

# Scouring Downstream of Sediment-Carrying Free Over Fall Water Jet

Ehsan Ghasemi<sup>1</sup> and Masoud Ghodsian<sup>2\*</sup>

1- Former M.Sc. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering and Research Institute for Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*ghods@modares.ac.ir

Received: 12 May 2021, Accepted: 26 September 2021    J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Prediction of scour and characteristics of scour hole due to out flow from hydraulic structures is important in the hydraulic engineering. The dimensions of scour hole are influenced by different parameters including: flow discharge, drop height of flow, tailwater depth, sediment size, sediment load and time of scouring. Almost all the previous studies have focused on the scour hole characteristics downstream of free over fall clear water jets. Water jets are not always clear and may carry sediment, especially during flood condition, and the effect of sediment load on the scour characteristics are not well studied. Therefore, in this study, scour downstream of a free over fall clear and sediment-carrying water jets are studied experimentally. The main purposes of this study are to analyze the effects of important parameters including sediment load, sediment size and discharge of the free falling jet on the scour depth and the longitudinal scour length. The temporal variation of the scour depth and longitudinal scour length were also addressed. New dimensionless equations for scour depth and longitudinal scour length were obtained.

**Methodology:** Experiments were conducted in a rectangular channel of 0.6 m width, 12 m length. The water was pumped from a sump to the channel. A rectangular free-overfall jet of 0.21 m width was established at the last 1 m length of the channel. Scour was simulated in a rectangular box of 1.5 m width and 2.51 m length, which is located downstream of channel. Measurement of discharge was done by using a calibrated sharp crested triangular weir with 90 degree apex angle. The depths of flow and longitudinal bed profiles were measured by using a digital point gauge with  $\pm 0.01$  mm theoretical accuracy. Temporal measurement of longitudinal bed profiles were also done by using the same digital point gauge. The rectangular box was covered by uniform sand layer with 0.45 mm thickness.

Experiments were performed for four different discharges (4.27, 7.48, 11.78 and 17.3 L/s) and two sediment sizes ( $d_{50} = 0.6$  mm and 1.2 mm). Experiments were conducted with clear water free falling water jet and sediment carrying free falling water jet. In experiments with sediment carrying free falling jet, the dry sediment with constant rate was added to the water jet by using a sediment feeder. Four values of sediment load: 0.25, 0.5, 1 and 2 kg/min were used. The added sediment to the jet was of the same size as the downstream bed material size ( $d_{50} = 0.6$  mm and 1.2 mm). Time variations of the scour depth and length of scour hole were also studied.

**Results:** Based on the result, by increasing the sediment load, the values of maximum depth of scour and length of scour hole decreased. The rate of scour reduction depends on the

amount of sediment load in the water jet, water discharge and duration of scour. By increasing the duration of experiments, the increasing effects of densimetric Froude number and jet discharge in the longitudinal bed profiles reduces. The decreasing trend of sediment load on the maximum scour depth is more pronounced in experiments with lower duration. In higher discharges, the reducing effect of the sediment load on the maximum depth of scour reduces. The reducing effect of sediment load on the longitudinal scour length is reduced for higher water discharge. The reducing effect of sediment load on longitudinal scour length is enhanced in experiments with lower duration. Effects of dimensionless parameters on the scour depth and scour length were addressed. By increasing the densimetric Froude number, the relative depth of scour and relative longitudinal length of scour hole increases. The dimensionless equations for estimation of the longitudinal scour profile, scour depth and scour length are obtained.

**Conclusion:** In this experimental study, the scour depths and the longitudinal scour lengths were compared in the clear water and sediment carrying free falling water jets. It was found that by increasing the sediment load, the values of maximum depth of scour and length of scour hole decreases. The rate of scour reduction depends on the amount of sediment load in the water jet, water discharge and scouring time. New equations for estimation of the longitudinal scour profile, scour depth and scour length are also developed.

**Keywords:** free over fall jet, sediment carrying jet, scouring, dimensional analysis, densimetric Froude number, and longitudinal profile.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی حاوی رسوب

احسان قاسمی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب- دانشگاه تربیت مدرس

\*ghods@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** پیش‌بینی آبشستگی و برآورد ویژه‌گی‌های حفره آبشستگی ناشی از جت‌های خروجی از سازه‌های هیدرولیکی یکی از موضوع‌های مهم در مهندسی هیدرولیک است. فراسنجه‌های متعددی مانند دبی جریان، ارتفاع ریزش جریان، عمق پایاب، قطر ذرات رسوب، دبی رسوب و زمان، بر ابعاد حفره آبشستگی ایجاد شده در پایین دست جت‌های ریزشی موثر هستند. در این تحقیق به بررسی آبشستگی ناشی از جت ریزشی و حاوی رسوب پرداخته شده است. برای انجام آزمایش‌ها از فلومی به طول ۱۲ متر و عرض ۰/۶ متر که در انتها به عرض ۰/۲۱ متر کاهش یافته، استفاده شد. آزمایش‌ها با چهار دبی مختلف ۴/۲۷، ۷/۴۸، ۱۱/۷۸ و ۱۷/۳۱ لیتر بر ثانیه و دو قطر رسوب ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر انجام شد. تغییرپذیری‌های زمانی عمق و طول حفره آبشستگی اندازه‌گیری و تحلیل شد. بنابر نتایج، با افزایش دبی رسوب میزان بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. میزان این کاهش نیز به میزان دبی رسوب در جت، دبی جریان و زمان آزمایش بستگی دارد. تاثیر فراسنجه‌های بدون بعد بر روی عمق و طول حفره آبشستگی بررسی و رابطه‌هایی برای محاسبه آنها ارائه شد.

**کلید واژگان:** جت ریزشی حاوی رسوب، آبشستگی، تحلیل ابعادی، عدد فرود ذرات.

## ۱- مقدمه

محققان می‌توان به (Ruff et al. 1982)، (Abt et al. 1984)، (Whittaker and Schleiss 1984)، (Mason 1985)، (Breusers and Abida and Townsend 1991)، (Ojha, Doehring and Abt 1994)، (Raudkivi 1991)، (Ghodsian, Rajaratnam and Mazurek 2002)، (Ghodsian et al. 2002)، (Azar 2002)، (Ghodsian et al. 2012)، (Latifi et al. 2018)، (Mahboubi 2001)، (Najafi 2001) و (Saeednejad 2005) اشاره کرد.

اگرچه بررسی‌های چندی در زمینه آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی انجام شده است و جت‌های مختلفی مانند جت‌های افقی، عمودی و پرتابی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لیکن تقریباً در همه موارد، آزمایش‌ها با آب زلال انجام شده است و اطلاعات زیادی در زمینه آبشستگی ناشی از جت‌های حاوی رسوب در دسترس نیست. در این زمینه (Ghodsian et al. 2012) به بررسی

تخلیه حجم آب مازاد بر ظرفیت ذخیره سدها و همچنین جریان عبوری از روی شیب‌شکن‌ها از طریق جت‌ریزشی امکان‌پذیر است. برخورد این جت با بستر آبرفتی رودخانه در پایین دست این نوع سازه‌ها موجب آبشستگی می‌شود. حفره ایجاد شده در پایین دست این سازه‌ها می‌تواند منجر به ناپایداری و حتی تخریب آنها شود. از این رو پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی دارای اهمیت خاصی است. از آنجایی که فراسنجه‌های موثر بر پدیده آبشستگی زیاد هستند و همچنین حل تحلیلی یا عددی دقیق برای آبشستگی وجود ندارد، لذا بیشتر محققان مطالعات خود را بر پایه کارهای آزمایشگاهی انجام داده‌اند. هریک از محققان با در نظر گرفتن تعدادی فراسنجه، آزمایش‌هایی را انجام دادند و رابطه‌هایی برای برآورد ابعاد حفره آبشستگی ارائه کردند که از جمله این

$$\frac{\phi}{R Y_t} = f \left( \frac{V}{\sqrt{gR}}, \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{d_{50}}}, \frac{\rho}{\rho_s - \rho}, \frac{R}{H_c}, \frac{Vt}{Y_t}, \frac{q_s}{q} \right) \quad (4)$$

