

آبشستگی در پایین دست سرریز لبه پهن دو طرف شیب‌دار

ابوذر سیفی¹، علی حسین زاده دلیر² و داود فرسادی زاده³

تاریخ دریافت: 91/10/09 تاریخ پذیرش: 92/01/24

¹- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

²- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Abuzar.seyfi@yahoo.com

چکیده

هر ساله هزینه‌های سنگینی برای کنترل و جلوگیری از تخریب ناشی از آبشستگی در پایین دست سازه‌های آبی صرف می‌شود. از این رو پدیده آبشستگی در سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است و پیش‌بینی آن قبل از ساخت سازه امری ضروری می‌باشد. گسترش این پدیده می‌تواند عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر اندازد. در این تحقیق ابتدا مهمترین عوامل موثر بر فرآیند آبشستگی در پایین دست کف بند سرریز لبه پهن دو طرف شیب‌دار شناسایی و با استفاده از تحلیل ابعادی به صورت گروه‌های بدون بعد استخراج شد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط و نمودارهای بدون بعد برای محاسبه طول‌های مشخصه حفره آبشستگی از قبیل حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن، حداکثر گسترش حفره، ارتفاع تلماسه و فاصله افقی انتهای کف بند تا تاج تلماسه ارائه گردید. با استفاده از روابط ساده ارائه شده، می‌توان شکل گودال را در شرایط مختلف تعیین کرد و برای کاهش خسارات احتمالی، اقدامات لازم را انجام داد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، تحلیل ابعادی، سرریز لبه پهن دو طرف شیب‌دار، حفره آبشستگی

Downstream Scour of Broad-Crested Weir with Sloping Sides

A seyfi^{1*}, A Hosseinzadeh Dalir² and D Farsadizadeh³

Received: 29 December 2012 Accepted: 13 April 2013

¹M.Sc student, Dept. of Water Engin, Univ of Tabriz, Iran

²Prof., Dept. of Water Engin Univ of Tabriz, Iran

³Assoc. Prof., Dept. of Water Engin Univ of Tabriz, Iran

*Correspondent Author Email: abuzar.seyfi@yahoo.com

Abstract

Every year, in order to control the downstream scour of hydraulic structures and prevent destruction of them so many costs are spent. Therefore, scouring in hydraulic structures and its forecasting before building any hydraulic structure are of great importance. Development of this process may be dangerous for the structure stability. In this research the most important factors, which affect the local scour processes at downstream of horizontal apron of a Broad-Crested weir with sides slopes are identified and grouped by dimensional analysis to obtain the dimensionless parameters. The results obtained were used to introduce dimensionless relationships and diagrams in order to determine characteristic length of the scour hole (i.e. maximum scour depth and its position, height of sand bars and its distance from the end of apron, and longitudinal development of scour hole). By using the introduced simple relationship the geometry of the scour hole may be predicted and proper action may be taken to reduce the probable losses.

Keywords: Broad-crested weir with side slopes, Dimensional analysis, Local scour, Scour hole

مقدمه

بالادست می‌تواند برای پرش هیدرولیکی مشکل ساز باشد و پرش به پایین دست منتقل شود و دیگر اینکه افزایش گرادیان هیدرولیکی، که در نهایت افزایش فشار بالابرنده و ایجاد پدیده تراوش را در پی دارد از جمله خطرات آبشستگی به شمار می‌روند. (موسوی جهرمی و ناصریان 1387). جریان در محل وقوع آبشستگی، یک فرایند دو فازی (آب و رسوب) است. بنابراین آبشستگی متأثر از متغیرهای بسیاری از قبیل شرایط جریان، مشخصات

آبشستگی موضعی یکی از موضوعات مهم و قابل توجه در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی می‌باشد. چنانچه در یک بازه مورد بررسی، مقدار رسوب وارد شده کمتر از مقدار رسوب خارج شده باشد، عمل فرسایش کف رودخانه و یا بدنه آن رخ می‌دهد و کف رودخانه به تدریج گود می‌شود. از جمله اثرات منفی گود شدن بستر رودخانه، یکی اینکه، در

آبشستگی در شرایط مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی عمق آبشستگی به صورت رابطه نمایی است. این محققین همچنین مشاهده کردند که در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آبشستگی مستقل از عدد فرود ذره است. آدوس و سیورتنو (2006) به بررسی عددی و آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جت متلاطم افقی پرداختند و با اجرای 9 آزمایش به وجود تشابه بین پروفیل‌های گودال آبشستگی پی بردند. بی و همکاران (2007) نقش ساختار جریان را بر گودال آبشستگی دو بعدی بررسی کردند. بررسی‌های این محققین نشان داد که در طول توسعه گودال آبشستگی، ساختار مختلفی از جریان ایجاد می‌شود. این محققین همچنین فرایند آبشستگی را به پنج بازه زمانی تقسیم کردند. ساراتی و همکاران (2008) به بررسی آبشستگی ناشی از نازل مربعی دیواره‌ای و با استفاده از رسوبات با دو دانه بندی متفاوت به این نتیجه رسیدند که در مقادیر کم عمق پایاب، در الگوی جریان و در نتیجه در الگوی گودال آبشستگی تقارن مشاهده نمی‌شود. علی حسینی و همکاران (1387) تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین‌دست جت افقی مستغرق را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که پروفیل بی‌بعد شده طول آبشستگی مستقل از زمان است. مقیم و همکاران (2008) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به برآورد حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای پرداختند. حمیدی‌فر و همکاران (1389) با بررسی آبشستگی بستر در پایین‌دست دریچه کشویی در آزمایشات مختلف، نشان دادند پروفیل‌ها از تشابه هندسی خاصی پیروی می‌کنند. حمیدی‌فر و امید (1389) براساس نتایج آزمایشگاهی حاصل از آبشستگی رسوبات غیر چسبیده در پایین‌دست کف بند، مشخص شد که تاثیر عمق پایاب بر پارامترهای حفره آبشستگی به مقدار عدد فرود ذره بستگی دارد. از

