

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر رسوبات درشت‌دانه بستر بر روند ته‌نشینی و تله‌اندازی رسوبات چسبنده معلق

میلاد خواستار بروجنی<sup>1</sup>، سعید رضا خداشناس<sup>2\*</sup> و حسین صمدی بروجنی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

2- استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

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

\* [khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

(دریافت مقاله: 96/12/21؛ پذیرش مقاله: 97/6/18)

**چکیده** - یکی از عوامل مؤثر بر ته‌نشینی و تله‌اندازی رسوبات چسبنده، جنس بستر می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از فلوم دایره‌ای به بررسی تأثیر رسوبات بستر بر تله‌اندازی و ته‌نشینی رسوبات معلق در غلظت‌های گوناگون و تنش‌های برشی مختلف جریان پرداخته شده است. آزمایش‌ها در دو حالت بستر صاف و بستر با رسوبات درشت دانه ( $D_{50} = 2.4, 9.4 \text{ mm}$ ) برای غلظت‌های اولیه 5، 10 و 20 گرم بر لیتر و سرعت‌های جریان 0/14، 0/24 و 0/34 متر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد در دو حالت بستر صاف و زبر، غلظت رسوبات معلق با گذشت زمان کاهش می‌یابد اما بسترهای زبر موجب افزایش نرخ ته‌نشینی و افزایش زمان رسیدن به غلظت تعادلی می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد ضریب تله‌اندازی در بستر ماسه‌ای و شنی با افزایش تنش‌برشی و غلظت اولیه، نسبت به بستر صاف به ترتیب تا 5/7 و 3/5 برابر افزایش می‌یابد. افزایش ضریب تله‌اندازی در تنش‌های برشی بزرگتر را می‌توان با تأثیر رسوبات درشت دانه بستر بر کاهش سرعت جریان و ایجاد پدیده‌های ترکشی - رفت و برگشتی ناشی از آشفتگی جریان بیان نمود.

**کلیدواژگان:** ته‌نشینی، تله‌اندازی، رسوبات چسبنده، فلوم دایره‌ای.

## 1- مقدمه

انتقال و ته‌نشینی ذرات ریزدانه در بالای بستر رودخانه‌های ماسه‌ای به ویژه در مناطق کوهستانی یک پدیده معمول است. تغییرات رسوبات معلق در اندرکنش آب و رسوب از سه طریق امکان پذیر است. در حالت اول رسوبات به دلیل تنش‌برشی جریان فرسایش یافته و در ستون آب معلق می‌شوند. در حالت دوم رسوبات اجازه ته‌نشینی پیدا کرده و پس از آن در بستر باقی می‌مانند و پتانسیل فرسایش را دارند. در حالت سوم رسوبات با توجه به ویژگی‌های بستر، پس از ته‌نشینی در فضای خالی بستر

نفوذ کرده و تله‌اندازی می‌شوند (Krishnappan and Engel, 2006). ته‌نشینی رسوبات ریزدانه به درون مواد بستر از طریق نیروی گرانش و یا نیروی مکش ناشی از جدایش جریان در نزدیک مواد بستر اتفاق می‌افتد (González, 2016). ساختار جریان آشفته در نزدیکی بستر تأثیر بسزایی در انتقال و تله‌اندازی ذرات رسوبی دارد. مطالعات مختلف بر ساختار آشفتگی جریان نشان می‌دهد که پدیده ترکشی<sup>1</sup> - رفت و برگشتی<sup>2</sup> در نزدیکی بستر برای تله‌اندازی و انتقال رسوبات بسیار با اهمیت

<sup>1</sup> Bursting

<sup>2</sup> Sweep

داشته باشد (Heppell et al., 2009)

نگرش اولیه ته‌نشینی رسوبات چسبنده توسط Krone (1962)، Mehta (1973) و Partheniades (1973) آغاز شد. این محققان با استفاده از پارامتر تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی، روابط نرخ ته‌نشینی را ارائه دادند (Maa et al., 2009).

به طور کلی دو نوع ته‌نشینی کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می‌شود؛ بر این اساس دو تنش‌برشی بحرانی (تنش‌برشی که در آن شرایط، تمام رسوبات معلق ته‌نشین شوند) و تنش‌برشی آستانه ته‌نشینی برای رسوبات چسبنده در نظر گرفته می‌شود. وقتی که تنش‌برشی بستر کوچک‌تر از تنش‌برشی بحرانی است، ته‌نشینی کامل صورت می‌گیرد و تمام ذرات رسوبی و توده‌ها ته‌نشین می‌شوند. رابطه زیر موسوم به رابطه ته‌نشینی Krone (1962) است که به عنوان یکی از روابط پایه برای محاسبه نرخ ته‌نشینی مطرح می‌باشد و در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Huang et al., 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،  $\omega$  سرعت سقوط توده‌ها،  $c$  غلظت رسوبات چسبنده معلق،  $\tau$  تنش‌برشی جریان و  $\tau_{d,full}$  تنش‌برشی بحرانی می‌باشد.

ته‌نشینی جزئی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش‌برشی بستر بزرگ‌تر از تنش‌برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل و کوچکتر از مقدار تنش‌برشی آستانه ته‌نشینی باشد. در محدوده تنش‌برشی بستر، توده‌های نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های ضعیف به طور معلق باقی می‌مانند. ته‌نشینی جزئی از رابطه (3) قابل محاسبه است. رابطه (3) حالت اصلاح شده رابطه نرخ ته‌نشینی Krone (1962) می‌باشد با این تفاوت که برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است (Huang et al., 2006).

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

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

است. پدیده ترکشی یک پدیده شایع در لایه مرزی آشفته و کانال‌های باز است و شواهدی از وجود ساختارهای یکپارچه آشفته که در منطقه نزدیک بستر میدان جریان شکل می‌گیرد، نشان می‌دهد. این پدیده شامل یک روند شبه چرخه‌ای از حرکت به سمت بالا جریان با سرعت پایین (خروج) و حرکت به سمت پایین با سرعت بالا می‌باشد که با نوسانات بالای فشار با طول موج کوتاه همراه است. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که نوسانات شدید فشار نقش مهمی در انتقال رسوبات دارد (Detert et al., 2011; Dwivedi et al., 2010; Dwivedi et al., 2011). نشان دادند گرادیان افقی و عمودی فشار ناشی از نوسانات فشار در تله‌اندازی رسوبات دارای اهمیت هستند. اگرچه استدلال این محققان کمی متفاوت است، اما معتقدند که رسوبات در پدیده رفت و برگشتی جذب و تله‌اندازی می‌شوند. با این حال در نرخ بالای جریان و تخلیه بار بستر Radice et al 2013 دریافتند همبستگی بالایی بین نرخ انتقال با پدیده پس‌زنی<sup>1</sup> وجود دارد.

