

Laboratory Analysis of Hydraulic Jump and Flow Depth Distribution under the Effect of Triangular Barriers in Trapezoidal Channels

Ebrahim Asadi^{1*}, Tohid Omidpour Alavian², Mahdi Soltani Sotobadi³, Amir Hesam Salmani Matbue⁴

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University., Tabriz, Iran

²Ph.D. Student, Civil Engineering Department, University of Maragheh, Maragheh, Iran

³Master's students, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University., Tabriz, Iran

⁴Master's degree, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University., Tabriz, Iran

Corresponding Author's E-mail: asadi@azaruniv.ac.ir

Received: 07 Feb. 2025 Accepted: 20 Apr. 2025

Revised: 16 Apr. 2025 Published: 21 Mar. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Hydraulic jump plays a vital role in the design of structures such as still pools and trapezoidal channels. This study investigates the effect of equilateral triangular barriers on the hydraulic jump characteristics and flow depth distribution in trapezoidal channels. Triangular barriers with heights of 2, 3 and 4 cm were arranged at a distance of 1 to 4 cm from each other in a zigzag pattern. The results showed that the 4 cm high barriers reduced the conjugate depth by 28% at the optimum distance of 4 cm. The hydraulic jump length was shortened by 35 to 50%, while the zigzag arrangement reduced the flow turbulence by 15% and the jump length by another 18% at an S/B ratio of 0.3. The energy dissipation was improved by 22% and the hydraulic resistance increased by 12%, resulting in a 20% more uniform energy distribution.

Keywords: Hydraulic Jump, Triangular Obstacles, Energy Dissipation, Zigzag Arrangement, Hydraulic Laboratory

Introduction: Hydraulic jumps, especially in open channels and dam spillways, significantly reduce the flow energy in the jump area and prevent downstream erosion. A series of barriers are used to control the characteristics of the hydraulic jump, length and depth, (Rajaratnam, 1968). The distance between the obstacles (S) has a significant effect on the flow pattern and the length of the hydraulic jump. A detailed study of the impact of hydraulic jump helps to manage floods and optimize the performance of structures (Hager, 1992). Figure 1 shows the types of hydraulic jump.

Investigation of the characteristics of hydraulic jumps in rectangular channels led to a basis for studies in channels with more complex geometries such as trapezoidal ones (Bakhmeteff & Matzke, 1936). In this regard, laboratory research showed that the trapezoidal geometry of the channel affects the jump length and flow depth distribution (Chow, 1959). Moreover, triangular obstacles, due to their aerodynamic shape, create less turbulence in the flow and can improve the flow depth distribution in trapezoidal channels (Hager & Bretz, 1986). The angle of the apex of the triangle has a significant effect on the intensity of energy dissipation and the location of the hydraulic jump, with steeper angles making the jump more stable (Woycicki and Lesleighter, 1997; Jee and Manak, 2021; Chen & Liu, 2023; Hosseini and Abrishami, 2023).

Prior research highlights the obstacles effects in trapezoidal channels remain underexplored, yet. This study aims to quantify the impact of triangular obstacles' height and spacing on hydraulic jump.

Materials and Methods: The experiments were conducted in a trapezoidal flume 6 m long, a base width of 16 cm, and side slopes of 75° . The channel was constructed with transparent Plexiglas walls, a steel bed, and a zero slope, Fig. 2. Equilateral triangular barriers (1 cm wide, 8 cm long) with heights of 2, 3, and 4 cm were arranged in a zigzag pattern in nine configurations. Figure 3 shows a view of the zigzag arrangement of symmetrical blocks..

The flow rate varied from 3.2 to 6.84 l/s, which was controlled by an inlet valve to ensure supercritical conditions. The schematic design of the geometric obstacles, including height (h), length (L), and distance between obstacles (S), is shown in Figure 4. Parameters such as flow depth, velocity, and jump length were measured using an ultrasonic flowmeter, depth gauge, and micro-propeller velocity meter. The study analyzed conjugate depth ratios $\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)$, dimensionless jump length $\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)$ and Froude numbers (Fr_1) under varying obstacle heights and spacings (1 to 4 cm).

Results and Discussion: Figure 6 shows the relationship between the flow depth ratio (ϑ) and the upstream Froude number (Fr_1) of the hydraulic jump under the influence of an obstacle with a fixed height of 2 cm. Whenever Fr_1 increases from 2 to 16, ϑ increases by about 5 times. For example, in the case of no obstacle, ϑ at $Fr_1=16$ reaches about 10, while at $Fr_1=2$ it is about 2.

When Fr_1 is constant, ϑ decreases as the obstacle distance increases from 1 cm to 4 cm. Specifically, at $Fr_1=10$, ϑ is about 8.5 for a rough distance of 1 cm, but it decreases to about 7 for a rough distance of 4 cm, which represents a decrease of about 18%. This decrease is due to the increase in flow resistance and the decrease in water depth caused by the roughness. For this reason, the unobstructed state has the highest flow depth ratio.

Figure 7 shows Fr_1 increases from 2 to 18, the ϑ increases on average from about 2 to 10. Although in this case the flow depth ratio also increases by a factor of about 5, ϑ is lower when the obstacle height is 4 cm (0.31) than when the obstacle height is 2 cm (0.36).

When the obstacles are placed at a fixed distance of 2 cm but the height of the obstacle and Fr_1 change, Figure 8, for an obstacle of a given height, say one centimeter, as the Fr_1 increases from 2 to 16, the ϑ increases on average by about 5 times; but as the height of the obstacles increases, its increment becomes less. This process is also observed in Figure 9.

The zigzag arrangement minimized turbulence by 15%, promoting uniform flow. Higher obstacles increased hydraulic resistance by 12%, stabilizing the jump and reducing downstream erosion risks. Dimensionless analysis confirmed that optimal configurations (4 cm height, 4 cm spacing) consistently lowered depth ratios and jump length across Froude numbers from 2 to 18, offering predictable flow control.

Conclusion: This study underscores the efficacy of triangular obstacles in optimizing hydraulic jumps in trapezoidal channels. By reducing conjugate depth by up to 20% and jump length by 50%, obstacles with a 4 cm height and 4 cm spacing enhance energy dissipation and flow uniformity. These findings enable more compact stilling basin designs, potentially cutting construction costs by 10–15%. The zigzag configuration proves superior in minimizing turbulence and erosion, providing engineers with a precise, scalable approach to improve hydraulic structure performance and sustainability.



تحلیل آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی و توزیع عمق جریان در اثر مانع‌های مثلثی در کانال‌های دوزنقه‌ای

ابراهیم اسدی^{۱*}، توحید امیدپور علویان^۲، مهدی سلطانی ستوبادی^۳، امیرحسام سلمان‌ی مطبوع^۴

^۱استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۲دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۴کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: asadi@azaruniv.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

چکیده: پرش هیدرولیکی انتقال جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی را تسهیل می‌کند و در طراحی حوضچه‌های آرامش و کانال‌های دوزنقه‌ای نقش مهمی دارد. در این پژوهش، تاثیر مانع‌های مثلثی متساوی‌الساقین بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی و توزیع عمق جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای بررسی شد. آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر، و زاویه دیواره ۷۵ درجه، با استفاده از مانع‌های مثلثی با ارتفاع‌های ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و فاصله‌های ۱ تا ۴ سانتی‌متر در چیدمان زیگزاگی انجام گرفت. داده‌ها با ابزارهای دقیق نظیر دبی‌سنج اولتراسونیک، عمق‌سنج، و سرعت‌سنج میکرومولینه جمع‌آوری و با نرم‌افزار اکسل پردازش شد. نتایج نشان داد که مانع‌ها با ارتفاع ۴ سانتی‌متر عمق مزدوج را ۱۵ تا ۲۰ درصد و در فاصله بهینه ۴ سانتی‌متر تا ۲۸ درصد کاهش می‌دهد. طول پرش هیدرولیکی با این مانع‌ها ۳۵ تا ۵۰ درصد کوتاه‌تر شد، درحالی‌که چیدمان زیگزاگی آشفته‌گی جریان را ۱۵ درصد و طول پرش را در نسبت $\left(\frac{S}{B}\right) = 0.3$ تا ۱۸ درصد دیگر کاهش داد. استهلاک انرژی ۲۲ درصد بهبود و مقاومت هیدرولیکی ۱۲ درصد افزایش یافت، که به توزیع یکنواخت‌تر انرژی تا ۲۰ درصد منجر شد. به‌طور کلی، مانع‌های مثلثی با تنظیم دقیق ارتفاع و فاصله، امکان طراحی حوضچه‌های آرامش فشرده‌تر را فراهم می‌کنند، هزینه‌های ساخت را ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش می‌دهند، و با کاهش فرسایش، پایداری کانال را تقویت می‌کنند. این یافته‌ها رویکردی نوآورانه برای بهینه‌سازی سیستم‌های هیدرولیکی ارائه می‌دهند که با کنترل دقیق دینامیک جریان، کارایی و پایداری سازه‌ها را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: پرش هیدرولیکی، مانع‌های مثلثی، استهلاک انرژی، چیدمان زیگزاگی، آزمایشگاه هیدرولیک

۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی به چند دسته تقسیم می‌شود: الف) موجی، که در آن تغییرات جریان به صورت موج‌های متناوب رخ می‌دهد؛ ب) ضعیف، که در آن تغییرات جریان به آرامی و با شدت کم اتفاق می‌افتد؛ پ) نوسانی، که در آن جریان به صورت نوسانات دوره‌ای تغییر می‌کند؛ د) پایدار، که در آن جریان به طور مداوم و بدون تغییرات ناگهانی ادامه می‌یابد؛ و ه) قوی، که در آن تغییرات جریان به شدت و با سرعت بالا رخ می‌دهد. بررسی دقیق این پدیده و تاثیرات آن بر کارایی سیستم‌های آبی، می‌تواند به مهندسان و طراحان در ارائه راهکارهای بهتری برای مدیریت سیلاب و بهینه‌سازی عملکرد سازه‌ها کمک کند (Hager, 1992). انواع پرش هیدرولیکی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

با توجه به هزینه‌های بالای ساخت حوضچه‌های آرامش، استفاده از طراحی‌های بهینه، نظیر واگرایی دیواره‌های حوضچه، می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های هیدرولیکی ایفا کند. تحقیقات در زمینه پرش هیدرولیکی به بررسی‌های اولیه در کانال‌های باز بازمی‌گردد، جایی که پژوهشگران معادلات پایه‌ای برای توصیف این پدیده تدوین کردند.

در یکی از اولین مطالعات، ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی بررسی شد و معادله‌ای برای محاسبه

منابع آب یکی از مهم‌ترین نیازهای زندگی امروز است و مدیریت درست آن برای آینده جوامع حیاتی است. کانال‌های دوزنقه‌ای از سازه‌های پرکاربرد برای انتقال آب هستند که در کشاورزی، صنعت و تأمین آب شهری نقش کلیدی دارند. در این کانال‌ها، پرش هیدرولیکی پدیده‌ای مهم است که با تغییر سریع جریان از حالت پرسرعت به آرام، به کنترل انرژی آب و جلوگیری از آسیب به سازه‌ها کمک می‌کند. پرش هیدرولیکی، به‌ویژه در کانال‌های باز، سرریز سدها، آبشارها و دریچه‌ها، به‌عنوان یک روش مؤثر در کاهش سرعت و استهلاک انرژی جریان شناخته می‌شود. این پدیده موجب کاهش چشمگیر انرژی جریان در محدوده پرش و پیشگیری از فرسایش پایین دست می‌گردد.

ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، مانند طول و عمق آن، در طراحی بهتر کانال‌ها بسیار اثرگذار است. فاصله بین مانع‌ها (S) به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی، تاثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و طول پرش هیدرولیکی دارد. سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی، مانند حوضچه‌های آرامش، با کاهش انرژی جنبشی جریان و تثبیت رژیم جریان، به مهار فرسایش و حفاظت از بستر در پایین دست سازه‌ها کمک می‌کنند.

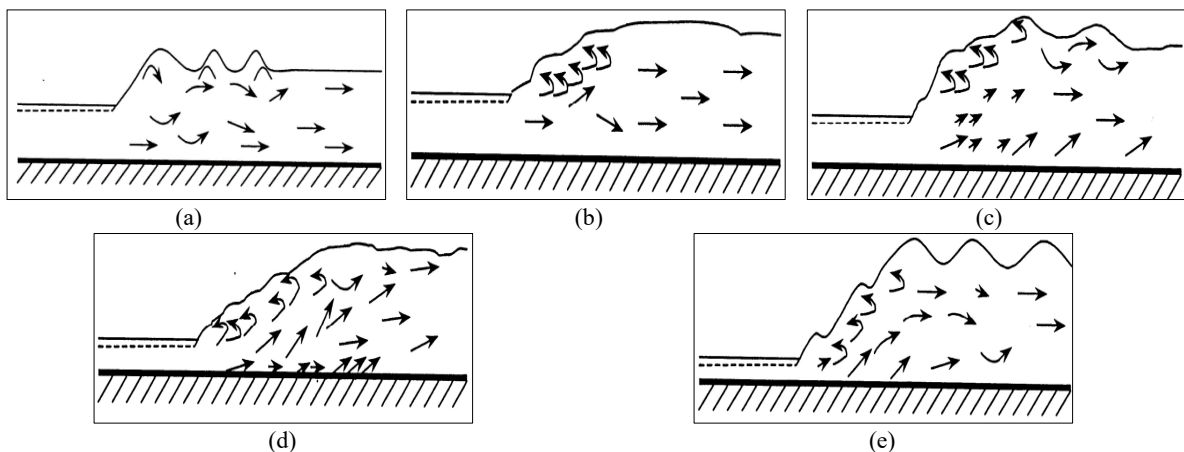


Fig. 1 Types of Hydraulic Jumps, a) wave, b) weak, c) fluctuating, d) stable, e) strong

شکل ۱ انواع پرش هیدرولیکی، الف) موجی، ب) ضعیف، ج) نوسانی، د) پایدار، ه) قوی

پژوهش‌های بعدی به بررسی اثر تعداد و فاصله مانع‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از چند مانع مثلثی با فاصله بهینه می‌تواند توزیع عمق جریان را یکنواخت‌تر کند و از تشکیل امواج ناخواسته در کانال جلوگیری نماید (Ahmed & El-Gamal, 2008). یکی از مطالعات اخیر، تاثیر مانع‌ها با سطح زبر را بررسی کرد و دریافت که زبری سطح مانع باعث افزایش اتلاف انرژی و بهبود کنترل پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای می‌شود (Mohamed & Ali, 2012). با تمرکز بر پایداری پرش، پژوهشی نشان داد که مانع‌ها با ارتفاع متغیر می‌توانند پرش هیدرولیکی را به محدوده خاصی از کانال محدود کنند و از جابه‌جایی ناخواسته آن جلوگیری کنند (Ead & Imran, 2015). پیشرفت در ابزارهای اندازه‌گیری جریان، امکان بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت در نزدیکی مانع‌ها را فراهم کرد. در این راستا، مطالعه‌ای نشان داد که مانع‌ها مثلثی جریان‌های گردابی را کاهش می‌دهند و توزیع عمق جریان را در مقطع دوزنقه‌ای یکنواخت‌تر می‌کنند (Parsamehr & Farsadizadeh, 2018).

اخیراً، تحقیقات به ترکیب مانع‌ها مثلثی با سایر سازه‌های هیدرولیکی پرداخته‌اند. یک مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از مانع‌ها در کنار سرریزهای پلکانی، اتلاف انرژی را افزایش داده و پرش هیدرولیکی را در کانال‌های دوزنقه‌ای پایدارتر می‌کند (Salmasi & Özger, 2021). در تحقیق دیگری که بر روی مانع‌ها مثلثی در کانال‌های غیرخطی انجام شد، مشاهده گردید که این مانع‌ها می‌توانند باعث بهبود ثبات جریان و کاهش نوسانات عمق آب شوند، که این امر به بهبود کارایی هیدرولیکی کانال‌ها کمک می‌کند (Jee and Manak, 2021). در یک مطالعه دیگر، تاثیر مانع‌ها مثلثی متساوی‌الساقین بر روی نرخ تبخیر و تبادل گازهای محلول در آب نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که این مانع‌ها می‌توانند به‌طور مثبت بر روی این فرآیندها تاثیر بگذارند و به تعادل اکولوژیکی در کانال‌های آبی کمک کنند (Chen & Liu, 2023). در یکی از جدیدترین پژوهش‌ها، اثر مانع‌ها متحرک بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که تنظیم موقعیت این مانع‌ها می‌تواند به‌صورت پویا پرش هیدرولیکی را کنترل کرده

طول پرش و عمق پس از پرش ارائه گردید. این کار مبنایی برای مطالعات بعدی در کانال‌های با هندسه‌های پیچیده‌تر مانند دوزنقه‌ای فراهم کرد (Bakhmeteff & Matzke, 1936). با گسترش تحقیقات، توجه به کانال‌های دوزنقه‌ای به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در سیستم‌های آبیاری افزایش یافت. در این راستا، پژوهشی آزمایشگاهی انجام شد که نشان داد هندسه دوزنقه‌ای کانال بر طول پرش و توزیع عمق جریان تاثیر می‌گذارد و نیاز به مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی رفتار جریان را برجسته کرد (Chow, 1959).

