

## بررسی تأثیر خصوصیات جریان بر عمق آبشستگی ناشی از برخورد دو جت مایل

آرش جاعل<sup>۱</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷

مقاله برگرفته از تحقیق پژوهشی

### چکیده

آبشستگی ناشی از فرسایش بستر در هنگام مواجهه با جت‌های ریزشی آب به دلیل عملکرد مخربی که بر پی سازه‌های هیدرولیکی می‌گذارد موضوعی است که مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است. برخورد دو جت مایل علاوه بر تغییری که در نیروی فرسایشی آب ایجاد می‌کند ممکن است سبب ورود هوا نیز شود که در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایشگاهی به بررسی عمق آبشستگی ناشی از برخورد دو جت در حوضچه آرامش فرود فواره پرداخته شده است. برای این کار از سه نوع دانه‌بندی در برابر ۴ ارتفاع عمق پایاب استفاده شده است. دو جت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به قائم باهم برخورد داده شده‌اند و در پایان هر آزمایش عمق آبشستگی اندازه‌گیری گردید. مشخص گردید که با افزایش عدد فرود ذره عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جت نسبت به قائم، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. پس از مقایسه روابط ارائه شده توسط محققین مختلف، رابطه‌ای برای بیان عمق آبشستگی ناشی از برخورد دو جت مایل ارائه شده است. همچنین مشخص شد که ورود هوا تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش عمق آبشستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: دو جت آزاد مایل، زاویه جت، عدد فرود ذره، حوضچه فرود فواره، عمق آبشستگی.

<sup>۱</sup> - استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. ۰۹۱۷۳۰۱۸۲۴۵ - arashjael60@yahoo.com



## مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات مهندسی سد پیش‌بینی عمق آبشستگی است که در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی رخ می‌دهد. جت‌های پرسرعت آب است که از سرریزها سرچشمه می‌گیرند، تأثیر خود را بر روی حجم آب پایین‌دست داشته و می‌توانند باعث ایجاد آبشستگی شوند. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبشستگی قابل‌ملاحظه باشد به‌گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و باعث خطرات بالقوه‌ای در پایداری این سازه‌ها شود. روشی که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشد. تجربه نشان می‌دهد که نیروی ناشی از یک جت آب با سرعت بالا اگر به‌درستی مهار نشود قادر است در مدت‌زمان کوتاهی حتی در سنگ‌های سخت باعث ایجاد گودال‌های عمیق می‌شود. به‌عنوان مثال آسیب‌های قابل‌ملاحظه سد کریبا در شرق آفریقا گواهی بر پتانسیل قدرت تخریب چنین جت‌هایی می‌باشد (Mason, 1984). شکل (۱) نمایی کلی از آبشستگی ناشی از برخورد دو جت را نشان می‌دهد. جت خروجی از هر لوله بصورت دایره ای می‌باشد. بر این اساس، برخورد دو جت آب می‌تواند مخلوط آب و هوا را ایجاد نماید که پس از برخورد با سطح آب مستقیماً بر روی بستر رسوب سقوط می‌نماید. این شرایط می‌تواند یک ساده‌سازی از یک مدل واقعی تلقی شود. بدین ترتیب می‌توان زاویه جت و همچنین سرعت سقوط جت آب را به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرد (Pagliara et al., 2006). همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، جت حاصل از تلاقی دو جت بر سطح بستر دانه‌ای نفوذپذیر ریخته شده است. زاویه  $\alpha$  زاویه جت با سطح قائم،  $\gamma_L$  عمق پایاب،  $S$  فاصله قائم محل برخورد دو جت با سطح آب پایاب،  $\gamma_S$  عمق آبشستگی نسبت به سطح بستر اولیه است.

تلاقی دو جت بر قدرت مومنتم آب تأثیر می‌گذارد. همچنین در کلیه آزمایش‌های این تحقیق، برخورد دو جت در بالای سطح آب در حوضچه فرود فواره صورت گرفته است که منجر به پدیده پاشش آب و ورود هوا به آن شده است. از دیدگاه هیدرولیکی جریان در این حالت

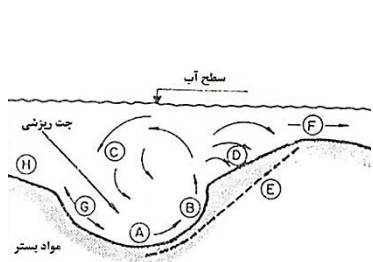
به‌صورت آزاد (غیر مستغرق) در نظر گرفته می‌شود. در درون حوضچه فرود فواره، در مکان برخورد جت با بستر، جریان آشفته و چرخشی پدید می‌آید که از سه فاز آب، هوا و رسوب تشکیل شده است. برای درک بهتر این مکانیسم می‌توان به خصوصیات جت و جریان درون حفره اشاره نمود.

(Albertson et al., 1948) اظهار نمودند که جریان جت را می‌توان به دو ناحیه مجزا تقسیم کرد یعنی یک هسته بالقوه و یک جت پخش شونده (شکل ۲). هسته بالقوه منطقه‌ای گوه‌ای مانند است که در آن سرعت جریان ثابت است. درحالی‌که در ناحیه پخش شونده سرعت جریان کاهش می‌یابد. طول هسته از رابطه  $J_p = C_d^2 \gamma_0$  و سرعت جریان در هسته جت از رابطه  $\frac{U}{U_0} = C_d \sqrt{\frac{\gamma_0}{J}}$  دست می‌آید (Rajaratnam, 1976). که  $L$  فاصله در امتداد خط مرکزی جت،  $J_p$  طول هسته جت است. همچنین ضخامت اولیه جت،  $U_0$  سرعت اولیه جت و  $L$  بیشترین سرعت جت پخش شده است.  $C_d$  نیز ضریب ثابت پخش جت می‌باشد که مقدار آن از  $2/5$  برای جریان آزاد تا  $2/72$  در ناحیه اصابت و برخورد جت تغییر می‌یابد (Stein et al., 1993). بنا به عقیده (Hoffmans, 2009) ویژگی اصلی در ایجاد حفره آبشستگی، تولید یک لایه اختلاط است که بین دو جریان مجاور که با سرعت‌های مختلف در حرکت هستند به وجود می‌آید. در اعداد رینولدز بالا در منطقه‌ای که این دو جریان به هم می‌رسند شاهد ناحیه اختلاط آشفته جریان خواهیم بود که عرض این لایه اختلاط در جهت پایین‌دست افزایش می‌یابد.

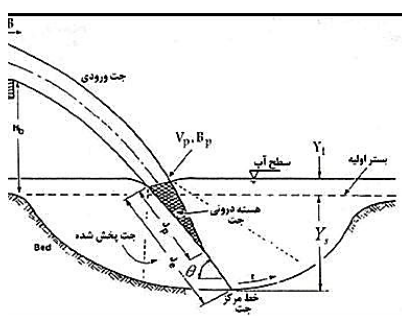
مکانیسم آبشستگی درون حفره فرسایشی توسط (Mason, 1989) شرح داده شده است (شکل ۳). مطابق توصیفات ایشان در ابتدا آبشستگی خیلی سریع پیشرفت می‌کند. جت ورودی سطح بستر را فرسایش داده و آن را پایین می‌برد. همچنین ذرات فرسایش یافته را می‌روبد و با خود به سطح پایین‌دست حفره آبشستگی (b) منتقل می‌نماید. همچنین جت‌های منحرف شده نیز به‌صورت عمودی رو به بالا حرکت می‌کنند. این جت‌ها با خود ذرات رسوب را نیز حمل می‌نمایند. سپس قسمتی از

می‌رسند. هنگامی که ضخامت مصالح بستر در  $D$  زیاد شود سطح شیب‌دار پایین‌تر به صورت متناوب در  $E$  توسعه می‌یابد و مصالح ته‌نشین شده یک‌دفعه و ناگهانی به پایین لغزش می‌یابد؛ و به سمت داخل چاله می‌ریزد؛ و ته شینی بر سطح  $D$  دوباره شروع می‌شود. این فرایند به‌طور مداوم تکرار می‌شود.

