

ارزیابی پرش هیدرولیکی روی حوضچه دنداندار بلوکی

محبوبه جم¹، اسدالله مردشتی^{2*}، ناصر طالب بیدختی³

1- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

2- استادیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

3- استاد بخش راه و ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

*شیراز، کدپستی 7143955588

a.mardashti@yahoo.com

چکیده - مستهلک کردن انرژی جنبشی ایجاد شده در پنجه سرریز، برای جلوگیری از فرسایش بستر رودخانه در پایین‌دست، بسیار لازم و ضروری است. هدف این پژوهش، ارائه حوضچه زبر شده به وسیله اجزای زبری (بلوک‌های دنداندار) با شکل هندسی و آرایش چیدمان جدید و نهایتاً بررسی تأثیر پارامترهای مختلف جهش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود 11-14، روی آن است. نتایج آزمایشگاهی کاهش پارامترهای جهش هیدرولیکی را روی حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به بستر صاف نشان دادند، به طوری که طول پرش و عمق ثانویه پرش به ترتیب 50-60 درصد و 10-12 درصد کاهش داشته است. نهایتاً در حوضچه دنداندار بلوکی، با ایجاد پرشی معادل با پرش روی بستر صاف، طول زبری مورد نیاز و طول جهش هیدرولیکی آن با بستر صاف مقایسه شد که به میزان 55-60 درصد در طول حوضچه و 35-40 درصد در طول جهش هیدرولیکی، کاهش مشاهده گردید.

کلیدواژگان: پرش هیدرولیکی، دنداندار بلوکی، حوضچه آرامش، عدد فرود، مدل آزمایشگاهی.

1- مقدمه

و ثانویه پرش هیدرولیکی است. Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی است که از رابطه (2) محاسبه می‌شود (Henderson, 1966):

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot Y_1}} \quad (2)$$

در این رابطه V_1 سرعت جریان فوق بحرانی در ابتدای پرش است.

یکی دیگر از پارامترهای جهش هیدرولیکی، طول پرش L_r است. طول پرش، معمولاً از ابتدای پرش (پنجه سرریز) تا جایی در نظر گرفته می‌شود که عمق جریان به حداکثر مقدار خود رسیده باشد (Hager, 1992).

پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و افقی توسط Peterka (1958) بررسی شد و سپس توسط Vischer and Hager (1995) دنبال گردید. ارتباط بین پارامترهای پرش هیدرولیکی در پرش هیدرولیکی معمولی روی سطح صاف و بدون زبری توسط رابطه بلانگر ارائه شده است (Henderson, 1966):

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

که در این رابطه Y_1 عمق جریان فوق بحرانی در پنجه سرریز و یا عمق اولیه پرش، Y_2 عمق جریان زیر بحرانی

داده است. (2009) Shafai Bejestan and Neisi روی پرش هیدرولیکی بر بستر با زبری مکعبی شکل، با تراکم چیدمان مختلف تحقیق کرده‌اند که طی آن استهلاک انرژی پرش روی آنها با استهلاک انرژی پرش روی بستر بدون زبری مقایسه شده است. در همین سال، شفافی بجستان و همکاران (1386) پژوهش دیگری روی پرش هیدرولیکی بر بسترهمین بلوک‌ها انجام دادند، با این تفاوت که بلوک‌ها طوری چیده شده بودند که پلان آن‌ها به صورت لوزی است. همچنین Abbaspour et al. (2009) بر روی تأثیر بستر سینوسی روی پارامترهای مختلف جهش هیدرولیکی تحقیق کرده‌اند که کاهش پارامترهای جهش را در مدل خود نسبت به بستر صاف مشاهده کردند. تحقیق دیگری توسط Zahed et al. (2010) روی شکل‌گیری پروفیل آب شستگی پایین‌دست حوضچه آرامش با آستانه انتهایی صورت گرفته است که در طی آن ارتباط مناسبی بین پروفیل گودال با جهش هیدرولیکی ایجاد شده مشاهده شده است.

(2010) Elsebaie and Shabayek تأثیر شکل‌های مختلف کنگره‌ای بر جهش هیدرولیکی را مطالعه کرده‌اند که تأثیر این شکل‌ها (مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و سینوسی) بر پارامترهای جهش تقریباً یکسان بود، اما همگی باعث کاهش پارامترهای جهش، نسبت به بستر صاف می‌شدند. (2011) Aboulatta et al. تأثیر پرش هیدرولیکی در طول‌ها و تراکم‌های مختلفی از زبری T شکل را بررسی کرده‌اند. همچنین (2011) Fathi Moghadam et al. بر روی کاهش طول حوضچه آرامش با آستانه انتهایی بلند بررسی انجام داده‌اند که اثر مؤثر و مثبت آن را مشاهده کرده‌اند. ابریشمی و اسماعیلی (1376) و اسماعیلی و ابریشمی (1379) نیز به ترتیب پرش هیدرولیکی روی کف‌های با شیب معکوس و پله مثبت و پله منفی در انتها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها، کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را در شیب معکوس

