

# بررسی آزمایشگاهی سرعت سقوط رسوبات چسبنده با استفاده از فلوم دایره‌ای

میلاذ خواستار بروجنی<sup>۱</sup> و حسین صمدی بروجنی<sup>۲</sup>

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد [khastar1365@yahoo.com](mailto:khastar1365@yahoo.com)

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب

تاریخ پذیرش: ۹۱/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۱۰

## چکیده

تعیین سرعت سقوط رسوبات چسبنده به دلیل خاصیت چسبندگی و فرآیند فلوکوله شدن ذرات بسیار پیچیده است. به همین منظور فرآیند ته‌نشینی رسوبات ریزدانه در یک فلوم دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از سرعت سنج صوتی (ADV) تعیین شد. هدف از این تحقیق بررسی اصول ته‌نشینی ذرات رسوبی و ارزیابی پارامترهای نرخ و احتمال ته‌نشینی است که بر روی سرعت سقوط موثر می‌باشند. سرعت سقوط رسوبات چسبنده در تنش‌های برشی و غلظت‌های مختلف محاسبه و در ادامه با روش‌ها و روابط تجربی دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد جواب‌های به‌دست آمده این تحقیق بر اساس معادله اصلاح شده کرون با رابطه بوربان و همکاران دارای یک الگوی نوسان است و سرعت سقوط بر اساس رابطه لو و کریشناپان کاملاً برعکس مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق می‌باشد. در ادامه مشخص شد سرعت سقوط ذرات وابسته به مقدار تنش برشی و غلظت رسوبات معلق می‌باشد و بر این اساس رابطه‌ای برای سرعت سقوط رسوبات مورد استفاده ارائه شد.

کلید واژه‌ها: نرخ ته‌نشینی، تنش برشی بحرانی، فلوم دوار، سرعت سنج صوتی.

## Experimental Study on the Fall Velocity of Cohesive Sediments by Using Rotating Circular Flume

M. Khastar-Boroujeni<sup>1</sup> and H. Samadi- Boroujeni<sup>2</sup>

1- M. Sc. Student of Water Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, Shahrekord University and Head of Water Resources Research Center, Iran.

Received: 31 May 2012

Accepted: 16 Dec 2012

## Abstract

Determination of the fall velocity of cohesive sediment particles is very complex because of the adhesion properties of cohesive sediments and flocculation phenomenon. Therefore the deposition of fine sediments was investigated using an annular flume and in this work the hydraulic parameters was measured using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Based on the experimental results the fall velocity of cohesive sediment was determined for different shear stresses values and different concentrations based on some empirical equations. The obtained results showed that a good agreement was observed between the Krone's equation and Burban's relationship. The obtained result from Lou and Krishnappan's method was inversely comparison the aforementioned equation. Finally, the results showed that the fall velocity is depended on the flow shear stress as well as the sediment concentration.

**Key words:** Fall velocity, Critical shear stress, Circular Flume, Acoustic doppler velocimeter.

### مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در انتقال رسوبات چسبنده، تعیین سرعت سقوط توده‌های رسوبی می‌باشد. برای ذرات رسوبی غیرچسبنده 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 (بالداک و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴).

رفتار رسوبات چسبنده به دلیل خاصیت چسبندگی (فلوکوله شدن) بسیار پیچیده می‌باشد که کارهای تحقیقاتی زیادی در جهت شناخت و تبیین رفتار این نوع رسوبات انجام شده است. با این حال هنوز بسیاری از خصوصیات این رسوبات در پرده ابهام قرار دارد 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 این رفتار رسوبات چسبنده، تعیین مقادیر واقعی برخی پارامترها در محل امکان پذیر است و یا می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی استفاده کرد (جوزه و مدسن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳).