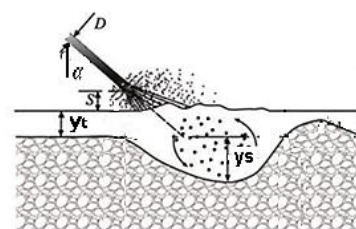
جریان به سمت بالادست حرکت می‌کند ( $C$ ) که دوباره با جت ورودی برخورد کرده و مقداری از رسوبات را با خود به سمت بالادست ( $A$ ) می‌آورد. باقی جریان به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند این جریان رسوبات همراه خود را در وجه شیب‌دار  $D$  ته‌نشین می‌کند. همچنین مقداری از رسوبات به پایین‌دست پشته  $F$



شکل (۳): فرایند آبستگي درون حفره



شکل (۴): ناحیه‌های جت ریزشی آب



شکل (۱): آبستگي ناشی از برخورد جت

آزمایشگاهی و داده‌های میدانی روابط (۳) و (۴) را برای تخمین حداکثر عمق آبستگي ارائه داده‌اند. (D'agostino, 1994) از کانالی به پهنای ۰/۵ متر برای مشاهده آبستگي ناشی از یک جت ریزشی ناشی از یک آبشار استفاده کرد. برای ریزش آب از یک سرریز با فشردگی جانبی استفاده شد که نسبت بین عرض تیغه سرریز به عرض کانال برابر ۰/۴۱ و ۰/۷۱ بود. ایشان دو دانه‌بندی به ابعاد  $D_{50}=4.1$  mm,  $D_{90}=7.0$  mm و دانه‌بندی دوم به ابعاد  $D_{50}=11.5$  mm,  $D_{90}=17.6$  mm استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که به ازای دبی واحد عرض بین ۰/۱۶۷ تا ۰/۱۶۷ (مترمربع بر ثانیه) مقدار عمق آبستگي بین ۰/۰۴۵ تا ۰/۲۸۵ متر تغییر می‌کند. (D'Agostino and Ferro, 2004) با جمع‌آوری داده‌های دیگر محققان معادله (۹) را برای تخمین عمق آبستگي ارائه دادند. آذر (۲۰۰۰) (به نقل از (Ghodsian et al., 2012)) رابطه (۷) را برای تخمین عمق آبستگي در پایین‌دست سرریزهای با جریان آزاد ارائه داده است. نجفی و قدسیان (۲۰۰۴) برای کالورت دایره‌ای رابطه (۸)، (Ghodsian et al., 2006) برای جت‌های ریزشی آزاد رابطه (۱۰) در رسوبات یکنواخت و

همان‌طور که اشاره شد، در هنگامی که آبستگي اتفاق می‌افتد رسوبات فرسایش یافته به صورت تپه‌های کوچک خاک پشته در پایین‌دست حفره ته‌نشین می‌شوند. ارتفاع این تپه‌ها به شرایط هیدرولیکی جریان و عمق آب بستگی دارد. باید توجه داشت که تأثیر خاک پشته پایین‌دست بر آب بستگی پیچیده است؛ زیرا علاوه بر اینکه رسوبات از روی آن عبور می‌کنند، مقداری از رسوبات به داخل حفره آبستگي حرکت می‌کنند. (Pagliara et al., 2006) ابراز می‌دارند در صورتی که توسط روشی اقدام به حذف مصنوعی خاک پشته شود مقدار عمق آبستگي افزایش می‌یابد.

(Schoklitsch, 1928) (به نقل از Hager, 1998) اولین فردی بود که بر آبستگي درون حوضچه‌های فرود فواره تحقیق نمود. ایشان از ۵ اندازه دانه‌بندی رسوبات یکنواخت و ۳ حالت رسوبات مختلط استفاده نمود و مشاهده کرد که سرعت آبستگي در ابتدا زیاد و پس از مدت‌زمانی به عمق متعادل می‌رسد. (Jaeger, 1939) رابطه (۱) را برای حداکثر عمق آبستگي ناشی از جت‌های ریزشی ارائه کرد. (Martins, 1973) بر اساس آبستگي در بلوک‌های مکعبی رابطه (۲) را ارائه داده است. (Mason and Arumugam, 1985) با توجه به داده‌های



استاندارد بهترین جواب را ارائه می‌نماید. همچنین هر چه جت آب به حوضچه نزدیک‌تر می‌شود دقت روش عددی کاهش می‌یابد.

محققان ثابت کرده‌اند که ورود هوا نیز نقش عمده‌ای در تشکیل حفره آبشستگی دارد. (Canepa and Hager, 2003, Duarte et al., 2016, Manso et al., 2004, Mason, 1989, Pagliara and Palermo, 2013) که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. (Mason, 1989) تلاش کرد تأثیر ورود هوا را بر حفره آبشستگی بیان نماید، تلاش او منجر به ایجاد روابط (۵) و (۶) شد. (Canepa and Hager, 2003) تأثیر هوادهی را بر حفره آبشستگی موردبررسی قراردادند آن‌ها عمق آبشستگی را به قطر لوله جت مایل ارتباط دادند و بیان نمودند که عدد فرود ذره تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر فرایند آبشستگی ایفا می‌کند. (Pagliara et al., 2006). دریافتند که حداکثر عمق آبشستگی علاوه بر قطر جت به درصد هوای داخل جت نیز ارتباط دارد. آن‌ها مشاهده کردند که در هنگامی که از  $D_{90}$  به‌عنوان قطر ذره در رابطه عدد فرود ذره استفاده شود، شکل جت تأثیر کمی بر عمق آبشستگی دارد. آن‌ها با در نظر گرفتن ارتفاع نسبی پایاب ( $T = y_t/D$ )، عدد فرود ذره با در نظر گرفتن  $D_{90}$  به‌عنوان قطر معرف ذره ( $Fr_{90}$ )، انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma_g$ ) و مقدار نسبت دبی هوا به دبی آب ( $\beta = \frac{Q_a}{Q_w}$ ) در هر دو حالت مستغرق و آزاد عمق آبشستگی را موردبررسی قراردادند. همچنین آن‌ها بر اساس نتایج (Canepa and Hager, 2003) رابطه (۱۱) را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی ارائه دادند.

همچنین (Ghodsian et al., 2012) رابطه (۱۲) را در رسوبات غیریکنواخت را ارائه داده‌اند.

تحلیل حساسیت عمق آب شستگی در جت‌های ریزشی آزاد توسط (منصوری و همکاران، ۱۳۹۷) موردبررسی قرار گرفته است. آن‌ها به بررسی دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها، قطر متوسط رسوبات بستر پایین‌دست و زاویه برخورد جت‌های ریزشی بر هندسه حفره آبشستگی پرداختند. در تمام آزمایش‌های آن‌ها با افزایش دبی عمق آبشستگی افزایش یافته است. همچنین با آنالیز حساسیت مشخص گردید که اعمال ۲۰ درصد تغییر در پارامترهای دبی جت، قطر متوسط رسوبات بستر و زاویه برخورد جت‌های ریزشی در صفحه افقی، عمق نسبی آبشستگی را به ترتیب ۱۲/۳۳، ۶/۲۳ و ۳/۴۰۳ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

سیفی زاده و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS تأثیر احداث سد بر تغییرات مورفولوژی رودخانه پلرود را برای یک دوره کوتاه‌مدت موردبررسی قراردادند. آن‌ها دریافتند که وجود سد باعث افزایش فرسایش به میزان ۱ متر نسبت به حالت عدم وجود سد، شده است.

