

## مطالعات آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی همگرا در حوضچه آرامش

تورج هنر<sup>۱\*</sup> - سوده پورحمزه<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۳

### چکیده

تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا صورت گرفته است اما در زمینه پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا به دلیل دشواری آزمایش ها تحقیقات اندکی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر، خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره همگرا بررسی گردید. هدف از انجام این تحقیق بررسی اعماق نسبی پرش هیدرولیکی، طول پرش و افت نسبی پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف دیواره های جانبی 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 حوضچه آرامش با دیواره همگرا نسبت به حالت کلاسیک حدود ۵۶ درصد کاهش پیدا می کند. همچنین همگرایی دیواره، طول پرش را نیز نسبت به پرش کلاسیک حدود ۵۱ درصد کاهش می دهد.

**واژه های کلیدی:** پرش هیدرولیکی، دیواره همگرا، طول پرش هیدرولیکی

### مقدمه

در مقاطع همگرا دارای مشخصات جریان موجی بر روی سطح آب بدون ایجاد گردابه می باشد، اما اگر عدد فرود اولیه از عدد  $1/7$  کمتر گردد، آنگاه پرش بصورت موج های متناوب تشکیل می شود. این نوع پرش عموماً در کانالهای مستطیلی با تنگ شدگی عرض کانال ایجاد می شود، که می تواند اثر فرسایشی بر روی دیواره ها داشته باشد (۵). جانسون و مونتز در سال ۱۹۹۵ آزمایشهایی در خصوص پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا در کانالهای مستطیلی انجام دادند. تحقیقات آنان نشان داد که تئوری کلاسیک پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با جریانهای فوق بحرانی مطابقت بیشتری دارد (۴). همچنین اتسو (۶) 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 ی تحقیقات انجام شده در گذشته برای بررسی پرش در داخل حوضچه با دیواره همگرا انجام گرفت، در این پژوهش ضمن تعیین نسبت اعماق مزدوج در پرش های هیدرولیکی کانالهای همگرا، طول پرش و افت نسبی در شرایط دیواره با سه زاویه همگرایی  $2/7$  درصد، ۴ درصد و  $5/3$  درصد، در نهایت نتایج بدست آمده با پرش هیدرولیکی کلاسیک نیز مقایسه گردید.

ایجاد پرش هیدرولیکی به عنوان یک عامل مهم انرژی گیرنده از دیرباز مورد توجه محققین بوده و در خصوص عواملی که بتوانند موقعیت پرش را کنترل نمایند تحقیقات قابل ملاحظه ای صورت گرفته است. بر این اساس حوضچه های آرامش در شکل ها و مشخصات متفاوت، با توجه به شرایط مختلف حاکم بر جریان آب ساخته شده اند و در هر مورد سعی گردیده این حوضچه ها بنحوی طراحی شوند که نه تنها موجب ایجاد یک پرش مناسب همراه با کاهش انرژی در داخل حوضچه باشند بلکه شرایط پایداری آن نیز تامین گردد. از نقطه نظر اقتصادی حوضچه باید تا حد امکان کوچک و ضامته اضافی کمتری در جهت کاهش هزینه ها در آن بکار رفته باشد. تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی حوضچه های آرامش با دیواره ساده و دیواره واگرا صورت گرفته است، لذا در این تحقیق، پرش در حوضچه هایی با دیواره همگرا مورد بررسی قرار گرفت. پرش بر روی حوضچه های با دیواره همگرا اولین بار توسط ایپن در سال ۱۹۵۱ مورد مطالعه قرار گرفت (۵). ایپن اظهار می دارد که پرش هیدرولیکی

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(\*- نویسنده مسئول (Email: toorajhonar@yahoo.com)

$$E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} = d \cos\theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (۴)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (۵)$$

در این رابطه  $\Delta E$  میزان افت انرژی در طول پرش،  $Q$  دبی جریان و  $E$  و  $y$  و  $A$  به ترتیب انرژی مخصوص، عمق و سطح مقطع جریان بوده و اندیسهای 1 و 2 به مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش اشاره می کنند (۲).