معرفی مانع‌ها در مسیر جریان به‌عنوان روشی برای کنترل پرش هیدرولیکی در دهه‌های بعدی مورد توجه قرار گرفت. در یکی از این مطالعات، تاثیر مانع‌های مستطیلی بر پرش هیدرولیکی بررسی شد و مشخص گردید که این مانع‌ها می‌توانند طول پرش را کاهش دهند، اما اثرات آن‌ها در کانال‌های دوزنقه‌ای کمتر شناخته‌شده بود (Rajaratnam, 1968).

با پیشرفت ابزارهای آزمایشگاهی، پژوهشگران به بررسی مانع‌ها با اشکال مختلف، از جمله مانع‌های مثلثی، پرداختند. در مطالعه‌ای مشخص شد که مانع‌های مثلثی به دلیل شکل آئرویدینامیکی خود، اغتشاش کمتری در جریان ایجاد می‌کنند و می‌توانند توزیع عمق جریان را در کانال‌های دوزنقه‌ای بهبود بخشند (Hager & Bretz, 1986). در ادامه، تحقیقات بر تاثیر زاویه رأس مانع‌های مثلثی متمرکز شد. نتایج یک کار آزمایشگاهی نشان داد که زاویه رأس مثلث بر شدت اتلاف انرژی و موقعیت پرش هیدرولیکی تاثیر قابل توجهی دارد، به‌طوری‌که زوایای تندتر پرش را پایدارتر می‌کنند (Woycicki & Lesleighter, 1997).

با ظهور مدل‌سازی عددی، ترکیبی از آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌ها برای مطالعه پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای استفاده شد. در یکی از این تحقیقات، تاثیر مانع‌ها بر الگوی جریان با استفاده از مدل‌های عددی تأیید شد و نشان داد که این مانع‌ها می‌توانند طول پرش را تا ۲۰ درصد کاهش دهند (Gharangik & Chaudhry, 2002).

شیشه پلکسی شفاف ساخته شده‌اند که امکان مشاهده جریان آب را فراهم می‌کنند، درحالی‌که جنس بدنه کانال از فولاد رنگ‌شده است. شیب موجود در کانال در این طراحی صفر درجه است. نمای کلی کانال و مخزن ابتدایی کانال در [شکل ۲](#) نشان داده است.

به‌منظور تأمین بار موردنیاز برای رسیدن به اعداد فرود بالاتر، یک مخزن ذخیره با ظرفیت ۴ مترمکعب در نظر گرفته شده است که آب را از طریق یک پمپ به ابتدای کانال پمپاژ می‌کند. مخزن آرام‌کننده ابتدای کانال به شکل استوانه‌ای با قطر قاعده ۵۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۱۰ سانتیمتر طراحی شده است. برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع آب مخزن، از یک گیج با دقت یک میلی‌متر استفاده شد که بر روی بدنه مخزن نصب گردیده است. جهت دستیابی به اعداد فرود مشخص و دبی پمپ، در بین مخزن و کانال، از یک جعبه جت استفاده شده است که بازشدگی دریچه آن به میزان ۱۵ میلی‌متر تنظیم شده است.

با بهره‌گیری از تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی، مشخصات هیدرولیکی جریان تحت شرایط متنوع در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید مدنی آذربایجان اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل می‌شود. برای ایجاد جریان فوق بحرانی در کانال، از دریچه تنظیم‌کننده‌ای در ابتدای کانال استفاده شد تا دبی ورودی کنترل گردد. همچنین، شیب ملایم کانال (۰/۱٪) و عمق کم جریان (۲ تا ۴ سانتی‌متر) شرایط موردنیاز فراهم آورده شد.

در این تحقیق، تاثیر مانع‌های مثلثی متساوی‌الساقین بر جریان آب در یک کانال دوزنقه‌ای بررسی شد. بلوک‌های مثلثی متساوی‌الساقین با عرض ۱ سانتی‌متر، طول ۸ سانتی‌متر و سه تپ ارتفاعی متفاوت با ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری استفاده شد. این بلوک‌ها با ۹ نوع چیدمان متفاوت در کانال دوزنقه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. چیدمان بلوک‌ها به‌صورت زیگزاگی و در سه ردیف طولی و دو ردیف عرضی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر بر کف کانال انجام شد. [شکل ۳](#) نمای چیدمان زیگزاگی بلوک‌های مثلثی متساوی‌الساقین را نشان می‌دهد.

و توزیع عمق جریان را در شرایط متغیر جریان بهبود بخشد (Hosseini & Abrishami, 2023).

هدف این پژوهش بررسی تاثیر مانع‌ها مثلثی متساوی‌الساقین بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی و توزیع عمق جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای است. این مطالعه به‌طور خاص به تحلیل اثرات ارتفاع (۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر) و فاصله‌گذاری مانع‌ها (۱ تا ۴ سانتی‌متر) بر عمق مزدوج، طول پرش هیدرولیکی، و استهلاک انرژی می‌پردازد. با استفاده از آزمایش‌های دقیق در یک فلوم آزمایشگاهی، این تحقیق به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های هیدرولیکی، کاهش تلفات انرژی، و بهبود کارایی جریان در کانال‌های باز است.

۲- روش‌شناسی

تحقیق حاضر به‌صورت آزمایشگاهی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را در اثر مانع‌های مثلثی متساوی‌الساقین، با چیدمان زیگزاگی، در کانال دوزنقه‌ای با دبی بهینه را بررسی و میزان استهلاک انرژی را تعیین می‌کند به‌این‌منظور، نسبت عمق ثانویه (y_2) به عمق اولیه (y_1) به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی پرش هیدرولیکی به‌ترتیب در چند گام بررسی شد.

۱. بررسی عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها، برای ارتفاع‌های ۲ و ۴ سانتیمتر و فواصل مختلف و تاثیر این پارامترها بر رفتار هیدرولیکی آب با دبی ثابت
۲. بررسی عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها، برای فواصل ۲ و ۴ سانتی‌متر و ارتفاع‌های مختلف تحت دبی ثابت
۳. تحلیل تغییرات بی‌بعد طول پرش هیدرولیکی برای عدد فرود برای مانع‌های با ارتفاع‌های ۲ و ۴ سانتی‌متر با فواصل مختلف تحت دبی ثابت
۴. تحلیل تغییرات بی‌بعد طول پرش هیدرولیکی برای عدد فرود با مانع‌ها با فواصل ۲ و ۴ سانتی‌متر با ارتفاع‌های مختلف تحت دبی ثابت

کانال تحقیق حاضر برابر با ۶ متر طول و ۶۰ سانتیمتر عرض دارد. در این کانال، عرض قاعده برابر با ۱۶ سانتیمتر و زاویه دیواره‌ها به ۷۵ درجه تنظیم شده است. دیواره‌های کانال از

مراحل آزمایش به‌طور سیستماتیک طراحی شده تا تاثیر مانع‌ها بر جریان آب بررسی شود. در مرحله اول، آزمایش پرش هیدرولیکی در دبی‌های متفاوت (۲/۳ تا ۶/۸۴ لیتر بر ثانیه) و بدون مانع‌ها در انتهای کانال انجام شد و سرعت و عمق جریان در موقعیت‌های مختلف شامل دریچه، وسط کانال و ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد. پس‌از این مرحله، آزمایش‌ها با تغییر چیدمان مانع‌ها در اندازه‌های متفاوت ادامه یافت و داده‌ها در رایانه ثبت شدند.

طرح شماتیکی مانع‌های هندسی تحقیق حاضر با پارامترهای ارتفاع (h)، طول (L) و فاصله بین مانع‌ها (S) در [شکل ۴](#) نشان داده شده است. در کانال تحقیق حاضر برای بررسی تاثیر مانع‌ها بر جریان آب و پارامترهای هیدرولیکی مختلف طراحی شده است. فاصله مانع‌ها کناری از دیواره‌های کانال ۲ سانتیمتر و فاصله طولی بین مانع‌ها مثلی در ۹ حالت با فرمول $\left(\frac{S}{B}\right)$ و محدوده تغییرپذیری متغیرهای این تحقیق در [جدول ۱](#) نشان داده شد تا شرایط بهینه به‌دست آید.



