

Experimental Investigation and Determination of Scour Dimensions Due to Symmetric Crossing Jets


Shayan Naini¹, Hojat Karami^{2*}, Khosrow Hosseini³

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

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

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

* hkarami@semnan.ac.ir

Received: 6 October 2021, Accepted: 9 January 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the vital parts of a dam is its energy dissipator structure. With the construction of a dam, the flow is conveyed downstream. The outlet flow of a dam has a lot of energy. To dissipate this energy, the plunge pools are used. The impact of jet from a dam outlet to the river bed might cause a large scour hole, which is one of the most important topics in the field of river engineering. The scour phenomenon may lead to damages for the dam or adjacent structures. Therefore, accurate estimation of the depth and dimensions of the scour hole is necessary. Although, the symmetric crossing jets in the dam outlet structures are used as a solution for the energy dissipation, the scour at downstream of these structures may happen. Pagliara et al. (2011) studied the scour caused by two crossing jets. They used a uniform bed material with a diameter of $d_{50}=9.5\text{mm}$. They observed that in the presence of high tailwater level, a significant decrease occurs in the scour depth at all the crossing angles. The continuation of studies in this field help to collect more information and findings. Therefore, the present research uses a different bed material size with $d_{50}=1.4\text{mm}$. An attempt was also made to derive specific equations which includes the crossing angle as an independent variable to interpolate the scour value at different angles.

Methodology: In this study, 54 experiments were conducted to investigate and analyze the scour caused by symmetric crossing jets, also 9 experiments with a single jet were performed as reference tests. The diameter of the equivalent single jet is equal to $D_{eq}=31.1\text{mm}$. A bed material with $d_{50}=1.4\text{mm}$ and geometric standard deviation of $\sigma_g=1.5$ is used. The experiments were carried out in a 16 m long, 1 m wide and 0.8 m high canal at the hydraulic laboratory of the Semnan University. A hinged gate was used to adjust the tailwater level. To hold the jet pipes during the tests and change their height, a metal base was built. An electro pump with a maximum discharge of 10 lit/s was used. Accordingly, three discharge values (105, 91.5, 78 lit/min), three tailwater levels (3, 6, 9 cm), the distance of the jets crossing point to the water surface (5, 10 cm) and three different crossing angles (30, 70, 110) were used. To predict the scour hole dimensions (the scour hole depth, the length and the width as well as the ending location of the downstream ridge), the linear and power regression models are also presented. The experiments performed systematically by changing the hydraulic parameters and the effect of each parameter was investigated on the scour hole dimensions. At the end of each experiment, the longitudinal and transverse profiles of the scour hole at the maximum depth section were measured using a laser measurer.

Results and Discussion: At the crossing angles of 70 and 110 with low tailwater level, the scour depth is more than that of the crossing angle of 30 and the single jet. It was also observed that at the crossing angles of 70 and 110 and low tailwater level the scour shape tends to be asymmetric. Increasing the tailwater level and the distance of the crossing point of the jets from tailwater increased the scour depth at the crossing angle of 30, but, at the angles of 70 and 110, on the contrary, the scour depth was decreased. Accordingly, it turns out that the use of crossing jets for the scour reduction is only effective in some hydraulic conditions. The linear and power equations obtained from the entire data collection were not able to estimate the scour hole dimensions accurately at all the crossing angles because of the complexity of the phenomenon. But, the power models obtained separately for each crossing angle were able to estimate the scour features satisfactorily. The longitudinal scour hole profiles are plotted and compared with each other at various crossing angles. To show the effects of each variable, the scour hole parameters are also plotted versus the independent variables.

Conclusion: The results of this research showed that the use of crossing jets necessarily does not reduce the scour, and at the same time this depends on different hydraulic factors such as, the angle of the crossing jets, the tailwater level, and the distance of the crossing point of the jets from tailwater level. The results show that at low tailwater level, the amount of scour due to the crossing jets is more than that of the single jet at all the crossing angles.

Keywords: Symmetric crossing jets, Scour hole dimensions, Regression equations.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی و تعیین ابعاد آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن

شایان نائینی^۱، حجت کریمی^{۲*} و خسرو حسینی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

* hkarami@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از معضلات موجود در سازه‌های هیدرولیکی سدها آب‌شستگی در پایین دست آنها می‌باشد. در تحقیق حاضر ۵۴ آزمایش برای بررسی و تحلیل آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع متقارن و ۹ آزمایش با جت منفرد معادل بعنوان تست‌های مرجع در بستر با قطر متوسط ۱/۴ میلیمتر انجام شده است و روابطی برای پیش بینی ابعاد حفره آب‌شستگی (عمق، طول و عرض حفره و همینطور محل قرارگیری انتهای پشته پایین دست) ارائه شده است. آزمایشها با تغییر پارامترهای مختلف هیدرولیکی بصورت سیستماتیک انجام شد و تاثیر هر یک از پارامترها بر ابعاد حفره آب‌شستگی بررسی شد. بر این اساس سه مقدار دبی، سه مقدار عمق پایاب و سه زاویه تقاطع گوناگون استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در عمق پایاب کم آب‌شستگی جت‌های متقاطع در تمامی زوایای تقاطع بیشتر از آب‌شستگی جت منفرد می‌باشد. در زاویه تقاطع ۱۱۰ درجه در شرایط عمق پایاب کم آب‌شستگی بیشتری حتی نسبت به زاویه تقاطع ۳۰ درجه ایجاد شد. همچنین مشاهده شد در زوایای تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه با کاهش عمق پایاب فرم آب‌شستگی بصورت نامتقارن می‌شود. افزایش عمق پایاب باعث افزایش عمق آب‌شستگی در زاویه تقاطع ۳۰ درجه شد. بر این اساس معلوم شد استفاده از جت‌های متقاطع تنها در برخی از شرایط هیدرولیکی موثر و مفید است.

کلیدواژگان: جت‌های متقاطع متقارن، ابعاد حفره آب‌شستگی، روابط رگرسیونی

۱- مقدمه

از مسئله‌های مهم در زمینه فرسایش بستر رودخانه می‌باشد و به منظور جلوگیری از ریسک‌های سازه‌ای و طراحی سازه‌های حفاظتی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی باید مورد توجه قرار گیرد.

اگر جریان جت بر روی بستر رودخانه که شامل شن و سنگریزه است ریزش کند، باعث پیدایش حفره‌های آب‌شستگی بزرگی می‌شود که به مرور زمان می‌تواند به پی سد آسیب رسانده و در نهایت تخریب سد را به همراه داشته باشد. اگر از حوضچه‌های استغراق به عنوان حوضچه آرامش استفاده شود و محل سقوط جت ویژگی‌هایی متفاوت با آنچه در طراحی در نظر گرفته شده داشته باشد،

یکی از بخش‌های حیاتی سدها، سازه‌های استهلاک انرژی می‌باشد. تخلیه آب از سد برای تولید انرژی، تأمین مصرف‌های کشاورزی یا تخلیه سیل‌های مازاد بر ظرفیت مخزن صورت می‌گیرد. جریان تخلیه شده از سد دارای انرژی زیادی است که برای استهلاک این انرژی از حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود. آب‌شستگی و پیش‌بینی آن در حوضچه‌های آرامش سازه‌های آبی بویژه سرریزها و روزنه‌ها بدلیل اهمیتی که در مهندسی دارند پژوهش‌های زیادی را به خود جلب کرده‌اند. برخورد جت خروجی از سامانه‌های تخلیه سدها به بستر رودخانه، یکی

ممکن است پدیده آبشستگی به وارد شدن خسارت‌هایی به سد منجر شود. به علت خسارت‌هایی که در گذشته به حوضچه سدها مانند کاریبا و نیروگاه تارپلا وارد شده، امروزه راهکارهای زیادی به منظور تقویت پایداری آنها اندیشیده می‌شود (Visher and Hager, 1998).

هرچند جت‌های متقاطع متقارن در روزنه‌های سدها و تاسیسات تخلیه به عنوان راهکاری برای استهلاک انرژی به کار می‌روند اما آبشستگی در پایین دست این نوع سازه‌ها نیز ایجاد می‌شود. بهمین منظور برآورد دقیقی از عمق و ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌ها در حوضچه‌های استغراق برای طراحی سدها و سازه‌های جانبی مانند نیروگاه‌ها امری ضروری است.

برای اطلاع از فراسنجه‌های تاثیرگذار بر آبشستگی، آزمایش‌هایی در گذشته انجام شده است و فراسنجه‌های جریان و بستر بررسی و ارزیابی شده‌اند. با آزمایش‌های انجام گرفته، معادله‌هایی ارائه شده که می‌تواند ویژگی‌های آبشستگی را پیش بینی کند. به دلیل پیچیدگی پدیده آبشستگی و دخیل بودن فراسنجه‌های هیدرولیکی و ژئوتکنیکی در آبشستگی و عدم بررسی تأثیر همه این فراسنجه‌ها، آزمایش‌ها در وضعیتی انجام می‌گیرد که شماری از فراسنجه‌ها ثابت می‌ماند. از این رو، رابطه‌های گوناگونی طی سالیان استخراج شده که ممکن است نتایج آنها تفاوت داشته باشد. بنابراین تداوم بررسی و ارزیابی‌ها در این زمینه به گردآوری اطلاعات و یافته‌های بیشتری کمک می‌کند.

بیشتر تحقیقات انجام شده در گذشته در مورد آبشستگی جت‌های منفرد می‌باشد و بررسی‌های کمی در رابطه با اثرگذاری جت‌های متقاطع^۱ بر ابعاد حفره آبشستگی شده است. جت‌های متقاطع متقارن اغلب در شرایطی که روزنه‌های میانی سدها یا دریچه‌های تخلیه آنها به صورت متقارن باز شود تشکیل می‌شوند، هدف از طراحی سامانه این نوع جت‌ها تخلیه آب مخزن به پایین دست با استهلاک انرژی زیاد جریان و قابلیت پخش پذیری زیاد در اثر برخورد جت‌ها به یکدیگر و کاهش اثر تخریبی جت در پایین دست می‌باشد.

