

## «یادداشت تحقیقاتی»

# آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال با جداره صلب با مقطع U-شکل

میر جعفر صادق صفری<sup>1\*</sup>، میر علی محمدی<sup>2</sup>

1- دکتری مهندسی عمران-هیدرولیک و منابع آب، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه  
2- دانشیار مهندسی عمران-هیدرولیک و مکانیک رودخانه، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

\*j.safari@urmia.ac.ir

**چکیده** - انتقال رسوب یکی از موضوع‌های مهم در طراحی هیدرولیکی کانال‌ها با جداره صلب می‌باشد. سیستم کانال‌های زهکشی آب‌های سطحی در شهرها، کانال‌های آبیاری و سایر کانال‌های انتقال و توزیع آب، نوعی از کانال‌ها با جداره صلب می‌باشند. شکل سطح مقطع کانال، یکی از عوامل تأثیرگذار در انتقال رسوب در کانال‌ها با جداره صلب می‌باشد. در این مطالعه آزمایشگاهی، آستانه حرکت ذره‌های رسوب در یک کانال U-شکل با جداره صلب بررسی شده است. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی تحلیل شده و روابطی برای محاسبه تنش برشی و سرعت مورد نیاز برای آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال U-شکل با جداره صلب ارائه شده است. روابط ارائه شده با روابط متناظر برای کانال‌ها با جداره متحرک و صلب موجود در پیشینه موضوع مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ذره‌های رسوب در کانال‌ها با جداره صلب نیاز به تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی کمتری در مقایسه با کانال‌ها با جداره متحرک دارند. مقایسه روابط آستانه حرکت بر اساس روش سرعت بحرانی در کانال‌ها با جداره صلب نشان می‌دهد که ذره‌های رسوب در کانال U-شکل نیاز به سرعت بحرانی بیشتری در مقایسه با کانال‌های دایره‌ای، مستطیلی و مستطیلی با کف V-شکل دارند.

**کلید واژگان:** آستانه حرکت، تنش برشی بحرانی، رسوب، سرعت بحرانی، U-شکل، کانال با جداره صلب.

## 1- مقدمه

نیروهای مثبت ایجاد کند (Dey and Papanicolaou, 2008). در تعریف شرایط آزمایشگاهی آستانه حرکت، وجود ناسازگاری تعریف‌ها سبب به وجود آمدن نتایجی می‌شود که گاهی به صورت چشم‌گیری با یکدیگر متفاوت می‌باشند. همان‌طور که (Lavelle and Mofjeld 1987) نیز اشاره کرده‌اند، بر اساس چنین تعریفی سلیقه و نحوه تشخیص فرد محقق تأثیر به‌سزایی در نتایج خواهد داشت. (Pilotti et al. 1997) دریافتند که مشخص کردن محدوده

ته‌نشینی رسوب در کانال‌ها موجب پدید آمدن عوامل نامطلوب زیادی از جمله، تغییر شکل سطح مقطع کانال، تغییر زبری، تغییر توزیع سرعت و تنش برشی و در نتیجه کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال خواهد بود. آستانه حرکت ذره‌های رسوبی یکی از معیارهای طراحی کانال‌ها با جداره صلب می‌باشد. شرایط آستانه حرکت ذره رسوب زمانی اتفاق می‌افتد که این نیروها به حد بحرانی خود رسیده و جریان به‌اندازه کافی برای حرکت ذره رسوبی

تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی موجود می‌باشد. در روش تنش برشی بحرانی از پارامترهای ارائه شده توسط Shields (1936) استفاده می‌شود. روش Shields (1936) برای کانال‌ها با جداره متحرک پیشنهاد شده است. ولی، پارامترهای تنش برشی بحرانی بی‌بعد و عدد رینولدز ذره در تحقیقات انجام یافته در کانال‌ها با جداره صلب نیز استفاده شده است. (Ippen and Verma, 1953; Novak and Nalluri, 1975; Mohammadi, 2005; Omid et al., 2002). سرعت مورد نیاز جریان برای به حرکت درآوردن ذره رسوبی با اندازه و جرم مخصوص مشخص، سرعت بحرانی جریان در آستانه حرکت ذره رسوبی می‌باشد. در این روش برآیند نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره رسوبی برای به دست آوردن روابط آستانه حرکت استفاده می‌شود. پارامترهای بی‌بعد عدد فرود ذره و اندازه نسبی ذره ارائه شده توسط Novak and Nalluri (1975, 1984) در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول 1 روابط پیشنهاد شده برای کانال‌ها با جداره صلب با شکل سطح مقطع‌های مختلف ارائه شده است.