منصوری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل عددی FLUENT خصوصیات هیدرولیکی جریان را در پرتابه جامی شکل موردبررسی قراردادند. آن‌ها برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان از مدل جریان آرام و مدل‌های جریان متلاطم و استفاده کردند. برای بیان شرایط دیوار دو تابع دیوار استاندارد (Standard) و غیر لغزشی (Non equilibrium) موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل آشفته استاندارد به همراه تابع دیوار

جدول (۱): روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای تخمین حداکثر عمق آبستگي

عبارت رابطه	محققین	شماره رابطه
$Y_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25}\left(\frac{Y_t}{D50}\right)^{0.333}$	Jaeger, 1939	(۱)
$Y_s = 0.14(7(Q^3H^{1.5}D_{50}^{-2})^{0.5}) - 0.73\frac{Y_t^2}{7(Q^3H^{1.5}D_{50}^{-2})^{0.5}} + 1.7Y_t - Y_t$	Martins, 1973	(۲)
$Y_s = 3.27\frac{q^{0.6}H^{0.05}Y_t^{0.15}}{g^{0.2}D_{50}^{0.1}} - Y_t$	Mason and Arumugam, 1985	(۳)
$Y_s = (4.42 - 3.1H^{0.1})q^{(0.600-0.0033H)}H^{(15-0.005H)}Y_t^{0.15}g^{-0.2}D_{50}^{-0.1} - Y_t$	Mason and Arumugam, 1985	(۴)
$y_s = 3.39\frac{(1+\beta)^{0.3}q^{0.6}y_t^{0.16}}{g^{0.3}D_{50}^{0.06}} - y_t$	Mason, 1989	(۵)
$y_s = 3.27\frac{H^{0.05}q^{0.6}y_t^{0.15}}{g^{0.3}D_{50}^{0.10}} - y_t$	Mason, 1989	(۶)
$\frac{y_s}{H} = 1.466\left(\frac{H}{y_t}\right)^{-0.739}\left(\frac{q}{D_{50}\sqrt{gH}}\right)^{0.104}\left(\frac{H}{y_t}\right)^{0.457}$	آذر، ۲۰۰۰	(۷)
$\frac{y_s}{H_c} = 0.271\left(\frac{Y_t}{D}\right)^{-0.226}\left(\frac{Fr_{50}D}{\sqrt{(GS-1)H_c}}\right)^{0.605}\left(\frac{Y_t}{D}\right)^{-0.48}$	نجفی و قدسیان، ۲۰۰۴	(۸)
$\frac{y_s}{w} = 0.54\left(\frac{b}{w}\right)^{0.593}\left(\frac{yt}{H}\right)^{-0.126}Fr'_{50}{}^{0.544}\left(\frac{D_{90}}{D_{50}}\right)^{-0.856}\left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751}$	D'Agostino and Ferro, 2004	(۹)
$\frac{y_s}{y_t} = 1.925\left(\frac{y_t}{H_c}\right)^{-0.66}\left(Fr_{50}\frac{R}{H_c}\right)^{0.3}$	Ghodsian et al, 2006	(۱۰)
$\frac{y_s}{D} = Fr_{90} \times [-0.38 \sin(\alpha' + 22.5^\circ)] \times (1 + \beta)^{-m} \times \frac{[0.12 \ln(1/T) + Cr]}{0.3} \times [-(0.33 + 0.57\alpha)] \times (1 + F_u^{0.5})$	Pagliara et al., 2006	(۱۱)
$\frac{y_s}{y_t} = 0.54Fr_{90}^{0.42}\left(\frac{H_c}{R}\right)^{-0.96}\left(\frac{B}{b}\right)^{0.68}\left(\frac{y_t}{H_c}\right)^{-1.27}$	Ghodsian et al, 2012	(۱۲)

شعاع هیدرولیکی سطح مقطع جت و  $H_c$  ارتفاع سقوط مرکز جت تا سطح بستر اولیه است.  $H_c$ : ارتفاع ریزش از مرکز جت تا کف بستر اولیه،  $Y_t$ : عمق پایاب،  $Fr_{50}$ : عدد فرود ذره،  $V$ : سرعت جریان خروجی،  $GS$ : چگالی است.  $B$  عرض حوضچه آرامش است. در رابطه (۱۱)  $\alpha'$  زاویه جت نسبت به افق،  $Cr$  ضریب تجربی است که مقدار آن در حضور خاک پشته برابر ۰/۴۵ و بدون حضور خاک پشته

که:  $y_s$ : عمق آبستگي،  $Y_t$ : عمق پایاب برحسب متر،  $D_{50}$ : قطر میانگین ذرات برحسب متر،  $H$ : اختلاف تراز سطح آب بین بالادست و پایین دست برحسب متر،  $q$  دبی در واحد عرض بر حسب مترمربع بر ثانیه است. در رابطه (۸)،  $D$  قطر لوله کالورت و در رابطه (۹)،  $w$  ارتفاع کل سقوط آب ( $w=yt+H$ ) و  $Fr'_{50} = \frac{(q/w)}{\sqrt{(G_s-1)gD_{50}}}$  است که شبیه عدد فرود ذره است. در رابطه (۱۰) و (۱۲)  $R$



جت در بالای سطح آب فراهم گردیده است. در ابتدا در هر سری آزمایش برای شرایطی که احتمال می‌رود بیشترین شدت آب شستگی وجود داشته باشد آزمایش‌هایی به منظور رسیدن به زمان تعادل انجام گرفت. سپس کل آزمایش‌ها در این مدت‌زمان صورت گرفت. برای رسیدن به عمق موردنظر در پایاب سطح آب در جعبه آزمایش به‌طور ملایم و از طریق تغذیه در کف توسط شیرهای زهکش (برای جلوگیری از کوچک‌ترین تغییرات در سطح بستر) تا تراز موردنظر بالا آورده شد. سپس جریان جت برقرار گردید. پس از پایان مدت‌زمان آزمایش جریان جت‌ها قطع شده و سطح آب از طریق زهکش پایین آورده شده تا امکان قرائت پروفیل بستر فراهم گردد. با انجام آزمایش چگالی سنجی میزان چگالی رسوبات برابر  $2/63$  به دست آمد. در نهایت  $36$  آزمایش با مدت‌زمان هر آزمایش برابر  $8$  ساعت انجام شد. برای هر آزمایش سطح بستر توسط اندازه‌گیر فاصله لیزری (با دقت  $1 \pm$  میلی‌متر) در یک شبکه  $1 \times 1$  (cm×cm) برداشته شد تا بتوان بیشترین میزان آبشستگی را تعیین نمود. به دلیل عدم تغذیه جریان از بالادست آبشستگی از نوع آبشستگی آب صاف می‌باشد.

جدول (۲): خصوصیات منحنی دانه‌بندی برای رسوبات

مورد استفاده در این تحقیق

D9	D8	D5	D1	D1	$\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$
0	4	0	6	0	
۱/۹۳	۱/۵۲	۶/۹۲	۱/۳۵	۵/۱	۱/۲۶
۸	۸		۵		
۱/۹۲	۱/۵۱	۱/۳۵	۲/۶۲	۱/۵۱	۱/۳۱
۴	۴	۳	۲		
۳/۵	۳	۱/۹۵	۱/۵	۱/۵۳	۱/۴۱
	۱				

### نالیز پارامترهای آبشستگی

عمق آبشستگی برای رسوبات یکنواخت تابعی از پارامترهای ذکر شده به‌صورت زیر است:

$$y_s = f(V, y_t, g, \rho, \rho_s, D_{50}, \alpha, S, D_j) \quad (13)$$

که در این رابطه  $S$ : فاصله عمودی محل برخورد دو جت تا سطح پایاب (متر)،  $V$ : سرعت جریان در خروجی جت (متر بر ثانیه)،  $y_t$ : عمق پایاب (عمق آب در حوضچه فرود فواره) (متر)،  $g$ : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،

$0/52$  می‌باشد. و  $m$  برای جت غیر مستغرق  $0/75$  و برای جت مستغرق  $0/5$  در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روابطی مانند رابطه (۱) و (۴) از نظر ابعادی غیر همگن است. همچنین در هیچ‌یک از روابط به‌جز رابطه (۱۱) تأثیر زاویه برخورد جت در نظر گرفته نشده است. درحالی‌که تحقیقات فراوانی در مورد آبشستگی ناشی از یک جت صورت گرفته است، کمتر تأثیر حضور  $2$  جت بر آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. وجود جت‌های متعدد به‌طور قابل توجهی پیچیدگی پدیده را افزایش می‌دهد، زیرا تحت تأثیر بسیاری از پارامترهای دیگر قرار دارد که تخمین آن‌ها همیشه آسان نیست. هنگامی که دو جت قبل از غوطه‌ور شدن در حوضچه آرامش، به هم برخورد می‌کنند، به دلیل برخورداری از حجم عظیم هوا که در تصادم دو جت به وجود می‌آید، فرآیند آبشستگی بسیار پیچیده‌تر می‌شود.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور اندازه‌گیری عمق آبشستگی با تغییر مشخصات پایاب، از جعبه‌ای مکعبی با سطح مقطع  $1/25 \times 1/25$  (متر×متر) و به ارتفاع  $0/7$  متر به‌عنوان حوضچه فرود فواره استفاده شد. این جعبه مجهز به یک دریچه باقابلیت تنظیم سطح آب در پایین‌دست، شیر زهکش آب در کف و رایزر با دو خروجی دایره‌ای شکل به قطر داخلی  $1$  سانتیمتر باقابلیت تنظیم زاویه خروجی جت نسبت به قائم است. از مخزن نگه‌دارنده آب و پمپ به‌منظور ایجاد سیستم چرخش آب درون جعبه مکعبی استفاده شده است. رسوبات به ارتفاع حدود  $40$  سانتیمتر در مدل ریخته می‌شوند. دبی هر یک از خروجی‌ها برابر  $245$  میلی‌لیتر بر ثانیه تنظیم شد. آزمایش‌ها تحت  $3$  زاویه خروجی جت نسبت به قائم برابر  $30$  و  $45$  و  $60$  درجه در  $4$  عمق تقریباً ترتیب  $6/92$  و  $3/35$  و  $1/95$  میلی‌متر و از مصالح یکنواخت، با خصوصیات نشان داده‌شده در جدول (۲) استفاده شده است. در هر آزمایش دو جت آب بر هم برخورد داده شده‌اند. کلیه آزمایش‌ها در شرایط جت آزاد صورت گرفته است بدین ترتیب امکان اندازه‌گیری موقعیت سطح برخورد دو

