

# اثر جانمایی نازل بر آبستگي موضعي ايجاد شده توسط جت‌هاي ديوارهاي

سهيل نعمتي<sup>۱</sup> و مجتبي مهر آيين<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، گرایش مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه خوارزمی

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

\* mehraein@khu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۱/۲۴)

**چکیده-** جت خروجی از بدنه سد با ایجاد آبستگي موضعي در پایین دست، پایداری پی سد و سازه‌های قرار گرفته در قسمت پایین دست آن را تهدید کرده و ممکن است سبب خرابی آن‌ها شود. در پژوهش حاضر، نتایج به دست آمده از ۴۰ آزمایش در زمینه آبستگي موضعي توسط جت‌های دیوارهای افقی سه بعدی ارائه شده است. در این آزمایش‌ها سه عدد فرود ذره متفاوت در محدوده ۳/۹ تا ۶/۶ و پنج نسبت استغراق در محدوده ۴ تا ۱۵ برابر ابعاد جت و سه نازل با فواصل محوری متفاوت در محدوده فاصله بی بعد ۰/۵ تا ۱۷/۳ از دیواره کانال مد نظر قرار گرفته شده است. ابتدا سازوکار آبستگي ناشی از این سه جت را شرح داده و سپس اثر نزدیک شدن جت به دیواره کانال در شرایط مختلف عمق پایاب و عدد فرود ذرات بر ابعاد حفرة آبستگي مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که نزدیک شدن فاصله نازل به دیواره کانال سبب انحراف جت به سمت دیواره نزدیک و ایجاد عدم تقارن در جریان‌های شکل گرفته شده است به طوری که با نزدیک شدن فاصله جت به دیواره کانال حداکثر عمق آبستگي دارای روند افزایشی است و بیشترین مقادیر حداکثر عمق آبستگي ایجاد شده نیز با میانگین ۹۴٪ افزایش نسبت به جت مرکز کانال، توسط جت مماس به دیواره کانال پدید آمده است. روند تغییرات پارامترهای طولی آبستگي با نزدیک شدن فاصله جت به دیواره، دارای روند کاهشی بوده و در اکثر موارد کمترین مقادیر آن با میانگین ۱۳٪ کاهش نسبت به جت مرکز کانال، توسط جت مماس به دیواره کانال ایجاد شده است. مشخص شد که پارامتر عمق پایاب بر پارامترهای طولی آبستگي اثرگذار بوده و در مواردی سبب افزایش پارامترهای طولی آبستگي شده است. به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت که اثر پارامتر محل قرارگیری جت بر ابعاد حفرة آبستگي محسوس بوده و می‌تواند به عنوان یک پارامتر موثر در مطالعات آبستگي توسط جت‌های دیوارهای مطرح شود.

**کلید واژگان:** آبستگي موضعي، مطالعات آزمایشگاهی، جت دیوارهای، جت سه بعدی، جانمایی نازل.

## ۱- مقدمه

آبستگي موضعي فرآیند انتقال دانه‌های مصالح بستر در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی است. جت خروجی از بدنه سد دارای سرعت زیادی بوده و می‌تواند باعث آبستگي در پایین دست سد شود. در صورتی که آبستگي قابل ملاحظه باشد پایداری پی سد، شیب‌های کناری رودخانه و

سازه‌های قرار گرفته در قسمت پایین دست سد در معرض تهدید قرار گرفته خطر خرابی و واژگونی آنها را به دنبال دارد. بنابراین تخمین صحیح ابعاد حفرة آبستگي ایجاد شده بر اثر جت‌های خروجی با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر بر این فرآیند الزامی است. پارامترهای متعددی بر فرآیند آبستگي ایجاد شده توسط جت‌های

فرود ذرات کوچک‌تر از ۵ پارامتر عمق پایاب اثری بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد، اما برای عدد فرود ذرات بزرگ‌تر از ۱۰ پارامتر عمق پایاب بر ابعاد حفرة آبشستگی اثرگذار است. همچنین در این تحقیقات به اثرگذاری نسبت پخش بزرگ‌تر از ۱۰ بر فرآیند آبشستگی اشاره شده است.

تحقیقات (Sui et al. (2008) نشان داد که در نسبت پخش بزرگ‌تر از ۳۰ نیز ابعاد حفرة آبشستگی تحت تاثیر دیواره‌های کانال بوده بر آبشستگی ایجاد شده اثرگذار است. همچنین این محققین تغییرات محدوده اثرگذاری سایر پارامترها با تغییر در پارامتر نسبت پخش را گزارش کردند. تحقیقات (Sarathi et al. (2008) نشان داد که پارامتر نسبت ابعاد نازل به قطر میانگین مصالح بستر در برداشت‌های زمانی ابعاد حفرة آبشستگی اثرگذار بوده و در شرایط تعادل این پارامتر اثر چندانی بر ابعاد حفرة آبشستگی ندارد. همچنین این محققین بیان کردند که به ازای مقادیر کوچک عمق پایاب، الگوی جریان و به تبع آن الگوی آبشستگی، نامتقارن است.

تحقیقات (Xie and Lim (2014) نشان داد که با افزایش عدد فرود ذرات حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین این محققین گزارش کردند که در استغراق‌های عمیق‌تر، حداکثر عمق آبشستگی بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. تحقیقات (Mehraein (2017) نشان داد که با کاهش عرض کانال حداکثر عمق آبشستگی همچنین ارتفاع حداکثر برآمدگی افزایش می‌یابد. همچنین وی به مقدار حدی اشاره کرده است که افزایش یا کاهش عرض کانال از این مقدار حدی سبب افزایش ابعاد حفرة آبشستگی می‌شود.

با توجه به مطالب ذکر شده مشخص می‌شود که علیرغم مطالعات بسیاری که در زمینه اثرگذاری عمق پایاب و نسبت پخش کانال بر آبشستگی ناشی از جت دیواره‌ای مستغرق سه بعدی، در اثر شکل‌های مختلف جریان جت انجام شده است، در اکثر موارد اختلاف قابل توجهی بین نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود و در برخی موارد نیز تناقض‌هایی وجود دارد. بنابر این انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه لازم است. همچنین بررسی نویسنده‌گان تحقیق حاضر نشان داد که تحقیقی در زمینه اثر جانمایی جت

دیواره‌ای اثرگذار هستند که مهمترین آن‌ها عبارتند از: سرعت جت، عمق پایاب، سطح مقطع جت، دانه‌بندی مصالح بستر، قطر و چگالی مصالح بستر، زاویه جت نسبت به افق و عرض کانالی که جت به آن وارد می‌شود (مهرآیین و قدسیان ۱۳۸۸). در این بخش به طور خلاصه به جمع‌بندی نحوه اثرگذاری پارامترهای مختلف بر ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای پرداخته شده است.

تحقیقات (Ali and Lim, Rajaratnam and Berry (1977) (1986)، (Dey and Sarkar (2006) و (Sui et al. (2008) نشان داده است که عدد فرود ذرات یکی از مهمترین پارامترهای موثر در تعیین ابعاد حفرة آبشستگی است. تحقیقات (Rajaratnam and Diebel (1981) نشان داد که تغییرات عمق پایاب بر پارامترهای طولی آبشستگی و طول حفرة تشکیل شده اثرگذار است.

تحقیقات (Ali and Lim (1986) نشان داد که برای عمق پایاب، مقداری حدی وجود دارد که افزایش یا کاهش عمق پایاب نسبت به این مقدار، باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی می‌شود. همچنین گفته شد که این مقدار حدی ثابت نبوده با افزایش عدد فرود ذرات مقدار آن نیز افزایش می‌یابد.

تحقیقات (Lim (1995) نشان داد که اگر نسبت عرض کانال به ابعاد نازل (نسبت پخش) از ۱۰ بیشتر باشد، افزایش عرض کانال تاثیری بر ابعاد حفرة آبشستگی ندارد. همچنین وی افزایش در پارامترهای طولی آبشستگی در اثر کاهش نسبت پخش کانال و امکان فرسایش بیشتر در راستای طولی را گزارش کرده است.