جریان ریزشی از روی سرریزها و شوت‌ها، انرژی جنبشی بالایی در پنجه سرریز دارد. چنین جریانی با انرژی جنبشی بالا، دارای قدرت تخریب‌کنندگی قابل توجهی است که ممکن است پایداری کل سازه هیدرولیکی مورد نظر را زیر سؤال ببرد. بنابراین باید به طریقی انرژی این جریان مستهلک شود. از جمله سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش است. ابعاد حوضچه آرامش تابع مشخصات پرش بوده و با توجه به شدت جریان و عدد فرود در ابتدای پرش، نیاز به تمهیداتی برای مقاومت در برابر جریان دارند. برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش، اقداماتی چون ساخت بلوک‌های پای شوت و یا بلوک‌های میانی به منظور اتلاف بیشتر انرژی جنبشی جریان در محدوده پرش و در نتیجه آن، کاهش پارامترهای جهش، انجام می‌شود. ممکن است در مواقعی این بلوک‌ها در معرض کاویتاسیون قرار بگیرند. یکی از روش‌های مقاوم‌سازی حوضچه نسبت به کاویتاسیون و فرسایش، صاف بودن بستر حوضچه و یا استفاده از اجزای زبری به صورت تاج هم تراز با کف بستر بالادست، می‌باشد (Ead et al., 2000). این زبری‌ها در کاهش طول و عمق ثانویه پرش نقش مؤثری دارند.

تحقیقات زیادی روی این پدیده در زمینه‌های مختلف از جمله طول پرش، پروفیل سطح آب، میزان استهلاک و غیره به روش‌های مختلف آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. در ادامه به خلاصه‌ای از تحقیقات آزمایشگاهی اشاره شده است.

(1985) Farhoudi and Smith روی پروفیل‌های آب شستگی در پایین‌دست پرش هیدرولیکی پژوهشی انجام داده‌اند. این تحقیق روی مصالح مختلف صورت گرفته و ارتباط بین ابعاد پروفیل گودال آب شستگی، با مصالح مختلف و شرایط جریان متفاوت بررسی شده است.

پژوهش دیگری را (2008) Pagliara et al. روی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر شده توسط رسوبات انجام

دنداندار استفاده شده در پایین دست سرریز، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز قرار دارد که به ترتیب شامل اجزای زیر است: (1) مخزن آرامش جریان در بالادست کانال که توسط پیژومتر نصب شده کنار آن به همراه یک خط کش قائم، تراز سطح آب ورودی به سیستم، قابل برداشت می باشد (2) شوت شیشه ای به عرض 20 سانتی متر، طول 4 متر و دیواره های شیشه ای به ارتفاع 50 سانتی متر (3) کانال افقی حوضچه شنی به عرض 20 سانتی متر، طول 4 متر، عمق شن 30 سانتی متر و 40 سانتی متر لبه آزاد (4) مخزن پایین دست کانال به ابعاد 3/5 متر در 3 متر و عمق 70 سانتی متر با احتساب 10 سانتی متر لبه آزاد (5) پمپ سانتریفیوژ با قدرت آب دهی حداکثر 60 لیتر در ثانیه در ارتفاع 10 متر (6) شیر کنترل کشویی به قطر 10 سانتی متر (4 اینچ) (7) دستگاه سنجش دبی مغناطیسی با دقت 0/1 لیتر در ثانیه (8) لوله فلزی انتقال به قطر 10 سانتی متر (4 اینچ) به طول کلی 11/5 متر که سیمای شماتیک مجموعه، در شکل 1 ارائه شده است. مشخصات شن مورد استفاده در حوضچه شنی، در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات شن مورد استفاده در حوضچه شنی

Φ ($^{\circ}$)	C (Kg cm^{-2})	D_{50} (mm)	γ_s (gr cm^{-3})	γ_d (gr cm^{-3})
41	0	25	1/862	1/475

برای اندازه گیری عمق اولیه و ثانویه پرش در کانال حوضچه شنی، از ارتفاع سنج الکترونیکی با دقت 0/01 میلی متر استفاده شده است و عمق جریان از میانگین گیری اعماق برداشت شده در راست، چپ و وسط هر مقطع از کانال محاسبه شده است و برای اندازه گیری دبی جریان از فلومتر مغناطیسی با دقت 0/1 لیتر در ثانیه استفاده شده است. همچنین، طول پرش هیدرولیکی، توسط شبکه بندی 10 سانتی متری که روی یکی از دیواره های کناری حوضچه ایجاد شده است، برداشت شد.

با پله مثبت و افزایش عمق ثانویه و طول پرش را با پله منفی، نشان داد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل آزمایشگاهی، به بررسی پرش هیدرولیکی و خصوصیات آن در مقطع مستطیلی کف سازی شده توسط بلوک های دنداندار با شکل هندسی و چیدمان نوآوری شده، پرداخته شده است.

2- مواد و روش ها

2-1- تحلیل ابعادی

پارامترهای وابسته مؤثر برای آنالیز ابعادی هر جریان کانال روباز باید شامل خصوصیات فیزیکی سیال، مشخصه های جریان و مؤلفه های هندسی بستر و شرایط مرزی جریان مانند هندسه کانال و شرایط جریان ورودی باشد. بر این اساس، تحلیل ابعادی مسأله، به صورت رابطه (3) نشان داده شده است.

$$f(L_r, Y_1, Y_2, h, q, \rho, \mu, g, L_r) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه L_r طول حوضچه آرامش، q دبی در واحد عرض، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی، ρ جرم مخصوص و h ارتفاع دنداندار بلوکها است.