بستر آبرفتی، زمان و هندسه آبراه می‌باشد. به همین دلیل محققین، هر یک به مطالعه بخشی از این وقایع پرداخته و آن را به صورت آزمایشگاهی و تجربی بررسی کرده‌اند. نکته مهمی که در مورد بستر فرسایش یافته باید اشاره نمود این است که اگر پروفیل‌ها براساس یک پارامتر مناسب بی‌بعد گردند، شکل آنها از نظر هندسی مشابه و مستقل از زمان خواهد بود و همچنین اندازه ذرات بر آن تاثیر گذار نیست (حسن و نارایانان 1985، راجاراتنام 1981). فرهودی و اسمیت (1985) به بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی در پایین‌دست پرش هیدرولیکی پرداختند و گودال آبشستگی را بر حسب پروفیل‌های بی‌بعد ارائه کردند. هافمن و پیلارسیک (1995) تغییرات زمانی آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی را بررسی کردند و توسعه حفره را به چهار مرحله تقسیم بندی کردند. موسوی خندان (1379) به مطالعه پروفیل‌های آبشستگی پایین‌دست پرش هیدرولیکی پرداخت و به وجود تشابه بین پروفیل‌های بی‌بعد پی برد. بالاچاندار و همکاران (2000) به بررسی تاثیر عمق پایاب بر آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی بدون کف بند پرداختند و نمودارهایی برای توسعه گودال آبشستگی در زمان‌های مختلف ارائه کردند. کلز و همکاران (2001) اثر اندازه ذره را بر آبشستگی بستر در زیر یک دریچه کشویی بدون کف بند بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های این محققین نشان داد که عمق گودال آبشستگی شدیداً وابسته به اندازه ذرات است. درگاهی (2003) توسعه آبشستگی در پایین‌دست یک سرریز را مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که هیچ تشابهی بین پروفیل‌های گودال آبشستگی وجود ندارد. اویوماز و همکاران (2006) با استفاده از منطق فازی به بررسی شرایط تعادلی گودال آبشستگی در پایین دست سازه ترکیبی سرریز و دریچه پرداختند. دی و سرکار (2006) تشابه گودال‌های

اندازه‌گیری طول پرش از دو اشل (خط کش) که روی فلوم در جهت طولی نصب شده بود استفاده گردید. عمق رسوبات برابر با 15 سانتی‌متر و طول آن برابر با 150 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از ماسه یکنواخت با اندازه متوسط $d_{50} = 3.5$ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی $1/27$ استفاده شده که منحنی دانه بندی ذرات رسوبی در شکل 3 ارائه شده است. عمق پایاب به وسیله دریچه کشویی که در انتهای مدل آزمایشگاهی تعبیه شده است تنظیم می‌گردید. در پایان مدت آزمایش (12 ساعت)، هم زمان با بستن دریچه انتهائی، جریان قطع و بعد از زهکشی کامل بستر رسوبی، پروفیل بستر توسط عمق سنج با دقت $\pm 0/1$ برداشت شده، و فرایند فوق برای انجام آزمایش بعدی تکرار می‌شد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر ابعاد آبشستگی در سرریز لبه پهن دو طرف شیبدار را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$f(q, Y_1, q_1, q_2, Y_1, L, g, r, r_s, m, d_{50}, T, d_s, L_s, L_o, h_d, L_d) = 0 \quad [1]$$

که در رابطه q دبی جریان در واحد عرض سرریز، Y_1 به ترتیب عمق پایاب و ارتفاع آب روی سرریز، q_1 زاویه شیب بالادست و پایین دست سرریز، L طول تاج سرریز در جهت جریان، g, r, r_s به ترتیب جرم مخصوص ماسه، جرم مخصوص آب و شتاب ثقل، m, d_{50}, T به ترتیب زمان آبشستگی، قطر متوسط ذرات، لزوجت دینامیکی آب و همچنین L_d, h_d, L_o, L_s, h_d حداکثر عمق آبشستگی، محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی، طول حفره آبشستگی، ارتفاع پشته و فاصله نوک پشته تا انتهای کف بند می‌باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق تاثیر دبی و عمق پایاب بر آبشستگی در پایین دست سرریز بررسی می‌شود، عامل

