

## «یادداشت تحقیقاتی»

# بررسی آزمایشگاهی تغییرات سرعت سقوط رسوبات چسبنده با استفاده از استوانه ته‌نشینی

حسین صمدی بروجنی<sup>1\*</sup>، سیده آرزو نقشبندی<sup>2</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>3</sup>، امین خدابنده<sup>4</sup>

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

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد

3- استاد گروه آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

4- کارشناس ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکزی

\* Samadi153@yahoo.com

**چکیده** - در این تحقیق سرعت سقوط رسوبات چسبنده در حالت سکون با انجام آزمایش در یک استوانه ته‌نشینی از جنس پلکسی‌گلاس با قطر داخلی 19 سانتی‌متر و ارتفاع 300 سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها با 5 غلظت اولیه 3، 5، 10، 15 و 20 گرم بر لیتر انجام گرفت و در فواصل زمانی مختلف از 5 دقیقه تا 480 دقیقه غلظت رسوب معلق از طریق نمونه‌گیری از شیرهایی که در فواصل ارتفاعی 20 سانتی‌متری در مدل تعبیه شده بود، اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده از معادله دیفرانسیلی مک‌لافلین استفاده شد. نتایج نشان داد معادله مک‌لافلین رفتار رسوبات چسبنده در حالت سکون را به خوبی مدل‌سازی می‌کند. در تمام آزمایشات بیشترین سرعت سقوط ذرات در زمان 15 دقیقه پس از شروع فرایند ته‌نشینی اتفاق افتاد که با نتایج کار محققان دیگر هم‌خوانی داشت. با افزایش غلظت اولیه آزمایش، سرعت سقوط رسوبات، روند کاهشی داشت، بطوری‌که بیشترین سرعت سقوط اندازه‌گیری شده برای غلظت اولیه 3 گرم بر لیتر و برابر 5/84 میلی‌متر بر ثانیه بود و کمترین سرعت سقوط مربوط به غلظت اولیه 20 گرم بر لیتر و برابر 2/13 میلی‌متر بر ثانیه بدست آمد.

**کلیدواژگان:** رسوبات چسبنده، فلوکولاسیون، سرعت سقوط، استوانه ته‌نشینی.

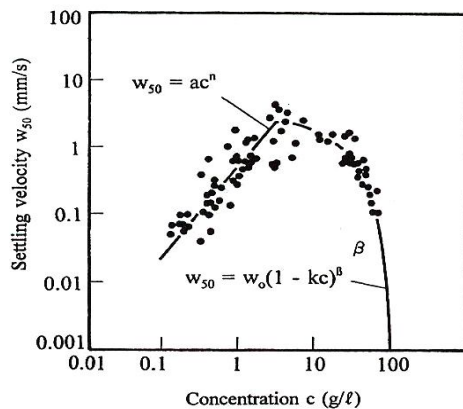
## 1- مقدمه

پارامتر در طراحی و مدل‌سازی فیزیکی حوضچه‌های ترسیب نقش بسزایی دارد و عدم برآورد دقیق آن می‌تواند باعث بروز خطاهای زیادی در برآورد بار رسوب، بررسی توزیع رسوب در مخازن سدها و یا طراحی ابعاد حوضچه‌های ته‌نشینی شود. بر اساس مطالعات انجام شده، سرعت سقوط رسوبات چسبنده بین 0/01 تا 10 میلی‌متر بر ثانیه متغیر است. بطور معمول حداکثر سرعت سقوط رسوبات چسبنده در غلظت 2 تا 10 گرم بر لیتر اتفاق می‌افتد. در غلظت‌های بیشتر،

ارزیابی و بررسی روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در مخازن سدها و سواحل یکی از موضوعات و مسایل مهم است که در طرح‌های مختلف رسوب‌زدایی و کنترل رسوب، از جمله پروژه‌های لایروبی و عملیات رسوبشویی هیدرولیکی سدها نقش مؤثری دارد (Samadi-Boroujeni et al. 2005). سرعت سقوط ذرات رسوبی از جمله متغیرهای مهم در برآورد میزان رسوب بار معلق و بار مواد بستر می‌باشد. این

(1).

Nicholas et al. (1986) روابطی برای محاسبه‌ی سرعت ته‌نشینی و برای تاثیر دادن تمام عوامل در آن ارائه دادند.



شکل 1 ارتباط سرعت سقوط با میزان غلظت (Thorne et al., 1991)

تمام ضرایب آنها به وسیله تجربه و بر اساس نوع رسوب معین شده‌اند.

