Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 3, PP. 125-136, Fall 2025

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2025.495899.1725

Effect of Crossing Point Distance of Symmetrical Jets from Water Surface on the Scouring of a Cohesive Bed

Reza Mirzaee[1], Sayed-Farhad Mousavi[2]*, Khosrow Hosseini[3]

1- PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Adjunct Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* **fmousavi@semnan.ac.ir**

Received: 26 December 2024
Accepted: 19 March 2025
Discussion: 22 December 2025

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The aim of this investigation is to examine the influence of various hydraulic parameters on the dimensions of scour holes caused by symmetrical crossing jets on cohesive sediment beds. Scouring, particularly in environments with cohesive beds, is a major factor threatening the stability of hydraulic structures such as spillways and dams. The kinetic energy of jets discharged from these structures, if not sufficiently dissipated, results in the creation of scour holes and ultimately results in bed degradation and structural failure. Conventional energy dissipation methods, such as stilling basins, are often impractical owing to economic constraints or environmental conditions. This research focuses on cohesive sediment beds and examines parameters such as jet crossing angle, distance between the crossing point of two symmetrical jets and water level, and bed moisture content to analyze the dimensions of scour holes under various conditions.

Methodology: To conduct this study, a laboratory flume with dimensions of 16 meters in length, 1 meter in width, and 0.8 meters in height was employed. The sediment bed utilized in this research was constructed using clay soil sources from the Semnan region, Iran. The soil had a relative density of 2.71, a liquid limit of 35, a plastic limit of 20, and an average particle size of 0.024 mm. The soil was prepared at three different moisture levels: 13%, 16%, and 19%. To achieve the desired moisture levels, the soil was first mixed with water and homogenized using a 1500-watt electric mixer. The moistened soil was then stored in plastic bags to maintain its moisture content until testing. The sediment bed was formed layer by layer, with each layer having a thickness of 5 cm. Each layer was compacted using a heavy roller weighing approximately 60 kg. The jets were supplied through 2-inch pipes that ultimately split into two jets with a diameter of 22 mm. A metal frame was employed to precisely adjust the angle and position of the jets, enabling variations in impact angles of 45°, 75°, and 105°, and setting the distance between the crossing point of two symmetrical jets and water level at 5, 7.5, and 10 cm. The vertical angle of the jets was maintained at 85° across all the experiments, with a tailwater depth of 9 cm. Each test was conducted for three hours to allow the scour hole to reach equilibrium. After each experiment, the used soil was discarded, and a new bed was prepared for subsequent testing.

Results and Discussion: The experimental results demonstrated that increasing the jet distance between the crossing point of two symmetrical jets and water level significantly decreased the depth, length, and width of the scour holes. This phenomenon is attributed to the decrease in pressure and force exerted

by the jets on the bed, as well as the increased air contact area of the jets prior to impact. These factors jointly decreased the kinetic energy, leading to smaller scour hole dimensions. Furthermore, the jet impact angle played a critical role in determining the dimensions of the scour hole. An increase in the crossing angle from 45° to 105° resulted in greater energy dissipation and attenuation of jet force, thereby reducing the dimensions of the scour hole. The smallest depth and degree of the scour hole were observed at 105° impact angle, indicating maximum energy dissipation. Additionally, an increase in bed moisture content contributed significantly to reducing the scour hole dimensions. With higher soil moisture, the bed compressive strength and specific weight increased, which restricted jet penetration and reduced the depth, length, and width of the scour hole. The shape of the scour holes was elliptical, and with increasing the impact angles, the holes elongated along the flow direction. This elongation reflects the longitudinal distribution of jet forces and diminished vertical penetration.

Conclusion: This study showed that parameters like jet crossing angle, distance between the crossing point of the two symmetrical jets and water level, and soil moisture significantly influence scour hole dimensions. Increased distance between the crossing point of the two symmetrical jets and water level and crossing angle reduced hole size owing to lower kinetic energy and higher energy dissipation. Higher soil moisture also enhanced bed resistance, further reducing scour dimensions. These findings aid in optimizing hydraulic structure design and mitigating scour and erosion risks.

Keywords: Cohesive sedimentary bed, scour, jets' crossing angle.

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۳، صفحات ۱۲۵-۱۳۶، پاییز ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2025.495899.1725

تأثیر فاصله برخورد جت‌های متقاطع از سطح آب بر آب‌شستگی بستر چسبنده

رضا میرزائی[۱]، سید فرهاد موسوی[۲*]، خسرو حسینی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۲- استاد وابسته، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

* fmousavi@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: تخمین ابعاد اولیه حوضچه‌های استغراق، به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی، از مسائل اساسی در طراحی آن‌ها محسوب می‌شود. برای دستیابی به طراحی ایمن و کاهش مخاطرات آتی، برآورد دقیق ابعاد حفره آب‌شستگی ضروری بوده و مستلزم انجام آزمایش‌های متعدد در شرایط هیدرولیکی گوناگون است. لذا در این تحقیق، پدیده آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن روی بستر رسوبی چسبنده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور تأثیر سه متغیر اصلی شامل زاویه برخورد بین جت‌ها، فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب، و مقاومت بستر بر ابعاد حفره آب‌شستگی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش فا صله برخورد جت‌ها تا سطح آب، زاویه برخورد جت ها و مقاومت بستر، منجر به کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی گردید به گونه‌ای که این کاهش حداقل ۱۶ درصد در عمق، ۸ درصد در طول و ۱۰ درصد در عرض حفره شد. علاوه بر این، با افزایش مقاومت بستر در شرایط یکسان هیدرولیکی، عمق حفره حداقل ۱۲ درصد و طول و عرض حفره حداقل ۵۰ درصد کاهش یافت. شکل حفره ایجاد شده بیضوی بوده که با افزایش زاویه برخورد جت‌ها، ابعاد حفره بیش از ۶۷ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات در زاویه و فاصله برخورد جت‌ها و همچنین مقاومت بستر، تأثیر مستقیم و مهمی بر ویژگی‌های آب‌شستگی و شکل‌گیری حفره آب‌شستگی دارند.

کلیدواژگان: بستر رسوبی چسبنده، آب‌شستگی، زاویه برخورد جت‌ها.

