

## بررسی آزمایشگاهی آبستگي رسوبات غير چسبنده در پايين دست كف بند

حسين حميدى فر\* و محمد حسين اميد\*\*

\* نگارنده مسئول، كرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶۱(۲۲۴۱۱۱۹).

پيام‌نگار: hhamidifar@ut.ac.ir

\*\* به ترتيب دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشيار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۲/۴

### چکیده

پیش‌بینی میزان آبستگي موضعی در پايين دست سازه‌های هیدرولیکی از موضوعات مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است. در این تحقیق اثر اندازه دانه، عمق پایاب، و عدد فرود بر آبستگي موضعی بستر ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریچه کشویی بررسی شده است. در این بررسی، از رسوبات غیر چسبنده با دو دانه‌بندی مختلف در پايين دست یک كف بند افقی استفاده شده است. آزمایش‌ها با اعداد فرود جت ورودی مختلف و دامنه متغیر عمق پایاب، شامل استغراق کم تا استغراق زیاد اجرا شده است. تغییرات حداکثر عمق گودال آبستگي، ارتفاع تلماسه، و گسترش طولی آبستگي بر حسب تغییرات عمق پایاب، اندازه ذره، و عدد فرود ذره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر عمق پایاب به میزان عدد فرود ذره بستگی دارد. همچنین وجود تشابه بین پروفیل‌های آبستگي، که یکی از موضوعات چالش برانگیز در تحقیقات قبلی بوده است، در این تحقیق تایید شد. همچنین پارامترهای مشخصه گودال آبستگي به صورت نمودارهایی بر حسب پارامترهای بدون بعد آورده شده است که می‌توان در طراحی‌ها جهت حفاظت بستر در برابر آبستگي استفاده کرد.

### واژه‌های کلیدی

آبستگي موضعی، اندازه ذره، جت افقی مستغرق، رسوبات غیر چسبنده، عدد فرود ذره، عمق پایاب

### مقدمه

بستر باید در زیر آب انجام شود، بسیار هزینه‌بر است. از طرفی، طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد بستگی به مقدار مجاز آبستگي دارد. بنابراین، پیش‌بینی ابعاد گودال آبستگي اجتناب ناپذیر و بسیار با اهمیت است. فرسایش ناشی از شکل‌های مختلف جت‌ها یکی از موضوعات مهم در بحث آبستگي است. در زمینه اندرکنش جت‌های دیواره‌ای و رسوبات غیر چسبنده بررسی‌هایی فراوان شده است و محققان به بررسی یک یا چند عامل تأثیرگذار در این زمینه پرداخته‌اند. جت با سرعت بالا که از زیر دریچه خارج می‌شود تنش برشی زیادی ایجاد می‌کند که اغلب از تنش برشی بحرانی برای شروع حرکت ذرات بیشتر است. با گذشت زمان، آبستگي مصالح بستر باعث افزایش عمق و در

آبستگي پدیده‌ای طبیعی ناشی از جریان آب روی بسترهای فرسایشی در رودخانه‌ها و کانال‌هاست. آبستگي موضعی نیز بخشی از تغییرات ریخت‌شناسی آبراهه‌هاست که عمدتاً در اثر سازه‌های مختلف رخ می‌دهد که به دست انسان ساخته شده‌اند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فرایند آبستگي در اثر شکست برشی و تراوش جریان در انتهای بستر حفاظت شده می‌تواند به طور فزاینده‌ای منجر به تخریب كف بند شود و به تدریج شرایط را برای شکست سازه اصلی مهیا کند که بستر به خاطر آن حفاظت شده است (Hoffmans & Pilarczyk, 1995). حفاظت بستر در برابر آبستگي، به خصوص در مواردی که عملیات حفاظت

همکاران (Balachandar *et al.*, 2000) به بررسی تأثیر عمق پایاب بر آبشستگی پایین دست دریاچه کشویی بدون کفبند پرداختند و نمودارهایی برای توسعه گودال آبشستگی در زمان‌های مختلف ارائه کردند. کلز و همکاران (Kells *et al.*, 2001) اثر اندازه ذره را بر آبشستگی بستر در زیر یک دریاچه کشویی بدون کفبند بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های این محققان نشان داد که عمق گودال آبشستگی شدیداً وابسته به اندازه ذرات است. درگاهی (Dargahi, 2003) توسعه آبشستگی در پایین دست یک سرریز را مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که هیچ تشابهی بین پروفیل‌های گودال‌های آبشستگی وجود ندارد. اویوماز و همکاران (Uyumaz *et al.*, 2006) با استفاده از منطق فازی به بررسی شرایط تعادلی گودال آبشستگی در پایین دست سازه ترکیبی سرریز و دریاچه پرداختند. دی و سرکار (Dey & Sarkar, 2006) تشابه گودال‌های آبشستگی در شرایط مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی عمق آبشستگی به صورت رابطه‌ای نمایی است. این محققان همچنین مشاهده کردند که در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آبشستگی مستقل از عدد فرود ذره است. آدوس و سیروتینو (Adduce & Sciortino, 2006) به بررسی عددی و آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جت متلاطم افقی پرداختند و با اجرای ۹ آزمایش به وجود تشابه بین پروفیل‌های گودال آبشستگی پی بردند. بی و همکاران (Bey *et al.*, 2007) نقش ساختار جریان را بر گودال آبشستگی دو بعدی بررسی کردند. بررسی‌های این محققان نشان داد که در طول توسعه گودال آبشستگی، ساختارهای مختلفی از جریان ایجاد می‌شود. این محققان همچنین فرایند آبشستگی را به پنج بازه زمانی تقسیم کردند. دی و سرکار (Dey & Sarkar, 2007) نیز به بررسی اثر جریان نشی رو به بالا بر آبشستگی پایین دست کفبند پرداختند.

