

# بررسی تغییرات ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر نسبت به تغییرات طول موج زبری‌ها

محمد بزاز<sup>۱</sup>، بهزاد قربانی<sup>۲\*</sup>، محمود اسکینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

\* شهر کرد، کد پستی ۸۱۵۴۹۴۵۷۹

behg1955@yahoo.com

**چکیده-** در این تحقیق به تغییرات خصوصیات پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش و عمق ثانویه و همچنین تغییرات طول مؤثر بستر زبر نسبت به تغییرات طول موج زبری بستر پرداخته شده است. طول مؤثر اندازه ای است که اگر طول بستر زبر از آن بیشتر شود، تغییری در ابعاد پرش مشاهده نمی‌شود. در این تحقیق تغییرات ویژگی‌های پرش برای ۴ طول موج زبری در ۴ عدد فرود مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود ۵/۸۳ تا ۱۰/۱۳ در فلومی به طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش طول موج زبری‌های مورد استفاده در این تحقیق نرخ کاهش طول پرش و عمق ثانویه تحت تأثیر بستر زبر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول موج زبری‌ها طول مؤثر بستر زبر بر روی عمق ثانویه افزایش، ولی طول مؤثر بستر زبر بر روی طول پرش کاهش می‌یابد. با توجه به روابط ایجاد شده برای تغییرات طول و عمق ثانویه پرش و همچنین طول مؤثر بستر زبر نسبت به طول موج، نسبت طول موج به ارتفاع موج (S/t) برابر ۴/۵ به عنوان طول موج بهینه تشخیص داده شد.

**کلیدواژگان:** پرش هیدرولیکی، بستر زبر، طول موج زبری، طول پرش، عمق ثانویه پرش.

## ۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی<sup>۱</sup> پدیده‌ای است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی<sup>۲</sup> به زیر بحرانی<sup>۳</sup> تغییر وضعیت می‌دهد. وقوع این پدیده با کاهش شدید انرژی جریان همراه است. از این خاصیت پرش در مواقعی که نیاز به استهلاک انرژی آب می‌باشد، مانند جریان پای سرریزها و

تنداب‌ها<sup>۴</sup> استفاده می‌شود (فرهودی ۱۳۷۲). امواج سطحی، آشفته بودن جریان و سرعت بالای جریان در پرش هیدرولیکی، باعث می‌شود تأسیسات آبی در محل پرش در معرض خطر تخریب و فرسایش قرار بگیرند. به همین دلیل لازم است این تأسیسات در محل پرش مقاوم‌سازی شوند که این موضوع باعث بالا رفتن هزینه‌های ساخت تأسیسات می‌شود. بنابراین بخش زیادی از تحقیقات انجام گرفته بر روی پرش هیدرولیکی به

1. Hydraulic Jump
2. Super Critical
3. Sub Critical

4. Chute

پرداخته نشده است، طول موج زبری‌ها است. محققان پیشین تمرکز خود را بیشتر بر روی شکل‌های مختلف بستر زبر قرار داده بودند. این موضوع زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که بستر زبر در مقیاس واقعی و خارج از آزمایشگاه طراحی و اجرا شود. در واقع در انتخاب بین دو زبری با تأثیر یکسان بر روی پرش، طول ثابت و طول موج زبری متفاوت، زبری بهینه زبری است که طول موج بلندتری داشته باشد، زیرا اجرای آن آسان‌تر و کم هزینه‌تر است.

هدف در این تحقیق بررسی تغییرات ویژگی‌های پرش نسبت به افزایش طول موج زبری‌ها و در نهایت ارائه روابط مناسب برای تغییرات ویژگی‌های پرش نسبت به تغییرات طول موج زبری است. لازم به ذکر است ویژگی‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل طول پرش، عمق ثانویه پرش و همچنین طول مؤثر زبری‌ها<sup>۱</sup> می‌باشد. طبق تعریف طول مؤثر اندازه‌ای است که اگر طول زبری از آن بیشتر شود تأثیری بر روی ویژگی‌ها پرش نمی‌گذارد. این پارامتر برای طول پرش و عمق ثانویه به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روشها

آزمایش‌های مورد نیاز در این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. فلوم مورد استفاده ۱۲ متر طول و ۴۰ سانتی‌متر عرض و ارتفاع داشت. دیواره فلوم از جنس پلاکسی گلاس شفاف بود که این امکان را می‌داد که رفتار پرش از نزدیک مطالعه شود. در این کانال آب از یک منبع واقع در بیرون آزمایشگاه، به کمک یک پمپ سانتریفیوژ و از طریق لوله ورودی کانال به مخزن ابتدایی وارد می‌شود. در انتهای مخزن یک سرریز مثلی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌آورد و آب پس از عبور از آن وارد حوضچه آرامش

منظور یافتن راهکارهایی برای به وقوع پیوستن پرش‌هایی با ابعاد کوچکتر انجام شده است.

از مهمترین سازه‌های طراحی شده در این زمینه می‌توان به حوضچه‌های آرامش استاندارد اشاره کرد. این حوضچه‌ها دارای بلوک‌هایی هستند که در برابر جریان قرار گرفته و باعث استهلاک انرژی پرش می‌شوند. معیار انتخاب این حوضچه‌ها بر اساس اندازه عدد فرود قبل از پرش است (ابریشمی و حسینی، ۱۳۸۷). از میان روش‌هایی که در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده، زبر نمودن بستر است. زبر نمودن بستر عبارت است از تغییر شکل بستر پرش به شکل‌های مثلی، ذوزنقه‌ای، سینوسی و غیره که به این اجزا زبری بستر گویند. از مهمترین ویژگی‌های بستر زبر همتراز بودن رأس زبری‌ها با بستر کانال در بالادست و پایین‌دست پرش هیدرولیکی می‌باشد.