به ازای  $C_S \leq C_H$ :

$$w = A_1 C_S^{B_1} \quad (3)$$

به ازای  $C_S > C_H$ :

$$w = A_1 C_H^{B_1} (1 - A_1 (C_S - C_H)^{B_2}) \quad (4)$$

که در آن  $C_H$  غلظت آستانه ممانعت از ته‌نشینی ذرات توسط یکدیگر است که برابر 25 گرم بر لیتر می‌باشد.  $A_1$ ،  $A_2$ ،  $B_1$  و  $B_2$  ضرایب معادله هستند که به صورت زیر تعیین شده‌اند:

$$B_1 = 1, B_2 = 5, A_1 = 1 \times 10^{-2} (\text{m}^4 \text{s} / \text{kg})$$

$$A_2 = 6 \times 10^{-4} (\text{m}^3 / \text{kg})$$

Lau and Kkrishnappen (1992) سرعت سقوط ذرات چسبنده را با زمان مرتبط و متغیر دانسته و رابطه (5) را پیشنهاد کردند:

$$\bar{w}_i = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} w_i dt \quad (5)$$

که در آن  $\bar{w}_i$  سرعت متوسط سقوط فلوکول در دسته  $\bar{w}_i$  نسبت به زمان،  $t_1$  و  $t_2$  زمان‌های مورد نظر می‌باشند که با انتگرال‌گیری و جایگذاری از روابط دیگر، رابطه (6) حاصل شد.

$$w_i = \frac{h}{t_2 - t_1} \ln \frac{C_{(t_1)}}{C_{(t_2)}} \quad (6)$$

فلوکول‌ها شکسته شده و سرعت سقوط آنها نیز کاهش می‌یابد (Sanford et al. 2005).

مطالعات (Shin et al. 2015) نشان داد تشکیل فلوکول‌ها در 15 دقیقه اول فرایند ته‌نشینی رسوبات چسبنده انجام می‌شود و در این بازه زمانی اندازه فلوکول‌ها به حداکثر رسیده و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند تا اینکه ته‌نشینی اتفاق بیافتد.

تحقیقات اولیه‌ی تاثیر غلظت ذرات رسوب بر سرعت سقوط توسط (Mclaughlin 1959) نشان داد که افزایش زیاد غلظت رسوب موجب کاهش سرعت سقوط ذرات می‌شود.

محققانی مانند (Cancio and Neves 1995)، Cancio and Neves (1999)، Krone (1963) و Mehta and Partheniades (1979) سرعت سقوط را تابعی از غلظت سیال تعریف نموده‌اند.

(Mclaughlin 1959) یک روش برای اندازه‌گیری سرعت سقوط در آب ساکنی که مواد جامد را حمل می‌کند، ارائه کرد. وی با استفاده از استوانه ته‌نشینی و با استفاده از فرمول دیفرانسیلی (1) تحقیق خود را پایه‌گذاری نمود.

$$\frac{\partial C \bar{W}}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

که در آن  $C$  غلظت ذرات رسوب در عمق  $Z$  و زمان  $t$  متوسط سرعت سقوط ذرات رسوبی و  $Z$  فاصله عمودی از سطح مینا می‌باشد.

(Krone 1963) مطالعاتی را بر روی رسوبات چسبنده در فلوم‌دوار انجام داد و دریافت که سرعت ته‌نشینی با غلظت رسوب افزایش می‌یابد و بر این اساس رابطه (2) را پیشنهاد کرد.

$$w = k C^{4/3} \quad (2)$$

که در آن  $C$  غلظت رسوبات معلق بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $k$  ثابت تجربی بر اساس نوع رسوب و میزان آن تقریباً برابر 0/001 و  $w$  سرعت سقوط بر حسب متر بر ثانیه است.

(Thorne et al. 1991) نشان داد در غلظت‌های پایین سرعت‌ته‌نشینی با غلظت افزایش می‌یابد. سپس به یک مقدار حداکثر رسیده و بعد از آن با افزایش غلظت به دلیل ممانعت از ته‌نشینی توسط ذرات دیگر و به خاطر برخوردی به وجود آمده با ساختمان‌های فلوکوله شده در غلظت‌های بالا میزان سرعت سقوط کاهش می‌یابد (شکل

برقی و پمپ کف کش ساخته شد و لوله انتقال آب از مخزن به بالای استوانه برای انتقال مخلوط آب و رسوب به داخل استوانه تعبیه گردید.



شکل 2 نمای از استوانه ته نشینی

قرائت سطح آب در مدل از طریق یک متر نواری بطول 3 متر که بر روی مدل نصب شده بود، انجام می‌گرفت و برای نمونه گیری از رسوبات برای تعیین غلظت، شیرهای نمونه-گیری با فواصل عمقی 20 سانتی متری بر روی استوانه ته-نشینی تعبیه گردید.

## 2-2- مشخصات رسوب مورد استفاده

برای انجام تحقیق حاضر، رسوبات از بستر خشک مخزن سدخاکی پیربلوط واقع در 20 کیلومتری جنوب غرب شهرکرد جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید. مشخصات فیزیکی رسوبات مورد استفاده در جدول 1 ارائه شده است و منحنی دانه‌بندی در شکل 3 نشان داده شده است. بر این اساس مشخص می‌شود رسوبات حاوی 64 درصد رس و 36 درصد سیلت می‌باشد. شایان ذکر است نوع کانی غالب رسوب مورد استفاده کائولینیت است.

## 2-3- اندازه گیری غلظت رسوبات

برای اندازه‌گیری غلظت رسوبات، در زمان‌های مختلف، از طریق شیرهای نمونه‌گیری، نمونه‌های رسوب با حجم حدود

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.

