

بررسی آزمایشگاهی تأثیر غلظت‌های مختلف پساب شهری بر نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده با استفاده از فلوم دوار

میلاذ خواستار بروجنی¹، حسین صمدی^{2*}

1- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب

* شهر کرد، صندوق پستی 115

Samadi153@yahoo.com

چکیده - رسوب‌گذاری در کانال‌های انتقال آب یکی از معضلات اساسی در مدیریت شبکه‌های آبیاری است. در چند سال اخیر استفاده از پساب تصفیه شده شهری در کشاورزی مورد توجه قرار گرفته و این امر ممکن است موجب تشدید رسوبگذاری در کانال‌های انتقال شود. برای بررسی این موضوع در این پژوهش آزمایش‌هایی در فلوم دوار انجام و پروفیل سرعت و تنش برشی جریان با استفاده از دستگاه ADV اندازه‌گیری شد. نرخ ته‌نشینی در طول آزمایش‌ها (0-240 دقیقه)، بر اساس غلظت رسوبات معلق و با روش خشک کردن و توزین بدست آمد. نتایج نشان داد پساب سبب افزایش 39% نرخ ته‌نشینی رسوبات معلق نسبت به آب خالص می‌شود و تفاوت محسوسی بین نتایج 30 و 60 درصد پساب مشاهده نگردید. همچنین مشاهده شد در تمام آزمایش‌ها، ته‌نشینی مقدار معینی از رسوبات معلق در سیال حاوی پساب نسبت به آب خالص، در زمان کمتری اتفاق می‌افتد.

کلیدواژگان: نرخ ته‌نشینی، تنش برشی بستر، هم‌آوری، فلوم دوار.

1- مقدمه

آبیاری بسیار با اهمیت است. بهره‌برداری از فاضلاب شهری، مشکل آلودگی آب‌های سطحی را بر طرف می‌کند و نه تنها باعث حفظ منابع آب می‌شود، بلکه به علت وجود مواد و عناصر غذایی همچون نیتروژن و فسفر، برای رشد گیاهان بسیار سودمند است و میزان مصرف کودهای شیمیایی را کاهش خواهد داد. از مشکلات مهم در این زمینه، فاصله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از زمین‌های کشاورزی و هزینه انتقال پساب با احداث کانال‌های انتقال آب می‌باشد (عابدی و نجفی، 1380).

رشد جمعیت شهری از سویی و بالا رفتن سطح بهداشت و آگاهی مردم از سوی دیگر، موجب افزایش میزان مصرف آب شده که به دنبال آن، میزان فاضلاب نیز افزایش یافته است. در مناطق خشک و نیمه خشک از آن-جائی که دسترسی به منابع آب با کیفیت محدود می‌باشد، لذا بهره‌برداری از پساب شهری (فاضلاب تصفیه شده) و مخلوط کردن آن با آب‌های سطحی و زیرزمینی برای

نگرش اولیه ته‌نشینی رسوبات چسبنده توسط کرون (1962)، مهتا (1973) و پارتندیس (1975) آغاز شد. این محققان با استفاده از پارامتر تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی، روابط نرخ ته‌نشینی را ارائه دادند (مآ و همکاران، 2009). به طور کلی دو نوع ته‌نشینی کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می‌شود. وقتی که تنش‌برشی کف کوچک‌تر از تنش‌برشی بحرانی است، ته‌نشینی کامل صورت می‌گیرد و تمام ذرات رسوبی و توده‌ها ته‌نشین می‌شوند. رابطه زیر موسوم به رابطه ته‌نشینی کرون (1962) است که به عنوان یکی از روابط پایه برای محاسبه نرخ ته‌نشینی مطرح می‌باشد و در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد (هوانگ و همکاران، 2006).

$$Q_d = P_d \omega c \quad \text{for} \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad (1)$$

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

در روابط فوق، Q_d نرخ ته‌نشینی، P_d احتمال ته‌نشینی، ω سرعت سقوط توده‌ها، c غلظت رسوبات چسبنده معلق، τ تنش‌برشی جریان و $\tau_{d,full}$ تنش‌برشی بحرانی می‌باشد. متغیر P_d احتمال چسبیدن ذرات به بستر را نشان می‌دهد که همراه با جریان جابه‌جا نمی‌شوند. بخشی از این رسوبات چسبنده در ناحیه نزدیک بستر نمی‌توانند در برابر تنش‌برشی بزرگ در ناحیه مشترک آب و بستر مقاومت کند و به سمت بالا حرکت کرده و به صورت معلق در می‌آیند.