راجاراتنام (۱۹۶۸) نشان داد که زبری‌های ممتد مثلی طول پرش را به اندازه قابل توجهی کاهش می‌دهند. این موضوع توسط محققان بعدی نیز تأیید شد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) با انجام تحقیقاتی بر روی پرش بر بستر زبر با ارتفاع زبری ۲/۵ سانتی‌متر در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ نشان دادند که بستر زبر طول پرش را ۵۰ درصد و عمق ثانویه را به میزان ۲۵ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌دهند. ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷)، با انجام آزمایش‌هایی بر روی بستر زبر ذوزنقه‌ای در محدوده اعداد فرود بین ۴ تا ۱۲ نشان دادند که تحت تأثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع ذوزنقه‌ای، طول پرش ۵۰ درصد و عمق ثانویه پرش ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. این تأثیرات در تحقیقات سایر محققان از جمله عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، غزالی (۱۳۸۹) و توکیای (۲۰۰۵) تأیید شد. با توجه به این نتایج زبرکردن بستر را می‌توان از جمله راه کارهای مؤثر برای کنترل پرش مد نظر قرار داد. از جمله پارامترهای مهمی که در تحقیقات پیشین به آن

گالوانیزه استفاده شد، به این صورت که ورق گالوانیزه بر روی بخشی از طول زبری که مورد نیاز نبود، قرار داده می‌شد و این زبری‌ها از مسیر جریان آب خارج می‌شدند. این ورق به وسیله پایه‌هایی در جای خود ثابت می‌شد. این پایه‌ها متحرک بوده و در کشوهایی که در دیواره کانال نصب شده بود به جلو و عقب حرکت می‌کردند و عملاً در مسیر جریان آب قرار نمی‌گرفتند. طرح‌واره این روش در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات زبری‌های استفاده شده در آزمایش‌ها

ردیف	نام زبری	S (cm)	L <sub>1</sub> (cm)	a <sub>1</sub> (درجه)	L <sub>2</sub> (cm)	a <sub>2</sub> (درجه)
۱	A	۵/۵	۲/۵	۳۶	۳/۸	۲۳
۲	B	۸/۵	۳/۴	۲۶	۵/۷	۱۵
۳	C	۱۱	۴/۳	۲۰	۷/۶	۱۲
۴	D	۱۳	۵/۲	۱۶	۸/۱	۱۰

به منظور یافتن پارامترهای مؤثر بر تغییرات عمق ثانویه پرش (y<sub>2</sub>) نخست به آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر بر عمق ثانویه پرداخته می‌شود. اگر y<sub>1</sub> عمق فوق بحرانی پرش بر روی بستر زبر، u<sub>1</sub> سرعت متوسط جریان قبل از پرش، و y<sub>2</sub> عمق ثانویه پرش باشد، می‌توان نوشت:

$$y_2 = f_1(y_1, u_1, g, \mu, \rho, s, t) \quad (1)$$

که در این رابطه g شتاب ثقل، ρ جرم مخصوص آب، μ لزجت آب، s طول موج زبری و t ارتفاع موج زبری است. بنابراین با توجه به تئوری باکینگهام رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2\left(\text{Re} = \frac{u_1 y_1}{\nu}, \text{Fr}_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}\right) \quad (2)$$

در این مطالعه مقدار عدد رینولدز در محدوده ۵۱۲۰۹ تا ۸۹۵۱۴ می‌باشد که بیانگر جریان آشسته است. بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد.

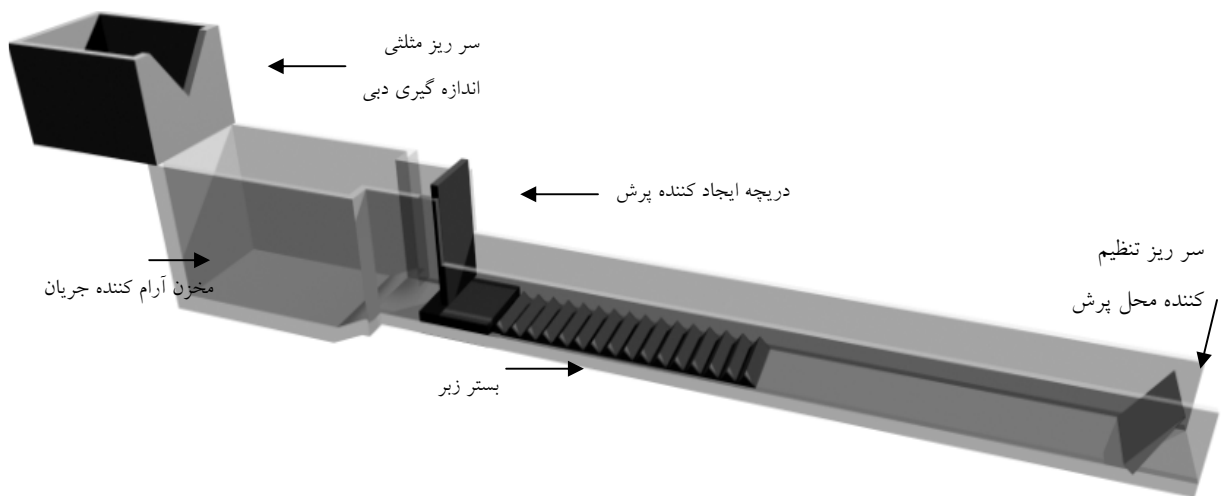
ابتدای فلوم شده که جهت آرام نمودن جریان ورودی از شبکه‌های توری فلزی و لاستیکی استفاده می‌شود و پس از طی طول کانال و عبور از روی سر ریز متحرک انتهایی کانال و ریزش به حوضچه رسوب‌گیر، به صورت ثقلی به مخزن اصلی بر می‌گردد.

