



Experimental Study on the Geometric Effects of the Baffle Blocks in Stilling Basin on the Hydraulic Jump Characteristics Downstream of Smooth and Stepped Chutes

Rasoul Daneshfaraz^{✉1}, Amir Ghaderi², Shahram Rajabi³

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, daneshfaraz@yahoo.com

2. Water and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, amir_ghaderi@znu.ac.ir

3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, sharam.rajabi@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 27, 2022

Received: Apr. 9, 2022

Accepted: Apr. 16, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:

Energy Dissipation,
Hydraulic Jump length,
Stilling Basin USBR III,
Darcy roughness coefficient,
Sequent depths ratio.

ABSTRACT

Hydraulic jump phenomenon is a rapid variation in flow conditions that occurs for dissipation of the kinetic energy of the flow in downstream of the hydraulic structures in stilling basins. The aim of this study is to investigate flow characteristics of stepped and smooth chute and the effects of block geometry on the hydraulic jump characteristics in the stilling basin USBR III. Experiments were conducted on the stepped chute and they were compared with smooth chute as well as stilling basin and baffle blocks and end sill in different geometry shapes to test the hydraulic behavior of different hydraulic conditions. The results were compared with stilling basin without block. The results of comparing the two types of chutes showed that in stepped chute, the air entrainment inception locations a positioning further upstream than the smooth chute due to the turbulence of the flow on the steps. The energy dissipation and Darcy roughness coefficient in stepped chute increases by 10% and 15.6% on average compared to smooth chute, respectively, which indicates the appropriate hydraulic performance of stepped chute compared to smooth type. Results showed that increasing the Froude number and height of the baffle blocks caused decreasing sequent depths ratio and the jump length by 22.12 and 36 percent, respectively, compared to classical jump. It is believed that the main reason was raising the rate of secondary flows and flow resistance due to the baffle blocks in stilling basin. The energy dissipation increased by 24 percent, compared to the classical jump and further increase in high Froude number.

Cite this article: Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., & Rajabi, Sh. (2022). Experimental Study on The Geometric Effects of The Baffle Blocks in Stilling Basin on The Hydraulic Jump Characteristics Downstream of Smooth and Stepped Chutes. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 732-746.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339653.669219>



بررسی آزمایشگاهی تأثیر هندسه و ابعاد بلوک‌های میانی حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی در پایین دست شوت صاف و پلکانی

رسول دانشفراز^۱، امیر قادری^۲، شهرام رجبی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، daneshfaraz@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، amir_ghaderi@znu.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، sharam.rajjabi@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و مقایسه خصوصیات جریان عبوری از شوت پلکانی و شوت صاف و همچنین مطالعه اثر تغییر در هندسه و ابعاد بلوک‌های حوضچه آرامش تیپ USBR III بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی مدل آزمایشگاهی شوت پلکانی و مقایسه آن با شوت صاف و همچنین حوضچه آرامش همراه با بلوک‌های میانی در ابعاد و اشکال مختلف در شرایط هیدرولیکی مختلف انجام شد. نتایج با حوضچه آرامش بدون بلوک (پرش کلاسیک) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه دو نوع شوت نشان داد که در شوت پلکانی به دلیل تلاطم جریان بر روی پله‌ها باعث اختلاط آب و هوا و انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست شوت پلکانی می‌شود. میزان استهلاک انرژی و ضریب زبری داری در شوت پلکانی به‌طور میانگین به ترتیب ۱۰ و ۱۵/۶ درصد نسبت به شوت صاف افزایش می‌یابد که نشانگر عملکرد هیدرولیکی مناسب شوت پلکانی نسبت به شوت صاف می‌باشد. نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش همراه با بلوک به ترتیب حداکثر ۲۲/۱۲ و ۳۶ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. روند کاهش با افزایش ارتفاع بلوک‌ها و عدد فرود بیشتر می‌شود و این به دلیل وجود بلوک‌ها در حوضچه آرامش و در نتیجه افزایش تلاطم و مقاومت در برابر جریان می‌باشد. افت انرژی نسبی در حوضچه آرامش همراه با بلوک به‌طور میانگین حداکثر ۲۴ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد که این روند با افزایش عدد فرود شدت می‌یابد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱

واژه‌های کلیدی:

استهلاک انرژی،

طول پرش هیدرولیکی،

حوضچه آرامش USBR III،

ضریب زبری داری،

نسبت اعماق مزدوج

استناد: دانشفراز، رسول؛ قادری، امیر؛ و رجبی، شهرام (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی تأثیر هندسه و ابعاد بلوک‌های میانی حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی در

پایین دست شوت صاف و پلکانی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۴)، ۷۳۲-۷۴۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339653.669219>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در آن جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌یابد و همراه با تلاطم، آشفتگی و اختلاط آب و هوا است. به منظور کنترل پرش هیدرولیکی و جلوگیری از آسیب و زیان‌های ناشی از انرژی جنبشی جریان در سرعت‌های فوق بحرانی، در انتهای سازه‌هایی مانند سرریزها، از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی مانند طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. تلاش محققین همواره بر ایجاد تمهیداتی بوده است که بتوانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش و افت انرژی را افزایش دهند تا ساخت حوضچه آرامش صرفه اقتصادی به همراه داشته باشد. طبق مطالعاتی که توسط اداره احیاء اراضی ایالات متحده^۱ USBR انجام شده، حوضچه‌های آرامش در تیپ‌های دو، سه و چهار USBR و SAF مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن‌ها از بلوک‌های ابتدایی، میانی و انتهایی استفاده می‌شود (Eshkou et al. 2018). از آنجایی که بلوک‌ها مستقیماً در معرض جریان با انرژی جنبشی بالا بوده و باعث ایجاد جدا شدگی جریان می‌شوند، نیاز به پایداری زیادی دارند و در صورتیکه سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر بر ثانیه باشد باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون نیز خواهند شد (Peterka, 1958). تاکنون تحقیقات متفاوتی برای بهبود افزایش کارایی پرش هیدرولیکی از سوی محققان مختلف پیشنهاد شده است که می‌توان به شیب‌دار کردن کف حوضچه آرامش (Shojaeian et al. 2011)، استفاده از بلوک‌های کف در حوضچه آرامش (Jam et al. 2015)، پله‌های با شیب مثبت یا منفی (Esmaili and Abrishami. 2001)، ناهمواری یا زبری با شکل مختلف (Dasineh et al. 2021; Najandali et al. 2012) و آستانه انتهایی (Minaei et al. 2016) اشاره کرد.

اولین مطالعات سیستماتیک در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ را (Rajaratnam, 1968) مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که اگر بستر کانالی که پرش بر روی آن تشکیل می‌شود زبر باشد، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش می‌تواند به‌طور مشخصی کوچکتر از عمق مزدوج مشابه خود در بستر صاف باشد. همچنین وی نشان داد طول پرش و طول غلتاب بر روی بستر زبر کاهش چشم‌گیری نسبت به بستر صاف دارد. (Ead and Rajaratnam, 2002) پارامترهای پرش هیدرولیکی را با در نظر گرفتن زبری بستر بدست آوردند. مطالعات خود را بر روی پرش‌هایی با اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند. نتایج نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز برای پرش‌های هیدرولیکی در کف کنگره‌دار در مقایسه با کف صاف کمتر است و در نتیجه طول پرش در این شرایط کمتر از طول پرش در کف صاف تشکیل می‌شود. (Pagliara and Palermo 2015) به بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و زبر با شیب معکوس در محدوده عدد فرود اولیه ۲ تا ۹/۵ و اجزای زبر طبیعی به قطرهای ۶/۲۶، ۱۹/۹۳ و ۳۰/۶۲ میلی‌متر پرداختند. نتایج نشان داد وجود اجزای زبر در بستر، باعث کاهش عمق ثانویه می‌شود که این کاهش با اعمال شیب معکوس در بستر شدت می‌یابد.

