

ارزیابی سرعت سقوط رسوبات چسبنده در مخزن سد کرخه

مهناز شادروان^۱، بابک لشکرآرا^{۲*} و حسام سید کابلی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران. Lashkarara@jsu.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۱۶

چکیده

ورود جریان غلیظ به مخزن و رسوب گذاری در مجاورت بدنه سد و تأسیسات وابسته به آن می تواند مشکلات متعددی از جمله انسداد دریاچه های تخلیه کننده تحتانی را به همراه داشته باشد. هم چنین ورود رسوبات به لوله پمپستاک به هنگام آبیگری نیروگاه در شرایط نامساعد مخزن می تواند منجر به خوردگی پروانه توربین شود. آگاهی و شناخت از سرعت ترسیب رسوبات وارده به مخزن می تواند در راستای تهیه منحنی فرمان برای بهره برداری از نیروگاه سدهای مخزنی نقش به سزایی بازی نماید. در این مقاله به ارزیابی سرعت سقوط رسوبات چسبنده وارده به دریاچه سد کرخه در حالت سکون پرداخته شده است. برای این منظور از روش استوانه ای ته نشینی استفاده گردید. نمونه برداری رسوبات از هفت منطقه ای مختلف دریاچه سد کرخه انجام شد و خصوصیات فیزیکی آنها تعیین گردید. آزمایش ته نشینی با غلظت های اولیه ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم بر لیتر صورت پذیرفت. نمونه گیری از استوانه ای ته نشینی در فواصل عمقی ۲۰ سانتی متر انجام شد. فاصله ای زمانی نمونه گیری از استوانه ای ته نشینی بسته به میزان غلظت از ۵ دقیقه تا ۲۴۰ دقیقه تنظیم گردید. در این تحقیق سرعت سقوط ذرات، از حل عددی معادله دیفرانسیل مک لافلین به روش عددی تفاضل محدود محاسبه شده اند. نتایج حاکی از آن است که بیشترین سرعت سقوط در زمان ۱۰ الی ۱۵ دقیقه در ابتدای فرآیند ته نشینی اتفاق می افتد. هم چنین نتایج نشان داد که افزایش غلظت اولیه رسوبات منجر به کاهش سرعت سقوط خواهد شد.

کلید واژه ها: استوانه ته نشینی، واکنش فلوکولاسیون، سرعت سقوط، رسوبات چسبنده.

مقدمه

مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریان های سیلابی رودخانه و به منظور تسکین سیل، ذخیره آب برای مصارف پایین دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می شوند. مواد رسوبی که وارد مخازن سدها می شوند، حاصل عمل فرسایش پوسته زمین بوده که توسط رودخانه حمل و به مخزن وارد می شوند. عدم توجه به رفتار رسوب در بالادست مخزن سد و چگونگی حرکت مواد جامد به سمت بدنه سد و میزان انباشتگی و محل رسوب گذاری در مخزن، مشکلاتی را در ارتباط با بهره برداری از سدها ایجاد خواهد کرد. از جمله اثرات مخرب رسوب گذاری در مخازن سدها، می توان به پایین آمدن کیفیت آب مصرفی، اختلال در عملکرد نیروگاه ها و افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری، کاهش حجم مفید مخزن، کم شدن سیلاب قابل کنترل، افزایش خطر سرریز شدن آب به هنگام سیلاب های احتمالی و نهایتاً کاهش عمر مفید سد اشاره کرد.

در مخازن سدها به ویژه نزدیک ساختگاه سد، عمدتاً رسوبات ریزدانه چسبنده ته نشین می شوند. رفتار مکانیکی این رسوبات تا حد زیادی توسط جاذبه بین ذره ای ناشی از نیروهای الکترواستاتیک

و فیزیکی و شیمیایی کنترل می شود و همین ویژگی ها سبب به هم چسبیدن ذرات کلوئیدی درون مخلوط آب و رسوب می گردد و تشکیل توده هایی مترامک به نام فلوک می دهد، که این عمل اصطلاحاً فلوکوله شدن (Flocclulate) نام دارد (Floyd et al., 2016) و این امر تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شوری، رژیم جریان، غلظت رسوب و مواد آلی می باشد (Krishnappan, 2000). به طور کلی مکانیسم های فرسایش، رسوب گذاری، انتقال و تحکیم رسوبات ریزدانه توسط مجموعه ای پیچیده از عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اداره می شود. یکی از مؤلفه های اصلی دینامیک رسوبات ریز، روند ته نشینی آنها می باشد. فلوکولاسیون (Flocclulation) مهم ترین عاملی است که ته نشینی رسوبات چسبنده، سرعت سقوط و انتقال آنها را به طور قابل ملاحظه ای پیچیده تر و پیوسته تر از رسوبات غیر چسبنده می نماید (Floyd et al., 2016). برای به دست آوردن روابط حاکم بر رسوبات چسبنده، باید خصوصیات فیزیکی و رفتاری این رسوبات شناسایی گردد. سرعت حد ته نشینی ذرات رسوبی در مایعات با عنوان سرعت سقوط ذرات از جمله خواص بسیار مهم در تعیین خصوصیات فیزیکی انتقال، ته نشینی و تحکیم رسوبات

فرآیندهای فیزیکی مانند انتشار و پخشیدگی، که ممکن است همزمان رخ دهد، درآمیخته است. این فرآیندها نمی‌توانند در حین بررسی‌های میدانی حذف و یا کنترل شوند و بنابراین روش‌های درجا نمی‌توانند فرآیند ته‌نشینی را از فرآیندهای انتقال عمودی جدا کنند. یکی دیگر از مشکلات این روش این است که روش لوله ته‌نشینی درجا نمی‌تواند فلوک‌های منفرد را تحت شرایط غلظت‌های بالا تشخیص دهد. حتی افزایش کمی در غلظت می‌تواند سبب عدم تشخیص فلوک‌های منفرد شود، در نتیجه این روش تنها برای غلظت‌های نسبتاً کم معتبر است. روش سوم تحت عنوان ستون ته‌نشینی موسوم است که برای اندازه‌گیری سرعت سقوط دارای پیشینه طولانی است (Van, McLaughlin 1959, Camp, 1936, Leussen, 1988, Fathi-Moghadam et al., 2011). مزایای اصلی این روش در قابلیت اندازه‌گیری سرعت سقوط تحت شرایط کنترل شده است. بسیاری از عوامل مانند غلظت، شوری و دما به‌عنوان متغیرهای مستقل سرعت در نظر گرفته شده‌اند (Wan et al., 2015). در راستای تعیین سرعت ته‌نشینی رسوبات مطالعات مختلفی صورت گرفته است که در این میان می‌توان به محققانی از جمله McLaughlin (1959)، Ross و Mehta (1982) اشاره نمود که در مطالعات خود سرعت سقوط را تابعی از غلظت سیال معرفی نمودند و بیان داشتند که افزایش زیاد غلظت رسوب موجب کاهش سرعت سقوط ذرات می‌شود.