نفوذ ذرات ریزدانه در بین مواد بستر موجب کاهش تخلخل و هدایت هیدرولیکی و در نهایت منجر به اشباع یا مسدود شدن محیط متخلخل می‌شود که این موضوع می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ناحیه هیپوریک<sup>2</sup> تأثیرگذار باشد (Mohajeri et al., 2016).

علاوه بر بحث تله‌اندازی رسوبات معلق ریزدانه در مواد بستر، خاصیت چسبندگی نیز موجب پیچیدگی فرآیند ته‌نشینی این نوع از رسوبات می‌شود. وجود 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، مواد ارگانیک نیز تأثیر بسزایی در چسبندگی رسوبات ریزدانه دارند (Amelia et al., 2010) که این خاصیت گاهی موجب جذب آلودگی‌ها و حتی عناصر سنگین شده که ته‌نشینی آن‌ها در ناحیه هیپوریک می‌تواند تأثیرات زیست محیطی قابل توجهی به همراه

<sup>1</sup> Ejection

<sup>2</sup> Hyporheic

برای ته‌نشینی جزئی، زمانی که تنش‌برشی بستر بزرگ‌تر از تنش‌برشی بحرانی باشد ته‌نشینی وجود ندارد و نرخ ته‌نشینی برابر صفر خواهد بود.

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

در روابط فوق،  $c_{eq}$  غلظت تعادلی و  $\tau_{d,part}$  تنش‌برشی ته‌نشینی جزئی و دیگر پارامترها مشابه روابط قبلی می‌باشد.

محققان بسیاری به بررسی ته‌نشینی رسوبات ریزدانه در حالت‌های مختلف غلظت، تنش‌برشی، خصوصیات سیال پرداختند که از این میان می‌توان به Winterwerp (2007)، Maa et al. (2009)، Giardino et al. (2009)، Boroujeni et al. (2018) و Amelia et al. (2010) اشاره نمود. اما در مورد تله‌اندازی رسوبات معلق در مواد بستر به نسبت تحقیقات کمتری صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

Packman and MacKay (2003) با استفاده از مدل تله‌اندازی به منظور بررسی تأثیر رسوبات معلق بر نرخ تبادل هیپروفیک با رسوبات بستر پرداختند. این محققان دریافتند زمانی که فضای منفذی در درون لایه بالایی با خاک رس پر شد، لایه مسدود کننده ایجاد می‌شود که مانع از تبادل رسوبات و به دام انداختن بیشتر رسوبات ریزدانه می‌شود. این محققان دریافتند که مقدار نسبتاً کمی از رسوبات معلق می‌تواند در بین رسوب بستر مسدود شوند و تبادل را مهار کنند. آنها همچنین پیشنهاد کردند فرم بستر برای مکش رسوبات ریزدانه به داخل بستر نیاز است و این عمل نمی‌تواند تحت شرایط بستر تخت اتفاق بیفتد.

Packman et al. (2004) تبادل آب سطحی و آب منفذی در بین شن‌های بستر با و بدون فرم بستر مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که تبادل بین آب سطحی و زیرسطحی به شدت وابسته سرعت جریان است که این ایده با جریان آب منفذی با جریان رودخانه که صرف نظر از توپوگرافی همراه است، پشتیبانی می‌شود. این محققان دریافتند رسوبات درشت دانه ته‌نشین شده نظیر ماسه، نفوذپذیری بالا و ناهنجاری‌های کوچک توپوگرافی در محدوده قطر دانه می‌تواند جدایی جریان را فراهم کند که این موضوع هد کافی برای ایجاد مکش افقی را فراهم

می‌کند.

Rehg and et al. (2005) نشان دادند حرکت رسوبات بستر با فرم بستر (دیون) مقدار تله‌اندازی رسوبات را افزایش می‌دهد. آنها افزایش تله‌اندازی رسوب را به حرکت بستر که مانع تشکیل لایه مسدود شونده در بالای سطح بستر رودخانه می‌شود، نسبت دادند. همچنین این محققان گزارش دادند تحت شرایط تنش‌برشی که موجب حرکت ذرات بستر و لایه مسدود کننده، که مانع حرکت ذرات بود، می‌شود مکش پیوسته رسوبات ریزدانه به داخل بستر را فراهم می‌کند.

Krishnappan and Engel (2006) پتانسیل تله‌اندازی برای شن‌های بستر تحت شرایط هر دو حالت تنش‌برشی کم و زیاد بررسی کردند و دریافتند که لایه مسدود کننده تشکیل نمی‌شود. این مشاهدات نشان می‌دهد نسبت منفذ بزرگتر مرتبط با شن برای جلوگیری از تشکیل لایه مسدود کننده برای غلظت مورد استفاده در این تحقیق کافی است. بر این اساس شن با فضای خالی بزرگ پتانسیل بالاتری در تله‌اندازی رسوبات ریزدانه حتی در شرایط جریان پایین دارد.

شناخت بیشتر از ویژگی‌های تله‌اندازی رسوبات ریزدانه در بستر با رسوبات درشت‌دانه موجب درک بهتر از دینامیک انتقال رسوبات ریزدانه می‌شود. در پژوهش‌های پیشین کمتر به نقش رسوبات بستر بر روند ته‌نشینی رسوبات پرداخته شده است. از این رو در این پژوهش در نظر است تأثیر رسوبات بستر بر تله‌اندازی و روند ته‌نشینی رسوبات معلق در غلظت‌های گوناگون و آشفتگی‌های متفاوت جریان مورد بررسی قرار گیرد.

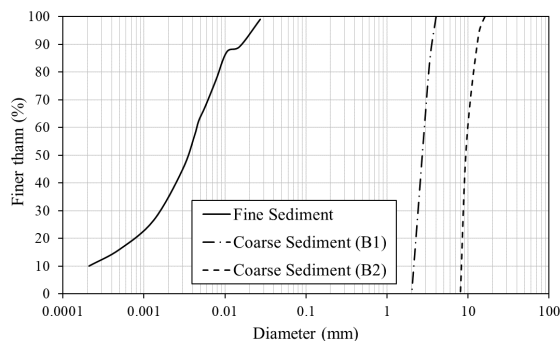
## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- رسوبات مورد آزمایش

برای انجام این تحقیق احتیاج به رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه است. رسوبات از رودخانه ارمند که از حوضه کارون شمالی سرچشمه می‌گیرد و نهایتاً به سد کارون 4 می‌ریزد، جمع آوری شد. پس از جداسازی رسوبات درشت‌دانه به منظور تهیه رسوبات ریزدانه، باقی‌مانده رسوبات در آب حل و سپس از الک شماره 200 استاندارد

