**Sharif University of Technology**

***Sharif Civil Engineering Journal***

**https://sjce.journals.sharif.edu**



**Research Article**

# Hydraulic Characteristics of Flow in Circular Stilling Basins with Baffle Blocks

**Hamed Dashtban[1], Abdorreza Kabiri-Samani *[1] and Mostafa Fazeli[2]**

[1]Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* corresponding author:(akabiri@cc.iut.ac.ir)

**Article Info**

**Article history:**

Received: 8 May 2024

Revised: 19 August 2024

Accepted: 1 September 2024

**Keywords:**

Hydraulic jump,
circular stilling basin,
baffle blocks,
relative energy loss.

**Abstract**

One of the most common hydraulic structures to dissipate the excess destructive flow energy is a 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, which can be more efficient if it comprises a number of baffle blocks on the bottom of the basin. Most of the former research on circular hydraulic jump stilling basins has focused on categorizing their types and hydraulic characteristics and recommended some limited design guidelines, overlooking the effectiveness of the baffle blocks inside a circular hydraulic jump. Considering the 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 the 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 decrease, are compared to the classical hydraulic jump-type stilling basins. The present study is a starting point for the 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.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

**To Cite this article:**
Dashtban, H., Kabiri-Samani, A. and Fazeli, M. 2025. Hydraulic characteristics of flow in circular stilling basins with baffle blocks, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(3), 3-12. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64524.3330

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

# مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده

**حامد دشتبان[۱]، عبدالرضا کبیری سامانی*[۱] و مصطفی فاضلی[۲]**

[۱] دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

[۲]دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (akabiri@iut.ac.ir)

**اطلاعات مقاله**

**تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۱۹**

**تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۵/۲۹**

**تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۶/۱۱**

**واژگان کلیدی:**

پرش هیدرولیکی،

حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای،

بلوک‌های آرام‌کننده،

افت نسبی انرژی.

**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، مشخصات هیدرولیکی بهینه‌تری دارند و در صورت اضافه‌کردن بلوک‌های آرام‌کننده، مشخصات هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش بهبود می‌یابد. هدف از مطالعه‌ی 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 مقایسه‌ی مشخصات هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با دیگر حوضچه‌های آرامش پرداخته شده است. ضمناً روابط تجربی برای محاسبه‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش و افت نسبی انرژی در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیان‌گر کاهش کمینه‌ی ۱۵٪ نسبت اعماق مزدوج و افزایش کمینه‌ی ۱۰٪ افت نسبی انرژی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان بوده است. براساس نتایج پژوهش 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. درنهایت، روابط تجربی استخراج‌شده با کمک شاخص‌های خطا ارزیابی شده است، که انطباق مطلوبی (حدود ۹۵٪) با داده‌های آزمایشگاهی داشته است.

## ۱. مقدمه

برای افزایش اتلاف نسبی انرژی جریان و جلوگیری از فرسایش بستر از تجهیزها و سازه‌های مناسب اتلاف انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. حوضچه‌های آرامش، یکی از متداول‌ترین سازه‌های اتلاف انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی هستند، که رژیم جریان را از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی 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 ارائه‌شده در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان، جایگزین مناسبی برای دیگر انواع حوضچه‌های آرامش هستند؛ که در آن‌ها، جت آب به مرکز حوضچه برخورد می‌کند و سپس در راستای شعاعی پخش می‌شود و در ادامه، پرش هیدرولیکی دایره‌ای رخ می‌دهد. در ادامه، برخی از مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای ارائه شده‌اند.

واتسون[۱] (۱۹۶۴)، با استفاده از معادله‌های اندازه‌ی حرکت و پیوستگی و به‌کارگیری تئوری لایه‌مرزی دوبُعدی، رابطه‌ای برای تعیین شعاع پرش در یک حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای در جریان‌های آرام و آشفته ارائه کرده است. با وجود عدم انطباق مطلوب بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری ارائه‌شده‌ی واتسون، مطالعات ایشان سرآغاز انجام مطالعات بیشتر در این زمینه شده است.[۱] کلسیوس و احمد[۲] (۱۹۶۹)، کاهش در نسبت عمق مزدوج و طول پرش و همچنین افزایش اتلاف انرژی توسط پرش هیدرولیکی را در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک (CHJ[3]) گزارش کرده‌اند.[۲] لاوسن و فلیپس[۴] (۱۹۸۳)، یک مدل ریاضی جهت شبیه‌سازی دقیق

[1] Watson
[2] Koloseus & Ahmad
[3] Classical Hydraulic Jump
[4] Lawson & Phillips

**استناد به این مقاله:**

دشتبان، حامد، کبیری سامانی، عبدالرضا و فاضلی، مصطفی، ۱۴۰۴. مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۳)، صص.۳-۱۲. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64524.3330

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

پرش هیدرولیکی دایره‌ای و پیش‌بینی مشخصات هیدرولیکی آن ارائه کرده‌اند؛ که براساس 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. علاوه‌بر این، مطابق نتایج به‌دست‌آمده، طول پرش دایره‌ای به‌طور قابل‌توجهی کمتر از پرش هیدرولیکی کلاسیک است.[۳] برخی از پژوهشگران نیز به انجام مطالعاتی در راستای بهبود عملکرد، شناخت مشخصات، و طراحی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای پرداخته‌اند.[۴-۱۰]