روش دیگری که برای تعیین سرعت سقوط مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام آزمایش‌های ته‌نشینی است. در این موارد سیال ساکن نبوده و عمل فلوکوله شدن و ته‌نشینی رسوبات چسبنده 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 نمی‌باشد. 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 چسبنده می‌شود (وینترورپ<sup>۳</sup>، ۲۰۰۶؛ و هوانگ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶). در مطالعه رسوبات چسبنده بیشتر محققین از طرح کانال‌های دایره‌ای استفاده کرده‌اند، لذا نتایج ارائه شده راجع به رسوبات چسبنده عمدتاً مربوط به کانال دایره‌ای است. استفاده از فلوم‌های دایره‌ای برای مطالعات رسوبات چسبنده به دلیل مزایای آن نسبت به فلوم‌های مستقیم از سال ۱۹۹۶ توسط پارتندیس 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 تنش‌برشی 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 تنش‌برشی در جهت جریان خواهد شد (پارتندیس<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹):  
 رابطه (۱) حالت اصلاح شده نرخ ته‌نشینی کرون<sup>۶</sup> (۱۹۶۲) می‌باشد که برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

$$Q_d = P_d \omega (c - c_{eq}) \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (1)$$

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}}, \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (2)$$

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

$$P_d = 0, \quad \text{for} \quad \tau \geq \tau_{d,part} \quad (3)$$

در روابط فوق،  $Q_d$ : نرخ ته‌نشینی،  $P_d$ : احتمال ته‌نشینی،  $\omega$ : سرعت سقوط توده‌های رسوبی،  $c_{eq}, c$ : به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی رسوبات،  $\tau$ : تنش برشی بستر،  $\tau_{d,part}$ : تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی جزئی و  $\tau_{d,full}$ : تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی کامل می‌باشد.

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

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

در این رابطه،  $\omega$ : 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.  
 تورن<sup>۷</sup> (۱۹۸۱) رابطه زیر را براساس غلظت رسوبات ارائه داد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶):

5- Partheniades  
 6- Krone  
 7- Thorn

1- Baldock et al.  
 2- Jose and Madsen  
 3- Winterwerp  
 4- Huang et al.

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

### مواد و روش‌ها

به منظور سنجش سرعت سقوط توده‌های رسوبی، آزمایش‌های تهنشینی در غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر رسوب و برای پنج تنش‌برشی ۰/۱۲، ۰/۲۰، ۰/۳۲، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ نیوتن بر متر مربع انجام شد. مدت هر آزمایش براساس آزمایش‌های اولیه و رسیدن به غلظت تعادلی، چهار ساعت انتخاب شد و بر اساس 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 ۰/۰۳۵ میلی‌متر بود. همچنین به منظور مشخص کردن خاصیت چسبندگی رسوبات، آزمایش هیدرومتری بدون ماده جداکننده (کالگن) نیز انجام شد که در نمودار شکل (۱) منحنی دانه‌بندی در دو حالت با و بدون کالگن نشان داده شده و اختلاف دو منحنی نشانگر وجود خاصیت فلوکوله شدن ذرات می‌باشد. براساس تحلیل تنش‌های برشی و معادله‌های مربوطه، مقدار تنش‌برشی آستانه تهنشینی رسوبات مورد استفاده، ۱/۰۱ نیوتن بر مترمربع و تنش‌برشی بحرانی تهنشینی کامل (تنش - برشی که ۹۹ درصد رسوبات در آن تهنشین شوند) ۰/۰۵۳ نیوتن بر مترمربع به‌دست آمد (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰).

### 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 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 تنش‌برشی 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) به‌دست آمد و

$$\begin{cases} \omega_S = 0.513C^{1.3} \\ \omega_S = 2.6 \times 10^{-3} \cdot (1 - 0.008C)^{4.65} \end{cases} \begin{cases} C \leq 3 \text{ (gr/lit)} \\ 3 < C < 10 \text{ (gr/lit)} \end{cases} \quad (5)$$

نیکلسون و اوکانر<sup>۱</sup> (۱۹۸۶) رابطه را زیر برای تعیین سرعت تهنشینی با ترکیب عوامل به‌دست آوردند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\omega = A_1 C_s^{B_1} \quad C_s \leq C_H \quad (6)$$

$$\omega = A_1 C_H^{B_1} [1.0 - A_2 (C_s - C_H)^{B_2}] \quad C_s > C_H \quad (7)$$

$C_H$ : ۲۵ گرم بر لیتر که غلظت اولیه برای جلوگیری از تهنشینی است.

