

مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده

حامد دشتبان^۱، عبدالرضا کبیری سامانی^{۲*}، مصطفی فاضلی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت

مدرس

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- dashtban.hamed@gmail.com

۲- akabiri@cc.iut.ac.ir

۳- mfazeli_2012@yahoo.com

چکیده:

یکی از متداول‌ترین انواع سازه‌های استهلاک انرژی، حوضچه‌های آرامش هستند. حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با توجه به کاهش دبی در واحد طول قوس حوضچه در مقایسه با دیگر انواع حوضچه‌های آرامش از مشخصات هیدرولیکی بهینه‌تری برخوردار هستند و در صورت اضافه کردن بلوک‌های آرام‌کننده، مشخصات هیدرولیکی این حوضچه‌ها بهبود می‌یابد. هدف از مطالعه تجربی حاضر بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده است. برای این منظور ضمن بررسی فیزیک پدیده و تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر، به مقایسه مشخصات هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با دیگر حوضچه‌های آرامش پرداخته شده است. ضمناً روابط تجربی برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش و افت نسبی انرژی در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده ارائه شده است. نتایج بیان‌گر کاهش حداقل ۱۵ درصد نسبت اعماق مزدوج و افزایش حداقل ۱۰ درصد افت نسبی انرژی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان است. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، امکان شکل‌گیری سه نوع پرش نوسانی، پایدار و قوی درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای وجود دارد. نزدیکی پروفیل پرش به شکل سهموی از دیگر نتایج پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود. در نهایت روابط تجربی استخراج شده با کمک شاخص‌های خطا مورد ارزیابی قرار گرفت که از انطباق مطلوبی (حدود ۹۵ درصد) با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است.

واژگان کلیدی:

پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش دایره‌ای، بلوک‌های آرام‌کننده، افت نسبی انرژی.

Hydraulic characteristics of flow in circular stilling basins with baffle blocks

H. Dashtban ^۱, A. Kabiri-Samani ^۲, M. Fazeli ^۳

۱- HAMED DASHTBAN, MSc Student, *Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran Email: Dashtban.hamed@gmail.com*

۲- ABDORREZA KABIRI-SAMANI, Professor, *Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box 84156, Isfahan, Iran Email: akabiri@iut.ac.ir (author for correspondence)*

۳- MOSTAFA FAZELI, PhD Student, *Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran Email: mfazeli_2012@yahoo.com*

Abstract:

One of the most common hydraulic structures to dissipate the excess destructive flow energy is stilling basin of the hydraulic jump type. Compared to the other types of stilling basins, due to the reduction of flow per unit arc length, in circular stilling basins the hydraulic performance is improved, that can be more efficient if comprised a number of baffle blocks on the bottom of the basin. Most of the former researches on circular hydraulic jump stilling basins have focused on categorizing their types and hydraulic characteristics and recommended some limited design guidelines, overlooking effectiveness of the baffle blocks inside a circular hydraulic jump. Considering positive effect of the baffle blocks on improving the hydraulic characteristics of the classical and radial hydraulic jumps, it is expected that compared to the typical circular basins, a circular stilling basin with baffle blocks would be more efficient. Therefore, identification of the hydraulic characteristics of the circular stilling basins with baffle blocks still needs further investigation. The present experimental study subjects to investigate hydraulic characteristics of the circular hydraulic jump-type stilling basins with the angled baffle blocks. Examining the hydraulic characteristics of the circular stilling basins with baffle blocks, empirical relationships are derived for the sequent depth ratio and the relative energy loss in the circular stilling basins with baffle blocks. The extracted empirical equations are evaluated, applying sensitivity and error analyses. The physics of the phenomenon, effects of the prevailing dimensionless parameters, and the profile of the jump surface are also discussed. Furthermore, the present results are compared with those of the other types of stilling basins. The characteristics of the circular stilling basins with the baffle blocks, such as the sequent depth ratio and relative energy loss increase and the relative jump length decreases compared to the classical hydraulic jump type stilling basins. The present study is a starting point for investigation of the circular hydraulic jumps in a plunge pool. More experimental/theoretical studies are obligatory to analyze the hydraulic characteristics of the circular hydraulic jumps, changing the bottom slope, the flow discharge, and the water free-surface profile.

Keywords: Hydraulic jump; circular stilling basin; baffle blocks; relative energy loss.

۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات انجام شده

برای افزایش اتلاف نسبی انرژی جریان و جلوگیری از فرسایش بستر از تجهیزات و سازه‌های مناسب اتلاف انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. حوضچه‌های آرامش یکی از متداول‌ترین سازه‌های اتلاف انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی هستند که رژیم جریان را از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌دهند. امروزه حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با کمترین میزان دبی در واحد طول حوضچه و بهینه‌ترین ویژگی‌ها نسبت به حوضچه‌های کلاسیک و شعاعی معرفی شده‌اند. حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با جریان شعاعی، به استناد مطالعات مراجع ارائه شده در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان، جایگزین مناسبی برای دیگر انواع حوضچه‌های آرامش هستند. در این حوضچه‌ها جت آب به مرکز حوضچه برخورد کرده و سپس در راستای شعاعی پخش می‌شود و در ادامه پرش هیدرولیکی دایره‌ای رخ می‌دهد. در ادامه برخی از مطالعات انجام شده در زمینه حوضچه‌های آرامش دایره‌ای آورده شده است.

واتسون^۱ (۱۹۶۴) با استفاده از معادلات اندازه حرکت و پیوستگی و به‌کارگیری تئوری لایه مرزی دوبعدی، رابطه‌ای برای تعیین شعاع پرش در یک حوضچه آرامش دایره‌ای در جریان‌های آرام و آشفته ارائه کرد. با وجود عدم انطباق مطلوب بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری ارائه شده توسط واتسون، مطالعات ایشان سرآغاز انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه شد^[۱]. کلسیوس و احمد^۲ (۱۹۶۹) کاهش در نسبت عمق مزدوج و طول پرش و همچنین افزایش اتلاف انرژی توسط پرش هیدرولیکی دایره‌ای در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک (CHJ^۳) را گزارش کردند^[۲]. لاوسن و فلیپس^۴ (۱۹۸۳) یک مدل ریاضی جهت شبیه‌سازی دقیق پرش هیدرولیکی دایره‌ای و پیش‌بینی مشخصات هیدرولیکی آن ارائه کردند. بر اساس داده‌های تجربی، نسبت اعماق مزدوج و اتلاف انرژی برای یک پرش در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای نسبت به پرش در حوضچه‌های آرامش کلاسیک به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مطابق نتایج به دست آمده طول پرش دایره‌ای به‌طور قابل توجهی کمتر از پرش هیدرولیکی کلاسیک است^[۳]. بوش و آریستوف^۵ (۲۰۰۳)، بوش و همکاران^۶ (۲۰۰۶)،

پسندیده‌فرد و همکاران^۷ (۲۰۱۱)، زوبیر و همکاران^۸ (۲۰۱۴)، ویشوانا و همکاران^۹ (۲۰۱۵)، والیانی و کالفی^{۱۰} (۲۰۱۶) و چو و کیم^{۱۱} (۲۰۱۶) نیز به انجام مطالعاتی در راستای بهبود عملکرد، شناخت مشخصات و طراحی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای پرداختند.