(2009) Fathi-Moghadam به بررسی فرایند سرعت ته‌نشینی رسوبات چسبنده مخزن سد در غلظت‌های مختلف با استفاده از مدل فیزیکی استوانه ته‌نشینی در شرایط سکون پرداختند. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که در هر عمق بیشترین سرعت‌های سقوط، در بازه زمانی 15 دقیقه تا 30 دقیقه اتفاق می‌افتد که این نتیجه نشان می‌دهد در این بازه زمانی فولکولاسیون بیش از زمان‌های دیگر انجام می‌شود.

با توجه به اینکه هنوز در مورد سرعت سقوط رسوبات چسبنده اتفاق نظر بین محققان مختلف بوجود نیامده است و ادامه این تحقیقات می‌تواند زوایای پنهان این موضوع را بیشتر نمایان سازد، لذا در تحقیق حاضر بررسی سرعت سقوط رسوبات چسبنده در مدل آزمایشگاهی استوانه‌ی ته‌نشینی تحت شرایط غلظت‌های اولیه متفاوت در دستور کار قرار گرفته است و روند ته‌نشینی رسوبات با گذشت زمان و در شرایط سکون مطالعه شده است.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق، برای انجام آزمایش‌ها اقدام به ساخت مدل استوانه ته‌نشینی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد شد. این مدل از جنس پلاستیکی گلاس با ارتفاع کلی 3 متر شامل سه قطعه استوانه پلاستیکی گلاس هریک بطول یک متر بود که این سه قطعه با رینگ و فلنچ به یکدیگر متصل گردیدند. قطر داخلی استوانه 19 سانتی متر و ضخامت ورق 5 میلی‌متر انتخاب گردید. مطابق مطالعات گذشته (از جمله Toorman, 1992, Yamagami et al., 2000 and Scully et al., 1984) استفاده از قطر استوانه ته‌نشینی بیشتر از 10 سانتی متر، اثر مقیاس را در آزمایش‌ها قابل چشم‌پوشی می‌کند.

انتهای پائینی استوانه به یک مجرای تخلیه‌ی قیفی متصل شد و در زیر آن شیر تخلیه تعبیه و کل مدل بر روی یک شاسی پایه دار فلزی نصب گردید (شکل 2).

همچنین به منظور تأمین مخلوط آب و رسوب برای انجام آزمایش‌ها، یک مخزن فلزی 250 لیتری مجهز به هم‌وزن

تهیه و با استفاده از همزن و پمپ مستغرق (بطور هم‌زمان) این مخلوط در مدت زمان یک ساعت بطور کامل مخلوط شد تا اطمینان لازم از عدم تشکیل فلوکول‌ها قبل از شروع آزمایش ته‌نشینی حاصل گردد. برای انجام مرحله دوم، از یک پمپ 1 اینچی استفاده شد و مخلوط آب و رسوب، به درون مدل منتقل گردید. که با توجه به حجم استوانه ته‌نشینی و دبی پمپ، حدود 1 دقیقه زمان برای پرشدن استوانه نیاز بود.

غلظت‌های اولیه مورد آزمایش 3، 5، 10، 15 و 20 گرم بر لیتر، بود و برای هر یک از این غلظت‌های اولیه، نمونه‌برداری در اعماق مختلف برای تعیین غلظت در زمان‌های 5، 15، 30، 60، 120 و 240 و 480 دقیقه انجام پذیرفت. نمونه‌گیری‌ها نیز از اعماق 40، 80، 140، 180، 240 و 280 سانتی‌متر نسبت به سطح آب در مدل، انجام گرفت. البته در لحظه شروع آزمایش یک نمونه شاهد برای هر غلظت اولیه به منظور تخمین غلظت اولیه گرفته‌شد.

## 2-5- روش محاسبه سرعت سقوط

به منظور تعیین سرعت سقوط از فرمول مک‌لافلین (1959) استفاده شد که بصورت رابطه (7) تعریف شده است.

$$\frac{dC_{(z,t)}}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt} = 0 \quad (7)$$

که در آن  $C$  برابر میانگین غلظت در اعماق مختلف در یک بازه‌ی زمانی مشخص می‌باشد و  $\bar{w}_{(z,t)} = \frac{dz}{dt}$  است. با انتگرال‌گیری معادله فوق و جاگذاری  $\frac{dz}{dt} = \bar{w}_{(z,t)}$  در این

معادله، رابطه (8) بدست می‌آید:

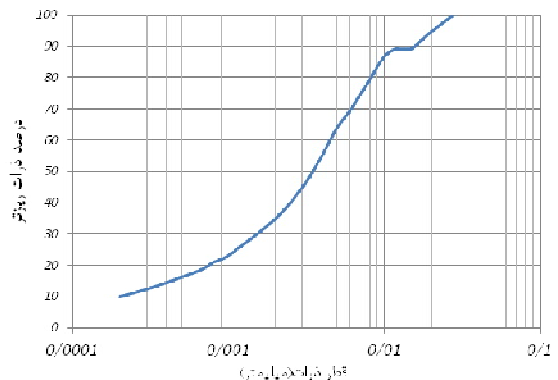
$$(\bar{w}C)_{z=d} = -\int_0^d \frac{\partial C}{\partial t} dz = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^d C dz \quad (8)$$

براساس معادله بدست آمده سرعت سقوط رسوبات معلق بصورت رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$(\bar{w})_d = -\frac{\partial \int_0^d C dz}{\partial t} \quad (9)$$

برای کاربرد رابطه فوق از منحنی تغییرات غلظت استفاده شده و صورت کسر همان سطح زیر منحنی توزیع غلظت نسبت به عمق در زمانهای مختلف می‌باشد.