سوختانلو و همکاران (۱۳۹۷)، با طرح‌ریزی آزمایش‌هایی به کمک تحلیل تاگوچی به بررسی آزمایشگاهی آثار دبی جریان، قطر جت برخوردی، و ارتفاع سرریز در پایین‌دست پرش بر تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی چندضلعی[۱] پرداخته و دو رابطه‌ی خطی و غیرخطی برای تخمین تعداد اضلاع پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی بر حسب پارامترهای مذکور ارائه کرده‌اند.[۱۱] لکزیان[۲] و همکاران (۱۳۹۸)، به مطالعه‌ی تأثیر دبی جریان و ارتفاع سرریز پایین‌دست در شعاع پرش در جریان سیال نیوتنی (آب) و سیال غیرنیوتنی (هرشل- بالکلی)[۳] از دو جنبه‌ی کمّی و کیفی پرداخته‌اند. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نظریه‌ی اصلاح‌شده‌ی واتسون و حل تقریبی بور انجام شده و نتایج نشان داده است که پرش‌های ایجادشده در سیال هرشل- بالکلی در مقایسه با آب، شعاع کمتر و نسبت به تغییرات دبی و ارتفاع پایین‌دست حساسیت کمتری داشته‌اند. تغییرات شعاع پرش در سیال هرشل- بالکلی با افزایش دبی و ارتفاع سرریز پایین‌دست کاهش می‌یابد.[۱۲] فاضلی و کبیری سامانی (۱۳۹۹)، با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی و اندازه‌ی حرکت، رابطه‌ای برای محاسبه‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش و استهلاک انرژی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با شیب معکوس ارائه کرده‌اند.[۱۳] به‌منظور بررسی تأثیر شعاع تحدب در بستر برخورد، صابری و همکاران (۲۰۱۹)، شعاع پرش هیدرولیکی دایره‌ای را برای سه نازل با دبی‌های جریان مختلف اندازه‌گیری کرده و دریافته‌اند که در مقایسه با یک بستر صاف، یک سطح محدب شعاع پرش هیدرولیکی را تا حدود ۳۰٪ افزایش می‌دهد.[۱۴]

وانگ و خیات[۴] (۲۰۲۱)، اثر لزجت و کشش سطحی در تشکیل پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای را بررسی و تفاوت مکانیکی قابل‌توجهی بین پرش‌های هیدرولیکی در جریان مایعات غیرلزج و لزج گزارش کرده‌اند. نتایج نشان داده است که کشش سطحی برای سیال‌های با لزجت پایین و نیروی گرانش برای جریان سیال با لزجت بالا غالب است.[۱۵] نتایج عبدالعزیز و خیات[۵] (۲۰۲۲) نیز نشان داده است که پرش‌های ایجادشده توسط جت‌های شیب‌دار، شکل بیضوی دارند. هنگامی که اثر گرانش در پرش‌های ناشی از جت‌های مایل به سمت بالا به اندازه‌ی کافی غالب باشد، گردابه‌هایی ایجاد می‌شوند که می‌توانند مایع را از رأس پرش بیضوی به سمت عقب پرش برگردانند.[۱۶] باگات و لیندن[۶] (۲۰۲۲)، در بررسی تئوریک اثر جریان‌های پایین‌دست در پرش هیدرولیکی دریافته‌اند که لایه‌ی پایین‌دست در پرش تأثیر نمی‌گذارد. آن‌ها درستی نظریه‌ی ارائه‌شده توسط باگات[۷] و همکاران (۲۰۱۸) در مورد شعاع پرش را اثبات کرده‌اند. براساس نتایج حاصل، اتلاف لزجی در لایه‌ی پایین‌دست می‌تواند ارتفاع پرش را افزایش دهد، که موجب تشکیل پرش با شعاع کوچک‌تر می‌شود.[۱۷] اُکولو[۸] و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعات خود تأثیر زبری در تولید گرداب و به‌خصوص اثر شکل و ارتفاع عناصر مختلف زبری در اختلاط حاصل از پرش را بررسی کرده‌اند.[۱۸]

در ارتباط با تأثیر مثبت بلوک‌های آرام‌کننده در بهبود مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش نیز مطالعات مختلفی انجام شده است؛ که در ادامه، به برخی از آن‌ها اشاره شده است:

رانگاراجو[۹] و همکاران (۱۹۸۰)، به‌منظور محاسبه‌ی نیروی وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده‌ی درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک از داده‌های آزمایشگاهی باسکو و آدامز و موراهری[۱۰] (۱۹۷۱) (با هدف محاسبه نیروی مقاوم بلوک‌های آرام‌کننده در حوضچه‌های آرامش کلاسیک) استفاده کرده‌اند. ایشان علاوه‌بر اینکه به مقاومت بالاتر بلوک‌های ذوزنقه‌ای نسبت به بلوک‌های مستطیلی در برابر جریان دست یافته‌اند، توانسته‌اند ارتباط بین بیشترین نیروی وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده را با شکل بلوک‌ها و محل قرارگیری آن‌ها تعیین کنند. همچنین نیروهای وارد بر بلوک‌های آرام‌کننده و سرریز انتهایی را محاسبه کرده‌اند.[۱۹] ایبراهیم[۱۱] (۲۰۱۷)، به بررسی تأثیر بلوک‌های آرام‌کننده در مشخصات هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش کلاسیک پرداخته و شکل‌های مختلف استوانه‌ای، ذوزنقه‌ای، و مکعبی از بلوک‌های آرام‌کننده‌ی درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک را در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک بدون بلوک‌های آرام‌کننده مقایسه کرده و تأثیر مثبت استفاده از بلوک‌های آرام‌کننده را در مشخصات هیدرولیکی جریان درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک تأیید کرده است.[۲۰] عباس و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی مشخصات جریان درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک با شیب معکوس و مجهز به بلوک‌های آرام‌کننده پرداخته و هندسه‌های مختلف بلوک‌های آرام‌کننده، نظیر ذوزنقه‌ای و مخروطی‌شکل را در حوضچه با شیب کف معکوس مطالعه کرده‌اند. نتایج مشاهده‌های آزمایشگاهی ایشان بیانگر کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با همین مشخصات در حوضچه‌های آرامش کلاسیک بوده است.[۲۱] جعفری و صالحی نیشابوری (۲۰۱۴)، به مطالعه‌ی پارامترهای مؤثر در طول پرش هیدرولیکی مستغرق درون حوضچه‌های آرامش کلاسیک همراه با بلوک‌های میانی پرداخته و ضمن بررسی تأثیر پارامترهای فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه، ارتفاع بلوک‌ها و شکل بلوک‌ها در طول پرش هیدرولیکی، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، شکل‌گیری دو نوع رژیم سطحی و دیواره‌ای درون حوضچه‌های آرامش را گزارش کرده‌اند.[۲۲]

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 یک مطالعه‌ی تجربی در ارتباط با حوضچه‌های آرامش دایره‌ای مجهز به بلوک‌های آرام‌کننده انجام نشده است. با توجه به تأثیر مثبت بلوک‌های آرام‌کننده در بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی کلاسیک، انتظار می‌رود که

[1] Polygonal Hydraulic Jumps
[2] Lakzian
[3] Herschel - Bulkley
[4] Wang & Khayat
[5] Abdelaziz & Khayat
[6] Bhagat & Linden
[7] Bhagat
[8] Okulov
[9] Ranga Raju
[10] Murahari
[11] Ibrahim

نتایج مطالعات آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده در ارائه‌ی اطلاعات مناسب جهت طراحی بهینه‌ی سازه‌های مذکور مفید باشد. مطالعه‌ی حاضر بر تحلیل ویژگی‌های پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده تمرکز داشته است.