تحقیقات (Ade and Rajaratnam (1998) نشان داد که ابعاد حفرة و حداکثر عمق آبشستگی برای عدد فرود ذرات بزرگ‌تر از ۱۰ با افزایش عمق پایاب افزایش می‌یابد و برای مقادیر کوچک‌تر عدد فرود ذرات، تغییرات عمق پایاب بر آبشستگی ایجاد شده تاثیر کمی دارد. تحقیقات مهرآیین و قدسیان (۱۳۸۸) نشان داد که ابعاد حفرة آبشستگی به جز در چند مورد خاص در جت‌های مایل کمتر از جت‌های افقی است.

تحقیقات (Faruque et al. (2006) نشان داد که برای اعداد

همچنین به دلیل افقی بودن کانال زاویه آن نسبت به افق،  $\Theta$  برابر با صفر بوده و تاثیرات آن بررسی نمی‌شود. در نهایت رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) خلاصه می‌شود.

$$\frac{\Psi}{b_0} = f(F_0, \frac{y(t)}{b_0}, \frac{D_w}{b_0}) \quad (3)$$

لازم به ذکر است که مقدار  $\frac{y(t)}{b_0}$  پارامتر نسبت پایاب بوده و در این تحقیق با TWR نشان داده شده است.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی، روش انجام و

#### مدت زمان آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در کانالی مستطیلی و افقی با طول ۵ متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خوارزمی انجام شده است. برای ساخت جت‌ها از ۳ نازل فلزی مربعی شکل به طول ۱/۵ متر و با ابعاد داخلی ۲۶ میلی‌متر و ضخامت پوسته ۲ میلی‌متر که به صورت افقی در دهانه ورودی کانال قرار داشتند، استفاده شد به طوری که محل قرارگیری لبه خارجی پایین نازل جت مماس بر سطح رسوب‌های کف کانال قرار داشت. فاصله مرکز نازل شماره ۱ تا ۳ از دیواره سمت چپ کانال به ترتیب برابر ۴۵۰، ۳۰۵ و ۱۳ میلی‌متر بوده است.

برای انتقال آب از مخازن به پشت جت‌ها، آب توسط پمپ از مخازن پمپاژ شده و توسط لوله‌ای با قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر به انتهای نازل‌ها انتقال پیدا کرد. برای فعالیت هر نازل یک شیر در انتهای آن تعبیه شد که با باز کردن هر شیر نازل مربوطه فعال می‌شد. پمپ مورد استفاده از نوع Pentax cr100 تک‌فاز بوده که برای دبی‌های تا ۱/۵ لیتر در ثانیه مناسب است. برای اندازه‌گیری دبی جریان خروجی جت از دستگاه دبی‌سنج مغناطیسی که در مسیر لوله انتقال آب به پشت نازل‌ها قرار داشت استفاده شد و با قرار دادن یک شیر تخلیه در مسیر بین پمپ و دبی‌سنج میزان دبی خروجی جت تنظیم شد. همچنین دبی اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه به روش حجمی کنترل شد تا از صحت دبی جریان عبوری اطمینان حاصل شود.

سطح بستر مورد آزمایش از لبه جت خروجی دارای طول ۲ متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر بود که برای تخلیه آب درون آن از یک لوله زهکش با شیر تخلیه در عمق ۴۰ سانتی‌متری استفاده شد. مصالح بستر استفاده

دیواره‌ای سه‌بعدی بر ابعاد حفرة آبشستگی انجام نشده است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، مطالعه اثر جانمایی نازل و در نتیجه نزدیک شدن فاصله محوری جت دیواره‌ای به دیواره کانال توام با تغییرات پارامتر عمق پایاب (نسبت استغراق جت) بر پارامترهای مشخصه حفرة آبشستگی است.

### ۲- تحلیل ابعادی

مهمترین پارامترهای موثر بر ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده بر اثر جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی عبارتند از: سرعت جت خروجی از نازل ( $U_0$ )، ابعاد نازل ( $b_0$ ) که برای نازل مربعی ضلع و برای نازل دایره‌ای قطر آن است، عمق پایاب ( $y(t)$ )، قطر میانگین مصالح بستر ( $d_{50}$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، چگالی مصالح بستر ( $\rho_s$ )، چگالی سیال ( $\rho$ )، لزجت سینماتیکی سیال ( $\nu$ )، عرض کانال ( $B$ ) و زاویه قرارگیری جت نسبت به افق ( $\Theta$ ). در تحقیق حاضر علاوه بر موارد ذکر شده اثر پارامتر فاصله مرکز نازل از دیواره کانال ( $D_w$ ) نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین اگر  $\Psi$  یکی از ابعاد حفرة آبشستگی (عمق، طول یا عرض حفرة آبشستگی) باشد:

$$\Psi = f(U_0, b_0, y(t), d_{50}, g, \rho_s, \rho, \nu, B, D_w, \Theta) \quad (1)$$

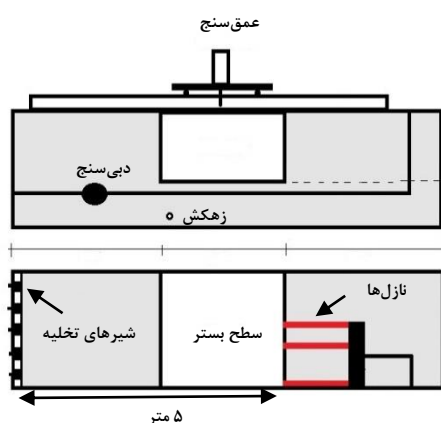
با انتخاب پارامترهای  $U_0$  و  $b_0$  به عنوان پارامترهای تکراری و استفاده قانون باکینگهام رابطه (۲) استخراج می‌شود.

$$\frac{\Psi}{b_0} = f\left(\frac{U_0^2}{g \cdot b_0}, \frac{y(t)}{b_0}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{b_0}, \frac{U_0 \cdot b_0}{\nu}, \frac{B}{b_0}, \frac{D_w}{b_0}, \Theta\right) \quad (2)$$

با ترکیب پارامترهای بی‌بعد  $\frac{U_0^2}{g \cdot b_0}$  و  $\frac{d_{50}}{b_0}$  عدد فرود ذرات به صورت  $F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)d_{50}}}$  به دست می‌آید.

مقادیر  $\frac{B}{b_0}$  و  $\frac{D_w}{b_0}$  در این تحقیق ثابت و به ترتیب برابر ۳۴/۶ و ۰/۰۹۵ است.

$\frac{U_0 \cdot b_0}{\nu}$  عدد رینولدز جت (Re) است که به دلیل آشفته بودن جریان جت می‌توان از آن صرف نظر کرد (مهرآیین و قدسیان ۱۳۸۸)، (Sarathi 2005).



شکل ۲ نمای کانال و بستر مورد آزمایش در پلان و مقطع

جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترها

پارامتر	Re	$D_w$	TWR	$F_0$
محدوده تغییرات	۲۰۲۸-۳۴۳۲۰	۰/۵-۱۷/۳	۴-۱۵	۳/۹-۶/۶

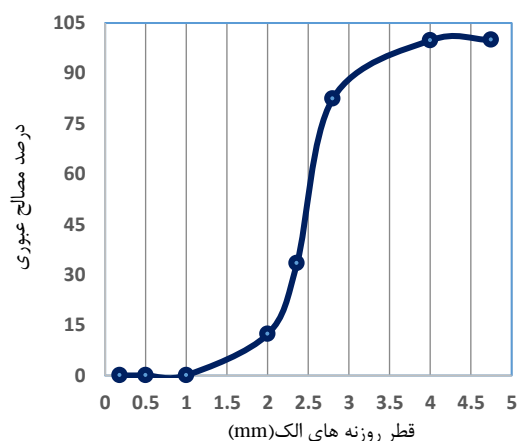
برای انجام آزمایش‌ها نخست سطح رسوب با استفاده از یک دستگاه تراز کننده مکانیکی کاملاً تراز شد. با بسته بودن شیر نازل جت‌ها و شیرهای تخلیه کانال و استفاده از شیر تخلیه پمپ، کانال از انتها و به آرامی به صورتی که بستر مورد آزمایش را تحت تاثیر قرار ندهد تا عمق پایاب مورد نظر پر شده و با بستن شیر تخلیه، کانال آماده انجام آزمایش شد. با تنظیم دی، هم‌زمان با باز کردن شیر متصل به لوله جت مورد نظر و شیرهای تخلیه انتهای کانال، فرآیند آبشستگی آغاز می‌شد.