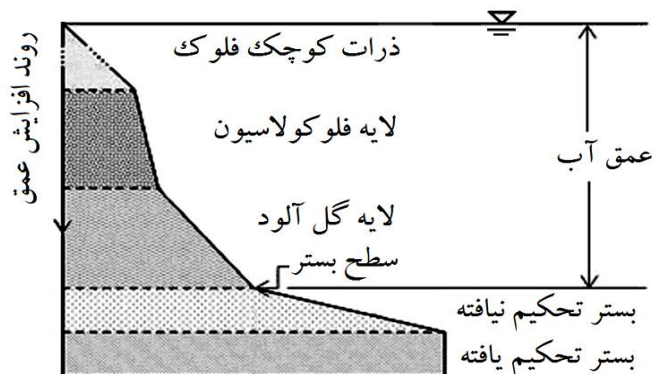
McLaughlin (1959) برای اندازه‌گیری سرعت سقوط ذرات (\bar{w}) در آب ساکن روشی را ارائه داد و با استفاده از استوانه ته‌نشینی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع حدوداً یک متر، رابطه (۱) را ارائه نمود.

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

که در آن C غلظت رسوبات، \bar{w} متوسط سرعت سقوط ذرات، t زمان و z فاصله عمودی از سطح مبنا می‌باشد.

است. سرعت سقوط یکی از مهم‌ترین پارامترهای اساسی در مدل‌سازی عددی به‌منظور درک مفهومی دینامیک رسوبات ریزدانه می‌باشد. متمایز از سرعت سقوط ذرات درشت دانه که به اندازه ذرات اولیه وابسته است و می‌تواند با استفاده از قانون استوکس به‌دست آید، سرعت سقوط رسوبات چسبنده تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارد که در این میان می‌توان به میزان شوری، اندازه ذرات اولیه، تلاطم، درجه حرارت آب و غلظت رسوبات معلق اشاره کرد. از آنجا که رسوبات ریز معلق در اثر حرکت براونی (Brownian motion) یا حرکت تصادفی ذرات غوطه‌ور در سیال و به واسطه وجود آشفتگی و ته‌نشینی ناشی از اختلاف سرعت سقوط ذرات، در معرض ابتلا به ساختارهای شبکه‌ای و فلوکوله هستند (Ou et al., 2016) لذا در فرآیند ته‌نشینی رسوبات چسبنده، در اعماق مختلف و در زمان‌های متفاوت، قطر مواد رسوبی متغیر است. در نتیجه می‌توان از پارامتر غلظت برای تعیین سرعت سقوط ذرات رسوبی استفاده نمود. در شکل (۱) چگونگی روند ته‌نشینی رسوبات چسبنده به تصویر کشیده شده است.

از آنجا که ردیابی مسیر سقوط ذرات ریز رسوب و یا یک فلوک منفرد به با چشم غیر مسلح و حتی با استفاده از ابزار دشوار است، سه نوع روش غیر مستقیم برای تعیین سرعت سقوط مورد استفاده قرار گرفته است. روش اول که به‌عنوان روش نظری از آن یاد می‌شود. این روش بر اساس ویژگی‌های سیال (چگالی و دما) و اندازه دانه یک ذره یا فلوک منفرد، سرعت سقوط محاسبه می‌شود. از رابطه استوکس می‌توان به‌عنوان یک نمونه از مطالعات انجام شده با استفاده از روش نظری یاد کرد. هم‌چنین مدل‌های نظری دیگری که با توجه به رفتارهای برخورد، انعقاد و رشد و تجزیه فلوک استوار می‌باشند، برای تعیین سرعت سقوط تنظیم شده‌اند. در روش دوم با بهره‌گیری از یک لوله ته‌نشینی در مکان مورد نظر، سرعت سقوط ذرات رسوب ارزیابی می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به حفظ شرایط طبیعی اشاره کرد. در این روش معایبی نیز وجود دارد که در این میان می‌توان به اختلال فلوک‌های طبیعی هنگام نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت آن‌ها اشاره نمود. علاوه بر این، ته‌نشینی ناشی از گرانث با سایر



شکل ۱- نمایش روند ته‌نشینی رسوبات از فلوکولاسیون تا تحکیم

می‌رسند. همچنین برای یک مدت زمان کوتاه نمونه‌های با غلظت کم، از حداکثر سرعت سقوط بالاتری نسبت به نمونه با غلظت بیشتر برخوردارند.

Samadi-Boroujeni و Naghshbandi (2014) تأثیر پدیده فلوکولاسیون رسوبات چسبنده را در محاسبه سرعت سقوط این رسوبات در حالت سکون بررسی کردند. آنان آزمایش‌های خود را در استوانه ته‌نشینی با قطر ۱۹ سانتی‌متر و ارتفاع سه متر و از جنس پلاکسی گلاس با غلظت‌های مختلف ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ گرم بر لیتر انجام دادند و بیان کردند که تغییرات غلظت با عمق رابطه مستقیم داشته و معمولاً نرخ افزایش غلظت با افزایش عمق در زمان‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه بیشتر از زمان‌های دیگر است. همچنین سرعت سقوط رسوبات با گذشت زمان، ابتدا روندی افزایشی داشته، سپس کاهش یافته و حداکثر سرعت سقوط مربوط به زمان‌های ۱۳ الی ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش در همه غلظت‌ها بود.

Wan et al. (2015) مطالعاتی برای بررسی تأثیر عوامل غلظت، شوری و دما بر سرعت سقوط رسوب ریزدانه در مصب رودخانه یانگ تسه در یک استوانه ته‌نشینی انجام دادند و برای پایش میزان غلظت رسوبات از سنسور سنجش کدورت مدل (OBS3+) استفاده کردند. آنان اظهار داشتند که غلظت رسوبات معلق، شوری و دما هر یک به مقادیر مختلفی باعث افزایش سرعت سقوط می‌شوند. البته تأثیر این عوامل در مراحل مختلف لخته شدن متفاوت است. همچنین بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیونی فرمول تجربی بین سرعت سقوط و عوامل مؤثر بر آن برقرار شد که به شدت وابسته به شرایط خاص زیست محیطی می‌باشد.

Ou و Liang (2016) به منظور بررسی تأثیر شوری و غلظت اولیه رسوب بر سرعت ته‌نشینی رسوبات ریزدانه از ستون ته‌نشینی و همچنین از کائولینیت صنعتی به‌عنوان رسوب استفاده نمودند و برای تجزیه و تحلیل روند رشد توده رسوب در زمان‌های مختلف، از سیستم پردازش تصویر استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که شکل گیری بزرگترین فلوک‌ها (حدود $30 \mu m$) در زمان ۳۰ دقیقه می‌باشد، در نتیجه حداکثر سرعت سقوط برای هر مورد بین زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه مشاهده گردید. در مجموع سرعت ته‌نشینی با افزایش غلظت نمک و غلظت رسوب افزایش یافت. آنان با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه رابطه‌ای تجربی بین سرعت سقوط رسوب، شوری و غلظت رسوب ارائه نمودند.

