



## مطالعه آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی بروی بستر زبر در تبدیل ها

قائم قصابی<sup>۱</sup>، محمدرضا جعفرزاده<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

ghaemghassabi@yahoo.com  
jafarzad@um.ac.ir

### خلاصه

تاکنون مطالعات بسیاری درخصوص پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی صورت گرفته است اما درزمینه پرش هیدرولیکی در تبدیل همگرا به دلیل دشواری آزمایشها تحقیقات اندکی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر، خصوصیات پرش هیدرولیکی در تبدیل همگرا بررسی گردید. هدف از انجام این تحقیق بررسی اعماق نسبی پرش هیدرولیکی، طول پرش و طول غلطاب پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف بستر می باشد. با توجه به نتایج حاصله از داده های اندازه گیری شده در راستای اهداف تحقیق، مشخص گردید که مقادیر اعماق نسبی پرش در یک تبدیل همگرا نسبت به حالت کلاسیک، کاهش در حدود ۲۵ درصد پیدا می کند. همچنین، زبری بستر طول پرش را نیز نسبت به پرش کلاسیک کاهش می دهد.

**کلمات کلیدی:** جریان متغیر سریع، تبدیل، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، نسبت عمق ثانویه به اولیه

### ۱. مقدمه

تبدیل، عبارت از سازه هیدرولیکی کوتاهی است که برای تغییر سطح مقطع و یا شکل کانال مورد استفاده قرار می گیرد. در صورت طراحی درست تبدیل ها، از ایجاد امواج ناخواسته و سایر آشفتگی های جریان جلوگیری شده و در نتیجه افت انرژی ناشی از تغییر مقدار حرکت به حداقل خود خواهد رسید. با این شرایط، تغییرات در شکل و وضعیت جریان تدریجی و به تعبیری خطوط جریان به نحوی هدایت می شوند که تقریباً موازی و جریان آب آرام باشد. به همین دلیل با در نظر گرفتن فرضیاتی، در طرح تبدیلی ها، می توان از تئوری جریان های متغییر تدریجی استفاده نمود. تحلیل جریان در تبدیل ها، هنگامی که جریان فوق بحرانی است، به دلیل ایجاد امواج ایستا و همچنین پرش هیدرولیکی دارای پیچیدگی بیشتری می باشد. روابط ارائه شده برای تعیین مشخصات جریان در این حالت، با استفاده از تجربیات آزمایشگاهی و یا با در نظر گرفتن فرضیات مختلف، از معادلات پیوستگی و مومنوم بدست می آیند.

پرش بر روی حوضچه های با دیواره همگرا اولین بار توسط اپین در سال ۱۹۵۱ مورد مطالعه قرار گرفت [۱]. اپین اظهار کرد که پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا دارای مشخصات جریان موجی بر روی سطح آب بدون ایجاد گردابه می باشد، اما اگر عدد فرود اولیه از عدد ۱/۷ کمتر گردد، آنگاه پرش به صورت موج های متناوب تشکیل می شود. این نوع پرش در کانال های مستطیلی با تنگ شدگی عرض کانال ایجاد می شود، که می تواند اثر فرسایشی بر روی دیواره ها داشته باشد [۱]، جانسون و مونتز در سال ۱۹۹۵ آزمایش هایی در خصوص پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا در کانال های مستطیلی انجام دادند. تحقیقات آنان نشان داد که تئوری کلاسیک پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با جریان های فوق بحرانی مطابقت بیشتری دارد [۲]. همچنین اتسو [۳] نشان داد که پرش هیدرولیکی مایل، به عدد فرود جریان ورودی، میزان شیب عدد رینولدز و فاصله پاشنه پرش تا تاج پرش بستگی دارد.

لذا پژوهش حاضر با هدف توسعه تحقیقات انجام شده در گذشته برای بررسی پرش در تبدیل همگرا انجام گرفت، در این پژوهش ضمن تعیین نسبت اعماق مزودج در پرش های هیدرولیکی کانال های همگرا، طول پرش و افت نسبی در شرایط سه زبری نسبی  $k_s = 0.0, 11/35, 16/1$ ، در نهایت نتایج بدست آمده با پرش کلاسیک نیز مقایسه گردید.

