

تأثیر پساب شهری بر سرعت و تنش برشی غیر رسوبگذار رسوبهای چسبنده

میلاذ خواستار بروجنی^۱، حسین صمدی بروجنی^{۲*}، کاظم اسماعیلی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵

Samadi153@yahoo.com

چکیده- رسوبگذاری در کانال‌های انتقال آب یکی از معضلات اساسی در مدیریت شبکه‌های آبیاری است. پیچیدگی رفتار رسوبهای چسبنده سبب شده که معیارهای طراحی معمول کارایی کافی برای جلوگیری از ته‌نشینی رسوبهای چسبنده نداشته باشند. هدف از تحقیق حاضر، تعیین حداقل سرعت و تنش برشی غیر رسوبگذار برای کانال‌های حاوی پساب شهری است. آزمایش‌ها با استفاده از رسوبهای چسبنده سد پیربلوط و در فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که پساب علاوه بر افزایش مقدار نهشته شدن و احتمال فلوکوله شدن رسوبهای معلق، باعث افزایش ۷٪ در کمیته سرعت غیر رسوبگذار نسبت به آب خالص می‌شود. همچنین مشخص شد که پساب تنش برشی آستانه ته‌نشینی را افزایش می‌دهد و با افزایش غلظت اولیه رسوبها تاثیر پساب بیشتر مشهود است. در ادامه، نتایج این تحقیق با روشهای نیمه تجربی مختلف مقایسه و نتیجه شد که کمیته سرعت غیر رسوبگذار در روشهای نیمه تجربی به‌طور چشمگیری کمتر از مقدار به‌دست آمده در این پژوهش است. نتایج این تحقیق نشان داد که کمیته عدد فرود برای شرایط غیررسوبگذار برابر ۰/۴۵ است.

کلیدواژگان: ته‌نشینی رسوبهای چسبنده، تنش برشی آستانه ته‌نشینی، فلوم دوار، سرعت سنج صوتی.

۱- مقدمه

وجود نداشته و رسوبهای ریزدانه چسبنده حتی در کانال‌هایی که معیارهای طراحی در آنها رعایت شده، ته‌نشین می‌شوند. وجود رسوبهای چسبنده در مجاری انتقال آب، علاوه بر کاهش ظرفیت انتقال کانال، هزینه‌های لایروبی و قطع آب کانال در زمان لایروبی را ایجاد می‌کند.

مسأله رسوب، در طی قرن‌ها توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته و دیدگاه‌های متفاوتی برای حل مسائل مرتبط ارائه شده است. متأسفانه تا کنون حتی با وجود طراحی مناسب نیز به‌طور کامل امکان مقابله با پدیده رسوبگذاری

ذرات چسبنده، نیروهای قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات ایجاد می‌کنند. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح آنها در واحد حجم (سطح ویژه) می‌شود و این نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). این نیروی بین ذره‌ای سبب فلوکوله شدن ذرات می‌شود که عامل اصلی تغییر ویژگی‌های فیزیکی در فلوک‌ها مانند قطر ذرات، چگالی و سرعت ته‌نشینی نسبت به ذرات اولیه، است. رفتار رسوبهای چسبنده، از پارامترها و فرایندهای مختلفی تأثیر می‌پذیرد و پیشگویی و تشریح این پدیده را بسیار مشکل می‌کند.

$$V_{\min} = 0.54m \cdot y^{0.64} \quad (1)$$

با توجه به کمبود آب، از دیرباز پساب شهری به‌عنوان یک منبع غنی از عناصر مغذی، به‌طور مستقیم با آب آبیاری مخلوط شده یا به‌طور غیرمستقیم مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. معمولاً پساب‌های شهری حاوی ترکیبی از مواد آلی (هیدروکربن‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها)، نمک‌های محلول، عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان (K, N, P) و گاهی مواد سمی مانند برخی فلزهای سنگین می‌باشد. نوع مواد موجود در پساب در رفتار رسوبهای چسبنده و نیز اثر زیست‌محیطی آن بسیار تأثیرگذار است. (معاصد و همکاران، ۱۳۸۵؛ حسن‌لی و جوان، ۱۳۸۴)

برخی محققان برای بررسی شرایط ته‌نشینی رسوبها، روش‌های مبتنی بر نظریهٔ رژیم را ارائه کرده‌اند. بر مبنای نظریهٔ رژیم، قدرت رودخانه‌ای باعث می‌شود که با گذشت زمان، ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مانند محیط خیس شده، عرض سطحی آب، مساحت مقطع، شیب طولی و شعاع هیدرولیکی در جهت پایداری بلندمدت تغییر کند. به این شرایط پایداری حالت رژیم گویند. کندی (۱۸۹۵) نخستین بار پس از آزمایش‌های متعدد بر روی کانال‌های شبکهٔ آبیاری باری-دوآب به این نتیجه رسید که سرعتی وجود دارد که می‌تواند شرایط

$$V_{\min} = 0.834(f \cdot R)^{0.5} \quad (2)$$

ذرات چسبنده، نیروهای قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات ایجاد می‌کنند. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح آنها در واحد حجم (سطح ویژه) می‌شود و این نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). این نیروی بین ذره‌ای سبب فلوکوله شدن ذرات می‌شود که عامل اصلی تغییر ویژگی‌های فیزیکی در فلوک‌ها مانند قطر ذرات، چگالی و سرعت ته‌نشینی نسبت به ذرات اولیه، است. رفتار رسوبهای چسبنده، از پارامترها و فرایندهای مختلفی تأثیر می‌پذیرد و پیشگویی و تشریح این پدیده را بسیار مشکل می‌کند.