برای ایجاد پرش هیدرولیکی از یک دریچه کشویی<sup>۱</sup> به ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر استفاده شد. وجود دریچه باعث کاهش عمق و افزایش سرعت جریان، بالا رفتن عدد فرود و در نتیجه فوق بحرانی شدن جریان خروجی می‌شود. با افزایش زاویه سرریز متحرک انتهایی عمق پایاب برای ایجاد پرش تنظیم می‌شد. از آنجاکه شیب فلوم بعد از دریچه ملایم<sup>۲</sup> می‌باشد، جریان تمایل دارد به حالت زیر بحرانی تبدیل شود و در نتیجه پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. نمای شماتیک فلوم مورد استفاده در آزمایشها در شکل ۱ نشان داده شده است. طول پرش هیدرولیکی در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که تلاطم از بین رفته و سطح آب با پایاب<sup>۳</sup> برابر باشد. بنابراین طول پرش به صورت مشاهده‌ای قابل اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین عمق اولیه و ثانویه پرش با استفاده از عمق‌سنج<sup>۴</sup> در انتهای پرش اندازه‌گیری شد.

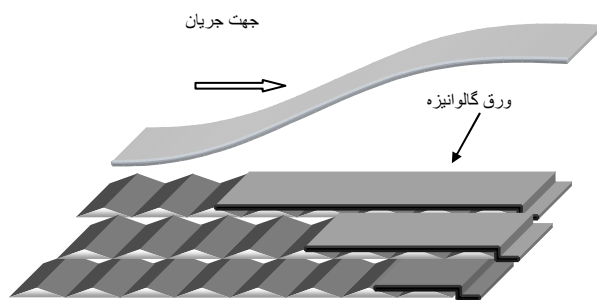
شکل زبری‌ها مثلثی است که طول ضلع رو به جریان آن از طول ضلع پشت به جریان بیشتر است. شکل زبری‌های مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات کامل زبری‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. ارتفاع زبری (t) در تمامی زبری‌ها ۱/۵ سانتی‌متر است.

به منظور بررسی طول مؤثر زبری‌ها، ویژگی‌های پرش برای ۵ طول زبری مورد بررسی قرار گرفت. افزایش طول زبری تا جایی ادامه داشت که تغییری در ویژگی‌های پرش مشاهده نشود. برای تغییر طول زبری‌ها از ورق صاف

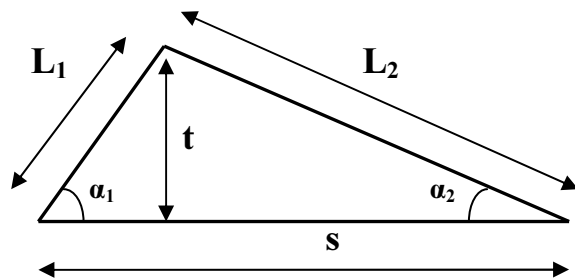
1. Sluice Gate  
2. Mild  
3. Tail Water  
4. Piont Gage



شکل ۱ طرح‌واره فلوم مورد استفاده



شکل ۳ طرح‌واره روش تغییر طول زبری



شکل ۲ زبری مورد استفاده در آزمایشات

تغییرات نسبت اعماق مزدوج و تغییرات طول پرش نسبی نسبت به افزایش عدد فرود در شکل ۴-الف و در شکل ۴-ب قابل ملاحظه است. در شکل ۴-الف خط منقطع نمودار مربوط به معادله بلانگر می‌باشد. این معادله تغییرات عمق ثانویه نسبت به عدد فرود را بر روی بستر صاف نشان می‌دهد. همچنین در این شکل داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر بر روی بستر صاف نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این داده‌ها تقریباً بر روی خط مربوط به معادله بلانگر قرار گرفته‌اند. با توجه به این شکل‌ها بستر زبر باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شود، ولی تغییر طول موج تأثیر چندانی بر تغییرات عمق ثانویه بر روی بستر زبر ندارد. توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود تغییرات طول موج بر روی تغییرات طول نسبی پرش مؤثر می‌باشد.

همچنین با توجه به یکسان بودن ارتفاع موج ( $t$ ) برای کلیه بسترهای زبر می‌توان  $t/y_1$  را حذف کرد و نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3(Fr_1, \frac{s}{y_1}) \quad (3)$$

به همین طریق می‌توان معادله ابعادی را برای طول پرش ( $L_j$ ) بیان کرد:

$$\frac{L_j}{y_1} = f_4(Fr_1, \frac{s}{y_1}) \quad (4)$$

### ۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها برای ۴ زبری A تا C و همچنین آزمایش‌های شاهد<sup>۱</sup> (CO) نشان داده شده است. در این جدول  $Q$  دبی جریان و  $Fr_1$  عدد فرود جریان قبل از پرش است.