با استفاده از روش باکینگهام، رابطه (3) به شکل رابطه (4) در می آید:

$$f_1(L_r/Y_1, Y_2/Y_1, h/Y_1, Fr_1, Re, L_r/Y_1) = 0 \quad (4)$$

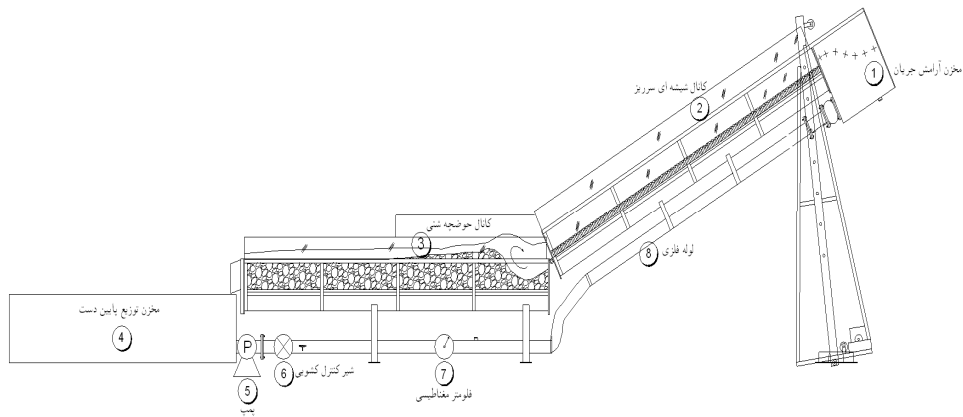
که Re عدد رینولدز است.

با توجه به بالا بودن عدد Re و امکان صرف نظر کردن از آن و از طرف دیگر ثابت بودن h (ارتفاع دنداندار بلوکها)، رابطه (4) به صورت رابطه (5) خلاصه می شود.

$$Y_2/Y_1 \text{ or } L_r/Y_1 = f_2(Fr_1, L_r/Y_1) \quad (5)$$

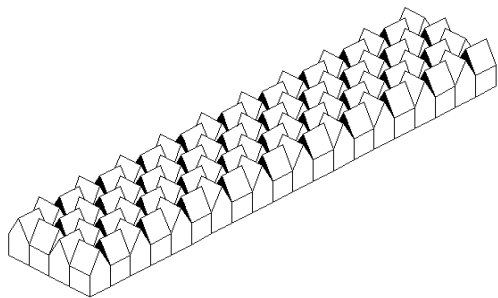
2-2- ساختار آزمایشگاهی، مدل و روش آزمایش

مجموعه آزمایشگاهی متشکل از کانال سرریز و حوضچه شنی در پایین دست، برای انجام آزمایش عبور جریان در دبی های مختلف سرریز برای طول های متفاوت بلوک های

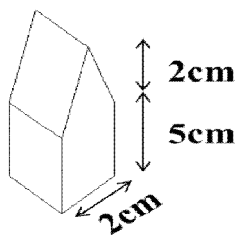


شکل 1 مدل آزمایشگاهی

آب زیر حوضچه جلوگیری می‌کند.



الف) نمای شماتیک آرایش قرارگیری دندان‌های بلوکی در کف حوضچه



ب) نمای شماتیک و ابعادی از یک نمونه دندان‌های بلوکی (از جنس تفلون)

شکل 2 شکل هندسی و چیدمان بلوک‌های دندان‌دار

4-2- روش انجام آزمایش

این پژوهش شامل 4 مرحله است که در زیر به ترتیب شرح داده شده‌اند:

به منظور تنظیم محل تشکیل پرش و با در نظر گرفتن این مسأله که جریان زیر بحرانی از پایین دست کنترل می‌شود، از یک دریچه در انتهای حوضچه استفاده شده است. با تغییر بازشدگی این دریچه، پرش در امتداد کانال جابه‌جا می‌شود. با توجه به توان پمپ و ارتفاع دیواره‌های شیشه‌ای شوت و حوضچه شنی، طیف عدد فرودهای مورد آزمایش بین 11-14 بوده است.

2-3- مدل آزمایشگاهی

بلوک‌های دندان‌دار به کار گرفته شده در این پژوهش، از جنس تفلون ساخته شده‌اند و شکل هندسی آنها در شکل (2- الف) نشان داده شده است و ابعاد آنها $7 \times 2 \times 2$ سانتی‌متر است که پایه آن در بستر خاک فرو می‌رود. برای استهلاک بیشتر توسط این بلوک‌ها، چیدمان آنها به گونه‌ای است که بلوک‌ها یکی در میان نسبت به هم 90 درجه چرخش دارند (شکل 2- ب). در نتیجه انتظار می‌رود که علاوه بر استهلاک جریان در اثر برخورد به این مواع، فضا و حفره‌های مناسب بین بلوک‌ها، سبب ایجاد و استقرار چرخابه‌ها و در نتیجه سبب ایجاد استهلاک انرژی شود. همچنین به علت یکپارچه نبودن بلوک‌ها و وجود درز بین آنها، استفاده از این نوع زبری در سازه‌های واقعی، از بروز نیرو و مشکلات مربوط به فشار بالا برنده

پارامترهای نظیر خود در پرش هیدرولیکی مرحله سوم (در هر فرود نظیر خود)، باشد. از سوی دیگر این طول زبری معادل و طول پرش هیدرولیکی روی آن، با حالت پرش بر بستر صاف مقایسه شد. در این حالت، در واقعیت میزان استهلاک انرژی توسط پرش هیدرولیکی، یکسان بوده است و هدف مقایسه طول پرش و طول زبری مورد نیاز برای ایجاد یک پرش با استهلاک انرژی یکسان بر بستر صاف است.