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

بوربان و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۰) میزان سرعت تهنشینی را با قطر متوسط توده‌ی ( $d_m$ ) در ارتباط دانسته و با استفاده از داده‌های آزمایشی رابطه زیر را ارائه دادند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\omega = a d_m^b \quad (8)$$

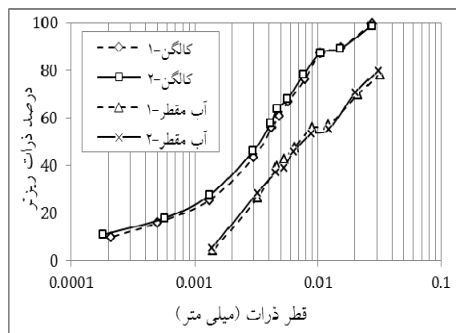
$$a = B_1 (C_s \tau)^{-0.85} \quad (9)$$

$$b = -[0.8 + 0.5 \log(C_s \tau - B_2)] \quad (10)$$

$$d_m = \left( \frac{\alpha_0}{C_s \tau} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$C_s$ : غلظت رسوبات چسبنده ( $\frac{gr}{cm^3}$ )،  $\tau$ : تنش‌برشی سیال ( $\frac{N}{m^2}$ )،  $d_m$ : متوسط قطر ذره توده‌ای (cm)،  $B_1, B_2$ : ضرایب آزمایشگاهی هستند که به ترتیب  $7/5 \times 10^{-6}$  و  $9/6 \times 10^{-6}$  می‌باشد.  $\alpha$ : ضریب آزمایشگاهی در آب شیرین برابر با  $10^{-8}$  می‌باشد. لو و کریشناپان<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) سرعت تهنشینی (سقوط) ذرات چسبنده را با با زمان متغیر دانسته و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

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



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی



شکل ۲- نمایی از اجزای فلوم دایره‌ای مورد استفاده

۱۳۹۰). کریشناپان و انگل<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) این نسبت را برای عمق ۱۲ سانتی‌متر فلوم دواری در کانادا ۱/۱۷ بدست آوردند. رابطه سرعت چرخش فلوم و تنش‌برشی، کالبره و معادله‌ای به صورت زیر تعیین شد:

$$\tau = 0.0256\omega^{1.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad (13)$$

در این رابطه  $\tau$  در این رابطه: تنش‌برشی متوسط جریان ( $\frac{N}{m^2}$ ) و  $\omega$ : مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه) است. هوکینگها و ما<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) نیز در تحقیقات خود، رابطه بین تنش-برشی و سرعت چرخش فلوم دوار را به صورت نمایی به‌دست آوردند.

### طراحی آزمایش‌ها

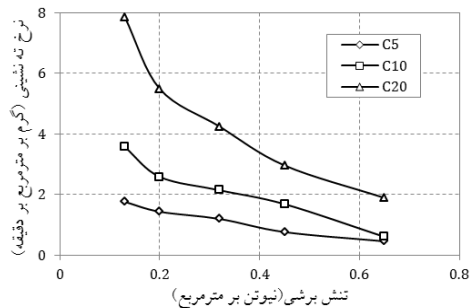
ترتیب آزمایش‌ها بدین گونه بود که ابتدا کم‌ترین غلظت رسوب (۵ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش‌ها برای پنج تنش‌برشی انجام شد. در این پژوهش روند اعمال تنش‌برشی از مقدار تنش کمتر به سمت تنش‌برشی بزرگ‌تر بود. در ادامه‌ی آزمایش‌ها با افزودن رسوب غلظت‌های بعدی (۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش‌ها به همین

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 (۱/۱، ۱/۱، ۱/۳، ۱/۱۰، ۱/۱۰) 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، به‌صورت وزنی محاسبه می‌شود. به منظور کار با این دستگاه از پایه‌ای سوار بر فلوم استفاده شد که علاوه بر حرکت سرعت سنج در عرض کانال، امکان جابه‌جایی عمودی و یا زاویه‌دار قرار گرفتن سرعت‌سنج را در فلوم فراهم می‌کند.

