

بررسی سرعت سقوط رسوبات چسبنده با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی

حسین صمدی بروجنی^۱ و مهدی نادری بلداجی^۲

^۱ - نویسنده مسئول، عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب (samadi153@yahoo.com)

^۲ - دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۳

چکیده

سرعت سقوط ذرات رسوب از جمله ویژگی‌هایی است که در مطالعات انتقال رسوب نقش مهمی دارد. در این تحقیق، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد آزمایش‌هایی در یک فلوم دایره‌ای با قطر بیرونی ۱/۹ متر انجام گرفت. رسوبات مورد استفاده، از نوع ریزدانه چسبنده از حوضه کارون شمالی برداشت شد. به منظور محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده در این تحقیق، از رابطه اصلاح شده کرون استفاده شد و برای تعیین پارامترهای این معادله، پروفیل سرعت و تنش برشی جریان و غلظت رسوبات معلق نسبت به زمان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد در غلظت‌های پائین با افزایش غلظت رسوب، سرعت سقوط هم افزایش می‌یابد ولی در غلظت‌های بالا این رابطه معکوس می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که علاوه بر غلظت رسوب، تنش برشی جریان نیز بر سرعت سقوط ذرات تأثیر قابل ملاحظه دارد. لذا براساس نتایج این تحقیق رابطه رگرسیون برای محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده ارائه شد.

کلید واژه‌ها: رسوبات چسبنده، فلوم دایره‌ای، سرعت سقوط، تنش برشی.

مقدمه

یکی از مهمترین خصوصیات توصیف کننده خواص رسوبات، سرعت سقوط آن‌ها می‌باشد. برای ذره در حال سقوط آزاد در آب می‌توان رابطه تعادل نیروها را نوشت که در شرایطی که نیروی مقاوم تنها به صورت اصطکاکی فرض گردد، نتیجه آن قانون استوکس خواهد بود. ولی این قانون صرفاً برای ذرات رسوب غیر چسبنده بسیار ریز صادق است و برای رسوبات چسبنده وضع به شکلی دیگر خواهد بود (فتحی مقدم و همکاران، ۲۰۰۹). رسوبات چسبنده به علت خاصیت چسبیده شدن ذرات به یکدیگر و تشکیل فلوک، از نظر اندازه، شکل و چگالی با ذرات رسوبی غیر چسبنده متفاوتند و در نتیجه، سرعت سقوط آن‌ها نیز به گونه‌ای دیگر خواهد بود. مایگنویت^۱ (۱۹۶۸) عنوان می‌کند که در مخلوط معلق دارای ذرات سیلت و نیز فلوک‌های تشکیل یافته از به هم چسبیدن آن‌ها، سرعت سقوط فلوک‌ها از ذرات مستقل بوده و در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۶ میلی‌متر برثانیه می‌باشد (به نقل از چین و وان^۲، ۱۹۹۸). کرون^۳ (۱۹۶۲) مطالعاتی را در فلوم انجام داد و دریافت که سرعت ته‌نشینی با غلظت رسوب افزایش می‌یابد و رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$w = KC_s^{4/3} \quad (1)$$

که در آن K یک ثابت تجربی با مقداری از حدود ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ و C_s و غلظت بر اساس کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

رفتار رسوبات چسبنده به دلیل خاصیت فلوکوله شدن آنها بسیار پیچیده است و کارهای تحقیقاتی زیادی در جهت شناخت و تبیین رفتار این نوع رسوبات انجام شده و یا در حال انجام است. با این حال هنوز بسیاری از رفتارهای رسوبات چسبنده در پرده ابهام قرار دارد و قوانین محکمی برای تبیین و تفسیر رفتار آنها به وجود نیامده است. سرعت سقوط ذرات رسوب از جمله ویژگی‌هایی است که در مطالعات انتقال رسوب نقش مهمی دارد. معمولاً ذرات بزرگتر نسبت به ذرات ریزتر با سرعت بیشتری ته‌نشین می‌شوند. در مخلوط‌های معلق با رسوبات چسبنده، در حین سقوط ذرات، دو پدیده مشاهده می‌شود: اول ته‌نشینی با تأخیر و کاهش سرعت سقوط ذره ناشی از غلظت مخلوط معلق و دوم مسئله به هم چسبیدن ذرات چسبنده در حین سقوط و تشکیل فلوک‌های بزرگتر، که این امر باعث می‌شود ته‌نشینی رسوبات با سرعت سقوط بیشتری انجام شود (به نقل از صمدی بروجنی، ۲۰۰۴). خصوصیات ساختمانی (اندازه، چگالی و شکل) فلوک‌های حاصل از به هم چسبیدن ذرات، سرعت ته‌نشینی را مشخص می‌کند. نیروهایی که بر این فرآیند تأثیر می‌گذارند، عمدتاً حرکت براونی، تنش برشی، آشفتگی جریان، نیروی نقل و نیروهای الکتروشمیایی می‌باشند. مک‌آنلی و مهتا (۲۰۰۰)^۱، در مطالعات خود متوجه شدند در مخلوط آب و رسوبات چسبنده معلق، عمل فلوکوله شدن و شکستن فلوک‌ها همزمان رخ می‌دهد. این امر بر پیچیدگی موضوع می‌افزاید.

2. Mighiot
3. Chien and Wan
4. Krone

1. Mc Anally and Mehta

لو و کریش ناپان^۱ (۱۹۹۴)، سرعت سقوط ذرات چسبنده را با زمان مرتبط و متغیر دانسته و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$\bar{w}_i = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} w_i \cdot dt \quad (2)$$

که در آن \bar{w}_i ، سرعت متوسط سقوط فلوک در دسته i ام نسبت به زمان، t_1 و t_2 زمان‌های مورد نظر که با انتگرال‌گیری رابطه زیر را به دست آوردند:

$$\bar{w}_i = \frac{h}{t_2 - t_1} \ln \frac{C_{(t_1)}}{C_{(t_2)}} \quad (3)$$

که در آن C_{t_1} و C_{t_2} ، غلظت‌های مواد معلق در زمان‌های t_1 و t_2 و h ، عمق جریان می‌باشد.