برای سیستم‌های فاضلاب به‌طور متداول از سطح مقطع دایره‌ای استفاده می‌کنند. ولی همان‌طور که Butler and Davis (2004) نیز پیشنهاد کرده است، از کانال‌های غیر دایره‌ای نیز می‌توان برای طراحی کانال‌های فاضلاب و همچنین سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری استفاده کرد. در طراحی این نوع کانال‌ها با شکل سطح مقطع‌های مختلف می‌توان به شکل‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای، U-شکل، بیضی، تخم‌مرغی، نعل اسبی و کانال‌های با سطح مقطع مرکب اشاره کرد (Butler and Davis, 2004).

دقیق بین حالات سکون و حرکت ذره‌های رسوبی امکان‌پذیر نمی‌باشد. (Lavelle and Mofjeld (1987). آستانه حرکت را نقطه‌ای تعریف کردند که تحت آن شرایط، ذره‌های رسوبی شروع به حرکت کرده، ولی تعیین مقدار حرکت، بستگی به نحوه تشخیص محقق دارد که انتزاعی بودن این موضوع را نشان می‌دهد.

بررسی مطالعات آزمایشگاهی آستانه حرکت ذره‌های رسوبی نشان می‌دهد که تعریف‌های ارائه شده توسط Kramer (1935) رایج‌ترین روش برای تعیین این شرایط می‌باشد. Kramer (1935) چهار وضعیت حرکت رسوب در بستر کانال برای تعیین آستانه حرکت ذره‌های رسوبی مشخص کرد که به ترتیب به شرح زیر می‌باشند: 1- هیچ ذره رسوبی حرکت نمی‌کند؛ بدون انتقال، 2- تعداد بسیار کمی از ذره‌ها با کوچک‌ترین اندازه حرکت می‌کنند؛ انتقال ضعیف، 3- تعداد نسبتاً زیادی از ذره‌ها با اندازه متوسط حرکت می‌کنند، انتقال متوسط، 4- تمامی ذرات در هر زمان، هر مکان و هر اندازه‌ای حرکت می‌کنند؛ انتقال کلی. در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی آستانه حرکت ذره‌های رسوبی، تعریف چهارم Kramer (1935) به کار برده شده است (Dey, 1999&2003; Bong et al., 2013).

بیشتر مطالعات انتقال رسوب در کانال‌ها با جداره صلب با هدف طراحی کانال بر اساس شرایط عدم ته‌نشینی انجام یافته است (Ota and Perrusquia, 2013; Safari et al., 2014, 2015, 2016). در مقایسه با کانال‌ها با جداره متحرک، تعداد بسیار کمی مطالعه در رابطه با آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال‌ها با جداره صلب در پیشینه موضوع موجود می‌باشد (صفری و همکاران، 1392). مطالعه پیشینه موضوع نشان می‌دهد که برای بررسی آستانه حرکت ذره‌های رسوب دو روش متداول

جدول 1 روابط آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال‌ها با جداره صلب به‌روش سرعت بحرانی

| شماره رابطه | مرجع                     | شکل سطح مقطع                | عبارت بر حسب $(d/R)$ | $Fr_c$                       |
|-------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| (1)         | Novak and Nalluri (1984) | دایره‌ای-مستطیلی            | $0.50(d/R)^{-0.40}$  | $\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}}$ |
| (2)         | El-Zaemey (1991)         | دایره‌ای                    | $0.75(d/R)^{-0.34}$  |                              |
| (3)         | Safari et al. (2011)     | مستطیلی با کف V-شکل         | $0.68(d/R)^{-0.41}$  |                              |
| (4)         | Bong et al. (2013)       | مستطیلی با بستر ته‌نشین شده | $1.01(d/R)^{-0.23}$  |                              |

$V_c$  سرعت بحرانی جریان،  $d$  قطر ذره رسوب،  $g$  شتاب ثقل،  $s$  جرم مخصوص نسبی ذره رسوب،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $Fr_c$  عدد فرود بحرانی ذره رسوبی،  $d/R$  اندازه نسبی ذره رسوبی)

اندازه‌گیری شد. چهار نوع رسوب از جنس ماسه طبیعی با دانه‌بندی یکنواخت با اندازه میانه 0/15 mm، 0/58 mm، 1/08 mm و 1/52 mm استفاده شده‌اند. آزمایش‌ها در 9 شیب مختلف در محدوده 0/15% تا 1/11% انجام یافت و برای هر شیب و اندازه ذره رسوب مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها انجام یافت. مشاهدات در مقطعی از کانال به طول 4 m در میانه کانال، با فاصله‌های 4 m از بالادست و 4 m از پایین دست کانال انجام یافت. در آزمایش‌ها، ابتدا شیب کانال تنظیم شده، سپس اندازه‌گیری و مشاهدات برای هر کدام از چهار اندازه رسوب انجام می‌گرفت.