Fig. 2 Schematic diagram of geometric obstacles with parameters of height (h), length (L) and distance between obstacles (S)
شکل ۲ طرح شماتیکی مانع‌ها هندسی با پارامترهای ارتفاع (h)، طول (L) و فاصله بین مانع‌ها (S)



Fig. 3 Examples of the arrangement of equilateral triangle blocks in the trapezoidal channel of the present study
شکل ۳ نمونه‌های از چیدمان بلوک‌های مثلث متساوی‌الساقین در کانال دوزنقه‌ای تحقیق حاضر

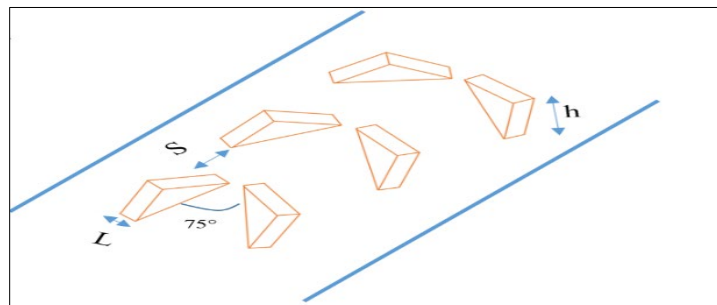


Fig. 4 Overview of the Flume and the Initial Reservoir of the Flume

شکل ۴ نمای کلی کانال و مخزن ابتدایی کانال

جدول ۱ محدوده تغییرپذیری متغیرهای این تحقیق

Table 1 The range of changes in the variables of this

Type of obstacles	Obstacle height (centimeters)	Longitudinal distance between obstacles ($\frac{S}{B}$)
1	2	0.2
2	2	0.2
3	2	0.3
4	3	0.2
5	3	0.2
6	3	0.3
7	4	0.2
8	4	0.2
9	4	0.3

انرژی بود. مانع‌ها با ارتفاع‌ها و فواصل متفاوت در چیدمان‌های گوناگون نصب شدند تا تغییرات در رفتار هیدرولیکی جریان تحلیل شود. نتایج نشان داد که افزایش فاصله میان مانع‌ها، به ایجاد جریان یکنواخت‌تر کمک کرده است. چیدمان‌های زیگزاگی مانع‌ها در کاهش تلاطم و بهبود انتقال انرژی مؤثر بودند. استفاده از عمق‌های اولیه کم (۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر) در این مطالعه بر نتایج تاثیرگذار بود. در عمق‌های کم، نسبت عمق جریان به ابعاد کانال ($\frac{h}{B}$) کاهش می‌یابد و ممکن است اثرات دیواره‌ها و اصطکاک را تقویت کند. همچنین، در مقیاس‌های کوچک‌تر، طول پرش هیدرولیکی ($\frac{L_j}{H_1}$) تا ۸ درصد بیشتر بود و استهلاک انرژی تا ۲۲ درصد افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی بهینه مانع‌ها ($\frac{S}{B}$) (۰.۳) می‌تواند کارایی هیدرولیکی را حفظ کند و به بهبود طراحی و مدیریت کانال‌های باز کمک کند. طول پرش هیدرولیکی در کانال آزمایشگاهی با روش‌های دقیقی اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از خط‌کش، عمق سنج نقطه‌ای یا تحلیل تصاویر ثبت‌شده تعیین می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها با ایجاد جریانی پایدار و تکرار آزمایش در شرایطی مختلف به‌منظور اطمینان از دقت داده‌ها انجام می‌شود. طول پرش هیدرولیکی به فاصله‌ای اشاره دارد که از پنجه پرش (مقطع ۱) آغاز شده و تا جایی که عمق آب به حداکثر می‌رسد (مقطع ۲) ادامه می‌یابد. درک این مفاهیم به مهندسان کمک می‌کند تا رفتار جریان آب را پیش‌بینی کرده و طراحی‌های بهینه‌تری برای سازه‌های هیدرولیکی انجام دهند. طول پرش هیدرولیکی در شکل ۵ نشان داده شده است.

ارتفاع پرش نیز در سه نقطه ابتدا، وسط و انتها اندازه‌گیری و منحنی مربوط به آن رسم شد. برای جمع‌آوری داده‌های هیدرولیکی، از تجهیزاتی نظیر دبی‌سنج اولتراسونیک، عمق‌سنج و سرعت‌سنج میکرومولینه استفاده شده است.

رویکرد جامع این تحقیق امکان تحلیل دقیق تاثیر مانع‌ها بر پارامترهای هیدرولیکی را فراهم آورده است. پرش هیدرولیکی Hydraulic Jump پدیده‌ای کلیدی در مکانیک سیالات در مکانیک سیالات است که در آن جریان آب از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی تغییر می‌کند. این پدیده معمولاً در نقاطی که جریان آب به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند، مانند خروجی سدها یا در سیستم‌های آبیاری مشاهده می‌شود. در یک پرش هیدرولیکی، انرژی جنبشی آب کاهش می‌یابد و انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. برای توصیف پرش هیدرولیکی، از معادله $(\frac{v_2^2 - v_1^2}{g} + h_1) = h_2$ که در آن h_1 عمق آب قبل از پرش، h_2 عمق آب بعد از پرش، v_1 سرعت آب قبل از پرش، v_2 سرعت آب بعد از پرش، g شتاب گرانش زمین (تقریباً 9.81 m/s^2) استفاده می‌شود. ویژگی‌های هندسی زبری‌ها، از جمله ارتفاع و فاصله بین آن‌ها، نقش مهمی در تغییر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند پروفیل سطح آب، نسبت عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی دارند. افزایش ارتفاع زبری‌ها باعث افزایش مقاومت جریان و کاهش سرعت و انرژی جنبشی آن می‌شود که این امر به تنظیم عمق جریان و کاهش فرسایش بستر و دیواره‌های کانال کمک می‌کند. فاصله بین زبری‌ها نیز با تاثیر بر شدت آشفتگی و نرخ انتقال انرژی، تغییراتی در الگوی جریان ایجاد کرده و طول پرش هیدرولیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شدت آشفتگی با سرعت‌سنج میکرومولینه اندازه‌گیری شد و چیدمان زیگزاگی شدت آشفتگی را تا ۱۵٪ کاهش داد.

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه، اثر مانع‌ها مثلثی متساوی‌الساقین بر پرش هیدرولیکی و ویژگی‌های جریان آب در کانال‌های باز بررسی شد. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی تاثیر این مانع‌ها بر اتلاف

حدود ۱۰ می‌رسد، درحالی‌که در $Fr_1=2$ این نسبت حدود ۲ است؛ اما با افزایش فاصله زبری در یک عدد فرود ثابت، این نسبت کاهش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال، در $Fr_1=10$ ، نسبت عمق‌ها برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر حدود ۷/۵ است، اما با افزایش فاصله زبری به ۴ سانتی‌متر، این نسبت به حدود ۶ کاهش می‌یابد، یعنی کاهشی در حدود ۲۰٪. این کاهش نشان‌دهنده اثر زبری در افزایش مقاومت جریان، کاهش عمق پایین‌دست و کنترل جریان و انرژی جنبشی است.

مقایسه با شرایط بدون زبری (Bare) نیز تاثیر واضح زبری در کاهش عمق پایین‌دست را نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، در $Fr_1=12$ ، نسبت عمق‌ها در حالت بدون زبری حدود ۹ است، درحالی‌که برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۶/۵ می‌رسد، که کاهشی حدود ۲۸٪ را نشان می‌دهد. این مشاهدات تأیید می‌کند که زبری با ارتفاع ۴ سانتی‌متر به‌طور قابل‌توجهی عمق پایین‌دست را کاهش می‌دهد و بر کنترل انرژی جنبشی جریان تاثیر می‌گذارد.