### ۲. تحلیل پرش هیدرولیکی در مقاطع با دیواره همگرا

ایجاد یک پرش در مقاطع همگرا مستلزم ایجاد جریان فوق بحرانی می باشد تا پرش در پایین دست ایجاد و ضمن تثبیت به سمت بالادست نیز حرکت نماید. در ضمن برای جلوگیری از پدیده انسداد در هنگام پرش، عدد فرود اولیه نیز می بایست به اندازه کافی بزرگ انتخاب گردد [۴]. با توجه به شکل ۱ اگر دیواره های قائم یک کانال دارای زاویه  $\Delta\theta$  به سمت داخل باشد، آنگاه پرش هیدرولیکی زاویه ای همچون  $\beta$  نسبت به افق پیدا می کند (شکل ۱). در نتیجه اگر هیچ نیرویی بصورت موازی در جهت پرش هیدرولیکی وجود نداشته باشد می توان عدد فرود نرمال قبل از پرش را به صورت زیر تعریف و بیان نمود:

$$F_{r_{n1}} = \frac{V_{n1}}{\sqrt{gh_1}} = \frac{V_1 \sin\beta}{\sqrt{gh_1}} = F_{r1} \sin\beta \quad (1)$$

در این معادله  $\beta$  زاویه انحراف پیشانی پرش نسبت به جهت اولیه سرعت،  $V_{n1}$  سرعت نرمال پیشانی پرش و  $V_1$  سرعت در مقطع اولیه و  $h_1$  عمق اولیه می باشد. همچنین چاو در سال ۱۹۵۹، رابطه زیر را برای پرش هیدرولیکی همگرا ارائه نمود [۵]:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan\beta}{\tan(\beta - \Delta\theta)} \quad (2)$$

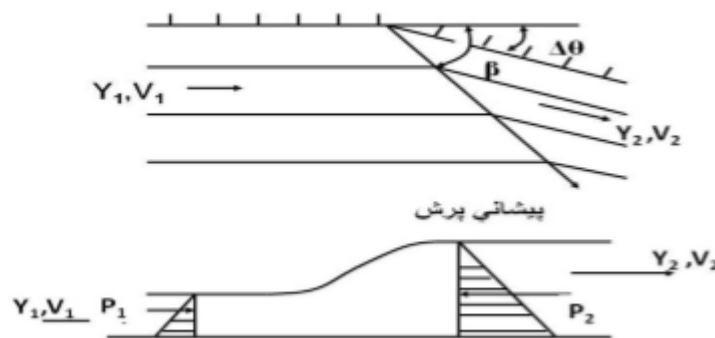
$$\tan\theta = \frac{\tan\beta (\sqrt{1 + 8F_{r1}^2 \sin^2\beta} - 3)}{2 \tan^2\beta + (\sqrt{1 + 8F_{r1}^2 \sin^2\beta} - 1)} \quad (3)$$

مقدار افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با در نظر گرفتن کف کانال به عنوان مبنا را می توان از رابطه انرژی مخصوص مطابق زیر استفاده نمود:

$$E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} = d \cos\theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (5)$$

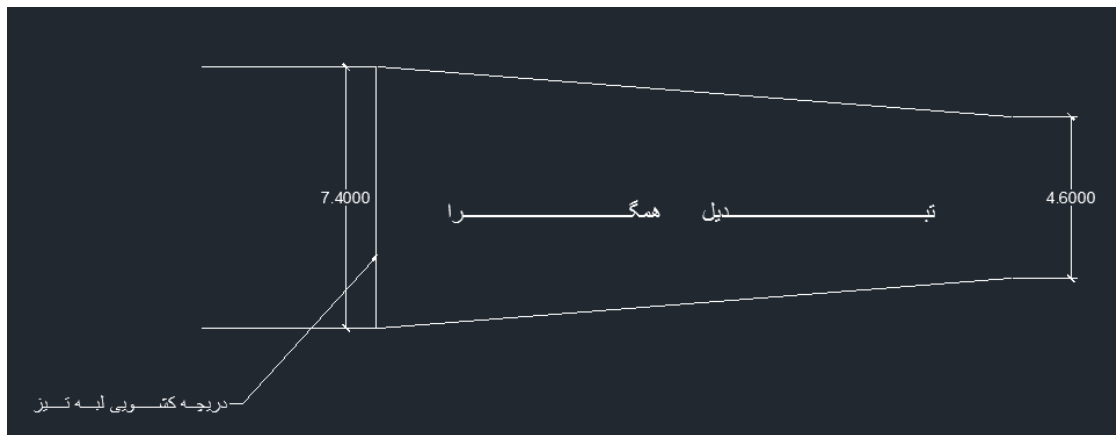
در این رابطه  $\Delta E$  میزان افت انرژی در طول پرش،  $Q$  دبی جریان و  $E$ ،  $y$  و  $A$  به ترتیب انرژی مخصوص، عمق و سطح مقطع جریان بوده و اندیس های ۱ و ۲ به مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش اشاره می کند [۶].