$$f = 1.587 \sqrt{D_{50}} \quad (3)$$

با توجه به کمبود آب، از دیرباز پساب شهری به‌عنوان یک منبع غنی از عناصر مغذی، به‌طور مستقیم با آب آبیاری مخلوط شده یا به‌طور غیرمستقیم مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. معمولاً پساب‌های شهری حاوی ترکیبی از مواد آلی (هیدروکربن‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها)، نمک‌های محلول، عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان (K, N, P) و گاهی مواد سمی مانند برخی فلزهای سنگین می‌باشد. نوع مواد موجود در پساب در رفتار رسوبهای چسبنده و نیز اثر زیست‌محیطی آن بسیار تأثیرگذار است. (معاصد و همکاران، ۱۳۸۵؛ حسن‌لی و جوان، ۱۳۸۴)

برخی محققان برای بررسی شرایط ته‌نشینی رسوبها، روش‌های مبتنی بر نظریهٔ رژیم را ارائه کرده‌اند. بر مبنای نظریهٔ رژیم، قدرت رودخانه‌ای باعث می‌شود که با گذشت زمان، ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مانند محیط خیس شده، عرض سطحی آب، مساحت مقطع، شیب طولی و شعاع هیدرولیکی در جهت پایداری بلندمدت تغییر کند. به این شرایط پایداری حالت رژیم گویند. کندی (۱۸۹۵) نخستین بار پس از آزمایش‌های متعدد بر روی کانال‌های شبکهٔ آبیاری باری-دوآب به این نتیجه رسید که سرعتی وجود دارد که می‌تواند شرایط

$$V_{\min} = 0.625cy^{0.64} \quad (4)$$

ذرات چسبنده، نیروهای قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات ایجاد می‌کنند. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح آنها در واحد حجم (سطح ویژه) می‌شود و این نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). این نیروی بین ذره‌ای سبب فلوکوله شدن ذرات می‌شود که عامل اصلی تغییر ویژگی‌های فیزیکی در فلوک‌ها مانند قطر ذرات، چگالی و سرعت ته‌نشینی نسبت به ذرات اولیه، است. رفتار رسوبهای چسبنده، از پارامترها و فرایندهای مختلفی تأثیر می‌پذیرد و پیشگویی و تشریح این پدیده را بسیار مشکل می‌کند.

$$V_{\min} = 0.625cy^{0.54} \quad (5)$$

با توجه به کمبود آب، از دیرباز پساب شهری به‌عنوان یک منبع غنی از عناصر مغذی، به‌طور مستقیم با آب آبیاری مخلوط شده یا به‌طور غیرمستقیم مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. معمولاً پساب‌های شهری حاوی ترکیبی از مواد آلی (هیدروکربن‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها)، نمک‌های محلول، عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان (K, N, P) و گاهی مواد سمی مانند برخی فلزهای سنگین می‌باشد. نوع مواد موجود در پساب در رفتار رسوبهای چسبنده و نیز اثر زیست‌محیطی آن بسیار تأثیرگذار است. (معاصد و همکاران، ۱۳۸۵؛ حسن‌لی و جوان، ۱۳۸۴)

برخی محققان برای بررسی شرایط ته‌نشینی رسوبها، روش‌های مبتنی بر نظریهٔ رژیم را ارائه کرده‌اند. بر مبنای نظریهٔ رژیم، قدرت رودخانه‌ای باعث می‌شود که با گذشت زمان، ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مانند محیط خیس شده، عرض سطحی آب، مساحت مقطع، شیب طولی و شعاع هیدرولیکی در جهت پایداری بلندمدت تغییر کند. به این شرایط پایداری حالت رژیم گویند. کندی (۱۸۹۵) نخستین بار پس از آزمایش‌های متعدد بر روی کانال‌های شبکهٔ آبیاری باری-دوآب به این نتیجه رسید که سرعتی وجود دارد که می‌تواند شرایط

شدن رسوبهای چسبنده تحت تأثیر تنش برشی و آشفتگی جریان اندازه‌گیری می‌شود. شبیه‌سازی جریان آشفته با تنش برشی مشخص ممکن است در کانال مستقیم یا کانال‌های دایره‌ای انجام شود (ویتروپ، ۲۰۰۶). در کانال‌های مستقیم به فضای بیشتری نیاز داشته و هزینه نیز بیشتر است، اما کانال دایره‌وی در فضای کمتری قابل اجرا بوده و داده‌برداری نیز در فضای کمتری انجام می‌شود (صمدی، ۲۰۰۴).