**جدول 1** مشخصات فیزیکی رسوبات درشت‌دانه بستر

پارامتر	بستر اول (B <sub>1</sub> )	بستر دوم (B <sub>2</sub> )
D <sub>10</sub>	2/13	8/2
D <sub>30</sub>	2/40	8/8
D <sub>50</sub>	2/80	9/4
D <sub>60</sub>	2/87	10/1
ضریب یکنواختی	1/3	1/2
ضریب انحنا	0/9	0/9



شکل 1 دانه‌بندی رسوبات ریزدانه و درشت دانه

این محققان دریافتند برای عمق 20 سانتی‌متری جریان، زمانی که درپوش و فلوم برعکس یکدیگر بچرخند و نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم 1/1 باشد؛ پروفیل سرعت در فلوم دایره‌ای مشابه کانال‌های باز و به صورت لگاریتمی است. همچنین این محققان نشان دادند در این حالت توزیع تنش‌برشی در عرض فلوم را می‌توان به صورت یکنواخت در نظر گرفت و بر این اساس می‌توان نتایج بدست آمده از فلوم دایره‌ای را به کانال‌های مستقیم تعمیم داد. این محققان ارتباط سرعت متوسط و تنش برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش به شرح روابط (6) و (7) است.

$$V=0.2085\ln(\omega)-0.0556 \quad R^2=0.98 \quad (6)$$

$$\tau = 0.0254\omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.99 \quad (7)$$

در رابطه‌های بالا،  $V$  سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)،  $\tau$  تنش‌برشی جریان (نیوتن بر متر مربع) و  $\omega$  مجموع سرعت چرخشی رینگ و فلوم (دور بر دقیقه) است. در پژوهش حاضر از روابط فوق برای تعیین سرعت و تنش‌برشی جریان به ازای سرعت‌های مختلف چرخش فلوم و درپوش استفاده می‌شود.

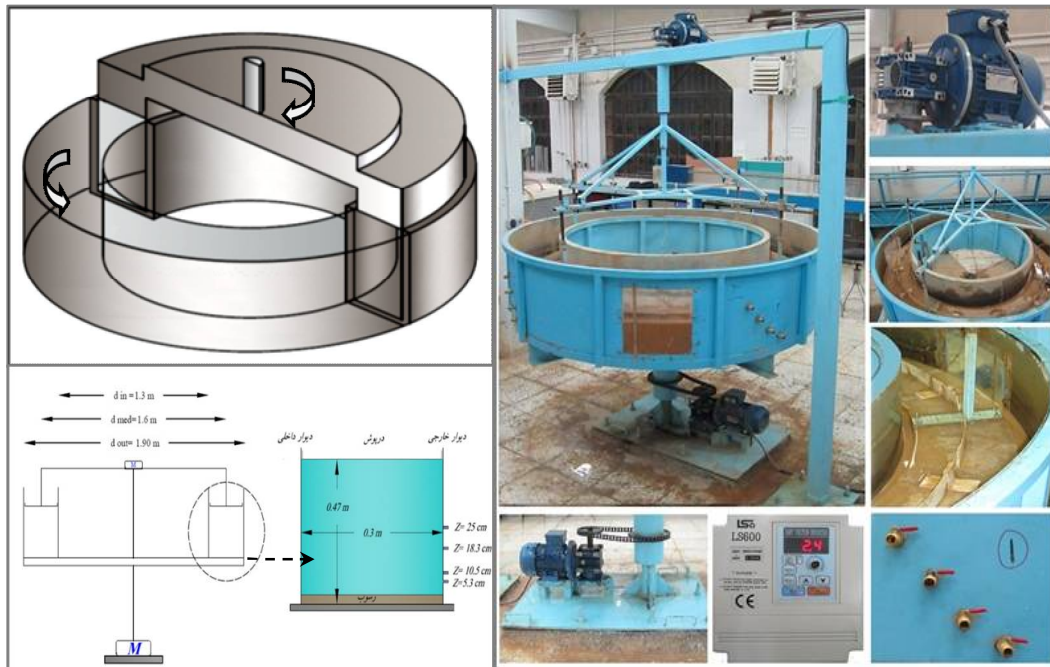
ASTM عبور داده شد. رسوبات عبوری از الک شماره 200 با قطر 0/075 میلی‌متر طبق تعاریف در گروه رسوبات رس و سیلت قرار می‌گیرد که دارای خاصیت چسبندگی نیز خواهند بود. رسوبات درشت‌دانه نیز بر اساس تقسیم‌بندی اتحادیه ژئوفیزیک آمریکا، در محدوده شن و قلوه سنگ (اندازه بین 2 تا 64 میلی‌متر) و در دو محدوده بسیار ریز (B<sub>1</sub>) با قطر متوسط بین 2 تا 4 میلی‌متر و محدوده متوسط (B<sub>2</sub>) با قطر متوسط 8 تا 16 میلی‌متر جداسازی شد. رسوبات درشت دانه به گونه‌ای انتخاب شد که دارای دانه‌بندی یکنواخت باشند (ضریب یکنواختی کمتر از 4 و ضریب انحنا کمتر از 1/5). در شکل 1 دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده ارائه شده است.

بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری، رسوبات ریزدانه حاوی 63 درصد رس، 37 درصد سیلت و با قطر متوسط 0/0035 میلی‌متر می‌باشند. مشخصات رسوبات درشت دانه نیز در جدول 1 ارائه شده است.

## 2-2- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های تله‌اندازی رسوبات با استفاده از فلوم دایره‌ای موجود در آزمایشگاه علوم آب و خاک مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد انجام شد. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب 1/3، 1/9 و 1/6 متر می‌باشد که از ورق گالوانیزه با پنجره‌های پلکسی‌گلس ساخته شده‌است. درپوش از جنس پلکسی‌گلس با قطر 1/6 متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. 28 عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل 5/3، 10/5، 15/2، 18/3، 22/2، 25، 30/5 و 34 سانتی‌متر از کف جهت 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 نموده‌است. شکل 2 نمای شماتیک و قسمت‌های مختلف این فلوم را نشان می‌دهد.

به بررسی پارامترهای Khastar Boroujeni et al. (2018) هیدرولیکی در فلوم دایره‌ای با استفاده از سرعت سنج صوتی پرداختند.



شکل 2 نمای شماتیک و اجزای فلوم دایره‌ای مورد استفاده

### 2-3- طراحی آزمایش‌ها

آزمایش‌های ته‌نشینی رسوبات ریزدانه معلق در سه غلظت 5، 10 و 20 گرم بر لیتر و برای سه سرعت جریان (اختلاف دور فلوم و درپوش) و در دو حالت بستر صاف ( $B_0$ ) و بستر حاوی رسوبات درشت‌دانه ( $B_1$  و  $B_2$ ) انجام شد. در این تحقیق منظور از بستر صاف، بستر فلوم با جنس گالوانیزه و بدون رسوبات بستر می‌باشد.

