



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۶۴۹-۲۶۳۷)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.325981.669004>

(مقاله علمی - پژوهشی)

## Experimental Investigation of Scour by Turbulent Wall Jets in Flowing Water

MEYSAM NOURI<sup>1</sup>, RASOOL ILKHANIPOUR ZEYNALI<sup>\*</sup>, AMIR HOSSEIN AZIMI<sup>2</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Lakehead, Thunder Bay, Canada.

(Received: June. 23, 2021- Revised: Sep. 10, 2021- Accepted: Sep. 18, 2021)

### ABSTRACT

In the present study, scour development by wall jets in flowing water in a 90° bend was investigated. To study the secondary flows effect, two different locations for the jet on the outer wall of the bend were considered (1) the beginning of the bend (0°) and (2) the end of the bend (90°). The studied parameters are the flume Froude number ( $F_f$ ), the jet Reynolds number ( $R_j$ ), and the jet submergence rate ( $H/d_o$ ). The results showed that under the influence of the flume flow, the jet trajectory and the scour profile are deflected to the flume flow direction. With increasing  $R_j$ , mound height ( $h_m$ ) and the max scour depth ( $d_s$ ) increase. Due to the secondary currents effect,  $d_s$  at the end of the bend is as much as the nozzle diameter ( $1d_o$ ) greater than  $d_s$  for the jet at the beginning of the bend. Also, for  $R_j > 36000$ , the scour development in the jet direction ( $y_s/B$ ) can make a choking in the flume that for  $F_f < 0.121$ , the flume choking is more likely. The findings show that with increasing the ratio of the flume flow velocity to the jet velocity ( $r$ ), the scour profile development in the flume flow direction ( $x_s/d_o$ ) increases and can reach  $100d_o$ . For  $r < 0.06$ , with decreasing the flume velocity,  $y_s/B$  increases and for  $r > 0.06$ , increase in the Flume velocity causes an increase in the scour development in the width of the flume. Furthermore,  $r = 0.06$ , was introduced as a point with the minimum effect of the jet on the flume, which can be utilized in the design of wastewaters discharge. Finally, some equations with acceptable accuracy were developed to estimate the scour profile development in the length and width of the flume.

**Keywords:** Wall Jet, Submerged Jet, Turbulent Flow, Channel Bend, Local Scour.

---

\*Corresponding Author's Email: r.ilkhanipour@urmia.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای آشفته در آب جاری

میثم نوری<sup>۱</sup>، رسول ایلخانی‌پور زینالی<sup>۱\*</sup>، امیرحسین عظیمی<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه لیکهد، تاندربی، کانادا.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۲۷)

### چکیده

در مطالعه حاضر توسعه آبشستگی در اثر جت‌های دیواره‌ای وارده در آب جاری در قوس ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. برای مطالعه تأثیر جریان‌های ثانویه، دو موقعیت برای جت در دیواره خارجی در نظر گرفته شد (۱) شروع قوس (۰°) و (۲) انتهای قوس (۹۰°). پارامترهای مطالعه شده عبارت‌اند از: عدد فرود فلوم ( $F_f$ )، عدد رینولدز جت ( $R_j$ ) و نسبت استغراق جت ( $H/d_o$ ). نتایج نشان داد تحت تأثیر جریان در فلوم، مسیر جت و پروفیل آبشستگی به سمت جریان فلوم انحراف پیدا می‌کنند. با افزایش  $R_j$ ، ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) و حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) افزایش می‌یابد. در اثر جریان‌های ثانویه،  $d_s$  در انتهای قوس به اندازه قطر نازل ( $d_o$ ) از  $d_s$  برای جت در شروع قوس بزرگ‌تر می‌باشد. همچنین برای  $R_j > 3600$ ، توسعه آبشستگی در جهت جت ( $v_s/B$ ) می‌تواند موجب انسداد کانال شود که برای  $F_f < 0.121$  انسداد کانال محتمل‌تر می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش نسبت سرعت جریان فلوم به سرعت جت ( $r$ )، توسعه پروفیل آبشستگی در جهت جریان فلوم ( $x_s/d_o$ ) افزایش می‌یابد و می‌تواند تا  $1.0 d_o$  پیشروی داشته باشد. برای  $r < 0.06$ ، با کاهش سرعت جریان فلوم،  $v_s/B$  افزایش می‌یابد و برای  $r > 0.06$ ، افزایش سرعت جریان فلوم موجب گسترش پیشروی جت در عرض کانال می‌شود. علاوه بر این،  $r = 0.06$  به عنوان نقطه‌ای با کم‌ترین تأثیر جت وارده بر کانال معرفی شد که می‌تواند در طراحی تخلیه فاضلاب‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در پایان نیز روابطی با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی پروفیل آبشستگی در طول و عرض فلوم ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: جت دیواره‌ای، جت مستغرق، جریان متلاطم، قوس کانال، آبشستگی موضعی.

### مقدمه

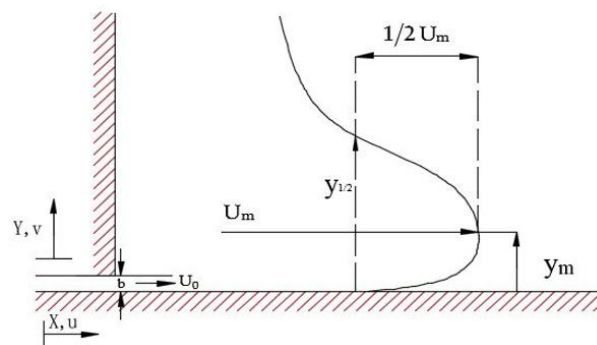
رفتار یک جت خروجی به صورت مماس به یک سطح جامد به علت کاربرد آن در موارد مختلف همانند کنترل لایه مرزی بال هواپیما مورد علاقه محققان می‌باشد. در صورت عدم وجود گرادیان فشار، میدان جریان ایجاد شده توسط این جت، که جت دیواره‌ای نامیده می‌شود، ترکیبی از لایه مرزی و جریان آشفته آزاد می‌باشد که این میدان جریان می‌تواند با حضور جریانات ثانویه پیچیده‌تر باشد (Verhoff, 1963). به عبارتی، جت دیواره‌ای، دارای مشخصه دو مقیاسی می‌باشد، لایه داخلی جت، به لایه مرزی آشفته شباهت دارد، این در حالی است که لایه بیرونی، به مانند یک جت آزاد می‌باشد (Eriksson et al., 1998). اثر متقابل آشفته‌گی با دو مقیاس بزرگ و کوچک، یک میدان جریان پیچیده را تولید می‌کند و سبب توسعه جت دیواره‌ای می‌شود. در تعریفی دیگر، جت آشفته دیواره‌ای یک جریان برشی مستقیم در طول مرز صلب می‌باشد، در جایی که با توجه به اندازه حرکت تامین شده اولیه، در هر جایی در پایین دست سرعت به بیش از سرعت خارجی جریان

می‌رسد (Lauder & Rodi, 1983). لایه داخلی جت، از دیواره یا سطح صلب تا موقعیت سرعت ماکزیمم ( $U_m$ )، به لایه مرزی آشفته شباهت دارد، در حالی که لایه خارجی، از  $U_m$  تا لبه بیرونی جریان به جریان آزاد شباهت دارد. موقعیت جریان در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱)،  $b$  قطر خروجی نازل،  $U_o$  سرعت جت خروجی،  $U_m$  سرعت ماکزیمم،  $U$  محل وقوع ماکزیمم سرعت و  $U_{1/2}$  محل وقوع  $U = U_m / 2$  است. علاوه بر موارد ذکر شده، خروجی‌های مستغرق در سدهای برقایی، جریان در داخل پمپ‌های سیرکیولاتور (پمپ‌هایی که جهت به حرکت در آوردن مایعات مختلف در صنایع شیمیایی و تصفیه نفت به کار می‌روند و هم‌چنین با به گردش در آوردن آب به منظور گرم کردن یا خنک کردن مورد استفاده قرار می‌گیرند) (Eriksson, 2003)، جریان خروجی از زیر دریچه‌ها و روزنه‌ها به آب‌های ساکن (Ead & Rajaratnam, 2002)، انتقال و ترکیب فاضلاب‌ها و آلودگی‌ها در دریاچه‌ها و رودخانه‌ها (Tachie et al.)