در تحقیقات آزمایشگاهی حرکت ذره‌های رسوبی، جدا کردن شرایط مختلف حرکت رسوب کار بسیار دشواری می‌باشد. به همین دلیل، برای سازگار بودن نتایج آزمایشگاهی، انتخاب تعریف مناسب برای حالت به‌خصوص حرکت ذره رسوبی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، تعریف چهارم (Kramer 1935) برای آستانه حرکت ذره‌های رسوب استفاده شده بود. نحوه قرارگیری ذره‌های رسوبی در بستر کانال و تعیین شرایط آستانه حرکت به این شکل انجام یافت، آزمایش‌ها در دو مرحله، اولی: مرحله قرارگیری ذره‌های رسوبی در بستر و دومی: تعیین آستانه حرکت انجام یافت. در مرحله اول، ذره‌های رسوبی از طریق یک تغذیه کننده رسوب که در ابتدای کانال نصب شده بود به داخل کانال ریخته می‌شد. در ابتدا آزمایش‌ها در شرایطی از جریان آغاز شد که سرعت جریان به حدی بالا بود که هیچ ذره رسوبی ته‌نشین نشود و جریان قابلیت حمل تمامی ذره‌های رسوبی را داشته باشد. سپس با کاهش تدریجی دبی جریان و به تبع آن سرعت جریان، حالت عدم ته‌نشینی ذره‌های رسوبی به ته‌نشینی تغییر می‌یافت. در این حالت ذره‌های رسوبی به حالت تجمع و خوشه‌ای در بخش‌هایی از کف کانال شروع به انباشته شدن می‌کردند. لازم به ذکر است که در آزمایش‌ها اجازه تشکیل لایه رسوبی ته‌نشین شده داده نشد. دلیل این امر ایجاد شرایط بستر رسوبی متفاوت با کانال‌ها با جداره متحرک می‌باشد. دلیل دیگر آن ایجاد شرایط طبیعی ته‌نشینی ذره‌های رسوبی می‌باشد که توسط خود جریان ایجاد شده است. پس از قرارگیری ذره‌های رسوبی

شکل سطح مقطع کانال بر مقاومت جریان تأثیر می‌گذارد (Engelund, 1964; Yen, 2002). تحقیقات آزمایشگاهی Knight et al. (1984) نشان داد توزیع تنش برشی بر روی محیط خیس شده به شکل سطح مقطع کانال وابسته می‌باشد. مقاومت جریان در کانال‌های روباز بیشتر از جریان در لوله‌ها در عدد رینولدز یکسان می‌باشد (Safari et al., 2017).

Rouse (1965) نشان داد که شکل سطح مقطع کانال به دو صورت در مقاومت جریان تأثیر می‌گذارد. اولاً در کانال‌ها با شکل سطح مقطع متفاوت مقدار محیط خیس شده در واحد مساحت سطح مقطع متفاوت بوده و ثانیاً باعث تغییر در توزیع تنش برشی بر روی جداره خواهد شد. بررسی پیشینه موضوع نشان می‌دهد که آستانه حرکت رسوب در کانال با مقطع U-شکل تا به حال بررسی نشده است. این مطالعه، آستانه حرکت رسوب را در یک کانال با جداره صلب با مقطع U-شکل را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است. داده‌های آزمایشگاهی بر اساس روش‌های تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی تحلیل شده و روابط جدیدی پیشنهاد شده است.