عمق رسوبات درشت‌دانه در کف فلوم با توجه به قطر ذرات ده سانتی‌متر ( $SD > 2d_{50}$ ) در نظر گرفته شد. همچنین به منظور ثابت بودن شرایط هیدرولیکی و نمونه‌گیری از شیرهای مشابه در هر دو حالت از بستر، ورقه‌ای فلزی از جنس گالوانیزه در ده سانتی‌متری از کف فلوم برای آزمایش‌های بستر صاف نصب شد.

غلظت رسوبات با توجه به حجم سیال متناظر با 20 سانتی‌متر عمق تهیه و پس از مخلوط کردن با همزن الکتریکی وارد فلوم در حال حرکت شد. مدت زمان آزمایش‌ها برای رسیدن به یک غلظت تعادلی پنج ساعت در نظر گرفته شد که به منظور سنجش غلظت رسوبات معلق در یک ساعت اول هر 15 دقیقه یکبار و بعد از آن هر 30 دقیقه نمونه‌گیری انجام شد. در هر زمان از

عمق‌های 4/9، 8/3، 12/8 و 17/8 سانتی‌متری بستر و چهار موقعیت فلوم نمونه‌گیری بعمل آمد. سپس با خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوبات معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

در آزمایش‌ها با بستر درشت‌دانه پس از پایان یافتن هر آزمایش، فلوم به طور کامل تخلیه و پس از شستشوی کامل رسوبات بستر، شرایط برای آزمایش‌های بعدی فراهم می‌شد. اما در آزمایش‌ها با بستر صاف ترتیب آزمایش‌ها بدین گونه بود که ابتدا کم‌ترین غلظت رسوب (5 گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش‌ها برای سه تنش‌برشی انجام پذیرفت. در این پژوهش روند اعمال تنش‌برشی از مقدار تنش‌برشی کمتر به سمت تنش‌برشی بزرگ‌تر بود. در ادامه‌ی آزمایش‌ها با افزودن رسوب غلظت‌های بعدی (10 و 20 گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش‌ها به همین ترتیب ادامه یافت. سرعت‌های جریان (کمینه و بیشینه) به گونه‌ای انتخاب شد که تنش‌برشی جریان برای تمام غلظت‌های رسوب در حالت بستر صاف و بستر زبر در محدوده تنش‌برشی آستانه و ته‌نشینی کامل رسوبات معلق قرار گیرد. به همین منظور پیش از آزمایش‌ها به نحوی صورت گرفت که غلظت 5 گرم

حالت تعادلی ادامه می‌یابد. با توجه به شکل 3 مشخص است که در حالت بستر صاف نسبت غلظت تعادلی رسوبات به غلظت اولیه ( $C_{eq}/C_0$ ) وابسته به تنش‌برشی جریان و مستقل از غلظت اولیه رسوبات است. در این حالت مشاهده می‌شود که مقادیر نسبت  $C_{eq}/C_0$  در یک تنش‌برشی مشخص از جریان و برای هر غلظت اولیه تقریباً ثابت است. اما در حالت بستر حاوی رسوبات، این موضوع متفاوت است. همان‌طور که در شکل 3- ب مشخص است در بستر با رسوبات ماسه‌ای ( $B_1: D_{50} = 2/8$  mm) نسبت  $C_{eq}/C_0$  مستقل از هر دو پارامتر غلظت اولیه رسوبات و آشفتگی جریان است. در این حالت غلظت تعادلی در تمام آزمایش‌ها تقریباً یکسان است و رسوبات ماسه‌ای بستر موجب تله‌اندازی رسوبات معلق شده‌اند. شکل 3- ج نسبت  $C_{eq}/C_0$  برای بستر با رسوبات شنی ( $B_2: D_{50} = 9/4$  mm) را نشان می‌دهد. در این حالت روند ته‌نشینی از بی‌نظمی خاصی پیروی می‌کند و می‌توان اظهار داشت که تغییرات بین دو حالت بستر صاف و بستر با رسوبات ماسه‌ای است.

بر لیتر رسوبات (کمینه غلظت)، برای تعیین سرعت حداکثر و غلظت 20 گرم بر لیتر (بیشینه غلظت) نیز برای تعیین سرعت حداقل انتخاب شد. بر این اساس با انجام آزمایش‌های اولیه اختلاف سرعت فلوم و درپوش (با نسبت 1/1) که در آن 80% رسوبات معلق ته‌نشین شوند به عنوان سرعت کمینه و در حالتی که حدود 80% رسوبات به صورت معلق باقی بمانند، به عنوان سرعت بیشینه انتخاب شد. در نهایت آزمایش‌ها برای سه مجموع دور فلوم و درپوش به ترتیب 2/4، 4/2 و 6/2 دور بردقیقه (تنش‌برشی 0/13، 0/32 و 0/65 نیوتن بر متر مربع) انجام پذیرفت. جدول 2 شرایط هر یک از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

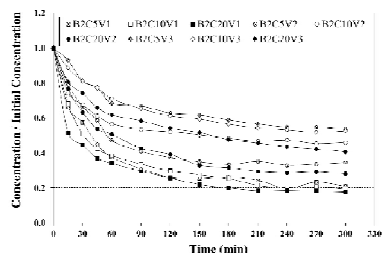
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- روند ته‌نشینی رسوبات معلق

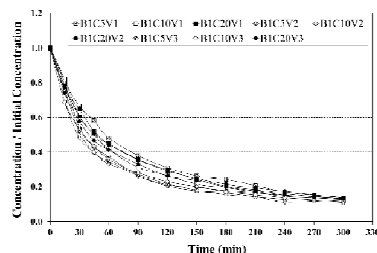
همان‌طور که در شکل 3 قابل مشاهده است تغییرات غلظت رسوبات معلق در حالت‌های مختلف بستر، تابعی از زمان است. بدین ترتیب که غلظت رسوبات معلق با گذشت زمان کاهش یافته و این روند تا رسیدن به یک