متلاطم انجام شده‌اند، اغلب در رابطه با جت آب وارده در آب‌های ساکن می‌باشند. (Faruque et al. (2006) تأثیر عمق آب پایین‌دست بر میزان آبستنگی در اثر جت دیواره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور از نسبت استغراق‌های مختلف  $(H/d_0)$  شامل ۲، ۴ و ۶ استفاده نمودند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که عدد فرود چگال  $(F_0 = U_j/\sqrt{g(\Delta\rho/\rho)d_{50}})$ ، عمق پایاب و نسبت اندازه ذره به قطر نازل، بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش آبستنگی دارند. هم‌چنین محققین در این مطالعه گزارش دادند که برای  $F_0 < 5$ ، عمق آب پایین‌دست و هم‌چنین نسبت اندازه ذره به اندازه نازل، تأثیری در حداکثر عمق آبستنگی و عرض آن ندارند. (Bey et al. (2007) تأثیر ساختار سیال را بر روی آبستنگی حاصل از جت دیواره‌ای دو بعدی بررسی کردند. محققین عنوان کردند که می‌توان کل پروسه آزمایش را در پنج قسمت تقسیم نمود. مرحله زمانی اول، توام با حفاری و آبستنگی شدید به علت عمل مستقیم برشی توسط جت می‌باشد. دو یا سه کشیدگی طولی و تورفتگی مقعر در مقیاس زمانی دوم مشاهده شد. یک نوع حرکتی مشابه کنده شدن و بیرون انداختن رسوبات در مرحله زمانی سوم و چهارم دیده شد. در مرحله پنجم یا مرحله تعادل تقریبی، پروفیل آبستنگی به صورت دو بعدی در عرض فلوام مشاهده شد. (Rajaratnam & Berry (1997) فرسایش حاصل از جت دیواره‌ای مدور آب و هوا را در مطالعه‌ای آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. در اکثر آزمایش‌ها نتایج نشان داد که، حداکثر عمق آبستنگی، حداکثر طول چاله آبستنگی و حداکثر عرض آبستنگی به یک حالت تقریباً پایدار می‌رسند. دلیل این حالت تقریباً پایدار اینگونه ذکر شده است که حتی بعد از گذشت زمان بسیار طولانی، زمانی که حداکثر عمق، طول و عرض آبستنگی مستقل از زمان می‌شوند، تلاطم‌هایی به صورت تصادفی مشاهده می‌شوند که باعث آبستنگی موضعی و انتقال مصالح فرسایش یافته به چاله و ته‌نشینی آنها بر روی خط القعر آبستنگی می‌شوند.

Zhao et al. (2019) مطالعه‌ای آزمایشگاهی را جهت بررسی تأثیر نسبت اندازه ذره رسوبی به شعاع هیدرولیکی نازل انجام دادند. بدین منظور مقادیر ۰/۴۴ تا ۲/۴۴ برای پارامتر  $K_s$  در نظر گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که یک رابطه به صورت تابع گاوسی بین ابعاد آبستنگی و پارامتر  $K_s$  وجود دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که نسبت اندازه ذره رسوبی به شعاع هیدرولیکی نازل  $(K_s)$  و عدد فرود چگال  $(F_0)$ ، در مقایسه با سایر پارامترها بیش‌ترین تأثیر را در میزان آبستنگی دارد. Xie & Lim (2015) مطالعه‌ای آزمایشگاهی را برای بررسی تأثیر جهش‌های

(2004) و غیره از دیگر کاربردهای جت آشفته دیواره‌ای می‌باشد. با توسعه روزافزون جمعیت و گسترش شهرنشینی، گزارش‌های متعددی از تخلیه فاضلاب‌ها به آب‌های ساکن، مانند آب دریا و یا آب‌های در حال جریان، مانند آب رودخانه‌ها ارائه می‌شود. از طرفی با توجه به محدودیت‌های مربوط به مسائل محیط زیستی، به خصوص در کشورهای توسعه یافته، فاضلاب‌های صنعتی و یا شهری، بعد از گذر از فیلترهای متعدد در تصفیه‌خانه‌ها، به صورت تصفیه شده و با مشخصاتی همانند مشخصات سیال پذیرنده در آب رودخانه‌ها و دریاها تخلیه می‌شوند. هم‌چنین فاضلاب‌های اصلاح شده می‌توانند جهت احیای مجدد رودخانه‌ها و به عنوان گامی برای احیای محیط زیست در نظر گرفته شوند (Iwane et al. 2001).



شکل ۱- پیکربندی یک جت دیواره‌ای

تخلیه فاضلاب‌ها در رودخانه‌ها معمولاً توسط کانال‌های روباز یا از طریق لوله صورت می‌گیرد. چنانچه برای تخلیه فاضلاب‌ها از لوله استفاده شود، آن را می‌توان نمونه‌ای از جت متلاطم دیواره‌ای در جریان آب در نظر گرفت. هم‌چنین انتقال و تخلیه رواناب حاصل از بارندگی‌های شدید در رودخانه‌ها توسط لوله‌های ذهکش تعبیه شده می‌تواند نمونه دیگری از این جریان باشد. بررسی رفتار جت وارده در آب در جاری نسبت به جت در آب ساکن امری پیچیده می‌باشد (Ayoub 1971; Lee and Chu 2003) و به همین علت مطالعات اندکی به بررسی رفتار جت آب وارد شده در آب جاری پرداخته‌اند. وارد شدن جت‌های دیواره‌ای در آب جاری می‌تواند اثرات متعددی بر رودخانه و محیط پذیرنده جت داشته باشد، به‌طور مثال می‌تواند اثرات سوء زیست‌محیطی داشته باشد، موجب آبستنگی و حتی انسداد رودخانه گردد و یا بر مهاجرت و زیست گونه‌های آبزیان و ماهی‌های رودخانه‌ای تأثیر داشته باشد. به همین علت می‌توان گفت آبستنگی در اثر وارد شدن جت‌های دیواره‌ای در آب جاری یک پدیده مهم از نظر هیدرولیکی و زیست‌محیطی می‌باشد. مطالعاتی که بر روی آبستنگی در اثر جت‌های دیواره‌ای

ملاحظات وارد به آب جاری در قوس ۹۰ درجه انجام می‌شود. بدین منظور سعی می‌شود که ارتباط بین ابعاد آبشستگی و پارامترهای موثر مورد تجزیه و تحلیل واقع شود.

### تجزیه و تحلیل ابعادی

در آبشستگی ایجاد شده توسط جت آب وارده به آب جاری، مهم‌ترین مشخصه‌های طولی در مرحله تعادل عبارت‌اند از حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ )، فاصله حداکثر عمق آبشستگی از نازل ( $x_{ds}$ )، حداکثر گسترش آبشستگی در جهت جت ( $y_s$ )، حداکثر گسترش آبشستگی در جهت جریان فلوم ( $x_s$ )، حداکثر ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) و فاصله آن از نازل ( $x_{hm}$ ).

با در نظر گرفتن  $d_s$  به عنوان نماینده مشخصه‌های طولی آبشستگی می‌توان نوشت:

$$d_s = f(U_j, d_o, \rho, g, \Delta\rho, d_{50}, \nu, U_f, H, R) \quad (۱)$$

در رابطه (۱) چگالی سیال،  $\Delta\rho$  اختلاف چگالی سیال و مواد رسوبی،  $\nu$  ویسکوزیته سنماتیکی و  $R$  شعاع قوس می‌باشد. با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، رابطه (۱) به صورت ارائه شده در روابط (۲) و (۳) شامل پارامترهای بی‌بعد تقلیل پیدا می‌کند:

(رابطه ۲)

$$\frac{d_s}{d_o} = f\left(\frac{d_{50}}{d_o}, \frac{U_j}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} d_o}}, \frac{U_j d_o}{\nu}, \frac{U_f}{U_j}, \frac{H}{d_o}, \frac{R}{d_o}\right)$$

$$\frac{d_s}{d_o} = f\left(\frac{d_{50}}{d_o}, F_f, R_j, r, \frac{U_f}{U_j}, \tilde{H}, \frac{R}{d_o}\right) \quad (۳)$$

### مواد و روش‌ها

برای انجام مطالعه آزمایشگاهی حاضر، از قوس ۹۰ درجه موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ارومیه استفاده شد. عرض ( $B$ ) و ارتفاع فلوم به ترتیب برابر با ۰/۱۸۸ و ۰/۶۵ متر و شعاع انحناء نسبی قوس برابر با ۲/۰۵ می‌باشد. بازه مستقیم قبل از قوس و بازه مستقیم بعد از قوس که طول آن‌ها به ترتیب برابر با ۸/۷۸ و ۶ متر می‌باشد توسط قوس ۹۰ درجه به هم متصل شده‌اند. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است برای مطالعه آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای متلاطم وارده به آب در حال جریان، در فلوم آزمایشگاهی هم به عنوان محیط پذیرنده جت، جریان آب برقرار گردید. برای بررسی تأثیر جریان‌های ثانویه در انتهای قوس (۹۰°)، دو موقعیت مختلف برای جت در نظر گرفته شد (۱) بلافاصله قبل از شروع قوس (۰°) و (۲) بلافاصله بعد از انتهای قوس (۹۰°). قطر متوسط رسوبات ( $d_{50}$ ) استفاده شده در