1. Control

جدول ۲ مشخصات آزمایش‌های انجام شده

نام آزمایش	Fr	Q	y <sub>2</sub>	L <sub>j</sub>	نام آزمایش	Fr	Q	y <sub>2</sub>	L <sub>j</sub>
A <sub>۱</sub>	۸/۹۴	۱۹/۷	۱۴/۸	۵۰	A <sub>۲</sub>	۵/۸۳	۲۶	۱۵/۶	۵۰
B <sub>۱</sub>			۱۴/۹	۵۰	B <sub>۲</sub>			۱۵/۹	۵۰
C <sub>۱</sub>			۱۵/۵	۵۴	C <sub>۲</sub>			۱۵/۹	۵۰
D <sub>۱</sub>			۱۵/۵	۶۰	D <sub>۲</sub>			۱۶/۳	۵۵
CO <sub>۱</sub>			۱۷/۵	۷۵	CO <sub>۲</sub>			۱۸/۲	۷۰
A <sub>۲</sub>	۱۰/۱۳	۲۳/۵	۱۶/۶	۵۴	A <sub>۳</sub>	۷/۲۶	۳۳/۳	۱۹/۲	۶۳
B <sub>۲</sub>			۱۷/۲	۵۱	B <sub>۳</sub>			۲۰/۱	۶۳
C <sub>۲</sub>			۱۷/۶	۶۵	C <sub>۳</sub>			۲۰	۷۳
D <sub>۲</sub>			۱۷/۶	۷۰	D <sub>۳</sub>			۲۰/۵	۸۰
CO <sub>۲</sub>			۲۰/۴	۸۸	CO <sub>۳</sub>			۲۳/۶	۱۰۰

۹۸/۸ نشان می‌دهد.

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.203Fr_1 - 0.681, R^2 = 0.988 \quad (5)$$

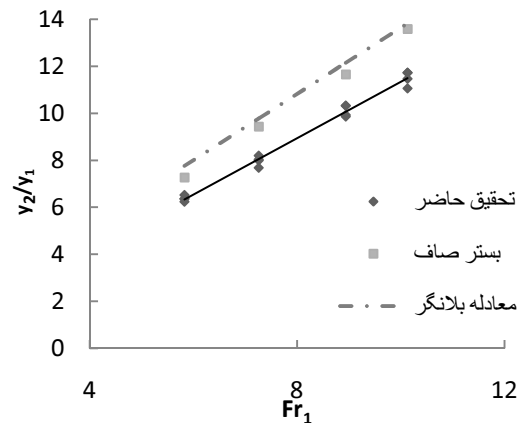
با توجه به شکل ۴-ب، فرم عمومی تغییرات طول پرش نسبت به عدد فرود را می‌توان مطابق رابطه ۶ بیان کرد. ضرایب این معادله برای هر زبری در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\frac{L_j}{y_1} = aFr_1 + b \quad (6)$$

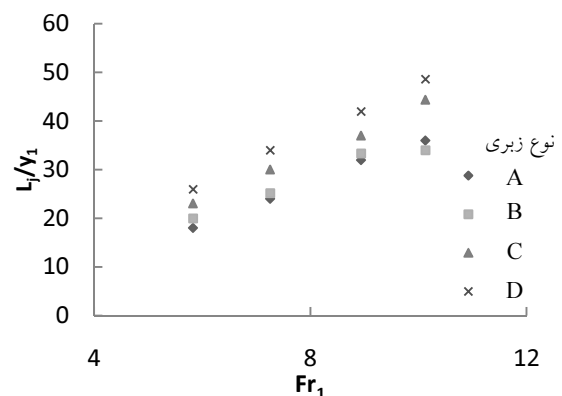
جدول ۳ ضرایب معادله ۶

نام زبری	s/t	a	b	R <sup>2</sup>
A	۳/۶۷	۴/۳	-۶/۸	۱
B	۳/۶۷	۳/۵	۰/۱	۰/۹۵
C	۷/۳۳	۴/۶	-۵/۴	۰/۹۹
D	۸/۶۷	۵/۲	-۴/۲	۱

در شکل ۵-الف تغییرات  $L_j/y_{co}$  نسبت به افزایش عدد فرود نشان داده شده است که در آن عمق ثانویه پرش در بستر صاف و  $L_j$  طول پرش است. همان‌طور که در شکل فوق ملاحظه می‌شود، مقدار  $L_j/y_{co}$  در بستر صاف برابر ۶ است، ولی مقادیر آن برای بستر زیر کمتر از ۶ می‌باشد که نشان دهنده تأثیر زبری‌ها در کاهش طول پرش است. ضمناً ملاحظه می‌شود که تأثیر طول موج‌های



الف- نسبت اعماق مزدوج



ب- نسبت طول پرش

شکل ۴ تغییرات خصوصیات پرش با عدد فرود

معادله (۵) تغییرات نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود را بر روی بستر زیر در تحقیق حاضر با ضرایب رگرسیون

اندازه ضریب کاهش عمق ثانویه بین ۰/۱۰ تا ۰/۱۸ است که بیشینه آن در طول موج ۳/۶۷ برای عدد فرود ۱۰/۱۳ اتفاق می‌افتد. زبری‌ها به طور متوسط ۱۴ درصد عمق ثانویه را کاهش می‌دهند که این مقدار در تحقیقات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ۲۵ درصد و در تحقیقات ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷) ۲۰ درصد گزارش شده است. اختلاف موجود بین مقادیر بدست آمده برای کاهش طول پرش و عمق ثانویه در این تحقیق و نتایج سایر محققان را شاید بتوان کوتاه‌تر بودن ارتفاع زبری در این تحقیق عنوان کرد. ارتفاع زبری‌ها در این تحقیق ۱/۵ سانتی‌متر و در تحقیقات ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷) و اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ۲/۵ سانتی‌متر است.