آنجا که برای پیش بینی و کنترل آبشستگی، که در برگیرنده همه حالت‌های ممکن باشد تاکنون معیار کلی کمتری ارائه شده است، غالب روابط تجربی و آزمایشگاهی کاربردی می‌باشند. 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 (امید و همکاران 1388). هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی تاثیر دبی و عمق پایاب بر روی ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی ناشی از ذرات ته نشین شده در پایین دست سرریز لبه پهن دو طرف شیب دار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق، از مدل‌های سرریز لبه پهن دو طرف شیبدار که از جنس پلی اتیلن بوده و عرض همه آنها 25 سانتی‌متر انتخاب گردیده، در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز استفاده شد. طرحواره‌ای از حفره آبشستگی در پایین دست کف بند همراه با پارامترهای مشخصه حفره در شکل 1 و نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل 2 آورده شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم به طول 10 متر، عرض 25 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر از جنس فلز با دیواره‌های شیشه‌ای انجام شد. برای اندازه گیری دبی جریان از سرریز مثلثی واسنجی شده با زاویه رأس 53 درجه استفاده گردید. همچنین این فلوم در پایین دست مجهز به یک دریچه با قابلیت کنترل عمق پایاب بود. طول کف بند صلب 60 سانتی‌متر، طول تاج سرریز 60 سانتی‌متر، ارتفاع سرریز 25 سانتی‌متر، شیب بالا-دست و پایین دست سرریز به ترتیب برابر با 45 و 26 درجه بود. پرش هیدرولیکی که در پایین دست سرریز لبه پهن دو طرف شیبدار ایجاد می‌شد در شرایط استغراق کم تا زیاد مورد آزمایش قرار گرفت و برای

عدد فرود ذره حاصل شد و با ثابت نگه داشتن همه پارامترها به جز دبی جریان و عمق پایاب، دو پارامتر بی‌بعد موثر بر پدیده آبشستگی در انتهای کف بند با طول ثابت به صورت زیر تعیین شدند:

$$\frac{\Psi}{Y_1} = f_3 \left(F_o, \frac{Y_t}{Y_1} \right) \quad [4]$$

F_o عدد فرود ذره می‌باشد و به صورت $F_o = \frac{U_o}{\sqrt{gd_{50}(s_g - 1)}}$ تعریف می‌شود و U_o سرعت آب، g شتاب ثقل، $s_g = \frac{r_s}{r_w}$ چگالی نسبی ذرات.

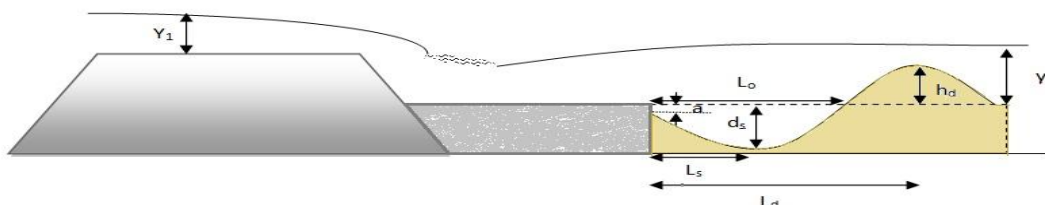
زمان و پارامترهای ثابت حذف می‌شوند و معادله بالا به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$y = f_1(q, Y_t, Y_1, r, r_s, g, m, d_{50}) \quad [2]$$

Y نمایگر ابعاد حفره آبشستگی و پشته پایین دست می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام (p) پارامترهای بی‌بعد موثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز تعیین شدند:

$$\frac{\Psi}{Y_1} = f_2 \left(\frac{q}{\sqrt{gY_1^3}}, \frac{Y_t}{Y_1}, \frac{d_{50}}{Y_1}, \frac{r_s - r_w}{r_w}, \frac{m}{rq} \right) \quad [3]$$

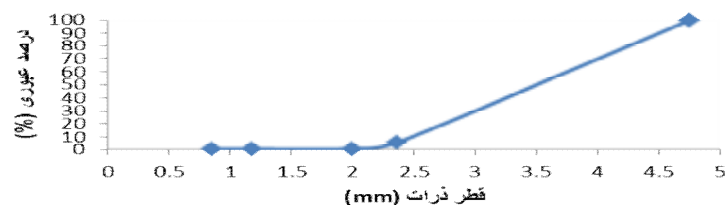
شرایط جریان در همه آزمایشات آشفته می‌باشد بنابراین عدد رینولدز از رابطه فوق حذف می‌شود. با ترکیب عدد فرود روی تاج سرریز، نسبت جرم واحد حجم ماسه به آب و نسبت اندازه ذرات به عمق آب روی تاج سرریز



شکل 1- طرحواره ای از حفره آبشستگی و پارامترهای مشخصه آن.



شکل 2- نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده.