پس از انجام آزمایش‌ها عمق حداکثر حفره آبشستگی، محل طولی عمق حداکثر حفره آبشستگی، طول حفره آبشستگی، طول کلی آبشستگی، عرض حفره آبشستگی در محل عمق حداکثر و ارتفاع حداکثر برآمدگی در پایین دست حفره آبشستگی اندازه‌گیری می‌شد. بر اساس نتایج پیش آزمایش‌ها و آزمایش‌های تکراری برای مدت زمان ۳۲ ساعت مطابق شکل ۳، مشخص شد که برای اینگونه مصالح گسترش بیش از ۹۰٪ پارامترهای آبشستگی (عمق حداکثر  $\varepsilon_{(m)}$  و طول حفره آبشستگی  $L_{(h)}$ ) در مدت

شده از جنس سیلیس بوده و ابعاد آن به گونه‌ای انتخاب شده است که با مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه، تقریباً مطابق است (Faruque 2004، Sarathi، 2005).

انحراف معیار دانه‌بندی مصالح  $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.16$  بوده و بنابراین از تاثیر این پارامتر بر ابعاد حفره می‌توان صرف نظر کرد (Faruque 2004).

همچنین مشخصات دانه‌بندی مصالح بستر اعم از قطر میانگین مصالح ( $d_{50}$ )، چگالی مصالح ( $\rho_s$ ) و ... در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه خوارزمی اندازه‌گیری و کنترل شده است (شکل ۱).

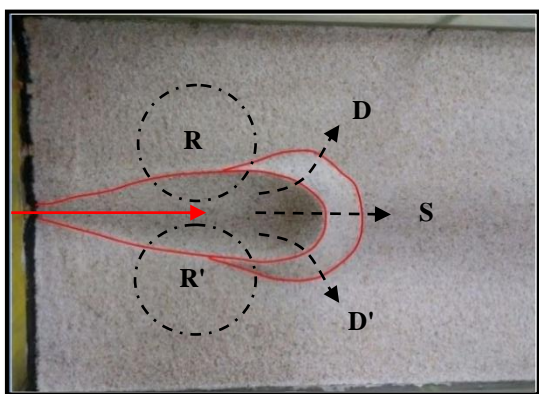


شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح بستر

برای تنظیم عمق پایاب از شیر تخلیه در انتهای کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری ابعاد حفره آبشستگی از یک دستگاه عمق‌سنج مکانیکی با قابلیت حرکت بر روی ریل در امتداد کانال برای اندازه‌گیری طول و حرکت در عرض برای برداشت‌های عرضی با دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌متر استفاده شد. نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۲ آورده شده است.

تعداد ۴۰ آزمایش با تغییر فاصله محور جت از دیواره کانال، عمق پایاب و عدد فرود ذرات برای سه جت مربعی انجام شد که محدوده تغییرات متغیرها در جدول ۱ آورده شده است.

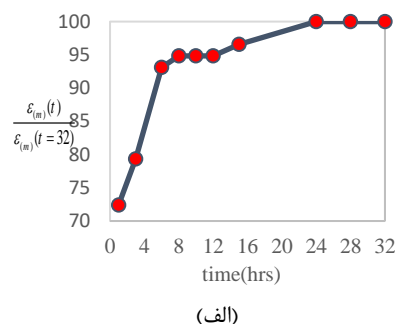
سمت یکی از دیواره‌های کانال (دیواره جانبی سمت راست) منحرف شده و گاهی نیز به سمت دیواره مقابل (دیواره جانبی سمت چپ) منحرف شده و با گذشت مدت زمانی در حدود چند دقیقه، جریان جت در مسیر مستقیم و در راستای محور نازل قرار گرفت. انحراف مسیر حرکت جت در جت‌های افقی دیواره‌ای سه‌بعدی مستطیلی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Sarathi 2005). در این شرایط به دلیل فاصله نسبتاً زیاد جت از دیواره‌های کانال و در شرایطی که این فواصل نسبت به محور نازل متقارن است، انحراف جت خروجی به طرفین، تحت تاثیر فاصله عرضی دیواره‌های جانبی کانال از محور نازل نبوده و جت به طور دائم به سمت هیچ یک از دیواره‌های جانبی کانال منحرف نیست. مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل کیفی آن با استفاده از روبان و جوهر نشان داد که جریان خروجی از حفره تشکیل شده توسط این جت به سه بخش اصلی جریان S، جریان D و جریان D' تقسیم می‌شود. همچنین R و R' جریان‌های چرخشی تشکیل شده پیرامون حفره هستند (شکل ۴).



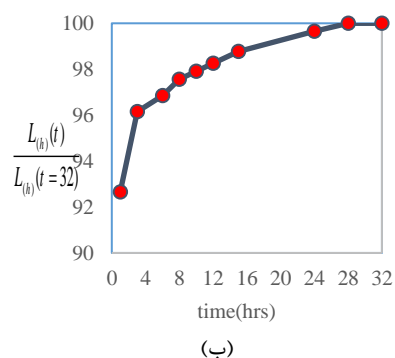
شکل ۴ جریان‌های تشکیل شده توسط جت شماره ۱

جریان S قسمتی از جریان است که پس از خروج از حفره با عبور از روی برآمدگی ایجاد شده در انتهای حفره به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند. این جریان موجب انتقال مصالح خارج شده از حفره به پایین دست می‌شود.

زمان ۶ ساعت اتفاق می‌افتد. بنابراین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته برای ۶ ساعت پس از شروع فرآیند آبستگی بوده است.



(الف)



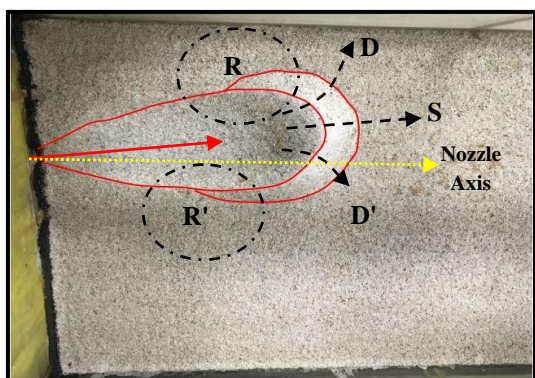
(ب)

شکل ۳ درصد گسترش پارامترهای آبستگی در طول زمان الف- حداکثر عمق آبستگی ب- طول حفره آبستگی

لازم به ذکر است که آزمایشات (Faruque 2004) نیز برای همین مدت زمان انجام شده است.