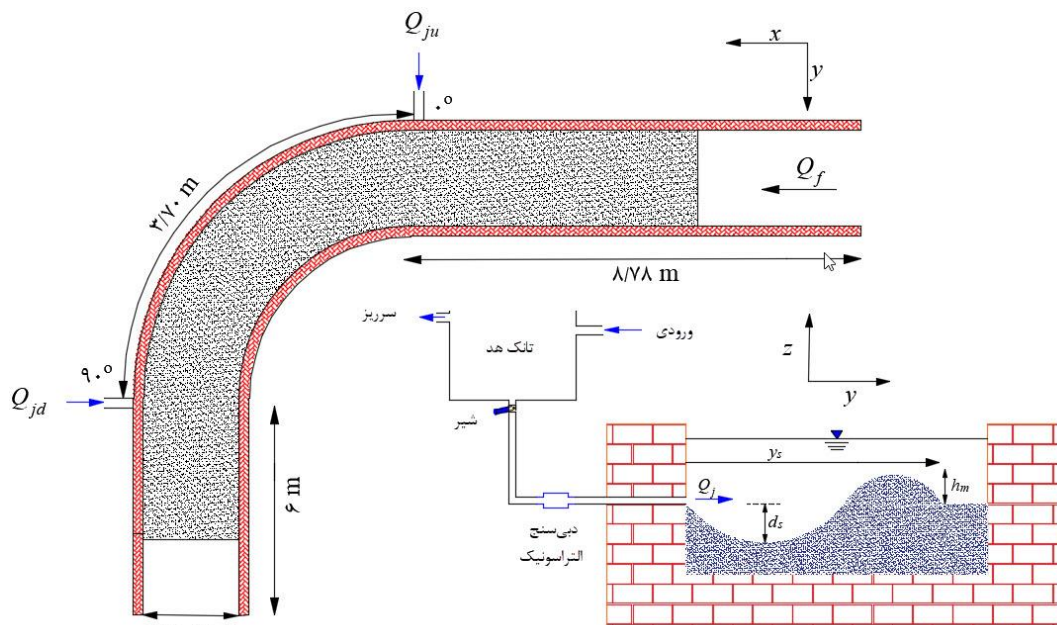
جت دیواره‌ای بر مکانیسم آبشستگی انجام دادند. بررسی آن‌ها نشان داد در صورتی که در مکانیسم آبشستگی جهش‌هایی توسط جت صورت بگیرد، نمی‌توان حالت پایدار برای آبشستگی در نظر گرفت و همواره دو فاز کندن و پرکردن قابل مشاهده می‌باشد. (2019) & (2020) Si *et al.* از روش سرعت سنج تصویری ذرات (PIV)، به ترتیب برای مطالعه میدان جریان در داخل چاله آبشستگی ایجاد شده توسط جت دیواره‌ای مستغرق و چاله آبشستگی ایجاد شده در پایین دست یک سرریز با جریان آزاد استفاده نمودند. (2017) Lee *et al.* در مطالعه خود یک مدل سه فازی برای مسائل انتقال رسوب ارائه دادند که شامل فاز آب، هوا و رسوبات می‌باشد. هم‌چنین در این مطالعه از مدل اصلاح شده K-ε برای محاسبه تنش برشی فاز سیال استفاده شد و تغییرات خاصی بر روی روش مبتنی بر حجم سیال (VOF) اعمال شد که این روش بتواند مرز بین آب و هوا را در حضور رسوب به عنوان فاز سوم محاسبه کند. مقایسه نتایج مدل‌های ارائه شده در این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی برای آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای نشان از کارایی مطلوب آن‌ها دارد. (2020) Yan *et al.* برای شبیه‌سازی آبشستگی توسط جت‌های دیواره‌ای، یک مدل رسوبی جدید مبتنی بر مش توسعه یافته در نرم افزار OpenFOAM ارائه کردند. با توجه به اینکه این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی حرکت ذرات با دامنه بزرگ‌تر نیست، روش جدید در ایجاد مش، این نقص را برطرف می‌کند. نعمتی و مهرآیین (۱۳۹۸) در مطالعه خود به بررسی اثر جانمایی نازل بر آبشستگی موضعی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد که محل قرارگیری جت به عنوان یک پارامتر موثر در توسعه آبشستگی می‌باشد و نزدیک شدن فاصله جت به دیواره کانال سبب انحراف جت به سمت دیواره و سبب عدم تقارن در جریان‌های تشکیل شده می‌شود که این مورد نیز به نوبه خود باعث متفاوت بودن الگوی آبشستگی نسبت به حالتی که نازل در وسط کانال است، می‌شود.

مطالعات انجام شده در رابطه با آبشستگی در اثر جت آب، مکانیسم آبشستگی را در اثر وارد شدن جت دیواره‌ای در آب ساکن را بررسی کرده‌اند و علی‌رغم کاربردهای ذکر شده برای پدیده‌ی جت دیواره‌ای متلاطم در آب جاری، مطالعه‌ای برای بررسی آبشستگی در اثر این پدیده انجام نشده است. آبشستگی و ته‌نشینی رسوبات در اثر جت‌های دیواره‌ای متلاطم وارده در سیال جاری از نقطه نظر (۱) بررسی سلامت زیست‌محیطی محیط پذیرنده و (۲) اندازه‌گیری‌ها به منظور کاهش اثرات سوء جت وارده، امری بسیار مهم به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی مکانیسم آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای

استفاده شد. برای دستیابی به سرعت‌های مختلف جت ( $U_j$ ) یک تانک هد که در تراز مشخصی نصب شده بود در نظر گرفته شد. همچنین یک شیر در انتهای تانک برای تنظیم دبی جت ( $Q_j$ ) مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که با داشتن سرعت‌های مورد نیاز برای جت، قبل از شروع آزمایش‌ها محل قرار گرفتن شیر برای سرعت‌های مختلف علامت‌گذاری شد و بلافاصله در شروع آزمایش، بسته به سرعت جت، بازشدگی شیر با استفاده از آن علامت‌ها تنظیم گردید. برای اندازه‌گیری نرخ جریان خروجی از جت، از دبی‌سنج التراسونیک دیگری با دقت  $\pm 0.2\%$  استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری حداکثر عمق آبستنگی ( $d_s$ ) و ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) از یک متر لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر استفاده شد.

این مطالعه  $1/4$  میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma$ ) برابر با  $1/29$  می‌باشد. همچنین ضخامت بستر رسوبی برابر با  $0.15$  متر می‌باشد. برای ایجاد اعداد رینولدز متفاوت ( $Re_j$ )، از نازل مدور با دو قطر ( $d_0$ )  $9/5$  و  $18$  میلی‌متر استفاده شد.

برای تامین دبی جریان در فلوم ( $Q_f$ ) از یک سیستم چرخشی استفاده شد که توسط پمپ، جریان مورد نیاز از مخزن پایین‌دست به حوضچه بالادست در ابتدای فلوم انتقال داده می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به فلوم از یک دبی‌سنج التراسونیک با دقت  $\pm 2\%$  استفاده شد. همچنین برای تنظیم عمق آب در فلوم ( $H$ ) از دریچه‌ای در پایین‌دست فلوم استفاده شد. برای جلوگیری از ورود رسوبات به سیستم چرخشی جریان فلوم از یک مانع در انتهای فلوم پس از بستر رسوبی



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی برای آبستنگی در اثر جت دیواره‌ای وارده به آب جاری

قبل از شروع هر آزمایش، آب به آرامی از انتهای کانال وارد شد تا بستر رسوبی اشباع شود. هدف مطالعه حاضر آبستنگی در اثر جت دیواره‌ای وارده و تداخل بین جریان جت و جریان فلوم می‌باشد. جریان در فلوم طوری تنظیم گردید که در اثر جریان آب در فلوم آبستنگی رخ نداده و بستر پایدار باشد. برای این امر،

عدد رینولدز بحرانی ذرات ( $Re_c$ ) و پارامتر بحرانی شیلدز ( $\theta_c$ ) به نوعی در نظر گرفته شدند که در اثر جریان آب در فلوم آبستنگی رخ ندهد (Shields, 1936). برای شروع آزمایشات، پس از اشباع کردن بستر رسوبی و بالا آمدن آب در فلوم تا ارتفاع مشخصی، ابتدا جریان در فلوم ( $Q_f$ ) برقرار گردید و عمق آب در فلوم در میزان مشخص برای هر آزمایش تنظیم گردید. سپس با باز کردن شیر در انتهای تانک و قرار دادن آن در موقعیت علامت‌گذاری

شده برای هر دبی جریان جت ( $Q_j$ )، آزمایش شروع شد. زمان آزمایش‌ها نیز به نحوی در نظر گرفته شد که بیش از ۹۵ درصد آبستنگی انجام شده باشد (۱۲ ساعت). برای رعایت اصول شبیه‌سازی و انجام مطالعه کاربردی، اقدام به شبیه‌سازی آزمایشگاهی یک رودخانه واقعی گردید. رودخانه شبیه‌سازی شده، رودخانه ساسکاچوان شمالی در کانادا می‌باشد، در موقعیتی که فاضلاب حاصل از شرکت Agrium Redwater در قوس رودخانه به داخل آن تخلیه می‌شود. مقادیر عدد فرود در نظر گرفته شده برای این مطالعه در محدوده مقادیر عدد فرود برای رودخانه واقعی ( $F_f = 0.14$ ) است. همچنین با توجه به اینکه عدد رینولدز فاضلاب تخلیه شده در ناحیه کاملاً آشفته است، اعداد رینولدز در نظر گرفته شده برای جت خروجی

موثر مطالعه شده را نشان می‌دهد. به‌طور کلی با تغییر پارامترهای نشان داده شده در جدول (۱)، ۴۲ آزمایش انجام شد. ابتدا ۲۱ آزمایش برای جت قبل از شروع قوس انجام شد و سپس، در شرایط مشابه با جت قبل از قوس، ۲۱ آزمایش برای جت بلافاصله در انتهای قوس تکرار شدند.