### ۳-۱- بررسی تغییرات ابعاد پرش نسبت به افزایش طول موج نسبی زبری‌ها (s/t)

#### ۳-۱-۱- عمق ثانویه

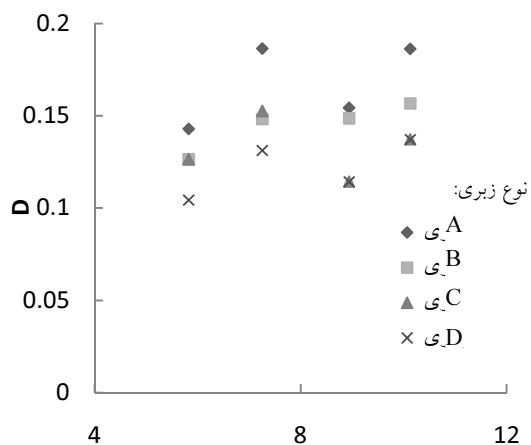
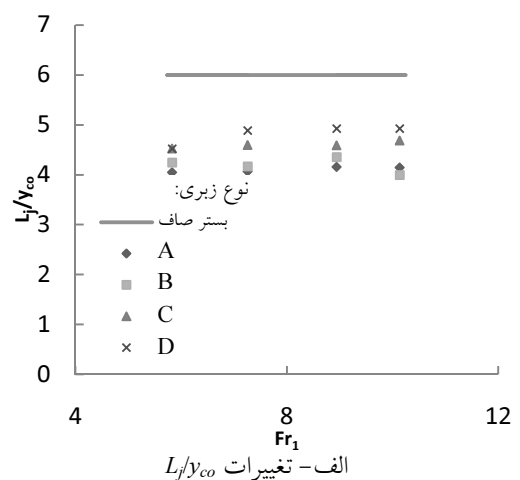
برای نشان دادن تغییرات عمق ثانویه پرش ( $y_2$ ) نسبت به تغییرات طول موج زبری‌ها ( $s/t$ ) ارتفاع زبری‌ها و  $s$  طول موج) از پارامتر ضریب کاهش عمق نسبی ( $D$ ) استفاده شد. شکل ۶ تغییرات عمق ثانویه پرش را نسبت به تغییرات طول موج زبری برای مقادیر مختلف عدد فرود نشان می‌دهد. روند کاهشی این پارامتر نشان می‌دهد که با افزایش طول موج، تأثیر زبری بر عمق ثانویه کاهش می‌یابد، ولی با افزایش عدد فرود میزان تغییرات این پارامتر افزایش می‌یابد. رابطه (۸) تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه جریان برای مقادیر مختلف عدد فرود را نشان می‌دهد. این معادله در شکل ۶ با خط ممند نشان داده شده است.

$$D = -0.009 \left( \frac{s}{t} \right) + 0.197 \quad (8)$$

#### ۳-۱-۲- طول پرش هیدرولیکی

به منظور بررسی تغییرات طول پرش هیدرولیکی ( $L_j$ ) نسبت به تغییر طول موج زبری‌ها ( $s/t$ ) از پارامتر ضریب کاهش طول پرش هیدرولیکی ( $L_j^*$ ) استفاده شد. این

کوتاه در کاهش طول پرش بیشتر از طول موج‌های بلند است. در مجموع زبری‌های مورد استفاده در این تحقیق طول پرش را ۲۰ تا ۴۲ درصد و به طور متوسط ۲۹ درصد کاهش دادند. درصد کاهش طول پرش در نتایج مطالعات توکیای (۲۰۰۵) ۳۵ درصد، در آزمایش‌های عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷) تقریباً ۵۰ درصد گزارش شده است.



ب- تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه

شکل ۵ تغییرات پارامترهای پرش با عدد فرود

همچنین در شکل ۵- ب تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه ( $D$ ) نسبت به عدد فرود نشان داده شده است.  $D$  از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$D = \frac{y_{co} - y_2}{y_{co}} \quad (8)$$

عدد فرود در شکل ۷ قابل ملاحظه است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش طول موج زبری‌ها میزان ضریب کاهش طول پرش ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود مقدار تغییرات این پارامتر بیشتر می‌شود. معادله ۱۱ رابطه استخراج شده از شکل ۷ برای تغییرات ضریب کاهش طول پرش نسبت به تغییرات طول موج زبری‌ها می‌باشد که در این شکل با خط ممتد نشان داده شده است.

$$L_j^* = -0.008\left(\frac{s}{t}\right)^2 + 0.076\left(\frac{s}{t}\right) + 0.183 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.72$$