#### ۴- سازوکار آبستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای افقی با فاصله محوری متفاوت از دیواره کانال

جت‌های شماره ۱ تا ۴ بترتیب در فواصل یکسان از دیواره جانبی کانال قرار گرفته است. جت ۱ در مرکز کانال قرار داشته و جت شماره ۴ به دیواره کانال جانبی مماس می‌باشد. فاصله جت شماره ۱ تا دیواره جانبی کانال ۴۵ سانتی متر است. در جت شماره ۱ در ابتدای آزمایش و با شروع فرآیند آبستگی، جت خروجی از این نازل به



شکل ۵ جریان‌های تشکیل شده توسط جت شماره ۲

علت انحراف جت به سمت دیواره نزدیک، جریان چرخشی  $R'$  در سمت دیواره دور در این جت اثرگذاری چندانی بر آبشستگی ناشی از این جت ندارد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که جریان انحرافی  $D$  و جریان چرخشی  $R$ ، به دلیل قرارگیری در فضای پخش کوچک‌تر دیواره نزدیک و همچنین انحراف جریان  $S$  به آن سمت، نسبت به جریان‌های تشکیل شده در سمت راست جت، دارای اثرگذاری بیشتری بر آبشستگی ناشی از این جت هستند و به همین دلیل شکل حفره آبشستگی و برآمدگی ایجاد شده ناشی از این جت متقارن نبوده و دارای انحراف به سمت دیواره نزدیک‌تر (دیواره سمت چپ) است.

جت شماره ۳ در مجاورت و تماس به دیواره سمت چپ کانال قرار گرفته است. این جت از سمت چپ محدود به دیواره جانبی کانال بوده و فاصله محور آن از دیواره نزدیک ۱۳ میلی‌متر و از دیواره سمت راست کانال ۸۸/۷ سانتی‌متر است که این مقدار در مقایسه با جت شماره ۱ حدود ۹۷٪ بزرگتر است. همچنین فضای پخش جریان برای این جت در مقایسه با جت شماره ۱ در سمت دیواره دورتر، حدود ۲ برابر بزرگتر است. جریان جت خروجی از این نازل با سایر جت‌ها متفاوت بوده به دو بخش اصلی جریان  $S$  و جریان  $D'$  تقسیم می‌شود.  $R'$  نیز جریان چرخشی پیرامون حفره در سمت دیواره دورتر این جت است (شکل ۶).

جریان  $D$  و  $D'$  بخشی از جریان خروجی از حفره آبشستگی هستند که بر اثر برخورد به برآمدگی تشکیل شده در پایین دست حفره، به سمت دیواره‌های جانبی کانال منحرف می‌شوند. این بخش از جریان پس از عبور از طرفین تاج برآمدگی به صورت جریان بازگشتی در طرفین حفره به سمت بالادست حرکت کرده و بخشی از آن نیز توسط جریان‌های چرخشی نزدیک حفره  $R$  و  $R'$  مکش شده باعث گسترش آبشستگی حفره می‌شود. بقیه این جریانات نیز بر اثر برخورد با دیواره بالادست کانال، به صورت جریانات بسیار ضعیفی به سمت جریان جت خروجی از نازل حرکت می‌کنند. در جت شماره ۱، به دلیل فواصل برابر دیواره‌های جانبی کانال از محور نازل و متقارن بودن آن، می‌توان به ترتیب شدت جریان‌های  $D$  و  $R$  را برابر با  $D'$  و  $R'$  دانست. همچنین به همین دلیل حفره آبشستگی و برآمدگی تشکیل شده در این شرایط نسبت به محور نازل تقریباً متقارن است. لازم به ذکر است مشابه این جریانات در مطالعات پیشین گزارش شده است (مهرآیین و قدسیان ۱۳۸۸).

جت شماره ۲ در مقایسه با جت شماره ۱، به دیواره سمت چپ کانال نزدیک‌تر و از دیواره سمت راست کانال دورتر است به طوری که فاصله محور نازل از دیواره سمت چپ کانال تقریباً نصف فاصله آن از دیواره سمت راست است. در این شرایط فضای پخش جریان در سمت دیواره نزدیک جت نسبت به جت شماره ۱ حدود ۳۲٪ کوچکتر و در سمت دیواره دورتر جت حدود ۳۲٪ بزرگتر است. مشابه جت شماره ۱، جریان خروجی از حفره ایجاد شده توسط جت شماره ۲ نیز به سه بخش اصلی جریان  $S$ ، جریان  $D$  و جریان  $D'$  تقسیم شده است و  $R$  و  $R'$  جریان‌های چرخشی پیرامون حفره هستند (شکل ۵).

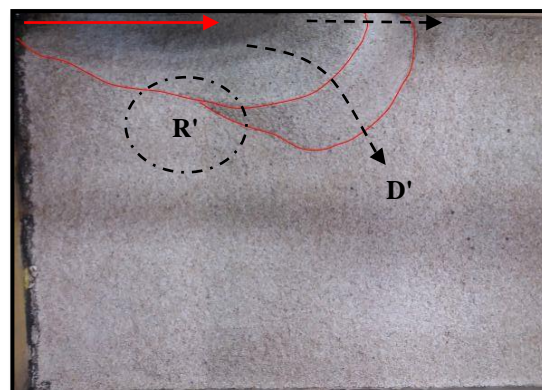
در این شرایط نیز جریان  $S$  با عبور از روی برآمدگی در انتهای حفره به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند با این تفاوت که این جریان به دلیل فاصله کمتر نازل نسبت به دیواره سمت چپ کانال دارای مقداری انحراف به سمت این دیواره است. مشابه موارد ذکر شده برای جت شماره ۱، در این شرایط نیز جریان  $D$  و  $D'$  جریان‌های انحرافی هستند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که به

عمق آبشستگی مشاهده نشد که این روند در مطالعات پیشین با شرایط تقریباً مشابه نیز گزارش شده است (Sarathi 2005).

مطابق شکل ۷ نتایج به دست آمده برای جت شماره ۲ در خصوص حداکثر عمق آبشستگی نشان داد که در عدد فرود ذرات بزرگ‌تر از ۵، با افزایش عمق پایاب عمق حداکثر آبشستگی مقداری افزایش می‌یابد که مشابه این روند در تعدادی از مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Ade and Rajaratnam 1998)، (Dey and Sarkar 2006)، (Mazurek et al. 2009)، (Xie and Lim 2014). پیش‌تر گفته شد که افزایش عمق پایاب جت خروجی را در حالت جت کفی قرار می‌دهد (Xie and Lim 2014).

همچنین در جت شماره ۲ به دلیل انحراف جریان آن به سمت دیواره نزدیک، الگوهای جریانی تشکیل شده در طرفین جت خروجی نسبت به حالت متقارن متفاوت بوده نتایج به دست آمده نشان داد که در مجموع این عوامل برای این جت سبب افزایش حداکثر عمق آبشستگی در استغراق‌های عمیق می‌شود. در خصوص پارامترهای طولی حفره آبشستگی، نتایج نشان داد که در اکثر موارد، با افزایش عمق پایاب در استغراق‌های عمیق‌تر به دلیل امکان پخش بیشتر جت در راستای عمودی، اثر سد کنندگی برآمدگی کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش طول حفره و طول کل آبشستگی می‌شود. افزایش طول حفره آبشستگی با افزایش عمق پایاب مطابق شکل ۸ در شرایط شبه پایدار (۲۴ ساعت پس از شروع آزمایش) در تعدادی از مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Sarathi 2005; Faruque 2004).

