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

محمود شفاعی بجستان[1] و صدیقه امیدی[2*]

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 دریافت: ۹۳/۳/۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۴

چکیده

آبشستگی پایین‌دست 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 ازگذشته 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 ١٤درصدی ارتفاع تنداب عمق، طول حفره و طول کل آبشستگی در حالت بدون بعد به طور متوسط، به ترتیب ۷ درصد، ١٤ درصد و ۱۹ درصد کاهش یافته و ارتفاع بدون بعد پشته بطور متوسط ٤٩ 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، تندآب.

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

M. Shafai Bajestan[1] and S. Omidi[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 پائین‌دست سدهای انحرافی یا تندآب‌ها هستند. بر اساس طبقه‌بندی کیندزواتر[1] (۱۹۴۴) بسته به اینکه موقعیت شروع پرش در سطح تندآب ونیز موقعیت انتهای طول غلتابی 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 انتهای مقطع شیب‌دار شروع گردد و عمق آب پایین‌دست با عمق ثانویه پرش برابر باشد، پرش نوع A تشکیل می‌گردد. اگر شروع پرش روی سطح شیبدار و انتهای طول غلتابی در حوضچه آرامش قرار گیرد، عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج، پرش را نوع B، اگر ابتدا و انتهای پرش روی تندآب و انتهای طول غلتابی 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. درچنین شرایطی طول کف‌بند صلب حوضچه برابر طول پرش هیدرولیکی نوع A محاسبه می شود. 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[2] (۱۹۵۲) اولین کسی بود که تشابه گسترش پروفیل‌های آبشستگی توسط جت افقی را بدون هیچ‌گونه مفهوم نظری گزارش کرد. نواک[3] (۱۹۵۵ و ۱۹۶۱) بیان نمود که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی نوع A را در برگیرد، عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می یابد. .نواک (۱۹۵۵ و ۱۹۶۱) با استفاده از معادله جایگر رابطه زیر را برای عمق آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش ارائه نمود و دریافت که کم ترین مقدار آبشستگی در حالت $y_t / y_{tmin} =$ 1.6 (y_{tmin} حداقل عمق پایاب)، و بیش ترین مقدار آبشستگی در حالت $y_t / y_{tmin} = 1$ رخ می‌دهد:

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

که در این رابطه d_s: حداکثر عمق فرسایشی (m)، H: اختلاف تراز آب در بالادست و پایین‌دست (m)، y_t: عمق پایاب (m)، q: دبی واحد عرض (m^2/s) و d_{90}: اندازه ذرات رسوب (mm) است.

کاتالکی[4] (۱۹۷۳) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک سرریز با حوضچه آرامش با طول $5y_t$ رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش ارائه نمودند:

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

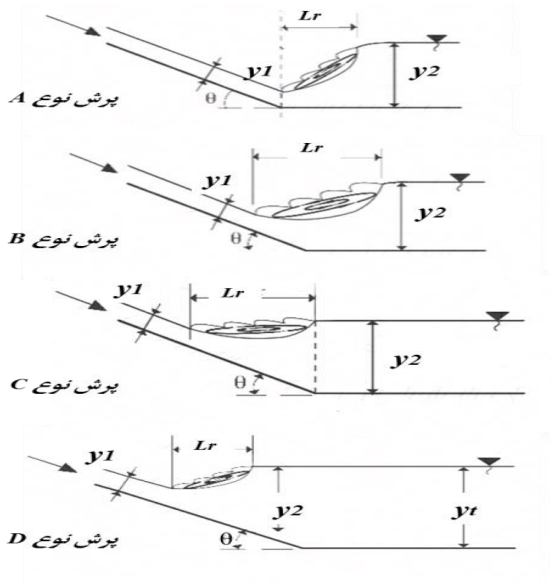
که در این رابطه H_1: اختلاف تراز آب بالادست از بستر اولیه (m)، d_{90}: اندازه ذرات (mm) و q: دبی در واحد عرض (m^2/s) می‌باشد.