### ۲-۳- بررسی تغییرات طول مؤثر زبری‌ها ( $L_{rou}^*$ ) نسبت به تغییرات طول موج زبری ( $s/t$ )

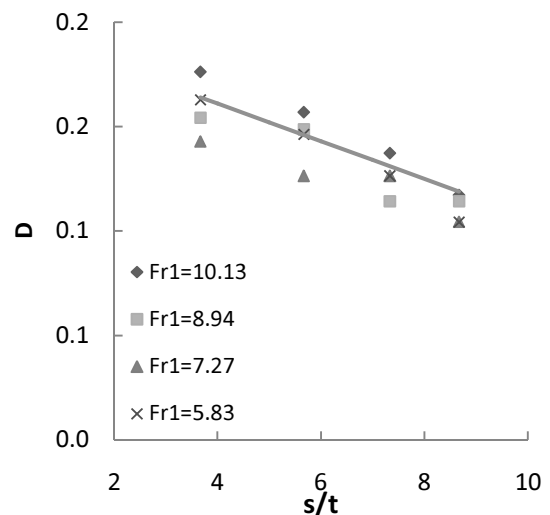
از جمله عواملی که در طراحی حوضچه آرامش نقش مهم و مؤثری را ایفا می‌کند، طول حوضچه آرامش است. در این تحقیق با انجام آزمایش‌هایی بر روی تغییرات ویژگی‌های پرش نسبت به تغییر طول زبری‌ها مشاهده شد که اگر طول زبری‌ها از یک حدی بیشتر شود تغییری در ویژگی‌های پرش ایجاد نمی‌شود. این طول با عنوان طول مؤثر ( $L_{rou}^*$ ) تعریف شد. همچنین مشاهده شد که طول مؤثر حوضچه برای پارامترهای مختلف پرش از جمله طول پرش و عمق ثانویه مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرد. تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه پرش و ضریب کاهش طول پرش نسبت به طول زبری‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ قابل ملاحظه است. نمودارها برای ۴ زبری A، B، C و D رسم شد که بر روی هر زبری ۴ پرش با اعداد فرود مختلف آزمایش شد. با توجه به شکل‌ها با افزایش طول بستر زبر ضرایب کاهش ابعاد پرش افزایش پیدا می‌کند، تا جایی که در طولی برابر با طول مؤثر به یک مقدار ثابت برسد. همچنین افزایش طول موج زبری‌ها از زبری A تا D باعث کاهش این تغییرات می‌شود.

همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش طول

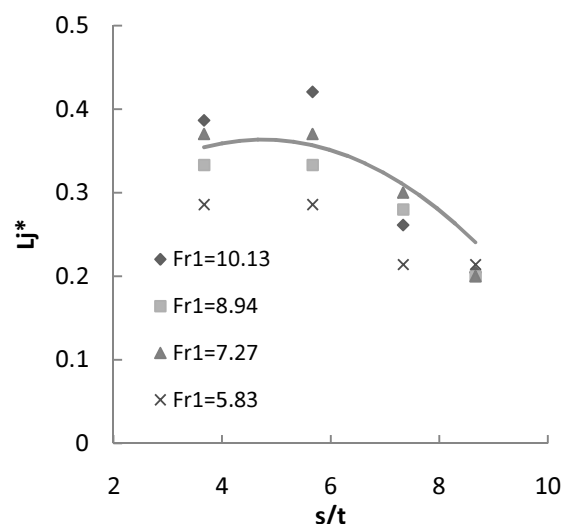
پارامتر از معادله (۹) بدست می‌آید.

$$L_j^* = \frac{L_{jco} - L_j}{L_{jco}} \quad (9)$$

در این معادله  $L_{jco}$  طول پرش بر روی بستر صاف و  $L_j$  طول پرش برای حالتی است که طول زبری برابر طول زبری مؤثر بر روی پرش هیدرولیکی باشد.



شکل ۶ تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه نسبت به تغییرات طول موج زبری برای اعداد فرود مختلف

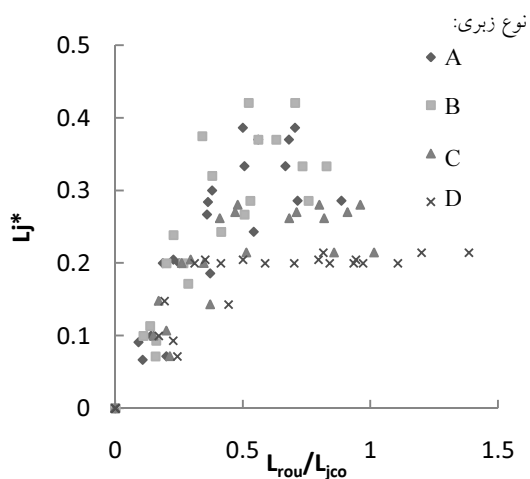


شکل ۷ تغییرات ضریب کاهش طول پرش نسبت به تغییرات طول موج زبری برای اعداد فرود مختلف

روند تغییرات ( $L_j^*$ ) در مقابل ( $s/t$ ) برای رقم‌های مختلف

$$\frac{L_{rou}}{y_{co}} = 0.029\left(\frac{S}{t}\right)^2 - 0.101\left(\frac{S}{t}\right) + 2.340 \quad (11)$$

$R^2 = 0.80$



شکل ۹ تغییرات ضریب کاهش طول پرش نسبت به طول زبری

### ۲-۲-۳-۲ طول پرش هیدرولیکی

در شکل ۱۱ تغییرات طول مؤثر زبری‌ها بر روی طول پرش هیدرولیکی نسبت به تغییر طول موج زبری قابل مشاهده می‌باشد. به منظور بررسی بهتر مقادیر طول مؤثر برای طول پرش، این داده‌ها بی‌بعد شدند. نمودار در مجموع یک روند نزولی را نشان می‌دهد. در واقع با افزایش طول موج زبری‌ها، طول مؤثر زبری‌ها کاهش می‌یابد. معادله (۱۲) تغییرات طول مؤثر نسبی برای طول پرش نسبت به تغییرات طول موج را نشان می‌دهد.