در این روابط،  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب ا آمین داده واقعی (اندازه‌گیری شده) و برآورد شده،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در کل جامعه آماری، و  $n$  تعداد کل نمونه‌های ارزیابی شده می‌باشند.

### نتایج و بحث:

در جدول (۳) خصوصیات آماری هر یک از پارامترهای بی‌بعد نشان داده شده است. در این جدول محدوده مقادیر به همراه ضریب همبستگی پیرسون ( $R$ ) و نتایج آزمون آماری مقدار پی (P-Value) برای هر یک از پارامترها نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور تعیین قطر معادل

حاصل از برخورد دو جت از رابطه  $D_{eq} = \sqrt{2D_j^2}$  استفاده شده است. بدین ترتیب از تقسیم دبی بر مساحت حاصل از این قطر، سرعت برای جت معادل حاصل از برخورد این دو جت به دست می‌آید. بدین ترتیب عدد فرود ذره از محدوده ۹/۳۸ تا ۱۷/۶۸ متغیر بود. از آزمون آماری مقدار پی، برای بیان وابستگی عمق بی‌بعد آبشستگی  $(Y_s/Y_t)$  به هر یک از پارامترهای بی‌بعد در سطح خطای ۵٪ استفاده شده است. فرضیه صفر ( $H_0$ ) نشان‌دهنده عدم وابستگی و فرضیه یک ( $H_1$ ) نشان‌دهنده وابستگی است. با رد فرضیه صفر با استفاده از نتایج این جدول مشخص شد که عمق بی‌بعد آبشستگی  $(Y_s/Y_t)$  به زبری نسبی  $(D_{50}/Y_t)$ ، فاصله برخورد نسبی  $(S/Y_t)$  و نسبت بی‌بعد عمق پایاب به قطر جت معادل  $(Y_t/D_{eq})$  وابستگی دارد. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) مشخص گردید که زبری نسبی بیشترین تأثیر را بر عمق بی‌بعد آبشستگی دارد. در شکل‌های (۴) تا (۷) نمودار پراکنشی هر یک از پارامترهای بی‌بعد بر عمق نسبی آب شستگی  $(Y_s/Y_t)$  نشان داده شده است.

$\rho$ : جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $\rho_s$ : جرم مخصوص رسوبات (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $D_{50}$ : قطر متوسط ذرات بستر (متر)،  $\alpha$ : زاویه خروجی جت ریزشی نسبت به قائم (درجه)،  $y_s$ : عمق آبشستگی (متر) و  $D_j$ : قطر جت (متر) است. با در نظر گرفتن پارامترهای سرعت جریان، عمق پایاب و جرم واحد حجم سیال به‌عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از آنالیز  $\pi$  بوکینگهام معادله بی‌بعد زیر به دست می‌آید:

$$f(\pi_1 = \frac{H}{y_t}, \pi_2 = \alpha, \pi_3 = \frac{y_s}{y_t}, \pi_4 = \frac{D_{50}}{y_t}, \pi_5 = \frac{\rho_s}{\rho}, \pi_6 = \frac{V^2}{gy_t}, \pi_7 = \frac{D_j}{y_t}) = 0 \quad (14)$$

با ترکیب متغیرهای بی‌بعد  $\pi_4$  و  $\pi_5$  و  $\pi_6$  به پارامتر بی‌بعد عدد فرود ذره دست می‌یابیم که برابر  $\frac{V}{\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho}-1)D_{50}}}$  است. بدین ترتیب معادله کلی به صورت زیر است:

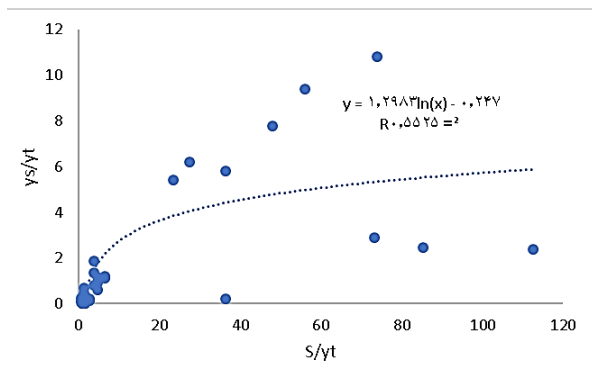
$$\frac{y_s}{y_t} = f\left(\frac{V}{\sqrt{g(Gs-1)D_{50}}}, \alpha, \frac{S}{y_t}, \frac{D}{y_t}, \frac{D_{50}}{y_t}\right) \quad (15)$$

در این تحقیق به منظور ارزیابی دقت روابط از معیارهای آماری، ضریب تبیین برازش ( $R^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شده است:

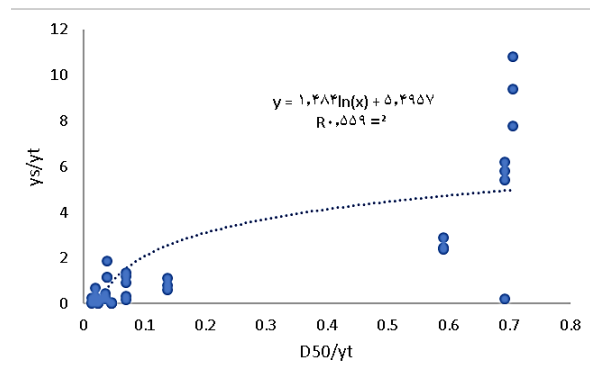
$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (16)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (17)$$

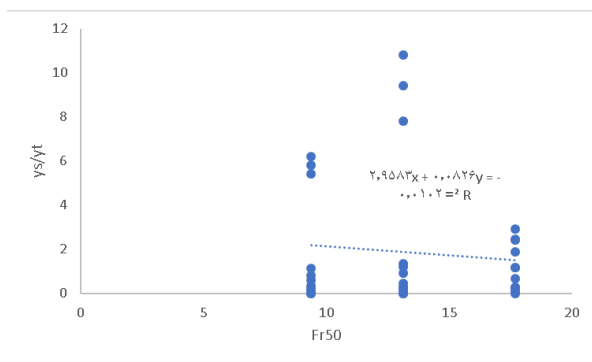
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n} \quad (18)$$



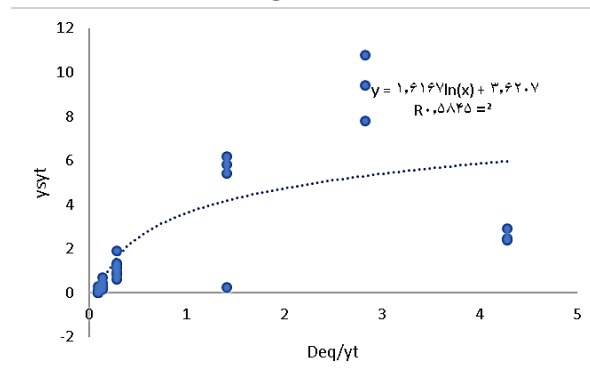
شکل (۵): نمودار  $S / y_t$  در برابر عمق بی بعد آبستگی



