

## بررسی آستانه ته‌نشینی رسوبات چسبنده معلق با استفاده از مدل آزمایشگاهی فلوم دایره‌ای

حسین صمدی بروجنی<sup>۱\*</sup>، مهدی نادری بلداجی<sup>۲</sup> و روح‌الله فتاحی نافچی<sup>۳</sup>

### چکیده

فلوکوله شدن رسوبات چسبنده باعث افزایش میزان ته‌نشینی می‌شود. در این تحقیق، آزمایش‌هایی در یک فلوم دایره‌ای اجرا شد. رسوبات مورد استفاده، از مخزن سد کوچک گهرباران واقع در نزدیکی شهرکرد (از زیرحوضه‌های کارون شمالی) برداشت شد. این رسوبات متشکل از ۳۱ درصد رس، ۵۸ درصد سیلت و ۱۱ درصد ماسه بود. پروفیل سرعت و تنش برشی جریان (در بستر) با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ADV و غلظت رسوبات با روش خشک کردن و توزین اندازه‌گیری شد. مدت هر آزمایش ۱۸۰ دقیقه و زمان لازم برای رسیدن به غلظت تعادلی برای آزمایشات مختلف بین ۳۰ تا ۶۰ دقیقه بود. نتایج نشان می‌دهد که بین تنش برشی بستر و غلظت نسبی تعادلی، رابطه خطی حاکم است. نرخ ته‌نشینی رسوبات براساس تغییرات زمانی غلظت رسوب محاسبه شد. این پارامتر و غلظت نسبی تعادلی رابطه غیرخطی از نوع درجه دوم دارند. همچنین آستانه عدم ته‌نشینی رسوبات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در آزمایشات با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، تنش برشی آستانه ته‌نشینی به ترتیب ۰/۸۲۷، ۰/۹۳۸ و ۰/۹۸ نیوتن بر مترمربع است. این نتیجه نشان می‌دهد بین حداقل تنش برشی موردنیاز جریان برای ته‌نشینی رسوبات چسبنده و غلظت اولیه رابطه مستقیم وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** رسوبات چسبنده، فلوم دوار، نرخ ته‌نشینی و تنش برشی.

**ارجاع:** صمدی بروجنی ح. نادری بلداجی م. و فتاحی نافچی ر. ۱۳۸۹. بررسی آستانه ته‌نشینی رسوبات چسبنده معلق با استفاده از مدل آزمایشگاهی فلوم دایره‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۷۵-۸۲.

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\*نویسنده مسئول: [samadi153@yahoo.com](mailto:samadi153@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۶/۰۳

## مقدمه

رسوبات چسبنده به رسوباتی گفته می‌شود که اندازه‌ای کوچک (در حد چند میکرون) و خاصیت چسبندگی داشته باشد. معمولاً کانی‌های رسی دارای چنین خاصیتی هستند. این خاصیت موجب می‌شود دانه‌های رسوب، در حالت معلق بودن به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگتر یا فلوک بدهند. به این فرآیند، به اصطلاح فلوکوله شدن می‌گویند. خواص فیزیکی و شیمیایی آب و رسوب و اندرکنش آنها موجب شدت یا ضعف این فرآیند می‌شود. وزن یک ذره رسوب چسبنده کوچک، به اندازه‌ای نیست که باعث ته‌نشینی آن در زمان معلق بودن شود. زیرا هرگونه آشفتگی و یا نوسان در جریان، بر وزن ذره غالب خواهد شد. همچنین ممکن است ذرات به وسیله تنش حاصل از آشفتگی شکسته شوند. خصوصیات ساختمانی (اندازه، چگالی و شکل) توده حاصل از به هم چسبیدن ذرات، سرعت ته‌نشینی را مشخص می‌کند. در حقیقت خصوصیات چسبندگی سیلت به دلیل وجود رس نمایان می‌شود ولی به طور کلی در مباحث مهندسی، رس و لای هر دو رسوبات چسبنده به شمار می‌آیند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

زمانی که تنش برشی کف، کمتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی باشد، ته‌نشینی اتفاق خواهد افتاد. فقط توده‌های شکل گرفته که دارای نیروی کافی برای مقاومت در مقابل تنشهای فوق‌العاده قوی در منطقه نزدیک بستر هستند، ته‌نشین شده و به بستر خواهند چسبید. مهتا و پارتیاداس (۱۹۷۳) مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار رسوبات چسبنده که منجر به ته‌نشینی آنها می‌شود انجام داده و دریافتند که ته‌نشینی به وسیله تنش برشی بستر، فرایندهای حاصل از آشفتگی جریان در ناحیه نزدیک بستر، سرعت ته‌نشینی، نوع رسوبات، عمق جریان، غلظت رسوبات معلق و محتوای یونی سیال، کنترل می‌شود.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که به طور کلی ته‌نشینی را می‌توان به دو شکل ته‌نشینی کامل و ته‌نشینی جزئی در نظر گرفت. زمانی که تنش برشی بستر کوچکتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل است، در نهایت تمامی ذرات رسوب و توده‌های حاصل از به هم چسبیدن آنها، ته‌نشین می‌شوند. معادله نرخ ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) به این شکل است.