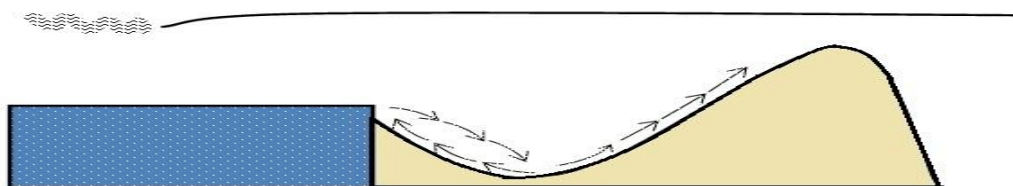


شکل 3- منحنی دانه بندی ذرات رسوبی.

که این تقسیم شدن را می‌توان از نحوه حرکت رسوبات درون حفره مشاهده کرد. به گونه‌ای که مقداری از رسوبات کنده شده، به سمت پایین دست حرکت کرده و از حفره خارج می‌شوند و باقیمانده رسوبات در اثر جریان برگشتی به سمت لبه کف بند جابجا شده و در یک ناحیه با جریان چرخشی قرار می‌گیرند (شکل 4). در انتهای حفره در اثر تجمع رسوبات فرسایش یافته که از حفره خارج شده‌اند، یک تلماسه تشکیل می‌شود. با عمیق‌تر شدن حفره آبشستگی، ارتفاع تلماسه نیز افزایش می‌یابد. ذراتی که به رأس تلماسه می‌رسند به پایین لغزیده و باعث گسترش آبشستگی در راستای طولی می‌شوند.

نتایج و بحث

با برخورد جت سیال به ذرات رسوب، آبشستگی آغاز و با توسعه حفره آبشستگی، فرسایش و رسوبگذاری به طور متناوب انجام می‌شود. در طول فاز فرسایشی، جت سیال که به طور مستقیم به بستر برخورد می‌کند منجر به آبشستگی سریع و قابل توجه مصالح بستر می‌شود. بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی در حد چند ثانیه از فرایند فرسایشی، جت سیال به سمت بالا منحرف و به یک جت سطحی تبدیل می‌گردد و قسمتی از حفره مجدداً پر می‌شود (فاز رسوبگذاری). در لبه انتهایی کف بند، جدا شدگی جریان اتفاق می‌افتد و جت افقی منتشر شده پس از ورود به حفره در عمیق ترین نقطه حفره آبشستگی به دو قسمت تقسیم می‌شود

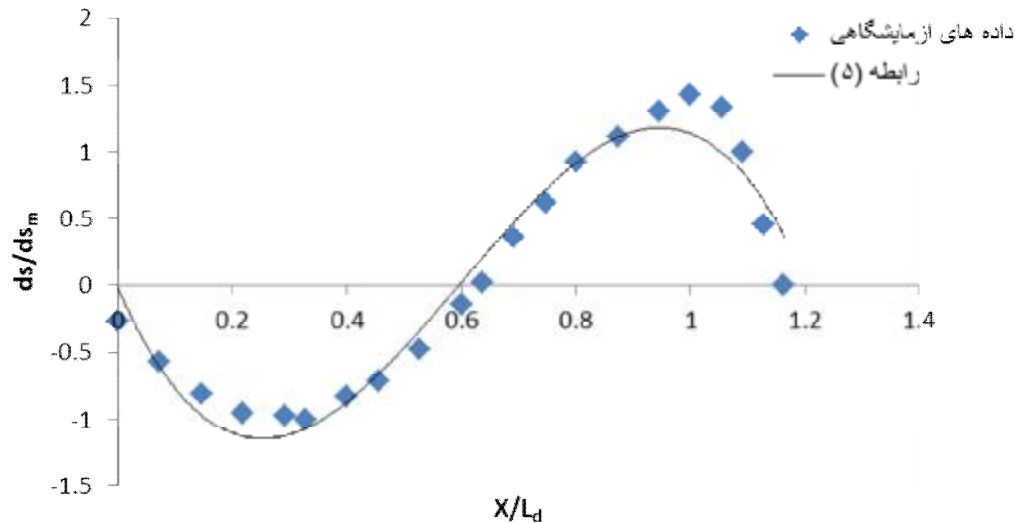


شکل 4- تقسیم شدن جریان درون حفره آبشستگی.

کردن دو پارامتر بدون بعد F_o و $\frac{y_t}{y_1}$ می‌توان پارامتر جدیدی به صورت $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$ تعریف کرد. با توجه به توضیحات ذکر شده، می‌توان روابط و نمودارهایی را برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی براساس پارامترهای

با توجه به مشاهدات و آزمایشات در این تحقیق، مشخص شد که آبشستگی انتهای کف بند صددرصد به پرش هیدرولیکی که بعد از ریزش آب از تاج سرریز اتفاق می‌افتد بستگی دارد و پرش هیدرولیکی به ارتفاع آب روی تاج سرریز و عمق پایاب بستگی دارد. با ضرب

پارامترهای مختلف برای بی بعد کردن پروفیل حفره آبشستگی، در نهایت پارامترهای L_d و d_s به ترتیب برای بی بعد کردن گسترش عمقی و طولی حفره آبشستگی انتخاب شدند که نتایج آن در شکل 5 آورده شده است.



