

بررسی میزان آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B

محمود شفاعی بجنستان^۱ و صدیقه امیدی^{۲*}

۱-استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲-نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۳

چکیده

آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی باعث خسارت به اطراف سازه می‌شود و ممکن است باعث تخریب سازه نیز بشود. از این رو موضوع آبشستگی از گذشته مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق، یک مدل آزمایشگاهی شامل سرریز و حوضچه آرامش ساخته شد و تأثیر خصوصیات پرش هیدرولیکی نوع B بر میزان آبشستگی پایین دست آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۲۰ آزمایش در چهار عدد فرود مختلف و پنج موقعیت مختلف پرش انجام گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از این است که در یک عدد فرود ثابت هرچه پرش در نقطه بالاتری از سرریز تشکیل شود، از میزان عمق و طول بدون بعد آبشستگی کاسته می‌شود. به این صورت که با انتقال پرش به ارتفاع ۱۴ درصدی ارتفاع تنداب عمق، طول حفره و طول کل آبشستگی در حالت بدون بعد به طور متوسط، به ترتیب ۷ درصد، ۱۴ درصد و ۱۹ درصد کاهش یافته و ارتفاع بدون بعد پشته بطور متوسط ۴۹ درصد افزایش نشان می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های سایر محققین در رابطه با پرش نوع B مطابقت نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: آبشستگی، پرش هیدرولیکی نوع B، تنداب.

Investigation of Scour Depth Downstream of Stilling Basin for the Case of B-Jump

M. Shafai Bajestan¹ and S. Omid^{2*}

1-Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

2* - M.Sc. Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

Received: 24 May 2014

Accepted: 26 October 2014

Abstract

Scour downstream of hydraulic jump stilling basins can damage the surrounding area and can cause failure of the structure itself. Because of the study of such phenomenon has attracted the attention of researchers in the past. In the present study by constructing a model of spillways and stilling basin, The effect of B-jump characteristics on downstream scour was investigated. A total of 20 tests under 4 different Froude numbers and 5 different of jump position were carried out. The results indicated that at any discharge, the scour depth and length is decreased as the B-jump started at higher level. When the B-jump started at 14% of spillway depth, the non-dimensional scour depth and scour length decrease 7% and 19% respectively. The non-dimensional height of point bar downstream of scour hole was increased by 49%. Comparison of the results obtains in this study with other investigators finding shows good agreement for the case of B-jump scour.

Keywords: Scour, B-jump, Chuts.

مقدمه

حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی متداول‌ترین نوع مستهلک کننده‌های انرژی جنبشی در پائین دست سدهای انحرافی یا تندآب‌ها هستند. بر اساس طبقه‌بندی کیندزواتر^۱ (۱۹۴۴) بسته به اینکه موقعیت شروع پرش در سطح تندآب و نیز موقعیت انتهایی طول غلتهای نسبت به محل تقاطع سطح شیب‌دار و کف حوضچه کجا باشد، انواع مختلف پرش A, B, C و D تشکیل می‌گردد (شکل ۱). اگر پرش در انتهایی مقطع شیب‌دار شروع گردد و عمق آب پایین دست با عمق ثانویه پرش برابر باشد، پرش نوع A تشکیل می‌گردد. اگر شروع پرش روی سطح شیب‌دار و انتهایی طول غلتهای در حوضچه آرامش قرار گیرد، عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج، پرش را نوع B، اگر ابتدا و انتهایی پرش روی تندآب و انتهایی طول غلتهای روی حوضچه باشد، نوع C و اگر پرش به طور کامل روی تندآب اتفاق بیافتد، پرش از نوع D است.

در طراحی سازه تلاش براین است که محل شروع پرش در ابتدای حوضچه آرامش باشد (نوع A) تا طول سازه به حداقل مقدار خود برسد. در چنین شرایطی طول کف‌بند صلب حوضچه برابر طول پرش هیدرولیکی نوع A محاسبه می‌شود. علیرغم تمهیدات فوق مشاهده شده است که در پائین دست این سازه بستر آبرفتی شسته شده و چاله‌ای تشکیل می‌شود که می‌تواند مخاطراتی را برای سازه به همراه داشته باشد. از این رو مطالعات گسترده‌ای تاکنون در رابطه با ابعاد حفره فوق در پائین دست حوضچه‌هایی که در آنها پرش نوع A اتفاق می‌افتد انجام شده است.

لارسن^۲ (۱۹۵۲) اولین کسی بود که تشابه گسترش پروفیل‌های آبستگي توسط جت افقی را بدون هیچ‌گونه مفهوم نظری گزارش کرد. نوک^۳ (۱۹۵۵ و ۱۹۶۱) بیان نمود که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی نوع A را در برگیرد، عمق آبستگي نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. نوک (۱۹۵۵ و ۱۹۶۱) با استفاده از معادله جایگز رابطه زیر را برای عمق آبستگي در پائین دست حوضچه آرامش ارائه نمود و دریافت که کم‌ترین مقدار آبستگي در حالت $y_t / y_{tmin} = 1.6$ (حداقل عمق پایاب)، و بیش‌ترین مقدار آبستگي در حالت $y_t / y_{tmin} = 1$ رخ می‌دهد:

$$d_s = 0.55 \left[6H^{0.25} q^{0.5} \left(\frac{y_t}{D_{90}} \right)^{0.33} - y_t \right] \quad (۱)$$

که در این رابطه d_s : حداکثر عمق فرسایشی (m)، H: اختلاف تراز آب در بالادست و پایین دست (m)، y_t : عمق پایاب

(m)، q: دبی واحد عرض (m^2/s) و d_{90} : اندازه ذرات رسوب (mm) است.

کاتالکی^۴ (۱۹۷۳) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک سرریز با حوضچه آرامش با طول $5y_t$ رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبستگي پایین دست حوضچه آرامش ارائه نمودند:

$$d_s = 1.6H_1^{0.2} q^{0.6} d_{90}^{0.1} - y_t \quad (۲)$$

که در این رابطه H_1 : اختلاف تراز آب بالادست از بستر اولیه (m)، d_{90} : اندازه ذرات (mm) و q: دبی در واحد عرض (m^2/s) می‌باشد.