$$Q_d = P_d w C \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad (1)$$

که در آن:  $Q_d$  نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده (کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه)،  $w$  سرعت ته‌نشینی ذره (متر بر ثانیه)،  $C$

غلظت رسوب معلق (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $P_d$  احتمال ته‌نشینی (در واقع احتمال چسبیدن فلوک‌ها به بستر و دوباره به حرکت در نیامدن آنها در مقابل تنش‌های برشی وارده بر بستر)،  $\tau$  تنش برشی بستر و  $\tau_{d,full}$  تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل (نیوتن بر متر مربع) است که در زیر این تنش، تمام ذرات ته‌نشین می‌شوند. در واقع مقداری از رسوبات ته‌نشین شونده در نزدیک ناحیه بستر نخواهند توانست در مقابل تنش برشی بزرگ موجود در مرز آب و رسوب مقاومت کرده، شکسته شده و دوباره به حالت معلق درخواهند آمد. معادله احتمال ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) به این شکل است (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

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

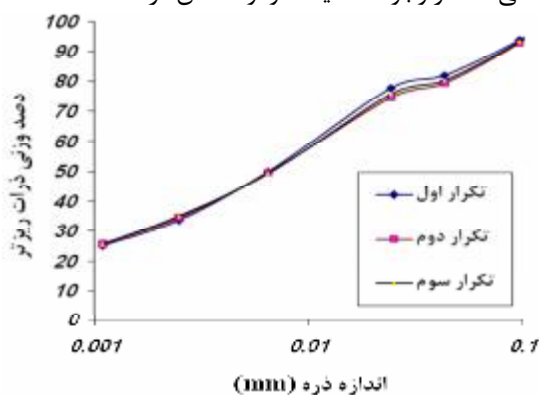
آزمایش‌های زیادی انجام شده که مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته‌نشینی کامل معین کنند. در این آزمایش‌ها اعدادی بین ۰/۰۶ تا ۱/۱ نیوتن بر متر مربع براساس نوع رسوب و غلظت آن به دست آمد. کرون (۱۹۶۲)، یک سری آزمایش در فلوم انجام داد و تنش برشی بحرانی را برای ته‌نشینی کامل رسوبات خلیج سان‌فرانسیسکو معین کرد. وی دریافت، زمانی که غلظت رسوبات معلق کمتر از ۰/۳ گرم بر لیتر باشد، آنگاه تنش برشی ته‌نشینی کامل رسوبات برابر ۰/۰۶ نیوتن بر مترمربع و هنگامی که غلظت رسوبات چسبنده معلق مذکور بین ۰/۳ تا ۱۰ گرم بر لیتر باشد، تنش بحرانی ته‌نشینی کامل برابر ۰/۰۷۸ نیوتن بر متر مربع خواهد بود (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). معروفترین معادله برای تعیین نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده اینشتین-کرون (۱۹۶۲) است (نگوین و همکاران، ۲۰۰۷).

ته‌نشینی جزئی، هنگامی اتفاق می‌افتد که تنش برشی کف از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل بزرگتر بوده ولی از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی جزئی  $\tau_{d,part}$  کوچکتر باشد. در این محدوده از تنش‌های برشی، ذرات توده شده نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های نسبتاً ضعیف در مخلوط سوسپانسیون باقی می‌مانند. معادله نرخ ته‌نشینی جزئی به این شکل است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

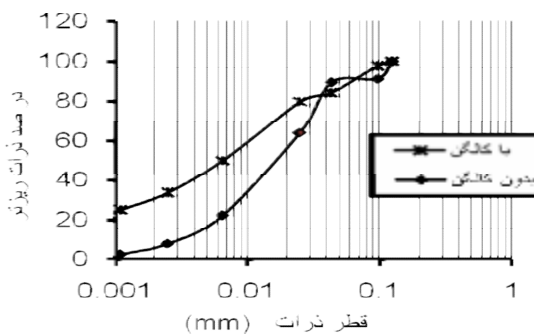
$$Q_d = P_d w (C - C_{eq}) \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (3)$$

در این رابطه،  $C_{eq}$  غلظت تعادلی رسوبات (کیلوگرم بر متر مکعب) است. غلظت تعادلی رسوبات، غلظت توده‌های ذرات یا