100 سانتی‌متر مکعب گرفته شد و با روش خشک کردن و توزین، غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری شد. در انجام این اندازه‌گیری‌ها از ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 گرم و آون با حداکثر حرارت داخلی 120 درجه سانتی‌گراد استفاده گردید.



شکل 3 دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده

جدول 1 پاره‌ای از خصوصیات رسوبات مورد استفاده در آزمایش

مقدار	شرح
30	ضریب یکنواختی
1/95	ضریب انحنای
0/0023	اندازه‌ی متوسط هندسی (میلی‌متر)
4/43	انحراف‌معیار هندسی
0/0032	D50 (میلی‌متر)
2/69	Gs
47/5	حد روانی (LL)
29/28	حد خمیری (PL)

## 2-4- مراحل انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل سه مرحله بود. مرحله اول تهیه مخلوط آب و رسوب، مرحله دوم انتقال مخلوط آب و رسوب به داخل مدل استوانه ته‌نشینی و مرحله سوم اندازه‌گیری‌های مورد نیاز در حین ته‌نشینی بود. در مرحله اول ابتدا رسوبات بطور کامل خشک و توسط چکش فلزی به خوبی کوبیده‌شده و از الک شماره 200 عبور داده شد. با توجه به غلظت اولیه مورد نظر، به میزان مشخص رسوبات خشک انتخاب و در مخزن 250 لیتری، با اضافه کردن حجم مشخصی از آب، مخلوط آب و رسوب

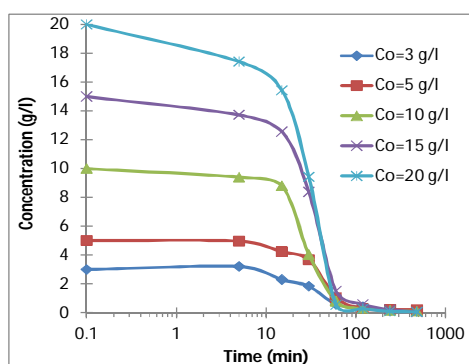
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تغییرات عمقی غلظت

با افزایش عمق میزان غلظت افزایش می‌یابد و با گذشت زمان، بدلیل ته‌نشینی رسوبات، غلظت رسوبات کاهش می‌یابد. براساس نتایج اندازه‌گیری غلظت رسوبات، توزیع عمقی غلظت در زمان‌های مختلف به عنوان نمونه برای غلظت اولیه 3 گرم بر لیتر در نمودار شکل 4 نشان داده شده است. توزیع عمقی غلظت در آزمایش‌های انجام شده نشان داد که در زمان 15 دقیقه پس از شروع ته‌نشینی بیشترین شیب تغییرات عمقی غلظت (بطور میانگین معادل 1/25 گرم بر لیتر به ازای هر متر عمق) اتفاق می‌افتد. در مقابل در زمان 60 دقیقه پس از شروع ته‌نشینی کمترین شیب تغییرات عمقی غلظت (بطور میانگین معادل 0/14 گرم بر لیتر به ازای هر متر عمق) اتفاق می‌افتد. این امر می‌تواند همان‌گونه که در تحقیقات Sanford و همکاران (2005) و همچنین Spicer و همکاران (1998) آمده است، ناشی از این موضوع باشد که در 15 دقیقه اول فرایند ته‌نشینی، فلوکول‌ها به حداکثر اندازه رسیده و نرخ ته‌نشینی نیز در این زمان حداکثر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش غلظت اولیه آزمایش، شیب تغییرات عمقی غلظت نیز افزایش یافته است. بطوریکه متوسط شیب تغییرات عمقی غلظت برای غلظت اولیه 3 گرم بر لیتر معادل 0/3 گرم بر لیتر به ازای هر متر عمق بوده و برای غلظت اولیه 20 گرم بر لیتر این شیب برابر 0/7 گرم بر لیتر به ازای هر متر عمق بدست می‌آید. علت این امر می‌تواند بخاطر اثر بالا بودن غلظت اولیه در افزایش نرخ ته‌نشینی و رسوبگذاری رسوبات معلق باشد.

#### 3-2- تغییرات غلظت در برابر زمان

به منظور بررسی تغییرات زمانی غلظت رسوبات، نمودار شکل 5 ارائه شده است. همانطور که در این نمودارها مشخص است برای آزمایشات با غلظت‌های اولیه متفاوت، تا زمان 15 دقیقه از شروع ته‌نشینی، تغییرات غلظت تدریجی می‌باشد، ولی پس از این زمان، روند کاهش غلظت سریعتر شده و در زمان 60 دقیقه پس از شروع ته‌نشینی غلظت رسوبات به 12 درصد غلظت اولیه می‌رسد. بعد از 120 دقیقه نیز غلظت رسوبات به 5 درصد غلظت اولیه می‌رسد. این نشان می‌دهد در همان یک تا دو ساعت اول آزمایش، بیشتر رسوبات ته‌نشینی می‌شوند.