۱- مقدمه

به‌منظور کاهش انرژی جنبشی زیانبار فوران جت‌های خروجی از سدها و سرریزها، استهلاک انرژی دارای اهمیت بسزایی است. پرکاربردترین روش استهلاک انرژی، استفاده از حوضچه‌های آرامش می‌باشد. در شرایط خاص، استفاده از این حوضچه‌ها میسر نبوده و یا اقتصادی نیست و بایستی از حوضچه استغراق برای استهلاک انرژی استفاده شود (Bollaret, 2002). حوضچه‌های استغراق یا به صورت طبیعی در بستر رودخانه پس از ایجاد بدون پوشش باقی می‌مانند یا توسط سنگ یا بتن پوشش داده می‌شوند. ابعاد حوضچه استغراق بستگی به نوع مصالح بستر، مشخصات خاک محل و عامل‌های هیدرولیکی و هندسی جت در حال سقوط دارد. ابعاد حفره آب‌شستگی حوضچه استغراق در بیشتر بررسی‌های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی بوده و به‌طور عمده روی بستر غیرچسبنده انجام یافته است. از آنجایی که نیروی جاذبه فیزیکی- شیمیایی در آب‌شستگی رسوب‌های چسبنده دخیل است، لذا در پروژه‌های مهندسی و کارهای آزمایشگاهی، بزرگ‌ترین چالش را برای مهندسان ایجاد می‌کند. بنابراین، انجام آزمایش‌ها روی بستر رسوبی چسبنده، در شرایط هیدرولیکی متفاوت، می‌تواند یک برآورد اولیه از ابعاد حوضچه استغراق ناشی از انواع جت‌ها و به‌ویژه جت‌های متقاطع متقارن ارائه دهد.

نتایج یک بررسی روی آب‌شستگی حوضچه استغراق ناشی از جت منفرد نشان داده است که شکل جت و عدد فرود

دانسیمتریک به ترتیب کم‌اثرترین و مؤثرترین فراسنجه روی حفره آب‌شستگی است (Pagliara et al., 2006). در یک بررسی آزمایشگاهی که توسط Pagliara et al. (2006) انجام شده است، آب‌شستگی حوضچه استغراق ناشی از جت‌های متقاطع متقارن با زاویه قائم ثابت ۴۵ درجه ارزیابی شده است. نتایج این بررسی نشان داده که در عمق پایاب کم، جت‌های متقاطع در مقایسه با جت منفرد عمق آب‌شستگی بیشتری ایجاد می‌کنند.

در پژوهشی دیگر، برای آب‌شستگی حوضچه استغراق روی بستر غیرچسبنده، نشان داده شده که با کاهش زاویه قائم قرارگیری نازل جت، شکل حفره بیضوی می‌شود (Pagliara and Palermo, 2008).

آب‌شستگی ناشی از برخورد دو جت متقاطع قائم توسط Pagliara et al. (2012) بررسی شده است. آنان گزارش دادند که ابعاد حفره آب‌شستگی تحت تأثیر زاویه‌های عمودی جت‌ها، عدد فرود دانسیمتریک، عمق پایاب و فاصله نقطه تقاطع جت‌ها تا سطح آب می‌باشد. Pagliara and Palermo (2008) برای آب‌شستگی دو جت نامتقاطع با ارائه فاصله نقطه تقاطع مجازی جت‌ها از سطح آب، بیان کردند که در وضعیت هیدرولیکی یکسان، جت‌های متقاطع قائم، نسبت به جت‌های متقاطع متقارن و جت منفرد، دارای طول آب‌شستگی زیاد و عمق آب‌شستگی کمتری می‌باشند. بررسی آب‌شستگی جت‌های متقاطع متقارن روی رسوب‌های غیرچسبنده نایکنواخت به صورت تجربی توسط Naini et al. (2022) انجام شده است. نتایج نشان داده که برای عمق پایاب کم، عدم تقارن در شکل حفره آب‌شستگی به‌ویژه در زاویه‌های برخورد ۷۵ و ۱۱۰ درجه مشهود است. همچنین، در بررسی‌های انجام شده توسط Mirzaee et al. (2023) با استفاده از روش محاسبه‌ها نرم، تأثیرگذارترین و کم‌اثرترین فراسنجه روی ابعاد حفره، به ترتیب عمق پایاب و زاویه قائم جت برای آب‌شستگی حوضچه استغراق جت‌های متقاطع متقارن می‌باشد.

آب‌شستگی جت عمودی دایره‌ای روی بستر رسوبی چسبنده توسط Ansari et al. (2003) انجام شده و بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌هایی برای برآورد حجم حفره ارائه شده است. بررسی تأثیر تراکم بستر رسوبی چسبنده روی آب‌شستگی پایه پل توسط Link et al. (2013) انجام شد. آنان گزارش دادند که کمترین میزان عمق آب‌شستگی در رطوبت بهینه خاک رخ می‌دهد. بررسی آب‌شستگی آبشکن روی بستر رسوبی چسبنده توسط Lodhi et al. (2016) انجام شد و نتیجه گرفتند که ابعاد حفره آب‌شستگی متأثر از درصدهای متفاوت رس در مخلوط ماسه و رس است. نتایج آزمایشی که توسط Dong et al. (2020) در این زمینه انجام شد، نشان داد که ابعاد حفره آب‌شستگی جت قائم برخوردی روی بستر رسوبی چسبنده تابعی از فراسنجه‌های سرعت جت، مدت زمان آب‌شستگی، ارتفاع برخورد، قطر نازل جت و درصد رطوبت خاک مورد آزمایش می‌باشد. آب‌شستگی جت قائم مستغرق که روی بستر رسوبی چسبنده و غیرچسبنده توسط Shakya et al. (2021) انجام شده نشان داد که شعاع حفره رسوب‌های چسبنده در مقایسه با رسوب‌های غیرچسبنده متفاوت است. Ghodsian and Nazarimehr (2022) آب‌شستگی جت‌های ریزشی آزاد را روی بستر رسوبی چسبنده بررسی کردند. آنان در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند که جت با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عمق آب‌شستگی را ایجاد کرده و آب‌شستگی در دو زاویه صفر و ۳۰ درجه بسیار نزدیک به هم هستند. Choi and Choi (2022) با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) آب‌شستگی پایه پل روی بستر رسوبی چسبنده را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل ماشین بردار پشتیبان، بیشینه عمق آب‌شستگی را به درستی پیش‌بینی و برآورد می‌کند. Ahmad and Ghani (2024) آب‌شستگی پایه پل‌های زاویه‌دار را در زاویه‌های صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه روی بستر رسوبی چسبنده با ترکیب ماسه و رس بررسی و ارزیابی کردند. نتایج گویای آن بود که کمترین عمق آب‌شستگی برای پایه مستطیلی و دایره‌ای در زاویه ۱۰ درجه رخ می‌دهد.

برآورد ابعاد اولیه حوضچه‌های استغراق به عنوان مستهلک کننده انرژی، یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها در طراحی آن‌ها می‌باشد. لذا، به منظور دستیابی به طراحی ایمن و دوری از مخاطره‌های احتمالی آتی، بایستی برآورد درستی از ابعاد حفره آب‌شستگی حوضچه استغراق صورت گیرد، که این امر مسلتزم انجام آزمایش‌های چندی با شرایط هیدرولیکی

متفاوت است.