پس از ساده سازی رابطه بالا داریم:

$$\frac{\phi}{Y_t} = f \left( Fr_d, \frac{R}{H_c}, \frac{Vt}{Y_t}, \frac{q_s}{q} \right) \quad (5)$$

که در آن:

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{g d_{50} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}}$$

شایان یادآوری است که فراسنجه  $Fr_d R / H_c$  نیز پیشتر توسط محققین مختلفی مانند: Rajaratnam and (1973) و Ghodsian et al. (2012), Ojha (1999), Belatos (1380) استفاده شده بود. با این تفاوت که Ojha (1999) و Rajaratnam and Belatos (1973) به جای شعاع هیدرولیکی از قطر جت استفاده کردند. در اینجا نیز از شعاع هیدرولیکی استفاده شده است.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۲ متر و عرض ۰/۶ متر، که در انتها، عرض آن به ۰/۲۱ متر کاهش یافته بود، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس، انجام شد. جریان از مخزن زیر زمینی وارد فلوم شده، پس از حرکت در فلوم به صورت جت ریزشی به مخزنی در پایین دست با ابعاد ۲/۵ متر در ۱/۵ متر وارد شده و با عبور از روی یک سرریز لبه تیز مثلثی به مخزن زیرزمینی می‌ریزد. جریان به صورت چرخه (سیکل) بسته، بار دیگر از طریق پمپ وارد فلوم می‌شود. اندازه‌گیری دبی توسط سرریز مثلثی لبه تیز واسنجی شده انجام شد. برداشت نیمرخ‌های طولی بستر و عمق جریان توسط عمق‌سنج دیجیتالی با دقت یک‌صدم میلی‌متر انجام شد. کف مخزن با لایه‌ای از رسوب‌های یکنواخت پوشانیده شد. برای بررسی تاثیر میزان رسوب در آزمایش‌های با جت حاوی رسوب، میزان رسوب مورد نظر، در طول آزمایش از بالای جت به جت اضافه می‌شد (شکل ۱). با انجام آزمایش‌های مقدماتی از تزریق یکنواخت رسوب اطمینان حاصل شد. آزمایش‌ها برای چهار دبی مختلف (۴/۲۷، ۷/۴۸، ۱۱/۷۸ و ۱۷/۳۱ لیتر بر ثانیه) انجام شد. رسوب‌های بکار رفته در این

این موضوع پرداختند. در تحقیق حاضر، به منظور تکمیل کار ایشان با انجام آزمایش‌هایی، در محدوده دیگری از فراسنجه‌های بدون بعد مثل عدد فرود ذرات، به بررسی تاثیر جت ریزشی حاوی رسوب بر ویژگی‌های آبشستگی بستر پایین دست این نوع جت پرداخته شده است. در این زمینه فراسنجه‌هایی چون سرعت جت ریزشی و بار رسوبی در جت مورد توجه قرار گرفتند و در پایان رابطه‌هایی برای نیمرخ طولی بستر، بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی ارائه شده است.

### ۲- تحلیل ابعادی

متغیرهای موثر بر پدیده آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی حاوی رسوبی که در شکل ۱ نشان داده شده است عبارت‌اند از: شعاع هیدرولیکی جت  $R$ ، سرعت جت  $V$  یا دبی جریان بر واحد عرض  $q$ ، ارتفاع ریزش جت آب  $H_c$ ، چگالی سیال  $\rho$ ، دبی رسوب در واحد عرض جت  $q_s$ ، اندازه متوسط ذرات رسوب  $d_{50}$ ، انحراف معیار هندسی ذرات رسوب  $\sigma_g$ ، چگالی ذرات رسوب  $\rho_s$ ، عمق پایاب  $Y_t$ ، شتاب جاذبه  $g$  و زمان از آغاز آبشستگی  $t$ . اگر  $\phi$  نشان دهنده عمق و طول حفره آبشستگی باشد می‌توان نوشت:

$$\phi = f(R, Y_t, d_{50}, \rho, \rho_s, g, \sigma_g, V, H_c, q_s, q, t) \quad (1)$$

به دلیل اینکه مصالح رسوب استفاده شده در این تحقیق، یکنواخت می‌باشد، انحراف معیار ذرات  $\sigma_g$  از رابطه بالا حذف می‌شود. در نتیجه:

$$\phi = f(R, Y_t, d_{50}, \rho, \rho_s, g, V, H_c, q_s, q, t) \quad (2)$$

با انتخاب  $\rho$ ،  $R$  و  $g$  به‌عنوان متغیرهای تکراری و استفاده از روش  $\pi$  با کینگهام رابطه بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$(3)$$

$$\phi / R = f \left( \frac{H_c}{R}, \frac{Y_t}{R}, \frac{d_{50}}{R}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{V}{\sqrt{gR}}, \frac{Vt}{Y_t}, \frac{q_s}{q} \right)$$

با استفاده از ویژگی ترکیب‌سازی در تحلیل ابعادی می‌توان رابطه بالا را به صورت زیر نوشت:

جدول ۱ محدوده متغیرهای استفاده شده در این تحقیق

Table 1 Variables used in this study

Discharge	sediment size	time	sediment load
Q	d <sub>50</sub>	t	Q <sub>s</sub>
(Lit/s)	(mm)	(min)	(kg/min)
4.27 - 17.31	0.6 and 1.2	2 - 30	0.25 - 2

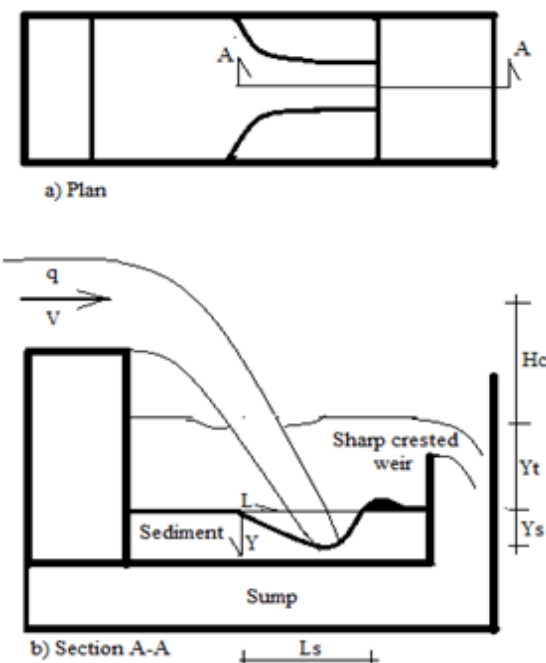


Fig. 1 Scour parameters

شکل ۱ فراسنجه‌های موثر بر حفره آبستنگی

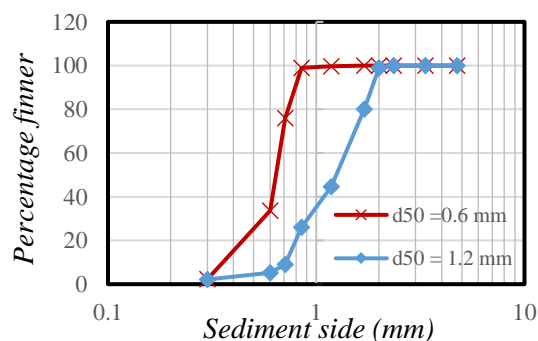


Fig. 2 Sediment gradation curve

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب

می‌پذیرفت. پس از پایان آزمایش‌ها و پس از مدتی که آب به کلی از مخزن پائین‌دست خارج می‌شد برداشت نیمرخ طولی بستر انجام می‌شد.