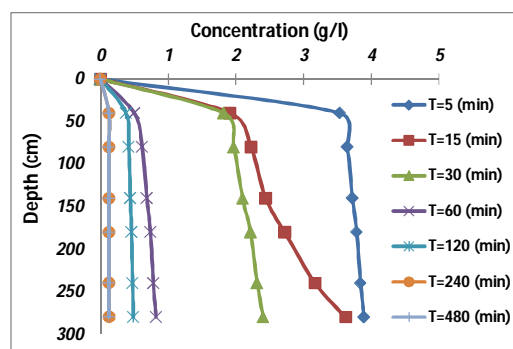
شکل 5 تغییرات زمانی غلظت رسوبات در آزمایشات انجام شده

#### 3-3- محاسبه سرعت سقوط

برای محاسبه سرعت سقوط رسوبات طبق معادله (9) لازم است ابتدا صورت کسر یعنی سطح زیر منحنی عمق- غلظت

که همان عبارت  $\frac{\partial \int_0^d C dz}{\partial t}$  است، تعیین شود. بدین منظور

از نمودار تغییرات عمقی غلظت رسوبات استفاده شد و در هر یک از زمان‌های 5، 15، 30، 60، 120، 240 و 480 دقیقه از شروع آزمایش به طور جداگانه در اعماق 40 تا 80، 80 تا 140، 140 تا 240، 180 تا 240 سانتی‌متری، سطح زیر منحنی عمق- غلظت به روش ذوزنقه محاسبه گردید. از تقسیم سطح زیر منحنی بر غلظت میانگین در اعماق مختلف در هر لحظه، سرعت سقوط محاسبه می‌شود که نتایج در شکل‌های 6 تا 8 ارائه شده‌اند. این نمودارها برای کلیه آزمایش‌ها با غلظت اولیه متفاوت نشان می‌دهد که سرعت سقوط متوسط در ابتدا روندی افزایشی دارد و پس از

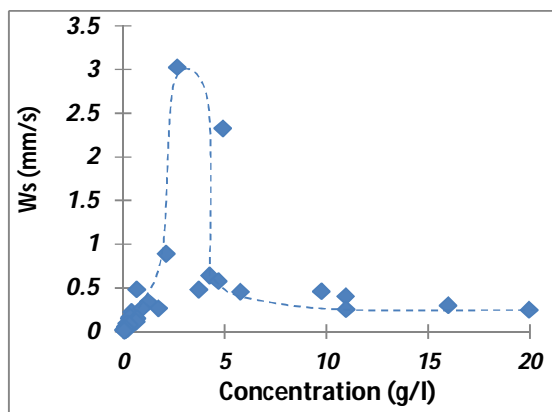


شکل 4 توزیع عمقی غلظت برای آزمایش با غلظت اولیه 3 گرم بر لیتر

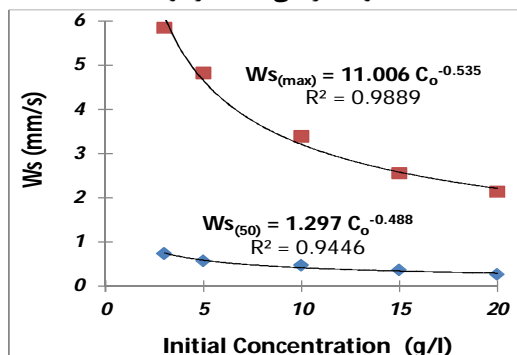
حداکثر شدن سرعت سقوط رسوبات در زمان 15 دقیقه پس از شروع آزمایش، بخاطر حداکثر شدن اندازه فلوکولها می باشد که این نتایج با مطالعات (Shin et al. (2015), Sanford et al. (2005) و Spicer et al. (1998) که نشان می داد بیشترین میزان فلوکولاسیون در زمان 15 دقیقه از شروع آزمایش رخ می دهد، همخوانی دارد. در شکل 9 نیز تغییرات متوسط زمانی سرعت سقوط رسوبات نسبت به متوسط زمانی غلظت رسوبات نشان داده شده است. ملاحظه می شود روند کلی تغییرات از نتایج هر آزمایش تبعیت می کند. همچنین همان گونه که در نمودار شکل 10 ملاحظه می شود، رابطه سرعت سقوط (حداکثر لحظه ای و متوسط) و غلظت اولیه رسوبات بصورت نمائی و به شرح روابط (10) و (11) می باشد.