بیشتر بررسی‌های انجام شده در زمینه آب‌شستگی و برآورد ابعاد آن معطوف به بستر غیرچسبنده است. بنابراین، در این پژوهش سعی شده است تا آب‌شستگی جت‌های متقاطع متقارن روی بستر رسوبی چسبنده انجام و تأثیر فراسنجه‌های زاویه برخورد جت‌ها، فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب و رطوبت بستر بررسی و تبیین شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- الگوی جریان و فرآیند آب‌شستگی

بر مبنای شمای کلی ارائه شده در شکل ۱ که مربوط به برخورد دو جت متقاطع است، هنگامی که دو جت متقارن با زاویه مشخصی به یکدیگر برخورد می‌کنند، الگوی جریان به سه ناحیه اصلی پیش از برخورد، ناحیه برخورد و ناحیه پس از برخورد تقسیم می‌شوند. در ناحیه پیش از برخورد دو جت جداگانه بدون انحراف به سمت نقطه برخورد حرکت می‌کنند. سطح جت‌ها دارای امواج اولیه است، اما هوای زیادی وارد جریان نمی‌شود. در ناحیه دوم جت‌ها به یکدیگر برخورد کرده و منجر به یک جت ترکیبی می‌شوند. در اثر برخورد تنش برشی بالا و گردابه‌های چرخشی به همراه یک جریان شعاعی ایجاد شده و ساختار جریان تغییر می‌کند. بسته به زاویه برخورد و دبی جت‌ها، میزان آشفتگی و انحراف جت‌ها متفاوت خواهد بود. در ناحیه پس از برخورد، جت ترکیبی به سمت پایین حرکت کرده و با سطح آب برخورد می‌کند. در این ناحیه، پدیده پاشش آب رخ می‌دهد که بسته به فراسنجه‌های جریان می‌تواند به سه حالت باشد؛ حالت اول جت ترکیبی به صورت یک جریان به نسبت منسجم حرکت می‌کند (زاویه‌های برخورد و دبی کم). حالت دوم جت پس از برخورد به شکل افقی گسترش می‌یابد و در حالت سوم جت به طور کامل به ذرات کوچک‌تر تقسیم شده و در همه جهت‌ها پخش می‌شود (زاویه‌های برخورد و دبی بزرگ). در ناحیه پس از برخورد بسته به فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب سه حالت رخ می‌دهد. اگر فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب کم باشد (محل برخورد نزدیک به سطح آب)، جت‌ها انرژی خود را به طور مستقیم به بستر منتقل می‌کنند و پیش از رسیدن به بستر شکسته نمی‌شوند. در این حالت جریان برخوردی دارای ساختار منسجم بوده و تنش برشی بیشتری به بستر منتقل می‌کند. این امر سبب ایجاد آب‌شستگی متمرکز و عمیق با شکل متقارن می‌شود. اگر فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب متوسط باشد (نقطه برخورد کمی پایین‌تر از آب) بخشی از انرژی جت‌ها هنگام عبور از آب مستهلک می‌شود، اما جریان دارای نیروی کافی برای اعمال تنش به بستر است که منجر به ایجاد گردابه‌های چرخشی و جریان برگشتی قوی می‌شود. در نتیجه، حفره گسترده‌تری ایجاد می‌شود. در شرایطی که فاصله برخورد جت تا سطح آب زیاد باشد، جت‌ها به شدت در آب پخش می‌شوند و مقدار زیادی هوا وارد جریان می‌شود. در نتیجه آن، نیروی فرسایشی کاهش یافته و آب‌شستگی کم عمق و پهن به همراه احتمال تشکیل پشته‌های رسوبی در پیرامون حفره آب‌شستگی می‌شود.

۲-۲- تحلیل ابعادی

در این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی اثر جت‌های متقاطع بر بستر چسبنده انجام گرفت. شکل ۱، شمای کلی مدل پژوهش و فراسنجه‌های مؤثر بر پدیده آب‌شستگی رسوب‌های چسبنده را نشان می‌دهد.

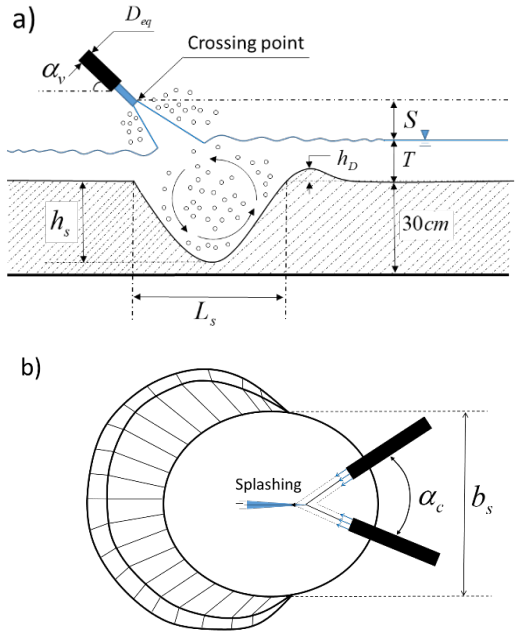

Fig. 1 Schematic of the experimental model: a) Side view, b) Top view

شکل ۱ شمای کلی مدل آزمایشگاهی: a) نمای کناری و b) نمای بالا

در شکل ۱، h_s بیشینه عمق آب‌شستگی، h_D بیشینه ارتفاع تپه رسوبی، L_s بیشینه طول آب‌شستگی و b_s بیشینه عرض آب‌شستگی (Ω معرف طول، عرض و عمق حفره) می‌باشد. برای بستر رسوبی چسبنده، ابعاد حفره آب‌شستگی به صورت تابعی از فراسنجه‌های رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\Omega = f(\rho, \mu, S, T, \alpha_c, \alpha_v, PI, \Delta g, d_{50}, D_{eq}, S_u, M_0, w) \quad (1)$$

که در آن ρ، μ، S، T، α_c، α_v، PI، Δg، d_{50}، D_{eq}، S_u، M_0 و w به ترتیب لزوجت آب، چگالی آب، فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب، عمق پایاب، زاویه برخورد جت‌ها، زاویه قائم جت‌ها، شاخص خمیری خاک، اختلاف چگالی نسبی آب و خاک در شتاب گرانش، اندازه ذرات خاک، قطر معادل جت‌ها، مقاومت برش پره زهکشی نشده بستر، مومنتم جت با قطر معادل و رطوبت بستر می‌باشد. بنابر نظریه (تئوری) پی – باکینگهام، از آنجایی که ۱۶ متغیر و سه بعد اصلی T، M و L وجود دارد، با انتخاب متغیرهای M_0، D_{eq} و ρ به عنوان فراسنجه‌های تکراری، ۱۳ فراسنجه بی‌بعد به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Omega}{D_{eq}} = f_1(\alpha_c, \alpha_v, Fr_{d50}, \mathrm{Re}_j, \frac{T}{D_{eq}}, \frac{S}{D_{eq}}, \frac{d_{50}}{D_{eq}}, \frac{S_u}{\rho V^2}, PI, w) \quad (2)$$