پارتندیس و همکاران (۱۹۶۶) نخستین گروهی بودند که از فلوم دوار برای مطالعه رسوبهای چسبنده استفاده کردند. محققان زیادی با استفاده از فلوم دوار به مطالعه رسوبهای چسبنده پرداختند که از میان آنان می‌توان کوفالا و همکاران (۲۰۱۰)، لائو و دروپا (۲۰۰۹)، ما و همکاران (۲۰۰۸)، کریشناپان (۲۰۰۶)، کانتر و همکاران (۲۰۰۴)، کتی و همکاران (۲۰۰۳)، میلیورن و کریشناپان (۲۰۰۱)، پارتندیس و همکاران (۱۹۹۶)، شنگ (۱۹۸۸)، مهتا و پارتندیس (۱۹۷۳)، فوکودا و لایک (۱۹۸۰) را نام برد.

از این دست پژوهش‌ها می‌توان به کارهای آملیا و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی ته‌نشینی و فرسایش رسوبها در چهار بندرگاه شمالی کشور پرتغال، کریشناپان (۲۰۰۶) در زمینه تأثیر تنش برشی بر اندازه توده‌های رسوبهای رودخانه‌ای، کتی هارلامپدیس و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی ویژگیهای ته‌نشینی رسوبهای ریزدانه رودخانه کلایر^۱ در کشور کانادا و میلیورن و کریشناپان (۲۰۰۱) بر روند ته‌نشینی و فرسایش رسوبهای چسبنده رودخانه‌های^۲ در کشور کانادا، با استفاده از فلوم دوار اشاره کرد.

در فلوم دوار چرخش درپوش و فلوم به دور خود موجب ایجاد جریان می‌شود و به پمپ برای ایجاد جریان نیاز نیست. این جایگزینی تضمین می‌کند که ذرات به هم چسبیده رسوبهای چسبنده، به وسیله عامل خارجی یعنی پمپ از هم جدا نخواهند شد و فقط تنش برشی جریان بر

رسوبها در حدود ۰/۶ تا ۰/۹ متر بر ثانیه است. با توجه به این که هر چه سرعت بیشتر شود اندازه حداقل مواد جامد حمل شونده توسط آب بزرگتر می‌شود برخی روابط نیمه تجربی مبتنی بر انتقال رسوب برای محاسبه حداقل سرعت غیررسوبگذار ارائه شده است. از جمله روابط ارائه شده در این زمینه رابطه لوی است (بیرامی، ۱۳۸۵).

$$V_{\min} = 0.01 \times \frac{\omega}{\sqrt{D_{av}}} \times \sqrt{R} \left(\frac{0.0225}{n} \right) \quad (6)$$

رابطه زامارین برای غلظت بار معلق کمتر از ۶ گرم بر لیتر چنین است (گرشین، ۱۹۸۲):

$$V_{\min} = 0.0127 \times \left(\frac{c^2 \omega \omega_0^2}{RS} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

در این روابط V_{\min} حداقل سرعت غیر رسوبگذار، c غلظت مواد معلق (کیلوگرم بر متر مکعب)، ω سرعت ته‌نشینی (متر بر ثانیه)، ω_0 برای $\omega > 2 \frac{mm}{s}$ همان مقدار ω و در غیر این صورت برابر ۲ میلی‌متر بر ثانیه بوده و R شعاع هیدرولیکی (متر) و S شیب خط انرژی است. رابطه دیگری که توسط گرشین (۱۹۸۲) در سیستم متری ارائه شده است چنین است:

$$V_{\min} = A Q^{0.2} \quad (8)$$

A ضریبی است که برای ذرات با سرعت سقوط کمتر از ۱/۵ و بیشتر از ۳/۵ میلی‌متر بر ثانیه، به ترتیب برابر ۰/۳۳ و ۰/۵۵ و برای سرعت سقوط بین ۱/۵ و ۳/۵ میلی‌متر بر ثانیه برابر ۰/۴۴ است.

لاتیشنکو رابطه زیر را ارائه کرده است (جلودار، ۲۰۰۸):

$$V_{\min} = 1.6(g.D_s)^{0.5} \left(\frac{y}{D_s} \right)^{0.2} \quad (9)$$

V_{\min} حداقل سرعت رسوبگذار (متر بر ثانیه)، y عمق جریان (متر)، D_s اندازه ذرات معلق (متر) و g شتاب ثقل است.

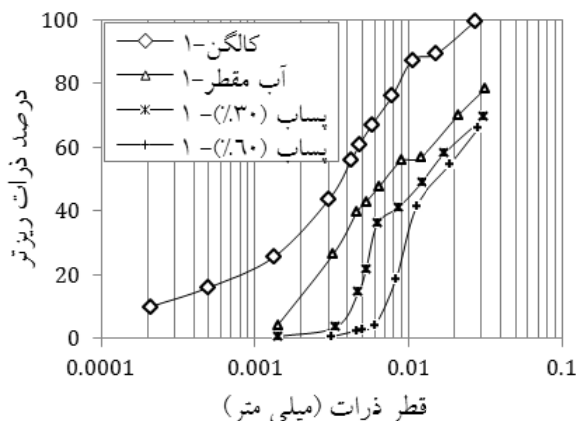
روش دیگری که برای تعیین کمینه سرعت رسوبگذار استفاده شده، انجام آزمایش‌های ته‌نشینی است. در این موارد سیال ساکن نبوده و عمل فلوکوله شدن و نهشته

1. Clair River
2. Hay River

آزمایش‌ها با استفاده از کالگن و بدون کالگن و محلول حاوی ۳۰ و ۶۰ درصد پساب، برای مشخص شدن چگونگی تمایل توده‌ای شدن رسوبهای ریزدانه انجام شد.