(Jam et al. 2015) بررسی‌های خود را در حوضچه آرامش زبر شده به وسیله اجزای دندان‌دار بلوکی و تأثیر آن‌ها بر خصوصیات پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر همراه با بلوک نسبت به بستر صاف بود، به طوری که طول پرش و عمق ثانویه به ترتیب ۵۰-۶۰ درصد و ۱۰-۱۲ درصد کاهش یافت. (Minaei et al. 2016) به بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی پرداختند. آزمایش‌ها درون کانالی با عرض ۰/۶ متر، ارتفاع ۱ متر و طول ۱۲ متر انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط یکسان جریان ورودی آستانه پلکانی در مقایسه با آستانه شیب‌دار در تثبیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه‌ی آرامش تأثیر بیشتری داشته و با افزایش تعداد پله‌های آستانه از ۲ به ۳ طول بیشتری از پرش هیدرولیکی بیرون از حوضچه آرامش خواهد بود. (Asadi et al. 2017) اثر زبری بستر حوضچه آرامش بر مشخصات جریان و پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عمق مزدوج و طول نسبی در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری دارد. ضریب نیروی برشی که عامل اصلی کاهش عمق و طول نسبی پرش است، در هر دو آرایش ۶ درصد بیشتر از بستر صاف محاسبه گردید. (Agha Majidi and Nozari 2020) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر همزمان زبری تیز گوشه و شیب مثبت بر روی طول پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش پرداختند. نتایج نشان داد که زبری تیز گوشه می‌تواند نسبت طول پرش به عمق ثانویه را تا ۳۵/۵ درصد کاهش دهد. برای زبری تیز گوشه با افزایش عدد فرود نسبت عمق‌های مزدوج به طور میانگین ۶/۵ درصد افزایش می‌یابد. برای یک عدد فرود با نصب زبری تیز گوشه نسبت طول پرش به عمق ثانویه به طور میانگین ۱/۲ درصد کاهش می‌یابد. (Ghaderi et al. 2020) به بررسی عددی مشخصات پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق بر روی زبری بستر با اشکال هندسی مختلف پرداختند. نتایج آنان نشان داد که حل عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی پرش آزاد و مستغرق بوده و زبری بستر باعث کاهش حداکثر سرعت نسبی می‌گردد. کاهش نسبت عمق مزدوج (y_2/y_1) برای بستر زبری مثلثی بیشتر از مربع و نیمه بیضی است. نسبت طول پرش برای نسبت $T/I = 0.5$ (ارتفاع زبری I و فاصله زبری)، در بستر زبر حدود ۲۵/۵۲ درصد در مقایسه با بستر صاف کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله بین زبری‌ها طول پرش افزایش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. 2020) به تحلیل آزمایشگاهی رفتار شیب شکن‌های مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد (USBR) پرداختند. نتایج نشان داد که شیب‌شکن مایل گابیونی به ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی‌مانده پایین‌دست در مقایسه

^۱ US Bureau of Reclamation

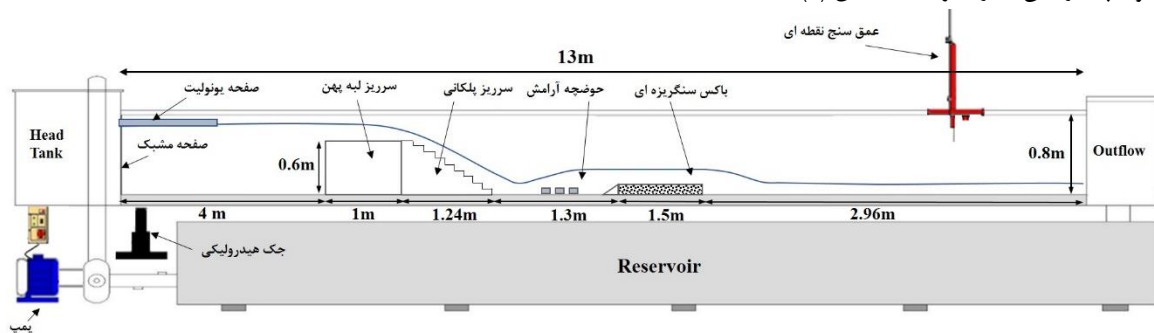
با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار گردد. (Taghinia et al. (2021) به بررسی تأثیر استهلاک انرژی ناشی از جت آب خروجی از کف و انتهای حوضچه آرامش بر طول پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که ایجاد جت در انتهای حوضچه آرامش در مقایسه با دیگر مدل‌ها، بیشترین تأثیر را در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته به طوری که در دبی ماکزیمم و حالت جت چسبیده به سرریز طول پرش را بین ۸۰ تا ۸۸ درصد نسبت به حالت بدون جت کاهش داده است. همچنین استفاده از جت باعث کاهش تراز سطح آب بالادست سرریز شده، به طوری که در دبی ماکزیمم تراز آب بالادست حدود ۵/۷ درصد کاهش یافته است. (Karimi Chahartaghi et al. (2021) تأثیر زاویه دیواره شوت بافل‌دار در میزان استهلاک انرژی جریان و مقدار آبشستگی در پایین دست شوت پرداختند. آنان مشاهده کردند که با افزایش زاویه دیواره شوت، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، مقدار عمق آبشستگی در پایین دست برای تمامی زوایای دیواره افزایش می‌یابد. (Ghaderi et al. (2021) توزیع افقی سرعت جریان و مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق بر روی بستر مثلثی را به کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. نتایج نشان داد با کاهش فاصله زبری‌ها برخی سرعت‌های منفی در بین زبری‌ها اتفاق می‌افتد. منطقه جریان آشفته در داخل پرش هیدرولیکی با بستر صاف در نزدیکی دریچه و نزدیک به سطح آب اتفاق می‌افتد، این درحالی است که در بستر زبر، منطقه آشفته تا انتهای آخرین زبری و در طول پرش هیدرولیکی گسترش یابد.

با آنکه تحقیقات زیادی بر روی حوضچه آرامش صورت گرفته و روش‌های متفاوتی مانند استفاده از بستر زبر در کف حوضچه آرامش، بستر سنگ‌چین و بازدارنده‌های شناور کروی بررسی شده و هرکدام به گونه‌ای باعث کاهش مشخصات طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی شده‌اند. اما تحقیق جامعی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش با توجه به شرایط ورودی جریان عبوری از شوت صاف و پلکانی و تفاوت این دو شوت نسبت به هم و تأثیر ابعاد و آرایش بلوک‌های تعبیه شده در کف حوضچه آرامش انجام نشده است. لذا در این تحقیق از بلوک‌ها با آرایش و ابعاد مختلف در کف حوضچه آرامش در پایین دست شوت صاف و شوت پلکانی استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان استهلاک انرژی، مشخصات پرش هیدرولیکی شامل طول و عمق ثانویه و کنترل بهتر پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش با در نظر گرفتن دو شرایط متفاوت ورودی جریان عبوری از شوت صاف و پلکانی می‌باشد.

مواد و روش

مدل‌های آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها در این پژوهش، از فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه با مقطع مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۱/۲ متر، ارتفاع ۰/۸ متر و با کف فیزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلس استفاده شد. برای تامین دبی جریان، از پمپی با توان ۵۵ لیتر بر ثانیه استفاده گردید. کنترل و تنظیم دبی مورد نظر ورودی به کانال، توسط یک شیر اهرمی نصب شده بر روی لوله رانش انجام می‌شود. آب از منبع ذخیره اصلی موازی کانال به منبع ابتدایی کانال پمپاژ شده و در آنجا جریان قبل از ورود به کانال از داخل یک سری صفحات مشبک عمودی عبور کرده تا تلاطم جریان در مقطع ورودی به کانال کاهش یابد. همچنین برای کاهش نوسانات سطح جریان در ابتدای کانال یک قطعه فوم شناور روی سطح آب قرار داده شد. جریان آب پس از عبور از طول کانال به مخزنی در انتهای کانال تخلیه می‌شود. اندازه‌گیری دبی جریان ورودی کانال توسط دبی‌سنج التراسونیک با دقت $\pm 0.1\%$ لیتر بر ثانیه که متشکل از یک دستگاه اصلی قابل تنظیم و سنسور که بر روی لوله رانش قرار دارد، استفاده گردید. اندازه‌گیری عمق جریان توسط عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر که بر روی ریل شاسی در بالای کانال نصب شده است و امکان حرکت در راستای طولی و عرضی جریان را دارد، انجام شد. اعماق جریان آب در فاصله‌ی ۲ متری از بالادست شوت صاف و پلکانی و بعد از پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش اندازه‌گیری شد (شکل ۱).



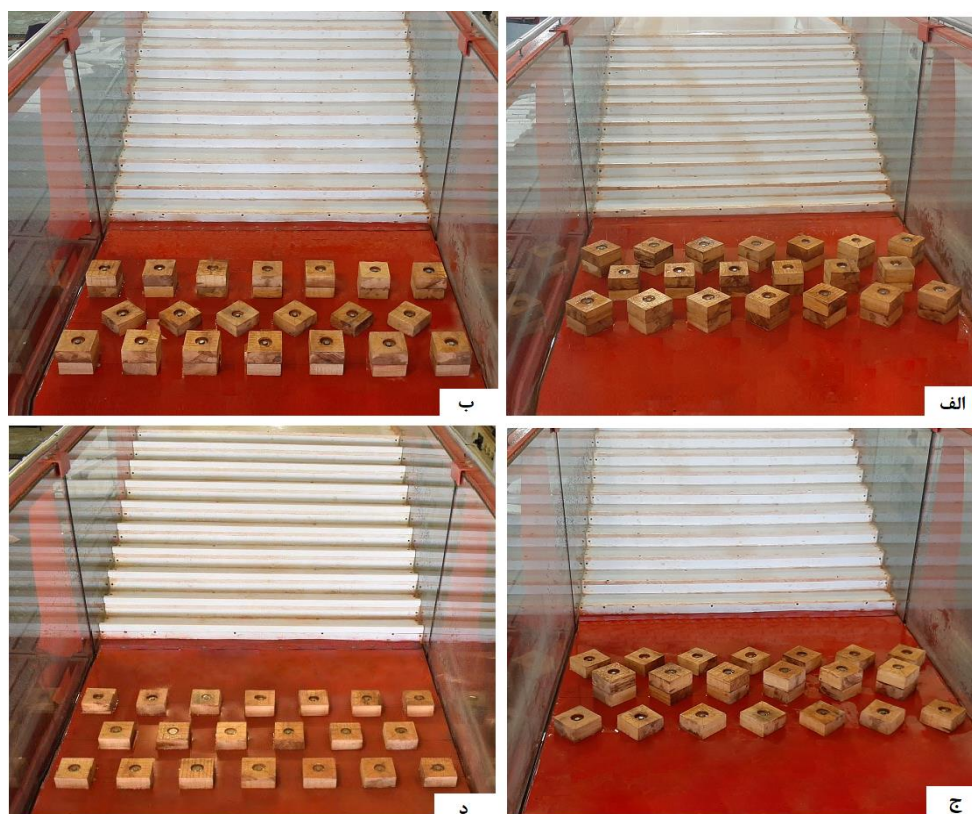
شکل ۱- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر

آزمایش‌ها بر روی مدل حوضچه آرامش تپ سه USBR و برای جریان با عدد فرود ۸ طراحی شد. بدین منظور حوضچه آرامش دارای ۱/۳ متر طول، ۱/۲ متر عرض و با سه ردیف بلوک‌های غیرممتد مکعب مربع و لوزی شکل از جنس چوب در دو ارتفاع ۰/۰۴۵ متر و ۰/۰۹ متر (در ردیف

اول و سوم هفت بلوک و در ردیف دوم شش بلوک با فاصله طولی و عرضی ثابت $0/08$ متر) با آبپایه‌ای مثلثی شکل در انتهای حوضچه آرامش به ارتفاع $0/08$ متر انجام شد. معیار انتخاب ابعاد و فواصل بلوک‌ها و آبپایه انتهایی بر مبنای ابعاد استاندارد حوضچه آرامش تیپ سه USBR بوده است. در بالادست حوضچه آرامش از دو نوع شوت صاف و پلکانی با شیب شوت $26/6$ درجه و متشکل از 10 پله با ارتفاع $0/06$ متر و طول $0/12$ متر ایجاد شد (ارتفاع و شیب هر دو شوت باهم یکسان و به ترتیب $0/6$ متر و $26/6$ درجه می‌باشد). شوت‌های ساخته شده از جنس فوم فشرده (ورق UPVC) با ضخامت $0/15$ متر و حوضچه آرامش از جنس فلز ساخته شدند. بدین منظور آزمایش‌ها در 17 مدل از حوضچه آرامش با آرایش و ابعاد مختلف بلوک‌ها در پایین‌دست شوت پلکانی و یک مدل شوت صاف برای مقایسه عملکرد آن با شوت پلکانی انجام گردید و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. شکل‌های (۲) و (۳) نمایی از مدل شوت‌ها و حوضچه آرامش با نحوه چیدمان بلوک‌های میانی ساخته شده را نشان می‌دهد. مشخصات آرایش بلوک‌های حوضچه آرامش در جدول (۱) ارائه شده است. در مجموع 119 آزمایش پرش هیدرولیکی بر روی حوضچه آرامش در پایین‌دست شوت پلکانی و 7 آزمایش پرش هیدرولیکی بر روی شوت صاف در محدوده عدد فرود اولیه $3/4$ تا $10/9$ انجام گرفت.



شکل ۲- مدل‌های آزمایشگاهی: الف) مدل شوت پلکانی ب) مدل شوت صاف



شکل ۳- نمونه‌ای از بسترهای زیر مورد آزمایش. الف) آرایش ردیف اول و سوم لوزی ارتفاع $0/09$ متر ردیف وسط مربع ارتفاع $0/09$ متر (AD₂S₂D₂). ب) آرایش ردیف اول و سوم لوزی ارتفاع $0/09$ متر ردیف وسط لوزی ارتفاع $0/045$ متر (AS₂D₁S₂). ج) آرایش ردیف اول و سوم لوزی ارتفاع $0/045$ متر ردیف وسط مربع ارتفاع $0/09$ متر (AD₁S₂D₁). د) هر سه ردیف مربع در ارتفاع $0/045$ متر (AS₁₁₁).

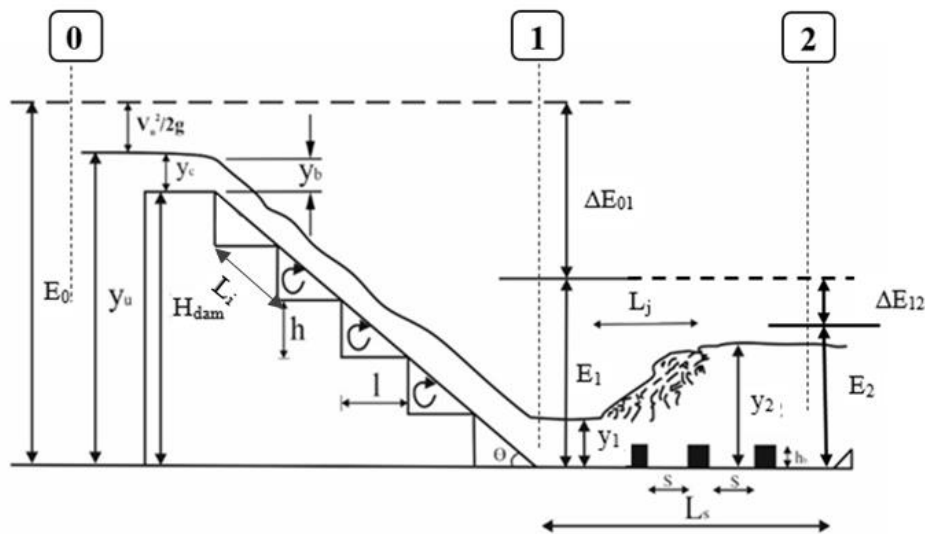
جدول ۱- مشخصات هندسی بلوک‌های قرار گرفته در حوضچه آرامش

بلوک‌های ردیف اول		بلوک‌های ردیف دوم		بلوک‌های ردیف اول		نام مدل	بلوک‌های ردیف سوم		بلوک‌های ردیف دوم		بلوک‌های ردیف اول		نام مدل
ارتفاع (m)	شکل	ارتفاع (m)	شکل	ارتفاع (m)	شکل		ارتفاع (m)	شکل	ارتفاع (m)	شکل	ارتفاع (m)	شکل	
۰/۰۹	مکعب	۰/۰۹	مکعب	۰/۰۹	مکعب	AS ₂₂₂	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۴۵	مکعب	AS ₁₁₁
۰/۰۹	مکعب	۰/۰۹	لوزی	۰/۰۹	مکعب	AS _{2D₂S₂}	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۴۵	مکعب	AS _{1D₁S₁}
۰/۰۹	لوزی	۰/۰۹	مکعب	۰/۰۹	لوزی	AD _{2S₂D₂}	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۴۵	لوزی	AD _{1S₁D₁}
۰/۰۹	لوزی	۰/۰۹	لوزی	۰/۰۹	لوزی	AD ₂₂₂	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۴۵	لوزی	AD ₁₁₁
۰/۰۹	مکعب	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۹	مکعب	AS ₂₁₂	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۹	مکعب	۰/۰۴۵	مکعب	AS ₁₂₁
۰/۰۹	مکعب	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۹	مکعب	AS _{2D₁S₂}	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۹	لوزی	۰/۰۴۵	مکعب	AS _{1D₂S₁}
۰/۰۹	لوزی	۰/۰۴۵	مکعب	۰/۰۹	لوزی	AD _{2S₁D₂}	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۹	مکعب	۰/۰۴۵	لوزی	AD _{1S₂D₁}
۰/۰۹	لوزی	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۹	لوزی	AD ₂₁₂	۰/۰۴۵	لوزی	۰/۰۹	لوزی	۰/۰۴۵	لوزی	AD ₁₂₁

آنالیز ابعادی

پارامترهای مهم و موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی ایجاد شده در پایین دست شوت صاف و پلکانی و در داخل حوضچه آرامش همراه با بلوک‌های میانی به شرح زیر می‌باشد (شکل ۴):

$$f_1(Q, y_u, y_b, y_c, y_1, y_2, H_{dam}, E_0, E_1, E_2, h, l, B, S, \rho, \mu, g, L_j, L_s, h_b, \theta, \sigma, f_e) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۴- نمبرخ طولی حوضچه آرامش در پایین دست شوت پلکانی و معرفی پارامترهای موثر