$$\frac{L_{rou}}{y_{co}} = -0.039\left(\frac{S}{t}\right)^2 + 0.33\left(\frac{S}{t}\right) + 1.69 \quad (12)$$

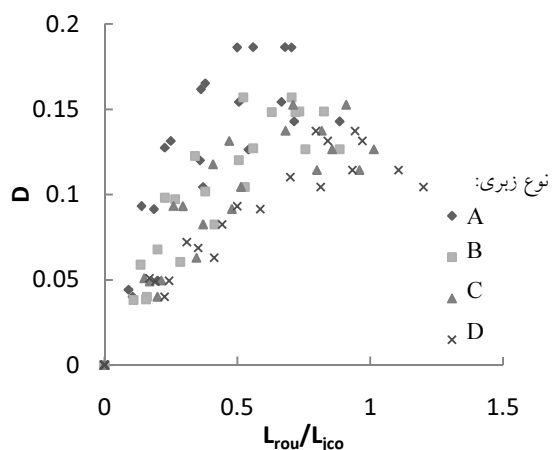
$R^2 = 0.74$

این معادله در شکل ۱۱ با خط ممتد نشان داده شده است. طول مؤثر برای طول پرش از ۱/۳۱ تا ۳/۱۴ برابر عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف برای زبری‌های مختلف متغیر است. در شکل ۱۲ نمودارهای بدست آمده برای تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه و طول پرش نسبت به طول موج قابل مشاهده می‌باشند.

موج زبری‌ها طول تأثیر آنها نیز تغییر می‌کند. در شکل ۸ طول تأثیر زبری‌ها با افزایش طول موج افزایش (کشیدگی بیشتر نمودارها) و در شکل ۹ کاهش (کشیدگی کمتر نمودارها) می‌یابد. این موضوع در ادامه به صورت دقیق‌تر بررسی می‌شود.

### ۳-۲-۱-۳ عمق ثانویه

در شکل ۱۰ تأثیر تغییر طول موج زبری‌ها بر طول مؤثر زبری برای عمق ثانویه برای هر عدد فرود مشاهده می‌شود. به منظور بررسی بهتر، با تقسیم طول تأثیر بر عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف ( $y_{co}$ ) این پارامتر بی‌بعد شد. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش طول موج زبری‌ها طول تأثیر آنها ( $L_{rou}^*$ ) بر روی کاهش عمق ثانویه بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش طول موج زبری‌ها برای کاهش عمق ثانویه به طول بیشتری از زبری نیاز است. در این نمودار طول تأثیر زبری‌ها بر عمق ثانویه از ۲/۱۵ تا ۴ برابر عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف متغیر می‌باشد.

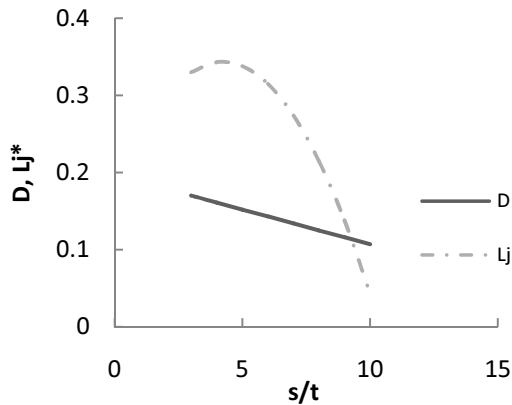


شکل ۸ تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه نسبت به افزایش طول زبری

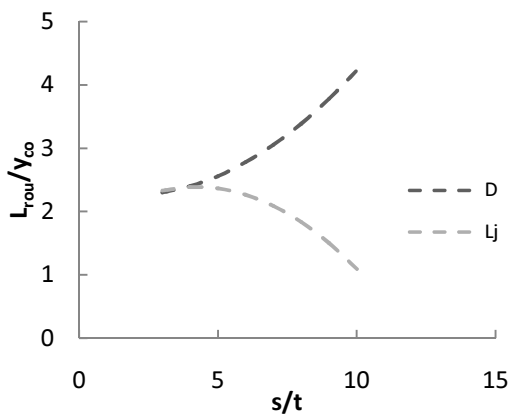
معادله ۱۱ تغییرات طول مؤثر برای عمق ثانویه نسبت به تغییرات طول موج را نشان می‌دهد. این معادله با خط ممتد در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ تقریباً محل برخورد منحنی طول مؤثر برای عمق ثانویه و منحنی طول مؤثر برای طول پرش می‌باشد.