سوختانو و همکاران (۱۳۹۷) با طرح‌ریزی آزمایش‌هایی به کمک تحلیل تاگوچی به بررسی آزمایشگاهی اثرات دبی جریان، قطر جت برخوردی و ارتفاع سرریز در پایین دست پرش بر تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی چندضلعی^{۱۲} پرداخته و دو رابطه خطی و غیرخطی برای تخمین تعداد اضلاع پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی برحسب پارامترهای مذکور ارائه کردند^[۴]. لکزیان و همکاران (۱۳۹۸) به مطالعه تأثیر دبی جریان و ارتفاع سرریز پایین دست بر شعاع پرش در جریان سیال نیوتنی (آب) و سیال غیرنیوتنی (هرشل-بالکلی^{۱۳}) از دو جنبه کمی و کیفی پرداختند. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نظریه اصلاح شده واتسون و حل تقریبی بور انجام گرفت. نتایج نشان داد که پرش‌های ایجاد شده در سیال هرشل-بالکلی در مقایسه با آب شعاع کمتری داشته و نسبت به تغییرات دبی و ارتفاع پایین دست حساسیت کمتری دارند. تغییرات شعاع پرش در سیال هرشل-بالکلی با افزایش دبی و ارتفاع سرریز پایین دست کاهش می‌یابد^[۵]. فاضلی و کبیری سامانی (۱۳۹۹) با استفاده از رابطه پیوستگی و اندازه حرکت، رابطه‌ای برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش و استهلاک انرژی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با شیب معکوس ارائه کردند^[۶]. به‌منظور بررسی تأثیر شعاع تحدب در بستر برخورد، صابری و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۹) شعاع پرش هیدرولیکی دایره‌ای را برای سه نازل با دبی‌های جریان مختلف اندازه‌گیری کردند. براساس نتایج، در مقایسه با یک بستر صاف، یک سطح محدب شعاع پرش هیدرولیکی را تا حدود ۳۰ درصد افزایش می‌دهد^[۷].

وانگ و خیات^{۱۵} (۲۰۲۱) اثر لزجت و کشش سطحی بر تشکیل پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای را بررسی کرده و تفاوت مکانیکی قابل توجهی بین پرش‌های هیدرولیکی در جریان مایعات غیرلزج و لزج گزارش کردند. نتایج نشان داد که کشش سطحی برای سیالات با لزجت پایین و نیروی گرانش برای جریان سیال با لزجت بالا غالب

^۹ Vishwanath et al.

^{۱۰} Valiani and Calfi

^{۱۱} Choo and Kim

^{۱۲} Polygonal hydraulic jumps

^{۱۳} Herschel - Bulkley

^{۱۴} Saberi et al.

^{۱۵} Wang and Khayat

^۱ Watson

^۲ Koloseus and Ahmad

^۳ Classical hydraulic jump

^۴ Lawson and Phillips

^۵ Bush and Aristoff

^۶ Bush et al

^۷ Passandideh-Fard et al.

^۸ Zobeyer et al.

است [۸]. نتایج عبدالعزیز و خیات^۱ (۲۰۲۲) نیز نشان داد که پرش‌های ایجاد شده توسط جت‌های شیب‌دار، دارای شکل بیضوی هستند. هنگامی که اثر گرانرش بر پرش‌های ناشی از جت‌های مایل به سمت بالا به اندازه کافی غالب باشد، گردابه‌هایی ایجاد می‌شوند که می‌توانند مایع را از رأس پرش بیضوی به سمت عقب پرش برگردانند [۹]. باگات و لیندن^۲ (۲۰۲۲) به بررسی تئوریک اثر جریان‌های پایین‌دست بر پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که لایه پایین‌دست بر پرش تأثیر نمی‌گذارد. آن‌ها درستی نظریه ارائه شده توسط باگات و همکاران^۳ (۲۰۱۸) در مورد شعاع پرش را اثبات نمودند. بر اساس نتایج حاصل، اتلاف لزجی در لایه پایین‌دست می‌تواند، ارتفاع پرش را افزایش دهد که موجب تشکیل پرش با شعاع کوچک‌تر می‌شود [۱۰]. آکالو و همکاران^۴ (۲۰۲۲) در مطالعات خود تأثیر زبری بر تولید گرداب و به خصوص اثر شکل و ارتفاع عناصر مختلف زبری بر اختلاط حاصل از پرش را مورد بررسی قرار دادند [۱۱].

در ارتباط با تأثیر مثبت بلوک‌های آرام‌کننده بر بهبود مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش نیز مطالعات مختلفی انجام شده است؛ که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود. رانگاراچو^۵ به‌منظور محاسبه نیروی وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک از داده‌های آزمایشگاهی باسکو و آدامز و موراهری^۶ در سال ۱۹۷۱ (با هدف محاسبه نیروی مقاوم بلوک‌های آرام‌کننده در حوضچه‌های آرامش کلاسیک) استفاده کرد. وی علاوه بر این که به مقاومت بالاتر بلوک‌های دوزنقه‌ای نسبت به بلوک‌های مستطیلی در برابر جریان دست یافت، توانست ارتباط بین بیشترین نیروی وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده با شکل بلوک‌ها و محل قرارگیری آن‌ها را تعیین کند. همچنین وی نیروهای وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده و سرریز انتهایی را محاسبه نمود [۱۲]. آبراهیم^۷ به بررسی تأثیر بلوک‌های آرام‌کننده بر مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش کلاسیک پرداخت. وی اشکال مختلف استوانه‌ای، دوزنقه‌ای و مکعبی از بلوک‌های آرام‌کننده درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک بدون بلوک‌های آرام‌کننده را مورد مقایسه قرار داد. مطالعات آزمایشگاهی ایشان تأثیر مثبت استفاده از بلوک‌های آرام‌کننده بر مشخصات هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک را تأیید کرد [۱۳]. عباس و همکاران^۸ به بررسی مشخصات جریان درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک با

شیب معکوس و مجهز به بلوک‌های آرام‌کننده پرداختند. آن‌ها هندسه‌های مختلف بلوک‌های آرام‌کننده نظیر؛ دوزنقه‌ای و مخروطی شکل در حوضچه با شیب کف معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مشاهدات آزمایشگاهی آن‌ها بیانگر کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با همین مشخصات در حوضچه‌های آرامش کلاسیک بود [۱۴]. جعفری و صالحی نیشابوری به مطالعه پارامترهای مؤثر بر طول پرش هیدرولیکی مستغرق درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک همراه با بلوک‌های میانی پرداختند. آن‌ها ضمن بررسی تأثیر پارامترهای فاصله بلوک‌ها از دریچه، ارتفاع بلوک‌ها و شکل بلوک‌ها بر طول پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار فلونت، شکل‌گیری دو نوع رژیم سطحی و دیواره-ای درون حوضچه‌های آرامش را گزارش کردند [۱۵].