### مواد و روش ها

بمنظور بررسی پرش هیدرولیکی همگرا در حوضچه آرامش با مقطع مستطیلی از مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز استفاده گردید (شکل ۲). مدل مورد استفاده شامل یک شبکه فلزی در ابتدای کانال به منظور آرام و منظم نمودن خطوط جریان، حوضچه آرامش مستطیلی با زبری کف ناچیز با دیواره از جنس شیشه با ضخامت ۶ میلی متر با طول ۱/۵ متر برای ایجاد پرش پایدار استفاده شد. از دو دریچه کشویی قائم، یکی واقع در ابتدای حوضچه برای ایجاد جریان فوق بحرانی و دیگری در فاصله ۵۰ سانتی متری انتهای حوضچه برای تثبیت جریان به همراه یک سر ریز مثلثی ۹۰ درجه در انتهای کانال جهت اندازه گیری دبی استفاده گردید. حوضچه آرامش در این تحقیق بگونه ای ساخته شد که بتوان زاویه همگرایی ۲/۷٪، ۴٪ و ۵/۳٪ را در دیواره آن ایجاد نمود. همچنین با استفاده از دریچه کشویی های موجود جریان های ورودی به حوضچه آرامش با عمق و سرعت های مختلف برای بدست آوردن اعداد مختلف فرود اولیه امکان پذیر گردید.

### تحلیل پرش هیدرولیکی در مقاطع با دیواره همگرا

ایجاد یک پرش پایدار در مقاطع همگرا مستلزم ایجاد جریان آب فوق بحرانی میباشد تا پرش در پایین دست ایجاد و ضمن تثبیت 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 (۱).

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:

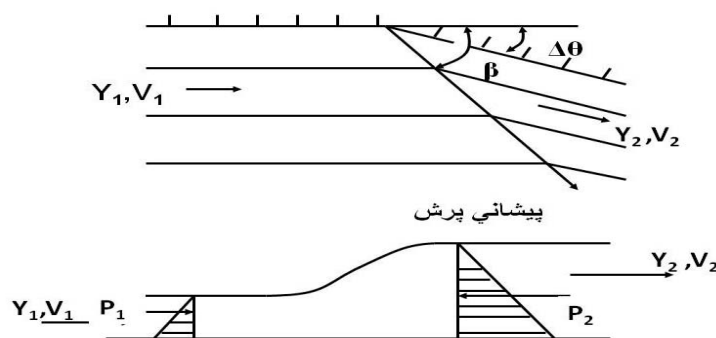
$$Fr_{n1} = \frac{V_{n1}}{\sqrt{gh_1}} = \frac{V_1 \sin \beta}{\sqrt{gh_1}} = Fr_1 \sin \beta \quad (۱)$$

در این معادله 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 (۳):

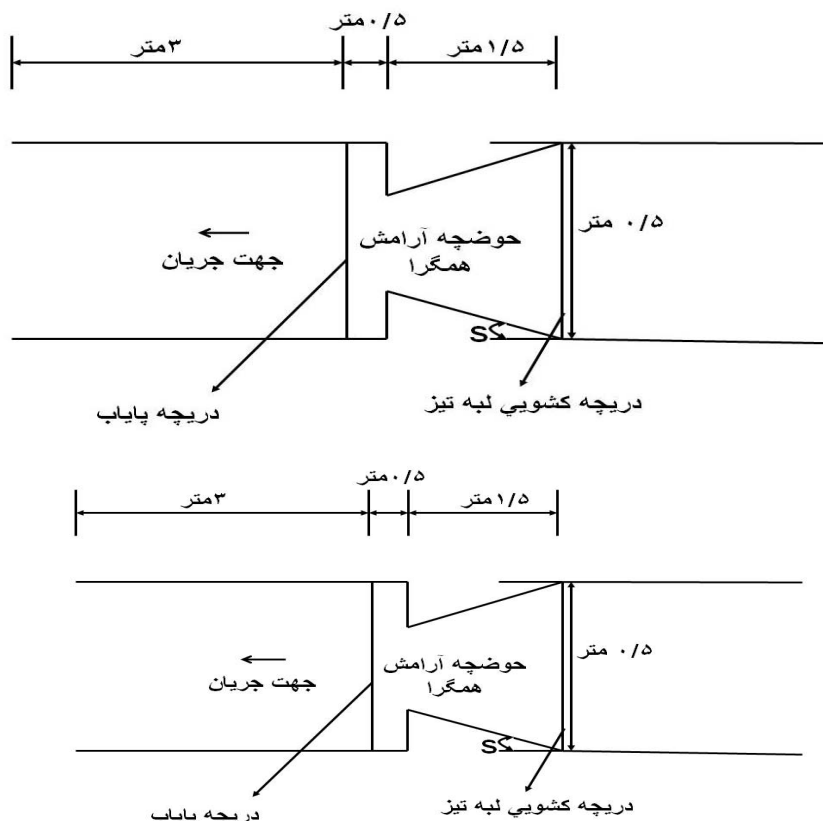
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \Delta\theta)} \quad (۲)$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \beta \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \beta} - 3 \right)}{2 \tan^2 \beta + \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \beta} - 1 \right)} \quad (۳)$$