جدول ۱ برخی ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی پساب

ویژگی	واحد	پساب	استاندارد
هدایت الکتریکی	ds/m	۰/۷۷۵	-
واکنش (PH)	—	۷/۸۹	۶/۵-۹/۰
چگالی	kg/m^3	۹۸۹/۵	-
غلظت کل جامدات حل شده	mg/L	۴۴۱/۸	۲۵۰۰
پتاسیم	mg/L	۲/۶۴	بدون حد
سدیم	mg/L	۲/۵۲	بدون حد
کلسیم	mg/L	۶۵/۴۴	-
منیزیم	mg/L	۱۶/۶۶	۱۰۰
نیترات	mg/L	۱۵/۴۸	۲۰-۸۵
اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)	mg/L	۱۸/۴۵	بدون حد
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	۳۰	۲۰۰-۵۰۰
کلراید	mg/L	۸۵	۶۰۰
نسبت جذب سدیم (SAR)	$(\frac{mole}{L})^{\frac{1}{2}}$	۱/۶۶	-



شکل ۱ دانه‌بندی رسوبها در حالت‌های مختلف

۱-۲- فلوم آزمایشگاهی

فلوم‌دوار موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد از ورق گالوانیزه با پنجره‌های پلکسی‌گلس

آنها اثر می‌گذارد. با چرخش فلوم و درپوش در جهت مخالف یکدیگر جریان‌های ثانویه و نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش فلوم به حداقل می‌رسد که به دلیل این مزیت، جریان تولید شده در داخل فلوم به خوبی گسترش یافته و سبب توزیع یکنواخت تنش برشی در جهت جریان می‌شود. بر اساس پژوهش‌های پیشین، برای توزیع یکنواخت تنش برشی در عرض فلوم دایره‌وی نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم باید بزرگتر از یک باشد ($\frac{N_r}{N_f} > 1$). بر اساس یافته‌های پارتندیس (۲۰۰۹) در شرایطی که دور فلوم و درپوش مناسب انتخاب شود، پروفیل سرعت در فلوم‌های دوار، مانند کانال‌های باز است.

با توجه به از استفاده پساب در چند سال اخیر برای کشاورزی، در این تحقیق سعی شد تأثیر پساب بر ته‌نشینی رسوبهای ریزدانه مطالعه و معیاری برای طراحی کانال‌های انتقال پساب حاوی رسوب ریزدانه ارائه شود.

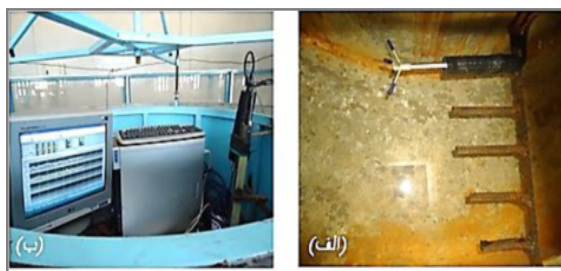
۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر تأثیر غلظت‌های مختلف پساب تصفیه شده شهری بر نرخ ته‌نشینی رسوبهای چسبنده مطالعه شد. برای تعیین روند تأثیر پساب، علاوه بر آب خالص از غلظت‌های ۳۰ و ۶۰ درصد پساب نیز استفاده شد؛ برای حجم ۳۰۰ لیتر (براساس ارتفاع مورد نیاز فلوم)، به ترتیب به ۹۰ و ۱۸۰ لیتر پساب نیاز است. پساب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه شد. برخی از ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی پساب به شرح جدول ۱ است.

رسوبها از بستر مخزن سد خاکی پیربلوط در حومه شهرکرد (از زیر حوضه‌های کارون شمالی) برداشت شد. به منظور مطالعه رسوبهای چسبنده، رسوبهای برداشت شده از الک شماره ۲۰۰ عبور داده و سپس استفاده شدند. رسوبهای اصلاح شده شامل ۶۳/۲ درصد رس و ۳۶/۸ درصد سیلت بود. بر طبق شکل ۱ دانه‌بندی برای

مختلف فراهم می‌سازد. در این آزمایش‌ها توزیع سرعت و تنش‌برشی برای پنج مقدار اختلاف سرعت فلوم و درپوش و چهار مقدار نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم (۱/۳، ۱/۲، ۱/۱، $\alpha=1$) با استفاده از این دستگاه مطالعه شد. اولین مقطع در ۵ سانتی‌متری دیواره داخلی قرار دارد و اندازه‌گیری به سمت دیواره خارجی انجام می‌شود. در هر مقطع عمودی، چهار مقدار سرعت اندازه‌گیری شده و سرعت متوسط جریان با توجه به تأثیر منطقه اندازه‌گیری، به صورت وزنی محاسبه می‌شود. به منظور کار با دستگاه از پایه‌ای سوار بر فلوم استفاده شد که علاوه بر حرکت سرعت‌سنج در عرض کانال، امکان جابه‌جایی عمودی یا قرارگیری زاویه‌دار آن را در فلوم فراهم می‌سازد (شکل ۳).