گرچه مطالعات مختلفی در مورد پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای و دسته‌بندی انواع و ویژگی‌های هیدرولیکی آن‌ها انجام شده است؛ اما تا به حال مطالعه تجربی در ارتباط با حوضچه‌های آرامش دایره‌ای مجهز به بلوک‌های آرام‌کننده انجام نشده است. با توجه به تأثیر مثبت بلوک‌های آرام‌کننده بر بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی کلاسیک، انتظار می‌رود که نتایج مطالعات آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده در ارائه اطلاعات مناسب جهت طراحی بهینه این سازه‌ها مفید باشد. مطالعه حاضر بر تحلیل ویژگی‌های پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده تمرکز دارد.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی و پارامترهای مؤثر

۲-۱- آنالیز ابعادی

همانطور که اشاره شد در تحقیق حاضر تأثیر مشخصات بلوک‌های آرام‌کننده بر اعماق و شعاع‌های پرش هیدرولیکی دایره‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه حوضچه‌های آرامش دایره‌ای و نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق، پارامترهای مؤثر بر پدیده پرش هیدرولیکی درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده مطابق با رابطه ۱ هستند.

$$f_1(\rho, g, Q, d_1, d_2, R_1, R_2) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه g ، Q ، d_1 ، d_2 ، R_1 و R_2 به ترتیب شتاب جاذبه زمین، دبی جریان، عمق اولیه پرش، عمق ثانویه پرش، شعاع اولیه

^۵ Ranga Raju

^۶ Murahari

^۷ Ibrahim

^۸ Abbas et al.

^۱ Abdelaziz and Khayat

^۲ Bhagat and Linden

^۳ Bhagat et al.

^۴ Okulov et al.

۰/۶۶	۲۲/۸۶	۱/۹۴	۶/۲۸	۵/۹۷	۰۴
۰/۷۸	۴۷/۹۲	۱/۸۷	۱۱/۰۴	۹/۹۷	۰۵
۰/۷۸	۴۴/۰۰	۱/۸۶	۱۰/۶۰	۹/۸۰	۰۶
۰/۸۰	۴۰/۰۰	۱/۹۲	۱۱/۴۰	۱۰/۷۸	۰۷
۰/۷۲	۳۵/۰۰	۱/۸۸	۸/۶۷	۷/۸۱	۰۸
۰/۷۳	۲۲/۷۹	۲/۲۵	۷/۹۴	۷/۶۰	۰۹
۰/۷۵	۳۲/۵۰	۲/۰۵	۹/۰۰	۸/۴۱	۱۰
۰/۷۷	۲۶/۱۵	۲/۲۶	۸/۴۶	۸/۵۶	۱۱
۰/۷۵	۲۷/۶۹	۲/۱۷	۸/۱۵	۸/۰۸	۱۲
۰/۸۸	۴۰/۰۰	۲/۱۷	۱۱/۷۸	۱۴/۰۳	۱۳
۰/۶۵	۶/۱۵	۴/۰۰	۴/۲۳	۴/۷۲	۱۴
۰/۶۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۳/۶۷	۴/۰۶	۱۵
۰/۶۱	۵/۰۰	۴/۲۰	۳/۵۳	۴/۰۶	۱۶
۰/۵۷	۴/۱۲	۴/۲۸	۳/۱۸	۳/۶۰	۱۷
۰/۵۸	۴/۱۲	۴/۲۸	۳/۱۲	۳/۶۰	۱۸
۰/۶۳	۵/۷۱	۴/۲۵	۳/۵۷	۴/۲۲	۱۹
۰/۶۳	۵/۳۶	۴/۰۷	۴/۰۷	۴/۵۰	۲۰
۰/۶۴	۳/۵۳	۵/۱۷	۳/۴۷	۴/۲۰	۲۱
۰/۶۰	۳/۱۶	۵/۰۰	۲/۸۹	۳/۵۶	۲۲
۰/۵۴	۲/۲۹	۵/۱۸	۲/۱۲	۲/۷۳	۲۳

پرش و شعاع ثانویه پرش هیدرولیکی هستند. تعداد کل پارامترهای مؤثر بر پدیده $n=7$ و تعداد متغیرهای تکراری برابر $m=3$ است. بنابراین، تعداد کل پارامترهای بی بعد برابر ۴ و مطابق با رابطه ۲ خواهد بود.

$$f_2 \left(F_1, \frac{d_2}{d_1}, \frac{R_2}{R_1}, \frac{R_1}{d_1} \right) = 0 \quad (2)$$

با ترکیب پارامترهای بدون بعد رابطه ۲ می توان پارامترهای جدیدی بر اساس روابط ۳ و ۴ تعریف کرد. لذا رابطه ۲ به صورت رابطه ۵ خلاصه می شود.

$$\pi_6 = \frac{d_2}{d_1} = d_o \quad (3)$$

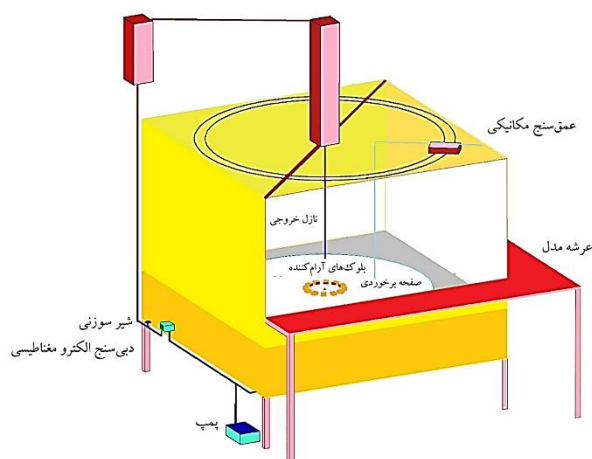
$$\pi_7 = \frac{\pi_8}{\pi_7} = \frac{R_2}{R_1} = R_o \quad (4)$$

$$d_o = f \left(F_1, R_o, \frac{R_1}{d_1} \right) \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

قرارگیری بلوک های آرام کننده بر روی صفحه برخورد حوضچه آرامش دایره ای، علاوه بر ایجاد مانع در مسیر جریان و اتلاف انرژی ناشی از برخورد جت، سبب افزایش اغتشاشات جریان می شود. بنابراین در مقایسه با حوضچه آرامش دایره ای بدون بلوک های آرام کننده استهلاک انرژی بیشتری به همراه دارد. همچنین با توجه به پخش شدن جریان شعاعی بر روی صفحه، نسبت اعماق مزدوج کاهش می یابد [۶]. تغییر در مشخصات بلوک ها می تواند سبب ایجاد تغییر در مشخصات هیدرولیکی پرش گردد. تأثیر تغییرات ارتفاع سرریز لبه تیز انتهایی و تأثیر تغییرات ارتفاع نازل از صفحه برخورد (به ازای ثابت بودن دیگر پارامترهای مؤثر بر پدیده) در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.



