

Experimental study on scour of cohesive sediments due to inclined submerged jets

Huriyeh Rajaei Litkouhi¹, Masoud Ghodsian^{2*}

¹Master's student, Department of Civil Engineering and Hydraulic Structures, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Faculty of Civil and Environment Engineering and Water Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: ghods@modares.ac.ir

Received: 30 Sep. 2025
Revised: 28 Nov. 2025

Accepted: 03 Nov. 2025
Published: 21 June 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This experimental study investigates scour dynamics in cohesive sediments induced by submerged inclined jets, focusing on the interactive effects of Froude number ($Fr = 3-9$), jet inclination angle ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$), and tailwater depth (10, 15, 20 cm). Experiments were conducted in a hydraulic flume using cohesive sediment mixtures (80% silica sand, 15% kaolinite, 5% bentonite) with precise laser profilometry for bed topography measurement. Results demonstrate that increasing Froude number significantly amplifies scour hole dimensions, with scour width at $Fr = 9$ approximately four times greater than at $Fr = 3$, while shifting maximum erosion downstream. Jet angle variation systematically alters scour symmetry and sediment ridge morphology, with 30° jets producing the most symmetrical scour holes. Greater tailwater depths reduce scour intensity through energy dissipation mechanisms. A novel symmetry index (SY_i) quantifies scour hole asymmetry, revealing that 30° jets yield optimal symmetry while 45° jets produce maximum asymmetry. The findings extend existing prediction models and provide critical design criteria for hydraulic structures in cohesive soil environments.

Keywords: Scour; submerged jet; cohesive sediment; jet inclination; Froude number; tailwater depth.

Introduction: Scour around hydraulic structures remains a critical challenge in river engineering due to its significant impact on structural stability and sediment transport dynamics. Previous research has demonstrated the complexity of scour phenomena influenced by flow turbulence, sediment cohesion, and geometric parameters (Kuti & Yen, 1976; Balachandar et al., 2000; Partheniades, 2007). Despite substantial advances, the interplay between jet inclination, tailwater effects, and cohesive sediment properties remains insufficiently quantified. Most studies have focused on non-cohesive sediments, while cohesive soils exhibit fundamentally different erosion behaviors due to electrochemical forces between particles (Breusers & Raudkivi, 1991). These forces can increase erosion thresholds by up to 90% compared to non-cohesive materials. The limited research on cohesive sediments has yielded conflicting results, with some studies reporting deeper scour in cohesive beds while others indicate reduced erosion rates (Ansari et al., 2003; Panagiotopoulos et al., 1997). Consequently, systematic experimental investigations are urgently needed to elucidate the combined effects of hydraulic parameters on scour morphology in cohesive sediments. This study aims to systematically evaluate these factors under controlled laboratory conditions to enhance predictive capabilities and inform mitigation strategies for hydraulic infrastructure.

Methodology: All experiments were conducted in a hydraulic flume 7 m long, 61.5 cm wide, and 95 cm deep. A water storage tank and a centrifugal pump with a maximum capacity of 10 liters per second provided the required water flow. The depth of the effluent was controlled through a rectangular weir made of Plexiglas with adjustable heights of 10, 15, and 20 cm. The jet device consisted of a 1 cm diameter tube connected to a mechanical system equipped with a graduated conveyor for precise adjustment of the jet angle (θ) at 30, 45, and 60 degrees. A schematic diagram of the laboratory equipment is presented in Fig. 1. The sediment beds are composed of cohesive mixtures (80% silica sand, 15% kaolinite, 5% bentonite) to simulate natural conditions. Tailwater depths were set at 10, 15, and 20 cm to represent varying downstream flow conditions. Flow rates corresponded to Froude numbers ranging from 3 to 9. Sediment bed topography post-experiment was measured via laser profilometry with ± 0.001 m accuracy. Key experimental parameters including Reynolds number (Re), jet velocity (U_o) and jet flow rate

(Q_0) and setup details are outlined in [Table 1](#) and [Figs. 1-2](#). Data acquisition ensured repeatability and precision.

Results and Discussion: Results demonstrate that increasing Froude number significantly enlarges scour hole dimensions. At $Fr = 9$, scour width is approximately four times that at $Fr = 3$, while the relative maximum scour depth (Y_s/d_j) increases by 120%. The volume of eroded sediment rises, the downstream sediment ridge grows, and both the scour length and the location of maximum depth shift downstream. Longitudinal profiles for the 30° jet show that at $Fr = 3$ the hole is small with no distinct ridge; as Fr increases, the hole deepens and migrates downstream, forming an upstream ridge at $Fr = 9$. Ridge height increases up to fourfold, transforming from trapezoidal to triangular shape. For the 45° jet, the trend is similar, but stronger upward flows reduce downstream extension while increasing upstream extension. At 60° , downstream sediment accumulation decreases while upstream accumulation increases.

Symmetry analysis, quantified by index $SY_i = \Delta V/\Delta V_{max} + \Delta A/\Delta A_{max} + \Delta W/\Delta W_{max}$ (ranging 0.018–3.0), shows that the 30° jet produces the most symmetrical scour holes, the 45° jet yields maximum asymmetry, and the 60° jet exhibits intermediate symmetry. Generally, increasing Froude number increases asymmetry. Dimensionless analysis reveals that for the 30° jet, 30% of the 120% depth increase occurs between $Fr = 3$ and 5, 50% between $Fr = 5$ and 7, and 30% between $Fr = 7$ and 9. For the 45° jet, the sharpest increase occurs between $Fr = 3$ and 5. Tailwater depth effects show that greater depths reduce scour intensity, altering deposit geometry from trapezoidal to triangular. Additionally, jet deflection toward channel walls is observed at shallow tailwater depths ($Y_t/d_j < 10$) due to Coanda effects and surface waves, contributing to asymmetry. An empirical equation $Y_s/d_j = d + a(Fr)^b(Y_t/d_j)^c$, with coefficients provided for each angle, yields R^2 values of 0.966, 0.859, and 0.845 for 30° , 45° , and 60° , respectively.

Conclusion: This study quantifies the interactive effects of hydraulic and geometric factors on scour formation in cohesive sediments subjected to submerged inclined jets. The comprehensive methodological approach, supported by rigorous referencing and detailed experimental documentation, enhances model accuracy for predicting scour behavior. The findings are crucial for designing resilient hydraulic structures and managing sediment dynamics in cohesive soil environments, contributing to improved engineering practices and infrastructure safety.

© 2024 University of Zabol, Zabol, 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/>)

بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی رسوبات چسبنده توسط جت مایل و مستغرق

حوریه رجایی لیتکوهی^۱، مسعود قدسیان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست و پژوهشکده آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: ghods@modares.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

چکیده: بررسی پدیده آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت بالایی در ایمنی و پایداری این سازه‌ها برخوردار است. این پژوهش با استفاده از یک روش آزمایشگاهی و با استفاده از رسوبات چسبنده، به بررسی اثرات عدد فرود، زاویه جت و عمق پایاب بر توپوگرافی بستر، پروفیل‌های طولی و عرضی حفره آب‌شستگی و پشته‌های رسوبی اطراف آن می‌پردازد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود، عمق و ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش یافته و محل حداکثر فرسایش به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. همچنین، افزایش زاویه جت از ۳۰ به ۴۵ درجه باعث کاهش گسترش حفره به سمت پایین‌دست و افزایش آن به سمت بالادست می‌شود، درحالی‌که زاویه ۶۰ درجه موجب کاهش انباشت رسوب در پایین‌دست و افزایش آن در بالادست می‌گردد. افزایش عمق پایاب نیز با کاهش انرژی جریان، موجب کاهش آب‌شستگی و تغییر شکل پشته‌های رسوبی به حالت مثلثی می‌شود. علاوه بر این، انحراف جت به سمت دیواره‌های کانال در عمق‌های پایاب کمتر، مشاهده شد. شاخص تقارن حفره آب‌شستگی نشان داد که زاویه جت ۳۰ درجه متقارن‌ترین حالت حفره را دارد و با افزایش عدد فرود، عدم تقارن حفره افزایش می‌یابد. درنهایت، این پژوهش با ارائه روابط کمی و تحلیل سیستماتیک پارامترهای موثر، معیارهای عملی برای پیش‌بینی دقیق‌تر الگوی آب‌شستگی و مدیریت بهینه رسوب در پایین‌دست جت‌های آب فراهم می‌کند که می‌تواند به طراحی پایدارتر سازه‌های هیدرولیکی بینجامد.

کلیدواژه‌ها: آب‌شستگی، شاخص آب‌شستگی، جت مستغرق، رسوب چسبنده، جریان مای

۱- مقدمه

این پدیده که در اثر برخورد جت‌های پرنرژی با بسترهای فرسایش‌پذیر رخ می‌دهد، نه تنها می‌تواند منجر به ناپایداری پی و درنهایت تخریب سازه شود، بلکه با تغییر مشخصات هیدرولیکی جریان و الگوهای انتقال رسوب، عملکرد بهینه سازه را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل، پیش‌بینی دقیق شکل و ابعاد حفره‌های آب‌شستگی در

آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریزها، دریچه‌ها و پایه پل‌ها، یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری و ایمنی این سازه‌ها به شمار می‌رود (Hoffmans & Verheij, 1966; Aderibigbe & Rajaratnam, 2007; Melville & Coleman, 2007).

غیرچسبنده باشد (Partheniades, 2007).

مقاومت رسوبات چسبنده در برابر فرسایش فرآیندی پیچیده است و علی‌رغم مطالعات متعدد، کمی‌سازی تمام عوامل موثر بر آن تاکنون میسر نشده است. گاهی حتی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، نتایج متناقضی گزارش شده است. برای مثال، (Panagiotopoulos et al., 1997) دادند که چسبندگی مصالح می‌تواند آستانه حرکت ذرات ماسه‌ای را تا ۹۰٪ افزایش دهد، درحالی‌که (۲۰۰۳) Ansari et al. با بررسی آبشستگی ناشی از جت‌های عمودی مستغرق به رابطه‌ای دست یافتند که حاکی از عمق بیشتر آبشستگی در رسوبات چسبنده نسبت به غیرچسبنده است. از سوی دیگر، آزمایش‌های (۲۰۰۳) Dey & Westrich روی رسوبات چسبنده نشان داد که پروفیل‌های آبشستگی از تشابه هندسی پیروی می‌کنند، اما آن‌ها تاکید کرده‌اند که هر نوع رسوب چسبنده رفتار منحصر به فردی دارد و لازم است مطالعاتی با ترکیبات مختلف رس انجام شود. با توجه به مطالب مطرح شده، به‌وضوح می‌توان دریافت که بررسی ویژگی‌های پروفیل حفره آبشستگی در رسوبات چسبنده هنوز به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است.

رسوبات حاوی حداقل ۱۰٪ خاک رس به‌عنوان رسوبات چسبنده در نظر گرفته می‌شوند. نیروی الکتروشمیایی بین ذرات خاک منبع چسبندگی آن‌ها هستند (Breusers & Raudkivi, 1991). اگرچه مطالعات گسترده‌ای در مورد فرسایش ناشی از جت‌ها انجام شده است، اما به‌دلیل دامنه وسیع عواملی که بر فرسایش رسوبات چسبنده تاثیر می‌گذارند، بیشتر تحقیقات بر روی رسوبات غیرچسبنده متمرکز شده‌اند. در رسوبات چسبنده، توسعه طولی حفره آبشستگی قبل از توسعه عمق آن متوقف می‌شود (Ansari et al., 2003; Mazurek et al., 2001, 2003). به‌دلیل وجود نیروی چسبندگی قوی‌تر در ذرات رس، آستانه فرسایش در این نوع خاک دیرتر از رسوبات غیرچسبنده رخ می‌دهد. شکل حفره‌های فرسایش در این دو نوع رسوب نیز با یکدیگر متفاوت است. (۱۹۹۱) Hanson ترکیب‌های مختلف شن و خاک رس را بررسی کرد و دریافت که هر چه محتوای شن بیشتر و محتوای خاک رس کمتر باشد، فرسایش بیشتر خواهد بود. مطالعه

پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از دیرباز موردتوجه پژوهشگران بوده است. بااین‌حال، پیش‌بینی دقیق این پدیده به‌دلیل وابستگی آن به پارامترهای هیدرودینامیکی متعدد (مانند مشخصات جت و جریان پایاب) و ویژگی‌های رسوب، همواره با چالش‌های زیادی روبرو بوده است. این پیچیدگی ذاتی سبب شده تا بیشتر مطالعات بنیادی در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شود. علیرغم دستاوردهای قابل‌توجه حاصل از این پژوهش‌ها، شواهد میدانی متعددی از تخریب‌های گسترده در سازه‌هایی نظیر حوضچه‌های آرامش و پایه‌های پل وجود دارد (Breusers & Raudkivi, 1991) که نشان می‌دهد دانش کنونی هنوز برای پیش‌بینی و مهار کامل این پدیده کافی نیست و بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر پارامترهای موثر بر آن را می‌طلبد.

آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی جریان آب از حد آستانه حرکت ذرات بستر تجاوز کند (Yang, 1996). مطالعات نشان می‌دهند که عوامل متعددی در این پدیده نقش دارند، ازجمله چسبندگی خاک، اندازه و دانه‌بندی رسوبات، عمق پایاب، عدد فرود، زاویه ریزش جریان و هندسه کانال پایین‌دست (Kuti & Yen, 1976; Balachandar et al., 2000; Kells et al., 2001; Lim & Yu, 2002; Faruque et al., 2006; Dey & Sarkar, 2006; Sarathi et al., 2008). علاوه‌براین، آبشستگی در پایین‌دست بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی عمدتاً ناشی از برخورد جت‌های متلاطم پرنرزی با بستر فرسایش‌پذیر است. این جت‌ها با ایجاد نوسانات شدید فشار و تنش برشی در نزدیکی بستر، ذرات رسوب را به حرکت درمی‌آورند. بااین‌حال، ماهیت غیرایستا و ساختار پیچیده گردابه‌ای این جریان‌های متلاطم، همراه با برهمکنش‌های غیرخطی بین سیال و ذرات رسوب، باعث شده است که رفتار و مکانیزم دقیق فرسایش ناشی از آن‌ها هنوز به‌طور کامل شناخته‌نشده و نیازمند پژوهش‌های بیشتری باشد. تنوع عوامل موثر باعث شده است که پژوهشگران در هر مطالعه، تنها بر یک یا چند عامل محدود تمرکز کنند و سایر پارامترها را ثابت در نظر بگیرند. به‌دلیل پیچیدگی رفتار رس‌ها، بیشتر تحقیقات روی آبشستگی پایین‌دست جت‌ها، بر روی رسوبات غیرچسبنده انجام شده است؛ درحالی‌که برخی مطالعات نشان می‌دهند نرخ فرسایش در خاک‌های چسبنده می‌تواند به‌مراتب کمتر از خاک‌های

در عمق آب‌شستگی مشاهده می‌شود.

تعدادی از محققان تغییرات زمانی در پروفیل‌های فرسایش را بررسی کرده و شباهت‌هایی در شکل آن‌ها مشاهده کردند (Cossette, 2016; Daly et al., 2013; Dey & Westrich, 2003; Mazurek, 2016). آن‌ها همچنین روابطی برای پیش‌بینی تغییرات زمانی در پروفیل‌های حفره آب‌شستگی و تنش برشی توسعه دادند که در برخی موارد به‌خوبی با داده‌های تجربی سایر مطالعات مطابقت ندارد. زمان مناسب برای متوقف کردن آزمایش‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. Dey (۱۹۹۵) آزمایش‌های فرسایش جت خود را بر روی رسوبات چسبنده، ۳ ساعت پس از شروع آزمایش متوقف کرد و بیان کرد که پس‌ازاین زمان، تغییر قابل‌توجهی در نرخ فرسایش مشاهده نشد. (۱۹۸۱) Blaisdell et al. عمق فرسایش تعادلی را با برازش دادن یک منحنی به داده‌های آزمایشگاهی محاسبه کردند. برخی دیگر از محققان از روش آن‌ها، برای تعیین تنش برشی بحرانی و زمان تعادل پیروی کردند (Hanson & Simon, 2001; Wahl & Erdogan, 2008; Cossette et al., 2012).

باوجود مطالعات گسترده در زمینه آب‌شستگی، پژوهش‌های تجربی سیستماتیک کمی در مورد برهم‌کنش هم‌زمان پارامترهای هیدرودینامیکی موثر بر آب‌شستگی بسترهای چسبنده توسط جت‌های فرسایش‌زا وجود دارد. به‌ویژه، اثرات ترکیبی عدد فرود جت، زاویه برخورد جت و عمق پایاب بر ریخت‌شناسی حفره آب‌شستگی و الگوی پشته‌های رسوبی به‌طور کامل شناخته‌نشده است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی تجربی و کمی این سه پارامتر کلیدی (عدد فرود، زاویه جت و عمق پایاب) بر هندسه حفره آب‌شستگی، پروفیل‌های طولی و عرضی بستر، و پشته‌های رسوبی در شرایط بستر چسبنده است. دستیابی به چنین داده‌های سیستماتیک نه‌تنها درک بنیادی از مکانیزم‌های فرسایش در رسوبات چسبنده را افزایش می‌دهد، بلکه معیارهای عملی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی فراهم کرده و درنهایت به طراحی ایمن‌تر و پایدارتر سازه‌های هیدرولیکی منجر خواهد شد.

(Nazarimehr & Ghodsian, 2025) با بررسی آب‌شستگی رسوبات چسبنده ناشی از جت‌های مورب نشان دادند که افزایش پارامترهای نسبت عمق پایاب به ارتفاع ریزش Y_t/H تا حدود ۰٫۳، عدد فرود و قطر جت، آب‌شستگی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که درصد رس زیاد و زاویه جت بیش از ۳۰ درجه باعث کاهش آن می‌شود.

تحقیقات متعددی در زمینه فرسایش ناشی از جت‌ها انجام‌شده است. Lim (۱۹۹۵) نشان داد که اگر نسبت عرض کانال به قطر جت بیشتر از ۱۰ باشد، ابعاد حفره آب‌شستگی تحت تاثیر عرض کانال قرار نمی‌گیرد. تعدادی از محققین اعلام کردند که با افزایش ارتفاع ریزش جت، ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد (Blaisdell & Anderson, 1988; Blaisdell et al., 1981; Doehring & Abt, 1994; Mason & Arumugam, 1985). Aderibigbe & Rajaratnam (۱۹۹۶) نشان دادند که ارتفاع ریزش تاثیر دوگانه‌ای بر ابعاد حفره آب‌شستگی دارد. Abida & Townsend (۱۹۹۱) نیز مقادیری را که در آن روند تغییر می‌کند، یافتند و بیان کردند که برای $Y_t/H < 0.2$ ، عمق فرسایش با افزایش عمق پایاب افزایش می‌یابد؛ برای $0.2 < Y_t/H < 0.7$ ، عمق فرسایش با افزایش عمق پایاب کاهش می‌یابد؛ و برای $Y_t/H > 1.0$ ، عمق پایاب تاثیر ناچیزی بر عمق فرسایش دارد. در اینجا، H ارتفاع سقوط جت و Y_t عمق پایاب است.

نوع جت به همراه زاویه انحراف آن نیز می‌تواند بر فرسایش تاثیر بگذارد. (۲۰۰۱) Mazurek به‌طور تجربی تفاوت‌هایی در ظاهر و ابعاد حفره‌های فرسایش (طول، عرض و عمق) ناشی از جت‌های دیواری و جت‌های دایره‌ای مشاهده کرد. نتایج او نشان داد که طول و عرض حفره آب‌شستگی در جت دیواری بیشتر بود، اما عمق فرسایش کمتر بود. از طرفی (۲۰۰۷) Mazurek & Hossain از داده‌های مربوط به جت‌های دایره‌ای و دیواری استفاده کردند و گزارش دادند که حداکثر عمق فرسایش و موقعیت آن در رسوبات چسبنده و غیرچسبنده مشابه بود، درحالی‌که طول حفره آب‌شستگی در رسوبات غیرچسبنده بیشتر بود. (۲۰۰۲) Rajaratnam & Mazurek افزایش ابعاد حفره آب‌شستگی را با افزایش زاویه جت گزارش کردند. (۲۰۰۷) Chaudhuri نشان داد که با تغییر زاویه جت از ۱۵ به ۴۵ درجه، افزایش

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهيزات آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران در یک فلوم به طول ۷ متر، عرض ۶۱،۵ سانتیمتر و عمق ۹۵ سانتیمتر انجام شد. یک مخزن ذخیره آب و پمپ سانتریفیوژ با ظرفیت حداکثر ۱۰ لیتر بر ثانیه، جریان آب موردنیاز را تامین می‌کرد. دبی جریان خروجی از جت با دقت ± 0.1 لیتر بر دقیقه توسط یک دبی‌سنج کالیبره‌شده اندازه‌گیری شد. عمق پایاب از طریق یک سرریز مستطیلی ساخته‌شده از پلکسی‌گلاس با قابلیت تنظیم در ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر کنترل می‌گردید. دستگاه جت شامل یک لوله به قطر ۱ سانتیمتر بود که به یک سیستم مکانیکی مجهز به نقاله مدرج برای تنظیم دقیق زاویه جت (θ) در ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه متصل شده بود. طرح شماتیک از تجهیزات آزمایشگاهی در [شکل ۱](#) ارائه شده است.

۲-۲- مصالح بستر و آماده‌سازی

مصالح بستر متشکل از ۸۰ درصد ماسه سیلیسی با قطر متوسط $d_{50} = 0.06$ میلی‌متر، ۱۵ درصد کائولینیت و ۵ درصد بنتونیت بود. این ترکیب به‌منظور شبیه‌سازی رفتار رسوبات طبیعی و ایجاد پایداری نسبی در شیب‌های حفره آب‌شستگی انتخاب شد. برای بهینه‌سازی مصرف مصالح، یک بخش از کف فلوم به ابعاد ۰،۹۵ متر در طول و ۰،۲ متر عمق، با رسوب پر شد. سطح رسوبات با استفاده از یک شابلون فلزی به‌دقت هموار گردید تا یک سطح اولیه یکنواخت برای کلیه آزمایش‌ها تضمین شود.

۲-۳- سناریوهای آزمایش و پارامترهای متغیر

برای بررسی سیستماتیک پدیده آب‌شستگی، یک ماتریس آزمایشی کامل شامل سه پارامتر اصلی و در سطوح مختلف طراحی شد:

- ♦ زاویه جت (θ) در سه سطح: ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه
- ♦ عمق پایاب (Y_t) در سه سطح: ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر

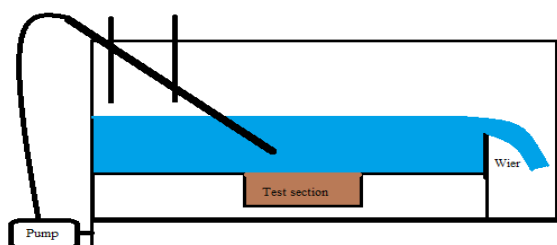
- ♦ عدد فرود (Fr) در چهار سطح: ۳، ۵، ۷ و ۹

این ترکیب منجر به اجرای ۳۶ آزمایش مستقل شد. نام‌گذاری هر آزمایش به‌صورت θ - Y_t - Fr (مانند ۳۰-۱۰-۳) انجام پذیرفت. جزئیات کامل پارامترهای هر آزمایش شامل عدد رینولدز (Re)، سرعت جت (U_0) و دبی جت (Q_0) در [جدول ۱](#) ارائه شده است.