ته‌نشینی جزئی زمانی که تنش‌برشی کف بزرگ‌تر از تنش‌برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل و کوچک‌تر از مقدار تنش‌برشی آستانه ته‌نشینی باشد، اتفاق می‌افتد. در محدوده تنش‌برشی بستر، توده‌های نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های ضعیف به طور معلق باقی می‌مانند. ته‌نشینی جزئی از رابطه (3) به دست می‌آید. رابطه (3) حالت اصلاح شده رابطه نرخ ته‌نشینی کرون (1962) می‌باشد، با این تفاوت که برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است (هوانگ و

از طرفی یکی از معضلات اساسی در مدیریت شبکه‌های انتقال آب، مسأله رسوب‌گذاری است که علاوه بر کاهش ظرفیت انتقال کانال، موجب ایجاد هزینه‌های لای‌روبی و قطع آب کانال در زمان لای‌روبی می‌شود. بخش اعظم رسوبات در مجاری انتقال (حدود 70 تا 80 درصد) حاوی ذرات ریزدانه است که به طور کلی دارای قطری کمتر از 75 میکرون می‌باشند و ذرات رس و سیلت را شامل می‌شوند. رسوبات ریزدانه برخی از مواد سمی و آبریزان موجود اطراف خود را جذب و منتقل می‌کنند. این رفتار به سبب خاصیت قطبی بودن برخی از مواد شیمیایی و خصوصیات رسوبات ریزدانه می‌باشد که به خاطر سطح ویژه نسبتاً بالا و ظرفیت بالای تبادل یونی آنهاست (Haralampides et al., 2003).

ذرات رسی سبب چسبندگی رسوبات ریزدانه شده که این خاصیت موجب می‌شود دانه‌های رسوب، در حالت معلق به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگتر بدهند. به این عمل اصطلاحاً هم‌آوری می‌گویند (Huang et al., 2006). علاوه بر ذرات رسی در چسبندگی رسوبات ریزدانه، مواد ارگانیک نیز تأثیر زیادی دارند (Amelia et al., 2010). چسب بیولوژیکی از قبیل ترشحات خارج سلولی مواد ارگانیک سبب پایداری ذرات بستر و ایجاد چسبندگی بین آنها می‌شود. بعضی از مواقع، عوامل بیولوژیک ممکن است از تأثیرات الکتروشیمیایی در زمان چسبندگی مهم‌تر باشند (Ha, 2008).

توده‌های رسوبی تشکیل شده شبیه یک اجتماع کوچک ویژه هستند که دارای رفتار و فعل و انفعالات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختص به خود می‌باشند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی با ذرات اولیه دارند (Milburn and Krishnappan, 2001). اندازه توده‌ها نیز نقش اساسی در رفتار رسوبات چسبنده دارد، زیرا مدت زمان معلق بودن ذرات، سرعت ته‌نشینی و از همه مهم‌تر دو پدیده انتقال و ته‌نشینی رسوبات مرتبط با اندازه توده‌هاست (Fedrico, 2005).

همکاران، 2006).

$$Q_d = P_d \omega(c - c_{eq}) \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (3)$$

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}}, \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (4)$$

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

$$P_d = 0, \quad \text{for} \quad \tau \geq \tau_{d,part} \quad (5)$$

در روابط فوق، Q_d نرخ ته‌نشینی، P_d احتمال ته‌نشینی، ω سرعت سقوط توده‌ها، c_{eq} غلظت تعادلی، c غلظت رسوبات معلق و $\tau_{d,part}$ تنش برشی ته‌نشینی جزئی می‌باشد.

Haralampides et al. (2003) با استفاده از فلوم دوار ته‌نشینی رسوبات رودخانه کلایر را مطالعه کردند. این محققان دریافتند که تنش برشی بستر تأثیرگذارترین عامل در نرخ ته‌نشینی رسوبات ریزدانه است و تنش برشی بهینه‌ای وجود دارد (در آن تحقیق 0/17 نیوتن بر متر مربع) که سبب تشکیل توده‌های با بزرگترین اندازه می‌شود.

راند و ملتون (1997) در تحقیقات خود نشان دادند که مقدار PH بر مقاومت نیروی بین ذره‌ای تأثیرگذار است، به طوری که مقدار کم PH نیروی چسبندگی بین ذرات را افزایش می‌دهد که بر روی مقاومت رسوبات چسبنده در برابر تنش برشی بستر و نرخ ته‌نشینی بستر تأثیرگذار است (آملیا و همکاران، 2010).

Amelia et al., (2010) در بررسی میزان ته‌نشینی و فرسایش رسوبات در چهار بندرگاه شمالی کشور پرتغال نشان دادند که شوری مقاومت بین ذرات را با افزایش هم‌آوری‌شدن (به دلیل تغییر در تنش برشی بحرانی) تغییر می‌دهد.

