

تأثیر شکل هندسی سرریز لبه‌پهن دوشیبه و طول کف‌بند بر ابعاد حفره آبستگي در پایین دست

ابوذر سیفی*^۱، علی حسین زاده دلیر^۲، داود فرسادی زاده^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۲۶

^۱ کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: abuzar.seyfi@gmail.com

چکیده

پیش‌بینی میزان آبستگي موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از موضوعات مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است. در این مطالعه، اثرات شکل سرریز لبه‌پهن دوشیبه در اعداد فرود مختلف بر روی آبستگي در اعداد فرود ذره متفاوت بررسی شد. ابتدا مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرآیند آبستگي در پایین‌دست کف‌بند شناسایی و با استفاده از تحلیل ابعادی به صورت بدون بعد تنظیم گردیدند. سپس تغییرات ابعاد گودال آبستگي برحسب تغییرات طول تاج سرریز، شیب پایین‌دست سرریز و طول کف‌بند به‌ازای عدد فرود ذره متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از وابستگی آبستگي متأثر از تغییرات طول تاج سرریز و زاویه شیب پایین‌دست به عدد فرود ذره هست. درحالی‌که تأثیر تغییرات طول کف‌بند بر آبستگي وابستگی کمتری را به عدد فرود ذره نشان می‌داد. همچنین وجود تشابه بین پروفیل‌های آبستگي مختلف تأیید شد و پارامترهای گودال آبستگي به صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد آورده شده است که می‌توان در طراحی‌ها جهت حفاظت بستر در برابر آبستگي استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبستگي موضعی، تحلیل ابعادی، سرریز لبه‌پهن، عدد فرود ذره، گودال آبستگي

Effects of the Shape of Broad-Crested Weir with Side Slopes and the Length of Horizontal Apron on Downstream Scour Hole Size

A Seyfi^{*1}, A Hosseinzadeh Dalir², D Farsadizadeh³

Received: 5 October 2013 Accepted: 17 September 2014

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

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

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

*Corresponding Author, E-mail: abuzar.seyfi@gmail.com

Abstract

Prediction of local scouring at downstream of hydraulic structures is one of the subjects which has been paid attention by researchers in recent years. In this study, the effects of shape of broad-crested weir with side slopes at different Froude numbers on local scouring were investigated at different particle Froude numbers. Firstly, the main factors affecting the process of downstream scouring were detected and adjusted as dimensionless parameters using dimensional analysis. Then variation of the sizes of scour hole dimensions were investigated by changing the lengths of weir crest and the horizontal apron, downstream slope of the weir at different particle Froude numbers. The results showed that the effects of weir crest length and the angle of downstream slope on scour hole depended on particle Froude number, while the scouring was less affected by particle Froude number with changes of the length of horizontal apron. Meanwhile, it was confirmed that there was a similarity between the various profiles of the scour. The parameters of the scour hole were presented as the dimensionless graphs that could be used in structure design to protect the bed against scouring.

Keywords: Broad-Crested weir, Dimensional analysis, Local scour, Particle Froude number, Scour hole

مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است. سازه‌های هیدرولیکی به صورت مانعی در برابر جریان قرار گرفته و الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر می‌دهند. در اثر تغییر الگوی جریان، آبشستگی موضعی در اطراف سازه به وجود

مقدمه

بحث آبشستگی هرچند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخ‌گوی تمامی شرایط باشد، همچنان

تا حد زیادی وابسته به اندازه ذرات است. درگاهی (۲۰۰۳) توسعه آبشستگی در پایین دست یک سرریز را مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که هیچ تشابهی بین پروفیل‌های گودال آبشستگی وجود ندارد. دی و سرکار (۲۰۰۶) تشابه گودال‌های آبشستگی در شرایط مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی عمق آبشستگی به صورت رابطه 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 (۲۰۰۶) 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 (۲۰۰۷) نقش ساختار جریان را بر گودال آبشستگی دوبعدی بررسی کردند. بررسی‌های این محققان نشان داد که در طول توسعه گودال آبشستگی، ساختار مختلفی از جریان ایجاد می‌شود. این محققان همچنین فرآیند آبشستگی را به پنج بازه زمانی تقسیم کردند. ساراتی و همکاران (۲۰۰۸) به 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. علی حسینی و همکاران (۱۳۸۷) تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که پروفیل بی‌بعد شده طول آبشستگی مستقل از زمان است. مقیم و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به برآورد بیشینه عمق آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای پرداختند. سیفی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تغییرات زمانی آبشستگی در پایین دست سرریز