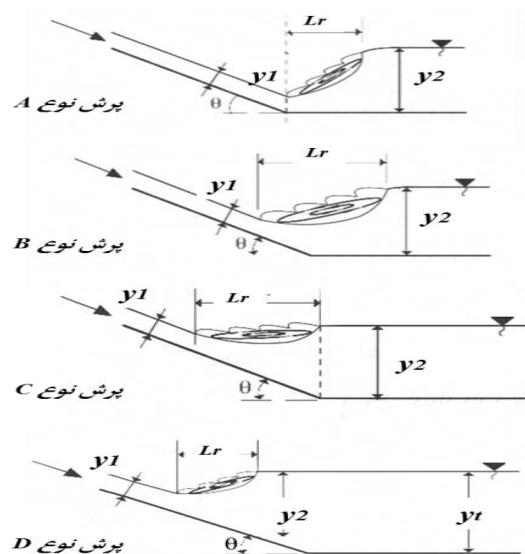
برازرز^۵ (۱۹۶۵) تحقیقات گسترده‌ای بر روی آبستگي با استفاده از مواد بستر متفاوت با چگالی‌های مختلف و ترکیبات هندسی متنوع انجام داد. او رابطه‌ای برای تکامل زمان آبستگي پیشنهاد داد و همچنین گزارش کرد که برای یک هندسه مشخص، پروفیل‌های آبستگي در تمام زمان‌ها مشابه است. فرهودی و اسمیت^۶ (۱۹۸۲ و ۱۹۸۵) مطالعاتی روی آبستگي ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش معمولی (نوع ۱) پائین دست یک سرریز انجام دادند. در این آزمایش‌ها یک کف بند مسطح که طول آن تقریباً برابر طول پرش هیدرولیکی بود، استفاده شد و آبستگي پائین دست سه نوع پرش مورد آزمایش قرار گرفت: پرش هیدرولیکی مستغرق (نوع B) ($y_1 > y_2$)، عمق مزدوج پرش هیدرولیکی است، پرش هیدرولیکی متعادل (نوع A) و پرش هیدرولیکی پیشرونده به سمت پائین دست ($y_1 < y_2$). بالاچاندار و همکاران^۷ (۲۰۰۰) به بررسی تأثیر عمق پایاب بر آبستگي پائین دست در بجه کشویی بدون کف‌بند پرداختند و نمودارهایی برای توسعه گودال آبستگي در زمان‌های مختلف ارائه کردند. درگاهی^۸ (۲۰۰۳) به مطالعه آبستگي پائین دست سرریز اوجی همراه با کف‌بند افقی پرداخت. در این آزمایش‌ها پرش روی بستر متحرک تشکیل می‌شده و بیشتر شبیه یک موج متحرک بوده است که از انواع پرش کلاسیک محسوب می‌شود. او روابط زیر را برای تعیین حداکثر عمق آبستگي در مرکز فلوام ارائه نمود:

$$\frac{y_s}{h_0} = 1.7 \left(\frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/4.5} \quad (۳)$$

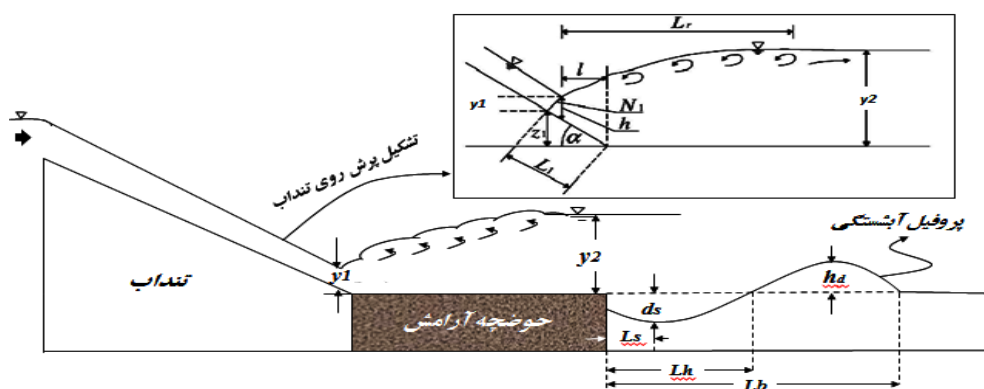
$$\frac{x_s}{h_0} = 5 \left(\frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/3} \quad (۴)$$

4- catalki
5- Breusers
6- Farhoodi and esmit
7- Balachandar et al.
8- Dargahi

1- Kindsvater
2- Laursen
3- Novak



شکل ۱- انواع پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از مدل آزمایشگاهی، حفره‌ی آبستگي و مشخصات پرش هیدرولیکی نوع B

در این رابطه b : میزان بازشدگی دریاچه و L : طول سطح محافظت شده از دریاچه تا انتهای کفبند و F_d : عدد فرود ذره می‌باشد.

حمیدی‌فر و امید (۱۳۸۹) اثر اندازه ذره، عمق پایاب و عدد فرود را بر آبستگي موضعی بستر ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریاچه کشویی را بررسی کردند و دریافتند که تأثیر عمق پایاب به میزان عدد فرود ذره بستگی دارد. خلیلی شایان و فرهودی (۱۳۹۱) تشابه نیمرخ‌های آبستگي حاصل از جریان مستغرق خروجی از زیر دریاچه‌های کشویی در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس را بررسی کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که نیمرخ‌های آبستگي در پایاب هر شیب حوضچه خودمتشابه هستند. آنها همچنین نشان دادند که در یک حالت خاص از عدد فرود ذره، عمق پایاب و طول حوضچه، افزایش شیب حوضچه معکوس سبب کاهش در عمق بیشینه آبستگي می‌شود. سیفی و همکاران (۱۳۹۲) عوامل موثر بر

که در این روابط y_s : حداکثر عمق آبستگي (m) ، x_s : موقعیت محل حداکثر عمق آبستگي از لبه انتهایی کفبند (m) ، h_0 : عمق آب روی سرریز (m) و D_{50} : عمق متوسط مصالح بستر (mm) می‌باشد. دی و سرکار^۱ (۲۰۰۶) آبستگي در رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت و در پایین‌دست کفبند افقی به‌علت جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریاچه را مورد بررسی قرار دادند و رابطه زیر را برای تعیین عمق آبستگي پیشنهاد دادند:

$$\frac{ds}{b} = 1.241 F_d^{0.85} \frac{L}{b}^{-0.19} \frac{y_f}{b}^{0.235} \frac{d_{50}}{b}^{0.193} \quad (5)$$

1- Day and sarkar

شفاعی بجستان و امیدی: بررسی میزان آبخستگی پایین دست حوضچه...