با توجه به استفاده مخلوط پساب و آب سطحی در چند سال اخیر برای مصرف کشاورزی و حساسیت رسوبات ریزدانه به خصوصیات محلول و همچنین اهمیت عدم

رسوب‌گذاری کانال‌های انتقال، بررسی تأثیر پساب تصفیه شده شهری بر نرخ ته‌نشینی رسوبات معلق ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور در این تحقیق سعی شد که تأثیر پساب بر نرخ ته‌نشینی رسوبات ریزدانه در حالتی که سیال ساکن نبوده و عمل هم‌آوری و ته‌نشینی رسوبات چسبنده تحت تأثیر تنش برشی و آشفتگی جریان است، مورد بررسی قرار گیرد.

2- مواد و روش‌ها

الف - تجهیزات آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر تأثیر غلظت‌های مختلف پساب شهری (فاضلاب تصفیه شده) بر نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین روند تأثیر پساب، علاوه بر آب خالص از غلظت‌های 30 و 60 درصد پساب (W_{60} و W_{30}) استفاده شد. با توجه به حجم مورد نیاز در آزمایش‌ها (300 لیتر) برای تهیه محلول 30 و 60 درصد پساب به ترتیب 90 و 180 لیتر پساب نیاز است. پساب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه شد که برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی پساب و آب آزمایشگاه به شرح جدول 1 است. با مقایسه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پساب با مقادیر محدوده استاندارد (اسپلمن، 2003) مشاهده می‌شود کیفیت پساب از نظر استاندارد در حد مطلوبی می‌باشد. رسوبات نیز از بستر مخزن سدخاکی پیربلوط واقع در حوضه کارون شمالی، برداشت گردید. به منظور مطالعه در مورد رسوبات چسبنده، رسوبات برداشت شده از الک شماره 200 عبور داده شد و سپس مورد استفاده قرار گرفت. رسوبات اصلاح شده شامل 63/2 درصد رس از نوع مونت-موریلونیت و 36/8 درصد سیلت بود. مقدار تنش برشی آستانه ته‌نشینی برای رسوبات مورد استفاده در سطوح 0، 30 و 60 درصد پساب به ترتیب 1/01، 1/11 و 1/12 نیوتن بر متر مربع بدست آمد (خواستار بروجنی، 1390).

دارد. 16 عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل 5/3، 10/5، 18/3 و 25 سانتی‌متر از کف برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، تعبیه شده است. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش می‌باشد که قابلیت حرکت در جهت‌های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم نموده است. سرعت چرخش فلوم و درپوش توسط دو دستگاه اینورتر تنظیم می‌شود. شکل 1 نمای کلی فلوم دایره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل 1 اجزای فلوم دایره‌ای مورد استفاده

ب- نحوه انجام آزمایش‌ها

پارامترهای هیدرولیکی

به منظور اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، نظیر سرعت و تنش‌برشی در فلوم دوار از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) مدل Victorino⁺ استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها با فرکانس 200Hz انجام گرفت و هر اندازه‌گیری برای مدت یک دقیقه ادامه یافت. بدین ترتیب سرعت متوسط نقطه‌ای (u,v,w) از میانگین $60 \times 200 = 12000$ سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه بدست آمد. نقاط اندازه‌گیری در مقطع عرضی فلوم مطابق شکل 2 انتخاب شد و سرعت متوسط با توجه به منطقه تأثیر هر نقطه بصورت وزنی محاسبه شد. در این آزمایش‌ها توزیع سرعت و تنش‌برشی

جدول 1 برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پساب و آب آزمایشگاه

ویژگی	واحد	پساب	آب آزمایشگاه	محدوده استاندارد
هدایت الکتریکی	ds/m	0/775	0/328	-
واکنش (PH)		7/89	7/25	6/5 - 9/0
جرم مخصوص	kg/m ³	989/5	997/1	-
غلظت کل جامدات حل شده	mg/L	441/8	-	2500
پتاسیم	mg/L	2/64	-	بدون حد
سدیم	mg/L	2/52	0/19	بدون حد
کلسیم	mg/L	65/44	-	-
منیزیم	mg/L	16/66	-	100
نیترات	mg/L	15/48	3/96	20-85
اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)	mg/L	18/45	2/61	بدون حد
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	30	-	200-500
کلراید	mg/L	85	-	600
نسبت جذب سدیم (SAR)	mol/L	1/66	0/13	-