Pagliara et al. (2006) آزمایش‌هایی را برای فهم و درک آبشستگی دوبعدی جت منفرد با سطح صخره‌ای خرد شده کامل انجام دادند. آنان اثرگذاری چندین فراسنجه شامل شکل جت، سرعت جت، زاویه اصابت جت، اثرگذاری عمق پایاب و غیریکنواختی رسوب‌ها را بررسی و نتیجه گرفتند که عدد فرود ذرات تاثیر عمده را بر آبشستگی حوضچه استغراق دارد. Pagliara et al. (2008a) آبشستگی سه‌بعدی حوضچه استغراق را در یک ارزیابی آزمایشگاهی بررسی کردند، این تحقیق بر پایه بررسی پیشین Pagliara et al. (2006) مربوط به آبشستگی دوبعدی حوضچه استغراق بود و نتایج آن را به حالت سه‌بعدی تعمیم داد. (Canepa and Hager (2003) تاثیر دبی هوا بر آبشستگی حوضچه استغراق به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند، نتایج نشان داد که در سرعت معینی از آب و دانه بندی خاصی، اضافه کردن هوا به درون جت باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود. Pagliara et al. (2009) آزمایش‌هایی را در حالت جت نامستغرق با بررسی تاثیر ورود هوا بر آبشستگی حوضچه استغراق به منظور توسعه رابطه‌هایی برای تشریح فراسنجه‌های هندسی اصلی آبشستگی و نیز نیمرخ طولی آبشستگی انجام دادند. مشخص شد که استفاده از عدد فرود ترکیبی هوا-آب باعث کاهش عمق آبشستگی شده و استفاده از عدد فرود معمولی آب بدون وجود هوا باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود. Pagliara and Palermo (2008) یک بررسی آزمایشگاهی را برای فهم و درک هیدرولیک آبشستگی دوبعدی حوضچه استغراق با سازه‌های حفاظتی انجام دادند. هدف این تحقیق ارزیابی تاثیر سازه‌های صفحه‌ای نفوذپذیر و نفوذناپذیر در موقعیت‌های طولی مختلف در حوضچه استغراق بود. مشاهده شد که وجود سازه یک عامل محدود کننده برای توسعه طول آبشستگی است که منجر به حفره عمیق‌تری می‌شود. Pagliara et al. (2010) تحقیقی را به منظور بررسی هیدرولیک آبشستگی سه‌بعدی حوضچه استغراق با اقدام‌های حفاظتی انجام دادند که معلوم شد حضور سازه حفاظتی باعث پیچیده‌تر شدن پدیده شده و موجب پیدایش پنج نوع حفره آبشستگی می‌شود. یک

از جریان همزمان از رو و زیر دریچه انجام داد و مشاهده کرد که طول آب‌شستگی و حداکثر عمق آب‌شستگی برای حالتی که آب همزمان از زیر و بالای دریچه عبور می‌کند نسبت به حالتی که آب تنها از زیر یا روی دریچه عبور می‌کند کمتر است. (Mehraein et al. (2012) آزمایش‌هایی را در حالت برخورد همزمان جت دیواره‌ای دایره‌ای^۲ و یک جت عمودی برخوردی انجام و تاثیر فراسنجه‌های بی بعد را بر ابعاد حفره آب‌شستگی بررسی کردند. مشاهده شد که عمق آب‌شستگی با افزایش عمق پایاب و افزایش فاصله افقی بین جت برخوردی و مبدا جت دیواره‌ای کاهش می‌یابد.

در این تحقیق قطر متوسط ذرات ۱/۴ میلی متر و زاویه عمودی جت‌های متقاطع ثابت (۴۵ درجه) و زاویه تقاطع جت‌ها سه اندازه ۷۰، ۳۰ و ۱۱۰ درجه در نظر گرفته شد تا تاثیر آنها بر شکل حفره و پشته آب‌شستگی ایجاد شده در مرحله تعادل بررسی شود. فاصله نقطه تقاطع جت‌ها و سطح آب نیز دو میزان مثبت (بالای سطح آب) گرفته شد. در تحقیقات پیشین زاویه تقاطع جت‌ها به صورت فراسنجه مستقل در معادله‌ها در نظر گرفته نشده است و معادله‌ها برای پیش‌بینی ابعاد حفره آب‌شستگی برای هر زاویه تقاطع به صورت جداگانه ارائه شده بود. یکی از هدف‌های مهم این تحقیق مطالعه فرآیند آب‌شستگی جت‌های متقاطع با قطر ذرات ۱/۴ میلی متر و یافتن و ارائه معادله‌های بی‌بعدی است که در صورت امکان فراسنجه زاویه تقاطع جت‌ها نیز به عنوان فراسنجه مستقل در آنها گنجانده شود. برای پیش‌بینی حداکثر عمق حفره آب‌شستگی، طول حفره آب‌شستگی، عرض حفره آب‌شستگی و محل انتهایی پشته پایین دست، مدل‌های مختلف رگرسیون برازش داده شد و مدل‌هایی که بهترین برآورد را در قالب معیارهای خطا داشتند ارائه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه سمنان

دسته‌بندی برای پیش‌بینی نوع حفره ارائه شد. Latifi et al. (2018) آزمایش‌هایی را با برخورد همزمان جت خروجی از سرریز بالایی سد و روزنه زیرین آن انجام و نتایج را با جت منفرد مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از جت‌های ترکیبی منجر به کاهش عمق آب‌شستگی و ارتفاع پشته نسبت به جت منفرد در همه‌ی شرایط می‌شود.

Pagliara et al. (2011) آب‌شستگی ناشی از برخورد دو جت متقاطع متقارن را بررسی کردند. آنان از یک نوع مصالح بستر یکنواخت با انحراف معیار هندسی $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.17$ و قطر $d_{50} = 9.5mm$ استفاده کردند. آنان مشاهده کردند که در صورت وجود عمق پایاب زیاد، در همه‌ی زاویه‌های برخورد جت کاهش شایان ملاحظه‌ای در عمق حفره آب‌شستگی رخ می‌دهد. Pagliara and Palermo (2013) آب‌شستگی سه بعدی ناشی از برخورد دو جت متقارن را در حالت هوادهی شده بررسی کردند و ثابت شد که حضور هوا در جت‌ها به شدت ریخت‌شناسی^۱ آب‌شستگی را تغییر می‌دهد. Pagliara et al. (2017) تاثیر چندین جت عمودی نامتقاطع را با قرار دادن نقطه تقاطع فرضی جت‌ها در زیر بستر با زاویه‌های برخورد مختلف تجزیه و تحلیل کردند. آنان نتیجه گرفتند که فراسنجه فاصله نقطه تقاطع فرضی با سطح بستر یکی از موثرترین فراسنجه‌ها در شکل آب‌شستگی می‌باشد و رابطه‌هایی برای پیش‌بینی فراسنجه‌های اصلی هندسه آب‌شستگی شامل حداکثر عمق آب‌شستگی، طول حفره آب‌شستگی و عرض حفره آب‌شستگی ارائه کردند. Li et al. (2006) بررسی خود را درباره تاثیر چندین جت نامتقاطع بر آب‌شستگی شکل گرفته در پایین دست نیروگاه Xiluodu بر روی رودخانه یانگ تسه انجام دادند. یک مدل هبیریدی ترکیبی از مدل‌های فیزیکی و عددی برای شبیه‌سازی میدان سرعت با چندین جت برخوردی به کار رفت. ویژگی‌های آب‌شستگی بستر رودخانه پایین دست در اثر جت‌ها بر مبنای ویژگی‌های میدان سرعت محاسبه شده پیش‌بینی و تحلیل شدند. (Uyumaz (1988) بررسی خود را برای آب‌شستگی پایین دست دریچه عمودی ناشی

ارتفاع آنها یک پایه فلزی ساخته شد که هم قابلیت تغییر زاویه عمودی جت را داشته باشد و هم تغییر زاویه تقاطع جت‌ها توسط بست‌های نگهدارنده به سادگی در آن انجام گیرد (شکل ۱ و ۲). وزن این پایه فلزی به ۳۵ کیلوگرم می‌رسد تا از تکانه‌های ناشی از خروج جت آب جلوگیری کند.

انجام شد. آزمایشها در کانالی مستطیلی و افقی با طول ۱۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر انجام شد. برای آسانی کار، آزمایش‌ها در بازه ۸ متری انتهای کانال انجام شد. برای تنظیم عمق پایاب مورد نیاز در کانال از دریچه نصب شده در انتهای کانال استفاده شد. برای نگه داشتن لوله‌های جت در طی آزمایش‌ها و تغییر

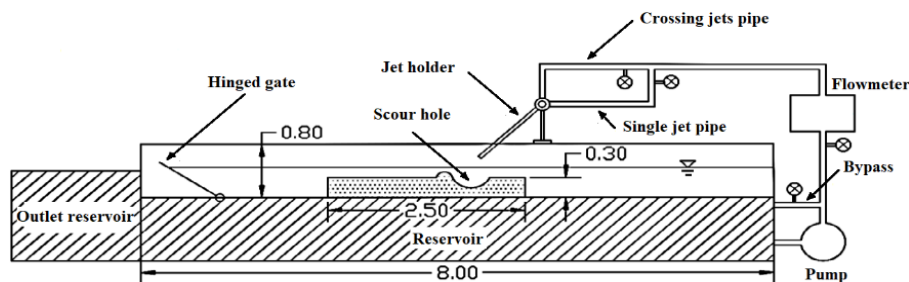


Fig. 1 Laboratory flume diagram

شکل ۱ نمودار ویژگی‌های فلوم آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح

مصالح به کار رفته از جنس سیلیس می‌باشد که منحنی دانه بندی آن به صورت شکل ۳ است. قطر متوسط ذرات رسوبی ۱/۴ میلیمتر بوده و انحراف هندسی آن $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.5$ می‌باشد که نشان می‌دهد مصالح غیر یکنواخت است. برابر معیار تعریف شده توسط Breussers and Raudkivi (1991) اگر $\sigma_g > 1.35$ باشد، ذرات رسوب غیر یکنواخت فرض می‌شود.

در آغاز کف کانال به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر از رسوب‌ها پر شد، در آزمایش‌های اولیه مشخص شد که این میزان ضخامت در بحرانی‌ترین شرایط (حداکثر دبی) کافی می‌باشد و از رسیدن مقدار فرسایش به کف فلوم جلوگیری می‌کند. به منظور دستیابی به یک سطح افقی پیش از انجام آزمایش‌ها، سطح مصالح بستر به دقت تراز می‌شود. برای برداشت حداکثر عمق، طول و عرض حفره آب‌شستگی و پروفیل طولی و عرضی آب‌شستگی و همین‌طور نقطه‌های پراکنده حفره و پشته آب‌شستگی از متر لیزری LAISAI با برد ۳۰ متر و دقت $2 \pm$ mm استفاده شد که با نصب آن بر روی یک قاب فلزی متحرک قابلیت حرکت در جهت طولی و عرضی کانال را داشت.

برای انتقال آب از یک الکتروپمپ استفاده شد که جریان مازاد آن توسط یک لوله کنارگذر (بای‌پس) به درون مخزن برگشت داده می‌شود. آبرسانی به لوله‌های جت توسط یک لوله ۲ اینچی انجام گرفت که برای تنظیم دبی نیز یک شیر روی آن پیش از دبی سنج نصب شد.

برای تولید جت‌های متقاطع از ۲ لوله آهنی با سطح مقطع دایره‌ای استفاده شد. قطر درونی لوله جت‌ها برابر با $D=22$ mm انتخاب شد. شماری از آزمایش‌ها نیز با یک لوله جت منفرد (آهنی) انجام شد تا آب‌شستگی حاصل از آن با جت‌های متقاطع مقایسه شود. قطر لوله جت منفرد (D) بنابر معیار تعریف شده در Pagliara et al. (2011) برابر با قطر یک لوله منفرد معادل (D_{eq}) در نظر گرفته شد که دارای سطح مقطعی برابر با مجموع سطح مقطع دو لوله جت متقاطع می‌باشد و از رابطه $D_{eq} = (2D^2)^{0.5}$ محاسبه می‌شود که برابر با $D_{eq} = 31.11$ mm بدست آمد. جریان توسط یک سه راهی به طور یکسان بین دو لوله جت تقسیم شد.

اندازه‌گیری دبی جریان در لوله اصلی توسط یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی ژاپنی از نوع YOKOGAWA (ADMAG AE) یک اینچی با قابلیت اندازه‌گیری دبی از ۰/۵ تا ۱۷/۶۷ متر مکعب بر ساعت و دقت $\pm 0.5\%$ انجام گرفت که به صورت فلنچی نصب شد.

۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

در آغاز زاویه تقاطع لوله جت‌ها که در بست‌های نگهدارنده به صورت متقارن قرار گرفتند بصورت دیجیتالی تنظیم شد و با استفاده از پیچ و مهره توسط بست‌ها در محل خود ثابت شدند. سطح رسوب‌ها به طور کامل افقی و تراز می‌شود، سپس با استفاده از ورقه آلومینیومی روی آن پوشیده می‌شود، پس از روشن کردن پمپ و باز کردن شیر تنظیمی، کانال توسط لوله جت‌های متقاطع و منفرد پر می‌شود. برای تنظیم تراز پایاب نخست پس از بستن شیر جت منفرد، با استفاده از شیر تنظیمی و شیر لوله کنار گذر دبی جریان به نرخ مورد نظر تنظیم شده و با استفاده از دریچه لولایی انتهایی کانال عمق پایاب به اندازه مورد نظر تنظیم شد. سپس ارتفاع جت‌ها با استفاده از پایه جت بگونه‌ای تنظیم شد که محل نقطه تقاطع جریان جت‌ها با سطح پایاب به ارتفاع مورد نظر برسد. پس از آن ورقه آلومینیومی از روی رسوب‌ها کنار رفته و آزمایش آغاز می‌شود. پس از پایان آزمایش دریچه لولایی به تدریج و به آرامی پایین آورده می‌شود تا سطح آب پایین آمده و آب کانال به کلی تخلیه شود. سپس حداکثر عمق آب‌شستگی، طول و عرض آب‌شستگی در مقطع حداکثر عمق و همین‌طور نیم‌رخ طولی و عرضی آب‌شستگی در مقطع حداکثر عمق با استفاده از متر لیزری برداشت شد. در جدول ۱ محدوده تغییرات هر فراسنجه را در آزمایش‌ها میتوان مشاهده نمود.

جدول ۱ محدوده تغییرات فراسنجه‌ها

Table 1 Range of parameters

$\alpha_c(^{\circ})$	S(cm)	h_0 (cm)	Q(l/s)	Parameter
30-110	5-10	3-9	1.3-1.75	Value

۳-۲- فراسنجه‌های در نظر گرفته شده و تحلیل

ابعادی

فراسنجه‌های متعددی در ایجاد پدیده آب‌شستگی جت‌های متقاطع دخیل می‌باشند که بین آنها رابطه‌ای به شکل زیر برقرار می‌باشد:

$$\phi = f(V, d_s, D_{eq}, \rho, \rho_s, \mu, g, S, h_0, \alpha_c, \alpha_v) \quad (1)$$

که در این رابطه:

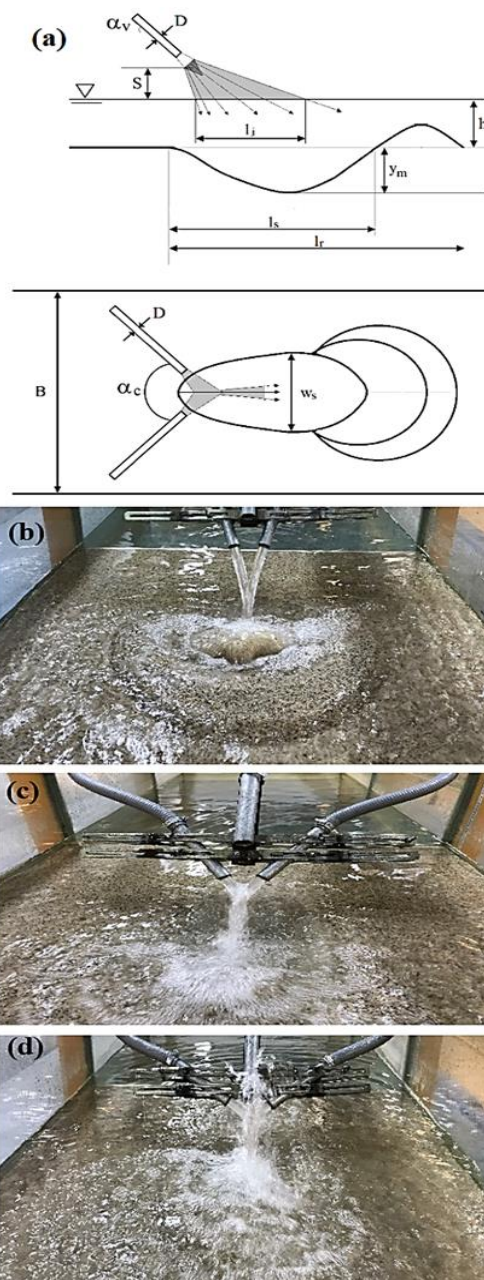


Fig. 2 (a) Plan and longitudinal profile of scour for jets at various angles: (b):30, (c):70, (d):110.

شکل ۲ (a) نمای کلی پلان و مقطع طولی آب‌شستگی برای جت‌ها در زاویه‌های گوناگون تقاطع: (b): ۳۰ درجه، (c): ۷۰ درجه، (d): ۱۱۰ درجه.

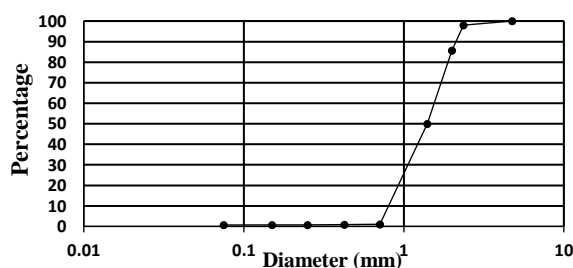


Fig. 3 Grain size distribution
شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح

$$\frac{\phi}{D_{eq}} = \left[\frac{V}{\sqrt{gd_{90} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}}, \frac{h_0}{D_{eq}}, \frac{S}{D_{eq}}, \alpha_c \right] \quad (3)$$

یا به صورت خلاصه‌تر:

$$\frac{\phi}{D_{eq}} = [F_{d90} \frac{h_0}{D_{eq}}, \frac{S}{D_{eq}}, \alpha_c] \quad (4)$$

که $\frac{h_0}{D_{eq}}$ عمق نسبی پایاب و $\frac{S}{D_{eq}}$ فاصله نسبی نقطه تقاطع جت‌ها از سطح پایاب می‌باشد که بنا بر Pagliara et al. (2011) این دو فراسنجه عمیقاً هندسه آبشستگی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و با افزایش S ، جریان جت در آنسوی نقطه تقاطع پخش‌تر خواهد شد و هوای زیادی را به درون آب وارد می‌کند.

آبشستگی با گذشت زمان پیشرفت می‌کند، برای تعیین زمان تعادل آبشستگی چندین آزمایش بلند مدت در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شد، برای اینکه مشخص شود در چه زمانی آبشستگی به مرحله تعادل رسیده است پیشرفت آبشستگی با زمان رسم شد، شکل ۴ پیشرفت آبشستگی را در یکی از بحرانی‌ترین شرایط (حداکثر دبی و سرعت جت و همگراترین زاویه تقاطع (۳۰ درجه)) نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف از یک عمق سنج مکانیکی^۲ با دقت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. محققان مختلف زمان تعادل حفره آبشستگی را متفاوت در نظر گرفته‌اند، در آزمایش‌های Rajaratnam and Aderibigbe (1996) زمان تعادل بین ۶ تا ۵۰ ساعت در نظر گرفته شد.

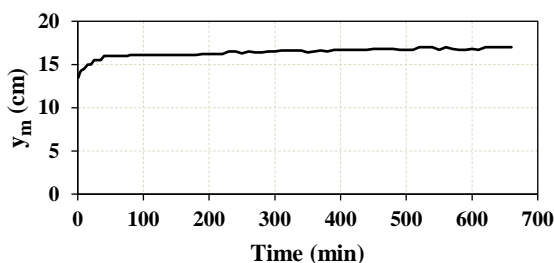


Fig. 4 Scour development with time
($Q = 1.75 \text{ l/s}, \alpha_c = 30$)

شکل ۴ پیشرفت آبشستگی با زمان برای شرایط
($\alpha_c = 30, Q = 1.75 \text{ l/s}$)

ϕ : یکی از ابعاد حفره آبشستگی (حداکثر عمق حفره آبشستگی y_m ، طول حفره آبشستگی l_s ، عرض حفره آبشستگی w_s ، محل انتهای پشته آبشستگی نسبت به ابتدای حفره l_r)، V : سرعت جت‌های متقاطع و برابر با $V = Q / (\pi D_{eq}^2 / 4)$ می‌باشد، Q : دبی کل در لوله اصلی، D_{eq} : قطر جت معادل لوله که بنا بر تعریف سطح مقطعی برابر با مجموع سطح مقطع دو تا لوله جت دارد، d_s : اندازه ذرات مصالح بستر، ρ : چگالی آب، ρ_s : چگالی ذرات رسوب، μ : لزجت دینامیکی آب، g : شتاب ثقل زمین، S : مسافت عمودی بین نقطه مرکزی تقاطع دو تا جت و سطح آب، h_0 : عمق پایاب، α_c : زاویه تقاطع بین جت‌ها، α_v : زاویه عمودی جت.

با استفاده از قضیه باکینگهام با داشتن ۱۲ متغیر و سه بعد M, L, T و انتخاب فراسنجه‌های (V, D_{eq}, ρ) به عنوان متغیرهای تکراری، ۹ متغیر بدون بعد به شرح زیر بدست می‌آید:

$$\left[\begin{array}{l} \pi_1 = \frac{\rho_s}{\rho}, \pi_2 = \frac{d_s}{D_{eq}}, \pi_3 = \frac{V^2}{gD_{eq}}, \pi_4 = \frac{\rho V D_{eq}}{\mu}, \\ \pi_5 = \frac{h_0}{D_{eq}}, \pi_6 = \frac{S}{D_{eq}}, \pi_7 = \frac{\phi}{D_{eq}}, \pi_8 = \alpha_c, \\ \pi_9 = \alpha_v \end{array} \right] \quad (2)$$

فراسنجه $\pi_4 = \frac{\rho V D_{eq}}{\mu}$ عدد رینولدز جریان می‌باشد و بدلیل آشفته بودن جریان صرفنظر می‌شود. فراسنجه $\pi_9 = \alpha_v$ نیز به دلیل ثابت در نظر گرفتن زاویه عمودی (۴۵°) در آزمایش‌ها حذف می‌شود. از ترکیب فراسنجه‌های بی‌بعد $\pi_1 = \frac{\rho_s}{\rho}$ ، $\pi_2 = \frac{d_s}{D_{eq}}$ و $\pi_3 = \frac{V^2}{gD_{eq}}$ فراسنجه بی‌بعد $\pi_{10} = \frac{V}{\sqrt{gd_s \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}}$ بدست می‌آید که در تحقیقات از آن به عنوان عدد فرود ذره یاد می‌شود. با توجه به غیریکنواختی ذرات رسوب، d_{90} به عنوان قطر مشخصه مصالح در عدد فرود ذره استفاده شده است که عبارت است از قطری که ۹۰ درصد وزنی ذرات قطری کوچک‌تر از آن دارند. عدد فرود ذره متناسب با این قطر به صورت F_{d90} نشان داده می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان رابطه بالا را به صورت رابطه زیر بازنویسی کرد.

در آزمایش‌های Pagliara et al. (2011) مدت زمان تعادل برابر ۴۰ دقیقه بود. در این تحقیق ۹۵٪ آب‌شستگی پس از گذشت ۱ ساعت رخ داد و از این زمان به بعد تا پایان آزمایش (۱۱ ساعت) تنها ۱ میلی‌متر عمق آب‌شستگی افزایش پیدا کرد که میزان ناچیزی می‌باشد و به صورت دیداری نیز مشاهده شد ذرات به بیرون از حفره منتقل نمی‌شوند، بهمین دلیل و با توجه به محدودیت‌های موجود مدت زمان هر آزمایش برابر با ۱ ساعت در نظر گرفته شد.

