

Experimental Study of Scouring of Cohesive Sediments Caused by Free Fall Jets

Fatemeh Nazarimehr¹, Masoud Ghodsian^{1*}

1- PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

* ghods@modares.ac.ir

Received: 19 July 2021, Accepted: 16 January 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Most of the times, flow passing above, through or below hydraulic structures is in the form of jets, which can cause downstream soil material erosion. When the amount of clay in soil materials is more than 10%, they can be considered as cohesive soils.

If the results of cohesionless sediment research are generalized to cohesive sediments, the scour values obtained will be more or less than the actual values. On the other hand, there are no specific conversion ratios to estimate the characteristics and temporal changes of the scouring of cohesive sediments from cohesionless sediments. The duration of reaching maximum scour depth in cohesive sediments has shown to be longer than that of cohesionless ones.

Previous works on cohesive sediments are often performed on flumes or by using a submerged vertical jet device. However, the jets formed below the hydraulic structures are mostly horizontal or oblique which are examined in this paper.

Based on dimensional analysis, it was determined that the parameters of nozzle diameter, jet drop height, jet angle, jet velocity, tailwater depth, fluid density, dynamic fluid viscosity, critical shear stress and gravity acceleration affect the scour of cohesive sediments caused by the jet which is studied here.

Methodology: Experiments were carried out at the Hydraulic Lab of Tarbiat Modares University in a rectangular flume 0.6 m wide and 0.6 m high. A 0.2 m deep hole is created on the floor to place cohesive sediments. The laboratory channel is equipped with a 2m³ inlet tank, from which water is pumped into the jet tube. Froude numbers 3, 5, 7, and 9 are established based on common hydraulic structures and previous works.

The experiments were performed using horizontal, oblique and vertical jets using tubes with nozzle diameters of 10, 15, 20 and 25 mm and with 3 tailwater depths of 5, 10 and 15 cm and 3 jet drop heights of 20, 50 and 60 cm. The cohesive sediments used were produced from a combination of fine sand with clay (including kaolin and bentonite at a ratio of 3 to 1). The amount of clay was considered to be 20% by weight of the total soil based on natural soils and previous works.

Prior to the start of tests, tailwater was established on the sediment layer in order to allow it to saturate. After reaching equilibrium in the experiments, water was completely drained from the channel and the scouring hole and bed profiles were extracted by a laser distance

meter device.

Results and Discussion: Erosion of cohesive sediments has the greatest scouring potential in the initial stage and in the later stages of the erosion process, the sediment bed becomes rougher and its resistance to scouring increases until equilibrium establishes.

A sedimentary ridge is formed at the end of the scouring hole by horizontal and oblique jets and around the scouring hole by vertical jets. In horizontal and oblique jets, the maximum scour depth does not necessarily form on the centerline. The growth of the length and width of scouring hole stops almost simultaneously, but deepening of it continues after that. This is in accordance with findings of Mazurek et al. (2001), Ansari et al. (2002), and Mazurek et al. (2003).

As the jet height rises, the time it takes to reach equilibrium increases and leads to maximum scouring occur at a greater distance from the jet nozzle. In horizontal jets, the location of the maximum scouring depth shifts in the early stages of scouring, but stabilizes after approximately 2 hours. Increased shear stress due to jet flow increases the scouring rate.

Increasing the ratio of tailwater depth to jet drop height (Y_t / H) has a dual effect on the maximum relative scour depth. So that the maximum relative scour depth first increases with increasing Y_t / H to about 0.3 for horizontal jets and about 0.35 for vertical jets, then the trend reversed and with increasing Y_t / H ratio the scour rate relatively reduced.

Increasing the Froude number increases the amount of scouring. Also, the amount of scouring at two angles of 0 and 30 degrees relative to the horizon, are very close to each other. At larger angles, except for the 90 degree angle, the scour depth increases as the jet angle increases. The 45 degree angle jet creates the maximum scouring depth.

Conclusion: As the jet height rises, the time it takes for the scouring to reach equilibrium increases. It also leads to maximum scouring to occur at a greater distance from the jet nozzle. Increasing shear stress by jet flow, increases the scouring rate.

At lower values of Y_t/H , with increasing this ratio, the maximum scour depth increases until it reaches the maximum value and then the trend reverses.

By increasing Froude number, scour rate increases. By steepening jet angle, the scour depth almost increases, but when the jet becomes vertical, lower scour depths were observed.

Keywords: Cohesion, Scour hole, Relative scour depth, Scour 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/>)

مطالعه آزمایشگاهی آبستگی رسوبات چسبنده ناشی از جت‌های ریزشی آزاد

فاطمه نظری مهر^۱، مسعود قدسیان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*ghods@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از مهمترین عواملی است که می‌تواند باعث آسیب یا کاهش کارایی سازه‌های هیدرولیکی گردد، آبستگی می‌باشد. بیشتر پژوهش‌ها در گذشته بر رسوبات غیرچسبنده متمرکز شده‌اند. اما از آنجا که بیشتر رسوبات موجود در طبیعت دارای خاصیت چسبندگی می‌باشند، در پژوهش حاضر این دسته از رسوبات مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از جت‌های افقی، مایل و قائم با قطر نازل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ میلی‌متر، تحت ۳ عمق پایاب ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتیمتری، ۳ ارتفاع ریزش ۲۰، ۵۰ و ۶۰ سانتیمتری و اعداد فرود ۳، ۵، ۷ و ۹ انجام شد. رسوبات چسبنده، از ترکیب ماسه ریزدانه با رس به میزان ۲۰ درصد وزنی کل مصالح، آماده و استفاده شد. پس از حصول تعادل در آزمایش‌ها، نیمرخ‌های نهایی آبستگی توسط متر لیزری برداشت گردید. نتایج نشان داد که افزایش نسبت عمق پایاب به ارتفاع ریزش (Y/H) ، اثر دو گانه بر بیشینه عمق آبستگی نسبی دارد. طوری که بیشینه عمق آبستگی نسبی با افزایش Y/H ، ابتدا افزایش یافته، برای جت افقی به حدود ۰/۳ و برای جت عمودی به حدود ۰/۳۵ می‌رسد، سپس روند تغییرات آن معکوس می‌شود و با افزایش نسبت Y/H میزان آبستگی نسبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این افزایش عدد فرود، باعث افزایش میزان آبستگی می‌شود. همچنین میزان آبستگی در دو زاویه جت ۰ و ۳۰ درجه نسبت به افق، بسیار نزدیک به هم هستند. در زوایای بزرگتر، به غیر از زاویه ۹۰ درجه، با بیشتر شدن زاویه جت، عمق آبستگی افزایش می‌یابد. جت با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عمق آبستگی را ایجاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: چسبندگی، حفره آبستگی، عمق آبستگی نسبی، نیمرخ آبستگی.