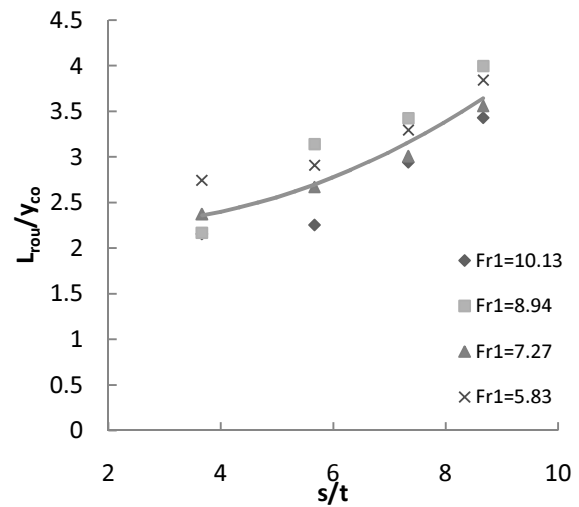


شکل ۱۲ تغییرات ضریب کاهش طول پرش و عمق ثانویه نسبت به طول موج

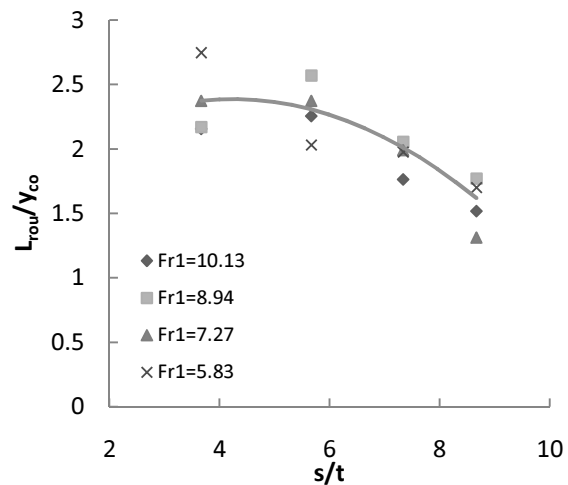


شکل ۱۳ تغییرات طول مؤثر برای عمق ثانویه و طول پرش نسبت به تغییر طول موج

نکته حایز اهمیت در شکل ۱۳ روند معکوس تغییرات طول مؤثر ضریب کاهش عمق ثانویه در برابر افزایش طول موج نسبت به تغییرات ضریب کاهش طول پرش می‌باشد. در واقع با افزایش طول موج زبری‌ها مؤثر بستر زبر برای عمق ثانویه افزایش می‌یابد، در صورتی که طول مؤثر بستر زبر برای طول پرش کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که طول پرش و عمق ثانویه تحت تأثیر تغییرات زبری رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند که نیازمند بررسی‌های بیشتری می‌باشد.



شکل ۱۰ تغییرات طول مؤثر زبری برای عمق ثانویه نسبت به طول موج زبری برای اعداد فرود مختلف



شکل ۱۱ تغییرات طول مؤثر زبری برای طول پرش نسبت به طول موج زبری برای اعداد فرود مختلف

همچنین در شکل ۱۳ تغییرات طول مؤثر برای عمق ثانویه و طول پرش نسبت به طول موج نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان گفت طول موج بهینه در زبری نسبی (s/t) برابر ۵ اتفاق می‌افتد. این نقطه در شکل ۱۲ نقطه اوج منحنی ضریب کاهش طول پرش می‌باشد. این موضوع بیانگر این است که در طول موج نسبی برابر ۴/۵ بیشترین مقدار کاهش طول پرش رخ داده است و در

## ۴- نتیجه گیری

زبری بستر باعث کوچکتر شدن ابعاد پرش هیدرولیکی می‌شود که اندازه این تغییرات به طول موج زبری بستری بستگی دارد. مطالعه حاضر نشان داد که زبری‌ها طول پرش را به اندازه ۲۰ تا ۴۲ درصد و عمق ثانویه را ۱۰ تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهند.

با توجه به نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج زبری بستر ابعاد پرش در مجموع کاهش می‌یابند. این تغییرات برای طول پرش نسبت به عمق ثانویه مقادیر بزرگتری به خود می‌گیرد. با بررسی نمودارهای مربوط به طول مؤثر مشاهده می‌شود طول مؤثر برای عمق ثانویه با افزایش طول موج افزایش می‌یابد در صورتی که طول مؤثر برای طول پرش با افزایش طول موج کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات طول پرش و عمق ثانویه تحت تأثیر عوامل متفاوتی انجام می‌گیرد. تغییرات طول موج زبری بستر باعث تغییر طول مؤثر زبری‌ها برای ویژگی‌های مختلف پرش می‌شود. طول مؤثر برای عمق ثانویه با افزایش طول موج از ۲/۱۵ تا ۴ برابر عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف و طول مؤثر برای طول پرش از ۱/۳۱ تا ۳/۱۴ برابر عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف متغیر می‌باشد. با توجه به نمودارهای به دست آمده برای تغییرات ویژگی‌های پرش و طول‌های مؤثر نسبت به افزایش طول زبری، زبری نسبی ( $s/t$ ) برابر ۴/۵ به‌عنوان زبری بهینه پیشنهاد شد.

## ۵- فهرست علائم

$D$	ضریب کاهش عمق
$Fr_1$	عدد فرود جریان قبل از پرش
$L_j$	طول پرش
$L_j^*$	ضریب کاهش طول پرش
$L_{rou}$	طول زبری

دبی

$Q$

عدد رینولدز

$Re$

طول موج زبری

$s$

ارتفاع زبری

$t$

سرعت اولیه جریان

$U_1$

عمق اولیه

$y_1$

عمق ثانویه

$y_2$

## ۶- منابع

ابریشمی، جلیل و حسینی، سید محمود (۱۳۷۸). هیدرولیک کانال‌های باز، چاپ هفتم، مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

غزالی، محبوبه (۱۳۸۹). تأثیر دندان‌های بودن بستر حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

سوبرامانیا (۱۳۷۲). جریان در آبراه‌های روباز، جواد فرهودی، انتشارات دانشگاه ارومیه، ارومیه.

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), pp. 2045-2055.

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

Izadjoo, F. and Shafai Bejestan M. (2007). "Corrugated bed hydraulic jump stilling basin" Applied Sciences, 7(8), pp. 1164-1169.

Rjaratnam N. (1968). "Hydraulic jump on rough bed", Trans. Eng. Inst. Canada, 11, pp.1-8.

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