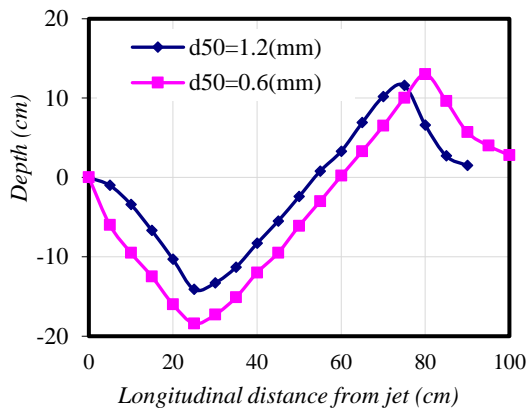
#### ۵- بررسی فراسنجه‌های موثر بر نیمرخ طولی حفره آبستنگی

تحقیق دارای دو نوع دانه‌بندی با قطر متوسط ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. رسوب‌ها از جنس سیلیس و دارای دانه‌بندی یکنواخت و چگالی ۲/۶۳ می‌باشند. قطر رسوب‌هایی که به جت اضافه می‌شد همانند قطر مصالح بستر در پایین‌دست جت بود. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی رسوب‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. ضریب یکنواختی ( $Cu = d_{60}/d_{10}$ ) برای دو نوع مصالح به ترتیب برابر ۱/۷۱ و ۱/۹۵ و انحراف معیار ذرات رسوب ( $\sigma_g = ((d_{84}/d_{16})^{0.5})$ ) برابر ۱/۱۵ و ۱/۲۸ بود. در اینجا  $d_{60}$  و  $d_{10}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۶۰ و ۱۰ درصد مصالح ریزتر از آن است. همچنین  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد مصالح ریزتر از آن است. در انتهای آزمایش نیمرخ طولی بستر برداشت شد. برای این منظور هر آزمایش برای مدت مورد نظر (از ۲ تا ۳۰ دقیقه) انجام و در انتهای هر بازه زمانی، پس از تخلیه کامل جریان، نیمرخ طولی بستر در وسط فلوم با استفاده از عمق‌سنج دیجیتالی برداشت می‌شد. چگونگی انجام آزمایش‌ها در هر دو مجموعه آزمایش‌ها همانند بود با این تفاوت که در جت حاوی رسوب، میزان رسوب مورد نظر از بالای جریان به آن اضافه می‌شد. جدول ۱ محدوده متغیرها در آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

#### ۴- شرح آزمایش‌ها

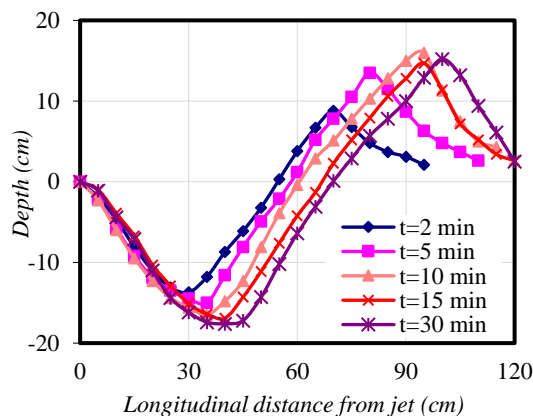
هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی ویژه‌گی‌های نیمرخ طولی حفره آبستنگی در جت ریزشی با و بدون رسوب است. برای این منظور در آغاز، سطح بستر در مخزن پائین‌دست به طور کامل صاف می‌شد. آنگاه با استفاده از پمپ کوچک نصب شده در کنار مخزن پائین‌دست، دبی وارد فلوم شده و سطح پایاب اولیه لازم برای آغاز آزمایش ایجاد می‌شد. به‌منظور جلوگیری از تغییرپذیری‌های توپوگرافی بستر در آغاز آزمایش، صفحه نازکی به ابعاد حدود ۱.5m x 0.5m بر روی رسوب‌های صاف شده، قرار داده و هنگامی که دبی جریان در فلوم به میزان مورد نظر می‌رسید، آن را برداشته و زمان آغاز آزمایش از آن لحظه ثبت می‌شد. در آزمایش‌هایی با جت ریزشی حاوی رسوب، با ثبت زمان آغاز آزمایش، اضافه کردن رسوب به جت ریزشی انجام

کاهش یافته در نتیجه عمق و طول حفره آبشستگی کمتر می‌شود. همچنین با کاهش قطر مصالح، میزان فرسایش ایجاد شده افزایش یافته و ابعاد پشته رسوبی در پائین دست حفره آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.



**Fig. 4** Effect of sediment size on longitudinal bed profiles  
شکل ۴ تاثیر قطر مصالح بستر بر روی نیمرخ طولی حفره آبشستگی  
( $Q = 7.4 \text{ L/S}$ ,  $t = 30 \text{ min}$ ,  $Q_s = 0$ )

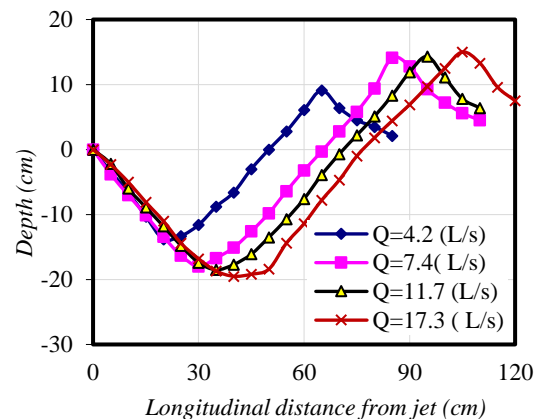
در شکل ۵ مقایسه‌ای بین نیمرخ‌های طولی حفره آبشستگی در زمانهای مختلف برای دبی ۱۷/۳ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش زمان، عمق و طول حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل، مشخص است که قسمت اعظم آبشستگی در زمان‌های اولیه حاصل می‌شود و در زمان‌های طولانی‌تر، تغییرپذیری‌های کمتری در افزایش ابعاد حفره آبشستگی دیده می‌شود. همچنین با افزایش زمان آزمایش، به دلیل آبشستگی بیشتر، ابعاد



**Fig. 5** Longitudinal bed profiles at different periods  
شکل ۵ نیمرخ طولی حفره آبشستگی در زمان‌های مختلف  
( $Q = 17.3 \text{ L/S}$  و  $Q_s = 0$ )

در این قسمت در آغاز، به بررسی تاثیر فراسنجه‌های موثر بر نیمرخ طولی حفره آبشستگی پرداخته می‌شود. شکل‌های ۳ الی ۶ به ترتیب تاثیر دبی جریان  $Q$ ، قطر متوسط مصالح  $d_{50}$ ، مدت زمان آزمایش  $t$  و بار رسوبی  $Q_s$  را بر روی نیمرخ طولی حفره آبشستگی نشان می‌دهد.

در شکل ۳، مقایسه بین نیمرخ‌های طولی حفره آبشستگی برای چهار دبی جریان بدون رسوب و میزان‌های ثابت برای دیگر فراسنجه‌ها ( $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$  و  $t = 10 \text{ min}$ ) نشان داده شده است. روشن است که با افزایش دبی، عمق حفره آبشستگی بدلیل افزایش پتانسیل فرسایش‌پذیری جت، افزایش می‌یابد. این افزایش در طول و عرض حفره آبشستگی نیز ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش دبی جریان، ارتفاع و طول پشته رسوبی در پائین دست حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. افزون‌براین با افزایش دبی جریان، فاصله محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی از جت بیشتر می‌شود زیرا با افزایش دبی، طول پرتابه جت و فاصله محل برخورد آن به بستر افزایش می‌یابد. در نتیجه فاصله محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی از محل جت بیشتر می‌شود.