## 2- آزمایش‌ها

در این تحقیق آستانه حرکت ذره‌های رسوب در یک کانال با جداره صلب و با سطح مقطع U-شکل بررسی شده است. آزمایش‌ها با هدف بررسی شرایط جریان و تعیین حداقل سرعت و تنش برشی بستر در وضعیت آستانه حرکت انجام یافت. آزمایش‌ها در یک کانال به طول 12 m با عرض و عمق سطح مقطع 300 mm انجام یافت. آب مورد استفاده در آزمایش‌ها از یک مخزن تعبیه شده در بالادست کانال و از شبکه آب آزمایشگاه تغذیه می‌شده است. جریان یکنواخت با کنترل دریچه در پایین دست کانال ایجاد می‌شده است. لازم به ذکر است دریچه کنترل فقط برای شرایط جریان زیر بحرانی برای ایجاد جریان یکنواخت، استفاده شده است. برای جلوگیری از نوسانات سطح جریان و جلوگیری از ایجاد موج در ورودی کانال از یک مخزن که در خروجی آن یک ورقه لانه زنبوری تعبیه شده بود استفاده شد. دبی کانال با یک جریان‌سنج دیجیتال

(Butler et al., 1996):

$$f = \frac{1}{4 \left( \log \left( \frac{k_b}{14.8R} + \frac{0.22\nu}{R\sqrt{gRS}} \right) \right)^2} \quad (10)$$

که در آن  $S$  شیب بستر کانال و  $k_b$  ارتفاع زبری بستر می‌باشد که برابر با اندازه میانه رسوب در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پارامترهای تنش برشی بی بعد و عدد رینولدز ذره محاسبه شده و بر اساس روش Shields (1936) رابطه زیر برای محاسبه تنش برشی بحرانی برای کانال با جداره صلب با مقطع U-شکل پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{\tau_c}{\rho g d (s-1)} = 0.12 \left( \frac{u^* d}{\nu} \right)^{-0.88} \quad (11)$$

در شکل 1 داده‌های آزمایشگاهی بر روی نمودار Shields (1936) نشان داده شده است. برای رسم نمودار Shields (1936) روابط ارائه شده توسط Paphitis (2001) استفاده شده است. Paphitis (2001) برای منحنی‌های میانگین، محدوده بالایی و محدوده پایینی آستانه حرکت در کانال‌ها با بستر متحرک، به ترتیب روابط (12-14) را ارائه کرده است:

$$\tau_c^* = \frac{0.188}{1 + Re^*} + 0.0475(1 - 0.699e^{-0.015Re^*}) \quad (12)$$

$$\tau_c^* = \frac{0.280}{1.2 + Re^*} + 0.0750(1 - 0.699e^{-0.015Re^*}) \quad (13)$$

$$\tau_c^* = \frac{0.075}{1 + Re^*} + 0.0300(1 - 0.699e^{-0.015Re^*}) \quad (14)$$

همان‌طور که از شکل 1 مشخص است، داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر به طور کلی در پایین منحنی میانگین Shields (1936) قرار گرفته‌اند. اگرچه تعداد کمی از داده‌های آزمایشگاهی برای ذره‌های رسوبی با اندازه میانه 0/15 mm بر روی منحنی میانگین قرار گرفته‌اند، ولی بیشتر این داده‌ها مابین منحنی میانگین و منحنی محدوده پایینی قرار دارند. داده‌های آزمایشگاهی ذره‌های رسوبی با اندازه میانه 0/58 mm بر روی منحنی محدوده پایینی قرار گرفته‌اند. ذره‌های رسوبی با اندازه میانه 1/08 mm و 1/52 mm رفتار مشابهی از خود نشان داده و هر دو مجموعه داده‌ها در پایین منحنی پایینی قرار گرفته‌اند.

در بستر کانال مرحله دوم آزمایش انجام یافت. برای رسیدن به شرایط آستانه حرکت با افزایش تدریجی دبی جریان و به تبع آن سرعت جریان حرکت‌های تصادفی ذره‌های رسوبی در بستر کانال مشاهده شد. آستانه حرکت برای شرایطی از جریان تعیین شد که تمامی ذرات در هر زمان، هر اندازه‌ای و در هر مکان از 4 m میانی کانال یعنی مقطع مشاهداتی، حرکت می‌کردند.

### 3- نتایج و بحث

داده‌های آزمایشگاهی به دو روش تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی تحلیل می‌شوند.

#### 3-1- روش تنش برشی بحرانی

در این مطالعه برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به روش تنش برشی بحرانی، روش ارائه شده توسط Shields (1936) استفاده شده است. در این روش Shields (1936) رابطه (5) را برای تعیین شرایط آستانه حرکت ارائه کرد:

$$\tau_c^* = f(Re^*) \quad (5)$$

که در آن  $\tau_c^*$  تنش برشی بحرانی بی‌بعد و  $Re^*$  عدد رینولدز ذره می‌باشد که از روابط (6) و (7) محاسبه می‌شوند:

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{\rho g d (s-1)} \quad (6)$$

$$Re^* = \frac{u^* d}{\nu} \quad (7)$$

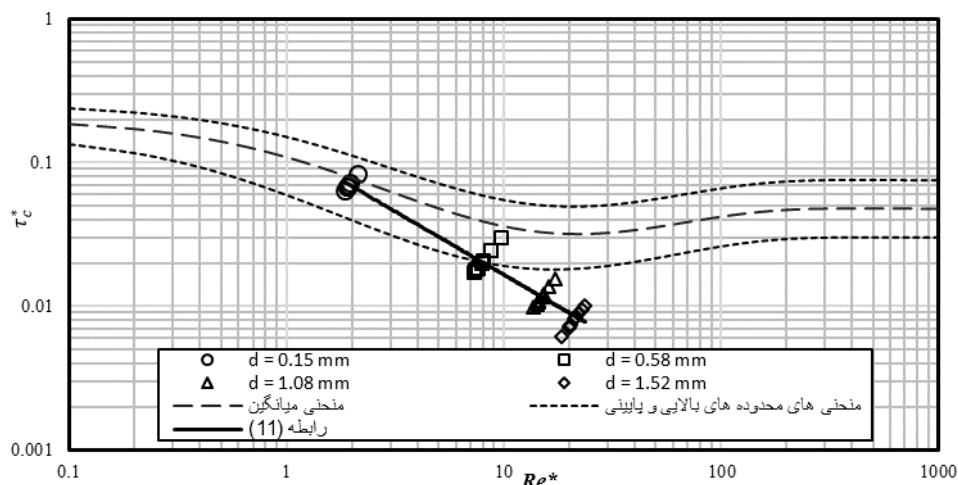
که در آن  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی بستر،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\nu$  لزجت جنبشی سیال و  $u^*$  سرعت برشی می‌باشد که از رابطه (8) به دست می‌آید.

$$u_s = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (8)$$

رابطه (5) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. تنش برشی میانگین بحرانی بستر بر حسب سرعت متوسط جریان از رابطه (9) به دست می‌آید (Dey, 2003):

$$\tau_c = \frac{f \rho V_c^2}{8} \quad (9)$$

که در آن  $f$  ضریب زبری کانال بوده و می‌توان آن را از رابطه کلبروک-وایت به شکل رابطه (10) محاسبه نمود



شکل 1 داده‌های آزمایشگاهی کانال با جداره صلب با مقطع U-شکل بر روی نمودار Shields (1936)

برای کانال با جداره صلب با سطح مقطع U-شکل به روش سرعت بحرانی پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.68 \left( \frac{d}{R} \right)^{-0.44} \quad (16)$$

در شکل 2 رابطه (16) با روابط آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال‌ها با جداره صلب با شکل سطح مقطع‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل 2 پیداست، داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر بالای تمامی روابط ارائه شده در پیشینه موضوع قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که سرعت بحرانی جریان در شرایط آستانه حرکت ذره‌های رسوبی در کانال با سطح مقطع U-شکل بیشتر از سایر کانال‌ها می‌باشد. رابطه ارائه شده در این مطالعه (16) به رابطه ارائه شده توسط Safari et al. (2011) بسیار نزدیک می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، رابطه (3) بر پایه داده‌های آزمایشگاهی (Mohammadi 2005) که در یک کانال مستطیلی با کف V-شکل انجام یافته بود، بنا شده است. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که اگرچه کانال با سطح مقطع U-شکل نیاز به سرعت بحرانی نسبتاً بیشتری در مقایسه با کانال مستطیلی با کف V-شکل دارد، ولی به طور کلی رفتار این دو کانال تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشند. برای مقادیر  $d/R > 0/1$  که برای ذره‌های رسوبی با اندازه بزرگتر از 1/08 mm می‌باشد، روابط مطالعه حاضر (16)، Safari et al. (2011) (3)، El-Zaemey (1991) (2) و Bong et al. (2013) (4) تقریباً بر روی یکدیگر منطبق شده‌اند.