۳- بررسی فرآیند و فرم آب‌شستگی جت‌های متقاطع

۳-۱- زاویه تقاطع ۳۰ درجه

حفره و پشته آب‌شستگی در تمامی آزمایش‌ها در زاویه مرکزی کانال متقارن می‌باشند. در شرایط عمق پایاب $\alpha_c = 30$ در عمق‌های مختلف پایاب نسبت به خط $(h_0/D_{eq} > 0.96)$ بیشتر برخی از ذرات معلق نیز در طی آزمایش به دلیل ایجاد فضای تعلیق بیشتر از روی پشته عبور کرده و در آن سوی خط‌الراس پشته فرود می‌آیند. در عمق پایاب کم $(h_0/D_{eq} = 0.96)$ ذرات معلق در پایین دست حفره ته نشین شده و با ایجاد پشته پایین دست که به مرور زمان ابعاد آن بزرگ‌تر می‌شود، یک مانع برای عبور جریان به سمت پایین دست حفره ایجاد می‌کنند که همین عامل بعلاوه محدودیت عمق آب باعث بوجود آمدن مولفه‌های عرضی سرعت در کف حفره می‌شود که همانند این وضعیت در تحقیق بر روی جت منفرد (Pagliara et al. 2008) نیز مشاهده شده است. مولفه‌های عرضی سرعت منتج به تشکیل پشته‌های کناری (چپ و راست) تا پیش از میانه بالادست حفره و تا نزدیکی ابتدای حفره می‌شود. هرچه عمق پایاب بیشتر شود این مولفه‌ها کمتر شده و از پهنای پشته‌های کناری کاسته می‌شود و پشته‌ها به سمت پایین دست مهاجرت کرده و ذرات بیشتر در پایین دست تجمع پیدا می‌کنند (شکل ۵). همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عمق پایاب عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. در عمق پایاب کم سطح پشته پایین دست مسطح بوده و در عمق‌های پایاب بیشتر

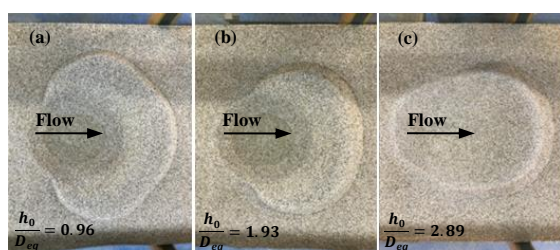


Fig. 5 Scour hole plan and ridge
($F_{d90} = 12.5, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61, \alpha_c = 30$)

شکل ۵ پلان حفره و پشته آب‌شستگی
($F_{d90} = 12.5, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61, \alpha_c = 30$)

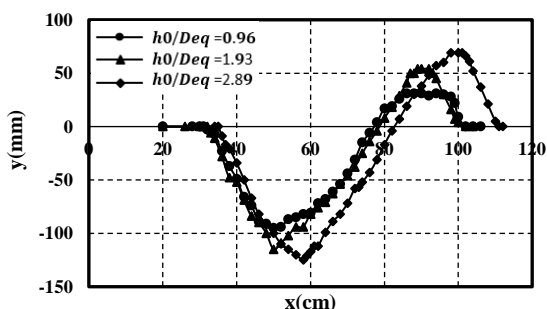


Fig. 6 Longitudinal scour profiles
($F_{d90} = 12.5, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61, \alpha_c = 30$)

شکل ۶ نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی:
($F_{d90} = 12.5, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61, \alpha_c = 30$)

۳-۲- زاویه تقاطع ۷۰ درجه

در زاویه تقاطع $\alpha_c = 70$ در عمق پایاب کم و متوسط ($h_0 = 3cm, 6cm$) ذرات معلق به صورت گردشی و فورانی مانند زاویه تقاطع ۳۰ درجه در درون حفره باقی نمی‌مانند که به دلیل طول زیاد پخشیدگی جت و مولفه رو به جلوی جریان می‌باشد، در واقع هنگامی که ذرات به صورت معلق در می‌آیند بیشتر آنها توسط مولفه افقی

ارتفاع پشته و پخش شدن ذرات و انتقال آنها به سمت پایین دست می‌شود. در واقع به دلیل ریزش جریان فوقانی تاج جت در زاویه $\alpha_c = 110$ بر روی پشته پایین دست، یک گودی یا آب‌شستگی ثانویه نیز بر روی پشته در عمق‌های پایاب ۳ و ۶ سانتیمتر ایجاد می‌شود، که جزئیات یک نمونه از این حالت را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود. ولی در عمق پایاب حداکثر ($h_0 = 9\text{cm}$) به دلیل استهلاک جریان شعاعی ریزشی جت در اثر برخورد با سطح پایاب که مانند یک بالشتک عمل می‌کند، پشته اولیه بدون فرسایش به همراه تاج و تقریباً متقارن شکل می‌گیرد و اثری از پشته ثانویه نیست (شکل (V(c,f)). در عمق پایاب کم $\frac{h_0}{D_{eq}} = 0.96$ و حالت $\frac{S}{D_{eq}} = 3.22$ حفره و پشته پایین دست شکل کشیده‌تری در نمای پلان پیدا می‌کنند در مقایسه با حالت $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61$ (شکل (V(a,d)). در شرایط عمق پایاب متوسط ($h_0 = 6\text{cm}$) نیز حفره آب‌شستگی در حالت $\frac{S}{D_{eq}} = 3.22$ نسبت به حالت $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61$ فرم کشیده‌تری دارد (شکل (V(b,e)).

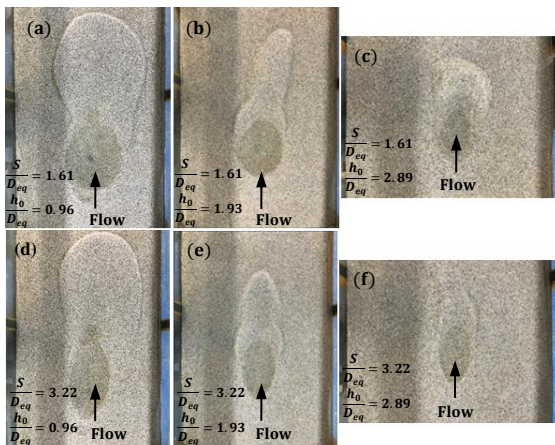


Fig. 7 Scour hole plan and ridge
($\alpha_c = 110, F_{d90} = 10.89$)

شکل ۷ پلان حفره و پشته آب‌شستگی ($\alpha_c = 110, F_{d90} = 10.89$)

۴- تاثیر فراسنجه‌های مختلف بر ابعاد حفره آب‌شستگی

شکل ۹ تاثیر زاویه تقاطع جت‌های متقاطع را بر نیمرخ طولی آب‌شستگی در شرایط هیدرولیکی یکسان و عمق پایاب کم $h_0 = 3\text{cm}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه

جریان شعاعی بلافاصله به بیرون از حفره منتقل می‌شوند که بصورت دیداری نیز قابل مشاهده است. در زاویه تقاطع $\alpha_c = 70$ و شرایط $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61$ پشته پایین دست در برخی از آزمایش‌ها با عمق پایاب کم و متوسط ($\frac{h_0}{D_{eq}} = 0.96, 1.93$) تقریباً تا اواسط مدت آزمایش متقارن بوده و پس از آن شروع به منحرف شدن به سمت یکی از دیواره‌های کانال می‌کند. پشته‌های آب‌شستگی در زاویه تقاطع 70 درجه نسبت به زاویه تقاطع 30 درجه شکل کشیده‌تری دارند. اما در شرایط حداکثر عمق پایاب ($h_0 = 9\text{cm}$) پشته تقریباً شکل متقارنی را به نمایش می‌گذارد. انحراف حفره یا پشته آب‌شستگی به یک سمت در هیچ یک از تحقیقات آزمایشگاهی جت‌های متقاطع توسط Pagliara and Palermo و Pagliara et al. (2011) و (2013) گزارش نشده است که علت عمده آن به احتمال در قطر بزرگ‌تر ذرات ($d_{50} = 9.5\text{mm}$) و یکنواختی مصالح بکار رفته توسط آنان می‌باشد. تحقیقات Sarathi et al. (2008) در رابطه با جت‌های مربعی دیواره‌ای مستغرق و ذرات بکار رفته با دو قطر $d_{50} = 0.71\text{mm}, 2.46\text{mm}$ نشان داده است که حفره و پشته آب‌شستگی در آزمایش‌های با عمق پایاب کمتر، دچار عدم تقارن می‌شوند. اما برخلاف نتایج Sarathi et al. (2008) که پایین بودن عدد فرود ذره باعث عدم تقارن بیشتر آب‌شستگی شده بود، در این تحقیق مشاهده شد که هر چقدر F_{d90} بیشتر شود، حفره و پشته آب‌شستگی نامتقارن‌تر می‌شوند.

۳-۳- زاویه تقاطع 110 درجه

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود در عمق پایاب کم و متوسط ($\frac{h_0}{D_{eq}} < 2.89$) پشته پایین دست حفره آب‌شستگی مسطح، بدون تاج و فرمی کشیده و نامتقارن دارد که می‌توان این پشته را به پشته اولیه و پشته ثانویه جداسازی کرد. پشته ثانویه در اصل در اثر جریان شعاعی ریزشی تاج جت در زاویه تقاطع 110 درجه ایجاد و گسترش می‌یابد که طی این فرآیند جریان بر روی پشته پایین دست (پشته اولیه) ریزش کرده و باعث کاهش

مولفه افقی جریان در زاویه تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه نیز به انتقال ذرات معلق به پایین دست حفره کمک می‌کند که به احتمال همین عامل باعث افزایش عمق آب‌شستگی نسبت به زاویه ۳۰ درجه شده است. اما در زاویه ۳۰ درجه، بیشتر ذرات معلق درون حفره به صورت گردشی باقی می‌مانند و همین عامل باعث کمتر شدن عمق آب‌شستگی نسبت به زاویه‌های دیگر می‌شود.

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش عمق پایاب به ۶ سانتی‌متر، عمق حفره آب‌شستگی برای هر دو زاویه تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه کاهش پیدا می‌کند. بدلیل مستهلک شدن جریان جت به ویژه جریان شعاعی ریزشی در زاویه تقاطع ۱۱۰ درجه، نیمرخ طولی حفره آب‌شستگی با فاصله گرفتن از نیمرخ طولی زاویه ۷۰ درجه کوچک‌تر شده و نزدیک به نیمرخ طولی حفره در زاویه ۳۰ درجه می‌شود اما همچنان عمق آب‌شستگی در زاویه ۱۱۰ درجه بیشتر از ۳۰ درجه می‌باشد.