نتیجه کاهش تنش برشی می‌شود که کاهش میزان آبشستگی را در پی دارد (Kells *et al.*, 2001). این امر به مرور زمان منجر به ایجاد عمق در آبشستگی تعادلی می‌شود. همزمان با تغییرات پروفیل گودال آبشستگی، زاویه برخورد جت با بستر نیز تغییر می‌کند به طوری که در ابتدا جت به صورت افقی است ولی بعد از رسیدن به عمق تعادلی آبشستگی، با زاویه تقریباً ۲۵ درجه نسبت به افق در گودال آبشستگی منتشر می‌شود (Kurniawan *et al.*, 2001).

حصول عمق تعادلی برای آبشستگی امری تقریبی است و هرچند برخی از محققان وجود عمق تعادلی آبشستگی را گزارش کرده‌اند اما برخی شواهد نشان می‌دهد که حتی بعد از گذشت ۹۶ ساعت از شروع آزمایش نیز پروفیل آبشستگی با زمان تغییر می‌کند (Balachandar *et al.*, 2000). این امر یک مشکل جدی در طراحی‌ها به وجود می‌آورد اینکه اگر حداکثر عمق آبشستگی قابل پیش‌بینی نباشد، طراحان سازه‌های هیدرولیکی قادر به ارائه تمهیدات لازم جهت کاهش خسارات ناشی از آبشستگی نیستند. بررسی دقیق این ادعا نیازمند آزمایش‌های بیشتر و دقیق‌تر است.

تاکنون تحقیقات زیادی روی آبشستگی موضعی در پایین دست بسترهای حفاظت شده صورت گرفته است. فرهودی و اسمیت (Farhodi & Smith 1985) به بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی پرداختند و گودال آبشستگی را بر حسب پروفیل‌های بی بعد ارائه کردند. هافمن و پیلارسیک (Hoffmans & Pilarczyk, 1995) تغییرات زمانی آبشستگی موضعی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی را بررسی و توسعه حفره را به چهار مرحله تقسیم‌بندی کردند.

موسوی (Musavi, 2000) به مطالعه پروفیل‌های آبشستگی پایین دست پرش هیدرولیکی پرداخت و به وجود تشابه بین پروفیل‌های بی بعد پی برد. بالاچاندار و

کشویی استفاده شد که در ابتدای فلوم تعبیه شده بود. بازشدگی دریچه در تمام آزمایش‌ها معادل دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد و اعداد فرود مختلف از طریق تغییر دبی حاصل شدند. پرش هیدرولیکی در اثر جت خروجی از زیر دریچه، روی یک کف‌بند به طول یک متر توسعه می‌یابد و نهایتاً وارد بازه‌ای از رسوبات به طول ۱/۶۵ متر و عمق ۰/۲ متر می‌شود. مشخصات رسوبات مورد استفاده که از جنس ماسه کوارتزی بودند در جدول ۱ شرح داده شده و منحنی دانه‌بندی رسوبات نیز در شکل ۱ آورده شده است.

دیواره کانال از شیشه پلاستیکی فشرده در نظر گرفته شد تا امکان مشاهده تغییرات گودال آبشستگی فراهم می‌شود. برای برداشت پروفیل گودال آبشستگی، از یک عمق سنج با دقت ۰/۱ ± میلی‌متر استفاده شد که می‌توانست دارای قابلیت حرکت در سه بعد حرکت کند. عمق پایاب به کمک یک دریچه کشویی واقع در انتهای کانال تنظیم و دبی ورودی نیز از طریق یک سرریز مستطیلی لبه‌تیز واسنجی شده اندازه‌گیری می‌شد که در مخزن ورودی بالادست فلوم قرار دارد. شیب کف کانال با دوربین ترازیب، نزدیک به صفر تنظیم شد. مجموعه آزمایشگاهی به صورت طرحواره در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل  $a_0$  بازشدگی دریچه،  $d_{sm}$  حداکثر عمق آبشستگی،  $h_{sm}$  ارتفاع تلماسه،  $X_0$  فاصله انتهای گودال از لبه کف‌بند،  $L_s$  حداکثر گسترش آبشستگی، و  $T_w$  عمق پایاب است. در ابتدای هر آزمایش بعد از تراز کردن کف، سطح رسوبات با ورقه‌ای نازک از جنس پلاستیک فشرده پوشانده و پس از تنظیم دقیق دبی و عمق پایاب، این پوشش به آرامی برداشته می‌شد. این امر باعث می‌شد که هر آزمایش در شرایط مطلوب و کنترل شده آغاز شود.

