

EXTENDED ABSTRACT

Study of the Characteristics of The Hydraulic Jump in A Stilling Basin with An Adverse Slope and Different Baffle Blocks

Rasoul Daneshfaraz^{a,*}, Amir Ghaderi^b, Shahram Rajabi^c

^a Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

^b Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

^c MSc Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: 16 July 2022; **Reviewed:** 23 January 2023; **Accepted:** 05 April 2023

Keywords:

Stilling basin, USBR III, Adverse bed, Hydraulic jump, Residual energy, Stepped chute.

1. Introduction

Hydraulic jump is a type of rapidly varying flow that occurs when the flow regime transitions from supercritical to subcritical. In this phenomenon, the flow depth increases rapidly over a short distance, accompanied by high turbulence, which results in significant local energy loss and a marked reduction in flow velocity. Hydraulic jumps are commonly utilized in energy dissipators downstream of various hydraulic structures, such as stilling basins, to enhance the dissipation of flow energy. While substantial research has focused on the performance of stilling basins and the control of hydraulic jumps within them, there has been limited comprehensive study on the characteristics of hydraulic jumps within stilling basins under different adverse slopes and with various baffle block configurations. The present study investigates the impact of baffle blocks with varying shapes and dimensions placed on a horizontal bed, along with three adverse slopes of 2.60%, 5.20%, and 7.55%, positioned downstream of a stepped chute. The primary objective of this study is to examine the relative residual energy and the characteristics of the hydraulic jump, including the variations in jump length, sequent depth ratios, and the percentage reductions in both jump length and sequent depth.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The laboratory tests were conducted in a rectangular flume at the hydraulics laboratory of Maragheh University, with dimensions of 1.2m in width, 0.8m in depth, and 12m in length. The flume featured glass walls to enhance flow visibility and reduce friction. Flow was supplied by a pump with a maximum capacity of 55 l/s, which transferred water into the flume's head tank. An ultrasonic flow meter with a precision of ± 1 l/s was installed on the transmission pipe to measure discharge. Two screen plates were used to facilitate flow relaxation, and a floating Styrofoam plate was fixed along the flow direction to minimize water level fluctuations. Flow depth was measured using a pointer gauge with an accuracy of ± 1 mm. Measurements were taken 2 meters upstream of the smooth chute and after the hydraulic jump in the stilling basin. The tests were designed based on the USBR III stilling basin model, with a Froude number of 8. The stilling basin had a length of 1.3m and a width of 1.2m, with three rows of square and lozenge-shaped wooden blocks at two heights (0.045m and 0.09m). The tests were performed on a horizontal bed with three adverse slopes: 2.60%, 5.20%,

and 7.55%. Upstream of the stilling basin, a stepped spillway with a 26.60° slope consisted of 10 steps, each with a step length (l) of 0.06m and a step height (h) of 0.12m. In total, 13 stilling basin models with varying block shapes and dimensions on the horizontal bed, and 36 models with different block configurations on adverse slopes, were tested.

3. Results and discussion

3.1. sequent depth ratios

According to dimensional analysis, the sequent depth ratio is a function of the baffle block height, block arrangement, adverse slope of the bed, and the initial Froude number. Laboratory observations indicate that changes in the arrangement and dimensions of the baffle blocks affect the vortex flow formed between them. The baffle blocks induce vortex flow, enhancing the mixing of water and air compared to the horizontal bed. This effect is further intensified as the height of the baffle blocks increases. The greatest and smallest reductions in sequent depth ratios were observed in the AD2S2D2 and AD1S2D1 models, which showed decreases of 22.12% and 8.33%, respectively, compared to the classical jump. The application of an adverse slope resulted in a significant decrease in sequent depth ratios relative to the horizontal bed. On average, the reduction was 72.25% and 37.44%, compared to the horizontal bed.

3.2. The relative jump length

The length of the hydraulic jump increases with an increase in the Froude number. The effect of altering the arrangement of the baffle blocks becomes particularly evident at higher Froude numbers. Comparison of different block arrangements revealed that the largest reduction in hydraulic jump length occurred with the AS2D2S2 model, while the smallest reduction was observed with the AS1D1S1 model, showing decreases of 35% and 13.24%, respectively, compared to the stilling basin without blocks. The maximum and minimum reductions in hydraulic jump length were observed with the AD2S2D2 model (-7.55%) and the AS1D1S1 model (-2.60%), respectively. On average, the jump length decreased by 42.15% and 8.20% compared to the horizontal bed.

3.3. The relative residual energy

The relative residual energy in the stilling basin with baffle blocks is lower than that in the smooth bed (classical jump) and decreases as the Froude number increases. The maximum and minimum reductions in relative residual energy were observed in the AS121 and AD121 models, with decreases of 10% and 32%, respectively, compared to the classical jump. When compared to the horizontal bed, the relative residual energy in the adverse slopes of -5.20% and -7.55% decreased by 14.60% and 32.78%, respectively.

4. Conclusions

This study investigated the effects of adverse slopes and baffle blocks on the characteristics of hydraulic jumps. Various baffle block arrangements were tested at adverse slopes of 2.60%, 5.20%, and 7.55%, and the results were compared to those of a stilling basin without baffle blocks. The findings showed that the use of baffle blocks in the stilling basin reduced the sequent depth ratio, jump length ratio, and relative residual energy by an average of 22.12%, 35%, and 32%, respectively, compared to the classical jump. Additionally, at an adverse slope of 2.60%, the sequent depth ratio, jump length ratio, and relative residual energy decreased by 72.25%, 8.20%, and 23.52%, respectively; at 5.20%, by 44.50%, 23.33%, and 14.60%; and at 7.55%, by 37.44%, 42.15%, and 32.78%, respectively, compared to the horizontal bed.

Overall, the combination of both adverse slopes and baffle blocks led to reductions in the sequent depth ratio, jump length ratio, and relative residual energy of the hydraulic jump. This approach not only makes the construction of stilling basins more economical but also improves the control of hydraulic jumps.

بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر شیب معکوس و آرایش بلوک‌های میانی متفاوت

رسول دانشفراز^{1*}، امیر قادری²، شهرام رجبی³

¹ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

² استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

³ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

دریافت: 1401/4/25، بازنگری: 1401/11/3، پذیرش: 1402/1/16، نشر آنلاین: 1402/1/16

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با به‌کارگیری بلوک‌های میانی و شیب معکوس است. در این پژوهش اثر تغییر در آرایش بلوک‌های حوضچه آرامش در شیب‌های معکوس 2/6، 5/2، 7/5 درصد و حالت افقی انجام شد و نتایج آن با حوضچه آرامش بدون بلوک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بکارگیری بلوک‌ها در حوضچه آرامش، مقدار متوسط نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش و انرژی نسبی باقی‌مانده را به‌ترتیب به‌طور متوسط 22/1، 35 و 32 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌دهد. همچنین کاهش متوسط نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش و انرژی نسبی باقی‌مانده در شیب معکوس 2/60 درصد به‌ترتیب به‌طور متوسط 72/2، 8/2 و 23/5 درصد، در شیب معکوس 5/2 درصد به‌ترتیب به‌طور متوسط 44/5، 23/3 و 14/6 درصد و در شیب معکوس 7/5 درصد به‌ترتیب به‌طور متوسط 37/4، 42/1 و 32/8 درصد نسبت به بستر افقی کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو عامل شیب معکوس حوضچه آرامش و زبری بستر باعث کاهش طول، نسبت اعماق مزدوج و انرژی نسبی باقی‌مانده پرش هیدرولیکی می‌شوند. این مسئله موجب می‌شود که ساخت حوضچه اقتصادی‌تر شود و کنترل پرش بهتر صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: حوضچه آرامش USBR III، بستر معکوس، پرش هیدرولیکی، افت انرژی باقی‌مانده، شوت پلکانی.

1- مقدمه

ایجاد می‌شود. در اثر پرش هیدرولیکی، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی افزایش یافته و ضمن ایجاد افت انرژی زیاد، سرعت جریان به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به همین دلیل پرش هیدرولیکی برای استهلاک انرژی جریان‌های فوق‌بحرانی با سرعت زیاد در پایین‌دست سازه‌های مولد جریان فوق‌بحرانی نظیر سدها، دریچه‌ها و تنداب‌ها در حوضچه آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات زیادی در خصوص نحوه تشکیل و خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش صورت گرفته است. محققان زیادی با استفاده از انواع زبری‌ها و بلوک‌ها و با ایجاد شیب در حوضچه آرامش سعی در

حوضچه آرامش یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی آب در پایین‌دست سرریزها و سایر منابع ایجادکننده جریان فوق‌بحرانی هستند. این‌گونه سازه‌ها علاوه بر این‌که عامل از بین‌برنده انرژی مخرب آب می‌باشد، وسیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش نیز می‌باشند. پرش هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است که همواره به‌عنوان امری ضروری مورد توجه مهندسی هیدرولیک می‌باشد. این پدیده در نتیجه تبدیل جریان فوق‌بحرانی به زیربحرانی



ترکیب زبری 3تایی با تراکم 10/6 درصد بیشترین مقدار کاهش عمق ثانویه برابر با 29/3 درصد و میزان افزایش استهلاک انرژی نسبت به بستر صاف به طور متوسط 10/9 درصد می باشد.