جدول 2 ویژگی و شرایط هیدرولیکی آزمایش‌های ته‌نشینی

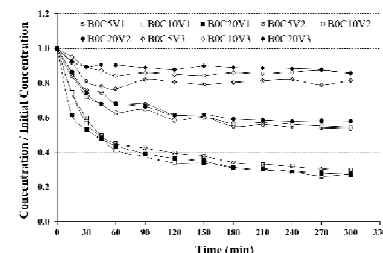
تش‌برشی جریان ( $N/m^2$ )	سرعت متوسط جریان (m/s)	سرعت چرخش فلوم و درپوش (rpm)	قطر متوسط رسوبات بستر (mm)	غلظت اولیه رسوبات (gr/l)	نام آزمایش	قطر متوسط رسوبات بستر (mm)	غلظت اولیه رسوبات (gr/l)	نام آزمایش	قطر متوسط رسوبات بستر (mm)	غلظت اولیه رسوبات (gr/l)	نام آزمایش
0/12	0/14	2/4	9/4	5	$C_5V_1B_2$	2/8	5	$C_5V_1B_1$	-	5	$C_5V_1B_0$
0/32	0/24	4/2	9/4	5	$C_5V_2B_2$	2/8	5	$C_5V_2B_1$	-	5	$C_5V_2B_0$
0/65	0/34	6/2	9/4	5	$C_5V_3B_2$	2/8	5	$C_5V_3B_1$	-	5	$C_5V_3B_0$
0/12	0/14	2/4	9/4	10	$C_{10}V_1B_2$	2/8	10	$C_{10}V_1B_1$	-	10	$C_{10}V_1B_0$
0/32	0/24	4/2	9/4	10	$C_{10}V_2B_2$	2/8	10	$C_{10}V_2B_1$	-	10	$C_{10}V_2B_0$
0/65	0/34	6/2	9/4	10	$C_{10}V_3B_2$	2/8	10	$C_{10}V_3B_1$	-	10	$C_{10}V_3B_0$
0/12	0/14	2/4	9/4	20	$C_{20}V_1B_2$	2/8	20	$C_{20}V_1B_1$	-	20	$C_{20}V_1B_0$
0/32	0/24	4/2	9/4	20	$C_{20}V_2B_2$	2/8	20	$C_{20}V_2B_1$	-	20	$C_{20}V_2B_0$
0/65	0/34	6/2	9/4	20	$C_{20}V_3B_2$	2/8	20	$C_{20}V_3B_1$	-	20	$C_{20}V_3B_0$



(ج)



(ب)



(الف)

شکل 3 تغییرات غلظت رسوبات معلق ( $C/C_0$ ) نسبت زمان، (الف) بستر صاف ( $B_0$ )، (ب) بستر ماسه‌ای ( $B_2$ ) و (ج) بستر شنی ( $B_3$ )

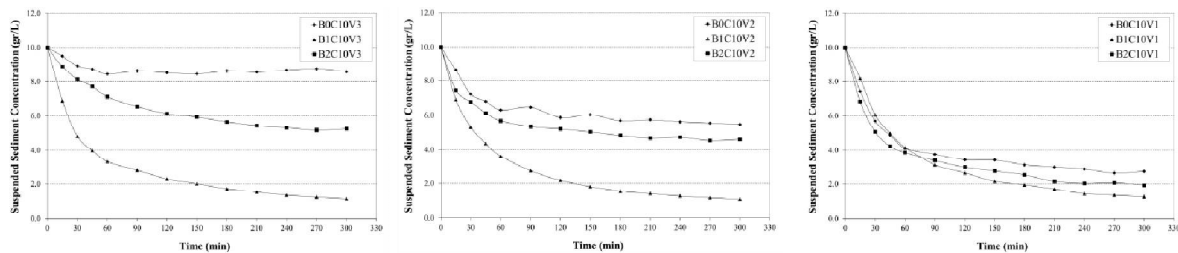
در ادامه تغییرات غلظت رسوبات معلق به ازای غلظت‌های اولیه مختلف در سرعت دوم (4/2 rpm) ترسیم شد که نتایج در شکل 5 ارائه شده است. مشخص است در تمام غلظت‌های اولیه به ازای یک سرعت ثابت، مقدار ته‌نشینی رسوبات معلق در حالت بستر با رسوبات درشت‌دانه نسبت به بستر صاف بیشتر است و این موضوع در غلظت‌های اولیه بزرگتر مشهودتر است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ته‌نشینی رسوبات در بستر ماسه‌ای نسبت به بستر شنی بیشتر است که با افزایش غلظت اولیه، این تفاوت کاهش می‌یابد. یکی از پارامترهای موثر بر این پدیده را می‌توان مسدود شدن منافذ سطحی لایه بستر معرفی کرد. همچنین قابل مشاهده است که زمان رسیدن به غلظت تعادلی کاملاً وابسته به شرایط هیدرولیکی آزمایش می‌باشد. علاوه بر این در صورتی که شرایط آزمایش یکسان باشد غلظت اولیه رسوبات بیشترین تأثیر را در مقدار غلظت تعادلی و زمان رسیدن به آن دارد.

وابسته بودن غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات یکی از تفاوت‌های بارز در رفتار رسوبات چسبنده نسبت به رسوبات غیر چسبنده است. در رسوبات غیر چسبنده، غلظت تعادلی فقط تابعی از تنش‌برشی بستر است و غلظت اولیه رسوبات بی‌تأثیر می‌باشد.

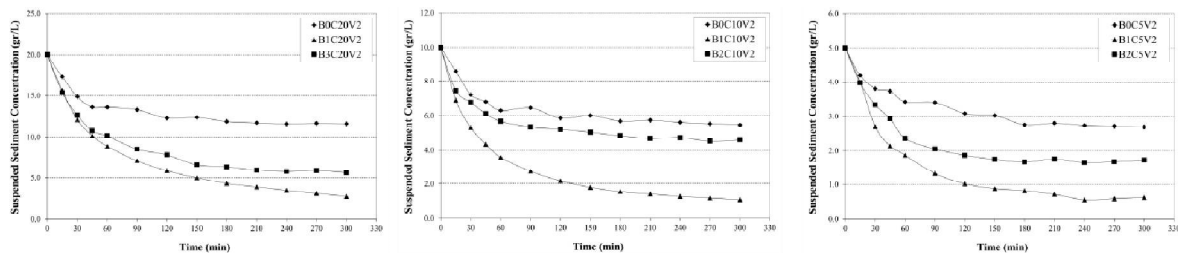
در این حالت از بستر مقادیر نسبت  $C_{eq}/C_0$  برای سرعت‌های پایین مشابه بستر صاف است اما افزایش سرعت جریان، موجب می‌شود  $C_{eq}/C_0$  از هر دو پارامتر غلظت اولیه و تنش‌برشی جریان تأثیر بپذیرد.

شکل 4 تغییرات غلظت رسوبات معلق را به عنوان نمونه برای غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر و تنش‌های برشی گوناگون نشان می‌دهد.