فلوم آزمایشگاهی

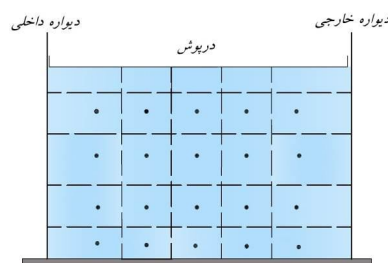
در چند دهه اخیر استفاده از فلوم‌های مستقیم برای انجام مطالعات رسوبات چسبنده منسوخ شده و فلوم‌های دایره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (وینترورپ، 2007). زیرا انتقال رسوبات ریزدانه فرایندی زمان‌بر است که از یک ساعت تا روزها به طول می‌انجامد و رسیدن به چنین زمانی با استفاده از فلوم مستقیم عملی نیست، لذا در این تحقیق برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز از فلوم آزمایشگاهی دایره‌ای استفاده شد. این فلوم از جنس گالوانیزه ساخته شده که مجهز به پنجره‌های پلکسی‌گلس می‌باشد. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب 1/3، 1/9 و 1/6 متر است. درپوش از جنس پلکسی‌گلس با قطر 1/6 متر در داخل فلوم بگونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله

و 60 درصد) تحت پنج تنش برشی (اختلاف دور فلوم و درپوش) انجام پذیرفت.

در ابتدا تنش‌های برشی به گونه‌ای انتخاب شد که برای تمام غلظت‌های رسوب و درصد‌های مختلف پساب مناسب باشد. بدین ترتیب برای مشخص شدن تنش برشی حداقل و حداکثر، از محلول آب با 30 درصد پساب فاضلاب استفاده شد. آزمایش‌ها به نحوی صورت گرفت که غلظت 5 گرم بر لیتر رسوبات (حداقل غلظت)، برای تعیین تنش برشی حداکثر و غلظت 20 گرم بر لیتر (حداکثر غلظت) نیز برای تعیین تنش برشی حداقل مورد استفاده قرار گرفت. تنش برشی (اختلاف سرعت فلوم و درپوش) که 80% رسوبات معلق ته‌نشین شوند، به عنوان تنش برشی حداقل و تنش برشی که 80% رسوبات به صورت معلق باقی بمانند، به عنوان تنش برشی حداکثر انتخاب شد. نهایتاً آزمایش‌ها تحت پنج تنش برشی 0/13، 0/20، 0/32، 0/45 و 0/65 نیوتن بر مترمربع (مجموع دور فلوم و درپوش به ترتیب 3/2، 3/4، 4/2، 4/9 و 6/2 دور بردقیقه) انجام پذیرفت. سرعت چرخش فلوم و درپوش با استفاده از دستگاه اینورتر تنظیم شد.

به منظور انجام آزمایش‌ها، محلول رسوب با غلظت‌های اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و تا ارتفاع 20 سانتی-متر در فلوم ریخته شد. برای کامل مخلوط شدن آب رسوب و خرد شدن توده‌های رسوبی، فلوم و درپوش را با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش 31 دور بر دقیقه)، که تنش برشی برابر با $11/2 \text{ N/m}^2$ ایجاد می‌کند، در جهت مخالف به مدت 30 دقیقه به گردش درآمد. بر اساس نتایج کرون (1963)، در تنش برشی $2/2 \text{ N/m}^2$ هیچ فلوکی در مقابل تنش برشی جریان مقاومت نکرده و تمام ذرات از یکدیگر مجزا خواهند شد. کریشناپان (2006)، هارلامپدیس و همکاران (2003) و اسکافیل و کریشناپان (1998) در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (تنش برشی

برای پنج اختلاف سرعت فلوم و درپوش و چهار نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ($\alpha=1, 1/1, 1/2, 1/3$) مورد بررسی قرار گرفت. اولین مقطع در 5 سانتی‌متری دیواره داخلی قرار دارد و مقاطع بعدی با همین 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، بصورت وزنی محاسبه می‌شود. به منظور کار با این دستگاه از پایه‌ای سوار بر فلوم استفاده شد که علاوه بر حرکت سرعت‌سنج در عرض کانال، امکان جابه‌جایی عمودی و یا زاویه‌دار قرار گرفتن سرعت‌سنج را در فلوم فراهم می‌کند.



شکل 2 موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع عرضی فلوم دوار

با توجه به اطلاعات بدست آمده از سرعت‌سنج ADV، پروفیل سرعت، توزیع تنش برشی و خطوط هم سرعت برای هر نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ترسیم و با توجه مقادیر انحراف معیار سرعت‌های لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط در هر نسبت، بهترین نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم برای رسیدن به توزیع یکنواخت تنش برشی در عرض 1/1 بدست آمد (خواستار بروجنی، 1390). کریشناپان و انجل (2004) این نسبت را برای عمق 12 سانتی‌متر فلوم دواری در کانادا 1/17 بدست آوردند.