**Fig. 3** Effect of discharge on longitudinal bed profiles  
شکل ۳ تاثیر دبی جریان بر نیمرخ طولی حفره آبشستگی  
( $d_{50} = 0.6$ ,  $t = 10 \text{ min}$  و  $Q_s = 0$ )

در شکل ۴ نیمرخ‌های طولی حفره آبشستگی برای دو قطر مصالح ( $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$  و  $1.2 \text{ mm}$ ) نشان داده شده است. در این شکل میزان‌های فراسنجه‌های موثر دیگر ثابت هستند ( $Q = 7.4 \text{ L/S}$  و  $t = 30 \text{ min}$ ,  $Q_s = 0$ ). با توجه به این شکل می‌توان گفت با افزایش قطر مصالح، آبشستگی

لیتر بر ثانیه و  $t=30$  min نشان داده شده است. در این شکل‌ها نیز پیامدهای بار رسوبی در دبی‌های مختلف بر روی ابعاد حفره آبستگي مشخص و روشن است که بار رسوبی باعث کاهش عمق و طول حفره آبستگي می‌شود. البته تاثیر بار رسوبی  $0.5 \text{ kg/min}$ ، در دبی  $17/3 \text{ L/s}$ ، کمتر است.

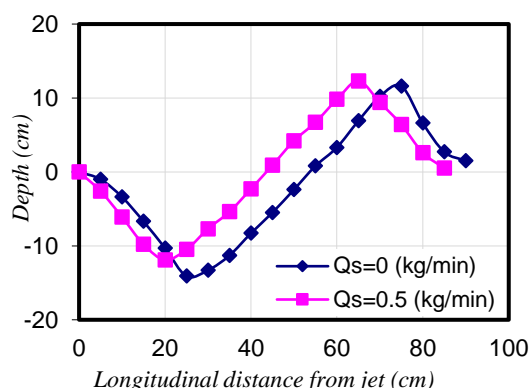


Fig. 7 Effect of sediment  $Q_s$  on longitudinal bed profiles for  $Q = 7.4 \text{ L/S}$ ,  $t = 30 \text{ min}$  and  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$

شکل ۷ تاثیر رسوب اضافه شده به جت بر نیمرخ طولی حفره آبستگي ( $t = 30 \text{ min}$  و  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ ،  $Q = 7.4 \text{ L/S}$ )

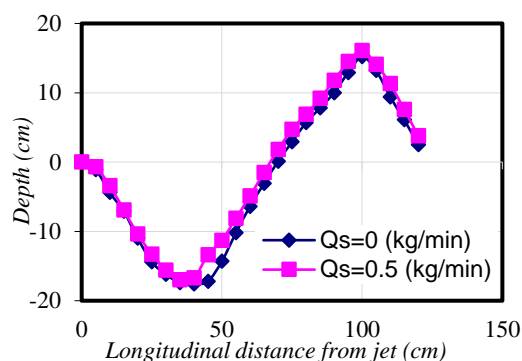


Fig. 8 Effect of sediment  $Q_s$  on longitudinal bed profiles  $Q = 17.3 \text{ L/S}$ ,  $t = 30 \text{ min}$  and  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$

شکل ۸ تاثیر رسوب اضافه شده به جت بر نیمرخ طولی حفره آبستگي ( $t = 30 \text{ min}$  و  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ ،  $Q = 17.3 \text{ L/S}$ )

با توجه به متغیرهای بررسی شده در این تحقیق، تغییرپذیری‌های محسوس‌تری در ابعاد حفره آبستگي با دبی  $7/4 \text{ L/S}$  در مقایسه با دبی  $17/3 \text{ L/S}$  و رسوب  $0.5 \text{ kg/min}$  مشاهده شد به‌گونه‌ای که بخشی از رسوب‌های ورودی، بر روی دیواره پایین‌دست حفره انباشته شده و به تدریج عمق حفره را کاهش می‌داد. این تغییرپذیری‌ها

پشته رسوبی در پایین‌دست حفره آبستگي توسعه می‌یابد. با افزایش زمان از آغاز آزمایش، موقعیت وقوع بیشترین عمق آبستگي، به پایین‌دست منتقل می‌شود. افزون‌براین، افزایش زمان منجر به تغییرپذیری‌ها بیشتری در دیوار پایین‌دست حفره آبستگي می‌شود.

شکل ۶ تاثیر رسوب تزریق شده به جت بر نیمرخ‌های طولی حفره آبستگي برای  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ ،  $Q = 17.3 \text{ L/S}$  و  $t = 5 \text{ min}$  را نشان می‌دهد. افزایش رسوب، پتانسیل حمل رسوب توسط جریان را کاهش داده و باعث کاهش فرسایش و در نتیجه کاهش ابعاد حفره آبستگي می‌شود. بر مبنای این شکل، تغییرپذیری‌های نیمرخ طولی حفره آبستگي برای دبی‌های رسوب اضافه شده، در محدوده ۱ تا ۲ کیلوگرم در دقیقه، با آنکه روند کاهشی دارد اما خیلی زیاد نیست.

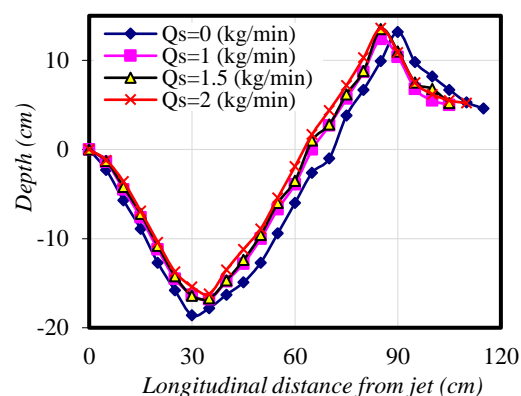


Fig. 6 Effect of sediment  $Q_s$  on longitudinal bed profiles for  $Q = 17.3 \text{ L/S}$ ,  $t = 5 \text{ min}$  and  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$

شکل ۶ تاثیر رسوب اضافه شده به جت بر نیمرخ طولی حفره آبستگي ( $t = 5 \text{ min}$  و  $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ ،  $Q = 17.3 \text{ L/S}$ )

فراسنج‌های دبی جریان، میزان بار رسوبی و طول مدت زمان آبستگي بر روی ابعاد حفره آبستگي تاثیر گذارند. این سه عامل با اثرهای متقابل بر یکدیگر در نحوه شکل‌گیری حفره آبستگي موثرند. اگر میزان بار رسوبی، نسبت به دبی جت ریزشی خیلی زیاد باشد، رسوب‌های موجود در جریان باعث پر شدن حفره آبستگي می‌شود.

در شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه نیمرخ‌های طولی حفره آبستگي برای جت بدون رسوب ( $Q_s = 0$ ) و جت حاوی رسوب ( $Q_s = 0.5 \text{ kg/min}$ )، برای دبی‌های  $17/3$  و  $7/4$



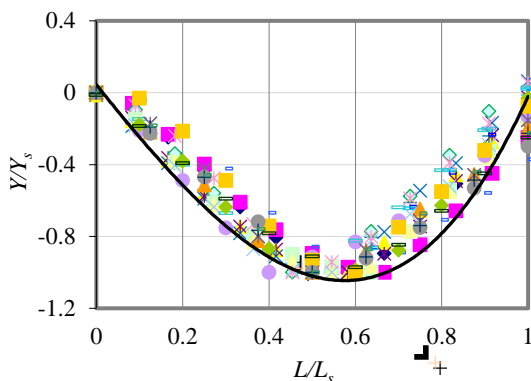


Fig. 9 Dimensionless longitudinal bed profile

شکل ۹ نیمرخ‌های طولی بدون بعد

بدون رسوب ( $Q_s = 0$ ) و جت با بار رسوبی ۱ kg/min را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است هر چه میزان  $Fr_d$  افزایش یابد میزان بیشینه عمق آبشستگی

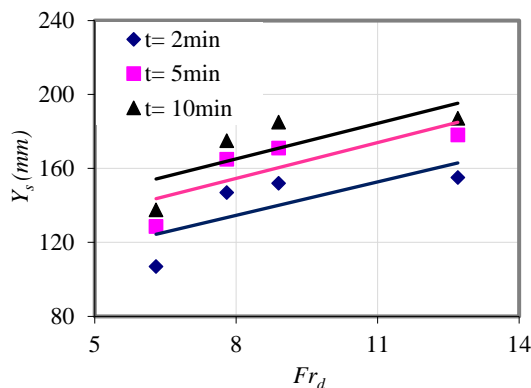


Fig. 10 Effect of  $Fr_d$  on maximum depth of scour for  $Q_s = 0$

شکل ۱۰ تاثیر  $Fr_d$  بر بیشینه عمق آبشستگی برای  $Q_s = 0$

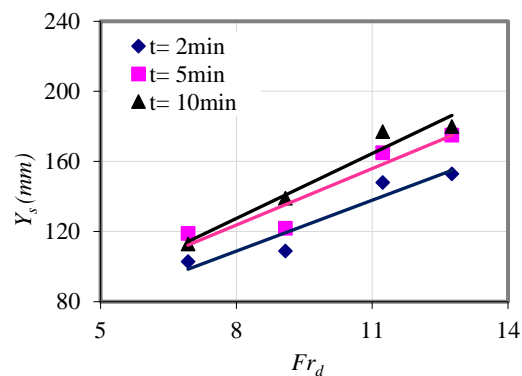


Fig. 11 Effect of  $Fr_d$  on maximum depth of scour for  $Q_s = 1$  kg/min

شکل ۱۱ تاثیر  $Fr_d$  بر بیشینه عمق آبشستگی در  $Q_s = 1$  kg/min

در شکل ۷ بخوبی نمایش داده شده است. البته با افزایش دبی جت ریزشی، از میزان ته‌نشینی رسوب‌ها کاسته شده و در نتیجه کاهش ابعاد حفره روند کندتری بخود می‌گیرد (شکل ۸). بنابراین می‌توان گفت که میزان دبی جت ریزشی و بار رسوبی اضافه شده، در نوع شکل‌گیری حفره آبشستگی موثرترند، به‌گونه‌ای که با افزایش دبی رسوب، میزان ته‌نشینی رسوب‌ها افزایش و در نتیجه ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

### ۵-۱- معادله نیمرخ طولی حفره آبشستگی

در این قسمت با توجه به داده‌های برداشت شده در تمامی آزمایش‌های انجام شده، معادله‌ای کلی برای نیمرخ‌های طولی حفره آبشستگی ارائه می‌شود. برای به دست آوردن این معادله، داده‌های برداشت شده از نیمرخ‌های طولی حفره آبشستگی به صورت بدون بعد در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل، داده‌های مربوط به عمق حفره آبشستگی ( $Y$ ) با بیشینه عمق حفره آبشستگی ( $Y_s$ ) و داده‌های مربوط به طول حفره ( $L$ ) با بیشینه طول حفره آبشستگی ( $L_s$ ) بدون بعد شده است. معادله خط نشان داده شده در شکل ۷ برای نیمرخ طولی حفره آبشستگی، که در برگزیده بیشترین تعداد نیمرخ‌های بستر است، به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{Y}{Y_s} = 2.39\left(\frac{L}{L_s}\right)^3 + 0.54\left(\frac{L}{L_s}\right)^2 - 2.99\left(\frac{L}{L_s}\right) \quad (6)$$

### ۶- بیشینه عمق آبشستگی

بیشینه عمق آبشستگی، بیشترین عمق ناشی از فرسایش بستر در پایان زمان آبشستگی است که پیش‌بینی آن برای اطمینان از پایداری سازه ضروری است. به‌همین دلیل بایستی با دقت محاسبه و برآورد شود. این امر مستلزم آن است که تاثیر فراسنجه‌های تأثیرگذار بر روی عمق آبشستگی بررسی شود. لذا در ادامه به بررسی تاثیر فراسنجه‌های مختلف بر بیشینه عمق آبشستگی پرداخته شده است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمونه‌ای از تاثیر  $Fr_d$  بر روی بیشینه عمق آبشستگی در زمان‌های متفاوت، به ترتیب برای جت



نمونه‌ای از تغییرپذیری‌های بیشینه عمق آبشستگی با تغییرپذیری‌های دبی جریان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل مربوط به زمان  $t = 2 \text{ min}$ ، برای جت بدون رسوب و جت با بار رسوبی ۱ و ۲ کیلوگرم بر دقیقه است. با توجه به این شکل نیز، تاثیر افزایش دبی جریان بر روی بیشینه عمق آبشستگی مشخص است. این افزایش در دبی‌های پائین نرخ بیشتری نسبت به دبی‌های بالاتر دارد.

در شکل ۱۴، نمونه‌ای از تاثیر زمان آزمایش بر عمق آبشستگی برای دبی‌های متفاوت و دبی رسوب ۰/۵ کیلوگرم در دقیقه ترسیم شده است. این شکل به تاثیر افزایشی زمان بر روی عمق آبشستگی اشاره می‌کند. اما با افزایش زمان و طولانی شدن مدت آزمایش، این تاثیر روند کندتری بخود می‌گیرد که نشان‌دهنده افزایش بیشتر عمق آبشستگی نسبت به زمان، تا حد مشخصی است. البته این افزایش همچنان به صورت خیلی جزئی ادامه دارد.

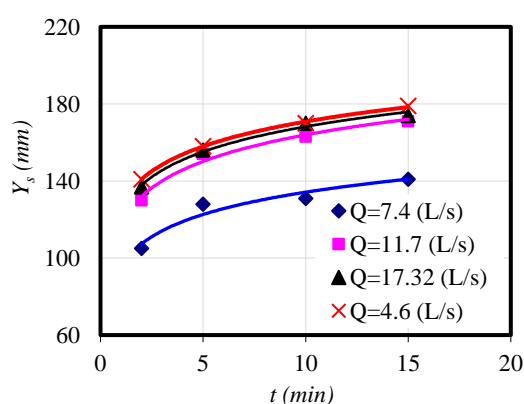


Fig. 14 Temporal variations of maximum depth of scour for different discharges and  $Q_s = 0.5 \text{ Kg/min}$

شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی در دبی‌های مختلف و  $Q_s = 1 \text{ Kg/min}$

در ادامه با توجه به رابطه بدون بعد  $(\delta)$ ، آثار سه عامل بدون بعد  $Fr_d R/H_c$ ،  $Vt/Y_t$  و  $q/q$  بر روی بیشینه عمق آبشستگی نسبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۵ تاثیر  $q/q$  بر روی بیشینه عمق آبشستگی نسبی  $Y_s/Y_t$  برای میزان‌های مختلف  $Vt/Y_t$  و میزان  $Fr_d R/H_c = 0.9$  را نشان می‌دهد. بر مبنای این شکل روشن است که افزایش  $q/q$  باعث کاهش عمق آبشستگی نسبی شده است.

نیز بیشتر می‌شود. زیرا افزایش  $Fr_d$  که همراه با افزایش دبی و سرعت جریان است، افزایش فرسایش پذیری جریان را به همراه دارد و در نتیجه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. روشن است که نمودارهای مربوط به زمان‌های متفاوت، الگوی مشابهی دارند.