برازرز[5] (۱۹۶۵) تحقیقات گسترده‌ای بر روی آبشستگی با استفاده از مواد بستر متفاوت با چگالی‌های مختلف و ترکیبات هندسی متنوع انجام داد. او رابطه‌ای برای تکامل زمان آبشستگی پیشنهاد داد و همچنین گزارش کرد که برای یک هندسه مشخص، پروفیل‌های آبشستگی در تمام زمان‌ها مشابه است. فرهودی و اسمیت[6] (۱۹۸۲ و ۱۹۸۵) مطالعاتی روی آبشستگی ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش معمولی (نوع ۱) پایین‌دست یک سرریز انجام دادند. در این آزمایش‌ها یک کف بند مسطح که طول آن تقریبا برابر طول پرش هیدرولیکی بود، استفاده شد و آبشستگی پایین‌دست سه نوع پرش مورد آزمایش قرار گرفت : پرش هیدرولیکی مستغرق (نوع B) ($y_t>y_2$ ، y_2 عمق مزدوج پرش هیدرولیکی است)، پرش هیدرولیکی متعادل (نوع A) و پرش هیدرولیکی پیشرونده به سمت پایین دست ($y_t<y_2$). بالاچاندار و همکاران[7] (۲۰۰۰) به بررسی تأثیر عمق پایاب بر آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی بدون کف‌بند پرداختند و نمودارهایی برای توسعه گودال آبشستگی در زمان‌های مختلف ارائه کردند. درگاهی[8] (۲۰۰۳) به مطالعه آبشستگی پایین‌دست 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 آبشستگی در مرکز فلوم ارائه نمود:

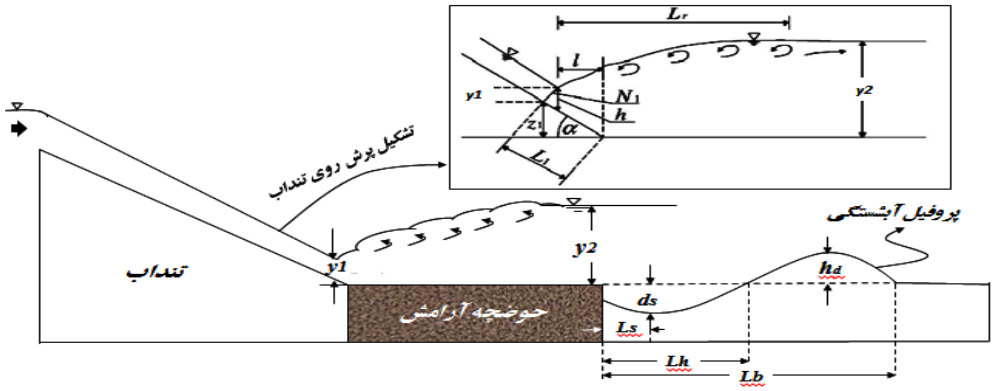
$$\frac{y_s}{h_0} = 1.7\ (\frac{h_0}{d_{50}})^{1/4.5} \qquad (۳)$$

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

1- Kindsvater
2- Laursen
3- Novak
4- catalki
5- Breusers
6- Farhoodi and esmit
7- Balachandar *et al.*
8- Dargahi



شکل ۱- انواع پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار



شکل ۲ – طرح‌واره‌ای از مدل آزمایشگاهی، حفره‌ی آبشستگی و مشخصات پرش هیدرولیکی نوع *B*

که در این روابط y_s. حداکثر عمق آبشستگی (m)، x_s. موقعیت محل حداکثر عمق آبشستگی از لبه انتهایی کف‌بند(m)، h_0. عمق آب روی سرریز (m) و D_{50}. عمق متوسط مصالح بستر (mm) می‌باشد.

دی و سرکار[1] (۲۰۰۶) آبشستگی در رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت و در پایین‌دست کف‌بند افقی به‌علت جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریچه را مورد بررسی قرار دادند و رابطه زیر را برای تعیین عمق آبشستگی پیشنهاد دادند:

$$\frac{ds}{b} = 1.241\, F_d^{0.85}\, \frac{L}{b}^{-0.19}\, \frac{y_t}{b}^{0.235}\, \frac{d_{50}}{b}^{0.193} \qquad (۵)$$