نیز در ناحیه کاملاً آشفته قرار دارد. با توجه به اثرگذاری هر دو جریان در میزان آبشستگی، یعنی جریان جت و جریان فلوم، سعی بر این شد با در نظر گرفتن پارامترهای موثر در هر دو جریان، ارتباط بین تغییرات ابعاد آبشستگی و پارامترهای موثر بررسی شود. جدول (۱) پارامترهای

جدول ۱- آزمایش‌های انجام شده برای جت در شروع و انتهای قوس

$F_0$	$\bar{H}$	$F_f$	$U_f$ (متر بر ثانیه)	$Q_f$ (متر مکعب بر ثانیه)	$R_j$	$U_j$ (متر بر ثانیه)	$d_0$ (میلی‌متر)	شماره آزمایش	شرح آزمایش
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۱۷۰	۰/۲۹۲	۰/۰۷۷	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۵/۹	۱	بررسی تأثیر جریان در فلوم
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۲	
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۱۲۱	۰/۲۰۸	۰/۰۵۵	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۳	
۱۸/۴۳	۳۱/۵۷	۰/۰۹۱	۰/۱۵۵	۰/۰۴۱	۲۶۳۵۹	۲/۷۷۵	۹/۵	۴	
۱۸/۴۳	۳۱/۵۷	۰/۰۶۰	۰/۱۰۲	۰/۰۲۷	۲۶۳۵۹	۲/۷۷۵	۹/۵	۵	
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۰۳۰	۰/۰۵۲	۰/۰۱۳	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۶	
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۰۱۳	۰/۰۲۳	۰/۰۰۶	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۷	
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۸	بررسی تأثیر نسبت استغراق جت
۱۸/۵۲	۲۶/۳۱	۰/۱۶۰	۰/۲۵۰	۰/۰۵۵	۲۶۷۹۳	۲/۷۸۹	۹/۵	۹	
۱۸/۷۱	۲۱/۰۵	۰/۱۷۸	۰/۲۵۰	۰/۰۴۴	۲۶۷۶۱	۲/۸۱۷	۹/۵	۱۰	
۱۸/۸۰	۱۵/۷۸	۰/۲۰۶	۰/۲۵۰	۰/۰۳۳	۲۶۸۹۴	۲/۸۳۱	۹/۵	۱۱	
۱۸/۹۹	۱۰/۵۲	۰/۲۵۲	۰/۲۵۰	۰/۰۲۲	۲۷۱۶۲	۲/۸۵۹	۹/۵	۱۲	
۱۹/۱۸	۵/۲۶	۰/۳۶۰	۰/۲۵۰	۰/۰۱۱	۲۷۴۳۰	۲/۸۸۷	۹/۵	۱۳	بررسی تأثیر عدد رینولدز جت
۱۸/۳۳	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۶۲۲۵	۲/۷۶۱	۹/۵	۱۴	
۱۶/۴۶	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۳۵۴۹	۲/۴۷۹	۹/۵	۱۵	
۱۴/۹۷	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۱۴۰۸	۲/۲۵۴	۹/۵	۱۶	
۱۳/۷۵	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۱۹۶۶۹	۲/۰۷۰	۹/۵	۱۷	
۱۱/۳۲	۳۱/۵۷	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۱۶۱۹۰	۱/۷۰۴	۹/۵	۱۸	
۱۷/۸۶	۱۶/۶۶	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۴۸۴۰۲	۲/۶۸۹	۱۸	۱۹	
۱۵/۳۷	۱۶/۶۶	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۴۱۶۶۹	۲/۳۱۵	۱۸	۲۰	
۱۳/۴۱	۱۶/۶۶	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۳۶۳۵۴	۲/۰۲۰	۱۸	۲۱	
۱۱/۰۸	۱۶/۶۶	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۳۰۰۴۷	۱/۶۶۹	۱۸		
۸/۶۰	۱۶/۶۶	۰/۱۴۶	۰/۲۵۰	۰/۰۶۶	۲۳۳۱۵	۱/۲۹۵	۱۸		

سری از آزمایش‌ها مشخصات جریان در فلوم ثابت نگه داشته شد. هم‌چنین با توجه به تغییرات در مشخصات جت خروجی، عدد فرود چگال ( $F_0 = U_j / \sqrt{g(\Delta\rho/\rho)d_{50}}$ ) نیز متغیر بود. اندازه‌گیری عمق آب در فلوم آزمایشگاهی درست در محل قرارگیری نازل‌ها صورت گرفت.

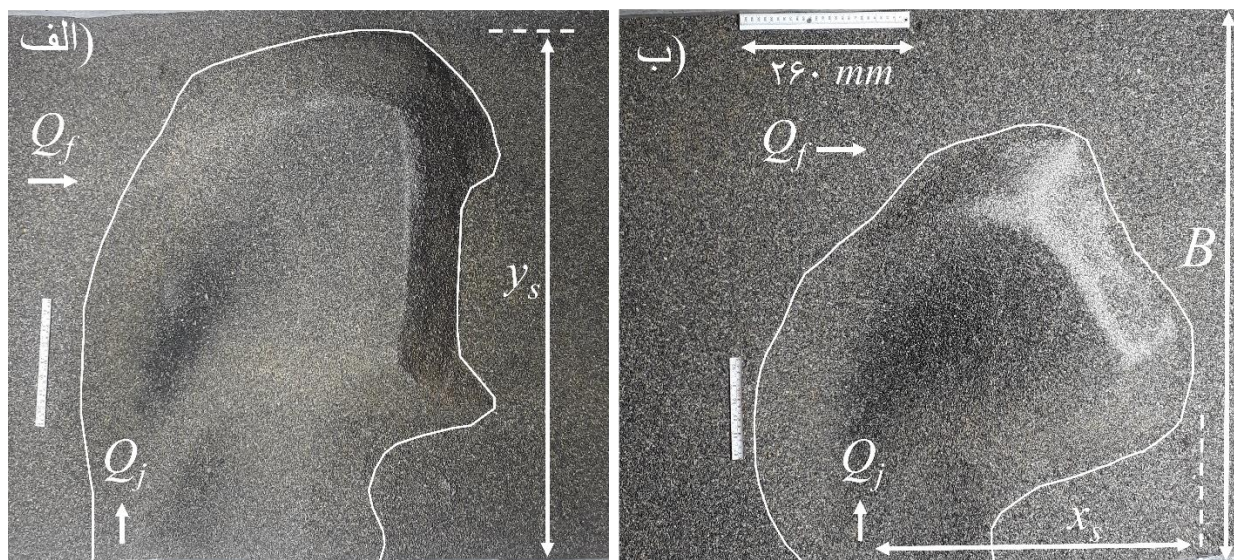
### نتایج و بحث

شکل (۳) نمونه‌ای از پروفیل بستر تشکیل شده در اثر جت دیواره‌ای وارده به جریان آب را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۳)، پروفیل آبشستگی تشکیل شده در اثر جت دیواره‌ای وارده به آب جاری متفاوت از پروفیل آبشستگی در اثر جت وارده به آب ساکن می‌باشد که توسط (Faruque et al. (2006), Sarathi et al. (2008) و (Chiew & Lim (1996) به آن پرداخته شده است و به دلیل تأثیر جریان در فلوم، پروفیل آبشستگی در مسیر جریان در فلوم

همان‌طور که در جدول (۱) ارائه شده است، سه سناریو مختلف در این مطالعه در نظر گرفته شده است. در سری اول از آزمایش‌ها، سرعت جریان در فلوم ( $U_f$ ) و به تبع آن عدد فرود جریان در فلوم ( $F_f = U_f / \sqrt{gH}$ ) متغیر بوده و نسبت استغراق جت ( $\bar{H} = H/d_0$ ) و عدد رینولدز جت ( $R_j = U_f d_0 / \nu$ ) ثابت نگه داشته شدند. تغییرات اندک در سرعت جت ( $U_j$ ) به علت تأثیر تغییرات عدد فرود فلوم می‌باشد. به عبارتی سرعت جریان در فلوم بر سرعت جت خروجی از نازل تأثیر می‌گذارد و با افزایش سرعت جریان فلوم، کاهش اندکی در سرعت جت خروجی مشاهده می‌شود. در سری دوم از آزمایش‌ها، نسبت استغراق جت متغیر بوده و مشخصات جت ثابت نگه داشته شدند. در قسمت سوم از آزمایش‌ها، با تغییر در سرعت جت و قطر نازل ( $d_0$ )، در مقادیر متعدد عدد رینولدز جت بررسی و آزمایش انجام گرفت. در این

عرض فلوم ( $v_s$ ) و میزان توسعه پروفیل آبشستگی در مسیر جریان فلوم ( $x_s$ ) تابعی از پارامترهای موثر دو جریان حاکم می‌باشند که نتایج مربوط به آن در قسمت‌های بعدی ارائه می‌شود.

منحرف خواهد شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش عدد رینولدز برای یک عدد فرود ثابت، از میزان انحراف پروفیل آبشستگی کاسته خواهد شد. میزان توسعه پروفیل آبشستگی در



شکل ۳- پروفیل آبشستگی تشکیل شده در اثر جت دیواره‌ای وارده به جریان آب: الف) مدل شماره ۱۷ و ب) مدل شماره ۱۹

و در مسیر جت ( $v_s$ ) از نظر قوانین زیست محیطی امری ضروری به نظر می‌رسد. منظور از قوانین زیست محیطی، محدودیت‌هایی است که سازمان‌های مربوط به محیط زیست برای جلوگیری از تخریب محیط زیست اعمال می‌کنند، به طور مثال در موضوع این مطالعه، تغییرات بستر رودخانه تا چه حدی باشد که در زیست-گونه‌های آبی تأثیری نداشته باشد؟ به همین دلیل قبل از تخلیه فاضلاب‌ها و جریان‌های تصفیه شده، میزان تأثیری که جریان وارده بر رودخانه می‌گذارد باید مورد مطالعه و بحث و بررسی قرار گیرد. شکل (۵) نشان‌دهنده تأثیر جریان در فلوم در میزان توسعه پروفیل آبشستگی می‌باشد. نتایج ارائه شده در شکل (۵) برای سری اول آزمایش‌ها می‌باشد که در آن نسبت استغراق و سرعت جت ثابت می‌باشد.