Wang et al. (2016) با استفاده از ابزار انکسار لیزر مدل به بررسی وجود لخته‌های رسوب در مخزن سد سه دره پرداختند و برای تعیین اثر فلوکوله شدن بر سرعت ته‌نشینی رسوب، آزمایش‌هایی در یک مخزن شیشه‌ای انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل فلوکوله شدن، شار ته‌نشینی جرم رسوب معلق در مخزن به بالاتر از ۶۶٪ افزایش نشان داده است. آنان علت این

Hauschild et al. (1961) نشان دادند که افزایش ذرات ریز معلق باعث افزایش لزجت و وزن مخصوص مخلوط آب و رسوب می‌گردد. همچنین افزایش غلظت این ذرات باعث کاهش سرعت سقوط شده و در نتیجه نرخ انتقال رسوب را در سیستم افزایش می‌دهند (به نقل از Yang, 1996).

Van Leussen (1999) با انجام اندازه‌گیری‌های میدانی در مصب اِمس Ems در شمال شرقی هلند توسط استوانه‌ای ته‌نشینی تحت شرایط میدانی به بررسی سرعت ته‌نشینی رسوبات در موقعیت‌های مختلف این مصب پرداخت و نشان داد که در راستای محور مصب و به سمت دریا، غلظت رسوبات معلق کاهش و سرعت ته‌نشینی افزایش می‌یابد. همچنین با انجام آزمایش‌های دیگری در یک غلظت ثابت رسوبات نشان داد که سرعت ته‌نشینی با افزایش شوری افزایش می‌یابد.

You (2004) به بررسی اثر غلظت رسوب معلق (C) روی سرعت سقوط رسوبات چسبنده پرداخت. نتایج این آزمایش نشان داد که سرعت سقوط در رژیم ته‌نشینی آزاد برای غلظت‌های کمتر از 0.3 گرم بر لیتر مستقل از غلظت رسوب معلق است. این روند در غلظت‌های بیشتر از 0.3 الی $4/3$ گرم بر لیتر به‌صورت غیر خطی با غلظت رسوب افزایش یافته و در رژیم ته‌نشینی تأخیر یافته که غلظت‌های بیشتر از $4/3$ گرم بر لیتر را شامل می‌شود، به شدت با افزایش غلظت رسوب کاهش می‌یابد.

Arman et al. (2007) تأثیر مواد فلوکوله‌ساز و پراکنده‌ساز را بر تغییرات غلظت و سرعت سقوط رسوبات چسبنده مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش برای غلظت اولیه ۱۷ گرم بر لیتر حاکی از کاهش غلظت بین ۱۰ تا ۱۵ درصد توسط نمک (فلوکوله ساز) و افزایش غلظت بین سه تا هشت درصد توسط کالگن (پراکنده ساز) نسبت به حالت نرمال بود. همچنین افزایش سرعت در هر عمق برای نمک بین صفر تا ۱۰ درصد و کاهش سرعت در هر عمق برای کالگن بین صفر تا ۱۰ درصد نسبت به حالت نرمال گزارش شده است.

Samadi-Boroujeni و Naderi-Boldaji (2009) به منظور بررسی آستانه ته‌نشینی رسوبات چسبنده معلق آزمایش خود را در یک فلوم دایره‌ای و با استفاده از سرعت سنج ADV برای محاسبه پروفیل سرعت و تنش برشی جریان در غلظت‌های اولیه متفاوت انجام دادند. نتایج نشان داد که غلظت تعادلی برای تمام آزمایشات بین دقایق ۳۰ تا ۶۰ از ابتدای آزمایش بود و با افزایش تنش برشی بستر، نرخ ته‌نشینی کاهش می‌یابد و همین روند نیز برای غلظت تعادلی صدق می‌کند. همچنین یک رابطه مستقیم بین مقدار تنش برشی آستانه ته‌نشینی و غلظت اولیه رسوبات معلق وجود دارد.

Fathi-Moghadam et al. (2011) از طریق بررسی خصوصیات ته‌نشینی رسوبات چسبنده مخزن سد در نشان دادند که همه نمونه‌های تجمع یافته در حدود زمان یکسان که تقریباً ۱۵ دقیقه بعد از شروع آزمایش است به سرعت سقوط حداکثر خود

مواد رسوب‌گذاری شده در یک دوره زمانی ۵۰ ساله برابر ۱۷۳۰٫۵ میلیون تن برآورد شده است.

برای انجام تحقیق حاضر، نمونه‌هایی از رسوبات ته نشین شده در کف مخزن سد کرخه و در مجاورت بدنه سد با استفاده از دستگاه نمونه گیر گرپ تهیه شد. شکل (۲) نشانگر محدوده حوزه آبریز کرخه و هم‌چنین موقعیت نقاط نمونه‌گیری شده از رسوبات کف مخزن سد کرخه می‌باشد. سپس به تعیین دانه‌بندی رسوبات توسط دستگاه دانه‌بندی لیزری اقدام شد. نتایج منحنی دانه‌بندی رسوبات در شکل (۳) نشان داده شده است.

از آنجا که هدف این تحقیق بررسی سرعت سقوط در شرایط ساکن است، لذا به منظور تحقق اهداف پژوهش ساخت مدل فیزیکی استوانه ته‌نشینی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی جندی شاپور در دستور کار قرار گرفت. با توجه به مطالعه‌های Yamagami et al. (1992)، Toorman (1984) و Scully et al. (1984) در صورتی که قطر استوانه ته‌نشینی از ۱۰ سانتی‌متر بزرگتر باشد می‌توان از اثر مقیاس قطر استوانه در مدل‌سازی صرف‌نظر نمود. برای این منظور از استوانه‌ای از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۲ متر و قطر ۲۵ سانتی‌متر استفاده گردید. به‌منظور تسهیل شرایط نمونه‌گیری از یک سو و هم‌چنین تعیین پروفیل غلظت در اعماق مختلف از سوی دیگر، شبره‌هایی به قطر یک چهارم اینچ به فواصل ۲۰ سانتی‌متر بر روی جداره استوانه تعبیه شد. به منظور توزیع یکنواخت رسوبات و تهیه مخلوط همگن از آب و رسوب، از یک مخزن ۲۰۰ لیتری برای ساخت مخلوط آب و رسوب استفاده گردید. وظیفه انتقال مخلوط آب و رسوب بر عهده یک دستگاه پمپ مستغرق دو اینچ گذاشته شد. شرایط فیزیکی درون مخزن بگونه‌ای فراهم گردید که با نصب پره‌هایی، پمپ قادر است تا نقش همزن رسوبات را نیز بازی نماید. شکل (۴) نمایی از مدل فیزیکی مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