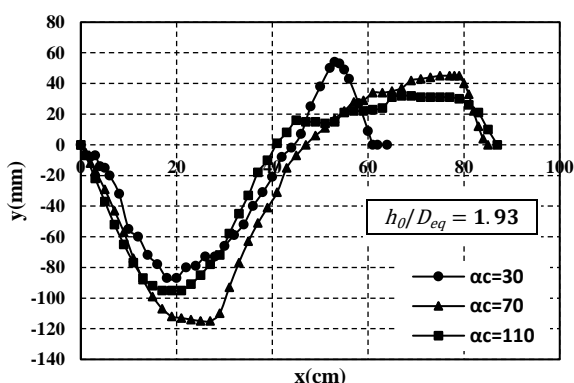


Fig. 10 Comparison of longitudinal scour profiles for $h_0/D_{eq}=1.93$ at various angles
($F_{d90} = 10.89, \frac{h_0}{D_{eq}} = 1.61$)

شکل ۱۰ مقایسه نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی در پایاب $h_0/D_{eq}=1.93$ و زاویه‌های مختلف
($F_{d90} = 10.89, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

شکل ۱۱ نشان می‌دهد در عمق پایاب ۹ سانتی‌متر عمق آب‌شستگی در زاویه تقاطع ۳۰ درجه بیشتر از زاویه‌های دیگر می‌باشد که این بدلیل زیاد بودن عمق پایاب و مستهلک شدن انرژی جریان جت در زاویه‌های تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه است. همین‌طور می‌توان مشاهده کرد که عمق

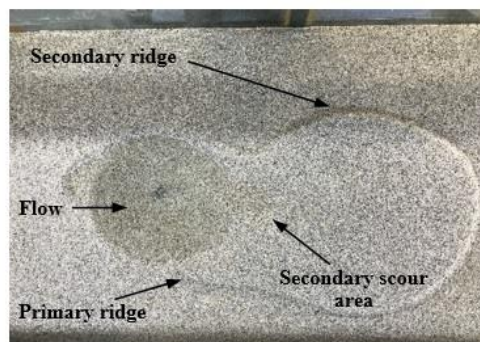
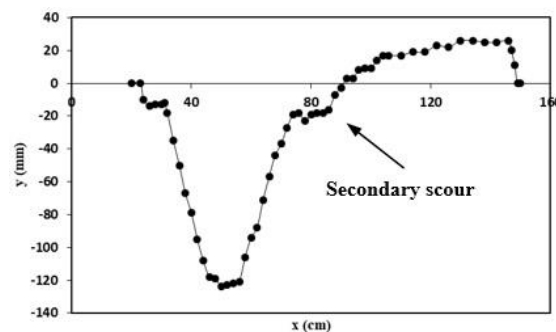


Fig. 8 A detailed view from longitudinal scour hole profile, plan and ridge

($\alpha_c = 110, F_{d90} = 10.89, \frac{h_0}{D_{eq}}=0.96, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

شکل ۸ جزئیات نیمرخ طولی و پلان حفره و پشته آب‌شستگی

($\alpha_c = 110, F_{d90} = 10.89, \frac{h_0}{D_{eq}}=0.96, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

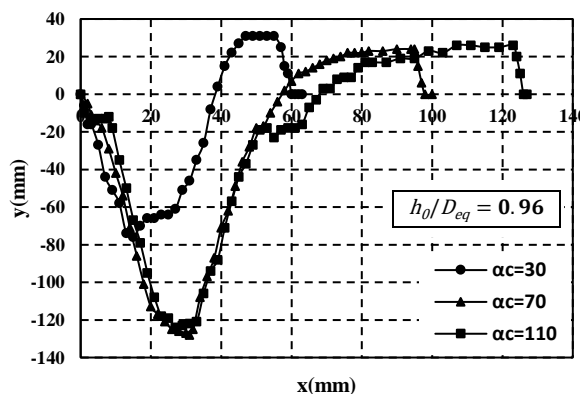


Fig. 9 Comparison of longitudinal scour profiles for $h_0/D_{eq}=0.96$ at various angles
($F_{d90} = 10.89, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

شکل ۹ مقایسه نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی در پایاب $h_0/D_{eq} = 0.96$ و زاویه‌های مختلف
($F_{d90} = 10.89, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

می‌شود برخلاف انتظار ابعاد حفره آب‌شستگی در زاویه تقاطع ۳۰ درجه نسبت به ابعاد حفره در زاویه‌های تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه کوچک‌تر می‌باشد و نیمرخ‌های طولی در زاویه‌های ۷۰ و ۱۱۰ درجه تقریباً مشابه می‌باشند. وجود

آب‌شستگی در زاویه تقاطع ۱۱۰ درجه کمتر از دیگر زاویه‌ها می‌باشد و اثری از آب‌شستگی ثانویه در اثر جریان ریزشی بر روی پشته پایین دست آن وجود ندارد. پشته های پایین دست در هر دو زاویه تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه همانند حالت $\alpha_c = 30$ دارای خط الراس می‌باشند.

همان‌طور که از شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد، نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع با نیمرخ آب‌شستگی جت منفرد در شرایط هیدرولیکی یکسان مقایسه شدند. شکل (a) نشان می‌دهد که عمق آب‌شستگی در شرایط $\alpha_c = 30$ و پایاب کم $\frac{h_0}{D_{eq}} = 0.96$ بیشتر از عمق آب‌شستگی جت منفرد می‌باشد که به احتمال به دلیل زاویه کم و همسو بودن مولفه جریان

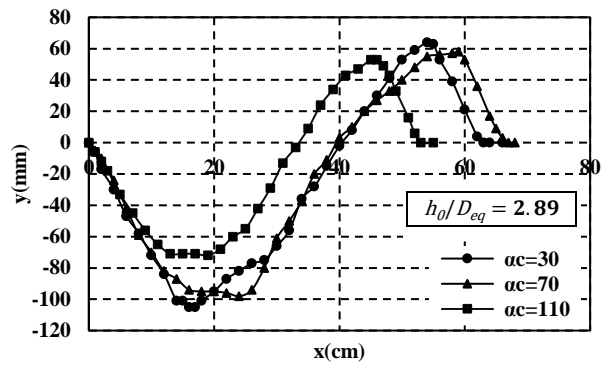


Fig. 11 Comparison of longitudinal scour profiles for $h_0/D_{eq}=2.89$ at various angles ($F_{d90} = 10.89, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

شکل ۱۱ مقایسه نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی در پایاب $h_0/D_{eq}=2.89$ و زاویه‌های مختلف ($F_{d90} = 10.89, \frac{S}{D_{eq}} = 1.61$)

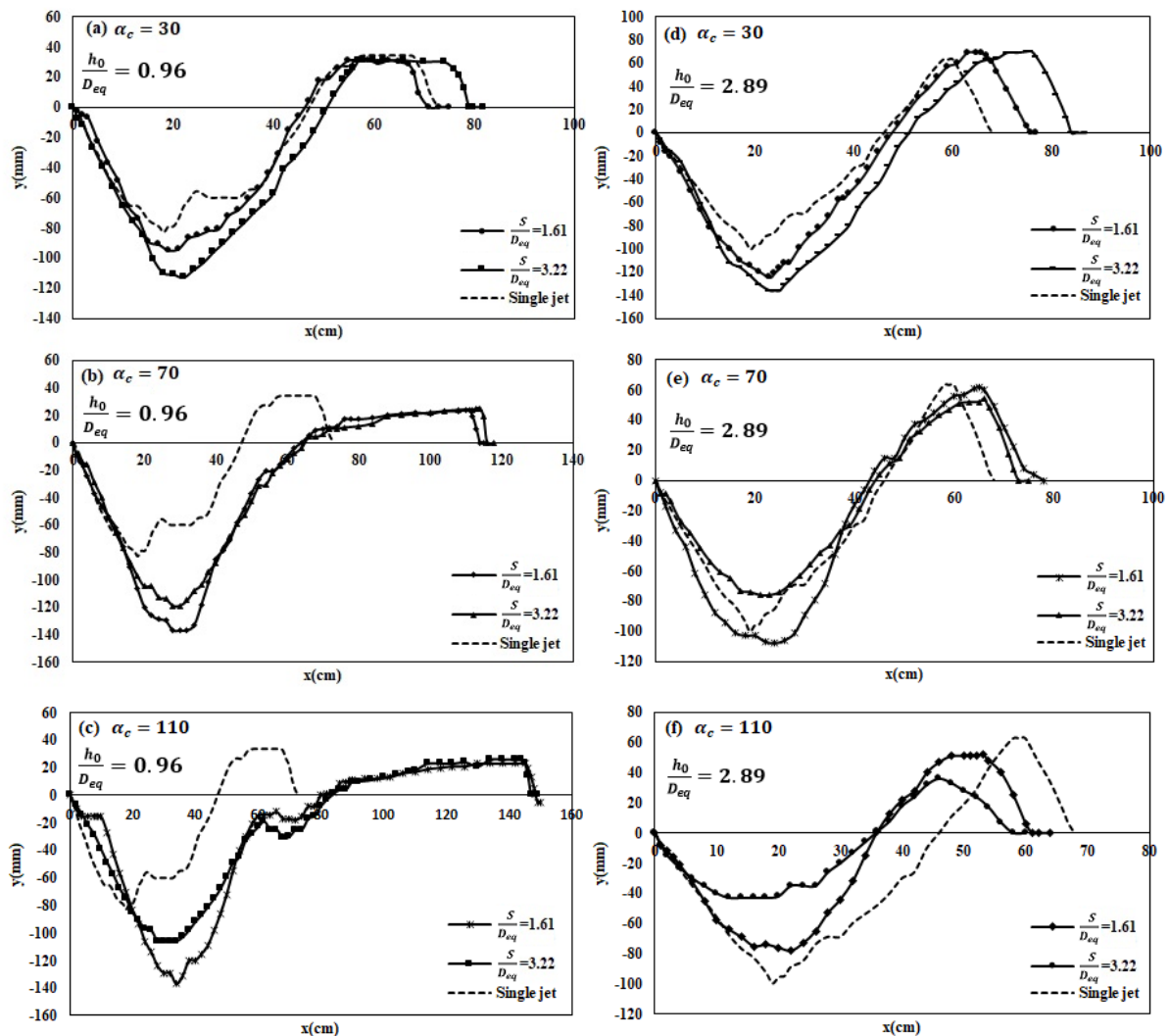


Fig. 12 Comparison of longitudinal scour profiles of crossing jets versus single jet ($F_{d90} = 12.5$).
شکل ۱۲ مقایسه نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی جت‌های متقاطع و جت منفرد ($F_{d90} = 12.5$).

کرد که در زاویه $\alpha_c = 70$ با افزایش عمق پایاب عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد که به دلیل همان استهلاک انرژی می‌باشد. در زاویه تقاطع $\alpha_c = 110$ نیز فرآیند مانند زاویه ۷۰ درجه است و بدلیل استهلاک بیشتر انرژی می‌توان شاهد کاهش بیشتر عمق آب‌شستگی بود. همچنین همان‌طور که پیشتر بیان شد می‌توان مشاهده کرد که در عمق پایاب کم $\frac{h_0}{D_{eq}} = 0.96$ عمق حفره آب‌شستگی در زاویه تقاطع ۳۰ درجه کمتر از زاویه‌های دیگر است. اما با افزایش عمق پایاب به $\frac{h_0}{D_{eq}} = 2.89$ و استهلاک جت، عمق آب‌شستگی در زاویه‌های ۷۰ و ۱۱۰ درجه کمتر از زاویه ۳۰ درجه می‌شود.

