

# بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با پنج جت افقی مستغرق

مهرداد مرادی<sup>۱</sup>، سید محسن سجادی<sup>۲\*</sup> و محمد محمودیان شوشتری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. m.sadjadi@scu.ac.ir

۳- استاد گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۷

## چکیده

حوضچه‌های آرامش با جت‌های افقی مستغرق نوع جدیدی از سازه‌های استهلاک انرژی می‌باشند که با هدایت جریان فوق بحرانی خروجی از جت‌ها به پایاب و ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق سبب اتلاف انرژی می‌شوند. مزیت این سازه از بین بردن اثر سرعت زیاد جریان نزدیک بستر و فشار منفی در کف می‌باشد. در این مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی برای جت‌های افقی مستغرق با پرش هیدرولیکی کلاسیک مقایسه شد و همچنین روابطی برای خصوصیات پرش هیدرولیکی و میزان استهلاک انرژی در جت‌های افقی مستغرق ارائه شد. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۵ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر با مدل جت پنج تایی در دولایه و از جنس پلی وینیل کلراید فشرده و در محدوده اعداد فرود ۱/۵ تا ۵ صورت گرفت. نتایج نشان داد که میزان استهلاک انرژی برای جت‌های افقی مستغرق حدوداً به میزان ۲۵ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن در پرش کلاسیک می‌باشد. طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب برای جت‌های افقی مستغرق بیشتر از پرش کلاسیک می‌باشد ولی در اعداد فرود بیشتر از چهار، طول غلتاب تشکیل شده بعد از جت‌های افقی مستغرق کمتر از مقدار آن در حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک است و با افزایش عدد فرود این مقدار اختلاف نیز افزایش می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** پرش هیدرولیکی، جت‌های افقی مستغرق، استهلاک انرژی، طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب.

## Experimental Investigation on Characteristics of Hydraulic Jump in Stilling Basin With Multi-Horizontal Submerged Jets

M. Moradi<sup>1</sup>, S. M. Sajadi<sup>2\*</sup> and M. Mahmoodian Shoshtari<sup>3</sup>

1-M.Sc Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2\* - Corresponding Author, Assistant Professor., Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University if Ahvaz, Iran.

3-Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received:26 April 2016

Accepted:28 June 2016

## Abstract

Stilling basin with multi-horizontal submerged jets is a new type of energy dissipater structure which causes to collapse excess energy by guiding the supercritical flow through jets and forming submerged hydraulic jump. The important advantage of this type of structures is to eliminate effects of high Flow velocity near to bed and negative bed pressure. In this study the characteristics of hydraulic jump in stilling basin with five parallel submerged jets have been investigated and results are compared with the previous studies also series of experimental equations provided for estimating of the flow characteristics in the multi-horizontal submerged jets. Experiments were carried out in a flume with 15m length and 80cm width. The model of jets has been made from PVC sheets and Froude number varies from 1.5 to 5. We concluded that the energy dissipation rate of submerged jets is approximately 25 percent more than that of the classical hydraulic jump. Length of the jump and length of the roller for multi-horizontal

submerged jets were found to be larger than classical hydraulic jump. But for Froude number more than 4, the roller length for multi-horizontal submerged jets is less than the roller length of classical hydraulic jump with the same Froude number; the difference will be larger as the Froude number increases.

**Keywords:** Hydraulic jump, Multi-horizontal submerged jets, Energy dissipation, Length of the jump and Length of the roller.

نمونه‌ی دیگری از سازه‌های مستهلک کننده انرژی به وسیله پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش با جت‌های افقی مستغرق می‌باشد که توسط دنگ و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۸) به‌طور کامل معرفی گردید. استهلاک انرژی در این نوع سازه هنگام ورود جت‌های مستغرق به صورت افقی به پایاب پایین دست اتفاق می‌افتد. این سازه بر اساس مکانیزم اتلاف انرژی در پرتاب کننده جامی شکل که استهلاک انرژی در ناحیه تنش برشی ناشی از فرود آمدن جت آب در استخر حوضچه آرامش اتفاق می‌افتد طراحی شده است، با این تفاوت که در این سازه با افزایش تعداد جت‌ها از یک جت به چند جت و همین‌طور افقی کردن جت‌ها، ناحیه تنش برشی و در نتیجه میزان استهلاک انرژی افزایش یافته است. علاوه بر این، در این سازه به دلیل افقی و مستغرق بودن جت‌ها اثر سرعت بستر زیاد و فشار منفی در کف حوضچه آرامش حذف شده است. همین‌طور، تلاطم سطحی جریان آب کم‌تر بوده و کنترل آن در پایین دست راحت‌تر است.