شکل 5- پروفیل بی بعد آبشستگی در رسوبات غیر چسبنده

برگشتی، در هنگام برخورد با دیواره عمودی کف بند، رسوبات را از این ناحیه جدا کرده و منجر به از بین رفتن پوشش خاکی و آشکار شدن دیواره می‌شود که می‌تواند پایداری سازه را با خطر جدی مواجه کند. بنابراین بایستی در هنگام طراحی سازه، مقدار آبشستگی در مجاورت کف بند را پیش بینی کرد. با جایگزینی $x=0$ در رابطه 5، آبشستگی در مجاورت کف بند a که در شکل 1 نشان داده شده است، بدست می‌آید:

$$x=0 \rightarrow ds=a \quad \frac{ds}{ds_m} = \frac{a}{ds_m} = -0.016 \quad [6]$$

بنابراین بعد از حصول شرایط تعادلی، تراز اولیه بستر بلافاصله بعد از کف بند به اندازه $0/016$ برابر حداکثر عمق آبشستگی پایین می‌افتد. براساس یافته‌های این

معرفی شده در بالا ارائه کرد. چنانچه حداکثر عمق آبشستگی (ds_m) به عنوان عامل بی‌بعد کننده در نظر گرفته شود، شکل حفره‌های آبشستگی در آزمایش‌های مختلف با کمی پراکندگی در تاج تلماسه مشابه می‌باشند که در شکل 5 نشان داده شده است. با آزمون

L_d فاصله افقی انتهای کف بند تا تاج تلماسه است. پروفیل بی‌بعد بدست آمده از رگرسیون بین داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر از یک معادله درجه سه که توسط حمیدی‌فر و همکاران (1389) ارائه شده پیروی می‌کند و به صورت زیر است.

$$\frac{ds}{ds_m} = a + b\left(\frac{x}{L_d}\right) + c\left(\frac{x}{L_d}\right)^2 + d\left(\frac{x}{L_d}\right)^3 \quad [5]$$

در این رابطه ds عمق آبشستگی در فاصله x از انتهای کف بند می‌باشد و ثابت a ، b ، c و d به ترتیب برابر $-0/016$ ، $-9/86$ ، $24/86$ و $-13/84$ و ضریب تبیین رابطه (5) برابر با $R^2=0/95$ می‌باشد.

همانطور که پیش از این ذکر شد جریان برگشتی درون حفره، رسوبات را از مقطع با حداکثر عمق آبشستگی به سمت بالادست جابجا می‌کند. این جریان

آبشستگی موضعی هستند، دو پارامتر حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در شکل 7 تغییرات $\frac{ds_m}{y_1}$ در مقابل

پارامتر بدون بعد $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$ ترسیم شده است. همان گونه

که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$

که می‌تواند در اثر زیاد شدن عمق پایاب و یا کاهش عمق آب روی تاج سرریز باشد، حداکثر عمق آبشستگی کاهش یابد.

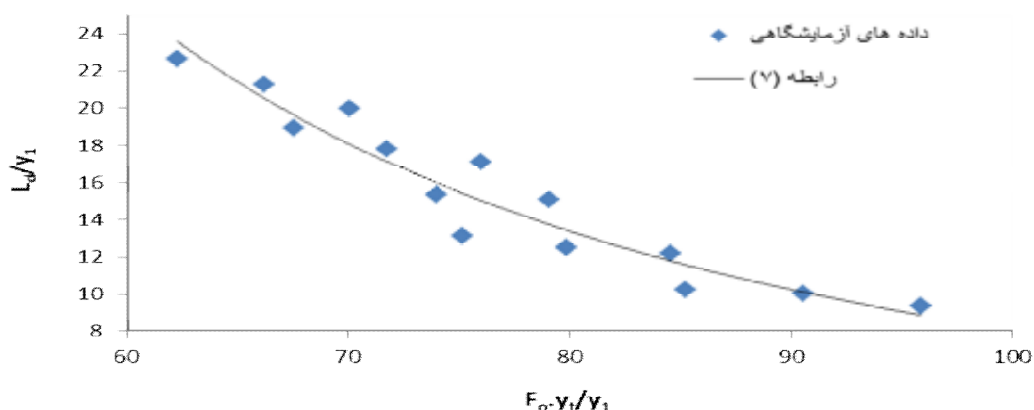
تحقیق، پارامتر L_d را می‌توان از رابطه 7 که از رگرسیون بین پارامترهای بدون بعد حاصل شده است، محاسبه کرد:

$$\frac{L_d}{y_1} = a_1 \left(\frac{F_o \cdot y_t}{y_1} \right)^{b_1} \quad [7]$$