تورن^۲ (۱۹۸۱) نشان داد که در غلظت‌های پایین، سرعت ته‌نشینی، با غلظت افزایش می‌یابد، سپس به یک مقدار حداکثر رسیده و بعد از آن در غلظت‌های متوسط به دلیل ممانعت از ته‌نشینی (ممانعت از ته‌نشینی توسط ذرات دیگر، به خاطر برخوردهای به وجود آمده) و نیز به خاطر به وجود آمدن ساختمان‌های فلوکوله‌شده در غلظت‌های بالا، کاهش می‌یابد.

نیکالسن و اوکانر^۳ (۱۹۸۶)، روابط زیر را برای محاسبه سرعت ته‌نشینی و برای تأثیر دادن تمامی عوامل مذکور استفاده کردند (هوانگ و همکاران^۴، ۲۰۰۶):

$$w = A_1 C_s^{B_1} \quad \text{for } C_s \leq C_H \quad (4)$$

$$w = A_1 C_H^{B_1} [0.1 - A_2 (C_s - C_H)]^{B_2} \quad \text{for } C_s > C_H \quad (5)$$

که در آنها C_H غلظت آستانه ممانعت از ته‌نشینی ذرات توسط یکدیگر است که برابر ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد. ضرایب این معادله‌ها به تجربه و براساس نوع رسوب و شوری تعیین می‌شود و بر این اساس، مقادیر اولیه آنها به صورت زیر ارائه شده است:

$$A_1 = 6 \times 10^{-4} m^{4/3} / kg / s$$

$$A_2 = 1 \times 10^{-2} m^{3/2} / kg \quad B_1 = 1.0, B_2 = 5.0$$

بوربان و همکاران^۵ (۱۹۹۰) از روی اطلاعات آزمایشگاهی سرعت ته‌نشینی را به شکل زیر به قطر متوسط توده ذرات مرتبط کردند:

$$w = ad_m^b \quad (6)$$

$$b = -[0.8 + 0.5 \log(C_s \tau - B_2)] \quad (7)$$

$$a = B_1 (C_s \tau)^{-0.85} \quad (8)$$

که در آن τ تنش برشی جریان بر حسب دین بر سانتی‌متر مربع، d_m قطر متوسط توده ذرات براساس سانتی‌متر، B_1 و B_2 ثابت‌های تجربی به ترتیب برابر 0.000075 و 0.000096 می‌باشد.

گایلانی و همکاران^۶ (۱۹۹۱)، براساس آزمایش، معادله‌ای برای تعیین قطرهای متوسط فلوک‌ها بدین شکل ارائه نمودند:

$$d_m = \left(\frac{\alpha_0}{C_s \tau} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

که در آن α_0 ثابت تجربی که در آب غیرشور برابر ۱۰-۸ می‌باشد. زمانی که تنش برشی کف، کمتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی است و یا زمانی که سرعت برشی جریان بیشتر از حد بحرانی باشد، ته‌نشینی اتفاق خواهد افتاد. فقط توده‌های شکل‌گرفته که دارای نیروی کافی جهت مقاومت در مقابل تنش‌های فوق‌العاده قوی در منطقه نزدیک بستر هستند، ته‌نشین شده و به بستر خواهند چسبید. طبق بررسی‌های هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) به طور کلی ته‌نشینی را می‌توان به دو شکل ته‌نشینی کامل و ته‌نشینی جزئی در نظر گرفت. زمانی که تنش برشی بستر کوچکتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل است، در نهایت تمامی ذرات رسوب و توده‌های حاصل از به هم چسبیدن آنها، ته‌نشین می‌شوند. فرمول نرخ ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) بدین شکل می‌باشد:

$$Q_d = P_d w C \quad \text{for } \tau \leq \tau_{d,full} \quad (10)$$

که در آن Q_d نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده بر حسب کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه، w سرعت ته‌نشینی ذره بر حسب متر برثانیه، C غلظت رسوب معلق بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و P_d احتمال ته‌نشینی (در واقع احتمال چسبیدن فلوک‌ها به بستر و دوباره به حرکت در نیامدن آنها در مقابل تنش‌های برشی وارده بر بستر)، τ تنش برشی بستر و $\tau_{d,full}$ تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل بر حسب نیوتون بر متر مربع می‌باشد که در زیر این تنش، تمام ذرات ته‌نشین می‌شوند. رابطه احتمال ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) بدین شکل می‌باشد:

1. Lau and Krishnappam
2. Thoren
3. Nicholson and Oconner
4. Huange et al.

5. Burban et al
6. Gaylani et al.

انجام گرفت که نتیجه در شکل (۱-الف) ارائه شده است. بر اساس این آزمایش مشخص شد نمونه رسوب از ۳۱ درصد رس، ۵۸ درصد سیلت و ۱۱ درصد ماسه تشکیل شده است. همچنین ضریب یکنواختی رسوب (C_u) برابر ۲/۹۵ و مقادیر D_{10} ، D_{16} ، D_{30} ، D_{60} و D_{84} به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۴۳، ۰/۰۰۰۰۷، ۰/۰۰۱۹، ۰/۰۱۳، و ۰/۰۴۳ میلی‌متر به دست آمد. همچنین به منظور مشخص کردن خاصیت چسبندگی رسوبات، آزمایش هیدرومتری بدون ماده جداکننده (کالگن) نیز انجام شد که در شکل (۱-ب) منحنی دانه بندی در دو حالت با و بدون کالگن نشان داده شده و اختلاف دو منحنی نشانگر وجود خاصیت فلوکوله شدن ذرات می‌باشد.

مشخصات فلوم آزمایشگاهی

فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق از نوع دایره‌ای (مدور) و واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد بود. شمای این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است. قطر خارجی این فلوم ۱/۹ متر و مقطع آن مستطیلی به عرض کف ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۷ متر می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها عمق جریان ۲۰ سانتی‌متر بود. جنس فلوم از ورق فولادی گالوانیزه است که بر روی شاسی دایره‌ای از جنس فولاد نصب گردید و از طریق یک شافت عمودی و یک سیستم چرخ دنده و زنجیر به یک گیربکس (با نسبت دور خروجی به ورودی برابر ۱ به ۳۰) و یک موتور الکتریکی سه فاز ۱/۵ کیلوواتی و حداکثر سرعت زاویه‌ای ۱۴۰۰ دور بر دقیقه متصل می‌باشد. همچنین در قسمت بالا یک رینگ افقی متصل به یک موتور الکتریکی سه فاز، با توان ۰/۳۷ کیلووات و حداکثر سرعت زاویه‌ای ۱۳۴۰ دور بر دقیقه برای ایجاد جریان نصب گردید. هر یک از این دو موتور به طور جداگانه مجهز به دستگاه اینورتر تنظیم کننده دور موتور بودند تا سرعت چرخش فلوم از صفر تا ۳۵/۵ دور بر دقیقه و سرعت چرخش رینگ بالا از صفر تا حداکثر ۴۷ دور بر دقیقه قابل تنظیم باشد. برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب نیز ۱۶ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار ردیف و در ارتفاع‌های ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی‌متر، تعبیه شد.