دنگ و همکاران (۲۰۰۸) جریان بعد از جت‌های افقی را به روش عددی شبیه‌سازی کردند، نتایج آن‌ها برای پروفیل سطح آب، سرعت نزدیک بستر و فشار بستر به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی داشت. آن‌ها با ترکیب داده‌های تجربی و عددی تحلیل دقیقی از الگوی جریان به دست آوردند. چن و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۰a) خصوصیات پرش هیدرولیکی را با استفاده از مدل‌های توربولانت  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon$ -RNG در حوضچه‌های آرامش با جت‌های افقی مستغرق بررسی کردند و الگوی دقیقی از رفتار جریان شامل نحوه تشکیل گردابه‌ها و شدت و توزیع اختلاط به دست آوردند. آن‌ها همین‌طور نشان دادند که ترکیب مدل‌های توربولانت  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon$ -RNG نتایج بهتری برای محاسبه تمرکز هوا به دست می‌دهد. چن و همکاران (۲۰۱۰b) آزمایش‌هایی با چهار مقیاس مختلف (۱:۳۶، ۱:۵۷، ۱:۸۰، ۱:۲۰۰) در جت‌های افقی مستغرق و تأثیر آن بر روی توزیع فشار، عمق آب و سرعت نزدیکی بستر متوسط‌گیری شده در زمان انجام دادند و نشان دادند که مقیاس مدل تأثیر اندکی بر روی خصوصیات هیدرولیکی متوسط‌گیری شده در زمان در این نوع حوضچه آرامش دارند یعنی می‌توان در یک مدل با فشار معمولی خصوصیات هیدرولیکی در جت‌های افقی مستغرق را در زمان متوسط‌گیری کرد. ژانگ و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۳) به‌وسیله

#### مقدمه

سازه‌های استهلاک انرژی نوعی از سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که برای از بین بردن انرژی جنبشی اضافی جریان آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک سازه‌ی مستهلک کننده انرژی مؤثر بایستی قادر به کاهش سرعت جریان بدون اینکه به ساختمان یا نهر پایین دست ساختمان خسارت وارد شود. سازه‌های استهلاک انرژی شامل دو نوع مستهلک کننده‌های نوع پرش هیدرولیکی و مستهلک کننده‌های نوع اصابت کننده‌ی جریان می‌باشند. در مستهلک کننده‌های نوع اول جریان آب با سرعت بیش از سرعت بحرانی با فشار به داخل یک پرش هیدرولیکی وارد می‌شود و در نتیجه‌ی تلاطم، انرژی اضافی خنثی می‌گردد. حوضچه‌های آرامش تا طولی حاوی جریان آب متلاطم می‌باشند که در نتیجه جریان آب نمی‌تواند خسارتی به نهر پایین دست وارد آورد (اکبریان، ۱۳۷۱).

رایج‌ترین سازه‌ی مستهلک کننده نوع پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌باشد که تحقیقات زیادی در مورد آن‌ها انجام گرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مطالعات باخمانف و متزک<sup>۱</sup> (۱۹۳۵)، چو<sup>۲</sup> (۱۹۵۹)، سیلوستر<sup>۳</sup> (۱۹۶۴)، راجاراتنام<sup>۴</sup> (۱۹۶۵)، هگر<sup>۵</sup> (۱۹۹۲) و بسیاری مطالعات دیگر اشاره کرد که خصوصیات پرش هیدرولیکی کلاسیک را بررسی کردند و روابط و نتایجی را ارائه دادند. در سال‌های اخیر نیز محققین زیادی به بررسی ویژگی‌های مختلف پدیده‌ی پرش هیدرولیکی پرداختند. کارولو و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۲) با انجام آزمایش‌هایی طول غلتاب را برای پرش هیدرولیکی کلاسیک و پرش نوع B روی بستر صاف بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های موجود رابطه‌ای برای تخمین طول غلتابی ارائه کردند و در نهایت نشان دادند که این رابطه برای محاسبه طول غلتاب در بستر زبر هم قابل استفاده است. نیسی و همکاران (۱۳۹۳) مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با بستر زبر را مطالعه و نشان دادند که عمق مزدوج بطور متوسط به میزان ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف کاهش یافته است و همچنین راندمان پرش نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط ۲۵ درصد افزایش دارد.

1- Bakhmeteff and Metzke

2- Chow.

3- Silvester.

4- Rajaratnam.

5- Hager.