مطابق شکل ۹، نتایج نشان داد که روند ذکر شده برای جت‌های ۱ و ۲ در جت شماره ۳ کمی متفاوت است. در این جت با افزایش عمق پایاب، طول حفره و طول کل آبشستگی برای عدد فرود ذرات بزرگ‌تر از ۵ دارای روند کاهشی محدودی است که مطابق شکل ۹ مشابه این روند کاهشی نیز در مطالعات پیشین برای عدد فرود ذرات بزرگ‌تر (عدد فرود ذرات برابر با ۱۰) گزارش شده است (Sarathi 2005)، (Sui et al. 2008). در جت شماره ۳ به دلیل حفر مصالح بستر با شدت زیاد و در نتیجه ارتفاع زیاد برآمدگی پایین دست حفره، میزان کاهش اثر

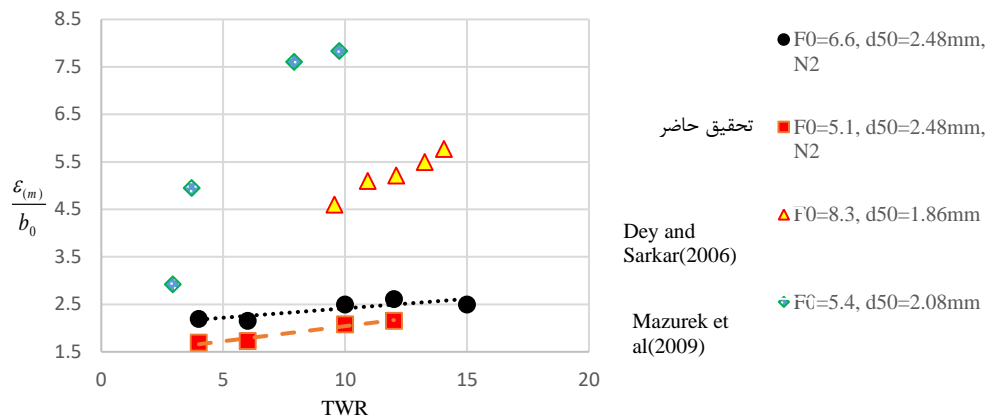


شکل ۶ جریان‌های تشکیل شده توسط جت شماره ۳

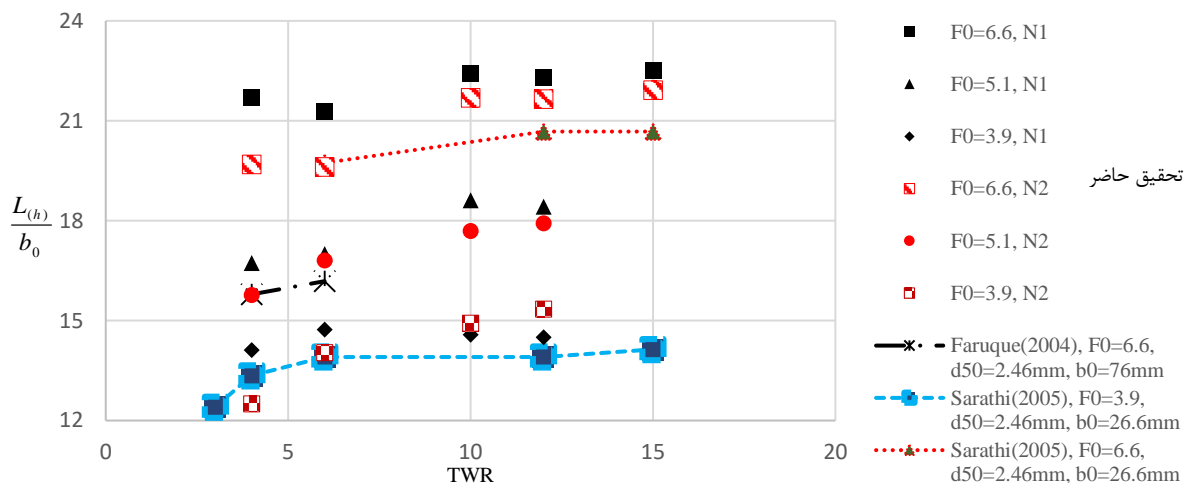
در این شرایط جریان S بدون انحراف، در مسیر مستقیم و مماس به دیواره جانبی از روی برآمدگی به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند. جریان انحرافی  $D'$  که در اثر برخورد جریان جت با برآمدگی تشکیل شده در پایین دست حفره تشکیل می‌شود به سمت فضای پخش بزرگ دیواره دورتر منحرف شده که مقداری از این جریان انحرافی در همان ابتدا توسط جریان چرخشی  $R'$  مکش می‌کند و بقیه آن با برخورد به دیواره دور، به صورت جریان برگشتی ضعیف با حرکت به سمت بالادست و برخورد به دیواره بالادست کانال به سمت جریان جت خروجی از نازل حرکت می‌کند. در این شرایط به دلیل محدودیت پخش در سمت چپ جت، امکان تشکیل جریان در آن ناحیه نیست. همچنین به دلیل فضای پخش بزرگ در سمت راست این جت، جریان‌های برگشتی این ناحیه، جریانات ضعیفی بوده و سبب آبشستگی بالادست کانال نشدند. شکل حفره و برآمدگی ایجاد شده توسط این جت نیز مطابق شکل ۶ به دلیل محدودیت دیواره با سایر جت‌ها متفاوت است.

##### ۵- اثر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی

نتایج به دست آمده در خصوص حداکثر عمق آبشستگی نشان داد که با افزایش عمق پایاب در محدوده مطالعاتی این تحقیق برای جت شماره ۱ تغییر چندانی در حداکثر



شکل ۷ افزایش حداکثر عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب در جت شماره ۲



شکل ۸ تغییرات طول حفره آبشستگی با افزایش عمق پایاب در جت‌های شماره ۱ و ۲

آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین این نتایج مطابقت خوبی با مطالعات مشابه پیشین داشته و حداکثر اختلاف نتایج آن در اعداد فرود ذرات بزرگ‌تر در شرایط یکسان، کم‌تر از ۱۰٪ و در عدد فرود ذرات کوچک‌تر در حدود قطر میانگین ذرات بستر است که نشان دهنده دقت خوب وسایل اندازه‌گیری این تحقیق است.

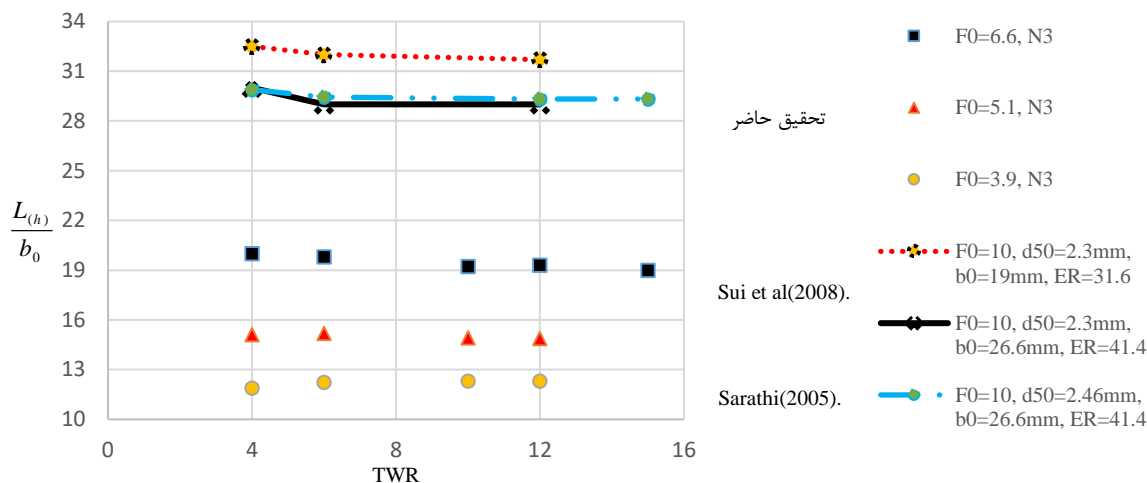
مطابق شکل ۱۱ نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و کاهش فاصله محوری نازل از دیواره جانبی سمت چپ کانال، عمق حداکثر حداکثر آبشستگی ایجاد شده نیز به طور میانگین با ۹۴٪

سدکنندگی برآمدگی تشکیل شده در پایین دست حفره در اثر تقویت جریان عمودی با افزایش عمق پایاب به گونه‌ای نبوده که باعث افزایش طول حفره آبشستگی شود و نتایج نشان داد که در این جت برای هیچ کدام از اعداد فرود ذرات متفاوت، افزایش پارامترهای طولی در اثر افزایش عمق پایاب مشاهده نشده است (شکل ۹).