3- طراحی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در سه غلظت رسوب 5، 10 و 20 گرم بر لیتر (C_5, C_{10} و C_{20}) و سه سطح مختلف پساب شهری (0، 30

4- بحث و نتایج

پارامترهای هیدرولیکی

براساس داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV، رابطه (7) بین دور فلوم و سرعت متوسط جریان به دست آمد. در ادامه بررسی‌ها مشاهده شد پروفیل سرعت در فلوم دوار بصورت قابل قبولی مشابه کانال‌های باز می‌باشد (خواستار بروجنی، 1390).

$$V = 0.2085 \ln(\varphi) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (7)$$

در تعیین تنش برشی از کواریانس سرعت‌های لحظه‌ای (تنش رینولدز) اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV استفاده شد و مقادیر تنش برشی در آزمایش‌ها مشخص و رابطه بین دور فلوم و تنش برشی کف بدست آمد.

$$\tau = 0.0256 \varphi^{1.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad (8)$$

در روابط (7) و (8)، V سرعت متوسط جریان، τ تنش-برشی متوسط جریان (N/m^2) ، φ مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه) می‌باشند. هوکیانگ‌ها و ماآ (2009) در تحقیقات خود، رابطه بین تنش برشی و سرعت چرخش فلوم دوار را به صورت نمایی بدست آوردند.

نرخ ته‌نشینی

شکل 3 تغییرات نرخ ته‌نشینی را در طول آزمایش (0-240 دقیقه) برای سطوح مختلف پساب نشان می‌دهد. با توجه به شکل 3، می‌توان اثر تنش برشی و غلظت اولیه رسوبات را در تغییرات نرخ ته‌نشینی مشاهده کرد. در حالت اول به ازای هر مقدار مشخصی از تنش برشی، با افزایش غلظت رسوبات نرخ ته‌نشینی نیز افزایش می‌یابد، زیرا افزایش غلظت رسوبات، برخورد بین توده‌های رسوبی را افزایش داده و به دنبال آن تشکیل توده‌ها با اندازه بزرگ‌تر را در پی دارد. شیب خطوط ترسیم شده در شکل‌های فوق نشان می‌دهد، افزایش نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی کوچک، بیشتر می‌باشد که این امر حاکی از نقش مضاعف تنش-برشی در ساختار و آرایش توده‌های رسوبی می‌باشد.

معادل 0/6 نیوتن بر مترمربع) زمان 20 دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است. پس از اتمام این زمان سرعت چرخش فلوم و درپوش تا رسیدن به سرعت مورد نظر آزمایش کاهش یافت و هر آزمایش 240 دقیقه به طول انجامید. در یک ساعت اول هر 15 دقیقه یکبار و در ادامه با فواصل زمانی 30 دقیقه‌ای نمونه‌گیری انجام شد. در هر زمان از سه عمق 5/5، 10/3 و 18/3 سانتی‌متری نمونه‌گیری به عمل آمد که هر نمونه دارای حجم مشخصی (تقریباً 50 سی‌سی) است و به طور مساوی از چهار موقعیت مختلف فلوم گرفته می‌شود. سپس با خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوبات معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

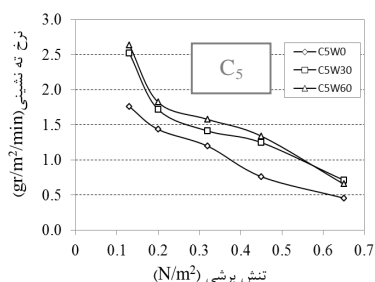
برای محاسبه نرخ ته‌نشینی از رابطه (6) استفاده شد. از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب ته‌نشینی مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و سطح فلوم، نرخ متوسط ته‌نشینی در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم بدست می‌آید.

$$Q_d = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (6)$$

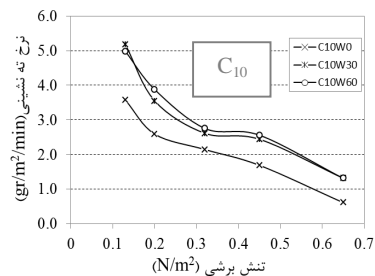
در رابطه فوق، Q_d نرخ ته‌نشینی $(gr/m^2/min)$ ، C_i غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)، V حجم سیال موجود در فلوم (مترمکعب)، t_i زمان (دقیقه) و A مساحت بستر فلوم (مترمربع) می‌باشد.

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 شده است 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. (خواستار بروجنی، 1390).

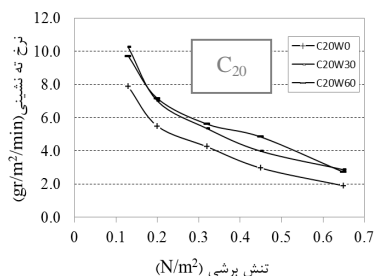
غلظت نشان می‌دهد.