شکل (۴): نمودار زبری نسبی در برابر عمق بی بعد آبستگی



شکل (۷): نمودار عدد فرود ذره در برابر عمق بی بعد آبستگی



شکل (۶): نمودار  $D_{eq} / y_t$  در برابر عمق بی بعد آبستگی

جدول (۳): معرفی خصوصیات آماری پارامترهای مورداستفاده

متغیر/ خصوصیت آماری	Fr50	Tw=y <sub>t</sub> /D <sub>eq</sub>	alpha (degree)	S/y <sub>t</sub>	D <sub>50</sub> /y <sub>t</sub>	y <sub>s</sub> /y <sub>t</sub>
تعداد	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶
کمترین مقدار	۹/۳۸۴	۰/۲۳۳	۳۰	۰/۶۳۳	۰/۰۱۳	۰
بیشترین مقدار	۱۷/۶۷۸	۱۰/۶۰۷	۶۰	۱۱۲/۶۳۶	۰/۷۰۶	۱۰/۸
میانگین	۱۳/۴۰۱	۵/۲۳۴	-	۱۷/۸۶۲	۰/۲۲۱	۱/۸۵۱
انحراف معیار	۳/۴۳۹	۳/۹۳۲	-	۲۸/۷۹۶	۰/۲۸۳	۲/۸۱۷
ضریب همبستگی پیرسون هر یک از متغیرها با متغیر Y <sub>s</sub> /y <sub>t</sub>	-۰/۱۰۱	-۰/۶۸۴	-۰/۰۱۳	۰/۶۲۶	۰/۸۱۳	۱
آزمون مقدار پی با متغیر Y <sub>s</sub> /y <sub>t</sub>	۰/۵۵۸	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۳۹	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰

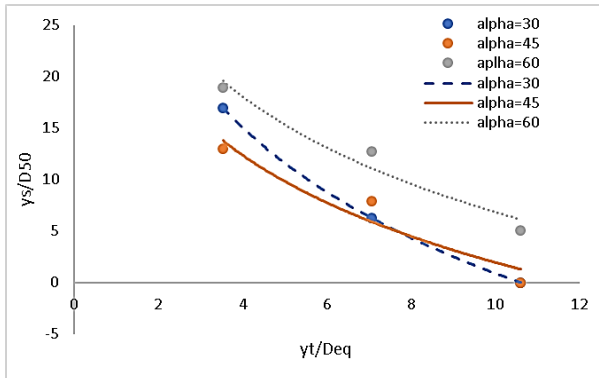
استفاده شده در این تحقیق تأثیر زاویه جت بر عمق بی بعد آبستگی نشان داده شده است. مشاهده می شود که زاویه جت ۶۰ درجه نسبت به سایر زاویه ها منجر به افزایش عمق آبستگی می شود. در شکل (۱۱) تأثیر عدد فرود ذره بر عمق بی بعد آبستگی نشان داده شده است. همان طور که

### تأثیر زاویه جت و عدد فرود ذره

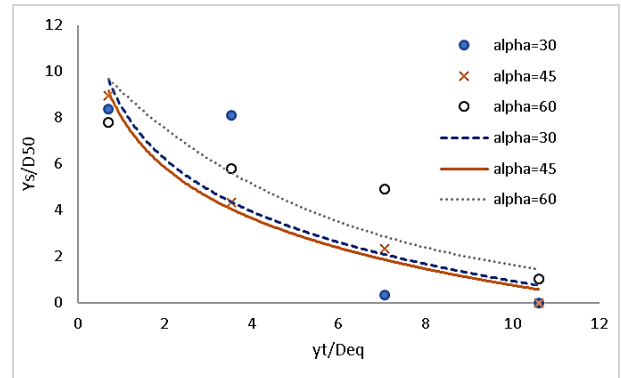
برای بیان تأثیر زاویه جت و عدد فرود ذره بر عمق آبستگی از نسبت بی بعد عمق آبستگی به قطر متوسط رسوبات ( $y_s / D_{50}$ ) استفاده شده است. بدین ترتیب در شکل های (۸) تا (۱۰) برای هر یک از دانه بندی های



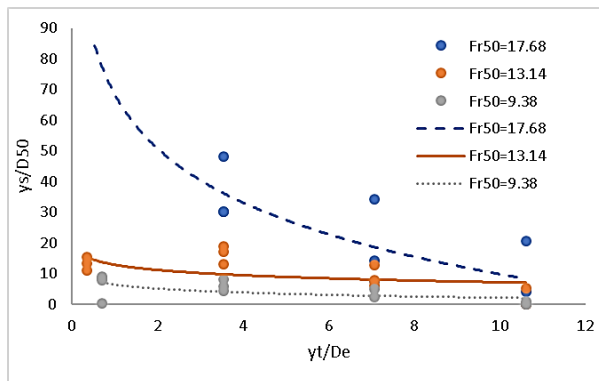
مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود ذره، عمق بی‌بعد آبشستگی افزایش می‌یابد.



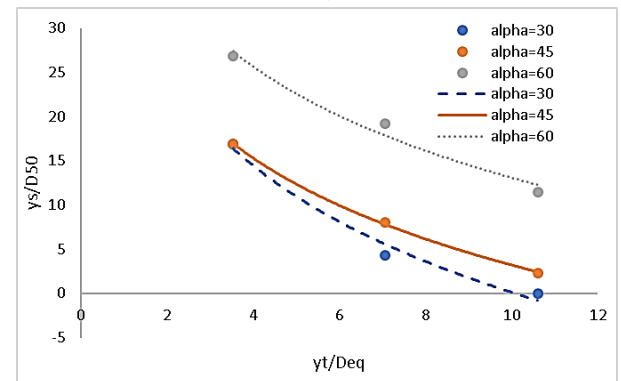
شکل (۹): دانه‌بندی حد وسط ( $D_{90}/D_{jet}=0.35$ )



شکل (۸): درشت‌ترین دانه‌بندی ( $D_{90}/D_{jet}=0.63$ )



شکل (۱۱): تأثیر عدد فرود ذره بر عمق بی‌بعد آبشستگی



شکل (۱۰): کوچک‌ترین دانه‌بندی ( $D_{90}/D_{jet}=0.25$ )

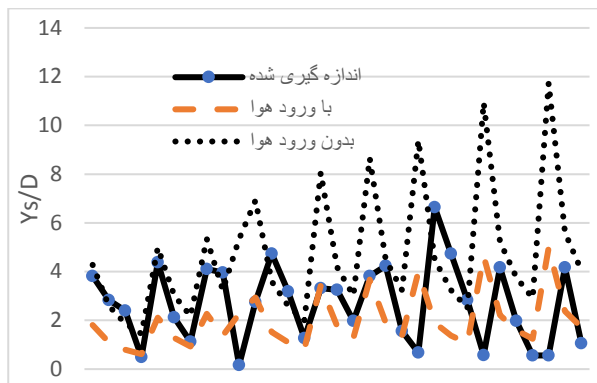
شکل (۱۲) به مقایسه عمق آبشستگی نسبی (  $y_s / y_t$  ) بین اندازه‌گیری و محاسبه‌شده توسط رابطه (۱۹) می‌پردازد. خط با شیب ۴۵ درجه بهترین تطابق و دو خط مجاور آن محدوده اطمینان با خطای ۱۰٪ را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی تأثیر ورود هوا بر عمق آبشستگی از رابطه (۱۹) استفاده شده است. بهترین تطبیق برای شرایط با ورود هوا به ازای مقدار  $\beta$  برابر با ۲/۱۳۸ به دست آمد، که در شکل (۱۳) نتایج آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ورود هوا تأثیر چشم‌گیری بر کاهش عمق آبشستگی دارد. به‌گونه‌ای که مقدار میانگین  $y_s / D_{eq}$  از ۴/۶۷ برای حالت بدون در نظر گرفتن  $\beta$  (بدون ورود هوا) به ۱/۹۸ در این حالت (با ورود هوا) می‌رسد یعنی به ازای افزایش  $\beta$  از صفر تا ۲/۱۴ میانگین  $y_s / D_{eq}$  به اندازه ۲/۶۹ واحد کاهش می‌یابد.