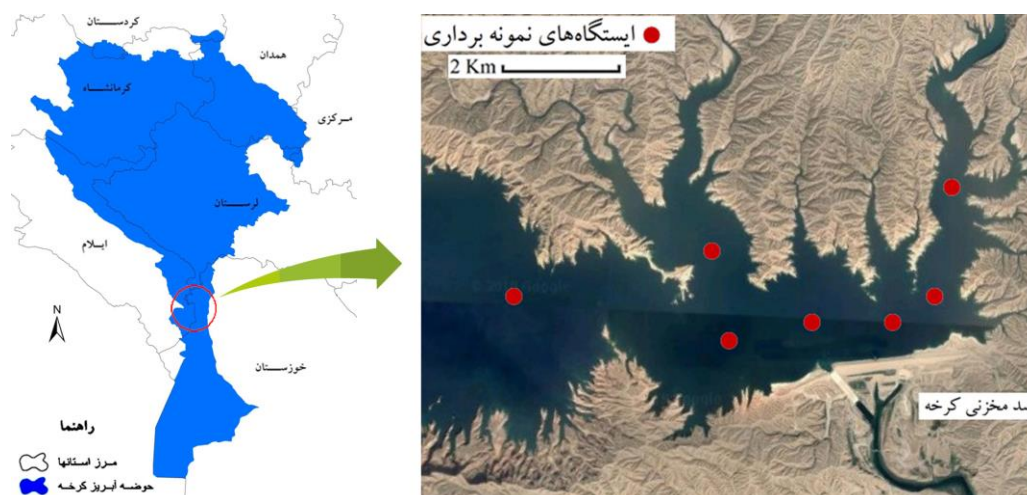
امر را ناشی از تأثیر قابل توجه اثر لخته شدن بر نرخ ته‌نشینی رسوب گزارش نمودند.

با توجه به مطالب بیان شده ملاحظه می‌گردد که شرایط محیطی نقش به‌سزایی بر خصوصیات فیزیکی رسوبات چسبنده ایفا می‌نماید. از طرفی بررسی منابع نشان داد که گزارشی در خصوص اندرکنش میزان غلظت رسوبات وارده بر مخزن سد کرخه و سرعت سقوط ذرات درون آن گزارش نشده است. لذا این موضوع به‌عنوان نوآوری تحقیق مطرح می‌باشد.

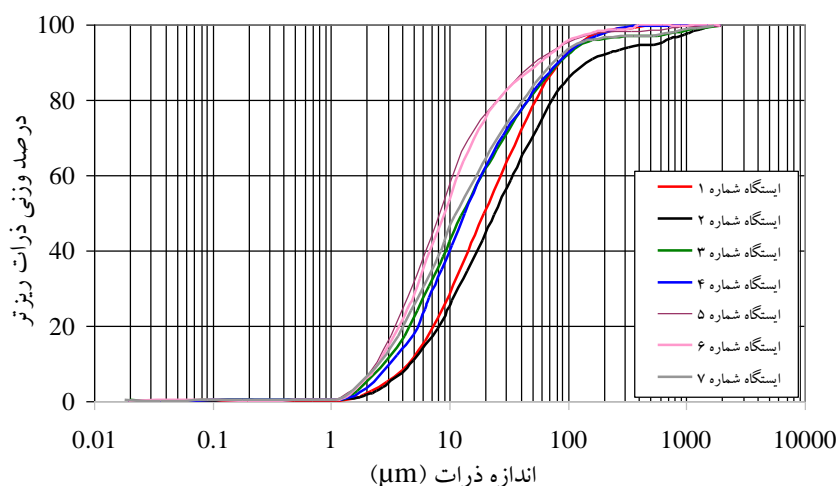
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه کرخه از مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس در نواحی غرب و شمال غرب کشور سرچشمه گرفته و سرشاخه‌های اصلی تشکیل دهنده آن رودخانه‌های سیمره، کشکان، قره‌سو، گاماسیاب و چرداول هستند. یکی از مشخصه‌های طبیعی رودخانه کرخه احتمال زیاد وقوع سیلاب و خطرات ناشی از آن است. در نتیجه به‌منظور کنترل سیلاب‌ها و جلوگیری از سیلابی شدن اراضی پایین دست و نیز تنظیم و تأمین آب برای آبیاری بیش از ۳۴۰ هزار هکتار از این اراضی و تولید انرژی برق‌آبی، سد مخزنی و نیروگاه برق‌آبی کرخه در فاصله ۲۲ کیلومتری شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان (در جنوب غربی ایران) احداث گردیده است. این سازه در ۴۸ درجه و ۷٫۸ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۲ درجه و ۲۹٫۶ دقیقه شمال در منطقه کرخه واقع شده است و از نوع خاکی با هسته رسی بوده و دارای ارتفاع ۱۲۷ متر با طول تاجی معادل ۳۰۳۰ متر و حجم کل مخزن سد در تراز بهره‌برداری ۲۲۰ متر، حدود ۵٫۶ میلیارد متر مکعب می‌باشد. هم‌چنین برای رقوم نرمال ۲۲۰ متر از سطح دریا، کل



شکل ۲- نقشه حوزه آبریز رودخانه کرخه و نمایش موقعیت‌های نمونه‌برداری



شکل ۳- منحنی‌های دانه بندی نمونه های رسوب در مخزن سد کرخه



شکل ۴- نمایی از مدل فیزیکی استوانه ته نشینی

در هر آزمایش نمونه گیری به‌طور متوسط در حد ۵۰ میلی‌لیتر از شیرهای تعبیه شده در سطوح ارتفاعی ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر نسبت به سطح فوقانی ستون در گام‌های زمانی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ دقیقه انجام گرفت. پس از اتمام زمان آزمایش، برای اندازه‌گیری غلظت، نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال توزین و سپس در آون با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و در نهایت غلظت هر نمونه اندازه گیری گردید. در گام بعد به‌منظور تعیین سرعت سقوط از نتایج تحقیقات McLaughlin (1959) استفاده گردید. معادله نهایی حاکم بر پژوهش مک لافلین که بر پایه شار ته‌نشینی و قانون بقای جرم ارائه شده است، که پیشتر به‌شکل رابطه (۱) ارائه گردید. با انتگرال گیری از معادله (۱) نسبت به عمق (z) می‌توان نوشت:

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا اقدام به تهیه مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های اولیه ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم بر لیتر در مخزن ۲۰۰ لیتری شد. بدین منظور میزان رسوبی که برای هر آزمایش با غلظت اولیه مورد نظر لازم بود توسط ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و سپس به آب داخل مخزن اضافه گردید. برای همگن سازی مخلوط و اطمینان از جداسازی کامل ذرات رسوب و عدم تشکیل فلوک، پمپ به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط آب و رسوب را با برخورد به تیغه نصب شده در مسیر خروجی لوله تخلیه پمپ برهم زده و پس از حصول اطمینان از یکنواختی مخلوط آب و رسوب، مخلوط به‌واسطه لوله رابط به ستون ته‌نشینی پمپاژ گردید. بلافاصله بعد از این لحظه زمان آزمایش شروع می‌شود، و بمنظور افزایش میزان دقت در اندازه گیری غلظت اولیه‌ی مخلوط، نمونه شاهدی از لایه فوقانی ستون مخلوط آب و رسوب نیز تهیه گردید.