$$W_{s-max} = 11 C_o^{-0.535}, (R^2 = 0.989) \quad (10)$$

$$W_{s-50} = 1.3 C_o^{-0.488}, (R^2 = 0.944) \quad (11)$$

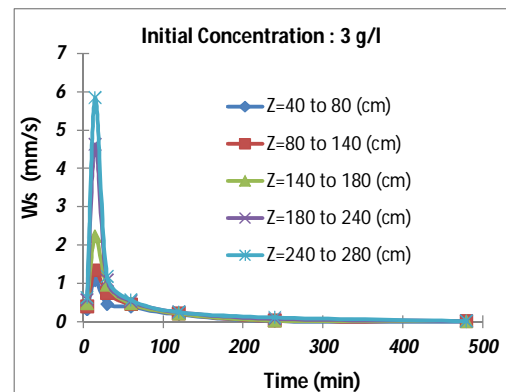


شکل 9 تغییرات متوسط زمانی سرعت سقوط رسوبات نسبت به متوسط زمانی غلظت رسوبات

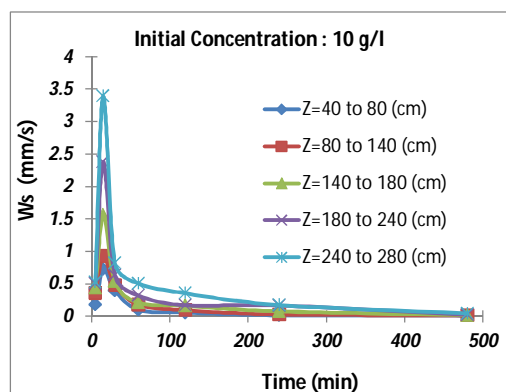


شکل 10 رابطه سرعت سقوط حداکثر و متوسط رسوبات با غلظت اولیه آزمایش های انجام شده

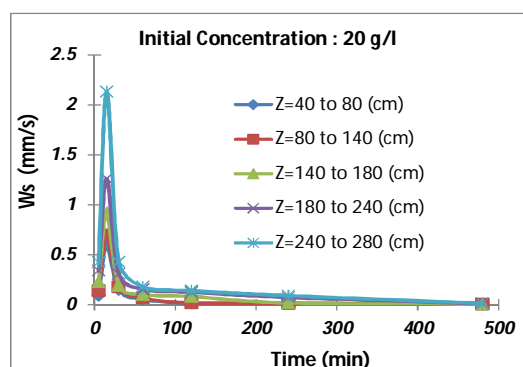
رسیدن به حداکثر مقدار در زمان 15 دقیقه از شروع آزمایش، روند تغییرات نزولی می شود و در نهایت پس از گذشت زمان به میزانی نزدیک به صفر میل می کند.



شکل 6 تغییرات زمانی سرعت سقوط رسوبات برای آزمایش با غلظت اولیه 3 گرم بر لیتر

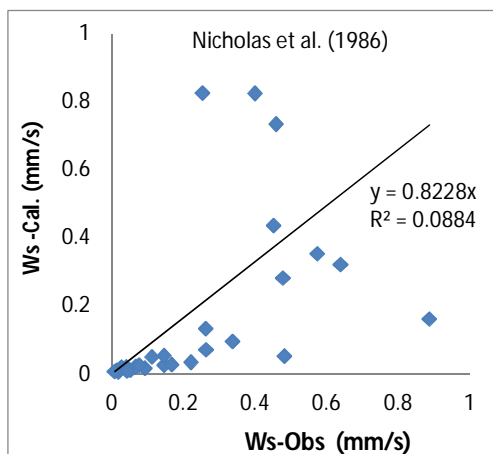


شکل 7 تغییرات زمانی سرعت سقوط رسوبات برای آزمایش با غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر

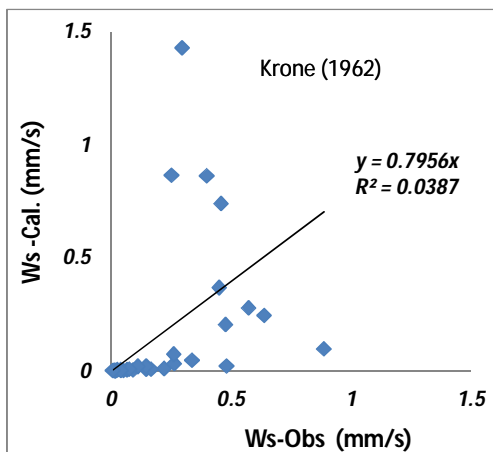


شکل 8 تغییرات زمانی سرعت سقوط رسوبات برای آزمایش با غلظت اولیه 20 گرم بر لیتر

نتایج معادله مک‌لافلین (1959) به ترتیب 62/6، 78/3 و 126/7 درصد بوده است.

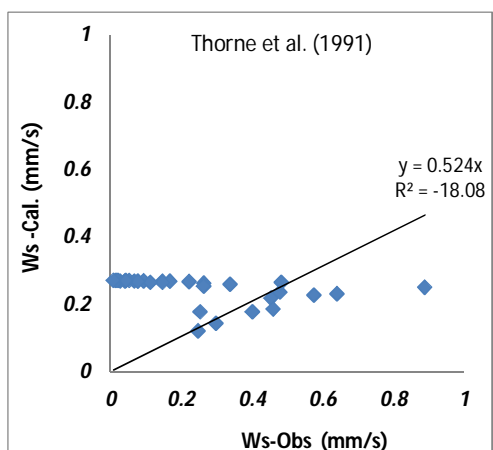


(الف)