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:



شکل ۱- نمای یک پرش هیدرولیکی در مقطع همگرا



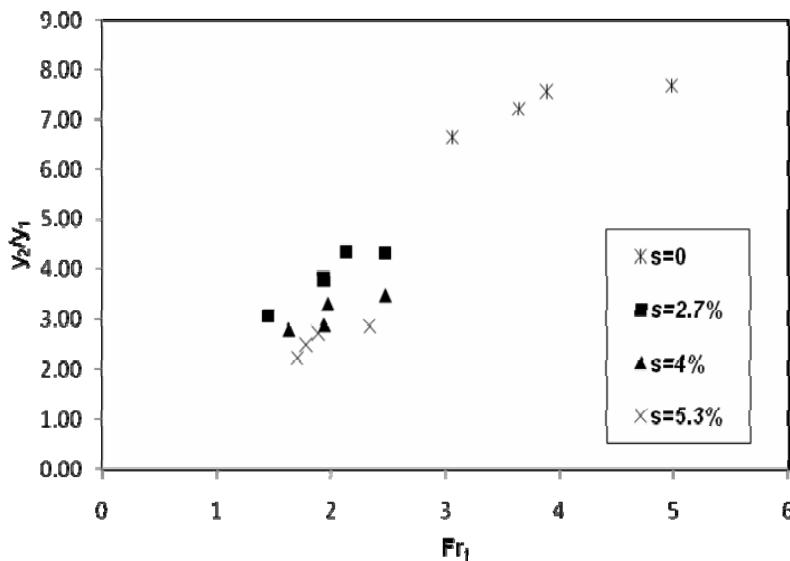
شکل ۲- پلان حوضچه آرامش

## نتایج و بحث

### نسبت اعماق مزدوج

یکی از پارامترهای مهم در محاسبات مربوط به پرش هیدرولیکی نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش می باشد و کاهش مقدار نسبت اعماق پرش می تواند به عنوان یک اصل در طراحی حوضچه آرامش مورد استفاده قرار گیرد، در این صورت ضمن کاهش مقدار ارتفاع دیواره حوضچه، از ارتفاع قائم آزاد نیز تا حدودی کاسته می گردد (۱). در شکل ۳ تاثیر زاویه همگرایی بر مقادیر نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه نشان داده شده است که در منحنی مربوط با زاویه همگرایی صفر (حالت کلاسیک) نیز مقایسه انجام گردیده است. در این تحقیق دبی های مورد آزمایش در تمامی زوایای همگرایی و شیب صفر یکسان می باشد که با مشاهده شکل ۳ مشخص میگردد که عمق نسبی پرش در شرایط این تحقیق نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک در زاویه همگرایی ۲/۷ درصد با ۴۷٪ کاهش، در زاویه همگرایی ۴ درصد با ۵۷٪ کاهش و در زاویه همگرایی ۵/۳ درصد با ۶۵٪ کاهش همراه بوده است. لذا می توان نتیجه گرفت که زاویه همگرایی تاثیر بسزایی در کاهش عمق نسبی پرش می تواند داشته باشد.