تغییرات غلظت در برابر زمان مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات حاکی از آن است که روند تغییرات غلظت رسوبات با عمق رابطه مستقیم داشته و با گذشت زمان به دلیل ته نشینی روند تغییرات به سمت صفر میل خواهد کرد. شکل‌های (۵) الی (۸) روند توزیع عمقی غلظت در سناریوهای اول، سوم، پنجم و هفتم به ترتیب با ماده خشک ۴ گرم، ۸ گرم، ۱۵ گرم و ۲۵ گرم بر لیتر را نشان می‌دهند. با بررسی روند ته نشینی رسوبات می‌توان به تغییرات گرادیان غلظت در سناریوهای مختلف پی برد. به عنوان نمونه از شکل (۵) می‌توان دریافت که بیشترین گرادیان تغییرات غلظت در مقابل عمق در زمان ۲۰ دقیقه از ابتدای آزمایش رخ داده است. علت این امر را می‌توان ناشی از خاصیت فلوک شدن ذرات رس دانست. بدین مفهوم که در زمان ۲۰ دقیقه نخست سناریوی اول، ذرات رس به دلیل خاصیت فلوکولاسیون به حداکثر مقدار حجم خود رسیده و این امر منجر به افزایش گرادیان ته نشینی سرعت در مقابل عمق گشته است. بررسی مشابه در خصوص گرادیان کمینه حاکی از آن است که کمترین گرادیان در زمان ۱۲۰ دقیقه به وقوع پیوسته است.

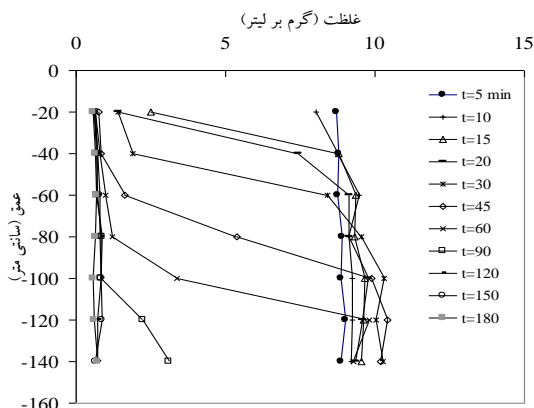
$$(\overline{wC})_{z=d} = \int_0^d \frac{\partial C}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d C dz \quad (2)$$

$$(\overline{w})_d = \frac{\partial \int_0^d C dz / \partial t}{C} \quad (3)$$

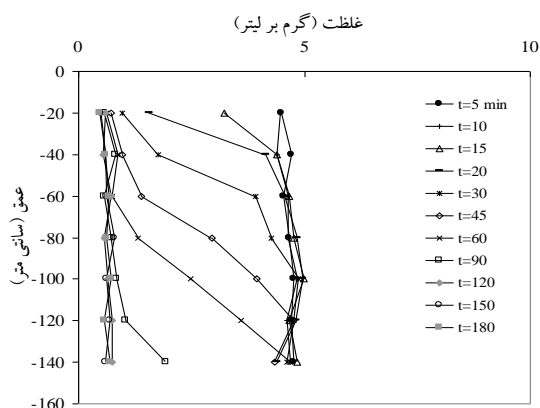
از آنجا که توزیع غلظت در برابر عمق در استوانه ته نشینی در زمان اولیه $t=0$ یکنواخت می‌باشد، در هر آزمایش غلظت اولیه به عنوان شرط مرزی اولیه منظور گردیده است و معادله‌ها بر اساس روش پیشرو انقطاع سازی گشته و این روند تا زمانی که غلظت در عمق به سمت صفر میل نماید و ته نشینی کامل صورت گیرد، ادامه خواهد داشت. در نتیجه با استفاده از رابطه (۳) که در واقع سطح زیر نمودار توزیع غلظت را نسبت به عمق در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد، نسبت به تعیین سرعت متوسط سقوط ذرات اقدام شد و تحلیل‌های لازم ارائه گردید.

نتایج و بحث

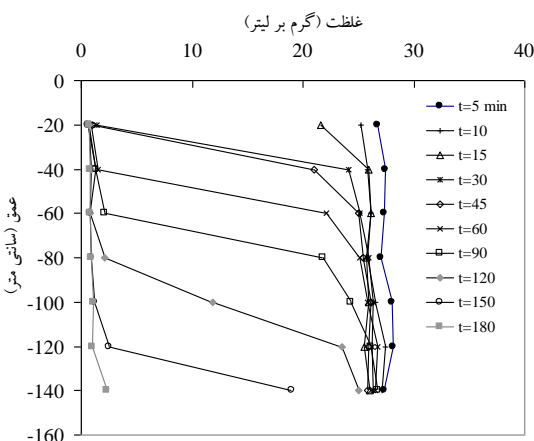
در این بخش یافته‌های تحقیق تحت سناریوهای مختلف با دو رویکرد تغییرات غلظت رسوبات در عمق استوانه ته نشینی و



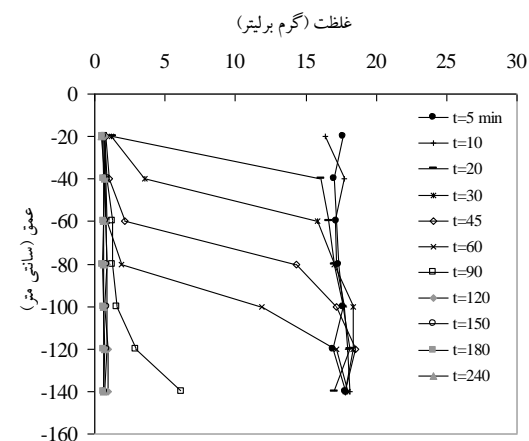
شکل ۶- توزیع عمقی غلظت در سناریوی سوم با ماده خشک ۸ گرم بر لیتر



شکل ۵- توزیع عمقی غلظت در سناریوی اول با ماده خشک ۴ گرم بر لیتر



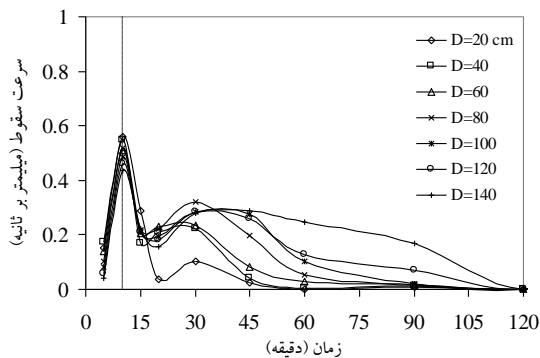
شکل ۸- توزیع عمقی غلظت در سناریوی هفتم با ماده خشک ۲۵ گرم بر لیتر