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

حمیدی‌فر و امید (۱۳۸۹) اثر اندازه ذره، عمق پایاب و عدد فرود را بر آبشستگی موضعی بستر ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریچه کشویی را بررسی کردند و دریافتند که تأثیر عمق پایاب به میزان عدد فرود ذره بستگی دارد. خلیلی شایان و فرهودی (۱۳۹۱) تشابه نیمرخ‌های آبشستگی حاصل از جریان مستغرق خروجی از زیر دریچه‌های کشویی در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس را بررسی کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که نیمرخ‌های آبشستگی 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 آبشستگی می‌شود. سیفی و همکاران (۱۳۹۲) عوامل موثر بر

1- Day and sarkar

آبشستگی پایین‌دست کف‌بند سرریز لبه پهن دوطرف شیبدار را شناسایی کردند و روابط ساده‌ای برای تعیین شکل گودال آبشستگی 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 آبشستگی در شرایط تشکیل این نوع پرش تاکنون مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است. حال با توجه به اهمیت پدیده‌ی آبشستگی و تخمین گستردگی آن در شرایط مختلف، در این تحقیق سعی شده تأثیر پارامترهای هیدرولیکی پرش نوع B بر میزان آبشستگی تعیین و روابطی برای تخمین آن ارائه شود.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش به تعداد زیادی از متغیرهای مربوط به جریان و همچنین رسوبات بستگی دارد. این متغیرها عبارتند از:

$$f(\xi, y_1, y_2, v, g, \mu, \rho, \rho_s, D_s, z, \alpha)=0 \qquad (۶)$$

که در آن D_s: اندازه قطر ذرات رسوبی بستر برحسب متر، ξ: نمایانگر ابعاد آبشستگی 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 v_1، y_1و ρ به عنوان متغیرهای تکراری و به کار بردن قضیه باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج گردید:

$$f(F_r, R_e, Y, E, \frac{D_s}{y_1}, \frac{\xi}{y_1}, G_s, \alpha) = 0 \qquad (۷)$$

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[1] ۱۹۸۸) ، D_s: اندازه متوسط ذرات رسوب، $G_S = \frac{\rho_S}{\rho}$ و α: شیب سرریز می‌باشد.

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:

$$\frac{\xi}{y_1} = f(F_r, Y, E) \qquad (۸)$$

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، تنداب با ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و با شیب ۳۰ درجه، از جنس پلکسی‌گلاس نصب شد. در پایین‌دست تنداب یک حوضچه‌ی آرامش USBR نوع یک، طراحی شد. این نوع حوضچه درحقیقت 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. پایین‌دست حوضچه مصالح رسوبی با قطر متوسط ۱/۸۵ میلی‌متر، بعنوان مصالح بستر رودخانه قرار داده شد و از دریچه 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، دریچه انتهای 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 دریچه پایین دست فلوم به آهستگی باز می‌گردید تا پرش در موقعیت مورد نظر قرار گیرد. پس از تثبیت موقعیت پرش، پروفیل سطح آب و به‌خصوص اعماق مزدوج پرش با استفاده از عمق سنج با

1- Hager

دقت ۰/۱ میلی‌متر برداشت می‌گردید. چون هدف این مطالعه، مقایسه میزان آبشستگی بین دو نوع پرش A و B بود و تکمیل فرآیند آبشستگی 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 آبشستگی در همین زمان اتفاق می‌افتد. پس از آن پمپ خاموش شده و دریچه انتهای فلوم به طور کامل بسته می‌شد تا آب داخل فلوم 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 وشکاف باز بستر نفوذ می‌نماید و باعث انتقال مواد بستر به پایین‌دست و ایجاد حفره می‌گردد. این مواد در فاصله اندکی از حوضچه ته‌نشین شده و در نتیجه تپه‌ای ماسه‌ای در پایین‌دست 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 پایین‌دست حفره می‌باشد.

در شکل (۴) تغییرات پروفیل آبشستگی 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 آبشستگی 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 آبشستگی (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 آبشستگی 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 آبشستگی نداشته و در بعضی موارد عمق آبشستگی بیشتری نیز مشاهده شد. همچنین تاثیر انتقال پرش به ارتفاع ۱۴ درصدی ارتفاع تنداب روی ابعاد بدون بعد آبشستگی نیز محاسبه شد و نتایج به این صورت به دست آمد که عمق، طول حفره و طول کل آبشستگی 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 فزایش می‌یابد. میزان تغییرات در دو حالت بابعد و بدون بعد در ارتفاع ۱۴درصدی 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 ۱۴درصد ارتفاع تنداب)، طول حفره، طول کل آبشستگی، 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.