به طور کلی می‌توان بیان داشت که در هر سه حالت از بستر، غلظت رسوبات معلق تابعی از سرعت جریان است به طوری که افزایش سرعت موجب کاهش ته‌نشینی رسوبات معلق می‌شود. با این تفاوت که در بستر ماسه‌ای این تأثیر بسیار کمتر از بستر شنی و بستر صاف است. همچنین قابل مشاهده است که در تمام تنش‌های برشی در بسترهای رسوبدار میزان ته‌نشینی رسوبات معلق نسبت به حالت بستر صاف بیشتر است. این در حالی است که در بستر صاف زمان رسیدن به غلظت تعادلی برای تمام غلظت‌های اولیه کمتر از بستر با رسوبات شنی و ماسه‌ای است. این موضوع به دلیل ورود رسوبات نزدیک بستر به داخل بستر با جریانی آرام نسبت به جریان بالای بستر است. لازم به توضیح است که برای دیگر غلظت‌های اولیه رسوب نیز نتایج مشابه بدست آمد.

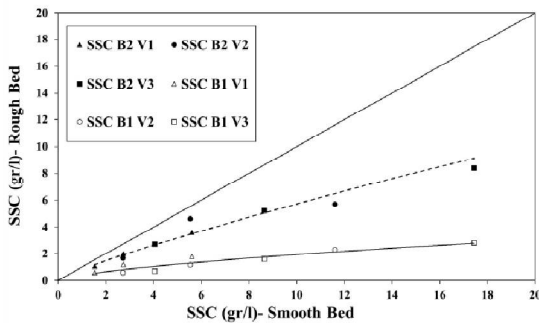


شکل 4 تغییرات غلظت رسوبات معلق نسبت به زمان در غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر و سرعت‌های مختلف جریان در حالت بستر صاف و زیر



شکل 5 تغییرات غلظت رسوبات معلق نسبت به زمان در سرعت 4/2 دور بر دقیقه و غلظت‌های اولیه متفاوت در حالت بستر صاف و زیر

تعدالی رسوبات معلق درحالت بستر صاف و بستر ماسه‌ای و بستر شنی بر حسب گرم بر لیتر می‌باشد.



شکل 6 رابطه بین غلظت تعدالی رسوبات معلق بین بستر صاف و زبر

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود در بسترهای زبر مقدار غلظت رسوبات معلق نسبت به بستر صاف کاهش یافته و این اختلاف در سرعت‌های بالاتر بیشتر است.

در شکل 7- الف نتایج مربوط به متوسط درصد ته‌نشینی رسوبات در سرعت‌های مختلف فلوم و برای هر غلظت اولیه ارائه شده است. قابل مشاهده است که در حالت‌های مختلف، درصد ته‌نشینی با افزایش سرعت جریان کاهش یافته که این کاهش برای بستر صاف بیشتر و در بستر ماسه‌ای کمینه می‌باشد. همچنین مشخص است که متوسط درصد ته‌نشینی در بسترهای حاوی رسوب نسبت به بستر صاف برای تمامی غلظت‌های اولیه، بیشتر است که این امر حاکی از تله‌اندازی رسوبات معلق به درون رسوبات بستر می‌باشد.

شکل 7- ب متوسط درصد‌های ته‌نشینی در غلظت‌های اولیه متفاوت در هر سرعت را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در این حالت روند ته‌نشینی در بستر صاف و ماسه‌ای به ازای غلظت‌های مختلف تقریباً ثابت است. این درحالی است که تغییرات درصد ته‌نشینی درحالت بستر شنی روندی صعودی دارد. یکسان بودن درصد ته‌نشینی در بستر صاف و بستر ماسه‌ای را می‌توان ناشی از یکنواختی تنش‌برشی جریان در نزدیکی بستر دانست اما در بستر شنی، افزایش زبری کاهش سرعت جریان در نزدیکی بستر را به همراه دارد، که این موضوع موجب

نظریه وابسته بودن غلظت تعدالی به غلظت اولیه در رسوبات چسبنده را Partheniades and Kennedy (1996) ارائه دادند. Partheniades et al. (1968) استدلال کردند که در فرآیند ته‌نشینی رسوبات چسبنده، فقط توده‌هایی که مقاومت کافی در برابر تنش‌برشی بزرگ در نزدیکی بستر را دارند، می‌توانند ته‌نشین شوند و توده‌های ضعیف‌تر در ناحیه تنش‌برشی بستر شکسته شده و به صورت معلق باقی می‌مانند. با توجه به استدلال فوق می‌توان نتیجه گرفت که فقط برخی از رسوبات می‌توانند به صورت توده‌های مقاوم باشند، از این رو مقدار باقی مانده تابعی از مقدار رسوبات در ابتدای آزمایش است. در نمونه با غلظت اولیه زیاد مقدار مواد توده‌ای سست بیشتر است، در نتیجه مقدار غلظت تعدالی نیز بیشتر می‌باشد. این موضوع بیانگر این است که تنش‌برشی جریان (تلاطم) ظاهراً نقش مضاعف در فرآیند توده‌ای شدن دارد. وجود تنش‌برشی کوچک در ابتدا سبب افزایش احتمال برخورد بین ذرات و به دنبال آن موجب آرایش توده‌ها و افزایش فرآیند هم‌آوری شده و ته‌نشینی را افزایش می‌دهد. اما شدت بیش از حد تنش برشی، نرخ‌برشی را افزایش داده که سبب خرد شدن توده‌های رسوبی (فلوک) و کاهش نرخ ته‌نشینی می‌شود. مسلم است که مقدار مناسب تنش‌برشی سبب تشکیل فلوک‌ها با بزرگ‌ترین اندازه و پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود.

### 3-2- تله‌اندازی

به منظور بررسی تأثیر رسوبات بستر بر میزان تله‌اندازی، غلظت تعدالی رسوبات (غلظت رسوب در دوره انتهایی آزمایش) برای حالت‌های بستر زبر در برابر بستر صاف ترسیم شد که نتایج در شکل 6 قابل مشاهده است. در این پژوهش رابطه بین متوسط غلظت تعدالی رسوبات معلق در پایان آزمایش بین بستر زبر و بستر صاف به صورت نمایی بدست آمد؛ همان‌طور که مشخص است این روابط از همبستگی بالایی نیز برخوردار می‌باشند.