Banitaba و همکاران (2019) به بررسی اثر زبری دوزنقه‌ای قائم‌الزاویه و شیب معکوس در حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداختند. در این پژوهش خصوصیات پرش هیدرولیکی را روی بسترهایی با زبری قائم‌الزاویه با ارتفاع‌های 0/5، 1، 2 سانتی - متر و شیب‌های صفر، 1/5- درصد و 3- درصد مورد بررسی قرار دادند. آنان مشاهده کردند که نسبت اعماق مزدوج به طور متوسط 18/8 درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش می‌یابد. همچنین افت انرژی نسبت به حالت کلاسیک، 9/6 درصد افزایش می‌یابد. زبری و شیب معکوس بر طول پرش تأثیر داشته و باعث کاهش آن نسبت به پرش کلاسیک شده است.

Agha Majidi و Nozari (2020) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر هم‌زمان زبری تیز گوشه و شیب مثبت بر روی طول پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کلاسیک پرداختند. در این مطالعه آزمایش‌های متعددی برای اعداد فرود جریان ورودی در محدوده 4-12 در فلوم به عرض 35 سانتی متر و با تغییر شیب کف از 0 تا 0/3 درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد که زبری تیز گوشه می‌تواند نسبت طول پرش به عمق ثانویه را تا 35/5 درصد کاهش دهد. برای زبری تیز گوشه با افزایش عدد فرود نسبت عمق‌های مزدوج به طور میانگین 6/5 درصد افزایش می‌یابد. برای یک عدد فرود با نصب زبری تیز گوشه نسبت طول پرش به عمق ثانویه به طور میانگین 1/2 درصد کاهش می‌یابد.

Ghaderi و همکاران (2021) 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 برای بستر زبری مثلثی بیشتر از مربع و نیمه بیضی شکل است. همچنین با افزایش فاصله بین زبری‌ها طول پرش افزایش می‌یابد.

Ghaderi و همکاران (2021) توزیع افقی سرعت جریان و مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق بر روی بستر مثلثی را به کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. نتایج آنان 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 در حالی است که در بستر زبر، منطقه آشفته تا انتهای آخرین زبری و در طول پرش هیدرولیکی گسترش یابد.

این داشتند که عمق ثانویه و طول پرش را کاهش و افت انرژی را افزایش دهند تا ساخت حوضچه آرامش صرفه‌جویی اقتصادی به همراه داشته باشد.

به کارگیری بستر زبر در مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی توسط Rajaratnam انجام شده که نشان داد پرش‌های تشکیل شده در بسترهای زبر کوتاه‌تر از پرش تشکیل شده در بسترهای صاف است (Rajaratnam, 1968).

محققین دیگری چون Eed و Rajaratnam (2002)، Tokyay (2005)، Abbaspour و همکاران (2009) و Badiehzadegan و همکاران (2012)، به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل با ارتفاع نسبی موج t/y_1 (که t ارتفاع موج بستر و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد) مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق پایاب تشکیل شده در بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف کمتر و ضریب تنش برشی در پرش هیدرولیکی در بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

Esmaeili varaki و همکاران (2014) به بررسی آزمایشگاهی و تئوری پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب معکوس و واگرای تدریجی در سطح مقطع مستطیلی پرداختند. آنان مشاهده کردند که با افزایش شیب بستر و افزایش زاویه واگرایی دیواره حوضچه، عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش یافته و افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. در اعداد فرود کمتر، پرش هیدرولیکی آزاد روی شیب معکوس ناپایدار بوده، اما امکان ایجاد پرش هیدرولیکی نسبتاً پایدار در اعداد فرود 4 تا 9 وجود داشت. در هر زاویه واگرایی، افزایش شیب کف معکوس تا 8 درصد باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به ترتیب به میزان 47 درصد و 35 درصد شد و افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش کلاسیک، 20 درصد افزایش یافت.

Goel و Tiwari (2014) تأثیر شکل آستانه انتهایی بر عملکرد حوضچه آرامش را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این تحقیق از یک جت مربعی شکل و چهار شکل مختلف آستانه به صورت دوزنقه‌ای، مربعی، مستطیلی و مثلثی که در پایین دست جت قرار می‌گیرند استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر در شکل آستانه بر روی الگوی جریان عبوری و میزان آبستگي در پایین دست آستانه تأثیر می‌گذارد و آستانه مثلثی شکل بیشترین تأثیر را در افزایش استهلاک انرژی دارد.

Parsamehr و همکاران (2017) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر بستر زبر در کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. آنان آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود 3/4 تا 12/4 در 4 آرایش زبر غیرممتد لوزی شکل انجام دادند. نتایج نشان داد که در آرایش

بخش چهارم نتایج کلی تحقیق به همراه پیشنهاداتی برای مطالعات بعدی ارائه می‌گردد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مدل‌های آزمایشگاهی

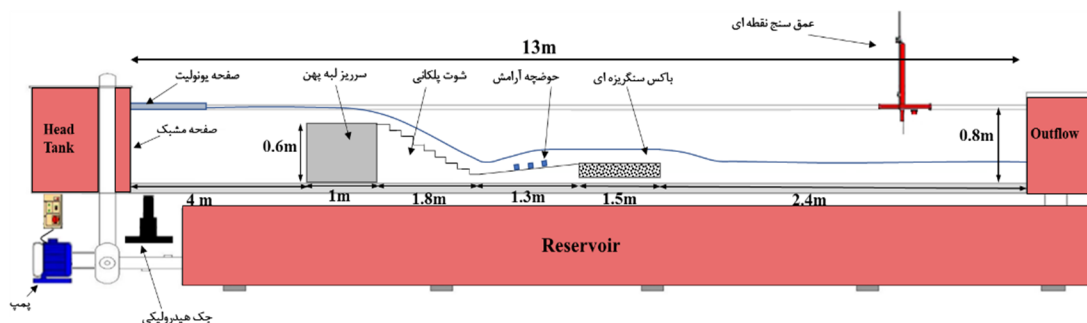
آزمایش‌ها در فلومی با مقطع مستطیلی به طول 12 متر، عرض 1/2 متر، ارتفاع 0/8 متر با دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلس شفاف و کف فلزی در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه مراغه انجام گرفت. جریان مورد نیاز توسط پمپی با توان 55 لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کانال هدایت می‌شود. برای جلوگیری از تلاطم جریان در مقطع ورودی به کانال از چند لایه صفحه مشبک (توری) تعبیه شده در ابتدای فلوم استفاده شد. همچنین برای کاهش نوسانات سطح جریان در ابتدای کانال یک قطعه فوم شناور روی سطح آب قرار داده شد. عمق جریان توسط عمق سنج نقطه‌ای با دقت 0/1 و دبی جریان ورودی کانال توسط دبی‌سنج التراسونیک با دقت 0/01 لیتر بر ثانیه که بر روی لوله ورودی جریان به فلوم نصب شده بود اندازه‌گیری شد. اعماق جریان آب در فاصله دو متری از بالادست شوت پلکانی و بعد از پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش در 6 نقطه عرضی کانال اندازه‌گیری و میانگین اعداد لحاظ شدند (شکل 1).

در این تحقیق به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش هیدرولیکی از یک عدد شوت پلکانی با شیب شوت 26/6 درجه و متشکل از 10 پله با ارتفاع 0/06 متر و طول 0/12 متر استفاده گردید. آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی حوضچه آرامش تیپ سه USBR انجام شد (Daneshfaraz و همکاران، 2024). مدل حوضچه آرامش با طول 1/3 متر و عرض 1/2 متر با آب‌پایه‌ای انتهایی به ارتفاع 0/08 متر و سه ردیف بلوک‌های میانی (در ردیف اول و سوم هفت بلوک و در ردیف دوم شش بلوک با فاصله طولی و عرضی ثابت 0/08 متر) در یک بستر افقی و سه شیب معکوس 2/6، 5/2 و 7/5 درصد انجام شد.

Dastourani و همکاران (2021) به بررسی اثر جت، زبری نیم-استوانه‌ای و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، تغییر زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش عمق ثانویه، طول پرش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر شد. شیب معکوس و زبری باعث کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی گردید. در شیب 2/25 و فاصله d (فاصله بین زبری‌ها) و زاویه جت 3/2 بیشترین تغییرات در مشخصات پرش هیدرولیکی مشاهده گردید.