الف) دید از کنار

۲-۲- معرفی مدل آزمایشگاهی

مطالعات انجام شده در این تحقیق بر روی مدلی با ساختار مخزن مکعبی با قاعده مربع شکل از جنس ورق گالوانیزه به اضلاع ۲/۵ و ارتفاع ۱/۵ متر انجام شد. آب از درون مخزن ذخیره زیرین مدل، توسط پمپی با حداکثر دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه از طریق یک خط لوله وارد مدار می شود. دبی جریان با استفاده از شیر سوزنی تنظیم و با استفاده از دبی سنج مغناطیسی با دقت $\pm 1/4$ درصد دبی اندازه گیری شده، کنترل می شود. مشخصات هیدرولیکی پرش های هیدرولیکی دایره ای در حضور بلوک های آرام کننده در شرایط هیدرولیکی مختلف در جدول ۱ و شمایی کلی از مدل آزمایشگاهی در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات چیدمان بلوک ها برای هر آزمایش آمده است.

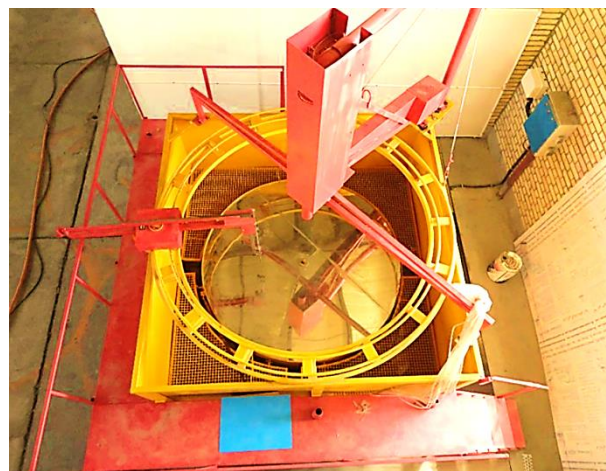
برای برداشت عمق جریان و پروفیل پرش، در زیر صفحه برخورد ۳۴ عدد پیزومتر در دو جهت عمود بر هم نصب شده و از طرفی عمق و شعاع های اولیه و ثانویه جریان به کمک عمق سنج نقطه ای در بالای صفحه برخورد با دقت ± 1 میلی متر، برداشت شد. بلوک های آرام کننده بر روی صفحه برخورد و در مسیر جریان، قرار داشتند. شکل ۲ نحوه قرارگیری بلوک های آرام کننده را بر روی صفحه برخورد نشان می دهد.

جدول ۱: دامنه تغییرات پارامترهای مدل آزمایشگاهی

شماره آزمایش	عدد فرود	نسبت اعماق مزدوج پرش	نسبت شعاع به عمق اولیه پرش	نسبت شعاع به عمق اولیه پرش	افت نسبی انرژی
۰۱	۱۴/۱۲	۱۴/۸۶	۱/۷۳	۶۴/۸۶	۰/۸۵
۰۲	۱۱/۲۳	۱۱/۵۵	۱/۸۲	۵۰/۰۰	۰/۸۲
۰۳	۹/۳۸	۱۰/۲۰	۱/۷۶	۴۶/۰۰	۰/۷۷

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سرریز، شعاع‌های اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی دایره‌ای کاهش می‌یابند. چراکه با افزایش ارتفاع سرریز لبه‌تیز انتهایی، جریان‌های برگشتی افزایش یافته و موقعیت شکل‌گیری پرش به سمت مرکز جت برخوردی جابجا می‌شود (شکل ۳).

مطابق شکل ۴ افزایش ارتفاع نازل سبب افزایش انرژی پتانسیل جت و در نتیجه افزایش انرژی جنبشی جریان روی صفحه برخورد می‌شود. با افزایش انرژی جنبشی جریان، عمق اولیه پرش کاهش و عمق ثانویه آن افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش ارتفاع نازل خروجی جریان از صفحه برخورد حوضچه، افزایش عمق ثانویه را در پی دارد. مشاهدات آزمایشگاهی همچنین نشان داد که افزایش انرژی جنبشی جریان بر روی صفحه برخورد ناشی از افزایش ارتفاع نازل سبب تغییر موقعیت شکل‌گیری پرش به سمت سرریز لبه‌تیز انتهایی می‌شود.

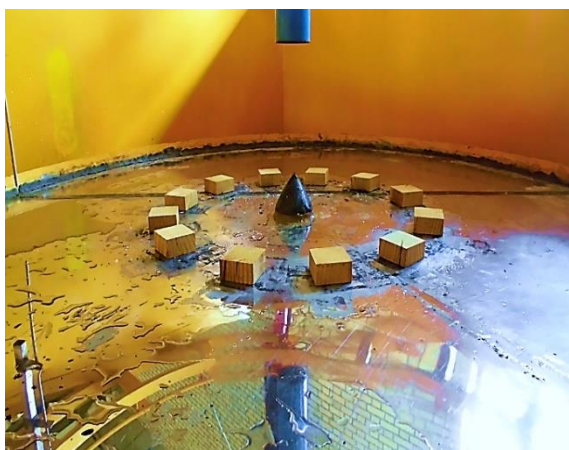


ب) دید از بالا

شکل ۱: شمای کلی مدل آزمایشگاهی

جدول ۲: مشخصات بلوک‌های آرام‌کننده

شماره آزمایش	عرض بلوک (متر)	ارتفاع بلوک (متر)	فاصله بلوک از مرکز جت (متر)	زاویه بین بلوک‌ها (درجه)
۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳۵	۳۰
۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۰۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳	۳۰
۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳	۶۰
۰۹	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۱۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۴۵
۱۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۱۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۳	۳۰
۱۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۲۵	۳۰
۱۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۴۵
۱۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۳	۳۰
۱۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۱۷	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳	۴۵
۱۸	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۳	۳۰
۱۹	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳۵	۳۰
۲۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳	۶۰
۲۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۲۲	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۳	۳۰
۲۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۲۵	۳۰



شکل ۲: نحوه قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده

۲-۲- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار جریان، منحنی انرژی مخصوص بر حسب عمق در پرش دایره‌ای و کلاسیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ تغییرات عمق به‌ازای تغییرات انرژی مخصوص جریان رسم شده است. از جمله ویژگی‌های این منحنی تشکیل دو عمق متناوب برای جریان فوق و زیر بحرانی است. هر منحنی در نمودار انرژی مخصوص مربوط به دبی ثابت است.