پروفیل سرعت و تنش‌برشی در فلوم دوار با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV) اندازه‌گیری، و مشخص شد زمانی که درپوش و فلوم در خلاف یکدیگر به حرکت درآیند و نسبت سرعت چرخش درپوش به سرعت چرخش فلوم ( $\frac{N_p}{N_f}$ ) ۱/۱ باشد، از چرخش‌های ثانویه کاسته شده و نتایج تنش‌برشی در عرض فلوم یکنواخت است. در این حالت پروفیل سرعت در فلوم‌های دوار به-صورت قابل قبولی مشابه کانال‌های باز می‌باشد و نتایج حاصل از فلوم دوار را می‌توان به کانال‌های باز تعمیم داد (خواستار بروجنی،

1- Krishnappanand Engel

2- H.K. Ha, J.P.-Y. Maa



شکل ۳- تغییرات نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی متفاوت در طول آزمایش

جدول ۱- احتمال ته‌نشینی توده‌های رسوبی در سطوح مختلف پساب، غلظت اولیه و تنش برشی بستر

تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)					غلظت (گرم بر لیتر)
۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۶۵	
۰/۸۷۱	۰/۸۱۰	۰/۶۹۵	۰/۶۷۱	۰/۳۸۱	۵
۰/۸۶۷	۰/۷۹۶	۰/۶۷۳	۰/۵۴۱	۰/۳۳۷	۱۰
۰/۸۶۳	۰/۷۸۹	۰/۶۶۳	۰/۵۲۶	۰/۳۱۶	۲۰

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

در رابطه فوق،  $Q_d$ : نرخ ته‌نشینی (گرم بر مترمربع بر دقیقه)،  $C_i$ : غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)،  $V$ : حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)،  $t_i$ : زمان (دقیقه) و  $A$ : مساحت بستر فلوم (مترمربع) می‌باشد.

قابل ذکر است که در محاسبه نرخ ته‌نشینی 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 اندازه‌گیری غلظت مورد نظر مرکز ثقل بازه زمانی مذکور باشد. به بیان دیگر بازه زمانی بین دو نمونه‌گیری به دو بخش مساوی تقسیم و هر کدام از این دو بخش به یکی از غلظت‌های موجود در ابتدا و انتهای بازه مذکور مرتبط شده است.

## نتایج و بحث

### نرخ ته‌نشینی

با استفاده از رابطه (۱۴) نرخ ته‌نشینی برای تمامی آزمایش‌ها در بازه (۲۴۰-۰ دقیقه) به‌دست آمد که در شکل (۳) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۳)، می‌توان اثر تنش برشی و غلظت اولیه رسوبات را در تغییرات نرخ ته‌نشینی مشاهده کرد. چنان‌که برای هر مقدار مشخصی از تنش برشی با افزایش غلظت رسوبات، افزایش تماس و

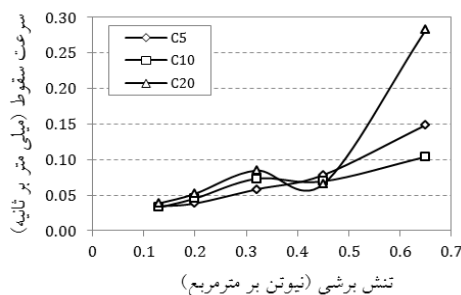
ترتیب ادامه یافت. نمونه‌گیری در ساعت اولیه هر ۱۵ دقیقه یکبار و در ادامه با فواصل ۳۰ دقیقه‌ای انجام شد. در هر زمان از چهار موقعیت مختلف و سه عمق، نمونه‌گیری به عمل آمد که در نهایت غلظت رسوبات معلق با توجه به منطقه تأثیر هر شیر به‌صورت وزنی و از روش توزین محاسبه شد. لازم به ذکر است که قبل از شروع آزمایش‌ها فلوم به منظور خرد شدن و مخلوط کامل توده‌های رسوبی به مدت ۳۰ دقیقه با بیشترین سرعت به چرخش در می‌آید که تنش برشی معادل، ۱۱/۲ نیوتن بر متر مربع ایجاد می‌کند. کریشناپان<sup>۱</sup> (۲۰۰۶)، هارلامپیدیس و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۳)، اسکافل و کریشناپان<sup>۳</sup> (۱۹۹۸) در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (حداکثر تنش برشی، ۰/۶ نیوتن بر متر مربع) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است.