برای اجرای تحقیق حاضر، رسوبات از بستر خشک مخزن یکی از سدهای خاکی سطح شهرستان شهرکرد واقع در دامنه ارتفاعات مشرف بر دشت چالستر در حومه شهرکرد، از مخزن سد خاکی گوهرباران، برداشت شد. رسوبات برداشت شده از بستر مخزن، ابتدا خشک شد و پس از کوبیدن، از الک با شماره شبکه ۱۲۰ (معادل اندازه ذره ۰/۱۲۵ میلی‌متر)، عبور داده شد تا برای استفاده در آزمایش‌ها آماده شوند. ضمناً به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی رسوب، آزمایش هیدرومتری در سه تکرار انجام گرفت که نتیجه در شکل ۱ ارائه شده است. بر اساس این آزمایش مشخص شد نمونه رسوب از ۳۱ درصد رس، ۵۸ درصد سیلت و ۱۱ درصد ماسه تشکیل شده است. همچنین ضریب یکنواختی رسوب ( $C_u$ ) برابر ۲/۹۵ و مقادیر  $D_{10}$ ،  $D_{16}$ ،  $D_{30}$ ،  $D_{60}$ ،  $D_{84}$  به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۴۳، ۰/۰۰۰۷، ۰/۰۰۱۹، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۴۳ میلی‌متر به دست آمد. همچنین برای تعیین خاصیت چسبندگی رسوبات، آزمایش هیدرومتری بدون ماده جداکننده (کالگن) نیز انجام شد که در شکل ۲ منحنی دانه بندی در دو حالت با و بدون کالگن نشان داده شده و اختلاف دو منحنی نشانگر وجود خاصیت فلوکوله شدن ذرات است.



شکل ۱- نمودار دانه بندی رسوبات مورد آزمایش



شکل ۲- دانه بندی رسوبات مورد آزمایش با استفاده از کالگن

همان فلوک‌های نسبتاً ضعیف است که انسجام چندانی ندارند و قبل از رسیدن به بستر می‌شکنند و یا پس از ته‌نشین شدن، بی‌درنگ از بستر کنده خواهند شد. احتمال ته‌نشینی به‌وسیله معادله زیر به دست می‌آید (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

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

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

طبق معادله ۴ اگر تنش برشی از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی جزئی بزرگتر باشد، مقدار  $P_d$  منفی خواهد بود. اما در این حالت طبق معادله ۵، مقدار  $P_d$  یا احتمال ته‌نشینی و باقی ماندن فلوک در بستر (شکسته نشدن و جدا نشدن فلوک از بستر) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در واقع در این تنش‌ها، فلوک‌ها در ناحیه نزدیک بستر شکسته و قطعات آن‌ها پراکنده می‌شود یا خود فلوک موفق به چسبیدن به بستر نخواهد شد و همراه جریان دوباره به حرکت درمی‌آید. مقدار  $\tau_{d,part}$ ، به غلظت رسوبات معلق و شرایط جریان در نزدیک بستر وابسته است (نگوین، ۲۰۰۷).

کانال مستقیم به فضای بیشتری نیاز داشته و هزینه آن نیز بیشتر است ولی کانال دایره‌ای در فضای کمتری قابل اجرا بوده و داده‌برداری نیز در فضای کمتری انجام می‌پذیرد. بیشتر محققین از طرح کانال دایره‌ای استفاده کرده‌اند، لذا نتایج ارائه شده راجع به رسوبات چسبیده عمدتاً، مربوط به کانال‌های دایره‌ای است. استفاده از فلوم دایره‌ای برای مطالعات رسوبات چسبیده به دلیل مزایای آن نسبت به فلوم‌های مستقیمی که دارای سیستمی هستند که به‌وسیله پمپ جریان را دوباره به چرخش درآورد از سال ۱۹۶۶ به‌وسیله پارتیاداس متداول شده است. این جایگزینی تضمین خواهد کرد که ذرات به هم چسبیده رسوبات چسبیده، به‌وسیله عامل خارجی یعنی پمپ از هم جدا نخواهد شد و تنها تنش برشی جریان بر آن اثر خواهد گذاشت. مزیت دیگر این فلوم‌ها این است که از لحظه شروع حرکت، جریان به شکل کامل در تمام فلوم توسعه یافته و باعث توزیع یکنواخت تنش برشی در جهت جریان خواهد شد (کانترو و همکاران، ۲۰۰۴).