شکل ۱۲ مربوط به تاثیر بار رسوبی  $Q_s$  بر بیشینه عمق آبشستگی در زمان‌های متفاوت و دبی ثابت  $Q = 7.4 \text{ L/S}$  است. در این شکل تاثیر کاهشی بار رسوب در جت، بر روی عمق آبشستگی مشخص است. این مسئله با افزایش زمان آزمایش نیز مشهود است. رسوب موجود در جریان منجر به کاهش ظرفیت حمل رسوب و در نتیجه کاهش قدرت فرساینده جت می‌شود. در نتیجه افزایش رسوب در جت، کاهش عمق آبشستگی را به همراه دارد.

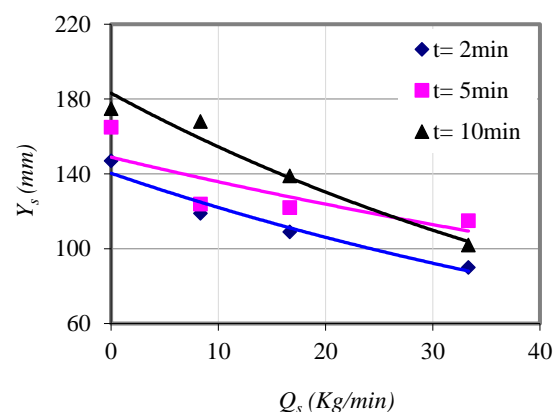


Fig. 12 Effect of  $Q_s$  on maximum depth of scour for  $Q = 7.4 \text{ L/S}$

شکل ۱۲ تاثیر  $Q_s$  بر بیشینه عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف برای  $Q = 7.4 \text{ L/S}$

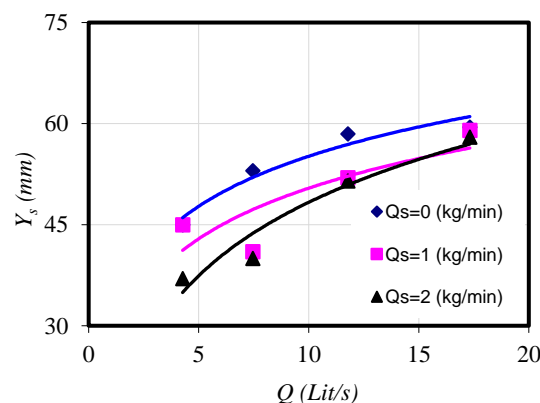


Fig. 13 Effect of discharge on maximum depth of scour for different  $Q_s$  at  $t = 2 \text{ min}$

شکل ۱۳ تاثیر دبی جت ریزشی  $Q$  بر بیشینه عمق آبشستگی در  $Q_s$  های مختلف

افزایشی  $Fr_d R/H_c$  بر روی عمق آبشستگی نسبی شایان توجه است. طوری که افزایش  $Fr_d R/H_c$  از ۰/۶۱ به ۰/۷، منجر به افزایش حدود چهار برابری عمق آبشستگی نسبی می‌شود.

با توجه به مطالب پیشین و با در نظر گرفتن عمق آبشستگی نسبی به‌عنوان تابعی از فراسنجه‌های بدون بعد  $Fr_d R/H_c$ ،  $Vt/Y_t$  و  $q_s/q$ ، رابطه زیر انتخاب شد:

$$\frac{Y_s}{Y_t} = a \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^b \left( \frac{Vt}{Y_t} \right)^c \left( 1 - d \frac{q_s}{q} \right)^e \quad (V)$$

در اینجا  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$  و  $e$  ثابت‌های تجربی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. با کمینه کردن خطا و با توجه به بیشترین همبستگی بین میزان‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، معادله‌ی (۸) برای برآورد بیشینه عمق آبشستگی نسبی با ضریب همبستگی  $R^2 = 0.85$  به دست آمد. با توجه به معادله (۸) روشن است که  $q_s/q$  بیشترین تاثیر را بر روی عمق نسبی آبشستگی دارد. پس از آن  $Fr_d R/H_c$  و  $Vt/Y_t$  به ترتیب اهمیت قرار دارند.

$$\frac{Y_s}{Y_t} = 3.64 \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{0.25} \left( \frac{Vt}{Y_t} \right)^{0.07} \left( 1 - 7.8 \frac{q_s}{q} \right)^{7.9} \quad (A)$$

در شکل ۱۷ مقایسه بیشینه عمق آبشستگی نسبی محاسبه‌شده  $(Y_s/Y_t)_c$  با استفاده از رابطه (۸) و بیشینه عمق آبشستگی نسبی اندازه‌گیری‌شده  $(Y_s/Y_t)_a$  نشان داده شده است. در این شکل به‌منظور بررسی دقت معادله فوق از داده‌های قدسیان و همکاران (۲۰۱۲) نیز استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشتر داده‌ها در محدوده  $\pm 20\%$  درصد خطا می‌باشند که نشان می‌دهد معادله (۸) از دقت مناسبی برخوردار است.

به‌منظور ارزیابی بهتر رابطه (۸)، میزان درصد مطلق خطای متوسط با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای و رابطه زیر محاسبه شد:

$$E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_c - Y_a}{Y_a} \right| \quad (9)$$

در این رابطه  $E$  میزان درصد مطلق خطای متوسط ناشی از رابطه (۸)،  $Y_c$  مقادیر محاسبه‌شده عمق آبشستگی نسبی

همچنین در  $Vt/Y_t$ ‌های بزرگتر از ۵۲۸، بدلیل افزایش زمان آزمایش، نرخ تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی نسبی با افزایش  $q_s/q$  بیشتر است.

تاثیر  $q_s/q$  بر روی بیشینه عمق آبشستگی نسبی برای میزان‌های مختلف  $Vt/Y_t$  و دو میزان  $Fr_d R/H_c$ ، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که تاثیر کاهش  $q_s/q$  بر روی بیشینه عمق آبشستگی نسبی قابل توجه است. این شکل همچنین تاثیر افزایش  $Vt/Y_t$  را بر عمق آبشستگی نسبی نشان می‌دهد. زیرا بدلیل افزایش سرعت جت و در نتیجه افزایش فراسنجه  $Vt/Y_t$  در زمان‌های مشابه، قدرت فرساینده‌گی جت افزوده شده و عمق آبشستگی نسبی افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر

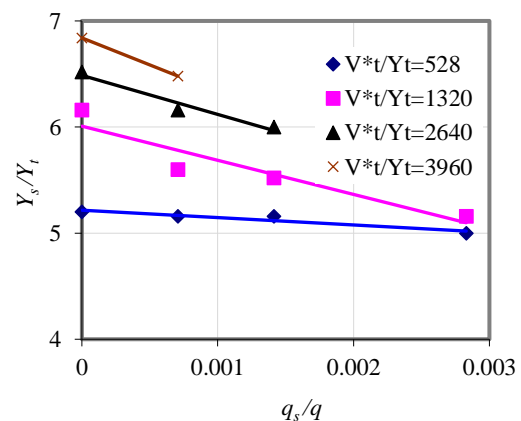


Fig. 15 Effect of  $q_s/q$  on relative maximum depth of scour at various  $Vt/Y_t$  and  $Fr_d R/H_c = 0.9$