برای محاسبه نرخ ته‌نشینی از رابطه (۱۴) استفاده شد. از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب ته‌نشینی مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط ته‌نشینی در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم به‌دست می‌آید:

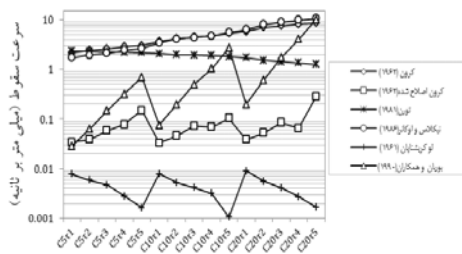
1- Krishnappan  
2- Haralampides et al.  
3- Skafel and Krishnappan

در تنش‌های برشی کوچک، بیشتر می‌باشد که این امر حاکی از نقش مضاعف تنش‌برشی در ساختار و آرایش توده‌های

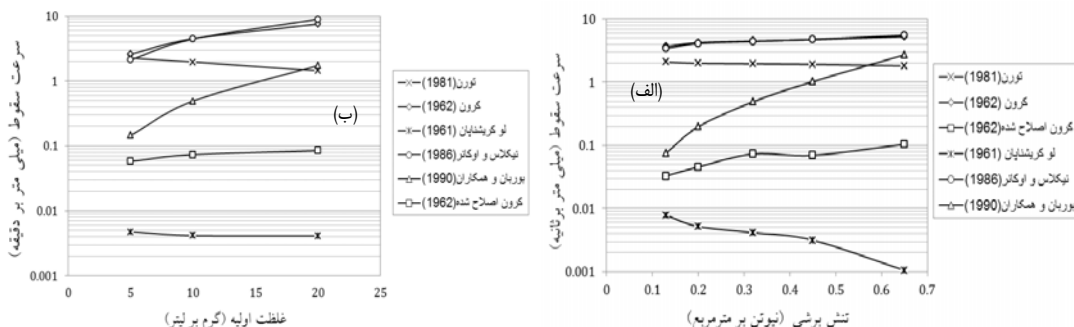
برخورد بین توده‌های رسوبی را در پی دارد و به دنبال آن توده‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌گردد و نرخ ته‌نشینی افزایش می‌یابد. شیب خطوط ترسیم شده در شکل (۳) نشان می‌دهد، افزایش نرخ ته‌نشینی



شکل ۴ - مقادیر سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس روابط مختلف - آب خالص



شکل ۵ - مقادیر سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس روابط مختلف - آب خالص



شکل ۶ - تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، (ب) تغییرات سرعت سقوط

$$\tau = 0.32 \frac{N}{m^2} \text{ (تنش برشی مختلف برای غلظت‌های رسوبی)}$$

### احتمال ته‌نشینی

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

رسوبی دارد. تنش‌برشی بزرگ علاوه بر افزایش برخورد بین توده‌های رسوبی، سبب شکسته‌شدن توده‌های ضعیف می‌شود. در حالت دوم که غلظت اولیه رسوبات ثابت است، با افزایش تنش‌برشی نرخ ته‌نشینی 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 تنش‌برشی در شکستن توده‌های رسوبی بیشتر است.

شکل (۶) نشان می‌دهد که نتایج به‌دست آمده سرعت سقوط، وابسته به تغییرات دو پارامتر تنش‌برشی و غلظت رسوبات می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر سرعت سقوط براساس معادله لو و کریشناپان (۱۹۹۱)، نسبت به تغییرات تنش‌برشی حساسیت بیشتری نشان می‌دهد این در حالی است که این معادله فقط بر اساس غلظت اولیه رسوبات برقرار گردیده است.