محدوده تغییرات عدد رینولدز در آزمایش‌ها بین ۱۵۳۶۰ و ۵۴۸۳۸ است، با توجه به بالا بودن مقدار رینولدز و تأثیر ناچیز نیروی لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی، می‌توان از اثر عدد رینولدز صرف‌نظر کرد و آن را معادله‌ها حذف نمود. همچنین به دلیل اینکه تمام آزمایش‌ها با یک نوع ماده رسوبی و در یک شیب انجام شده است، چگالی ذرات بستر (G_s) ، D_s/Y_1 و α نیز از معادله حذف می‌شوند. لذا معادله اخیر را می‌توان به صورت رابطه (۸) نوشت:

$$\frac{\xi}{Y_1} = f(F_r, Y, E) \quad (8)$$

امکانات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام این تحقیق، آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و دارای ارتفاع ۰/۸ متر در ۲/۱ متر ابتدایی و ۰/۵ متر در ۵/۴ متر انتهایی فلوم و از جنس شیشه، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. دبی جریان قبل از ورود به مخزن آرام‌کننده توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۰۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. برای انجام آزمایش‌ها، تندابی با ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و با شیب ۳۰ درجه، از جنس پلکسی‌گلاس نصب شد. در پایین دست تنداب یک حوضچه‌ی آرامش USBR نوع یک، طراحی شد. این نوع حوضچه در حقیقت یک کف‌سازی ساده افقی در مسیر پرش است که بدون هیچ زائده‌ای جهش آبی در روی آن اتفاق می‌افتد، لذا طرح آن عبارت است از کاربرد روابط پرش هیدرولیکی آزاد (ابریشمی و حسینی ۱۳۸۸). لذا برای ساخت حوضچه طول آن طبق استانداردهای همان سازمان و از جنس بتن ساخته شد. پایین دست حوضچه مصالح رسوبی با قطر متوسط ۱/۸۵ میلی‌متر، بعنوان مصالح بستر رودخانه قرار داده شد و از درجه کشویی‌ای در انتهای فلوم برای تنظیم عمق پایاب، به منظور تشکیل پرش و تنظیم محل وقوع آن استفاده شد. در شکل (۲) طرحی از مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

به منظور انجام آزمایش‌ها برای دبی‌های مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۱۸ لیتر بر ثانیه) و تشکیل پرش در محل‌های مشخص شده روی تنداب (به عنوان مثال: ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری)، پس از تسطیح مصالح، درجه انتهایی فلوم کاملاً بسته و عمق پایاب، به اندازه محاسبه شده برای تشکیل پرش در محل مورد نظر، افزایش داده می‌شد، سپس دبی ورودی به فلوم توسط شیر ورودی تنظیم شده و پس از اطمینان از تثبیت دبی درجه پایین دست فلوم به آهستگی باز می‌گردید تا پرش در موقعیت مورد نظر قرار گیرد. پس از تثبیت موقعیت پرش، پروفیل سطح آب و به خصوص اعماق مزدوج پرش با استفاده از عمق سنج با

آبخستگی پایین دست کف‌بند سرریز لبه پهن دوطرف شیبدار را شناسایی کردند و روابط ساده‌ای برای تعیین شکل گودال آبخستگی در شرایط مختلف ارائه دادند.

در گذشته، همچنین مطالعاتی روی خصوصیات هیدرولیکی پرش نوع B انجام شده است (رجوع شود به شکریان، ۱۳۹۲)، اما در مورد میزان آبخستگی در شرایط تشکیل این نوع پرش تاکنون مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است. حال با توجه به اهمیت پدیده‌ی آبخستگی و تخمین گستردگی آن در شرایط مختلف، در این تحقیق سعی شده تأثیر پارامترهای هیدرولیکی پرش نوع B بر میزان آبخستگی تعیین و روابطی برای تخمین آن ارائه شود.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

آبخستگی پایین دست حوضچه آرامش به تعداد زیادی از متغیرهای مربوط به جریان و همچنین رسوبات بستگی دارد. این متغیرها عبارتند از:

$$f(\xi, Y_1, Y_2, v, g, \mu, \rho, \rho_s, D_s, z, \alpha) = 0 \quad (6)$$

که در آن D_s : اندازه قطر ذرات رسوبی بستر برحسب متر، ξ : نمایانگر ابعاد آبخستگی برحسب متر، g : شتاب ثقل برحسب متر بر مجذور ثانیه، ρ_s : چگالی ویژه ذرات برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، ρ : چگالی ویژه سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، μ : لزجت دینامیکی سیال برحسب کیلوگرم بر متر بر ثانیه، Y_1 : عمق اولیه پرش برحسب متر، Y_2 : عمق ثانویه پرش برحسب متر، v : سرعت جریان برحسب مترمربع بر ثانیه، z : محل تشکیل عمق اولیه پرش روی تنداب برحسب متر و α : زاویه تنداب برحسب درجه می‌باشد. برخی از این متغیرها در شکل (۲) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن Y_1, v, ρ به عنوان متغیرهای تکراری و به کار بردن قضیه باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج گردید:

$$f(F_r, R_e, Y, E, \frac{D_s}{Y_1}, \frac{\xi}{Y_1}, G_s, \alpha) = 0 \quad (7)$$

در این رابطه F_r : عدد فرود، R_e : عدد رینولدز، $Y = \frac{Y_2}{Y_1}$ (نسبت اعماق مزدوج پرش)، $E = \frac{Y_2 - z}{Y_2}$ (پارامتر بدون بعدی است که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است بدین معنی که در صورت تشکیل پرش در پای تنداب مقدار آن یک و در شیب بحرانی نزدیک به عدد صفر می‌شود، هاگر^۱ ۱۹۸۸)، D_s : اندازه متوسط ذرات رسوب، $G_s = \frac{\rho_s}{\rho}$ و α : شیب سرریز می‌باشد.

