Iranian Water Research Journal

Shahrekord University

Vol. 19/ No. 2/ Serial No. 57/ Summer 2025
https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15143.2672

Comparison of the scouring of symmetrical crossing jets with single jet on cohesive bed

F. Aria[1], Kh. Hosseini[2]* and S .F. Mousavi[3]

Extended Abstract

Introduction:
Scour in cohesive sediment beds under hydraulic jets is a critical challenge in hydraulic engineering due to the complex interplay of jet energy and sediment properties. Cohesive beds, dominated by fine-grained clay, exhibit unique erosion resistance driven by inter-particle bonding, making scour prediction and control vital for the stability of hydraulic structures like dams and plunge pools. The novelty of this study lies in its comparative analysis of scour induced by single and symmetric crossing jets on a purely cohesive clay bed, a relatively underexplored area. Unlike previous research focusing on non-cohesive or mixed beds, this study investigates the specific effects of jet configuration, impingement angles, bed moisture, and nozzle distance on scour dimensions under controlled conditions. By examining a cohesive bed with 90% fines and 10% sand, the study addresses a critical gap in understanding scour dynamics in fine-grained sediments. The experimental findings aim to provide innovative insights into optimizing plunge pool design and developing effective scour control strategies, enhancing the resilience of hydraulic infrastructure in cohesive sediment environments.

Methods:
Experiments were conducted in a 16 m long, 1 m wide, and 0.8 m high rectangular flume with transparent plexiglas walls for direct observation of scour processes. The flume included an adjustable tailgate to maintain a 12 cm tailwater depth, and a pumping system to provide a 2 L/s steady flow rate, measured by an electromagnetic flowmeter. Circular nozzles (2.2 cm diameter for crossing jets; 3.11 cm equivalent diameter for single jets) were mounted on adjustable supports to maintain a fixed vertical angle of 85° for both single and crossing jets, with crossing angles set at 45°, 75°, and 105° for crossing jets only. The nozzle distances from the water surface were adjusted to 8, 10.5, and 13 cm. The cohesive bed, with 90% clay (illite, montmorillonite, kaolinite) and 10% fine sand, had a median particle size of 0.0126 mm, plastic limit of 20%, and liquid limit of 35%. Bed moisture contents (13%, 16%, 19%) were prepared by mixing soil with water using an electric mixer, followed by compaction in six 5 cm layers to a 30 cm thickness. A hand roller ensured uniform compaction, and a vane shear test verified bed shear strength. Scour dimensions (depth, length, width) were measured using a laser meter with 1 mm accuracy.The experiments were conducted for 180 minutes to ensure that scour had reached equilibrium. Dimensional analysis focused on scour characteristics as functions of crossing angle, moisture content, and nozzle distance, with constant flow rate, tailwater depth, and vertical jet angle.

Results:
The results revealed distinct scour patterns between single and crossing jets. Single jets, due to concentrated kinetic energy, produced deeper scour holes, with depths up to 30% greater than those from crossing jets. At a dimensionless fall height of 4.18 and 13% moisture content, single jets produced maximum scour depth. In contrast, crossing jets at 105° and 19% moisture content exhibited minimal scour, while no scour observed at higher moisture levels (16% and 19%) and a fall height of 4.18 due to increased bed resistance. Crossing jets reduced scour depth by 45–66% at 75° and up to 100% at 105° compared with single jets, attributed to energy dissipation from jet collision, which forms a radial flow with reduced shear stress. Moisture content

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
*** Corresponding Author: khhoseini@semnan.ac.ir**
Received: 2025/03/08 Accepted: 2025/05/18

significantly influenced scour, with a 12–55% reduction in depth and 33–40% in length as moisture increased from 13% to 19%. This reduction is attributed to the reflecting enhanced cohesion from montmorillonite clay in the bed material. Scour length followed similar trends, with single jets producing longer holes (up to 14% increase with fall height) and crossing jets reducing length by 19–100% at 105°. Width was also lower for crossing jets, with reductions of 24–100% at higher angles and moisture levels. These findings align with previous studies, confirming that increased fall height reduces relative scour depth due to energy dissipation. The study highlights the effectiveness of crossing jets in minimizing scour on cohesive beds, particularly at higher impingement angles and moisture contents, providing a basis for optimizing plunge pool designs.

Conclusion:
This study highlights the contrasting scour behaviors of single and crossing jets on cohesive sediment beds, emphasizing the role of jet configuration, bed moisture, and nozzle distance in scour dynamics. Regarding the results, single jets, with focused energy, produced deeper, longer, and wider scour holes, with maximum dimensions at 13% moisture and higher fall heights. Crossing jets, particularly at 105°, significantly reduced scour (up to 100% in depth, length, and width) due to energy dissipation, with minimal scour at 19% moisture. Increased moisture content enhanced bed cohesion, reducing scour dimensions across both jet types. These findings offer valuable insights for hydraulic engineers, enabling the design of plunge pools and spillways that mitigate scour risks in cohesive bed environments. The results advocate for the use of crossing jets in scenarios requiring scour control, particularly in high-moisture conditions. Future research should explore numerical modeling to validate these experimental outcomes and investigate additional parameters, such as varying flow rates and bed compositions, to further refine scour prediction models for cohesive sediments.

Keywords: Scouring, Cohesion bed, Crossing Jet, Single jet

Citation: Aria, F., Mousavi S .F. and Hosseini, Kh., 2025. Comparison of the scouring of symmetrical crossing jets with single jet on cohesive bed. Iranian Water Research Journal. 57(2). Pp. 67-78.
https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15143.2672

مجله پژوهش آب ایران

جلد ۱۹/ شماره ۲/ پیاپی ۵۷/ تابستان ۱۴۰۴
https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15143.2672

مقایسه ابعاد حفره آب‌شستگی ناشی از جت منفرد و متقاطع متقارن روی بستر رسوبی چسبنده

فرهاد آریا[۱]، خسرو حسینی[۲*] و سید فرهاد موسوی[۳]

چکیده

بررسی آب‌شستگی در بسترهای رسوبی چسبنده، به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی این پدیده، نیازمند مطالعات آزمایشگاهی دقیق است. این بررسی‌ها امکان تخمین دقیق ابعاد آب‌شستگی و پیش‌بینی مخاطرات احتمالی را فراهم می‌سازد. به همین منظور در این مطالعه به بررسی و مقایسه آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن و جت منفرد بر بستر رسوبی چسبنده با خاک رسی، تحت شرایط هیدرولیکی یکسان پرداخته شده است. آزمایش‌ها با دبی، عمق پایاب، زاویه قائم جت و قطر نازل ثابت انجام شد و تأثیر زاویه برخورد جت‌ها (۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه)، رطوبت بستر (۱۳، ۱۶ و ۱۹ درصد) و فاصله نازل تا سطح آب (۸، ۱۰/۵ و ۱۳ سانتی‌متر) بر ابعاد حفره آب‌شستگی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که جت‌های منفرد به دلیل تمرکز انرژی، فرسایش سریع‌تر و عمیق‌تری (تا ۳۰ درصد بیشتر از جت‌های متقاطع) ایجاد می‌کنند و پشته‌های رسوبی قابل‌توجهی در پایین‌دست شکل می‌دهند. در مقابل، فرسایش ناشی از جت‌های متقاطع با استهلاک انرژی، سبب ایجاد ابعادی کوچک‌تر برای حفره می‌گردند، به‌طوری‌که ابعاد حفره در زاویه ۷۵ درجه تا ۴۵ درصد و در زاویه ۱۰۵ درجه تا ۶۶ درصد کمتر از جت منفرد است. افزایش رطوبت بستر نیز منجر به کاهش عمق و طول حفره به ترتیب ۱۲ و ۳۳ درصد در جت‌های منفرد و تا ۵۵ و ۴۰ درصد در جت‌های متقاطع (زاویه ۱۰۵ درجه) شده است. همچنین، افزایش فاصله نازل در جت منفرد سبب افزایش ۱۶ درصدی در عمق و در جت‌های متقاطع تا ۵۴ درصد کاهش را نسبت به جت منفرد نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، بستر چسبنده، جت متقاطع، جت منفرد.