شکل ۱ - نمای یک پرش هیدرولیکی در مقطع همگرا

### ۳. مواد و روش ها

به منظور بررسی پرش هیدرولیکی در تبدیل همگرا از مدل ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیکی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی استفاده گردید (شکل ۲). مدل مورد استفاده شامل یک شبکه فلزی در ابتدای کانال به منظور آرام و منظم نمودن خطوط جریان، تبدیل همگرا با کف و دیواره از جنس شیشه با ضخامت ۶ میلی متر و طول ۱/۸۰ متر برای ایجاد پرش پایدار استفاده شد. از یک دریچه کشویی قائم، در ابتدای تبدیل برای ایجاد جریان فوق بحرانی استفاده گردید. اندازه گیری دبی به صورت حجمی صورت گرفت و با گذاشتن یک شیر افت در طول لوله انتقال آب دبی های مختلف ایجاد گردید.



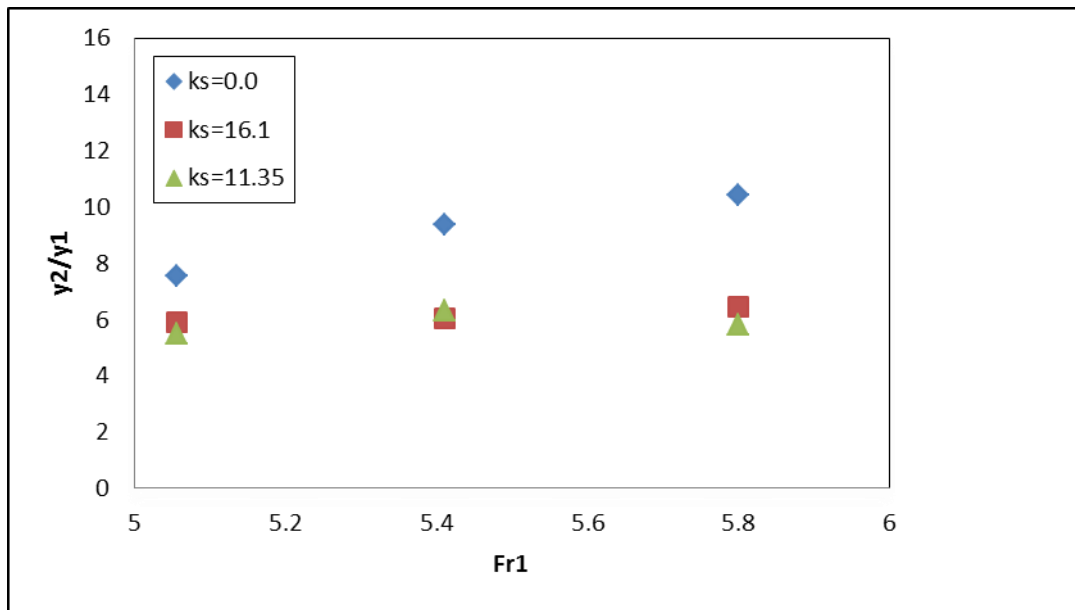
شکل ۲- پلان تبدیل همگرا

برای اندازه گیری عمق پرش در ابتدا و پایاب از عمق یاب نقطه‌ای با دقت  $\pm 0/1$  میلی متر استفاده شد و در هر مقطع و به خصوص در ابتدای پرش به علت حساسیت بیشتر از میانگین اعماق سه نقطه در عرض کانال به عنوان عمق متوسط جریان آن مقطع استفاده شد. لازم به ذکر است در حین آزمایش‌های مربوط به این تحقیق طول پرش اندازه گیری شده برابر است با فاصله افقی از شروع پرش تا نقطه‌ای بر روی سطح آب، بلافاصله پس از آخرین موج غلطان که در آن نقطه ارتفاع آب تقریباً با ارتفاع پایاب برابر می‌گردد.