۱- مقدمه

طول J_p که از سطح پایاب آغاز شده و ضخامت آن در جهت جت کاهش می‌یابد و دیگری، ناحیه پخش شده جت است. سرعت جت در طول خط مرکزی جت تا حدودی ثابت می‌ماند و میزان آن برابر با سرعت اولیه جت خروجی، در نظر گرفته می‌شود. در بیرون از ناحیه هسته، سرعت جت به دلیل پخشیدگی، کم می‌شود و انرژی آن در جهت جت کاهش چشمگیری دارد. از دیدگاهی دیگر می‌توان ناحیه‌های جت قائم را به سه دسته تقسیم کرد که در شکل ۲ نشان داده شده است: ناحیه آزاد^۱ جت تا فاصله $0.86H$ ، ناحیه برخورد^۲ که تا فاصله H

اغلب، جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی مانند دریچه‌ها و سرریزها به صورت جت می‌باشد. در جت ریزشی، آشفتگی درونی، تنش برشی هوای پیرامون آن و تأثیر کشش سطحی باعث متلاشی شدن آن می‌شود و ممکن است با کشیدن هوای پیرامون به درون جریان، به شکل مخلوطی از ذرات آب و هوا درآید. زاویه برخورد جت با سطح آب در فرآیند آبستگی به ویژه شکل حفره تأثیر می‌گذارد. چنانکه در شکل ۱ برای دو نوع جت قائم و مایل ملاحظه می‌شود، جت پس از برخورد به سطح پایاب، به دو ناحیه جداگانه تقسیم می‌شود؛ یک هسته درونی به

1 Free Region
2 Impingement Region

در گذشته بررسی‌های گسترده‌ای بر روی آبستگي ناشي از جت‌های ریزشی شده است. بیشتر این بررسی‌ها روی رسوب‌های غیرچسبنده انجام شده است. در ادامه برخی از این بررسی‌ها معرفی می‌شود.

(1995) Lim نشان داد که اگر نسبت عرض آبراهه (کانال) به قطر جت بیشتر از ۱۰ باشد، افزایش عرض آبراهه تأثیری بر ابعاد حفره آبستگي ندارد. تأثیر ارتفاع ریزش جت بر ابعاد حفره آبستگي در پژوهش‌های بسیاری بررسی شده است. عده‌ای از پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش ارتفاع ریزش، ابعاد حفره آبستگي افزایش می‌یابد (Blaisdell et al., 1981; Mason and Arumugam, 1985; Blaisdell and Anderson, 1988; Doehring and Abt, 1994).

(1996) Aderibigbe and Rajaratnam نشان دادند که افزایش ارتفاع ریزش اثر دوگانه (کاهشی و افزایشی) بر ابعاد حفره آبستگي دارد. Abida and Townsend (1991) دریافتند اگر $Y_f/H < 0.2$ باشد، با افزایش این نسبت، عمق آبستگي افزایش می‌یابد و اگر $Y_f/H > 0.2$ باشد، به دلیل پراکنش انرژی جت خروجی، با افزایش عمق پایاب، عمق آبستگي کاهش پیدا می‌کند. در اینجا Y_f عمق پایاب می‌باشد. Ghodsian et al. (2006) نیز این روند دوگانه را تأیید کرده و مقدار حدی $Y_f/H = 0.4$ را به دست آوردند.

چنانچه میزان رس موجود در مصالح خاکی بیش از ۱۰٪ باشد، آن مصالح جزو خاک‌های چسبنده به شمار می‌آید. نیروهای الکتروشمیائی بین ذرات و نوع کانی‌های تشکیل دهنده این رسوب‌ها، منشأ ویژگی چسبندگی آنهاست (Breusers and Raudkivi, 1991). سازوکار آبستگي در رسوب‌های چسبنده پیچیدگی بیشتری نسبت به رسوب‌های غیرچسبنده دارد زیرا عامل‌های بیشتری بر مقاومت این رسوب‌ها در برابر آبستگي تأثیر می‌گذارند. مقایسه آبستگي در رسوب‌های چسبنده و رسوب‌های غیرچسبنده نشان می‌دهد در رسوب‌های چسبنده، توسعه طولی حفره آبستگي، پیش از توسعه عمقی آن متوقف می‌شود (Ansari et al., 2003; Mazurek et al., 2001; and 2003).

۰/۲۲ گسترش می‌یابد و ناحیه جت دیوارهای^۱ که پس از آن قرار می‌گیرد. در اینجا H ارتفاع ریزش جت می‌باشد.

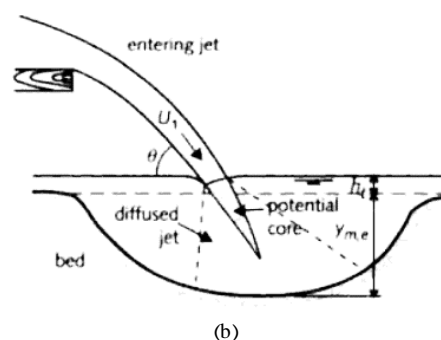
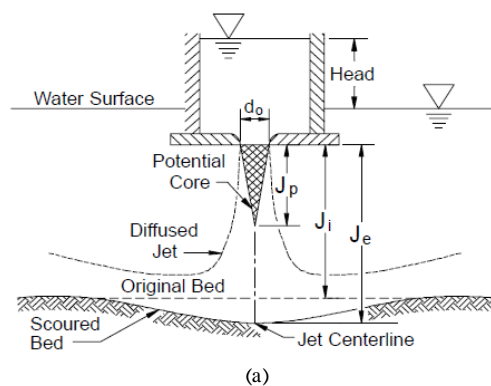


Fig. 1 Characteristics of: (a) vertical and (b) oblique impinging jets

شکل ۱ ویژگی‌های جت‌های ریزشی: (a) قائم (Zomorodian et al., 2015) و (b) مایل (Hoffmans and Verheij, 2017)

از آنجا که جریان جت می‌تواند باعث آبستگي مصالح پایبند دست این سازه‌ها شود، آگاهی از ویژگی‌های آبستگي و فراسنجه (پارامتر)های مؤثر بر آن، اهمیت دارد.

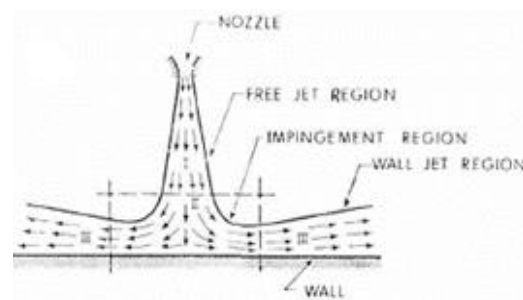


Fig. 2 Different regions formed in impinging jets
شکل ۲ ناحیه‌های مختلف تشکیل شده در جت ریزشی

آبشستگی در رسوب‌های چسبنده ناشی از جت قائم به روش پژوهشگران مختلف پرداختند و تفاوت‌هایی را در آنها مشاهده کردند. پژوهشگران دیگری مانند Daly (2015)، Cossette (2016) و Mazurek (2016) رابطه‌هایی را برای پروفیل‌های زمانی آبشستگی و تعیین تنش برشی بحرانی فرسایش رسوب‌ها چسبنده توسعه دادند.

نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد بیشتر پژوهشگران، به بررسی آبشستگی رسوب‌های غیر چسبنده پرداخته‌اند و بررسی‌های کمتری روی رسوب‌های چسبنده شده است. اثر زاویه جت بر روی آبشستگی با رسوب‌های چسبنده در گذشته به ندرت بررسی شده است. اثر قطر جت، عمق پایاب و ارتفاع ریزش جت نیز در پژوهش‌های قبلی به طور کامل بررسی نشده است. در این پژوهش به بررسی اثر همزمان این فراسنجه‌ها بر آبشستگی در رسوب‌های چسبنده پرداخته شده است.