الف - غلظت 5 گرم بر لیتر



ب - غلظت 10 گرم بر لیتر

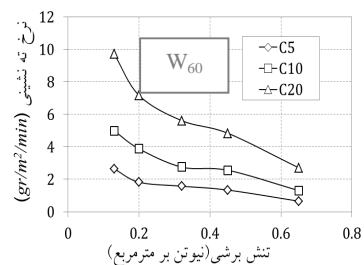


ج - غلظت 20 گرم بر لیتر

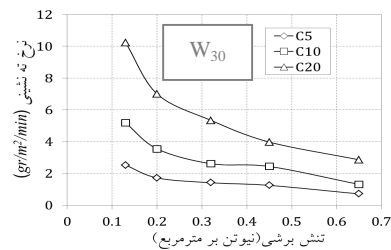
شکل 4 تغییرات نرخ ته‌نشینی در برابر تنش برشی جریان برای سطوح مختلف غلظت - (0-240 دقیقه)

همان‌طور که مشخص است، پساب سبب افزایش نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده معلق شده است و این افزایش در غلظت‌های بزرگ‌تر مشهودتر است. همچنین قابل مشاهده است که تفاوت چشمگیری بین نتایج سیال حاوی پساب 30 و 60 درصد وجود ندارد.

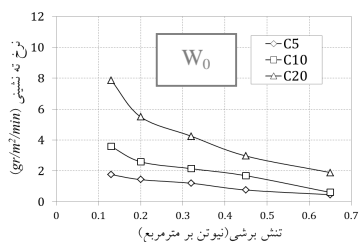
با توجه به این موضوع که محلول 30 و 60 درصد پساب تقریباً تأثیر یکسانی در افزایش مقدار نرخ ته‌نشینی رسوبات معلق دارند، از متوسط مقدار نرخ ته‌نشینی در سیال 30 و 60 درصد پساب برای تعیین مقدار افزایش



الف - پساب 60%



ب - پساب 30%



ج - آب خالص

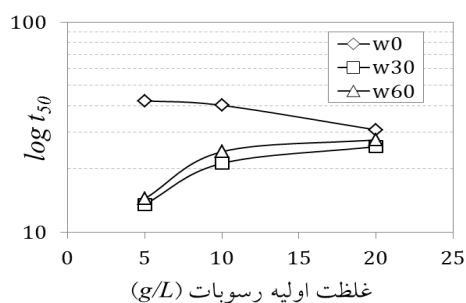
شکل 3 تغییرات نرخ ته‌نشینی در برابر تنش برشی جریان برای غلظت‌های مختلف پساب - (0-240 دقیقه)

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

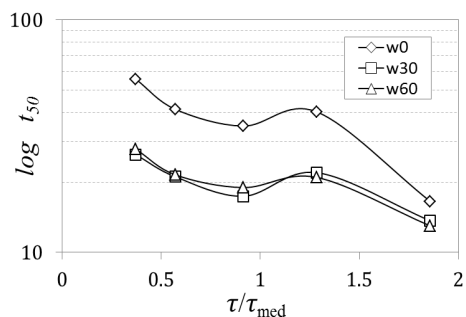
کریشناپان (2006) در تحقیقات خود پیرامون توده‌ای شدن ذرات چسبنده، با اندازه‌گیری قطر ذرات در حین آزمایش‌ها، تأثیر مضاعف تنش برشی را مشاهده کرد.

شکل 4 نرخ ته‌نشینی را برای سطوح مختلف پساب و

مخالف یکدیگر است. در آب خالص با افزایش غلظت اولیه مقدار متوسط t_{50} در تنش‌های مختلف، کاهش می‌یابد. در صورتی که این پارامتر در 30 و 60 درصد پساب با افزایش غلظت اولیه، افزایش می‌یابد.



الف- متوسط t_{50} در تنش‌های برشی متفاوت در برابر غلظت اولیه



ب- متوسط t_{50} در غلظت‌های اولیه متفاوت در برابر تنش-برشی بستر

شکل 5 تاثیر تنش‌برشی و غلظت اولیه رسوبات بر زمان لازم برای ته‌نشینی 50 درصد رسوبات

در غلظت‌های کوچک اختلاف بیشتری بین مقدار t_{50} در آب خالص و پساب مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت این اختلاف کاهش می‌یابد. مقدار t_{50} در آب خالص نسبت به سیال حاوی پساب همواره بزرگ‌تر می‌باشد.

شکل 5- ب مقدار t_{50} در مقیاس لگاریتمی را در برابر تنش‌برشی نسبی (نسبت به تنش‌برشی متوسط) نشان می‌دهد. در هر سه حالت با افزایش تنش‌برشی مقدار t_{50} کاهش می‌یابد، اما مشخص است که در یک مقدار تنش-برشی نسبی، زمان رسیدن به 50 درصد ته‌نشینی در آب

نرخ ته‌نشینی در محلول حاوی پساب نسبت به آب خالص استفاده شد که نتایج به شرح جدول 2 می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار افزایش نرخ ته‌نشینی در محلول حاوی پساب نسبت به آب خالص، برای غلظت‌های 5، 10 و 20 گرم بر لیتر به ترتیب 39، 42 و 36 درصد می‌باشد. بر این اساس می‌توان استنباط نمود که در این آزمایش‌ها پساب به طور متوسط سبب افزایش 39 درصدی نرخ ته‌نشینی می‌شود.