6 - Carollo *et al.*

7- Deng *et al.*

8- Chen *et al.*

9- Zhang *et al.*

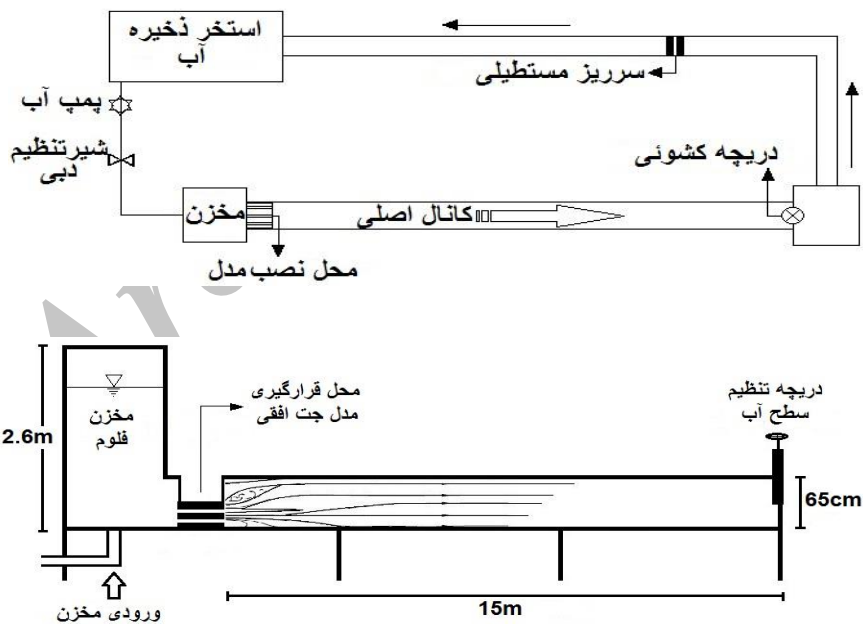
استهلاک انرژی در اعداد فرود بالا به میزان بیش از ۷۰ درصد هم می‌رسد.

از آنجاکه سازه‌های استهلاک انرژی نقش بسیار مهمی در سدها و شبکه‌های آبرسانی دارند و از طرفی با توجه به اینکه اکثر مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته روی پایداری حوضچه آرامش، الگوی جریان آن و ابعاد هندسی جت‌های خروجی بوده است، در این مطالعه به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی و میزان استهلاک انرژی در این نوع حوضچه آرامش، ارائه روابط تجربی برای این خصوصیات هیدرولیکی و مقایسه آن‌ها با استانداردهای موجود برای پرش هیدرولیکی کلاسیک پرداخته شده است.

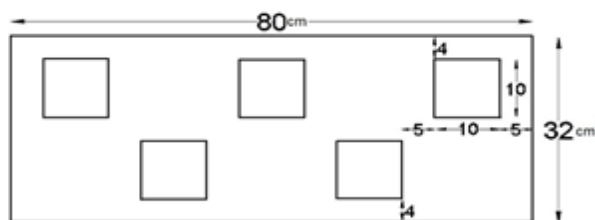
### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلولی به طول ۱۵ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۵ سانتی‌متر انجام شد. دیواره فلولوم از جنس شیشه و مدل جت ساخته شده از جنس پلی وینیل کلراید فشرده با ضخامت ۱/۶ سانتی‌متر می‌باشد. ابعاد جت‌ها (سانتی‌متر ۱۰ \* ۱۰ سانتی‌متر)، طول آن‌ها ۲۰ سانتی‌متر و تعداد جت‌ها پنج عدد می‌باشد. شکل (۱) پلان و مقطع طولی فلولوم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، با استفاده از مدل اختلاط آشفته  $k-\epsilon-RNG$  ساختار جریان و خصوصیات دقیق گردابه‌ها، نحوه حرکت و توزیع دقیق آن‌ها را در حوضچه آرامش با جت‌های مستغرق بررسی کردند. آن‌ها برای سه حالت، جت‌های لایه بالا، باز، جت‌های لایه پایین باز و حالت جت‌های هر دو لایه باز، جریان را شبیه‌سازی و گردابه‌های افقی و عمودی را بررسی کردند. دامنه و شدت گردابه‌ها در نزدیکی دیواره جت‌های خروجی، دیواره‌های کناری و دال بتنی کف حوضچه آرامش کوچک و ضعیف هستند و شدت این گردابه‌ها تأثیر اندکی بر پایداری قسمت خروجی جت‌ها، دیواره‌های کناری و کف حوضچه آرامش دارد. چن و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر فاصله از کف جت‌ها را به ازای چهار مقدار مختلف بر روی ساختار جریان در این نوع حوضچه آرامش را بررسی کردند. آن‌ها توزیع سرعت در این نوع سازه را بررسی کردند و الگوی جریان در این نوع سازه را ترکیبی از جت کلاسیک و پرش هیدرولیکی معرفی کردند. به این ترتیب که توزیع سرعت در صفحه‌های افقی و عمودی در جت‌های لایه پایین و نقطه مرکزی جت‌های لایه بالا شبیه توزیع سرعت جت کلاسیک و در سایر نواحی شبیه پرش هیدرولیکی است. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که بخش عمده‌ی اتلاف انرژی در ۱/۳ ابتدای حوضچه آرامش اتفاق می‌افتد در حالی که در ادامه‌ی حوضچه آرامش جریان آرام و با تلاطم کم می‌باشد. چن و همکاران (۲۰۱۴) نتیجه گرفتند که