ارجاع: آریا، ف.، حسینی، خ. و موسوی، س. ف. ۱۴۰۴. مقایسه ابعاد حفره آب‌شستگی ناشی از جت منفرد و متقاطع متقارن روی بستر رسوبی چسبنده. مجله پژوهش آب ایران.۵۷(۲). صص ۶۷-۷۸. https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15143.2672.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
* **نویسنده مسئول:** khhoseini@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

مقدمه

جت‌های خروجی از سدها نقش حیاتی در مدیریت ایمن و کارآمد سدها ایفا می‌کنند. این جت‌ها با هدف کنترل سطح آب مخزن، تخلیه اضطراری در شرایط بحرانی، شستشوی رسوبات تجمع‌یافته، هوادهی جریان برای جلوگیری از کاویتاسیون و پراکندگی انرژی جریان به‌منظور کاهش فرسایش در پایین‌دست طراحی می‌شوند. عملکرد مناسب این جت‌ها نه‌تنها در افزایش بهره‌وری عملکرد سد مؤثر است، بلکه نقشی کلیدی در حفظ پایداری سازه و جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی و سازه‌ای در پایین‌دست دارند (Chanson, 2004).

در طراحی سدها، انتخاب نوع جت خروج برای تخلیه آب از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که الگوی جریان ناشی از آن مستقیماً بر پایداری بستر پایین‌دست و میزان آب‌شستگی تأثیر می‌گذارد. جت‌های متقاطع به‌دلیل پراکندگی بهتر انرژی و کاهش تمرکز تنش‌های برشی، می‌توانند فرسایش موضعی را نسبت به جت‌های منفرد کاهش دهند، اما در عین حال با پیچیدگی‌های طراحی، هزینه بالاتر و رفتار هیدرودینامیکی غیرخطی همراه هستند. از سوی دیگر، جت‌های منفرد با ساختاری ساده‌تر و توانایی ایجاد جریان متمرکز، برای شرایطی که نیاز به تخلیه پرانرژی در یک مسیر مشخص است، مناسب‌تر خواهند بود. مقایسه عملکرد این دو نوع جت در شرایط مختلف، به درک بهتر سازوکارهای آب‌شستگی و بهینه‌سازی طراحی سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی می‌کند (Bleninger, 2007).

آب‌شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی از جمله مواردی است که می‌تواند پایداری سازه‌های هیدرولیکی را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین مهندسین هیدرولیک با آگاهی از ابعاد حفره آب‌شستگی و تاثیر آن بر پایداری سازه می‌توانند با تصمیم‌گیری درست و مناسب، سازه را از هر گونه مخاطرات آتی حفظ نمایند. با توجه به کمبود مدارک علمی در مورد جت‌های ریزشی روی بستر چسبنده ریزدانه بدون ماسه و ضرورت تخمین ابعاد حفره آب‌شستگی، ارائه راهکار عملی و اقتصادی به منظور کنترل آب‌شستگی و طراحی حوضچه‌های استغراق ضروری است. برای جت‌های ریزشی سدها در شرایطی که عمق پایاب نامشخص و یا ابعاد حوضچه آرامش زیاد بوده و مصالح بستر مناسب باشد، از حوضچه استغراق استفاده می‌شود. بستر با خاک چسبنده از آن جایی که حاوی رس و متشکل از کانی‌های مختلف است، پیچیدگی‌هایی دارد و می‌تواند مهندسین هیدرولیک را در طراحی با مشکلات و چالش‌هایی مواجه سازد. حوضچه‌های استغراق طبیعی بایستی به گونه‌ای درنظر گرفته شوند که ابعاد آب‌شستگی ناشی از آن به فونداسیون سد آسیبی نرساند. ایجاد این حوضچه‌ها می‌تواند ناشی از جت منفرد و یا جت‌های متقاطع باشد؛ لذا بررسی و مقایسه ابعاد آب‌شستگی ناشی از آن‌ها روی بستر چسبنده حائز اهمیت است.

Mazurek et al. (2001) آب‌شستگی جت روی خاک چسبنده با ۴۰ درصد رس، ۵۳ درصد لای و ۷ درصد ماسه ریز را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که پس از حدود ۱۰۰ ساعت، حفره آب‌شستگی به وضعیت تعادل می‌رسد و به غیر از لحظه شروع و پایان آزمایش‌ها، رابطه خطی میان توسعه ابعاد مختلف حفره و لگاریتم زمان وجود دارد. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که با این که جت افقی مورد استفاده نوعی جت دوبعدی بوده، اما حفره ایجاد شده سه‌بعدی بود و در عرض کانال یکنواخت نمی‌باشد. Ansari et al. (2003) آب‌شستگی جت عمودی دایروی را روی بستر رسوبی چسبنده بررسی کردند. نتایج نشان داد که مشخصات آب‌شستگی در رسوبات چسنده با شاخص خمیری مخالف صفر، در شرایط جریان یکسان، کاملاً متفاوت از رسوبات غیرچسبنده است. آن‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق خود، رابطه‌ای برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی برای جت عمودی مستغرق روی بستر رسوبی چسبنده ارائه نمودند. D'Agostino and Ferro (2004) به بررسی تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی در سرریز و سازه‌های تثبیت‌کننده شیب بستر پرداختند و حداکثر ارتفاع تپه آب‌شستگی و فاصله حداکثر ارتفاع تپه آب‌شستگی از سرریز را تخمین زدند و رابطه‌ای را برای تخمین فاصله حداکثر عمق آب‌شستگی از سرریز ارائه نمودند. Pagliara et al. (2006) آب‌شستگی حوضچه استغراق ناشی از جت آزاد را روی بستر رسوبی غیرچسبنده یکنواخت و غیریکنواخت بررسی نمودند و نتیجه گرفتند عمق پایاب با عمق حفره آب‌شستگی نسبت عکس دارد؛ به گونه‌ای که افزایش عمق پایاب منجر به کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. آنها شکل جت را کم‌تأثیرترین پارامتر روی حفره آب‌شستگی و عدد فرود چگال را مؤثرترین پارامتر بیان کردند.

