

## «یادداشت تحقیقاتی»

# بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر سنگ چین

بهزاد قربانی<sup>1\*</sup>، حسین صمدی بروجنی<sup>2</sup>، ابراهیم رحمتی<sup>3</sup>

1- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد

\* behzad.ghorbani55@gmail.com

**چکیده** - یکی از راه‌های کاهش قدرت جریان مخرب در پایین‌دست سرریزها و شوت‌ها، ایجاد پرش هیدرولیکی است. جنس بستر حوضچه‌های آرامش تأثیر قابل ملاحظه در مشخصات پرش هیدرولیکی دارد. هرچه زبری بستر حوضچه‌های آرامش بیشتر باشد، طول پرش و عمق ثانویه آن کمتر می‌شود، و این امر باعث کوچک‌تر شدن ابعاد حوضچه آرامش و در نتیجه کاهش هزینه می‌شود. یکی از راهکارها در این زمینه استفاده از سنگ‌چین در بستر حوضچه است که نوعی زبری ممتد را به وجود می‌آورد. در این تحقیق بررسی تجربی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر سنگ‌چین با 2 نوع دانه‌بندی مختلف انجام شد. آزمایش‌ها در فلومی با مقطع مستطیلی با عرض و عمق 0/4 و طول 12 متر انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد بستر سنگ‌چین باعث می‌شود که عمق پرش به میزان 35 درصد، طول پرش به میزان 50 درصد و طول غلتاب به مقدار 49 درصد نسبت به بستر صاف کاهش یابد. همچنین نتایج نشان داد، با تغییر متوسط اندازه سنگدانه‌های بستر سنگ‌چین از 4/45 به 5/75 میلی‌متر، طول پرش 13/5 درصد کاهش یافت، ولی اندازه سنگ‌چین تفاوت معنی داری روی عمق ثانویه پرش نداشت.

**کلیدواژگان:** بستر سنگ‌چین، پرش هیدرولیکی، عمق مزدوج، طول پرش.

## 1- مقدمه

در بستر جریان است. زبر نمودن کف بستر باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومت زبری‌ها، کمتر از مومنتم ورودی شود. تفاوت زبری با بلوک‌ها این است که سطح فوقانی زیری‌ها می‌تواند کاملاً در زیر عمق اولیه پرش قرار گرفته و هم تراز با کف کانال بالادست شود. از این‌رو روشی برای کاهش طول و عمق ثانویه پرش می‌باشد. Ead and Rajaratnam (2002) پرش هیدرولیکی بر روی

پرش هیدرولیکی کلاسیک پدیده فیزیکی خاصی است که معمولاً در حوضچه‌های آرامش سازه‌های هیدرولیکی کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش اقداماتی مانند ساخت بلوک‌های پای شوت و یا بلوک‌های میانی به منظور اتلاف بیشتر انرژی جنبشی جریان در محدوده پرش و کاهش مشخصات آن در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌ها شود، ایجاد زبری مصنوعی

زبری‌های لوزی شکل می‌توانند عمق متناوب پرش را به-طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. این میزان کاهش برای اعداد فرود مختلف، تفاوت دارد، به‌طوری که حداقل 18 درصد و حداکثر 31 درصد و به‌طور متوسط 24/2 درصد کاهش در عمق متناوب پرش حاصل می‌شود. ایشان رابطه (5) را بر طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های خود با استفاده از رگرسیون برای این بسترها ارائه دادند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.8676Fr_1 + 0.9717 \quad (5)$$

غزالی (1389) با انجام 42 آزمایش در محدوده اعداد فرود 6/1 تا 13/1 بر روی مدل فیزیکی حوضچه آرامش با زبری‌های مثلثی شکل نشان دادند که عمق پایاب و طول پرش بر روی بسترهای موج‌دار مثلثی نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان به ترتیب 25 و 54/7 درصد کمتر می‌شود و با به کار بردن رگرسیون خطی، رابطه (6) را با ضریب همبستگی 95 درصد به دست آوردند.