شکل ۱- پلان و مقطع طولی فلولوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه



(ب)

(الف)

شکل ۲- مدل جت‌های افقی ساخته شده، (الف)- نمایی از نحوه‌ی قرارگیری مدل در فلوم، (ب)- ابعاد مدل ساخته شده

جدول ۱- محدوده تغییر متغیرهای مورد اندازه‌گیری در مطالعه

متغیر	دبی (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع آب در مخزن (سانتی‌متر)	ارتفاع آب بعد از پرش، عمق پایاب (سانتی‌متر)	طول پرش (سانتی‌متر)	طول غلتاب (سانتی‌متر)
دامنه	۸۸-۲۵۰	۶۵-۲۲۵	۳۸/۲-۶۰	۱۱۰-۳۳۰	۷۴-۱۴۳



شکل ۳- جریان بعد از جت‌های افقی مستغرق (آزمایش با دبی ۲۵۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع آب مخزن ۲/۲۵ متر و عمق پایاب ۰/۶ متر)

خط مرکزی کف کانال صورت می‌گرفت. آزمایش‌ها برای دبی‌های مختلف از ۸۸ تا ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تکرار گردید، در جدول (۱) دامنه تغییر متغیرها در آزمایش‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که با تنظیم دریچه پایین دست نتایج کلیه آزمایش‌ها در شرایط استغراق کامل جت‌های افقی مستغرق برداشت گردیده است. شکل ۳ نمایی از آزمایش صورت گرفته در دبی ۲۵۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

به‌منظور استخراج رابطه کلی برای محاسبه عمق ثانویه پرش، طول پرش، طول غلتابی و درصد استهلاک انرژی از تحلیل ابعادی استفاده گردید، پارامترهای مؤثر بر مسئله را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$F(L_j, L_r, Y_2, h_t, h, b, \rho, \mu, g, V_1, \Delta E) = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $L_j$ : طول پرش،  $L_r$ : طول غلتاب،  $Y_2$ : عمق ثانویه پرش،  $h_t$ : ارتفاع آب در مخزن،  $b$ : به ترتیب

نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که پس از قرار دادن مدل جت‌های افقی در ابتدای فلوم و بعد از مخزن، پمپ را روشن کرده و به تدریج شیر ورودی فلوم باز می‌شد. شکل (۲) نحوه قرارگیری مدل جت‌های افقی در فلوم و طرح شماتیک ابعاد آن را نشان می‌دهند. پس از رسیدن به میزان دبی دلخواه با تنظیم دریچه کشویی انتهای فلوم عمق پایاب لازم برای مستغرق کردن پرش هیدرولیکی تأمین می‌گردید و پس از آن داده‌های مورد نیاز برداشت می‌شد. این شرایط در مدت برداشت داده‌ها ثابت نگه‌داشته می‌شد. در این مطالعه دبی به‌وسیله یک سرریز مستطیلی در قسمت خروجی اندازه‌گیری می‌شد. ابتدا در حالتی که مقدار بسیار اندکی آب از روی سرریز عبور می‌کند تراز سطح آب به‌وسیله عمق سنج اندازه‌گیری می‌شد و با کم کردن این مقدار از ارتفاع آب روی سرریز در آزمایش‌های مختلف، ارتفاع آب روی سرریز و متعاقباً مقدار دبی از روی جدول دبی-اشل مربوط به سرریز محاسبه می‌گردید. اندازه‌گیری رقوم سطح آب توسط پیژومترهای نصب‌شده در

سطح مبنا (Z) در هر دو مقطع مساوی و برابر صفر بود و همچنین سرعت در مخزن مساوی صفر فرض شد. اگر  $E_1$  انرژی در بالادست و  $E_2$  انرژی در پایین دست باشد،  $\Delta E$  اختلاف تراز انرژی در بالادست و پایین دست است و درصد استهلاک انرژی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (3)$$

شکل (۴) نشان می دهد که میزان استهلاک انرژی در جت های افقی مستغرق تقریباً ۲۵ درصد (در محدوده عدد فرود ۲ تا ۵) از مقدار آن در حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک بیشتر است. با بررسی شکل (۴) می توان نتیجه گرفت که شیب نمودار تغییرات استهلاک انرژی به ازای عددهای فرود بیشتر از ۴/۵ تقریباً ثابت می شود ولی در پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می یابد، به عبارتی در این محدوده عدد فرود، تفاوت میزان استهلاک انرژی بیشتر است. افقی وارد شدن جت ها با سرعت زیاد به پایاب که منجر به تلاطم و آشفتگی قابل توجه و تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق می شود می تواند دلیل میزان اختلاف در استهلاک انرژی باشد. واضح است که افزایش دبی و متعاقباً افزایش عدد فرود موجب بیشتر شدن این تلاطم و آشفتگی و اتلاف انرژی جنبشی می شود. نتایج نشان می دهد که میزان استهلاک انرژی جت های افقی مستغرق در اعداد فرود نزدیک ۵ (در بیشترین حالت) به حدوداً ۷۳ درصد می رسد.