اندازه‌گیری پارامترها

در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری پارامترهای سرعت و تنش برشی، از دستگاه سرعت سنج ADV مدل Vectrino+، ساخت شرکت Nortek نروژ استفاده شد. برای اندازه‌گیری غلظت نیز از روش خشک کردن و توزین استفاده شد و در این ارتباط نمونه‌های رسوب از طریق شیرهای نمونه‌گیر فلوم گرفته می‌شد.

مراحل انجام کار

در ابتدای کار برای مشخص کردن پارامترهای هیدرولیکی جریان در دوره‌های مختلف فلوم، آزمایش‌هایی در دوره‌های مختلف چرخش فلوم انجام گرفت و در هر آزمایش، پروفیل سرعت و تنش برشی جریان (در بستر) با استفاده از دستگاه سرعت سنج ADV اندازه‌گیری شد تا بر این اساس

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,full}} \quad (11)$$

آزمایش‌های زیادی انجام شده تا مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته‌نشینی کامل معین کند. در این آزمایش‌ها، اعدادی بین ۰/۰۶ تا ۱/۱ نیوتن بر مترمربع بر اساس نوع رسوب و غلظت آن به دست آمده است. ته‌نشینی جزئی (ته‌نشینی، کامل نیست)، هنگامی اتفاق خواهد افتاد که تنش برشی کف از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل بزرگتر بوده ولی از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی جزئی ($\tau_{d,part}$)، کوچکتر است. در این محدوده از تنش‌های برشی، ذرات توده شده نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های نسبتاً ضعیف در مخلوط سوسپانسیون باقی می‌مانند. فرمول نرخ ته‌نشینی جزئی بدین شکل می‌باشد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶):

$$Q_d = P_d w(C - C_{eq}) \tau_{d,full} \langle \tau_{d,part} \rangle \quad (12)$$

در صورتی که با انجام آزمایش‌هایی بتوان پارامترهای معادله (۱۰) را اندازه‌گیری یا تعیین نمود، می‌توان سرعت سقوط ذرات را از همین معادله محاسبه کرد. در این تحقیق نیز از همین روش استفاده شده و با انجام آزمایش‌هایی در یک فلوم دوار مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، سعی شده سرعت سقوط ذرات تعیین و نتیجه حاصله با روش‌ها و روابط موجود مقایسه شود. استفاده از فلوم دایره‌ای برای مطالعات رسوبات چسبنده به دلیل مزایای آن نسبت به فلوم‌های مستقیم که دارای سیستم دوباره به چرخش در آورنده جریان به وسیله پمپ هستند، از سال ۱۹۶۶ به وسیله پارتیاداس^۱ متداول شده است. این جایگزینی تضمین خواهد کرد که ذرات به هم چسبیده رسوبات چسبنده، به وسیله عامل خارجی یعنی پمپ از هم جدا نخواهند شد و تنها تنش برشی جریان بر آن اثر خواهد گذاشت. مزیت دیگر این فلوم‌ها این است که از لحظه شروع حرکت، جریان به شکل کامل در تمام فلوم توسعه یافته و باعث توزیع یکنواخت تنش برشی در جهت جریان خواهد شد (کانترو و همکاران^۲، ۲۰۰۴). در کارهای پارتیاداس و همکاران (۱۹۶۶)، مهتا و پارتیاداس^۳ (۱۹۷۳) و کریش‌ناپان^۴ (۲۰۰۰)، از این نوع فلوم استفاده شده است.

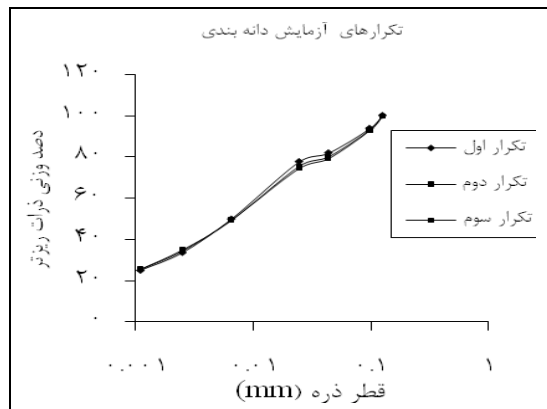
مواد و روش‌ها

رسوب مورد آزمایش

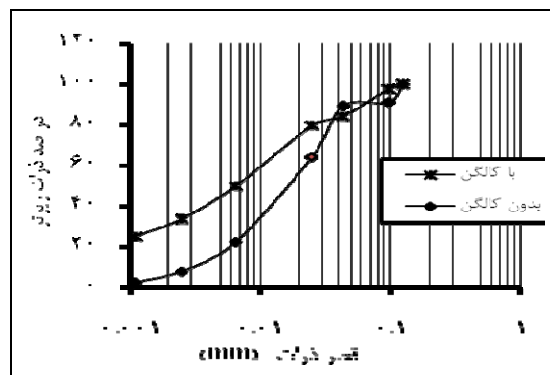
جهت انجام تحقیق حاضر، رسوبات از بستر مخزن سد خاکی گوهرباران واقع در دامنه ارتفاعات مشرف بر دشت چالشر در حومه شهرکرد (از زیرحوضه‌های کارون شمالی) برداشت گردید. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی رسوب، آزمایش هیدرومتری در سه تکرار