می‌آید. روشی که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی هست. لازم به ذکر است علی‌رغم این‌که تاکنون مطالعات وسیعی جهت برآورد آبشستگی موضعی اطراف سازه‌های هیدرولیکی مختلف انجام شده، اما هنوز رابطه‌ای عمومی و جامع برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی اطراف هیچ‌کدام از سازه‌های هیدرولیکی ارائه نشده است. بدیهی است استفاده از یک روش بدون توجه به شرایط حاکم بر آن روش، مناسب نیست. معمولاً توصیه می‌شود محاسبه عمق آبشستگی با روش‌های مختلف انجام شود و در نهایت بر اساس قضاوت مهندسی، مقدار آبشستگی موضعی تعیین شود. در بسیاری از موارد نیز می‌توان از مدل‌های فیزیکی برای تخمین عمق آبشستگی کمک گرفت (بی‌نام ۱۳۹۰). فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) به بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی پرداختند و گودال آبشستگی را برحسب پروفیل‌های بی‌بعد ارائه کردند. هافمن و پیلارسیک (۱۹۹۵) تغییرات زمانی آبشستگی موضعی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی را بررسی کردند و توسعه حفره را به چهار مرحله تقسیم‌بندی کردند. موسوی خندان (۱۳۷۹) به مطالعه پروفیل‌های آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی پرداخت و به وجود تشابه بین پروفیل‌های بی‌بعد پی برد. بالاچاندار و همکاران (۲۰۰۰) 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 (۲۰۰۱) 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

۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از جنس فلز با دیواره شیشه‌ای انجام شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مثلثی واسنجی شده با زاویه رأس ۵۳ درجه استفاده گردید. همچنین این فلوم در پایین دست مجهز به یک دریچه با قابلیت کنترل عمق پایاب بود. در این تحقیق به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی و همچنین برای جلوگیری از زیاد شدن تعداد آزمایش‌ها ارتفاع سرریز و شیب بالادست ثابت و به ترتیب به اندازه‌های ۲۵ سانتی‌متر و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. با توجه به آزمایش‌های مددی و همکاران (۱۳۹۱) تغییر شیب بالادست از حالت قائم به ۴۰ تا ۴۵ درجه باعث کاهش ۷۸ درصدی ارتفاع موجک روی سرریز و همچنین انتقال موقعیت تشکیل موجک به پایین دست می‌شد. تشکیل موجک تأثیر به‌سزایی در پروفیل گودال آبشستگی داشت. در این تحقیق ۴۸ مدل از سرریز لبه‌پهن دوشیبه وجود داشت و پارامترهای متغیر سرریز لبه‌پهن دوشیبه در این تحقیق طول کف بند، طول تاج سرریز و شیب پایین دست سرریز بودند که این تغییرات به‌ازای عدد فرود ذره متفاوت و عمق پایاب ثابت ۱۷ سانتی‌متری، و در تمام آزمایش‌ها پرش به‌صورت مستغرق انجام شد. تغییرات حفره آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های قبلی انجام شده (پناهی ۱۳۸۹) عمق رسوبات برابر با ۱۵ سانتی‌متر و طول آن برابر با ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از ماسه یکنواخت به‌اندازه متوسط ذرات $d_{50} = 3.4$ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی ۱/۱۵ استفاده شده است. زمان لازم برای آزمایش‌های آبشستگی به‌روش تجربی تعیین شد. بدین منظور یک آزمایش آبشستگی با دبی و عمق پایاب مشخص در مدت ۲۰ ساعت انجام شد. در پایان مدت آزمایش ۲۰ ساعته با اینکه هنوز

لبه‌پهن دوشیبه پرداختند. نتایج نشان داد تغییرات زمان بر روی ابعاد آبشستگی مؤثر است و بیشترین مقدار آبشستگی در لحظات اولیه اتفاق می‌افتد. از آنجاکه 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. از سوی دیگر، نتایج تحقیقات در این زمینه در پاره‌ای از اوقات بسیار متفاوت است که این امر لزوم آزمایش‌های بیشتر را برای شناخت بهتر این پدیده نشان می‌دهد (امید و همکاران ۱۳۸۸). در این مقاله به بررسی تأثیر شکل هندسی سرریز لبه‌پهن دوشیبه و طول کف‌بند بر ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست کف بند در حالت مستغرق پرداخته شده است. این سرریز در تمام شبکه‌های آبیاری استفاده می‌شود و جایگزین خوبی برای سرریز لبه‌پهن مستطیلی استاندارد هست (مددی ۱۳۹۰). همچنین این سرریز برای تنظیم دبی، کنترل سطح آب و در مقیاس بزرگ به‌عنوان یک بند انحرافی عمل می‌کند و از مزایای آن استحکام و ضریب دبی بالا هست و به‌خاطر شیب دار بودن شیب بالادست، باعث می‌شود که حجم مرده کمتری از رسوبات پشت آن جمع شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز روی مدل‌های سرریز لبه‌پهن دوشیبه از جنس پلی‌اتیلن و عرض مدل ۲۵ سانتی‌متر انجام پذیرفت. شکل شماتیک سرریز لبه‌پهن دوشیبه با کف‌بند و ابعاد حفره آبشستگی همراه با پارامترهای متغیر شکل سرریز و پارامترهای مشخصه حفره در شکل ۱ و نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم به‌طول

سرریز بر آبشستگی در پایین دست سرریز هست، عامل زمان و عمق پایاب به دلیل ثابت بودن در تمام آزمایش‌ها حذف می‌شوند و معادله ۱ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\varphi = f_1(q, H, \theta, L_A, L_B, g, \rho, \rho_s, \mu, d_{50}) \quad [2]$$