۲- تحلیل ابعادی

به منظور شناسایی عامل‌های مؤثر بر آبشستگی رسوب‌های چسبنده، با استفاده از تحلیل ابعادی فراسنجه‌های بدون بُعد برای هندسه حفره آبشستگی استخراج می‌شود. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که به ازای میزان‌های زیاد ارتفاع ریزش جت ($H > 1/3d$)، ویژگی‌های جت تابع سرعت جریان خروجی از نازل، قطر نازل، چگالی سیال، ارتفاع ریزش جت و لزجت سیال می‌باشد (Rajaratnam and Beltaos, 1977). با تعمیم این دید (ایده) به آبشستگی ناشی از جت و استفاده از تنش برشی بحرانی برای توصیف ویژگی‌های رسوب چسبنده، پیشینه عمق آبشستگی (d_s) را می‌توان به صورت تابعی از فراسنجه‌های زیر در نظر گرفت (شکل ۳):

$$d_s = f(U_0, d, \rho, H, \mu, Y_t, \theta, \tau_c, g) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، d قطر نازل، H ارتفاع ریزش جت، θ زاویه ریزش جت، U_0 سرعت جت خروجی، Y_t عمق پایاب، ρ چگالی سیال، μ لزجت پویایی (دینامیکی) سیال، τ_c تنش برشی بحرانی و g شتاب ثقل هستند. با در نظر گرفتن d و ρ و U_0 به عنوان متغیرهای تکراری و بی‌بعدسازی فراسنجه‌ها به رابطه (۲) می‌رسیم:

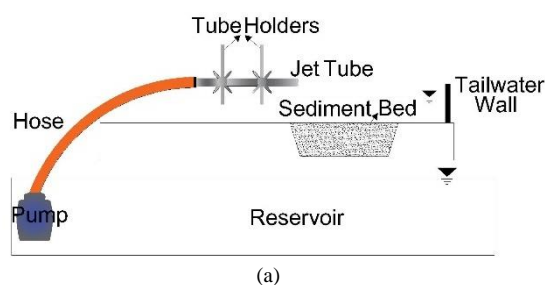
آستانه آبشستگی در رسوب‌های چسبنده نسبت به رسوب‌های غیرچسبنده دیرتر رخ می‌دهد زیرا چسبندگی باعث نگه داشتن ذرات رسوب در کنار یکدیگر و افزایش مقاومت آن می‌گردد. شکل ظاهری حفره‌های آبشستگی تشکیل شده در این دو نوع رسوب‌ها نیز با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

پژوهش‌های انجام شده با استفاده از رسوب‌های چسبنده نسبت به رسوب‌های غیرچسبنده محدودتر هستند. Hedges (1990) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که در مصالح چسبنده، ابعاد حفره آبشستگی تحت تأثیر زاویه برخورد جت در حالت مستغرق نمی‌باشد. Mazurek (2001) آزمایش‌هایی به منظور مقایسه آبشستگی بر روی جت دیواره‌ای و جت دایروی قائم انجام داد و تفاوت در شکل ظاهری و ابعاد حفره آبشستگی (طول، عرض و عمق) ناشی از این دو نوع جت را مشاهده کرد. نتایج ایشان نشان داد طول و عرض حفره آبشستگی در جت‌های دیواره‌ای بیشتر ولی عمق آبشستگی کمتری بوده است.

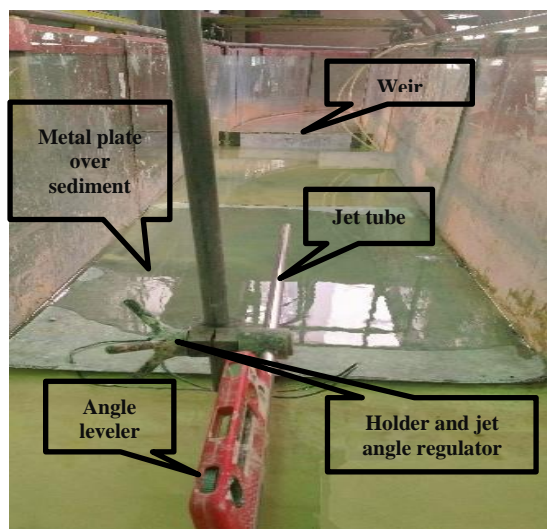
Hanson (2001) روش استاندارد برای انجام آزمایش جت به صورت آزمایشگاهی و میدانی معرفی کرد. این محقق به همراه Cook در سال ۲۰۰۴ رابطه‌ای برای پیش‌بینی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی استخراج کردند.

Rajaratnam and Mazurek (2005) مشاهده کردند که ابعاد حفره آبشستگی (عمق، عرض و طول) در جت‌های ریزشی مایل بیشتر از جت‌های عمودی است. Mazurek (2007) and Hossain از داده‌های پژوهش‌های پیشین بر روی جت‌های دایروی ریزشی عمودی و جت‌های دیواره‌ای، برای مقایسه آبشستگی در رسوب‌های چسبنده با آبشستگی در رسوب‌های غیرچسبنده استفاده کردند و دریافتند که پیشینه عمق آبشستگی و محل رخداد آن در رسوب‌های چسبنده و غیرچسبنده همانند بوده ولی طول حفره آبشستگی در مصالح غیرچسبنده، بیشتر است. Rajaratnam and Mazurek (2002) افزایش ابعاد حفره آبشستگی با افزایش زاویه را گزارش کردند. نتایج Chaudhuri (2007) نشان داد زاویه جت اثر دوگانه بر عمق حفره آبشستگی دارد.

Cossette et al. (2012) به مقایسه تنش برشی بحرانی



(a)



(b)

Fig. 4 Laboratory equipment
شکل ۴ تجهیزات آزمایشگاهی

جهت همخوانی با سازه‌های هیدرولیکی معمول، میزان‌های عدد فرود در محدوده ۳ تا ۹ انتخاب شد. لوله‌هایی با قطرهای ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتی‌متر برای تولید جت در نظر گرفته شد تا تأثیر قطر جت بر ویژگی‌های حفره آبشستگی بررسی شود. با تنظیم ارتفاع لوله‌های یادشده نسبت به لایه رسوبی، تأثیر ارتفاع ریزش جت مورد بررسی گرفت. آب پس از پمپاژ از مخزن ورودی آبراهه، وارد لوله تولید جت می‌شد. دو پمپ طی آزمایش‌ها به کار گرفته شد که یکی با قابلیت تأمین بیشینه دبی ۳۰ لیتر بر دقیقه و دیگری با ظرفیت ۱۱۵ لیتر بر دقیقه برای آزمایش‌ها با دبی‌های بیشتر می‌باشند.

به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان خروجی از روزنه، از رابطه‌های زیر استفاده شد. در اینجا $L_{turbulent}$ طول توسعه یافتگی جریان و D قطر هیدرولیکی می‌باشد (Çengel, and Cimbala, 2010; Rodi, 2017).

$$L_{turbulent} = 4.4D Re^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

$$\frac{d_s}{H} = f \left\{ \frac{\rho U_0^2}{\tau_c}, \frac{d}{H}, Re, Fr, \frac{Y_t}{H}, \theta \right\} \quad (2)$$

در این رابطه Re و Fr به ترتیب عبارتند از عدد رینولدز و عدد فرود جریان. از آنجا که میزان‌های عدد رینولدز Re در این پژوهش بزرگتر از ۱۰۰۰۰ می‌باشد، می‌توان به علت آشسته بودن جریان از این فراسنجه صرف‌نظر کرد. با ترکیب دو فراسنجه بدون بعد در سمت راست معادله بالا، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{d_s}{H} = f \left\{ \frac{\rho U_0^2}{\tau_c} \left(\frac{d}{H} \right)^2, Fr, \frac{Y_t}{H}, \theta \right\} \quad (3)$$

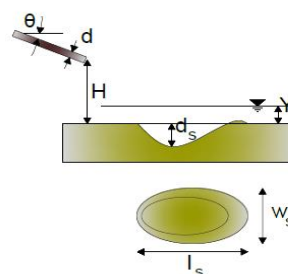


Fig. 3 Scour parameters

شکل ۳ فراسنجه‌های آبشستگی

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۱- آبراهه و جت آب

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از جت‌هایی با قطرهای و زاویه‌های متفاوت، عمق‌های پایاب و ارتفاع‌های ریزش مختلف اجرا شد.