که در آن: Q دبی جریان، y_u عمق جریان در بالادست شوت‌ها، y_b عمق جریان روی لبه شوت‌ها، y_c عمق جریان بحرانی، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، H_{dam} ارتفاع شوت، E_0 انرژی جریان در بالادست شوت، E_1 انرژی جریان در پنجه شوت، E_2 انرژی جریان در پایین دست حوضچه آرامش، h ارتفاع پله شوت پلکانی، l عرض پله شوت پلکانی، L_j طول پرش هیدرولیکی، L_s طول حوضچه آرامش، h_b ارتفاع بلوک‌ها، θ زاویه شوت سرریز، B عرض کانال، σ کشش سطحی، μ لزوجت، g شتاب گرانش زمین، f_e ضریب زبری شوت و S فاصله بین زبری‌ها می‌باشند. رابطه بدون بعد با استفاده از تئوری پی باکینگهام^۱ بصورت زیر بدست می‌آید:

$$f_2\left(\frac{y_u}{y_1}, \frac{y_b}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{H_{dam}}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{E_0}{y_1}, \frac{E_1}{y_1}, \frac{E_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{h_b}{y_1}, \frac{S}{y_1}, \frac{1}{We}, \theta, Fr_1, Re_u, f_e\right) = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

اگر فرض شود که در آبراهه‌های روباز لزجت سیال به نیروی اینرسی ناچیز می‌باشد و با توجه به اینکه عدد رینولدز در مطالعه حاضر در

محدوده ۲۰۶۶۶ تا ۴۴۰۰۰ بوده و از مقدار ۲۰۰۰ بیشتر است، می‌توان از تأثیر عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Chow, 1959, Daneshfaraz et al., 2021a). همچنین با توجه به اینکه ارتفاع آب بر روی لبه تمامی مدل‌های شوت صاف و پلکانی بیش‌تر از ۵ سانتی متر می‌باشد، از اثرات عدد وبر (W_e) نیز صرف‌نظر شد (Chow, 1959, Daneshfaraz et al., 2021b). پارامترهای هندسی چون عرض و ارتفاع پله شوت پلکانی، عرض کانال، زاویه شوت سرریز و طول حوضچه آرامش ثابت می‌باشند و می‌توان از تأثیر آن‌ها صرف‌نظر کرد. لذا رابطه (۲) به رابطه (۳) خلاصه می‌شود.

$$f_3\left(\frac{y_u}{y_1}, \frac{y_b}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{H_{dam}}{y_1}, \frac{E_0}{y_1}, \frac{E_1}{y_1}, \frac{E_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{h_b}{y_1}, \frac{s}{y_1}, Fr_1, f_e\right) = 0 \quad \text{رابطه ۳}$$

برای کاهش کمیت‌های بدون بعد، با دقت در رابطه (۳) می‌توان پارامترهای بی‌بعد y_b/y_1 و y_u/y_1 را با هم ادغام و از تقسیم این دو پارامتر بی‌بعد برهمدیگر پارامتر بی‌بعد y_u/y_b را استخراج نمود. از ادغام دو پارامتر h_b/s و s/y_1 پارامتر بی‌بعد h_b/s استخراج می‌شود. همچنین از ادغام دو پارامتر E_0/y_1 و E_1/y_1 پارامتر بی‌بعد استهلاک انرژی در مقطع یک $\Delta E_{01}/E_0$ و از ادغام دو پارامتر E_1/y_1 و E_2/y_1 پارامتر بی‌بعد استهلاک انرژی در مقطع دو $\Delta E_{12}/E_1$ بدست می‌آید. و نهایتاً از تقسیم دو پارامتر بی‌بعد H_{dam}/y_1 و y_c/y_1 پارامتر بی‌بعد H_{dam}/y_c حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان پارامترهای بی‌بعد موثر بر استهلاک انرژی نسبی مقطع یک و دو، طول نسبی پرش هیدرولیکی و عمق نسبی پایاب را تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\Delta E_{01}}{E_0}, \frac{\Delta E_{12}}{E_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f_4\left(\frac{h_b}{s}, \frac{y_c}{H_{dam}}, \frac{y_u}{y_b}, Fr_1, f_e\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

نتایج و بحث

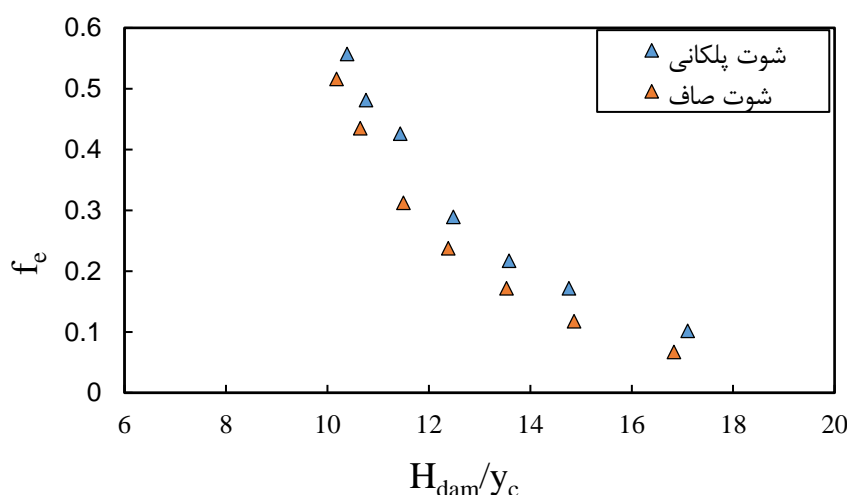
مقاومت در برابر جریان و هوادهی در شوت صاف و پلکانی

مقاومت در برابر جریان عبوری از روی شوت صاف و پلکانی معمولاً به صورت ضریب داری و بسپاخ (f_c) بیان می‌شود. ضریب داری به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ghaderi and Abbasi, 2021):

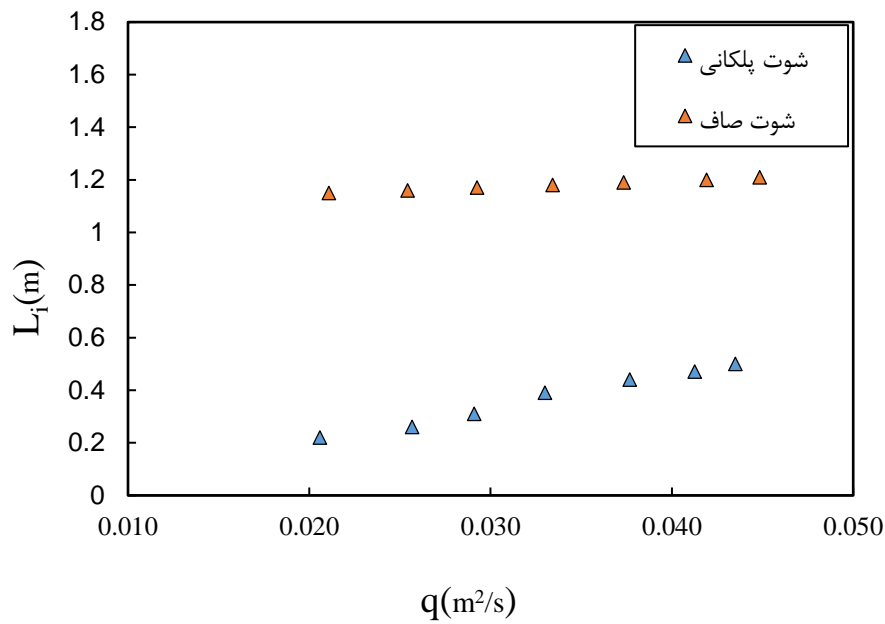
$$f_e = \frac{8 \times g \times q \sin \theta}{V_1^3} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه فوق $V_1 = q/y_1$ سرعت جریان در پنجه شوت، g شتاب گرانشی، q دبی در واحد عرض و θ زاویه شوت صاف و پلکانی می‌باشد. در شکل (۵) تغییرات ضریب داری f_e نسبت به تغییرات بی‌بعد H_{dam}/y_c برای مدل‌های شوت صاف و پلکانی نشان داده شده است. نتایج نشان داد که ضریب داری شوت پلکانی به طور میانگین ۱۵/۶ درصد نسبت به شوت صاف افزایش دارد. در واقع با افزایش ضریب زبری، تلاطم در جریان ایجاد شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد. کاهش سرعت نیز باعث کاهش انرژی مخرب آب می‌گردد.

برای بررسی نقطه شروع هوادهی جریان عبوری از روی مدل‌های شوت صاف و پلکانی، می‌توان از پارامتر L_i (فاصله طولی نقطه شروع هوادهی تا تاج شوت) نسبت به q (دبی در واحد عرض) استفاده کرد. در بین دو مدل شوت صاف و پلکانی، شدت تلاطم جریان در مدل شوت پلکانی بیشتر از شوت صاف مشاهده گردید. علت آن این است که جریان به هنگام عبور از روی پله‌ها دچار شکستگی و تلاطم می‌شود. وجود تلاطم در داخل پله‌ها و زبری مصنوعی که پله‌ها در برخورد با جریان ایجاد می‌کنند، باعث ورود هوای بیشتر به درون جریان شده و علاوه بر ایجاد بی‌ثباتی و ناپایداری در سطح جریان، باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست شوت پلکانی می‌شود (شکل ۶).