ساخته شده است. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب برابر ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر است. درپوش از جنس پلکسی‌گلس با قطر ۱/۶ متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. ۱۶ شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی‌متری از کف برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، قرار داده شده است. فلوم به دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش مجهز است که قابلیت حرکت در جهت‌های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم می‌سازد. سرعت چرخش فلوم و درپوش با استفاده از دو دستگاه اینورتر تنظیم می‌شود. شکل ۲ نمای کلی فلوم دوار را نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف- نحوه قرار گرفتن سرعت‌سنج صوتی در کانال،
ب- نحوه اتصال سرعت‌سنج به کامپیوتر در داخل فلوم

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از سرعت‌سنج صوتی، پروفیل سرعت، توزیع تنش‌برشی و خطوط هم‌سرعت برای هر مقدار نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ترسیم شد و با توجه به انحراف معیار سرعت لحظه‌ای نسبت به سرعت متوسط برای هر نسبت، بهترین نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم برای رسیدن به توزیع یکنواخت تنش‌برشی در عرض $\alpha=1/1$ به دست آمد (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰). کریشناپان و انجل (۲۰۰۴) این نسبت را برای عمق ۱۲ سانتی‌متری فلوم دوار برابر ۱/۱۷ به دست آورده‌اند.



شکل ۲ اجزای فلوم دوار مورد استفاده

۲-۲ پارامترهای هیدرولیکی

به منظور اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، مانند سرعت و تنش‌برشی در فلوم دوار از دستگاه سرعت‌سنج صوتی^۳ (ADV) مدل $Victorino^+$ استفاده شد. این نوع سرعت‌سنج امکان مطالعه آشفتگی جریان را در زوایای

3. Acoustic Doppler Velocimeter

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

آزمایشها برای سه غلظت رسوب ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و سه سطح مختلف پساب شهری (۰، ۳۰ و ۶۰ درصد) برای پنج تنش‌برشی (اختلاف دور فلوم و درپوش) انجام شد.

در آغاز تنش‌های برشی طوری انتخاب شد که برای تمامی مقادیر غلظت رسوب و درصدهای مختلف پساب مناسب باشد. بدین ترتیب برای مشخص شدن تنش‌برشی کمینه و بیشینه، از محلول آب با ۳۰ درصد پساب استفاده شد. آزمایش‌ها به نحوی انجام شد که غلظت ۵ گرم بر لیتر رسوب (کمترین غلظت)، برای تعیین تنش‌برشی بیشینه و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر (بیشترین غلظت) برای تعیین تنش‌برشی کمینه استفاده شود. تنش‌برشی (اختلاف سرعت فلوم و درپوش) که در آن ۸۰٪ رسوبهای معلق ته‌نشین شوند، به‌عنوان تنش‌برشی کمینه و تنش‌برشی که در آن ۸۰٪ رسوبها به صورت معلق باقی بمانند، به‌عنوان تنش‌برشی بیشینه انتخاب شد. آزمایش‌ها برای مقدار پنج تنش‌برشی برابر ۰/۱۳، ۰/۲۰، ۰/۳۲، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ نیوتن بر مترمربع (مجموع دور فلوم و درپوش به‌ترتیب برابر ۴/۳، ۳/۲، ۴/۲، ۴/۹ و ۶/۲ دور بر دقیقه) انجام شد. سپس محلول رسوب با غلظت‌های اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری در فلوم ریخته شد. برای مخلوط شدن کامل آب و رسوب و خرد شدن توده‌های رسوبی، فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش برابر ۳۱ دور بر دقیقه) - که تنش‌برشی برابر $\frac{N}{m^2}$ ایجاد می‌کند - در جهت مخالف به مدت ۳۰ دقیقه به گردش درآمد. بر اساس کارهای کرون (۱۹۶۳)، در تنش‌برشی $\frac{N}{m^2}$ ، هیچ فلوکی در برابر تنش‌برشی جریان مقاومت نکرده و تمامی ذرات از یکدیگر جدا خواهند شد (صمدی و همکاران، ۱۳۸۹). کریشناپان (۲۰۰۶)، کتی و همکاران (۲۰۰۳)، اسکافیل و کریشناپان (۱۹۹۸) در تحقیقات خود در زمینه