۲-۴- روش آزمایش

مراحل اجرای هر آزمایش به‌شرح زیر بود:

۱. آماده‌سازی: ابتدا سرریز پایین‌دست در ارتفاع متناسب با عمق پایاب موردنظر نصب و آب‌بندی شد.
۲. حفاظت از بستر: یک ورق فلزی گالوانیزه صاف بر روی سطح رسوبی قرارداده شد تا از هرگونه فرسایش زودرس در حین برقراری جریان جلوگیری کند.
۳. برقراری جریان: پمپ روشن و دبی جریان به‌آرامی تا رسیدن به مقدار و عمق پایاب موردنظر تنظیم شد. این مرحله حدود ۱ ساعت به طول می‌انجامید تا جریان کاملاً پایدار شود.



(a، ۱)



(b، ۲)

Fig. 1 Schematic of a) experimental setup and b) its photo

شکل ۱ (a) نمایش شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی و (b) عکسی از آن

جدول ۱ مشخصات آزمایش‌ها انجام‌شده

Table 1 Characteristics of experiments

No	Test name	θ (°)	Y_f (cm)	Fr	Re	(m/s) U_o	Q_o (Lit/min)
1	30-10-3	30	10	3	9400	0.94	4.43
2	30-10-5	30	10	5	15700	1.57	7.38
3	30-10-7	30	10	7	21900	2.19	10.32
4	30-10-9	30	10	9	28200	2.82	13.28
5	30-15-3	30	15	3	9400	0.94	4.43
6	30-15-5	30	15	5	15700	1.57	7.38
7	30-15-7	30	15	7	21900	2.19	10.32
8	30-15-9	30	15	9	28200	2.82	13.28
9	30-20-3	30	20	3	9400	0.94	4.43
10	30-20-5	30	20	5	15700	1.57	7.38
11	30-20-7	30	20	7	21900	2.19	10.32
12	30-20-9	30	20	9	28200	2.82	13.28
13	45-10-3	45	10	3	9400	0.94	4.43
14	45-10-5	45	10	5	15700	1.57	7.38
15	45-10-7	45	10	7	21900	2.19	10.32
16	45-10-9	45	10	9	28200	2.82	13.28
17	45-15-3	45	15	3	9400	0.94	4.43
18	45-15-5	45	15	5	15700	1.57	7.38
19	45-15-7	45	15	7	21900	2.19	10.32
20	45-15-9	45	15	9	28200	2.82	13.28
21	45-20-3	45	20	3	9400	0.94	4.43
22	45-20-5	45	20	5	15700	1.57	7.38
23	45-20-7	45	20	7	21900	2.19	10.32
24	45-20-9	45	20	9	28200	2.82	13.28
25	60-10-3	60	10	3	9400	0.94	4.43
26	60-10-5	60	10	5	15700	1.57	7.38
27	60-10-7	60	10	7	21900	2.19	10.32
28	60-10-9	60	10	9	28200	2.82	13.28
29	60-15-3	60	15	3	9400	0.94	4.43
30	60-15-5	60	15	5	15700	1.57	7.38
31	60-15-7	60	15	7	21900	2.19	10.32
32	60-15-9	60	15	9	28200	2.82	13.28
33	60-20-3	60	20	3	9400	0.94	4.43
34	60-20-5	60	20	5	15700	1.57	7.38
35	60-20-7	60	20	7	21900	2.19	10.32
36	60-20-9	60	20	9	28200	2.82	13.28

۴. شروع آزمایش: پس از حصول اطمینان از پایداری

جریان، ورق محافظ با دقت از روی بستر کنار زده

می‌شد. این لحظه به‌عنوان زمان شروع

آب‌شستگی در نظر گرفته می‌شد.

۵. پایش و کنترل: در طول مدت آزمایش، دبی جریان

به‌صورت دوره‌ای توسط دبی‌سنج کنترل می‌شد

تا از ثبات شرایط هیدرولیکی اطمینان حاصل

شود.

۶. پایان آزمایش و برداشت داده‌ها: پس از قطع

جریان، آب موجود در فلوم و حفره آب‌شستگی

به‌کمک لوله‌های موئین به‌آرامی تخلیه گردید تا

از هرگونه فرسایش ثانویه جلوگیری شود.

توپوگرافی نهایی بستر با استفاده از یک متر

نسبت به خط وسط فلوم، متقارن هستند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، به دلیل افزایش قدرت جریان و افزایش پتانسیل رسوب‌گذاری، گستره حفره آبشستگی افزایش یافته است. به طوری که عرض حفره در عدد فرود ۹، حدود چهار برابر عرض حفره در عدد فرود ۳ است. با افزایش عدد فرود، حجم رسوبات خارج شده از حفره آبشستگی بیشتر شده و پشته رسوبی بزرگ‌تری تشکیل



Fig. 2 A typical scour hole for test 30-10-3

شکل ۲ نمونه‌ای از حفره آبشستگی برای آزمایش 30-10-3

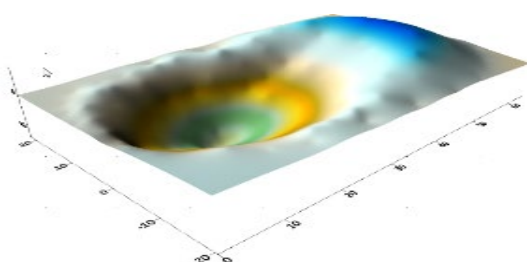


Fig. 3 A typical scour hole for Test 30-10-9

شکل ۳ نمونه‌ای از حفره آبشستگی برای آزمایش 30-10-9

لیزری با دقت ± 1 میلی‌متر برداشت شد. به طور متوسط از هر حفره حدود ۱۰۰ نقطه به صورت مختصات سه بعدی (x, y, z) قرائت و ثبت گردید. شکل ۲ تصویری از حفره آبشستگی نهایی برای آزمایش ۳-۱۰-۳۰ (عدد فرود ۹، عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر و زاویه جت 30°) و شکل ۳ نمونه دیگری از حفره ایجاد شده را برای آزمایش ۹-۱۰-۳۰ نشان می‌دهد. این تصاویر به درک بصری از ابعاد و هندسه حفره‌های ایجاد شده کمک می‌کنند. جدول ۱ مشخصات آمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر عمق پایاب و دبی خروجی از جت، بر شکل نهایی حفره آبشستگی است. در ادامه به بررسی اثر عدد فرود و زاویه جت بر توپوگرافی بستر پرداخته شده است.

۳-۱- اثر عدد فرود بر توپوگرافی بستر

توپوگرافی بستر در پایین دست جت با زاویه 30° درجه و به ازای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر در شکل ۴ نمایش داده شده است. حفره و پشته آبشستگی

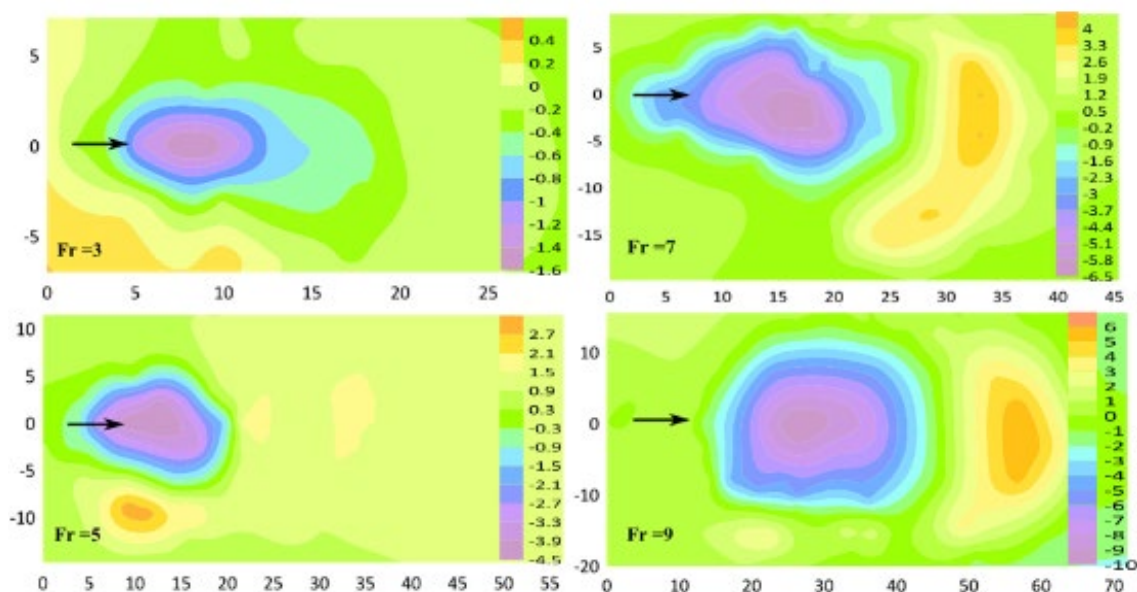


Fig. 4 Bed topography for different Froude number: $\theta = 30^\circ$ and $Y_t = 10$ cm

شکل ۴ توپوگرافی بستر برای جت با زاویه 30° و عمق پایاب ۱۰ cm به ازای عددهای فرود مختلف

فرآیند باعث می‌شود انرژی جنبشی در لایه‌های نزدیک بستر به سرعت کاهش یابد. در نتیجه، ذرات رسوب که توسط جت به حرکت درآمده‌اند، مومنوم کافی برای انتقال به فواصل دورتر را از دست داده و در فاصله نزدیک‌تری نسبت به حفره اصلی ته‌نشین می‌شوند. این تغییر در دینامیک انتقال رسوب، توجیه‌کننده شکل فشرده‌تر و متمرکزتر برآمدگی پایین دست و همچنین کاهش قابل توجه کشیدگی حفره نسبت به حالت عمق پایاب کمتر است.

۳-۲- پروفیل‌های طولی و عرضی بستر

در این قسمت به بررسی پروفیل‌های طولی و عرضی بستر در شرایط مختلف پرداخته شده است. به این منظور خط عبوری از محور مرکزی جت که دربرگیرنده نقاط حداکثر عمق آب‌شستگی و حداکثر ارتفاع پشته است، مورد بررسی قرار گرفت و پروفیل عرضی به گونه‌ای ترسیم شد که از خط‌القعر حفره آب‌شستگی در طول کانال عبور کند.

تأثیر عدد فرود و زاویه ریزش جت

شکل ۶-الف پروفیل‌های طولی بستر برای شرایط مختلف جریان و زاویه جت 30° درجه برای عمق پایاب ۱۰ cm را نشان می‌دهد.

می‌شود، طول حفره افزایش یافته و حفره به سمت پایین دست پیشروی کرده و محل قرارگیری حداکثر عمق آب‌شستگی به سمت پایین دست منتقل می‌شود.

شکل ۵ توپوگرافی بستر برای جت با زاویه 30° درجه و عمق پایاب ۱۵ سانتیمتر را نشان می‌دهد. الگوی کلی آب‌شستگی مشابه حالت عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر است، اما مکانیزم تأثیر نیروی مومنوم بر بستر به طور قابل توجهی متفاوت عمل می‌کند. با افزایش عدد فرود از ۳ به ۹، تحلیل ابعاد حفره نشان‌دهنده افزایشی حدود ۴/۵ برابری در حداکثر عمق و گسترش جانبی حفره است. این افزایش قابل توجه را می‌توان مستقیماً به این واقعیت فیزیکی نسبت داد که نیروی مومنوم ورودی به بستر با مجذور عدد فرود (یعنی مربع سرعت) افزایش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان در تغییر مکانیزم استهلاك انرژی جت دانست. با افزایش عمق پایاب، مسیر طولانی‌تری برای نفوذ و گسترش جت در اختیار دارد که منجر به تبادل مومنوم بیشتر با سیال اطراف و در نتیجه اتلاف انرژی می‌شود.