φ نمایانگر ابعاد حفره آبشستگی هست. با استفاده از نظریه π باکینگهام پارامترهای بی بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی را تعیین و با ترکیب بعضی از آن‌ها در نهایت رابطه ۲ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\varphi}{H} = f_2\left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \frac{\mu}{\rho q}, \frac{L_B}{H}, \frac{L_A}{H}, \theta, \frac{d_{50}}{H}\right) \quad [3]$$

شرایط جریان در تمام آزمایش‌ها آشفته هست

بنابراین عدد رینولدز $\left(\frac{\mu}{\rho q}\right)$ از رابطه فوق حذف می‌شود. با ترکیب کردن عدد فرود روی تاج سرریز، نسبت جرم واحد حجم ماسه به آب و نسبت اندازه ذرات به عمق روی تاج سرریز، عدد فرود ذره حاصل شد و رابطه فوق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\varphi}{H} = f_3\left(F_o, \frac{L_B}{H}, \frac{L_A}{H}, \theta\right) \quad [4]$$

F_o عدد فرود ذره بوده و به صورت $F_o = \frac{U_o}{\sqrt{gd_{50}(S_g - 1)}}$ تعریف می‌شود. U_o سرعت آب روی تاج سرریز و S_g چگالی نسبی ذرات هست.

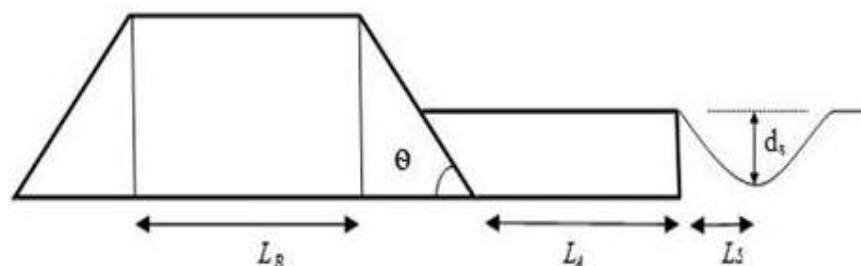
آبشستگی به تعادل کامل نرسیده بود، تقریب بیش از ۹۵ درصد آبشستگی در ۱۲ ساعت اولیه اتفاق می‌افتاد و به همین دلیل تمام آزمایش‌ها در ۱۲ ساعت انجام شد. هم‌زمان با بستن دریچه انتهایی، جریان قطع می‌شد. با این روش جابه‌جا شدن ذرات و تغییر پروفیل بستر در اثر کاهش عمق پایاب کمتر خواهد بود. بعد از قطع کامل جریان می‌توان دریچه را به مقدار اندکی باز کرد و پایاب را به آرامی تخلیه نمود، و بعد از زهکشی کامل بستر رسوبی، پروفیل بستر توسط عمق سنج با دقت ± 0.1 میلی‌متر که روی عرض فوقانی فلوم نصب شده بود و قابلیت حرکت در جهت قائم و طولی داشت برداشت شده، و فرآیند فوق برای انجام آزمایش‌های بعدی تکرار می‌شد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره آبشستگی در سرریز لبه پهن دوشیبه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$f(q, Y_t, H, \theta, L_A, L_B, g, \rho, \rho_s, \mu, d_{50}, T, d_s, L_s) \quad [1]$$

که در این رابطه q دبی جریان در واحد عرض، Y_t و H به ترتیب عمق پایاب و ارتفاع آب روی سرریز، θ ، L_A و L_B به ترتیب زاویه شیب پایین دست، طول کف بند، طول تاج سرریز و ρ ، ρ_s ، d_{50} ، μ ، g به ترتیب جرم مخصوص آب، لزجت دینامیکی، قطر متوسط ذرات، جرم مخصوص ماسه و شتاب ثقل و همچنین T ، d_s و L_s به ترتیب زمان آبشستگی، بیشینه عمق آبشستگی و محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی هستند. با توجه به این‌که هدف در این تحقیق تأثیر شکل هندسی



شکل ۱- شکل شماتیک سرریز و حفره آبستنگی.



شکل ۲- نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده.

نتایج و بحث

باعث گسترش آبستنگی در راستای طولی می‌شدند. در نقاط عمیق 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. به‌نظر می‌رسد گردابه‌های حاصل از پرش هیدرولیکی نقش بسیار مهمی در انتقال رسوبات و تغییر هندسه بستر داشته باشند. مشخصات کلی آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

در ۳۰ دقیقه اولیه آزمایش بعد از تنظیم دبی و عمق پایاب، پرش هیدرولیکی روی شیب پایین- دست اتفاق افتاده و باعث ایجاد گردابه‌هایی شد. این گردابه‌ها باعث می‌شد ذراتی که در نزدیکی کف‌بند قرار داشتند بلافاصله جابه‌جا شوند، به‌طوری‌که بخش زیادی از عمق تعادلی آبستنگی در همان دقایق اولیه حاصل شد. با عمیق‌تر شدن گودال آبستنگی، ارتفاع تلماسه نیز افزایش یافت. ذراتی که به رأس تلماسه می‌رسیدند به پایین می‌لغزیدند و

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترها و داده‌ها در آزمایش‌های مختلف.