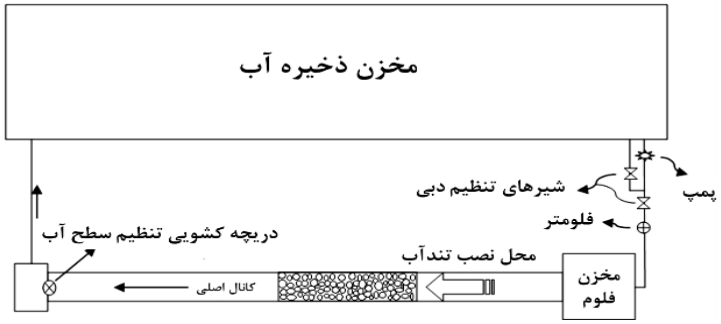
همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه اصطکاک بین ذرات رسوب و شیشه کمتر از اصطکاک بین خود ذرات است، حفره آبشستگی در دو انتهای عرضی فلوم دارای عمق بیشتری می‌باشد و در قسمت‌های میانی فلوم دارای عمق نسبتاً یکسانی می‌باشد (قسمت‌های تیره‌تر در نمای دوبعدی نشانگر عمیق‌تر بودن حفره می‌باشد).

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق

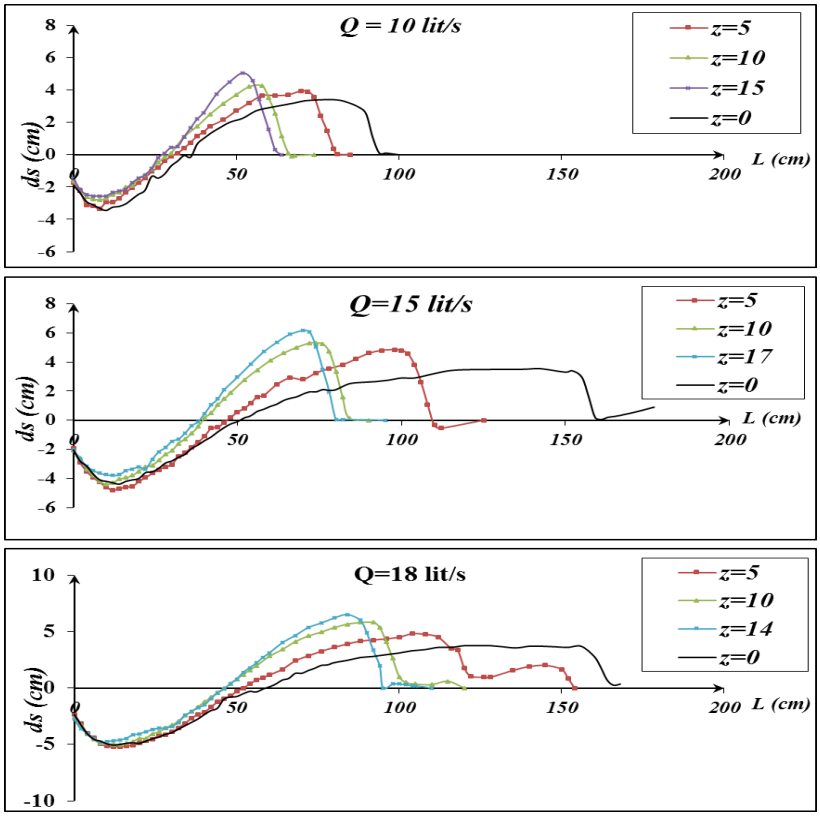
Y	E	F_r	Q (lit/s)
۹/۳ – ۲۸/۲	۰/۱ – ۰/۶۶	۵/۳ – ۱۲	۵ –۱۸