1. Partheniades
2. Cantro et al.
3. Mehta and Partheniades
4. Krishnappan

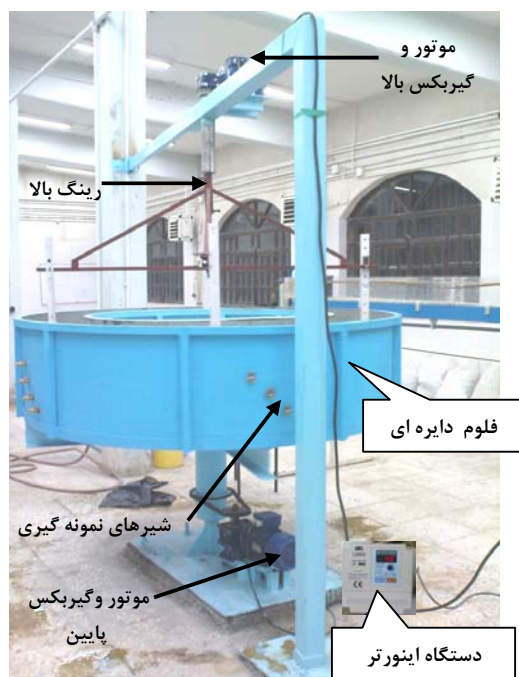
الف-۱



ب-۱



شکل ۱- نمودار دانه بندی رسوبات مورد آزمایش



شکل ۲- نمای کلی از سیستم فلوم دایره ای در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد

تحلیل این داده‌ها نشان داد که بین سرعت چرخش فلوم و پارامترهای هیدرولیکی همبستگی بالایی وجود دارد. این نتیجه با کارهای دیگران از جمله پارتاندیز و همکاران (۱۹۶۶)، مهتا و پارتاندیز (۱۹۷۳) و هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) هم‌خوانی دارد. بر این اساس رابطه زیر بین دور فلوم و پارامترهای هیدرولیکی جریان (سرعت متوسط و تنش برشی) روابط زیر به دست آمد:

$$\tau_o = 0.00071 \times (0.585^\omega) \times (\omega^{5.46}) \quad (13)$$

$$R^2 = 0.988$$

$$\bar{V} = 0.003255.\omega^2 + 0.03689.\omega \quad (14)$$

$$R^2 = 0.992$$

که در آن ω مجموع دور فلوم و رینگ بر حسب دور بر دقیقه (برای مقادیر بین صفر تا ۱۰ دور بر دقیقه) و \bar{V} متوسط سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه و τ_o تنش برشی جریان در بستر بر حسب نیوتن بر مترمربع می‌باشد. این روابط برای تنش برشی محدوده آزمایش‌ها (یعنی از ۰/۰۳ تا ۱ نیوتن بر مترمربع) و سرعت جریان کمتر از ۰/۷ متر بر ثانیه دارای دقت بالایی می‌باشد.

تغییرات غلظت رسوب معلق

همانگونه که گفته شد، در فواصل زمانی مشخص، از سه عمق مختلف نمونه برداری انجام گرفت و غلظت رسوب در این عمق‌ها با روش توزین در سه تکرار تعیین شد. متوسط عمقی غلظت رسوب معلق در هر آزمایش به صورت میانگین وزنی به دست آمد. نتیجه به صورت غلظت نسبی (نسبت غلظت هر آزمایش به غلظت اولیه آن) در نمودار شکل (۲) ارائه شده است. براساس این شکل می‌توان آزمایش‌ها را در سه گروه دسته‌بندی کرد. دسته اول آزمایش‌هایی هستند که غلظت نسبی آنها در انتهای زمان آزمایش به صفر نزدیک شده است. در این آزمایش‌ها تنش برشی جریان نتوانسته فلوک‌ها را شکسته و مانع از ته‌نشینی آنها شود. دسته دوم مواردی هستند که تنش برشی بستر جریان زیاد بوده و مقادیر غلظت نسبی در انتهای آزمایش در حدود رقم یک (یعنی همان غلظت اولیه آزمایش) باقی مانده است. در این آزمایش‌ها، تنش برشی بستر آنقدر زیاد بوده که مانع از ته‌نشینی شده است. دسته آخر مواردی هستند که غلظت نسبی با گذشت زمان ابتدا کاهش یافته ولی در ادامه آزمایش، غلظت نسبی دچار نوسان شده است. این بدان معناست که جریان و بستر به یک تعادل رسیده‌اند و بین ته‌نشینی و فرسایش فلوک‌ها در بستر یک تعادل به وجود آمده و به همین دلیل روند کاهش مستمر غلظت قطع شده است. این موارد در تحقیق حاضر از این جهت که تنش برشی بحرانی ته‌نشینی را به دست می‌دهند از اهمیت بیشتری برخوردارند. لذا در جدول (۲) لیست آزمایش‌های این گروه ارائه شده و مقدار غلظت در حالت تعادل و زمان مشاهده نوسان در غلظت نیز ذکر شده است.

بتوان رابطه بین سرعت چرخش فلوم و مشخصات هیدرولیکی جریان (سرعت و تنش برشی) را به دست آورد و از این روابط برای آزمایش‌های مختلف استفاده نمود. این اندازه‌گیری‌ها در سه عمق مختلف (در ارتفاع‌های ۵/۵، ۹ و ۱۱ سانتی‌متر از بستر) انجام گرفت و برای محاسبه سرعت متوسط از روش میانگین وزنی استفاده شد. در مرحله بعدی، مخلوط آب و رسوب با غلظت اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در فلوم ریخته شد. برای کاملاً مخلوط شدن آب و رسوب و این‌که تمام فلوک‌های تشکیل شده، خرد شوند و قبل از شروع آزمایش یک مخلوط همگن آب و رسوب بدون وجود فلوک بدست آید، فلوم و رینگ بالائی، با سرعت زیاد (فلوم با سرعت ۱۳/۵۲ دور بر دقیقه معادل ۱/۱۳ متر بر ثانیه و رینگ بالا با سرعت ۱۶/۶۲ دور بر دقیقه معادل ۱/۳۹ متر بر ثانیه در جهت مخالف هم) چرخانده شد. این باعث شد جمع قدر مطلق سرعت فلوم و رینگ بالا برابر ۲/۵ متر بر ثانیه باشد که در این حالت، تنش برشی بستر در حدود ۴/۲۵ نیوتن بر متر مربع ایجاد گردید. با توجه به بررسی‌های کرون (۱۹۶۲) که مشخص نمود در تنش برشی ۲/۲ نیوتن بر مترمربع، هیچ فلوکی در مقابل تنش برشی جریان مقاومت نمی‌کند، می‌توان اطمینان داشت که سرعت چرخش فلوم در ابتدای آزمایش‌ها در این تحقیق در جهت اطمینان بوده است. شایان ذکر است طبق نظر مهتا و پارتاندیز (۱۹۷۳) زمان چرخاندن دستگاه در ابتدای آزمایش برای خرد شدن کامل فلوک‌ها، دو ساعت در نظر گرفته شد.