3- بحث و نتیجه گیری

3-1- نتایج حاصل از مرحله اول

شکل 3 مقایسه عمق ثانویه آزمایشگاهی و تئوری (رابطه 1) را نشان می‌دهد که تفاوت آنها به کمتر از 5% می‌رسد. همچنین مقایسه‌ای بین طول پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، با طول پرش ارائه شده توسط USBR (با توجه به عدد فرود) در شکل 4 ارائه شده است.

3-2- نتایج حاصل از مرحله دوم

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی روی بستر دنداندار بلوکی 10-12 درصد کاهش را نسبت به پرش بر بستر صاف را به همراه داشته است که نتیجه آن به صورت نمودار بدون بعد، در شکل 5 ارائه شده است. همچنین طول پرش هیدرولیکی نیز به میزان 50-60 درصد نسبت به پرش بر بستر صاف، کاهش یافت. نتیجه این مسأله در شکل 6 نشان داده شده است. نهایتاً شکل 7، مقایسه پروفیل سطح آب را در حالت شکل‌گیری پرش روی بستر صاف و دنداندار بلوکی برای تعدادی از اعداد فرود نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، پروفیل پرش هیدرولیکی در حوضچه دنداندار بلوکی از طول و عمق ثانویه کمتری برخوردار بوده و در واقع پرش به طرف بالادست جمع شده است. در واقع این میزان کاهش در پارامترهای پرش، ناشی از تأثیر زبری به کار رفته در بستر حوضچه است که از یک

مرحله اول، پرش هیدرولیکی روی بستر افقی شیشه‌ای: در این مرحله کل حوضچه پایین‌دست با شیشه و بدون زبری، کف‌بندی شده و پرش هیدرولیکی توسط تنظیم دریچه واقع در پایین‌دست کف شیشه‌ای، تشکیل شد و پارامترهای عمق اولیه، عمق ثانویه، طول پرش در هر دبی (برای هر عدد فرود) برداشت گردید.

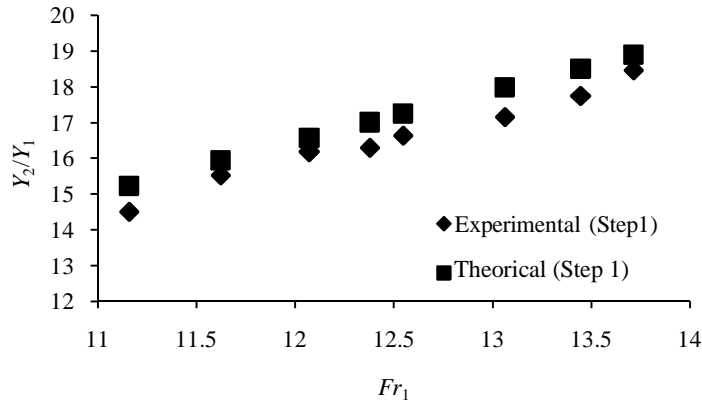
مرحله دوم، پرش هیدرولیکی روی بستر دنداندار در طول‌های مختلف: در این مرحله، برای هر دبی (هر عدد فرود)، کف حوضچه را به اندازه طول پرش اندازه‌گیری شده در مرحله اول، با استفاده از بلوک‌های دنداندار پوشانده و بقیه طول حوضچه، هم سطح با کف شیشه‌ای با شن پوشانده شد. بلوک‌ها طوری در حوضچه قرار گرفتند که تراز تاج آنها هم تراز پایین‌دست شوت بود. در هر آزمایش پارامترهای مختلف پرش هیدرولیکی، پروفیل سطح آب در محدوده پرش و پروفیل گودال تشکیل شده بعد از کف زبر شده توسط بلوک‌ها، در اثر انرژی موجود در انتهای پرش، برداشت شد. لازم به ذکر است که پروفیل گودال، توسط شبکه‌بندی 10 سانتی‌متری که روی یکی از دیواره‌های کناری حوضچه ایجاد شده است، برداشت می‌شد. هدف از انجام این مرحله بررسی تأثیر طول کف زبر توسط بلوک‌های دنداندار، روی پارامترهای مختلف جهش بوده است.

مرحله سوم، پرش هیدرولیکی روی بستر افقی شیشه‌ای و شنی: در این مرحله روی کف حوضچه را با توجه به طول پرش اندازه‌گیری شده در مرحله اول برای هر دبی (عدد فرود)، شیشه نصب کرده و بقیه طول حوضچه، هم سطح با کف شیشه‌ای با شن پوشانده شد و دوباره پارامترهای پرش و پروفیل گودال تشکیل شده بعد از کف شیشه‌ای، در اثر انرژی موجود در انتهای پرش، برداشت شد.