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.993Fr_1 + 0.1538 \quad (6)$$

بزاز و قربانی (1392) در تحقیقی روی تأثیر طول موج زبری‌ها بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نشان دادند که طول زبری‌ها، طول پرش را به اندازه 20 تا 42 درصد و عمق ثانویه پرش را به اندازه 10 تا 18 درصد کاهش می‌دهند. عزیزی و همکاران (1392)، تحقیقی به منظور بررسی تأثیر صفحات مستغرق در حوضچه‌های آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که این صفحات در مقایسه با پرش کلاسیک می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش به مقدار 10 درصد و افزایش ضریب نیروی برشی تا حدود 12 برابر نسبت به بستر صاف شوند. همچنین در مقایسه با پرش هیدرولیکی روی بستر صاف نتایج نشانگر آن است که صفحات می‌توانند مقدار ضریب نیروی برشی در بسترهای زبر را تا حدود 12 برابر نسبت به بستر صاف افزایش دهند. طول پرش نیز در بهترین حالت با کاهش 25 درصدی روبرو خواهد شد. تا کنون مطالعات گسترده‌ای روی بسترهای زبر با مشخصات فوق انجام شده است، ولی روی بستر سنگ‌چین مطالعات قابل توجهی

بستر موج دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود 4-10 و ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  ارتفاع موج بستر و  $y_1$  عمق اولیه پرش) با نسبت‌های 0/25، 0/43 و 0/5 بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که طول پرش روی بستر موج دار سینوسی تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است. علاوه بر آن، آنها رابطه (1) را برای محاسبه عمق متناوب پرش ( $y_1$  عمق اولیه و  $y_2$  عمق ثانویه) با عدد فرود در عمق اولیه پرش ( $Fr_1$ ) پیشنهاد دادند:

$$\frac{y_2}{y_1} \cong Fr_1 \quad (1)$$

همچنین آن‌ها پارامتر دیگری به نام کاهش عمق نسبی ( $D$ ) پیشنهاد نمودند که به‌صورت رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (2)$$

که در آن  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش بر بستر صاف است.

Abbaspour et al. (2009)، با تحقیقی روی زبری‌های سینوسی شکل نشان دادند که برای یک عمق فوق بحرانی، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود  $3.6 \leq Fr_1 \leq 8.6$  و برای شش نسبت زبری مختلف در محدوده  $0.286 \leq t/s \leq 0.625$  (طول موج زبری) حدود 5 تا 26 درصد کوچک‌تر از بستر صاف است. همچنین آنها رابطه بین عدد فرود اولیه و اعماق مزدوج را به‌صورت رابطه (3) به‌دست آوردند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146 Fr_1 \quad (3)$$

Elsebaie and Shabayek (2010) یک مطالعه آزمایشگاهی در محدوده عدد فرود 3 تا 7/5 روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی انجام دادند. نتایج کار آن‌ها بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر در مقایسه با پرش بر روی بستر صاف بود و رابطه کلی (4) را برای عمق نسبی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر ارائه دادند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.88Fr_1 \quad (4)$$

نیسی و شفافی بجزستان (1388) نشان دادند که

انتخابی، 30 لیتر بر ثانیه با توجه به نیروی هیدرودینامیکی جریان برای حرکت ذرات و ظرفیت فلوم انتخاب شد. برای ایجاد پرش هیدرولیکی از یک سرریز شوت با سه شیب مختلف (1:1/5، 1:2 و 2:1/5) به منظور افزایش سرعت جریان استفاده شد (شکل 2). دلیل انتخاب سه شیب مختلف، فراهم آوردن اعداد فرود لازم برای رسم نمودار تغییر متغیرهای مختلف نسبت به عدد فرود در شرایط متفاوت است. سازه شوت دارای یک تاج افقی به طول 1/5 متر و کانال شیب‌داری به عرض 40 و ارتفاع 40 سانتی متر است که جریان پس از طی مسیر افقی تاج وارد قسمت شیب‌دار سرریز می‌شود. سرریز شوت باعث افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق جریان می‌شود. در انتهای سرریز در کف بستر فلوم یک حوضچه سنگ‌چین مطابق شکل 3 برای انجام آزمایش‌ها در این تحقیق فراهم شد. برای تنظیم محل تشکیل پرش از سرریز انتهایی فلوم استفاده شد و عمق اولیه پرش در پنجه سرریز شوت تنظیم گردید. در مجموع 18 آزمایش بر روی دو بستر سنگ‌چین با اندازه‌های متفاوت و 9 آزمایش برای بستر صاف به عنوان آزمایش شاهد انجام گرفت که در مجموع 27 آزمایش برای تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی انجام شد.