ساراتی و همکاران (Sarathi et al., 2008) با بررسی آبشستگی ناشی از نازل مربعی دیواره‌ای و با استفاده از رسوبات با دو دانه‌بندی متفاوت به این نتیجه رسیدند که در مقادیر کم عمق پایاب، در الگوی جریان و در نتیجه در الگوی گودال آبشستگی تقارن مشاهده نمی‌شود. اولیوتو و همکاران (Oliveto et al., 2008) تغییرات زمانی حفره آبشستگی در پایین دست یک آستانه را مطالعه کردند. علی حسینی و همکاران (Alihosseini et al., 2008) تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که پروفیل بی بعد شده طول آبشستگی مستقل از زمان است. مقیم و همکاران (Moghim et al., 2008) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به برآورد حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای پرداختند.

از آنجا که برای پیش‌بینی و کنترل آبشستگی، که دربرگیرنده تمام حالت‌های ممکن باشد تاکنون معیاری کلی ارائه نشده است، روابط تجربی و آزمایشگاهی بسیار کاربردی خواهند بود. در این میان با توجه به دو فازی بودن جریان در پدیده آبشستگی، عوامل متعددی در ساز و کار آن که ذاتاً فرایندی پویاست دخالت دارند؛ که بررسی همه عوامل در کنار هم میسر نخواهد بود. از سوی دیگر، نتایج تحقیقات در این زمینه بعضاً بسیار متفاوت است که این امر لزوم آزمایش‌های بیشتر را برای شناخت بهتر این پدیده نشان می‌دهد (Omid et al., 2009).

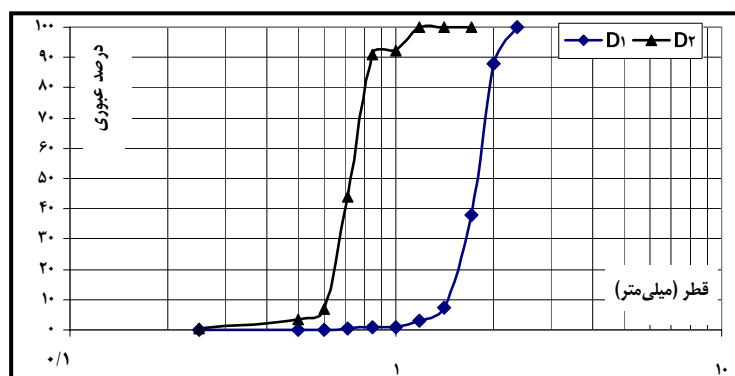
## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و با استفاده از فلومی به طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر اجرا شد. برای ایجاد پرش هیدرولیکی، از یک دریچه

جدول ۱- مشخصات کلی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها

زاویه ایستایی	ضریب یکنواختی	ضریب خمیدگی	انحراف معیار	$d_{50}$ (میلی متر)	
۳۷/۶	۱/۲۵	۱/۰۲	۱/۱۰	۱/۸۵	D <sub>1</sub>
۳۵/۸	۱/۲۱	۰/۹۹	۱/۱۲	۰/۷۲	D <sub>2</sub>

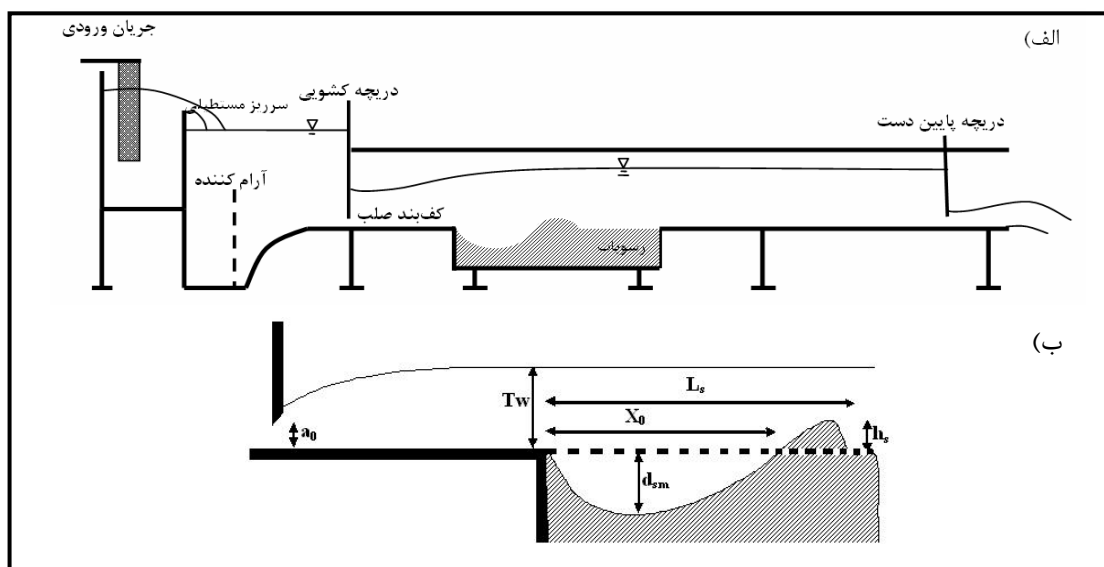
$d_{50}$  = قطر میانه



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد آزمایش

آبشستگی در خط مرکزی کانال با دستگاه عمق‌سنج برداشته و از روی آن مشخصه‌های گودال آبشستگی از قبیل حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تلماسه، و حداکثر گسترش طولی گودال استخراج شد. دامنه تغییرات پارامترهای مختلف در آزمایش‌های نیز در جدول ۲ آورده شده است.