برای اندازه گیری عمق پرش در ابتدا و پایاب از عمق یاب نقطه ای با دقت  $\pm 0/1$  میلیمتر استفاده شد و در هر مقطع و به خصوص در ابتدای پرش بعلت حساسیت بیشتر از میانگین اعماق سه نقطه در عرض کانال بعنوان عمق متوسط جریان آن مقطع استفاده شد. لازم بذکر است در حین آزمایش های مربوط به این تحقیق طول پرش هیدرولیکی اندازه گیری شده برابر است با فاصله افقی از شروع پرش تا نقطه ای بر روی سطح آب، بلافاصله پس از آخرین موج غلطان که در آن نقطه ارتفاع آب تقریباً با ارتفاع پایاب برابر می گردد. همچنین اندازه گیری سرعت آب با استفاده از سرعت سنج یک بعدی مدل LP1100 با دقت  $0/1$  سانتی متر بر ثانیه انجام و آزمایشها بگونه ای اجرا گردید که در ابتدای هر آزمایش هردو دریچه ابتدایی و انتهایی حوضچه آرامش را در حالت بسته نگه داشته و با تجمع آب در پشت دریچه اول، با باز نمودن آن و ایجاد تغییر در میزان بازشدگی دریچه و تثبیت پرش هیدرولیکی مراحل داده برداری انجام و در تمام حالت های مورد آزمایش این مراحل تکرار و انجام گردید.



شکل ۳- نمودار عمق نسبی پرش در حالت همگرایی دیواره ها

جدول ۱- داده های محاسبه شده برای حوضچه آرامش با همگرایی دیواره در دبی یکسان

$\Delta\theta(\%)$	Q(lit/s)	$y_1(\text{cm})$	$y_2(\text{cm})$	L(cm)	$FR_1$	$E_1$	$E_2$	L/ $y_1$	$y_2 / y_1$	E/ $E_1$
۰/۰	۳۶/۱۰	۲/۸۰	۲۱/۵۰	۱۲۰	۴/۹۷	۲۷/۰۱	۲۲/۷۷	۴۲/۸۶	۷/۶۸	۴/۲۴
۲/۷	۳۶/۱۰	۴/۴۰	۱۹/۰۰	۱۱۲	۲/۴۷	۲۴/۷۲	۲۰/۱۲	۲۵/۴۵	۴/۳۲	۴/۵۹
۴/۰	۳۶/۱۰	۴/۵۰	۱۵/۷۰	۱۰۷	۲/۴۷	۲۴/۵۳	۱۹/۲۷	۲۳/۷۸	۳/۴۹	۵/۲۶
۵/۳	۳۶/۱۰	۴/۷۰	۱۳/۵۰	۱۰۰	۲/۳۴	۲۴/۲۸	۱۸/۸۴	۲۱/۲۸	۲/۸۷	۵/۴۴

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول (۱) با مقایسه اعماق نسبی پرش در دبی یکسان که در چهار حالت انجام شده است، در می یابیم که افزایش زاویه همگرایی موجب کاهش طول پرش نیز می گردد و نهایتاً می توان نتیجه گرفت که اختلاف طول پرش مابین حالت پرش کلاسیک و پرش در حالت دیواره همگرا در یک دبی یکسان بسیار زیاد می باشد.