الف) ارتفاع سرریز ۴ سانتی‌متر

افزایش ارتفاع سرریز انتهایی، افزایش عمق ثانویه پرش را در پی دارد. افزایش ارتفاع سرریز سبب افزایش عمق پایاب در مقابل جریان می‌شود. بنابراین می‌توان تغییرات ارتفاع سرریز انتهایی را از دلایل ایجاد تغییرات محسوس بر عمق ثانویه پرش دانست. همچنین



ج) ارتفاع نازل ۳۰ سانتی‌متر



ب) ارتفاع سرریز ۵ سانتی‌متر

شکل ۴: تأثیر تغییرات ارتفاع نازل خروجی جریان

چنانچه دبی در واحد طول کمان حوضچه در اثر تنگ‌شدگی مقطع افزایش یابد، منحنی نسبت به حالت اولیه به سمت راست منتقل و عمق ثانویه پرش افزایش می‌یابد. حال آن‌که اگر بر اثر بازشدگی مقطع و افزایش عرض حوضچه دبی در واحد طول کمان کاهش یابد، منحنی نسبت به حالت اولیه به سمت چپ کشیده می‌شود و عمق ثانویه پرش نیز کاهش می‌یابد [۶]. در شرایطی که امکان احداث هر دو نوع حوضچه وجود داشته باشد، شکل ۵ برتری حوضچه آرامش دایره‌ای نسبت به حوضچه آرامش کلاسیک را نیز اثبات می‌کند. چراکه در حوضچه‌های آرامش کلاسیک عرض حوضچه ثابت است؛ اما در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با توجه به پخش شدن جریان شعاعی بر روی سطح بیشتری از صفحه برخورد، از نسبت اعماق مزدوج کاسته می‌شود.



ج) ارتفاع سرریز ۶ سانتی‌متر

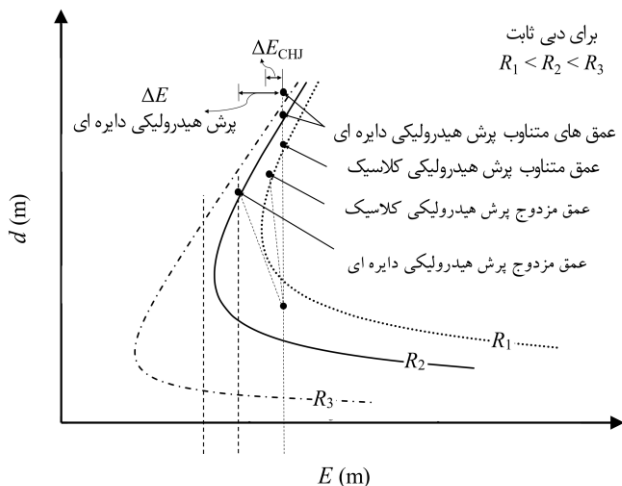
شکل ۳: تأثیر تغییرات ارتفاع سرریز لبه تیز انتهایی



الف) ارتفاع نازل ۲۰ سانتی‌متر



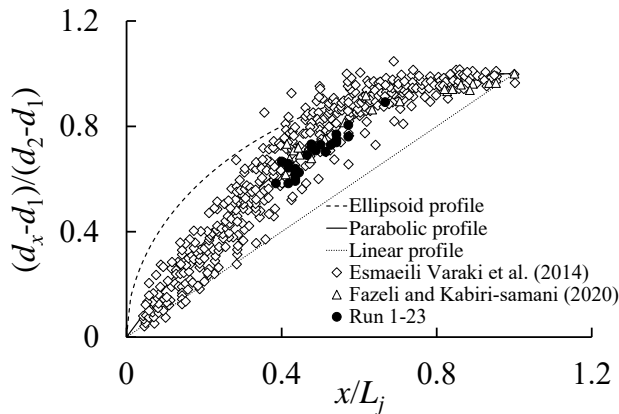
ب) ارتفاع نازل ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۵: منحنی انرژی مخصوص جریان بر حسب عمق [۶]

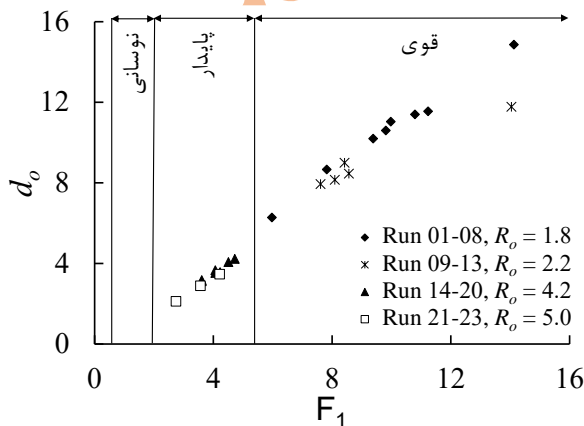
در ادامه روند تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی بررسی می‌شود تا ضمن شناخت فیزیک پدیده، تأثیر پارامترهای مستقل حاصل از آنالیز ابعادی بر پارامتر وابسته (نسبت اعماق مزدوج پرش d_o) مورد ارزیابی قرار گیرد. کاهش عمق اولیه جریان و یا افزایش دبی جریان سبب افزایش عدد فرود

پروفیل سطح آب در حدفصل شعاع اولیه تا ثانویه پرش بر حسب عمق در امتداد پرش (d_x) مطابق شکل ۸ ترسیم شده است. در این شکل پارامتر بی بعد $(d_x - d_1) / (d_2 - d_1)$ در مقابل (x/L_j) برای همه آزمایش‌ها نشان داده شده است. همچنین پروفیل خطی، بیضوی و سهمی نیز در این نمودار نشان داده شده‌اند. به منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل، داده‌های آزمایشگاهی مراجع [۶] و [۱۲] نیز ارائه شده است. مطابق این شکل، معادله سهمی به خوبی با پروفیل سطح پرش در حوضچه آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده مطابقت دارد.



شکل ۸: پروفیل سطح پرش درون حوضچه آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده

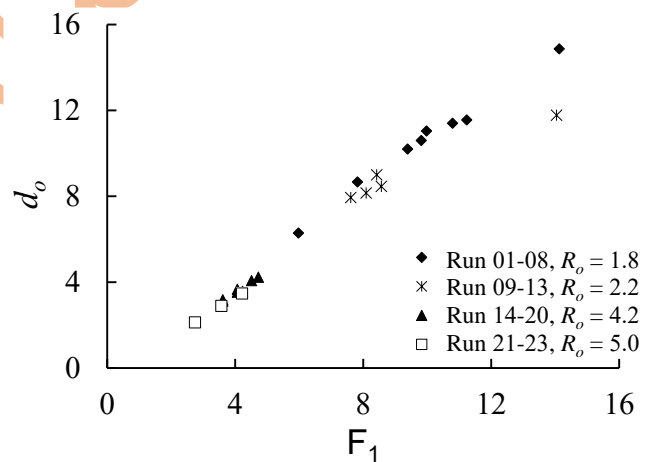
پرش هیدرولیکی بر اساس عدد فرود اولیه و نحوه شکل‌گیری اغتشاشات جریان درون حوضچه‌های آرامش مستطیلی به انواع موجی، ضعیف، نوسانی، پایدار و قوی طبقه‌بندی می‌شود. بر اساس روندی مشابه با حوضچه‌های آرامش مستطیلی و طبق مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر، سه نوع پرش نوسانی، پایدار و قوی درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده تشکیل شد (شکل ۹).