طول و عرض جت،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $\mu$ : لزجت دینامیکی آب،  $g$ : شتاب ثقل،  $V_1$ : سرعت خروجی جت ها و  $\Delta E$ : تفاوت تراز سطح انرژی در مخزن با پایین دست پرش هیدرولیکی مستغرق می باشد. با استفاده از تئوری  $\Pi$  باکینگهام تحلیل ابعادی و انتخاب  $\rho, \nu_1$  و  $h$  به عنوان متغیرهای تکراری رابطه (۱) را می توان به صورت اعداد بدون بعد زیر بیان کرد:

$$F\left(\frac{\Delta E}{h_t}, Fr_1, Re, \frac{b}{h}, \frac{Y_2}{h}, \frac{L_j}{h}, \frac{L_r}{h}\right) = 0 \quad (1)$$

در اینجا،  $Re$ : عدد رینولدز می باشد که محاسبات نشان داد جریان بعد از جت همواره آشفته ( $Re > 4000$ ) بود، لذا از تأثیر عدد رینولدز در آزمایش ها صرف نظر شد. همچنین  $\frac{b}{h}$  نسبت ابعاد جت ها (که به دلیل مربعی بودن جت ها برابر یک می باشد) از روابط حذف شد. بنابراین رابطه به صورت زیر می شود:

$$\frac{Y_2}{h}, \frac{L_j}{h}, \frac{L_r}{h}, \frac{\Delta E}{h_t} = F(Fr_1) \quad (2)$$

دامنه ی تغییر پارامترهای بدون بعد در کلیه آزمایش ها در جدول (۲) ارائه شده است.

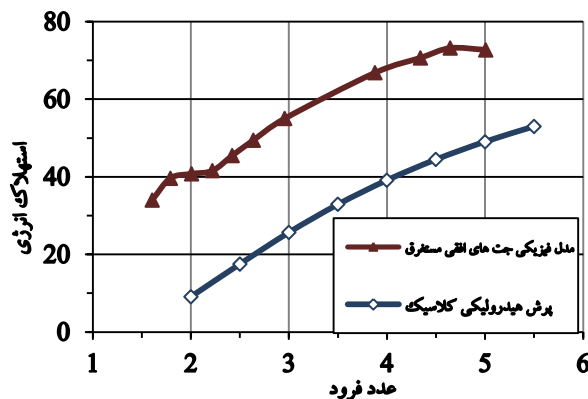
## نتایج و بحث

### استهلاک انرژی

میزان استهلاک انرژی از معادله انرژی در دو مقطع، مخزن ورودی و مقطع بعد از پرش هیدرولیکی به دست آمد. تراز

جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد

متغیر	$Fr_1$	$\frac{Y_2}{h}$	$\frac{L_j}{h}$	$\frac{L_r}{h}$	$\frac{\Delta E}{h_t}$
حداقل	۱/۵	۳/۳	۱۱	۷/۴	۳۱/۴
حداکثر	۵	۶	۳۵	۱۵	۷۲/۷



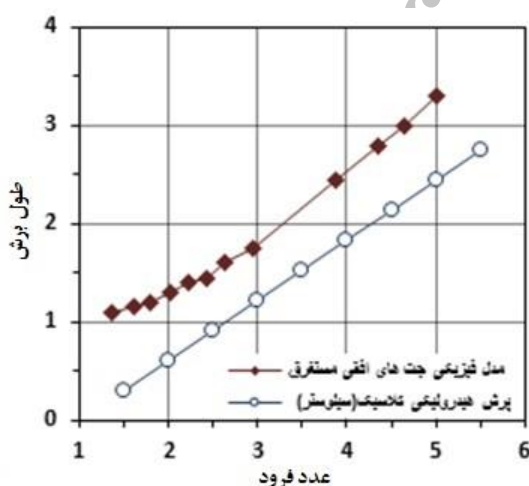
شکل ۴- مقایسه استهلاک انرژی در جت های افقی مستغرق و پرش هیدرولیکی کلاسیک

مستهلك می‌شود.