$$SSC_{B_1} = 0.4134 \times SSC_{B_0}^{0.6679} \quad R^2 = 0.81 \quad (8)$$

$$SSC_{B_2} = 0.8194 \times SSC_{B_0}^{0.8441} \quad R^2 = 0.96 \quad (9)$$

در این روابط  $SSC_{B_0}$ ،  $SSC_{B_1}$  و  $SSC_{B_2}$  به ترتیب غلظت

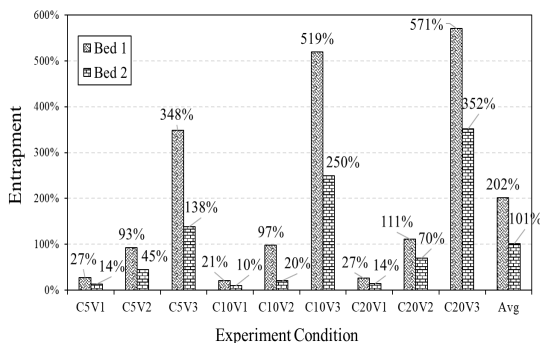


بزرگتر را می‌توان این گونه بیان نمود که با توجه به وجود رسوبات ریزدانه، رسوبات درشت دانه بستر با کاهش سرعت جریان در نزدیکی بستر و ایجاد پدیده‌های ترکیبی و رفت و برگشتی موجب تله‌اندازی و ته‌نشینی رسوبات می‌شوند. این در حالی است که در بستر صاف، آشفستگی جریان از ته‌نشینی رسوبات جلوگیری می‌کند.

جدول 3 درصد ته‌نشینی رسوبات معلق در شرایط مختلف بستر

متوسط	بستر			سرعت فلوم درصد ته‌نشینی
	$\omega=6.2$ rpm	$\omega=4.2$ rpm	$\omega=2.4$ rpm	
45	19	46	69	بستر صاف (5 gr/l)
87	86	88	88	بستر ماسه‌ای (5 gr/l)
64	46	66	79	بستر شنی (5 gr/l)
44	14	45	73	بستر صاف (10 gr/l)
87	84	88	88	بستر ماسه‌ای (10 gr/l)
60	47	54	80	بستر زیر (10 gr/l)
42	13	42	72	بستر صاف (20 gr/l)
88	86	86	91	بستر ماسه‌ای (20 gr/l)
70	58	71	82	بستر زیر (20 gr/l)
43/6	15/3	44/3	71/3	متوسط بستر صاف
87/2	85/3	87/3	89	متوسط بستر ماسه‌ای
64/8	50/3	63/7	80/3	متوسط بستر شنی

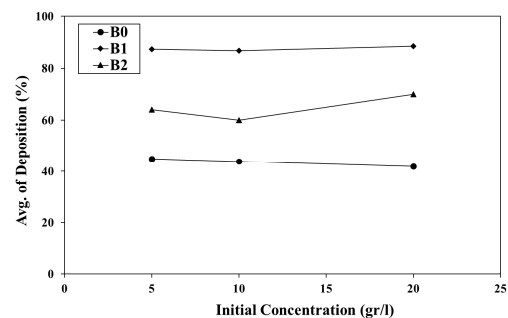
کلیه ارقام به درصد می‌باشد.



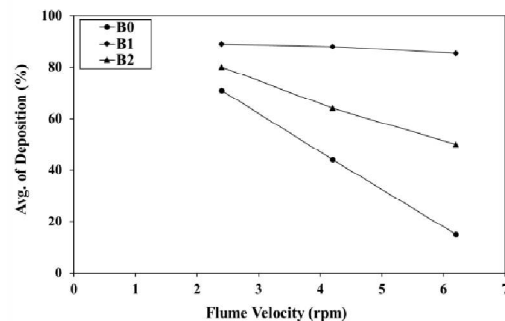
شکل 8 نسبت تله‌اندازی رسوبات معلق در بستر زیر

نکته قابل توجه این است که در سرعت اول کمترین نسبت تله‌اندازی مربوط به غلظت 10 گرم بر لیتر می‌باشد. به طوری که کمترین مقدار برای بستر ماسه‌ای و شنی به ترتیب با مقدار 10 و 21 درصد در سرعت 2/4 دور بر

افزایش ته‌نشینی در غلظت‌های اولیه بیشتر می‌شود. اختلاف بین درصد ته‌نشینی در بستر صاف و بستر شنی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که درصد ته‌نشینی در حالت بستر شنی غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر روندی متفاوت دارد و نسبت به غلظت اولیه 5 گرم بر لیتر کاهش یافته است. علت تفاوت در غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر که در شکل 5 نیز قابل مشاهده است را می‌توان ناشی از برتری آشفستگی جریان بر استحکام فلوک‌های تشکیل شده دانست. درصدهای ته‌نشینی رسوبات معلق در پایان آزمایش برای هر سه حالت از بستر در جدول 3 ارائه شده است که بر اساس آن درصد تله‌اندازی بستر ماسه‌ای و شنی نسبت به بستر صاف محاسبه شد که نتایج آن در شکل 8 ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل 7 الف) متوسط درصد ته‌نشینی غلظت‌های مختلف در هر سرعت، ب) متوسط درصد ته‌نشینی سرعت‌های مختلف در هر غلظت اولیه

نتایج نشان می‌دهد در هر دو بستر شنی و ماسه‌ای به ازای یک غلظت اولیه، میزان تله‌اندازی با افزایش تنش برشی افزایش می‌یابد. علت افزایش نسبت تله‌اندازی در تنش‌های

صاف و زبر با افزایش سرعت و غلظت اولیه رسوبات، افزایش می‌یابد به طوری که بیشینه اختلاف ضریب تله‌اندازی برای آزمایش با سرعت 6/2 و غلظت اولیه 20 گرم بر لیتر در حالت بستر ماسه‌ای و شنی به ترتیب 5/7 و 3/5 برابر می‌باشد. این در حالی است که کمینه اختلاف در ضریب تله‌اندازی مربوط به سرعت اول با مقدار 10 درصد می‌باشد. با توجه به توده‌های رسوبی بیشتر در غلظت‌های اولیه بزرگتر، نیروی مکش ناشی از وجود رسوبات بستر باعث نفوذ و تله‌اندازی ذرات به داخل مواد بستر و ته‌نشینی بیشتر آن‌ها نسبت به بستر صاف می‌شود. به طوری که در پژوهش حاضر متوسط تله‌اندازی رسوبات در بستر ماسه‌ای 2/02 برابر بستر صاف است که این مقدار دقیقاً دو برابر بستر شنی می‌باشد. به نظر می‌رسد به منظور بررسی بیشتر لازم باشد دانه‌بندی‌های مختلف رسوبات بستر مورد ارزیابی قرار گیرد تا از این طریق بتوان نظری کامل در خصوص تأثیر رسوبات بستر بر تله‌اندازی رسوبات معلق ارائه نمود.