برای بررسی تأثیر عدد فرود ذره،  $F_0$ ، بر فرایند آبشستگی، ۱۱ آزمایش با دو دانه‌بندی مختلف  $D_1$  و  $D_2$  اجرا شد. عدد فرود ذره به صورت  $F_0 = U_0 / \sqrt{gd_{50}(S_s - 1)}$  تعریف می‌شود که در آن  $U_0$  سرعت جت ورودی،  $d_{50}$  قطر میانه و  $S_s$  چگالی نسبی ذرات است. در پایان هر آزمایش، پروفیل طولی گودال



شکل ۲- الف) طرح‌واره‌ای از مجموعه آزمایشگاهی و ب) حفره آبشستگی و پارامترهای مربوط

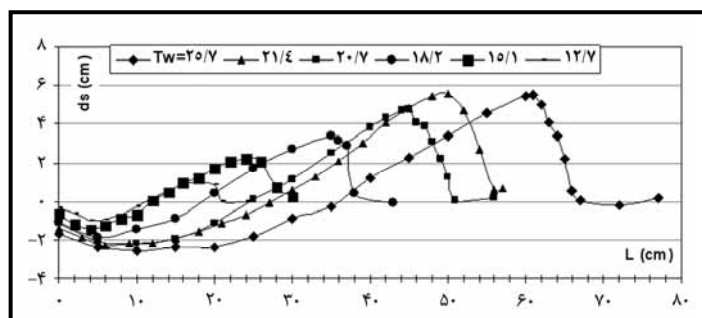
## نتایج و بحث

در امتداد عرضی و طولی گودال آبستنگی مشاهده شد؛ دلیل این غیر یکنواختی‌ها، توسعه جریان‌های ثانویه و نیز سیستم‌های گردابه‌ای در پایین دست پرش هیدرولیکی است. مشخصات کلی آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

### بررسی تأثیر عمق پایاب

یازده آزمایش با عمق‌های متفاوت پایاب برای مطالعه اثر عمق پایاب اجرا شد. نمونه‌ای از پروفیل گودال آبستنگی در عمق‌های مختلف پایاب در شکل ۳ آورده شده است. در این شکل مشخص است که هندسه گودال آبستنگی به شدت تحت تأثیر عمق پایاب قرار دارد. یادآوری می‌شود که نقش عدد فرود ذره در اینجا بسیار مهم است. تغییرات حداکثر عمق آبستنگی در مقابل عمق پایاب به ازای دو عدد فرود ذره  $F_0=13/7$  و  $F_0=8/3$  در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. با توجه به این دو شکل مشخص می‌شود که به ازای  $F_0$  کوچکتر، با افزایش عمق پایاب، حداکثر عمق آبستنگی نیز افزایش می‌یابد؛ اما به ازای  $F_0$  بزرگتر، در ابتدا با افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابد و پس از رسیدن به عمق بحرانی حداقل، روند افزایشی پیدا می‌کند. این روند تغییرات در آزمایش‌های (Ali & Lim 1986) و (Dey & Sarkar 2006) به ازای  $F_0=12/61$  و  $F_0=8/27$  نیز به همین صورت گزارش شده است.

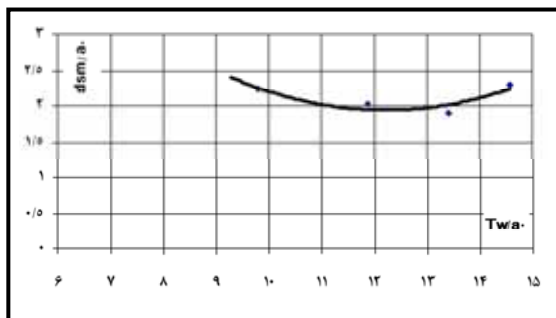
در لحظات اولیه بعد از شروع آزمایش، ذراتی که در نزدیکی کف بند قرار داشتند بلافاصله جابه‌جا می‌شدند، به طوری که بخش زیادی از عمق تعادلی آبستنگی در همان دقایق اولیه حاصل می‌شد. با عمیق‌تر شدن گودال آبستنگی، ارتفاع تلماسه نیز افزایش می‌یافت. ذراتی که به راس تلماسه می‌رسیدند به پایین می‌لغزیدند و باعث گسترش آبستنگی در راستای طولی می‌شدند. در نقاط عمیق‌تر گودال آبستنگی، گردابه‌هایی در نزدیکی بستر مشاهده می‌شدند که دارای قدرت کافی برای جدا کردن ذرات از بستر و معلق شدن آنها در جریان بودند. در آزمایش‌های اجرا شده روی ذرات با اندازه کوچکتر ( $d_{50}=0.72$  میلی‌متر)، این گردابه‌ها شدت بیشتری داشتند. به نظر می‌رسد گردابه‌ها نقش مهمی در انتقال رسوبات و تغییر هندسه بستر داشته باشند. در اثر گردابه‌ها، بخشی از ذرات به سمت عقب حرکت می‌کردند و باعث می‌شدند فرسایش و رسوبگذاری متناوب باشد. بخشی از ذرات که در اثر عمل گردابه‌ها معلق بودند از انتهای بازه رسوبی خارج و در ادامه روی کف کانال ته‌نشین می‌شدند و فرم‌های بستر ناپیوسته را به شکل شکنج (Ripple) در اندازه‌های بسیار کوچک تشکیل می‌دادند. اکثر محققان، اگر چه گودال آبستنگی پایین دست کف‌بند را دو بعدی گزارش کرده‌اند (Bey et al., 2007) اما در این تحقیق غیر یکنواختی‌هایی