از آنجایی که زاویه قائم جت‌ها، نوع و قطر متوسط ذرات خاک، عمق پایاب و سرعت جریان ثابت بوده و جریان آشفته است، لذا می‌توان از تأثیر شاخص خمیری، زاویه قائم جت ها، قطر نسبی رسوب‌ها، عمق پایاب، عدد رینولدز و عدد فرود دانسیمتریک صرف‌نظر کرد. از سوی دیگر، دو فراسنجه بی‌بعد w و $S_u/\rho V^2$ را می‌توان بر هم تقسیم کرد. بنابراین، رابطه ۲ به‌صورت رابطه ۳ قابل بازنویسی است.

$$\frac{\Omega}{D_{eq}} = f_2(\alpha_c, \frac{S}{D_{eq}} = S_c, \frac{S_u}{\rho w V^2} = \Delta) \quad (3)$$

$$\frac{\Omega}{D_{eq}} = f_3(\alpha_c, S_c, \Delta) \quad (4)$$

در رابطه‌های بالا، S_c و Δ به ترتیب فاصله برخورد تا سطح آب بی‌بعد شده و مقاومت بی‌بعد بستر رسوبی با در نظر گرفتن رطوبت خاک می‌باشد.

۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از ۸ متر انتهایی یک آبراهه به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۶، ۱ و ۰/۸ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان استفاده شد. دریچه انتهایی فلوم برای ایجاد عمق پایاب در مدل به‌کار گرفته شد. از یک پایه فلزی برای نگهداری جت استفاده شد و مدل جت به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که شرایط تنظیم زاویه قائم و برخورد جت‌ها و همچنین محل برخورد جت‌ها تا سطح آب به راحتی و با استفاده از اهرم پیچی قابل تنظیم باشد. از یک الکتروپمپ برای برقراری جریان آب در لوله حاوی شیر بای‌پس برای تنظیم دبی جت‌ها استفاده شد. دبی جریان با استفاده از یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی ساخت ژاپن مدل ADMAG AE با دقت ۰/۵± اندازه‌گیری و تنظیم شد. لوله متصل به پمپ دارای قطر ۲ اینچ بوده، که روی پایه جت و با استفاده از یک تبدیل به دو جت با قطر ۲۲ میلی‌متر تبدیل شد. قطر معادل دارای سطح مقطعی برابر با مجموع سطح مقطع دو جت متقاطع بوده و به‌صورت $D_{eq}=(2D^2)^{0.5}$ محاسبه می‌شود که مقدار آن ۳/۱۱ سانتی‌متر به‌دست آمد. به منظور متراکم کردن بستر رسوبی، از یک غلتک سطح صاف به عرض ۰/۸ متر با وزن تقریبی ۶۰ کیلوگرم استفاده شد. برای برداشت تغییرپذیری‌های بستر رسوبی نیز دستگاه متر لیزری JCB مدل HM 30 با دقت یک میلی‌متر به‌کار گرفته شد. شکل ۲، فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. در شکل ۳، نگاره‌ای از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده ارائه شده است.

Fig. 2 Experimental channel
شکل ۲ آبراهه آزمایشگاهی

۲-۴- ساخت بستر و انجام آزمایش‌ها

به منظور ساخت بستر رسوبی چسبنده، بازه‌ای از قسمت انتهایی فلوم به طول تقریبی ۲ متر استفاده شد. نمونه‌ای از خاک رس معدنی که برای کاربردهای ساختمان‌سازی است، برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. چگالی ویژه ذرات

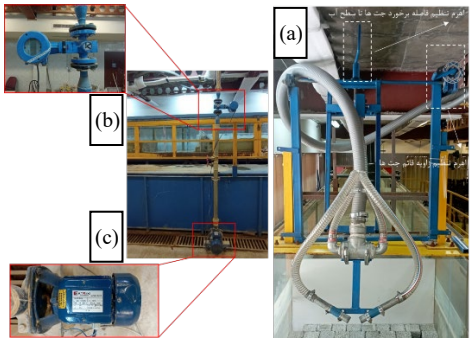

Fig. 3 Experimental equipment: a) jet holder, b) flow meter, and c) pump

شکل ۳ تجهیزات آزمایشگاهی: a) پایه نگهدارنده جت، b) دبی‌سنج و c) پمپ

خاک ۲/۷۱، اندازه متوسط ذرات ۰/۰۱۲۶ میلی‌متر، حد خمیری ۲۰، حد روانی ۳۵، رطوبت بهینه ۱۶ درصد و وزن مخصوص خشک بیشینه ۲۱/۶۷ کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد. این خاک شامل ۹۰ درصد رس و سیلت با کانی‌های ایلیت، مونت‌موریلونیت و کائولینیت و ۱۰ درصد ماسه ریز با اندازه ذرات ۰/۱۴ میلی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها برای درصدهای رطوبت ۱۳، ۱۶ و ۱۹ خاک انجام شد. در هر سری از آزمایش‌ها، در آغاز، بر مبنای رطوبت مدنظر برای بستر، وزن مشخصی از خاک به همراه وزن مشخصی از آب درون یک ظرف ریخته شده و با استفاده از یک همزن برقی با توان ۱۵۰۰ وات عمل اختلاط به‌صورت همگن انجام شد. مخلوط رطوبت داده شده در درون پلاستیک به منظور حفظ رطوبت قرار داده شد. خاک‌های رطوبت داده شده در ۶ لایه ۵ سانتی‌متری در درون آبراهه آزمایشگاهی ریخته و هر لایه از خاک با استفاده از یک غلتک با ۱۰ دور رفت و برگشت متراکم شد. پس از پایان عملیات تراکم هر لایه، در سطح آن شیار ایجاد کرده تا پیوستگی لایه رویین و زیرین تأمین شود. پس از آماده‌سازی بستر، نمونه‌های دست نخورده استوانه‌ای از آن برای تعیین مشخصات بستر برداشت شد. وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری محدود نشده بستر ساخته شده در جدول ۱ ارائه شده است. بستر ساخته شده به مدت سه ساعت اشباع شد (Hassan et al., 2020). پیش از برقراری جریان داخل نازل جت و مدل، یک صفحه گالوانیزه روی بستر قرار داده می‌شد تا در حین تنظیم دبی، فاصله برخورد جت تا سطح آب و عمق پایاب، آشفتگی ناشی از آن سبب ایجاد آب‌شستگی در بستر نشود. جت‌ها با زاویه‌های برخورد ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه تنظیم شدند. زاویه قائم جت‌ها به همراه عمق پایاب و دبی ثابت و به ترتیب برابر ۸۵ درجه، ۹ سانتی‌متر و ۲ لیتر در ثانیه تنظیم شد. افزون بر این، فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب در همه آزمایش‌ها برابر ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر (به‌صورت نسبی ۱/۶، ۲/۴ و ۳/۲) انتخاب شد. پس از تنظیم شرایط هیدرولیکی مدل، صفحه گالوانیزه به آرامی از روی بستر برداشته می‌شد. از آنجایی که با گذشت زمان، آب‌شستگی پیشرفت می‌کند، به منظور تعیین زمان تعادل چندین آزمایش در شرایط بحرانی و در چند زمان مختلف انجام شد (با توجه به آشفتگی زیاد جریان در محل برخورد جت و گل‌آلود بودن آب امکان اندازه‌گیری در حین انجام آزمایش‌ها میسر نبود، لذا برای هر زمان یک آزمایش جداگانه انجام شد). نیمرخ طولی آزمایش‌های انجام شده نسبت به زمان در شکل ۴ ارائه شده است.