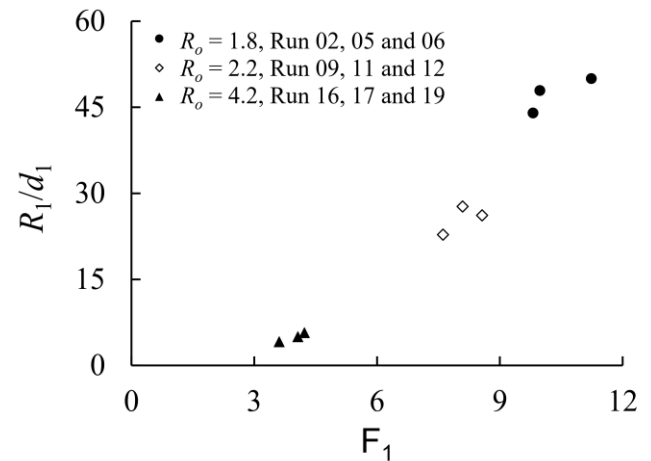
شکل ۹: گونه‌های مختلف پرش درون حوضچه آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده

می‌شود. مطابق مطالعات انجام شده در مرجع [۲] کاهش عمق اولیه با افزایش عمق ثانویه در ارتباط است، بنابراین مطابق شکل ۶ افزایش عدد فرود سبب افزایش نسبت اعماق مزدوج پرش می‌شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش نیز سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش می‌شود.

افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش به دلیل ایجاد جریان شعاعی درون حوضچه آرامش سبب پخش شدن جریان بر روی سطح بیشتری از صفحه برخورد حوضچه آرامش دایره‌ای شده و در نتیجه میزان دبی در واحد طول حوضچه آرامش کاهش می‌یابد. مطابق آنچه پیشتر نیز اشاره شد، کاهش دبی سبب کاهش عمق ثانویه پرش و در نتیجه افزایش عمق اولیه آن می‌شود. بنابراین نسبت اعماق مزدوج پرش به ازای افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش مطابق شکل ۶ کاهش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۷ با افزایش عدد فرود، کاهش مقدار عمق اولیه پرش و افزایش شعاع اولیه پرش، مقدار پارامتر (R_1/d_1) افزایش می‌یابد.



شکل ۶: تغییرات d_0 در مقابل F_1 برای مقادیر مختلف R_o

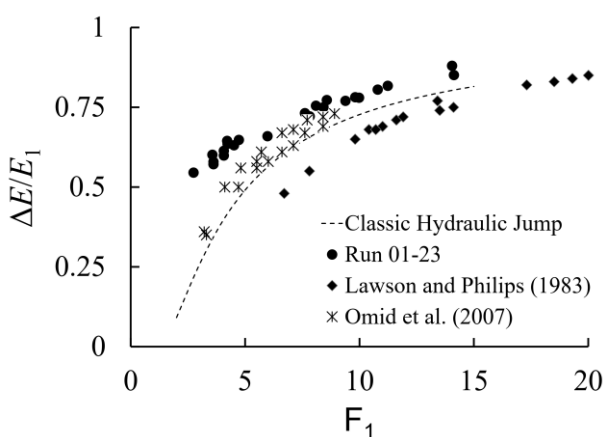


شکل ۷: تغییرات R_1/d_1 در مقابل F_1 برای مقادیر مختلف R_o

جریان می‌شود. مطابق شکل ۱۱ مقدار افت نسبی انرژی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده نسبت به دیگر حوضچه‌های آرامش کلاسیک، شعاعی و دایره‌ای بیشتر است. این موضوع از جنبه هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت بوده و از معیارهای برتری این حوضچه‌ها به‌شمار می‌رود.

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تنها براساس پارامترهای مستقل حاکم بر d_o در رابطه ۵، رابطه تجربی ۷ به‌منظور تعیین افت نسبی انرژی جریان استخراج گردید. تأثیر پارامترهای مستقل رابطه ۵ بر روی پارامتر وابسته نسبت اعماق مزدوج پرش (d_o) در رابطه ۶ لحاظ گردیده است. درستی رابطه ارائه شده با استفاده از شاخص‌های خطا در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 0.344 + 0.147d_o^{0.47} \quad (7)$$



شکل ۱۱: افت نسبی انرژی جریان در پرش هیدرولیکی دایره‌ای

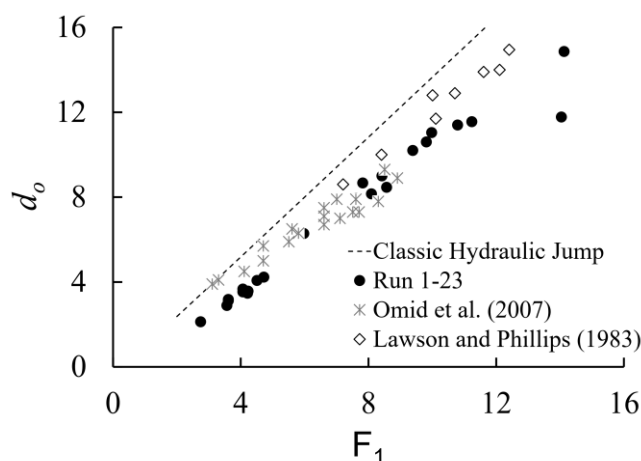
۴- صحت‌سنجی نتایج

در این بخش با استفاده از شاخص‌های محاسبه خطا که در ادامه آمده است، میزان دقت و درستی روابط ارائه شده اعتبارسنجی می‌شود. از جمله شاخص‌های محاسبه خطا می‌توان به روابط ۸ تا ۱۱ به ترتیب شامل EF ، WQD ، R^2 و RSS اشاره کرد. در این مطالعه نتایج به‌دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و همبستگی روابط ۶ و ۷ با استفاده از شاخص‌های خطا در جدول ۳ ارائه شده است. میزان پراکندگی داده‌ها نیز در اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. بنابراین با توجه به عملکرد مناسب روابط تجربی ارائه شده، می‌توان از نتایج این تحقیق برای تعیین مشخصات هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده بهره برد.