## مواد و روش‌ها

### رسوب مورد آزمایش



شکل ۳- نمای کلی از سیستم فلوم دایره‌ای دانشگاه شهرکرد

در ابتدای کار برای مشخص کردن پارامترهای هیدرولیکی جریان در دوره‌های مختلف فلوم، آزمایشاتی در دوره‌های مختلف چرخش فلوم انجام گرفت و در هر آزمایش پروفیل سرعت و تنش برشی جریان (در بستر) با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ADV اندازه‌گیری شد تا بر این اساس بتوان رابطه بین سرعت چرخش فلوم و مشخصات هیدرولیکی جریان (سرعت و تنش برشی) را به دست آورد و از این روابط برای آزمایش‌های مختلف استفاده کرد. در مرحله بعدی مخلوط آب و رسوب با غلظت اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در فلوم ریخته شد. برای کامل مخلوط شدن آب و رسوب و این‌که تمام کلوخچه‌ها و یا فلوک‌های تشکیل شده خرد شوند و قبل از شروع آزمایش یک مخلوط همگن آب و رسوب بدون وجود فلوک به دست آید، فلوم و رینگ بالا، با سرعت زیاد (فلوم با سرعت ۱۳/۵۲ دور بر دقیقه معادل ۱/۱۳ متر بر ثانیه و رینگ بالا با سرعت ۱۶/۶۲ دور بر دقیقه معادل ۱/۳۹ متر بر ثانیه در جهت مخالف هم) چرخانده شد. این باعث شد جمع قدر مطلق

### مشخصات فلوم آزمایشگاهی

در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد یک فلوم دایره‌ای با قطر خارجی ۱/۹ متر و مقطع مستطیلی به عرض کف ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۷ متر ساخته شد که شمای آن در شکل ۳ نشان داده شده است. فلوم ساخته شده از ورق فولادی گالوانیزه است که بر روی شاسی دایره‌ای از جنس فولاد نصب شد که از طریق یک شافت عمودی و یک سیستم چرخ دنده و زنجیر به یک گیربکس (با نسبت دور خروجی به ورودی برابر ۱ به ۳۰) و یک موتور الکتریکی سه فاز ۱/۵ کیلوواتی و حداکثر سرعت زاویه‌ای ۱۴۰۰ دور بر دقیقه متصل است. همچنین در قسمت بالا یک رینگ افقی متصل به یک موتور الکتریکی سه فاز، با توان ۰/۳۷ کیلووات و حداکثر سرعت زاویه‌ای ۱۳۴۰ دور بر دقیقه برای ایجاد جریان نصب شد. هر یک از این دو موتور به‌طور جداگانه مجهز به دستگاه اینورتر تنظیم‌کننده دور موتور بودند. دستگاه اینورتر تنظیم‌کننده دور موتور پایین، مبدل برق تک فاز به سه فاز، با توان ۱/۵ کیلووات، مدل 600-2002s و دستگاه اینورتر تنظیم‌کننده دور موتور بالا، مبدل برق تک فاز به سه فاز، با توان ۰/۷۵ کیلووات، مدل 600-2001s بود و این امکان به وجود آمد که سرعت چرخش فلوم از صفر تا ۳۵/۵ دور بر دقیقه و سرعت چرخش رینگ بالا از صفر تا حداکثر ۴۷ دور بر دقیقه قابل تنظیم باشد. برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب نیز ۱۶ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار ردیف و در ارتفاع‌های ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی‌متر، تعبیه شد.

### اندازه‌گیری سرعت

برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، نظیر سرعت و تنش برشی در فلوم دایره‌ای از دستگاه سرعت‌سنج ADV مدل Vectrino<sup>+</sup>، ساخت شرکت Nortek نروژ استفاده شد. ADV ها نسل جدید سرعت‌سنج‌های سه بعدی هستند که به‌علت ساختار کابلی امکان اندازه‌گیری با زوایای مختلف را برای کاربر فراهم می‌کند. این دستگاه در کارخانه سازنده کالیبراسیون شده است و نیازی به کالیبراسیون توسط کاربر نیست. در این تحقیق، با استفاده از دستگاه مذکور، سرعت جریان در سه بعد و در اعماق ۹، ۱۱ و ۱۴/۵ سانتی‌متری نسبت به کف فلوم اندازه‌گیری شد.

پس از اتمام این زمان مخلوط همگن آب و رسوب بدون وجود فلوک، به دست آمد. لذا براساس برنامه آزمایش‌ها، با تنظیم دور فلوم و رینگ درحد موردنظر، آزمایش اصلی شروع شده و هر آزمایش تا ۱۸۰ دقیقه ادامه یافت و در فواصل زمانی مختلف اقدام به نمونه برداری رسوب شد. این زمان نیز با توجه به تجربه مهتا و پارتنیادس (۱۹۷۳)، انتخاب شد. در این تحقیق آزمایشات برای پنج سرعت و سه غلظت انجام گرفت که در جدول ۱، نام آزمایش‌ها و شرایط غلظت و سرعت آن‌ها ذکر شده است.