شکل ۱۴(a) تغییرات طول حفره آب‌شستگی نسبت به عدد فرود ذره را نشان می‌دهد که روندی صعودی دارد، همان‌طور که می‌توان مشاهده کرد در زاویه‌های $\alpha_c = 30$ و $\alpha_c = 110$ در دبی کم $F_{d90} = 9.29$ و زیاد $F_{d90} = 12.5$ ، مقادیر طول آب‌شستگی نزدیک به یکدیگر هستند. در زاویه تقاطع ۷۰ درجه طول آب‌شستگی بیشتر از زاویه‌های دیگر است. در شکل ۱۴(b) نیز می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عمق پایاب طول حفره نیز کاهش

جت‌ها پس از نقطه تقاطع و انرژی بیشتر آن است. در شکل‌های (b,c) ۱۲ مربوط به زاویه‌های تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه نیز عمق‌های آب‌شستگی بیشتر از جت منفرد است، همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد به احتمال قوی به دلیل وجود جریان شعاعی و مولفه رو به جلوی جریان می‌باشد. کمتر بودن عمق آب‌شستگی در جت منفرد نسبت به جت‌های متقاطع در همه‌ی زاویه‌ها در شرایط عمق پایاب کم با نتایج (Pagliara et al. 2011) نیز مطابقت دارد. در شکل‌های (d,e,f) ۱۲ نیز می‌توان نیمرخ‌های طولی آب‌شستگی را در عمق پایاب زیاد $\frac{h_0}{D_{eq}} = 2.89$ مشاهده کرد، شکل (d) ۱۲ نشان می‌دهد که نیمرخ‌ها در زاویه تقاطع ۳۰ درجه و $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61, 3.22$ نیز مانند شکل (a) ۱۲ دارای عمق و ابعاد آب‌شستگی بزرگ‌تری نسبت به جت منفرد هستند و پشته‌های پایین دست همگی دارای خط‌الراس می‌باشند. اما نتایج تحقیقات (Pagliara et al. 2011) نشان داد که در زاویه ۳۰ درجه در عمق پایاب زیاد عمق آب‌شستگی جت منفرد بیشتر از جت متقاطع بود. در شکل (e) ۱۲ عمق آب‌شستگی در جت‌های متقاطع ۷۰ درجه در شرایط $\frac{S}{D_{eq}} = 3.22$ کمتر از جت منفرد است، اما در شرایط $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61$ همچنان دارای عمق بیشتری است.

شکل (f) ۱۲ نشان می‌دهد که در زاویه تقاطع ۱۱۰ درجه ابعاد حفره در هر دو وضعیت $\frac{S}{D_{eq}} = 1.61, 3.22$ کوچک‌تر از جت منفرد است که بدلیل استهلاک زیاد جت در عمق پایاب زیاد می‌باشد. پشته‌های پایین دست حفره نیز در هر دو زاویه تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه و $\frac{h_0}{D_{eq}} = 2.89$ دارای خط‌الراس می‌باشند.

همان‌طور که از شکل ۱۳(a) مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود ذره در همه‌ی زاویه‌های تقاطع جت، حداکثر عمق حفره آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. عمق آب‌شستگی در زاویه‌های تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه در بیشتر دبی‌ها نسبت به زاویه تقاطع ۳۰ درجه بیشتر است. شکل ۱۳(b) نشان می‌دهد که در زاویه تقاطع $\alpha_c = 30$ با افزایش عمق پایاب، عمق حفره آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. برخلاف زاویه تقاطع ۳۰ درجه می‌توان مشاهده

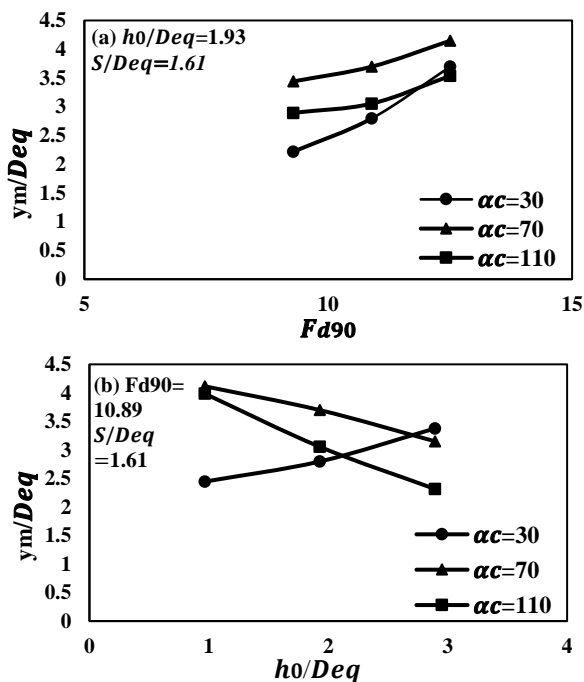


Fig. 13 Nondimensional variation of scour hole depth with Froude number and tailwater level at various angles. شکل ۱۳ تغییرات بی‌بعد حداکثر عمق حفره آب‌شستگی با عدد فرود و عمق پایاب در زاویه‌های مختلف.

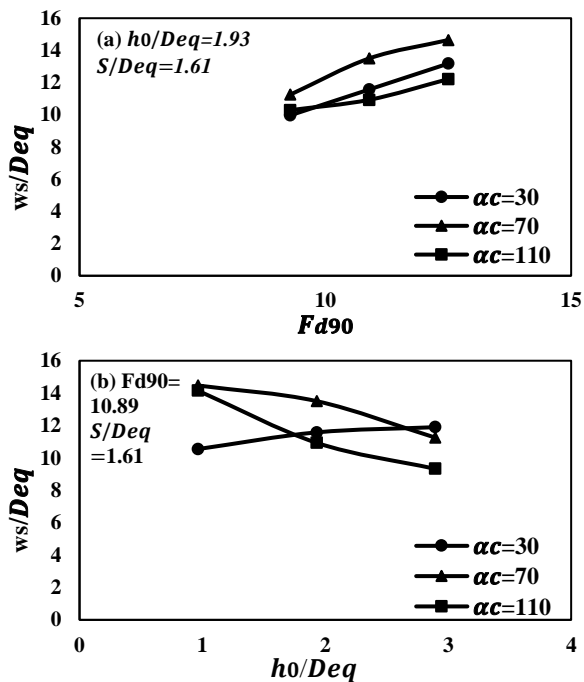


Fig. 15 Nondimensional variation of scour hole width with Froude number and tailwater level at various angles. شکل ۱۵ تغییرات بی‌بعد عرض حفره آب‌شستگی با عدد فرود و عمق پایاب در زاویه‌های مختلف.

تغییرات نمودار عرض حفره تقریباً همانند روند تغییرات عمق حفره آب‌شستگی (شکل ۱۳b) می‌باشد.

در شکل (a) ۱۶ می‌توان مشاهده کرد که تغییرات فراسنجه محل انتهای پشته پایین دست نیز نسبت به عدد فرود ذره در همه‌ی زاویه‌های تقاطع روندی صعودی دارد و مقدار آن در زاویه $\alpha_c = 30^\circ$ نسبت به زاویه‌های 70° و 110° درجه کمتر است. برخلاف دیگر ابعاد حفره (طول، عمق و عرض) که در زاویه تقاطع 110° درجه مقادیر کمتری نسبت به زاویه 70° درجه داشتند، از نمودار (a) ۱۶ مشاهده می‌شود که در زاویه تقاطع 110° درجه به دلیل کشیدگی بیشتر پشته پایین دست، محل قرارگیری انتهای پشته دارای مقادیر بیشتری نسبت به زاویه‌های دیگر است.

شکل (b) ۱۶ نیز نشان می‌دهد با افزایش عمق پایاب محل انتهای پشته در زاویه‌های 70° و 110° درجه عقب نشینی کرده و کاهش می‌یابد ولی در زاویه $\alpha_c = 30^\circ$ منحنی آن با شیب کمی افزایش می‌یابد و در پایاب $\frac{h_0}{Deq} = 2.89$ مقدار آن به مقدار I_r در زاویه 70° درجه نزدیک می‌شود. در عمق پایاب حداکثر نیز I_r کمترین مقدار را در زاویه تقاطع

می‌یابد به غیر از زاویه تقاطع 30° درجه که روندی تقریباً افزایشی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در عمق پایاب کم $\frac{h_0}{Deq} = 0.96$ مقادیر طول حفره در زاویه‌های مختلف اختلاف زیادی با یکدیگر دارند ولی در شرایط $\frac{h_0}{Deq} > 0.96$ اختلاف طول به یکدیگر نزدیک‌تر هستند. در شرایط $\alpha_c = 110^\circ$ و $\frac{h_0}{Deq} = 0.96$ طول حفره آب‌شستگی بیشترین مقدار را نسبت به دیگر زاویه‌ها دارد و با افزایش عمق پایاب به $\frac{h_0}{Deq} = 2.89$ طول حفره کوچک‌تر از دیگر زاویه‌ها می‌شود. در شکل (a) ۱۵ نیز می‌توان مشاهده کرد که افزایش دبی افزایش عرض حفره را در همه‌ی زاویه‌ها به دنبال دارد و مقادیر عرض حفره مانند طول حفره در زاویه‌های 30° و 110° درجه نزدیک به یکدیگر هستند و در حالت $Fd_{90} > 9.29$ عرض حفره آب‌شستگی در زاویه تقاطع 30° درجه بیشتر از عرض حفره در زاویه تقاطع 110° درجه می‌باشد.

شکل (b) ۱۵ نیز نشان می‌دهد با افزایش عمق پایاب عرض حفره آب‌شستگی برای زاویه $\alpha_c = 30^\circ$ افزایش یافته و برای زاویه‌های $\alpha_c = 70^\circ$ و $\alpha_c = 110^\circ$ درجه کاهش می‌یابد. می‌توان از شکل (b) ۱۵ ملاحظه کرد که روند

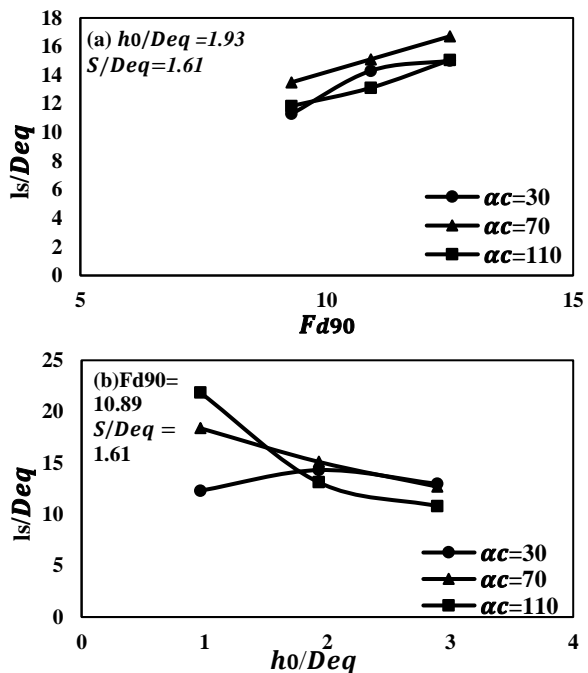


Fig. 14 Nondimensional variation of scour hole length with Froude number and tailwater level at various angles. شکل ۱۴ تغییرات بی‌بعد طول حفره آب‌شستگی با عدد فرود و عمق پایاب در زاویه‌های مختلف.