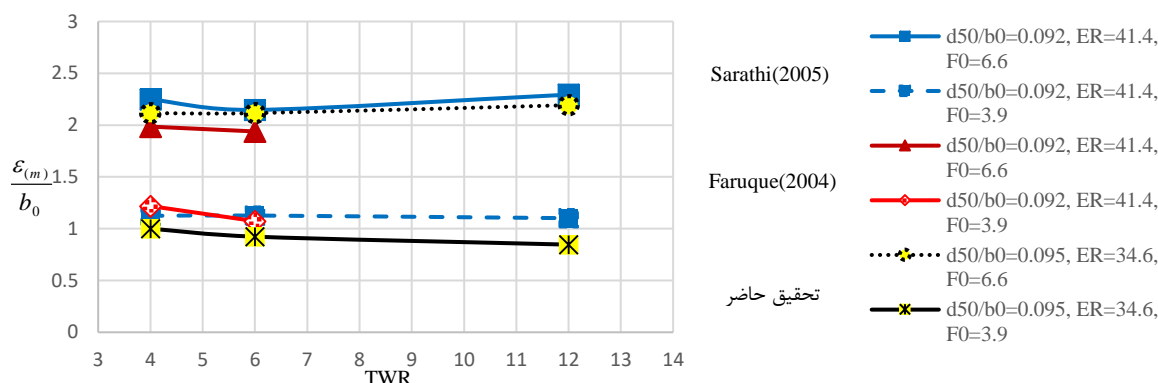
## ۶- اثر جانمایی نازل بر ابعاد حفره آبشستگی

بر اساس شکل ۱۰، نتایج به دست آمده از جت شماره ۱ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذرات، حداکثر عمق





شکل ۹ تغییرات طول حفره آبستگي با افزایش عمق پایاب در جت شماره ۳



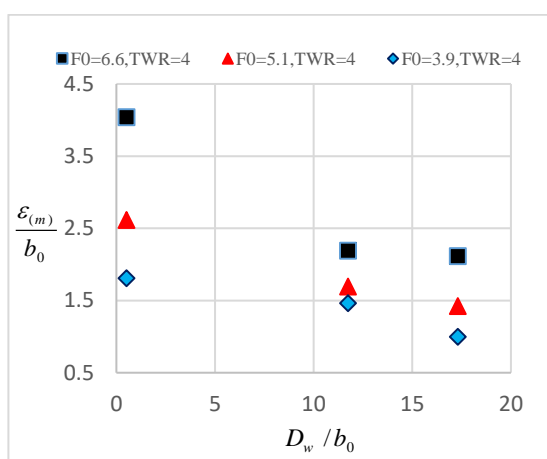
شکل ۱۰ حداکثر عمق آبستگي در مقابل تغییرات عمق پایاب برای جت شماره ۱

سطح تماس دیواره نزدیک با جت خروجی در عمق، بیشتر هم می‌شود که مجموعه این عوامل باعث شده که این جت در حالت جت کفی قرار گرفته و در نتیجه فاز حفر کردن با شدت زیادی انجام شود. به همین دلیل مطابق شکل ۱۱ نتایج نشان داد.

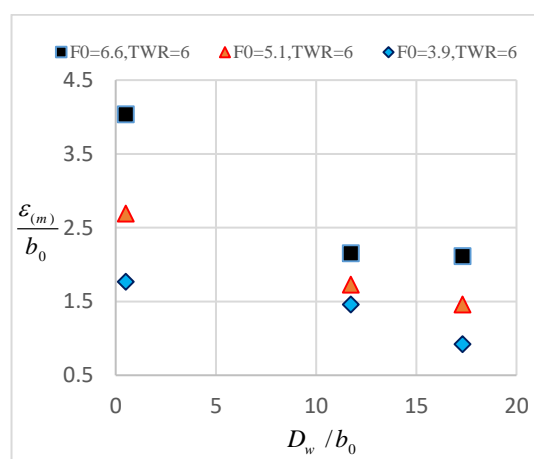
که این جت دارای بیشترین حداکثر عمق آبستگي در مقایسه با سایر جت‌های بررسی شده در این تحقیق است. مشابه این روند در مطالعات پیشین نیز به این شکل گزارش شده است که در صورت فعالیت تنها یک دریچه از مجموعه دریچه‌های تخلیه قرار گرفته در یک راستا،

افزایش نسبت به جت مرکز کانال، توسط جت مماس به دیواره کانال پدید آمده است.

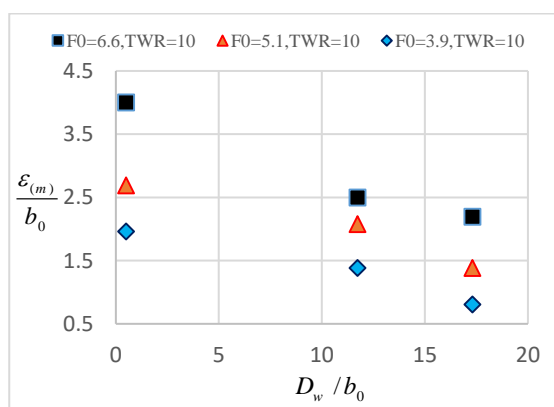
آبستگي دارای روند افزایشی است به طوری که بیشترین مقادیر عمق مطابق شکل ۱۱ با انحراف جت شماره ۲ به سمت دیواره نزدیک، نتایج به دست آمده نشان داد که در تمامی نسبت‌های پایاب، حفره آبستگي در این حالت در مقایسه با جت شماره ۱ دارای حداکثر عمق آبستگي بزرگتری است. جت خروجی از نازل شماره ۳ که از دو جهت مماس به مرز جامد است (دیواره جانبی و سطح بستر)، با گذشت زمان و گسترش ابعاد حفره آبستگي،



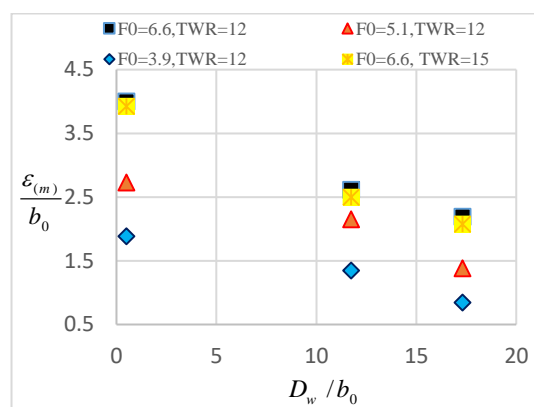
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱ اثر جانمایی نازل بر حداکثر عمق آبشستگی در نسبت‌های پایاب مختلف

صورتی که نسبت پخش کانال کاهش یابد به دلیل محدودتر شدن پخش جت در راستای عرضی و تقویت ظرفیت فرسایش بستر در جهت طولی، پارامترهای طولی حفره آبشستگی روند افزایشی دارند. هرچند این تاثیرات، برای نسبت‌های پخش بزرگ‌تر از ۱۰ بی تاثیر دانسته شده است (Lim 1995).

در مطالعات جدیدتر نیز به تاثیرات عرض کانال بر آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی اشاره و عنوان شده است که تغییرات عرض کانال در نسبت‌های پخش بزرگ‌تر از ۱۰ نیز اثرگذار است. همچنین نتایج این مطالعات نشان داده است که در شرایط مشابه نسبت پایاب و عدد فرود ذرات، طول حفره

دریچه مماس به دیواره کانال در مقایسه با سایر دریچه‌ها که در فواصل متفاوتی از دیواره کانال قرار داشتند، بیشترین حداکثر عمق آبشستگی را ایجاد کرده است (Elsayed et al. 2018).