رسوبهای ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (تنش‌برشی برابر ۰/۶ نیوتن بر مترمربع) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبها کافی است. پس از گذشت این زمان سرعت چرخش فلوم و درپوش تا رسیدن به سرعت مورد نظر آزمایش کاهش یافت و هر آزمایش ۲۴۰ دقیقه به طول انجامید. در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یک بار و پس از آن هر ۳۰ دقیقه یک بار نمونه‌گیری انجام شد. در هر زمان از سه عمق ۵/۵، ۱۰/۳ و ۱۸/۳ سانتی‌متر نمونه‌گیری انجام شد و هر نمونه حجم مشخصی (حدود ۵۰ سی‌سی) دارد که به‌طور یکسان از چهار موقعیت مختلف فلوم برداشته می‌شود. سپس با خشک‌کردن نمونه‌ها در اجاق، غلظت رسوبهای معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- پارامترهای هیدرولیکی

براساس داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV، رابطه زیر بین دور فلوم و سرعت متوسط جریان به‌دست آمد. در ادامه مطالعه مشاهده شد که پروفیل سرعت در فلوم دوار به‌صورت قابل قبولی مشابه کانال‌های باز است.

$$V = 0.2085 \ln(\omega) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (10)$$

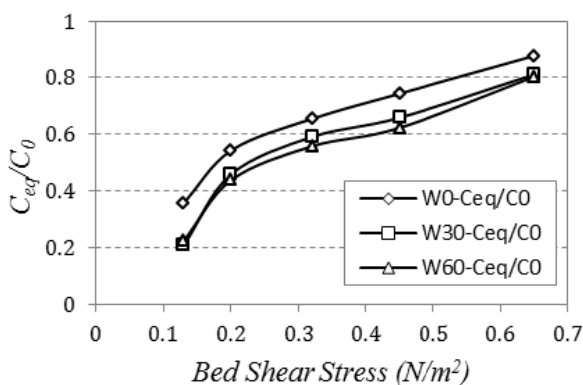
در این رابطه V سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) و ω مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه) است.

در تعیین تنش‌برشی از کواریانس داده‌های سرعت لحظه‌ای (تنش رینولدز) اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV استفاده شد و رابطه زیر بین دور فلوم و تنش‌برشی کف به‌دست آمد.

$$\tau = 0.0256 \omega^{1.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad (11)$$

در این رابطه τ تنش‌برشی متوسط جریان $(\frac{N}{m^2})$ است.

مقادیر غلظت تعادلی رسوبها، به شرح جدول ۲ به دست آمد. روشن است که پساب باعث افزایش تنش برشی آستانه ته نشینی شده است. به بیان دیگر رسوبها در محلول حاوی پساب نسبت به آب خالص، در تنش های بزرگتری نیز می توانند شروع به ته نشینی کنند. از سوی دیگر با افزایش غلظت اولیه رسوبها، تنش برشی آستانه ته نشینی افزایش یافته که این ناشی از افزایش احتمال تشکیل توده های رسوبی در غلظت های بالا است (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰).



شکل ۵ مقایسه تغییر متوسط $(\frac{C_{eq}}{C_0})$ برای درصدهای مختلف پساب

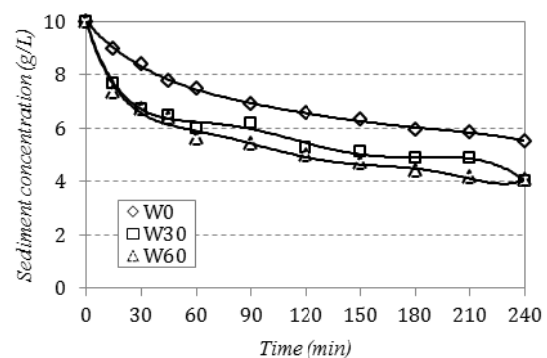
میلبورن و کریشناپان (۲۰۰۱) با استفاده از فلوم دوار دریافتند که رسوبهای رودخانه "های" برای تنش برشی بزرگتر از ۰/۴ نیوتن بر مترمربع به صورت معلق باقی می ماند. ما و همکاران (۲۰۰۸) نیز با انجام آزمایش هایی در فلوم دوار تنش برشی حداقل را برای جلوگیری از ته نشینی رسوبهای چسبنده از نوع کائولونیت برابر ۰/۸۳ نیوتن بر مترمربع به دست آوردند.

با توجه به مقادیر تنش برشی غیر رسوبگذار و رابطه های (۱) و (۲)، سرعت غیر رسوبگذار نیز قابل محاسبه است. مقادیر سرعت غیر رسوبگذار برای غلظت های مختلف در ستون دوم جدول ۲ آورده شده است.

هوکیانگها و ما (۲۰۰۹) و پارتندیس (۱۹۹۶) نیز در تحقیقات خود، رابطه بین تنش برشی و سرعت چرخش فلوم دوار را به صورت نمایی به دست آوردند.

۳-۲- ته نشینی رسوبهای معلق

برای سطح های مختلف پساب مشاهده شد که غلظت رسوبهای معلق برای تمامی مقادیر تنش های برشی و غلظت اولیه، در ۱۵ دقیقه آغازین، افتی ناگهانی دارد و سپس به تدریج کاهش می یابد. کاهش غلظت رسوبهای معلق تا رسیدن به حالت تعادل ادامه می یابد. نتایج نشان داد که پساب، درصد ته نشینی رسوبهای معلق در پایان آزمایش را نسبت به آب خالص ۳۰ درصد افزایش داده و همچنین سبب کاهش غلظت تعادلی و زمان رسیدن به آن می شود. مشخص شد که غلظت های ۳۰ و ۶۰ درصد پساب تقریباً تأثیر یکسانی بر مقدار ته نشینی رسوبهای معلق دارند. شکل های ۴ و ۵ به عنوان نمونه تأثیر پساب را به ترتیب بر افزایش درصد ته نشینی رسوبهای معلق و کاهش نسبت غلظت اولیه به غلظت تعادلی برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر و تنش برشی ۰/۱۳ نیوتن بر مترمربع نشان می دهد.