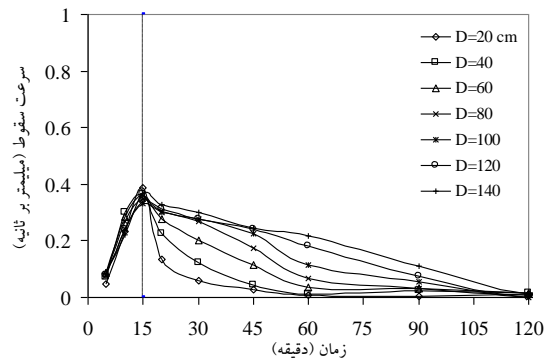
شکل ۷- توزیع عمقی غلظت در سناریوی پنجم با ماده خشک ۱۵ گرم بر لیتر

الی ۱۵ دقیقه پس از شروع آزمایش‌ها، منحنی تغییرات سرعت سقوط در مقابل زمان به حداکثر مقدار خود میل می‌نماید. این امر ناشی از آن است که در بازه زمانی یاد شده، حجم ذرات فلوک‌ها شده به واسطه حرکت براونی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. افزایش حجم فلوک‌ها منجر به سنگین‌تر شدن آن‌ها خواهد شد و این امر سبب افزایش سرعت سقوط می‌شود. لازم به ذکر است که با گذر زمان فرآیند فلوک‌کوله شدن ذرات رو به افول گذاشته و به واسطه کاهش چگالی و افزایش تخلخل توده آن‌ها از یک‌سو و برخورد آن‌ها با هم از سوی دیگر، منجر به متلاشی شدن ساختار آن‌ها می‌شود. طبیعتاً با شکست ساختار فلوک‌ها، سرعت سقوط نیز کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۹) الی (۱۲) موقعیت زمانی پیک سرعت سقوط ذرات نمایش داده شده‌اند. این موضوع در تحقیقات Spicer et al. (2015)، Shin et al. (2015)، Sanford et al. (2005) و Fathi-Moghadam et al. (1998) و Samadi-Boroujeni و Naghshbandi (2014) نیز گزارش شده است.

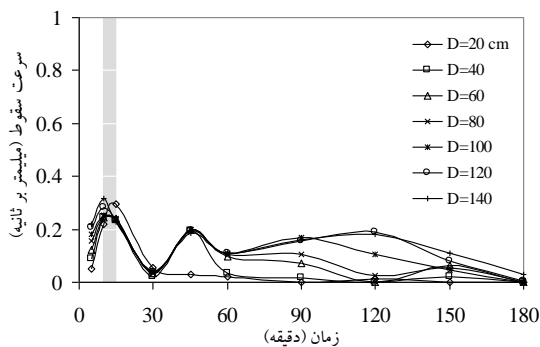
در گام بعد به منظور تخمین میزان سرعت سقوط از رابطه (۳) استفاده گردید. برای این منظور در بازه‌های زمانی مختلف، سطح زیر نمودار عمق غلظت در اعماق متوالی توسط این رابطه محاسبه گردید. سپس با تقسیم مجموع مقادیر فوق‌الذکر بر غلظت میانگین در زمان‌های متوالی، سرعت سقوط ذرات در زمان‌های متفاوت محاسبه گردید. شکل‌های (۹) الی (۱۲) به ترتیب نشان‌گر تغییرات زمانی سرعت سقوط در غلظت‌های ۴، ۸، ۱۵ و ۲۵ گرم بر لیتر می‌باشند. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که متوسط سرعت سقوط ذرات، ابتدا از گرادبان مثبتی برخوردار بوده و پس از سپری شدن ۱۰ الی ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش، روند نزولی در پی می‌گیرد. مشاهدات نشان می‌دهد که بازوی نزولی منحنی سرعت در مقابل زمان از بیشینه‌های محلی برخوردارند. این امر را می‌توان ناشی از ورود مرحله فلوک‌های کوچک به جریان لخته‌ای یا همان ناحیه ته‌نشینی تأخیر یافته دانست. پس از گذشت زمان و سپری شدن مرحله ته‌نشینی تأخیر یافته، تغییرات سرعت سقوط ذرات به سمت صفر میل می‌نماید. بررسی‌ها نشان داد که در بازه زمانی ۱۰



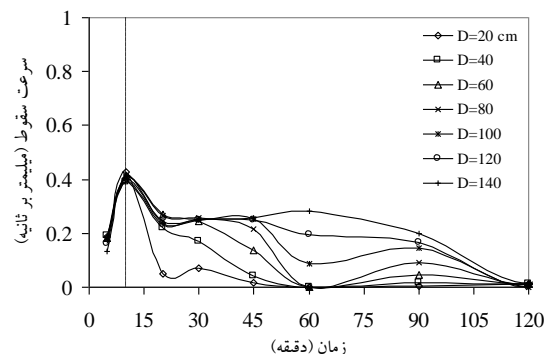
شکل ۱۰- تغییرات زمانی سرعت سقوط در سناریوی سوم با ماده خشک ۸ گرم بر لیتر



شکل ۹- تغییرات زمانی سرعت سقوط در سناریوی اول با ماده خشک ۴ گرم بر لیتر



شکل ۱۲- تغییرات زمانی سرعت سقوط در سناریوی هفتم با ماده خشک ۲۵ گرم بر لیتر



شکل ۱۱- تغییرات زمانی سرعت سقوط در سناریوی پنجم با ماده خشک ۱۵ گرم بر لیتر

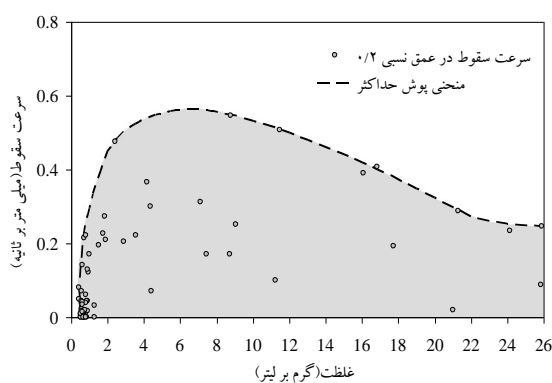
بازوی نزولی منحنی پوش سرعت - غلظت که به نوعی روند کوچک شدن حجم فلوکها را گزارش می‌نماید برای محدوده غلظت $6.5 \leq C < 15$ از تابع سیگموئید (Sigmoid Function) تبعیت می‌نماید که به شکل رابطه (۶) گزارش شده است.