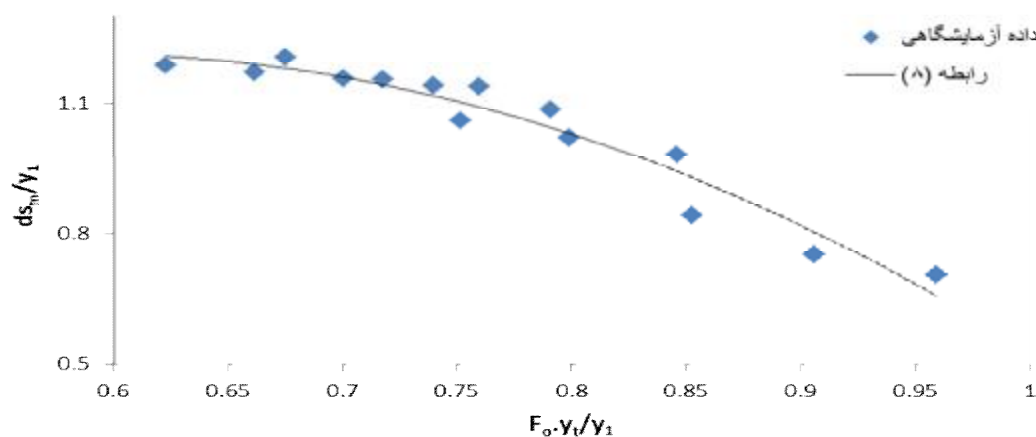
در این رابطه ثابت‌های a_1 و b_1 به ترتیب عبارتند از $271/64$ و $-2/26$ و ضریب تبیین این رابطه $R^2 = 0/91$

می‌باشد. همچنین تغییرات $\frac{L_d}{y_1}$ در مقابل $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$ همراه

با منحنی رابطه 7 در شکل 6 آورده شده است. از دیدگاه طراحی سازه‌های هیدرولیکی که در معرض



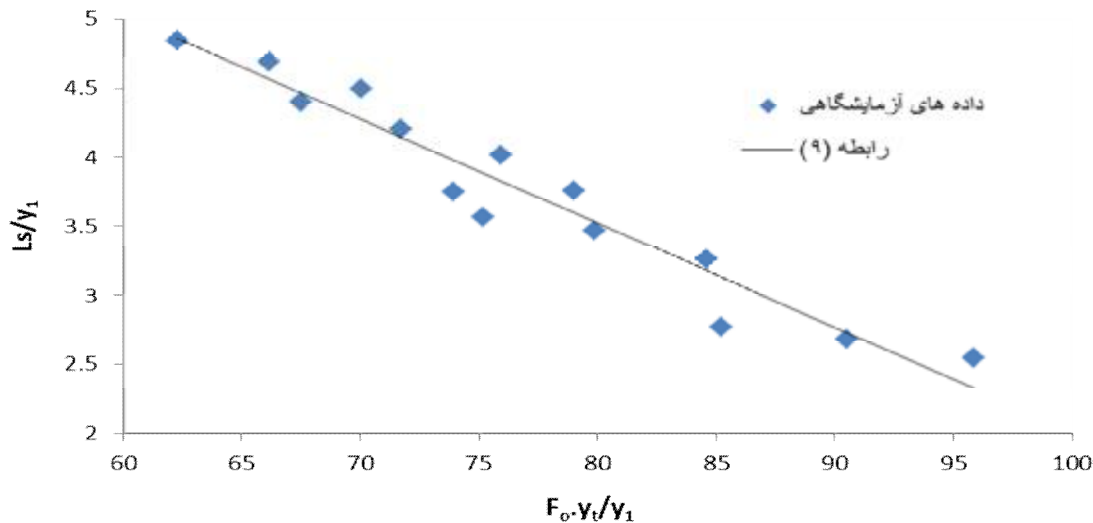
شکل 6- تغییرات $\frac{L_d}{y_1}$ به ازای $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$.



شکل 7- تغییرات $\frac{ds_m}{y_1}$ به ازای $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$.

همچنین با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، رابطه ای خطی به صورت زیر برای محاسبه موقعیت رخداد حداکثر عمق آبشستگی با ضریب تبیین $R^2=0/93$ و مقادیر ثابت a_3 و b_3 به ترتیب برابر است با $-0/075$ و $9/54$ که در شکل 8 همراه با نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است:

$$\left(\frac{L_s}{y_1}\right) = a_3 \left(\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}\right) + b_3 \quad [9]$$



شکل 8- تغییرات $\frac{L_s}{y_1}$ به ازای $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$