با افزایش عمق پایاب، مسیر طولانی‌تری برای نفوذ و گسترش جت در اختیار دارد که منجر به تبادل مومنوم بیشتر با سیال اطراف و در نتیجه اتلاف انرژی می‌شود. این

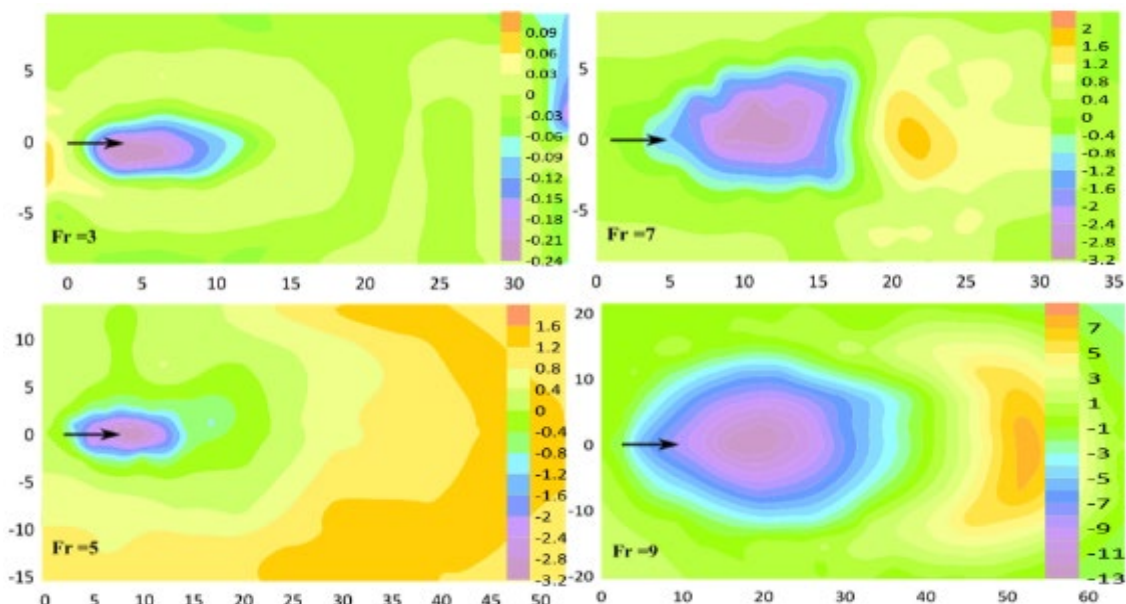
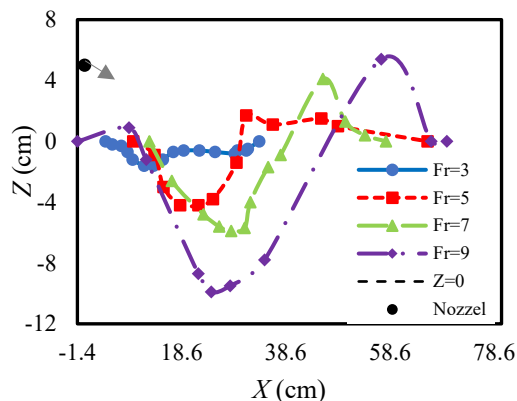


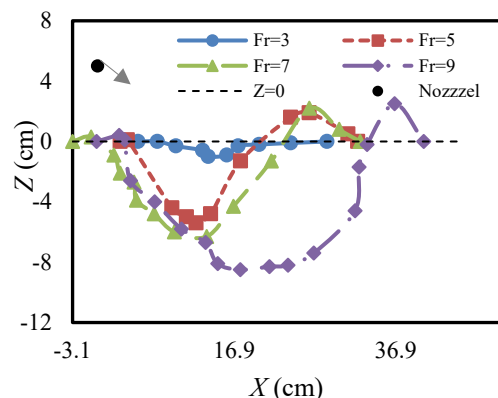
Fig. 5 Bed topography for different Froude number: $\theta = 30^\circ$ and $Y_t = 15$ cm

شکل ۵ توپوگرافی بستر برای جت با زاویه 30° و عمق پایاب ۱۵ cm به‌ازای عددهای فرود مختلف

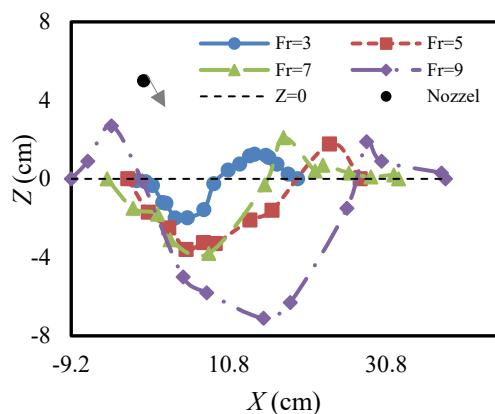
نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه جت، ابتدای حفره به دهانه خروجی جت نزدیک‌تر می‌شود. براساس مشاهدات تجربی، ریخت‌شناسی حفره آبشستگی را می‌توان به دو ناحیه متمایز تقسیم‌بندی کرد:



$\theta = 30^\circ$ (a, آ)



$\theta = 45^\circ$ (b, ب)



$\theta = 60^\circ$ (c, ج)

Fig. 6 Longitudinal bed profiles for different Froude number and $Y_t = 10$ cm

شکل ۶ پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۰ cm

در این شکل محور افقی فاصله از جت و محور عمودی تراز بستر است. همان‌گونه که در این شکل قابل‌مشاهده است، حفره آبشستگی در عدد فرود ۳ کوچک و سطحی بود و پشته رسوبی مشخصی تشکیل نشد و رسوبات خارج‌شده در پایین‌دست کانال ته‌نشین شد، با افزایش عدد فرود و با قوی‌تر شدن جریان پایین‌رونده، حفره آبشستگی عمیق‌تر شده و به‌سوی پایین‌دست کانال حرکت می‌کند، حداکثر عمق آبشستگی و محل شروع حفره از دهانه خروجی جریان از لوله دورتر می‌شود. در حالت عدد فرود ۹، به‌دلیل قوی‌تر شدن قدرت فرسایشی جریان، با افزایش مقدار آبشستگی، پشته رسوبی در ابتدای حفره آبشستگی نیز تشکیل می‌شود و محل شروع حفره کمی به بالادست منتقل می‌شود. با افزایش عدد فرود، شیب دیواره پایین‌دست حفره آبشستگی، تقریباً یکسان و در بالادست کمی افزایش می‌یابد. افزون بر این با افزایش عدد فرود، به‌دلیل افزایش قدرت جریان، میزان فرسایش و حمل رسوب افزایش‌یافته و محل بیشترین ارتفاع پشته رسوبی، به پایین‌دست منتقل‌شده است. به‌دلیل خروج رسوبات بیشتر از حفره، ارتفاع پشته رسوبی تا حدود چهار برابر افزایش‌یافته و از حالت دوزنقه‌ای به سمت مثلثی شکل تغییر شکل می‌دهد.

شکل ۶-ب نشان‌دهنده پروفیل‌های طولی بستر برای شرایط مختلف جریان، زاویه جت ۴۵ درجه و عمق پایاب ۱۰ cm است. همان‌گونه که در این شکل قابل‌مشاهده است، روند تغییرات پروفیل طولی بستر به‌ازای تغییر عدد فرود، مشابه حالت جت با زاویه ۳۰ درجه است. افزایش زاویه جت در این حالت باعث قوی‌تر شدن جریان‌های زیرخط مرکزی جت شده و در نتیجه گسترش حفره به سمت پایین‌دست کاهش و به سمت بالادست افزایش می‌یابد. پروفیل‌های طولی بستر برای جت با زاویه ۶۰ درجه برای شرایط مختلف در شکل ۶-ج نشان داده‌شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه جت، انباشت رسوب در پایین‌دست حفره کاهش و در بالادست حفره افزایش می‌یابد. این فرآیند در عددهای فرود بیشتر، مشهودتر است. در این حالت هم همانند حالات قبل به دلایل ذکرشده با افزایش عدد فرود، حفره آبشستگی به سمت بالادست پیشروی می‌کند.

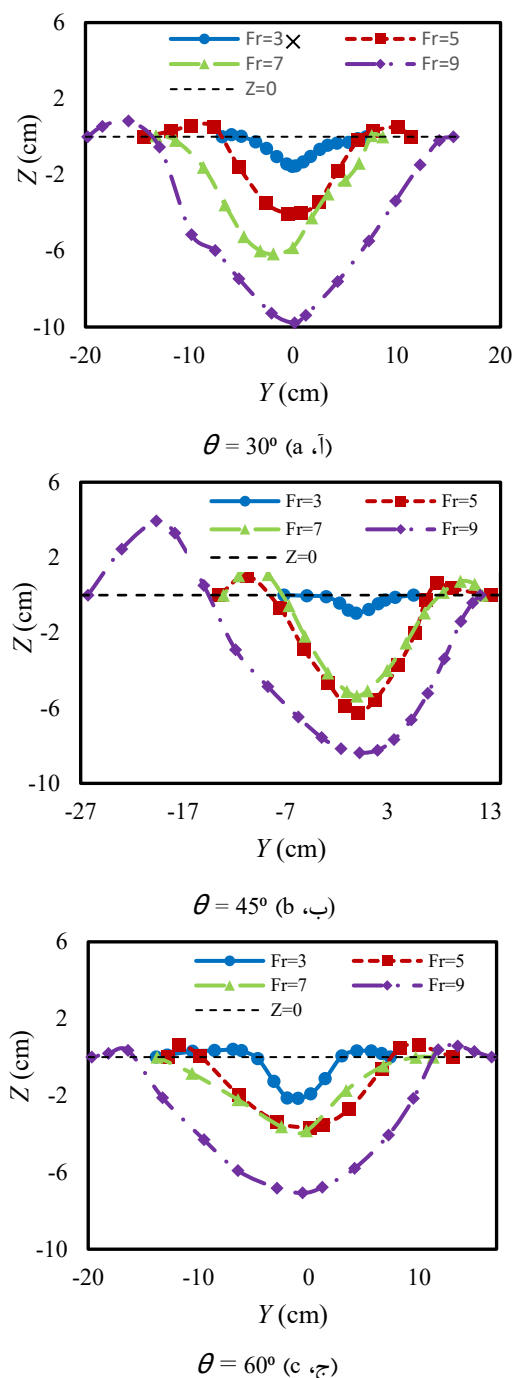


Fig. 7 Lateral bed profiles for different Froude number and $Y_t = 10$ cm

شکل ۷ پروفیل‌های عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۰ cm

شکل ۸ نشان‌دهنده پروفیل‌های طولی بستر برای شرایط مختلف جریان، در حالت جت با زاویه‌های 30° ، 45° و 60° و عمق پایاب ۱۵ cm است. همان‌گونه که در شکل ۸-الف قابل مشاهده است، روند تغییرات پروفیل طولی به‌ازای تغییر

ناحیه ب نزدیک به جت، که مستقیماً تحت تاثیر نیروی دینامیکی بالای جت قرار دارد، و ناحیه دور از جت، که در آن فرآیندهای انتقال و ته‌نشینی رسوب بر جریان مستقیم غالب است. این تحلیل به تفکیک این دو ناحیه و پاسخ آن‌ها به پارامترهای هیدرولیکی می‌پردازد.

شکل ۶ به خوبی تاثیر زاویه اعمال جت بر ناحیه نزدیک به جت را نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف ($\theta = 30^\circ$)، ناحیه نزدیک به جت کشیده و کم‌عمق‌تر است، زیرا مولفه افقی مومنتوم موجب فرسایش و انتقال سریع رسوب به سمت پایین‌دست می‌شود. در حالت میانی (شکل ۶-ب، $\theta = 45^\circ$)، یک انتقال ریخت‌شناسی به سمت تمرکز بیشتر حفره مشاهده می‌شود. در زوایای بیشتر (شکل ۶-ج، $\theta = 60^\circ$)، این ناحیه متمرکزتر و عمیق‌تر است، زیرا مولفه عمودی مومنتوم، انرژی را مستقیماً به سمت پایین متمرکز می‌کند. به‌عنوان مثال، در شکل ۶-ج، افزایش عدد فرود از ۵ به ۹، منجر به افزایش عمق و گسترش جانبی قابل‌توجهی در این ناحیه می‌شود که ناشی از افزایش نمایی نیروی مومنتوم وارده بر بستر ($F \propto V^2$) است.