Saadi و همکاران (2021) به مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب معکوس و پله منفی ابتدایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش شیب معکوس کانال، مقدار نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی به ترتیب 12/6، 13/9 و 16/8 درصد کاهش می‌یابد. در حالی که پله منفی نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را به ترتیب 5/6 و 6/2 درصد افزایش و افت انرژی را 2/6 درصد کاهش داد.

تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص تأثیر زبری و شیب معکوس بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام گرفته است. اما تحقیق جامعی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش با بکارگیری هم‌زمان شیب‌های معکوس مختلف همراه با بلوک‌های میانی انجام نشده است. در پژوهش حاضر اثر توأمان بلوک‌ها با ابعاد و آرایش‌های مختلف در شیب‌های معکوس 2/6، 5/2 و 7/5 درصد و یک شیب افقی در پایین دست شوت پلکانی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان انرژی نسبی باقی‌مانده، مشخصات پرش هیدرولیکی شامل طول نسبی پرش، درصد کاهش طول پرش، نسبت اعماق مزدوج و درصد کاهش عمق ثانویه می‌باشد. روش تحقیق و موضوعات مورد بررسی در این مقاله شامل بخش اول مقدمه و بررسی مطالعات پیشین در رابطه با زبری کف حوضچه آرامش و شیب معکوس می‌باشد. در بخش دوم مدل‌های آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده، چگونگی احداث مدل‌ها و روش انجام بیان می‌شود. بخش سوم به تحلیل پارامترهای اندازه‌گیری شده پرداخته و نتایج مورد بحث قرار می‌گیرند. در نهایت در



شکل 1- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر

جریان غیرریزشی بر روی سرریز پلکانی ارائه شده است. نوع رژیم جریان ایجاد شده بر روی مدل شوت پلکانی تحقیق حاضر در جدول (1) نشان داده شده است.

$$\frac{y_c}{h} \geq 0.8, 0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9 \quad (1)$$

که در آن $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ عمق بحرانی جریان (Sadeghfam و همکاران، 2014)، h و l به ترتیب ارتفاع و عرض پله می‌باشند. مشخصات آرایش بلوک‌های حوضچه آرامش در جدول (2) مشاهده می‌شود.

بلوک‌های استفاده شده در این آزمایش به صورت غیرممتد و به شکل مکعب و لوزی از جنس چوب در دو ارتفاع 0/045 و 0/09 متر در داخل حوضچه آرامش نصب شد. معیار انتخاب ابعاد و فواصل بلوک‌ها و آبپایه انتهایی بر مبنای ابعاد استاندارد حوضچه آرامش تیپ سه USBR و برای جریان با عدد فرود 8 بوده است (Ghaderi و Abbasi، 2022؛ Daneshfaraz و همکاران، 2023). بدین منظور آزمایش‌ها در 13 مدل از حوضچه آرامش با ابعاد و آرایش‌های مختلف بلوک‌ها در بستر افقی و 36 مدل از حوضچه آرامش با ابعاد و آرایش مختلف بلوک‌ها در شیب‌های معکوس مختلف انجام گردید و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. باتوجه به رابطه (1)، که یک رابطه تجربی توسط Rajaratnam (1990) برای تشخیص رژیم

جدول 1- مشخصات هیدرولیکی و نوع رژیم جریان ایجاد شده روی شوت پلکانی تحقیق حاضر

نوع رژیم جریان	y_c/h	h/l	طول پله (متر)	ارتفاع پله (متر)	عمق بحرانی (متر)	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)
ریزشی	0/59	0/5	0/12	0/06	0/035	0/025
ریزشی	0/66	0/5	0/12	0/06	0/04	0/030
ریزشی	0/74	0/5	0/12	0/06	0/044	0/035
انتقالی	0/81	0/5	0/12	0/06	0/048	0/040
غیرریزشی	0/87	0/5	0/12	0/06	0/052	0/045
غیرریزشی	0/94	0/5	0/12	0/06	0/056	0/050
غیرریزشی	0/98	0/5	0/12	0/06	0/058	0/053

جدول 2- مشخصات هندسی بلوک‌های قرار گرفته روی حوضچه آرامش

نام مدل						مشخصات	
AD ₁₂₁	AD _{1S2D1}	AS _{1D2S1}	AS ₁₂₁	AD _{1S1D1}	AS _{1D1S1}	شکل	بلوک‌های ردیف اول
لوزی 0/045	لوزی 0/045	مکعب 0/045	مکعب 0/045	لوزی 0/045	مکعب 0/045	ارتفاع (m)	
لوزی 0/09	مکعب 0/09	لوزی 0/09	مکعب 0/09	مکعب 0/045	لوزی 0/045	شکل	بلوک‌های ردیف دوم
						ارتفاع (m)	
لوزی 0/045	لوزی 0/045	مکعب 0/045	مکعب 0/045	لوزی 0/045	مکعب 0/045	شکل	بلوک‌های ردیف سوم
						ارتفاع (m)	
نام مدل						مشخصات	
AD ₂₁₂	AD _{2S1D2}	AS _{2D1S2}	AS ₂₁₂	AD _{2S2D2}	AS _{2D2S2}	شکل	بلوک‌های ردیف اول
لوزی 0/09	لوزی 0/09	مکعب 0/09	مکعب 0/09	لوزی 0/09	مکعب 0/09	ارتفاع (m)	
لوزی 0/045	مکعب 0/045	لوزی 0/045	مکعب 0/045	مکعب 0/09	لوزی 0/09	شکل	بلوک‌های ردیف دوم
						ارتفاع (m)	
لوزی 0/09	لوزی 0/09	مکعب 0/09	مکعب 0/09	لوزی 0/09	مکعب 0/09	شکل	بلوک‌های ردیف سوم
						ارتفاع (m)	

با توجه به این که پارامترهای هندسی چون عرض کانال، زاویه شوت، عرض و ارتفاع پله شوت پلکانی، فاصله بین بلوک‌ها ثابت می‌باشند، بنابراین می‌توان از تأثیر آن‌ها صرف‌نظر کرد. عدد رینولدز در این مطالعه در محدوده ما بین 20666 تا 44000 بوده و از مقدار 2000 بالاتر است، لذا جریان متلاطم بوده و می‌توان از تأثیر عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Rajaratnam, 1967; Daneshfaraz و همکاران، 2023).

همچنین با توجه به این که ارتفاع آب بر روی لبه تمامی مدل‌های شوت پلکانی بیش‌تر از 5 سانتی‌متر می‌باشد، از اثرات عدد و بر (We) نیز صرف‌نظر شد (Daneshfaraz و همکاران، 2021; Chow, 1959). در نهایت برای کاهش کمیت‌های بدون بعد، می‌توان پارامترهای بی‌بعد y_u/y_1 و y_b/y_1 را با هم ادغام و از تقسیم این دو پارامتر بی‌بعد y_u/y_b را استخراج نمود. از ادغام دو پارامتر h_b/y_1 و L_s/y_1 پارامتر بی‌بعد L_s/h_b حاصل می‌شود.

همچنین از ادغام دو پارامتر E_1/y_1 و E_2/y_1 پارامتر بی‌بعد انرژی نسبی باقی‌مانده E_2/E_1 به‌دست می‌آید. و نهایتاً از تقسیم دو پارامتر بی‌بعد y_c/y_1 و H_{dam}/y_1 پارامتر بی‌بعد y_c/H_{dam} حاصل می‌شود. بنابراین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر انرژی نسبی باقی‌مانده، طول نسبی پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق مزدوج را تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\Delta E_{12}}{E_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f_4\left(\frac{L_s}{h_b}, \frac{y_c}{H_{dam}}, \frac{y_u}{y_b}, \phi, Fr_1\right) \quad (4)$$

3- نتایج و بحث

3-1- نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی

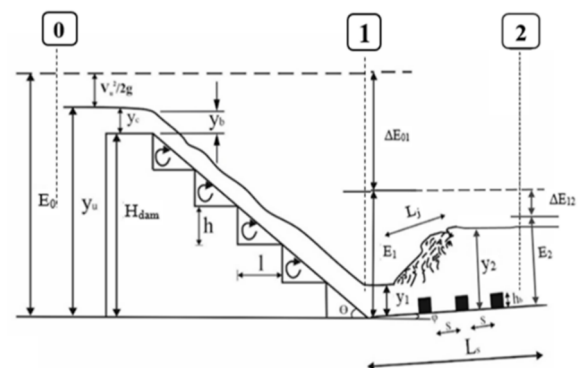
با توجه به آنالیز ابعادی، نسبت اعماق مزدوج تابعی از ارتفاع، آرایش بلوک‌های حوضچه آرامش، شیب معکوس بستر و عدد فرود اولیه بستگی دارد. در شکل (3-الف) تغییرات y_2/y_1 در برابر Fr_1 برای آرایش‌های مختلف بلوک‌های میانی حوضچه آرامش ارائه شده است. مطابق شکل مشخص است که نتایج آرایش‌های مختلف بلوک‌ها با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. از میان تمامی مدل‌های آزمایشی، بیشترین و کمترین میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج مربوط به مدل $AD_1S_2D_1$ و $AD_2S_2D_2$ بوده که به‌ترتیب به‌طور میانگین 22/1 و 8/3 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است. براساس مشاهدات آزمایشگاهی، با تغییر در آرایش و ابعاد بلوک‌ها عملکرد گرداب تشکیل شده بین آن‌ها تغییر کرده به‌طوری که بلوک‌های میانی باعث ایجاد جریان گردابه و افزایش میزان اختلاط آب و هوا نسبت به بستر صاف می‌شود. این روند با افزایش ارتفاع بلوک‌ها شدت می‌یابد.