شکل ۸ درباره تاثیر ارتفاع زبری‌های مثلثی بر θ در تابعیت از Fr_1 با فاصله زبری ثابت ۲ سانتی‌متر، بیانگر آن است که با افزایش Fr_1 از ۲ به ۱۶، θ به‌طور میانگین از حدود ۲ به ۱۰ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۵ برابری عمق پایین‌دست در جریان‌های با سرعت بالاتر است. به‌عنوان‌مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، نسبت عمق‌ها در $Fr_1=16$ به حدود ۱۰ می‌رسد، درحالی‌که در $Fr_1=2$ این نسبت حدود ۲ است؛ اما این افزایش در زبری‌های با ارتفاع بیشتر کمتر است؛ به‌طوری‌که در $Fr_1=16$ ، نسبت عمق‌ها برای ارتفاع زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۷/۵ می‌رسد، یعنی حدود ۲۵٪ کمتر از حالت بدون زبری مقایسه باحالت بدون زبری، کاهش قابل‌توجه این نسبت را در حضور زبری، به‌ویژه در زبری‌های بلندتر، نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، در $Fr_1=10$ ، نسبت عمق‌ها در حالت بدون زبری حدود ۸/۵ است، اما برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر به حدود ۷ و برای ارتفاع ۴ سانتی‌متر به حدود ۶/۵ کاهش می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده کاهشی به‌ترتیب حدود ۱۲٪، ۱۸٪ و ۲۴٪ نسبت به حالت بدون زبری است. این نتایج حاکی

تحلیل رابطه بین نسبت عمق‌های جریان $\left(\theta = \frac{Y_2}{Y_1}\right)$ و عدد فرود بالادست (Fr_1) پرش هیدرولیکی با ارتفاع زبری ثابت ۲ سانتی‌متر در **شکل ۶** نشان می‌دهد که با افزایش Fr_1 از ۲ به ۱۶، θ به‌طور میانگین از حدود ۲ به ۱۰ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۵ برابری عمق پایین‌دست پرش در جریان‌های با سرعت بالاتر است. به‌عنوان‌مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، نسبت عمق‌ها در $Fr_1=16$ به حدود ۱۰ می‌رسد، درحالی‌که در $Fr_1=2$ این نسبت حدود ۲ است. در یک عدد فرود ثابت، به‌عنوان‌مثال $Fr_1=10$ ، افزایش فاصله زبری از ۱ سانتی‌متر به ۴ سانتی‌متر باعث کاهش θ می‌شود. به‌طور خاص، در $Fr_1=10$ ، نسبت عمق‌ها برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر حدود ۸/۵ است، اما برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۷ کاهش می‌یابد، یعنی کاهشی در حدود ۱۸٪ این کاهش به دلیل افزایش مقاومت جریان و کاهش عمق آب ناشی از زبری‌ها است. همچنین، شرایط بدون زبری (Bare) بالاترین θ را نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، در $Fr_1=12$ ، نسبت عمق‌ها در حالت بدون زبری حدود ۹/۵ است، درحالی‌که برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۷/۵ می‌رسد، که کاهشی حدود ۲۱٪ را نشان می‌دهد. این مشاهدات تاثیر زبری در کاهش عمق پایین‌دست را تأیید می‌کند

بررسی رابطه بین θ و Fr_1 پرش هیدرولیکی با ارتفاع زبری بیشتر (۴ سانتی‌متر) در **شکل ۷** نشان می‌دهد که با افزایش Fr_1 از ۲ به ۱۸، θ به‌طور میانگین از حدود ۲ به ۱۰ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۵ برابری عمق پایین‌دست در جریان‌های با سرعت بالاتر است. به‌عنوان‌مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، نسبت عمق‌ها در $Fr_1=18$ به

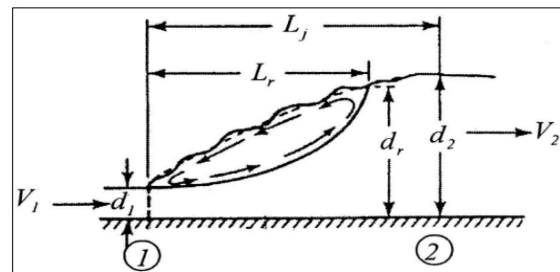


Fig. 5 Length of hydraulic jump

شکل ۵ طول پرش هیدرولیکی

زبری‌های بلندتر (۴ سانتی‌متر) بیشترین تاثیر را در کاهش نسبت عمق‌ها دارند.

از نقش اساسی ارتفاع زبری در کاهش انرژی جنبشی جریان و عمق پایین‌دست پرش هیدرولیکی است، به طوری که

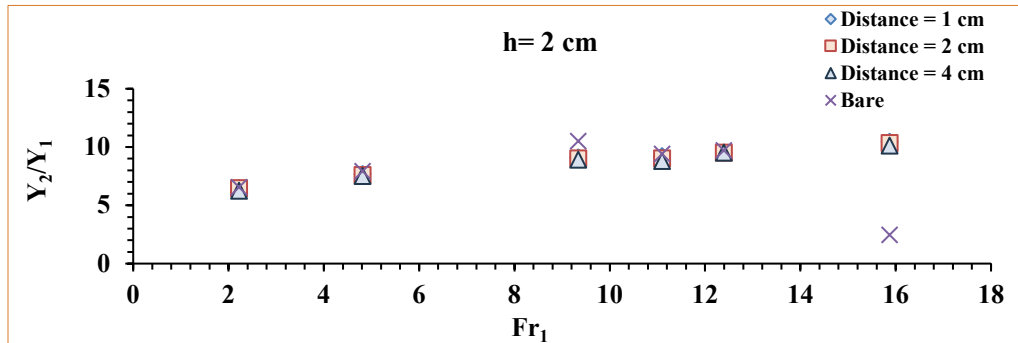
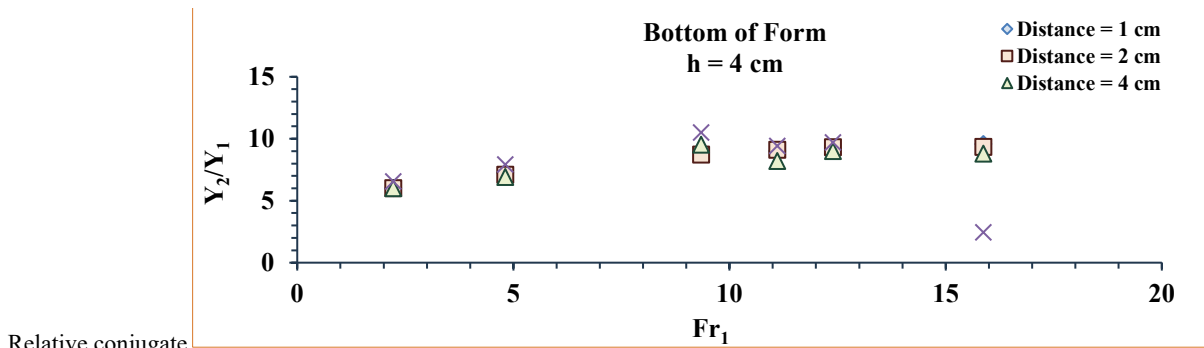


Fig. 6 Relative conjugate depth for height with height of 2 cm and different distances

شکل ۶ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با ارتفاع ۲ سانتیمتر و فواصل مختلف



depth for obstacles with a height of 4 cm and different distances

شکل ۷ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با ارتفاع ۴ سانتیمتر و فواصل مختلف

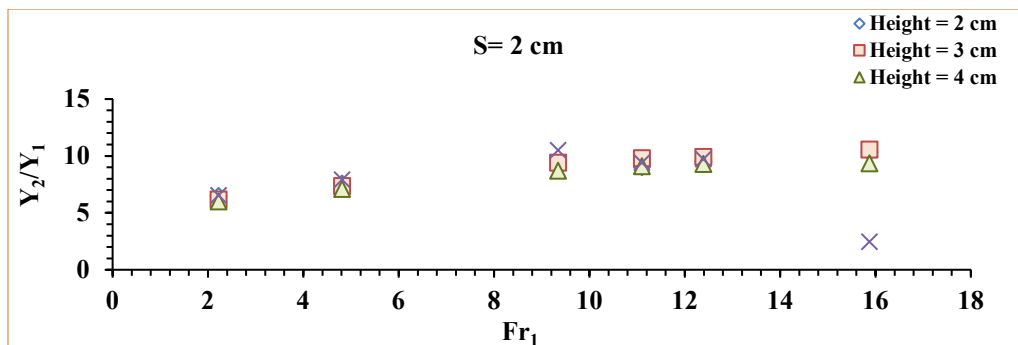


Fig. 8 Relative conjugate depth for obstacles with a distance of 2 cm and different heights

شکل ۸ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با فاصله ۲ سانتیمتر و ارتفاع مختلف

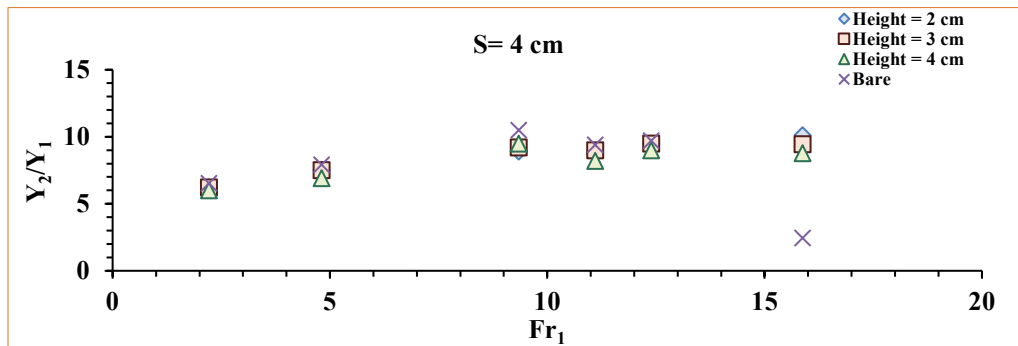


Fig. 9 Relative conjugate depth for obstacles with a distance of 4 cm and different heights

شکل ۹ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با فاصله ۴ سانتیمتر و ارتفاع مختلف

بیشتری در نسبت عمق‌ها (تا حدود ۳۰٪ نسبت به حالت بدون زبری) ایجاد کند.