### 3- نتایج و بحث

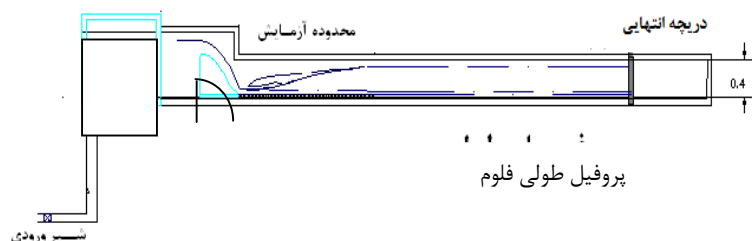
با توجه به اهداف اصلی تحقیق، در این مبحث تأثیر بستر سنگ‌چین بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی هم‌چون پروفیل سطح آب، نسبت اعماق اولیه و ثانویه پرش، طول غلتاب، طول پرش و تلفات انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

انجام نشده است که این تحقیق روی این موضوع انجام گرفته است.

### 2- مواد و روش‌ها

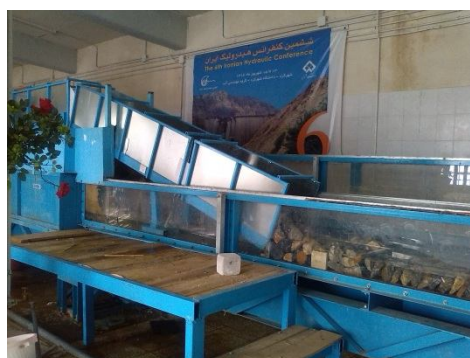
در این تحقیق، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول 12 متر و عرض و ارتفاع 40 سانتی‌متر، واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفت (شکل 1). فلوم با کف فلزی و دیواره‌های پلاستیکی گلاس شیب‌پذیر بوده و امکان تغییر شیب آن به کمک جک‌های هیدرولیکی فراهم می‌شود. در ابتدای کانال یک مخزن مجهز به یک سرریز مثلثی شکل با زاویه راس 90 درجه قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌نماید. جریان پس از عبور از مخزن وارد یک شوت شده و سپس وارد یک حوضچه آرامش که در ابتدای فلوم قرار دارد، می‌شود. در انتهای کانال نیز یک دریچه برای تنظیم جریان نصب شده است.

برای اندازه‌گیری سرعت در اعماق و مقاطع مختلف جریان از دستگاه ADV و لوله پیتوت استفاده و مقایسه شدند. برای به‌دست آوردن اندازه سنگ‌چین‌ها از الک‌های 1/5، 2 و 2/5 اینچی استفاده شد و دو ترکیب مختلف سنگ‌چین با متوسط اندازه سنگ دانه‌های 5/75 و 4/45 میلی‌متر تهیه شد. انتخاب اندازه سنگ‌چین‌ها براساس آزمایش پایداری سنگ‌ها برای بیشترین دبی و تندترین شیب شوت به‌دست آمد. اندازه‌گیری عمق جریان به وسیله یک عمق سنج با دقت 1 میلی‌متر انجام گرفت. برای این منظور، با توجه به نوسان سطح آب عمق جریان نسبت به لبه فلوم با سه تکرار اندازه‌گیری و میانگین هر نقطه مشخص گردید. برای انجام آزمایش‌ها از سه دبی مختلف (10، 20 و 30 لیتر بر ثانیه) استفاده گردید. حداکثر دبی



شکل 1 طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی

ملاحظه می‌شود، پروفیل سطح آب از یک عمق کمینه شروع شده و به تدریج افزایش یافته و به یک عمق بیشینه میل می‌کند. عمق کمینه در این شکل همان عمق فوق بحرانی و عمق بیشینه عمق زیر بحرانی است. در این تحقیق با استفاده از سرریز انتهایی محل تشکیل پرش کنترل و سعی شد که در تمام آزمایش‌ها عمق اولیه پرش در پنجه شوت تشکیل شود و در عمل جریان متغیر تدریجی پرش حذف و تنها تغییرات عمق جریان در بخش متغیر سریع پرش اندازه‌گیری شد. پروفیل سطح آب در شکل 4، روند تغییرات سطح آب را در حوضچه آرامش نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل آن است که پروفیل‌های بدون بعد سطح آب در همه آزمایش‌ها از جمله آزمایش‌های شاهد روند مشابهی را دنبال می‌کند.