## ۲. مدل‌سازی آزمایشگاهی و پارامترهای مؤثر

### ۱.۲. آنالیز ابعادی

همان‌طور که اشاره شد، در پژوهش حاضر تأثیر مشخصات بلوک‌های آرام‌کننده در اعماق و شعاع‌های پرش هیدرولیکی دایره‌ای ارزیابی شده است. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای و نمونه‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر، پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی پرش هیدرولیکی درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده مطابق با رابطه‌ی ۱ هستند:

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

که در آن، g، Q، $d_1$، $d_2$، $R_1$ و $R_2$ به ترتیب شتاب جاذبه‌ی زمین، دبی جریان، عمق اولیه‌ی پرش، عمق ثانویه‌ی پرش، شعاع اولیه‌ی پرش، و شعاع ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی هستند. تعداد کل پارامترهای مؤثر در پدیده، ۷ =n و تعداد متغیرهای تکراری، ۳ = m بوده است. بنابراین، تعداد کل پارامترهای بی‌بُعد برابر ۴ و مطابق با رابطه‌ی 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 بُعد رابطه‌ی ۲ می‌توان پارامترهای جدیدی براساس روابط ۳ و ۴ تعریف کرد. لذا رابطه‌ی ۲ به‌صورت رابطه‌ی ۵ خلاصه شده است.

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

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

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

### ۲.۲. معرفی مدل آزمایشگاهی

مطالعات انجام‌شده در پژوهش حاضر بر روی مدلی با ساختار مخزن مکعبی با قاعده‌ی مربع‌شکل از جنس ورق گالوانیزه به اضلاع ۲/۵ و ارتفاع ۱/۵ متر انجام شده است. آب از درون مخزن ذخیره‌ی زیرین مدل، توسط پمپی با بیشینه‌ی دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه از طریق یک خط لوله وارد مدار شده است. دبی جریان با استفاده از شیر سوزنی تنظیم و با استفاده از دبی‌سنج مغناطیسی با دقت ±۱/۴ ٪ دبی اندازه‌گیری‌شده، کنترل شده است. مشخصات هیدرولیکی پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای در حضور بلوک‌های آرام‌کننده 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 بلوک‌ها برای هر آزمایش مشاهده می‌شود.

برای برداشت عمق جریان و پروفیل پرش، در زیرصفحه‌ی برخورد، ۳۴ عدد پیزومتر در دو جهت عمود بر هم نصب شده‌اند. از طرفی، عمق و شعاع‌های اولیه و ثانویه‌ی جریان به کمک عمق‌سنج نقطه‌ای در بالای صفحه‌ی برخورد با دقت ±۱ میلی‌متر برداشت شده است. بلوک‌های آرام‌کننده بر روی صفحه‌ی برخورد و در مسیر جریان قرار داشته‌اند. در شکل ۲، نحوه‌ی قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده بر روی صفحه‌ی برخورد مشاهده می‌شود.

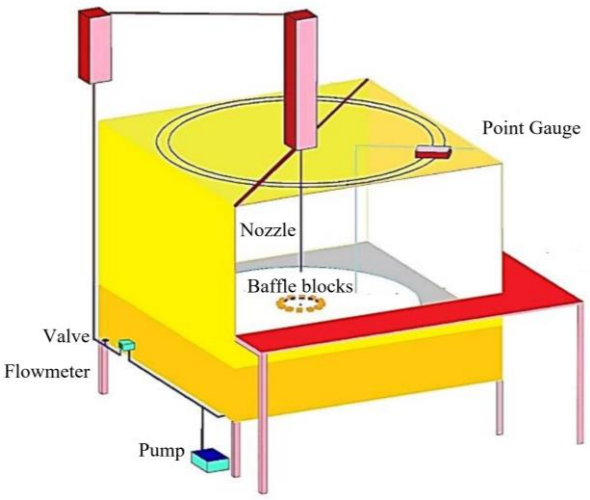
**جدول ۱. دامنه‌ی تغییرات پارامترهای مدل آزمایشگاهی.**

| Exp. No. | $F_1$ | $d_o$ | $R_o$ | $R_1/d_1$ | $\Delta E/E_1$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 01 | 14.12 | 14.86 | 1.73 | 64.86 | 0.85 |
| 02 | 11.23 | 11.55 | 1.82 | 50.00 | 0.82 |
| 03 | 9.38 | 10.20 | 1.76 | 46.00 | 0.77 |
| 04 | 5.97 | 6.28 | 1.94 | 22.86 | 0.66 |
| 05 | 9.97 | 11.04 | 1.87 | 47.92 | 0.78 |
| 06 | 9.80 | 10.60 | 1.86 | 44.00 | 0.78 |
| 07 | 10.78 | 11.40 | 1.92 | 40.00 | 0.80 |
| 08 | 7.81 | 8.67 | 1.88 | 35.00 | 0.72 |
| 09 | 7.60 | 7.94 | 2.25 | 22.79 | 0.73 |
| 10 | 8.41 | 9.00 | 2.05 | 32.50 | 0.75 |
| 11 | 8.56 | 8.46 | 2.26 | 26.15 | 0.77 |
| 12 | 8.08 | 8.15 | 2.17 | 27.69 | 0.75 |
| 13 | 14.03 | 11.78 | 2.17 | 40.00 | 0.88 |
| 14 | 4.72 | 4.23 | 4.00 | 6.15 | 0.65 |
| 15 | 4.06 | 3.67 | 4.00 | 5.00 | 0.60 |
| 16 | 4.06 | 3.53 | 4.20 | 5.00 | 0.61 |
| 17 | 3.60 | 3.18 | 4.28 | 4.12 | 0.57 |
| 18 | 3.60 | 3.12 | 4.28 | 4.12 | 0.58 |
| 19 | 4.22 | 3.57 | 4.25 | 5.71 | 0.63 |
| 20 | 4.50 | 4.07 | 4.07 | 5.36 | 0.63 |
| 21 | 4.20 | 3.47 | 5.17 | 3.53 | 0.64 |
| 22 | 3.56 | 2.89 | 5.00 | 3.16 | 0.60 |
| 23 | 2.73 | 2.12 | 5.18 | 2.29 | 0.54 |