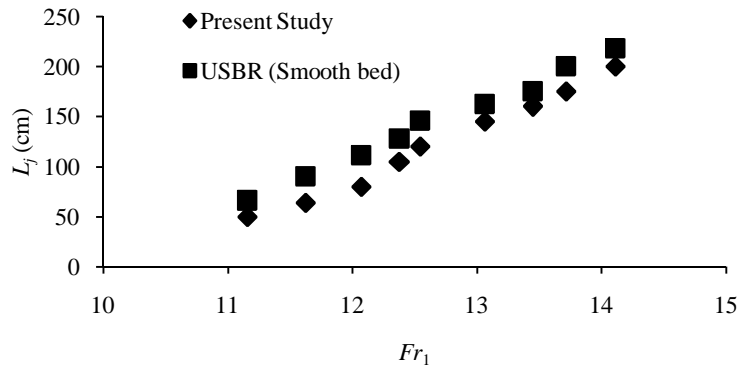
مرحله چهارم: پرش هیدرولیکی روی بستر دنداندار به اندازه طول معادل: در این مرحله طول زبری‌ها (طول معادل) به گونه‌ای انتخاب شد که در آن، میزان عمق ثانویه، عمق پایاب و عمق گودال آب شستگی، برابر با

بلوک‌ها، برای ایجاد گردابه و در نتیجه استهلاک بیشتر انرژی است.

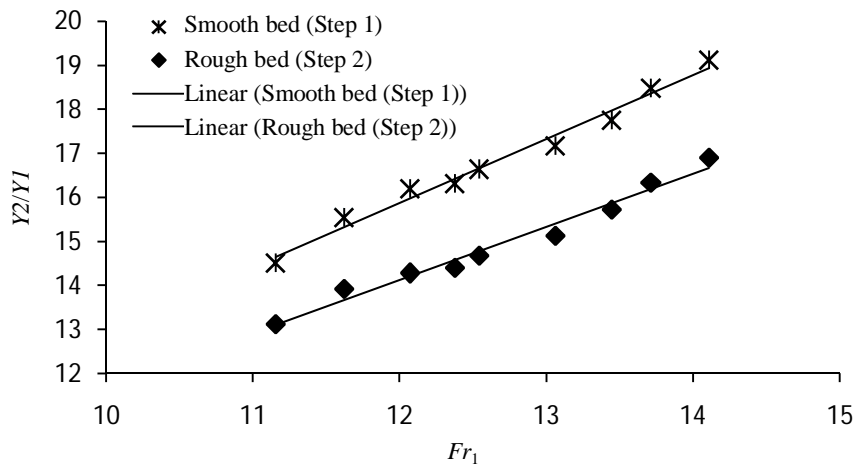
طرف به دلیل برخورد جریان با عناصر زبر و از طرف دیگر به دلیل شکل چیدمان این عناصر و وجود فضا بین



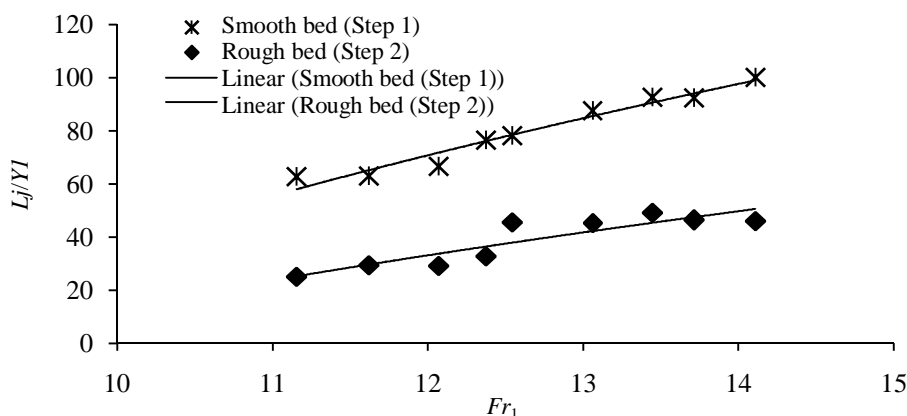
شکل 3 مقایسه عمق ثانویه پرش آزمایشگاهی و تئوری روی بستر صاف