آبستگي (L_b) کاهش یافته و ارتفاع پشته (h_d) افزایش می‌یابد. به عنوان مثال با حرکت پرش به سمت بالای تنداب به اندازه ۱۴ درصد ارتفاع آن، به طور متوسط طول حفره و طول کل آبستگي به ترتیب حدود ۱۶ درصد و ۱۵ درصد کاهش داشته و ارتفاع پشته حدود ۲۵ درصد نسبت به حالت تشکیل پرش نوع A افزایش نشان می‌دهد. انتقال ابتدای پرش به این ارتفاع تأثیر چشمگیری روی عمق آبستگي نداشته و در بعضی موارد عمق آبستگي بیشتری نیز مشاهده شد. همچنین تأثیر انتقال پرش به ارتفاع ۱۴ درصدی ارتفاع تنداب روی ابعاد بدون بعد آبستگي نیز محاسبه شد و نتایج به این صورت به دست آمد که عمق، طول حفره و طول کل آبستگي در حالت بدون بعد بطور متوسط، به ترتیب ۷ درصد، ۱۴ درصد و ۱۹ درصد کاهش یافته و ارتفاع بدون بعد پشته به طور متوسط ۴۹ درصد افزایش می‌یابد. میزان تغییرات در دو حالت با بعد و بدون بعد در ارتفاع ۱۴ درصدی تنداب در جدول (۲) آورده شده است. همین طور مشاهده می‌شود که با افزایش ۵۰ درصدی دبی، زمانی که محل شروع پرش یکسان باشد (به عنوان مثال در ارتفاعی معادل ۱۴ درصد ارتفاع تنداب)، طول حفره، طول کل آبستگي، عمق بیشینه و ارتفاع پشته به ترتیب ۵۰ درصد، ۴۷ درصد، ۴۵ درصد و ۲۳ درصد افزایش می‌یابند. مقایسه‌ی بین پرش هیدرولیکی نوع A و B نشان می‌دهد در تمامی دبی‌ها با تبدیل پرش از نوع A به پرش هیدرولیکی نوع B، حجم کمتری از مواد بستر شسته می‌شود (شکل ۵). دلیل این امر آن است که زمانی که عمق پایاب افزایش می‌یابد انرژی جریان فوق بحرانی جاری روی تنداب با برخورد با حجم آب موجود پراکنده می‌شود. همچنین افزایش عمق در مقطع ثانویه پرش هنگامیکه به پرش نوع B تبدیل می‌شود، باعث کاهش سرعت شده، عدد فرود در مقطع ثانویه کاهش می‌یابد و در نتیجه از طول پشته کاسته شده و بر ارتفاع پشته افزوده می‌شود.

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه اصطکاک بین ذرات رسوب و شیشه کمتر از اصطکاک بین خود ذرات است، حفره آبستگي در دو انتهای عرضی فلوام دارای عمق بیشتری می‌باشد و در قسمت‌های میانی فلوام دارای عمق نسبتاً یکسانی می‌باشد (قسمت‌های تیره‌تر در نمای دوبعدی نشانگر عمیق‌تر بودن حفره می‌باشد).

دقت ۰/۱ میلی‌متر برداشت می‌گردید. چون هدف این مطالعه، مقایسه میزان آبستگي بین دو نوع پرش A و B بود و تکمیل فرآیند آبستگي مد نظر نبود، مدت تمامی آزمایش‌ها زمان ثابت سه ساعت در نظر گرفته شد. ضمن اینکه اندازه‌گیری‌های در حین آزمایش نشان داد که در حدود بیش از ۹۰ درصد عمق آبستگي در همین زمان اتفاق می‌افتد. پس از آن پمپ خاموش شده و دریچه انتهایی فلوام به طور کامل بسته می‌شد تا آب داخل فلوام به آرامی تخلیه گردد. پس از خشک شدن آب روی ماسه‌ها، پروفیل فرسایش بستر در یک شبکه ۲×۲ سانتی‌متری در جهت طولی و عرضی کانال به وسیله متر لیزری برداشت می‌شد. در این تحقیق در مجموع ۲۰ آزمایش انجام گرفت که جدول (۱) محدوده‌ی متغیرهای آن را نشان می‌دهد. همچنین نمای شماتیک امکانات آزمایشگاهی این تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

در حین آزمایش‌ها مشاهده شد که در انتهای حوضچه، بلافاصله بعد از پرش، جریان متلاطمی وجود دارد که در درز و شکاف باز بستر نفوذ می‌نماید و باعث انتقال مواد بستر به پایین دست و ایجاد حفره می‌گردد. این مواد در فاصله اندکی از حوضچه ته‌نشین شده و در نتیجه تپه‌ای ماسه‌ای در پایین دست حفره تشکیل می‌شود. فرآیند فرسایش‌پذیری و تشکیل حفره در حدود ۱۵ دقیقه اول با سرعت بسیار زیادی انجام می‌شود و بیش از ۹۰ درصد آن در دو ساعت اولیه آزمایش صورت می‌گیرد و در زمان باقیمانده سرعت تغییرات بسیار اندک می‌باشد. گفتنی است که حجم حفره ایجاد شده معادل حجم رسوبگذاری پایین دست حفره می‌باشد.

در شکل (۴) تغییرات پروفیل آبستگي در چند دبی و محل مختلف تشکیل پرش، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش دبی باعث ایجاد عمق و طول آبستگي بیشتری می‌شود و با مقایسه‌ی پروفیل‌ها در Zهای مختلف درمی‌یابیم که هر چه پرش به سمت بالادست شیب حرکت کند، عمق حفره (d_s)، طول حفره (L_h) و طول کل

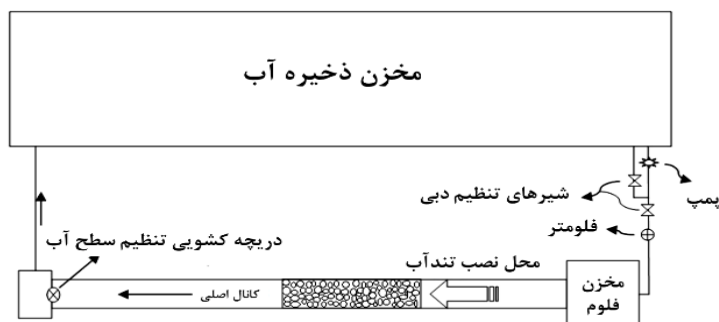
جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق

Y	E	F_r	Q (lit/s)
۹/۳ - ۲۸/۲	۰/۱ - ۰/۶۶	۵/۳ - ۱۲	۵ - ۱۸

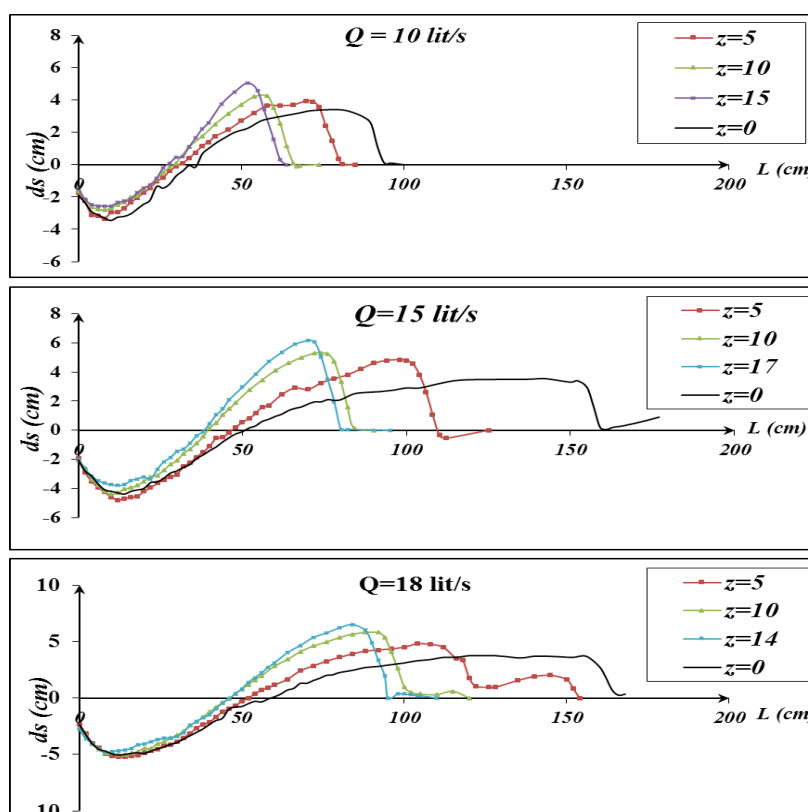
جدول ۲- تغییر ابعاد آبستگي با انتقال پرش به ارتفاع ۱۴ درصدی تنداب