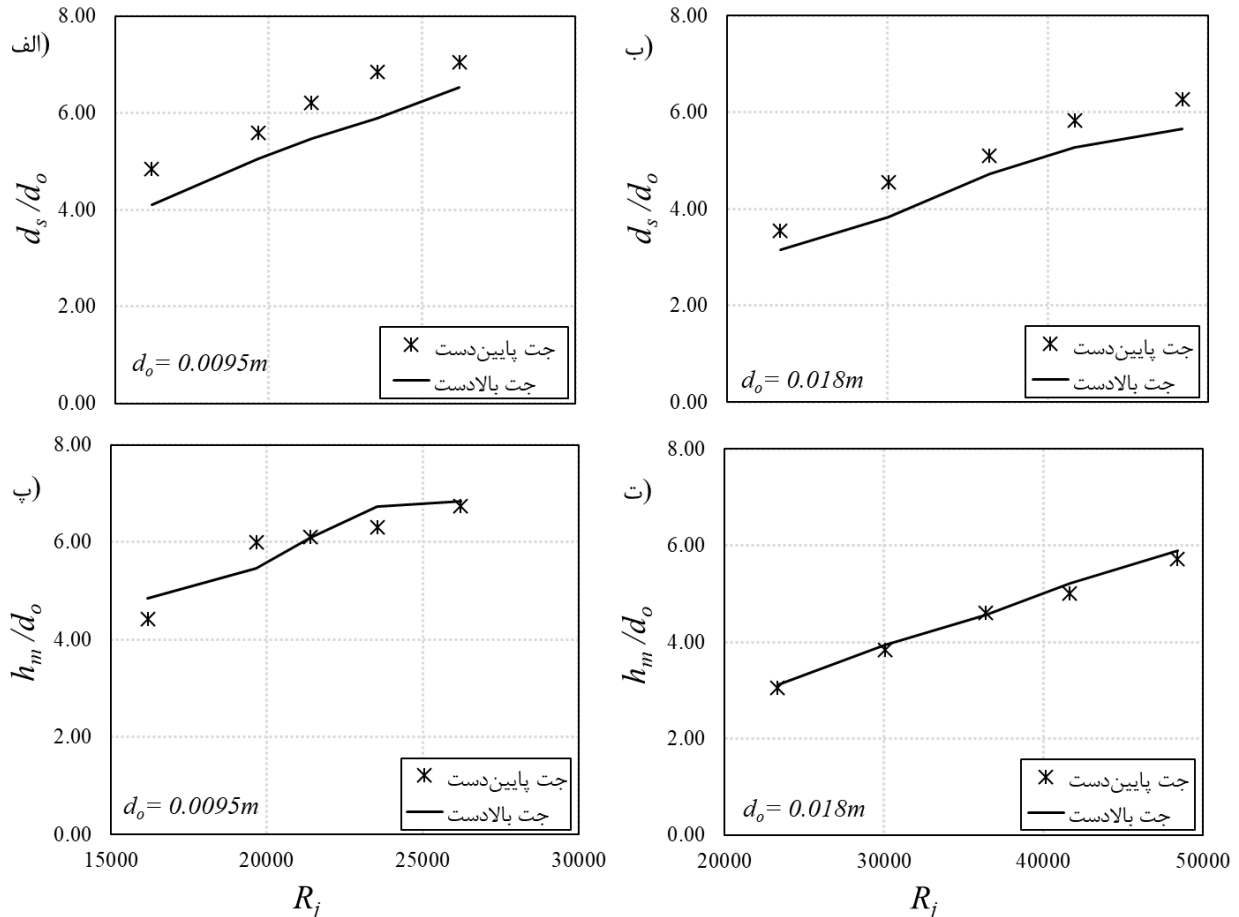
توسعه پروفیل آبشستگی در مقابل نسبت سرعت جریان فلوم به سرعت جریان جت ( $r = U_f / U_j$ ) در شکل (۵) ارائه شده است. شکل (۵-الف) به عبارتی نشان‌دهنده تأثیر جریان در فلوم بر میزان توسعه آبشستگی در مسیر جت وارده می‌باشد. برای یک سرعت ثابت جت، افزایش سرعت جریان فلوم، اثر قدرت جریان جت و انرژی آن را بر توسعه آبشستگی می‌کاهد. به عبارتی در نسبت سرعت جریان فلوم به سرعت جت کوچک‌تر از ۰/۰۶ ( $r < 0.06$ )، این جریان جت است که حاکم است و کاهش سرعت جریان فلوم و کاهش  $r$  سبب افزایش توسعه آبشستگی خواهد شد. برای  $r = 0.06$  میزان توسعه آبشستگی در مسیر جت ( $v_s/B$ )

شکل (۴) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) و ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) حاصل از آبشستگی را در برابر عدد رینولدز جت نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) با افزایش عدد رینولدز جت دیواره‌ای ( $R_j$ ) در محدوده مطالعه شده در این آزمایش‌ها، حداکثر عمق آبشستگی با شیب ثابتی افزایش می‌یابد [شکل ۴ (الف و ب)]. با افزایش حداکثر عمق آبشستگی، به علت خارج شدن ذرات از چاله آبشستگی و ترسیب آن در پشته رسوبی، به همان نسبت ارتفاع پشته رسوبی افزایش می‌یابد [شکل ۴ (پ و ت)]. مقایسه عمق آبشستگی برای جت بالادست و جت پایین دست در شکل [۴ (الف و ب)] نشان می‌دهد که  $d_s$  برای جت پایین دست به اندازه  $1d_0$  بیش‌تر از مقادیر آن برای جت بالادست می‌باشد. علت این امر را می‌توان جریان‌های ثانویه دانست که در انتهای قوس، درست در محل نصب جت پایین دست تشکیل می‌شوند. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز جت، اختلاف حداکثر عمق آبشستگی برای جت بالادست و پایین دست افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) نتایج بدست آمده مقادیر یکسانی را نشان می‌دهد [شکل ۴ (پ و ت)].

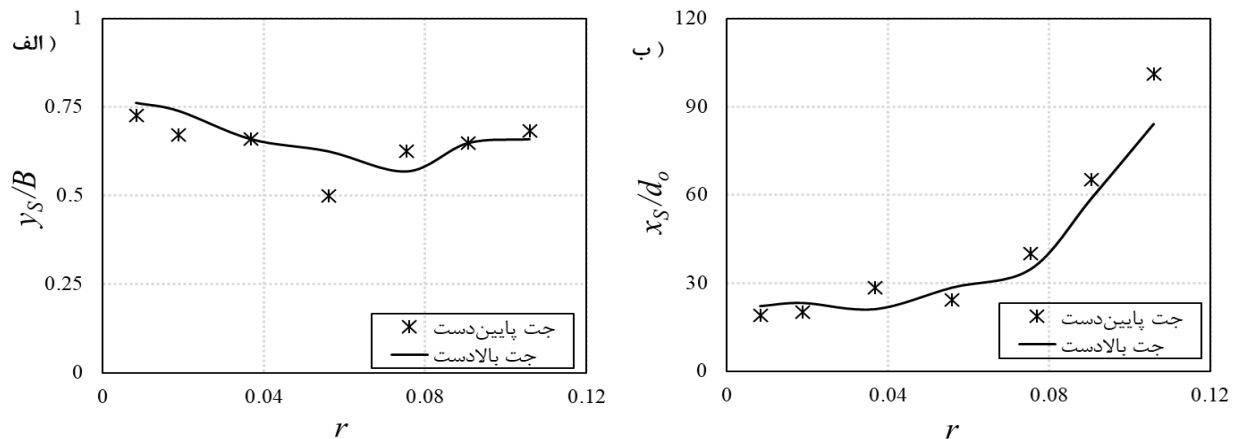
برخلاف نتایج گزارش شده در مطالعات مربوط به آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای وارده به آب ساکن، آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای وارده به آب جاری، علاوه بر توسعه در مسیر جت، در مسیر جریان پذیرنده جت نیز توسعه پیدا خواهد کرد. بنابراین بررسی نحوه توسعه پروفیل آبشستگی در مسیر جریان فلوم ( $x_s$ )

دو جریان تأثیر می‌پذیرد. برای این محدوده از جریان در فلوم، با افزایش سرعت جریان فلوم و به تبع آن افزایش تداخل دو جریان، هم‌چنین مقایسه توسعه پروفیل آبشستگی در مسیر جت برای هر دو جت تقریباً یکسان به نظر می‌رسد.