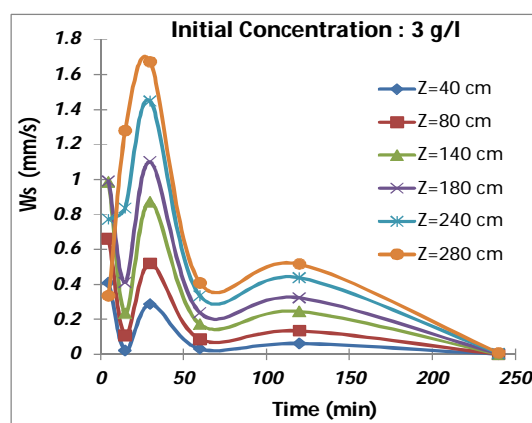
(ب)

شکل 12 مقایسه سرعت رسوبات روش مک‌لافلین و الف) روش نیکولاس؛ ب) روش کرون



شکل 13 مقایسه سرعت رسوبات روش تام و همکاران

در روابط (10) و (11)، حداکثر لحظه‌ای سرعت سقوط (میلی‌متر بر ثانیه)،  $W_{s-50}$  متوسط سرعت سقوط (میلی‌متر بر ثانیه) و  $C_0$  غلظت اولیه رسوبات (گرم بر لیتر) است. Lau and Kkrishnappen (1992) روش ساده شده برای محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده در شرایط ساکن ارائه نموده‌اند که با کاربرد این روش، مقادیر سرعت سقوط در آزمایش‌های با غلظت اولیه مختلف محاسبه شد که نمونه‌ای از نتایج در شکل 11 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد روند تغییرات سرعت سقوط رسوبات چسبنده با روش لو و کریشناپن (1992) هم‌خوانی لازم را با نتایج روش مک‌لافلین (1959) دارد، ولی حداکثر سرعت سقوط روش لو و کریشناپن (1992) در زمان 30 دقیقه پس از شروع آزمایش بدست می‌آید که با نتایج این مطالعه و نتایج سایر محققان اختلاف دارد. از نظر مقدار سرعت سقوط رسوبات چسبنده (متوسط و حداکثر لحظه‌ای) در غلظت‌های اولیه پائین، برآوردها با روش لو و کریشناپن (1992) نسبت به نتایج معادله مک‌لافلین (1959) کمتر و برای غلظت‌های اولیه بالاتر این برآوردها بیشتر بدست آمده است. اختلاف نتایج این دو روش در مجموع برای حداکثر لحظه‌ای سرعت سقوط معادل 53 درصد و برای میانگین سرعت سقوط معادل 63 درصد بدست آمده است.



شکل 11 تغییرات متوسط زمانی سرعت سقوط رسوبات نسبت به متوسط زمانی غلظت رسوبات (روش لو و کریشناپن)

مقایسه دیگر نتایج با روش‌های نیکولاس (1986)، کرون (1963) و تورن و همکاران (1991) همان‌گونه که در نمودار شکل‌های 12 و 13 دیده می‌شود نشان می‌دهد که متوسط خطای این روش‌ها (با کاربرد روابط (2) تا (4)) نسبت به



روش‌ها نسبت به نتایج معادله مک‌لافلین به ترتیب 62/6، 78/3 و 126/7 درصد بوده است که نشانگر خطای بالای این روش‌ها است.

در این محاسبات ضرایب مدل‌ها در حالت کمترین خطا برای روش‌های فوق (با فرض آنکه سرعت سقوط بر حسب میلی‌متر بر ثانیه و غلظت گرم بر لیتر باشد) به ترتیب 0/075، 0/035 و 0/27 در نظر گرفته شده است.

## 5- فهرست علائم

$C, C_s$	غلظت رسوبات معلق
$C_H$	غلظت آستانه ممانعت از ته‌نشینی ذرات
$D_{50}$	اندازه‌ای که 50 درصد ذرات قطر کوچکتر دارد
$G_s$	چگالی ویژه دانه های رسوبی
$h$	عمق جریان
$LL$	حد روانی (%)
$PL$	حد خمیری (%)
$T$	زمان
$W_s$	سرعت سقوط رسوبات معلق
$Z$	عمق از سطح آب

## 6- سپاس‌گزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد که در انجام این تحقیق حمایت مالی داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## 7- منابع

- Cancio L. and Neves R. (1995). "Three dimensional model system for baroclinic estuarine dynamics and suspended sediment transport in a mesotidal estuary". Computational Mechanics Publications, 11: 353-360.
- Cancio L. and Neves R. (1999). "Hydrodynamics and sediment suspension modelling in stuarine system". Journal of Marine Systems, 22: 105-116.
- Fathi-Moghadam, M., A. Arman, H. Samadi-Boroujeni and S. Emamgholizadeh, (2009), "Fall velocity of cohesive sediments in Dez dam reservoir", Research Journal of Environmental Sciences, 3(1): 71-79.
- Krone R. B. (1963). "A study of rheologic properties of estuarial sediment". Hyde. Eng. Lab. And Soni. Eng. Lab. Univ. of California, Berkeley, No. 63-38.
- Lau Y. L. and Kkrishnappen B. G. (1992). "Size distribution and settling velocity of cohesive sediments during settling". Journal of Hydraulic Research, 30(5): 673-684.
- Mehta A.J. and Partheniades E. (1979). "Kaolinite resuspension properties". Tech. Note. Proc ASCE, 105: 164-177.