نمونه‌ای از پروفیل عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف جریان، عمق پایاب ۱۰ cm و زوایای جت 30° ، 45° و 60° در شکل ۷، نشان داده شده است. طبق این شکل با افزایش عدد فرود، ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، ارتفاع پشته‌های کناری حفره آب‌شستگی نیز کمی افزایش می‌یابد از شکل ۷ روشن است که با افزایش زاویه جت، عرض حفره آب‌شستگی نیز کمی افزایش یافته است. کمترین عرض حفره مربوط به عدد فرود ۳ و بیشترین آن مربوط به عدد فرود ۹ هست، که بیشترین قدرت فرساینده‌گی را دارد.

تاثیر زاویه جت بر ناحیه دور از جت، به‌ویژه بر تشکیل پشته‌های کناری، در شکل ۷ مشهود است. پشته‌های کناری ناشی از پخش‌شدگی جانبی جت هستند. در شکل ۷-الف ($\theta = 30^\circ$) پشته‌های کناری کم‌ارتفاع و گسترده هستند. در شکل ۷-ب ($\theta = 45^\circ$) این پشته‌ها توسعه میانی را نشان می‌دهند و در شکل ۷-ج ($\theta = 60^\circ$) پشته‌های کناری مرتفع‌تر و متمرکزتر شده‌اند.

آبش همراه است. از طرفی با افزایش عمق پایاب، پشته رسوبی پایین‌دست حفره، توسط جریان پایین‌رونده کمتر شسته شده و ارتفاع آن افزایش می‌یابد، این حالت نیز در عددهای فرود بزرگ‌تر، بیشتر اتفاق می‌افتد که با افزایش حداکثر عمق آبشستگی نیز همراه است.

همچنین مطابق **شکل ۸-الف** به دلیل عمق پایاب بیشتر، حفره به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند و پشته رسوبی در بالادست حفره تشکیل نمی‌شود که می‌تواند به دلیل کاهش انرژی جریان‌های بالارونده، به دلیل پخش بیشتر جریان در اثر افزایش عمق پایاب، باشد. طبق **شکل ۸-ب**، در حالت جت با زاویه 45° ، جریان‌های بالارونده قوی‌تر شده و حفره به سمت بالادست حرکت می‌کند. در مقایسه با حالت قبل، طول حفره آبشستگی برای عددهای فرود بیشتر، کاهش یافته و عمق آبشستگی برای عددهای فرود بیشتر، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، رشد ارتفاع پشته رسوبی در بالادست حفره بیشتر از رشد ارتفاع پشته رسوبی در پایین‌دست است. با افزایش زاویه جت به 60° که در **شکل ۸-ج** نشان داده شده، برای عدد فرود ۹، پشته رسوبی با ارتفاع بیشتری در بالادست حفره تشکیل می‌شود.

برای عدد فرود ۵، ارتفاع پشته رسوبی در پایین‌دست حفره بیشتر از حالات قبل است. این نشان‌دهنده آن است که با افزایش عدد فرود قدرت جریان و گردابه‌های بالارونده و گردابه‌های پایین‌رونده بیشتر خواهد شد. در این حالت جریان‌های گردابه‌ای قوی بالارونده ایجاد می‌شوند که رسوبات را به سمت بالادست پرتاب کرده و منجر به تشکیل یک پشته مشخص در بالادست حفره می‌شوند.

شکل ۹ نشان‌دهنده پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف در حالت جت با زاویه‌های 30° ، 45° و 60° در عمق پایاب ۱۵ سانتیمتر است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، مانند حالت‌های قبلی، با افزایش عدد فرود، عمق آبشستگی و عرض حفره آبشستگی افزایش یافته است و شیب دیواره‌های کناری حفره آبشستگی تقریباً یکسان است. علاوه بر این، با افزایش زاویه جت، ارتفاع پشته رسوبی اطراف حفره آبشستگی افزایش می‌یابد.

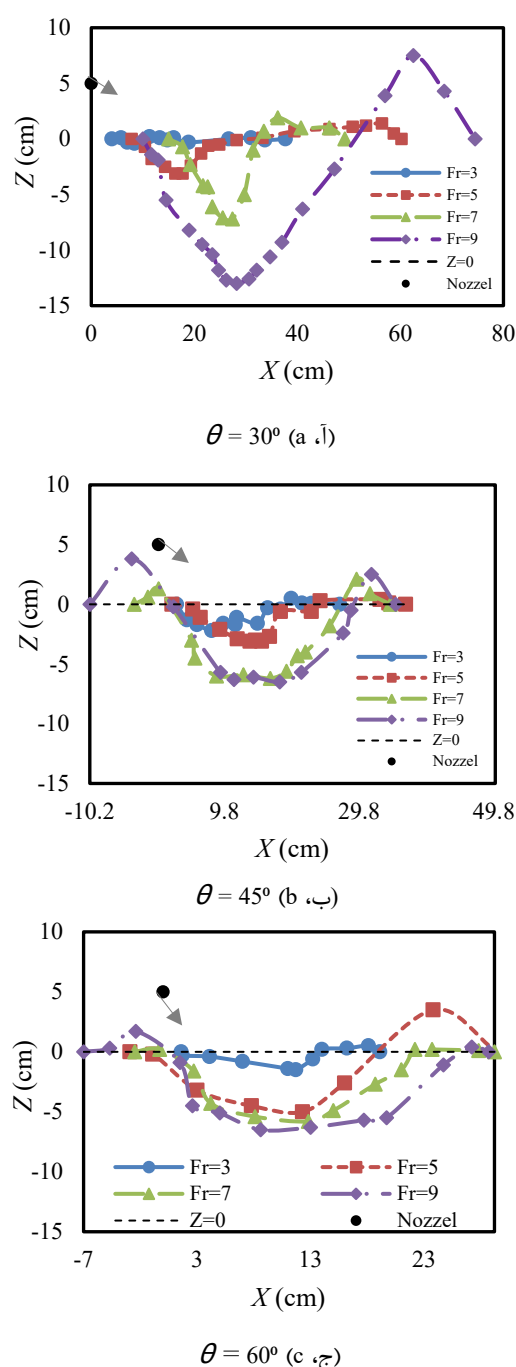


Fig. 8 Longitudinal bed profiles for different Froude number and $Y_f = 15$ cm

شکل ۸ پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۵ cm

عدد فرود، مشابه جت با زاویه 30° در عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر است. با این تفاوت که در این حالت به علت افزایش عمق پایاب، انرژی جریان پایین‌رونده کاهش یافته و ارتفاع پشته رسوبی در بیشتر حالات کاهش می‌یابد. این حالت بیشتر در عددهای فرود کمتر اتفاق می‌افتد که با کاهش

جت، ارتفاع پشته رسوبی اطراف حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد. این روند توسعه پشته‌های کناری با افزایش زاویه، به‌وضوح در شکل ۱۰ برای عمق پایاب ۱۵ سانتیمتر تکرار شده است. مقایسه شکل‌های ۱۰-الف ($\theta = 30^\circ$)، ۱۰-ب ($\theta = 45^\circ$) و ۱۰-ج ($\theta = 60^\circ$) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه جت، ارتفاع پشته‌های کناری افزایش می‌یابد.

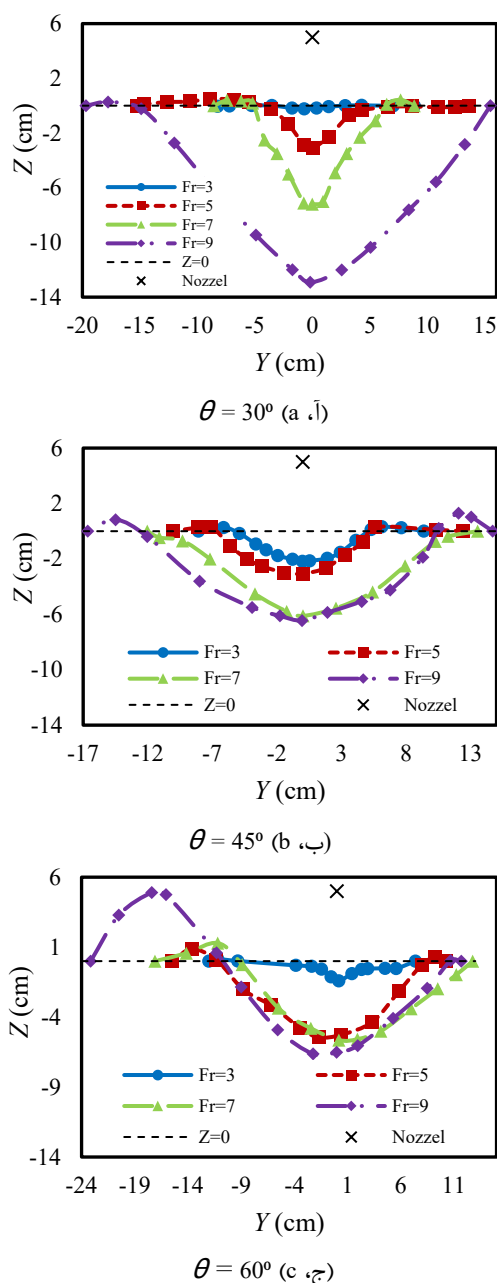


Fig. 10 Lateral bed profiles for different Froude number and $Y_t = 15$ cm

شکل ۱۰ پروفیل‌های عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۵ cm

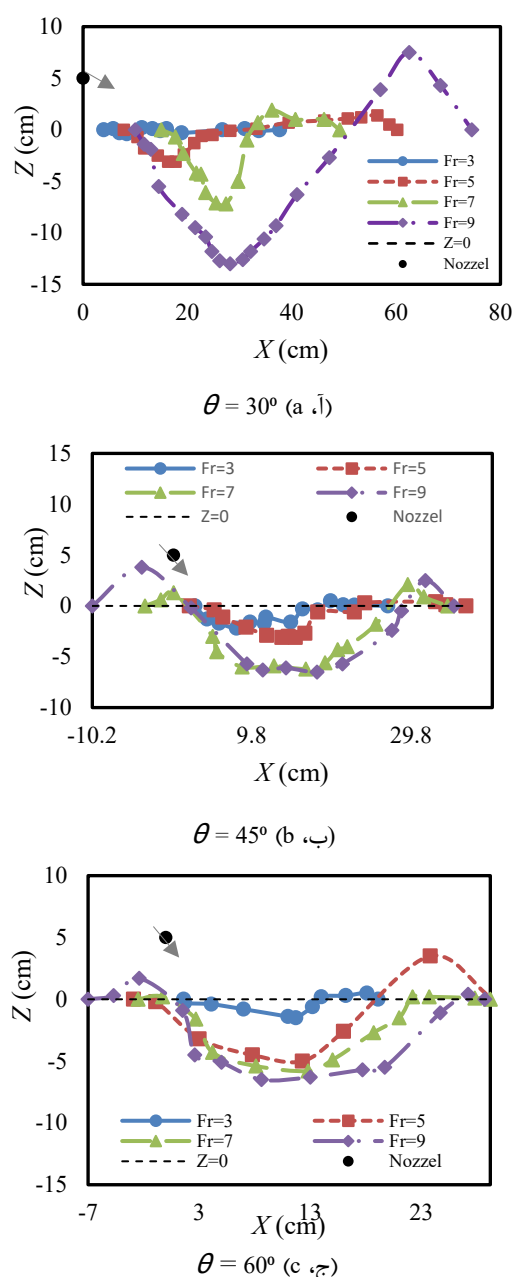


Fig. 9 Longitudinal bed profiles for different Froude number and $Y_t = 15$ cm

شکل ۹ پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۱۵ cm

شکل ۱۰ نشان‌دهنده پروفیل‌های عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف در حالت جت با زاویه‌های 30° ، 45° و 60° در عمق پایاب ۱۵ سانتیمتر است. همان‌گونه که قابل‌مشاهده است، مانند حالت‌های قبلی، با افزایش عدد فرود، عمق آب‌شستگی و عرض حفره آب‌شستگی افزایش‌یافته است و شیب دیواره‌های کناری حفره آب‌شستگی تقریباً یکسان است. علاوه‌براین، با افزایش زاویه

پشته رسوبی اطراف حفره، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با مشاهده **شکل‌های ۱۲-الف-ج** مجدداً تایید می‌کند که با افزایش زاویه جت، حتی در عمق پایاب زیاد (۲۰ سانتیمتر)، پشته‌های کناری مرتفع‌تر شده و ناحیه فرسایش متمرکزتر می‌شود.