با استناد به یافته‌های فوق و با استفاده از ۷۰ درصد نتایج با کمک نرم‌افزار SPSS، تحلیلی در خصوص رابطه سرعت سقوط با تنش‌برشی جریان و غلظت تعادلی رسوبات به صورت بی‌بعد انجام گرفت که نهایتاً رابطه زیر برقرار گردید:

$$W_s = 0.085 \left( \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.102} \left( \frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{1.056}, R^2 = 0.87, RMSE = 0.0001 \quad (15)$$

با توجه به مشخصات آماری محاسبه شده برای رابطه به‌دست 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 کرون و رابط فوق، ۱۲/۲۵ درصد می‌باشد.

در ادامه، روابط فوق با ۳۰ درصد باقی مانده داده‌ها صحت‌سنجی شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با پذیرش ۲۰ خطا، ۸۵ درصد داده‌های واسنجی شده در این محدوده قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد پذیرش این مقدار خطا در مطالعات هیدرولیک رسوب مناسب باشد. نتایج در شکل (۷) قابل مشاهده است.

### 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 کرون (۱۹۶۲) در حالی که تفاوت اندکی بین غلظت اولیه و غلظت تعادلی باشد، از دقت کافی برخوردار نیست. مقادیر سرعت سقوط براساس روابط اصلاح شده کرون (۱۹۶۲) و بوربان و همکاران (۱۹۹۰) دارای یک الگوی نوسان می‌باشند اما الگوی تغییرات سرعت سقوط در رابطه لو و کریشناپان (۱۹۹۱) کاملاً برعکس مقادیر به‌دست آمده از رابطه اصلاح شده کرون (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 لو و کریشناپان (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 طرح موفق کمک خواهد کرد زیرا معادله‌های تجربی موجود هر یک در شرایط خاصی برقرار گردیده است.

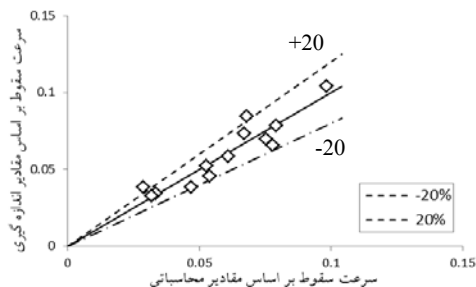
مشخص بودن نرخ ته‌نشینی، احتمال ته‌نشینی توده‌های رسوبی، غلظت متوسط در طول بازه زمانی ته‌نشینی و غلظت تعادلی رسوبات چسبیده سرعت سقوط توده‌ها را می‌توان بر اساس معادله (۱) محاسبه نمود.

شکل (۴) سرعت ته‌نشینی را برای سطوح مختلف تنش‌برشی نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در برخی از غلظت‌ها، سرعت سقوط دارای یک افزایش ناگهانی در تنش‌های برشی بزرگ 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.

در ادامه به محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبیده، با استفاده از روابط ذکر شده در قسمت مقدمه پرداخته شد که نتایج در شکل (۵) قابل مشاهده است.

نتایج نشان می‌دهد در تحقیق حاضر برای سطوح مختلف تنش-برشی، مقادیر سرعت سقوط بر اساس روابط اصلاح شده کرون (۱۹۶۲) و بوربان و همکاران (۱۹۹۰) دارای یک الگوی نوسان می‌باشند. بدین ترتیب که در یک غلظت معین با افزایش تنش‌برشی، سرعت سقوط نیز افزایش می‌یابد. الگوی تغییرات سرعت سقوط در رابطه لو و کریشناپان (۱۹۹۱) (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶) کاملاً برعکس مقادیر به‌دست آمده از رابطه اصلاح شده کرون (۱۹۶۲) می‌باشد. در رابطه بوربان و همکاران (۱۹۹۰) از دو پارامتر تنش‌برشی جریان و غلظت رسوبات برای محاسبه سرعت سقوط استفاده شده است در صورتی که در رابطه لو و کریشناپان (۱۹۹۱) سرعت سقوط ذرات فقط وابسته به غلظت ذرات می‌باشد. همچنین مقادیر سرعت سقوط در رابطه نیلسون و اوکانر (۱۹۸۶) و کرون (۱۹۶۲) بسیار نزدیک به هم به دست آمد و در تمامی تنش‌های برشی و سطوح غلظت روند افزایشی دارند. سرعت سقوط بر اساس رابطه تورن (۱۹۸۱) در غلظت‌های کم، نزدیک به مقادیر حاصل از روابط نیلسون و اوکانر (۱۹۸۶) و کرون (۱۹۶۲) می‌باشد. اما با افزایش غلظت مقادیر سرعت سقوط روند کاهشی دارند.