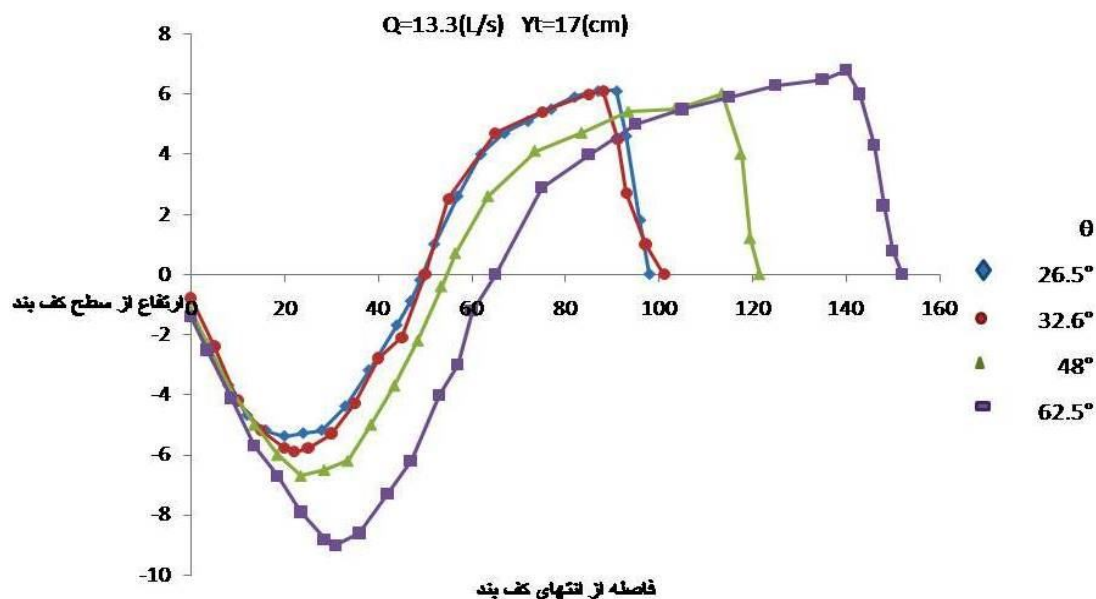
محل وقوع	بیشینه عمق آبستنگی	طول کف‌بند (cm)	طول تاج سرریز (cm)	شیب پایین‌دست θ (deg)	فرود ذره F_o	دبی $(L S^{-1})$	تعداد آزمایش
عمق آبستنگی (cm)	(cm)						

۴ تا ۴۰	۱ تا ۱۰/۷	۴۵ تا ۹۶	۵۰ تا ۶۸	۲۶/۵ تا ۶۲/۵	۱/۸ تا ۱/۱	۹/۶ تا ۱۵	۴۴
---------	-----------	----------	----------	--------------	------------	-----------	----

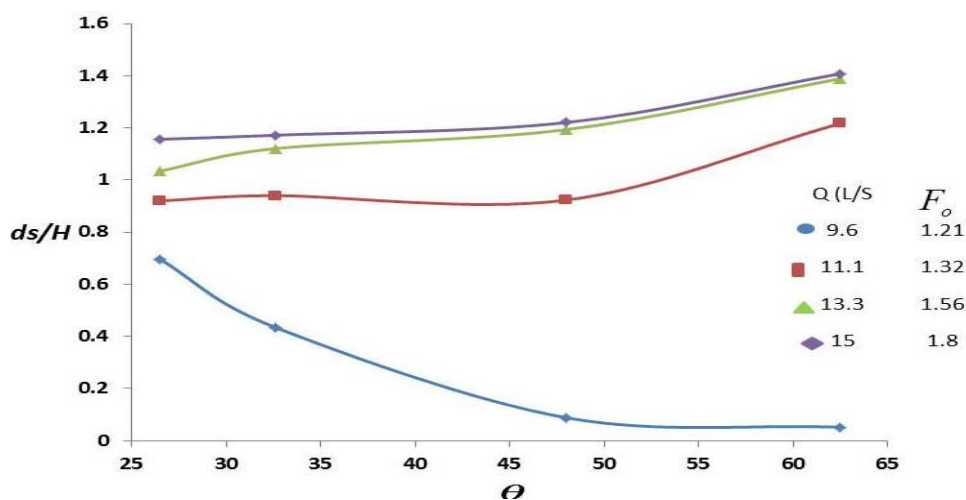
تأثیر شیب پایین دست سرریز

۱۶ آزمایش با شیب‌های متفاوت برای مطالعه اثر شیب پایین دست سرریز لبه پهن دوشیبه اجرا شد، نمونه‌ای از پروفیل گودال آبشستگی در شیب‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که هندسه گودال آبشستگی به شدت تحت تأثیر شیب پایین دست (θ) قرار دارد. تغییرات بیشینه عمق آبشستگی به صورت بدون بعد در مقابل شیب پایین دست (θ) به ازای عدد فرود ذره مختلف در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که به ازای عدد فرود ذره بزرگتر از ۱/۲۱، با افزایش شیب پایین دست، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد (به دلیل وقوع پرش قوی)، ولی به ازای عدد فرود ذره کوچکتر از ۱/۲۱ با