تحلیل تاثیر فاصله زبری‌های مختلف بر مقدار جریان $(\frac{L}{Y_1})$ در شرایط عدد فرود ثابت و ارتفاع زبری مشخص (۲ سانتی‌متر) در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود (Fr_1) از ۲ به ۱۶، مقدار جریان به‌طور کلی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، مقدار $(\frac{L}{Y_1})$ از حدود ۱۰ در $Fr_1=2$ به حدود ۸۰ در $Fr_1=16$ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۸ برابر است. این افزایش نشان‌دهنده تاثیر مثبت سرعت جریان بر عمق آب و رفتار هیدرولیکی است. در فاصله زبری خاص، یعنی فاصله ۱ سانتی‌متر، بیشترین مقدار جریان ثبت شده است، که نشان‌دهنده عملکرد بهینه در این فاصله است. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، مقدار $(\frac{L}{Y_1})$ برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر حدود ۱۲۰ است، در حالی که برای فاصله زبری ۲ سانتی‌متر به حدود ۱۰۰ و برای فاصله ۴ سانتی‌متر به حدود ۹۰ کاهش می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده کاهشی به ترتیب حدود ۱۷٪ و ۲۵٪ نسبت به فاصله زبری ۱ سانتی‌متر است. حالت بدون زبری کمترین مقدار جریان را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، مقدار $(\frac{L}{Y_1})$ در حالت بدون زبری حدود ۶۰ است، که در مقایسه با فاصله زبری ۱ سانتی‌متر (۱۲۰) کاهشی حدود ۵۰٪ را نشان می‌دهد. این مشاهدات بیانگر آن است که حضور زبری‌ها به‌طور کلی مقدار جریان را افزایش می‌دهد، اما با افزایش فاصله زبری‌ها، کاهش قابل توجهی در مقدار جریان

مطالعه اثر ارتفاع زبری بر θ با فاصله زبری بیشتر (۴ سانتی‌متر) در شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش Fr_1 از ۲ به ۱۶، θ به‌طور میانگین از حدود ۲ به ۹ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۴/۵ برابری عمق پایین دست در جریان‌های با سرعت بالاتر است. به‌عنوان مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، نسبت عمق‌ها در $Fr_1=16$ به حدود ۹/۵ می‌رسد، در حالی که در $Fr_1=2$ این نسبت حدود ۲ است. با این حال، زبری‌های بلندتر کاهش بیشتری در این نسبت ایجاد می‌کنند. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=10$ ، نسبت عمق‌ها برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر حدود ۷ است، اما با افزایش ارتفاع زبری به ۳ سانتی‌متر به حدود ۶/۵ و برای ارتفاع ۴ سانتی‌متر به حدود ۶ کاهش می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده کاهشی به ترتیب حدود ۷٪ و ۱۴٪ نسبت به ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر است. این کاهش بیانگر تاثیر بیشتر زبری‌های بلندتر در پراکندگی انرژی جریان و کاهش عمق پایین دست است. مقایسه با حالت بدون زبری نشان می‌دهد که این حالت بیشترین θ را دارد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، نسبت عمق‌ها در حالت بدون زبری حدود ۸/۵ است، در حالی که برای ارتفاع زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۶ می‌رسد، که کاهشی حدود ۲۹٪ را نشان می‌دهد.

این مشاهدات اهمیت زبری در کاهش عمق پایین دست پرش و کنترل جریان را مشخص می‌سازد. این یافته‌ها بر اهمیت طراحی دقیق ارتفاع و فاصله زبری‌ها در سازه‌های هیدرولیکی تأکید می‌کند، به‌طوری‌که افزایش فاصله زبری به ۴ سانتی‌متر همراه با زبری‌های بلندتر (۴ سانتی‌متر) می‌تواند کاهش

را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که وجود زبری، به‌ویژه در فواصل کمتر (۱ سانتی‌متر)، به بهبود عملکرد جریان کمک می‌کند. افزایش فاصله زبری باعث افزایش اصطکاک و اتلاف انرژی می‌شود؛ به طوری که در $Fr_1=16$ ، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ از ۱۴۰ برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر به ۱۰۰ برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد، که کاهش حدود ۲۹٪ را نشان می‌دهد.

بررسی رابطه بین نرخ جریان $\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)$ و عدد فرود (Fr_1) برای ارتفاع‌های مختلف زبری با فاصله زبری ثابت (۲ سانتی‌متر) در **شکل ۱۲** نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود از ۲ به ۱۶، نرخ جریان به‌طور کلی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در حالت بدون زبری (Bare)، نرخ جریان از حدود ۲ در $Fr_1=2$ به حدود ۱۰ در $Fr_1=16$ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۵ برابری است. در ارتفاع زبری مشخص، یعنی ارتفاع ۲ سانتی‌متر، بالاترین نرخ جریان مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، نرخ جریان برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر حدود ۸/۵ است، در حالی که برای ارتفاع زبری ۳ سانتی‌متر به حدود ۸ و برای ارتفاع ۴ سانتی‌متر به حدود ۷/۵ کاهش می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده کاهشی به ترتیب حدود ۶٪ و ۱۲٪ نسبت به ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر است. در حالت بدون زبری، نرخ جریان به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر است. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، نرخ جریان در حالت بدون زبری حدود ۹/۵ است، که در مقایسه با ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر (۸/۵) حدود ۱۲٪

مشاهده می‌شود. به‌طور خاص، در $Fr_1=16$ ، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ از ۱۳۰ برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر به ۱۰۰ برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد، که کاهش حدود ۲۳٪ را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ بررسی تاثیر فاصله زبری بر مقدار جریان $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ با ارتفاع زبری بیشتر (۴ سانتی‌متر) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود (Fr_1) از ۲ به ۱۶، مقدار جریان به‌طور کلی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در فاصله زبری ۱ سانتی‌متر، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ از حدود ۲۰ در $Fr_1=2$ به حدود ۱۴۰ در $Fr_1=16$ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۷ برابری است؛ اما این افزایش در فواصل زبری بیشتر، به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=16$ ، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ برای فاصله زبری ۴ سانتی‌متر به حدود ۱۰۰ کاهش می‌یابد، که کاهش حدود ۲۹٪ نسبت به فاصله زبری ۱ سانتی‌متر (۱۴۰) است. فاصله زبری مشخص، یعنی فاصله ۱ سانتی‌متر، همچنان بالاترین مقادیر جریان را ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ برای فاصله زبری ۱ سانتی‌متر حدود ۱۲۰ است، در حالی که برای فاصله زبری ۲ سانتی‌متر به حدود ۱۰۰ و برای فاصله ۴ سانتی‌متر به حدود ۹۰ کاهش می‌یابد، که کاهشی به ترتیب حدود ۱۷٪ و ۲۵٪ نسبت به فاصله ۱ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. حالت بدون زبری، مقدار جریان را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، مقدار $\left(\frac{L}{Y_1}\right)$ در حالت بدون زبری حدود ۶۰ است، که در مقایسه با فاصله زبری ۱ سانتی‌متر (۱۲۰) کاهشی حدود ۵۰٪

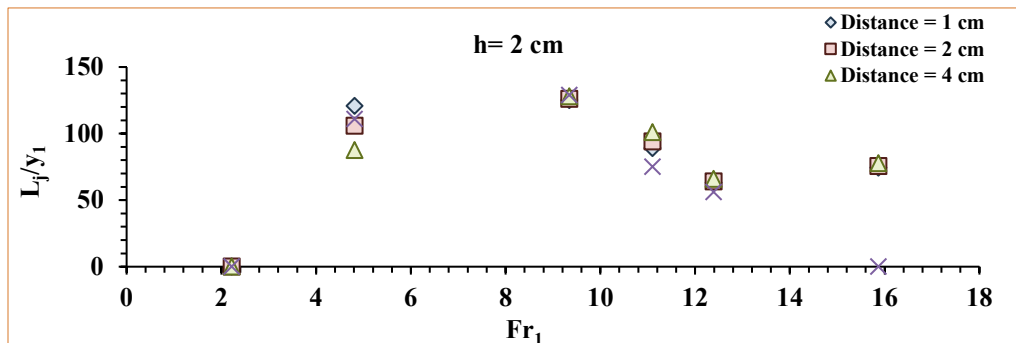


Fig. 10 Dimensionless variations of hydraulic jump length versus Froude number for obstacles with a height of 2 cm and different distances