Dey and Raikar (2007) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی و ارزیابی آب‌شستگی پایین‌دست جت ریزشی ناشی از یک شیب‌شکن قائم پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که عدد فرود چگال مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر عمق حفره آب‌شستگی است. همچنین، با افزایش اندازه ذرات رسوبی بستر و عمق پایاب، ابعاد حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد. Pagliara et al. (2008) به بررسی ویژگی‌های جریان اصلی آب‌شستگی سه‌بعدی در حوضچه استغراق برای جریان ماندگار پرداختند. آنها گزارش

کردند که حداکثر عرض آب‌شستگی رابطه مستقیم با عدد فرود چگال، زاویه جت و عمق پایاب دارد.(2010) .Xue et al به بررسی عددی آب‌شستگی جت مسطح مستغرق خروجی از زیر دریچه قائم پرداختند و نتیجه گرفتند که مهمترین و مؤثرترین پارامتر در عمق حفره آب‌شستگی عدد فرود چگال است. (2011) .Pagliara et al آب‌شستگی ناشی از برخورد دو جت متقاطع متقارن را به صورت آزمایشگاهی بررسی و گزارش کردند که آب‌شستگی پس از ۴۰ دقیقه به شرایط تعادل می‌رسد. همچنین پروفیل آب‌شستگی ایجاد شده توسط جت متقاطع متقارن را با جت منفرد مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که جت‌های متقاطع در شرایط خاص می‌توانند تأثیر بیشتری بر فرسایش بستر داشته باشند. (2012) .Pagliara et al به بررسی آب‌شستگی حوضچه استغراق ناشی از برخورد دو جت متقاطع قائم پرداختند. نتایج نشان داد که برای عمق پایاب زیاد، عمق حفره آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع کمتر از جت منفرد بوده و در عمق پایاب کم، حفره آب‌شستگی ناشی از جت متقاطع بزرگتر و برابر با عمق آب‌شستگی جت منفرد است.

(2017) .Armaghani et al تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از برخورد جت قائم با رسوبات غیرچسبنده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق دینامیک حفره آب‌شستگی با افزایش ارتفاع جت کاهش می‌یابد و ابعاد حفره آب‌شستگی با عدد فرود جت رابطه مستقیمی دارد. Singh and Ahmad (2019) برای مخلوط رسوبی رس- لای- ماسه به صورت آزمایشگاهی نرخ انتقال و پروفیل بستر را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که درصد رس موجود در رسوبات تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انتقال رسوبات دارد. همچنین دریافتند که زمان لازم برای رسیدن بستر به حالت پایدار در خاک چسبنده نسبت به خاک دانه‌ای بیشتر بوده و زمان تعادل با افزایش درصد رس در مخلوط افزایش می‌یابد.

(2020) .Dong et al آب‌شستگی جت قائم برخوردی مستغرق را روی بستر رسوبی چسبنده به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها برای تخمین عمق و عرض حفره آب‌شستگی روابطی ارائه نمودند. (2022) .Naini et al آب‌شستگی جت‌های متقاطع روی رسوبات غیرچسبنده غیر یکنواخت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که در عمق پایاب کم، حفره آب‌شستگی در زوایای برخورد ۷۵ و ۱۱۰ درجه دارای عدم تقارن در شکل است.

Lee and Choi (2022) تحقیقاتی در زمینه مکانیزم‌های آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع غوطه‌ور روی بسترهای رسوبی چسبنده انجام دادند. این پژوهش‌ها نشان داد که توزیع تنش‌های برشی و الگوی جریان جت‌های متقاطع تأثیر زیادی بر میزان و الگوی آب‌شستگی دارند. (2023a) .Mirzaee et al تاثیر درصد رطوبت و زاویه برخورد جت‌های متقاطع متقارن بر آب‌شستگی بستر چسبنده را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش زاویه برخورد جت‌ها و رطوبت خاک، ابعاد حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد، به طوری که زاویه برخورد ۴۵ درجه، در هر سه رطوبت خاک، عمق حفره آب‌شستگی را بیش از ۹۷ درصد و در مقایسه با زاویه برخورد ۷۵ درجه نیز بیش از ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش رطوبت از ۱۳ به ۱۹ درصد، بیش از ۱۹ درصد عمق حفره آب‌شستگی را کاهش داد. (2023b) .Mirzaee et al با استفاده از روش محاسبات نرم، آب‌شستگی حوضچه استغراق جت‌های متقاطع متقارن را بررسی نموده و نشان دادند که عمق پایاب و زاویه قائم جت به ترتیب تأثیرگذارترین و کم‌تأثیرترین پارامتر روی عمق حفره آب‌شستگی هستند. Zhang and Wang (2024) با استفاده از مدل‌های عددی به شبیه‌سازی توسعه حفره آب‌شستگی تحت جت‌های غوطه‌ور روی بسترهای رسوبی چسبنده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های عددی قابلیت پیش‌بینی دقیق فرآیند آب‌شستگی را دارند و می‌توانند برای طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند. (2024) .Feng et al با استفاده از الگوریتم SPH، شبیه‌سازی عددی برخورد جت‌های آبی پالسی و پیوسته (جریان غیر دائم و دائم) با بستر رسوبی چسبنده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد جت‌های پالسی کارایی بهتری در فرسایش بستر دارند و الگوریتم SPH دقت بالایی در مدل‌سازی این فرآیند ارائه می‌دهد. (2024) .Deitrick et al تأثیر تلاطم ناشی از پوشش گیاهی بر فرسایش رسوبات چسبنده طبیعی را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تلاطم گیاهی تأثیر قابل‌توجهی بر فرسایش این رسوبات ندارد و عوامل دیگر مانند ویژگی‌های رسوب، نقش مهم‌تری در فرآیند فرسایش ایفا می‌کنند. Ahmad and Ghani (2024) به بررسی تجربی فرسایش موضعی اطراف پایه‌های پل شیب‌دار در بستر رسوب چسبنده مخلوط خاک رس و ماسه در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه شیب پایه‌ها و ترکیب رسوب بر عمق و الگوی فرسایش تأثیر قابل‌توجهی دارد.

مطالعات قبلی بر ارزیابی آب‌شستگی ناشی از جت‌های منفرد و تأثیر پارامترهایی مانند عمق پایاب، عدد فرود و دانه‌بندی رسوبات در بسترهای غیرچسبنده متمرکز بوده‌اند. برخی پژوهش‌ها نیز تأثیر زاویه برخورد و استغراق جت‌های متقاطع را در کاهش فرسایش مورد مطالعه قرار داده‌اند، اما اغلب این

تحقیقات بر بسترهای غیرچسبنده یا مخلوطی از رس و ماسه انجام شده است. مطالعه حاضر به‌طور خاص به مقایسه آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن و جت منفرد روی بستر رسوبی چسبنده در شرایط هیدرولیکی ثابت می‌پردازد. در این پژوهش، تأثیر پارامترهایی مانند زاویه برخورد جت‌های متقاطع، رطوبت بستر رسوبی چسبنده و فاصله نازل جت تا سطح آب بر ابعاد حفره آب‌شستگی بررسی شده است تا به کمک این نتایج بتوان راهکارهای بهتری برای کنترل فرسایش در سازه‌های هیدرولیکی ارائه نمود.