سرعت فلوم و رینگ بالا برابر ۲/۵ متر بر ثانیه باشد که در این حالت، تنش برشی بستر در حدود ۴/۲۵ نیوتن بر متر مربع ایجاد شد. با توجه به بررسی‌های کرون (۱۹۶۳)، که مشخص کرد در تنش برشی ۲/۲ نیوتن بر مترمربع، هیچ فلوکی درمقابل تنش برشی جریان مقاومت نمی‌کند، می‌توان اطمینان داشت که سرعت چرخش فلوم در ابتدای آزمایشات در این تحقیق برای اطمینان بوده است. شایان ذکر است طبق نظر مهتا و پارتنیادس (۱۹۷۳) زمان چرخاندن دستگاه در ابتدای آزمایش برای خرد شدن کامل فلوک‌ها، دو ساعت در نظر گرفته شد.

جدول ۱- نام آزمایش‌ها براساس اختلاف سرعت خطی رینگ بالا و فلوم و غلظت ابتدای آزمایش

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

که در آن:  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$ ، سرعت‌های اندازه‌گیری شده در ارتفاع‌های ۵/۵، ۹ و ۱۱ سانتی‌متر از بستر و  $v_4$  و  $v_5$ ، مساوی هم و برابر اختلاف سرعت خطی چرخش رینگ و فلوم و  $v_0$ ، سرعت در بستر و برابر با صفر است. براساس این نتایج، معادله ۷ بین دور فلوم و سرعت متوسط جریان به دست آمد:

$$\bar{V} = 0.00325\Omega^2 + 0.03689\Omega \quad R^2 = 0.992 \quad (7)$$

که در آن  $\Omega$ ، مجموع دور فلوم و رینگ (دور بر دقیقه) و  $\bar{V}$  متوسط سرعت جریان (متر بر ثانیه) است. همچنین دستگاه مقادیر تنش برشی جریان را اندازه‌گیری می‌کند. براساس نتایج این اندازه‌گیری‌ها رابطه زیر بین دور فلوم و پارامتر تنش برشی جریان در بستر به دست آمد.

$$\tau_o = 0.00071 \times (0.585^\Omega) \times (\Omega^{5.46}), \quad R^2 = 0.99 \quad (8)$$

که در آن:  $\tau_o$  تنش برشی جریان در بستر (نیوتن بر مترمربع) است. این رابطه برای تنش برشی محدوده آزمایش (۰/۳ تا ۱ نیوتن بر مترمربع) دارای دقت بالایی است.

#### ب) تغییرات غلظت رسوب معلق نسبت به زمان

متوسط عمقی غلظت رسوب معلق در هر آزمایش به صورت میانگین وزنی و به‌طور مشابه با روش محاسبه متوسط سرعت

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

#### نتایج و بحث

##### الف) مشخصات هیدرولیکی جریان

از جمله مهمترین مشخصات هیدرولیکی جریان، سرعت و تنش برشی است. اندازه‌گیری سرعت در سه عمق مختلف اجرا شد و برای محاسبه سرعت متوسط از روش میانگین وزنی از معادله زیر استفاده شد:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^5 \left( \frac{v_i + v_{i-1}}{2} \right) \cdot d_i}{\sum_{i=1}^5 d_i} \quad \sum_{i=1}^5 d_i = 20 (cm) \quad (6)$$

شکل ۴ را براساس تغییرات غلظت نسبی در طول آزمایش، به سه دسته می‌توان تقسیم کرد. دسته اول آزمایش‌هایی است که غلظت نسبی آنها در انتهای زمان آزمایش به صفر نزدیک شده. در این آزمایشات تنش برشی جریان نتوانسته فلوک‌ها را شکسته مانع از ته‌نشینی آنها شود. دسته دوم مواردی هستند که تنش برشی جریان زیاد و مقادیر غلظت نسبی در انتهای آزمایش در حدود رقم ۱ (یعنی همان غلظت اولیه آزمایش) باقی‌مانده است. در این آزمایش‌ها، تنش برشی جریان آنقدر زیاد است که مانع از ته‌نشینی می‌شود. دسته آخر مواردی است که غلظت نسبی با گذشت زمان ابتدا کاهش یافته ولی در ادامه آزمایش، غلظت نسبی دچار نوسان می‌شود. این بدان معناست که جریان و بستر به تعادل رسیده‌اند و بین ته‌نشینی و فرسایش فلوک‌ها در بستر تعادل به‌وجود آمده و به‌همین دلیل روند کاهش مستمر غلظت قطع شده است. این موارد در تحقیق حاضر از این جهت که تنش برشی بحرانی ته‌نشینی را به‌دست می‌دهند از اهمیت بیشتری برخوردارند. شایان ذکر است تغییرات غلظت رسوبات معلق، نرخ خالص ته‌نشینی یا جدا شدن رسوبات از بستر در بازه زمانی بین دو اندازه‌گیری را نشان می‌دهد لذا بروز نوسان در مقدار غلظت رسوبات معلق، می‌تواند حاکی از بروز تعادل بوده و غلظت رسوبات معلق، اطراف غلظت تعادلی شروع به نوسان نموده‌است. در جدول ۲ لیست آزمایش‌های این گروه ارائه شده و مقدار غلظت در حالت تعادل و زمان مشاهده نوسان در غلظت نیز ذکر شده است. براساس این نتایج، معادله زیر بین تنش برشی بستر و نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه آزمایش ( $\frac{C_{eq}}{C_o}$ ) به‌دست آمد:

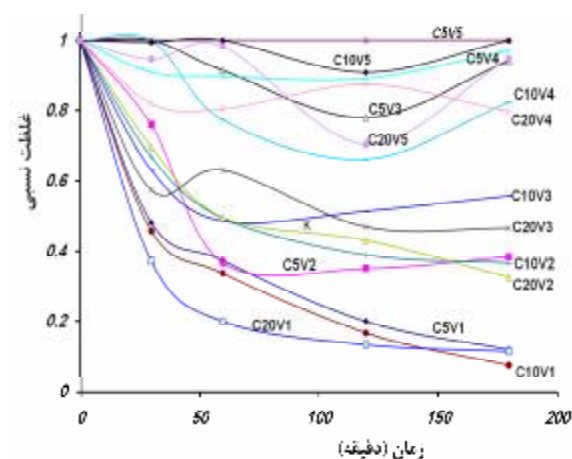
$$\frac{C_{eq}}{C_o} = 0.5639 \tau_o + 0.1534 \quad R^2 = 0.94 \quad (9)$$

$$C_{eq} = 1.396 \tau_b^{0.588} \cdot C_o^{0.873} \quad R^2 = 0.91 \quad (10)$$

که در آن  $C_o$  و  $C_{eq}$ ، به‌ترتیب غلظت تعادلی و غلظت اولیه است. با استفاده از این رابطه می‌توان به‌ازای هر تنش برشی در بستر جریان و غلظت اولیه، مقدار غلظت تعادلی را به‌دست آورد.

نکته دیگری که می‌توان از این نتایج استنباط کرد این است که در یک تنش برشی یکسان، هرچه غلظت اولیه رسوبات معلق بیشتر باشد، غلظت تعادلی مشاهده شده نیز بزرگتر بوده و این می‌تواند ناشی از مسئله فلوکوله شدن رسوبات باشد که در هر

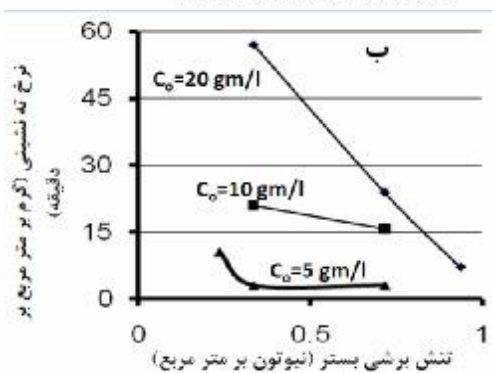
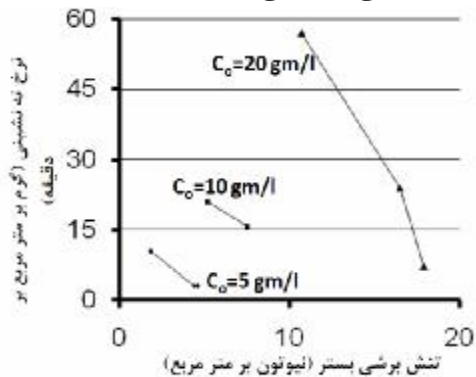
(شبهه معادله ۶) به‌دست آمد. نتیجه به‌صورت غلظت نسبی (نسبت غلظت هر آزمایش به غلظت اولیه آن) در شکل ۴ ارائه شده است. ممکن است این سوال مطرح شود که ۱۱ درصد از رسوبات مورد آزمایش ماسه بوده و ممکن است بخشی از رسوبات ته‌نشین شده رسوبات غیرچسبنده باشد. به‌منظور بررسی این موضوع از معیار آستانه حرکت شیلدز استفاده شد و مشخص شد در تنش برشی بستر  $0.0271$  نیوتن بر مترمربع، ذرات با اندازه  $0.05$  میلی‌متر در آستانه حرکت قرار می‌گیرد و با توجه به نمودار دانه‌بندی رسوبات، تنها ۱۴ درصد از آنها از این اندازه بزرگتر است. لذا در آزمایش‌هایی که تنش برشی بستر برابر با  $0.0271$  نیوتن بر مترمربع یا کمتر است (آزمایش‌های C5-V1, C10-V1, C20-V1) پیش‌بینی می‌شود در ابتدای آزمایش این ذرات ته‌نشین شده و از مخلوط معلق آب و رسوب جدا شوند. به‌همین دلیل برای انجام تحلیلهای بعدی، در سه آزمایش مذکور غلظت اولیه آزمایش از مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر به‌ترتیب به مقادیر  $4/3$ ،  $8/6$  و  $17/2$  گرم بر لیتر اصلاح شده است. از آنجایی‌که فلوک‌های حاصل از اتصال ذرات چسبنده، در صورت ته‌نشین شدن به بستر می‌چسبند و در صورت خرد شدن از بستر جدا شده، به مخلوط آب و رسوب باز می‌گردند لذا در خصوص ذرات غیر چسبنده با اندازه کمتر از  $0.05$  میلی‌متر نیز در صورت عدم ماندگاری در بستر و حتی غلطیدن روی بستر نیز جزء رسوب در حال حمل توسط جریان به‌حساب آمده و جزء رسوب ته‌نشین شده به‌حساب نمی‌آیند و در واقع بین بار بستر و بار معلق تفکیکی صورت نگرفته است.