در مجموع 343 آزمایش پرش هیدرولیکی بر روی حوضچه آرامش با ابعاد و آرایش مختلف بلوک‌ها و شیب‌های مختلف در پایین‌دست شوت پلکانی در محدوده عدد فرود اولیه 1/7 تا 11 انجام گرفت.

2-2- آنالیز ابعادی

با بررسی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی جریان عبوری از شوت پلکانی و حوضچه آرامش مطابق شکل (2)، پارامترهای مهم و مؤثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی تشکیل شده در پایین‌دست شوت پلکانی به‌صورت رابطه (2) معرفی شد (Daneshfaraz و همکاران، 2024):

$$f_1(Q, y_u, y_b, y_c, y_1, y_2, H_{dam}, E_1, E_2, h, l, B, S, \rho, \mu, g, L_j, L_s, h_b, \theta, \phi, \sigma) = 0 \quad (2)$$



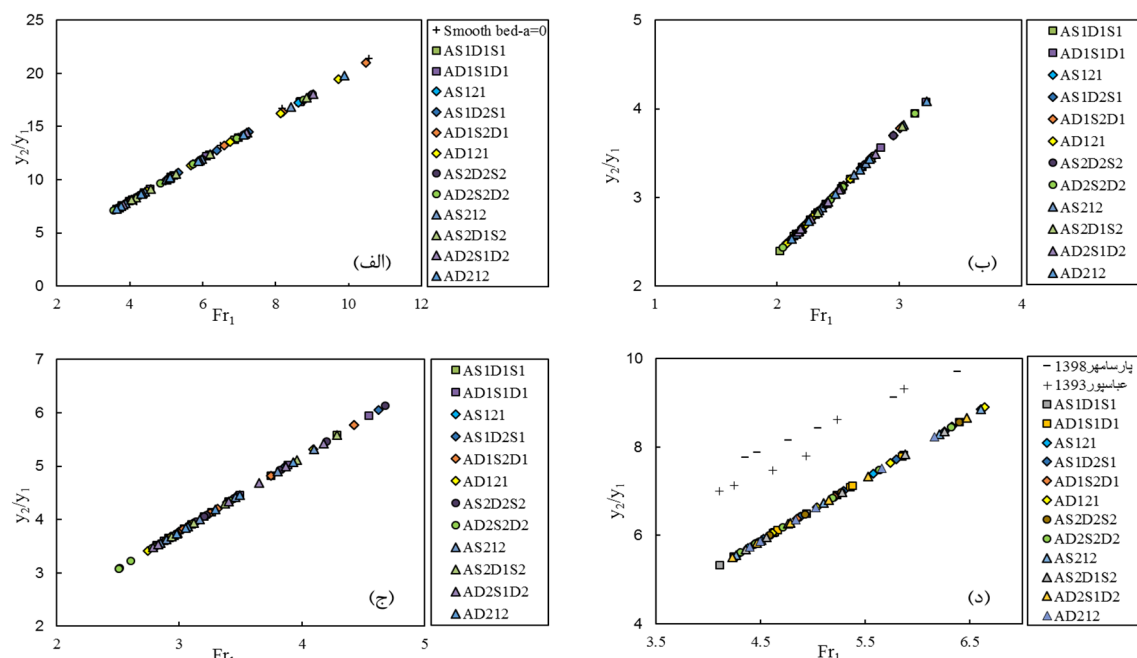
شکل 2- حوضچه آرامش در پایین دست شوت پلکانی

در این رابطه Q دبی جریان، y_u عمق جریان در بالادست شوت، y_b عمق جریان روی لبه شوت، y_c عمق جریان بحرانی، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، H_{dam} ارتفاع شوت، E_1 انرژی جریان در پایین‌دست شوت (پنجه)، E_2 انرژی جریان در پایین‌دست 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، B عرض کانال، σ کشش سطحی، μ لزوجت، g شتاب گرانش زمین و S فاصله بین زیری‌ها می‌باشند. رابطه بدون بعد با استفاده از تئوری پی باکینگهام به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

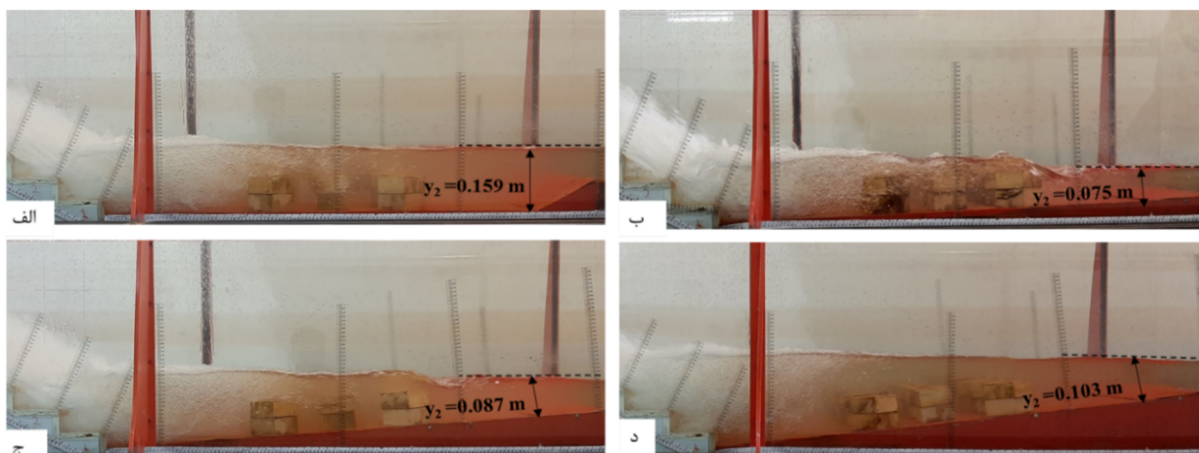
$$f_2\left(\frac{y_u}{y_1}, \frac{y_b}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{H_{dam}}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{E_1}{y_1}, \frac{E_2}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{h_b}{y_1}, \frac{S}{y_1}, \frac{1}{We}, \phi, \theta, Fr_1, Re_u\right) = 0 \quad (3)$$

تمامی مدل‌های آزمایشی، بیشترین و کمترین میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ در شیب $2/6\%$ و $AS_1D_2S_1$ در شیب $7/5\%$ بوده که به ترتیب به طور میانگین $72/2$ و $37/4$ درصد نسبت به شیب صفر کاهش داشته است. این روند با افزایش عدد فرود و شیب معکوس بیشتر می‌گردد. از آنجایی که در شیب معکوس، مؤلفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جریان بوده، عاملی در کوتاه کردن طول پرش و به طبع آن کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌باشد و لذا پرش در فاصله کوتاه‌تر و با افت انرژی بیشتر شکل می‌گیرد (شکل (4)).