مواد و روش‌ها

۱- تحلیل ابعادی

بر اساس شکل ۱، پارامترهای مؤثر را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ نوشت:

$$h_s, b_s, L_s = f_1(H, \alpha_v, \alpha_c, T, \rho, \Delta g, Q, d_{50}, w, D_{eq}) \quad (۱)$$

که در آن، h_s، b_s و L_s به ترتیب عمق، عرض و طول حفره آب‌شستگی بوده و پارامترهای وابسته هستند. همچنین پارامترهای مستقل عبارتند از H؛ ارتفاع ریزش جت، α_v؛ زاویه قائم جت، α_c؛ زاویه برخورد جت‌های متقاطع، T؛ عمق پایاب، Δg؛ اختلاف چگالی نسبی آب و خاک در شتاب گرانش، Q؛ دبی جریان، d_{50}؛ اندازه متوسط ذرات بستر، w؛ رطوبت تراکم بستر و D_{eq}؛ قطر نازل جت منفرد یا قطر معادل دو جت متقاطع (قطری است که از برابری سطح مقطع یک جت منفرد با مجموع سطح مقطع دو جت متقاطع بدست می‌آید).

$$A_{eq} = 2A \rightarrow \frac{\pi}{4}D_{eq}^2 = 2\times(\frac{\pi}{4}D^2) \rightarrow D_{eq} = \sqrt{2}D \quad (۲)$$

با استفاده از روش پی-باکینگهام و ساده‌سازی، پارامترهای بی‌بعد بصورت رابطه ۳ ارائه می‌شود:

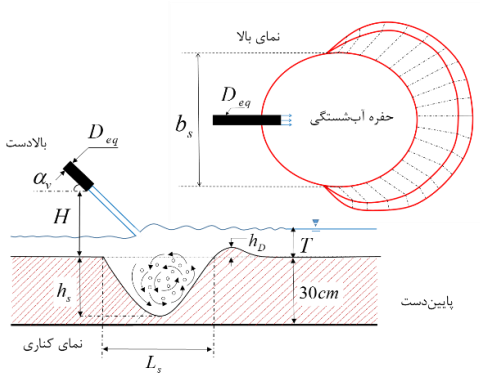
$$\frac{h_s, b_s, L_s}{D_{eq}} = f_2(\frac{H}{D_{eq}}, \alpha_v, \alpha_c, \frac{T}{D_{eq}}, Fr_{d50}, w, \mathrm{Re}) \quad (۳)$$

در رابطه بدست آمده Re و Fr_{d50} به ترتیب عدد رینولدز و عدد فرود چگال ذره می‌باشد. با توجه به اینکه جریان آشفته است و قطر ذرات و دبی جریان ثابت هستند، می‌توان از تأثیر آن‌ها صرف‌نظر کرد. همچنین، با ثابت بودن عمق پایاب و زاویه قائم جت‌ها، تأثیر آن‌ها نیز قابل چشم‌پوشی است.بنابراین رابطه نهایی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

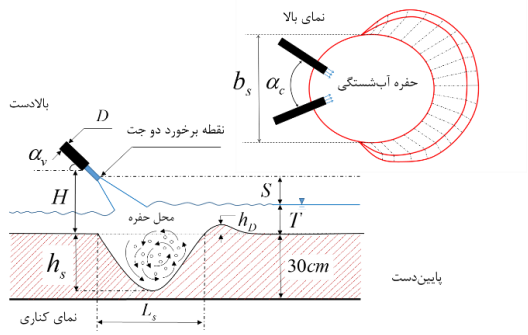
$$\frac{h_s, b_s, L_s}{D_{eq}} = f_3(\frac{H}{D_{eq}}, \alpha_c, w) \quad (۴)$$

این پژوهش با هدف مقایسه آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن و جت منفرد بر بستر رسوبی چسبنده تحت شرایط هیدرولیکی کنترل‌شده طراحی گردید.

آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاهی انجام شد تا تأثیر متغیرهای کلیدی شامل نوع جت (منفرد و متقاطع)، زاویه برخورد جت‌ها (۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه)، رطوبت تراکم بستر (۱۳، ۱۶ و ۱۹ درصد) و فاصله نازل تا سطح آب (۸، ۱۰/۵ و ۱۳ سانتی‌متر) بر ابعاد حفره آب‌شستگی (عمق، طول و عرض) ارزیابی شود. متغیرهای ثابت شامل دبی (۲ لیتر بر ثانیه)، عمق پایاب (۱۲ سانتی‌متر)، قطر نازل جت‌های متقاطع (۲/۲ سانتی‌متر)، قطر معادل جت منفرد حاصل از مجموع سطح مقطع دو جت متقاطع (۳/۱۱ سانتی‌متر) و زاویه قائم جت منفرد (۸۵ درجه) در تمامی آزمایش‌ها حفظ شد تا شرایط هیدرولیکی یکسان باشد. فرضیات اصلی شامل جریان دائمی، رطوبت یکنواخت در بستر و برقراری پیوستگی بین لایه‌های خاک پس از تراکم بود. در ادامه، جزئیات تجهیزات، مواد و مصالح مصرفی و روش انجام آزمایش به‌صورت یکپارچه ارائه می‌شود.



الف) جت منفرد



ب) جت متقاطع

شکل ۱- شماتیک مدل تحقیق حاضر

۲- تجهیزات

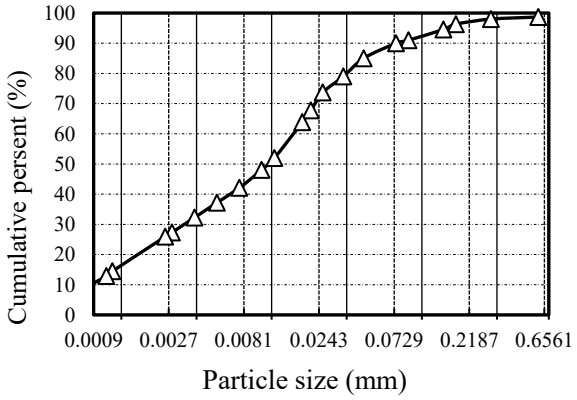
آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با ۱۶ متر طول، ۱ متر عرض و ۰/۸ متر ارتفاع انجام شد. دیواره‌های این فلوم از پلکسی‌گلاس شفاف بوده تا امکان مشاهده مستقیم فرآیند آب‌شستگی را فراهم کند (شکل۲). فلوم مجهز به دریچه انتهایی برای تنظیم عمق پایاب و سیستم پمپاژ برای تأمین جریان است. نازل‌های جت متقاطع به شکل دایره‌ای با قطر ۲/۲ سانتی‌متر از جنس فولاد مقاوم طراحی و بر پایه‌های قابل تنظیم نصب شدند تا

زاویه و ارتفاع آن‌ها دقیقاً کنترل شود. تأمین و اندازه‌گیری دبی ثابت ۲ لیتر در ثانیه توسط پمپ و دبی‌سنج الکترومغناطیسی انجام شد. برای اندازه‌گیری دقیق ابعاد حفره آب‌شستگی (عمق، طول و عرض)، از متر لیزری با برد ۳۰ متر و دقت یک میلی‌متر استفاده شد. آماده‌سازی بستر نیز با استفاده از غلتک دستی برای متراکم‌سازی لایه‌های خاک و همزن برقی برای مخلوط کردن خاک با آب و تنظیم رطوبت انجام شد. مقاومت برشی بستر پس از متراکم‌سازی با دستگاه برش پره دستی ارزیابی شد.