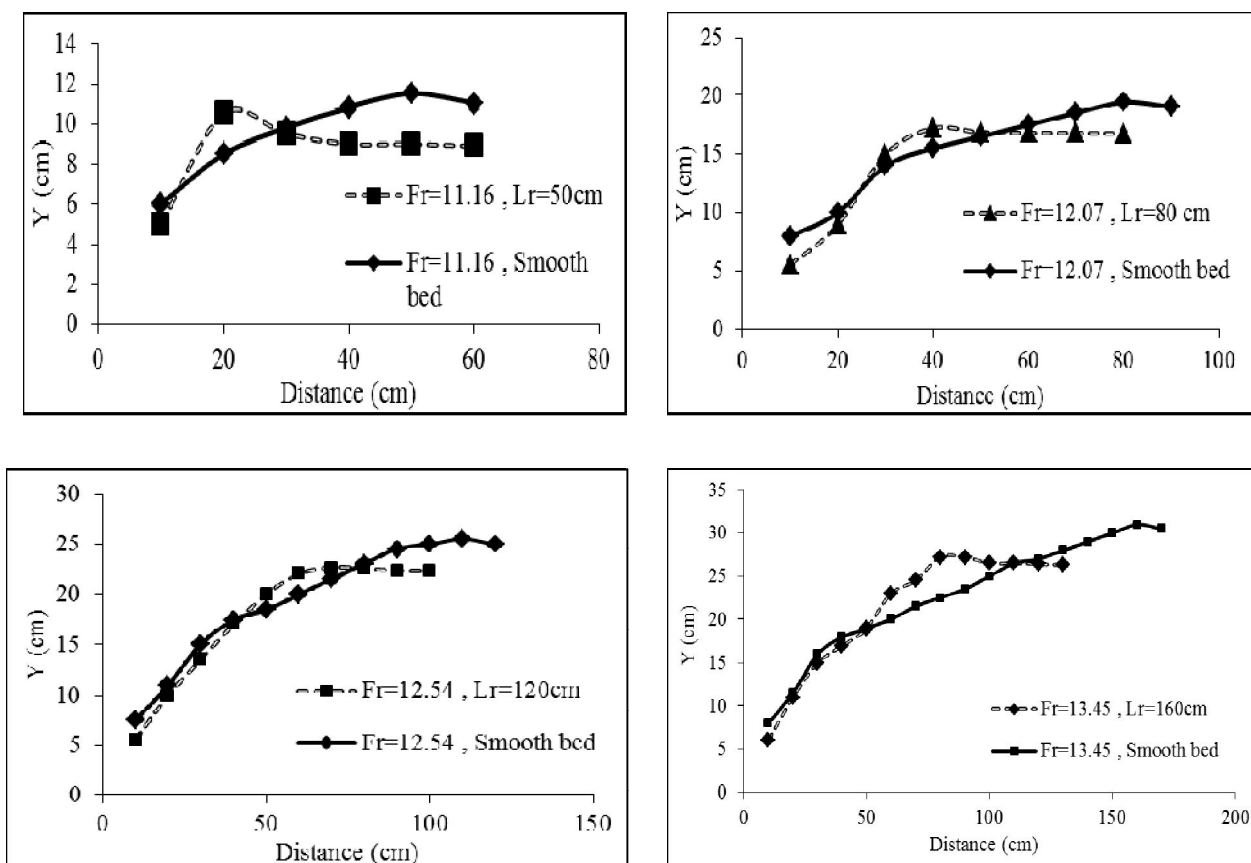
شکل 4 مقایسه طول پرش روی بستر صاف مطالعه حاضر با USBR (Peterka, 1958)



شکل 5 مقایسه نسبی عمق ثانویه پرش روی بستر صاف و بستر دندانه‌دار بلوکی



شکل 6 مقایسه نسبی طول پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر دنداندار بلوکی



شکل 7 مقایسه پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر دنداندار بلوکی در اعداد فرود مختلف

علاوه بر عامل ذکر شده، نحوه چیدمان عناصر زیر در کنار هم و در نتیجه آن ایجاد فضای مناسب برای استقرار گردابه‌ها، این اثر را تشدید کرده است.

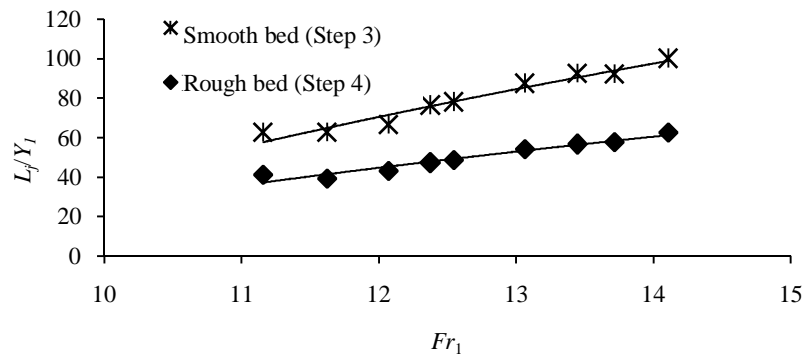
در بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است، معمولاً عامل مؤثر در افزایش استهلاک انرژی پرش و در نتیجه آن کاهش پارامترهای جهش، تنها شکل هندسی زیری بوده است، در حالی که در این پژوهش