به منظور بررسی بیشتر وابستگی سرعت سقوط، براساس روابط مختلف، نسبت به تغییرات غلظت و تنش‌برشی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌طور نمونه برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر و  $\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}$  در شکل (۶) قابل مشاهده است. در تمام روابط فوق به جز لو و کریشناپان (۱۹۹۱) و تورن (۱۹۸۱) مشاهده می‌شود که افزایش تنش‌برشی و غلظت اولیه سبب افزایش سرعت سقوط توده‌های رسوبی می‌شود. همچنین هماهنگی مقادیر سرعت سقوط بر اساس معادله‌های کرون (۱۹۶۲) و نیلسون و اوکانر (۱۹۸۶) در غلظت‌ها و تنش‌برشی مختلف، قابل توجه و بررسی بیشتر می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای سرعت سقوط توده‌های رسوبی

### منابع

- ۱- اردلان، ا. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی جریان رسوبات ریزدانه معلق در مخازن سدهای تنظیمی با استفاده از مدل *MIKE11* (مطالعه موردی سد تنظیمی دزفول). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد، ۱۲۸ صفحه.
- ۲- خواستار بروجنی، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تاثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبنده در کانال‌های انتقال آب. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۰۲ صفحه.
- 3- Arman, A., Fathi-moghadam, M., Samadi Boroujeni, H. and s. Emamgholozadeh. 2009. Fall velocity of cohesive sediment in Dez dam reservoir. *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(1):71-79.
- 4- Baldock, T. E., Tomkins, M. R., Nielsen. P. and M. G. Hughes. 2004. Settling velocity of sediments at high concentrations. *Coastal Engineering* 51: 91-100.
- 5- Burban, P.Y., Y.U. Xu, J. McNeil, and W. Lick. 1990. Settling Speeds of Floccs in Fresh Water and Seawater, *Journal of Geophysics Research*, 1821 3-1 8220.
- 6- Ha, H. K. and j. p. y. Maa. 2009. Evaluation of two conflicting paradigms for cohesive sediment deposition. *Marine Geology*, 265:120-129.
- 7- Haralampides, K., Mc Corquodale, A. and B. G. Krishnappan. 2003. Deposition properties of fine sediment. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129:230-234.
- 8- Huang, J., Hilldate, R. C. and B. P. Greiman, 2006. *Erosion and sedimentation manual*. U.S. Department of The Interior. United States Bureau of Reclamation.
- 9- Jimenez, J. and Madsem, O. 2003. A. Ole. 2003. A Simple formula to estimate settling velocity of natural sediments. *Journal of Waterway, Port, Costal and OEcean engineering*. 129:(2):70-78.
- 10- Krishnappan. B. G. 2006. Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume. The 7th Int. Conf. on Hydro science and Engineering (ICHE), Philadelphia, USA.
- 11- Krishnappan, B. G. and P. Engel, 2004. Distribution of bed shear stress in rotating circular flume. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130:324-331
- 12- 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.
- 13- Nicholson, J., and B.A. O'Connor (1986). Cohesive Sediment Transport Model, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 1 12, no. 7, pp. 621 -640.
- 14- Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive Soils. *Journal of The Hydraulics Division. Proceedings of the ASCE*, 91(1):105-139.



- 15- Partheniades, E. 2009. Cohesive sediments in open channels. (1st Ed), Elsevier Inc, Burlingon, USA.
- 16- 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.
- 17- 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 Pollution 112: 1-19.
- 18- Thorn, M.F.C. 1981. 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, pp. 47-55.
- 19- Winterwerp, J. C. 2006. On the sedimentation rate of cohesive sediment. Proceedings in Marine Science, Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics, 8: 209-226.