در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایشگاهی مربوط به اندازه‌گیری عمق آبشستگی در شرایط برخورد دو جت به‌صورت آزاد و با استفاده از ترکیب پارامترهای تأثیرگذار رابطه (۱۹) برای تخمین عمق آبشستگی ارائه می‌گردد:

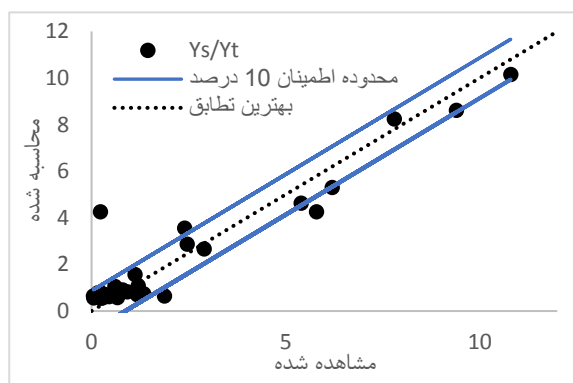
$$\frac{Y_s}{Y_t} = 0.2654 \left( \frac{-4.7108 + 10.0084 \times Fr'_{50}}{1 - 4.5507 Fr'_{50} + 5.1812 Fr'^2_{50}} \right) + 0.7865 \left( \frac{0.5889 - 0.8470 (D_{50} / y_t)}{1 - 2.7478 (D_{50} / y_t) + 1.8838 (D_{50} / y_t)^2} \right) \quad (19)$$

$$Fr'_{50} = \frac{V_{jet}}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \times \left( \frac{D_{eq} / y_t + \sin \alpha}{1 + S / y_t + \sin \alpha} \right)$$

است.



شکل (۱۳): تأثیر ورود هوا بر عمق آبستگي نسبي محاسبه شده توسط رابطه (۱۱)



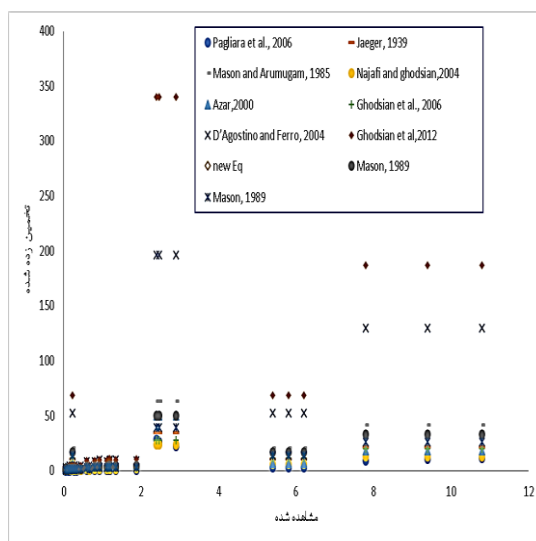
شکل (۱۴): مقایسه عمق آبستگي نسبي بين اندازه گیری و محاسبه شده توسط رابطه (۱۹)

اندازه گیری شده تخمین بزنند ممکن است به صورت زیر باشد:

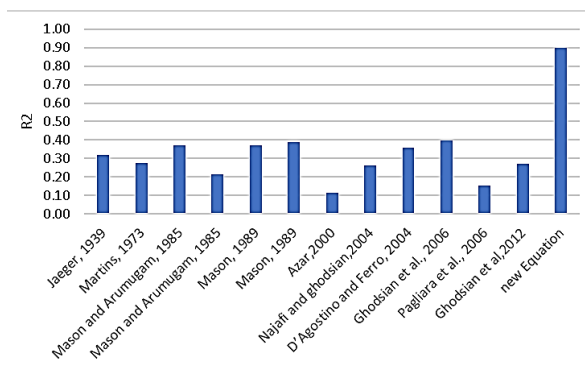
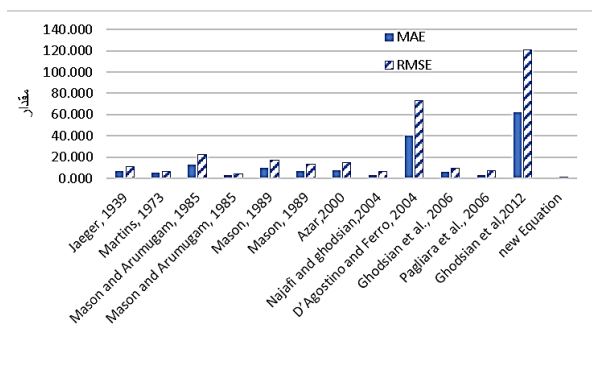
۱- جریان حاصله در این تحقیق ناشی از برخورد دو جت بوده که منجر به تلفات بخشی از انرژی فرساینده آب می شود که سبب کاهش عمق آبستگي می گردد. از سوی دیگر با تداخل دو جت امکان ورود هوای بیشتر نسبت به حالت بدون تداخل به جت فراهم گردید که سبب کاهش عمق فرسایش می شود.

۲- بسیاری از روابط برای شکل جت مستطیلی نباشد و آنکه در آن ها از تقسیم دبی بر عرض جت، دبی واحد عرض به دست آمده است. در این تحقیق به دلیل جت دایره ای قطر معادل جایگزین عرض جت شده است

در شکل های (۱۴) و (۱۵) به مقایسه دقت روابط مختلف برای تخمین عمق آبستگي در حالت برخورد دو جت برای مصالح یکنواخت پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می شود رابطه ارائه شده در این تحقیق (رابطه ۱۹)، نجفی و قدسیان، ۲۰۰۴ (رابطه ۸) و pagliara et al, 2006 (رابطه ۱۱) بهترین دقت را دارند. در شکل (۱۴) نتایج حاصل از عمق بی بعد آبستگي ( $y_s / y_t$ ) مشاهده شده در برابر مقدار محاسبه شده توسط روابط مختلف نشان داده شده است. از دلایلی که منجر شده که روابط مختلف میزان عمق آبستگي را در این حالت بیش از مقدار



شکل (۱۴): مقایسه تصویری روابط مختلف جهت تخمین عمق آبستگي بی بعد



ب- مقایسه برحسب معیارهای آماری MAE و RMSE

الف- مقایسه برحسب معیار آماری R2

شکل (۱۵): مقایسه آماری روابط مختلف جهت تخمین عمق آبستنگی

## نتیجه گیری

عمق پایاب، بدنه آبی که بین جت ورودی در لحظه برخورد با سطح آب و بستر قرار گرفته مانند بالشتک ضربه گیر عمل نموده و منجر به فاصله گرفتن هسته جت و همچنین استهلاک انرژی جت می شود. بدین ترتیب در عمق های کم شاهد بیشترین آبستنگی خواهیم بود و با افزایش عمق پایاب به طور محسوسی عمق آبستنگی کاهش می یابد.

۳- افزایش زاویه جت نسبت به قائم باعث افزایش عمق آبستنگی در مصالح غیر چسبنده شده است. به گونه ای که بیشترین میزان نسبت بی بعد عمق آبستنگی  $y_s / D_{50}$  ( در عمق های پایاب مختلف به ازای زاویه ۶۰ درجه حاصل شده است.

۴- از بین پارامترهای بی بعد زبری نسبی  $(D_{50} / y_t)$ ، عدد فرود ذره  $(Fr_{50})$ ، زاویه جت  $(\alpha)$ ، نسبت بی بعد قطر جت به عمق پایاب  $(D_{eq} / y_t)$  و پارامتر ارتفاع نسبی برخورد دو جت  $(S / y_t)$  بیشترین تأثیر را زبری نسبی بر عمق آبستنگی دارد. همچنین در این تحقیق رابطه (۱۹) برای محاسبه عمق آبستنگی در شرایط برخورد دو جت به صورت آزاد و برای مصالح یکنواخت ارائه شده است.