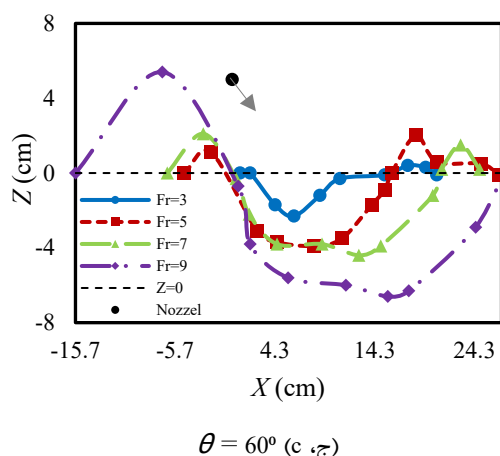
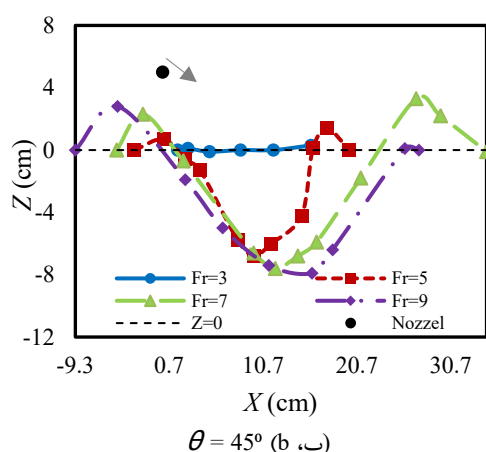
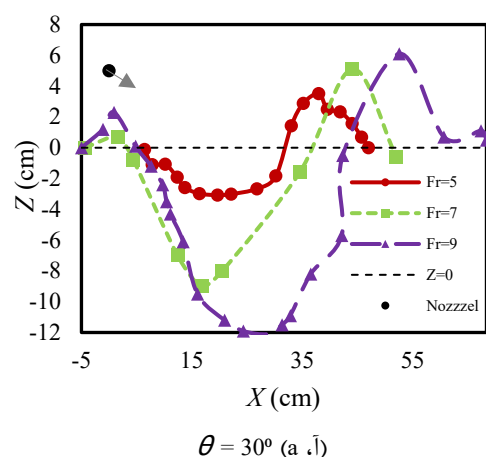


Fig. 11 Longitudinal bed profiles for different Froude number and $Y_f = 20$ cm

شکل ۱۱ پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۲۰ cm

شکل ۱۱ نشان‌دهنده پروفیل‌های طولی بستر برای شرایط مختلف جریان، در حالت جت با زاویه‌های 30° ، 45° و 60° و عمق پایاب ۲۰ سانتیمتر است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، روند تغییرات پروفیل طولی به‌ازای تغییر عدد فرود، مشابه حالات قبل است و با افزایش عدد فرود ابعاد حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جت، به‌علت قوی‌تر شدن جریان‌های بالارونده، ارتفاع پشته رسوبی در پایین‌دست حفره، کاهش و ارتفاع پشته رسوبی در بالادست حفره، افزایش می‌یابد. مانند حالات قبل با افزایش عدد فرود و افزایش زاویه جت، حفره آبشستگی تا حدی به سمت بالادست حرکت می‌کند. افزایش عمق پایاب از طرفی، انرژی جریان را کاهش داده و باعث کاهش آبشستگی و در نتیجه کاهش ارتفاع پشته رسوبی نسبت به عمق پایاب کمتر شده است. از طرف دیگر، با افزایش عمق پایاب، پشته رسوبی کمتر شسته‌شده، مثلثی‌شکل‌تر شده و ارتفاع آن افزایش می‌یابد. این حالت نیز در عددهای فرود بالا، بیشتر اتفاق می‌افتد که با افزایش حداکثر عمق نیز همراه است.

شکل ۱۱ به‌وضوح نشان می‌دهد که عمق پایاب با کنترل میزان استهلاک انرژی جت قبل از برخورد، بر مرز بین دو ناحیه اشاره‌شده تاثیر می‌گذارد. مقایسه **شکل‌های ۱۱-الف-ج**، نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب، از شدت ناحیه نزدیک کاسته و بر وسعت ناحیه دور افزوده می‌شود. این اثر در کنار تاثیر زاویه جت، ریخت‌شناسی نهایی را شکل می‌دهد.

پروفیل‌های طولی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۲۰ سانتیمتر (**شکل ۱۲**) نشان‌دهنده پروفیل‌های عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف جریان در حالت جت با زاویه 30° ، 45° و 60° و عمق پایاب ۲۰ سانتیمتر است. همان‌گونه که در **این شکل** نیز قابل مشاهده است، مانند حالات قبل با افزایش عدد فرود، عمق آبشستگی و عرض حفره آبشستگی افزایش‌یافته است و شیب دیواره‌های کناری حفره آبشستگی تقریباً یکسان است. با افزایش زاویه جت، ارتفاع پشته رسوبی کناری حفره آبشستگی در عددهای فرود کمتر، افزایش و در عددهای فرود بیشتر، کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت نسبت به حالت قبل با افزایش عمق پایاب، در بیشتر موارد ارتفاع

نواحی نزدیک (فرسایش مستقیم) و دور (انتقال و ته‌نشینی) از جت دیکته می‌کند. عمق پایاب نیز به‌عنوان یک عامل میراکننده، با تضعیف انرژی جت، بر تعادل بین این دو ناحیه تاثیر می‌گذارد. این چارچوب برای پیش‌بینی ریخت‌شناسی حفره براساس پارامترهای هیدرولیکی مفید است.

۳-۳- بررسی تقارن و عدم تقارن در حفره نهایی آب‌شستگی

جریان جت در لحظات ابتدایی، با شدت زیاد ابعاد حفره آب‌شستگی را گسترش می‌دهد و مصالح با حرکات غلطشی و لغزشی و بیشتر به‌صورت ذرات معلق منتقل می‌شود. طبق گزارش مهرآیین (۱۳۹۰) در شرایطی که $Y_t/d_j = 1/5$ باشد، با شروع آزمایش، جت به سمت یکی از دیواره‌های کانال منحرف‌شده و باعث انحراف حفره آب‌شستگی به سمت همان دیواره کانال می‌شود. بعد از گذشت حدود ۲ تا ۳ دقیقه از شروع آزمایش مسیر حرکت جت به سمت وسط کانال تغییر می‌کند. انحراف مسیر حرکت جت در ابتدای آزمایش باعث نامتقارن شدن حفره آب‌شستگی در پلان می‌شود. نتایج تحقیقات Sobey (۱۹۸۵) نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، میزان انحراف جت به سمت دیواره‌ها افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر انحراف جت به سمت دیواره‌ها برای جت‌های با سرعت بالاتر، بیشتر بوده که با نتایج Sobey (۱۹۸۵) تطابق دارد. Shapira et al. (۱۹۹۰) عامل انحراف جت را عدم تقارن هندسی در تجهیزات آزمایشگاهی دانست. در تحقیق حاضر، آزمایش‌هایی در شرایط یکسان انجام شد و نتایج نشان داد که در شرایط یکسان، گاهی انحراف جت به سمت دیواره سمت راست و گاهی به سمت دیواره سمت چپ کانال است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عامل انحراف جت به سمت دیواره‌ها، عدم تقارن هندسی نیست. نتایج تحقیقات Kantoush (۲۰۰۸) نشان داد که اثر کوند/موجب انحراف بیشتر جت به سمت دیواره‌های کانال می‌شود. کوند/اثری است که در نتیجه آن جت به سمت سطوح نزدیک خود انحراف پیدا می‌کند. نکته قابل‌ذکر این است که انحراف جت به سمت دیواره‌های کانال، در آزمایش‌هایی با عمق پایاب کم، مشاهده شد. بنابراین با مقایسه تحقیقات قبلی و تحقیق حاضر می‌توان نتیجه گرفت که عمق پایاب نیز یکی

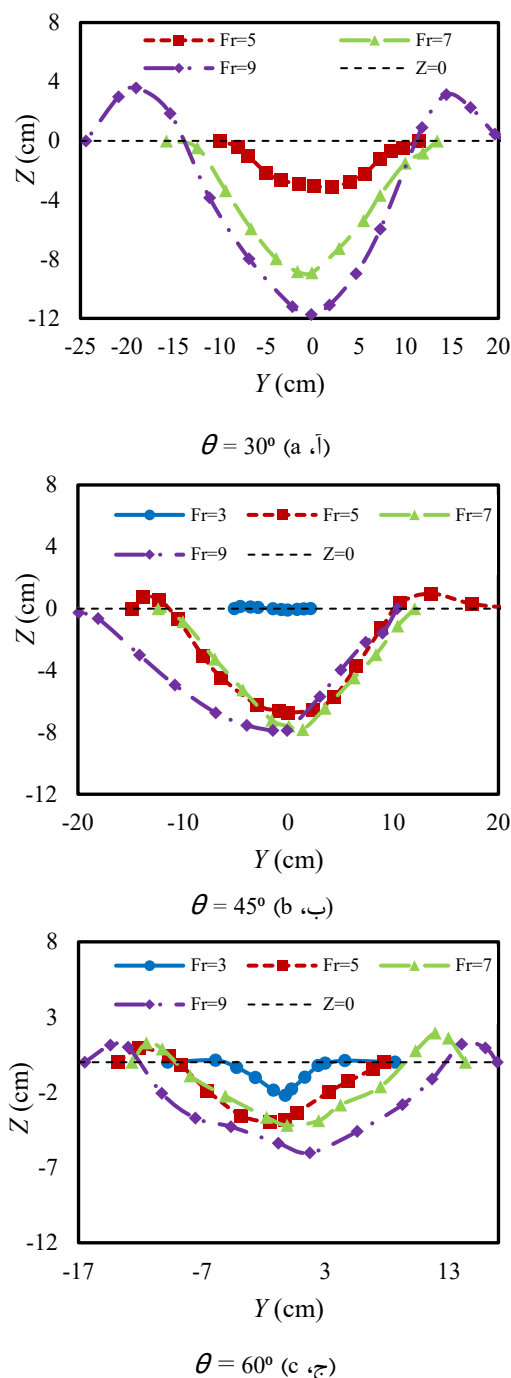


Fig. 12 Lateral bed profiles for different Froude number and $Y_t = 20$ cm

شکل ۱۲ پروفیل‌های عرضی بستر برای عددهای فرود مختلف و عمق پایاب ۲۰ cm

این تحلیل دوگانه، با استناد به مشاهدات تفکیک‌شده در [شکلهای ۶ تا ۱۲](#)، درک مکانیکی کامل‌تری از پدیده آب‌شستگی ارائه می‌دهد. نیروی مومنتوم ورودی (تابعی از عدد فرود)، مقیاس کلی سیستم را تعیین می‌کند، درحالی‌که زاویه اعمال جت، توزیع فضایی این انرژی را بین

نیمه، به تنهایی نمی تواند بیانگر تقارن بستر باشد، لذا از دو پارامتر دیگر شامل اختلاف مساحت سطح حفره بین دو نیمه در پلان (ΔA) و اختلاف فاصله دیواره حفره تا محل حداکثر عمق آبشستگی در دو نیمه (ΔW)، برای بررسی تقارن نیز استفاده شده است (شکل ۱۳).

در ادامه به منظور تعیین شاخص تقارن در هر آزمایش، هریک از سه پارامتر مذکور نسبت به مقدار حداکثر خود بی بعد شده و با هم جمع می شوند (معادله (۱)).

$$SY_i = \frac{\Delta V}{\Delta V_{max}} + \frac{\Delta A}{\Delta A_{max}} + \frac{\Delta W}{\Delta W_{max}} \quad (1)$$

در آزمایش ها انجام شده میزان این شاخص در محدوده ۰/۱۸ تا ۳ متغیر بوده است.