میزان تغییرات (بر حسب درصد)				
Ds	Lh	Lb	hd	
--	-۱۶	-۱۵	۲۵	با بعد
-۷	-۱۴	-۱۹	۴۹	بدون بعد

شفاعی بجستان و امیدی: بررسی میزان آبستگي پایین دست حوضچه...



شکل ۳- پلان آزمایشگاهی و تجهیزات آن



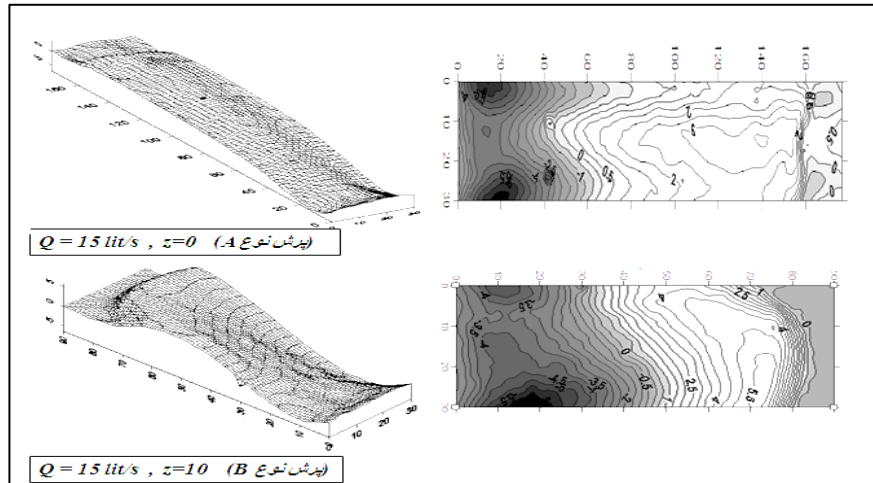
شکل ۴- تغییرات پروفیل آبستگي با تغییر در دبی و محل تشکیل پرش

آزمایش به طول حفره کاهش می‌یابد و آن به این معناست که تأثیری که عدد فرود در مقطع فوق بحرانی پرش نوع B روی طول آبستگي می‌گذارد به مراتب بیشتر از تأثیر آن بر عمق آبستگي است. این موضوع با رسم عمق بدون بعد آبستگي $\left(\frac{d_s}{p}\right)$ در برابر طول بی بعد آبستگي $\left(\frac{L_h}{p}\right)$ در هر آزمایش (P ارتفاع سرریز است)، کاملاً مشهود است (شکل ۸). همان‌طور که در شکل مشخص است، خط برازش داده شده با شیب زیادی به سمت محور $\left(\frac{L_h}{p}\right)$ گرایش دارد و طول آبستگي با سرعت بیشتری نسبت به عمق آن در حال افزایش است.

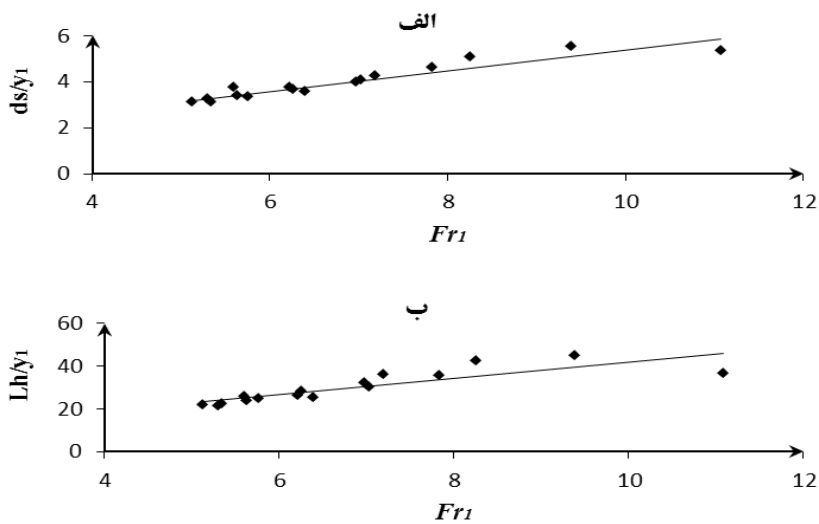
تأثیر عدد فرود روی میزان آبستگي پرش

هیدرولیکی نوع B

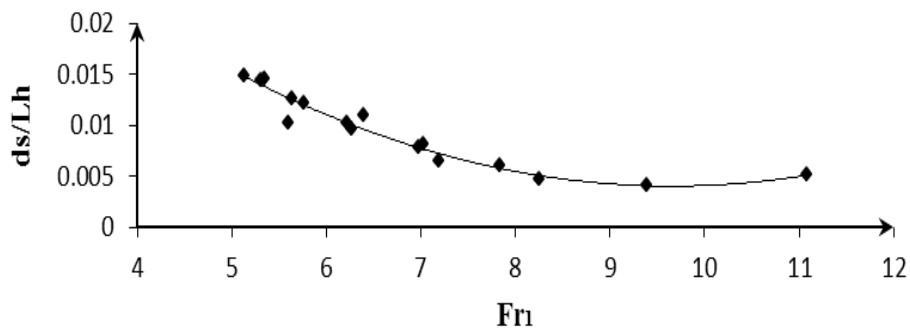
شکل‌های (۶ الف و ب) به ترتیب میزان عمق و طول حفره آبستگي بدون بعد را در برابر عدد فرود در محل تشکیل عمق اولیه پرش، در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد بین عدد فرود و عمق و همچنین طول آبستگي بدون بعد رابطه خطی برقرار است و با افزایش عدد فرود میزان عمق و طول بی‌بعد آبستگي افزایش می‌یابد. حال اگر نسبت عمق بیشینه به طول آبستگي $\left(\frac{d_s}{L_h}\right)$ نسبت به عدد فرود رسم شود، (شکل ۷) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، نسبت بیشترین عمق آبستگي به دست آمده در طول