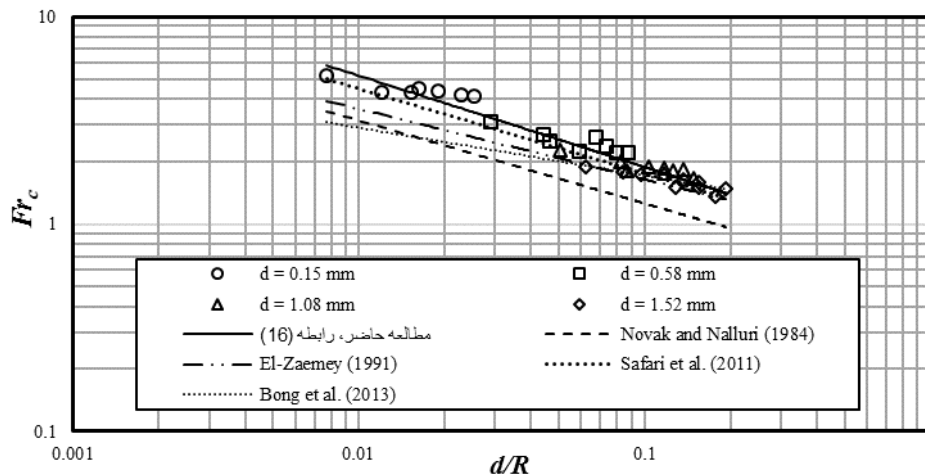
به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی مورد نیاز برای آستانه حرکت ذره‌های رسوب در کانال‌ها با جداره متحرک بیشتر از کانال‌ها با جداره صلب می‌باشد. دلیل این موضوع به تفاوت زبری در کانال‌ها بستگی دارد. در کانال‌ها با جداره متحرک زبری کانال بیشتر از کانال‌ها با جداره صلب بوده، بنابراین نیروی مقاومت جریان در کانال‌ها با جداره متحرک بیشتر بوده و در نتیجه برای به حرکت درآوردن ذره‌های رسوبی در بستر، نیروی‌های هیدرودینامیکی رانش و بالابر بیشتری لازم بوده و به همین دلیل سرعت متوسط جریان بیشتری مورد نیاز می‌باشد.

### 3-2- روش سرعت بحرانی

در تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به روش سرعت بحرانی، پارامترهای ارائه شده توسط Novak and Nalluri (1975, 1984) پارامتر اندازه نسبی ذره رسوبی و عدد فرود بحرانی ذره رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول 1). فرم کلی رابطه به شکل رابطه (15) می‌باشد.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = a \left( \frac{d}{R} \right)^b \quad (15)$$

طرف چپ رابطه، عدد فرود بحرانی ذره رسوبی ( $Fr_c$ ) بوده و  $a$  و  $b$  اعداد ثابت می‌باشند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند. با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی رابطه زیر برای آستانه حرکت ذره‌های رسوبی



شکل 2 مقایسه روابط آستانه حرکت ذره‌های رسوب در کانال‌ها با جداره صلب

کمی از ذره‌ها با غلتیدن، پرش‌های کوتاه و یا به صورت لغزش شروع به حرکت می‌کنند. با افزایش دبی جریان تعداد ذره‌هایی که شروع به حرکت می‌کنند، به تدریج افزایش می‌یابند. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، تشخیص آستانه حرکت ذره‌های رسوب در بستر کانال موضوعی انتزاعی می‌باشد که نقش تعریف آستانه حرکت استفاده شده حائز اهمیت می‌باشد.

در مقایسه دو روش تحلیل آستانه حرکت، یعنی تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی، هرکدام دارای مزایا و ایرادهایی می‌باشند. در روش تنش برشی بحرانی، پارامترهای تنش برشی بحرانی بی بعد و عدد رینولدز ذره رسوبی استفاده می‌شوند. با توجه به روابط این پارامترها (6 و 7) می‌توان دریافت که هر دو پارامتر تابعی از تنش برشی بحرانی می‌باشند. این نکته نشان می‌دهد که برای محاسبه تنش برشی بحرانی برای ذره رسوبی با اندازه و جرم مخصوص مشخص، روابط بنا شده به روش Shields (1936) باید به روش ضمنی حل شوند. این موضوع می‌تواند به عنوان ایراد اصلی روش تنش برشی بحرانی در نظر گرفته شود. در روش سرعت بحرانی ایراد اشاره شده در روش تنش برشی بحرانی وجود ندارد. یعنی روابط ارائه شده بر اساس روش سرعت بحرانی (1-4 و 16) را می‌توان به روش صریح حل کرد. به‌طور خلاصه روش سرعت بحرانی نسبت به روش تنش برشی بحرانی با در نظر گرفتن مراحل محاسباتی دارای مزیت می‌باشد.