دقیقه و غلظت اولیه 10 گرم بر لیتر اتفاق افتاده است. قابل مشاهده است که در سرعت‌های یکسان، افزایش غلظت اولیه رسوبات نیز مقدار تله‌اندازی را افزایش می‌دهد. به طوری که برای هر دو بستر ماسه‌ای و شنی، در سرعت سوم که شدت آشفتگی بیشتر است، مقدار تله‌اندازی با افزایش غلظت اولیه رسوبات افزایش می‌یابد. بر این اساس بیشترین مقدار تله‌اندازی بسترهای ماسه‌ای و شنی، در سرعت سوم و غلظت اولیه 20 گرم بر لیتر اتفاق افتاده است که مقدار ته‌نشینی رسوبات را به ترتیب 5/7 و 3/5 برابر افزایش داده است و به نظر می‌رسد تا پرشدن کامل منافذ رسوبات بستر یا انسداد در لایه فوقانی رسوبات بستر، با افزایش غلظت رسوبات معلق، میزان تله‌اندازی نیز افزایش یابد.

مقادیر متوسط تله‌اندازی در این پژوهش نشان می‌دهد، متوسط تله‌اندازی رسوبات در بستر ماسه‌ای 2/02 برابر بستر صاف است که این مقدار دقیقاً دو برابر بستر شنی می‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تله‌اندازی رسوبات معلق به داخل رسوبات بستر با استفاده از فلوم دایره‌ای پرداخته شده است. به همین منظور از بستر صاف و پوشیده شده با رسوبات درشت دانه با قطر متوسط 2/8 و 9/4 میلی‌متر استفاده شد. در حالت‌های مختلف بستر مشاهده شد که غلظت رسوبات معلق با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اما در حال بستر صاف، رسیدن به غلظت تعادلی در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهد متوسط درصد ته‌نشینی رسوبات در سرعت‌های مختلف فلوم و برای هر غلظت اولیه در حالت‌های مختلف، با افزایش سرعت جریان کاهش یافته که این کاهش برای بستر صاف بیشتر و در بستر ماسه‌ای کمینه می‌باشد. همچنین مشخص است که متوسط درصد ته‌نشینی در بسترهای حاوی رسوب نسبت به بستر صاف برای تمامی غلظت‌های اولیه، بیشتر است که این امر حاکی از تله‌اندازی رسوبات معلق به درون رسوبات بستر می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که اختلاف ضریب تله‌اندازی بستر

#### 5- فهرست علائم

$B_i$	نوع بستر
$C$	غلظت رسوبات معلق
$C_{eq}$	غلظت تعادلی
$C_0$	غلظت اولیه رسوبات
$Fr$	عدد فرود
$Re$	عدد رینولدز
$SSC$	غلظت رسوبات معلق
$y$	عمق جریان
$\alpha$	نسبت سرعت چرخش در پوش به فلوم
$\tau_b$	تنش برشی بستر
$\tau_c$	تنش برشی بحرانی
$\tau_{d,part}$	تنش برشی برای ته‌نشینی جزئی

#### 6- منابع

Amelia V.C.M., Teixeira, C.F.J., Senhorinha. Teixeira, F.C.F.S. (2010). "Physical characterization of estuarine sediments in the northern coast of Portugal". Journal of Coastal Research, 26.2: 301-311.

Detert, M., Nikora, V., Jirka, G., (2010). "Synoptic velocity and pressure fields at the water-sediment

2008. Critical bed shear stress for cohesive sediment deposition under steady flows. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 134: 1767-1771.
- Mehta, A.J., and E. Partheniades (1973). "Depositional Behavior of Cohesive Sediments," Tech Report No. 16, Univ. of Florida, Gainesville, Florida.
- Mohajeri, S. H., Righetti, M., Wharton, G., Romano, G. P. (2016). "On the structure of turbulent gravel bed flow: Implications for sediment transport". *Journal of Advances in Water Resources (Elsevier)*. 92, 90–104.
- Packman, A.I., and MacKay, J.S. (2003). "Interplay of stream-subsurface exchange, clay particle deposition, and streambed evolution". *Water Resources Research*. 39(4): 1-7.
- Partheniades, E., and Kennedy, J. G. (1966). "Deposition behavior of fine sediment in a turbulent fluid motion". *Proc., 10th Int. Conf. on Coastal Engineering, Tokyo*, 707–724.
- Partheniades, E., Cross, R.H., Ayora, A., (1968). "Further research on the deposition of cohesive sediments". *Proceedings of the 11th Conference on Coastal Engineering*, pp. 723–772.
- Partheniades, E., J.F. Kennedy, R.J. Etter, and R.P. Hoyer (1966). "Investigations of the Depositional Behavior of Fine Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel.", *Hydrodynamics Lab Report No. 96*, MIT, Cambridge Massachusetts.
- Radice, A., Nikora, V., Campagnol, J., Ballio, F., (2013). "Active interactions between turbulence and bed load: Conceptual picture and experimental evidence". *Water Resour. Res.* 49 (1), 90–99 .
- Rehg, K.J., Packman, A.I., Ren, J. (2005). "Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging". *Hydrological Processes*, 19: 413-427.
- Winterwerp, J.C. (2007). *On the sedimentation rate of cohesive sediment*. *Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics*, 209-225.
- interface of streambeds". *J. Fluid Mech.* 660, 55–86.
- Dwivedi, A., Melville, B., Shamseldin, A., Guha, T., (2011). "Flow structures and hydro-dynamic force during sediment entrainment". *Water Resour. Res.* 47, W01509 . Finnigan, J. 2000. Turbulence in plant canopies. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 32 (1), 519–571
- Giardino, A., Ibrahim, E., Adam, S., Toorman, E.A., Monbaliu, J. (2009). "Hydrodynamics and Cohesive sediment transport in the Ijzer Estuary, Belgium: Case Steady". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ACSE)*, 135:176-184.
- Gonzalez, F.N. (2016). "Infiltration of fine sediment mixtures through poorly sorted immobile coarse beds". *Journal of Advances in Water Resources*, AGU Publication. 52, 9306–9324.
- Heppell, C., Wharton, G., Cotton, J., Bass, J., Roberts, S., (2009). "Sediment storage in the shallow hyporheic of lowland vegetated river reaches". *Hydrol. Processes* 23, 2239–2251.
- Huang, J., Hilldate, R.C., Greiman, B.P. (2006). "Erosion and sedimentation manual". U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation.
- Khastar Boroujeni, M., Esmaili, k., Samadi, H., Ziaei, A.N. (2018). "Wastewater effect on the deposition of cohesive sediment". *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, ISSN 0733-9372. 144(1): 04017083
- Krishnappan, B.G. & Engel, P. (2006). Entrapment of fines in coarse sediment beds. *River Flow 2006*. Ferreira, Alves, Leal and Cardoso (eds). Taylor and Francis Group, London, 817–824.
- Krone, R.B. (1962). "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes," Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley California.
- Maa, J.P., Kwon, J., Hwang, K., Kyung Ha, H.