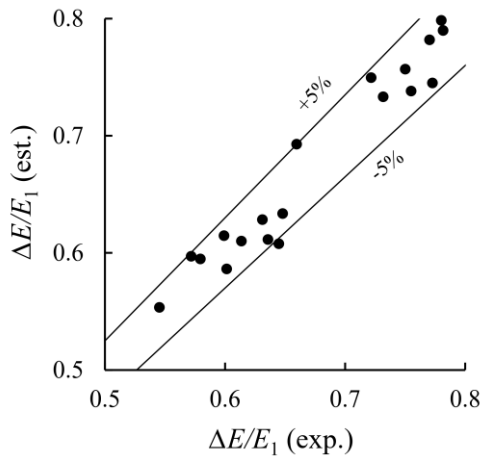
نسبت اعماق مزدوج یکی از شاخص‌های مهم در بررسی برتری حوضچه‌های آرامش است. زمانی که این نسبت در یک حوضچه آرامش در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک کاهش یابد، می‌توان گفت که تغییرات ایجاد شده در ساختار حوضچه مؤثر بوده و سبب بهبود مشخصات هیدرولیکی آن شده است. براساس نتایج مرجع [۱۳] حوضچه‌های آرامش شعاعی به نسبت حوضچه‌های آرامش کلاسیک از نسبت اعماق مزدوج پرش کمتری برخوردار است. در مطالعات مراجع [۲] و [۳] مقدار بهینه نسبت اعماق مزدوج پرش درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰ نسبت اعماق مزدوج پرش درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده از مقدار بهینه‌تری در مقایسه با دیگر حوضچه‌های آرامش برخوردار است و قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده درون این حوضچه‌ها سبب بهبود مشخصات هیدرولیکی آن می‌شود. با شناخت رفتار پرش درون حوضچه آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده به‌منظور محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش، رابطه تجربی ۶ با استفاده از نرم افزار SPSS و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و استناد به رابطه ۵ استخراج شد.

$$d_o = 4.69 + 6.66F_1^{0.35} - 1.66R_o^{0.34} + 0.01\left(\frac{R_1}{d_1}\right)^{1.61} \quad (6)$$

مطابق رابطه ۶، پارامتر نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی دایره‌ای با پارامتر مستقل R_o رابطه عکس و با پارامترهای F_1 و R_1/d_1 رابطه مستقیم دارد. ضمن تأکید بر انطباق نتایج حاصل بر فیزیک پدیده، در ادامه رابطه ارائه شده با استفاده از شاخص‌های صحت‌سنجی می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش در حوضچه‌های آرامش مختلف قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده در مسیر جریان، برخورد مستقیم جت جریان با بلوک‌های قرارگرفته در مسیر آن و اغتشاشات حاصل از تشکیل پرش هیدرولیکی سبب افزایش افت نسبی انرژی



شکل ۱۳: پراکندگی نتایج حاصل از رابطه ۷ برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی جریان در مقابل داده‌های آزمایشگاهی

۵- نتیجه گیری

در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، ویژگی‌های هیدرولیکی پرش هیدرولیکی دایره‌ای ناشی از برخورد جت جریان به مرکز حوضچه آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده ارزیابی شد. در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان، نتایج تحقیق حاضر بیان‌گر کاهش حداقل ۱۵ درصدی نسبت اعماق مزدوج پرش و افزایش حداقل ۱۰ درصدی افت نسبی انرژی جریان در مقایسه با همین ویژگی‌ها درون حوضه‌های آرامش کلاسیک بود. این نتایج از نقطه‌نظر هیدرولیکی در طراحی حوضچه‌های آرامش به‌منظور دستیابی به راندمان عملکرد بالا و هزینه کم حائز اهمیت است. معادلات استخراج شده برای نسبت اعماق مزدوج پرش (۶) و افت نسبی انرژی (۷) از پارامترهای بدون بعد فیزیکی تشکیل شده‌اند و همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و می‌توانند برای طراحی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده استفاده شوند. در نهایت می‌توان گفت که افزایش F_1 ، R_1/d_1 و کاهش R_0 سبب افزایش نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده می‌شود. تشکیل سه نوع پرش نوسانی، پایدار و قوی و همچنین نزدیکی پروفیل سطحی پرش به شکل سهموی از دیگر نتایج پژوهش حاضر هستند. شایان ذکر است که مطالعه حاضر نقطه شروعی برای بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی پرش هیدرولیکی دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده است و طبیعتاً انجام مطالعات تجربی/تحلیلی بیشتری برای بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای مجهز به بلوک‌های آرام‌کننده ضروری است.

فهرست علائم

- d_1 : عمق اولیه پرش هیدرولیکی
- d_2 : عمق ثانویه پرش هیدرولیکی
- d_0 : نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی
- R_1 : شعاع اولیه پرش هیدرولیکی
- R_2 : شعاع ثانویه پرش هیدرولیکی

$$WQD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i O_i)(S_i - O_i)^2}}{\sum_{i=1}^n (S_i O_i)} \quad (۸)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۹)$$

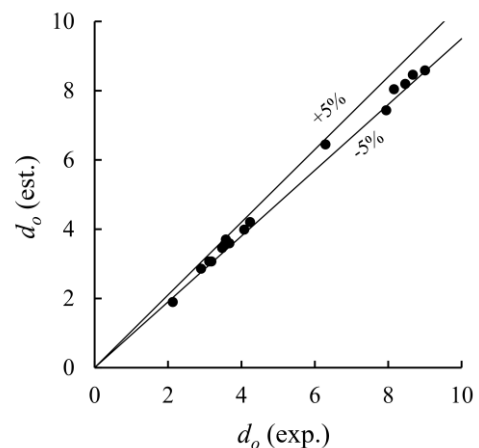
$$RSS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{P})(M_i - \bar{M})] \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \right]} \quad (۱۱)$$

در این روابط S_i بیان‌گر نتایج حاصل از روابط ارائه شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی، \bar{S} متوسط مقادیر حاصل از روابط استخراج شده و \bar{O} متوسط مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. هر چه مقدار R^2 و EF به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی داده‌ها بیشتر و خطا کمتر است. در مورد WQD و RSS هر چه مقدار این پارامترها کوچک‌تر باشد، رابطه به‌دست آمده از دقت بیشتری برخوردار است. بر اساس معیارهای ذکر شده، مقادیر ضریب همبستگی و خطاهای به‌دست آمده برای روابط معرفی شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: صحت‌سنجی نتایج با استفاده از شاخص‌های خطا

رابطه تجربی	شاخص‌های بررسی خطا			
	R^2	WQD	EF	RSE
۶	۰/۹۸۷	۰/۰۳۹	۰/۹۹۳	۰/۰۰۷
۷	۰/۹۴۲	۰/۰۳۲	۰/۹۴۲	۰/۰۵۷



شکل ۱۲: پراکندگی نتایج حاصل از رابطه ۶ برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش در مقابل داده‌های آزمایشگاهی

target plate. *Flow Measurement and Instrumentation*, ۶۵, ۲۷۴-۲۷۹.