#### افت انرژی

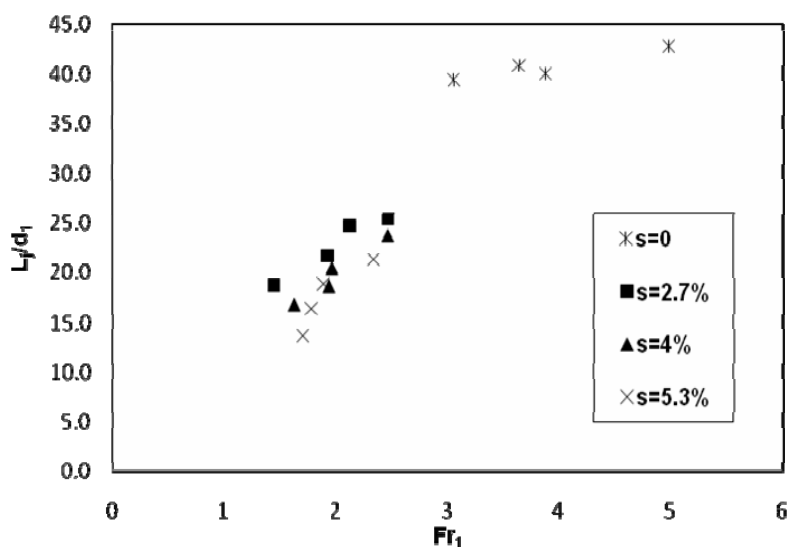
همانطور که در شکل (۵) دیده می شود تاثیر زاویه همگرایی بر مقادیر افت نسبی انرژی در برابر عدد فرود اولیه برای سه زاویه همگرایی و زاویه همگرایی صفر مورد بررسی قرار گرفته است. با مشاهده این شکل مشخص می گردد که افت نسبی پرش در زاویه همگرایی ۲/۷٪ برابر ۲۴ درصد، در زاویه همگرایی ۴٪ برابر با ۴۳ درصد و در زاویه همگرایی ۵/۳٪ برابر با ۴۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش یافته است و از دلایل این امر می توان به کاهش عدد فرود نسبت به حالت پرش کلاسیک اشاره نمود.

و نیز برای هر زاویه همگرایی، با افزایش نسبت تنگ شدگی حساسیت موقعیت عمق پنجه پرش نسبت به تغییرات عمق پایاب بیشتر می گردد.

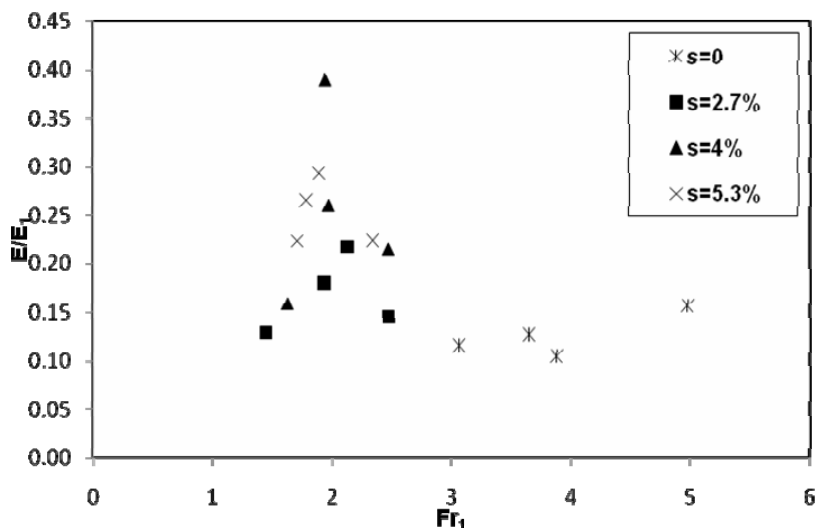
در جدول ۱ مقایسه ای بین اعماق نسبی پرش در دبی یکسان در چهار حالت نشان داده شده است، با توجه به این جدول در می یابیم که با افزایش زاویه همگرایی عمق نسبی پرش نیز کاهش یافته و در یک دبی یکسان عدد فرود جریان برای پرش کلاسیک بسیار بیشتر از عدد فرود پرش هیدرولیکی در حالت دیواره همگرا می باشد، همچنین اختلاف مابین عمق نسبی پرش نیز ما بین پرش کلاسیک و پرش در دیواره همگرا در یک دبی یکسان بسیار زیاد می گردد.