## 4- نتیجه گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق نتایج زیر بدست آمد:

- در هر غلظت اولیه‌ای با افزایش عمق ستون آب، میزان غلظت افزایش می‌یابد.

- با توجه به نمودارهای سرعت سقوط نسبت به زمان مشخص می‌شود که در هر عمقی نرخ تغییرات غلظت نسبت به زمان، ابتدا روندی افزایشی داشته و پس از رسیدن به حداکثر که در زمان 5 دقیقه پس از شروع آزمایش اتفاق می‌افتد، روند کاهشی پیدا می‌کند. این امر به روند فلوکولاسیون رسوبات چسبنده بر می‌گردد، که منجر به افزایش جرم و چگالی فلوکول‌ها نسبت به ذرات منفرد تا یک زمان مشخص پس از شروع ته‌نشینی شده و نتیجه آن افزایش سرعت سقوط فلوکول‌ها نسبت به ذرات اولیه رسوب می‌باشد.

- معادله‌ی مک‌لافلین (1959) در محاسبه سرعت سقوط متوسط، تاثیر فلوکولاسیون بر سرعت سقوط متوسط، ذرات را به خوبی نشان می‌دهد. این معادله صرفاً برای شرایط سکون و عدم وجود تنش برشی کاربرد دارد.

- نتایج نشان داد بیشترین میزان سرعت سقوط در غلظت اولیه پائین رسوبات (3 گرم بر لیتر) اتفاق افتاده ولی با افزایش غلظت اولیه بدلیل وارد شدن مخلوط آب و رسوب به فاز هیندر<sup>1</sup>، مقدار بیشینه سرعت سقوط رسوبات چسبنده روند کاهشی پیدا می‌کند.

- نتایج بدست آمده از روش لو و کریشناپن (1992) اگرچه روند تغییرات زمانی سرعت سقوط را درست بدست می‌دهد، ولی از نظر زمان رخداد حداکثر سرعت سقوط رسوبات و مقدار سرعت سقوط رسوبات، نتایج این روش با نتایج حاصل از حل معادله مک‌لافلین (1959) اختلاف معنی‌دار دارد.

- کاربرد روش‌های نیکولاس (1986)، کرون (1963) و تورن و همکاران (1991) نشان می‌دهد که متوسط خطای این

<sup>1</sup> Hindered



Symposium on Sedimentation/ Consolidation Models, San Francisco.

Shin, H.J., M. Son and G. Lee, (2015). "Stochastic flocculation model for cohesive sediment suspended in water". *Water* 2015, 7, 2527-2541; doi:10.3390/w7052527

Spicer, P.T., Pratsinis, S.E., Raper, J., Amal, R., Bushell, G. and Meesters, G. (1998). "Effect of shear schedule on particle size, density, and structure during flocculation in stirred tanks". *Powder Tech.*, 97, 26–34.

Thorne J.A. Grace E. Swift D.J.P and Niedoroda A. (1991). "The depositional fabric and analytical approach to stratification and facies identification sedimentation on continental margins in shel sand and sandstone bodies". Special Publication 14, International Association of Sedimentologists. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 59–87.

Toorman E. (1992). "Modelling of fluid mud flow and consolidation". Ph.D Thesis, Hydraul. Lab., Katholieke Univ. Leuven, Belgium.

Yamagami T., Ueno K. and Sakai, S., (2000), "Back analysis for determination of sedimentation and consolidation properties", Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Nakase and Tsuchida (eds) Balkema, Rotterdam, ISBN.

Mclaughlin RT. (1959). "Settling properties of suspensions". Proc. ASCE.HY12. Paper 2311. 85 :9-41.

Nicholas J. and O Connor B. A. (1986). "Cohesive sediment transport model". *Journal of Hydraulic Engineering*. - 112(7): 621-640.

Samadi-Boroujeni, H., M. Fathi-oghaddam, M. Shafaie-Bajestan and H. Mohammad. Vali. Saman, (2005), "Modelling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments", *Sediment and Ecohydraulics Intercoh2005*. 1<sup>st</sup> Edn. Elsevier B.V.Oxford, UK, ISBN: 978-444-53184-1. pp. 165-191

Sanford, L., Dickhudt, P.J., Rubiano-Gomez, L., Yates, M., Suttles, S.E., Friedrichs, C.T., Fugate, D.D., and Romine, H., (2005), "Variability of suspended particle concentrations, sizes, and settling velocities in the Chesapeake Bay turbidity maximum. In: Droppo, I.G., Leppard, G.G., Liss, S.N., and Milligan, T.G. (eds.), *Flocculation in Natural and Engineered Environment Systems*". CRC Press, Washington D.C., pp. 211–356.

Scully, R.W., Shiffman, R.L., Olsen, H.W. and Ko, H.Y., (1984), "Validation of consolidation properties of phosphatic clay at very high void ratios", ASCE