جدول۲- تغییر ابعاد آبشستگی با انتقال پرش به ارتفاع ۱٤درصدی تنداب

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



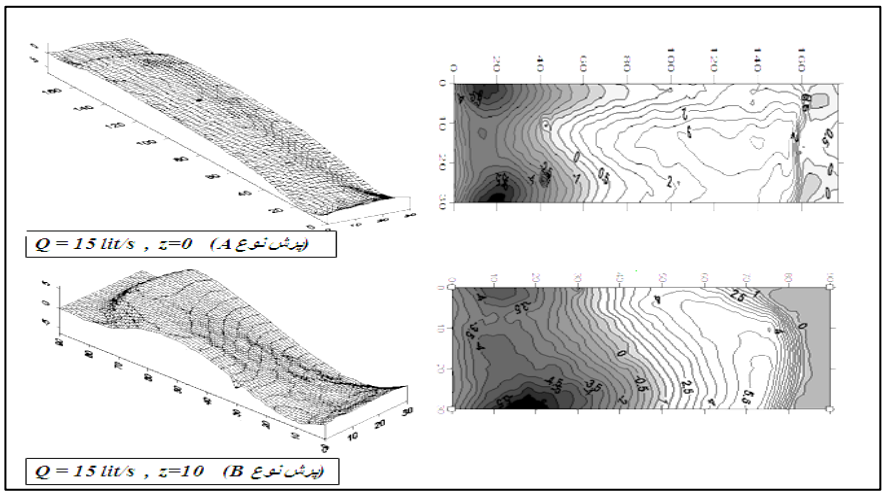
شکل ۳- پلان آزمایشگاهی و تجهیزات آن



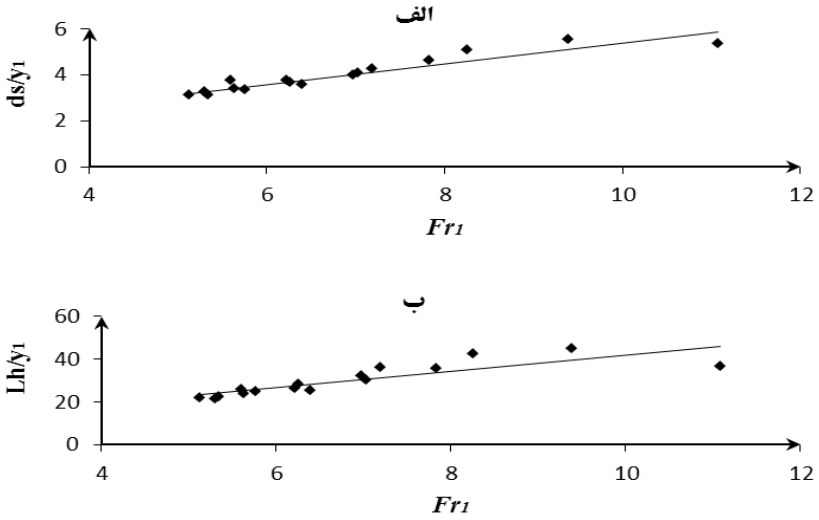
شکل ٤- تغییرات پروفیل آبشستگی با تغییر در دبی و محل تشکیل پرش

تأثیر عدد فرود روی میزان آبشستگی پرش هیدرولیکی نوع B

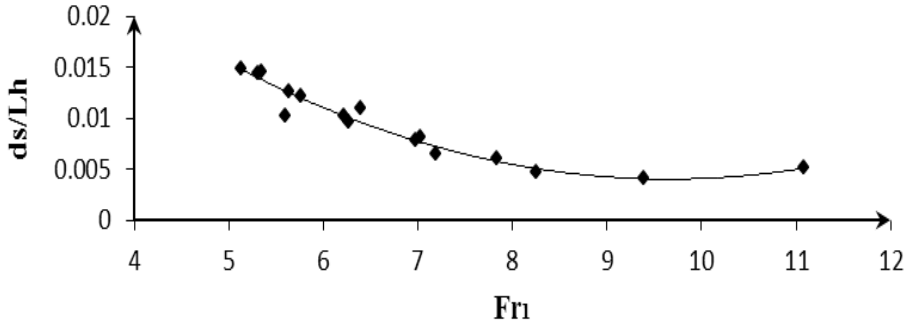
شکل‌های (۶ الف و ب) به ترتیب میزان عمق و طول حفره آبشستگی بدون بعد را در برابر عدد فرود در محل تشکیل عمق اولیه پرش، در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد بین عدد فرود و عمق و همچنین طول آبشستگی بدون بعد رابطه خطی برقرار است و با افزایش عدد فرود میزان عمق و طول بی‌بعد آبشستگی افزایش می‌یابد. حال اگر نسبت عمق بیشینه به طول آبشستگی ($\frac{d_s}{L_h}$) نسبت به عدد فرود رسم شود، (شکل ۷) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، نسبت بیشترین عمق آبشستگی به دست آمده در طول آزمایش به طول حفره کاهش می‌یابد و آن به این معناست که تاثیری که عدد فرود در مقطع فوق بحرانی پرش نوع B روی طول آبشستگی می‌گذارد به مراتب بیشتر از تأثیر آن بر عمق آبشستگی است. این موضوع با رسم عمق بدون بعد آبشستگی ($\frac{d_s}{p}$) در برابر طول بی بعد آبشستگی ($\frac{L_h}{p}$) 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 ($\frac{L_h}{p}$) گرایش دارد و طول آبشستگی با سرعت بیشتری نسبت به عمق آن در حال افزایش است.