3-3- نتایج حاصل از مراحل سوم و چهارم

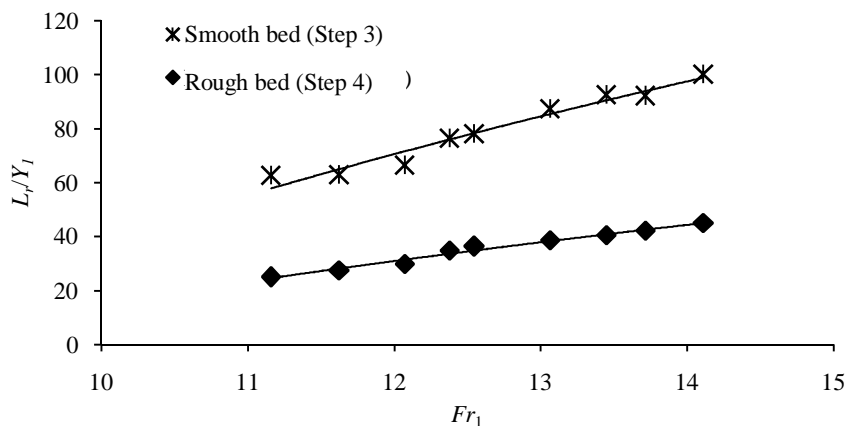
طبق نتایج به دست آمده توسط مردشتی و همکاران (1386)، ارتباط مستقیمی بین انرژی باقی مانده در بالادست گودال آبشستگی و عمق گودال آبشستگی حاصل از انرژی جریان ورودی به حوضچه شنی، وجود دارد. بنابراین، برای تشکیل دو پرش هیدرولیکی با افت انرژی یکسان برای یک عدد فرود، باید عمق ثانویه (Y_2)، عمق پایاب (Y_1) و عمق گودال آبشستگی پایین دست (h_s) در هر دو پرش مساوی باشد. در نتیجه، در مرحله چهارم، با بلند و کوتاه کردن طول زبری مورد نظر، هدف یافتن طولی از بلوکها در حوضچه بوده است که عمق ثانویه (Y_2)، عمق پایاب (Y_1) و عمق گودال آبشستگی پایین دست (h_s) یکسانی با پرش تشکیل یافته روی شیشه (سطح صاف) مرحله سوم

داشته باشد. پس از آزمایشهای بسیار و یافتن طول معادل برای هر عدد فرود، طول پرش و عمق پایاب نیز برداشت گردید. شکل های 8 و 9 به ترتیب مقایسه بین طول پرش و طول زبری معادل (L_r)، برای یک میزان استهلاک انرژی، جهت پرش روی شیشه و بلوک دنداندار را نشان می دهند.

بر اساس اندازه گیری های انجام شده، طول حوضچه دنداندار بلوکی لازم برای تشکیل پرش هیدرولیکی با استهلاک انرژی یکسان نسبت به طول بستر صاف، 55-60 درصد کاهش داشته است. همچنین، طول پرش هیدرولیکی در حوضچه دنداندار بلوکی با طول معادل، به میزان 35-40 درصد نسبت به پرش بر بستر صاف، کاهش یافته است.



شکل 8 مقایسه نسبی طول پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر دنداندار بلوکی با طول معادل



شکل 9 مقایسه نسبی طول حوضچه مورد نیاز برای تشکیل پرش با استهلاک انرژی معادل روی بستر صاف و بستر دنداندار بلوکی با طول معادل

در نهایت، یکی از نسبت‌های بی‌بعدی که برای مقایسه میان پژوهش‌های مختلف بکار می‌رود، نسبت طول پرش L_f/Y_2^* است که Y_2^* همان عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف است. جدول 2، میانگین نسبت طول در پژوهش‌های مختلف و در محدوده اعداد فرود مورد آزمایش را نشان می‌دهد. این نسبت برای پرش هیدرولیکی در حوضچه دنداندار بلوکی، با توجه به شکل 10 به صورت میانگین، $2/6$ است که نسبت به عدد فرود بالای مورد آزمایش، بسیار کوچک و مناسب به دست آمده است.

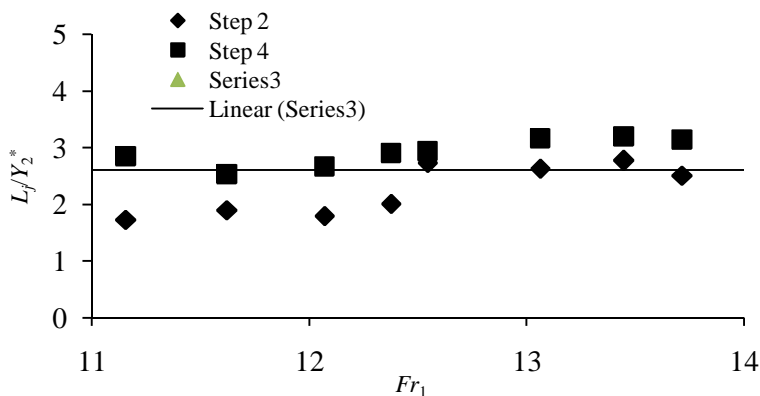
جدول 2 میانگین نسبت طول در پژوهش‌های مختلف و در محدوده اعداد فرود مورد آزمایش

Research	Fr	L_f/Y_2^*
USBR (TypeII)	11-14	4.35
USBR (TypeIII)	11-14	2.75
Elsebaie(2010)	3-7.5	2.1
Abbaspour et al.(2009)	3.8-8.6	3.25
Ead et al. (2002)	4-10	3
Tokyay (2005)	5-12	4

4- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیرپذیری پارامترهای مختلف پرش هیدرولیکی در حوضچه دنداندار بلوکی، در محدوده اعداد فرود 11-14، مورد مطالعه قرار گرفت. خلاصه