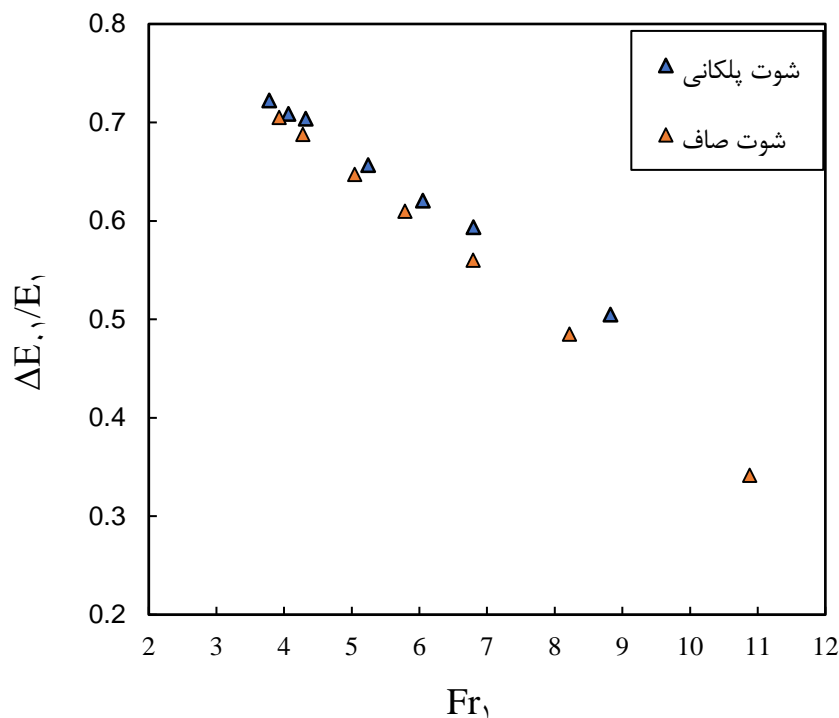
شکل ۵- تغییرات ضریب زبری f_e نسبت به H_{dam}/y_c برای شوت صاف و پلکانی



شکل ۶- نقطه شروع هوادهی بر روی مدل‌های شوت صاف و پلکانی

مقایسه استهلاک انرژی شوت صاف و پلکانی

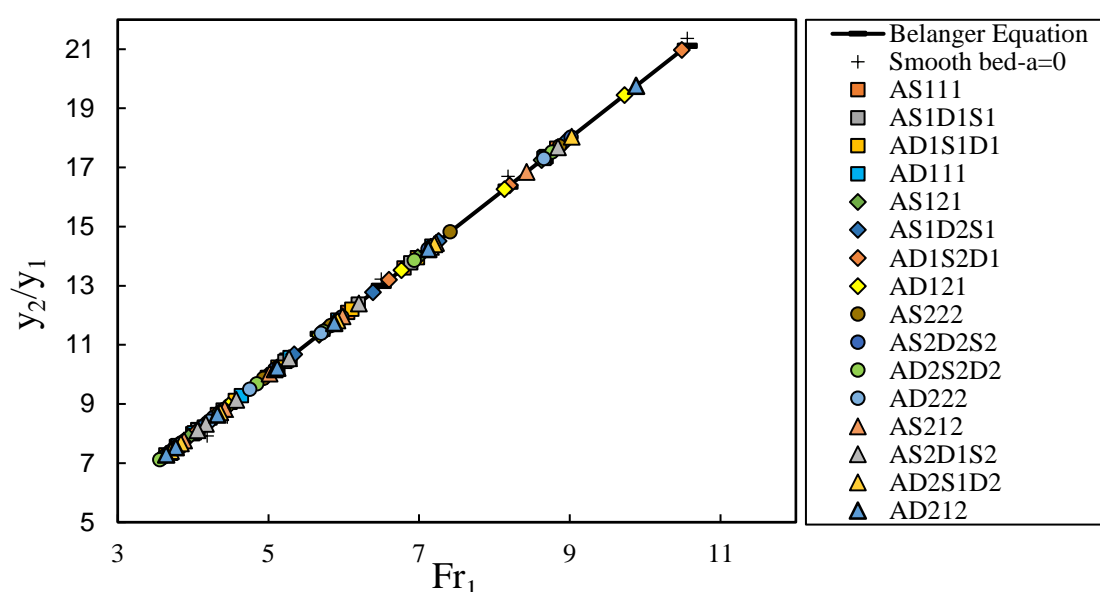
جریان آب به هنگام عبور از شوت پلکانی باعث شکستگی و تلاطم شده و در نتیجه شدت آشفته‌گی، اختلاط آب و هوا و ایجاد جریان‌های گردابه را در طول شوت افزایش می‌دهد. به طوری که جریان به هنگام ورود به حوضچه آرامش همراه با حباب‌های هوا و کف می‌باشد. طبق نتایج مربوط به بخش هوادهی، شوت پلکانی بر شدت هوادهی و اختلاط آب و هوا نقش مهمی دارد. لذا انتظار می‌رود بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از روی شوت پلکانی نیز تأثیرگذار باشد. در این مطالعه میزان استهلاک انرژی در پنجه هر دو شوت محاسبه و در شکل (۷) ارائه شد. نتایج حاصل از مقایسه استهلاک انرژی شوت صاف و پلکانی نشان داد در شوت پلکانی به دلیل آشفته‌گی، اختلاط آب و هوا و ایجاد جریان‌های گردابه بر روی پله‌ها استهلاک انرژی به طور میانگین ۱۰ درصد بیشتر از شوت صاف اتفاق می‌افتد.



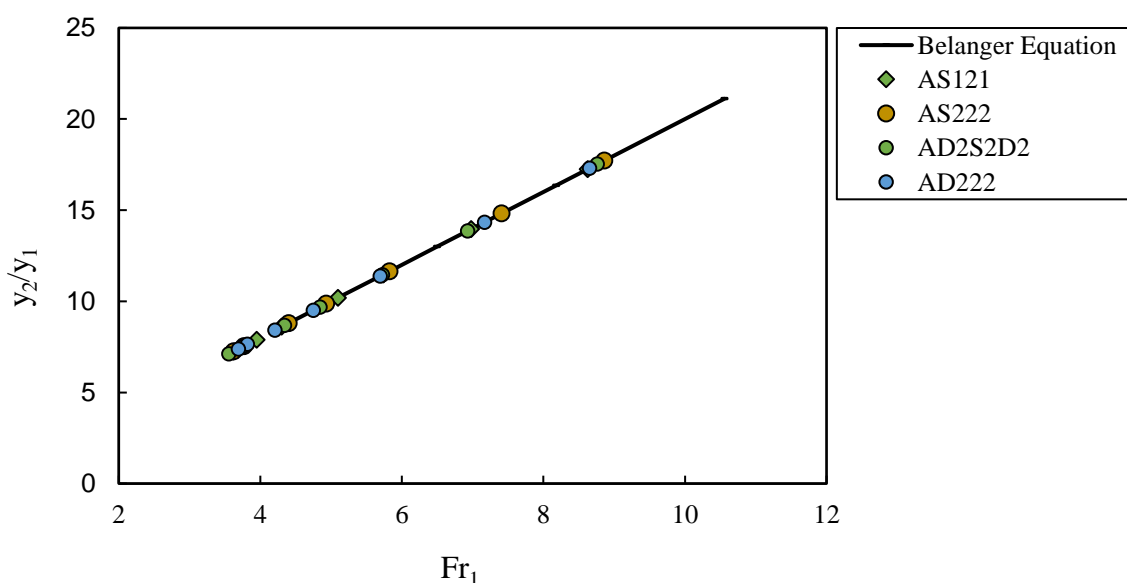
شکل ۷- تغییرات استهلاک انرژی برای شوت صاف و پلکانی