$$\omega_{\max} = 0.4106 + \frac{0.1785}{1 + \text{EXP}\left(\frac{C-9.1}{0.9614}\right)} \quad (6)$$

ناحیه سوم منحنی که در برخی از سناریوها ادامه بازوی نزولی را تکمیل نموده و در برخی دیگر شرایط ته‌نشینی تأخیر یافته را گزارش می‌نماید برای محدوده غلظت $15 \leq C < 30$ به صورت رابطه (۷) حاصل گردید.

$$\omega_{\max} = 0.091 + \frac{0.5014}{1 + \text{EXP}\left(\frac{C-27.61}{1.806}\right)} \quad (7)$$

تجزیه و تحلیل‌های آماری در خصوص چگونگی عملکرد روابط (۵) الی (۷) در تخمین سرعت سقوط حداکثر ω_{\max} نشان داد که این روابط قادرند به‌طور متوسط با سه درصد انحراف از بهترین شرایط تطبیق، مقادیر سرعت حداکثر را گزارش نمایند. در شکل (۱۷) مقادیر سرعت حداکثر تخمین زده شده توسط روابط (۵) الی (۷) در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی نمایش داده شده‌اند.



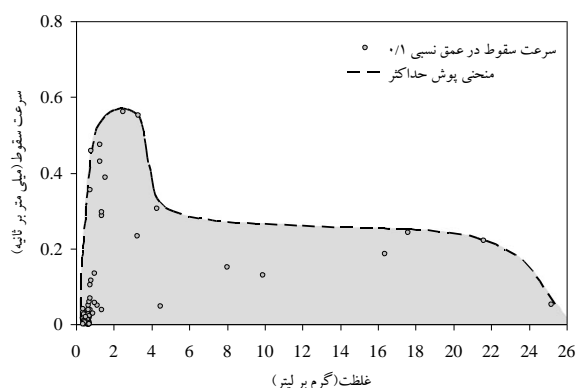
شکل ۱۴- تغییرات سرعت سقوط ذرات در مقابل غلظت در عمق نسبی ۰/۲

از آنجایی که آگاهی از چگونگی تغییرات زمانی و عمقی حداکثر سرعت سقوط لحظه‌ای می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت و بهره‌برداری از مخازن بازی نماید، لذا بررسی این موضوع نیز در دستور کار تحقیق قرار گرفت. برای این منظور، پارامتری تحت عنوان عمق نسبی تعریف گردید که از تقسیم عمق نمونه‌برداری به ارتفاع ستون ته‌نشینی حاصل می‌شود. به‌منظور کسب اطلاع از کمیت حداکثر سرعت سقوط ذرات، نسبت به رسم منحنی پوش در کلیه سناریوها اقدام گردید. به‌طور نمونه در شکل‌های (۱۳) الی (۱۶) اندرکنش سرعت سقوط ذرات در مقابل غلظت آنها به ترتیب در اعماق نسبی ۰/۱ الی ۰/۴ نمایش داده شده‌اند.

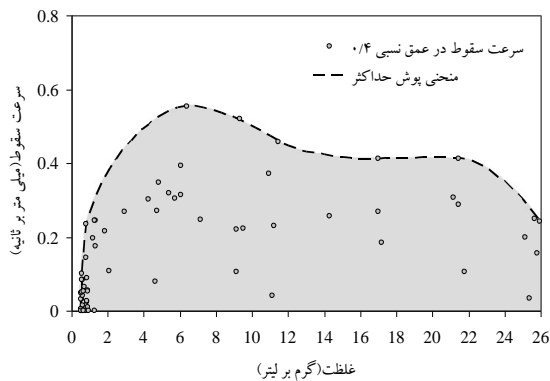
پس از رسم منحنی پوش حداکثر سرعت سقوط ذرات، نسبت به استخراج مشخصات غلظت و سرعت نقاط آزمایشگاهی واقع بر روی منحنی پوش کلیه سناریوها با اعماق نسبی ۰/۱ الی ۰/۷ اقدام گردید. سپس با استفاده از نرم افزار تحلیل‌گر آماری SPSS نسبت به استخراج معادله‌ها حاکم بر نقاط پوش تحت کلیه سناریوها اقدام شد.

بازوی بالارونده منحنی پوش غلظت-سرعت در واقع گویای چگونگی روند افزایش حجم ذرات فلوک کوچک را گزارش می‌نماید. بررسی‌ها نشان داد که روند تغییرات با توزیع لگاریتمی تناسب بهتری نشان می‌دهد. فرم این رابطه برای محدوده غلظت $0.5 \leq C < 6.5$ بصورت رابطه (۵) حاصل گردید.

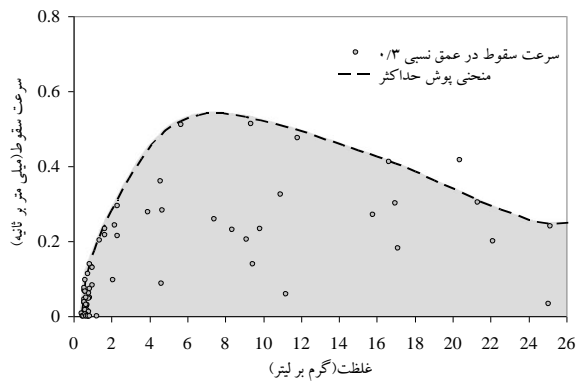
$$\omega_{\max} = 0.3141 + 0.1496 \ln|C - 0.3713| \quad (5)$$



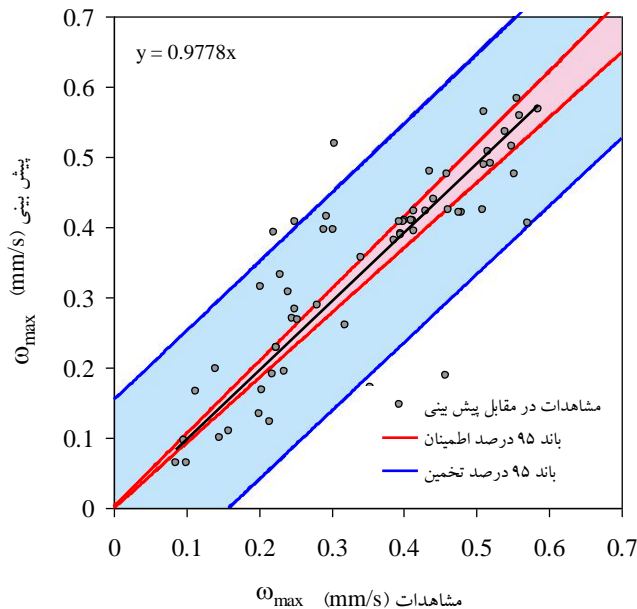
شکل ۱۳- تغییرات سرعت سقوط ذرات در مقابل غلظت در عمق نسبی ۰/۱