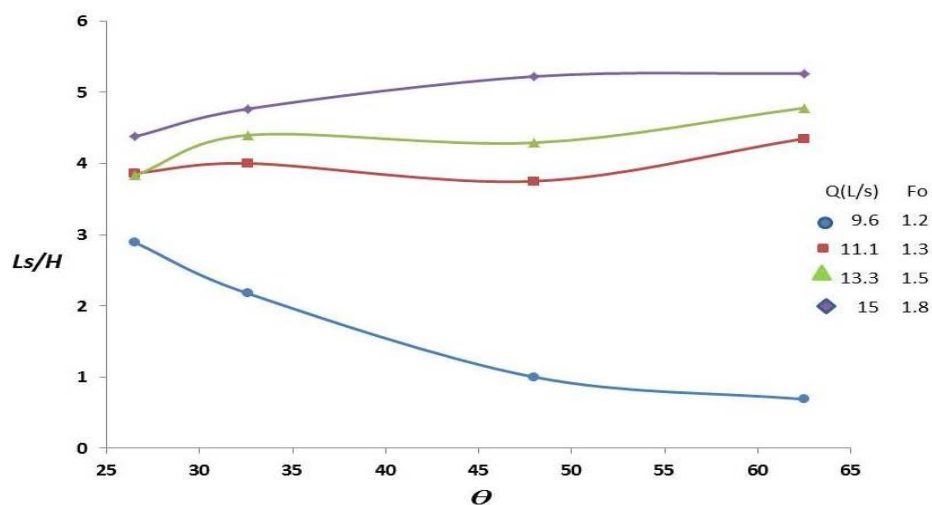
افزایش شیب پایین دست پرش هیدرولیکی ضعیف و یا اتفاق نمی‌افتد و متعاقب آن گردابه‌ای ایجاد نمی‌شود. همان‌طور که در بالا اشاره شد آبشستگی به شدت تحت تأثیر گردابه‌های حاصل از پرش هیدرولیکی هست و این امر باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی شده است. همچنین چگونگی تغییر محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی (L_s) بر حسب تغییرات شیب پایین دست (θ) به صورت بدون بعد در شکل ۵ آورده شده است. در این شکل مانند شکل ۴ مشاهده می‌شود که در عدد فرود ذره کوچکتر با افزایش (θ) محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، اما در اعداد فرود ذره بزرگتر با افزایش θ ، L_s افزایش می‌یابد.



شکل ۳- پروفیل گودال آبشستگی به ازای شیب‌های پایاب.



شکل ۴- تغییرات ds/H برحسب θ به‌ازای F_o های متفاوت.



شکل ۵- تغییرات L_s/H برحسب θ به‌ازای F_o های متفاوت.

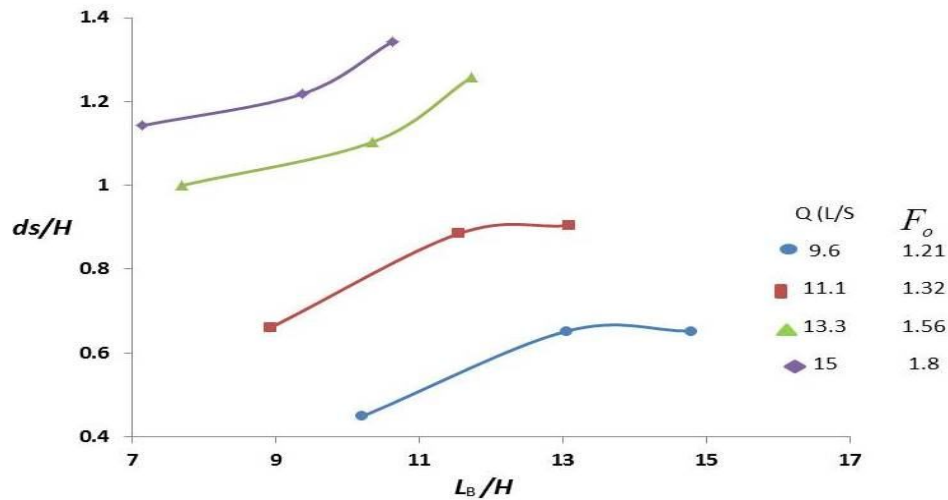
بررسی تأثیر طول تاج سرریز

برای مطالعه اثر طول تاج سرریز لبه‌پهن دو شبیه بر مشخصات گودال آبشستگی، ۱۲ آزمایش اجرا شد. تغییرات بیشینه عمق آبشستگی به‌صورت بدون بعد در مقابل افزایش طول تاج سرریز در شکل ۶ نشان داده‌شده است. نتایج نشان داد که عمق آبشستگی با افزایش طول تاج سرریز به‌ازای