شکل ۴ تأثیر درصد پساب در روند ته نشینی رسوبهای معلق

$$\left(\tau = 0.13 \frac{N}{m^2} \right)$$

۳-۳- تنش برشی و سرعت غیر رسوبگذار

مقادیر تنش برشی آستانه ته نشینی در آب خالص، برابر ۳۰ و ۶۰ درصد پساب برای غلظت های اولیه مختلف براساس

روش‌ها علاوه بر مسأله فلوکوله شدن رسوب، ویژگیهای شیمیایی سیال نیز در نظر گرفته نشده است.

۳-۴- عدد فرود

معیار دیگری در انتخاب شرایط هیدرولیکی غیررسوبگذار، عدد فرود است که بر طبق تحقیقات مؤسسه USBR اگر عدد فرود در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۳۵ قرار داشته باشد، هیچ گونه ته‌نشینی رسوب در کانال وجود نخواهد داشت (بیرامی، ۱۳۸۵). براساس نتایج اندازه‌گیری‌های تحقیق حاضر، حداقل عدد فرود در شرایط غیررسوبگذار و برای غلظت‌های اولیه برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم برلیتر برای تمامی آزمایش‌ها به شرح ستون سوم جدول ۲ است.

قابل توجه است که پساب تأثیر ناچیزی بر افزایش حداقل عدد فرود در شرایط غیر رسوبگذار داشته و تفاوت چشمگیری بین درصدهای مختلف پساب وجود ندارد.

متوسط سرعت غیررسوبگذار در سطوح مختلف پساب به ترتیب برابر ۰/۳۷، ۰/۴۰ و ۰/۴۱ متر برثانیه است که نشان می‌دهد پساب باعث افزایش ۷٪ در سرعت غیررسوبگذار شده است.

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت رسوبهای معلق، تأثیر پساب در افزایش سرعت و تنش برشی آستانه ته‌نشینی رسوبگذار بیشتر مشهود است.

به منظور بررسی بیشتر و مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای دیگران، از روابط تجربی اشاره شده در مقدمه استفاده شد و نتایج در جدول ۳ آورده شده است. دیده می‌شود که جواب‌های به دست آمده از تمامی روش‌های تجربی نسبت به نتایج حاصل از اندازه‌گیری به طور چشمگیری کمتر است. این به معنای آن است که در حالتی که در کانال رسوبهای چسبیده معلق در جریان حضور دارد، روشهای تجربی، برای محاسبه حداقل سرعت غیررسوبگذار کارایی مناسبی ندارند. زیرا در این

جدول ۲ تنش برشی آستانه ته‌نشینی و حداقل سرعت غیررسوبگذار در سطوح مختلف پساب و غلظت

تنش برشی آستانه ته‌نشینی (N/m ²)			حداقل سرعت غیر رسوبگذار (m/s)			عدد فرود در شرایط غیر رسوبگذار			
درصد پساب	غلظت اولیه رسوبات (گرم برلیتر)			غلظت اولیه رسوبات (گرم برلیتر)			غلظت اولیه رسوبات (گرم برلیتر)		
	۵	۱۰	۲۰	۵	۱۰	۲۰	۵	۱۰	۲۰
۰	۰/۹۵	۰/۹۸	۱/۰۵	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۴
۳۰	۱/۱۰	۱/۲۰	۱/۴۰	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۶
۶۰	۱/۱۵	۱/۲	۱/۴	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۶

جدول ۳ حداقل سرعت غیر رسوبگذار با استفاده از روشهای تجربی مختلف (متر بر ثانیه)

نام روش	گرشین	لیسی	لوی	USBR	لاتیشنکو	زامارین		
						C = 5g / L	C = 10g / L	C = 20g / L
حداقل سرعت رسوبگذار	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۳
درصد خطا نسبت به آب خالص	٪۶۳	٪۹۴	٪۶۶	٪۶۹	٪۷۸	٪۷۱	٪۴۴	٪۲۰
درصد خطا نسبت به ٪۳۰ پساب	٪۶۵	٪۹۵	٪۶۸	٪۷۰	٪۷۹	٪۷۲	٪۴۷	٪۲۵
درصد خطا نسبت به ٪۶۰ پساب	٪۶۵	٪۹۵	٪۶۸	٪۷۱	٪۷۹	٪۷۲	٪۴۷	٪۲۵

W_{60}	سیال حاوی ۶۰ درصد پساب
y	عمق جریان
τ_b	تنش برشی بستر
τ_c	تنش برشی بحرانی
$\tau_{d,part}$	تنش برشی برای ته‌نشینی جزئی

با مقایسه این نتایج با آنچه مؤسسه USBR توصیه کرده می‌توان دریافت که در طراحی کانال‌های انتقال پساب و رسوبهای چسبنده معلق، با توجه به ویژگی فلوکوله شدن، حداقل عدد فرود طراحی را باید بیشتر از توصیه مؤسسه USBR در نظر گرفت.