شکل۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی

۳- مواد و مصالح مصرفی

بستر آزمایش از خاک رس چسبنده (خاک رس ساختمانی) با درصد گذرنده از الک نمره ۲۰۰ بالا (۹۰ درصد) و ده درصد ماسه ریز تهیه شد. حدخمیری و حد روانی خاک به ترتیب ۲۰ و ۳۵ درصد به دست آمد. بر اساس آزمایش پراش اشعه ایکس خاک حاوی کانی‌های رسی ایلیت، مونتموریلونیت و کائولینیت به میزان تقریبی ۱۸ درصد می‌باشد. دانه‌بندی خاک با استفاده از آزمایش هیدرومتری تعیین شد و قطر متوسط ذرات (d_{50}) حدود ۰/۰۱۲۶ میلی‌متر به دست آمد (شکل۳). رطوبت بهینه خاک نیز از آزمایش تراکم استاندارد (پروکتور) برابر با ۱۶ درصد تعیین شد.



شکل۳- نمودار دانه‌بندی خاک

۴- روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در مراحل مشخص و با کنترل دقیق پارامترها اجرا شدند تا داده‌های دقیق‌تری برای مقایسه جت‌های منفرد و متقاطع تولید شود. ابتدا، بستر رسوبی آماده شد. خاک رس با استفاده از همزن برقی با آب مخلوط گردید تا به رطوبت مورد نظر (۱۳، ۱۶ یا ۱۹ درصد) برسد. به منظور دستیابی به بستر یکنواخت و متراکم، خاک در۶ لایه ۵ سانتی‌متری درون فلوم ریخته و با غلتک دستی متراکم گردید. سطح هر لایه با ابزار دستی زبر شد تا چسبندگی بین لایه‌ها حفظ شود. ضخامت کل بستر پس از متراکم‌سازی به ۳۰ سانتی‌متر رسید. لازم به ذکر است که در دبی‌های کمتر از ۲ لیتر بر ثانیه، در اکثر آزمایش‌های مربوط به جت‌های متقاطع (به‌ویژه در زوایای برخورد زیاد)، آب‌شستگی رخ نمی‌داد. از طرفی برای دبی‌های بیشتر از ۲ لیتر بر ثانیه در جت منفرد، عمق آب‌شستگی فراتر از ۳۰ سانتی‌متر ارتفاع بستر می‌شد. برای سایر پارامترهای ثابت نیز چنین شرایطی وجود داشت و محدوده متغیرهای مستقل نیز بر همین اساس انتخاب شده است. مشخصات بستر ساخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱-مشخصات بستر ساخته شده در رطوبت‌های مختلف

رطوبت (٪)	وزن مخصوص خشک بستر (kN/m^3)	مقاومت پرش پره (kPa)
۱۳	۱۵/۱	۰/۹۸
۱۶	۱۷/۲۶	۱/۴۷
۱۹	۱۷/۳۶	۲/۴۵

پس از آماده‌سازی بستر در رطوبت‌های مختلف، به مدت ۳ ساعت اشباع گردید. نازل‌های جت نصب و فاصله نازل جت‌ها تا سطح آب برای هر دو نوع جت در سه سطح ۸، ۱۰/۵ و ۱۳ تنظیم شد تا تأثیر فاصله نازل جت تا سطح آب بررسی شود. لازم به ذکر است که در جت‌های متقاطع تنظیم فاصله نازل جت تا سطح آب به‌گونه‌ای بود که دو جت با زاویه‌های تقاطع ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ درجه در حد فاصل بین نازل تا سطح آب در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متری تا سطح آب با هم برخورد داشته باشند. قبل از شروع آزمایش یک صفحه گالوانیزه روی بستر قرار داده شد تا از آب‌شستگی اولیه جلوگیری شود. در تمامی آزمایش‌ها دبی ۲ لیتر بر ثانیه توسط پمپ تأمین گردید، در حالی که عمق پایاب با دریچه انتهایی روی ۱۲ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شد. مدت زمانی که طی آن فرآیند آب‌شستگی در اطراف یک سازه یا محل برخورد جت به بستر به حداکثر

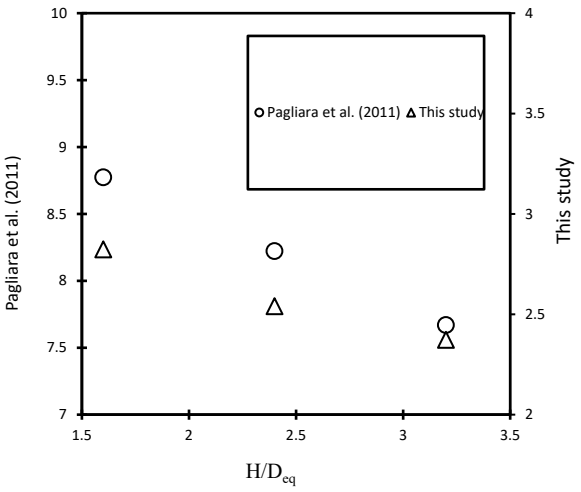
عمق خود رسیده و پس از آن تغییرات قابل توجهی در عمق یا شکل حفره ایجاد نمی‌شود، زمان تعادل آب‌شستگی نامیده می‌شود (Melville and Chiew, 1999). در تحقیق حاضر یک سری آزمایش‌هایی در شرایط بحرانی و زمان‌های متفاوت انجام و پس از آن مشخص شد که فرآیند آب‌شستگی پس از مدت ۱۸۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. بنابراین زمان انجام آزمایش در تحقیق حاظر ۱۸۰ دقیقه انتخاب شد.