برای انجام آزمایش‌ها، از آبراهه‌ای با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۶ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و طول ۴/۵ متر استفاده شد که دیواره‌های جانبی آن از جنس شیشه و کف آن فلزی می‌باشد. برای ایجاد بستر فرسایش پذیر، حفره‌ای به عمق ۰/۲ متر و طول یک متر و هم عرض آبراهه، در کف آن تعبیه شد. این حفره با فاصله ۲ متر از محل ورود جریان آب به آبراهه در نظر گرفته شد تا تلاطم جریان پیش از رسیدن به رسوبات از بین برود. با استفاده از سرریزی از جنس پلکسی‌گلاس و ارتفاع‌های مختلف (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر)، عمق‌های پایاب مورد نظر ایجاد می‌شد (شکل ۴).

از هوا به آب، دچار شکست و منجر به بروز خطا می شود، آب روی حفره پس از آزمایش و پیش از برداشت داده به طور کامل تخلیه می شود. اندازه گیری دبی توسط دو جریان سنج استوانه ای گوه ای صورت گرفت؛ یکی با دامنه اندازه گیری ۰/۶ تا ۶ متر مکعب در ساعت برای دبی های کمتر و دیگری با دامنه ۰/۳۶ تا ۱/۲۸ متر مکعب در ساعت برای دبی های بیشتر.

۴-۳- روش انجام آزمایش ها

در آغاز رسوبها در حفره تعبیه شده در کف آبراهه ریخته شده و سطح آن صاف می شد تا با کف آبراهه هم تراز باشد. سپس صفحه ای فلزی روی رسوبها قرار داده می شد تا هنگام برقراری پایاب، جریان آب باعث شسته شدن رسوبها نشود. پس از برقراری پایاب مورد نظر، آب از مخزن به درون لوله جت فرستاده می شد. با برداشتن صفحه فلزی آزمایش آغاز می شد و تا هنگامی ادامه پیدا می کرد که با گذشت زمان، تغییر قابل ملاحظه ای در ابعاد حفره آبشستگی مشاهده نشود و تعادل در آبشستگی برقرار شود. این زمان با انجام آزمایش های درازمدت، تعیین شد. پس از قطع آزمایش، آب درون آبراهه و حفره آبشستگی به آرامی تخلیه می شد و نیمرخ حفره آبشستگی توسط دستگاه متر لیزری با دقت ۱/۵ میلی متر برداشت می شد. در آزمایش ها با هدف بررسی تغییرپذیری های زمانی آبشستگی، آزمایش در زمان های مورد نظر قطع شده و پس از تخلیه کامل آب، خواندن ترازهای ارتفاعی بستر توسط متر لیزری انجام می گرفت. ویژگی های آزمایش های انجام گرفته، در جدول ۱ ارائه شده است.

۴- نتایج

در هنگام انجام آزمایش ها، مرحله های مختلفی برای روند آبشستگی مشاهده شد. مرحله آغازین ظرفیت آبشستگی بالایی دارد و بیشینه میزان آبشستگی در این مرحله ایجاد می شود. پس از آن، عمق و ابعاد حفره آبشستگی گسترش می یابد. در مرحله بعد، میزان تغییرپذیری های نیمرخ بستر به تدریج کاهش می یابد و پس از آن، در مرحله تعادل تنها حرکت ذرات درون حفره آبشستگی مشاهده شد و ذرات

$$L_{turbulent} = 1.359DRe^{0.25} \quad (5)$$

مقدار $L_{turbulent}$ با استفاده از رابطه های (۴) و (۵) به ترتیب برابر ۰/۵۸ و ۰/۷۶ متر محاسبه شد. با توجه به این میزان ها و در جهت اطمینان، طول لوله ها ۱/۲ متر در نظر گرفته شد. از طرفی بنا به نظر Ervine and DA (1976) در شرایطی که ارتفاع ریزش بیشتر از ۸ برابر قطر جت باشد ($\frac{H}{d} > 8$)، جت کاملاً توسعه یافته خواهد بود. به منظور ارضای این شرط، ارتفاع های ریزش ۲۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی متری مورد آزمون قرار گرفتند.

۳-۲- رسوب های چسبنده

رسوب های مورد استفاده در آزمایش های این پژوهش، از ترکیب ماسه ریزدانه با رس (شامل کائولین و بنتونیت با نسبت ۳ به ۱) آماده شد. برای انتخاب درصد مناسب برای اختلاط مصالح رسوب، از نمونه های طبیعی و نیز پژوهش های گذشته، الهام گرفته و میزان ۲۰ درصد وزنی رس برای مخلوط در نظر گرفته شد. نمودار دانه بندی رسوب های مورد استفاده در شکل ۵ نمایش داده شده است. مصالح با تراکم ۷۵ درصد، درون حفره تعبیه شده در کف آبراهه جا داده می شد. پیش از آغاز آزمایش ها، عمق پایاب مورد نظر برقرار شده و اجازه داده می شد تا رسوبها به اشباع برسند. لذا، به تأثیر رطوبت خاک بر آبشستگی در این پژوهش پرداخته نشد.

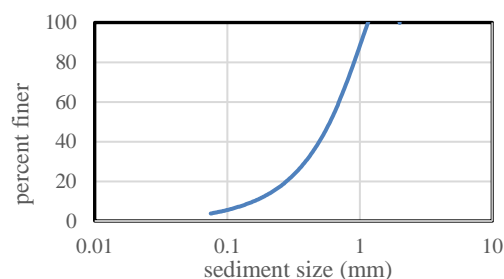


Fig. 5 Sediment grading curve
شکل ۵ نمودار دانه بندی رسوبها

۳-۳- ابزار اندازه گیری

برای اندازه گیری عمق پایاب و ناهمواری (توپوگرافی) بستر از متر لیزری استفاده شد. از آنجا که پرتو لیزر هنگام ورود

و مایل، و در پیرامون حفره آبشستگی در جت‌های عمودی توسط ماسه جدا شده از محل حفره ایجاد می‌شود.

۴-۱- تغییرپذیری‌های زمانی آبشستگی

دو آزمایش با هدف بررسی تغییرپذیری‌های زمانی ابعاد حفره آبشستگی با ویژگی‌های نوشته شده در جدول ۲، انجام شد.