شکل 2 نمایی از سرریز شوت از پهلو



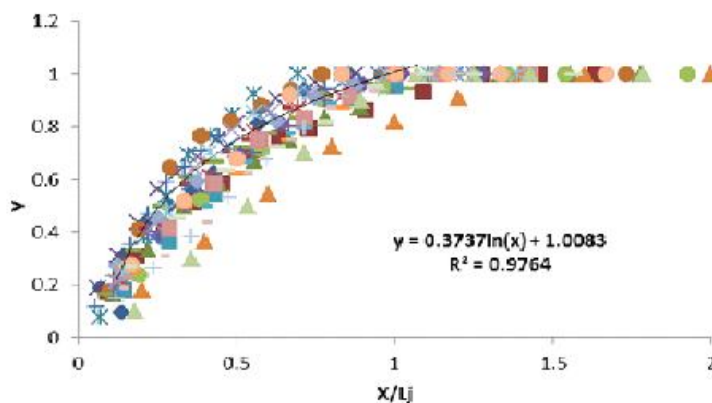
شکل 3 نمایی از بستر سنگ‌چین

### 3-2- نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش

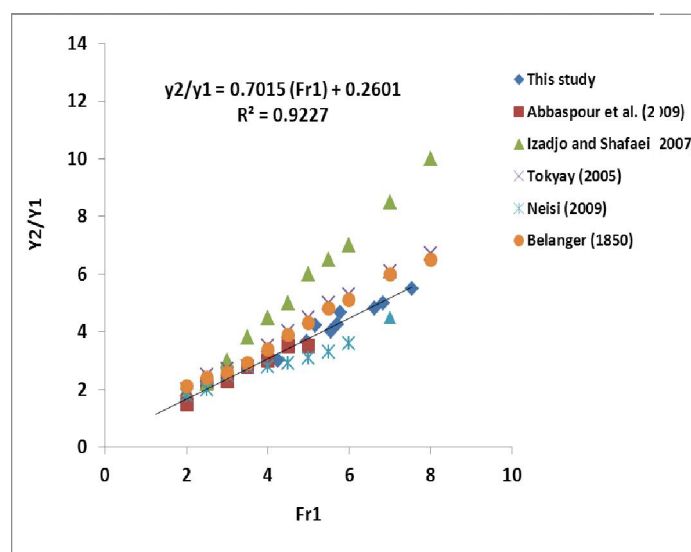
عمق نسبی پرش هیدرولیکی  $(y_2/y_1)$ ، تابعی از عدد فرود اولیه جریان،  $Fr_1$ ، است. لذا برای بررسی تأثیر بستر سنگ‌چین بر عمق ثانویه، نمودار عمق نسبی پرش،  $y_2/y_1$ ، به ازای اعداد فرود اولیه در شکل 5 قابل ملاحظه است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد فرود، نسبت عمق ثانویه پرش به صورت خطی با ضریب تبیین  $(R^2 \approx 93.9)$  افزایش می‌یابد. در این شکل، داده‌های مطالعه حاضر با نتایج محققان دیگر نیز مقایسه شده‌اند.

### 3-1- پروفیل سطح آب

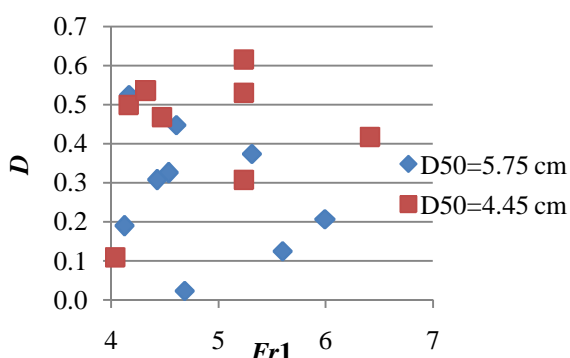
شکل 4 پروفیل‌های سطح آب را برای تمامی آزمایش‌های این تحقیق اعم از بستر صاف و بستر سنگ‌چین نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی با تقسیم فاصله بر طول پرش  $(x/L_j)$  و محور عمودی با تقسیم افزایش عمق جریان در نقاط مختلف پرش بر افزایش عمق ثانویه  $(y_2 - y_1)$  بی‌بعد شدند. همان‌طور که در این شکل



شکل 4 پروفیل‌های بی بعد سطح آب در مطالعه حاضر



شکل 5 مقایسه تغییرات  $y_2/y_1$  نسبت به عدد  $Fr_1$  در این تحقیق با سایر تحقیقات



شکل 6 تغییرات مقادیر کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی ( $D$ ) نسبت به عدد فرود اولیه ( $Fr_1$ )

در شکل 7، متوسط مقادیر کاهش عمق نسبی ( $D$ )، با نتایج سایر محققان مانند (Ead and Rajaratnam (2002)، (Izadjo and Shafai Bejestan (2007)، (Tokyay (2005)، (Abbaspour et al. (2009)، نیسی و شفافی بجزستان (1388) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، متوسط بیشترین مقدار کاهش عمق نسبی،  $D$ ، مربوط به تحقیق حاضر یعنی 35 درصد است.

### 3-3- طول نسبی پرش هیدرولیکی

شکل 8 مقادیر طول نسبی پرش  $Lj/y_2$  را به ازای اعداد فرود اولیه نشان می‌دهد.