شکل ۱۵ تاثیر  $q_s/q$  بر  $Y_s/Y_t$  در  $Vt/Y_t$ ‌های مختلف

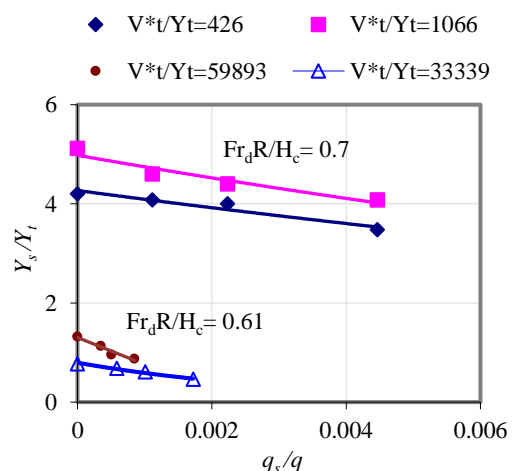
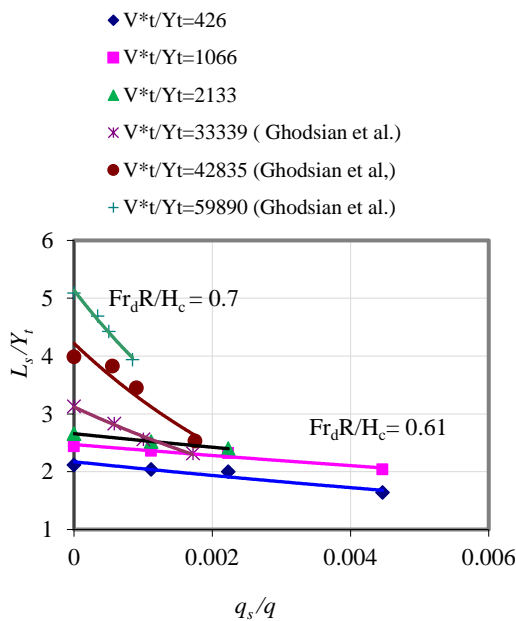


Fig. 16 Effect of  $q_s/q$  on relative maximum depth of scour at various  $Vt/Y_t$

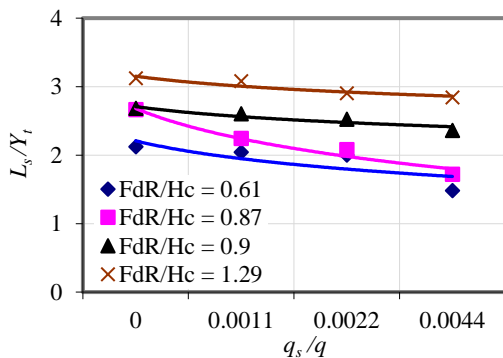
شکل ۱۶ تاثیر  $q_s/q$  بر عمق آبشستگی نسبی



**Fig. 18** Effect of  $q_s/q$  on relative maximum length of scour at various  $Vt/Y_t$

شکل ۱۸ تاثیر عامل  $q_s/q$  بر طول نسبی حفره آبستگي در  $Vt/Y_t$  های مختلف

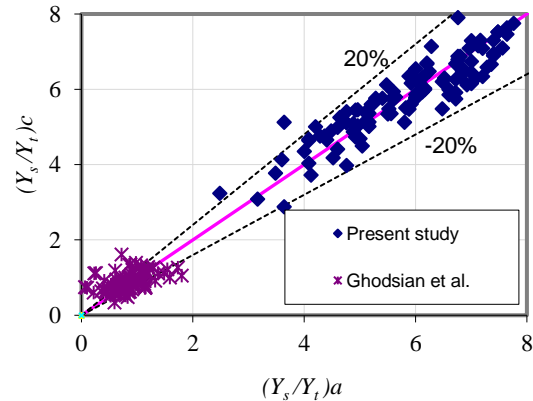
شکل ۱۹ تاثیر  $q_s/q$  بر طول نسبی حفره آبستگي برای میزان های مختلف  $Fr_dR/H_c$  و زمان ثابت  $t = 2\text{min}$  را نشان می دهد. روشن است که با افزایش  $q_s/q$ ، طول نسبی حفره آبستگي کاهش می یابد که به دلیل کاهش پتانسیل فرساینده جت ریزشی با افزایش  $q_s/q$  است. تاثیر افزایشی  $Fr_dR/H_c$  بر طول نسبی حفره آبستگي نیز در این شکل مشخص است که به خاطر افزایش سرعت و افزایش پتانسیل فرساینده جت با افزایش  $Fr_dR/H_c$  است.



**Fig. 19** Effect of  $q_s/q$  on relative maximum length of scour at various  $Fr_dR/H_c$  and  $t = 2\text{ min}$

شکل ۱۹ تاثیر  $q_s/q$  بر طول نسبی حفره آبستگي برای  $t = 2\text{ mm}$  و  $Fr_dR/H_c$  های مختلف

توسط رابطه (۸)،  $Y_a$  میزان های مشاهده ای عمق آبستگي نسبی و  $N$  تعداد داده های استفاده شده است. با استفاده از داده های ترسیم شده در شکل ۱۷، درصد مطلق خطای ناشی از رابطه (۸) برابر ۷ درصد به دست آمد.



**Fig. 17** Comparison of computed and actual values of relative depth of scour

شکل ۱۷ مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده عمق آبستگي نسبی

### ۷- پیشینه طول حفره آبستگي

فاصله افقی از محل ابتدا تا انتهای حفره آبستگي را طول حفره آبستگي گویند. این فراسنجه به دلیل اطلاع از محدوده لازم برای تثبیت و مقاوم سازی بستر مهم است. در ادامه تاثیر فراسنجه های بدون بعد در رابطه (۵)، بر طول نسبی حفره آبستگي بررسی می شود. شکل ۱۸ تاثیر  $q_s/q$  را بر طول نسبی حفره آبستگي برای داده های این تحقیق با میزان های مختلف  $Vt/Y_t$  ( $Vt/Y_t = 426$ )،  $Vt/Y_t = 1066$  و  $Vt/Y_t = 2133$ ) و برای داده های قدسیان و همکاران (۲۰۱۲) نشان می دهد. در این شکل نیز روند کاهشی  $q_s/q$  بر طول نسبی حفره آبستگي به روشنی دیده می شود. روشن است که روند کاهشی  $q_s/q$  برای  $Fr_dR/H_c = 0.7$  با نرخ بیشتری همراه است. افزون بر این افزایش  $Vt/Y_t$  نیز افزایش طول نسبی حفره آبستگي را به همراه دارد. از این شکل مشخص است که هرچه  $Vt/Y_t$  افزایش می یابد شیب نمودارها کمی بیشتر می شود. این روند تغییرپذیری های طول نسبی حفره آبستگي، در میزان های بیشتر  $Fr_dR/H_c$  محسوس تر است.

داده‌های ایشان نیز در محدود  $\pm 20\%$  درصد خطا می‌باشند. لذا می‌توان گفت معادله (۱۱) دارای دقت مناسبی است.

### ۹- نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به آزمایش‌های انجام شده با هدف بررسی آبشستگی ناشی از جت ریزشی حاوی رسوب نتایج زیر به دست آمد:

- با افزایش زمان، عمق و طول حفره آبشستگی در جت بدون رسوب، افزایش می‌یابد. در زمان‌های طولانی‌تر، تغییرپذیری‌های کمتری در افزایش ابعاد حفره آبشستگی دیده می‌شود. همچنین با افزایش زمان آزمایش، ابعاد پشته رسوبی در پایین دست حفره آبشستگی توسعه می‌یابد.
- با افزایش دبی جریان، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.
- میزان دبی جت ریزشی و بار رسوبی اضافه شده به جت، در نوع شکل‌گیری حفره آبشستگی موثرترند.
- با افزایش دبی جت ریزشی برای میزان ثابت رسوب، از میزان ته‌نشینی رسوب‌ها کاسته شده و در نتیجه افزایش ابعاد حفره روند کندتری بخود می‌گیرد.
- تغییرپذیری‌های بیشتری در ابعاد حفره آبشستگی در دبی 7.4 L/S در مقایسه با دبی 17.3 L/S، برای میزان رسوب ثابت، مشاهده شد.
- عمق آبشستگی با افزایش دبی رسوب، در دبی جریان ثابت، کاهش می‌یابد.
- با افزایش  $Fr_d$  میزان بیشینه عمق آبشستگی بیشتر می‌شود.
- افزایش  $q_s/q$  باعث کاهش عمق و طول حفره آبشستگی نسبی می‌شود.
- تاثیر افزایشی فراسنجه  $Fr_d R/H_c$  بر روی عمق آبشستگی قابل توجه است. طوری که افزایش  $Fr_d R/H_c$  از ۰/۶۱ به ۰/۷، منجر به افزایش حدود چهار برابری عمق آبشستگی نسبی می‌شود.
- افزایش  $Vt/Y_t$  عمق و طول نسبی حفره آبشستگی را به همراه دارد.
- متغیر  $q_s/q$  بیشترین تاثیر را بر روی عمق نسبی