شکل ۵- نمای دوبعدی و سه بعدی پروفیل آبستگی در پرش نوع A و B

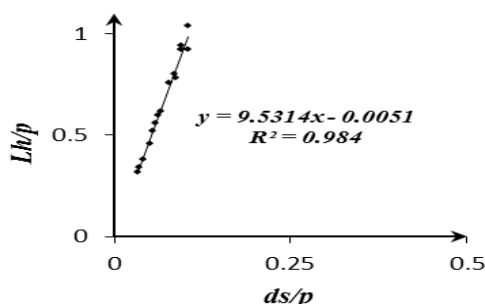


شکل ۶ الف) تغییرات عمق بیشینه آبستگی نسبی نسبت به عدد فرود، ب) تغییرات طول حفره بیشینه آبستگی در برابر عدد فرود



شکل ۷- تغییرات نسبت عمق بیشینه به طول حفره آبستگی در برابر عدد فرود

شفاعی بجستان و امیدی: بررسی میزان آبشستگی پایین دست حوضچه...



شکل ۸ - تغییرات طول آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی

بررسی دقت روابط سایر محققین

به منظور بررسی دقت روابط ارائه شده توسط سایر محققین در زمینه پیش‌بینی عمق بیشینه آبشستگی، ابتدا عمق آبشستگی با روابط (۱) تا (۵) که در مقدمه ارائه شدند محاسبه گردید سپس میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از هر روش با نتایج به‌دست آمده در آزمایشگاه از رابطه $R = \frac{d_s(m) - d_s(c)}{d_s(m)}$ محاسبه شد و میانگین قدرمطلق این خطاها به عنوان متوسط خطا در نظر گرفته شد. در این رابطه $d_s(m)$: عمق آبشستگی بدست آمده از آزمایش‌ها و $d_s(c)$: مقادیر محاسباتی می‌باشد. نتایج این مقایسه در جدول (۳) آورده شده است و نتایج ترسیمی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شرایط آزمایش‌های درگاهی (۲۰۰۳) بیشترین نزدیکی را با آزمایش‌های این تحقیق داشته بهمین دلیل رابطه (۳) نزدیک‌ترین نتایج را با نتایج آزمایش‌ها دارد و درصد خطای کمتری دارد، اما همان‌طور که در شکل مشخص است مقادیر به‌دست آمده با این رابطه بزرگ‌تر از مقادیر حاصل شده در آزمایشگاه است. این امر می‌تواند به دلیل بیشتر بودن زمان آزمایش‌های درگاهی (۲۰۰۳) باشد. معادله نواک (۱۹۵۵) (رابطه ۱) مقادیر آبشستگی را بسیار بیشتر از مقدار به‌دست آمده در آزمایش‌ها به‌دست می‌دهد، معادله کاتالکی (۱۹۷۳) (رابطه ۲) در پرش نوع A مقادیر دقیق‌تری به‌دست می‌دهد ولی در پرش نوع B چون اختلاف بین تراز آب در بالادست و پایین دست را در نظر نگرفته، مقدار قسمت اول معادله ثابت مانده و قسمت دوم (y_i) افزایش می‌یابد. در نتیجه در پرش نوع B مقادیری بسیار کوچک‌تر از مقدار واقعی به‌دست می‌آید. معادله دی و سرکار (۲۰۰۶) (رابطه ۵) نیز مقادیر بزرگ‌تری به‌دست می‌دهند که احتمالاً به دلیل بیشتر بودن مدت آزمایش و طول کفبند افقی می‌باشد.

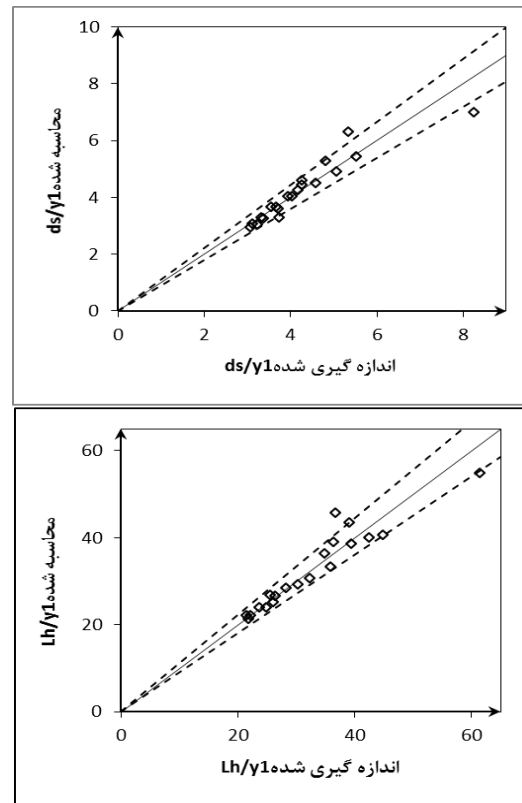
استخراج رابطه

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها عنوان شد، با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (۸) حاصل گردید که به منظور استخراج رابطه‌ای خاص، می‌باید با به‌کار بردن داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزارهای آماری مناسب‌ترین معادله بین متغیرهای بدون بعد را برآزش داد. در این مقاله از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و معادله‌ها زیر به ترتیب برای محاسبه عمق و طول حفره آبشستگی تحت تأثیر پرش استخراج گردید:

$$\frac{d_s}{y_1} = 1.274 F_{r1}^{0.725} Y^{-0.03} E^{0.046} \quad (9)$$

$$\frac{L_h}{y_1} = 8.51 F_{r1}^{0.954} Y^{-0.207} E^{0.016} \quad (10)$$

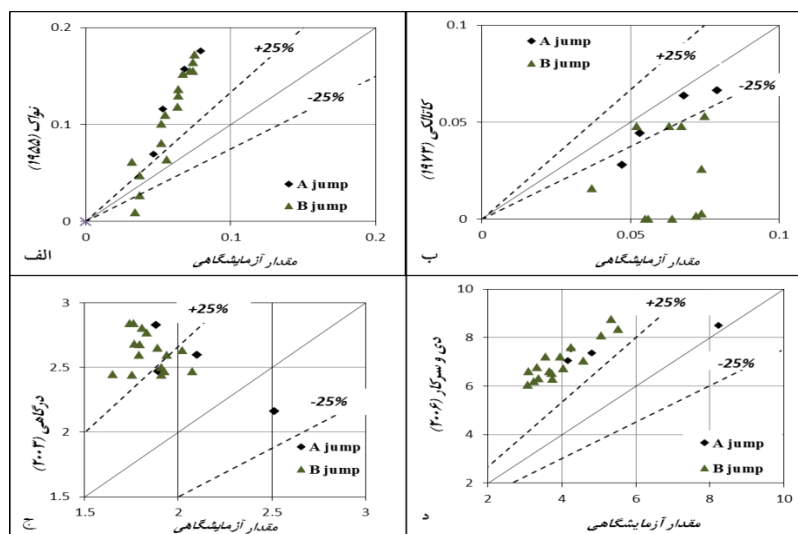
مقدار R^2 در معادله (۹)، ۰/۸۹۴ و در معادله (۱۰)، ۰/۸۵۳ می‌باشد و در سطح پنج درصد معنی‌دار هستند. همان‌طور که از روابط پیداست عمق و طول حفره آبشستگی با عدد فرود و مقدار پارامتر E رابطه مستقیم و با نسبت اعماق مزدوج رابطه عکس دارند. همین‌طور از روابط مشخص است که تأثیر عدد فرود در مقطع فوق بحرانی پرش، روی عمق و طول حفره آبشستگی، به مراتب بیشتر از اعماق مزدوج پرش و محل تشکیل پرش روی تنداب می‌باشد. به منظور نشان دادن دقت این روابط، مقادیر عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی بدون بعد محاسبه شده با روابط (۹) و (۱۰) در مقابل مقادیر همین پارامترها که از آزمایش‌ها به‌دست آمده‌اند ترسیم گردید و شکل (۹) بدست آمد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، این روابط می‌توانند عمق و طول آبشستگی را در محدوده ۸۵ درصد اطمینان پیش‌بینی کنند.



شکل ۹- نمودار مقایسه $ds/y1$ و $Lh/y1$ محاسبه شده از روابط (۹) و (۱۰) در برابر مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها

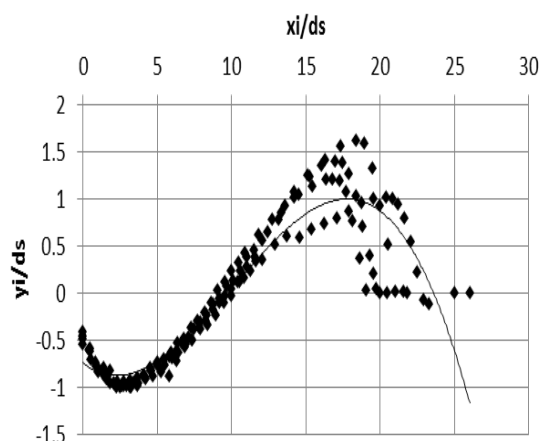
جدول ۳- درصد قدر مطلق متوسط خطای روابط موجود در عمق آبستگی پرش نوع A و B

نوع پرش	معادله ۱	معادله ۲	معادله ۳	معادله ۵
نوع A	۱۰۵	۱۹/۷	۲۹/۷	۵۰/۶
نوع B	۸۶/۹	۱۵۹/۴	۳۶/۱۴	۸۰

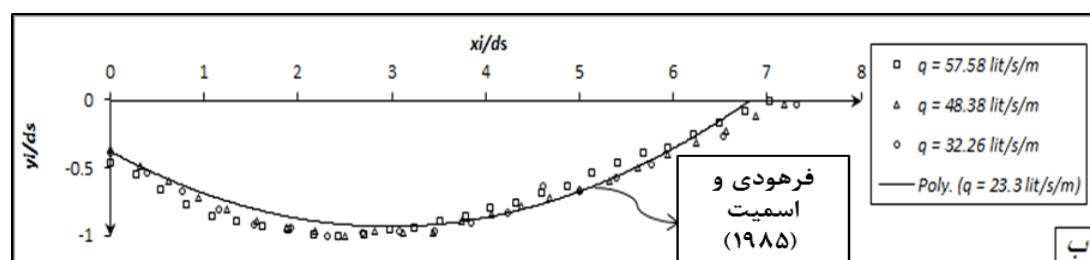
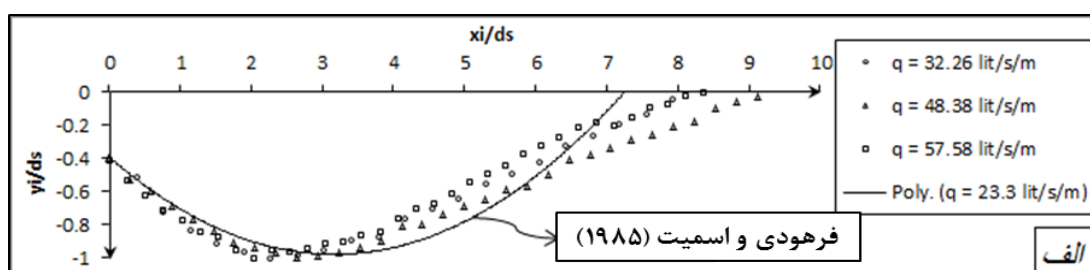


شکل ۱۰- اعماق آبستگی محاسبه شده از روابط (۱) تا (۵) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی

شفاعی بجستان و امیدی: بررسی میزان آبستگي پایین دست حوضچه...



شکل ۱۱ - پروفیل بی بعد آبستگي در شرایط مختلف



شکل ۱۲ - تشابه پروفیل بدون بعد حفره آبستگي و مقایسه با نتایج فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵): الف) در حالت تشکیل پرش نوع A و ب) در حالت تشکیل پرش نوع B

شده در مرز بین رسوبات و شیشه فلوم در نظر گرفته شد (آزمایش‌هایی انتخاب شد؛ که شرایط نزدیک‌تری به نمودارهای انتخاب شده برای مقایسه داشته باشد) و در دو حالت پرش نوع A و نوع B به ترتیب در برابر دو حالت عمق پایاب برابر با عمق ثانویه پرش و عمق پایاب بیشتر از عمق ثانویه پرش در آزمایش‌های فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) که در حقیقت همان پرش نوع A و B هستند، رسم شد. این نمودارها در شکل (۱۲، الف و ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش‌ها در حالت پرش هیدرولیکی نوع A در شیب بالادست حفره برآزش خوبی با نتایج فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) دارد ولی در قسمت پایین دست حفره تفاوت قابل ملاحظه‌ای دیده