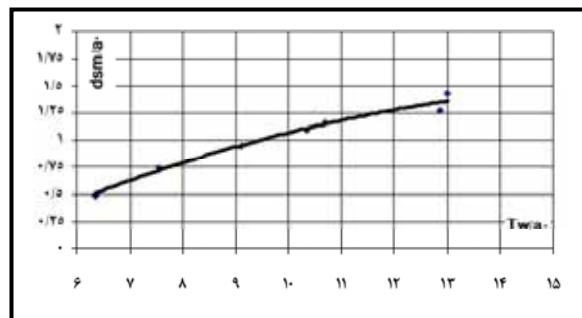
شکل ۳- پروفیل گودال آبستنگی به ازای عمق‌های پایاب مختلف

جدول ۲- محدوده تغییرات داده‌ها در آزمایش‌های مختلف

تعداد آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	فرود جت	مدت آزمایش (دقیقه)	عمق پایاب (سانتی‌متر)	عمق حداکثر (سانتی‌متر)	ارتفاع تلماسه (سانتی‌متر)	حداکثر گسترش آبشستگی (سانتی‌متر)	فرود ذره
۲۲	۸/۸-۲۲/۱	۲/۰-۴/۹۹	۴۵۰-۷۹۰	۲۹/۲-۱۲/۷	۱/۰-۴/۶	۱/۰-۹/۳	۲۱-۱۴۳	۷/۸-۱۷/۲



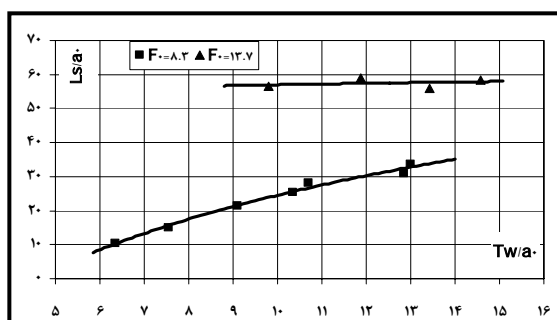
شکل ۵- تغییرات  $d_{sm}/a_0$  بر حسب  $Tw/a_0$  به ازای  $F_0=13/7$



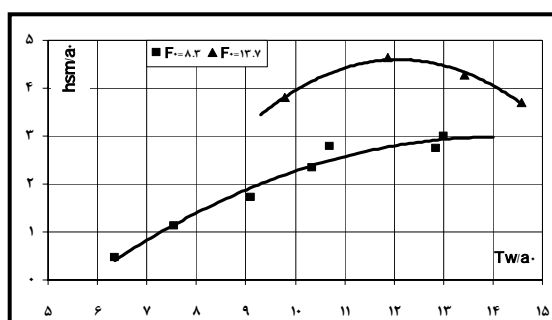
شکل ۶- تغییرات  $d_{sm}/a_0$  بر حسب  $Tw/a_0$  به ازای  $F_0=8/3$

در شکل ۷ گسترش طولی گودال آبشستگی بر حسب تغییرات عمق پایاب به صورت پارامترهای بی بعد نشان داده شده است. واضح است که روند تغییرات به عدد فرود ذره بستگی دارد، به گونه‌ای که به ازای  $F_0=8/3$  با افزایش عمق پایاب، طول گودال به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ برای مثال، با دو برابر شدن مقدار  $Tw$  (افزایش  $Tw/a_0$  از ۶ به ۱۲)، طول گودال آبشستگی بیش از سه برابر می‌شود. اما در  $F_0=13/7$  میزان افزایش طول گودال آبشستگی بسیار ناچیز و تقریباً ثابت است و چندان تحت تاثیر عمق پایاب قرار ندارد. برای مثال، چنانچه عمق پایاب ۵۰ درصد افزایش یابد، (افزایش  $Tw/a_0$  از ۱۰ به ۱۵)، طول گودال آبشستگی فقط حدود ۸ درصد بیشتر می‌شود. این نکته نیز باید ذکر شود که در مقادیر کم عمق پایاب، تقارن کمتری در الگوی آبشستگی مشاهده می‌شود.

همچنین، چگونگی تغییر ارتفاع تلماسه بعد از گودال آبشستگی،  $h_{sm}$  بر حسب تغییرات عمق پایاب در شکل ۶ آورده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در  $F_0=8/3$  با افزایش عمق پایاب، ارتفاع تلماسه نیز افزایش می‌یابد اما در  $F_0=13/7$  با افزایش  $Tw/a_0$  مقدار  $h_{sm}/a_0$  نیز ابتدا افزایش و پس از رسیدن به حداکثر، کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند افزایش عمق جریان و در نتیجه تنش برشی وارد شده به تلماسه بعد از گودال آبشستگی باشد که منجر به شسته شدن آن و کاهش  $h_{sm}$  می‌شود. باید توجه داشت که در شکل‌گیری تلماسه مقداری انرژی جریان برای غلبه بر پستی و بلندی تلماسه صرف می‌شود. بنابراین، با افزایش ارتفاع تلماسه، از انرژی جریان برای جابه‌جا کردن ذرات کاسته و تمایل به رسیدن به وضعیت تعادلی بیشتر می‌شود. این امر در آزمایش‌های (Chiew & Lim 1996) نیز مشاهده شده است.