نسبت اعماق مزدوج

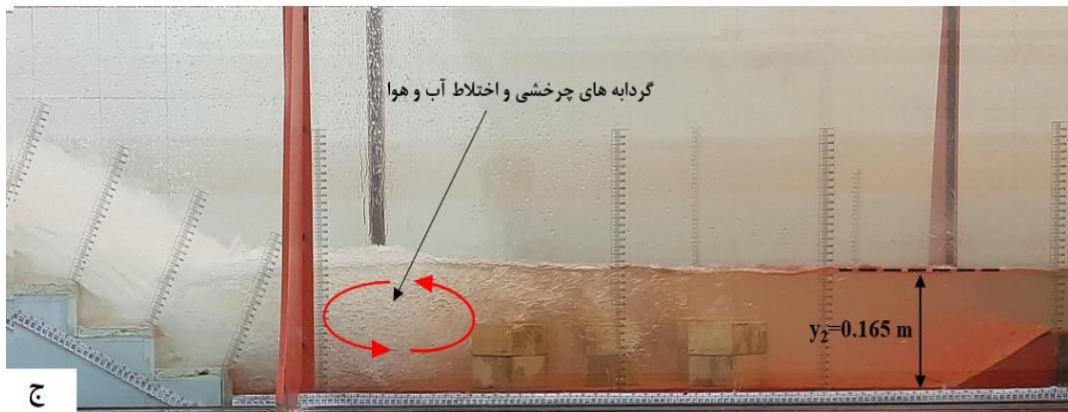
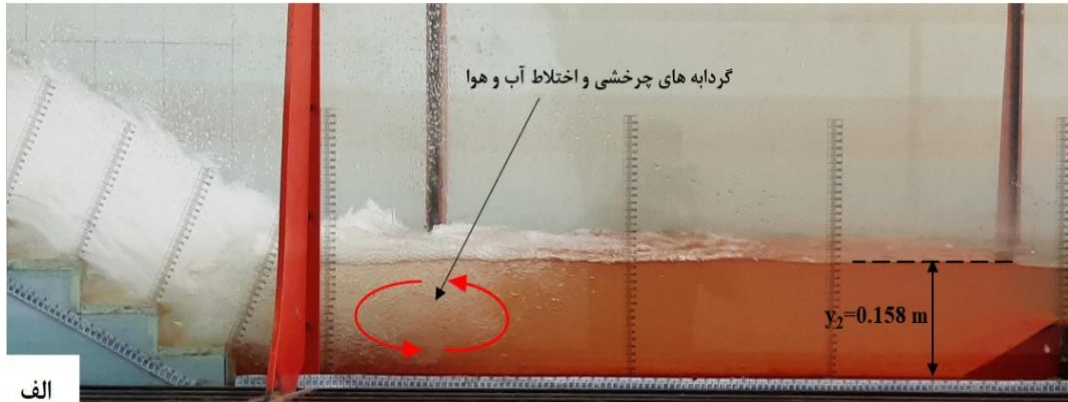
تأثیر بکارگیری بلوک‌ها بر تغییرات نسبت اعماق مزدوج در برابر عدد فرود اولیه برای تمام مدل آزمایش‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد، نسبت اعماق مزدوج در حوضچه آرامش همراه با بلوک نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته که این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش عملکرد گرداب‌ها در فضای بین بلوک‌ها باشد. این روند با افزایش عدد فرود بیشتر می‌گردد. بیشترین و کمترین میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج در بین مدل‌های حوضچه آرامش مربوط به مدل $AD_1S_2D_1$ و $AD_2S_2D_2$ بوده که به ترتیب به‌طور میانگین $۲۲/۱۲$ و $۸/۳۳$ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است. در شکل (۹) برای نمایش بهتر این نتایج چهار مدل از بهترین عملکرد بلوک‌ها در کاهش نسبت اعماق مزدوج نشان داده شده است. با استنباط به این شکل می‌توان گفت، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی با افزایش ارتفاع بلوک‌ها کاهش می‌یابد. با تغییر در آرایش و ابعاد بلوک‌ها عملکرد گرداب تشکیل شده بین آن‌ها تغییر کرده به‌طوری که در شکل (۱۰ ب) نشان داده شده است بلوک‌های میانی باعث ایجاد جریان گردابه و افزایش میزان اختلاط آب و هوا نسبت به بستر صاف در شکل (۱۰ الف) می‌شود. این روند با افزایش ارتفاع بلوک‌ها شدت می‌یابد (شکل ۱۰ ج).



شکل ۸- مقایسه تغییرات نسبت اعماق مزدوج به ازای اعداد فرود اولیه برای تمامی مدل‌ها



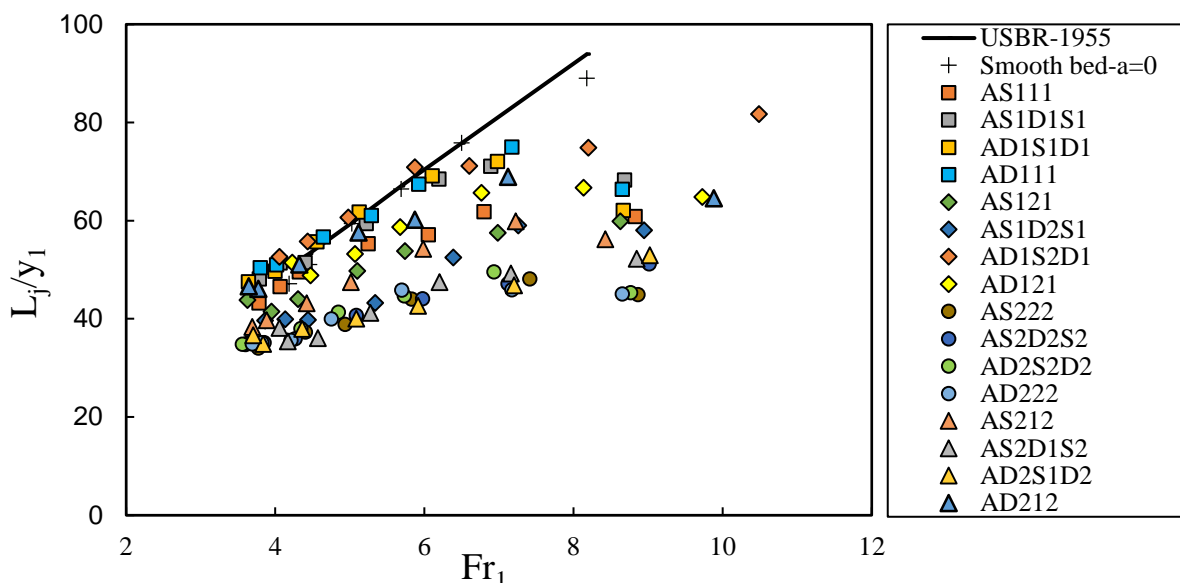
شکل ۹- تغییرات نسبت اعماق مزدوج به ازای اعداد فرود اولیه برای چهار مدل برتر



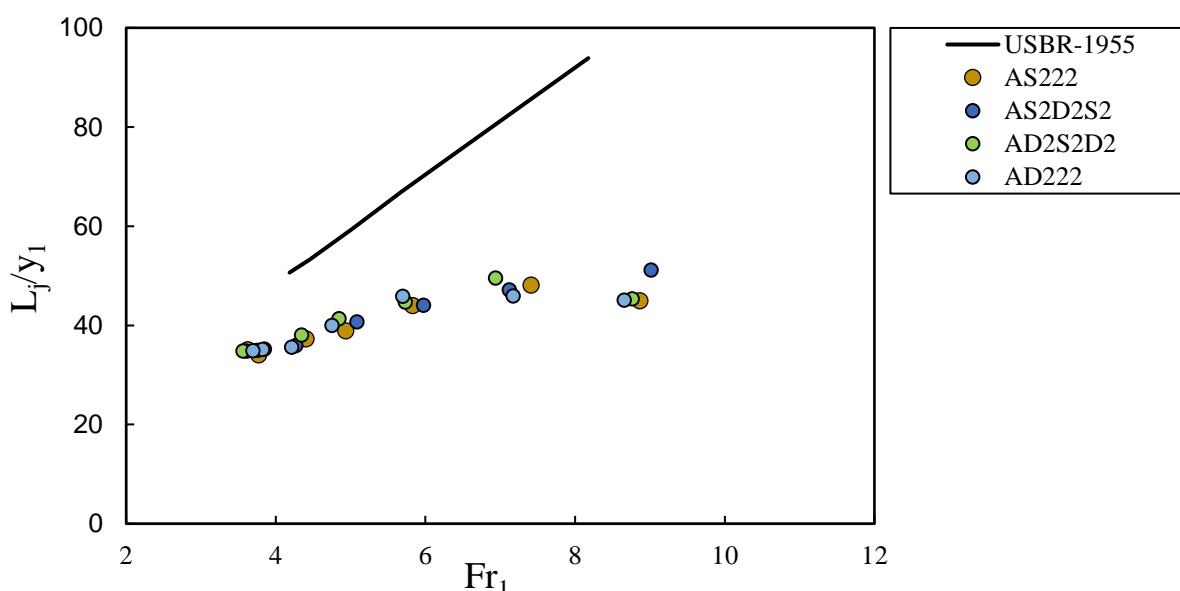
شکل ۱۰- نمایشی از عمق مزدوج مدل‌ها در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه الف) مدل بدون بلوک ب) مدل AS1D1S1 ج) مدل AD2S2D2

طول نسبی پرش هیدرولیکی

در این تحقیق با اجرای آزمایش‌های متعدد، طول پرش هیدرولیکی برای حالت‌های مختلف بررسی و اندازه‌گیری شد. برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش همراه با بلوک و بدون بلوک، مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی‌بعد شدند. شکل (۱۱) تغییرات طول نسبی پرش L_i/y_1 در برابر Fr_1 را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، طول پرش هیدرولیکی بر روی حوضچه آرامش همراه با بلوک نسبت به پرش کلاسیک کاهش دارد و با افزایش عدد فرود میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شود. این کاهش طول به دلیل وجود بلوک‌ها در حوضچه آرامش و در نتیجه افزایش تلاطم بوده که باعث می‌شود پرش در طول کوتاه‌تری نسبت به پرش کلاسیک تشکیل شود. بیشترین و کمترین میزان کاهش طول نسبی پرش در بین مدل‌ها مربوط به مدل AD222 و AD111 بوده که به ترتیب به طور میانگین ۳۶ و ۱۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است (شکل ۱۳). همچنین برای نمایش بهتر این نتایج، در شکل (۱۲) چهار مدل از بهترین عملکرد بلوک‌ها در کاهش طول نسبی پرش نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع بلوک‌ها، طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش بیشتری می‌یابد.