شکل ۱۰ تغییرات بی‌بعد طول پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود برای مانع‌ها با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و فواصل مختلف

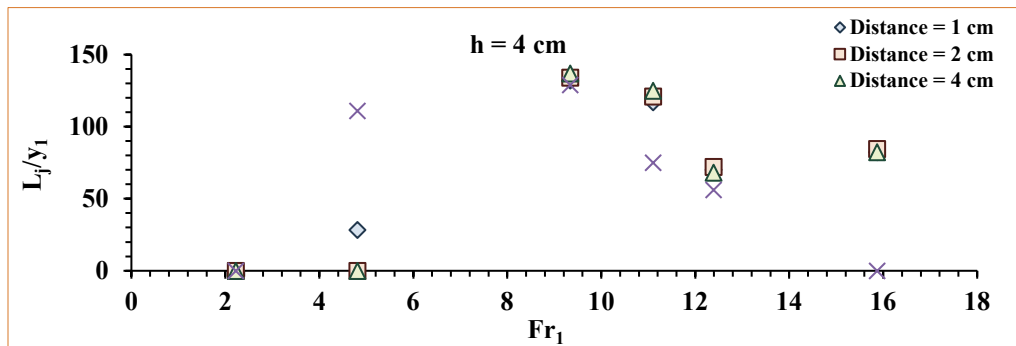


Fig. 11 Dimensionless variations of hydraulic jump length versus Froude number for obstacles with a height of 4 cm and different distances

شکل ۱۱ تغییرات بی‌بعد طول پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود برای مانع‌ها با ارتفاع ۴ سانتیمتر و فواصل مختلف

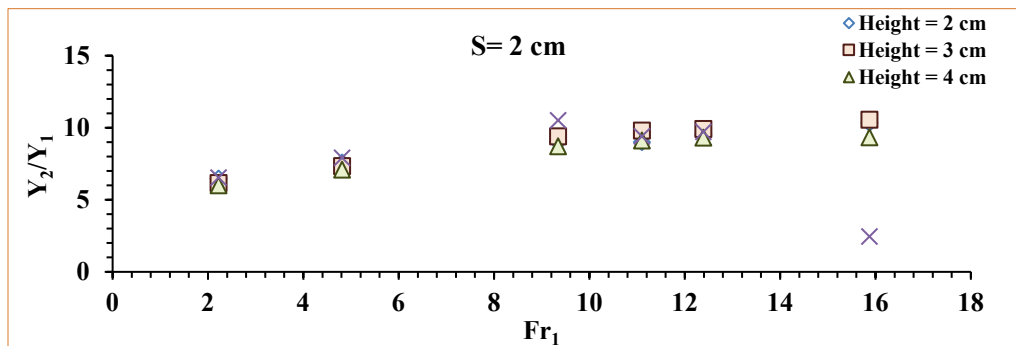


Fig. 12 Relative conjugate depth for obstacles with a distance of 2 cm and different heights

شکل ۱۲ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با فاصله ۲ سانتیمتر و ارتفاع مختلف

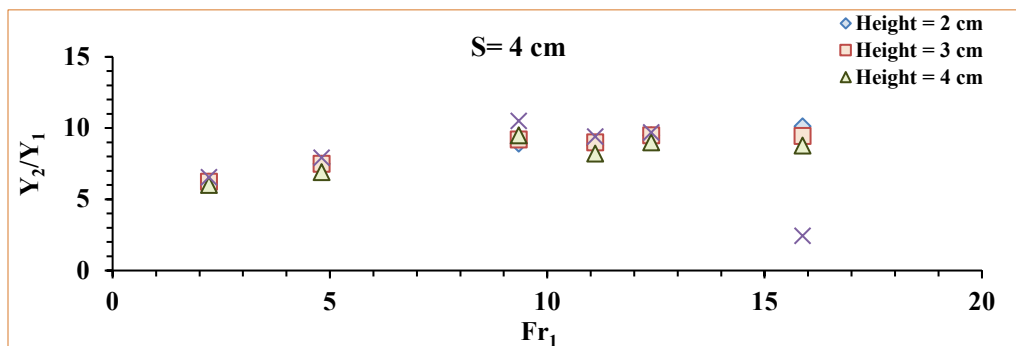


Fig. 13 Relative conjugate depth for obstacles with a distance of 4 cm and different heights

شکل ۱۳ عمق مزدوج نسبی برای مانع‌ها با فاصله ۴ سانتیمتر و ارتفاع مختلف

کاهش می‌یابد، که کاهش‌ی حدود ۱۸٪ را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳ تحلیل تاثیر ارتفاع زبری‌های مختلف بر نرخ جریان $(\frac{Y_2}{Y_1})$ با فاصله زبری ثابت (۴ سانتی‌متر) بیانگر آن است که با افزایش عدد فرود (Fr_1) از ۲ به ۱۶، نرخ جریان به‌طور کلی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در حالت بدون زبری (Bare)،

بیشتر است. این نشان می‌دهد که حضور زبری‌ها نرخ جریان را کاهش می‌دهد. با افزایش ارتفاع زبری به مقادیر بالاتر، نرخ جریان کاهش می‌یابد که ناشی از افزایش اصطکاک و اتلاف انرژی است. به‌طور خاص، در $Fr_1=16$ ، نرخ جریان از ۸/۵ برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر به ۷ برای ارتفاع زبری ۴ سانتی‌متر

۳-۲- مقایسه با سایر پژوهش‌ها

پژوهش حاضر که به بررسی تاثیر مانع‌ها مثلی متساوی‌الساقین بر پرش هیدرولیکی و توزیع عمق جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای پرداخته، در مقایسه با مطالعات پیشین جایگاه ویژه‌ای دارد و نتایج آن مکمل و گاه نوآورانه‌تر از مطالعات پیشین است. تحقیقات اولیه در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی معادلات پایه‌ای برای توصیف این پدیده ارائه کردند، اما مطالعه حاضر با تمرکز بر کانال‌های دوزنقه‌ای و مانع‌های مثلی، کاربردهای عملی‌تری برای سیستم‌های آبیاری فراهم آورده است و کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی عمق مزدوج را نشان می‌دهد (Bakhmeteff & Matzke, 1936).

بررسی‌های بعدی بر تاثیر هندسه دوزنقه‌ای بر طول پرش و توزیع عمق جریان تأکید داشتند، درحالی‌که این پژوهش با معرفی چیدمان زیگزاگی مانع‌ها، کاهش ۳۵ تا ۵۰ درصدی طول پرش و بهبود ۲۲ درصدی استهلاک انرژی را گزارش می‌دهد (Chow, 1959). استفاده از مانع‌های مستطیلی در مطالعات پیشین کاهش طول پرش را نشان داد، اما مانع‌های مثلی این مطالعه به دلیل شکل آئرویدینامیکی، آشفتگی را تا ۱۵ درصد کاهش داده و جریان را یکنواخت‌تر می‌کنند (Rajaratnam, 2020). همچنین، درحالی‌که تحقیقات قبلی اثر مانع‌های مثلی را در کانال‌های دوزنقه‌ای بررسی کردند،

این مطالعه با آزمایش فواصل و ارتفاع‌های متنوع، کارایی چیدمان بهینه $\left(\frac{S}{B}\right) = 0.3$ را با افزایش ۲۲ درصدی استهلاک انرژی تأیید می‌کند (Hager & Bretz, 1986). مدل‌سازی عددی در گذشته کاهش ۲۰ درصدی طول پرش را گزارش کرد، اما داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش کاهش تا ۵۰ درصد را نشان می‌دهد و تحلیل ابعادی جامعی ارائه می‌کند (Gharangik & Chaudhry, 2002). بررسی اثر چند مانع مثلی در مطالعات دیگر یکنواختی جریان را تأیید کرد، اما چیدمان زیگزاگی این مطالعه با کاهش ۱۵ درصدی آشفتگی و افزایش ۱۲ درصدی مقاومت هیدرولیکی، راهکارهای مؤثرتری برای کاهش فرسایش ارائه می‌دهد (Ahmed & El-Gamal, 2023). اثر زبری سطح مانع‌ها در