۵- ورود هوا تأثیر چشم گیری بر کاهش عمق آبستنگی داشته است به گونه ای که به ازای ۲/۱۴ واحد افزایش در ضریب نفوذ هوا در معادله (۱۱) میانگین  $y_s / D_{eq}$  به اندازه ۲/۶۹ واحد کاهش می یابد

می توان از برخورد دو جت به منظور کاهش عمق آبستنگی در پایین دست سازه های هیدرولیکی بهره برد. در این پژوهش با استفاده از داده های آزمایشگاهی اثر برخورد دو جت بر عمق حفره آبستنگی مورد مطالعه قرار گرفت. زاویه خروجی هر جت نسبت به سطح قائم ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در نظر گرفته شد. از سه دانه بندی غیر چسبنده با قطر متوسط ۱/۹۵ و ۳/۵۳ و ۶/۹۲ میلی متر استفاده شد. کلیه آزمایش ها در شرایط جت آزاد صورت گرفت و عمق پایاب نسبی  $(y_t / D_{eq})$  از ۰/۲۳۳ تا ۱۰/۶ و عدد فرود ذره از ۹/۳۸ تا ۱۷/۶۸ تغییر می کرد. برای تحقیق های بیشتر پیشنهاد می شود تأثیر چسبندگی ذرات و تراکم رسوبات مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

۱- با افزایش عدد فرود ذره، عمق حفره آبستنگی افزایش می یابد. شیب منحنی حاصل ناشی از تأثیر افزایش عدد فرود در دانه بندی های بزرگ تر کاهش می یابد که نشان دهنده این است که به ازای دانه بندی بزرگ تر مقاومت ذرات به جابه جایی به ازای یک سرعت جت معین، بیشتر می شود.

۲- عمق پایاب تأثیر زیادی بر آبستنگی دارد. به گونه ای که با افزایش عمق پایاب در نسبت بی بعد  $y_t / D_{eq}$  عمق آبستنگی در هر دو نسبت بی بعد  $y_s / y_t$  و  $y_s / D_{50}$  کاهش می یابد؛ زیرا با افزایش



## منابع

سیفی زاده، م.، ع. عمادی و ر. فضل اولی. ۱۳۹۲. تغییرات مورفولوژی رودخانه پلرود در پایین دست سد، قبل و بعد از احداث سد در مقیاس کوتاه مدت. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. سال سوم، شماره ۴، ص. ۷۰-۵۹.  
منصوری، س.، ص. امامقلی زاده، خ. اژدری و ر. مؤذن زاده. ۱۳۹۷. مطالعه آزمایشگاهی حداکثر عمق آب شستگی ناشی از جت های ریزشی آزاد در پایین دست سدهای مخزنی، نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال سی و یکم، شماره ۱۰، ص. ۱-۲۰.  
منصوری، ر.، ف. معاف، م. بهشتی راد و ع. کاربخش. ۱۳۹۸. بررسی خصوصیات هیدرولیکی در پرتابه جامی شکل با استفاده از مدل عددی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران سال دهم، شماره ۲، ص. ۱۲-۱.  
نجفی، ج. و م. قدسیان. ۲۰۰۴. بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفره آبشستگی پایین دست کالورت لوله ای. نشریه دانشکده فنی، سال سی و هشتم، شماره ۲، ص. ۳۲۹-۳۳۸.

ALBERTSON, M., DAI, Y., JENSEN, R. & ROUSE, H. 1948. Diffusion of submerged jets; § 74, vol. 74.

CANEPA, S. & HAGER, W. H. 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 129, 358-365.

D'AGOSTINO, V. 1994. Indagine sullo scavo a valle di opere trasversali mediante modello fisico a fondo mobile. L'Energia elettrica (1981), 71, 37-51.

D'AGOSTINO, V. & FERRO, V. 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. Journal of Hydraulic Engineering, 1, ۲۴-۳۷, ۳۰.

DUARTE, R., PINHEIRO, A. & SCHLEISS, A. J. 2016. An enhanced physically based scour model for considering jet air entrainment. Engineering, 2, 294-301.

GHODSIAN, M., MEHRAEIN, M. & RANJBAR, H. 2012. Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. Scientia Iranica, 19, 1437-1444.

GHODSIAN, M., MELVILLE, B. & TAJKARIMI, D. Local scour due to free overfall jet. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2006. Thomas Telford Ltd, 253-260.

HOFFMANS, I. G. J. 2009. Closure problem to jet scour. Journal of hydraulic research, 47, 100-109.

JAEGER, C. 1939. Uber die Aehnlichkeit bei flussaulichen Modellversuchen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 34, 269.

MANSO, P. A., FIOROTTO, V., BOLLAERT, E. & SCHLEISS, A. J. 2000. Discussion of "Effect of jet air content on plunge pool scour" by Stefano Canepa and Willi H. Hager. Journal of Hydraulic Engineering, 130, 1128-1130.

MARTINS, R. Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds. Proc. from the 11th Congress on Large Dams, 1973. 799-814.

MASON, P. 1984. EROSION OF PLUNGE POOLS DOWNSTREAM OF DAMS DUE TO THE ACTION OF FREE-T-RAJECTORY JETS. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 76, 523-537.

MASON, P. J. 1989. Effects of air entrainment on plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 115, 385-399.



MASON, P. J. & ARUMUGAM, K. 1985. Free jet scour below dams and flip buckets. Journal of Hydraulic Engineering, 111, 220-235.

PAGLIARA, S., HAGER, W. H. & MINOR, H.-E. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 132, 450-461.

PAGLIARA, S. & PALERMO, M. 2013. Analysis of scour characteristics in presence of aerated crossing jets. Australasian Journal of Water Resources, 16, 163-172.

RAJARATNAM, N. 1976. Turbulent jets, Elsevier.

STEIN, O., JULIEN, P. & ALONSO, C. 1993. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. Journal of hydraulic research, 31, 723-738.



## Investigation on flow characteristics effect on scour depth of two inclined jets impingement

ArashJael<sup>1</sup>

### Abstract

Local scour of free fall jets due to destructive effects on hydraulic structures is an interesting topic for researchers. Impingement of 2 jet changes the erosive water power and also leads to air entrainment. In this research-based on experimental results, scour depth in the plunge pool due to two inclined jets impingement was investigated. Three sizes of sediment aggregate was used and tailwater was changed at four levels. Jets had three angles relative to vertical, namely 30, 45, 60 degrees. It was found that with increasing densimetric Froud number, the scour depth increases. Also It was found that with increasing jet angle, the scouring depth was increased. Some formulas presented by different researchers were compared to estimate the scour depth for impingement of the two inclined jet and a new equation for estimating of scour depth was proposed. Furthermore, the results showed that air entrainment had a significant effect on reducing scour depth.

**Keywords:** Two free inclined jets; Jet angle; densimetric Froud number; Plunge pool; Scour depth.

---

<sup>1</sup> -Assistant Professor, Agriculture Department, Payam Noor University, Tehran, Iran. Arashjael60@yahoo.com



## Investigation on flow characteristics effect on scour depth of two inclined jets impingement

Arash Jael<sup>1</sup>

### Introduction

The water jets that usually release from the weir of the dam have high velocities. If they don't control, they may cause deep excavation in a bed of the river downstream of the dam even in the short time. If the scour depth of these jets reaches to the dam, they would be dangerous for dam stability. Impact of 2 incoming jets before entrancing to flip bucket can dissipate excess energy, so it is essential to understand scouring depth in impact situation of incoming jets. Manson (1989) found that there are several stages in scour hole developing. Also, the rate of scouring process is rapid at its creation beginning. Scoklitsch (1928) probably was the first person who investigated scour hole characteristics. He used five different gradations of uniform sediment and used three situations of mixture sediment in his works. He claimed that the scour rate was fast at the beginning, and its rate has decreased gradually. There are several documents about the air entrance important on scour hole characteristics (Canepa and Hager, 2003, Duarte et al., 2016, Manso et al., 2004, Mason, 1989, Pagliara and Palermo, 2013). Manson (1989) tried to illustrate the effect of air existence on scour hole characteristics. Canepa and Hager (2003) related scour depth to a diameter of a circular inclined falling jet. They claimed that particle Froude Number has a noticeable effect on scour process. Pagliara et al. (2006) found that the maximum scour depth depends on diameter jet and air content in incoming water-air mixture jet. their results show that jet shape has a negligible effect on scour hole while  $D_{90}$  is used as a sediment particles diameter in Particle Froude number.