شکل ۱۶- تغییرات سرعت سقوط ذرات در مقابل غلظت در عمق نسبی ۰/۴



شکل ۱۵- تغییرات سرعت سقوط ذرات در مقابل غلظت در عمق نسبی ۰/۳



شکل ۱۷- مقایسه نتایج حاصل از تخمین ω_{max} در مقابل مشاهدات

شروع آزمایش، سرعت سقوط ذرات به واسطه تشکیل فلوک به حداکثر مقدار خود فزونی یافته و پس از ورود به ناحیه ته نشینی تأخیر یافته از سرعت ته‌نشست ذرات چسبنده کاسته می‌شود. علت کاهش سرعت سقوط ذرات به دلیل ته نشین شدن ذرات و فلوک‌های درشت‌تر و باقی ماندن ذرات ریزتر در سوسپانسیون می‌باشد. بررسی‌ها گویای آن است که تغییرات گرادیان حداکثر سرعت سقوط ذرات به میزان غلظت اولیه محلول مورد آزمون، وابستگی نشان می‌دهد. به گونه‌ای که با افزایش ۵۰ درصدی غلظت اولیه از چهار گرم به شش گرم، میزان حداکثر سرعت سقوط و به نوعی تسهیل شرایط تشکیل فلوک تا ۴۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اظهار نظر یاد شده به غلظت تا شش گرم بر لیتر ماده خشک محدود می‌گردد و با افزایش غلظت اولیه رسوبات به دلیل محدود شدن حرکت براونی

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی به روش استوانه ته‌نشینی، نسبت به ارزیابی اندرکنش غلظت رسوبات در مقایسه با سرعت سقوط آن‌ها در مخزن سد کرخه پرداخته شده است. یافته‌های حاصل از آزمون کلیه سناریوها، تحت غلظت‌های مختلف نشان داد که با افزایش عمق ستون آب، میزان غلظت نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که در آغاز کلیه سناریوها، سرعت سقوط رسوبات مورد آزمون در استوانه ته‌نشینی از روند افزایشی برخوردار بوده و پس از سپری شدن زمان، این تغییرات روند کاهشی به خود می‌گیرد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که کلیه رسوبات درون استوانه ته‌نشین شوند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در بازه‌های زمانی ۱۰ الی ۱۵ دقیقه از

مقیاس مخزن سد مورد مطالعه و همچنین نوع و اندازه ذرات رسوبات چسبنده جستجو نمود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق و تامین منابع مالی قدردانی می‌نمایند.

ذرات، این روند به ناحیه ته‌نشینی تأخیر یافته وارد می‌شود، به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت به ۲۵ گرم بر لیتر، سرعت سقوط حداکثر ۶۰ درصد کاهش یافته و به مقدار ۰/۲۲ میلی‌متر بر ثانیه محدود می‌گردد. نتایج این تحقیق از نقطه نظر کمی میزان سرعت حداکثر با نتایج محققین قبلی اندکی تفاوت نشان می‌دهد. ریشه اصلی تفاوت نتایج این تحقیق را با دیگران می‌بایست در تفاوت

منابع

- 1- Arman, A., Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S. and Alikhani, A., 2007. Effect of Flocculating and Dispersing Material on Concentration and Fall Velocity of Cohesive Sediments. *7th International River Engineering Conference Shahid, Chamran University*. (In Persian).
- 2- Camp, T.R., 1936. A study of the rational design of settling tanks. *Sewage Works Journal*, pp.742-758.
- 3- Fathi-Moghadam, M., Arman, A., Emamgholizadeh, S. and Alikhani, A., 2010. Settling properties of cohesive sediments in lakes and reservoirs. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(4), pp.204-209. (In Persian).
- 4- Floyd, I.E., Smith, S.J., Scott, S.H. and Brown, G.L., 2016. *Flocculation and Settling Velocity Estimates for Reservoir Sedimentation Analysis*. Engineer Research and Development Center Vicksburg ms Vicksburg United States.
- 5- Krishnappan, B.G., 2000. In situ size distribution of suspended particles in the Fraser River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(8), pp.561-569.
- 6- McLaughlin Jr, R.T., 1959. The settling properties of suspensions. *Journal of the Hydraulics Division*, 85(HY12), pp.9-41.
- 7- Mehta, A.J., Parchure, T.M., Dixit, J.G. and Ariathurai, R., 1982. Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds. *In Estuarine Comparisons* (pp. 591-609).
- 8- Ou, Y., Li, R. and Liang, R., 2016. Experimental study on the impact of NaCl concentration on the Flocculating Settling of Fine Sediment in Static Water. *Procedia Engineering*, 154, pp.529-535.
- 9- Ross, M.A. and Mehta, A.J., 1989. On the mechanics of lutoclines and fluid mud. *Journal of Coastal Research*, pp.51-62.
- 10- Samadi-Boroujeni, H., Naderi-Boldaji, M., 2009. Investigate of fall velocity of cohesive sediments using laboratory studies. *Irrigation Science and Engineering, Scientific Journal of Agriculture*, 34(2), pp.31-41. (In Persian).
- 11- Samadi-Boroujeni, H., Naghshbandi, S.A., 2014. Effect of Flocculation of Adhesive Sediments on Calculating the Fall of Sticky Sediments. *2nd International Congress on Structure, Architecture and Urban Development*. (In Persian).
- 12- Sanford, L.P., 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. *Flocculation in Natural and Engineered Environmental Systems*, pp.211-236.
- 13- Scully, R.W., Schiffman, R.L., Olsen, H.W. and Ko, H.Y., 1984. Validation of consolidation properties of phosphatic clay at very high void ratios. *In Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation* (pp. 158-181). ASCE.

- 14- Shin, H.J., Son, M. and Lee, G.H., 2015. Stochastic flocculation model for cohesive sediment suspended in water. *Water*, 7(5), pp.2527-2541.
- 15- 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 Technology*, 97(1), pp.26-34.
- 16- Toorman, E., 1992. Modelling of Fluid mud Flow and Consolidation.
- 17- Van Leussen, W., 1988. Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs a review. In *Physical Processes in Estuaries* (pp. 347-403). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 18- Van Leussen, W., 1999. The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary. *Journal of Sea Research*, 41(1-2), pp.109-118.
- 19- Wan, Y., Wu, H., Roelvink, D. and Gu, F., 2015. Experimental study on fall velocity of fine sediment in the Yangtze Estuary, China. *Ocean Engineering*, 103, pp.180-187.
- 20- Wang, D., Liu, X., Ji, Z., Dong, Z. and Hu, H., 2016. Influence of flocculation on sediment deposition process at the Three Gorges Reservoir. *Water Science and Technology*, 73(4), pp.873-880.
- 21- 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.
- 22- Yang, C.T., 1996. Sediment transport: theory and practice.
- 23- You, Z.J., 2004. The effect of suspended sediment concentration on the settling velocity of cohesive sediment in quiescent water. *Ocean Engineering*, 31(16), pp.1955-1965.