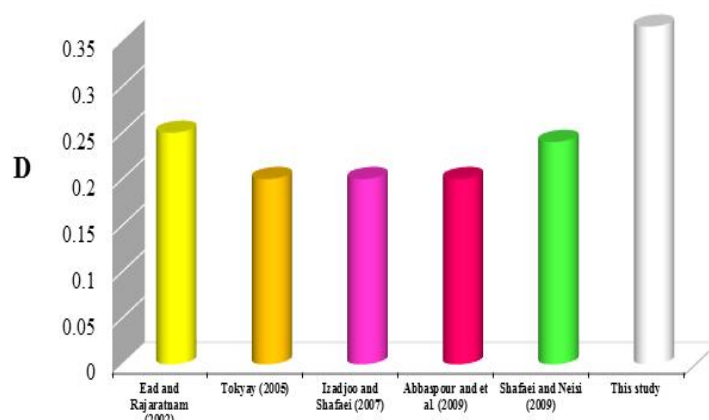
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، داده‌های تحقیق حاضر با روش شفافی بجزستان و نیسی (1388)، توکیای (2005) و بلانگر (1850) تطابق بیشتری دارد که حاکی از تأثیر قابل توجه بستر سنگ‌چین بر کاهش عمق ثانویه پرش است. رابطه بین عمق نسبی پرش و عدد فرود بر بستر سنگ‌چین با استفاده از رگرسیون خطی به صورت رابطه (7) است:

$$y_2/y_1 = 4.0959 \ln(Fr_1) - 2.8147 \quad R^2 = 93.9 \quad (7)$$

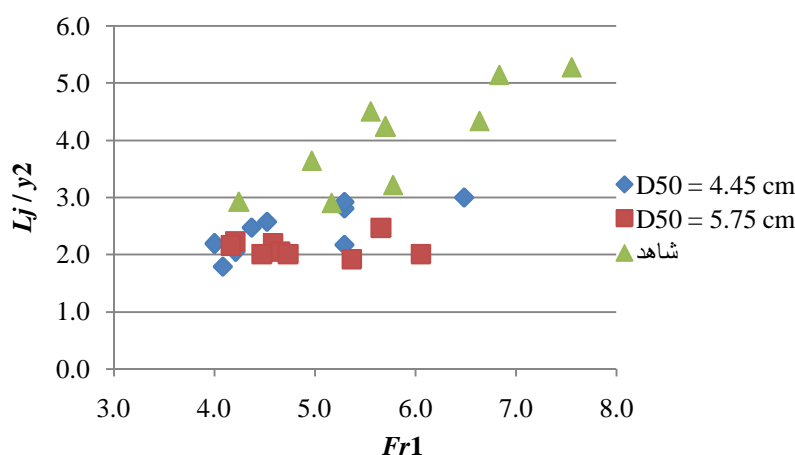
علاوه بر آن، پارامتر کاهش عمق نسبی،  $D$ ، که توسط Ead and Rajaratnam (2002) ارائه شده است به شکل رابطه (8) است.

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (8)$$

که در آن  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش روی بستر صاف و  $y_2$  عمق ثانویه پرش روی بستر سنگ‌چین است. در شکل 6 تغییرات مقادیر کاهش عمق نسبی به ازای اعداد فرود اولیه برای دو مقدار اندازه ذرات بستر سنگ‌چین،  $D_{50}$ ، نشان داده شده است. مطابق این شکل برای محدوده اعداد فرود 4 تا 6/5 کاهش عمق نسبی برای قطر ذرات بستر سنگ‌چین روند مشخصی ندارد. بدیهی است، با توجه به معادله (8)، کاهش عمق نسبی ( $D$ )، برای اعداد فرود مختلف برای آزمایش شاهد صفر است.



شکل 7 مقایسه  $D$  در این تحقیق با نتایج سایر محققان



شکل 8 طول نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به عدد فرود

Izadjoo and Shafai (2000)، Tokyay (2005)، Bejestan (2007) و Abbaspour et al. (2009) نشان می-دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود نتایج این تحقیق کمترین مقدار طول نسبی پرش را نشان می-دهد.