شکل ۷- تغییرات  $L_s/a_0$  بر حسب  $Tw/a_0$

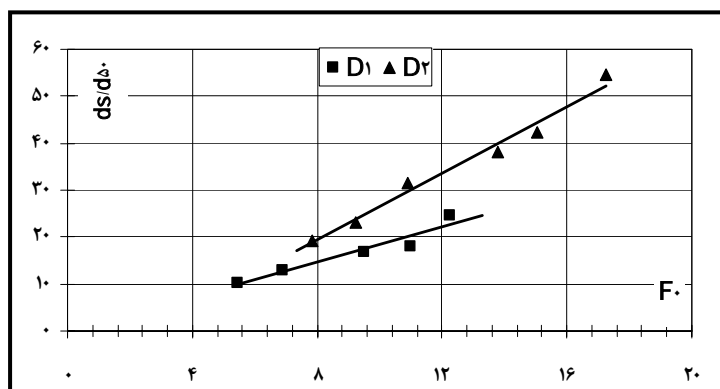


شکل ۶- تغییرات  $h_{sm}/a_0$  بر حسب  $Tw/a_0$

شده است. در این شکل مشخص است در هر دو دانه‌بندی  $D_1$  و  $D_2$ ، روند تغییرات خطی است پیروی می‌کند و با کوچکتر شدن اندازه ذره، میزان تغییرات افزایش می‌یابد. در هر حال به ازای یک  $F_0$  ثابت، هر چه اندازه ذره بزرگتر باشد حداکثر عمق آبشستگی کمتر خواهد بود و این اختلاف با افزایش عدد فرود ذره بیشتر می‌شود.

### بررسی تأثیر اندازه و عدد فرود ذره

برای مطالعه اثر اندازه و عدد فرود ذره بر مشخصات گودال آبشستگی، دو دانه‌بندی  $D_1$  و  $D_2$  در ۱۱ عدد فرود ذره آزمایش شدند. در تمام این آزمایش‌ها برای حذف اثر عمق پایاب، مقدار  $Tw$  برابر  $20 \pm 3\%$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بدون بعد در برابر  $F_0$  برای دو دانه‌بندی  $D_1$  و  $D_2$  در شکل ۸ نشان داده



شکل ۸- تغییرات نسبت  $d_s/d_0$  در مقابل عدد فرود ذره

بیشتر رسوبات ریزدانه برای معلق بودن و حرکت در نزدیکی بستر است (saltation)، که در نتیجه آن، رسوبات می‌توانند تا ارتفاع بیشتری نسبت به بستر بالا آمده و روی تلماسه انباشته و باعث افزایش ارتفاع موج تلماسه‌ای شوند. همین دلیل نیز می‌تواند باعث افزایش گسترش

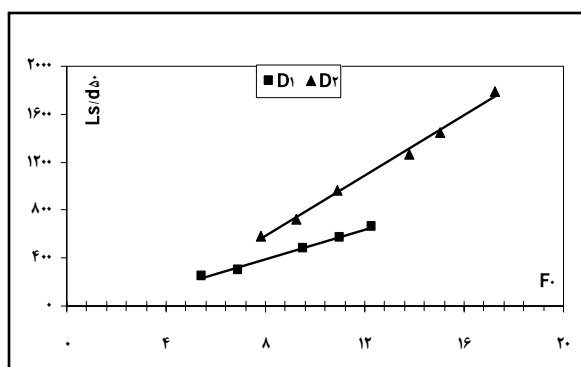
در شکل ۹ تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه بعد از آبشستگی بر حسب  $F_0$  آورده شده است که روندی مشابه شکل ۸ را دنبال می‌کند. مشخص است که به ازای یک  $F_0$  ثابت، هر چه اندازه رسوبات ریزتر باشد ارتفاع تلماسه نیز بیشتر خواهد بود. یک دلیل برای این امر، تمایل

تاج تلماسه متشابه هستند (شکل ۱۱). تشابه بین پروفیل‌های آبشستگی را پیش از این محققانی مانند (Rajaratnam, 1981; Farhodi & Smith, 1985; Ali & Lim, 1986; Dargahi, 2003; Dey & Westrich, 2003; Oliveto *et al.*, 2008) آزمایش‌های خود تشابهی بین پروفیل‌های آبشستگی مشاهده نکرد.

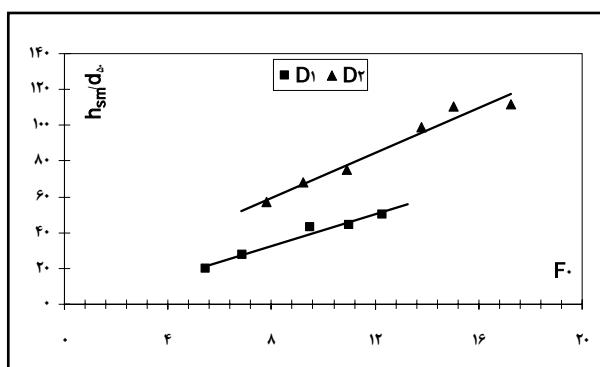
طولی آبشستگی شود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

### بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی

چنانچه حداکثر عمق آبشستگی تعادلی،  $d_{sm}$ ، عامل بی بعد کننده در نظر گرفته شود، شکل پروفیل‌های آبشستگی در آزمایش‌های مختلف با کمی پراکندگی در



شکل ۱۰- تغییرات نسبت  $L_s/d_s$  بر حسب  $F_0$



شکل ۹- تغییرات نسبت  $h_{sm}/d_s$  بر حسب  $F_0$

نسبت به معادله درجه شش و رابطه مثلثاتی که به ترتیب (Musavi, 2000) و (Farhodi & Smith, 1985) ارائه داده‌اند شکلی ساده‌تر دارد.