#### طول پرش

در این تحقیق با انجام آزمایشات متعدد، طول پرش برای حالت های مختلف مورد مطالعه و اندازه گیری قرار گرفت. در شکل ۴ مشاهده می گردد که کاهش طول پرش در زاویه همگرایی ۲/۷٪ برابر ۴۵ درصد، در زاویه همگرایی ۴٪ برابر با ۵۱ درصد و در زاویه همگرایی ۵/۳٪ برابر با ۵۷ درصد می باشد. لذا می توان نتیجه گرفت که زاویه همگرایی تاثیر بسزایی در کاهش طول پرش دارد و



شکل ۴- مقایسه طول پرش در حالت همگرایی دیواره با حالت کلاسیک



شکل ۵- نمودار افت نسبی انرژی در حالت همگرایی دیواره

همگرا نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش پیدا می کند. (ب) با توجه به نتایج حاصل شده در حالت پرش هیدرولیکی با مقطع همگرا متوجه می شویم که زاویه همگرایی باعث کاهش طول پرش می گردد. به همین دلیل در یک دبی معین، با افزایش زاویه همگرایی طول پرش هیدرولیکی کاهش می یابد که البته این اختلاف بسیار چشمگیر می باشد.

(ج) با بررسی نتایج مشخص می گردد که افت نسبی پرش، درمقاطع با همگرایی دیواره نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می یابد. لذا می توان نتیجه گیری نمود که زاویه همگرایی تاثیر زیادی در افزایش افت نسبی پرش را دارد. مطابق اطلاعات ارائه شده می توان بیان نمود که با ایجاد یک

جدول (۱) مقایسه ای بین افت نسبی پرش در دبی یکسان در چهار حالت را نشان می دهد، با توجه به اطلاعات این جدول در می یابیم که با افزایش زاویه همگرایی افت نسبی پرش افزایش می یابد. البته باید در نظر داشت که اختلاف میان افت نسبی پرش ما بین پرش کلاسیک و پرش در دیواره همگرا در یک دبی یکسان ناچیز می باشد.

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده می توان نتیجه گیری نمود که: (الف) مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با دیواره

( به ازاء هر یک متر طول حوضچه، ۱/۸ درصد ایجاد زاویه همگرایی در دیواره) باعث کاهش اعماق نسبی پرش هیدرولیکی و طول پرش هیدرولیکی می گردد لذا با کاهش طول حوضچه میتوان موجب کاهش هزینه های اجرایی مربوطه گردید.

تنگ شدگی و نیز کنترل موقعیت پنجه پرش، می توان 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 می یابد. لذا با توجه به این نتایج، پیشنهاد می گردد به علت دشواری تثبیت جریان در زوایای بالا، مقدار اندکی همگرایی در دیواره

## منابع

- ۱- ابریشمی ج. و حسینی م. ۱۳۸۰. هیدرولیک کانالهای روباز. انتشارات دانشگاه امام رضا(ع).
- ۲- فرهودی ج. ۱۳۷۲. جریان در آبراهه های روباز. انتشارات: دانشگاه ارومیه.
- 3- Chow V.T. 1959. Open channel hydraulic. McGraw-HillBookCompany. NewYork.
- 4- 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.
- 5- Ippen A.T. 1951. Mechanics of supercritical flow. Transactions. ASCE. 116. pp:268-295.
- 6- 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 . ASCE. 123(2). pp:161-164.

## An Experimental Study of Convergent Hydraulic Jump in Stilling Basins

T. Honar<sup>1\*</sup>-S. Pourhamzeh<sup>2</sup>

Received: 2-3-2010  
Accepted: 25-7-2010

### Abstract

Many studies have been conducted on the characteristics of hydraulic jump over gradually expanding cross sections, but comparatively few have been carried out on basins with convergent wall. In the present research, the hydraulic jump characteristic of the stilling basin with convergent wall has been investigated. The main objective of this research is evaluation of conjugate depths ratio, jump length and evaluation of hydraulic jump energy loss. According to the charts and results of this study, which are based on measured data, conjugate depth ratio decreases 56 % compared with the vertical case. Also, convergence of the walls along is decreased by 51% of the jump length compared with the classic jump.

**Keywords:** Hydraulic jump, Convergent wall, Hydraulic jump length

---

1,2- Associate Prof. and Former graduated Student of Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, respectively  
(\*- Corresponding author Email: toorajhonar@yahoo.com)