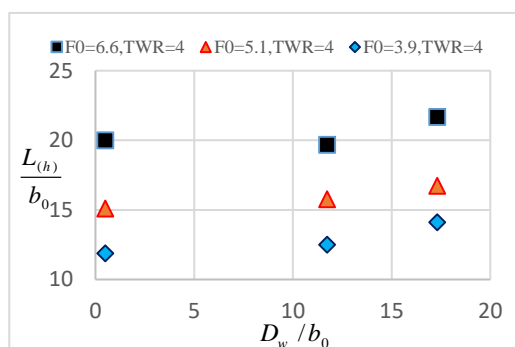
در رابطه با پارامترهای طولی آبشستگی مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ نتایج به دست آمده نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها و کاهش فاصله محوری نازل از دیواره جانبی سمت چپ کانال، طول حفره و طول کل آبشستگی در اکثر موارد دارای روند کاهشی است و کمترین مقادیر آن نیز با میانگین ۱۳٪ کاهش نسبت به جت مرکز کانال، توسط جت مماس به دیواره کانال ایجاد شده است.

مطالعات پیشین به اثرگذاری عرض کانال بر پارامترهای طولی حفره آبشستگی اشاره کرده و عنوان شده که در

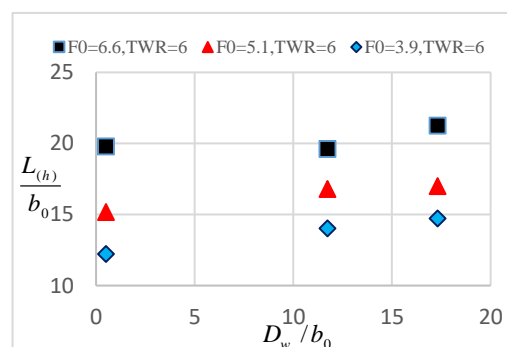
کاهش در پارامترهای طولی آبشستگی در مقایسه با جت شماره ۱ شده است، اما با افزایش عمق پایاب، جریان جت در راستای عمودی تقویت شده و سبب افزایش پارامترهای طولی آبشستگی در مقایسه با جت شماره ۱ می‌شود (شکل ۱۱).

برای جت خروجی از نازل شماره ۳ به دلیل شدت زیاد فاز حفر کردن و شکل‌گیری برآمدگی با ارتفاع زیاد نسبت به سایر جت‌های مورد بررسی در این تحقیق و در نتیجه اثر سدکنندگی بالای آن در انتهای حفره، عمده جریان عبوری از حفره از کناره سمت راست حفره و برآمدگی تشکیل شده خارج شده و آبشستگی ناشی از این جت در اکثر موارد دارای کم‌ترین طول حفره و طول کل آبشستگی در مقایسه با سایر جت‌های بررسی شده در این تحقیق است (شکل ۱۱ و ۱۲).

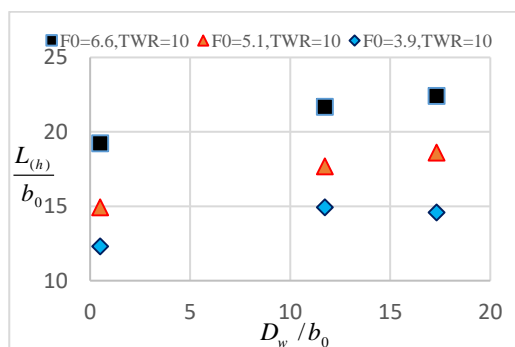
آبشستگی برای نسبت پخش بزرگ‌تر  $4/4$  در مقایسه با نسبت پخش  $3/6$ ، کم‌تر است (Sui et al 2008). مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ در جت شماره ۲ برای عدد فرود ذرات بزرگ‌تر از ۵ که سرعت و شدت جت خروجی زیاد است، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در تمامی موارد طول حفره و طول کل آبشستگی در این حالت در مقایسه با جت شماره ۱ کاهش می‌یابد. این مقدار کاهشی در استغراق‌های عمیق‌تر به دلیل امکان پخش بیشتر جت در راستای عمودی و کاهش اثر سدکنندگی برآمدگی، کم‌تر است. همچنین در عدد فرود ذرات کوچک‌تر از ۵، سرعت و شدت جریان جت خروجی از نازل ضعیف است که به همین دلیل اثر سدکنندگی برآمدگی غالب بوده و عمده جریان جت با اثرگذاری بر شکل حفره (مطابق شکل ۵) از کناره برآمدگی در سمت دیواره نزدیک عبور می‌کند که این روند سبب



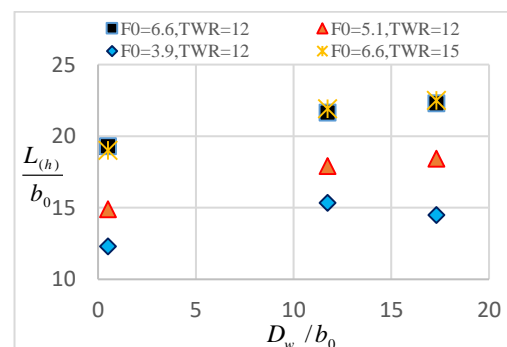
(ب)



(الف)



(د)

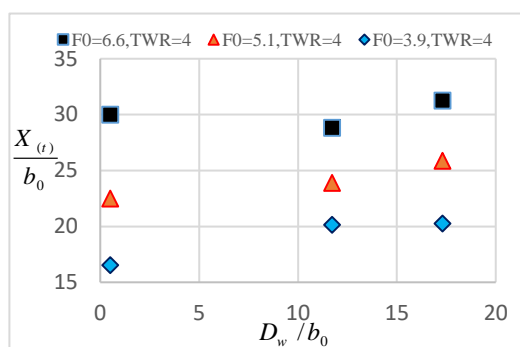


(ج)

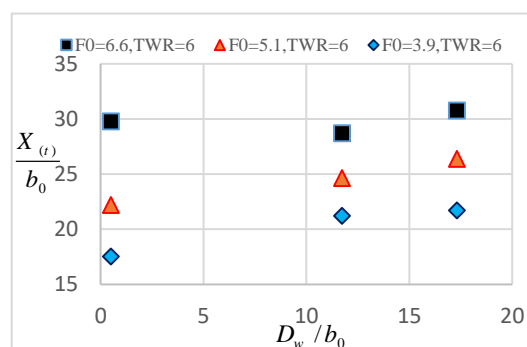
شکل ۱۲ اثر جانمایی نازل بر طول حفره آبشستگی در نسبت‌های پایاب مختلف

جانمایی کانال بر شکل حفرة آبشستگی اثرگذار بوده و باعث عدم تقارن در شکل حفرة و برآمدگی تشکیل شده در پلان شده است (شکل‌های ۴ تا ۶).

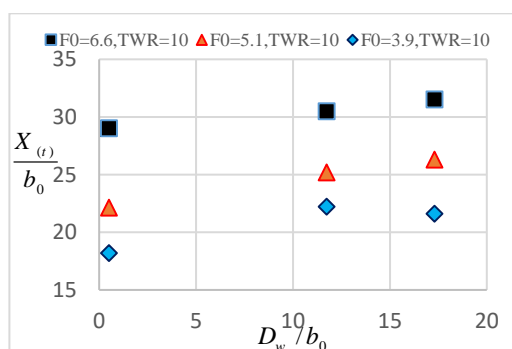
در تحقیق حاضر با توجه به محدوده مطالعه شده، روند خاصی در تغییرات عرض حفرة آبشستگی مشاهده نشد اما با توجه به متفاوت بودن الگوی جریان‌های تشکیل شده پیرامون حفرة برای هر یک جت‌ها همانطور که پیش‌تر به آن اشاره شد نزدیک شدن فاصله محور نازل به دیواره



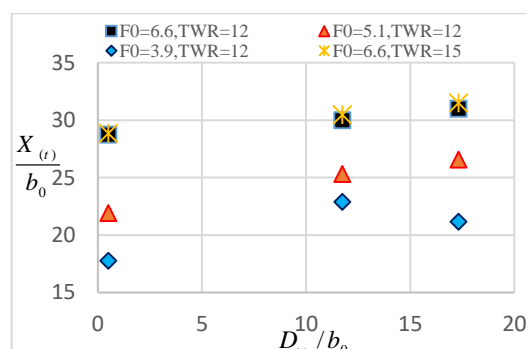
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳ اثر جانمایی نازل بر طول کل آبشستگی در نسبت‌های پایاب مختلف

۲- با نزدیک شدن فاصله محور نازل به دیواره کانال در شرایطی که جریان‌های تشکیل شده در طرفین آن متقارن و دارای فضای پخش یکسان هستند، حداکثر عمق آبشستگی مقداری افزایش می‌یابد درحالی‌که طول کلی آبشستگی در اکثر موارد دارای مقدار کم‌تری است.