عملکرد آنها در قالب معیارهای آماری ضریب تعیین (R^2) و درصد میانگین قدر مطلق خطا^۱ (MAPE) (معادله‌های ۸ و ۷) ارزیابی شد. بر مبنای رابطه (۴) بدست آمده در بخش ۲-۳ می‌توان آن را به صورت معادلات زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\phi}{Deq} = a (Fd90)^b \left(\frac{h_0}{Deq}\right)^c \left(\frac{S}{Deq}\right)^d (\alpha_c)^e \quad (5)$$

$$\frac{\phi}{Deq} = a(Fd90) + b \left(\frac{h_0}{Deq}\right) + c \left(\frac{S}{Deq}\right) + d(\alpha_c) + e \quad (6)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right| \times 100 \quad (8)$$

که X_i عبارت است از مقدار مشاهده شده و Y_i مقدار پیش‌بینی شده. برای استخراج رابطه‌های رگرسیونی و تعیین ضرایب a, b, c, d, e از کل داده‌ها استفاده شد و پس از انتخاب بهترین مدل‌ها ضرایب آنها در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲ ضرایب معادله ۵ با کل داده‌ها

Table 2 Equation 5's coefficients with all data				
Variable	ym/Deq	l _s /Deq	ws/Deq	l _r /Deq
a	0.719	2.057	1.969	2.204
b	0.849	0.865	0.81	1.082
c	-0.171	-0.352	-0.18	-0.41
d	-0.122	0.131	-0.078	0.063
e	-0.091	0.151	-0.108	0.271
R²	0.32	0.68	0.47	0.73
MAPE	55.8	12.6	14.6	14.9

جدول ۳ ضرایب معادله ۶ با کل داده‌ها

Table 3 Equation 6's coefficients with all data				
Variable	ym/Deq	l _s /Deq	ws/Deq	l _r /Deq
a	0.237	1.198	0.844	2.54
b	-0.353	-2.95	-1.31	-5.76
c	-0.186	0.849	-0.475	0.78
d	-0.432	1.57	-1.58	5.11
e	2.167	3.93	7.92	0.975
R²	0.38	0.61	0.52	0.65
MAPE	21	13.1	13.4	16.7

1. Mean Absolute Percentage Error

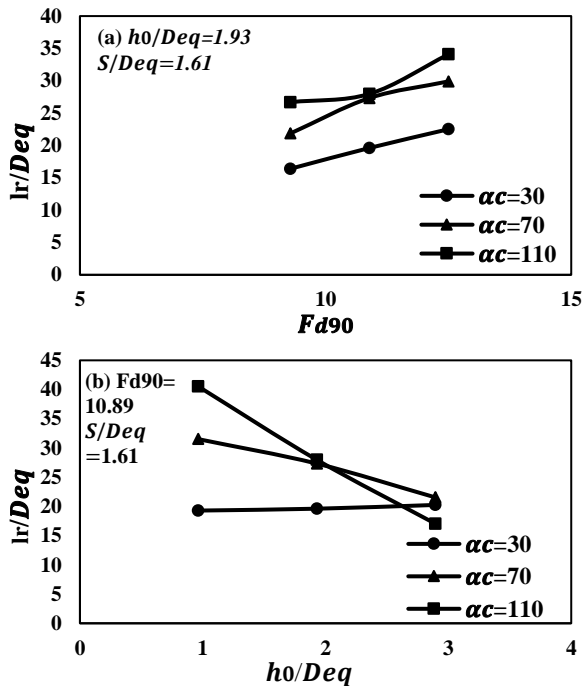


Fig. 16 Nondimensional variation of scour ridge end with Froude number and tailwater level at various angles.

شکل ۱۶ تغییرات بی‌بعد محل انتهای پشته آب‌شستگی با عدد فرود و عمق پایاب در زاویه‌های مختلف.

۱۱۰ درجه دارد.

۵- رابطه‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی ابعاد حفره آب‌شستگی

با توجه به داده‌های بدست آمده از این تحقیق و رابطه‌های بدست آمده در بخش تحلیل ابعادی، معادله‌های رگرسیونی بی‌بعد برای تخمین ابعاد حفره آب‌شستگی شامل حداکثر عمق حفره آب‌شستگی، طول حفره آب‌شستگی، عرض حفره آب‌شستگی و فاصله انتهای پشته پایین دست ارائه شد.

رابطه‌هایی که توسط Pagliara et al. (2011) برای پیش‌بینی ابعاد حفره آب‌شستگی ناشی از جت‌های متقاطع ارائه شده است برای هر زاویه تقاطع به صورت جداگانه می‌باشد و قادر به درون‌یابی در زاویه‌های بینابینی نیست. برای همین منظور سعی شد با داده‌های این تحقیق رابطه‌هایی استخراج شود که بتواند ابعاد حفره را در زاویه‌های بین $30 \leq \alpha_c \leq 110$ نیز پیش‌بینی کند. مدل‌های رگرسیونی خطی و توانی برآزش داده شد و

به صورت جداگانه می‌باشد. در جدول ۴ نتایج این معادله‌ها ارائه شده است. همان طور که از جدول ۴ ملاحظه می‌شود مدل‌های توانی ارائه شده برای هر زاویه تقاطع به دلیل پیچیده نبودن فیزیک مسئله، قادر به تخمین ابعاد حفره آبشستگی با دقت به نسبت خوبی می‌باشند ($R^2 > 0.8$). می‌توان مشاهده کرد که مدل رگرسیونی در زاویه تقاطع $\alpha_c = 30$ در تخمین فراسنجه‌های عمق حفره آبشستگی، عرض حفره و فاصله انتهای پشته نسبت به زاویه‌های دیگر دقیق‌تر عمل کرده است.

برای ارزیابی دقت معادله‌های ارائه شده در این تحقیق، نتایج آنها با رابطه‌های ارائه شده در تحقیق پیشین توسط Pagliara et al. (2011) مقایسه شد. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های محققان پیشین، از داده‌های این تحقیق برای اعتبارسنجی معادله‌ها استفاده شد. در جدول ۵ می‌توان رابطه‌های ارائه شده برای عمق، طول و عرض حفره آبشستگی در زاویه‌های مختلف توسط Pagliara et al. (2011) را مشاهده کرد.

لازم به یادآوری است که رابطه‌های ارائه شده توسط آنها برای زاویه‌های تقاطع بیشتر از ۳۰ درجه مربوط به حالت‌های ۷۵ و ۱۲۰ درجه می‌باشد که بترتیب ۵ و ۱۰ درجه بیشتر از زاویه‌های این تحقیق (۷۰ و ۱۱۰ درجه) است که بدلیل وجود اختلاف کم زاویه، تصمیم گرفته شد نتایج آنها با نتایج این تحقیق در زاویه ۷۰ و ۱۱۰ درجه مقایسه و ارزیابی شود. نتایج معادله‌های جدول ۵ در جدول ۶ قابل مشاهده است.

همان طور که از جدول ۶ ملاحظه می‌شود، به طور کلی نتایج معادله‌ها نسبت به رابطه‌های این تحقیق (جدول ۴) دارای دقت پایین‌تری می‌باشند. در زاویه ۳۰ درجه برای پیش‌بینی عمق نسبی حفره آبشستگی معادله ارائه شده دارای دقت بالایی نمی‌باشد ($R^2=0.69$, $MAPE=68.8$) در مقایسه با این تحقیق ($R^2=0.95$, $MAPE=3.8$). در پیش‌بینی طول و عرض حفره نیز با $R^2=0.86$ و خطاهای بیشتر دقت پایین‌تری نسبت به معادله‌های جدول ۴ دارد. در زاویه تقاطع ۷۵ درجه مدل‌ها نسبت به زاویه ۳۰ درجه دارای دقت بالاتری در پیش‌بینی ابعاد حفره هستند به

همان طور که از جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد مدل توانی نتایج ضعیفی را برای پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی به ویژه عمق آبشستگی ($R^2=0.32$, $MAPE=55.8$) ارائه می‌دهد و در تخمین فراسنجه‌های I_s و I_r بهتر عمل می‌کند. در همه‌ی مدل‌ها $R^2 < 0.8$ می‌باشد که چندان رضایت‌بخش نیست. نتایج جدول ۳ نیز تقریباً مانند جدول ۲ می‌باشد و مدل‌های خطی بدست آمده نیز رضایت بخش نیستند اما مدل خطی در تخمین عمق آبشستگی (y_m) بهتر عمل کرده است ($R^2=0.38$, $MAPE=21$).

به دلیل پیچیدگی زیاد پدیده آبشستگی جت‌های متقاطع و اینکه مشاهده شد هر فراسنجه هیدرولیکی بر روی هر کدام از ابعاد هندسی حفره آبشستگی تاثیر متفاوتی می‌گذارد، رابطه‌های ۵ و ۶ که با کل داده‌ها بدست آمده است دقت پایینی داشته و از عمومیت لازم و کافی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین رابطه‌های دیگری نیز به شکل توانی رابطه (۵) اما این بار به صورت جداگانه برای هر یک از سه زاویه تقاطع استخراج و ارزیابی شد که در آن فراسنجه α_c به دلیل ثابت بودن از معادله ۵ حذف شد. در تحقیقات Pagliara et al. (2011) این نتیجه‌گیری که پدیده آبشستگی جت‌های متقاطع دارای پیچیدگی زیادی است نیز دلیل اصلی برای ارائه معادله‌ها در هر زاویه

جدول ۴ ضرایب معادله ۵ در زاویه‌های تقاطع جداگانه

Table 4 Equation 5's coefficients at separate angles					
Variable Coef.	α_c	ym /Deq	I_s /Deq	ws /Deq	I_r /Deq
a	30°	0.11	1.157	0.821	1.123
b		1.26	0.984	1.034	1.147
c		0.238	0.033	0.127	0.0678
d		0.266	0.144	0.194	0.198
R²		0.95	0.91	0.97	0.97
MAPE		3.8	2.8	2.2	2.4
a	70°	1.882	2.52	3.99	3.622
b		0.385	0.806	0.578	0.892
c		-0.281	-0.303	-0.279	-0.359
d		-0.209	0.0757	-0.143	0.0854
R²		0.85	0.95	0.87	0.93
MAPE		6.3	3.3	5.3	4.8
a	110°	0.64	2.421	2.646	2.223
b		0.869	0.871	0.775	1.212
c		-0.529	-0.662	-0.456	-0.683
d		-0.499	0.171	-0.347	-0.012
R²		0.92	0.94	0.95	0.94
MAPE		11.1	6.5	6	10

جدول ۵ رابطه‌های ارائه شده توسط Pagliara et al. (2011) برای ابعاد حفره آب‌شستگی جت‌های متقاطع

Table 5 Pagliara et al. (2011)'s equations for the scour hole dimensions of the crossing jets

Equation	α_c
$\frac{y_m}{D_{eq}} = \left[0.3 F_{d90} + (-0.046 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 + 0.52 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.16) \right]$ $\cdot \left[(0.003 \frac{h_0}{D_{eq}} - 0.02) \left(\frac{S}{D_{eq}}\right)^2 + (-0.05 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.24) \frac{S}{D_{eq}} + 1 \right]$	30°
$\frac{l_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{30^\circ} \left[(0.014 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 - 0.03 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.08) \frac{S}{D_{eq}} + 3 \right]$	30°
$\frac{w_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{30^\circ} \left[(0.009 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 - 0.024 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.035) \frac{S}{D_{eq}} + 3 \right]$	30°
$\frac{y_m}{D_{eq}} = [0.3 F_{d90} + (-0.53 \frac{h_0}{D_{eq}} + 3)] \cdot \left[(-0.01 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 + 0.006 \frac{h_0}{D_{eq}} - 0.06) \frac{S}{D_{eq}} + 1 \right]$	75°
$\frac{l_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{75^\circ} \left[(0.07 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 - 0.16 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.5) \frac{S}{D_{eq}} + 3 \right]$	75°
$\frac{w_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{75^\circ} \left[(0.135 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.084) \frac{S}{D_{eq}} + 3 \right]$	75°
$\frac{y_m}{D_{eq}} = [0.3 F_{d90} + (-0.46 \frac{h_0}{D_{eq}} + 1.28)] \cdot \left[(-0.03 \frac{h_0}{D_{eq}} - 0.02) \frac{S}{D_{eq}} + 1 \right]$	120°
$\frac{l_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{120^\circ} \left[(0.074 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.3) \frac{S}{D_{eq}} + 4 \right]$	120°
$\frac{w_s}{D_{eq}} = \left(\frac{y_m}{D_{eq}}\right)_{120^\circ} \left[(-0.026 \left(\frac{h_0}{D_{eq}}\right)^2 + 0.2 \frac{h_0}{D_{eq}} + 0.026) \frac{S}{D_{eq}} + 4 \right]$	120°

مدل‌های رگرسیونی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی در قالب نمودارهای پراکنش نیز ارائه شده است (شکل‌های ۱۹-۱۷).