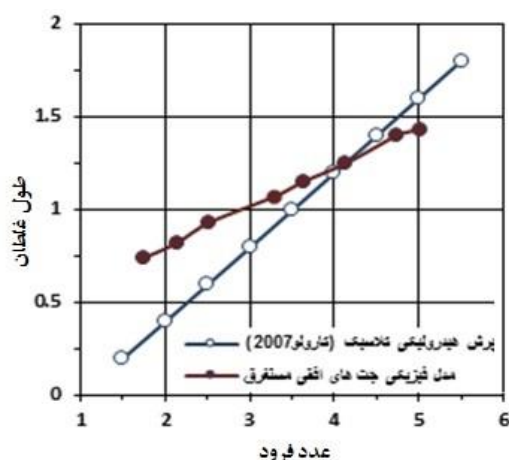
### طول پرش

یکی از عوامل مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش طول آن است. حوضچه آرامش باید به نحوی باشد که پرش هیدرولیکی در طول آن انجام گیرد، در غیر این صورت با خارج شدن پرش هیدرولیکی از حوضچه آرامش، در پایین دس حوضچه آرامش آبستستگی اتفاق می‌افتد که منجر به تخریب سازه می‌شود؛ بنابراین طول پرش هیدرولیکی از اهمیت زیادی در طراحی حوضچه آرامش برخوردار است. در این تحقیق طول پرش برای جت‌های افقی مستغرق (فاصله از ابتدای پرش مستغرق تا ۹۰ درصد حباب‌ها) اندازه‌گیری و با مقدار آن برای پرش هیدرولیکی کلاسیک (به کمک رابطه‌ی تجربی سیلوستر  $Lz = 1.01(9.75y_1(Fr_1 - 1))$ ) مقایسه شد. در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که طول پرش در جت‌های افقی مستغرق به میزان قابل توجهی بیشتر از مقدار آن در پرش هیدرولیکی کلاسیک است. در واقع مکانیزم جت‌های مستغرق به این صورت است که با ورود افقی به عمق پایاب در طول نسبتاً بیشتری انرژی اضافی

**طول غلتاب**  
از عوامل مهم دیگر در طراحی حوضچه‌های آرامش طول غلتاب پرش هیدرولیکی است چراکه در محدوده‌ی آن ضخامت دال بتنی را بیشتر باید گرفت و به این دلیل بررسی طول غلتاب از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و معیار بهتری در بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی نسبت به طول پرش هیدرولیکی می‌باشد. در این تحقیق طول غلتاب مدل ساخته‌شده اندازه‌گیری و با فرمول ارائه‌شده توسط کارولو و همکاران (۲۰۱۲) مقایسه شد. از شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که در اعداد فرود پایین طول غلتاب جت‌های افقی مستغرق بیشتر از پرش هیدرولیکی کلاسیک است ولی در اعداد فرود بیشتر (حدوداً ۴) مقدار آن برابر شده و با افزایش عدد فرود این مقدار برای پرش هیدرولیکی کلاسیک بیشتر از پرش بعد از جت‌های افقی مستغرق می‌شود.