برای هر دو جت بالادست و پایین‌دست حداقل می‌باشد و این نشان‌دهنده خنثی شدن تأثیر دو جریان توسط همدیگر می‌باشد. با افزایش نسبت سرعت دو جریان به بیش از این مقدار ( $r > 0.06$ ) می‌توان گفت تداخل دو جریان بیش‌ترین تأثیر را در توسعه پروفیل آبشستگی در عرض کانال دارد و توسعه آبشستگی از هر



شکل ۴- تأثیر عدد رینولدز جت دیواره‌ای بر: الف) حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای  $d_o = 0.0095m$  (ب) الف) حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای  $d_o = 0.018m$  (پ) حداکثر ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) برای  $d_o = 0.0095m$  (د) حداکثر ارتفاع پشته رسوبی ( $h_m$ ) برای  $d_o = 0.018m$

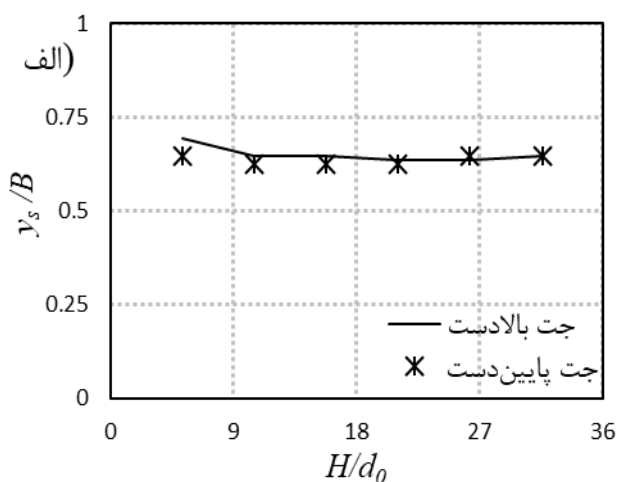


شکل ۵- تأثیر جریان در فلوم بر: الف) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جت ( $y_s/B$ ), ب) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جریان فلوم ( $x_s/d_o$ )

توسعه پروفیل آبشستگی در مسیر جریان در فلوم ( $x_s/d_o$ ) در برابر تغییرات نسبت سرعت جریان فلوم به سرعت جت ( $r$ ) در

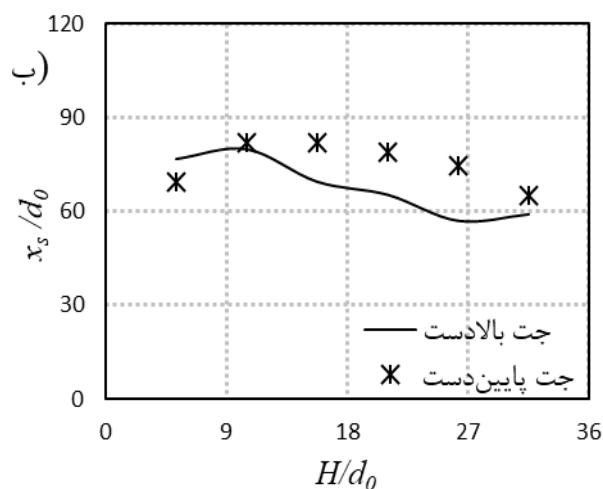


موضوع در هر دو جت مطالعه شده قابل مشاهده می‌باشد. نتایج ارائه شده در مطالعات آبستنگی در اثر جت دیواره‌ای در آب ساکن توسط Faruque et al. (2006) و Sarathi et al. (2008)، تاییدکننده نتایج این مطالعه در رابطه با تأثیر اندک نسبت استغراق جت در توسعه پروفیل آبستنگی در مسیر جت می‌باشد. برخلاف تأثیر ناپذیری گسترش پروفیل آبستنگی در عرض کانال از نسبت استغراق جت، نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت استغراق برای محدوده  $H/d_0 < 10/53$ ، توسعه پروفیل در طول کانال افزایش می‌یابد (شکل ۶-ب). اما با افزایش نسبت استغراق به بیش‌تر از  $10/53$ ، از توسعه آبستنگی در طول کانال کاسته خواهد شد. در  $H/d_0 < 10/53$  توسعه آبستنگی در جت بالادست بیش‌تر از جت پایین‌دست می‌باشد ولی در  $H/d_0 \geq 10/53$  جت در پایین‌دست توسعه بیش‌تری دارد.



شکل ۵(ب) نشان داده شده است. افزایش نسبت سرعت دو جریان باعث توسعه پروفیل آبستنگی در طول کانال می‌شود. مقدار توسعه پروفیل آبستنگی تا  $r < 0/06$  با شیب کم‌تری اتفاق می‌افتد ولی با افزایش  $r$  از این مقدار، افزایش شدید شیب گسترش پروفیل آبستنگی مشاهده می‌شود. هم‌چنین مقایسه پروفیل آبستنگی در طول کانال برای دو جت مطالعه شده نشان می‌دهد برای  $r < 0/06$ ، میزان گسترش آبستنگی برای دو جت تقریباً برابر است ولی با افزایش این نسبت به بیش از  $0/06$ ، توسعه پروفیل آبستنگی در جت پایین‌دست بیش‌تر از توسعه آن در جت بالادست خواهد بود.

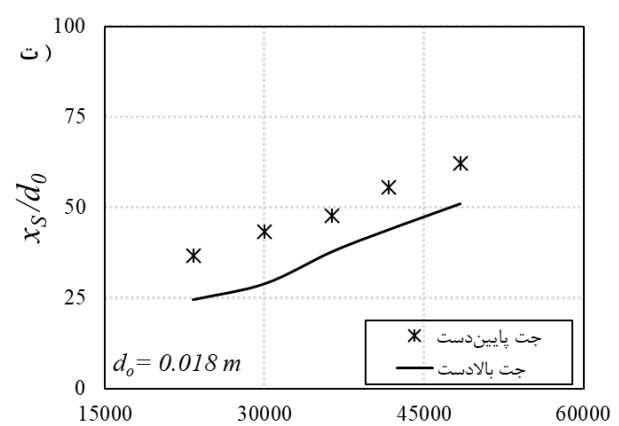
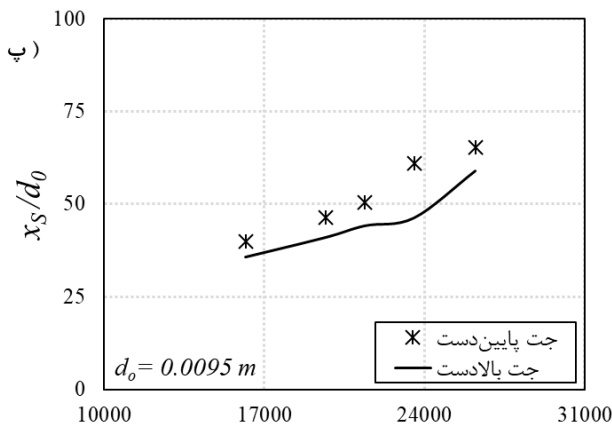
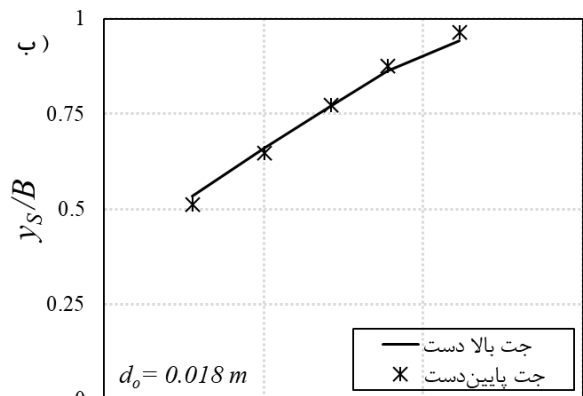
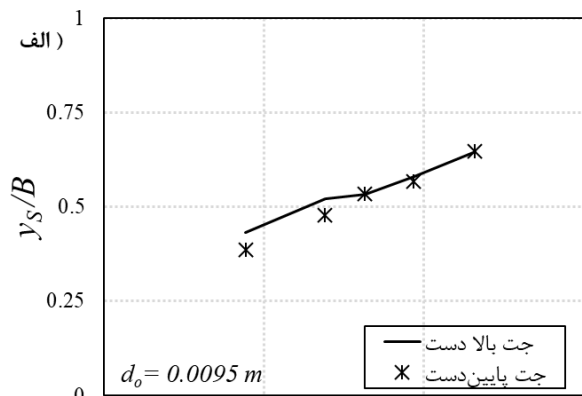
شکل ۶-الف) گسترش آبستنگی در عرض کانال یا همان مسیر جت ( $v_s/B$ ) را در برابر نسبت استغراق جت نشان می‌دهد. مطابق این شکل، افزایش یا کاهش در نسبت استغراق جت تأثیر قابل توجهی بر میزان پیشروی جت در عرض کانال ندارد و این



شکل ۶- تأثیر نسبت استغراق جت بر: الف) میزان توسعه آبستنگی در مسیر جت ( $v_s/B$ )، ب) میزان توسعه آبستنگی در مسیر جریان فلووم ( $x_s/d_0$ )

جریان در فلووم می‌باشد. به عبارتی در  $F_r < 0/121$ ، وارد شدن جت با سرعت‌های کم‌تر نیز می‌تواند موجب انسداد کانال شود. همانند نتایج ارائه شده برای  $v_s/B$  در مقابل عدد رینولدز جت، پیشروی آبستنگی در جهت جریان فلووم ( $x_s/d_0$ ) نیز با افزایش  $R_f$  افزایش می‌یابد (شکل ۷-پ و ت). شیب توسعه پروفیل آبستنگی برای نازل بزرگ‌تر (۱۸ میلی‌متر)، کم‌تر از شیب آن برای نازل با قطر کوچک می‌باشد (۹/۵ میلی‌متر). برخلاف پیشروی پروفیل آبستنگی در عرض کانال که در آن شیب توسعه آبستنگی برای هر دو جت بالادست و پایین‌دست یکسان می‌باشد، توسعه پروفیل در طول کانال برای جت پایین‌دست برای هر دو قطر نازل، بیش‌تر از توسعه آن برای جت بالادست می‌باشد.