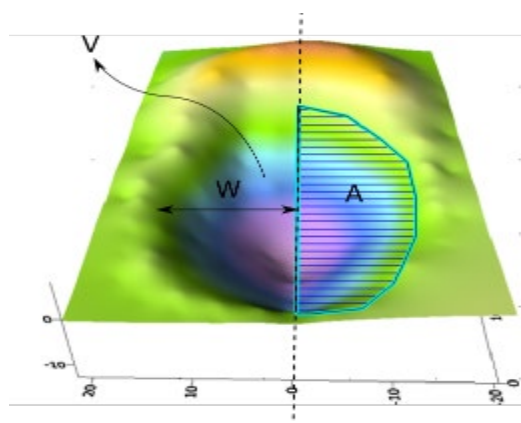


Fig. 13 3D bed topography: experiment 30-15-9

شکل ۱۳ توپوگرافی سه بعدی بستر: آزمایش ۳۰-۱۵-۹

دیگر از عوامل انحراف جت به سمت دیواره ها است. چنانچه در تحقیق حاضر، انحراف جت به سمت دیواره های کانال در شرایطی که $Y_t/d_j > 10$ باشد، کمتر مشاهده شد. شاید بتوان گفت که در اعماق پایاب کم به دلیل موج های ایجاد شده بر روی سطح آب، عدم تقارن در میدان جریان خروجی از روزنه بیشتر شده و در نتیجه جت به سمت دیواره های کانال منحرف می شود.

برای آزمایش ها انجام شده، وضعیت حفره آبشستگی در پلان مشاهده و نتایج آن، از نظر تقارن حفره آبشستگی، در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول آزمایش ها به سه قسمت تقارن خوب، تقارن متوسط و تقارن ضعیف تقسیم شده اند، مشاهده می شود که عدم تقارن حفره های آبشستگی از الگوی مشخصی پیروی نمی کنند.

در ادامه با معرفی شاخص تقارن (SY_i)، به بررسی وضعیت تقارن حفره آبشستگی پرداخته و هریک از آزمایش ها از لحاظ میزان تقارن دسته بندی می شود. شکل ۱۳ توپوگرافی سه بعدی آزمایش ۳۰-۱۵-۹ را به عنوان نمونه نشان می دهد که جهت بررسی تقارن بستر، از محور مرکزی کانال و در راستای محور طولی به دو نیمه سمت چپ و نیمه سمت راست تقسیم شده، و پارامترهای لازم در دو نیمه برای مقایسه برداشت شد. یکی از مهم ترین پارامترها مقدار حجم رسوب شسته شده در هر نیمه است، که هر چه اختلاف آن ها در دو نیمه (ΔV) کمتر باشد، حفره تقارن بیشتری دارد. اما از آنجایی که اختلاف حجم رسوب شسته شده در این دو

جدول ۲ بررسی تقارن حفره آبشستگی در آزمایش ها

Table 2 Symmetry index for scour hole

Jet angle	$\theta = 60^\circ$				$\theta = 45^\circ$				$\theta = 30^\circ$			
Fr	9	7	5	3	9	7	5	3	9	7	5	3
$Y_t = 10 \text{ cm}$												
$Y_t = 15 \text{ cm}$												
$Y_t = 20 \text{ cm}$												
Symmetry type	Weak symmetry				Medium symmetry				Well symmetry			

تقسیم‌بندی شدند. **شکل ۱۴** نمونه‌ای از این سه نوع تقارن حفره آب‌شستگی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ شاخص تقارن را برای هر یک از زاویه‌های جت و عددهای فرود مختلف نشان می‌دهد. در نگاه کلی مشاهده می‌شود که در زاویه جت 30° ، حفره آب‌شستگی متقارن‌تر بوده و با افزایش زاویه جت از 30° به 45° ، شاخص تقارن افزایش یافته و حفره آب‌شستگی نامتقارن‌تر شده، سپس با افزایش زاویه جت از 45° به 60° ، شاخص تقارن کمتر شده و نسبت به حالت قبل متقارن‌تر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود نیز شاخص تقارن افزایش می‌یابد اما به‌طور قطعی نمی‌توان گفت که افزایش عدد فرود باعث عدم تقارن زیاد می‌شود.

۳-۴- اثر پارامترهای بدون بعد بر حداکثر عمق آب‌شستگی نسبی

شکل ۱۶ رابطه بین پارامترهای هیدرولیکی بدون بعد را با حداکثر عمق آب‌شستگی نسبی (Y/d_j) نشان می‌دهد.

جدول ۳ رده‌بندی شاخص تقارن حفره آب‌شستگی

Table 3 Types of symmetrical index

Symmetry type	SY_i
Well	0.018 - 0.3
Medium	0.3 - 0.6
Weak	0.6 - 3.0

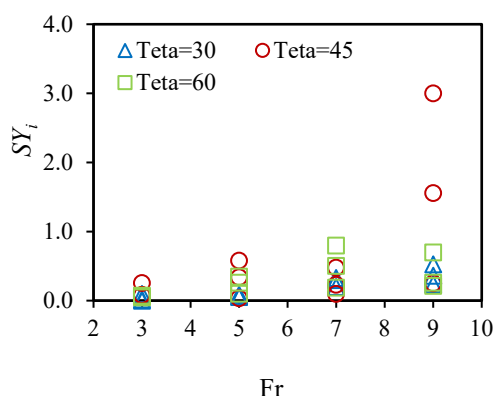


Fig. 15 Variations of symmetry index with Froude number and jet angle

شکل ۱۵ تغییرات شاخص تقارن بر حسب عدد فرود و زاویه جت

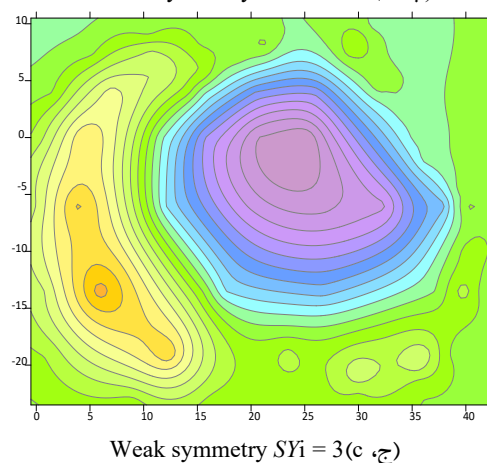
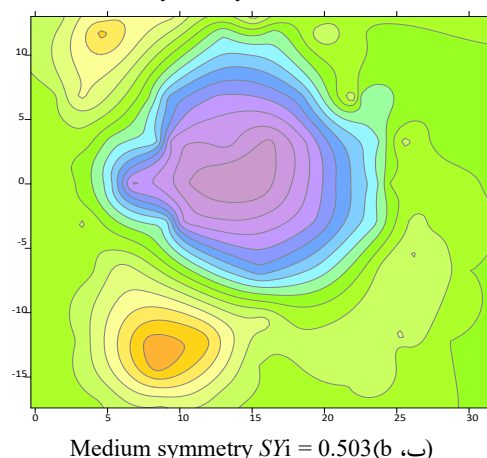
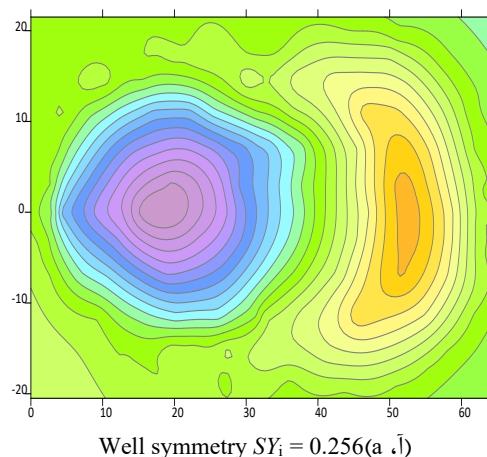


Fig. 14 Different bed topography with different symmetry index: a) Well, b) Medium, and c) Weak

شکل ۱۴ توپوگرافی‌های بستر پایین‌دست جت با شاخص تقارن: (الف) خوب، (ب) متوسط و (ج) ضعیف

این شاخص بیانگر آن است که هرچه حفره نامتقارن‌تر باشد شاخص تقارن آن بیشتر است. براین اساس توپوگرافی‌های بستر به سه دسته خوب، متوسط و ضعیف، مطابق **جدول ۳**

اعماق پایاب نسبی، باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی نسبی گردید. اثر کاهشی زاویه جت بر عمق نسبی آبشستگی نیز به خوبی در [شکل ۱۶](#) نشان داده شده است. این امر را می‌توان به تمرکز انرژی در سطح کوچک‌تر و تشدید ناحیه فرسایش سطحی نسبت داد. در این زاویه، جت انرژی بیشتری را صرف فرسایش جانبی و انتقال رسوب می‌کند تا نفوذ عمقی.

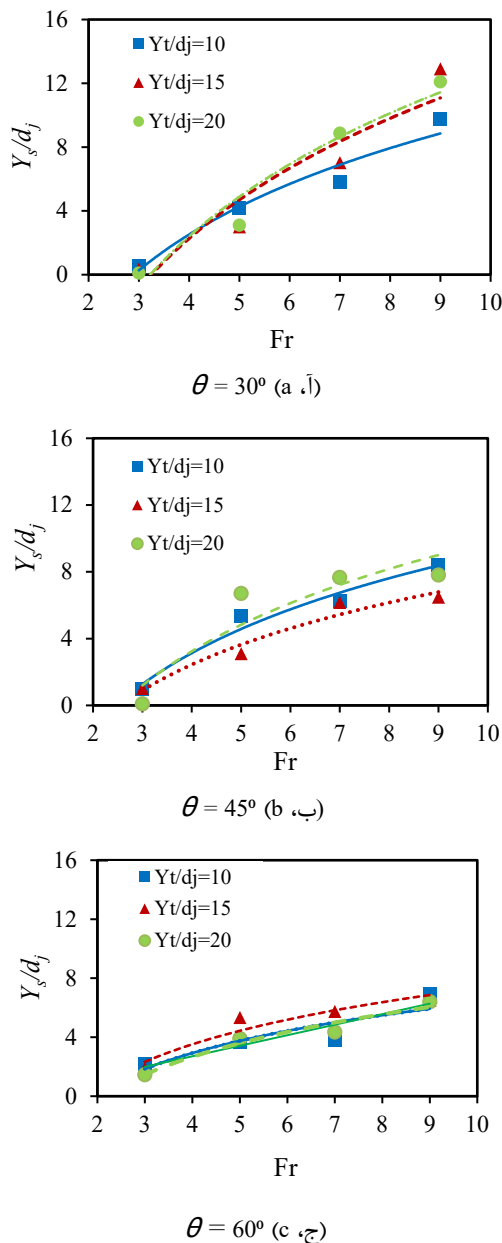


Fig. 16 Variations of relative maximum scour depth with Froude number and relative tailwater depth

شکل ۱۶ تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بدون بعد نسبت به عدد فرود و عمق نسبی پایاب

در اینجا d_j معرف قطر جت و Y_s معرف حداکثر عمق آبشستگی است. تحلیل کمی این نتایج، وابستگی شدید عمق فرسایش به شار مومنتوم جت و توزیع فضایی آن را آشکار می‌سازد.