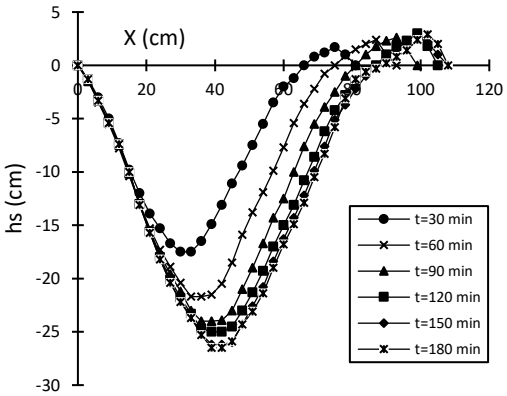

Fig. 4 Changes in the longitudinal profile of the scour hole over time

شکل ۴ تغییرپذیری‌های نیمرخ طولی نسبت به زمان

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان شکل حفره بزرگ‌تر شده و در زمان ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه تغییرپذیری‌های نیمرخ طولی تا حدودی نزدیک به هم و به شکل ثابتی می‌رسد. از سوی دیگر، در حین انجام آزمایش و با قرار دادن دست به آرامی در درون جریان و حفره، ذراتی در درون حفره به صورت معلق و چرخشی حضور داشته و به بیرون حفره منتقل نمی‌شدند. به همین دلیل و بر مبنای شرایط موجود زمان تعادل آب‌شستگی به مدت ۱۸۰ دقیقه برای تمام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. در شکل ۵، نگاره‌هایی از آزمایش در سه زاویه برخورد ارائه شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های بستر رسوبی

Table 1 Characteristics of the sedimentary bed

Bed soil moisture (%)	13	16	19
S_u (kPa)	0.98	1.47	2.45
Dry specific weigth (KN/m^3)	14.3	17.26	17.36
Relative compresion (%)	66	77	82

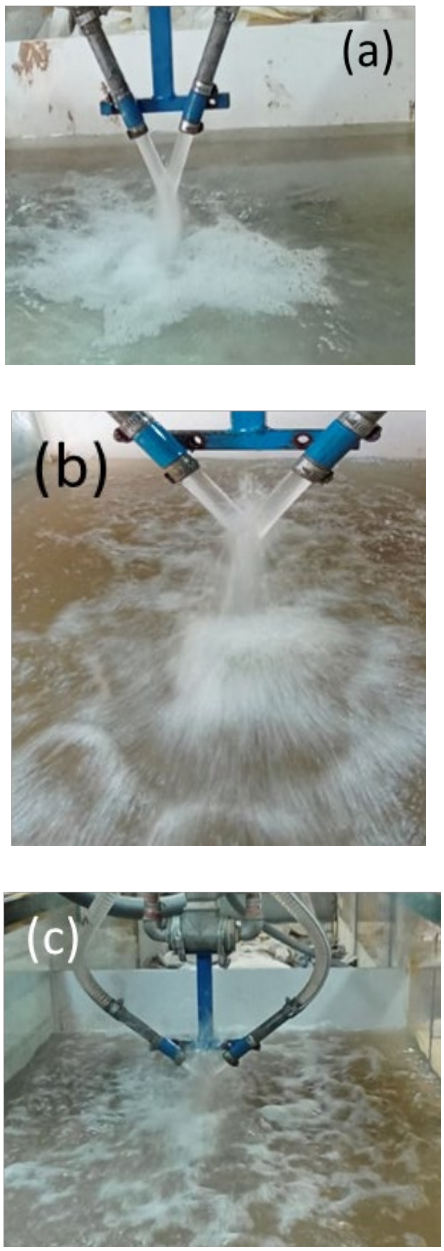

Fig. 5 Experiments at different crossing angles: a) α_c=45°, b) α_c=75°, c) α_c=105°

شکل ۵ آزمایش‌ها در زاویه‌های مختلف برخورد: a) α_c=45°، b) α_c=75°، c) α_c=105°

۳- نتایج و بحث

۳-۱- عمق نسبی حفره آب‌شستگی

نتایج عمق نسبی حفره آب‌شستگی بستر چسبنده نسبت به مقاومت بدون بعد بستر رسوبی به ازای فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت و در شکل نیز مشخص است، در هر سه زاویه برخورد جت‌ها، با افزایش مقاومت بدون بعد بستر، عمق حفره کاهش یافته است. انتظار می‌رفت که کمینه‌ترین مقدار ابعاد حفره در رطوبت بهینه (رطوبت ۱۶ درصد با مقاومت نسبی بستر ۱۳/۲) رخ دهد، اما از آنجایی که انرژی تراکم بستر در این پژوهش کمتر از انرژی تراکم بهینه خاک است، لذا رطوبت نقش موثرتری ایفا کرده و با انرژی تراکم این پژوهش، رطوبت بهینه در رطوبتی بیشتر از ۱۶ درصد رخ می‌دهد و همین امر منجر می‌شود تا با افزایش رطوبت، بستر از نظر مکانیک خاک و مقاومت بهبود یابد. بنا بر ویژگی‌هایی که در جدول ۱ ارائه شده است، با افزایش رطوبت تراکم بستر، مقاومت بستر، درصد تراکم و وزن مخصوص خشک بستر نیز افزایش می‌یابد. لذا به همین دلیل در اثر افزایش مقاومت نسبی بستر، عمق حفره کاهش یافته است. از سوی دیگر، نتایج گویای آن است که در اثر افزایش فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب، که منجر به افزایش سطح تماس جت با بستر و کاهش فشار و تنش برشی وارده بر بستر می‌شود، عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد. با مقایسه مقدارهای عمق حفره، برای شرایط هیدرولیکی برابر (ثابت درنظر گرفتن مقاومت بستر و همچنین فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب)، نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه برخورد بین جت‌ها سبب کاهش عمق حفره شده است. این مورد نیز به این دلیل است که با افزایش زاویه برخورد جت‌ها، استهلاک انرژی افزایش یافته و جت‌ها نیروی هم را مستهلک می‌کنند. مقایسه تأثیر فاصله برخورد جت تا سطح آب روی عمق حفره آب‌شستگی در این پژوهش با نتایج به دست آمده از بررسی‌های Pagliara et al. (2011) در شکل ۷ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که در این شکل نتایج به دست آمده از بررسی‌های Pagliara et al. (2011) برای رسوب‌های غیرچسبنده با عدد فرود دانسیمتریک ۱۴/۸۷، عمق نسبی پایاب ۰/۷، زاویه برخورد ۷۵ درجه و زاویه قائم ۸۵ درجه می‌باشد. نتایج این پژوهش نیز در زاویه برخورد ۷۵ درجه، مقاومت نسبی بستر ۱۸/۶۵ و عمق نسبی پایاب ۲/۹