با توجه به بررسی‌های پیشین و با در نظر گرفتن روند تغییرپذیری‌های طول نسبی حفره آبشستگی بعنوان تابعی از فراسنجه‌های بدون بعد  $Vt/Y_t$ ،  $Fr_d R/H_c$  و  $q_s/q$  رابطه زیر برای طول نسبی حفره آبشستگی انتخاب شد:

$$\frac{L_s}{Y_t} = a(Fr_d \frac{R}{H_c})^b (\frac{Vt}{Y_t})^c (1 - d \frac{q_s}{q})^e \quad (10)$$

در این رابطه نیز  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$  و  $e$  ثابت‌های تجربی هستند. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با کمینه کردن خطا و با توجه به بیشترین همبستگی بین میزان‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، معادله زیر برای برآورد طول نسبی حفره آبشستگی به دست آمد. میزان‌های ضریب همبستگی  $R^2$  و درصد مطلق خطای متوسط  $E$ ، ناشی از رابطه بالا به ترتیب برابر ۰/۹ و ۵ درصد به دست آمد.

$$\frac{L_s}{Y_t} = 2.24(Fr_d \frac{R}{H_c})^{0.3} (\frac{Vt}{Y_t})^{0.1} (1 - 4.35 \frac{q_s}{q})^{10.2} \quad (11)$$

شکل ۲۰ مقایسه بین میزان‌های محاسبه شده طول نسبی حفره آبشستگی  $(L_s/Y_t)_c$  با استفاده از رابطه ۱۱ و میزان‌های اندازه‌گیری شده آن  $(L_s/Y_t)_a$  را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که بیشتر داده‌ها به خط بهترین برازش نزدیک‌اند و در محدود  $\pm 20\%$  درصد خطا قرار دارند که نشان دهنده دقت قابل قبول رابطه (۱۱) می‌باشد. همچنین در این شکل، مقایسه‌ای بین داده‌های قدسیان و همکاران (2012) و داده‌های این تحقیق انجام گرفته است که مشاهده می‌شود بیشتر

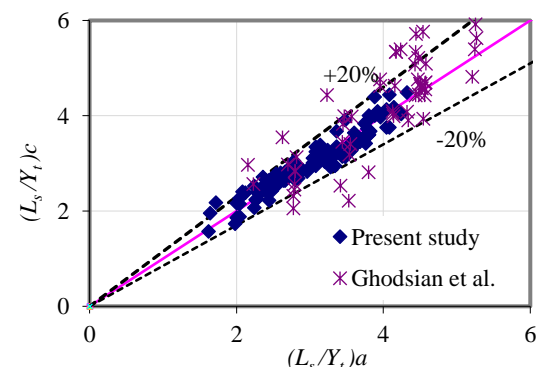


Fig. 20 Comparison of computed and actual values of relative length of scour

شکل ۲۰ مقایسه میزان‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده طول نسبی حفره آبشستگی

Ghodsian, M. and Azar, F.A. (2002). Scour hole characteristics below free over fall spillway. *International J. Sediment Research*, 17(4), 304–313.

Ghodsian, M., Melville, B. and Coleman, S. (2012). Local scour due to sediment carrying free-overfall water jet. *Proc. of the Institution of civil engineers, Water Management, Issue WM1*, 21–29, doi.org/10.1680/wama.2012. 165.1.21

Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. (2012). Local scour due to free over fall jet. *Proc. of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 159 (WM4), 253–260.

Latifi, A., Hosseini, S.A., and Saneie, M. (2018). Comparison of downstream scour of single and combined free-fall jets in co-axial and non-axial modes. *Modeling Earth Systems and Environment* 4, 1271–1284, doi.org/10.1007/s40808-018-0501-6.

Mahboubi, E. (2001). Effect of sediment size on scouring downstream of free fall jets, M.Sc. Thesis, Iran university of science and technology, Tehran, Iran. (In Persian)

Mason, P.J. (1985). Free jet scour below dam and flip bucket. *J. Hydraulic Eng. ASCE*. 111(2), 220-235.

Najafi, A. (2001). Scouring downstream of free fall jets, M.Sc. Thesis, Civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

Ojha, C.S.P. (1999). Outlet scour modeling for drop height influence. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 125(1), 83-85.

Rajaratnam, N. and Belatos S. (1973). Plane turbulent impinging jets. *J. Hydraulic Research, IAHR*, 11(1), 29-59.

Rajaratnam, N. and Mazurek, K.A. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *J. Hydraulic Research, IAHR*, 40(6), 709-716.

Ruff, J.R., Abt, S.R., Mendoza, C., Shaikh, A. and Kloberdanz, R. (1982). Scour at culvert outlets in mixed bed materials. Colorado State Univ., Engineering Research Center Report no. FHWA/RD-82/011. Fort Collins Colorado.

Saeednejad, M.R. (2005). Analysis of scouring downstream of rectangular free fall jets, M.Sc. Thesis, Civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

آبشستگی دارد. پس از آن  $Vt/Y_t$  و  $Fr_d R/H_c$  به ترتیب اهمیت قرار دارند.

- رابطه‌هایی برای برآورد نیمرخ طولی حفره آبشستگی، بیشینه عمق آبشستگی و بیشینه طول حفره آبشستگی به دست آمد.

### ۱۰- فهرست نشانه‌ها

$d_{50}$	اندازه میانگین ذرات بستر (m)
$Fr_d$	عدد فرود ذرات (-)
$g$	شتاب جاذبه ( $m^2/s$ )
$H_c$	ارتفاع ریزش جت آب (m)
$L$	فاصله از ابتدای حفره آبشستگی (m)
$L_s$	بیشینه طول حفره آبشستگی (m)
$Q$	دبی جریان (L/s)
$Q_s$	دبی رسوب در جت (g/min)
$q$	دبی جریان بر واحد عرض (L/s/m)
$q_s$	دبی رسوب بر واحد عرض جت (g/min/m)
$q_s/q$	نسبت دبی رسوب به دبی جریان (-)
$R$	شعاع هیدرولیکی جت (m)
$Y$	عمق آبشستگی (m)
$Y_s$	بیشینه عمق آبشستگی (m)
$Y_t$	عمق پایاب (m)
$\rho$	چگالی سیال ( $kg/m^3$ )
$\rho_s$	چگالی ذرات رسوب ( $kg/m^3$ )

### منبع‌ها

Abida, H. and Townsend, R.D. (1991). Local scour downstream of box-culvert outlets. *J. Irrigation and Drainage Eng. ASCE*, 117(3), 425-440.

Abt, S.R., Kloberdanz, R.L. and Mendoza, C. (1984). Unified culvert scour determination. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 110(10), 1363-1367.

Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. (1991). Scouring; Hydraulic structures design manual, Volume 2, Balkema, Rotterdam.

Doehring, F., and Abt, S.R. (1994). Drop height influence on outlet scour. *J. of Hydraulic Eng. ASCE*, 20(12), 1470-1476.

Ghodsian, M. (2002). Scour hole geometry downstream of a culvert. *Proc. of 13th APD-IAHR Conference, Singapore.*

Whittaker, J.G, and Schleiss A. (1984). Scour related to energy dissipators for high head structures. Mitteilung VAW 73.