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱- نسبت اعماق مزدوج

یکی از پارامترهای مهم در محاسبات مربوط به پرش هیدرولیکی نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش می‌باشد و کاهش مقدار نسبت اعماق پرش می‌تواند به عنوان یک اصل در طراحی حوضچه آرامش مورد استفاده قرار گیرد، در این صورت ضمن کاهش مقدار ارتفاع دیواره تبدیل، از ارتفاع قائم آزاد نیز تا حدودی کاسته می‌گردد [۴]. در شکل ۳ تاثیر زبری بستر بر مقادیر نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه نشان داده شده است که در منحنی مربوط با زبری صفر (پرش کلاسیک) مقایسه انجام گردیده است. در این تحقیق دبی‌های مورد آزمایش در تمامی زبری‌ها و شیب صفر یکسان می‌باشد که با مشاهده شکل ۳ مشخص می‌گردد که عمق نسبی پرش در شرایط این تحقیق نسبت به پرش کلاسیک در زبری  $k_s = 16/1$  با 32٪ کاهش، در زبری  $k_s = 11/35$  با 35٪ کاهش همراه بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که زبری بستر تاثیر بسزایی در کاهش عمق نسبی پرش می‌تواند داشته باشد.



شکل ۳- نمودار عمق نسبی پرش در تبدیل همگرا

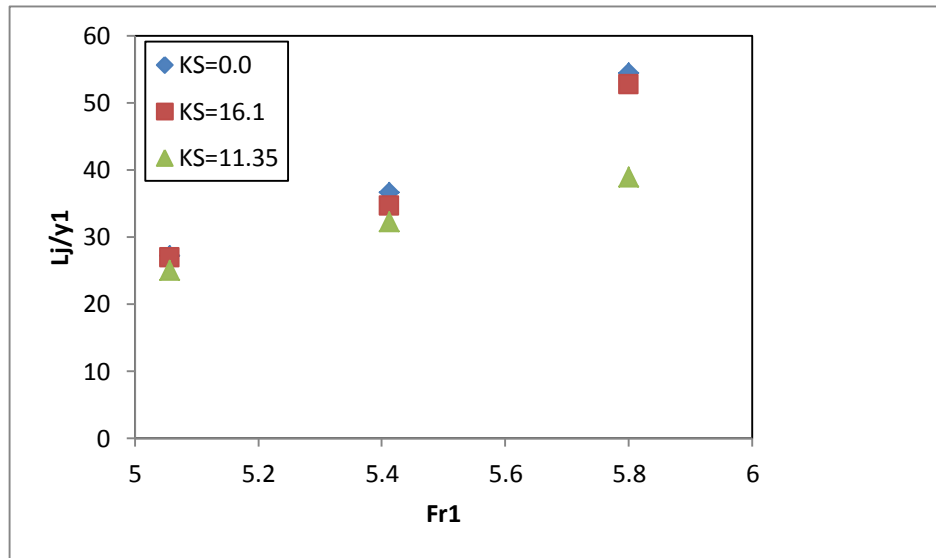
در جدول ۱ مقایسه‌ای بین اعماق نسبی پرش در دبی یکسان در سه حالت نشان داده شده است، با توجه به این جدول درمی‌یابیم که زبری بستر عمق نسبی پرش را کاهش می‌دهد.

جدول ۱- داده‌های محاسبه شده برای تبدیل همگرا

$d_{50}$ (mm)	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$F_{r1}$	$y_2/y_1$	$L_j/y_1$	$E/E_1$
smooth	12447/13	5/799861	10/4	54/.45	0/831003
smooth	11614/12	5/411712	9/383333	36/66667	0/822086
smooth	10851/1	5/056175	7/55	27/21667	0/823847
16/1	12447/13	5/799861	6/45	52/78333	0/862542
16/1	11614/12	5/411712	6/05	34/61667	0/849696
16/1	10851/1	5/056175	5/883333	26/95	0/83571
11/35	12447/13	5/799861	5/833333	38/88333	0/862041
11/35	11614/12	5/411712	6/3	32/21667	0/849277
11/35	10851/1	5/056175	5/5	25	0/835673