رابطه ارائه شده توسط El-Zaemey (1991) (2) که برای کانال با شکل سطح مقطع دایره‌ای پیشنهاد شده برای مقادیر  $d/R < 0/1$  پایین رابطه ارائه شده توسط Safari et al. (2011) (3) قرار گرفته است. رابطه ارائه شده توسط Bong et al. (2013) (2013) که برای کانال مستطیلی با بستر ته‌نشین شده ارائه شده است (4)، دارای شیب متفاوت با روابط مطالعه حاضر (16)، Safari et al. (2011) (3) و El-Zaemey (1991) (2) می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که وجود بستر رسوبی ته‌نشین شده در کانال روند رابطه را به شکل چشم‌گیری تغییر می‌دهد. شکل 2 نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده توسط Novak and Nalluri (1984) (1) که برای کانال‌ها با شکل مقطع‌های دایره‌ای و مستطیلی پیشنهاد شده است، پایین سایر روابط موجود قرار گرفته است. این نتیجه نشان می‌دهد که در مقایسه شکل‌های مختلف سطح مقطع، کانال‌های دایره‌ای و مستطیلی نسبت به کانال‌ها با مقطع‌های U-شکل و مستطیلی با کف V-شکل، دارای کارایی بهتری می‌باشند. به‌عبارت دیگر، در کانال‌ها با شکل سطح مقطع‌های دایره‌ای و مستطیلی، ذره‌های رسوب در سرعت‌های بحرانی پایین‌تری نسبت به کانال‌ها با مقطع‌های U-شکل و مستطیلی با کف V-شکل شروع به حرکت می‌کنند. نتایج به‌دست آمده اهمیت شکل سطح مقطع کانال را در پدیده آستانه حرکت ذره‌های رسوبی نشان می‌دهد. در نقطه آغازین حرکت ذره‌های رسوبی در بستر کانال ابتدا تعداد

#### 4- نتیجه گیری

مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر با نمودار ارائه شده برای کانال‌ها با جداره متحرک، نشان داد که ذره‌های رسوب در کانال‌ها با جداره صلب نیاز به تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی کمتری نسبت به کانال‌ها با جداره متحرک دارند. این امر تأثیر مشخصات بستر کانال را نشان می‌دهد. در کانال‌ها با جداره متحرک زبری کانال بیشتر بوده و در نتیجه برای به حرکت درآوردن ذره‌های رسوب نیروهای هیدرودینامیکی رانش و بالابر بیشتری مورد نیاز می‌باشد. بر اساس معیار طراحی کانال‌های زهکشی شهری، کانالی دارای کارایی بهتری است که در آن ذره‌های رسوبی در سرعت و تنش برشی پایین‌تری شروع به حرکت بکنند. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، در مقایسه کانال‌ها با جداره صلب با شکل سطح مقطع‌های مختلف، کانال‌های دایره‌ای و مستطیلی دارای کارایی بهتری نسبت به کانال‌ها با مقطع‌های U-شکل و مستطیلی با کف V-شکل می‌باشند. مقایسه روابط آستانه حرکت ذره‌های رسوب در کانال‌ها با جداره صلب اهمیت تأثیر شکل سطح مقطع کانال در این پدیده را نشان می‌دهد.

#### 5- فهرست علائم

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| $a, b$     | ابعاد ثابت                                |
| $d$        | اندازه میانه ذره رسوب (m)                 |
| $Fr_c$     | عدد فرود بحرانی ذره رسوب                  |
| $f$        | ضریب اصطکاک کانال                         |
| $g$        | شتاب ثقل ( $ms^{-2}$ )                    |
| $k_b$      | ارتفاع زبری بستر (m)                      |
| $R$        | شعاع هیدرولیکی (m)                        |
| $Re^*$     | عدد رینولدز ذره رسوب                      |
| $S$        | شیب بستر کانال                            |
| $s$        | جرم مخصوص نسبی ذره رسوب                   |
| $u_*$      | سرعت برشی ( $ms^{-1}$ )                   |
| $V_c$      | سرعت بحرانی ( $ms^{-1}$ )                 |
| $\nu$      | لزجت جنبشی ( $m^2s^{-1}$ )                |
| $\rho$     | جرم مخصوص سیال ( $kgm^{-3}$ )             |
| $\tau_c$   | تنش برشی بحرانی بستر ( $kgm^{-1}s^{-2}$ ) |
| $\tau_c^*$ | تنش برشی بحرانی بی‌بعد                    |