پس از اتمام این زمان، مخلوط همگن آب و رسوب بدون وجود هیچ فلوکی به دست آمد. لذا براساس برنامه آزمایش‌ها با تنظیم دور فلوم و رینگ در حد مورد نظر، آزمایش اصلی شروع شده و هر آزمایش تا ۱۸۰ دقیقه ادامه یافت و در فواصل زمانی مختلف اقدام به نمونه برداری رسوب گردید. این زمان نیز با توجه به تجربه مهتا و پارتاندیز (۱۹۷۳) انتخاب گردید. البته در آزمایش‌هایی که غلظت رسوب به یک حد تعادلی رسید، کفایت این مدت زمان را تأیید کرد. لذا در این تحقیق آزمایش‌ها برای پنج سرعت و سه غلظت انجام گرفت که در جدول (۱) نام آزمایش‌ها و شرایط غلظت و سرعت آن‌ها ذکر شده است. در جدول مذکور ω مجموع دور رینگ بالا و فلوم می‌باشد.

در هر آزمایش، نمونه‌گیری از غلظت مواد معلق به ترتیب در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه صورت گرفت. بدین ترتیب که جهت نمونه‌گیری در هر زمان و هر عمق، یک ظرف آزمایش در نظر گرفته شد. در زمان نمونه‌گیری از عمق مورد نظر، از سه عدد شیری که در آن عمق هستند به مدت مساوی، درون ظرف در نظر گرفته شده نمونه‌گیری به عمل آمد. غلظت نمونه‌ها با روش خشک و وزن کردن اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

مشخصات هیدرولیکی جریان

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت جریان، تنش برشی، عدد فرود و عدد رینولدز تعیین و نتیجه در جدول (۲) ارائه شده است.

نرخ ته‌نشینی رسوبات

یکی از متغیرهای معادله کرون، نرخ ته‌نشینی است و با توجه به اینکه هدف از این تحقیق محاسبه سرعت سقوط رسوبات از این معادله است، بایستی این پارامتر تعیین شود. با توجه به مفهوم نرخ ته‌نشینی رسوبات، می‌توان با استفاده از رابطه تحلیلی زیر، این پارامتر را تعیین نمود:

$$Q_d = 1000 \times \frac{(C_2 - C_1) \times V_f}{(t_2 - t_1) \cdot A} \quad (15)$$

که در آن Q_d نرخ ته‌نشینی بر حسب گرم بر مترمربع بر دقیقه، C_1 و C_2 به ترتیب غلظت‌های ابتدا و انتهای بازه زمانی بین دو اندازه‌گیری بر حسب گرم بر لیتر، V_f حجم مخلوط آب و رسوب معلق درون فلوم بر حسب متر مکعب و t_1 و t_2 زمان‌های نمونه‌گیری ابتدا و انتهای بازه زمانی موردنظر بر حسب دقیقه و A سطح بستر فلوم بر حسب

متر مربع است که برابر حاصلضرب عرض فلوم در محیط فلوم (مربوط به شعاع مرکزی فلوم) می‌باشد.

تنش برشی بحرانی ته‌نشینی

پارامتر دیگر در معادله کرون (۱۹۶۲) تنش برشی بحرانی است. اگر تنش برشی جریان در مجاورت بستر از مقدار تنش برشی بحرانی ته‌نشینی جزئی بیشتر شود، ته‌نشینی اتفاق نیفتاده و نرخ خالص ته‌نشینی برابر صفر خواهد بود. برای تعیین تنش برشی بحرانی ته‌نشینی، شکل (۴) که نشان دهنده رابطه بین نسبت تنش برشی بستر و غلظت رسوبات ته‌نشین شده به غلظت اولیه آزمایش است، تهیه شد. با ترسیم بهترین خط از نقاط، محل تلاقی خط و محور افقی به عنوان تنش برشی بحرانی آستانه ته‌نشینی در نظر گرفته شد. براین اساس تنش برشی آستانه ته‌نشینی در آزمایش‌های با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، به ترتیب برابر ۰/۸۲۷، ۰/۹۳۸ و ۰/۹۸ نیوتن بر متر مربع به دست آمد. با استفاده از این نتیجه می‌توان احتمال ته‌نشینی را از رابطه (۱۱) بدست آورد.

جدول ۱- نام و مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق

آزمایش‌های با غلظت اولیه ۲۰ گرم بر لیتر			آزمایش‌های با غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر			آزمایش‌های با غلظت اولیه ۵ گرم بر لیتر		
نام آزمایش	ω (rpm)	\bar{v} (m/s)	نام آزمایش	ω (rpm)	\bar{v} (m/s)	نام آزمایش	ω (rpm)	\bar{v} (m/s)
C20-V1	۱/۹۸۷	۰/۱۶۷	C10-V1	۱/۹۸۷	۰/۱۶۷	C5-V1	۱/۹۸۷	۰/۱۶۷
C20-V2	۴/۲۹	۰/۳۶	C10-V2	۴/۲۹	۰/۳۶	C5-V2	۴/۲۹	۰/۳۶
C20-V3	۵/۳۱	۰/۴۴۵	C10-V3	۵/۳۱	۰/۴۴۵	C5-V3	۵/۳۱	۰/۴۴۵
C20-V4	۷/۰۴	۰/۵۹	C10-V4	۷/۰۴	۰/۵۹	C5-V4	۷/۰۴	۰/۵۹
C20-V5	۹/۱۷۸	۰/۷۶۹	C10-V5	۹/۱۷۸	۰/۷۶۹	C5-V5	۹/۱۷۸	۰/۷۶۹

جدول ۲- محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده با استفاده از رابطه کرون برای آزمایش‌های به تعادل رسیده