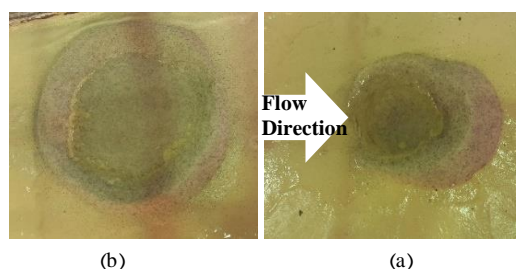


Fig. 6 The usual form of scour hole in experiments with jets: a) horizontal and oblique and b) vertical

شکل ۶ شکل معمول حفره آبشستگی در آزمایش با جت‌های: (a) افقی و مایل و (b) قائم

آزمایش اول با ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر و آزمایش دوم با ارتفاع ریزش ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. در آزمایش شماره ۱، جت به صورت افقی تنظیم شده و ثبت داده در ۵ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت، ۳/۵ ساعت، ۶ ساعت و ۹ ساعت پس از آغاز صورت گرفت. در آزمایش شماره ۲ نیز با جت افقی، ثبت داده پس از ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۴۰ دقیقه، ۵۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۱/۵ ساعت، ۲ ساعت، ۳ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت انجام شد. فاصله‌های خواندن و زمان مناسب برای ثبت داده‌ها بر اساس میزان آبشستگی مشاهده شده و همگرایی میزان‌های عمق آبشستگی انتخاب شد.

جدول ۲ ویژگی‌های آزمایش‌های زمانی آبشستگی

Test No.	Y_t (cm)	H (cm)	d (cm)	Fr	θ (°)
1	10	20	1	7	0
2	10	60	1	7	0

نتایج نشان داد، مرحله آغازین بیشترین پتانسیل فرسایشی را دارد و بیشترین آبشستگی را ایجاد می‌کند. در مرحله‌های پس از آن، به تدریج با جدا شدن ذرات

جدول ۱ ویژگی‌های آزمایش‌ها در حالت آبشستگی نهایی

Test No.	Y_t (cm)	H (cm)	d (cm)	Fr	θ (°)
1	10	20	1	7	0
2	10	60	1	7	0
3	10	20	1	7	0
4	10	20	1	7	0
5	15	20	1	7	0
6	15	20	1	3	0
7	10	20	1	5	0
8	10	20	1	9	0
9	10	50	1	7	0
10	10	50	1	3	0
11	10	60	1	3	0
12	10	60	1	7	0
13	10	20	1	3	0
14	10	20	1	3	30
15	10	20	1	7	30
16	10	20	1	7	45
17	10	20	1	3	45
18	10	20	1	3	60
19	10	20	1	7	60
20	10	20	1.5	3	0
21	5	20	1	7	0
22	5	20	1	3	0
23	5	50	1	3	0
24	5	50	1	7	0
25	5	60	1	7	0
26	5	60	1	3	0
27	10	20	1	3	0
28	10	20	1	7	0
29	10	60	1	7	0
30	10	20	1.5	7	0
31	10	20	2	3	0
32	10	20	2	7	0
33	10	20	2.5	3	0
34	10	20	2.5	7	0
35	10	20	1	7	90
36	10	50	1	7	90
37	10	60	1	7	90
38	10	20	1.5	7	90
39	10	20	1.5	3	90
40	10	20	2	3	90
41	10	20	2	7	90
42	10	20	2.5	3	90
43	10	20	2.5	7	90
44	5	20	1	7	90
45	5	50	1	7	90
46	5	50	1	3	90
47	5	20	1	3	90
48	5	60	1	3	90
49	5	60	1	7	90
50	10	60	1	3	90
51	10	50	1	3	90
52	10	20	1	3	90

رسوب از درون حفره آبشستگی بیرون نمی‌شد. در این مرحله با توجه به شرایط جریان ممکن است حتی جابه‌جایی ذرات رسوب متوقف شود.

شکل ۶ تصویری از حفره آبشستگی در آزمایش با جت‌های افقی و مایل (شکل 6-a) و جت عمودی (شکل 6-b) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پشته رسوبی در پایین دست حفره آبشستگی در جت‌های افقی

آبشستگی و عمق آبشستگی در خط مرکزی آبراهه منطبق می‌شوند.

شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ریزش، مدت زمان کمتری طول می‌کشد تا میزان‌های بیشینه عمق آبشستگی و عمق آبشستگی در خط مرکزی آبراهه به مقدار تعادلی خود برسند. زیرا افزایش ارتفاع ریزش، شدت فرسایش‌دهندگی جریان و میزان عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد و در نتیجه آبشستگی زودتر به تعادل می‌رسد. این عمق در مدت زمان بیشتری تشکیل می‌شود. به گونه‌ای که مشاهده می‌شود، با سه برابر شدن ارتفاع ریزش جت، میزان‌های آبشستگی به‌دست‌آمده نیز نزدیک به سه برابر می‌شود.

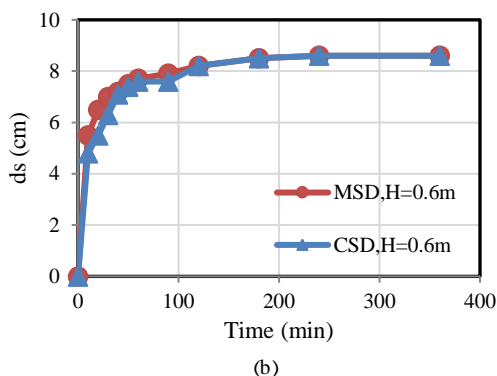
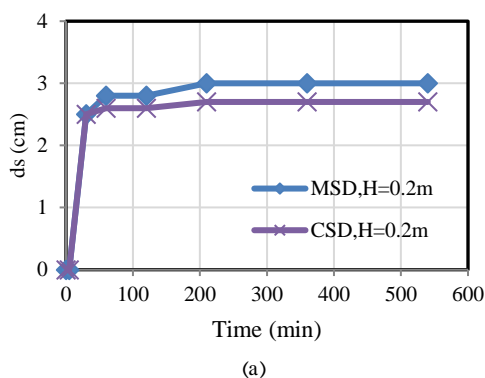


Fig. 8 Comparison of centerline scour depth (CSD) and maximum scour depth (MSD) in: a) Test No.1 and b) Test No.2

شکل ۸ مقایسه عمق آبشستگی در خط مرکزی آبراهه (CSD) با بیشینه عمق آبشستگی (MSD) در: (a) آزمایش شماره ۱ و (b) آزمایش شماره ۲

فاصله از خروجی جت تا موقعیت بیشینه عمق آبشستگی (X_s) از دیگر مواردی است که بدان پرداخته شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. چنانکه مشخص است با افزایش ارتفاع ریزش، بیشینه آبشستگی در فاصله بیشتری

ریزدانه‌تر و حمل آنها توسط جریان آب، بستر رسوبی نسبت به حالت اولیه زبرتر شده و مقاومت آن در برابر آبشستگی افزایش می‌یابد.

مقایسه میزان نهایی ویژگی‌های آبشستگی در آزمایش‌های زمانی با آزمایش‌های حالت نهایی، گویای همخوانی خوب نتایج بود. تغییرپذیری‌های زمانی طول (L_s) و عرض (W_s) حفره آبشستگی در آزمایش شماره ۲ در شکل ۷ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با آغاز آزمایش گسترش طول و عرض حفره آبشستگی، با نرخ زیاد آغاز می‌شود اما به تدریج روند تغییرپذیری‌های آن ملایم شده و پس از حدود یک ساعت متوقف می‌شود. در این آزمایش میزان‌های نهایی طول و عرض حفره آبشستگی به ترتیب ۱۷/۵ و ۱۱ سانتی‌متر بودند.