شکل ۵- مقایسه طول پرش در جت‌های افقی مستغرق و پرش هیدرولیکی کلاسیک

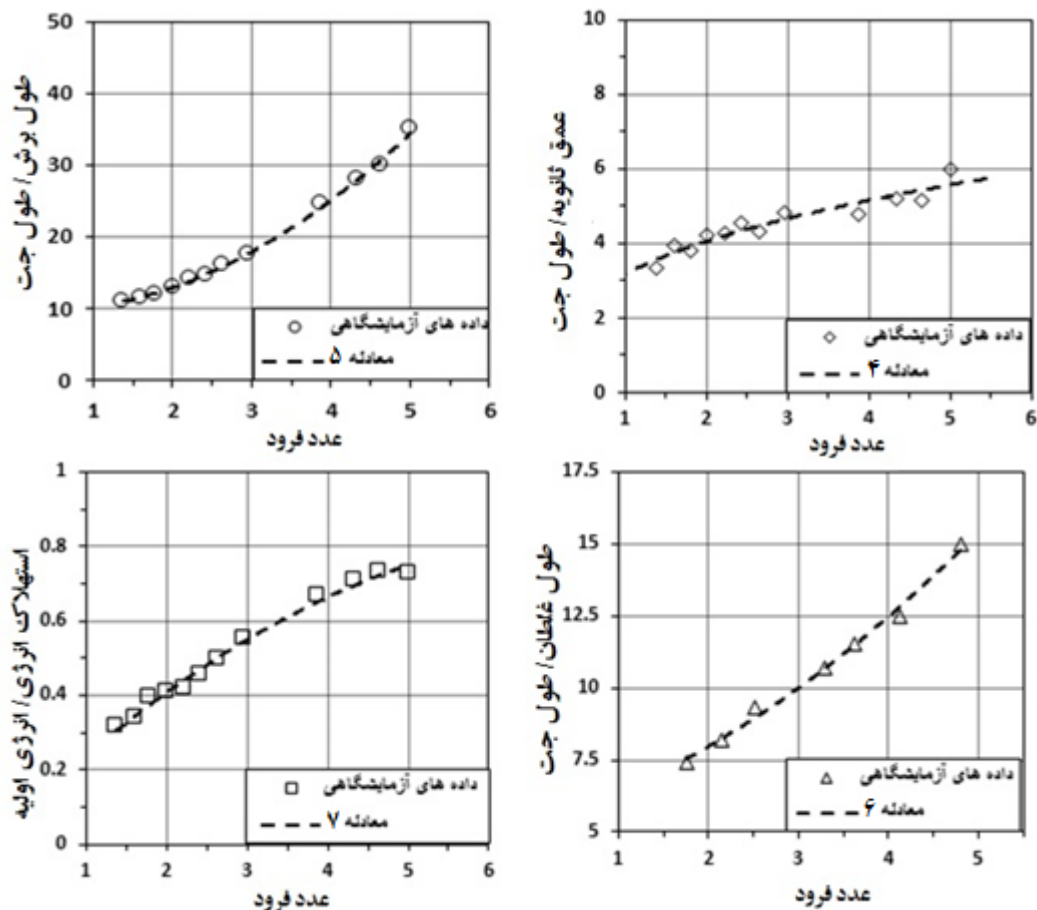


شکل ۶- مقایسه طول غلتاب در جت‌های افقی مستغرق و پرش هیدرولیکی کلاسیک

اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با معادله‌های به‌دست‌آمده مقایسه شد و نشان می‌دهند که معادله‌های ارائه‌شده از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است.

**معادله‌های استخراج شده**

با توجه به رابطه‌ی (۳) می‌توان عمق ثانویه پرش، طول پرش، طول غلتاب و میزان استهلاک انرژی را به‌صورت تابعی از عدد فرود بررسی کرد. در شکل (۷) زیر پارامترهای بدون بعد



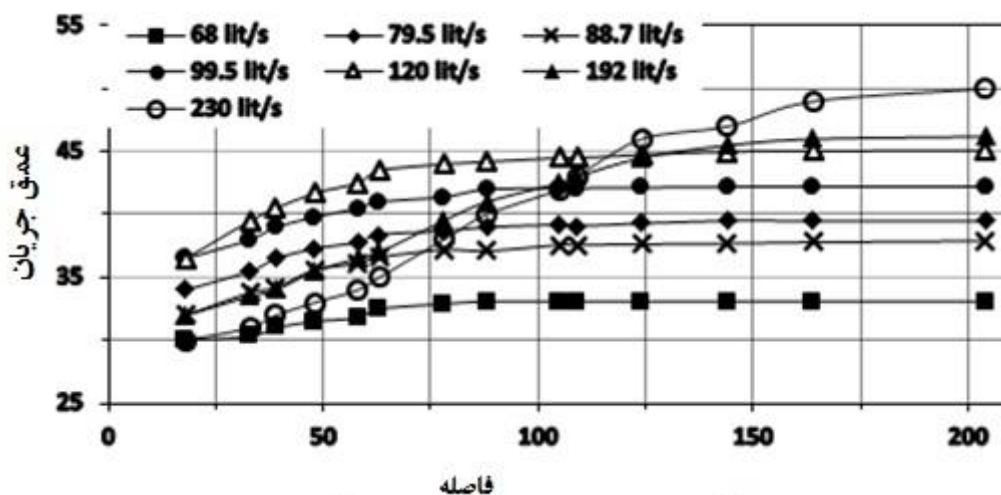
شکل ۷- رسم داده‌های اندازه‌گیری شده در برابر معادله‌های ارائه‌شده

$$\frac{Y_2}{h} = 3.1995Fr^{0.3448} \quad (R^2 = 0.898) \quad (RMSE = 0.0226) \quad (۴)$$

$$\frac{L_j}{h} = 1.1Fr^2 - 0.54Fr + 9.6 \quad (R^2 = 0.998) \quad (RMSE = 0.332) \quad (۵)$$

$$\frac{L_r}{h} = 0.227Fr^2 + 0.89Fr + 5.3 \quad (R^2 = 0.992) \quad (RMSE = 0.225) \quad (۶)$$

$$\frac{\Delta E}{h_t} = -0.014Fr^2 + 0.212Fr + 0.04 \quad (R^2 = 0.99) \quad (RMSE = 0.015) \quad (۷)$$



شکل ۸- نیمرخ سطح آب بعد از جت‌های افقی مستغرق در دبی‌های مختلف

در حوضچه آرامش با جت‌های افقی مستغرق حدوداً ۲۵ درصد بیشتر از مقدار آن در حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی کلاسیک است. این اتلاف انرژی در جت‌های افقی مستغرق در طول نسبتاً بیشتری اتفاق می‌افتد و طول پرش هیدرولیکی به‌طور میانگین در حدود ۳۰ درصد بیشتر از حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک است. بررسی‌های انجام‌شده بر روی طول غلتاب نشان داد که در اعداد فرود بیشتر از چهار، طول غلتاب تشکیل شده بعد از جت‌های افقی مستغرق کمتر از مقدار آن در حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک است و با افزایش عدد فرود اختلاف این دو مقدار هم افزایش می‌یابد. روابطی برای پیش‌بینی خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حوضچه آرامش با جت‌های افقی مستغرق استخراج شد که با مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شد که این معادله‌های از دقت بالایی برخوردار هستند.