می‌باشد. همان طور که بیان شد و از شکل نیز چنین استنباط می‌شود، افزایش فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب منجر به کاهش عمق حفره شده و رفتار کلی این تأثیر در هر دو بررسی مشابه هم است.

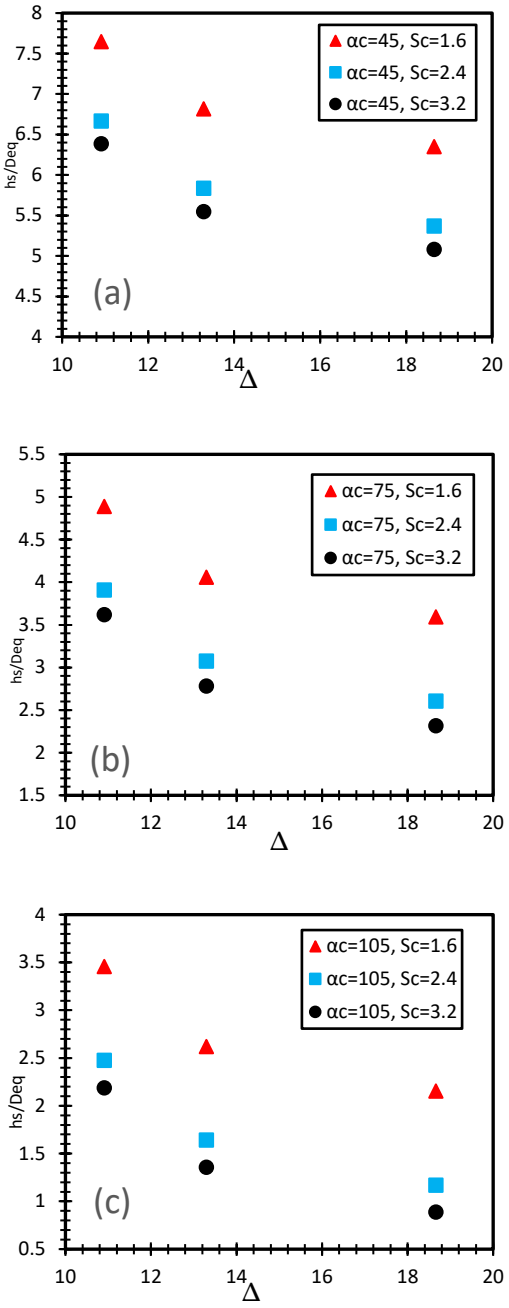

Fig. 6 Scour depth of hole relative to dimensionless bed resistance: a) α_c=45°, b) α_c=75°, c) α_c=105°

شکل ۶ عمق حفره آب‌شستگی نسبت به مقاومت بدون بعد بستر: a) α_c=45°، b) α_c=75°، c) α_c=105°

نتایج کمّی تأثیر افزایش فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب، زاویه برخورد و مقاومت نسبی بستر روی کاهش عمق حفره در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که از مقدارهای جدول ۲ ملاحظه می‌شود، عمق حفره بیش از ۱۷ درصد کاهش داشته و بیشینه تأثیر افزایش فاصله نسبی برخورد در مقاومت نسبی بستر ۱۸/۶ رخ داده که مقدار آن در زاویه‌های برخورد ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه، به ترتیب برابر ۲۰، ۳۶ و ۵۹ درصد می‌باشد.

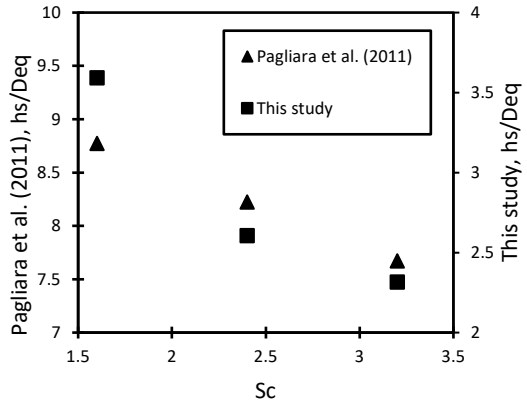

Fig. 7 Comparison of the overall behavior of the jet crossing point distance from water level on scour hole depth in the present study and the study of Pagliara et al. (2011)

شکل ۷ مقایسه رفتار کلی فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب روی عمق حفره آب‌شستگی در این پژوهش و پژوهش Pagliara et al. (2011)

جدول ۲ درصد کاهش عمق حفره در اثر افزایش S_c در مقاومت نسبی بستر و زاویه‌های برخورد مختلف جت‌ها

Table 2 Percentage reduction in scour hole depth due to increasing S_c in the relative bed resistance and different jet crossing angles

Δ	α_c	Decrease of Scour hole depth (%)
10.9	45	17
	75	26
	105	37
13.2	45	19
	75	32
	105	48
18.6	45	20
	75	36
	105	59

همچنین از جدول ۲ استنباط می‌شود که افزایش مقاومت بستر از ۱۰/۹ به ۱۸/۶ به‌طور متوسط در زاویه‌های برخورد ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه به ترتیب سبب کاهش ۱۳، ۲۱ و ۶۰ درصدی عمق حفره آب‌شستگی می‌شود. افزون بر این،

افزایش زاویه برخورد جت‌ها منجر به کاهش ۱۲۴، ۱۶۰ و ۱۹۵ درصدی در مقاومت‌های نسبی بستر ۱۰/۹، ۱۳/۲ و ۱۸/۶ می‌شود.