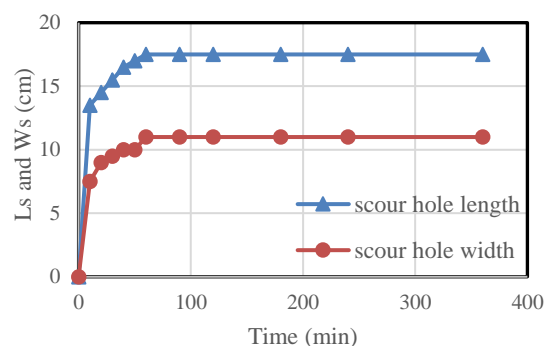


Fig. 7 Temporal changes of scour hole length and width in Test No.2

شکل ۷ تغییرپذیری‌های زمانی طول و عرض حفره آبشستگی در آزمایش شماره ۲

در آزمایش‌ها مشاهده شد که بیشترین مقدار آبشستگی به حتم در خط مرکزی طولی آبراهه رخ نمی‌دهد. شکل ۸ مقایسه بین عمق آبشستگی در خط مرکزی آبراهه و بیشینه عمق آبشستگی، را در دو آزمایش نشان می‌دهد. روشن است که با افزایش ارتفاع ریزش از ۲۰ به ۶۰ سانتی‌متر، مکان رخداد بیشینه عمق آبشستگی به خط مرکزی آبراهه نزدیک‌تر می‌شود. در آزمایش شماره ۱ (شکل ۸-a)، اختلاف عمق آبشستگی در خط مرکزی آبراهه با عمق آبشستگی بیشینه، در طول آزمایش ثابت می‌ماند اما در آزمایش شماره ۲ (شکل ۸-b)، پس از گذشت حدود ۲ ساعت، نقطه‌های مربوط به بیشینه عمق

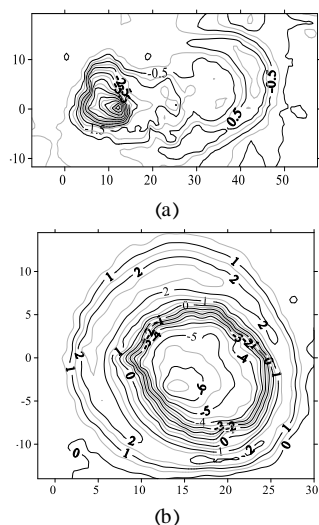


Fig. 10 Bed topography for tests: a) No. 24 and b) No. 45

شکل ۱۰ ناهمواری بستر مربوط به: (a) جت افقی (آزمایش شماره ۲۴) و (b) جت قائم (آزمایش شماره ۴۵)

حسب تنش برشی بیشینه، تنش برشی بحرانی را می‌توان به دست آورد. بنابراین برای برآورد تنش برشی بحرانی، در آغاز لازم است میزان‌های بیشینه تنش برشی بستر τ_{0m} محاسبه شود. بدین منظور از رابطه (Rajaratnam 1976) استفاده می‌شود:

$$\tau_{0m} = c_f \rho \left(C_d U_0 \frac{d}{H} \right)^2 \quad (6)$$

که در آن c_f ضریب اصطکاک پوسته‌ای محلی با مقدار 0.043 ، C_d ضریب پخشیدگی با مقدار $6/3$ و ρ چگالی مایع است. رابطه بالا را می‌توان با جایگذاری مقادیر به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\tau_{0m} = 0.16 \rho U_0^2 \left(\frac{d}{H} \right)^2 \quad (7)$$

با ترسیم نمودار حجم بدون بعد حفره آبشستگی $(\sqrt[3]{V}/H)$ بر حسب بیشینه تنش برشی، محل تلاقی این نمودار با محور افقی، که تنش برشی بحرانی می‌باشد، برابر 0.02 پاسکال تعیین شد. نمودار عمق آبشستگی نسبی بر حسب تنش برشی بدون بعد در شکل ۱۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مقدارهای کمتر تنش برشی، افزایش آن با بیشتر شدن میزان آبشستگی نسبی همراه است. روشن است که نرخ تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی در آغاز زیاد بوده و پس از آن کاسته شده و در مقدارهای بالای تنش برشی، مقدار آبشستگی ثابت می‌ماند.

از نازل تشکیل می‌شود زیرا بنابر قانون‌های حرکت پرتابی، محل فرود جت که در آن بیشترین نیرو اعمال می‌شود، از نازل دور می‌شود. افزون‌براین، موقعیتی که بیشینه عمق آبشستگی در آن تشکیل می‌شود، در مرحله‌های آغازین آزمایش، تغییر مکان می‌دهد و تا حدودی پس از آغاز ۲ ساعت، ثابت می‌شود که دلیل آن به تعادل رسیدن شکل کلی حفره آبشستگی می‌باشد.

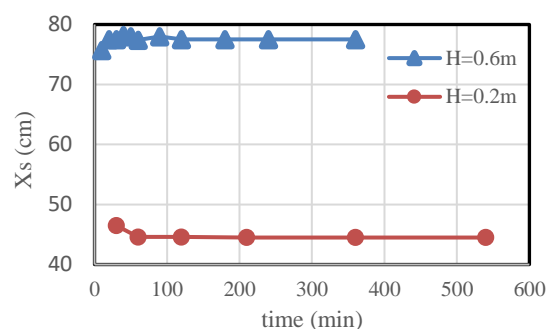


Fig. 9 Comparison of distance to maximum scour depth in Tests No.1 and 2

شکل ۹ مقایسه فاصله جت تا موقعیت بیشینه عمق آبشستگی در آزمایش‌های شماره ۱ و ۲

۴-۲- تأثیر زاویه جت بر ناهمواری بستر

نمونه‌ای از ناهمواری بستر برای جت افقی در شکل 10-a و برای جت قائم در شکل 10-b، نشان داده شده است. میزان‌های همه فراسنجه‌ها، به غیر از زاویه ریزش جت، در این شکل‌ها یکسان است. ملاحظه می‌شود که در حالت جت افقی، گسترش طولی حفره آبشستگی بیشتر، و گسترش عرضی آن کمتر است.

در حالی که در جت قائم، گسترش عرضی و طولی حفره آبشستگی یکسان، و شکل آن نزدیک به دایره‌ای شکل است. دلیل آن پخش بیشتر جریان جت در راستای طولی، در جت افقی می‌باشد که محدوده تأثیر جت را در این راستا گسترش می‌دهد. افزون‌براین، به دلیل قدرت نفوذ کمتر جت افقی در راستای قائم، این جت عمق آبشستگی کمتری را ایجاد می‌کند.

۴-۳- تنش برشی بستر

با استفاده از نمودار حجم بدون بعد حفره آبشستگی بر

فرو، اغلب عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد زیرا در سرعت‌های بالاتر، قدرت فرساینده‌گی جریان بیشتر است. تأثیر عدد فرود بصورت دقیق‌تر برای $Y_t/H = 0.5$ در شکل ۱۳ نشان داده شده است که گویای تأثیر مستقیم افزایش عدد فرود بر افزایش عمق آبشستگی نسبی و به صورت خطی می‌باشد. این شکل همچنین تأثیرپذیری آبشستگی را با تغییر زاویه جت به تصویر می‌کشد. ملاحظه می‌شود میزان‌های آبشستگی نسبی در دو زاویه صفر و ۳۰ درجه، بسیار نزدیک به هم هستند و برای زاویه‌های بیشتر، با بیشتر شدن زاویه جت، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. اما در زاویه ۹۰ درجه، عمق‌های آبشستگی مشاهده شده، کمتر از میزان‌های مربوط به زاویه ۴۵ درجه هستند.