جدول 2 مقدار افزایش نرخ ته‌نشینی رسوبات معلق در محلول حاوی پساب نسبت به آب خالص

متوسط در هر غلظت	تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)					غلظت رسوب (gr/L)
	0/65	0/45	0/32	0/20	0/13	
5	%50	%50	%25	%23	%47	5
10	%42	%52	%48	%25	%43	10
20	%36	%47	%49	%29	%27	20

یکی دیگر از معیارهای محاسبه نرخ ته‌نشینی، زمان ته‌نشینی است که توسط مهتا و پارتندیس (1973) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نظریه این محققان مقدار رسوباتی که می‌توانند ته‌نشین شوند، برابر با $C_0 - C_{eq}$ خواهد بود. از طرفی میزان رسوباتی که در زمان t ته‌نشین می‌شوند (C^*) با استفاده از رابطه (9) بدست می‌آید (پارتندیس 2009):

$$C^* = \frac{C_0 - C}{C_0 - C_{eq}} \quad (9)$$

در رابطه فوق C_0 غلظت اولیه رسوبات، C_{eq} غلظت در زمان تعادل و C غلظت رسوبات در زمان t می‌باشد.

برای مطالعه نرخ ته‌نشینی کافی است که C^* در برابر t/t_{50} ترسیم شود. t_{50} زمان لازم برای ته‌نشینی 50 درصد رسوبات است.

با توجه به شکل 5- الف مشخص است که الگوی تغییرات متوسط t_{50} برای آب خالص، 30 و 60 درصد پساب کاملاً

همان‌طور که از مقادیر جدول 3 مشخص است، رابطه خطی بین احتمال ته‌نشینی و تنش برشی برقرار است و با افزایش تنش برشی احتمال ته‌نشینی کاهش می‌یابد. همچنین مشابه قبل، نقش پساب در تنش‌های برشی بزرگ‌تر مشهودتر است و تفاوتی چندانی بین سطح 30 و 60 درصد پساب وجود ندارد.

جدول 3 متوسط احتمال ته‌نشین شدن توده‌های رسوبی در سطوح مختلف پساب و تنش برشی بستر

تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)					
میزان پساب (%)	0/13	0/20	0/32	0/45	0/65
0	87%	80%	68%	55%	36%
30	88%	82%	71%	59%	41%
60	88%	82%	71%	60%	42%

5- نتیجه‌گیری

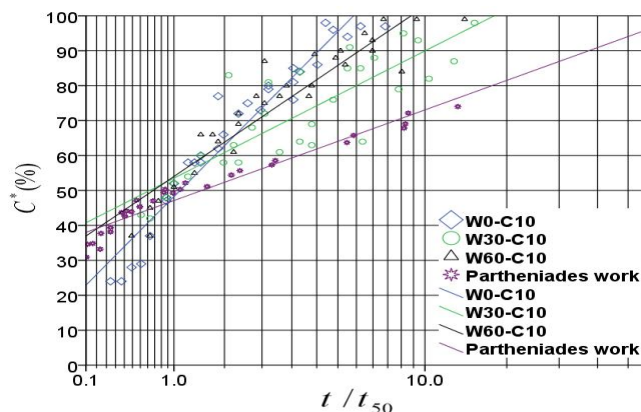
نتایج این تحقیق نشان داد پساب به طور متوسط سبب افزایش 39% نرخ ته‌نشینی رسوبات ریزدانه نسبت به آب خالص شده و تفاوت چندانی بین 30 و 60 درصد پساب وجود ندارد. برای تمامی آزمایش‌ها زمان رسیدن به مقدار مشخصی از ته‌نشینی در سیال حاوی پساب در زمان کمتری اتفاق می‌افتد.

خالص نسبت به سیال حاوی پساب، بزرگ‌تر است. با افزایش تنش برشی اختلاف مقدار t_{50} در آب خالص و سیال حاوی پساب، کاهش می‌یابد.

شکل 6 مقادیر C^* را در سطوح مختلف تنش برشی و پساب در برابر (t/t_{50}) برای غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر برای تحقیق حاضر و نتایج پارتندیس (2009) برای رس کائولونیت و غلظت اولیه 11/5 گرم بر لیتر نشان می‌دهد. با توجه به شیب خطوط مربوط به سطوح مختلف پساب مشخص است که مقدار مشخصی از ته‌نشینی، در سیال حاوی پساب در زمان کمتری نسبت به آب خالص اتفاق می‌افتد. نتایج برای غلظت‌های 5 و 20 گرم بر لیتر نیز نتایج یکسان به دست آمد.