۳-۲- طول و عرض نسبی حفره آب‌شستگی

طول و عرض نسبی حفره آب‌شستگی نسبت به مقاومت نسبی بستر برای زاویه‌های برخورد جت‌ها و فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب در شکل ۸ ارائه شده است. طول و عرض حفره آب شستگی به ترتیب با رنگ‌های مشکی و قرمز در شکل نشان داده شده‌اند. از آنجایی که با افزایش رطوبت خاک، مقاومت فشاری زهکشی نشده و وزن مخصوص خشک خاک افزایش یافته است (مطابق جدول ۱)، لذا به همین دلیل و همان طور که در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است، افزایش مقاومت نسبی بستر منجر به کاهش طول و عرض حفره آب‌شستگی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب و همچنین افزایش زاویه برخورد جت‌ها نیز که منجر به افزایش استهلاک انرژی جت‌ها و کاهش شدت فشار وارد شده از جت‌ها به بستر می‌شود، سبب کاهش طول و عرض حفره آب‌شستگی شده است. مقایسه اندازه طول و عرض حفره در فاصله‌های مساوی برخورد جت‌ها از سطح آب و زاویه‌های یکسان برخورد جت‌ها از یکدیگر نشان می‌دهد که طول حفره آب‌شستگی بیشتر از عرض آن بوده و این بدان معنی است که شکل حفره ایجاد شده به‌صورت بیضوی است. افزون بر این، با افزایش زاویه برخورد بین جت‌ها، تیغه تشکیل یافته ناشی از برخورد جت‌ها در راستای طولی گسترش یافته و نیروی وارد شده بر بستر نیز در راستای طولی اعمال می‌شود. لذا افزایش زاویه برخورد بین جت‌ها منجر به کشیدگی بیشتر حفره در راستای جریان می‌شود.

جدول ۳ نشان می‌دهد که افزایش فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب سبب کاهش دست‌کم ۸ تا بیشینه ۲۰ درصدی طول حفره می‌شود. همچنین، عرض حفره دست‌کم ۱۰ درصد در زاویه برخورد ۴۵ درجه و بیشینه ۳۱ درصد در زاویه برخورد ۱۰۵ درجه کاهش می‌یابد. افزون بر این، نتایج گویای آن است که افزایش زاویه برخورد جت‌ها به ترتیب سبب کاهش ۶۷ و ۱۰۰ درصدی طول و عرض حفره می‌گردد. افزایش مقاومت بستر نیز منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصد طول و عرض حفره آب‌شستگی می‌شود.

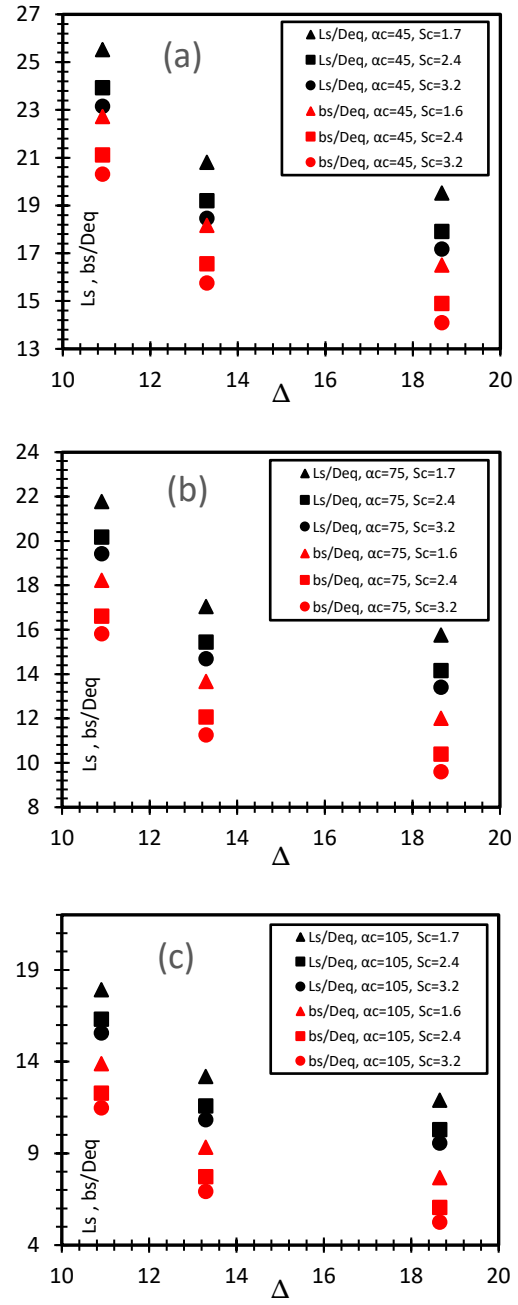

Fig. 8 Relative scour length and width to dimensionless bed resistance; a) α_c=45°, b) α_c=75°, c) α_c=105°

شکل ۸ عرض و طول حفره آب‌شستگی نسبت به مقاومت بستر رسوبی در زاویه برخورد و فاصله نسبی برخورد تا سطح آب: a) α_c=45°، b) α_c=75°، c) α_c=105°

در شکل ۹، نیمرخ طولی و عرضی بی‌بعد شده در فاصله‌های برخورد متفاوت برای زاویه برخورد ۴۵ درجه و مقاومت نسبی بستر ۱۳/۲ ارائه شده است. در این شکل،

فراسنجه‌های X/D_{eq}، Y/D_{eq} و Z/D_{eq} به ترتیب راستای طولی، عرضی و ارتفاعی بی‌بعد شده حفره آب‌شستگی می‌باشند. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است، برای نیمرخ طولی حفره، شیب جلوی حفره نسبت به شیب پشتی آن به دلیل اینکه در راستای حرکت جریان قرار گرفته و در معرض تنش برشی بیشتری قرار دارد، ملایم‌تر می‌باشد. همچنین برای نیمرخ عرضی، شیب دو طرف حفره‌ها تا حدودی یکسان است، که نشان‌دهنده تقارن نسبی حفره در راستای عرضی است و می‌تواند به دلیل نیروهای همسان در دو طرف جریان باشد. افزون بر این، افزایش فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب سبب افزایش ارتفاع و طول پشته رسوبی شده است. این پدیده به دلیل کاهش انرژی جریان و رسوب‌گذاری بیشتر در نزدیکی سطح آب رخ می‌دهد. برای هر دو نیمرخ طولی و عرضی حفره نیز با افزایش فاصله برخورد جت‌ها تا سطح آب، کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی مشهود است.