در شکل‌های (3-ب)، (3-ج) و (3-د) تغییرات y_2/y_1 در مقابل Fr_1 در آرایش‌های مختلف بلوک‌های میانی بر روی شیب‌های $2/6\%$ ، $5/2\%$ و $7/5\%$ حوضچه آرامش نشان داده شده است. مطابق نمودارهای ارائه شده مقایسه نتایج تأثیر آرایش بلوک‌ها در شیب‌های معکوس مختلف با نتایج شیب صفر نشان می‌دهد که با اعمال شیب معکوس نسبت اعماق مزدوج کاهش چشمگیری نسبت به شیب صفر پیدا می‌کند. همچنین تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شیب $2/6\%$ بیشترین اثر را در کاهش نسبت اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی، در مقایسه با سایر شیب‌ها دارد. از میان



شکل 3- تغییرات نسبت اعماق مزدوج به ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه آرامش همراه با بلوک در شیب‌های مختلف: (الف) شیب صفر، (ب) شیب $2/6\%$ ، (ج) شیب $5/2\%$ ، (د) شیب $7/5\%$



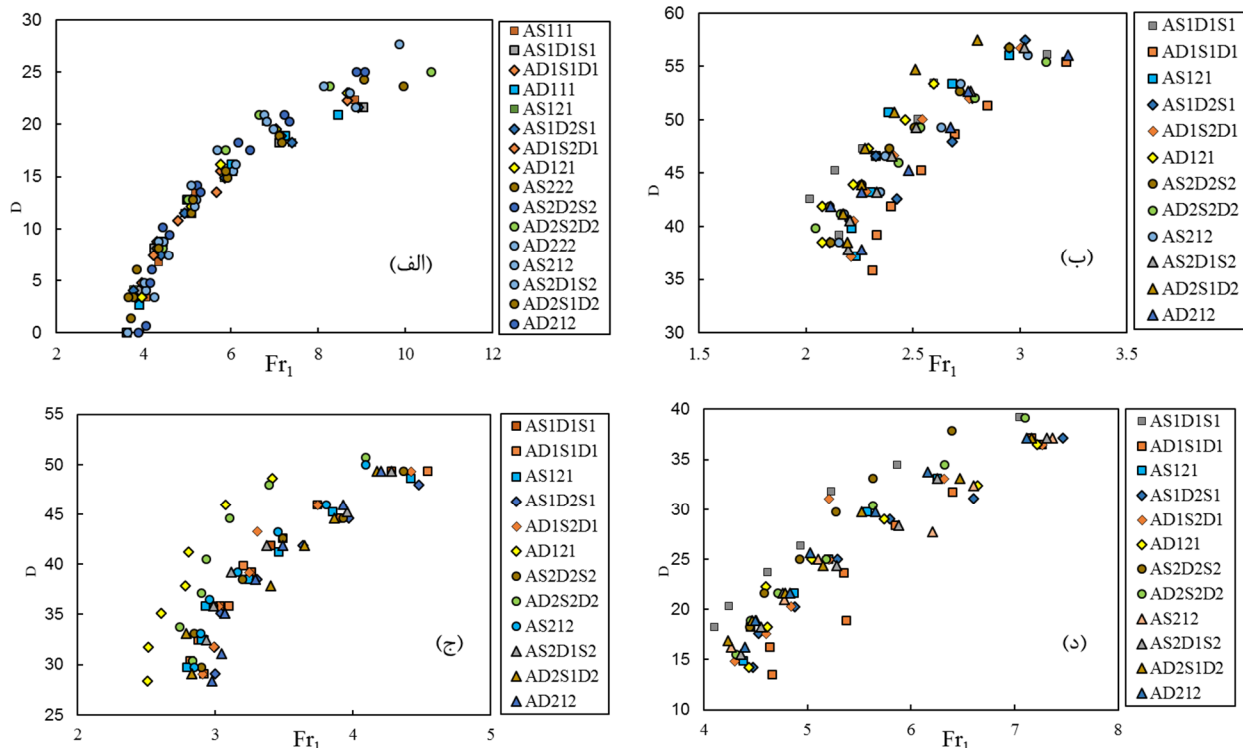
شکل 4- نمایی از عمق مزدوج مدل $AD_2S_2D_2$ بر روی چهار شیب متفاوت در دبی 35 لیتر بر ثانیه: (الف) شیب صفر، (ب) شیب $2/60\%$ ، (ج) شیب $5/20\%$ ، (د) شیب $7/55\%$

3-2- درصد کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

به منظور بررسی درصد کاهش عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر نسبت به پرش کلاسیک در شرایط هیدرولیکی یکسان، پارامتر کاهش عمق ثانویه پرش (D) به صورت رابطه زیر محاسبه شده است:

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \times 100 \quad (4)$$

که در رابطه فوق y_2^* بیانگر عمق ثانویه پرش کلاسیک و y_2 بیانگر عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در پایاب یکسان می باشد. بزرگتر شدن مؤلفه D که توسط Ead و Rajaratnam ارائه گردید، نشانگر افزایش هدررفت انرژی در پرش هیدرولیکی می باشد (Rajaratnam و Ead، 2002). در شکل (5-الف) تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه به ازای عدد فرود اولیه نشان داده شده است.



شکل 5- تغییرات درصد کاهش عمق ثانویه به ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه آramش همراه با بلوک در شیب های مختلف:

الف) شیب صفر، ب) شیب 2/6-، ج) شیب 5/2-، د) شیب 7/5- %

نسبت به بستر صاف (پرش کلاسیک) کاهش داشته است. در شیب معکوس 5/20- درصد، میزان کاهش نسبی عمق ثانویه نسب به پرش کلاسیک در بیشترین و کمترین حالت خود مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ و $AS_1D_2S_1$ می باشد که به ترتیب به طور متوسط 41/3 و 37/3 درصد کاهش می یابد. همچنین در شیب معکوس 7/5- درصد بیشترین و کمترین کاهش مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ و $AD_1S_1D_1$ می باشد که به ترتیب به طور میانگین 33/2 و 24/9 درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش داشته است.

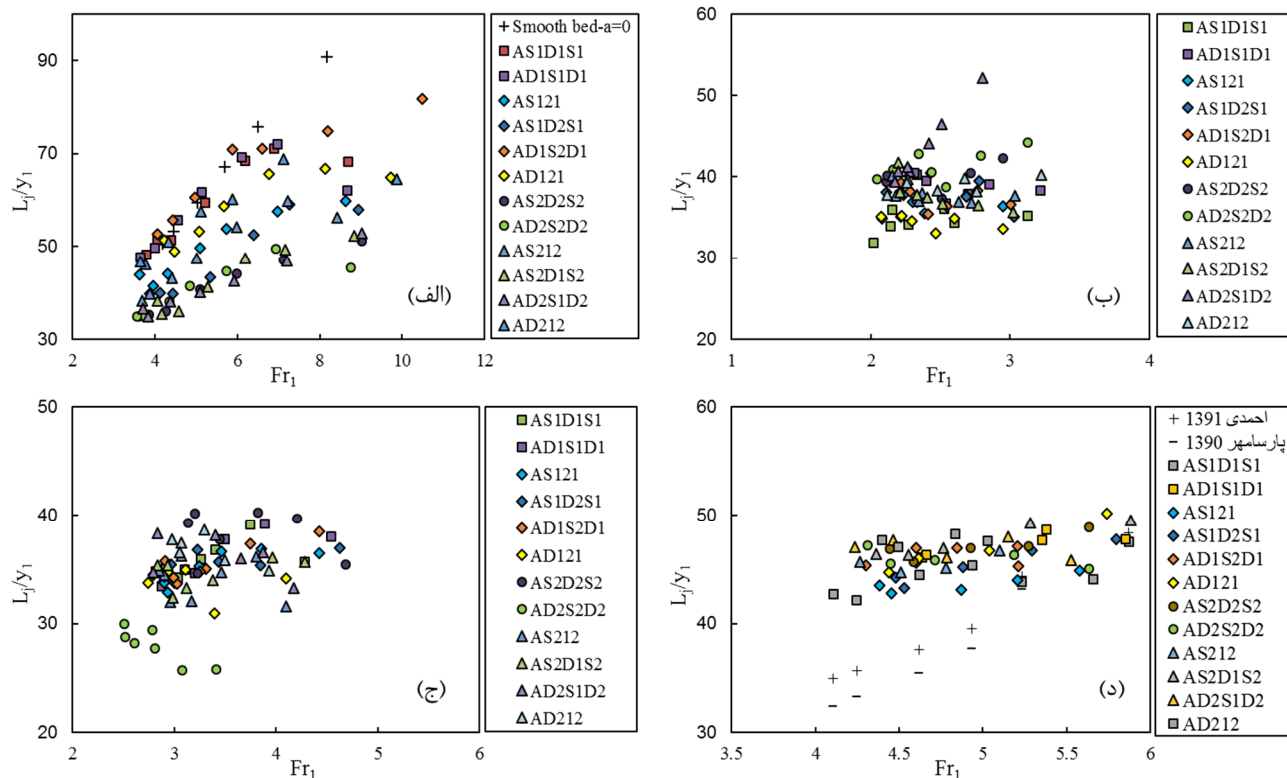
3-3- طول نسبی پرش

تغییرات طول نسبی پرش با تغییرات زبری کف در روی شیب افقی در شکل (6-الف) ترسیم شده است. با بررسی این شکل