شکل ۴- تغییرات زمانی غلظت رسوب معلق در آزمایش‌های با غلظت اولیه: الف) ۵؛ ب) ۱۰؛ ج) ۲۰ گرم بر لیتر



آید. لذا شکل ۵ تهیه شد. ملاحظه می‌شود با افزایش تنش برشی بستر، نرخ ته‌نشینی کاهش می‌یابد و همین روند نیز برای غلظت تعادلی صدق می‌کند.



شکل ۵- تغییرات نرخ ته‌نشینی نسبت به: الف) غلظت تعادلی؛ ب) تنش برشی بستر

#### د) تنش برشی بحرانی ته‌نشینی

اگر تنش برشی جریان در مجاورت بستر از مقدار تنش برشی بحرانی ته‌نشینی جزیی بیشتر شود، ته‌نشینی اتفاق نیفتاده و نرخ خالص ته‌نشینی برابر صفر خواهد بود. برای تعیین تنش برشی بحرانی ته‌نشینی، شکل ۶ که نشان‌دهنده رابطه بین نسبت تنش برشی بستر و غلظت رسوبات ته‌نشین شده به غلظت اولیه آزمایش است، تهیه شد. با ترسیم بهترین خط از نقاط، محل تلاقی خط و محور افقی به‌عنوان تنش برشی بحرانی آستانه ته‌نشینی در نظر گرفته شد. براین اساس تنش برشی آستانه ته‌نشینی در آزمایش‌های با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، به ترتیب برابر ۰/۸۲۷، ۰/۹۳۸ و ۰/۹۸ نیوتن بر متر مربع به‌دست آمد. در این تنش برشی نرخ ته‌نشینی به‌دست آمده از رابطه کرون معادل صفر به‌دست می‌آید. همچنین براساس این نتایج مشخص می‌شود مقدار تنش برشی آستانه ته‌نشینی با غلظت اولیه رسوبات معلق رابطه مستقیم دارد.

تنش برشی و غلظت اولیه مشخص، پس از یک زمان مشخص غلظت جریان به یک حالت تعادلی می‌رسد. به بیان دیگر روند فلوکوله شدن رسوبات علاوه بر تنش برشی، به غلظت اولیه رسوبات وابسته است.

جدول ۲- آزمایش‌های به تعادل رسیده و مقادیر غلظت تعادلی و

نام آزمایش	زمان رسیدن به غلظت تعادلی		غلظت اولیه (گرم بر لیتر)	تنش برشی بستر (نیوتن بر مترمربع)
	غلظت تعادلی (گرم بر لیتر)	زمان رسیدن به تعادل (دقیقه)		
C5 - V2	۵	۰/۴۴۹	۱/۸۴	۶۰
C5 - V3	۵	۰/۶۳۲	۴/۳۹	۴۰
C5 - V4	۵	۰/۷۱۷	۴/۵۸	۲۷
C10 - V3	۱۰	۰/۶۳۲	۵/۱۸	۴۶
C10 - V4	۱۰	۰/۷۱۷	۷/۵۲	۳۱
C20 - V3	۲۰	۰/۶۳۲	۱۰/۶۹	۳۳
C20 - V4	۲۰	۰/۷۱۷	۱۶/۵	۲۹
C20 - V5	۲۰	۰/۹۳۸	۱۷/۹۱	۵۸

#### ج) نرخ ته‌نشینی رسوبات

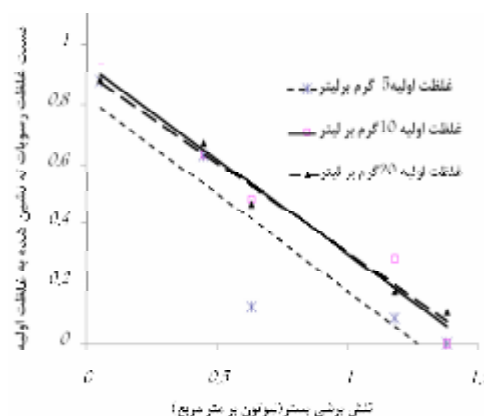
از آنجایی که یکی از اهداف این تحقیق، بررسی نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده در شرایط مختلف جریان می‌باشد، با استفاده از معادله تحلیلی زیر، نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده در طول هر بازه زمانی محاسبه شده است.