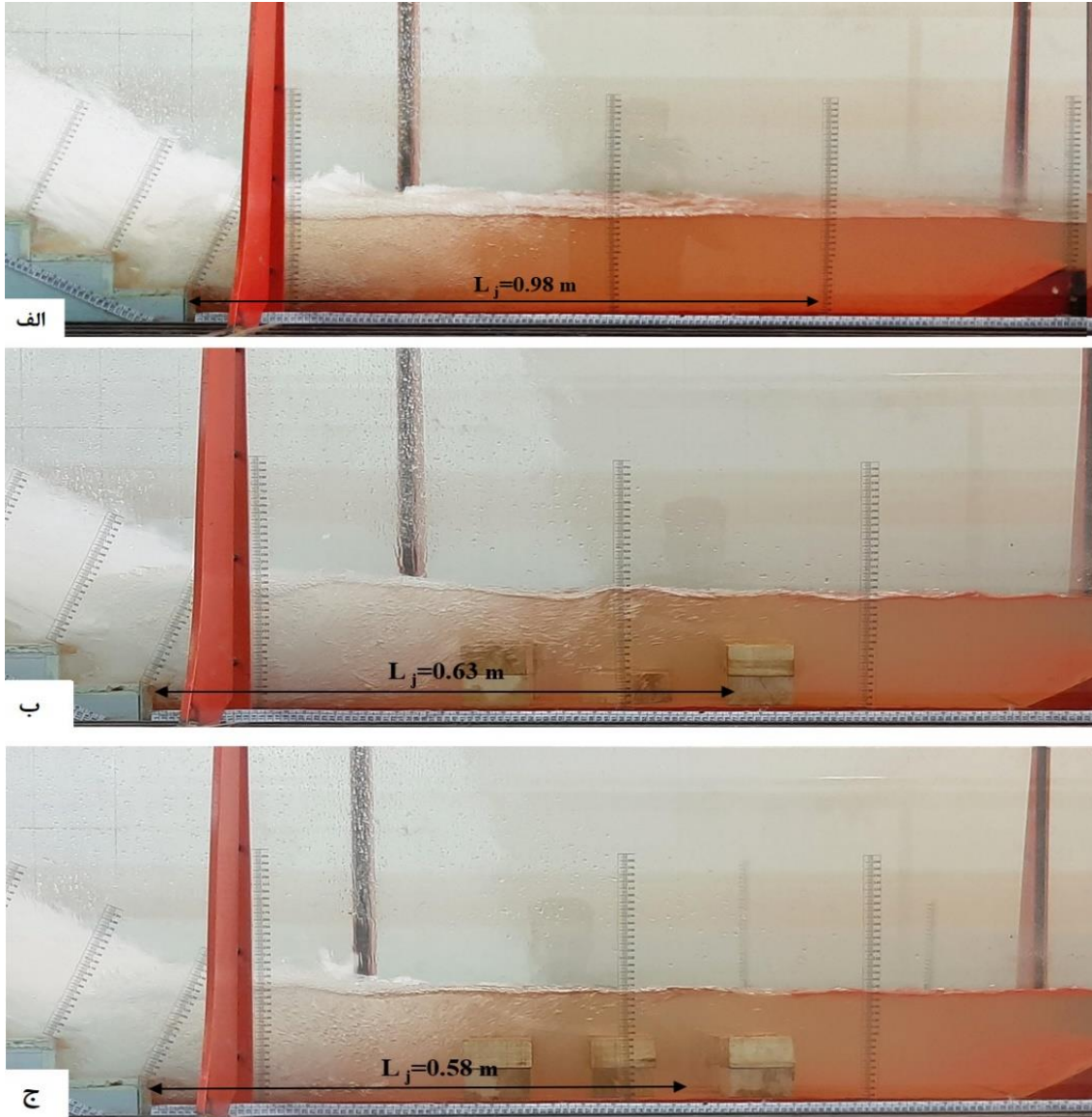
شکل ۱۱- مقایسه تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای تمامی مدل‌ها



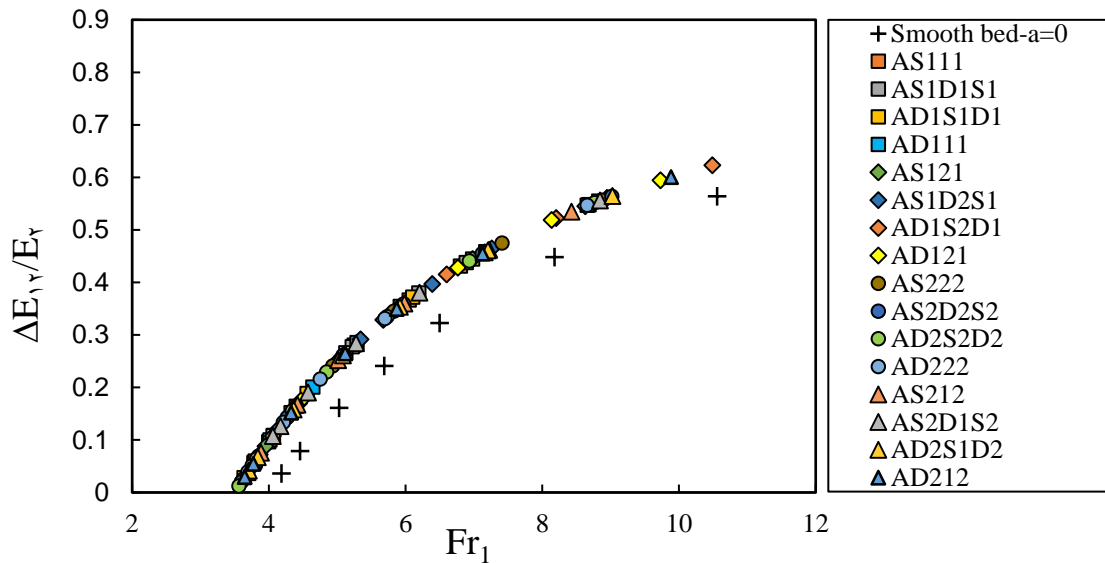
شکل ۱۲- تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای چهار مدل برتر

افت نسبی انرژی

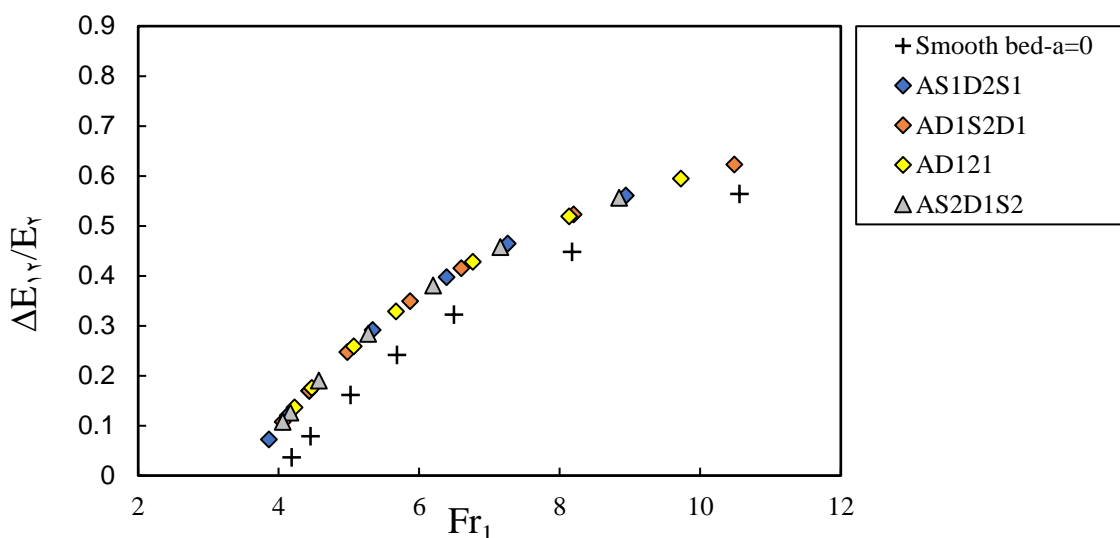
افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی از اختلاف انرژی مخصوص ابتدا و انتهای پرش محاسبه شد. در شکل (۱۴) حالات مختلف تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل Fr_1 برای مدل‌های مختلف حوضچه آرامش رسم شده است. از این شکل مشخص است که مقادیر افت انرژی نسبی در حوضچه آرامش همراه با بلوک، بیشتر از حوضچه صاف (پرش کلاسیک) می‌باشد و با افزایش عدد فرود در پنجه شوت میزان افت انرژی نسبی بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه بلوک‌ها باعث ایجاد تلاطم و گردابه‌های چرخشی در طول پرش هیدرولیکی می‌شوند در نتیجه باعث افزایش افت نسبی انرژی می‌گردد. حداکثر و حداقل افت انرژی نسبی در بین مدل‌ها مربوط به مدل AD_{121} و AS_{121} بوده که به ترتیب به‌طور میانگین ۳۲ و ۱۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است. نتایج نشان می‌دهد بلوک‌ها در حالت لوزی افت انرژی بهتری نسبت به بلوک‌های مکعبی داشته و ارتفاع بلوک‌ها تأثیر ناچیزی در افت انرژی دارند. در شکل (۱۵) چهار مدل از بهترین عملکرد بلوک‌ها در کاهش میزان افت انرژی نسبی نشان داده شده است.