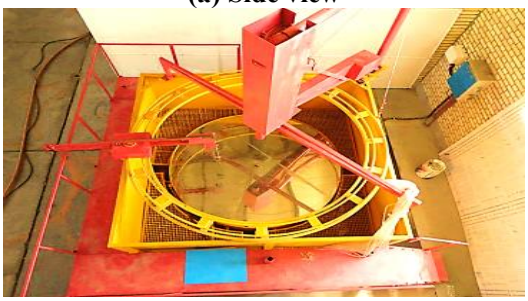
## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳. مشاهده‌های آزمایشگاهی

قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده بر روی صفحه‌ی برخورد حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای، علاوه‌بر ایجاد مانع در مسیر جریان و اتلاف انرژی ناشی از برخورد جت، سبب افزایش اغتشاش‌های جریان می‌شود. بنابراین، در مقایسه با حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای بدون بلوک‌های آرام‌کننده، استهلاک انرژی بیشتری به همراه دارد. همچنین با توجه به پخش‌شدن جریان شعاعی بر روی صفحه، نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد.[۱۳] تغییر در مشخصات بلوک‌ها می‌تواند سبب ایجاد تغییر در مشخصات هیدرولیکی پرش شود. تأثیر تغییرات ارتفاع




**(a) Side view**



**(b) Plan**

**شکل ۱. شمای کلی مدل آزمایشگاهی.**

**جدول ۲. مشخصات بلوک‌های آرام‌کننده.**

| Blocks angle (°) | Blocks distance from the jet center (m) | Block height (m) | Block width (m) | Exp. No. |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 01 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 02 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.03 | 03 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 04 |
| 30 | 0.35 | 0.04 | 0.05 | 05 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.03 | 06 |
| 30 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 07 |
| 60 | 0.3 | 0.04 | 0.07 | 08 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 09 |
| 45 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 10 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.07 | 11 |
| 30 | 0.3 | 0.03 | 0.07 | 12 |
| 30 | 0.25 | 0.04 | 0.07 | 13 |
| 45 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 14 |
| 30 | 0.3 | 0.03 | 0.05 | 15 |
| 30 | 0.3 | 0.04 | 0.05 | 16 |
| 45 | 0.3 | 0.04 | 0.07 | 17 |
| 30 | 0.3 | 0.03 | 0.07 | 18 |
| 30 | 0.35 | 0.04 | 0.07 | 19 |
| 60 | 0.3 | 0.04 | 0.07 | 20 |



**شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده.**



**(a) End sill height = 40 mm**



**(b) End sill height = 50 mm**

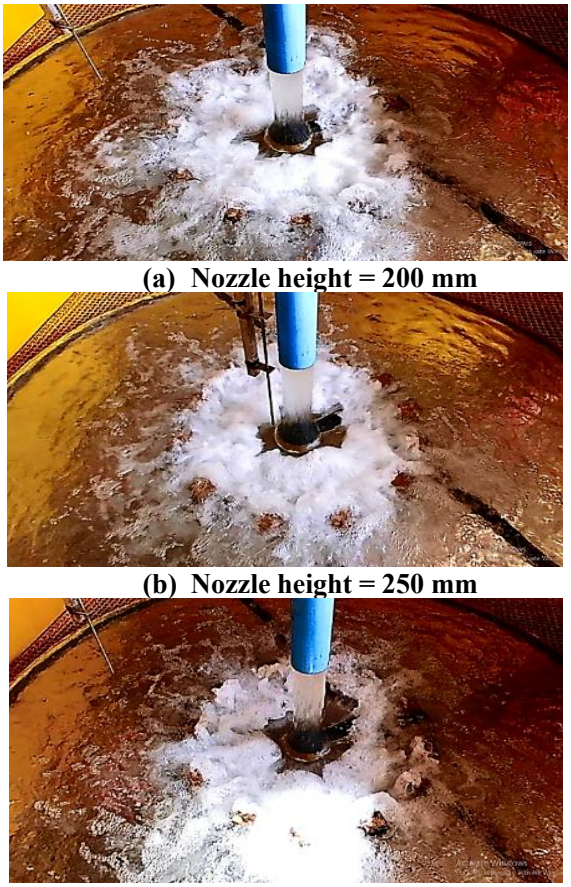


**(c) End sill height = 60 mm**

**شکل ۳. تأثیر تغییرات ارتفاع سرریز لبه‌ی تیز انتهایی.**

سرریز لبه‌تیز انتهایی و تأثیر تغییرات ارتفاع نازل از صفحه‌ی برخورد (به ازاء ثابت‌بودن دیگر پارامترهای مؤثر در پدیده) در ادامه بررسی شده است.

افزایش ارتفاع سرریز انتهایی، افزایش عمق ثانویه‌ی 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 ثانویه‌ی پرش دانست. همچنین مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع سرریز، شعاع‌های اولیه و ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی دایره‌ای کاهش می‌یابند. چرا که با افزایش ارتفاع سرریز لبه‌ی تیز انتهایی، جریان‌های برگشتی افزایش یافته و موقعیت شکل‌گیری پرش به سمت مرکز جت برخوردی جابجا شده است (شکل ۳).




**شکل ۴. تأثیر تغییرات ارتفاع نازل خروجی جریان.**

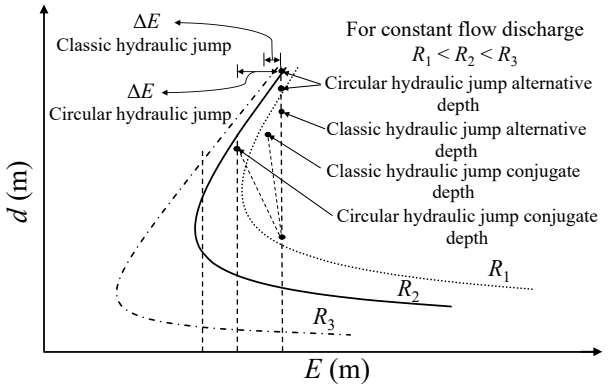
مطابق شکل ۴، افزایش ارتفاع نازل سبب افزایش انرژی پتانسیل جت و در نتیجه، افزایش انر ژی جنبشی جریان روی صفحه‌ی برخورد شده است.