نتایج و بحث

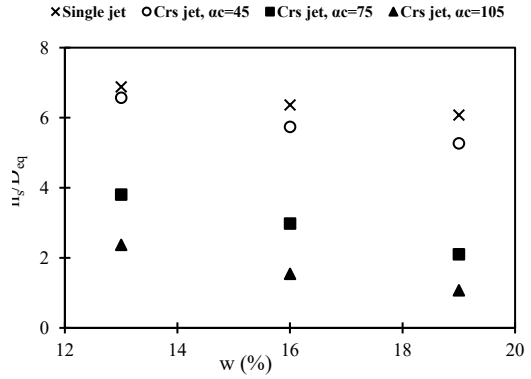
۱- عمق حفره آب‌شستگی

در شکل‌های ۵ تا ۷، نتایج عمق حفره آب‌شستگی برای ارتفاع‌های ریزش بی‌بعد مختلف نشان داده شده است. همچنین درصد کاهش عمق حفره آب‌شستگی جت متقاطع نسبت به جت منفرد در جدول ۲ نمایش داده شده‌است. همانگونه که در این جدول و شکل‌ها دیده می‌شود، جت‌های متقاطع در مقایسه با جت منفرد، عمق حفره کمتری ایجاد نموده و با افزایش زاویه برخورد جت متقاطع، نرخ کاهش عمق حفره بیش‌تر می‌گردد. با برخورد جت‌های متقاطع، یک جریان تیغه‌ای به‌صورت شعاعی ایجاد شده که با افزایش زاویه برخورد شعاع ایجاد شده بیشتر می‌شود. در اثر این برخورد هوای زیادی وارد جریان شده و انرژی جنبشی جت‌ها مستهلک شده و همین امر منجر به کاهش تنش برشی اعمالی به بستر می‌شود و به دنبال آن، عمق حفره کاهش می‌یابد. برای ارتفاع ریزش بی‌بعد ۳/۳۷ و ۴/۱۸ (شکل‌های ۶ و ۷) در زاویه برخورد ۱۰۵ درجه در جت‌های متقاطع و رطوبت‌های ۱۶ و ۱۹ درصد بستر بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱ به دلیل افزایش مقاومت بستر و کاهش انرژی جنبشی آب‌شستگی رخ نداده است. از آنجایی که رطوبت بهینه خاک برابر ۱۶ درصد است، لذا انتظار می‌رفت حداقل عمق حفره آب‌شستگی در این شرایط رخ دهد، ولی اینگونه نبود. با توجه به این که انرژی تراکم تحقیق حاضر کمتر از انرژی تراکم بهینه آزمایش تراکم استاندارد است، لذا این امر سبب می‌شود تا خاک با رطوبتی بالاتر از رطوبت بهینه آزمایش تراکم به حداکثر وزن مخصوص خشک برسد. از نتایج جدول ۱ نیز مشخص است که در رطوبت‌های ۱۶ و ۱۹ درصد، بستر ساخته شده وزن مخصوص خشک تقریباً یکسانی دارند. از این رو، رطوبت بهینه تحت انرژی تراکم تحقیق حاضر مابین دو رطوبت ۱۶ و ۱۹ درصد رخ می‌دهد. از طرفی در دو رطوبت متفاوت که وزن مخصوص خشک یکسانی دارند، بستر در رطوبتی که بالاتر از رطوبت بهینه است، به دلیل وجود کانی رسی مونتموریلونیت (که با جذب آب پیوندهای قوی‌تری بین ذرات ایجاد می‌کند) چسبندگی بیشتری دارد. در رطوبت کمتر از رطوبت بهینه، کمبود آب منجر به کاهش چسبندگی و رفتار تردتر خاک می‌شود و خاک بیشتر به اصطکاک داخلی وابسته است. بنابراین همین امر سبب شده است تا با افزایش رطوبت بستر، مقاومت بستر افزایش یافته و عمق حفره آب‌شستگی کاهش یابد.

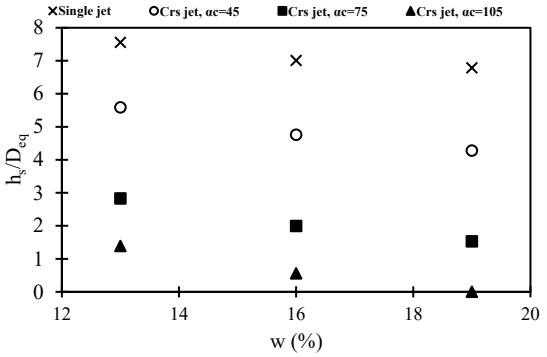
به منظور مقایسه نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های تحقیقات پیشین، در آب‌شستگی جت‌های متقاطع، تاثیر ارتفاع ریزش نسبی روی عمق نسبی حفره در مقایسه با مطالعه Pagliara et al. (2011) در شکل ۴ ارائه شده است. هر دو مطالعه با زاویه برخورد ۷۵ درجه انجام شده‌اند، اما در نوع بستر متفاوت هستند. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج هر دو پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ریزش نسبی جت‌ها (فاصله نقطه برخورد جت‌ها تا سطح آب)، عمق نسبی حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد. اختلاف مقادیر مشاهده‌شده ناشی از تفاوت در ماهیت بستر و سایر شرایط هیدرولیکی جریان است.



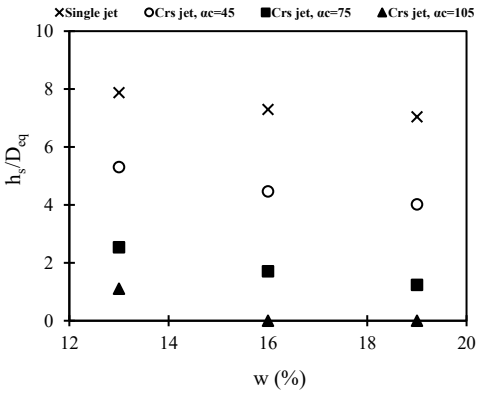
شکل ۴. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های تحقیق Pagliara et al. (2011)



شکل ۵- مقایسه عمق حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد ۲/۵۷



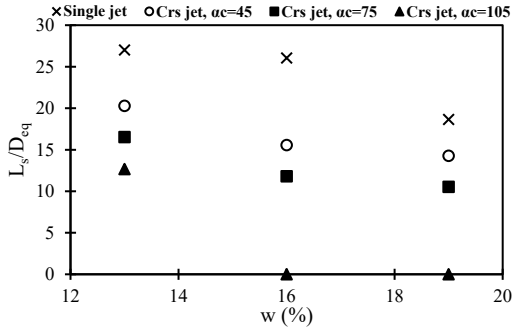
شکل ۶- مقایسه عمق حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد ۳/۳۷



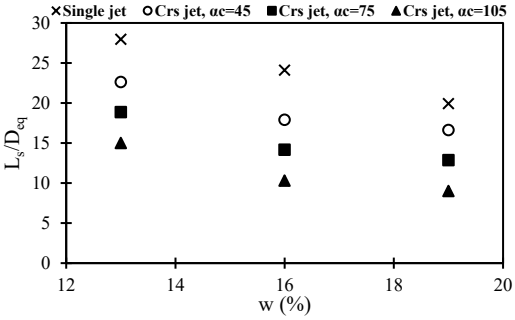
شکل ۷- مقایسه عمق حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد ۴/۱۸

۲- طول حفره آب‌شستگی

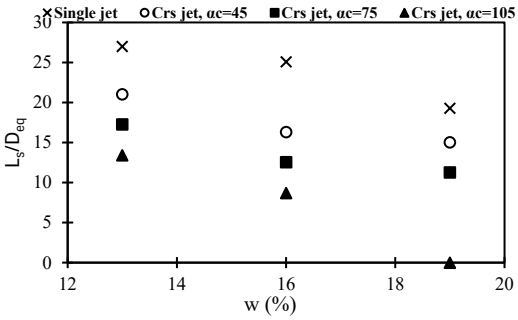
طول حفره آب‌شستگی جت‌های متقاطع و منفرد تابع رطوبت بستر در ارتفاع‌های ریزش نسبی متفاوت، در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. افزایش ارتفاع ریزش در جت منفرد سبب افزایش طول حفره آب‌شستگی و در جت‌های متقاطع منجر به کاهش طول حفره می‌گردد که این امر ناشی از برخورد جت‌ها در فاصله بین نازل جت و سطح آب می‌باشد. مقایسه طول حفره آب‌شستگی نمایانگر آن است که بیشترین مقدار طول حفره آب‌شستگی در جت منفرد برای رطوبت بستر ۱۳ درصد و ارتفاع ریزش بی‌بعد ۴/۱۸ رخ داده است. در مقابل برای جت‌های متقاطع کمترین مقدار طول آب‌شستگی در زاویه برخورد ۱۰۵ درجه، رطوبت ۱۹ درصد و ارتفاع ریزش بی‌بعد ۲/۵۷ رخ داده است. بر اساس داده‌های جدول ۳، نرخ کاهش طول حفره آب‌شستگی در جت‌های متقاطع نسبت به جت منفرد نشان می‌دهد که در فاصله برخورد ۲.۵۷ (بی‌بعد)، جت‌های متقاطع در سه زاویه برخورد مختلف، طول حفره را ۱۹ تا ۵۷ درصد کاهش داده‌اند. همچنین در ارتفاع‌های ریزش بی‌بعد ۳/۳۷ و ۴/۱۸، این کاهش به ۲۲ تا ۱۰۰ درصد رسیده است.