### Material and methods

For measurement of scour depth in this study, one hollow box for the simulation scours process was constructed. The dimensions of this box are  $1.25 \times 1.25$  (m×m) in the plan area and 0.7 m in high. A movable gate was installed at the back wall of this box to assure control of water elevation in the box as tailwater. Also, a drainage valve in a bed and a riser equipped with two circular outlet pipes with 1 cm inner diameter for each pipe were set up. The water jet angle can be adjusted by this instrument. Circulation of water was done by a little water reservoir and a centrifuge pump. About 40 cm thick layer of uniform sediment was poured on the bottom of this box. The discharge of each outlet pipe is about 0.245 liter per second. The mean diameter of sediment are 1.95 mm and 3.35 mm, and 6.92 mm, respectively. Water depths are 5, 10, 15 cm and slightly bigger than 0 cm. Two separate circular jets were impacted before the entrance to the water body in each run. 36 data sets were measured and the

time duration for each run is 8 hours. Equivalent diameter (i.e.,  $D_{eq} = \sqrt{2D_J^2}$ ) was used instead of actual pipe diameter to determine the velocity of impacted jets. On the basis of Buckingham  $\pi$  analysis, the below non-dimensional parameters were extracted.

$$1) \left( \frac{y_s}{y_t} = f \left( \frac{V}{\sqrt{g(Gs-1)D_{50}}}, \alpha, \frac{S}{y_t}, \frac{D}{y_t}, \frac{D_{50}}{y_t} \right) \right)$$

Where  $D_{50}/y_t$  is relative roughness,  $Fr_{50}$  is particle froude number,  $\alpha$  is the jet angle to a vertical axis,  $D_{eq}/y_t$  is a jet equivalent diameter to tailwater depth ratio, and  $S/y_t$  is high of impact location.

<sup>1</sup> -Assistant Professor, Agriculture Department, Payam Noor University, Tehran, Iran. Arashjael60@yahoo.com

## Result and discussion

$y_s / D_{50}$  was used to express jet angle and particle froude number on maximum scour depth. Fig.1 illustrates that scour depth was increased by increasing jet angle. The maximum scours depth ratio ( $y_s / D_{50}$ ) appeared when the jet angle approached  $60^\circ$ . Fig.2 shows the effect of the froude number on scour depth. It shows that by increasing particle froude number, a non-dimensional scour depth ( $y_s / D_{50}$ ) was increased.

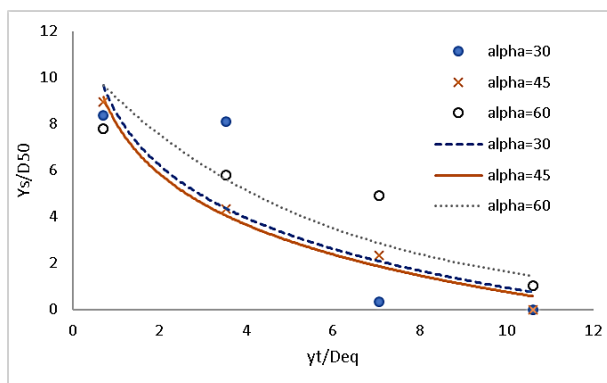


Fig.1. jet angle effect on scour depth ( $D_{90}/D_{jet}=0.63$ )

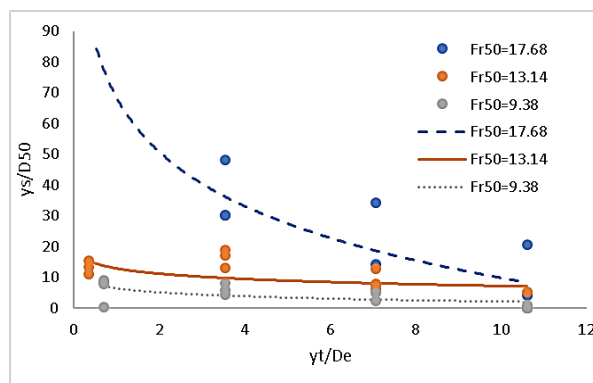


Fig.2. The effect of Particle froude number on scours depth

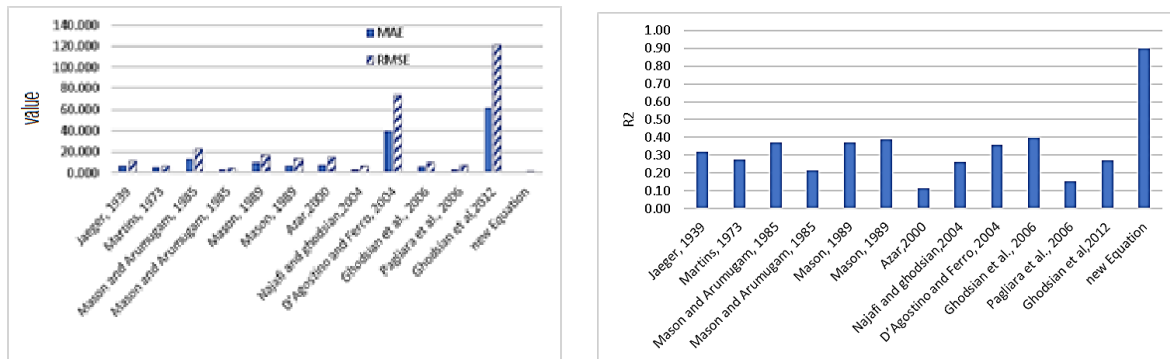
On the basis of experimental results, the below equation (i.e., eq.No.2) was presented for estimation of maximum equivalent scour depth from the impact of 2 separate circular free jets on a flat layer of uniform non-cohesive sediment.

$$\frac{Y_s}{Y_t} = 0.2654 \left( \frac{-4.7108 + 10.0084 \times Fr'_{50}}{1 - 4.5507 Fr'_{50} + 5.1812 Fr'^2_{50}} \right) + 0.7865 \left( \frac{0.5889 - 0.8470 (D_{50} / y_t)}{1 - 2.7478 (D_{50} / y_t) + 1.8838 (D_{50} / y_t)^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{Where: } Fr'_{50} = \frac{V_{jet}}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \times \left( \frac{D_{eq} / y_t + \sin \alpha}{1 + S / y_t + \sin \alpha} \right).$$

In Fig.3, the accuracy of the new equations and other empirical equations was evaluated by standard statistical criteria. Fig.5 shows that the newly presented equation and equations presented by Najafi and Ghodsian (2004) and pagliara et al. (2006) are more accurate than other equations.





a. A Compression of different equations on the base of MAE and RMSE criteria.

b. A compression of different equations on the base of  $R^2$  criterion.

Fig.3. Different equation Comparison to estimate scour depth which results of two impacted jets

## Summary and conclusion

The impact of separate jets is an applicable and effective method to decrease scour depth downstream of hydraulic structures. In the present study, the effect of jets collision on maximum equivalent scour depth was investigated. Jet angles to the vertical axis were  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ . Three different sediment mean diameters i.e., 1.95 mm, 3.53 mm, and 6.92 mm, were used. The range of the Relative tail water depth ( $y_t/Deq$ ) is varied from 0.233 to 10.6, and the range of the particle froude number are varied from 9.38 to 17.68. Among different non-dimensional parameters, Relative roughness is the most effective. Also, Tailwater depth has an important effect on scour depth. An increase in particle froude number causes deeper scour depth. The effect of froude number on scour depth was gradually decreased by increasing sediment size. Equation (2) was presented as a new equation for estimation of scour depth in impact situation of 2 separated circular free inclined jets on a uniform and non-cohesive bed sediment.

## Reference

- CANEPA, S. & HAGER, W. H. 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 358-365.
- DUARTE, R., PINHEIRO, A. & SCHLEISS, A. J. 2016. An enhanced physically based scour model for considering jet air entrainment. *Engineering*, 2, 294-301.
- MANSO, P. A., FIOROTTO, V., BOLLAERT, E. & SCHLEISS, A. J. 2004. Discussion of "Effect of jet air content on plunge pool scour" by Stefano Canepa and Willi H. Hager. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 1128-1130.
- MASON, P. J. 1989. Effects of air entrainment on plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 385-399.
- NAJAFI, J., & GHODSIAN, M. (2004). EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SCOUR WHOLE GEOMETRY DOWNSTREAM OF PIPE CULVERT. *JOURNAL OF FACULTY OF ENGINEERING (UNIVERSITY OF TEHRAN)*, 38(2 (84)), 329-338 (in Persian).
- PAGLIARA, S. & PALERMO, M. 2013. Analysis of scour characteristics in presence of aerated crossing jets. *Australasian Journal of Water Resources*, 16, 163-172.
- PAGLIARA, S., HAGER, W. H. & MINOR, H.-E. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 450-461.
- Schoklitsch, A., 1928. Kolkbildung und Kolkabwehr unterhalb von Stauwerken. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, 23(15), pp.217-222