۶- منابع

بیرامی م.ک. (۱۳۸۵). *سازه‌های انتقال آب*، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ص. ۴۶۰.

حسن‌لی ع.، جوان م. (۱۳۸۴). "ارزیابی پساب تصفیه شده شهری و کاربرد آن در آبیاری فضای سبز"، *مجله محیط شناسی*، شماره ۳۸، ص.ص. ۲۳-۳۰.

حسینی م.، ابریشمی ج. (۱۳۸۶). *هیدرولیک کانال‌های باز (چاپ شانزدهم)*، انتشارات آستان قدس رضوی، ص. ۶۰۴.

خواستاربروجنی، م. (۱۳۹۰). *بررسی آزمایشگاهی تاثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبنده در کانال‌های انتقال آب*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

صمدی بروجنی، ح.، نادری م. و فتاحی ر. (۱۳۸۹). "بررسی آستانه ته‌نشینی رسوبات چسبنده معلق با استفاده از مدل آزمایشگاهی فلوم دایره‌ای"، *مجله پژوهش آب ایران*، دانشگاه شهرکرد، سال چهارم، شماره ۷، ص.ص. ۷۵-۸۲.

معاضد، ه.، جعفرزاده حقیقی ن. و شامحمدی حیدری ز. (۱۳۸۵). "حذف کادمیوم از آب و پساب کشاورزی با استفاده از پوسته شلتوک"، *همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز*، دوازدهم تا چهاردهم اردیبهشت.

نظری ن. و صالحی نیشابوری ع.ا. (۱۳۸۸). "مدلسازی جریان و حرکت ذرات رسوب در کانال‌های باز، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران دانشگاه تهران، ۲۴ تا ۲۶ آذر.

وجدانی ن.، قمشی م. و شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۱). "بررسی آزمایشگاهی تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده شش کانال آبیاری در استان خوزستان"، *ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز*، ص.ص. ۳۷-۴۳.

۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر نشان داد که پساب علاوه بر افزایش خاصیت چسبندگی رسوبهای چسبنده و احتمال فلوکوله شدن رسوبهای معلق، باعث افزایش ته‌نشینی و سرعت و تنش برشی غیر رسوبگذار، در مقایسه با آب خالص می‌شود. با وجود این واقعیت، در طراحی کانال‌ها، حداقل سرعت غیررسوبگذار را باید بیشتر از آنچه روش‌های تجربی مانند روش‌های گرشین، لوی، لانتشکو، زامارین، لیبسی و USBR مشخص می‌کنند، در نظر گرفت و در این زمینه، انجام آزمایش‌های ته‌نشینی برای دستیابی به طرحی موفق ضروری است. زیرا در تمامی این روشها، مسأله فلوکوله شدن رسوبهای چسبنده و ویژگیهای سیال در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد که اگر کانال حاوی پساب و رسوبهای چسبنده معلق باشد، حداقل عدد فرود در شرایط غیررسوبگذار برابر ۰/۴۵ است در حالی که بر طبق نظر USBR، این مقدار برابر ۰/۱۲ توصیه شده است.

۵- فهرست علائم

α	نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم
C	غلظت رسوبات معلق
C_{eq}	غلظت تعادلی
C_0	غلظت اولیه رسوبات
Fr	عدد فرود
Re	عدد رینولدز
W_0	سیال بدون پساب (آب خالص)
W_{30}	سیال حاوی ۳۰ درصد پساب

- Maa J.P., Kwon J., Hwang K. and Kyung Ha, H. (2008). "Critical bed shear stress for cohesive sediment deposition under steady flows", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 134: pp. 1767-1771.
- Milburn D. and Krishnappan B.G. (2001). "Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River, Northwest Territories, Canada", 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. 19-24.
- Samadi-Boroujeni H. (2004). Modeling of deposition and self weight consolidation of cohesive sediments, PhD dissertation, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz.
- USBR (1967). Canals and Related Structures Design standards No. 3, release No. DS-3-5, Denver, Colorado, USA.
- Varshney R.S. and Gavpta S.C. (1983). Theory and design of irrigation structure, Fifth Edition, Newch and Brosroorkee India.
- Winterwerp J.C. (2007). On the sedimentation rate of cohesive sediment, *Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics*, pp. 209-225.
- Grishin M.M. (1982). *Hydraulic structures*, Mir publication of Environmental Sciences, Moscow.
- 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.
- Hasan Nattaj Jelodar A. and Navayineya B. (2008). "Effective suspended particles and sediment on water flow velocity". *World Applied Sciences Journal*, 4 (2): pp. 295-299.
- 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. and Engel P. (2004). "Distribution of bed shear stress in rotating circular flume", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 130: pp. 324-331.
- Krishnappan B.G. (2006). "Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume", *The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE)*, Sep. 10-13, Philadelphia, USA.