نام آزمایش	C_o (گرم بر لیتر)	C_{eq} (گرم بر لیتر)	غلظت متوسط (گرم بر لیتر)	تنش برشی بستر (نیوتن بر مترمربع)	Q_d^* (گرم بر متر مربع بر دقیقه)	** متوسط سرعت سقوط فلوک‌ها (میلی متر بر ثانیه)
V2-C5	۵	۱/۸۴	۳/۴۲	۰/۴۴۹	۱۰/۵۳	۰/۱۵۵
V3-C5	۵	۴/۳۹	۴/۷	۰/۶۳۲	۳/۰۴	۰/۲۷۹
C5 - V4	۵	۴/۵۸	۴/۷۹	۰/۷۱۷	۳/۰۶	۱/۸۳
V3-C10	۱۰	۵/۱۸	۷/۵۹	۰/۶۳۲	۲۰/۹۶	۰/۲۲۵
V4-C10	۱۰	۷/۵۲	۸/۷۶	۰/۷۱۷	۱۵/۷۴	۰/۹
V3-C20	۲۰	۱۰/۶۹	۱۵/۳۵	۰/۶۳۲	۵۶/۹۴	۰/۳۱
V4 - C20	۲۰	۱۶/۵	۱۸/۲۵	۰/۷۱۷	۲۳/۸۸	۰/۸۴۷
V5 - C20	۲۰	۱۷/۹۱	۱۸/۹۶	۰/۹۳۸	۷/۱۷	۲/۶۷

*: نرخ متوسط ته‌نشینی در طول بازه زمانی قبل از وقوع حالت تعادلی
 **: سرعت سقوط محاسبه شده بر اساس رابطه اصلاح شده کرون (۱۹۶۲)

محاسبه سرعت سقوط

حال که پارامترهای معادله (۱۰) به دست آمد می‌توان تنها مجهول معادله که همان سرعت سقوط ذرات رسوب است را محاسبه کرد. برای آزمایش‌هایی که به تعادل رسیده‌اند، نتیجه محاسبات سرعت سقوط با استفاده از رابطه کرون (یعنی معادله ۱۰)، در جدول (۲) ارائه شده است. در شکل (۵) نیز سرعت سقوط این آزمایش‌ها در مقابل غلظت متوسط ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهند در آزمایش‌های با غلظت اولیه یکسان ولی تنش برشی متفاوت، مقادیر سرعت سقوط اختلاف زیادی با هم دارند. اگرچه برخی محققین معتقدند بین سرعت سقوط رسوبات چسبنده و غلظت معلق رابطه نمائی حاکم است ولی نتایج به دست آمده از رابطه کرون این موضوع را تأیید نمی‌کند. البته برخی نتایج تحقیقات دیگران (به نقل از چین و وان، ۱۹۹۸) نشان می‌دهد در غلظت‌های پائین با افزایش غلظت رسوب، سرعت سقوط هم افزایش می‌یابد ولی در غلظت‌های بالا این رابطه معکوس می‌شود. از طرف دیگر در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که یک رابطه رگرسیون مشخص بین سرعت سقوط رسوبات چسبنده و غلظت معلق به دست نمی‌آید. این به آن معنی است که سرعت سقوط رسوبات چسبنده علاوه بر غلظت رسوب معلق، به پارامترهای دیگری هم وابسته است. با بررسی بیشتر نتایج مشخص می‌شود با افزایش تنش برشی جریان، سرعت سقوط ذرات نیز بیشتر شده است و این به آن معنی است که در محاسبه سرعت سقوط

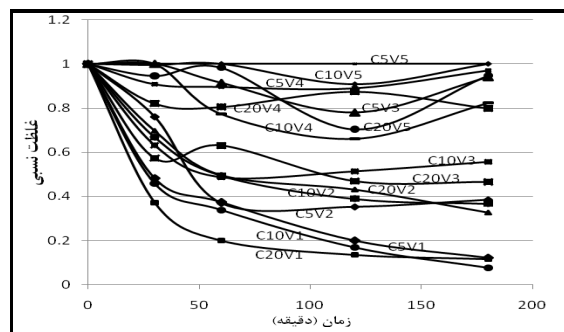
رسوبات چسبنده می‌بایست علاوه بر غلظت مواد معلق، تنش برشی جریان را نیز در نظر گرفت. علت آن می‌تواند به مسئله فلوکوله شدن ذرات مربوط شود. چرا که تنش برشی جریان در حد پائینی بوده است. البته در صورتی که تنش برشی جریان افزایش یابد، اجازه تشکیل فلوک‌ها به ذرات رسوب داده نمی‌شود و در این حالت انتظار می‌رود با افزایش تنش برشی جریان، سرعت سقوط ذرات کاهش یابد.

تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان داد سرعت سقوط فلوک‌ها با غلظت رسوب و تنش برشی جریان رابطه مناسب دارد. این رابطه به صورت زیر با ضریب تعیین $R^2 = 0.72$ به دست آمد:

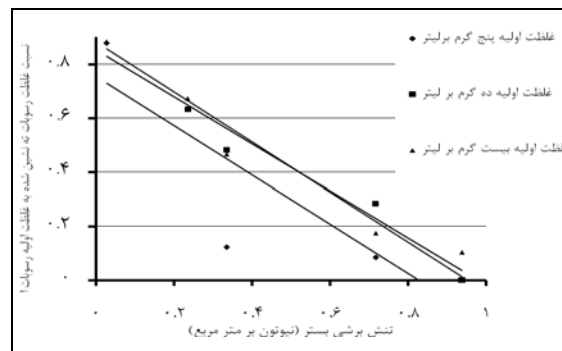
$$w = 0.407 \times \tau^{3.277} \times C^{-0.238} \quad (16)$$

که در آن τ تنش برشی جریان در بستر، C غلظت رسوب معلق برحسب گرم بر لیتر و w سرعت سقوط رسوب (به صورت فلوک) برحسب میلی‌متر بر ثانیه است.

ملاحظه می‌شود رابطه سرعت سقوط و غلظت معکوس بوده ولی این رابطه برای تنش برشی جریان مستقیم می‌باشد. ضمن آنکه تأثیرگذاری تنش برشی جریان بر سرعت سقوط در مقایسه با غلظت بیشتر است.