### 3-4- اتلاف انرژی

اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی اختلاف انرژی مخصوص  $(E_2-E_1)$  قبل و بعد از پرش است. شکل 10 اتلاف انرژی نسبی  $(E_2-E_1)/E_1$  را به ازای مقادیر مختلف عدد فرود نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد فرود تلفات انرژی برای اندازه‌های مختلف بستر سنگ‌چین و شاهد روند افزایشی دارد، ولی

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، طول نسبی پرش با عدد فرود اولیه افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد به ازای تمامی اعداد فرود نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش،  $L_j/y_2$ ، به طور متوسط  $2/3$  و طول پرش روی بستر سنگ‌چین تقریباً نصف طول پرش بر روی بستر صاف است. همچنین نتایج نشان داد، که سنگ‌چین در ابعاد بزرگ تر، شرایط مناسب‌تری را برای کنترل طول پرش به‌وجود می‌آورد، به‌طوری که در سنگ‌چین با اندازه سنگدانه  $5/75$  میلی‌متر،  $L_j/y_2$  به میزان  $13/5$  درصد نسبت به سنگ‌چین با اندازه سنگدانه  $4/45$  میلی‌متر کمتر به‌دست می‌آید.

شکل 9 مقایسه مقادیر متوسط طول نسبی پرش در این تحقیق را با نتایج تحقیقات Ead and Rajaratnam

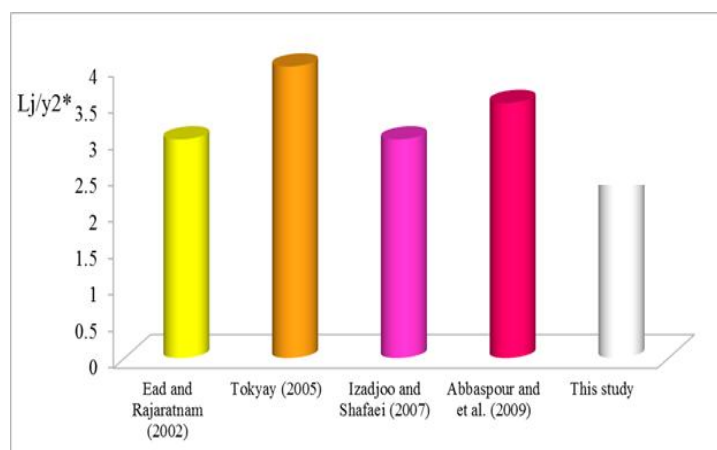
برای بستر دانه درشت  $10/1$  درصد کمتر از دانه ریز است. شکل 12 تغییرات  $Lr/y_2$  در مقابل عدد فرود برای حوضچه‌های تیپ‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل داده‌های این تحقیق با حوضچه‌ها دیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از این تحقیق تطابق بیشتری با حوضچه SAF دارد.

شکل 13 مقادیر  $Lr/y_2$  را در مقابل قطر ذرات  $D_{50}$  برای شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش قطر ذرات ( $D_{50}$ )، مقادیر  $Lr/y_2$  کاهش می‌یابد. البته شیب تغییرات برای شیب‌های تند بیشتر از شیب‌های ملایم است.

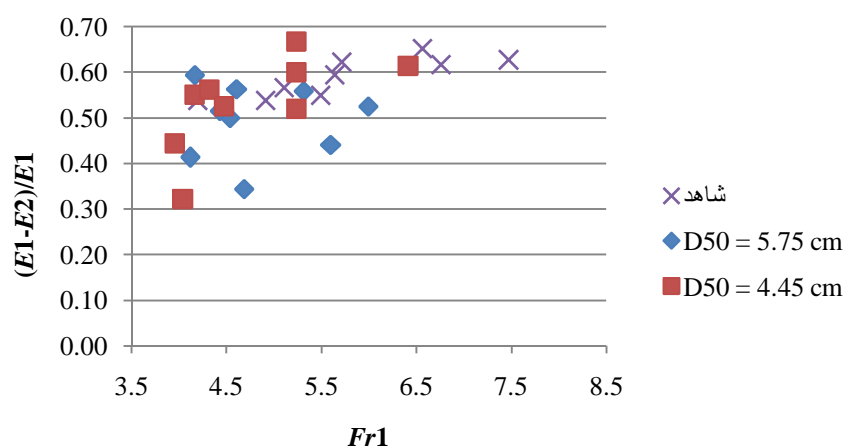
تأثیر قطر سنگ‌چین بر کاهش تلفات انرژی روند مشخصی را دنبال نمی‌کند.