شکل ۷) نشان‌دهنده توسعه پروفیل آبستنگی در مقابل عدد رینولدز جت می‌باشد. با توجه به اینکه دو قطر متفاوت شامل ۹/۵ و ۱۸ میلی‌متر در این مطالعه در نظر گرفته شده است، برای هر قطر، نمودار مجزایی ارایه شده است. افزایش سرعت جت ( $U_j$ ) و به تبع آن افزایش عدد رینولدز جت ( $R_f$ ) پیشروی پروفیل آبستنگی را در مسیر جریان جت افزایش می‌دهد (شکل ۷-الف و ب). شیب افزایش پیشروی پروفیل آبستنگی برای هر دو قطر نازل استفاده شده برابر می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد افزایش عدد رینولدز جت به بیش از ۳۶۰۰۰ می‌تواند موجب گرفتگی و انسداد در رودخانه شود به طوری که در شکل ۷(ب) مشخص است در این محدوده پروفیل آبستنگی تا ۹۵ درصد عرض کانال توسعه می‌یابد. مانعی که در برابر مسدود شدن فلووم با توسعه آبستنگی وجود دارد،



شکل ۷- تأثیر عدد رینولدز جت بر: الف) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جت ( $y_s/B$ ) برای نازل با قطر ۹/۵ میلی‌متر، ب) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جت ( $y_s/B$ ) برای نازل با قطر ۱۸ میلی‌متر، پ) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جریان فلوم ( $x_s/d_o$ ) برای نازل با قطر ۹/۵ میلی‌متر، د) میزان توسعه آبشستگی در مسیر جریان فلوم ( $x_s/d_o$ ) برای نازل با قطر ۱۸ میلی‌متر

$$(R^2 = 0.186) \quad (RMSE = 0.1)$$

$$\frac{y_s}{B} = 0.00001e^{-5}R_j + 0.16F_f + 0.003\tilde{H}$$

$$(R^2 = 0.91) \quad (RMSE = 0.08) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$\frac{x_s}{d_o} = 0.001R_j + 3018.74F_f^{2.16} - 3814.14\tilde{H}^{-1.52}$$

$$(R^2 = 0.81) \quad (RMSE = 0.18) \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$\frac{y_s}{B} = 0.00001e^{-5}R_j + 0.22F_f + 0.004\tilde{H}$$

$$(R^2 = 0.73) \quad (RMSE = 0.31) \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$\frac{x_s}{d_o} = 0.001R_j + 334.99F_f + 1.43\tilde{H} - 63.29$$

شکل (۸) عملکرد روابط رگرسیونی ارائه شده در تخمین میزان توسعه پروفیل آبشستگی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸-الف و پ)، روابط (۴ و ۶) در پیش‌بینی میزان پیشروی جت در عرض فلوم ( $y_s/B$ ) برای هر دو موقعیت مطالعه شده برای جت دیواره‌ای، با داشتن خطای کم‌تر از ۵ درصد، و مقادیر RMSE به ترتیب ۰/۱ و ۰/۱۸، نتایج نزدیکی به مقادیر آزمایشگاهی دارند.

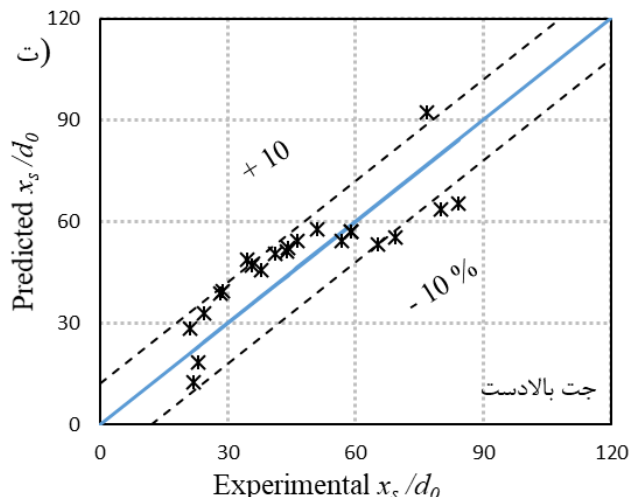
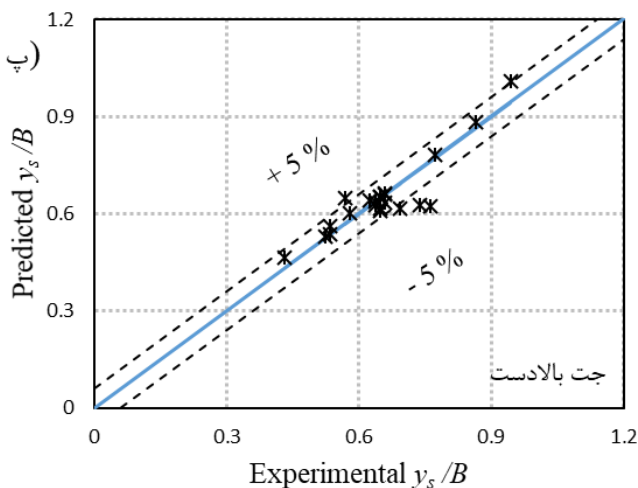
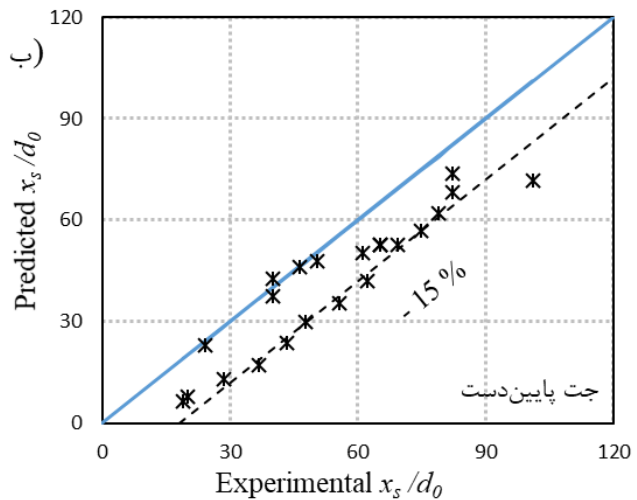
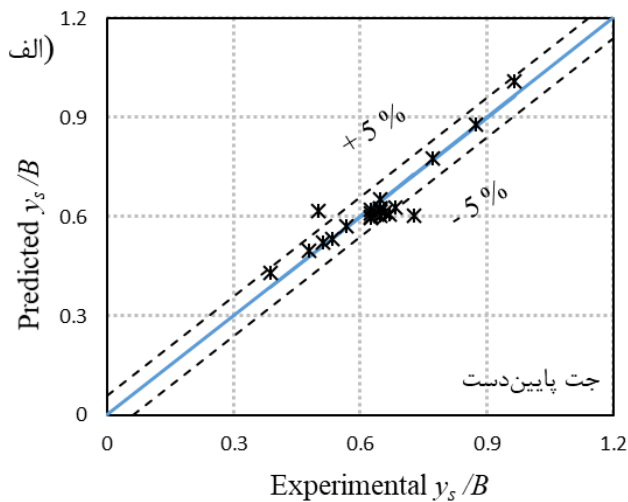
همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد مطالعه آبشستگی

در اثر جت دیواره‌ای وارده به جریان آب از نقطه نظر (۱) تأثیری که به محیط پذیرنده جت می‌گذارد و (۲) هم‌چنین بررسی عواقب و کنترل نتایج مخرب آن امری ضروری به نظر می‌رسد. بدین جهت برای پیش‌بینی میزان توسعه پروفیل آبشستگی در جهت جریان جت یا همان عرض کانال ( $y_s/B$ ) و برای پیش‌بینی پیشروی پروفیل آبشستگی در جهت جریان فلوم یا همان طول کانال ( $x_s/d_o$ )، با استفاده از نتایج بدست آمده آزمایشگاهی اقدام به ارائه روابط ساده رگرسیونی گردید. روابط (۴) و (۵) برای محاسبه  $y_s/B$  و  $x_s/d_o$  برای جت پایین‌دست و روابط (۶) و (۷) برای محاسبه پارامترهای مذکور در جت بالادست می‌باشند. محدوده استفاده از روابط ارائه شده برای  $31/57 < R_j < 48402$ ،  $0.36 < F_f < 0.3$  و  $31/57 < H/d_o < 5/26$  می‌باشد. آنالیز حساسیت انجام شده بر روی پارامترهای موثر مطالعه نشان می‌دهد که عدد فرود جریان فلوم ( $F_f$ )، بیش‌ترین تأثیر را در گسترش و توسعه پروفیل آبشستگی در هر دو جهت مطالعه شده دارد.