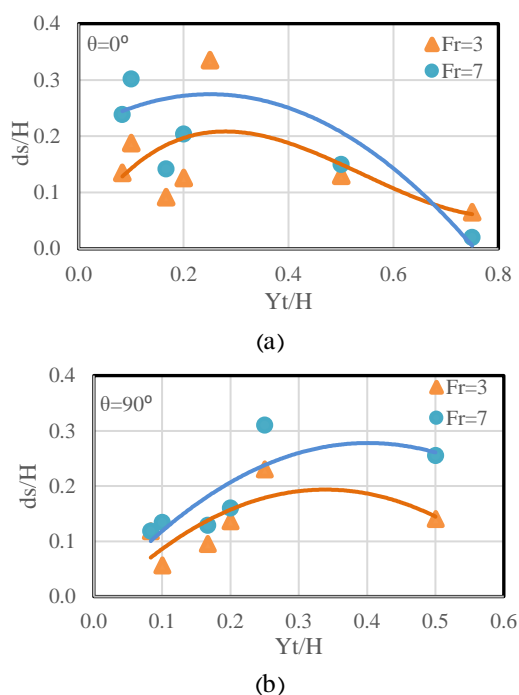


Fig. 12 Dimensionless scour depth vs dimensionless tailwater depth for: a) horizontal and b) vertical jets
 شکل ۱۲ عمق آبشستگی نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی برای: (a) جت افقی و (b) جت قائم

شکل ۱۴ تأثیر زاویه جت بر عمق آبشستگی نسبی برای عدد فرود ۳ و عمق پایاب نسبی ۰/۵ مربوط به این پژوهش و نیز نتایج (Chaudhuri (2007) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این پژوهش مشاهده می‌شود، میزان‌های آبشستگی نسبی برای جت با زاویه ۰ تا ۳۰

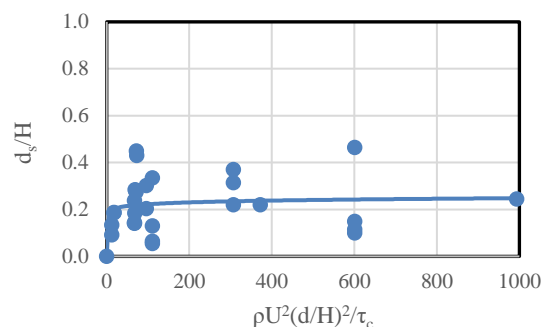


Fig. 11 Dimensionless scour depth vs dimensionless shear stress for horizontal jets
 شکل ۱۱ عمق آبشستگی نسبی بر حسب تنش برشی بدون بعد برای جت‌های افقی

۴-۴- تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر عمق آبشستگی

برای ارزیابی تأثیر ارتفاع ریزش و عمق پایاب، تأثیر توأم این دو فراسنجه در قالب فراسنجه بدون بعد Y_t/H بررسی می‌شود. چنان‌که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش نسبت Y_t/H در هر دو جت افقی و جت عمودی، تأثیر دوگانه‌ای بر عمق آبشستگی نسبی دارد. بدان معنا که، به ازای میزان‌های کمتر Y_t/H ، با افزایش این نسبت، آبشستگی نسبی افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن به مقدار مشخصی، این روند معکوس شده و با افزایش نسبت Y_t/H ، آبشستگی نسبی کاهش می‌یابد. این روند در هر دو عدد فرود نشان داده شده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. علت این روند را می‌توان بدین صورت بیان کرد که میزان‌های کم عمق پایاب، انرژی جت را مستهلک نمی‌کند و آبشستگی بیشتری ایجاد می‌شود. اما پس از رسیدن به یک مقدار حدی، عمق پایاب به صورت بازدارنده‌ای در برابر نفوذ جت عمل کرده و افزایش عمق پایاب، منجر به آبشستگی کمتری می‌شود.

با توجه به خطوط برازش داده شده در شکل ۱۲، مقدار حدی Y_t/H برای جت افقی، حدود ۰/۳ و برای جت عمودی حدود ۰/۳۵ می‌باشد. این میزان‌ها نزدیک به میزان‌های گزارش شده برای رسوب‌های غیرچسبنده توسط (Abida and Townsend (1991) و Ghodsian et al. (2006) است. افزون بر این، در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که در جت‌های عمودی و افقی، با افزایش عدد

۵- نتیجه گیری

بنابر مشاهده‌های به عمل آمده از آزمایش‌های صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمد:

- حدود ۹۰ درصد بیشینه عمق آبستگي در ۱۲۰ دقیقه اول آزمایش حاصل می‌شود.
- با افزایش ارتفاع ریزش، مکان رخداد بیشینه عمق آبستگي به خط مرکزی آبراهه نزدیک‌تر می‌شود.
- در جت افقی، گسترش طولی حفره آبستگي بیشتر و گسترش عرضی آن کمتر است. در حالی که در جت قائم، گسترش عرضی و طولی حفره آبستگي یکسان و شکل حفره آبستگي نزدیک به دایره‌ای شکل است.
- پشته رسوبي در جت‌های افقی و مایل، در پایین دست حفره آبستگي و در جت‌های عمودی در پیرامون حفره آبستگي ایجاد می‌شود.
- افزایش عمق نسبي پایاب در هر دو جت افقی و جت عمودی، تأثیر دوگانه‌ای بر عمق نسبي آبستگي دارد. مقدار حدی عمق نسبي پایاب برای جت‌های افقی حدود ۰/۳ و برای جت‌های عمودی حدود ۰/۳۵ به دست آمد.
- با افزایش عدد فرود، عمق آبستگي افزایش می‌یابد.
- جت با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عمق آبستگي را ایجاد می‌کند.

۸- فهرست نشانه‌ها

C_d	ضریب پخشیدگی
C_f	ضریب اصطکاک پوسته ای محلی
D	قطر هیدرولیکی (cm)
d	قطر جت (mm)
d_s	بیشینه عمق آبستگي (cm)
Fr	عدد فرود
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
H	ارتفاع ریزش جت (cm)
J_p	هسته درونی (cm)
L_s	طول حفره آبستگي (cm)
$L_{turbulent}$	طول توسعه یافتگی جریان (cm)
MCD	عمق آبستگي در خط مرکزی (cm)
MSD	بیشینه عمق آبستگي (cm)
r	شعاع گسترش جت (cm)

درجه، تغییر اندکی دارد. اما برای جت با زاویه ۳۰ تا ۶۰ درجه، روند افزایشی آبستگي با نرخ زیادی مشاهده می‌شود. در حالی که برای جت با زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه، آبستگي نسبي کاهش می‌یابد. علت این روند دوگانه تغییرپذیری‌ها را می‌توان بدین صورت بیان کرد که در حالت جت افقی و مورب، تأثیر بازدارندگی پایاب خفیف‌تر است. اما در جت قائم، پایاب به طور مستقیم در برابر نفوذ جت قرار می‌گیرد و منجر به استهلاک بیشتر انرژی جت و بروز آبستگي کمتر می‌شود.