با افزایش انرژی جنبشی جریان، عمق اولیه‌ی پرش، کاهش و عمق ثانویه‌ی آن؛ افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش ارتفاع نازل خروجی جریان از صفحه‌ی برخورد حوضچه، افزایش عمق ثانویه را در پی دارد. مشاهده‌های آزمایشگاهی همچنین نشان داده است که افزایش انرژی جنبشی جریان بر روی صفحه‌ی برخورد ناشی از افزایش ارتفاع نازل سبب تغییر موقعیت شکل‌گیری پرش به سمت سرریز لبه‌ی تیز انتهایی شده است.

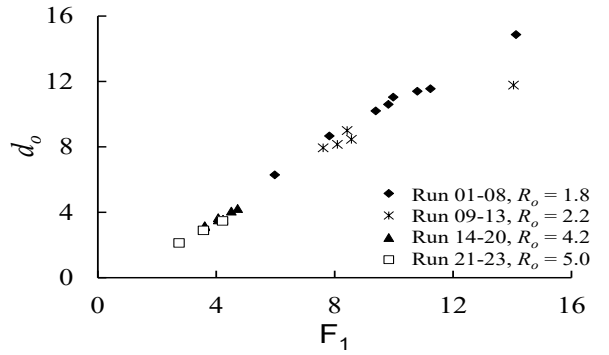
## ۲.۳. تحلیل نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار جریان، منحنی انرژی مخصوص بر حسب عمق در پرش دایره‌ای و کلاسیک بررسی شده است. در شکل ۵، منحنی تغییرات عمق به ازاء تغییرات انرژی مخصوص جریان مشاهده می‌شود؛ که از جمله ویژگی‌های آن، تشکیل دو عمق متناوب برای جریان فوق و زیربحرانی است. هر منحنی در نمودار انرژی مخصوص مربوط به دبی ثابت است.

چنانچه دبی در واحد طول کمان حوضچه در اثر تنگ‌شدگی مقطع افزایش یابد، منحنی نسبت به حالت اولیه به سمت راست منتقل و عمق ثانویه‌ی پرش افزایش می‌یابد. حال آنکه اگر در اثر بازشدگی مقطع و افزایش عرض حوضچه‌ی دبی در واحد طول کمان کاهش یابد، منحنی نسبت به حالت اولیه به سمت چپ کشیده می‌شود و عمق ثانویه‌ی پرش نیز کاهش می‌یابد.[۱۳] در شرایطی




**شکل ۵. منحنی انرژی مخصوص جریان بر حسب عمق.[۱۳]**



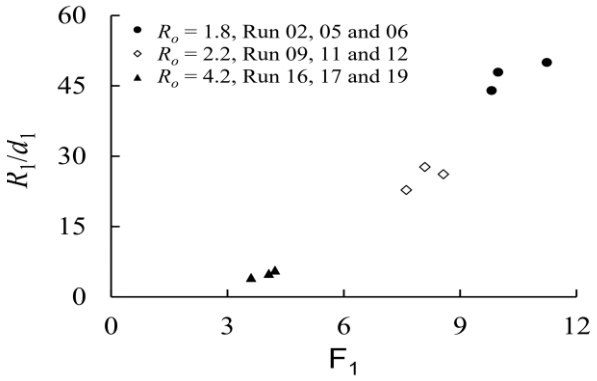

**شکل ۶. تغییرات $d_o$ در مقابل $F_1$ برای مقادیر مختلف $R_o$.**

که امکان احداث هر دو نوع حوضچه وجود داشته باشد، همچنین، شکل ۵، برتری حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای نسبت به حوضچه‌ی آرامش کلاسیک را نیز اثبات می‌کند. چرا که در حوضچه‌های آرامش کلاسیک عرض حوضچه، ثابت است؛ اما در حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با توجه به پخش‌شدن جریان شعاعی بر روی سطح بیشتری از صفحه‌ی برخورد، از نسبت اعماق مزدوج کاسته می‌شود.

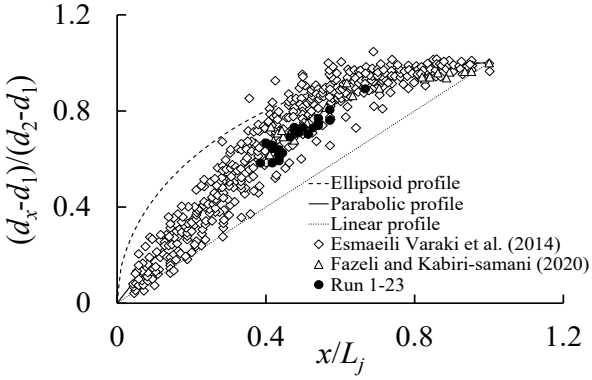
در ادامه، روند تغییرات داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مدل آزمایشگاهی بررسی شده است، تا ضمن شناخت فیزیک پدیده، تأثیر پارامترهای مستقل حاصل از آنالیز ابعادی در پارامتر وابسته (نسبت اعماق مزدوج پرش $d_o$) ارزیابی شود. کاهش عمق اولیه‌ی جریان و یا افزایش دبی جریان، سبب افزایش عدد فرود $F_1^2=V_1^2/gd_1^2$ می‌شود. مطابق مطالعات انجام‌شده‌ی کولسیوس و احمد[۱۲] (۱۹۶۹)،[۲] کاهش عمق اولیه با افزایش عمق ثانویه در ارتباط است، بنابراین مطابق شکل ۶، افزایش عدد فرود سبب افزایش نسبت اعماق مزدوج پرش و نیز افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش می‌شود.

افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش به دلیل ایجاد جریان شعاعی درون حوضچه‌ی آرامش سبب پخش‌شدن جریان بر روی سطح بیشتری از صفحه‌ی برخورد حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای می‌شود؛ و در نتیجه، میزان دبی در واحد طول حوضچه‌ی آرامش کاهش می‌یابد. مطابق آنچه پیشتر نیز اشاره شد، کاهش دبی سبب کاهش عمق ثانویه‌ی پرش و در نتیجه افزایش عمق اولیه‌ی آن می‌شود. بنابراین نسبت اعماق مزدوج پرش به ازاء افزایش نسبت شعاع مزدوج پرش مطابق شکل ۶ کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۷ با

[12] Koloseus & Ahmad




**شکل ۷. تغییرات $R_1/d_1$ در مقابل $F_1$ برای مقادیر مختلف $R_o$**



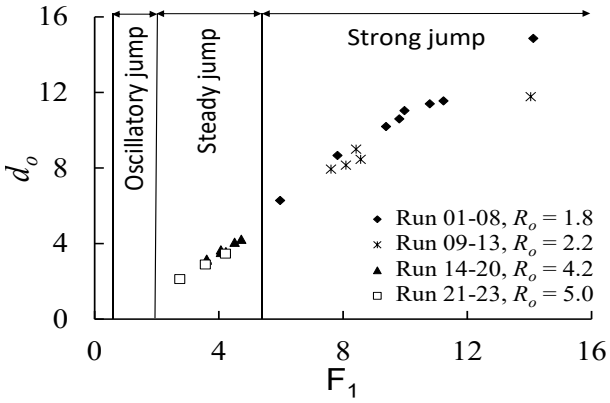

**شکل ۸. پروفیل سطح پرش درون حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده.**

افزایش عدد فرود، کاهش مقدار عمق اولیه‌ی پرش و افزایش شعاع اولیه‌ی پرش، مقدار پارامتر ($R_1/d_1$) افزایش یافته است.

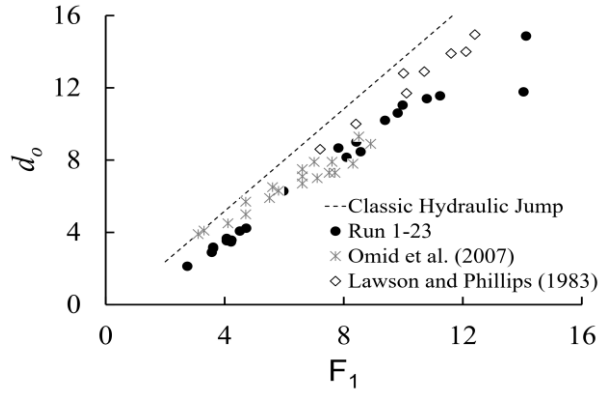
در شکل ۸، پروفیل سطح آب در حد فاصل شعاع اولیه تا ثانویه‌ی پرش بر حسب عمق در امتداد پرش ($d_x$) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، پارامتر بی‌بُعد $(d_x-d_1)/(d_2-d_1)$ در مقابل $(x/L_j)$ برای همه‌ی آزمایش‌ها نشان داده شده است. همچنین پروفیل‌های خطی، بیضوی، و سهمی نیز در نمودار اخیر نشان داده شده‌اند. به‌منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل، داده‌های آزمایشگاهی نوشتارهای فضلی و کبیری سامانی (۲۰۱۹)،[۱۳] و اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۳] نیز ارائه شده‌اند. مطابق شکل ۸، معادله‌ی سهمی به خوبی با پروفیل سطح پرش در حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده مطابقت دارد.

پرش هیدرولیکی براساس عدد فرود اولیه و نحوه‌ی شکل‌گیری اغتشاش‌های جریان درون حوضچه‌های آرامش مستطیلی به انواع موجی، ضعیف، نوسانی، پایدار، و قوی طبقه‌بندی می‌شود. براساس روندی مشابه با حوضچه‌های آرامش مستطیلی و طبق مشاهده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر، سه نوع پرش نوسانی، پایدار، و قوی درون حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده تشکیل شده است (شکل ۹).

نسبت اعماق مزدوج، یکی از شاخص‌های مهم در بررسی برتری حوضچه‌های آرامش است. زمانی که این نسبت در یک حوضچه‌ی آرامش در مقایسه با حوضچه‌های آرامش کلاسیک کاهش یابد، می‌توان گفت که تغییرات ایجادشده در ساختار حوضچه مؤثر بوده و سبب بهبود مشخصات هیدرولیکی آن شده است. براساس نتایج نوشتار اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۳]




**شکل ۹. گونه‌های مختلف پرش درون حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده.**



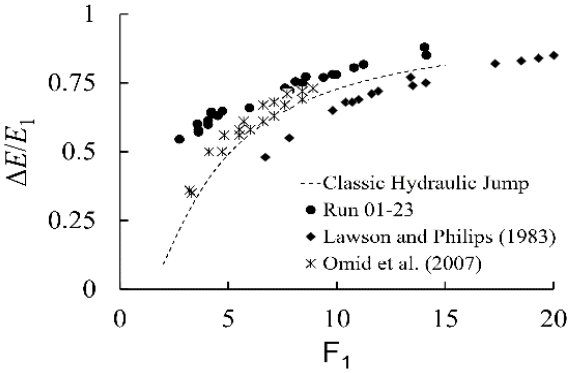

**شکل ۱۰. مقایسه‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش در حوضچه‌های آرامش**

حوضچه‌های آرامش شعاعی به نسبت حوضچه‌های آرامش کلاسیک، نسبت اعماق مزدوج پرش کمتری دارند. در برخی مطالعات،[۲ و ۳] مقدار بهینه‌ی 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، مقدار بهینه‌تری در مقایسه با دیگر حوضچه‌های آرامش در برخی مطالعات،[۳ و ۲۴] داشته و قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده درون حوضچه‌های آرامش سبب بهبود مشخصات هیدرولیکی آن شده است. با شناخت رفتار پرش درون حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده به‌منظور محاسبه‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش، رابطه‌ی تجربی ۶ با استفاده از نرم‌افزار SPSS و براساس داده‌های آزمایشگاهی و استناد به رابطه‌ی ۵ استخراج شده است.

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

مطابق رابطه‌ی ۶، پارامتر نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی دایره‌ای با پارامتر مستقل $R_o$ رابطه‌ی عکس و با پارامترهای $F_1$ و $R_1/d_1$ رابطه‌ی مستقیم دارد. ضمن تأکید بر انطباق نتایج حاصل بر فیزیک پدیده، در ادامه، رابطه‌ی ارائه‌شده با استفاده از شاخص‌های خطا راستی‌آزمایی شده است.