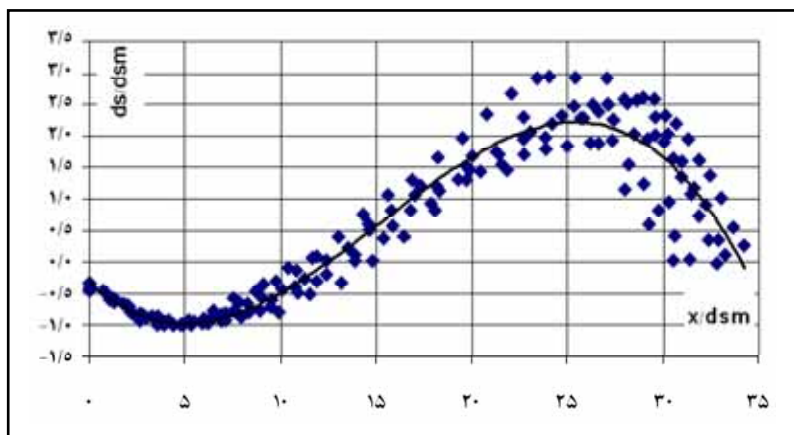
$$\frac{d_s}{d_{sm}} = -0.0008\left(\frac{x}{d_{sm}}\right)^3 + 0.0342\left(\frac{x}{d_{sm}}\right)^2 - 0.2859\left(\frac{x}{d_{sm}}\right) - 0.3086 \quad (1)$$

با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر بر آبشستگی بررسی شده در این تحقیق می‌توان نموداری شبیه به شکل ۱۲ رسم کرد که در برگیرنده تأثیر عمق پایاب، عدد فرود ذره، و اندازه ذره بر حداکثر عمق آبشستگی است. در این نمودار مشخص است که روند تغییرات  $d_{sm}/d_s$  بر حسب  $F_0 Tw/a_0$  به صورت نمایی است.

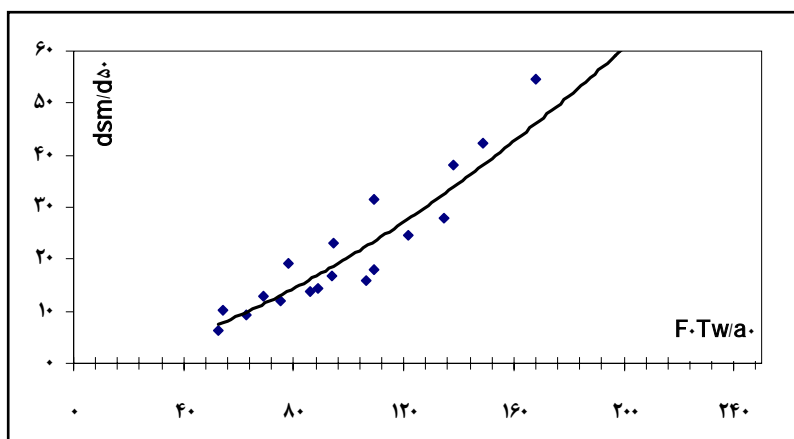
در این تحقیق پارامتر بدون بعد  $X_0/d_{sm}$  که نشان دهنده گسترش طولی انتهای گودال آبشستگی است، برابر ۱۲/۵ به دست آمد. این پارامتر در گزارش‌های (Farhodi & Smith, 1985)، (Oliveto *et al.*, 2008) و (Musavi, 2000) به ترتیب برابر ۷، ۱۰ و ۱۲ آمده است. علت این امر می‌تواند استغراق بیشتر و نیز طولانی‌تر بودن زمان آزمایش و رسیدن به تعادل بر هندسه گودال آبشستگی در تحقیق حاضر باشد؛ به طور مثال، معیاری را که فرهودی و اسمیت (Farhodi & Smith, 1985) ارائه داده است از آزمایش‌هایی به دست آمده که تنها ۶ ساعت طول کشیده است.

پروفیل بی بعد به دست آمده در این تحقیق از معادله درجه سه به صورت رابطه ۱ پیروی می‌کند که





شکل ۱۱- پروفیل بی بعد گودال آبشستگی تحت شرایط مختلف



شکل ۱۲- تغییرات پارامتر  $d_{sm}/d_{s0}$  بر حسب  $F_0Tw/a_0$

طول گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که به ازای یک  $F_0$  ثابت، با بزرگتر شدن اندازه ذره، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. با رسم پروفیل‌های بی بعد گودال آبشستگی، وجود تشابه بین این پروفیل‌ها (که یکی از موضوعات مورد بحث در تحقیقات قبلی بود) تایید و رابطه‌ای برای تعیین پروفیل گودال در شرایط مختلف شد. سرانجام، گسترش طولی گودال آبشستگی بر حسب پارامترهای بی بعد به صورت نمودار رسم شد که می‌توان از آنها در طراحی‌ها به منظور کاهش خسارات ناشی از آبشستگی و در هر سیستم ابعادی استفاده کرد.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی برخی از پارامترهای تأثیرگذار در آبشستگی موضعی پایین‌دست یک کف‌بند پرداخته شد. یک فرایند پیوسته فرسایش و رسوبگذاری در اثر عمل گردابه‌های نشئت گرفته از جریان‌های ثانویه در درون گودال آبشستگی مشاهده شد که این فرایند با گذشت زمان رو به تحلیل می‌رفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، تغییرات پارامترهای گودال آبشستگی بر حسب تغییرات عمق پایاب بررسی و مشخص شد که تأثیر عمق پایاب بر پارامترهای حفره آبشستگی به مقدار عدد فرود ذره بستگی دارد. در هر حال با افزایش عمق پایاب،