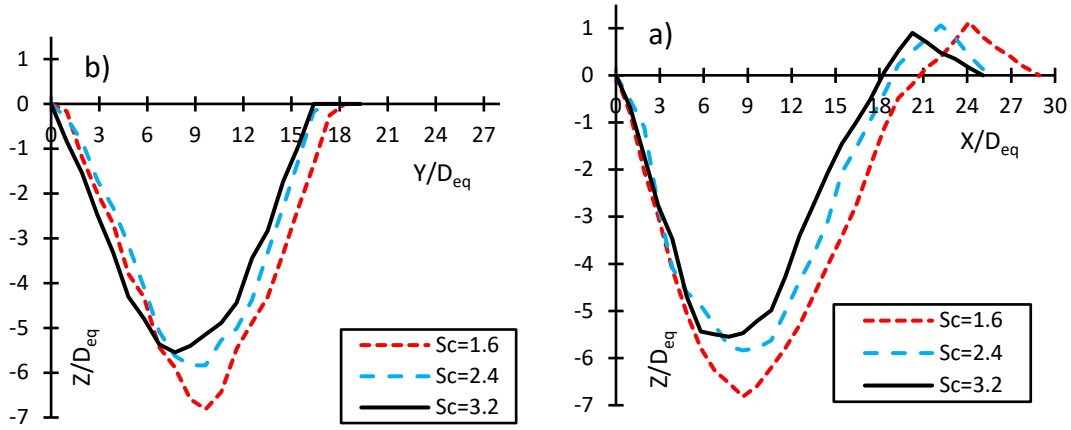

Fig. 9 Dimensionless longitudinal and transverse profiles at different S_c: a) Longitudinal profiles, b) Transverse profiles

شکل ۹ نیمرخ‌های طولی و عرضی بی‌بعد شده در فواصل مختلف برخورد: a) نیمرخ‌های طولی و b) نیمرخ‌های عرضی

جدول ۳ درصد کاهش طول و عرض حفره آب‌شستگی در اثر افزایش S_c در مقاومت نسبی بستر و زاویه‌های برخورد مختلف جت‌ها

Table 3 Percentage reduction in scour hole length and width due to increasing S_c in the relative bed resistance and different jet crossing angles

Δ	α_c	Decrease of Scour hole length (%)	Decrease of Scour hole width (%)
10.9	45	8	10
	75	11	13
	105	13	17
13.2	45	10	13
	75	14	18
	105	18	26
18.6	45	22	15
	75	15	20
	105	20	13

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر فاصله برخورد جت‌های متقاطع متقارن بر حفره آب‌شستگی در بستر رسوبی چسبنده، آزمایش‌هایی با زاویه قائم، دبی نازل جت‌ها و عمق پایاب ثابت انجام گرفت. فراسنجه‌های رطوبت خاک، زاویه برخورد جت‌ها و فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها عبارتند از:

۱. افزایش فاصله برخورد جت‌ها از سطح آب منجر به کاهش عمق، طول و عرض حفره آب‌شستگی شد. به گونه‌ای که افزایش نسبی فاصله برخورد تا سطح آب از ۱/۶ به ۳/۲، منجر به کاهش دست‌کم ۱۶ درصد در

عمق، ۱۰ درصد در عرض و ۸ درصد در طول شده است.

۲. افزایش وزن مخصوص و مقاومت بستر ناشی از افزایش رطوبت نسبی آن، باعث کاهش ابعاد حفره شد. به گونه‌ای که عمق حفره بیش از ۱۲ درصد و طول و عرض حفره بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت.

۳. کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی که در نتیجه استهلاک انرژی بیشتر ناشی از افزایش زاویه جت‌ها می‌باشد، به گونه‌ای است که کمترین میزان ابعاد حفره آب‌شستگی در زاویه برخورد ۱۰۵ درجه رخ داده و در مقایسه با زاویه برخورد ۴۵ درجه بیش از ۱۲۴ درصد عمق حفره و بیش از ۶۷ درصد طول و عرض حفره را کاهش داد.

۴. نتایج نشان داد که شکل حفره آب‌شستگی ایجاد شده به‌صورت بیضوی بوده و با افزایش زاویه برخورد جت‌ها، کشیدگی شکل حفره در راستای طولی بیشتر می‌شود.

۵- منبع‌ها

Ahmad, Q. & Ghani, U. (2024). Experimental investigation of local scour around inclined bridge piers on clay-sand mixed cohesive sediment bed in clear-water conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *49*, 2013-2033.

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

Bollaert, E.F.R. (2002). The influence of plunge pool air entrainment on the presence of free air in rock joints. Proc. Int. Workshop on Rock Scour, Lausanne, Swets & Zeitlinger, Lisse, Switzerland, 137–149.

Choi, S.U. & Choi, S. (2022). Prediction of local scour around bridge piers in the cohesive bed using support vector machines. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *26*(5), 2174-2182.

Dong, C., Yu, G., Zhang, H. & Zhang, M. (2020). Scouring by submerged steady water jet vertically impinging on a cohesive bed. *Ocean Engineering*, *196*, 106781, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106781.

Ghodsian, M. & Nazarimehr, F. (2022). Experimental study of scouring of cohesive sediments caused by free fall jets. *Journal of Hydraulics*, *17*(3), 1-14. (In Persian)

Hassan, Z.F., Karim, I.R. & Al-Shukur, A.H.K. (2020). Effect of interaction between bridge piers on local scouring in cohesive soils. *Civil Engineering Journal*, *6*(4), 659-669.

Link, O., Klischies, K., Montalva, G. & Dey, S. (2013). Effects of bed compaction on scour at piers in sand-clay mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, *139*(9), 1013-1019.

Lodhi, A.S., Jain, R.K. & Sharma, P.K. (2016). Influence of cohesion on scour around submerged dike founded in clay–sand–gravel mixtures. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, *22*(1), 70-87.

Mirzaee, R., Mohammadi, M., Mousavi, S.F., Bagherzadeh, M. & Hosseini, K. (2023). Application of soft computing techniques to estimate the scouring depth formed by crossing jets. *Water Science and Technology*, *87*(8), 1853-1865.

Naini, S., Karami, H. & Hosseini, K. (2022). Experimental investigation and determination of scour dimensions due to symmetric crossing jets. *Journal of Hydraulics*, *17*(2), 107-125. (In Persian)

Pagliara, S., Hager, W.H. & Minor, H.E. (2006). Hydraulics of plane plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, *132*(5), 450-461.

Pagliara, S. & Palermo, M. (2008). Plane plunge pool scour with protection structures. *Journal of Hydro-environment Research*, *2*(3), 182-191.

Pagliara, S., Roy, D. & Palermo, M. (2011). Scour due to crossing jets at fixed vertical angle. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *137*(1), 49-55.

Pagliara, S., Palermo, M. & Roy, D. (2012). Stilling basin erosion due to vertical crossing jets. *Journal of Hydraulic Research*, *50*(3), 290-297.

Pagliara, S. & Palermo, M. (2017). Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets. *Water Science and Engineering*, *10*(1), 17-24.

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the origina work is properly cited.