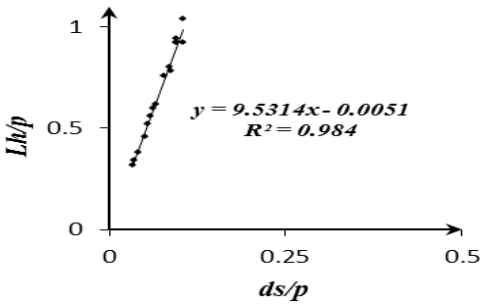
شکل ۵- نمای دوبعدی و سه بعدی پروفیل آبشستگی در پرش نوع A و B



شکل ٦ الف) تغییرات عمق بیشینه‌ی آبشستگی نسبی نسبت به عدد فرود ، ب) تغییرات طول حفره بیشینه آبشستگی در برابر عدد فرود



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



شکل ۸ – تغییرات طول آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی

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 برازش 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:

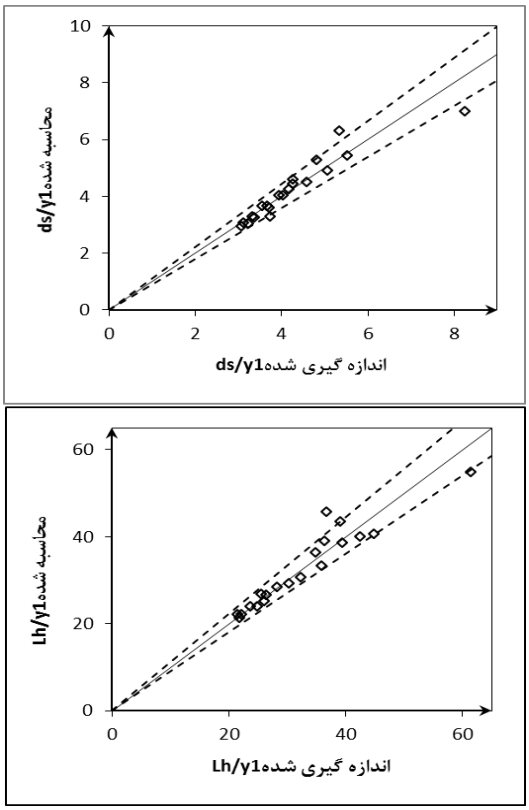
$$\frac{d_s}{y_1} = 1.274F_{r1}^{0.725}\,Y^{-0.03}\,E^{0.046} \qquad (۹)$$

$$\frac{L_h}{y_1} = 8.51F_{r1}^{0.954}\,Y^{-0.207}\,E^{0.016} \qquad (۱۰)$$

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.