۳- با نزدیک شدن فاصله جت به دیواره کانال، بیشترین حداکثر عمق آبشستگی و کمترین طول حفرة نسبت به سایر جت‌ها، در جت مماس به دیواره کانال ایجاد شده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایشات به دست آمده از این تحقیق می‌توان گفت که شدت اثرگذاری پارامترهای موثر بر اساس تغییر الگوی جریان‌های تشکیل شده در اثر نزدیک شدن فاصله محور نازل به دیواره کانال متفاوت بوده و نتایج ذیل حاصل شده است:

۱- نزدیک شدن فاصله جت به دیواره کانال سبب انحراف جت به سمت دیواره نزدیک و ایجاد عدم تقارن در جریان‌های تشکیل شده در طرفین جت خروجی می‌شود.

$\sigma_{(g)}$	انحراف معیار دانه‌بندی مصالح
$\rho_s$	چگالی مصالح بستر
$\Psi$	یکی از ابعاد حفرة آبشستگی

### ۹- منابع

مهرايين، م. و قدسیان، م. (۱۳۸۸)، "آبشستگی موضعی ناشی از جت های دیواره‌ای سه بعدی مایل"، مجله علمی پژوهشی، دوره ۴، شماره ۴، ۵۱-۶۹.

Ali, K.H.M., and Lim, S.Y. (1986). "Local scour caused by submerged wall jets", Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part 2 (81), pp. 607-645.

Ade, F., and Rajaratnam, N. (1998). "Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets", Journal of Hydraulic Research, 36(4), pp. 613-635.

Dey, S., and Sarkar, A. (2006). "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets", Journal of Hydraulic Engineering, 132(3), pp. 246-257.

Elsayed, H., and Helal, E., El-Enany, M., and Sobeih, M. (2018). "Impacts of multi-gate regulator operation schemes on local scour downstream", ISH, Journal of Hydraulic Engineering, <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1511386>.

Faruque, M. A. A. (2004). "Transient local scour by submerged three dimensional wall jets: effect of tailwater depth". M. A. Sc. Thesis, University of Windsor. Windsor, Canada.

Faruque, M.A.A., Sarathi, P., and Balachandar, R. (2006). "Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 132(6), pp. 575-580.

Lim, S.Y. (1995). "Scour below unsubmerged full-flowing culvert outlets", Institution of Civil Engineers, 112 (2), pp.136-149.

Mazurek, K. A., and Gautam, B., and Ahsan, M. R. (2009). "Submergence effects on jet behavior and scour for plane wall jets in cohesionless material", 33<sup>rd</sup> IAHR Congress, IAHR, Spain.

Mehraein, M. (2017). "Discussion of 'Effects of Jet Flipping on Local Scour Downstream of a Sluice Gate' by Chen Xie and Siow-Yong Lim", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 143(11).

۴- اثرگذاری پارامتر عمق پایاب بر آبشستگی ایجاد شده در اعداد فرود ذرات کوچک‌تر از ۱۰ در ادامه مطالعات پیشین در این تحقیق نیز تایید شد به طوری که افزایش عمق پایاب امکان پخش بهتر جت در راستای عمودی را فراهم کرده و در مواردی نیز سبب افزایش در پارامترهای طولی آبشستگی شده است.

نتایج این مطالعه نشان داد که پارامتر جانمایی نازل جت نیز بر آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای موثر بوده و باید به عنوان یک پارامتر اثرگذار در نظر گرفته شود.

در نهایت می‌توان از نتایج به دست آمده از این تحقیق جهت جانمایی با ضریب اطمینان مناسب نازل خروجی در پشت سازه‌های هیدرولیکی بهره جست.

### ۸- فهرست علائم

B	عرض کانال
$b_0$	ضخامت جت
$d_{50}$	قطر میانگین مصالح
$d_n$	قطری که n درصد مصالح از آن ریزتر است
$D_w$	فاصله مرکز جت از دیواره چپ کانال
$D_{w'}$	فاصله مرکز جت از دیواره راست کانال
ER	نسبت عرض کانال به عرض نازل (نسبت پخش جت)
$F_0$	عدد فرود ذرات
g	شتاب ثقل
$H_{(R)}$	ارتفاع برآمدگی حداکثر
$L_{(h)}$	طول حفرة آبشستگی
Re	عدد رینولدز جت
TWR	نسبت عمق پایاب به ابعاد نازل (نسبت پایاب)
$U_0$	سرعت جت
$X_{(t)}$	طول کل آبشستگی
$X_{(\epsilon)}$	محل طولی عمق حداکثر حفرة آبشستگی

(2008). "Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets", *Journal of Hydraulic Research*, 46 (2), pp.158-175.

Sui, J., Faruque, M. A. A., and Balachandar, R. (2008). "Influence of channel width and tailwater depth on local scour caused by square jets", *Journal of Hydro-environment Research*, 2, pp. 39-45.

Xie, C., and Lim, S.Y. (2014). "Effects of Jet Flipping on Local Scour Downstream of a Sluice Gate", *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 141(4).

Rajaratnam, N., and Berry, B. (1977). "Erosion by circular turbulent wall jets", *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), pp. 277-289.

Rajaratnam, N., and Diebel, M. (1981). "Erosion below culvert like structure", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, 112(2), pp.136-149.

Sarathi, P. (2005). "Scour by submerged square wall jets at low densimetric Froude numbers". M. A. Sc. Thesis, University of Windsor, Windsor, Canada.

Sarathi, P., Faruque, M.A.A., Balachandar, R.

# Effects of the location of the nozzle on scour due to wall jets

Soheil Nemati<sup>1</sup> and Mojtaba Mehraein<sup>2\*</sup>

1- Graduated M.Sc., Faculty of Civil Engineering, Kharazmi University

2- Assistant Prof, Faculty of Civil Engineering, Kharazmi University

\* mehraein@khu.ac.ir

## Abstract

The scour due to jets influence the stability of the base of the dam the downstream structures and may cause them failure. In this paper the results of 40 experiments of scour due to 3D-wall jets are presented. In this research, 3 values of densimetric Froude number in the range of 3.9-6.6, 5 values of tailwater ratio in the range of 4-15 and 3 values of the location of the wall jet from the side wall in the range of 0.5-17.3 were used. In this research the mechanism of the scour is reported, then the effect of the side wall on scour due to wall jets for different values of tailwatre depth ratio and densimetric Froude number is investigated. According to the results of this research by decreasing the distance of the nozzle to the channel side wall, the jet deviates to the side wall and forms the asymmetrical shape of flow structures as the maximum scour hole depth due to the nearest jet nozzle increases 94% as compare to the jet in the middle of the channel. In addition, the length of the scour hole decreases as the jet goes to the side wall of the channel. In most of the experiments the minimum scour hole length decreases about 13% for the nearest nozzle to the channel side wall as compare to the nozzle in the middle of the channel. In some cases the tailwater depth influences the scour hole length parameters an increases them. According to this research one can concluded that the location of the nozzle affect the scour hole dimensions and should be considered as an effective parameters on scour hole due to wall jets.

**Keywords:** Local scour, Experimental investigation, 3d wall jet, Wall jet location.