#### 6- منابع

- صفری، م. ج. ص؛ محمدی، م. ع. و گیلانی‌زاده‌دیزج، گ.؛ (1392). "بررسی آستانه نهشته شدن و حرکت دانه‌های رسوبی در مجاری باز جدارصلب،" مجله دانش آب و خاک، دوره 23، شماره 3، ص.ص. 13-24.
- Bong, C. H. J., Lau, T. L. and Ab Ghani, A. (2013). "Verification of equations for incipient motion studies for a rigid rectangular channel." *Water Sci. Technol.* 67(2): 395-403.
- Butler, D., May, R. W. P. and Ackers, J. C. (1996). "Sediment transport in sewers. Pt. 2: design." *P. I. Civil Eng-Mar. En.* 118(2): 113-120.
- Butler, D. and Davies, J., (2004). *Urban drainage*. CRC Press, Boca Raton.
- Dey, S. (1999). "Sediment threshold." *Appl. Math. Model.* 23(5): 399-417.
- Dey, S. (2003). "Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds." *J. Hydraul. Res.* 41(4), 405-415.
- Dey, S. and Papanicolaou, A. (2008). "Sediment threshold under stream flow: A state-of-the-art review." *KSCE J. Civ. Eng.* 12(1): 45-60.
- El-Zaemey, A. K. S. (1991). "Sediment transport over deposited beds in sewers." PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
- Engelund, F. A. (1964). "Flow resistance and hydraulic radius." ISVA, Technical Univ. of Denmark. Basic Research Progress Rep. No. 6.
- Ippen, A. T. and Verma, R. P. (1953). The motion of discrete particles along the bed of a turbulent stream. *Proceedings of Minnesota International Convention, Minneapolis, Minn.*
- Kramer, H. (1935). "Sand mixtures and sand movement in fluvial levels." *Trans. ASCE*, 100, 798-838.
- Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Hamed, M. E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels." *J. Hydraul. Eng.* 110(4), 405-422.
- Lavelle, J. W. and Mofjeld, H. O. (1987). "Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist?" *J. Hydraul. Eng.* 113(3): 370-385.
- Mohammadi, M. (2005). "The initiation of sediment motion in fixed bed channels." *Iran. J. Sci. Technol. B.* 29(B3): 365-372.
- Novak, P. and Nalluri, C. (1975). "Sediment transport in smooth fixed bed channels." *J. Hydraul. Div. ASCE* 101(HY9): 1139-1154.

- Sedimentation of Solid Particles, 6-9 September, Wroclaw, Poland, 63-75.
- Safari, M. J. S., Mohammadi, M. and Gilanizadehdizaj, G. (2014). "On the effect of cross sectional shape on incipient motion and deposition of sediments in fixed bed channels." *J. Hydrol. Hydromech.* 62(1): 75-81.
- Safari, M. J. S., Aksoy, H. and Mohammadi, M. (2015). "Incipient deposition of sediment in rigid boundary open channels." *Environ. Fluid Mech.* 15 (5): 1053-1068.
- Safari, M. J. S., Aksoy, H. and Mohammadi, M. (2016). "Artificial neural network and regression models for flow velocity at sediment incipient deposition." *J Hydrol.* 541, 1420-1429.
- Safari, M. J. S., Aksoy, H., Unal, N. E. and Mohammadi, M. (2017). "Non-deposition self-cleansing design criteria for drainage systems." *J. Hydro-environ. Res.* 14: 76-84.
- Shields, A. (1936). "Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement." *Preussiischen Research Institute of Hydraulic Engineering, Berlin, Germany, Issue 26.*
- Yen, B. C. (2002). "Open channel flow resistance." *J. Hydraul. Eng.* 128 (1), 20-39.
- Novak, P. and Nalluri, C. (1984). "Incipient motion of sediment particles over fixed beds." *J. Hydraul. Res.* 22(3): 181-197.
- Omid, M. H., Narayanan, R. and Nalluri, C. (2002). "Erosion of a sediment deposit from a rigid rectangular channel by clear water." *Proc. Inst. Civ. Eng., Waters Maritime Engineering*, 154(1): 63-73.
- Ota, J. J. and Perrusquia, G. S. (2013). "Particle velocity and sediment transport at the limit of deposition in sewers." *Water Sci. Technol.* 67(5): 959-967.
- Paphitis, D. (2001). "Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves." *Coast. Eng.* 43(3): 227-245.
- Pilotti, M., Menduni, G. and Castelli, E. (1997). "Monitoring the inception of sediment transport by image processing techniques." *Exp. Fluids.* 23(3): 202-208.
- Rouse, H. (1965). "Critical analysis of open-channel resistance." *J. Hydr. Eng. Div., ASCE*, 91 (4), 1-23.
- Safari, M. J. S., Mohammadi, M. and Manafpour, M. (2011). "Incipient motion and deposition of sediment in rigid boundary channels." *Proceedings 15th International Conference on Transport &*