شکل ۳- تغییرات زمانی غلظت رسوب معلق در آزمایش‌های انجام گرفته



شکل ۴- تغییرات غلظت نسبی رسوبات ته نشین شده با تنش برشی بستر

نتایج نشان می‌دهد الگوی نوسان مقادیر سرعت سقوط نسبت به غلظت متوسط که در این تحقیق از طریق رابطه اصلاح شده کرون (۱۹۶۲) محاسبه شده است با مقادیر محاسبه شده از رابطه بوربان و همکاران (۱۹۹۰) هماهنگ است. اما الگوی تغییرات مقادیر به دست آمده از طریق رابطه لو و کریش‌ناپان (۱۹۹۴) کاملاً بر عکس مقادیر مربوط به این تحقیق است. در رابطه لو و کریش‌ناپان (۱۹۹۴) فقط از تغییرات غلظت رسوبات چسبنده معلق استفاده شده ولی در رابطه بوربان و همکاران (۱۹۹۰)، از تنش برشی جریان و غلظت رسوبات معلق هر دو استفاده شده است. به نظر می‌رسد در خصوص سرعت سقوط رسوبات چسبنده مورد استفاده در تحقیق حاضر باید رابطه‌ای با خصوصیات رابطه بوربان و همکاران (۱۹۹۰) توسعه داده شود.

بر اساس تحقیقات مایگنویت (۱۹۶۸)، سرعت سقوط فلوک‌ها می‌تواند در فاصله ۰/۱۵ تا ۰/۶ میلی متر بر ثانیه باشد. در بین سرعت‌های سقوط محاسبه شده برای هشت آزمایشی که به حالت تعادل رسیده و در جدول (۳) ذکر شده‌اند، سرعت‌های سقوط به دست آمده در آزمایش‌های C5-V2، C5-V3، C10-V3 و C20-V3 در این محدوده قرار می‌گیرند.

در حالتی که تنها از غلظت رسوب (برحسب گرم بر لیتر) یا تنش برشی (برحسب نیوتن بر مترمربع) به عنوان متغیر مستقل استفاده شود روابط زیر برای محاسبه سرعت سقوط (برحسب میلی‌متر بر ثانیه) به دست می‌آید:

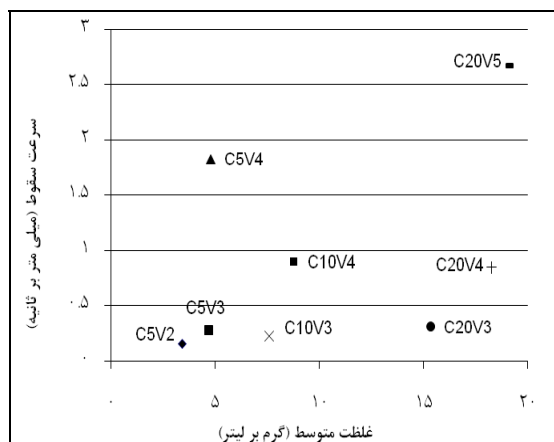
$$w = 0.065 \times C^{1.015}, R^2 = 0.67 \quad (17)$$

$$w = 3.395 \times \tau^{4.404}, R^2 = 0.76 \quad (18)$$

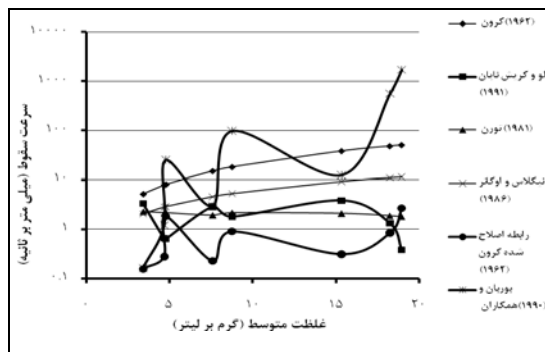
ملاحظه می‌شود نمای معادله برای تنش برشی نسبت به غلظت رسوب بیشتر به دست آمد که این نتیجه با آنچه در رابطه (۱۶) ارائه شد هماهنگی دارد.

مقایسه با کارهای دیگران

به منظور مقایسه نتیجه این تحقیق با کارهای دیگران، سرعت سقوط رسوبات مورد مطالعه با کاربرد روش‌های مختلف محاسبه گردید و نتیجه در جدول (۳) ارائه گردید و بر این اساس شکل (۶) تهیه شد.



شکل ۵- سرعت سقوط آزمایش‌های به تعادل رسیده در مقابل غلظت متوسط



شکل ۶- سرعت سقوط بر اساس غلظت متوسط از روابط مختلف

نتیجه گیری

برخلاف نظر برخی محققین دیگر که سرعت سقوط رسوبات چسبنده را تنها بر حسب غلظت رسوب به دست آورده‌اند نتایج این تحقیق نشان داد که فاکتورهای دیگری از جمله تنش برشی نیز بر سرعت سقوط ذرات تأثیر قابل ملاحظه دارد. در این ارتباط با استفاده از تکنیک رگرسیون چند متغیره، رابطه‌ای برای محاسبه سرعت سقوط بر حسب غلظت رسوب و تنش برشی به دست آمد. بر این اساس با افزایش تنش برشی جریان، سرعت سقوط ذرات نیز بیشتر شده که علت آن می‌تواند به مسئله فلوکوله شدن ذرات مربوط شود. چرا که تنش برشی جریان در حد پائینی بوده است.

همچنین نتایج نشان داد در غلظت‌های پائین با افزایش غلظت رسوب، سرعت سقوط هم افزایش یافت ولی در غلظت‌های بالا این رابطه معکوس شد. این نتیجه با نتایج تحقیقات برخی محققین (به نقل از چین و وان، ۱۹۹۸؛ یو، ۲۰۰۴) همخوانی داشت.

مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای دیگران نشان داد الگوی نوسان مقادیر سرعت سقوط نسبت به غلظت متوسط که در این تحقیق از طریق رابطه اصلاح شده کرون (۱۹۶۲) محاسبه گردید با مقادیر محاسبه شده از رابطه بوربان و همکاران (۱۹۹۰) هماهنگ است اما الگوی تغییرات مقادیر به

دست آمده از طریق رابطه لو و کریشناپان (۱۹۹۱)، کاملاً بر عکس مقادیر مربوط به این تحقیق است. این دوگانگی به پیچیدگی زیاد رفتار رسوبات چسبنده مربوط می‌شود. همچنین به منظور مقایسه بهتر بین سرعت سقوط محاسبه شده از روش‌های مختلف و سرعت سقوط به دست آمده در تحقیق حاضر، روابط رگرسیون بین این نتایج به دست آمده نتیجه در جدول (۴) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود ضمن آنکه ضریب تعیین هیچ یک از این روابط مناسب نیست، عرض از مبدأ و ضریب معادله نیز نسبت به خط آرمانی (که می‌باید به ترتیب ۰ و ۱ باشد) در سطح ۱۰ درصد اختلاف معنی‌دار داشته و نشان می‌دهد که نتایج روش‌های مختلف جواب‌های متفاوتی برای محاسبه سرعت سقوط به دست می‌دهند که این امر عمدتاً به خاصیت فلوکوله شدن ذرات ریزدانه چسبنده و پیچیده بودن رفتار اینگونه رسوبات مربوط می‌شود. لذا انجام تحقیق‌های بیشتر در این زمینه توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد که هزینه‌های انجام این تحقیق را فراهم نمودند، سپاسگزاری می‌شود.