### 3-5- طول غلتاب

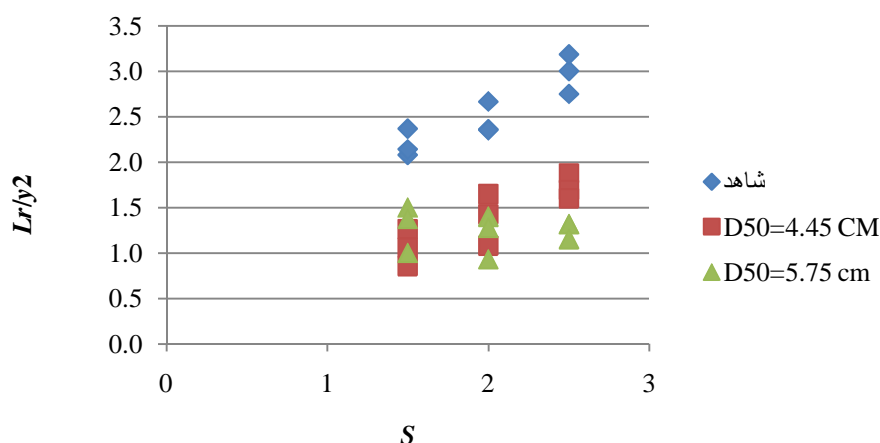
در شکل 11، نسبت طول غلتاب ( $Lr/y_2$ ) برای دانه‌بندی‌های مختلف در مقابل شیب‌های متفاوت سرریز ( $1/5$ ،  $2$  و  $2/5$ ) قابل ملاحظه است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شیب شوت، طول غلتاب نیز افزایش می‌یابد، ولی مقدار آن در همه شیب‌ها برای بستر سنگ‌چین به‌طور قابل ملاحظه‌ای از شاهد (بستر بدون سنگ‌چین) کمتر است. متوسط کاهش طول غلتاب نسبت به بستر صاف 49 درصد است. علاوه بر آن، طول غلتاب



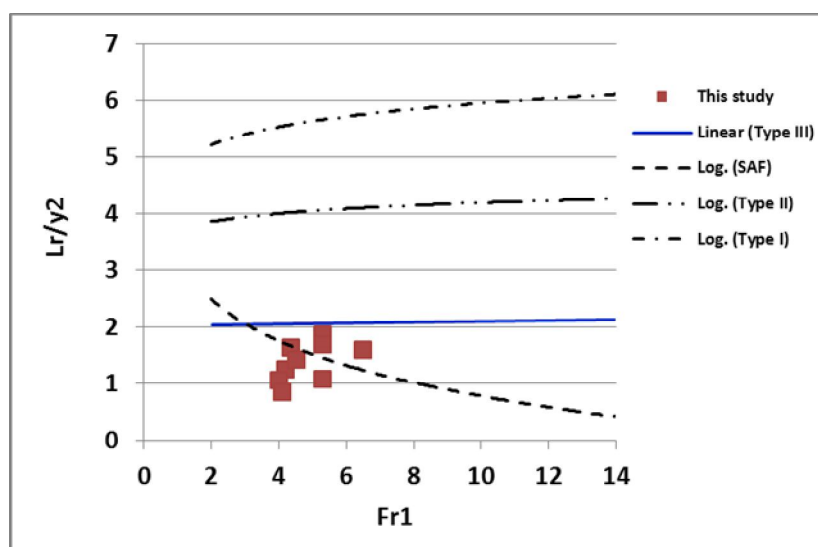
شکل 9 مقایسه طول نسبی پرش هیدرولیکی با نتایج سایر تحقیقات



شکل 10 مقایسه اتلاف انرژی نسبی بر روی بستر سنگ‌چین و بستر صاف



شکل 11 تغییرات  $Lr/y_2$  با شیب شوت



شکل 12 نسبت تغییرات  $Lr/y_2$  با عدد  $Fr_1$  و مقایسه آن در این تحقیق با حوضچه‌های استاندارد USBR