نتایج تحقیق در زیر ارائه شده است. نتایج، کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان 50-60 درصد را در حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به پرش بر بستر صاف، نشان می‌دهند. همچنین 10-12 درصد کاهش در عمق ثانویه پرش در حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به بستر صاف مشاهده گردید. از مقایسه پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی روی این دو سطح، جمع‌شدگی و عقب‌نشینی پرش به طرف بالادست در حوضچه دنداندار بلوکی قابل مشاهده بود که در نتیجه باعث کاهش طول حوضچه و هزینه خواهد شد. در مرحله بعد، با تشکیل پرش هیدرولیکی روی طولی از بلوک‌های دنداندار که میزان استهلاک انرژی یکسانی را با پرش روی بستر صاف دارد، میزان طول زبری مورد نیاز با طول بستر صاف معادل مقایسه شد که کاهش 55-60 درصد در طول حوضچه زبر مشاهده گردید. طول پرش هیدرولیکی در حوضچه دنداندار بلوکی در چنین پرشی با استهلاک انرژی یکسان، به میزان 35-40 درصد نسبت به بستر صاف کاهش داشته است. نهایتاً نسبت طول میانگین پرش روی حوضچه دنداندار بلوکی، $2/6$ به دست آمد که در محدوده عدد فرود مورد آزمایش، نسبت مناسب و پایینی محسوب می‌شود.



شکل 10 نسبت طول در حوضچه دنداندار بلوکی

22-1

Abbaspour, A., Hosseinzade, A., Farsadzadeh, D., and Sadraddini, A.A. (2009). "Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics", J. Hydro-environment Research, (3), pp. 109-117.

AboulAtta, N., Ezizah, G., Yousif, N. and Fathy, S. (2011). "Design of stilling basin artificial roughness". International J. Civil & Environmental Eng., 3(2), pp. 65-71.

Shafai Bejestan, M.S., and Neisi, K. (2009). "A new roughened bed hydraulic jump stilling basin", Asian J. Applied Science, 2(5), pp. 436-445.

Ead, S.A., Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Ade, F. (2000). "Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts", J. Hydraulic Eng., 126 (10), pp. 750-757.

Elsebaie, I.H., and Shabayek, Sh. (2010). "Formation of hydraulic jumps on corrugation beds", International J. Civil & Environmental Eng., IJCEE-IJENS, 10(01), pp. 40-50.

Farhoudi, J., and Smith, K.V.H. (1985). "Local scour profiles downstream of hydraulic jump", J. Hydraulic research, 23(4), pp. 343-358.

Fathi-moghadam, M., Haghhighipour, S., Lashkara, B. and Aghtouman, P. (2011). "Reduction of stilling basin length with tall end sill", J. Hydrodynamics, 23(4), pp. 498-502.

Hager, W.H., (1992). *Energy dissipators and hydraulic jump*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.

Henderson, F.M. (1966). "Open Channel Flow." Macmilan Publishing co. Inc. New York. pp. 1-76.

Pagliara, S., Lotti, I., and Palermo, M. (2008). "Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures", J. Hydro-environment Research Vol. 2, pp. 29-38.

Peterka, A.J. (1958). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Engineering Monograph No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

Vischer, D.L., and Hager, W.H. (1995). "Energy dissipaters", IAHR Hydraulic Structures Design Manual series No. 9. A.A. Balkema Publishers. The Netherlands, pp.206.

Zahed, E., Farhoudi, J., and Javan, M. (2010). "Similarity of scour evolution downstream of stilling basin with an end sill", New Aspects of Fluid Mechanics, Heat Transfer and Environment, ISBN: 978-960-474-215-8.

5- فهرست علایم

D_{50}	قطر متوسط دانه‌های شن
Fr_1	عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی
g	شتاب ثقل
h_s	عمق گودال پروفیل گودال آبشستگی
L_j	طول پرش هیدرولیکی
L_r	طول حوضچه آرامش
q	دبی جریان در واحد عرض سرریز
Re	عدد رینولدز
V_1	سرعت جریان فوق بحرانی در بالادست جریان
Y_1	عمق جریان فوق بحرانی در بالادست جریان (عمق اولیه پرش)
Y_2	عمق جریان زیر بحرانی در پایین دست جریان (عمق ثانویه پرش)
Y_2^*	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر بستر صاف
Y_t	عمق پایاب جریان
ρ	جرم مخصوص آب
Φ	زاویه اصطکاک داخلی
γ_s	وزن مخصوص اشباع
γ_d	وزن مخصوص خشک

6- منابع

ابریشمی، ج.، و اسماعیلی، ک. (1376). "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله مثبت"، امیرکبیر، 9(35)، ص.ص. 276-292.

اسماعیلی، ک.، و ابریشمی، ج. (1379). "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله منفی"، استقلال، 19(2)، ص.ص. 97-110.

شفاعی بجستان، م.، کاظمیان زاده، ا.، پارسی، ا.، و محدی رویوران، م. (1388). "تأثیر آرایش زبری‌های مکعب شکل بر میزان استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.

مردشتی، ا.، طالب بیدختی، ن.، و جوان، م. (1386). "ارزیابی استهلاک انرژی جریان دو فازي روگذر سرریز پلکانی به کمک گودال آبشستگی پایین دست"، مجله هیدرولیک، 4، ص.ص.