قرارگیری بلوک‌های آرام‌کننده در مسیر جریان، برخورد مستقیم جت جریان با بلوک‌های قرارگرفته در مسیر آن، و اغتشاش‌های حاصل از تشکیل پرش هیدرولیکی سبب افزایش افت نسبی انرژی 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،[۳ و




**شکل ۱۱. افت نسبی انرژی جریان در پرش هیدرولیکی دایره‌ای.**

| Error Indices | | | | Equation |
|---|---|---|---|---|
| RSE | EF | WQD | $R^2$ | |
| 0.007 | 0.993 | 0.039 | 0.987 | 6 |
| 0.057 | 0.942 | 0.032 | 0.942 | 7 |

[۲۴] بیشتر بوده است. این موضوع از جنبه‌ی هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت است و از معیارهای برتری حوضچه‌های مذکور به شمار می‌رود.

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و فقط براساس پارامترهای مستقل حاکم بر $d_o$ در رابطه‌ی ۵، رابطه‌ی تجربی ۷ به‌منظور تعیین افت نسبی انرژی جریان استخراج شده است. تأثیر پارامترهای مستقل رابطه‌ی ۵ در پارامتر وابسته‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش ($d_o$) در رابطه‌ی ۶ لحاظ شده است. درستی رابطه‌ی ارائه‌شده با استفاده از شاخص‌های خطا در ادامه بررسی شده است.

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

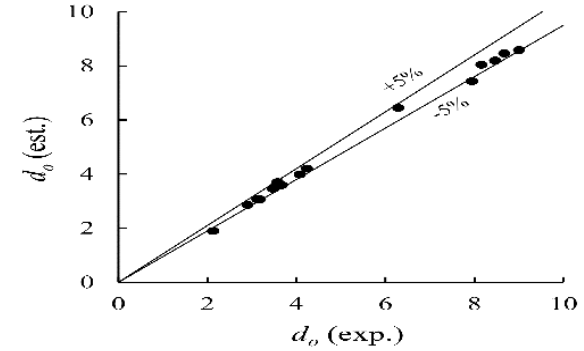
## ۴. راستی‌آزمایی نتایج

در بخش کنونی، با استفاده از شاخص‌های محاسبه‌ی خطا، که در ادامه ارائه شده است، میزان دقت و درستی روابط ارائه‌شده اعتبارسنجی شده است. از جمله شاخص‌های محاسبه‌ی خطا می‌توان به روابط ۸ الی ۱۱ به ترتیب شامل: WQD، EF، RSS، و $R^2$ اشاره کرد. در مطالعه‌ی حاضر، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و همبستگی روابط ۶ و ۷ با استفاده از شاخص‌های خطا در جدول ۳ ارائه شده است. میزان پراکندگی داده‌ها نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود. بنابراین، با توجه به عملکرد مناسب روابط تجربی ارائه‌شده، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر برای تعیین مشخصات هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده بهره برد.

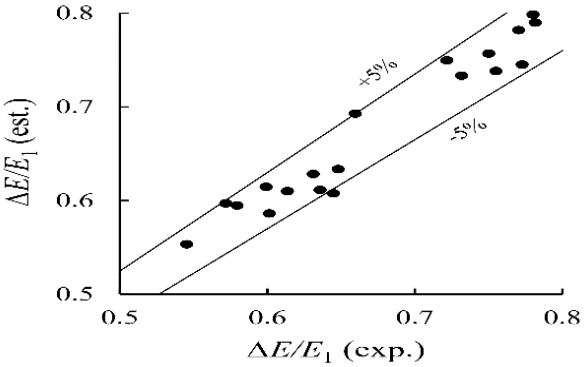
$$WQD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i O_i)(S_i - O_i)^2}}{\sum_{i=1}^{n}(S_i O_i)} \tag{8}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \tag{9}$$

$$RSS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \tag{10}$$




**شکل ۱۲. پراکندگی نتایج حاصل از رابطه‌ی ۶ برای محاسبه‌ی نسبت اعماق مزدوج پرش در مقابل داده‌های آزمایشگاهی.**




**شکل ۱۳. پراکندگی نتایج حاصل از رابطه‌ی ۷ برای محاسبه‌ی استهلاک نسبی انرژی جریان در مقابل داده‌های آزمایشگاهی.**

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(P_i - \bar{P}\right)\left(M_i - \bar{M}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - \bar{P}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(M_i - \bar{M}\right)^2}}\right]^2 \tag{11}$$

در روابط اخیر، $S_i$ بیان‌گر نتایج حاصل از روابط ارائه‌شده، $O_i$ مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی، $\bar{S}$ متوسط مقادیر حاصل از روابط استخراج‌شده، و $\bar{O}$ متوسط مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هستند. هر چه مقدار $R^2$ و EF به ۱ نزدیک‌تر باشد، همبستگی داده‌ها بیشتر و خطا کمتر است. در مورد WQD و RSS ، هر چه مقدار آن‌ها کوچک‌تر باشد، رابطه‌ی به‌دست‌آمده، دقت بیشتری دارد. براساس معیارهای ذکرشده، مقادیر ضریب همبستگی و خطاهای به‌دست‌آمده برای روابط معرفی‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، ویژگی‌های هیدرولیکی پرش هیدرولیکی دایره‌ای ناشی از برخورد جت جریان به مرکز حوضچه‌ی آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده ارزیابی شده است. در شرایط هندسی-هیدرولیکی یکسان، نتایج پژوهش حاضر بیانگر کاهش کمینه‌ی ۱۵ درصدی نسبت اعماق مزدوج پرش و افزایش کمینه‌ی ۱۰ درصدی افت نسبی انرژی جریان در مقایسه با همین ویژگی‌ها درون حوضه‌های آرامش کلاسیک بوده است. نتایج اخیر از نقطه‌نظر هیدرولیکی در طراحی حوضچه‌های آرامش به‌منظور دست‌یابی به راندمان عملکرد بالا و هزینه‌ی کم حائز اهمیت است. معادله‌های استخراج‌شده برای نسبت اعماق مزدوج پرش (رابطه‌ی ۶) و افت نسبی انرژی

(رابطه‌ی ۷) از پارامترهای بدون‌بُعد فیزیکی تشکیل شده‌اند و همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و می‌توانند برای طراحی حوضچه‌های آرامش دایره‌ای با بلوک‌های آرام‌کننده استفاده شوند. درنهایت می‌توان گفت که افزایش $F_1$، $R_1/d_1$ و کاهش $R_o$ 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 مطالعه‌ی حاضر، نقطه‌ی 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 اولیه‌ی پرش هیدرولیکی