بررسی تشابه پروفیل‌های آبستگي

مشاهدات روی فرآیند آبستگي در آزمایشگاه تشابهی در تشکیل حفره آبستگي در تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. شکل تمامی پروفیل‌های آبستگي در آزمایش‌های مختلف با کمی پراکندگی در شکل رسوبگذاری پایین دست حفره متشابه است. وجود این تشابه با رسم مختصات نقاط پروفیل که توسط عمق بیشینه آبستگي، ds ، بدون بعد شده باشد، اثبات می‌شود (شکل ۱۱). در گذشته محققان دیگری از جمله فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) نیز تشابه بین پروفیل‌های آبستگي را بررسی کرده بودند. برای مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش‌های فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵)، پروفیل تشکیل

در تمامی دبی‌ها با تبدیل پرش از نوع A به پرش هیدرولیکی نوع B، حجم کمتری از مواد بستر شسته می‌شود، همچنین هر چه پرش به سمت بالای شیب حرکت کند و ابتدای پرش در محل بالاتری از تنداب قرار بگیرد، آبستگی پایین‌دست آن کاهش می‌یابد. با رسم عمق و طول بیشینه آبستگی در برابر اعداد فرود در محل ایجاد عمق اولیه پرش نوع B مشاهده شد که با افزایش عدد فرود، میزان عمق و طول بیشینه آبستگی افزایش می‌یابد و نسبت بیشترین عمق آبستگی به دست آمده در طول آزمایش به طول حفره کاهش می‌یابد بدین معنا که تأثیری که عدد فرود در مقطع فوق بحرانی پرش نوع B روی طول آبستگی می‌گذارد به مراتب بیشتر از تأثیر آن بر عمق آبستگی است. بررسی برخی روابط موجود برای پیش‌بینی عمق آبستگی نشان داد که این روابط برای تعیین عمق آبستگی در شرایط تشکیل پرش نوع B دقت کافی ندارند. همچنین با رسم پروفیل‌های بدون بعد آبستگی، وجود تشابه بین این پروفیل‌ها تأیید شد و تشابه در حفره آبستگی بسیار نزدیک با نتایج فرودی و اسمیت (۱۹۸۵) ملاحظه شد. در پایان نیز معادله‌هایی برای محاسبه عمق و طول حفره آبستگی تحت تأثیر پرش نوع B استخراج گردید.

می‌شود، به طوری که بیشترین مقدار X_i/d_s در آزمایش‌های فرودی و اسمیت (۱۹۸۵) حدود $7/3$ و در آزمایش‌های تحقیق حاضر بطور متوسط $8/5$ می‌باشد. این در حالی است که در پرش هیدرولیکی نوع B نتایج بسیار نزدیک به هم است. لازم به ذکر است که آزمایش‌های فرودی و اسمیت (۱۹۸۵) در پرش نوع B در حالت $\gamma_t/\gamma_2 = 1.25$ انجام شده بود. در شکل (۱۲-ب) نیز سعی شد از نتایج آزمایش‌هایی استفاده شود که γ_t/γ_2 آنها در محدوده $1/2$ تا $1/3$ باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی برخی از پارامترهای تأثیرگذار در آبستگی موضعی پایین‌دست یک تنداب با حوضچه‌ی آرامش نوع یک پرداخته شد. یک فرآیند پیوسته فرسایش و رسوب‌گذاری در اثر به‌وجود آمدن جریان‌های گردابی پایین‌دست حوضچه، در درون گودال آبستگی مشاهده شد که با گذشت زمان رو به تحلیل می‌رفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که افزایش دبی باعث ایجاد عمق و طول آبستگی بیشتری می‌شود. همچنین تغییرات میزان آبستگی بر حسب تغییر در محل تشکیل پرش روی تنداب بررسی شد و مشخص شد که پرش هیدرولیکی نوع B در مقایسه با پرش کلاسیک آبستگی کمتری ایجاد می‌کند و

منابع

- ۱- ابریشمی، ج و س.م. حسینی. ۱۳۸۸. هیدرولیک کانال‌های باز، نشر مشهد. ۵۱۰-۵۰۶.
- ۲- حمیدی‌فر، ح و ج.ا. امید. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی آبستگی رسوبات غیر چسبنده در پایین‌دست کف‌بند. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۱(۲): ۲۸-۱۷.
- ۳- خلیلی شایان، ح. و ج. فرهودی. ۱۳۹۱. نیمرخ‌های آبستگی و تغییرات تنش‌های برشی در حفره در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس. مجله علمی-پژوهشی، ۷(۴): ۸۵-۹۹.
- ۴- سیفی، ا. حسین‌زاده دلیر، ع و د. فرسادی زاده. ۱۳۹۲. آبستگی در پایین‌دست سرریز لبه پهن دوطرف شیبدار. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳(۴): ۱۷۷-۱۸۸.
- ۵- شکریان، م. ۱۳۹۲. بررسی اثر ارتفاع زبری بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نوع B. پایان نامه کارشناسی ارشد. رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۴-۲۰.
- 6- Balachandar, R. , Kells, J.A. and R.J.Thiessen. 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. Canadian Journal of Civil Engineering, 27: 138-150.
- 7- Breusers, H.N.C. 1965. Conformity and time scale in two dimensional local scour. Publication 40, Delft Hydraulic Laboratory, Delft, the Netherlands.
- 8- Catalki, O. 1973. A study of scour at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipator. Proceeding of 11th International Congress of Large Dams, Madrid, Q41 R2: 23-37

شفاعی بجستان و امیدی: بررسی میزان آبشستگی پایین دست حوضچه...

- 9- Dargahi, B. 2003. Scour downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4): 417-426.
- 10-Day,S. and A. Sarkar. 2006. Scour downstream of an apron due to submerge horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3): 246 – 257
- 11-Farhoodi,J and K. Smith. 1985. Local scour profile downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research* 23(4): 343-359.
- 12-Hager,W.H. 1988. B-jump in sloping channel. *Journal of hydraulic research*, 26(5): 539-558.
- 13-Kindsvater,C.E. 1944. The hydraulic jump in sloping channels. *Trans, American Society of Civil Engineers*. 109: 1107–1120.
- 14-Laursen,E.M. 1952. Observation on the nature of scour. *Proceeding of 5th Hydraulic Conference*. University of Iowa, Iowa city, USA, pp. 179-197.
- 15-Novak,P. 1955. Study of stilling basin with special regard to their end sill. *Proceeding of 6th IAHR Conference*, The Hague, paper C15.
- 16-Novak,P. 1961. Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin. *Proceeding of 19th IAHR Conference*, Dubrovnik: 66-75.