مطابق شکل مقایسه نتایج درصد کاهش عمق ثانویه در بین مدل ها نشان می دهد مدل $AD_2S_2D_2$ بیشترین تأثیر ($D=15/36$) و مدل $AS_1D_1S_1$ کمترین تأثیر ($D=10/95$) را در کاهش عمق ثانویه دارد. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع بلوک ها در یک هندسه ثابت، درصد کاهش عمق ثانویه 7/40 درصد افزایش می یابد. در شکل های (5-ب)، (5-ج) و (5-د) تغییرات مقادیر کاهش عمق ثانویه (D) به ازای اعداد فرود اولیه برای شیب های معکوس 2/6-، 5/2- و 7/5- نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد با اعمال شیب معکوس، درصد کاهش عمق ثانویه پرش افزایش می یابد. در شیب معکوس 2/6- درصد، بیشترین و کمترین میزان کاهش نسبی عمق ثانویه در بین مدل های مورد بررسی مربوط به مدل $AD_2S_1D_2$ و $AD_1S_1D_1$ می باشد که به ترتیب به طور متوسط 50/2 و 44/6 درصد

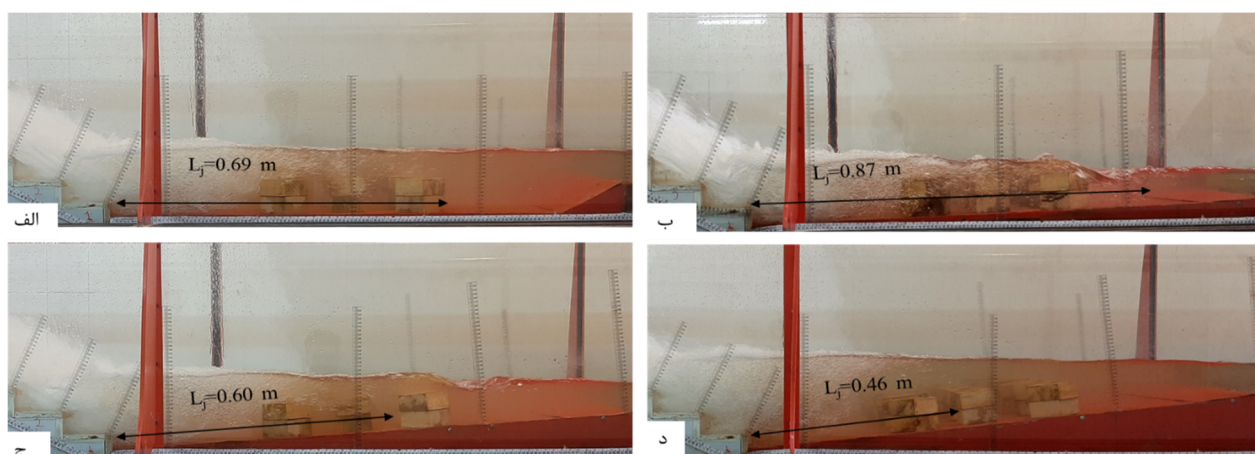
کاهش مربوط به مدل $AS_1D_1S_1$ بوده که به ترتیب به طور میانگین 35 و 13/2 درصد در مقایسه با حالت حوضچه آرامش بدون بلوک کاهش داشته است.

می توان دریافت که با افزایش عدد فرود طول پرش هیدرولیکی افزایش می یابد و تأثیر تغییر آرایش بلوک ها در اعداد فرود بالا کاملاً مشهود است. نتایج مقایسه آرایش بلوک ها نشان داد بیشترین کاهش طول پرش هیدرولیکی مربوط به مدل $AS_2D_2S_2$ و کمترین



شکل 6- تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه آرامش همراه با بلوک در شیب های مختلف:

(الف) شیب صفر، (ب) شیب 2/6-، (ج) شیب 5/2-، (د) شیب 7/5-.



شکل 7- نمایی از طول پرش هیدرولیکی مدل $AD_2S_2D_2$ بر روی چهار شیب متفاوت در دبی 35 لیتر بر ثانیه:

(الف) شیب صفر، (ب) شیب 2/6-، (ج) شیب 5/2-، (د) شیب 7/5-.

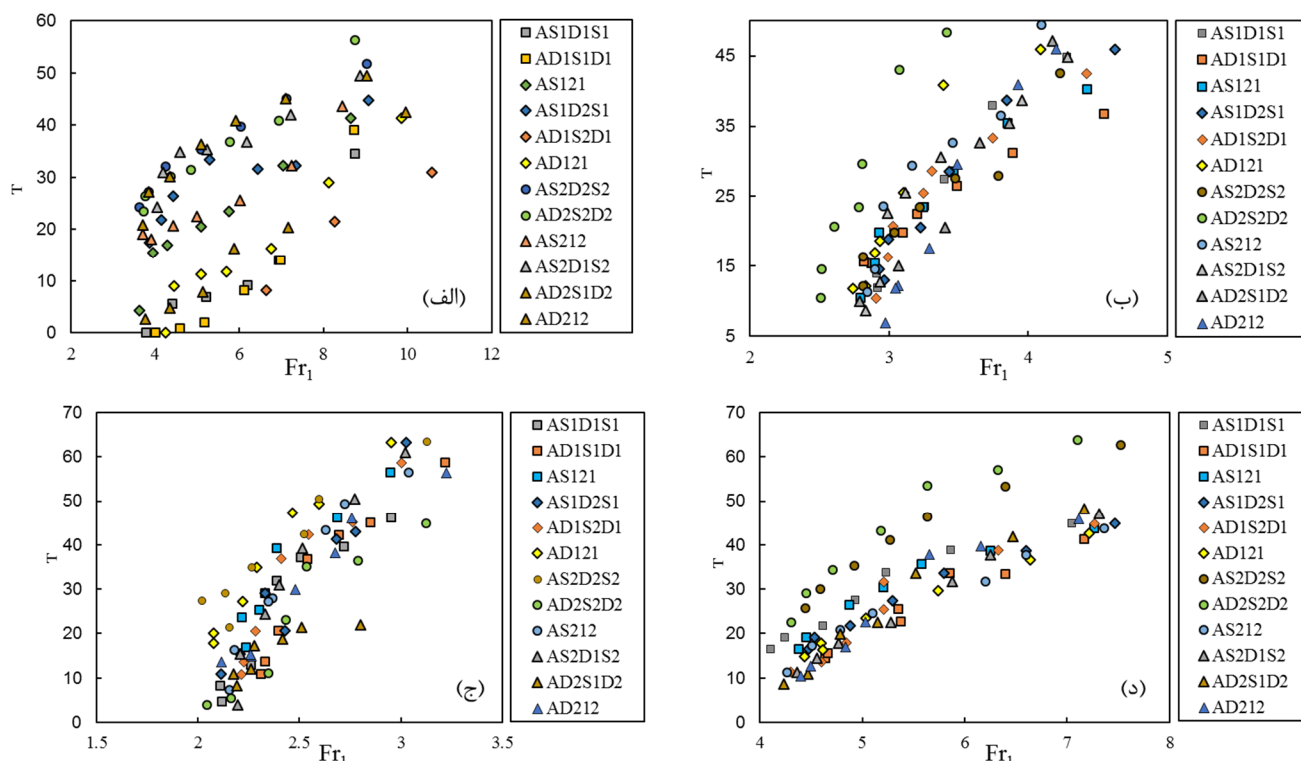
3-4- درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی

درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی در بستر زیر نسبت به حالت کلاسیک (بدون زیری) با استفاده از رابطه Tokyay به صورت زیر محاسبه شده است (Tokyay, 2005):

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \times 100 \quad (5)$$

بدین گونه که L_j^* بیانگر طول پرش در بستر صاف و L_j بیانگر طول پرش در بستر زیر با همان عدد فرود می باشد. شکل (8-الف) تغییرات درصد کاهش طول پرش در برابر اعداد فرود اولیه برای مدل های مختلف بلوک ها را نشان می دهد. مطابق شکل مشاهده می شود از میان تمامی مدل های آزمایشی، بیشترین و کمترین میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی در بین مدل های حوضچه آرامش مربوط به مدل AD_1SD_1 و $AS_2D_2S_2$ بوده که به ترتیب به طور میانگین $34/5$ و $8/7$ درصد نسبت به حالت پرش کلاسیک باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می شوند. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع بلوک ها در یک هندسه ثابت، درصد کاهش طول پرش به طور متوسط $35/7$ افزایش یافت. در شکل های (8-ب)، (8-ج) و (8-د) تغییرات درصد کاهش طول پرش (T) به ازای اعداد فرود اولیه در شیب های $2/6$ ، $5/2$ و $7/5$ نشان داده شده است.