<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.01.011>.

[۸] Wang, Y., and Khayat, R. E. ۲۰۲۱. The effects of gravity and surface tension on the circular hydraulic jump for low-and high-viscosity liquids: A numerical investigation. *Physics of Fluids*, 33(۱), ۰۱۲۱۰۵.

<https://doi.org/10.1063/5.0032369>.

[۹] Abdelaziz, A., and Khayat, R. E. ۲۰۲۲. On the non-circular hydraulic jump for an impinging inclined jet. *Physics of Fluids*, 34(۲).

<https://doi.org/10.1063/5.0079563>.

[۱۰] Bhagat, R. K., and Linden, P. F. ۲۰۲۲. The circular hydraulic jump; the influence of downstream flow on the jump radius. *Physics of Fluids*, 34(۷).

<https://doi.org/10.1063/5.0090549>.

[۱۱] Okulov, V. L., Sharifullin, B. R., Okulova, N. ۲۰۲۲. Influence of nano-and micro-roughness on vortex generations of mixing flows in a cavity. *Physics of Fluids*, 34(۳).

[۱۲] Ranga Raju, K. G., Kitaal, M. K., Verma, M. S., and Ganeshan, V. R. ۱۹۸۰. Analysis of flow over baffle blocks and end sills. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. ۱۸, No. ۳, pp. ۲۲۷-۲۴۱.

<https://doi.org/10.1080/00221688.09499549>.

[۱۳] Ibrahim, M. ۲۰۱۷. Improve the efficiency of stilling basin using different types of blocks. *American Journal of Engineering Research*, ۶(۱), ۲۹۵-۳۰۴.

https://feng.stafpu.bu.edu.eg/Civil%20Engineering/۲۴۷۶/publications/Mohammad%20Mahmoud%20Mohammad%20Ibrahim_ZJ۰۶۰۸۲۹۵۳۰۴.pdf.

[۱۴] Abbas, A., and Alwash, H. ۲۰۱۸. Effect of baffle block configurations on characteristics of hydraulic jump in adverse stilling basins. *MATEC Web of Conferences*, ۱۶۲(۱), ۳۰۰۵-۳۰۱۲.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201816203005>.

[۱۵] Jafari, A., and Salehi Neyshabouri, S.A.A., ۲۰۱۶. Numerical study of effective parameters in length of

R_0 : نسبت شعاع مزدوج پرش هیدرولیکی

$\Delta E/E_1$: افت نسبی انرژی جریان

F_1 : عدد فرود جریان فوق بحرانی بالادست

منابع

[۱] Watson, E. ۱۹۶۴. The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane. *Journal of Fluid Mechanics*, ۲۰(۳), ۴۸۱-۴۹۹.

<https://doi.org/10.1017/S0022112064001367>.

[۲] Koloseus, H.J., and Ahmad, D. ۱۹۶۹. Circular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, ۹۵(۱): ۴۰۹-۴۲۲.

<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001947>.

[۳] Lawson, J. D., and Phillips, B.C. ۱۹۸۳. Circular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, ۱۰۹(۴): ۵۰۵-۵۱۸.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(1983\)109:4\(505\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1983)109:4(505)).

[۴] Soukhtanlou, Teymourtash and Mahpeykar. ۲۰۱۷. Experimental relationships for determining the hydraulic characteristics of polygonal hydraulic jumps. *Modares Mechanical Engineering Journal*, ۱۸(۱), ۲۷۳-۲۸۰. [In Persian].

<http://mme.modares.ac.ir/article-۱۵-۱۹۹-fa.html>.

[۵] Lakzian, Estiri, Teymourtash and Niazi. ۲۰۱۸. Numerical investigation of circular hydraulic jump with non-Newtonian fluid with modified VOF method. *Mechanical Engineering Journal, Tabriz University*, ۴۹(۱), ۲۶۸-۲۶۱. [In Persian].

https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_۸۶۶۱_۱۰۹۶.html?lang=fa.

[۶] Fazli, M., and Kabiri-Samani, A. ۲۰۱۹. Circular hydraulic jump in stilling basins with reverse slope bed. *Sharif Civil Engineering Journal*, Volume ۲-۳۶(۱/۲), Page ۳۷-۴۷. [In Persian].

<https://doi.org/10.24200/j30.2018.50627.2334>.

[۷] Saberi, A., Teymourtash, A. R. and Mahpeykar, M. R. ۲۰۱۹. Experimental measurement of radius of circular hydraulic jumps: Effect of radius of convex

[۲۳] Valiani, A., and Caleffi, V. ۲۰۱۶. Free-surface axially symmetric flows and radial hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(۴), ۰۶۰۱۵۰۲۵. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001104](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001104).

[۲۴] Choo, K., and Sung, J. K. ۲۰۱۶. The influence of nozzle diameter on the circular hydraulic jump of liquid jet impingement. *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science.*, 72, ۱۲-۱۷.

<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.10.033>

submerged hydraulic jump with the baffle blocks. *Sharif Civil Engineering Journal*, ۳۳-۲(۲/۳), ۶۵-۷۳. [In Persian]. <https://www.sid.ir/paper/127934/en>.

[۱۶] Esmaeeli Varaki, M., Kasi, A., Farhoudi J. and Sen D. ۲۰۱۴. Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope. *Iranian Journal of Science and Technology, Trans. Civil Engineering*, ۳۸(C۱): ۱۱۱-۱۲۱.

https://ijstc.shirazu.ac.ir/article_1848_0.html.

[۱۷] Omid, M., Esmaeeli Varaki, M., and Narayanan, R. ۲۰۰۷. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, ۴۵ (۴): ۵۱۲-۵۱۸.

<https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521786>.

[۱۸] Bush, J. W. M., and Aristoff, J. M. ۲۰۰۳. The influence of surface tension on the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, 489, ۲۲۹-۲۳۸.

<https://doi.org/10.1017/S0022112003005159>.

[۱۹] Bush, J. W. M., Aristoff, J. M., and Hosoi, A. ۲۰۰۶. An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, 558, ۳۳-۵۲.

<https://doi.org/10.1017/S0022112006009839>.

[۲۰] Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R., and Khavari, M. ۲۰۰۹. Numerical study of circular hydraulic jump using volume of fluid method. *Journal of Fluids Engineering*, ۱۳۳(۱).

<https://doi.org/10.1115/1.4003307>.

[۲۱] Zobeyer, H., Rajaratnam, N., and Zhu, D. Z. ۲۰۱۳. Radial jet and hydraulic jump in a circular basin. *Journal of Engineering Mechanics*, ۱۴۰(۱): ۱۲۸-۱۳۳.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000644](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000644).

[۲۲] Vishwanath, K. P., Dasgupta, R., Govindarajan, R., and Sreenivas, K. R. ۲۰۱۵. The effect of initial momentum flux on the circular hydraulic jump. *Journal of Fluids Engineering*, 137(۶).

<https://doi.org/10.1115/1.4029725>.