[شکل ۱۶-الف](#) که مربوط به جت با زاویه 30° درجه است نشان می‌دهد افزایش عدد فرود از ۳ به ۹، موجب افزایش ۱۲۰ درصدی عمق آبشستگی نسبی می‌شود. این در حالی است که حدود ۳۰ درصد این افزایش ناشی از افزایش عدد فرود از ۳ به ۵ است که نشان می‌دهد تغییرات زیادی در این ناحیه اتفاق افتاده است و در عدد فرود ۳ آبشستگی بسیار کم است. در ادامه با افزایش عدد فرود از ۵ به ۷، حداکثر عمق آبشستگی تا ۵۰ درصد افزایش یافته، و در نهایت با افزایش عدد فرود از ۷ به ۹ این مقدار تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد درحالی‌که برای عمق نسبی پایاب ۱۵، در این ناحیه حدود ۹۰ درصد افزایش مشاهده شد. این افزایش غیرخطی را می‌توان با رابطه شار مومنتوم توجیه کرد که با مربع سرعت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، افزایش عدد فرود از ۳ به ۹ به معنای افزایش ۹ برابری در مومنتوم جت است. باین حال، تنها ۱۲۰ درصد افزایش در عمق فرسایش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اتلاف انرژی قابل توجه در مکانیزم‌های ثانویه مانند انتقال رسوب و تشکیل گردابه است.

همان‌طور که در [شکل ۱۶-ب](#) قابل مشاهده است، روند افزایش حداکثر عمق آبشستگی نسبی در حالت جت با زاویه 45° کمی با حالت قبلی متفاوت است و بیشترین افزایش حداکثر عمق آبشستگی نسبی در افزایش عدد فرود از ۳ به ۵ رخ داده و تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در عدد فرود ۷ به ۹ کمتر از حالت‌های دیگر است. این پدیده نشان می‌دهد که در این زاویه، آستانه فرسایش در عددهای فرود پایین‌تر اتفاق افتاده و سیستم سریع‌تر به حالت پایدار نزدیک می‌شود. کاهش نرخ رشد در افزایش عدد فرود از ۷ به ۹ نیز می‌تواند ناشی از تغییر الگوی جریان از حالت فرسایش عمقی به جانبی باشد.

در حالت جت با زاویه 60° که در [شکل ۱۶-ج](#) نشان داده شده نیز مشابه حالات دیگر، افزایش عدد فرود در تمامی

جدول ۴ ضرایب رابطه (۲)

Table 4 Values of constants in Eq. (2)

θ (°)	a	b	c	d	R ²
30	0.147	1.733	0.249	-1.165	0.966
45	1340	0.005	0	-1340	0.859
60	7.699	0.313	0.001	-8.925	0.845

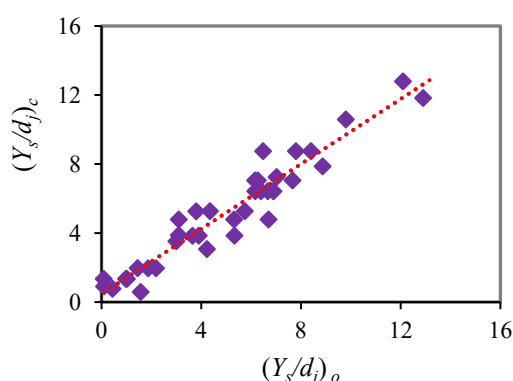


Fig. 17 Comparison of predicted and observed values of maximum relative scour depth for different jet angles

شکل ۱۷ مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی برای زاویه‌های مختلف جت

بررسی‌شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود منجر به عمیق‌تر شدن حفره آب‌شستگی، انتقال محل حداکثر فرسایش به پایین‌دست و تشکیل پشته‌های رسوبی بلندتری می‌شود. در عدد‌های فرود بالا مانند ۹، پشته‌های رسوبی به شکل مثلثی و با ارتفاع تا چهار برابر حالت اولیه دیده می‌شوند. همچنین، در زاویه جت ۳۰ درجه، حفره آب‌شستگی متقارن‌تر با پشته‌های کم‌ارتفاع تشکیل می‌شود. در زاویه ۴۵ درجه، عدم تقارن حفره افزایش یافته و گسترش آن به سمت بالادست بیشتر می‌شود. در زاویه ۶۰ درجه، رسوب‌گذاری در پایین‌دست کاهش و در بالادست افزایش می‌یابد.

علاوه‌براین، افزایش عمق پایاب باعث کاهش انرژی جریان شده و آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. بعلاوه، ارتفاع پشته‌های رسوبی در پایین‌دست افزایش یافته و حفره به سمت پایین‌دست جابه‌جا می‌شود؛ اما در عمق‌های کم پایاب، جت به دلیل اثر کواندا و امواج سطحی به سمت

تحلیل ترکیبی پارامترها نشان می‌دهد که:

- ♦ عدد فرود تعیین‌کننده مقیاس کلی انرژی فرسایشی است.
- ♦ زاویه جت الگوی توزیع انرژی بین مولفه‌های عمقی و جانبی را کنترل می‌کند.
- ♦ عمق پایاب نقش میراننده داشته و با افزایش آن، از شدت فرسایش کاسته می‌شود.
- ♦ این تحلیل‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی عمق فرسایش در شرایط مختلف هیدرولیکی باشد.

۳-۵- رابطه بدون بعد حداکثر عمق آب‌شستگی

بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که رابطه (۲) حداکثر عمق آب‌شستگی را برای داده‌های به‌دست‌آمده، با دقت مطلوب نشان می‌دهد. در این رابطه a ، b ، c و d ثابت‌های تجربی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمد. این ثابت‌ها برای زاویه‌های مختلف جت به همراه مقادیر ضریب همبستگی R^2 برای هر حالت، در جدول ۴ نشان داده شده است.

$$\frac{Y_s}{d_j} = a(Fr)^b \left(\frac{Y_t}{d_j} \right)^c + d \quad (2)$$

در شکل (۱۷) مقادیر حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه‌شده $(Y_s/d_j)_c$ برای هر سه زاویه جت با استفاده از رابطه (۲)، با مقادیر مشاهداتی آن $(Y_s/d_j)_o$ مقایسه شده‌اند. مقادیر ضریب همبستگی و پراکندگی داده‌ها در اطراف خط بهترین برازش نشان می‌دهد که رابطه (۲) حداکثر عمق آب‌شستگی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند.

رابطه به‌دست‌آمده در شرایط $3 \leq Fr \leq 10$ ، $20 \leq Y_t/d_j \leq 10$ و $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ و رسوب چسبنده استفاده‌شده معتبر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی تغییرات توپوگرافی بستر چسبنده و پروفیل‌های آب‌شستگی در پایین‌دست یک جت مستغرق مایل، به‌ازای عمق پایاب و دبی‌های مختلف

زاویه ۴۵ درجه بیشترین عدم تقارن را نشان می‌دهد. افزایش عدد فرود نیز به‌طور کلی باعث کاهش تقارن حفره می‌شود. به‌طور کلی، پارامترهای عدد فرود، زاویه جت و عمق پایاب تاثیر مستقیمی بر ریخت‌شناسی حفره آبشستگی و پشته‌های رسوبی دارند.

دیواره‌های کانال منحرف می‌شود که منجر به عدم تقارن حفره آبشستگی می‌گردد. این پدیده در عددهای فرود بالا مشهودتر است.

سرانجام، مشاهده شد که زاویه جت ۳۰ درجه بیشترین تقارن را در حفره آبشستگی ایجاد می‌کند، درحالی‌که

5- List of symbols

d_{50} (cm)	Average diameter of bed particles
d_j (m)	Jet diameter
Fr (-)	Froude number
H (m)	Drop height
Q_o (m ³ /s)	Discharge
Re (-)	Reynolds number
SY_i (-)	Scour index
U_o (-)	Jet Velocity
X (m)	Longitudinal distance
Y (m)	Lateral distance
Y_s (m)	Sour depth
Y_t (m)	Tailwater depth
Z (m)	Bed level
ΔW (m)	Difference in the distance from the scour hole edge to the location of maximum scour depth
θ (o)	Jet angle

Acknowledgements

The authors would like to thank the Hydraulic Laboratory of Tarbiat Modares University, Tehran.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization M G; Methodology H. R. and M. G.; Software H.R.; Data collection H. R.; Analysis H.R; Supervisor M. G.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No external financial support was received from for this research.

Data Availability Statement

The data are provided within the manuscript.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Abida, H., and Townsend, R. (1991). Local scour

downstream of box-culvert outlets. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 117(3), 425-440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:3\(425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:3(425))

Aderibigbe, O., and Rajaratnam, N. 1996. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets, *J. Hydr. Res.*, 34(1): 19-33. <https://doi.org/10.1080/00221689609498762>

Ansari, S. A., Kothiyari, 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:12\(1014\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:12(1014))

Balachandar, R., Kells, J. and Thiessen, R. (2000). The Effect of Tailwater Depth on the Dynamics of Local Scour. *Canadaian Journal of Civil Engineering*, Vol.27, 138-150. <https://doi.org/10.1139/99-061>

Blaisdell, F. W., and Anderson, C. L. (1988). A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets. *Journal of Hydraulic Research*, 26(4), 357-376. <https://doi.org/10.1080/00221688809499198>

Blaisdell, F. W., Hebaus, G. G., and Anderson, C. L. (1981). Ultimate dimensions of local scour. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(3), 327-337.

Breusers, H., and Raudkivi, A. (1991). Scouring, hydraulic structures design manual. *IAHR, AA Balkema, Rotterdam*, 143. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005630>

Chaudhuri, P. (2007). Study of scour caused by obliquely impinging plunging and non-plunging turbulent jets. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/7018/>

Cossette, D. (2016). *Erodibility and scour by a vertical submerged circular turbulent impinging jet in cohesive soils*. University of Saskatchewan, Canada. <https://harvest.usask.ca/items/36631f0f-1c26-4e76-b790-59a46cd6fbac/full>

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., Miller, R. B., and Al-Madhhachi, A.-S. T. (2013). A scour depth approach for deriving erodibility parameters from jet erosion tests. *Transactions of the ASABE*, 56(6), 1343-1351. <https://doi.org/10.13031/trans.56.10350>
- Dey, S., and Westrich, B. (2003). Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *Journal of hydraulic engineering*, 129(1), 44-53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:1\(44\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:1(44))
- Doehring, F. K., and Abt, S. R. (1994). Drop height influence on outlet scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(12), 1470-1476. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:12\(1470\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:12(1470))
- Hanson, G. (1991). Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways. *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2015-2020. <https://doi.org/10.13031/2013.31831>
- Hoffmans, G. J. C. M., & Verheij, H. J. (1997). Scour Manual. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/b17703-5>
- Lim, S. (1995). Scour below unsubmerged full-flowing culvert outlets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 112(2), 136-149. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.27659>
- Mason, P. J., and Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:2\(220\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:2(220))
- Mazurek, K. (2001). Scour of Clay by Jets. PhD Thesis in Water Resources Engineering, University of Alberta, Canada. p. 313. <https://doi.org/10.7939/r3-kt8g-sk74>
- Mazurek, K. (2016). Assessment of Equilibrium Scour by a Submerged Circular Turbulent Impinging Jet in Cohesive Soils. <https://doi.org/doi:10.15142/T3350628160853>
- Mazurek, K. A. (2001). *Scour of clay by jets*. University of Alberta Edmonton, Alberta,, Canada, <https://doi.org/10.7939/r3-kt8g-sk74>
- Mazurek, K. A., and Hossain, T. (2007). Scour by jets in cohesionless and cohesive soils. *Canadian journal of civil engineering*, 34(6), 744-751. <https://doi.org/10.1139/107-005>
- 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. <https://doi.org/10.1080/00221680509500155>
- Mazurek, K., Rajaratnam, N., and Sego, D. (2001). Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(7), 598-606. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:7\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(598))
- 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), 195-206. <https://doi.org/10.1080/00221680509500127>
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). Bridge Scour. Water Resources Publication. ISBN-10 : 1887201181
- Nazarimehr, F. and Ghodsian, M. (2025). Experimental study of scour characteristics by circular turbulent impinging jets in cohesive soils. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.1080/09715010.2025.2481936>
- Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G. and Collins, M. (1997). The Influence of Clay on the Threshold of Movement of Fine Sandy Beds. *Coastal Engineering* (32), 19-43. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(97\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00013-6)
- Rajaratnam, N., and Mazurek, K. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 709-716. <https://doi.org/10.1080/00221680209499917>
- Yang, C. T. (1996). *Sediment Transport Theory and Practice*. McGraw-Hill.