شکل ۱۳- نمایشی از طول پرش هیدرولیکی مدل‌ها در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه الف) مدل بدون بلوک ب) مدل AS₂D₁S₂ ج) مدل AS₂₂₂



شکل ۱۴- مقایسه افت نسبی انرژی به ازای اعداد فرود اولیه برای تمامی مدل‌ها



شکل ۱۵- تغییرات افت نسبی انرژی به ازای اعداد فرود اولیه برای چهار مدل برتر

نتیجه گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی و مقایسه خصوصیات جریان عبوری از شوت صاف و پلکانی شامل تغییرات در ضریب زبری، موقعیت نقطه شروع هوادهی و میزان استهلاک انرژی و همچنین مطالعه اثر تغییر در هندسه و ابعاد بلوک‌های حوضچه آرامش تیپ USBR III بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش و افت انرژی نسبی می‌باشد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که در شوت پلکانی به دلیل وجود تلاطم و پرش جریان از روی پله‌ها، محل نقطه شروع هوادهی در قسمت بالادست شوت پلکانی تشکیل می‌شود و عملکرد خوبی نسبت به شوت صاف دارد. در بررسی و مقایسه میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از مدل‌های شوت صاف و پلکانی نتایج نشان داد به دلیل ایجاد جریان‌های گردابه بر روی پله‌ها استهلاک انرژی در شوت پلکانی به‌طور میانگین ۱۰ درصد بیشتر از شوت صاف اتفاق می‌افتد. همچنین مقایسه ضریب داری مدل شوت پلکانی و شوت صاف نتایج نشان داد که شوت پلکانی به‌طور میانگین ۱۵/۶ درصد نسبت به شوت صاف، ضریب داری بیشتری دارد.

نسبت اعماق مزدوج در حوضچه آرامش همراه با بلوک، حداکثر و حداقل به ترتیب ۲۲/۱۲ و ۸/۳۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش عملکرد گردابه‌ها در فضای بین بلوک‌ها می‌باشد. روند کاهش با افزایش عدد فرود و ارتفاع بلوک‌ها بیشتر می‌گردد. طول پرش هیدرولیکی بر روی حوضچه آرامش همراه با بلوک، حداکثر و حداقل به ترتیب ۳۶ و ۱۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد و با افزایش ارتفاع بلوک‌ها و افزایش عدد فرود میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شود. این کاهش طول به دلیل وجود بلوک‌ها در حوضچه آرامش و در نتیجه افزایش تلاطم می‌باشد.

مقادیر افت انرژی نسبی در حوضچه آرامش همراه با بلوک، حداکثر و حداقل به ترتیب ۲۴ و ۲۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. این روند با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. نتایج نشان داد بلوک‌ها در حالت لوزی افت انرژی بهتری نسبت به بلوک‌های مکعبی داشته و ارتفاع بلوک‌ها تأثیر ناچیزی در افت انرژی دارند. همچنین برای ادامه این مطالعه پیشنهادهایی ارائه می‌گردد مانند اعمال شیب معکوس در بستر حوضچه آرامش و بررسی عددی مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزارهای Flow-3d و Fluent. پیشنهاد می‌گردد همین مطالعه برای جریان دو فازی آب و رسوب نیز انجام شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Agha Majidi, R. and Nozari, A. H. (2020). Laboratory Study of Simultaneous Coarse-gradient Roughness and Positive Slope on Hydraulic Jump Length in Classical Stilling Basin: *Water Engineering*, 7(4), 281-291. (In Farsi)
- Asadi, F. Fazloulou, R. and Emadi, A. (2016). Investigation the characteristics of hydraulic jump in a rough bed condition using a physical model: *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(5), 295-306. (In Farsi)
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics: McGraw-Hill civil engineering series*.
- Dastourani, M. Esmaili, K. and Khodashenas, S.R. (2016). The impact of water rectangular jet angel on the characteristics of hydraulic jump: *Journal Water and Soil Cons*, 23(3), 225-238. (In Persian)
- Daneshfaraz, R. Ghaderi, A. Di Francesco, S. and Khajei, N. (2021). Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop: *Water Supply*, 21(5), 2425-2436.
- Daneshfaraz, R. Bagherzadeh, M. Ghaderi, A. Di Francesco, S. and Asl, M. M. (2021). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss: *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3451-3459.
- Daneshfaraz, R. ASL, M. M. and Bagherzadeh, M. (2021). Experimental Investigation of the Performance of Inclined



- Gabion Drop Equipped with a Horizontal Screen: *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 81-93. (In Farsi)
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds: *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 656-663.
- Eshkou, Z., Dehghani, A.A. and Ahmadi, A. (2018). Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 144 (8), 06018004. (In Farsi)
- Esmaili, K. and Abrishami, J. (2001). Hydraulic Jump over Negative Slopes with Negative Steps: *Journal of Advanced Materials in Engineering*, 19(2), 97-110. (In Farsi)
- Ghaderi, A. Dasineh, M. Aristodemo, F. and Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses: *Journal of Hydroinformatics*, 22(6), 1554-1572.
- Ghaderi, A. Dasineh, M. Aristodemo, F. and Aricò, C. (2021). Numerical simulations of the flow field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses: *Water*, 13(5), 674.
- Ghaderi, A. and Abbasi, S. (2021). Experimental Study of Energy Dissipation over Stepped Spillway with Appendence Elements on the Steps: *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(3), 494-509. (In Farsi)
- Karimi Chahartaghi, M. Nazari, S. and Babarsad, M. S. (2020). Investigating the Effects of the Block Geometries and Sidewall Divergences on the Local Scour Downstream of Baffled Chute Spillways: *Advances in Civil Engineering*. (In Press)
- Dasineh, M., Ghaderi, A., Bagherzadeh, M., Ahmadi, M., and Kuriqi, A. (2021). Prediction of Hydraulic Jumps on a Triangular Bed Roughness Using Numerical Modeling and Soft Computing Methods: *Mathematics*, 9(23), 3135.
- Jam, M. Mardasht, A. and Talebbeydokhti, N. (2014). Evaluation of Hydraulic Jump on Dentate Blocks Stilling Basin: *Journal of Hydraulics*, 9(1), 1-10.
- Minaei, G. A. Ghodsian, M. and Mehraein, M. (2016). Experimental investigation of hydraulic jump in stilling basin with stepped sill: *Modares Civil Engineering journal*, 16(1), 145-155. (In Farsi)
- Najandali, A. Esmaili, K. and Farhoudi, J. (2012). The Effect of Triangular Blocks on the Characteristics of Hydraulic Jump: *Journal Water and Soil*, 26(2), 282 - 289. (In Farsi)
- Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters engineering monograph No. 25: *US Bureau of Reclamation, Denver Colorado*.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2015). Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds: *Journal of Hydraulic Research*, 53(2), 243-252.
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jumps on rough beds. *Trans. Eng. Inst. Canada*, 11(A-2), 1-8.
- Salami Asl, S. Fathi, A. and Ghomeshi, M. (2018). Effect of the Artificial Bed Roughness's Shape on Hydraulic Jump's Characteristics: *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(2), 19-31. (In Farsi)
- Shojaeian, Z. Dalir, A. H. Farsadzadeh, D. and Salmasi, F. (2011). Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Rectangular Sections on Inverse Slope: *Water and Soil Science*, 21(3), 49-60. (In Farsi)
- Taghinia, A. Asghari Pari, S. A. Shafai Bejestan, M. and Ahmadianfar, I. (2021). The effect of energy dissipation due to outflow water jet from floor and end of stilling basin on hydraulic jump: *Journal of Hydraulics*, 16(3). (In Farsi)
- U.S.B.R. 1955. Research Studies on Stilling Basins. Energy Dissipaters and Associated Appurtenances. U.S. Bureau of Reclamation: *Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-399*.