Chaudhuri (2007) با جتی به ابعاد 1×1 سانتی‌متر تحت عمق پایاب نسبي ۰/۹۱ و عدد فرود ۳/۵ نیز این تغییر روند را از زاویه ۴۵ درجه به بعد مشاهده نمود. میزان‌های کمتر اندازه‌گیری شده عمق آبستگي نسبي توسط Chaudhuri (2007)، به دلیل شرایط متفاوت آزمایش‌های ایشان مانند عمق پایاب نسبي ۰/۹۱ است.

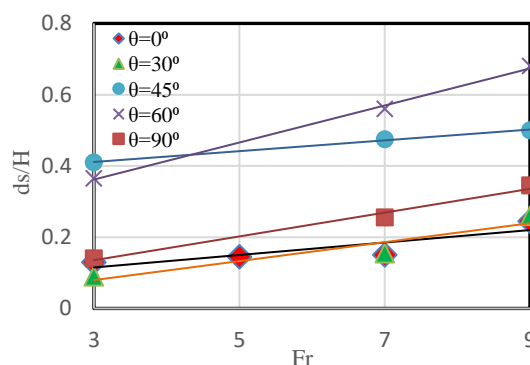


Fig. 13 Variations of dimensionless scour depth with Froude number for relative tailwater depth equal to 0.5
شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های عمق آبستگي نسبي بر حسب عدد فرود: $Y_t/H = 0.5$

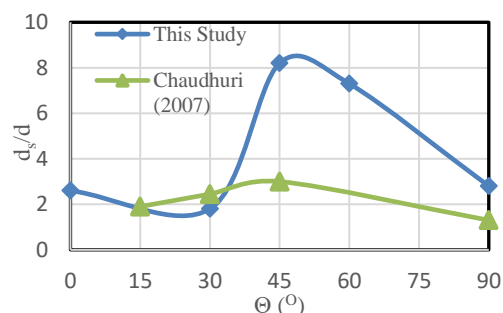


Fig. 14 Variations of dimensionless scour depth with jet angle
شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های عمق آبستگي نسبي بر حسب زاویه جت

in cohesive soils, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan.

Cossette, D., Mazurek, K.A. and Rennie, C.D. (2012). Critical shear stress from varied methods of analysis of a submerged circular turbulent impinging jet test for determining erosion resistance of cohesive soils. Paper presented at the Proc. 6th Intl. Conf. on Scour and Erosion (ICSE6).

Daly, E.R., Fox, G.A., Enlow, H.K., Storm, D.E. and Hunt, S.L. (2015). Site-scale variability of streambank fluvial erodibility parameters as measured with a jet erosion test. *Hydrological Processes*. 29(26), 5451-5464.

Doehring, F.K. and Abt, S.R. (1994). Drop height influence on outlet scour. *Journal of hydraulic engineering*, 120(12), 14701476.

Ervine, D.A. (1976). The entrainment of air in water. *Int. Water Power Dam Constr.* 28(12), 27-30.

Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. (2006). Local scour due to free overfall jet. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management.

Hanson, G.J. (2001). Field and laboratory jet testing method for determining cohesive material erodibility. In Proceedings of the seventh Federal interagency sedimentation conference.

Hanson, G. and Cook, K. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied engineering in agriculture*. 20(4), 455.

Hedges, J.D. (1990) The scour of cohesive soils by an inclined submerged water jet, Master Thesis, Texas A&M University.

Hoffmans, G.J. and Verheij, H.J. (2017). *Scour Manual*. Routledge, 224 p.

Lim, S.S. and Khalili, N. (2009). An improved rotating cylinder test design for laboratory measurement of erosion in clayey soils. *Geotechnical testing journal*, 32(3), 232-238.

Lim, S.Y. (1995). Scour below unsubmerged full flowing culvert outlets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Maritime and Energy*. 112(2), 136149.

Mason, P.J. and Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of hydraulic engineering*, 111(2), 220235.

Re	عدد رینولدز
U_0	سرعت جت خروجی (ms^{-1})
V	حجم حفره آبشستگی (cm^3)
W_s	عرض حفره آبشستگی (cm)
X	فاصله در راستای طول آبراهه (cm)
Y_t	عمق پایاب (cm)
θ	زاویه ریزش جت ($^\circ$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت پویایی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
τ_{0m}	تنش برشی ماکزیموم ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
τ_c	تنش برشی بحرانی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Free Region	ناحیه آزاد
Impingment Region	ناحیه برخورد
Wall Jet Region	ناحیه جت دیواره‌ای

۹- منابع

Abida, H. and Townsend, R. (1991). Local scour downstream of boxculvert outlets. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 117(3), 425-440.

Aderibigbe, O. and Rajaratnam, N. (1996). Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*, 34(1), 1933.

Ansari, S.A., Kothyari, U.C. and Raju, K.G.R. (2003). Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jets. *Journal of hydraulic engineering*. 129(12), 1014-1019.

Blaisdell, F.W. and Anderson, C.L. (1988). A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets. *Journal of Hydraulic Research*. 26(4), 357376.

Blaisdell, F.W., Hebaus, G.G. and Anderson, C.L. (1981). Ultimate dimensions of local scour. *Journal of the Hydraulics Division*. 107(3), 327337.

Breusers, H. and Raudkivi, A. (1991). *Scouring, hydraulic structures design manual*. IAHR, AA Balkema, Rotterdam, 143.

Chaudhuri, P. (2007). Study of scour caused by obliquely impinging plunging and non-plunging turbulent jets.

Cossette, D. (2016). Erodibility and scour by a vertical submerged circular turbulent impinging jet

- Mazurek, K.A. and Hossain, T. (2007). Scour by jets in cohesionless and cohesive soils. *Canadian journal of civil engineering*, 34(6), 744751.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets*, Elsevier.
- Rajaratnam, N. and Beltaos, S. (1977). Erosion by impinging circular turbulent jets. *Journal of the Hydraulics Division*. 103(10), 11911205.
- Rajaratnam, N. and Mazurek, K.A. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *Journal of Hydraulic Research*. 40(6), 709-716.
- Rodi, W. (2017). *Turbulence models and their application in hydraulics: A state-of-the-art review*. Routledge, 124 p.
- Zomordian., S.M.A., Honar zad, H. and Heydarian, H. (2015). Investigation of the effect of nanotechnology Product (CBR+) on the erodibility of clayey soils using the jet erosion testing. *Journal of Civil Engineering of Sharif*, 31.2(3.2), 121-129. (In Persian)
- Çengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 994 p.
- Mazurek, K.A. (2010). Erodibility of a cohesive soil using a submerged circular turbulent impinging jet test. In 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV.
- Mazurek, K. (2016). Assessment of Equilibrium Scour by a Submerged Circular Turbulent Impinging Jet in Cohesive Soils. 6th International Symposium on Hydraulic Structures and Water System Management, Portland, Oregon, USA, 27-30 June 2016
- Mazurek, K. and Rajaratnam, N. (2005). Erosion of sand beds by obliquely impinging plane turbulent air jets. *Journal of Hydraulic Research*. 43(5), 567-573.
- Mazurek, K., Rajaratnam, N. and Sego, D. (2001). Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets. *Journal of hydraulic engineering*. 127(7), 598606.
- Mazurek, K., Rajaratnam, N. and Sego, D. (2003). Scour of a cohesive soil by submerged plane turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2), 195206.
- Mazurek, K.A. (2001). *Scour of Clay by Jets*. Ph.D. thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.