(رابطه ۴)

مطالعه شده برای جت دیواره‌ای نیز به ترتیب کم‌تر از ۱۵ و ۱۰ درصد می‌باشد (شکل ۸-ب و ت).

میزان خطای روابط (۵ و ۷) برای پیش‌بینی پیشروی پروفیل آبشستگی در مسیر جریان فلوم  $(x_s/d_0)$  برای دو موقعیت مختلف



شکل ۸- عملکرد روابط رگرسیونی ارائه شده برای پیش‌بینی: الف) پیشروی پروفیل آبشستگی در جهت جریان جت  $(y_s/B)$  برای جت پایین دست، ب) پیشروی پروفیل آبشستگی در جهت جریان فلوم  $(x_s/d_0)$  برای جت پایین دست، پ) پیشروی پروفیل آبشستگی در جهت جریان جت  $(y_s/B)$  برای جت بالادست، ت) پیشروی پروفیل آبشستگی در جهت جریان فلوم  $(x_s/d_0)$  برای جت بالادست.

رینولدز جریان جت  $(R_f)$ . نتایج نشان داد که پروفیل آبشستگی تشکیل شده در اثر جت دیواره‌ای وارده به سیال پذیرنده در حال جریان متفاوت از پروفیل آبشستگی تشکیل شده در اثر جت دیواره‌ای در آب ساکن می‌باشد و با توجه به تأثیر عدد فرود جریان پذیرنده جت، جت در مسیر جریان فلوم انحراف پیدا می‌کند و به واسطه این انحراف، پروفیل آبشستگی نیز متفاوت خواهد بود.

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، با افزایش عدد رینولدز جت دیواره‌ای، حداکثر عمق آبشستگی  $(d_s)$  و ارتفاع پشته رسوبی  $(h_m)$  افزایش خواهد یافت. مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای جت بالادست و پایین دست نشان داد که تحت تأثیر جریان‌های ثانویه تشکیل شده در جت پایین دست،  $d_s$  برای جت پایین دست به اندازه  $1d_0$  بیش‌تر از مقادیر آن برای جت بالادست خواهد بود

## نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی میزان توسعه پروفیل آبشستگی در اثر جت دیواره‌ای وارده به جریان آب در قوس ۹۰ درجه، مطالعه‌ای آزمایشگاهی ترتیب داده شد. برای مطالعه تأثیر جریان‌های ثانویه بر آبشستگی در انتهای قوس، دو موقعیت مختلف برای جت در دیواره خارجی در نظر گرفته شد (۱) بلافاصله در شروع قوس  $(0^\circ)$  (جت بالادست) و (۲) بلافاصله در انتهای قوس  $(90^\circ)$  (جت پایین دست). تعداد ۴۲ مدل آزمایشگاهی شامل ۲۱ مدل برای جت بالادست و در شرایط مشابه، ۲۱ مدل برای جت پایین دست انجام شد. با توجه به ماهیت موضوع، سه سناریوی مختلف در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت (۱) تأثیر عدد فرود جریان فلوم  $(F_f)$ ، (۲) تأثیر نسبت استغراق جت  $(H/d_0)$ ، (۳) تأثیر عدد

افزایش نسبت استغراق برای  $H/d_o < 10/53$  توسعه می‌یابد ولی برای محدوده بالاتر از آن، با افزایش نسبت استغراق از توسعه و پیشروی پروفیل آبشستگی کاسته خواهد شد. در نهایت مشاهدات مربوط به تأثیر عدد رینولدز جت ( $R_j$ ) در توسعه پروفیل آبشستگی در دو محور مطالعه شده نشان داد که افزایش عدد رینولدز جت همواره سبب توسعه آبشستگی در عرض و طول کانال خواهد شد. هر چند تأثیر  $R_j$  برای هر دو جت مطالعه شده در توسعه  $y_s/B$  یکسان می‌باشد اما گسترش پروفیل آبشستگی در مسیر جریان فلوم برای جت پایین دست بیش تر از مقدار آن برای جت بالادست خواهد بود. در پایان، برای تخمین اثرات تخلیه جریان‌های جت‌مانند در رودخانه‌ها و کاستن از اثرات مخرب آن‌ها، روابط رگرسیونی برای محاسبه میزان توسعه آبشستگی توسط جت دیواره‌ای افقی متلاطم در عرض  $(y_s/B)$  و در طول فلوم  $(x_s/d_o)$  ارائه شد که دارای نتایج قابل قبولی می‌باشند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Ayoub, G. M. (1971). Dispersion of buoyant jets in a flowing ambient fluid. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College of Science Technology, London, England.
- Bey, A., Faruque, M., & Balachandar, R. (2007). Two-dimensional scour hole problem: Role of fluid structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 414-430.
- Chiew, Y.-M., & Lim, S.-Y. (1996). Local scour by a deeply submerged horizontal circular jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(9), 529-532.
- Ead, S., & Rajaratnam, N. (2002). Plane turbulent wall jets in shallow tailwater. *Journal of engineering mechanics*, 128(2), 143-155.
- Eriksson, J. (2003). *Experimental studies of the plane turbulent wall jet*. technical report from Royal institute of technology, S-100 44 stockholm, Sweden.
- Eriksson, J., Karlsson, R., & Persson, J. (1998). An experimental study of a two-dimensional plane turbulent wall jet. *Experiments in fluids*, 25(1), 50-60.
- Faruque, M., Sarathi, P., & Balachandar, R. (2006). Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets: Effect of tailwater depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 575-580.
- Iwane, T., Urase, T., & Yamamoto, K. (2001). Possible impact of treated wastewater discharge on incidence of antibiotic resistant bacteria in river water. *Water Science and Technology*, 43(2), 91-99.
- Lauder, B., & Rodi, W. (1983). The turbulent wall jet measurements and modeling. *Annual review of fluid mechanics*, 15(1), 429-459.
- Lee, C.-H., Xu, C., & Huang, Z. (2019). A three-phase flow simulation of local scour caused by a submerged wall jet with a water-air interface. *Advances in Water Resources*, 129, 373-384.
- Lee, J. H.-w., Chu, V., & Chu, V. H. (2003). *Turbulent jets and plumes: A Lagrangian approach* (Vol. 1): Springer Science & Business Media.
- Nemati, S & Mehraein, M. (2019). Effects of the location of the nozzle on scour due to wall jets. *Hydraulic journal*, 142 (2). (In Persian).
- Rajaratnam, N., & Berry, B. (1977). Erosion by circular turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 277-289.
- Sarathi, P., Faruque, M., & Balachandar, R. (2008). Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 158-175.
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Si, J.H., Lim, S.Y., & Wang, X.K. (2019). Jet-Flipping in Scour Hole Downstream of Unsubmerged Weir with Apron. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(10), 04019035.
- Si, J.H., Lim, S.Y., & Wang, X.K. (2020). Evolution of flow fields in a developing local scour hole formed by a submerged wall jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(6), 04020040.
- Tachie, M., Balachandar, R., & Bergstrom, D. (2004). Roughness effects on turbulent plane wall jets in an open channel. *Experiments in fluids*, 37(2), 281-292.
- Verhoff, A. (1963). *The two-dimensional, turbulent wall jet with and without an external free stream*. Report number .626, Office of Naval Research Department of the Navy Contract Nonr 1858(14)

در حالی که ارتفاع پشته رسوبی برای دو جت مطالعه شده تقریباً برابر خواهد بود. تأثیر عدد فرود جریان فلوم در توسعه آبشستگی در مسیر جریان جت ( $y_s/B$ ) را بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان در سه بخش تقسیم کرد (۱) برای  $r < 0/06$  با کاهش نسبت سرعت جریان فلوم به سرعت جریان جت ( $r$ )، آبشستگی در عرض کانال توسعه بیشتری می‌یابد، (۲) برای  $r = 0/06$ ، دو جریان همدیگر را خنثی می‌کنند و کم‌ترین میزان توسعه پروفیل جت در این نقطه اتفاق می‌افتد که می‌توان آن را به‌عنوان نقطه عطف در طراحی تخلیه فاضلاب‌ها در نظر گرفت و (۳) برای  $r > 0/06$  با شدت گرفتن تداخل دو جریان، دوباره توسعه پروفیل در جهت جریان جت افزایشی خواهد بود. این در حالی است که تأثیر  $r$  در توسعه پروفیل آبشستگی در راستای جریان فلوم  $(x_s/d_o)$  همواره افزایشی می‌باشد.

در ارتباط با تأثیر نسبت استغراق جت ( $H/d_o$ )، نتایج نشان داد که توسعه  $y_s/B$  از تغییرات نسبت استغراق مستقل می‌باشد، در حالی که پروفیل آبشستگی در مسیر جریان فلوم  $(x_s/d_o)$  با

- in Co-operation with Bureau of Naval Weapons.
- Xie, C., & Lim, S.Y. (2015). Effects of jet flipping on local scour downstream of a sluice gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(4), 04014088.
- Yan, X., Mohammadian, A., & Rennie, C. D. (2020). Numerical modeling of local scour due to submerged wall jets using a strict vertex-based, terrain conformal, moving-mesh technique in OpenFOAM. *International Journal of Sediment Research*, 35(3), 237-248.
- Zhao, P., Yu, G., & Zhong, M. (2019). Local scour on noncohesive beds by a submerged horizontal circular wall jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(9), 06019012.