همانطور که از شکل ۱۷ مشاهده می‌شود دقت پایین معادله Pagliara et al. (2011) در پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در زاویه ۳۰ درجه مشهود است به طوری که نقطه‌ها از خط برازش ایده‌آل با زاویه ۴۵ درجه فاصله بیشتری نسبت به دیگر نقطه‌ها دارند. نکته دیگر اینکه همه‌ی رابطه‌های تحقیق پیشین عمق آب‌شستگی را در همه‌ی زاویه‌های تقاطع، بیش از مقدار آزمایشگاهی تخمین زده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیز مقادیر نسبی طول و عرض حفره آب‌شستگی را نشان می‌دهند، همان‌طور که ملاحظه می‌شود معادله‌های Pagliara et al. (2011) در پیش‌بینی این فراسنجه‌ها ضعیف‌تر عمل کرده و بیشتر مقادیر را بیش از مقدار آزمایشگاهی تخمین زده است.

طوری که در تخمین عمق آب‌شستگی $R^2=0.95$ و خطای MAPE به ۱۹/۴ درصد کاهش می‌یابد.

در زاویه تقاطع ۱۲۰ درجه عمق آب‌شستگی با دقت به نسبت خوبی محاسبه شده است اما با درصد خطای بیشتر (MAPE=24.1) نسبت به معادله این تحقیق که MAPE=11.1 می‌باشد.

جدول ۶ نتایج رابطه‌های ارائه شده توسط Pagliara et al.

(2011) با اعمال داده‌های این تحقیق

Table 6 Results of equations (Pagliara et al. 2011) employing the current research dataset

α_c	Error	y_m/D_{eq}	l_s/D_{eq}	w_s/D_{eq}
30°	R ²	0.69	0.86	0.86
	MAPE	68.8	21.6	33
75°	R ²	0.95	0.92	0.88
	MAPE	19.4	9	28.3
120°	R ²	0.91	0.79	0.79
	MAPE	24.1	16.7	44.3

برای مقایسه و ارزیابی بهتر نتایج، مقادیر خروجی

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق فرآیند آبشستگی جت‌های متقاطع متقارن در سه زاویه مختلف ۷۰، ۳۰ و ۱۱۰ درجه در مصالح بستر با قطر متوسط $d_{50}=1.4\text{mm}$ بررسی و تاثیر فراسنجه‌های مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی ارزیابی شد. جت‌ها در زاویه تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ درجه در شرایط هیدرولیکی عمق پایاب کم $\frac{h_0}{D_{eq}} = 0.96$ آبشستگی بیشتری نسبت به جت با زاویه تقاطع ۳۰ درجه و جت منفرد ایجاد کردند. با افزایش فراسنجه‌های عمق پایاب $(\frac{h_0}{D_{eq}})$ و فاصله نقطه تقاطع جت‌ها $(\frac{S}{D_{eq}})$ در زاویه تقاطع ۳۰ درجه عمق حفره آبشستگی نیز بیشتر می‌شود اما در زاویه‌های $\alpha_c = 70, 110$ برعکس این فرآیند رخ می‌دهد و آبشستگی کمتر می‌شود. در عمق پایاب کم و زاویه‌های تقاطع ۷۰ و ۱۱۰ پشته آبشستگی از حالت تقارن خارج شده و به سمت دیواره کانال متمایل می‌شود. مدل‌های خطی و توانی بدست آمده از مجموعه کل داده‌ها بدلیل پیچیدگی پدیده آبشستگی جت‌های متقاطع قادر به تخمین دقیق ابعاد حفره آبشستگی در همه‌ی زاویه‌ها نیستند، ولی مدل‌های توانی بدست آمده برای هر زاویه تقاطع، دارای دقت به نسبت خوبی در پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی می‌باشند. با مقایسه نتایج رابطه‌های این تحقیق و تحقیق پیشین مشخص شد که معادله‌های ارائه شده نسبت به تحقیق پیشین از دقت بالاتری برخوردارند. این تحقیق نشان داد که استفاده از جت‌های متقاطع لزوماً باعث کاهش آبشستگی نمی‌شود و این هم‌زمان بستگی به عوامل متعدد هیدرولیکی مانند زاویه تقاطع جت‌ها، عمق پایاب و فاصله نقطه تقاطع جت‌ها با سطح پایاب دارد.

۷- فهرست نشانه‌ها

D_{eq}	قطر جت معادل (cm)
d_s	قطر ذرات بستر (cm)
F_{d90}	عدد فرود ذرات
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h_0	عمق پایاب (cm)
l_r	محل انتهایی پشته آبشستگی (cm)

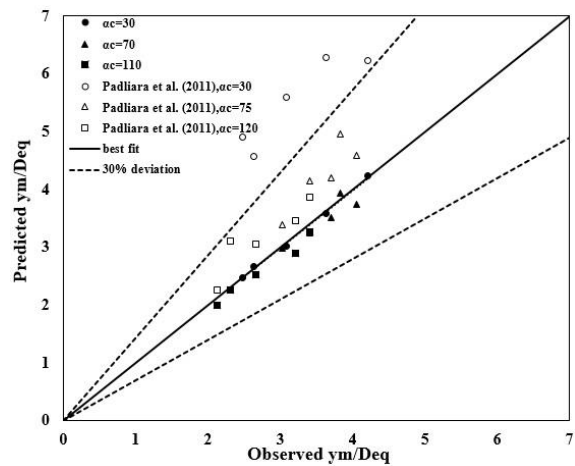


Fig. 17 Comparison between predicted and measured values of scour hole depth.

شکل ۱۷ مقایسه بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده عمق حفره آبشستگی.

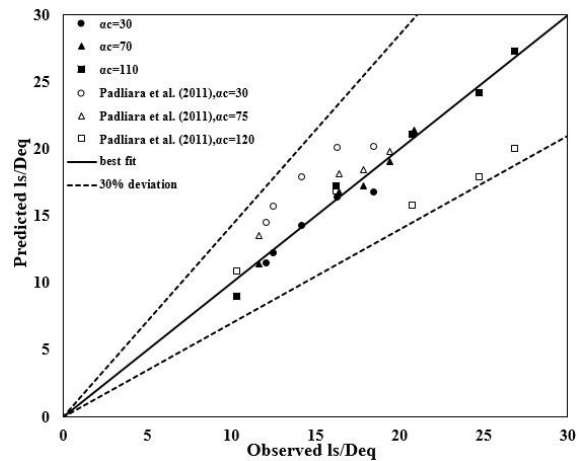


Fig. 18 Comparison between predicted and measured values of scour hole length.

شکل ۱۸ مقایسه بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده طول حفره آبشستگی.

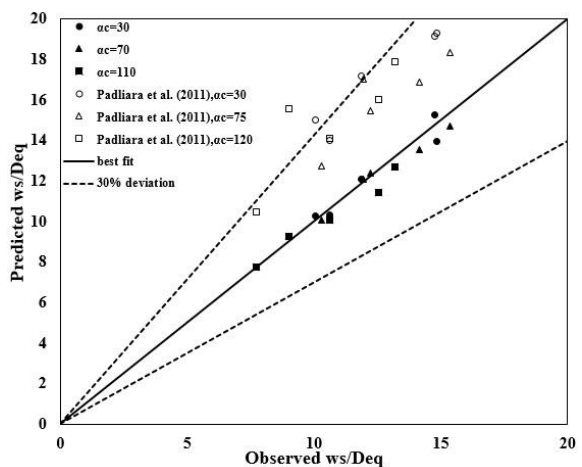


Fig. 19 Comparison between predicted and measured values of scour hole width.

شکل ۱۹ مقایسه بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده عرض حفره آبشستگی.

jets. Australian Journal of Water Resources. 16(2), 163-172.

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

Pagliara, S., Amidei, M. and Hager, W.H. (2008). Hydraulics of 3D plunge pool scour. J. Hydr. Eng. 134(9), 1275-1284.

Pagliara, S., Hager, W.H. and Minor, H.-E. (2006). Hydraulics of plane plunge pool scour. J. Hydraul. Eng. 132(5), 450-461.

Pagliara, S., Roy, D. and Palermo, M. (2009). Effect of jet air content on 3D plunge pool scour. Proc. of 33rd IAHR Congress Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, 9-14 August, 3588-3595.

Pagliara, S., Roy, D. and Palermo, M. (2010). 3D plunge pool scour with protection measures. Journal of Hydro-Environment Research. 4(3), 225-233.

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

Sarathi, P., Faruque M.A.A. and Balachandar, R. (2008). Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. J. Hydra. Res. 46(2), 158-175.

Uyumaz, A. (1988). Scour downstream of the vertical gate. J. Hydraulic Eng. 114(7), 811-816.

Visher, D.L. and Hager, W.H. (1998). Dam Hydraulics. John Wiley & Sons Ltd.

l_s طول حفره آب‌شستگی (cm)

Q دبی (m^3s^{-1})

S فاصله نقطه تقاطع جت‌ها با سطح آب (cm)

V سرعت جت‌های متقاطع (ms^{-1})

w_s عرض حفره آب‌شستگی (cm)

y_m حداکثر عمق حفره آب‌شستگی (cm)

ρ چگالی آب (kgm^{-3})

μ لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)

ρ_s چگالی ذرات (kgm^{-3})

ϕ ابعاد حفره آب‌شستگی (cm)

α_c زاویه بین جت‌های متقاطع (Rad)

α_v زاویه عمودی جت‌ها (Rad)

۸- منابع

Breussers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. (1991). Scouring. Hydraulic structures design manual. Rotterdam, Netherlands.

Canepa, S. and Hager, W.H. (2003). Effect of air jet content on plunge pool scour. J. Hydraul. Eng. 128(5), 358-365.

Latifi, A., Hosseini, S.A. and Saneie, M. (2018). Comparison of downstream scour of single and combined free-fall jets in co-axial and non-axial modes. Journal of Model. Earth Syst. Environ. 4, 1271-1284.

Li, L.-X., Liao, H.-S. and Li, T.-X. (2006). A hybrid model for simulating velocity field of a river with complex geometry plunged by multiple jets. Hydrodynamics. 18(6), 752-759.

Mehraein, M., Ghodsian, M. and Schleiss, A. (2012). Scour formation due to simultaneous circular impinging jet and wall jet. Journal of Hydraulic Research. 50(4), 395-399.

Pagliara, S. and Palermo, M. (2013). Analysis of scour characteristics in presence of aerated crossing