بررسی دقت روابط سایر محققین

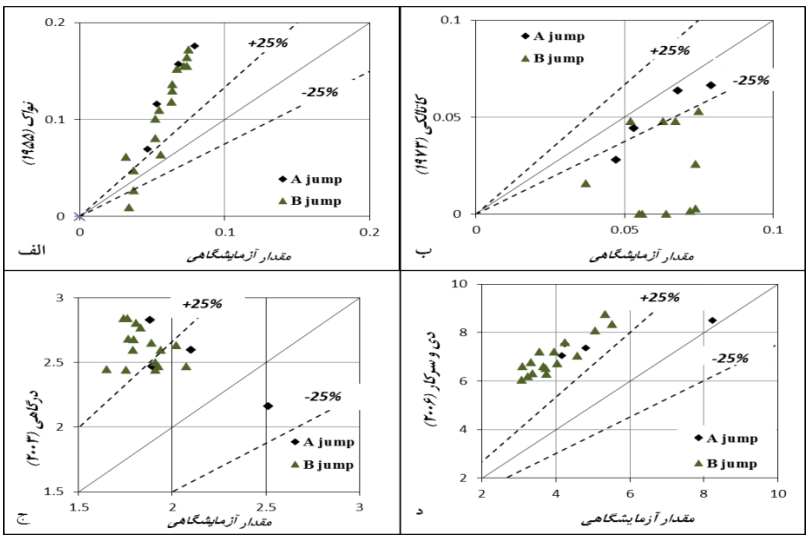
به منظور بررسی دقت روابط ارائه شده توسط سایر محققین در زمینه پیش‌بینی عمق بیشینه آبشستگی، ابتدا عمق آبشستگی با روابط (۱) تا (۵) که در مقدمه ارائه شدند محاسبه گردید سپس میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از هر روش با نتایج به‌دست آمده در آزمایشگاه از رابطه $R = \frac{d_s(m)-d_s(c)}{d_s(m)}$ محاسبه شد و میانگین 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 ودرصد 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 به‌دلیل 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_t) 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.



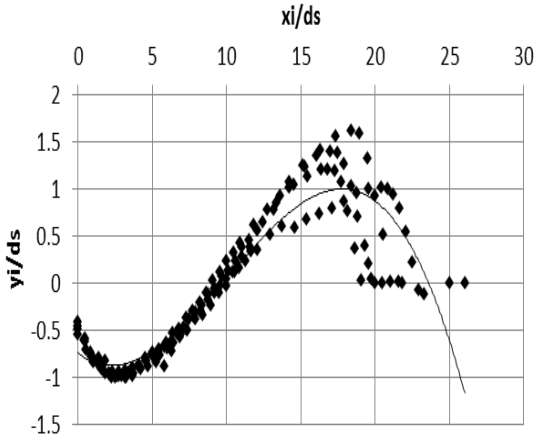
شکل ۹-نمودار مقایسه ds/y1 و Lh/y1 محاسبه شده از روابط (۹) و (۱۰) در برابر مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌ها

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

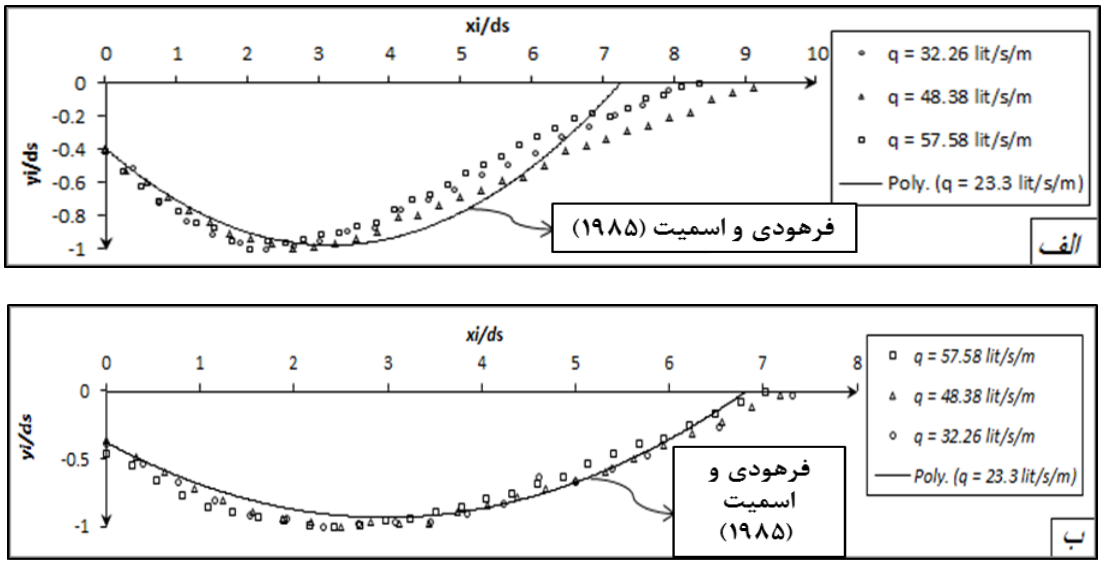
نوع پرش	معادله ۱	معادله ۲	معادله ۳	معادله ۵
نوع A	۱۰۵	۱۹/۷	۲۹/۷	۵۰/۶
نوع B	۸۶/۹	۱۵۹/۴	۳۶/۱۴	۸۰