شکل ۸- مقایسه طول حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد۲/۵۷



شکل ۹- مقایسه طول حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد۳/۳۷



شکل۱۰ - مقایسه طول حفره آب‌شستگی جت منفرد و متقاطع در ارتفاع ریزش بی‌بعد ۴/۱۸

۳-عرض حفره آب‌شستگی

عرض حفره آب‌شستگی جت‌های متقاطع و منفرد نسبت به رطوبت بستر در ارتفاع ریزش‌های مختلف در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. بر اساس شکل و نتایج حاصل از مقایسه عمق و طول حفره آب‌شستگی جت‌های متقاطع در مقایسه با جت منفرد دارای عرض آب‌شستگی کمتری بوده و با افزایش زاویه برخورد بین جت‌های متقاطع، در مقایسه با جت منفرد، عرض حفره کاهش چشم‌گیری داشته است؛ به‌گونه‌ای که حتی در زاویه برخورد ۱۰۵ درجه برای شرایطی که رطوبت بستر و ارتفاع ریزش جت افزایش می‌یابد، به دلیل عدم وقوع آب‌شستگی، عرض حفره برابر صفر اندازه‌گیری شده

است. بنابراین جت‌های منفرد دارای بیشترین مقدار عرض حفره و جت‌های متقاطع با زاویه برخورد ۱۰۵ درجه دارای کمترین مقدار عرض در تمامی شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر هستند.

برای بیان کمی این مقایسه، نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که از مقادیر جدول ۴ مشخص است برای رطوبت ۱۳ درصد بستر در ارتفاع ریزش‌های بی‌بعد ۲/۵۷، ۳/۳۷ و ۴/۱۸ جت‌های متقاطع در مقایسه با جت منفرد عرض حفره آب‌شستگی به ترتیب حداقل ۲۵ و حداکثر ۶۴ درصد کاهش را در زاویه برخورد ۴۵ و ۱۰۵ درجه نشان می‌دهد. در رطوبت بستر ۱۶ درصد برای ارتفاع ریزش‌های بی‌بعد ۲/۵۷، ۳/۳۷ و ۴/۱۸ عرض حفره حداقل ۳۲ و حداکثر ۱۰۰ درصد کاهش یافته و در رطوبت ۱۹ درصد بستر در هر سه ارتفاع ریزش جت، عرض حفره از ۲۴ تا ۱۰۰ درصد کاهش داشته است.

جدول ۲- نرخ کاهش عمق حفره آب‌شستگی جت متقاطع در مقایسه با جت منفرد (درصد)

H/D_{eq}		۲/۵۷			۲/۳۷			۴/۱۸		
W (%)		۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹
۴۵		۴/۵	۱۰	۱۳	۲۶	۳۲	۳۷	۳۳	۳۹	۴۳
۷۵	α_c	۴۵	۵۳	۵۹	۶۲	۷۲	۷۷	۶۸	۷۷	۸۲
۱۰۵		۶۶	۷۶	۸۲	۸۱	۹۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۳- نرخ کاهش طول حفره آب‌شستگی جت متقاطع در مقایسه با جت منفرد (درصد)

H/D_{eq}		۲/۵۷			۲/۳۷			۴/۸		
W (%)		۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹
۴۵		۱۹	۲۶	۱۷	۲۲	۳۵	۲۲	۲۵	۴۰	۲۳
۷۵	α_c	۳۳	۴۱	۳۵	۳۶	۵۰	۴۲	۳۹	۵۵	۴۴
۱۰۵		۴۶	۵۷	۵۵	۵۰	۶۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۴- نرخ کاهش عرض حفره آب‌شستگی جت متقاطع در مقایسه با جت منفرد (درصد)

H/D_{eq}		۲/۵۷			۲/۳۷			۴/۱۸		
W (%)		۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۹
۴۵		۲۵	۳۲	۲۴	۲۸	۴۱	۳۰	۲۸	۴۷	۳۲
۷۵	α_c	۴۱	۵۱	۴۸	۴۵	۶۰	۵۵	۴۶	۶۵	۵۸
۱۰۵		۵۷	۷۰	۷۲	۶۲	۷۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

نتیجه‌گیری

بررسی پدیده آبشستگی ناشی از جت‌های منفرد و متقاطع روی بسترهای رسوبی چسبنده، به دلیل رفتار پیچیده و وابسته به زمان این نوع بسترها تحت تأثیر جریان‌های موضعی با انرژی بالا، از اهمیت مهندسی بالایی برخوردار است. بسترهای چسبنده به‌واسطه ترکیب نیروهای برشی و نیروهای چسبندگی بین ذرات، نسبت به بسترهای غیرچسبنده، واکنش‌های متفاوتی در برابر نفوذ جت‌های آبی نشان می‌دهند که منجر به تغییر در الگوی توسعه حفره‌های آب‌شستگی می‌شود. تحلیل و مقایسه رفتار جت‌های منفرد و متقاطع در این شرایط، امکان شناسایی تفاوت‌های هیدرولیکی مانند عمق نهایی آب‌شستگی، نرخ پیشروی حفره و پهنای تخریب را فراهم می‌سازد و نقش مؤثری در بهینه‌سازی طراحی سازه‌های تخلیه و کنترل فرسایش ایفا می‌کند. نتایج این تحقیق با توجه به ماهیت هم‌زمانی اثر برهم‌کنش جت‌ها و ویژگی‌های ژئوتکنیکی بستر، می‌تواند مبنای دقیقی برای مدل‌سازی عددی و توسعه راهکارهای حفاظتی در سامانه‌های هیدرولیکی حساس باشد. بنابراین در این پژوهش، نمونه‌ای از بستر چسبنده متشکل از ۹۰ درصد مواد ریزدانه (شامل رس و سیلت) و ۱۰ درصد ماسه ریز مورد آزمایش قرار گرفت. جت جریان تابیده روی بستر به صورت جت منفرد و جت‌های متقاطع می‌باشند.