نمودار تغییرات طول نسبی پرش با تغییرات زیری کف در روی شیب معکوس $2/6$ ، $5/2$ و $7/5$ در شکل های (6-ب)، (6-ج) و (6-د) نشان داده شده است. با بررسی شکل های زیر می توان دریافت که با افزایش عدد فرود طول پرش هیدرولیکی افزایش می یابد. نتایج مقایسه آرایش بلوک ها در شیب های متفاوت نشان داد که حداکثر و حداقل کاهش طول پرش هیدرولیکی در بین مدل ها مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ در شیب $7/5$ و $AS_1D_1S_1$ در شیب $2/6$ بوده که به ترتیب به طور میانگین $42/15$ و $8/2$ درصد نسبت به شیب افقی کاهش داشته است. با بررسی شکل های زیر می توان دریافت که با افزایش شیب معکوس، عدد فرود و ارتفاع بلوک ها طول پرش هیدرولیکی کاهش می یابد. این کاهش طول به دلیل وجود بلوک ها در حوضچه آرامش و شیب معکوس با جهت جریان و در نتیجه افزایش تلاطم و تنش برشی بوده که باعث می شود پرش در طول کوتاه تری نسبت به پرش کلاسیک به عمق ثانویه خود برسد. در شکل (7) نمایی از تأثیر اعمال شیب معکوس نسبت به بستر افقی در کاهش طول نسبی پرش را نشان می دهد.



شکل 8- تغییرات درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه آرامش همراه با بلوک در شیب های مختلف:

(الف) شیب صفر، (ب) شیب $2/6$ ، (ج) شیب $5/2$ ، (د) شیب $7/5$ %

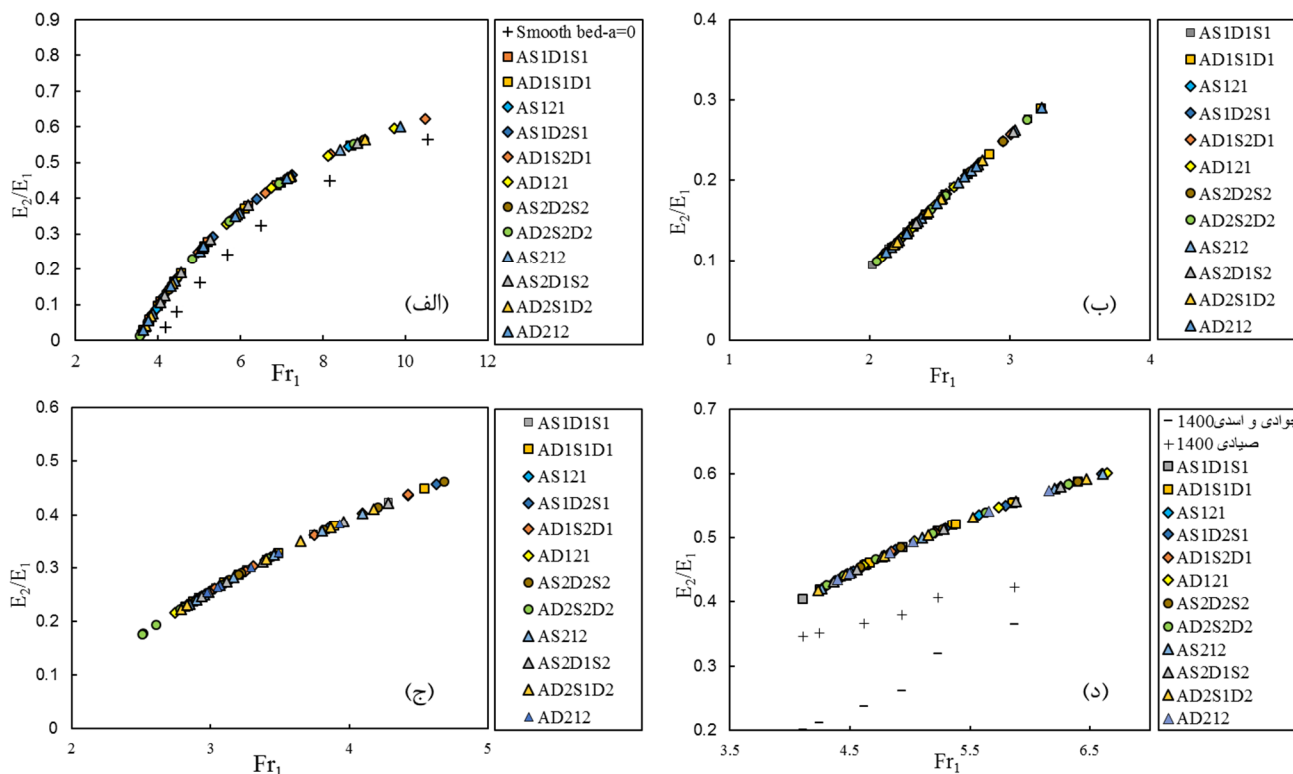
ایجاد تلاطم و گردابه‌های چرخشی در طول پرش هیدرولیکی می‌شوند در نتیجه باعث کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده می‌گردد. مقایسه نتایج آرایش بلوک‌ها نشان داد که حداکثر و حداقل انرژی نسبی باقی‌مانده در بین مدل‌ها مربوط به مدل AS_{121} و AD_{121} بوده که به ترتیب به‌طور میانگین 10 و 32 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است.

برای بررسی میزان تأثیر توام آرایش بلوک‌ها در شیب‌های معکوس 2/6-، 5/2- و 7/5- درصد در کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده نسبت به حالت افقی (مدل AD_{121})، شکل‌های (9-ب)، (9-ج) و (9-د) ارائه شده است. با بررسی شکل‌ها در می‌یابیم که با افزایش عدد فرود، انرژی نسبی باقی‌مانده در پرش کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج آرایش بلوک‌ها در شیب‌های معکوس نسبت به حالت افقی نشان داد که انرژی نسبی باقی‌مانده در شیب‌های معکوس 5/2- و 7/5- درصد به ترتیب حداکثر 14/6 و 32/8 درصد نسبت به شیب افقی کاهش داشته است ولی در شیب معکوس 2/6- درصد به دلیل نداشتن آبپایه انتهایی و نزدیک بودن شیب معکوس به کف افقی، انرژی نسبی باقی‌مانده به‌طور میانگین 23/5 درصد نسبت به مدل AD_{121} در شیب افقی افزایش داشته است. نتایج نشان داد با افزایش شیب معکوس انرژی نسبی باقی‌مانده کاهش می‌یابد.

با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود شیب معکوس تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش دارد، به‌طوری که در شیب معکوس 2/6- درصد، بیشترین و کمترین کاهش مربوط به مدل AD_{2S2D2} و AD_{212} بوده که به‌طور میانگین 35/6 و 11/6 درصد، در شیب معکوس 5/2- درصد مدل AS_{2D2S2} و AD_{2S1D2} به‌طور میانگین 40/4 و 15/8 درصد و در شیب معکوس 7/5- درصد مدل AD_{1S1D1} و AD_{2S2D2} بوده که به ترتیب به‌طور میانگین 47/4 و 24/8 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است.

3-5- انرژی نسبی باقی‌مانده

انرژی نسبی باقی‌مانده پرش از اختلاف انرژی مخصوص انتها و ابتدای پرش محاسبه شد. در شکل (9) مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده در برابر عدد فرود اولیه به ترتیب برای شیب صفر، معکوس 2/6-، معکوس 5/2- و معکوس 7/5- درصد با مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده در حوضچه صاف افقی و حوضچه همراه با بلوک در حالت افقی مقایسه شد. مطابق شکل (9-الف) مشخص است که انرژی نسبی باقی‌مانده در حوضچه آرامش همراه با بلوک، کمتر از حوضچه صاف (پرش کلاسیک) می‌باشد و با افزایش عدد فرود میزان انرژی نسبی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. با توجه به این که بلوک‌ها باعث



شکل 9- تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده به‌ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه آرامش همراه با بلوک در شیب‌های مختلف:

(الف) شیب صفر، (ب) شیب 2/6- درصد، (ج) شیب 5/2- درصد، (د) شیب 7/5- درصد

4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر تغییر در آرایش و ارتفاع بلوک‌های حوضچه آرامش در شیب‌های منفی 2/6، 5/2 و 7/5 درصد و حالت افقی انجام شد و نتایج آن با حوضچه آرامش بدون بلوک مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها شامل نسبت اعماق مزدوج، درصد کاهش عمق ثانویه، طول نسبی پرش، درصد کاهش طول پرش و انرژی نسبی باقی‌مانده می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که بکارگیری توأم شیب معکوس در بستر حوضچه آرامش به همراه بلوک‌های میانی تعبیه شده در آن، باعث کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی و انرژی نسبی باقی‌مانده جریان می‌شود. اهم نتایج تحقیق حاضر، در زیر خلاصه شده است:

- نسبت اعماق مزدوج در حوضچه آرامش همراه با بلوک، حداکثر و حداقل به ترتیب 22/1 و 8/3 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت. همچنین مقایسه نتایج با در نظر گرفتن آرایش بلوک-ها در شیب‌های معکوس، بیشترین و کمترین کاهش نسبت اعماق مزدوج در بین مدل‌ها مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ در شیب 2/6- و $AS_1D_2S_1$ در شیب 7/5- بود که به ترتیب 72/2 و 37/4 درصد نسبت به مدل $AD_2S_2D_2$ در شیب صفر کاهش داشته است.
- درصد کاهش عمق ثانویه در حوضچه آرامش همراه با بلوک در بیشترین و کمترین حالت به ترتیب 16/6 و 10/8 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. نتایج درصد کاهش عمق ثانویه در شیب معکوس 2/6- درصد نشان داد، بیشترین و کمترین میزان کاهش نسبی عمق ثانویه به ترتیب 50/2 و 44/6 درصد، در شیب معکوس 5/2- به ترتیب 41/3 و 37/3 درصد و در شیب معکوس 7/5- درصد به ترتیب 33/2 و 24/9 درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش داشته است.