## مراجع

- Adduce, C. and Sciortino, G. 2006. Scour due to a horizontal turbulent jet: numerical and experimental investigation. *J. hydra. Res.* 44(5): 663-673.
- Ali, K. H. M. and Lim, S. Y. 1986. Local scour caused by submerged wall jets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 2. Res. Theory.* 69(DEC):1059-1064.
- Alihosseini, P., Ebrahimi, K., Sanei, M. and Mashaal, M. 2008. Experimental investigation of temporal variation of scour profile downstream of submerged hydraulic jumps. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Iranian Conference on Hydraulic.* Nov. 11-13. Sh. Abbaspour University. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Balachandar, R., Kells, J. A. and Thiessen, R. J. 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Can. J. Civ. Eng.* 27, 138-150.
- Bey, A., Faruque M. A. A. and Balachandar, R. 2007. Two-dimensional scour hole problem: role of fluid structure. *J. Hydra. Eng.* 133(4): 414-430.
- Chiew, Y. M. and Lim, S. Y. 1996. Local scour by a deeply submerged horizontal circular jet. *J. Hydra. Eng.* 122(9): 529-532.
- Dargahi, B. 2003. Scour downstream of a spillway. *J. hydra. Res.* 41(4): 417-426.
- Dey, S. and Sarkar A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *J. Hydra. Eng.* 132(3): 246-257.
- Dey, S. and Sarkar A. 2007. Effect of upward seepage on scour and flow downstream of an apron due to submerged jets. *J. Hydra. Eng.* 133(1): 59-69.
- Dey, S. and Westrich, B. 2003. Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *J. Hydra. Eng.* 129(1): 44-53.
- Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *J. Hydra. Res.* 23(4): 343-358.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Pilarczyk, K. W. 1995. Local scour downstream of hydraulic structures. *J. Hydra. Eng.* 121(4): 326-340.
- Kells, J. A., Balachandar, R. and Hagel, K. P. 2001. Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Can. J. Civ. Eng.* 28, 440-451.
- Kurniawan, A., Altinakar, M. S. and Graf, W. H. 2001. Flow pattern of an eroding jet. *Proceedings of XXIX IAHR Congress.* Beijing. China. 537-544.
- Moghim, M. N., Golsangi, M. G. and Ghodsian, M. 2008. Using artificial neural network to predict the maximum depth of scour by wall jets. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering.* Tehran University. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Musavi, I. 2000. Experimental investigation of scour profile downstream of hydraulic jumps. M. Sc. Thesis. Faculty of Engineering. Sharif University of Technology. Tehran. Iran. (in Farsi)

- Oliveto, G., Comuniello, V. and Onorati, B. 2008. Temporal development of local scour downstream of positive-step stilling basins. Proceedings of River Flows. Sep. 3-5. Izmir. Turkey. 1673-1678.
- Omid, M. H., Hamidifar, H. and Reisi, A. 2009. Effect of tailwater depth on local scour downstream of an apron. Proceedings of 8<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering. May 11-13. Shiraz. Iran. In press. (in Farsi)
- Rajaratnam, N. 1981. Erosion by plane turbulent jets. Journal of hydraulic research. 19(4): 339-345
- Sarathi, P., Faruque M. A. A. and Balachandar, R. 2008. Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. J. Hydra. Res. 46(2): 158-175.
- Uyumaz, A., Altunkaynak A. and Ozger, M. 2006. Fuzzy logic model for equilibrium scour downstream of a dam's vertical gate. J. Hydra. Eng. 132(10): 1069-1075.



## **Noncohesive Sediment Scour Downstream of an Apron**

**H. Hamidifar\* and M. H. Omid**

\* Corresponding Author: Msc Student, Tehran University, P. O. Box: 4111, Karaj, Iran. E-mail: [omid@ut.ac.ir](mailto:omid@ut.ac.ir)

The effect of grain size, tailwater depth and grain Froude number on local scour caused by submerged horizontal jets issuing below a sluice gate was investigated. Noncohesive sediments with two gradations downstream of a horizontal apron were used in the experiments. The experiments were carried out at different inflow Froude numbers and a range of tailwater depth from low to high submergence. Variations in the maximum depth of scour, height of dune and longitudinal extension of scour hole were plotted by tailwater depth, grain size and grain densimetric Froude number. Results showed that the effect of tailwater depth depends on the grain densimetric Froude number. Also, the similarity between non-dimensional scour profiles, one of the most controversial problems in previous studies, was proven. Finally, the extension of scour hole was plotted in the form of nondimensional parameters that can be used in any unit system.

**Key words:** Densimetric Froude Number, Grain Size, Local Scour, Submerged Horizontal Jets, Tailwater Depth