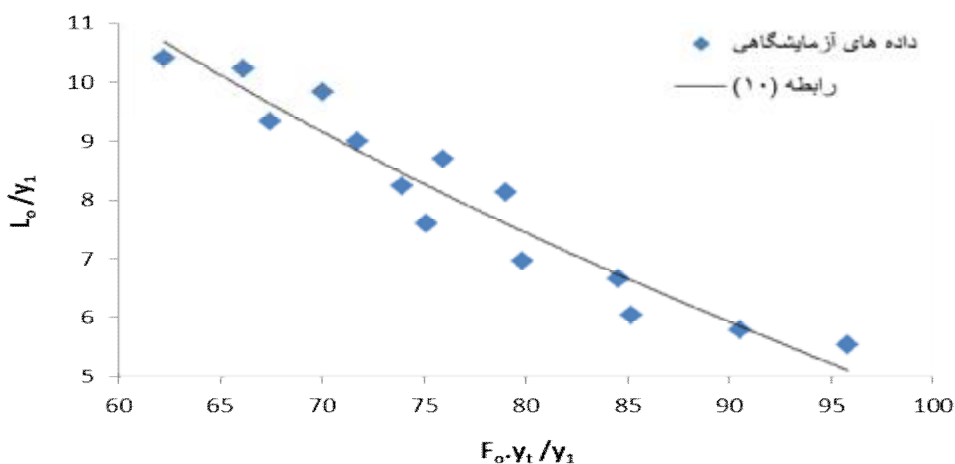
نشان می‌دهد که هر چه عمق پایاب کمتر باشد گسترش طولی حفره آبشستگی زیاد خواهد بود. همچنین معادله لگاریتمی به صورت زیر با ضریب تبیین $R^2=0/92$ بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد:

$$\frac{L_o}{y_1} = a_4 \ln \left(\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}\right) + b_4 \quad [10]$$

همان طور که قبلاً اشاره شد آبشستگی به رخ دادن پرش هیدرولیکی بستگی دارد، اگر پرش هیدرولیکی رخ ندهد هر چه قدر F_o زیاد باشد آبشستگی ایجاد نخواهد شد. به طور کلی می‌توان گفت که عمق پایاب تاثیر به سزایی در آبشستگی پایین دست کف بند دارد. همچنین با استفاده از داده‌های حاصل از تحقیق حاضر، رابطه درجه دو با ضریب تبیین $R^2=0/93$ بدست آمد که منحنی آن در شکل 7 ترسیم شده است در این رابطه ثابت‌های a_2 و b_2 به ترتیب عبارتند از $-0/0004$ و $0/042$.

$$\frac{ds_m}{y_1} = a_2 \left(\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}\right)^2 + b_2 \left(\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}\right) \quad [8]$$

از دیگر پارامترهای آبشستگی، حداکثر گسترش حفره L_o است که نشان دهنده مکانی است که حفره آبشستگی به تراز اولیه بستر برخورد می‌کند. پیش بینی تقریبی این طول مشخصه به طراحان در انتخاب طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد کمک می‌کند. در شکل 9 تغییرات طول بی‌بعد حفره آبشستگی در برابر پارامتر $\frac{F_o \cdot y_t}{y_1}$ در رسوبات غیر چسبنده آورده شده و روند نزولی آن



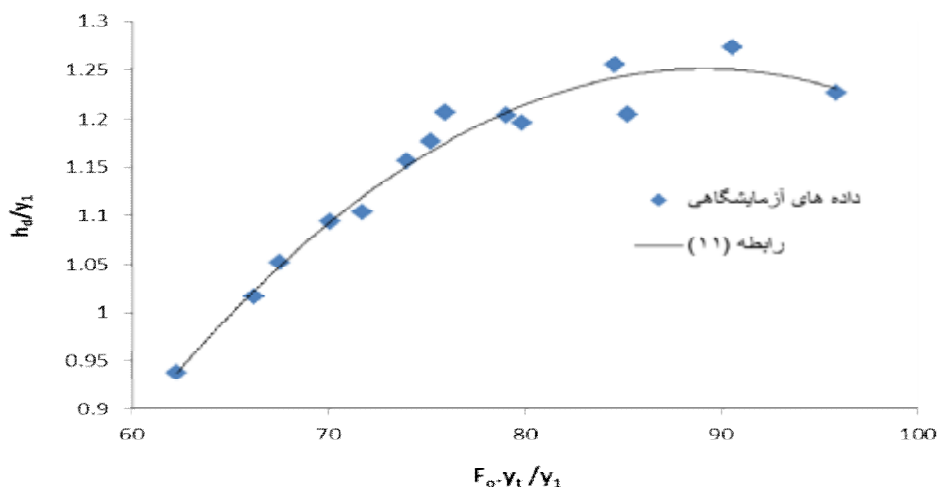
شکل 9- تغییرات $\frac{L_0}{y_1}$ به ازای $\frac{F_0 \cdot y_t}{y_1}$.

در این رابطه ثابت‌های a_4 و b_4 به ترتیب عبارت 12/8- و 63/93 می‌باشند معمولاً در انتهای حفره آبشستگی رسوبات غیر چسپنده، ذرات رسوبی که از حفره خارج شده‌اند بر روی هم انباشته شده و یک تلماسه تشکیل می‌دهند. از آنجا که حضور تلماسه بر چگونگی جریان در حفره آبشستگی و در نتیجه سازو کار آبشستگی تاثیر گذار است، بررسی تغییرات ارتفاع تلماسه نیز در شرایط مختلف ضروری به نظر می‌رسد. در شکل 10 تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه بر حسب پارامتر

ترسیم شده است. همچنین با استفاده از داده‌های بدست آمده، رابطه‌ای به فرم زیر برای تعیین ارتفاع تلماسه بدست آمد که نمودار آن در شکل 10 همراه با داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شده است:

$$\left(\frac{h_d}{y_1}\right) = a_5 \left(\frac{F_0 \cdot y_t}{y_1}\right)^2 + b_5 \left(\frac{F_0 \cdot y_t}{y_1}\right) + c_5 \quad [11]$$

در این رابطه ثابت‌های a_5 ، b_5 و c_5 به ترتیب برابر 0/0004-، 0/077 و 2/2- بوده و ضریب تبیین این رابطه $R^2=0/96$ می‌باشد.