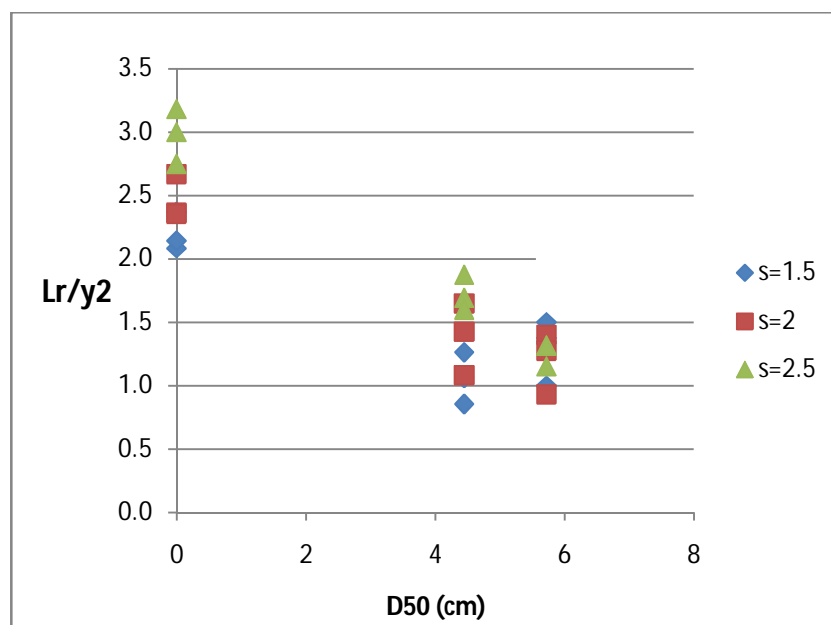
#### 4- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بستر سنگ‌چین تأثیر قابل توجهی در کاهش پارامترهای هیدرولیکی پرش مثل عمق پرش، طول پرش و طول غلتاب دارد. در این تحقیق، عمق پرش به میزان 35 درصد، طول پرش به میزان 50 درصد و طول غلتاب به مقدار 49 درصد نسبت به بستر صاف کاهش نشان می‌دهد. میزان کاهش برخی از خصوصیات فوق برای بستر سنگ‌چین در ابعاد بزرگتر، بیشتر است. به طوری که در سنگ‌چین با اندازه سنگدانه

5/75 میلی‌متر،  $Lr/y_2$  به میزان 13/5 درصد نسبت به سنگ‌چین با اندازه سنگدانه 4/45 میلی‌متر کمتر به دست می‌آید.

همچنین نتایج نشان داد، میزان افت انرژی در حالت بستر سنگ‌چین نسبت به بستر صاف، 12 درصد کاهش می‌یابد. این نتایج حاکی از آنست که با کاربرد بستر سنگ‌چین در حوضچه‌های آرامش می‌توان ابعاد حوضچه را کاهش داد.





شکل 13 تغییرات  $Lr/y_2$  با  $D_{50}$  برای شیب‌های مختلف

تغییرات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر نسبت به تغییرات طول موج زبری‌ها، مجله هیدرولیک، 7(3): 33-42.

عزیزی آ، قربانی ب، تبریزی ه، و صمدی ح. (1392). "ارزیابی اثر صفحات مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش"، مجله هیدرولیک، 81(1): 73-81.

غزالی، م. (1389). "بررسی تأثیر بستر دندان‌های شکل بر مشخصات پرش هیدرولیکی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد.

نیسی ک. و شفاعی بجستان م. (1388). "بررسی اثر زبری‌های لوزی شکل بر عمق متناوب پرش هیدرولیکی". هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، 21 تا 23 اردیبهشت ماه، دانشگاه شیراز.

Abbaspour A. Hosseinzadeh Dalir A. Farsadizadeh D. and Sadraddini A.A. (2009). "Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics". Applied Sciences, 9(11): 2045-2055.

Belanger, J.B. (1850). Notes sur le Cours d'Hydraulique. ('Notes on a Course in Hydraulics.')

## 5- سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد که با حمایت مالی در قالب طرح پژوهشی زمینه انجام این تحقیق را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## 6- فهرست علائم

$D$	کاهش عمق نسبی
$D_{50}$	قطر ذرات
$E$	انرژی مخصوص
$Fr$	عدد فرود
$L_j$	طول پرش
$L_r$	طول غلتاب
$s$	طول موج بستر
$t$	ارتفاع موج بستر
$x$	فاصله
$y$	عمق جریان
$Y$	عمق نسبی

## 7- منابع

بزاز ب، قربانی ب، و اسکینی م. (1391). "بررسی

Izadjoo, F. and Shafai Bejestan M. (2007). "Corrugated bed hydraulic jump stilling basin". Applied Sciences, 7(8): 1164-11610-

Samadi-Boroujeni H., Ghazali M., Gorbani B. and Fattahi R. (2013). "Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics". Canadian Journal of Civil Engineering, 40: (1-7).

Shafai Bejestan M. and Neisi K. (2009). "A new roughened bed hydraulic jump stilling basin". Applied Sciences, 2(5): 436-445.

Tokyay N.D. (2005). "Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps". EWRI, Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, USA.

Mem. Ecole Nat. Ponts et Chaussees, Paris, France, Session p. 222.

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

Ead S.A. and Rajaratnam N. (2002). "Hydraulic jumps on corrugated bed". J. Hydraulic Engineering, 128(2): 656-663.

Elsebaie I.H. and Shabayek Sh. (2010). "Formation of hydraulic jumps on corrugated beds". Civil & Environmental Engineering, IJCEE-IJENS 10(1): 40-50.