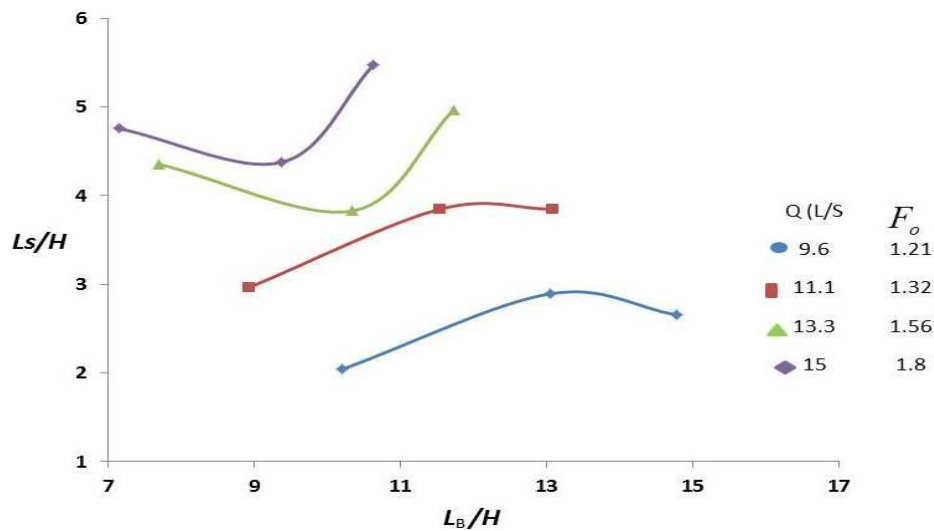
اعداد فرود نره کوچک، روند افزایشی-کاهشی از خود نشان می‌دهد. به‌دلیل تشکیل جریان موجکی بر روی سرریز که در دبی‌های کم در محدوده خاصی از طول تاج سرریز اتفاق می‌افتاد، باعث تغییر در پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز می‌شد و متعاقب آن باعث تأثیر بر روی پروفیل گودال آبشستگی می‌شد. درحالی‌که در دبی‌های زیاد

همچنین چگونگی تغییرات محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی با توجه به تغییرات طول تاج سرریز به صورت بدون بعد در شکل ۷ نشان داده شده است. روند تغییرات به ازای دبی‌های متفاوت مانند تغییرات بیشینه عمق آبشستگی هست که در شکل ۸ نشان داده شده است.

جریان موجکی به صورت خیلی ضعیف تشکیل می‌شد و این باعث تأثیر کمتر جریان موجکی بر روی پروفیل گودال آبشستگی می‌شد. جریان موجکی در سرریزهای لبه پهن، پدیده‌ای است که تحت شرایط هیدرولیکی خاصی رخ می‌دهد (مددی و همکاران ۱۳۹۱). این نکته می‌تواند در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد. تغییرات گودال آبشستگی به شدت تحت تأثیر شکل پروفیل سطح آب روی تاج سرریز بود.



شکل ۶- تغییرات ds/H برحسب L_B/H به ازای F_o های متفاوت.

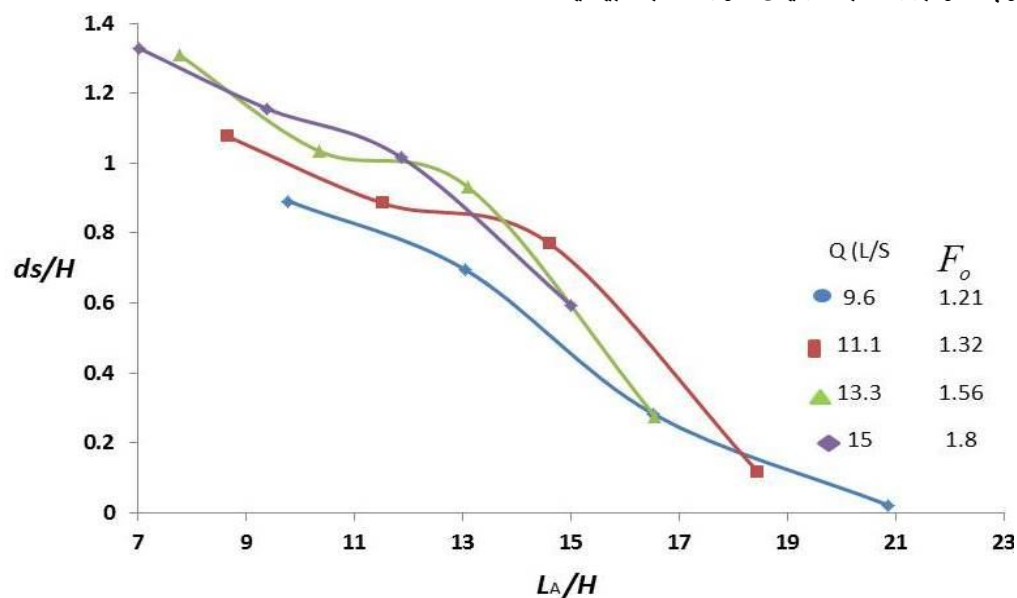


شکل ۷- تغییرات L_s/H برحسب L_B/H به ازای F_o های متفاوت.