شکل 10- تغییرات $\frac{h_d}{y_1}$ به ازای $\frac{F_0 \cdot y_t}{y_1}$.

نتیجه‌گیری کلی

گسترش طولی مشخصه‌های آبشستگی می‌شود. دیگر اینکه آبشستگی در انتهای کف بند در صورتی رخ می‌دهد که پرش هیدرولیکی رخ دهد، و پرش هیدرولیکی به دبی و عمق پایاب بستگی دارد. با معرفی یک پارامتر بدون بعد به صورت $\frac{F_o \cdot y_i}{y_1}$ که تاثیر پارامترهای مختلف را به صورت مستقیم و غیر مستقیم در بر می‌گیرد، روابط و نمودارهایی برای محاسبه طول‌های مشخصه حفره آبشستگی و تلماسه بعد از حفره ارائه شد که می‌توان در طراحی‌ها برای پیش بینی ابعاد حفره آبشستگی به منظور کاهش خسارات احتمالی از آنها استفاده کرد.

با بررسی مطالعات پیشین و تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد موثر بر پدیده آبشستگی شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آنها طرح ریزی شد. در زیر نتایج تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است. مشاهده شد که در طول توسعه گودال آبشستگی، یک جریان برگشتی درون حفره ایجاد می‌شود که رسوبات را به سمت بالادست جابجا می‌کند. با بررسی پروفیل‌های آبشستگی در آزمایش‌های مختلف، مشخص شد که پروفیل‌ها از تشابه هندسی خاصی پیروی می‌کنند. همچنین مشخص شد که کاهش عمق پایاب باعث

منابع مورد استفاده

- امید م ح، حمیدی فرح و رئیسی ا، 1388. تاثیر عمق پایاب بر آبشستگی موضعی در پایین دست کف بند. هشتمین کنگره مهندسی عمران. اردیبهشت 21-23. دانشگاه شیراز.
- حمیدی فرح، امید م ح و نصرآبادی م، 1389. آبشستگی موضعی بستر در پایین دست دریچه کشویی. نشریه دانش آب و خاک، جلد 24، شماره 4. صفحه‌های 728 تا 736.
- حمیدی فرح و امید م ح، 1389. بررسی آزمایشگاهی آبشستگی رسوبات غیرچسبنده در پایین دست کف بند. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد 11، شماره 2. صفحه‌های 17 تا 28.
- علی حسینی پ، ابراهیمی ک و ماشال م، 1387. بررسی آزمایشگاهی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی مستغرق. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. آبان 21-23. دانشگاه شهید عباسپور. تهران.
- مقیم م، گلسنکی م و قدسیان م، 1387. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی برای جت‌های دیواره‌ای. چهارمین کنگره مهندسی عمران. اردیبهشت 21-23. دانشگاه تهران.
- موسوی جهرمی س ح و هلالات ناصریان ح، 1387. بررسی تغییرات زمانی آبشستگی موضعی در پایین دست جت‌های ریزشی سه بعدی. چهارمین کنگره مهندسی عمران. اردیبهشت 21-23. دانشگاه تهران.
- موسوی خندان ا، 1379. بررسی پروفیل آبشستگی پایین دست پرش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف.
- Adduce C and Sciortino G, 2006. Scour due to a horizontal turbulent jet: numerical and experimental investigation. Journal of Hydraulic Research 44(5):663-673.
- Balachandar R, Kells JA and Thiessen RJ, 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. Can J Civ Eng 27: 138-150.
- Bey A, Faruque MAA and Balachandar R, 2007. Two-dimensional scour hole problem: role of fluid structure. Journal of Hydraulic Engineering 133(4): 414-430.
- Dargahi B, 2003. Scour downstream of a spillway. Journal of Hydraulic Research 41(4): 417-426.

- Dey S and Sarkar A, 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(3): 246-857.
- Farhodi J and Smith K, 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research* 23(4): 343-359.
- Haffmans GJCM and Pilarczyk KW, 1995. Local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(4): 326-340.
- Kells JA, Balachandar R and Hagel KP, 2001. Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Can J Civ Eng* 28: 440- 451.
- Hassan N and Narayanan R, 1985. Local scour downstream of an apron. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(11): 1371-1385.
- Rajaratnam N, 1981. Erosion by plane turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research* 19(4): 339-345.
- Sarathi P, Faruque MAA and Balachandar R, 2008. Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *Journal of Hydraulic Research* 46(2): 158-175.
- Uyumaz A, Altunkaynak A and Ozger M. 2006. Fuzzy logic model for equilibrium scour downstream of a dam's vertical gate. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(10): 1069-1075.