- با افزایش شیب معکوس، عدد فرود و ارتفاع بلوک‌ها طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش طول پرش هیدرولیکی در آرایش‌های مختلف بلوک مربوط به مدل $AS_2D_2S_2$ و کمترین کاهش مربوط به مدل $AS_1D_1S_1$ به ترتیب و به طور میانگین 35 و 13/2 درصد نسبت به پرش کلاسیک می‌باشد. همچنین نتایج مقایسه آرایش بلوک‌ها در شیب‌های متفاوت بستر نشان داد که حداکثر و حداقل کاهش طول پرش هیدرولیکی در بین مدل‌ها مربوط به مدل $AD_2S_2D_2$ در شیب 7/5- و $AS_1D_1S_1$

در شیب 2/6- بوده که به ترتیب 42/15 و 8/2 درصد نسبت به شیب افقی کاهش داشته است.

- درصد کاهش طول پرش در حوضچه آرامش همراه با بلوک در بیشترین و کمترین حالت به ترتیب 34/5 و 8/7 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع بلوک‌ها در یک هندسه ثابت، درصد کاهش طول پرش به طور متوسط 35/7 درصد افزایش یافت. شیب معکوس تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش داشت، به طوری که در شیب 2/6- درصد، حداکثر و حداقل کاهش طول پرش 35/6 و 11/6 درصد، در شیب 5/2- درصد 40/4 و 15/8 درصد و در شیب 7/5- درصد 47/4 و 24/8 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است.

- مقایسه نتایج آرایش بلوک‌ها نشان داد که حداکثر و حداقل افت انرژی نسبی در بین مدل‌ها مربوط به مدل AD_{121} و AS_{121} بوده که به ترتیب 31/4 و 10 درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است. انرژی نسبی باقی‌مانده در شیب‌های 5/2- و 7/5- کمتر از شیب صفر می‌باشد و این روند با افزایش شیب معکوس و عدد فرود شدت می‌یابد ولی در شیب معکوس 2/6- به دلیل نداشتن آبپایه انتهایی و نزدیک بودن شیب معکوس به کف افقی، انرژی نسبی باقی‌مانده بیشتر از شیب صفر اتفاق می‌افتد.

نتایج این تحقیق نشان داد دلایل اصلی کاهش طول پرش، نسبت اعماق مزدوج و انرژی نسبی باقی‌مانده در پرش هیدرولیکی تشکیل شده روی حوضچه آرامش همراه با بلوک و شیب معکوس، تأثیر جهت عکس مؤلفه نیروی وزن و افزایش نیروی برشی ناشی از بلوک‌ها در بستر پرش می‌باشد. با توجه به بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه آرامش با شیب معکوس همراه با آرایش‌های مختلف بلوک‌های میانی برای ادامه این مطالعه می‌توان با بهره‌گیری از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی وضعیت فشار و توزیع سرعت در داخل حوضچه آرامش و در اطراف بلوک‌ها را مورد بررسی قرار داد.

5- مراجع

- Abrishami J, Saneie M, "Hydraulic jump in adverse basin slopes", International Journal of Water Research Engineering, 1994, 2 (1), 51-63.
- Abbaspour A, Dalir AH, Farsadizadeh D, Sadraddini AA, "Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic

- Eshkou Z, Dehghani AA, Ahmadi A, "Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 2018, 144 (8), 06018004.
- Ghaderi A, Abbasi S, "Experimental and numerical study of the effects of geometric appendage elements on energy dissipation over stepped spillway", *Water*, 2022, 13 (7), 957.
- Ghaderi A, Dasineh M, Aristodemo F, Ghahramanzadeh A, "Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses", *Journal of Hydroinformatics*, 2020, 22 (6), 1554-1572.
- Ghaderi A, Dasineh M, Aristodemo F, Aricò C, "Numerical simulations of the flow field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses", *Water*, 2021, 13 (5), 674.
- Parsamehr P, Hosseinzadeh A, Farsadizadeh D, Abaspour A, Nasresfahani M, "Investigation of hydraulic jump characteristics on rough bed with different density and roughness arrangements", *Journal Water Soil Sci*, 2016, 26 (4), 13-24.
- Rajaratnam N, "Hydraulic jump on rough bed", *Transaction of the Engineering Institute of Canada*, 1968, 11 (2), 1-8.
- Rajaratnam N, "Turbulent jets", Elsevier, 1976.
- Rouse H, Siao TT, Nagaratnam S, "Turbulence characteristics of the hydraulic jump", *Journal of Hydraulic Division*, 1958, 84 (1), 1-30.
- Sadeghfam S, Akhtari AA, Daneshfaraz R, Tayfur G, "Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2014, 38, 126-138.
- Saiadi K, Heidarpour M, Ghadampour Z, "Study of the effect of adverse slope and elementary negative step on hydraulic jump characteristics", *Iranian Water Researches Journal*, 2021, 15 (4), 35-43.
<https://doi.org/10.22034/iwrj.2021.11163>
- Stevens JC, "Discussion of the Hydraulic jump in sloping channels", by C. E. Kindsvater. *Trans. ASCE*, 1944, (109), 1154-1187.
- Tokyay ND, "Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps", In *Impacts of Global Climate Change*, 2005, 1-9.
- Tiwari HL, Goel A, "Effect of end sill in the performance of stilling basin models", *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2014, 2 (2), 60-63.
- jump characteristics", *Journal of Hydro-Environment Research*, 2009, 3 (2), 109-117.
- Agha Majidi R, Nozari AH, "Laboratory study of simultaneous coarse-gradient roughness and positive slope on hydraulic jump length in classical stilling basin", *Water Engineering*, 2020, 7 (4), 281-291.
- Banitaba S, Heidarpour M, Pourabdollah N, "Investigation of the effect of vertical trapezium roughness and adverse slope in relaxation basin on hydraulic jump characteristics", *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 2019, 20 (76), 95-110.
<https://doi.org/10.22092/idser.2018.122797.1344>
- Chow VT, "Open channel hydraulics", McGraw-Hill, New York, 1959, 680.
- Daneshfaraz R, Ghaderi A, Di Francesco S, Khajei N, "Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop", *Water Supply*, 2021, 21 (5), 2425-2436.
- Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Ghaderi A, Di Francesco S, Asl MM, "Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss", *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, 12 (4), 3451-3459.
- Daneshfaraz R, Rezaie M, Aminvash, Süme V, Abraham J, Ghaderi A, "On the effect of green nonstructural materials on scour reduction downstream of grid dissipators", *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2023, 72 (7), 1344-1357.
- Daneshfaraz R, Sadeghi H, Ghaderi A, Abraham JP, "Characteristics of hydraulic jump and energy dissipation in the downstream of stepped spillways with rough steps", *Flow Measurement and Instrumentation*, 2024, 96, 102506.
- Daneshfaraz R, Ghaderi A, Bagheri A, "Effect of angle and geometric shape of block on flow energy dissipation in baffled chute", *Environment and Water Engineering*, 2023, 9 (2), 225-240.
<https://doi.org/10.22034/ewe.2022.340443.17>
- Daneshfaraz R, Sadeghi H, Ghaderi, Abraham JP, "The effect of gabion steps on the hydraulic jump characteristics downstream of stepped spillways", *Water Science*, 2024, 38 (1), 128-139.
- Dastourani M, Roosta Z, Abdollahi Salmabad Z, "Investigation of the effect of jet, semi-cylindrical roughness and reverse slope on hydraulic jump", *Journal of Water and Soil Conservation*, 2021, 28 (3), 153-171.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.19147.3458>
- Ead SA, Rajaratnam N, "Hydraulic jumps on corrugated beds", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 2002, 128 (7), 656-663.
- Varaki ME, Kasi A, Farhoudi J, Sen D, "Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope", *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 2014, 38 (C1), 111.