احتمال ته‌نشینی

با توجه به مشخص بودن مقادیر تنش برشی آستانه ته‌نشینی و تنش برشی بستر و نظر به این‌که آزمایش‌های ته‌نشینی این تحقیق از نوع ته‌نشینی جزئی می‌باشد، احتمال ته‌نشینی را می‌توان به شکلی که در رابطه (4) در قسمت مقدمه بیان شد، محاسبه نمود. از آنجا که تنش-برشی بستر در آزمایش‌ها کوچک‌تر از مقدار تنش برشی آستانه ته‌نشینی می‌باشد، احتمال ته‌نشینی همواره بزرگ‌تر از صفر خواهد بود.



شکل 6 مقایسه ارتباط غلظت، زمان برای آب خالص، 30 و 60 درصد پساب و نتایج پارتندیس (2009) در غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر

عابدی، م. نجفی، پ. (1380). استفاده از پساب تصفیه شده در کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

Amelia V.C.M. Teixeira C.F.J. and Senhorinha. (2010). "Physical characterization of estuarine sediments in the northern coast of Portugal", *Journal of Coastal Research*, 26, 2, pp. 301-311.

Fedrico M. (2005). Flocculation dynamics of cohesive sediment. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering* of the Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

Haralampides K., Mc Corquodale. A., and Krishnappan, B. G. (2003). "Deposition properties of fine sediment", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 129, 3, pp. 230-234.

Ha, K.H. (2008). Acoustic measurements of cohesive sediment transport: suspension to consolidation. PhD dissertation, University Park, Pennsylvania

Ha, K.H. and Maa, J.P.-Y. (2009). "Evaluation of two conflicting paradigms for cohesive sediment deposition", *Elsevier, Marine Geology* 265, pp. 120-129.

Huang J. Hilldate R.C. and Greiman B.P. (2006). *Erosion and sedimentation manual*, U.S. Department of the Interior. United States Bureau of Reclamation.

Krishnappan B.G. (2006). "Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume", 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE), Sep10-13, Philadelphia, USA.

Milburn D. and Krishnappan B.G. (2001). "Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River", Northwest Territories, Canada. Paper presented at the 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. 19-24.

partheniades e. (2009). *Cohesive sediments in open channels*, (1st Ed), Elsevier Inc, Burlington, USA.

Skafel M.G. and Krishnappan B.G. (1998). A laboratory investing of depositional characteristics of mud from an inland harbour using a rotating circular flume. *Water, Air, and Soil Pollution*, 112, pp. 1-19.

Winterwerp, J.C. (2007). On the sedimentation rate of cohesive sediment, 7th Int. Conf. on Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics, pp. 209-226.

نتایج نشان داد که در تنش‌های برشی کوچک نرخ ته‌نشینی بیشتر است و افزایش تنش برشی سبب کاهش آن می‌شود. این امر حاکی از آن است که تنش برشی نقش مضاعف در ته‌نشینی ذرات دارد و بیشترین ته‌نشینی در تنش برشی اتفاق خواهد افتاد که علاوه بر این که سبب افزایش برخورد بین توده‌های رسوبی شده، به اندازه‌ای بزرگ نباشد که سبب خرد شدن آن‌ها شود. همچنین مشخص شد که در تنش برشی یکسان، برای سطوح مختلف پساب، افزایش غلظت اولیه رسوبات سبب افزایش نرخ ته‌نشینی می‌شود. با توجه به افزایش نرخ ته‌نشینی رسوبات معلق ریزدانه در طراحی کانال‌های حاوی پساب، بهتر است ضریب اطمینانی در طراحی کانال‌ها برای شرایط غیر رسوبگذار در نظر گرفته شود. در این ارتباط انجام آزمایش‌های ته‌نشینی برای ارائه یک طرح موفق ضروری می‌باشد.

6- فهرست علائم

α	نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم
τ_b	تنش برشی بستر
τ_c	تنش برشی بحرانی
$\tau_{d,pari}$	تنش برشی برای ته‌نشینی جزئی
$\tau_{d,full}$	تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل
C	غلظت رسوبات معلق
C_{eq}	غلظت تعادلی
C_0	غلظت اولیه رسوبات
W_0	سیال بدون پساب (آب خالص)
W_{30}	سیال حاوی 30 درصد پساب
W_{60}	سیال حاوی 60 درصد پساب
y	عمق جریان

7- منابع

خواستار بروجنی، م. (1390). بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبیده در کانال‌های انتقال آب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.