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



شکل ۱۱ – پروفیل بی‌بعد آبشستگی در شرایط مختلف



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

بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی

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

می‌شود، به‌طوری که بیشترین مقدار x_i/d_s در آزمایش‌های فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) حدود ۷٫۳ و در آزمایش‌های تحقیق حاضر بطور متوسط ۸٫۵ می‌باشد. این در حالی است که در پرش هیدرولیکی نوع B نتایج بسیار نزدیک به‌هم است. لازم به ذکر است که آزمایش‌های فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) در پرش نوع B در حالت $y_t/y_2 = 1.25$ انجام شده بود. در شکل (۱۲-ب) نیز سعی شد از نتایج آزمایش‌هایی استفاده شود که y_t/y_2 آنها در محدوده ۱٫۲ تا ۱٫۳ باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی برخی از پارامترهای تاثیرگذار در آبشستگی 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 آبشستگی مشاهده شد که با گذشت زمان رو به تحلیل می‌رفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که افزایش دبی باعث ایجاد عمق و طول آبشستگی بیشتری می‌شود. همچنین تغییرات میزان آبشستگی بر حسب تغییر در محل تشکیل پرش روی تنداب بررسی شد و مشخص شد که پرش هیدرولیکی نوع B در مقایسه با پرش کلاسیک آبشستگی کمتری ایجاد می‌کند و 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، آبشستگی پایین‌دست آن کاهش می‌یابد. با رسم عمق و طول بیشینه آبشستگی در برابر اعداد فرود در محل ایجاد عمق اولیه پرش نوع B مشاهده شد که با افزایش عدد فرود، میزان عمق وطول بیشینه آبشستگی افزایش می‌یابد و نسبت بیشترین عمق آبشستگی به‌دست 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 آبشستگی می‌گذارد به مراتب بیشتر از تأثیر آن بر عمق آبشستگی است. بررسی برخی روابط موجود برای پیش‌بینی عمق آبشستگی نشان داد که این روابط برای تعیین عمق آبشستگی در شرایط تشکیل پرش نوع B دقت کافی ندارند. همچنین با رسم پروفیل‌های بدون بعد آبشستگی، وجود تشابه بین این پروفیل‌ها تأیید شد و تشابه در حفره آبشستگی بسیار نزدیک با نتایج فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) ملاحظه شد. درپایان نیز معادله‌هایی برای محاسبه عمق و طول حفره آبشستگی تحت تأثیر پرش نوع B استخراج گردید.

منابع

۱- ابریشمی، ج و س.م، حسینی. ۱۳۸۸. هیدرولیک کانال‌های باز، نشر مشهد.۵۱۰-۵۰۶.

۲- حمیدی‌فر، ح و ح.ا. امید. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی آبشستگی رسوبات غیر چسبنده در پایین‌دست کف‌بند. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۱(۲): ۲۸ – ۱۷.

۳- خلیلی شایان، ح. و ج، فرهودی. ۱۳۹۱. نیمرخ‌های آبشستگی و تغییرات تنش‌های برشی در حفره در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس. مجله علمی-پژوهشی، ۷ (۴): ۹۹-۸۵.

۴- سیفی، ا، حسین‌زاده دلیر، ع و د، فرسادی زاده. ۱۳۹۲. آبشستگی در پایین‌دست سرریز لبه پهن دوطرف شیبدار. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳ (۴): ۱۸۸-۱۷۷.

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 dimentional 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 Larg Dams, Madrid, Q41 R2: 23-37

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 Ingineering, 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 Ioha, Ioha city, USA, pp. 179-197.

15- Novak,P. 1955. Study of stilling basin withspecial 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, Dubrovink: 66-75.