در شرایط هیدرولیکی مشابه (عمق پایاب و دبی یکسان) جت منفرد به دلیل تمرکز انرژی جنبشی، حفره‌های عمیق‌تری نسبت به جت‌های متقاطع ایجاد کرد. در جت‌های منفرد، افزایش ارتفاع ریزش سبب افزایش عمق فرسایش تا حدود ۱۶ درصد گردید. برای جت‌های متقاطع با زاویه ۱۰۵ درجه، عمق فرسایش با کاهش ۵۴ درصدی در ارتفاع مشابه همراه بود به گونه‌ای که در رطوبت ۱۶ و ۱۹ درصد و ارتفاع ریزش بی‌بعد

۴/۱۸، میزان فرسایش بستر به صفر کاهش یافت. در تحلیل طول حفره آب‌شستگی جت منفرد با ایجاد حفره‌های بزرگ‌تر، حداکثر طول را در رطوبت ۱۳ درصد و ارتفاع ریزش بی‌بعد ۴/۱۸ ثبت کرد و افزایش ارتفاع ریزش منجر به افزایش طول حفره تا ۱۴ درصد گردید. برای جت‌های متقاطع با زاویه ۱۰۵ درجه در همین رطوبت طول حفره تا ۱۰۰ درصد کاهش نشان داد و کمترین طول حفره آب‌شستگی در رطوبت ۱۹ درصد و ارتفاع بی‌بعد ۲/۵۷ مشاهده شد. نرخ کاهش طول بین ۱۹ تا ۱۰۰ درصد متغیر بود. در بررسی عرض حفره آب‌شستگی جت منفرد با توزیع یکنواخت‌تر انرژی، حفره‌های عریض‌تری ایجاد و حداکثر عرض در رطوبت ۱۳ درصد و ارتفاع ریزش بی‌بعد ۴/۱۸ ثبت شد. در جت‌های متقاطع با زاویه ۱۰۵ درجه، عرض حفره تا ۱۰۰ درصد کاهش یافت و در شرایط رطوبت بالاتر و ارتفاع ریزش بیشتر، آب‌شستگی کاملاً متوقف شد به گونه‌ای که عرض حفره آب‌شستگی به صفر کاهش یافت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه سمنان که ابزار تحقیق و امکان استفاده از آزمایشگاه را فراهم نموده است تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این تحقیق بخشی از داده‌های مربوط به پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول، جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و انجام مراحل آزمایشگاهی را به‌عهده داشته‌است.

نویسندگان دوم و سوم، تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله و کنترل نتایج را عهده‌دار بوده‌اند.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1- Ahmad, Q. and 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*, pp.1-21. doi:10.1007/s40996-024-01354-7

2- 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), pp.1014-1019. 129:12(1014) doi:10.1061/(ASCE)0733-9429

3- Armaghani, A., Lashkarara, B. and Akhond Ali, A.M., 2017. The process of plunge pool bed form changes by a vertical jet impinging upon non-cohesive sediment. Irrigation Sciences and Engineering, 40(3), pp.77-85. doi:10.22055/jise.2017.13406

4- Bleninger, T., 2007. Two-phase flow and morphology modelling of sediment transport in coastal waters. PhD dissertation, ETH Zurich. doi:10.3929/ethz-a-005512345

5- Chanson, H., 2004. Hydraulics of open channel flow: An introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/B978-075065978-9/50008-5

6- D'Agostino, V. and Ferro, V., 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. Journal of Hydraulic Engineering, 130(1), pp.24-37. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:1(24)

7- Dey, S. and Raikar, R.V., 2007. Scour below a high vertical drop. Journal of Hydraulic Engineering, 133(5), pp.564-568 .133:5(564). doi:10.1061/(ASCE)0733-9429

8- Deitrick, A.R., Ralston, D.K., Esposito, C.R., Baustian, M.M., Burgos, M.B., Courtois, A.J. and Nepf, H., 2024. Vegetation-generated turbulence does not impact the erosion of natural cohesive sediment. Geophysical Research Letters, 51(14), p.e2024GL109730. doi:10.1029/2024GL109730

9- Dong, C., Yu, G., Zhang, H. and Zhang, M., 2020. Scouring by submerged steady water jet vertically impinging on a cohesive bed. Ocean Engineering, 196, p.106781. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106781

10-Feng, C., Kong, L., Wang, Y., Li, K. and Gao, Y., 2024. Numerical simulation of cohesive bed impinging by submerged pulsed and continuous waterjet based on SPH algorithm. Ocean Engineering, 314, p.119720. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.119720

11-Lee, J. and Choi, H., 2022. Scour mechanisms induced by submerged cross jets on cohesive sediment beds. International Journal of Sediment Research, 37(3), pp.201-215. doi:10.1016/j.ijsrc.2021.10.005

12-Mazurek, K.A., Rajaratnam, N. and Sego, D.C., 2001. Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets. Journal of Hydraulic Engineering, 127(7), pp.598-606. 127:7(598) doi:10.1061/(ASCE)0733-9429

13-Melville, B.W. and Chiew, Y.M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 125(1), pp.59-65. 125:1(59) . doi:10.1061/(ASCE)0733-9429

14-Mirzaee, R., Mohammadi, M., Mousavi, S.F., Bagherzadeh, M. and Hosseini, K., 2023(b). Application of soft computing techniques to estimate the scouring depth formed by crossing jets. Water Science and Technology, 87(8), pp.1853-1865. doi:10.2166/wst.2023.097

15-Mirzaee, R., Mousavi, F., Hosseini, K. and Choobi, F., 2023(a). Effect of moisture content and angle of impact of symmetric crossing jets on scour of cohesive bed. In: 22nd Iranian Hydraulics Conference. Maragheh, East Azerbaijan, Iran.

16-Naini, S., Karami, H. and Hosseini, K., 2022. Effect of sediment gradation on scour by symmetric crossing jets: An experimental investigation. Water Supply, 22(11), pp.8211-8232. doi:10.2166/ws.2022.379

17-Pagliara, S., Amidei, M. and Hager, W.H., 2008. Hydraulics of 3D plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 134(9), pp.1275-1284. 134:9(1275) .doi:10.1061/(ASCE)0733-9429.

18-Pagliara, S., Hager, W.H. and Minor, H.E., 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 132(5), pp.450-461. doi:10.1061/(ASCE)0733-94291

19-Pagliara, S., Palermo, M. and Carnacina, I., 2011. Scour process due to symmetric dam spillways crossing jets. International Journal of River Basin Management, 9(1), pp.31-42. doi:10.1080/15715124.2011.552918

20-Pagliara, S., Palermo, M. and Roy, D., 2012. Stilling basin erosion due to vertical crossing jets. Journal of Hydraulic Research, 50(3), pp.290-297. doi:10.1080/00221686.2012.669201

21-Singh, U.K. and Ahmad, Z., 2019. Transport rate and bed profile computations for clay–silt–gravel mixture. Environmental Earth Sciences, 78(15), pp.1-20. doi:10.1007/s12665-019-8475-4

22-Xue, W.Y., Huai, W.X. and Qian, Z.D., 2010. Numerical simulation of sediment erosion by submerged plane turbulent jets. Journal of Hydrodynamics, Series B, 22(5), pp.593-598. doi:10.1016/S1001-6058(09)60094-7

23-Zhang, L. and Wang, Y., 2024. Numerical simulation of scour hole development under submerged jets on cohesive sediment beds. Water Resources Research, 60(4), pp.567-582. doi:10.1029/2023WR035678