#### نیمرخ سطح آب

با نصب پیژومترهایی در کف فلوم نیمرخ سطح آب در جت‌های افقی مستغرق برای هفت دبی مختلف، به‌منظور مشاهده‌ی نحوه‌ی استغراق جت‌ها برداشت شد. پیژومترها در فواصل (۱۸، ۳۳، ۳۹، ۴۸/۵، ۵۸، ۶۳/۵، ۷۸، ۸۸، ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۲۴، ۱۴۴، ۱۶۴ و ۲۰۴) سانتی‌متری از ابتدای فلوم و در خط مرکزی آن قرار دارند. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود با افزایش دبی (با توجه به ثابت بودن ابعاد جت‌ها) سرعت خروجی جت‌ها زیاد شده و مشاهده می‌شود که میزان استغراق جت‌ها کمتر شده، به عبارتی تأثیر عمق پایاب کمتر می‌شود. نکته‌ی قابل توجه دیگر در این بخش طول پرش هیدرولیکی است، به این صورت که از بررسی نیمرخ سطح آب در دبی‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش دبی تدریجاً طول پرش نیز افزایش پیدا می‌کند.

#### نتیجه‌گیری

از آزمایش‌های انجام‌شده مشخص شد که میزان استهلاک انرژی

#### منابع

- ۱- اکبریان، ع. ۱۳۷۱. طراحی سازه‌های هیدرولیکی کانال‌ها. انتشارات عمیدی، ۷۰۰ صفحه.
- ۲- نیسی، ک.، شفاعی بجستان، م.، قمشی، م و م. س. م. کاشفی پور. ۱۳۹۳. بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بسترزبر. مجله علوم و مهندسی آبیاری ۳۷(۲): ۹۳-۸۳.
- 3- Abbaspour, A., Farsadzadeh, D. and M. Ali Ghorbani. 2013. "Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming: Water Science and Engineering
- 4- Bakhmeteff, B. A. and A. E. Metzke, 1935 The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. Trans. Journal of Hydraulic Engineering. 101: 630-680.
- 5- Carollo, F.G., Ferro, V. and V. Pampalone. 2012 New expression of the hydraulic jump roller length: Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 138(11): 995-999.



- 6- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Y. Peng 2010a. Numerical simulation of the energy dissipation characteristics in stilling basin of multi-horizontal submerged jets. *Journal of Hydrodynamics*, 22(5): 732–741.
- 7- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Y. Peng, 2010b. Scale effects of air-water flows in stilling basin of multi-horizontal submerged jets. *Journal of Hydrodynamics*, 22. (6): 788–795.
- 8- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Y. Peng, 2014. Characteristics of the velocity distribution in a hydraulic jump stilling basin with five parallel offset jets in a twin-layer configuration *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 140(2): 208–217.
- 9- Chow, V. 1959. *Open-channel hydraulics*: McGraw Hill, New York.
- 10- Deng, J., Xu, W.L., Zhang, J.m., Qu, J. and Y.q. Yang, 2008. A new type of plunge pool—Multi-horizontal submerged jets. *Science in China Series (E: Technological Sciences)*, 51(12): 2128-2141.
- 11- Hager, W. H., 1992. *Energy dissipaters and hydraulic jump*: Kluwer, London.
- 12- Hager, W. H., and D. Li, 1992. Sill-controlled energy dissipater: *Journal of Hydraulic Research*, 30(2): 165–181.
- 13- Rahimzadeh, H., Maghsoodi, R., Sarkardeh, H., and S. Tavakkol, 2012. Simulating flow over circular spillways by using different turbulence models: *Eng. Appl. Comp. Fluid*, 6.(1): 100–109.
- 14- Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet" *J. Hydraulic. Division*, 91(HY5): 107–132.
- 15- Rajaratnam, N. 1967. Hydraulic jumps: *Advances In Hydro science*, V. T. Chow, ed., Vol. 4, Academic Press, New York, 197–280.
- 16- Silvester, R. 1964. Hydraulic jump in all Shapes of horizontal channels. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 90(1): 23–55.
- 17- Zhang, J.M., Chen, J.G., Xu, W.L. and Y. Peng, 2013. Characteristics of vortex structure in multi-horizontal submerged jets stilling basin. *Water Management*, 167: 322–333.