$$Q_d = 1000 \times \frac{(C_2 - C_1) \times V_f}{(t_2 - t_1) \cdot A} \quad (11)$$

که در آن:  $Q_d$ : نرخ ته‌نشینی (گرم بر مترمربع بر دقیقه)،  $C_2$  و  $C_1$  به ترتیب غلظت‌های ابتدا و انتهای بازه زمانی بین دو اندازه‌گیری (گرم بر لیتر)،  $V_f$ ، حجم مخلوط آب و رسوب معلق درون فلوم (متر مکعب) و  $t_1$  و  $t_2$  زمان‌های نمونه‌گیری ابتدا و انتهای بازه زمانی موردنظر (دقیقه) و  $A$  سطح بستر فلوم (متر مربع) است که برابر حاصلضرب عرض فلوم در محیط فلوم (مربوط به شعاع مرکزی فلوم) است. برای آن دسته از آزمایش‌هایی که پس از مدتی به یک غلظت تعادلی رسیدند و لیست آنها در جدول ۲ ارائه شد، سعی شد رابطه نرخ ته‌نشینی و پارامترهای جریان به‌دست

## منابع

- ۱- نادری بلداجی م. ۱۳۸۹. بررسی نرخ رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده در کانال‌های با جریان باز با استفاده از یک مدل فیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهرکرد.
- 2- Cantero M. Mangini S. Pedocchi F. Niño Y. and García M. 2004. Analysis of flow characteristics in an annular flume: Implications for erosion and deposition of cohesive sediments. World Water and Environmental Resources Congress 2004. Salt Lake City. Utah. USA.
- 3- Gierke J. 2002. Engineering Applications in the Earth Sciences: River Velocity. Michigan Technological University. Research Report: MI 49931-1295.
- 4- 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.
- 5- Krone R. B. 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final Rep. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory. Univ. of California at Berkeley. Berkeley. Calif.
- 6- Mehta A.J. and Partheniades E. 1973. Depositional Behavior of Cohesive Sediments. Tech report no. 16, University of Florida, Gainesville, Florida.
- 7- Nguyen D. K. Guylan S. Barby N. and Ngoc V. P. 2007. Modeling of sediment transport and turbidity maximum in estuaries: difficulties and probable solutions.
- 8- Samadi-Boroujeni H. 2004. Modeling of deposition and self weight consolidation of cohesive sediments. PhD dissertation. Faculty of Water Sciences Engineering. ShahidChamran University of Ahwaz.
- 9- Samadi-Boroujeni H. Fathi-Moghaddam M. Shafaie M. and Samani H.M.V. 2005. Modeling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments. Sediment and Ecohydraulics Intercohd2005.1stEdn. Elsevier B.V.Oxford, UK.



شکل ۶- تغییرات غلظت نسبی رسوبات ته‌نشین شده با تنش برشی بستر

## نتیجه‌گیری

براساس این تحقیق، نتایج زیر به‌طور خلاصه به‌دست آمد:

- ۱- بین سرعت چرخش فلوم و تنش برشی جریان رابطه‌ی با ضریب همبستگی ۰/۹۹ به‌دست آمد.
- ۲- نتایج نشان داد که در یک تنش برشی یکسان، هرچه غلظت اولیه رسوبات معلق بیشتر باشد، غلظت تعادلی مشاهده شده نیز بزرگتر بوده و این می‌تواند ناشی از مسئله فلوکوله شدن رسوبات باشد. همچنین روند فلوکوله شدن رسوبات علاوه بر تنش برشی، به غلظت اولیه رسوبات وابسته است.
- ۳- با افزایش تنش برشی بستر، نرخ ته‌نشینی کاهش می‌یابد و همین روند نیز برای غلظت تعادلی صدق می‌کند.
- ۴- برای تعیین تنش برشی بحرانی ته‌نشینی، رابطه بین نسبت تنش برشی بستر و غلظت رسوبات ته‌نشین شده به غلظت اولیه آزمایش مورد توجه قرار گرفت و براین اساس تنش برشی آستانه ته‌نشینی در آزمایشات با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، به ترتیب برابر ۰/۸۲۷، ۰/۹۳۸ و ۰/۹۸ نیوتن بر متر مربع به‌دست آمد که نشانگر وجود رابطه مستقیم بین مقدار تنش برشی آستانه ته‌نشینی و غلظت اولیه رسوبات معلق است.

## سپاسگزاری

به‌این‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد که هزینه‌های انجام این تحقیق را فراهم کردند تشکر و قدردانی می‌شود.