#### ۴-۲- طول پرش

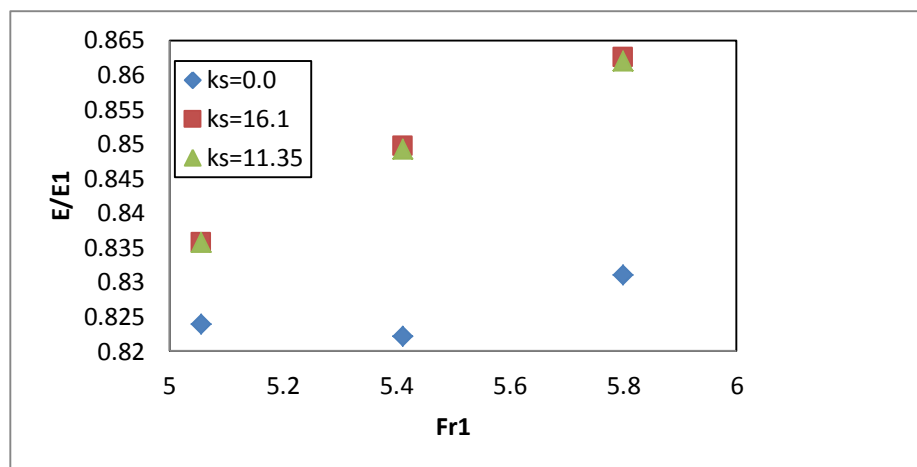
در این تحقیق با انجام آزمایش‌های متعدد، طول پرش برای حالت‌های مختلف مورد مطالعه و اندازه‌گیری قرار گرفت. در شکل ۴ مشاهده می‌گردد که کاهش طول پرش در  $k_s=16.1$  با  $3/2\%$  در  $k_s=11.35$  با  $16/2\%$  می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که زبری بستر بر روی کاهش طول پرش تأثیر دارد.



شکل ۴- نمودار طول نسبی پرش در تبدیل همگرا

#### ۴-۳- افت انرژی

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود تأثیر زبری بستر بر مقادیر افت نسبی انرژی در برابر عدد فرود اولیه مورد بررسی قرار گرفته است، با مشاهده این شکل مشخص می‌گردد که افت نسبی پرش در  $k_s=16.1$  برابر  $3\%$ ، در  $k_s=11.35$  برابر  $2/8\%$  نسبت به پرش بر روی بستر صاف افزایش یافته است.



شکل ۵- نمودار افت انرژی در تبدیل همگرا



جدول (۱) مقایسه‌ای بین افت نسبی پرش در دبی یکسان در سه حالت نشان می‌دهد، با توجه به اطلاعات این جدول در می‌یابیم که با زبری بستر افت نسبی پرش افزایش می‌یابد.

#### ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر بسترهای زبر بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج آن به شرح زیر می‌باشد. نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر در بازه عدد فرود  $5/056$  تا  $5/8$  نسبت به بستر صاف (پرش کلاسیک) کاهش یافته که این میزان کاهش بطور متوسط برابر  $33/5\%$  است. طول پرش در بستر زبر نیز نسبت به بستر صاف به طور متوسط حدود  $10\%$  کاهش پیدا می‌کند. میزان اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر  $2/9\%$  بیشتر از بستر صاف است. مطابق اطلاعات ارائه شده می‌توان بیان نمود که با ایجاد یک تنگ‌شدگی و نیز کنترل موقعیت پنجه پرش، می‌توان شرایطی را مهیا نمود که در آن ضمن ایجاد شرایطی در جهت کاهش عمق ثانویه طول پرش نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک، افت نسبی نیز افزایش می‌یابد.

#### ۶. قدردانی

از مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر فراهم نمودن شرایط مناسب، جهت انجام آزمایش‌های مربوط به این پژوهش، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

#### ۷. مراجع

1. Ippen A.T. 1951. Mechanics of supercritical flow. Transactions. ASCE. 116. pp:268-295.
2. Chanson H. and Montes J.S. 1995. Characteristics of undular hydraulic jump: experiments apparatus and flow patters. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 121(2). pp:129-144.
3. Ohtsu I., and Yasuda Y., and Gotoh H. 1997. Discussion of characteristics of undular hydraulic jump: experimental apparatus and flow patterns . Journal of Hydraulic Engineering . ACSE. 123(2). pp:161-164.

۴. ابریشمی ج، و حسینی م. ۱۳۸۰. هیدرولیک کانال‌های روباز. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

5. Chow V.T. 1959. Open channel hydraulic. McGraw-Hill Book Company. New York.

۶. فرهودی ج، ۱۳۷۲. جریان در آبراه‌های روباز. انتشارات دانشگاه ارومیه.