$d_2$: عمق ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی

$d_o$: نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی

$\Delta E/E_1$: افت نسبی انرژی جریان

$F_1$: عدد فرود جریان فوق‌بحرانی بالادست

$R_1$: شعاع اولیه‌ی پرش هیدرولیکی

$R_2$: شعاع ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی

$R_o$: نسبت شعاع مزدوج پرش هیدرولیکی

## References- منابع


1. Watson, E. 1964. The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane. *Journal of Fluid Mechanics*, *20*(3), pp.481–499. doi: https://doi.org/10.1017/S0022112064001367.
2. Koloseus, H.J. and Ahmad, D. 1969. Circular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering, 95*(1), pp.409–422. doi: https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001947.
3. Lawson, J.D. and Phillips, B.C. 1983. Circular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering, 109*(4): pp.505–518. doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1983)109:4(505).
4. Bush, J.W.M. and Aristoff, J.M. 2003. The influence of surface tension on the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, *489*, pp.229–238. doi: https://doi.org/10.1017/S0022112003005159.
5. Bush, J. W. M., Aristoff, J. M. and Hosoi, A. 2006. An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, *558*, pp.33–52. doi: https://doi.org/10.1017/S0022112006009839.
6. Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A.R. and Khavari, M. 2009. Numerical study of circular hydraulic jump using volume of fluid method. *Journal of Fluids Engineering*, *133*(1), pp.114011–1140111. doi: https://doi.org/10.1115/1.4003307.
7. Zobeyer, H., Rajaratnam, N. and Zhu, D.Z. 2013. Radial jet and hydraulic jump in a circular basin. *Journal of Engineering Mechanics, 140*(1), pp.128–133. doi: https://doi.org/10.1061/ (ASCE)EM.1943 7889.0000644.
8. Vishwanath, K.P., Dasgupta, R., Govindarajan, R. and Sreenivas, K.R. 2015. The effect of initial momentum flux on the circular hydraulic jump. *Journal of Fluids Engineering*, *137*(6), 061301(7 pages). doi: https://doi.org/10.1115/1.4029725.
9. Valiani, A. and Caleffi, V. 2016. Free-surface axially symmetric flows and radial hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, *142*(4), 06015025. doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943 7900.0001104.
10. Choo, K. and Kim, S.J. 2016. The influence of nozzle diameter on the circular hydraulic jump of liquid jet impingement. *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science.*, *72*, pp.12–17. doi: https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.10.033.
11. Soukhtanlou, E., Teymourtash, A.R. and Mahpeykar, M.R. 2017. Experimental relationships for determining the hydraulic characteristics of polygonal hydraulic jumps. *Modares Mechanical Engineering Journal, 18*(1), pp.273–280. [In Persian]. doi: http://mme.modares.ac.ir/article-15-199-fa.html.
12. Lakzian, E., Estiri, A., Teymourtash, A.R. and Niazi, M. 2018. Numerical investigation of circular hydraulic jump with non-Newtonian fluid with modified VOF method. *Mechanical Engineering Journal, Tabriz University*, *49*(1), pp.268–261. [In Persian]. doi: https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_8661_1096.html?lang=fa.
13. Fazli, M. and Kabiri-Samani, A. 2019. Circular hydraulic jump in stilling basins with reverse slope bed. *Sharif Civil Engineering Journal*, *2-36*(1/2), pp.37–47. [In Persian]. doi: https://doi.org/10.24200/j30.2018.50627.2334.
14. Saberi, A., Mahpeykar, M.R. and Teymourtash, A.R. 2019. Experimental measurement of radius of circular hydraulic jumps: effect of radius of convex target plate. *Flow Measurement and Instrumentation*, *65*, pp.274–279. doi: https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.01.011.

15. Wang, Y. and Khayat, R.E. 2021. 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*(1), 012105. doi: https://doi.org/10.1063/5.0032369.

16. Abdelaziz, A. and Khayat, R.E. 2022. On the non-circular hydraulic jump for an impinging inclined jet. *Physics of Fluids*, *34*(2), 023603. doi: https://doi.org/10.1063/5.0079563.

17. Bhagat, R.K. and Linden, P.F. 2022. The circular hydraulic jump; the influence of downstream flow on the jump radius. *Physics of Fluids*, *34*(7), 072111. doi: https://doi.org/10.1063/5.0090549.

18. Okulov, V. L., Sharifullin, B. R., Okulova, N., Kafka. J., Taboryski, R., Sørensen, J.N. and Naumov, I.V. 2022. Influence of nano-and micro-roughness on vortex generations of mixing flows in a cavity. *Physics of Fluids*, *34*(3), 032005. doi: https://doi.org/10.1063/5.0083503.

19. Ranga Raju, K.G., Kitaal, M.K., Verma, M.S. and Ganeshan, V.R. 1980. Analysis of flow over baffle blocks and end sills. *Journal of Hydraulic Research*, *18*(3), pp.227–241. doi: https://doi.org/10.1080/00221688009499549.

20. Ibrahim, M. 2017. Improve the efficiency of stilling basin using different types of blocks. *American Journal of Engineering Research*, *6*(8), pp.295–304. doi: https://feng.stafpu.bu.edu.eg/Civil%20Engineering/2476/publications/Mohammad%20Mahmoud%20Mohammad%20Ibrahim_ZJ0608295304.pdf.

21. Abbas, A., Alwash, H. and Mahmood, A. 2018. Effect of baffle block configurations on characteristics of hydraulic jump in adverse stilling basins. *MATEC Web of Conferences*, *162*(1), pp.3005–3012. doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/201816203005.

22. Jafari, A. and Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2016. Numerical study of effective parameters in length of submerged hydraulic jump with the baffle blocks. *Sharif Civil Engineering Journal*, *33-2*(2/3), pp.65-73. [In Persian]. doi: https://www.sid.ir/paper/127934/en.

23. Esmaeeli Varaki, M., Kasi, A., Farhoudi J. and Sen, D. 2014. Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope. *Iranian Journal of Science and Technology, Trans. Civil Engineering, 38*(C1): pp.111–121. doi: https://ijstc.shirazu.ac.ir/article_1848_0.html.

24. Omid, M.H., Esmaeeli Varaki, M. and Narayanan, R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research, 45*(4), pp.512-518. doi: https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521786.