جدول ۳- سرعت سقوط محاسبه شده از روش‌های مختلف (میلی متر بر ثانیه)

نام آزمایش	تحقیق * حاضر	کرون (۱۹۶۲)	تورن (۱۹۸۱)	نیکلاس و اوکانر (۱۹۸۶)	لو و کریشناپان (۱۹۹۱)	بوربان و همکاران (۱۹۹۰)
V2-C5	۰/۱۵۵	۵/۱۵	۲/۳۹	۲/۰۵	۳/۳۳	۰/۱۶۲
V3-C5	۰/۳۷۹	۷/۸۶	۲/۱۸	۲/۸۲	۰/۶۵	۱/۲
C5 - V4	۱/۸۳	۸/۰۷	۲/۱۷	۲/۸۷	۰/۶۴	۲۵/۱۲
V3-C10	۰/۲۲۵	۱۴/۹۲	۱/۹۴	۴/۵۶	۲/۸۶	۳
V4-C10	۰/۹	۱۸/۰۶	۲/۱۶	۵/۲۶	۱/۸۱	۹۷/۱
V3-C20	۰/۳۱	۳۸/۱۳	۲/۱	۹/۲۱	۳/۸۳	۱۲/۴۷
V4 - C20	۰/۸۴۷	۴۸/۰۴	۱/۸۹	۱۰/۹۴	۱/۳۱	۵۵۸/۹۷
V5 - C20	۲/۶۷	۵۰/۵۴	۱/۸۱	۱۱/۳۷	۰/۳۸	۱۷۰۷/۶۶

جدول ۴- رابطه آماری روش‌های مختلف بر آورد سرعت سقوط بر حسب سرعت سقوط به دست آمده در تحقیق حاضر

R ²	معادله رگرسیون	شرح
0.1961	$y = 9.1816x + 15.564$	بوربان و همکاران (۱۹۹۰) نسبت به تحقیق حاضر
0.2395	$y = -0.0905x + 2.1491$	لو و کریشناپان (۱۹۹۱) نسبت به تحقیق حاضر
0.1828	$y = 1.7973x + 4.5138$	نیکلاس و اوکانر (۱۹۸۶) نسبت به تحقیق حاضر
0.4861	$y = -1.028x + 2.7785$	تورن (۱۹۸۱) نسبت به تحقیق حاضر
0.6233	$y = 522.41x - 170.5$	کرون (۱۹۶۲) نسبت به تحقیق حاضر

منابع

1. Burban, P.Y., Xu, Y. U., Mc Neil, J. and W. Lick. 1990. Settling speeds of flocs in fresh water and seawater. *Journal of Geophysics Research*, 95 (10):18200-18213.
2. Cantero, M.; Mangini, S.; Pedocchi, F.; Niño, Y.; and García, M. 2004. Analysis of flow characteristics in an annular flume: Implications for erosion and deposition of cohesive sediments. *World Water and Environmental Resources Congress 2004*, Salt Lake City, Utah, USA.
3. Chien, N. and Z. Wan. 1998. *Mechanics of sediment transport* (1st ed.). ASCE Press, New York, U.S.A.
4. Fathi Moghadam, M., Arman, A. Samadi-Boroujeni, H. and S. Emamgholizadeh. 2009. Fall velocity of cohesive sediments in Dez dam reservoir. *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(1): 71-79.
5. Gailani J. Zeigler C.K. and Lick W. 1991. Transport of Suspended Solids in the Lower Fox River. *Journal of Great Lakes Research*.17 (4): 479-494.
6. Huang, J., Hilldate, R. C. and B. P. Greiman. 2006. *Erosion and sedimentation manual*. U.S. Department of the interior, Beaura of Reclamation.
7. Krishnappan, B. G. 2000. In situ size distribution of suspended particles the Fraser river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (8):561-569.
8. Krone, R. B. 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California. Berkeley California.
9. Lau, Y. L. and B. G. Krishnappan. 1994. Does reentrainment occur during cohesive sediment transport. *Journal of Hydraulic Research*, 19 (1): 28-42.
10. McAnally, W. H. and A. J. Mehta. 2000. Aggregation rate of fine sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 152-163.
11. Mehta, A. J. and E. Partheniades. 1973. Depositional behavior of cohesive sediments. Tech Report no. 16, University of Florida, Gainsville, Florida.
12. Migniot, C. 1968. A study of the physical properties of various forms of very fine sediments and their behavior under hydrodynamic action. *Comonunication Presente au Comite Technique de la Societe Hydrotechnique de France, La Houille Blanche*, 23(7):591-620.
13. Nicholson, J. and B. A. O'connor. 1986. Cohesive sediment transport model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112 (7): 621-640.
14. Partheniades, E., Kennedy, J. F., Etter, R. J. and R. P. Hoyer. 1966. Investigations of the depositional behavior of fine cohesive sediments in an annular rotating channel. *Hydrodynamics Lab Report No. 96*, MIT, Cambridge Massachusetts.
15. Samadi Boroujeni, H. 2004. Modeling of deposition and self weight consolidation of cohesive sediments. Ph. D Dissertation, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.
16. Thorn, M. F. C. 1981. Physical processes of siltation in tidal channels. *Proceedings of the Conference on Hydraulic Modeling Applied to Maritime Engineering Problems*, Institution of Civil Engineers, London, England, 47-55.
17. You, Z. J. 2004. The effect of suspended sediment concentration on the settling velocity of cohesive sediment in quiescent water. *Ocean Engineering Journal*, 31(16):1955-1965.