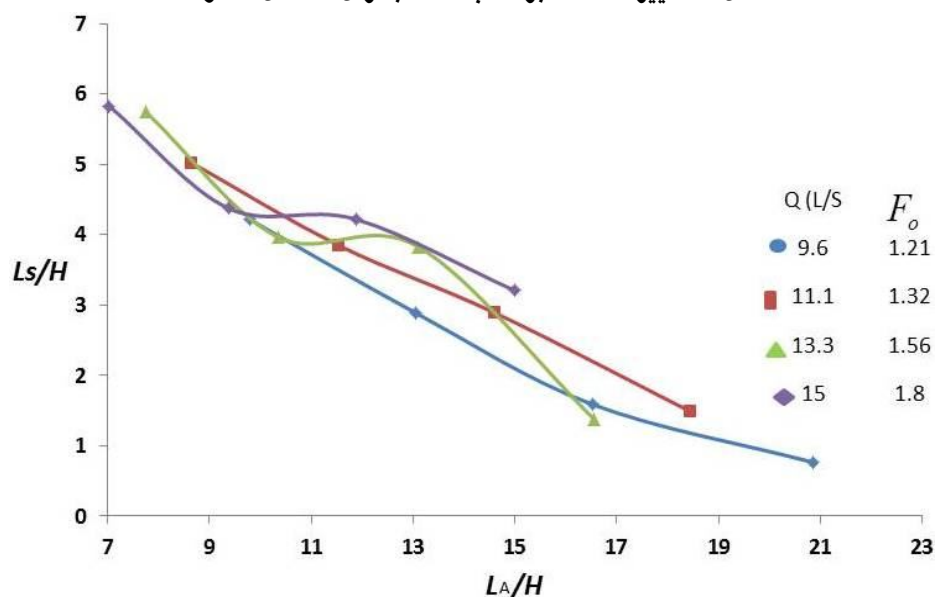
بررسی تأثیر طول کف‌بند

۱۶ آزمایش با طول کف‌بندهای متفاوت برای مطالعه اثر طول کف‌بند اجرا شد. روند تغییرات بیشینه عمق آبستگي در مقابل تغییرات طول کف-بند به صورت بدون بعد در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل مشاهده می‌شود به ازای اعداد فرود زره کوچک و بزرگ، با افزایش طول کف‌بند بیشینه

عمق آبستگي کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات محل وقوع بیشینه عمق آبستگي با توجه به تغییرات طول کف‌بند در شکل ۹ نشان داده شده است. روند تغییرات مانند شکل ۸ هست، البته شیب نمودارها نسبت به شکل ۸ حالت ملایم‌تری دارد.



شکل ۸- تغییرات d_s/H برحسب L_A/H به ازای F_o های متفاوت.



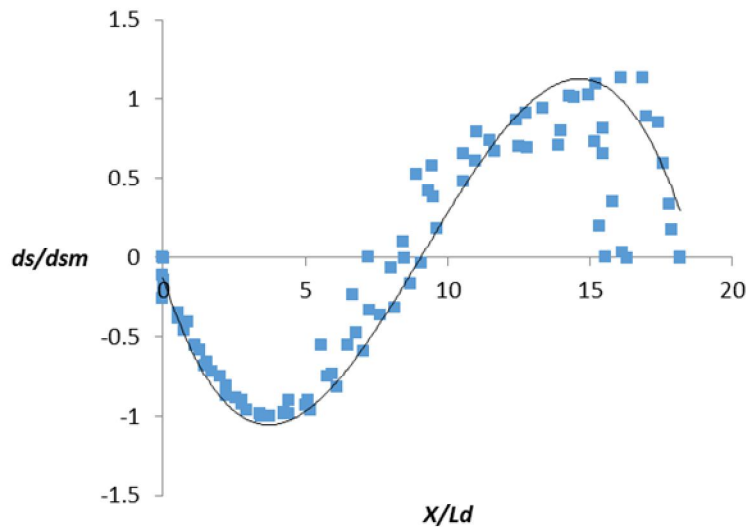
شکل ۹- تغییرات L_s/H برحسب L_A/H به ازای F_o های متفاوت.

بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی

$$\left(\frac{ds}{ds_m}\right) = -0.049 \left(\frac{x}{ds_m}\right)^3 + 0.12 \left(\frac{x}{ds_m}\right)^2 - 0.66 \left(\frac{x}{ds_m}\right) + 0.013 \quad [5]$$

در این رابطه ds عمق آبشستگی در فاصله x از انتهای کفبند و ds_m بیشینه عمق آبشستگی و ضریب تبیین رابطه $R^2 = 0.97$ هست.

چنانچه بیشینه عمق آبشستگی ds_m عامل بی‌بعد کننده در نظر گرفته شود، شکل پروفیل‌های آبشستگی در آزمایش‌های مختلف با کمی پراکندگی در ارتفاع پشته، مشابه هستند (شکل ۱۰). پروفیل بی‌بعد به‌دست‌آمده در این تحقیق از معادله درجه ۳ به‌صورت رابطه زیر پیروی می‌کند:

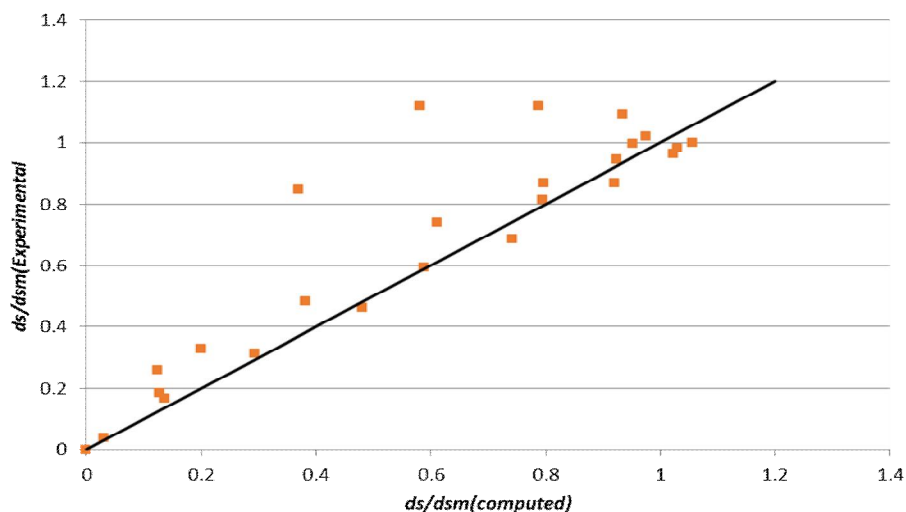


شکل ۱۰- پروفیل بی‌بعد گودال آبشستگی در آزمایش‌ها مختلف.

X_o مقادیر مشاهداتی و X_c مقادیر محاسباتی هست.

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_o - X_c}{X_o} \right| \quad [6]$$

میانگین خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (E) که به‌صورت رابطه ۶ هست برای رابطه ۵، برابر با ۹/۶۷ درصد به دست آمد. با توجه به خطای به‌دست‌آمده برای رابطه ۵ این فرمول با تقریب خوبی قادر به محاسبه عمق آبشستگی در فواصل متفاوتی از انتهای کفبند هست. در اینجا:



شکل ۱۱- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده عمق آبشستگی.

نتیجه‌گیری کلی

آبشستگی دارد. با رسم پروفیل‌های بی‌بعد گودال آبشستگی، وجود تشابه بین این پروفیل‌ها تأیید و رابطه‌ای برای تعیین پروفیل گودال در شرایط مختلف تعیین شد. همچنین پارامترهای گودال آبشستگی به صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد آورده شده است که می‌توان در طراحی‌ها جهت حفاظت بستر در برابر آبشستگی استفاده کرد.

در این تحقیق به بررسی تأثیر شکل هندسی سرریز لبه‌پهن دوشیبه بر آبشستگی موضعی در پایین دست کف‌بند پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد که فرآیند پیوسته فرسایش و رسوب‌گذاری در اثر گردابه‌های حاصل از پرش هیدرولیکی که تقریباً روی شیب پایین دست اتفاق می‌افتاد، با گذشت زمان رو به تحلیل می‌رفت. تشکیل جریان موجکی بر روی طول تاج سرریز که تحت شرایط هیدرولیکی خاصی رخ می‌دهد، تأثیر به‌سزایی بر روی پروفیل گودال

منابع مورد استفاده

- امید مح، حمیدی فرح و رئیسی ا، ۱۳۸۸. تأثیر عمق پایاب بر آبشستگی موضعی در پایین دست کف‌بند. هشتمین کنگره مهندسی عمران، اردیبهشت ۲۱-۲۳، دانشگاه شیراز.
- بی‌نام، ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های آبشستگی موضعی، وزارت نیرو، نشریه شماره ۵۴۹.
- پناهی س، ۱۳۸۹. بررسی آبشستگی در پایین دست سازه پرتاب کننده جامی مستغرق. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- سیفی ا، حسین زاده دلیر ع، فرسادی زاده د و حاجی آبادی ر، ۱۳۹۲. بررسی تغییرات زمانی آبشستگی در پایین دست سرریز لبه پهن دوشیبه. هفتمین کنگره مهندسی عمران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه. دانشگاه زاهدان.

علی حسینی پ، ابراهیمی ک و ماشال م، ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی در پایین- دست پرش هیدرولیکی مستغرق. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ۲۱-۲۳، دانشگاه شهید عباسپور، تهران.

مددی م، ۱۳۹۰. تأثیر خصوصیات هندسی سرریز لبه پهن دوشیبه بر ضریب دبی و مشخصه‌های جریان. پایان- نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی.

مددی م، فرسادی زاده د و حسین زاده دلیر ع، ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی عوامل موثر بر شکل‌گیری جریان موجی در سرریزهای لبه‌پهن. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۶، صفحه‌های ۱۴۲۸ تا ۱۴۳۹.

مقیم م، گل‌سنگی م و قدسیان م، ۱۳۸۷. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی برای جت‌های دیواره‌ای. چهارمین کنگره مهندسی عمران، اردیبهشت ۲۱-۲۳، دانشگاه تهران.

موسوی خندان ا. ۱۳۷۹. بررسی پروفیل آبشستگی پایین‌دست پرش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، 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.

Balachadar R, Kells JA and Thiessen RJ, 2000. The Effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering* 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.

Farhoudi 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. *Canadian Journal of Civil Engineering* 28(3): 440-451.

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.