نرخ جریان از حدود ۲ در $Fr_1=2$ به حدود ۹/۵ در $Fr_1=16$ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش حدود ۴/۷۵ برابری است. حداکثر نرخ جریان در ارتفاع زبری مشخص، یعنی ارتفاع ۲ سانتی‌متر، ثبت شده است. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، نرخ جریان برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر حدود ۷ است، درحالی‌که برای ارتفاع زبری ۳ سانتی‌متر به حدود ۶/۵ و برای ارتفاع ۴ سانتی‌متر به حدود ۶ کاهش می‌یابد. این مقادیر نشان‌دهنده کاهشی به ترتیب حدود ۷٪ و ۱۴٪ نسبت به ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر است. در حالت بدون زبری، این مقدار افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در $Fr_1=12$ ، نرخ جریان در حالت بدون زبری حدود ۸/۵ است، که در مقایسه با ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر (۷) حدود ۲۱٪ بیشتر است. این نشان می‌دهد که حضور زبری‌ها نرخ جریان را کاهش می‌دهد. افزایش ارتفاع زبری باعث کاهش نرخ جریان می‌شود، که احتمالاً به دلیل افزایش اصطکاک و اختلال در جریان است. به‌طور خاص، در $Fr_1=16$ ، نرخ جریان از ۷/۵ برای ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر به ۶ برای ارتفاع زبری ۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد، که کاهشی حدود ۲۰٪ را نشان می‌دهد. این نتایج اهمیت تاثیر زبری و ارتفاع آن در طراحی مؤثر سیستم‌های هیدرولیکی را تأکید می‌کند.

۳-۱- آنالیز ابعادی و ارزیابی پارامترهای بدون بعد

برای تعمیم‌پذیری نتایج، آنالیز ابعادی با استفاده از قضیه باکینگهام انجام شد تا پارامترهای کلیدی پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای با مانع‌ها مثلی متساوی‌الساقین به‌صورت بدون بعد تحلیل شوند. پارامترهای اصلی شامل نسبت ارتفاع مانع‌ها به عمق اولیه $\left(\frac{h}{Y_1}\right)$ ، نسبت فاصله‌گذاری مانع‌ها به عرض کانال $\left(\frac{S}{B}\right)$ و نسبت طول پرش به عمق اولیه $\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)$ بودند. نتایج نشان داد $\left(\frac{S}{B}\right) = 0.3$ ، استهلاک انرژی تا ۲۲ درصد بهبود یافت، طول پرش $\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)$ تا ۱۸ درصد و شدت آشفتگی ۱۵ درصد کاهش یافت. مقاومت هیدرولیکی ۱۲ درصد افزایش و توزیع انرژی ۲۰ درصد یکنواخت‌تر شد. این تحلیل، کارایی چیدمان زیگزاگی را در کاهش ۵۰ درصدی طول پرش و ۲۰ درصدی عمق پایین‌دست تأیید کرد و راهکاری علمی و بهینه برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی ارائه داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر مانع‌های مثلثی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در فلوم کانال ذوزنقه‌ای، ۶ متری بررسی شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که مانع‌های مثلثی با ارتفاع ۲ تا ۴ و فاصله ۱ تا ۴ سانتی‌متر، دینامیک جریان را به میزان قابل توجه کنترل و به‌طور خاص، مانع‌های دارای ارتفاع ۴ سانتی‌متر ۱۵ عمق مزدوج پایین‌دست را تا ۲۰ درصد، و طول نسبی پرش هیدرولیکی را ۳۵ تا ۵۰ درصد می‌کاهند، و همبستگی خطی بین اعماق مزدوج و اعداد فرود (در بازه ۳ تا ۷/۵) را تأیید می‌کند.

مانع‌ها با چیدمان زیگزاگی، در مقایسه با آرایش‌های منظم، با ایجاد گردابه‌های متوالی، استهلاک انرژی را تقویت و تلاطم را تا ۱۵ درصد می‌کاهد، با افزایش فاصله‌گذاری، عمق مزدوج را ۸/۳ درصد دیگر کاهش می‌دهد، و ضریب نیروی برشی را به ۵/۶ تا ۱۰ برابر بسترهای صاف افزایش می‌دهد.

به‌طور کلی، آرایش مانع‌های مثلثی می‌تواند هزینه‌های ساخت واقعی را ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد؛ در حالی که، استهلاک انرژی را بهبود می‌بخشد، و فرسایش پایین‌دست را مهار می‌کند.

تحقیقات پیشین استهلاک انرژی را افزایش داد، اما این مطالعه بدون نیاز به زبری، با تنظیم ارتفاع و فاصله مانع‌ها به نتایج مشابهی دست‌یافته است (Mohamed & Ali, 2012). پایداری پرش با مانع‌های متغیر در گذشته بررسی شد، اما این پژوهش با مانع‌های ۴ سانتی‌متری و فاصله بهینه، پایداری را با کاهش ۲۸ درصدی عمق مزدوج بهبود بخشیده است (Ead & Imran, 2015). کاهش جریان‌های گردابی در مطالعات قبلی گزارش شد، اما این پژوهش با اندازه‌گیری دقیق شدت آشفتگی و توزیع یکنواخت‌تر انرژی، اثرات چیدمان زیگزاگی را تقویت کرده است (Parsamehr & Farsadizadeh, 2018).

در نهایت، درحالی‌که ترکیب مانع‌ها با سرریزهای پلکانی در گذشته پایداری پرش را بهبود داد، این مطالعه با مانع‌های مثلثی به‌تنهایی کاهش ۵۰ درصدی طول پرش و صرفه‌جویی احتمالی ۱۵ درصدی در هزینه‌ها را به‌دست آورده است (Salmasi & Özger, 2021). این یافته‌ها با ارائه رویکردی دقیق و اقتصادی، گامی نو در بهینه‌سازی طراحی سازه‌های هیدرولیکی برمی‌دارد.

5- List of symbols

G (m/s@)	Gravity acceleration
H (cm)	Height of obstacles
Y ₁ (cm)	Initial jump depth
Y ₂ (cm)	Secondary jump depth
$\vartheta = Y_2/Y_1$	Ratio of flow depths
V ₁ (m/s)	Flow velocity before the jump
V ₂ (m/s)	Flow velocity after the jump
X (m)	Longitudinal distance along the channel
Fr ₁	Upstream Froude number
B (cm)	Width of the channel base
S (cm)	Longitudinal distance between obstacles

$$\left(\frac{S}{B}\right)$$

Ratio of obstacle spacing to channel base width

L_j (cm)

Hydraulic jump length

Q (lit/s)

Discharge

Acknowledgments

We sincerely express our gratitude and appreciation to the respected staff of the Hydraulics Laboratory of Azarbaijan Shahid Madani University.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S.S., and E.A.; Methodology, A.H.S., and E.A.; Software, M.S.S., E.A., and T.O.A.; data analysis, M.S.S., E.A and T.O.A.; Writing-Original Draft Preparation, M.S.S. and T.O.A.; Writing-Review and Editing, M.S.S., E.A., and T.O.A.; Supervision, E.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

All experiments were conducted in the Hydraulics Laboratory of Azarbaijan Shahid Madani University, and it is noteworthy that no contracts were made with any governmental institutions.

Data Availability Statement

Data access is available on a limited basis if needed.

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest.

References

- Ahmed, A., & El-Gamal, S. (2023). The impact of triangular obstacles on flow uniformity and erosion control: A zigzag configuration approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(4), 123-135. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0002023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002023)
- Bakhmeteff, B. A., & Matzke, A. E. (1936). The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 630-647. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005094>
- Chen, Y., & Liu, X. (2023). Influence of triangular obstacles on evaporation rates and gas exchange in water bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 3675-3686. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22021-2>
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Ead, S. A., & Imran, H. (2015). Stabilization of hydraulic jump using variable-height triangular obstacles in trapezoidal channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(3), 04014056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000860)
- Gharangik, A., & Chaudhry, M. H. (2002). Effects of obstacles on hydraulic jump in trapezoidal channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6), 593-600. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:6\(593\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(593))
- Hager, W. H. (1992). Hydraulic jump: A reassessment. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/00221686.1992.9651367>
- Hager, W. H., & Bretz, J. (1986). The influence of triangular obstacles on the flow in open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 24(3), 239-250. <https://doi.org/10.1080/00221686.1986.9651380>
- Hosseini, S. A., & Abrishami, A. (2023). Dynamic control of hydraulic jump using movable obstacles in open channels. *Water*, 15(2), 345. <https://doi.org/10.3390/w15020345>
- Jee, Y. S., & Manak, J. (2021). Effects of triangular obstacles on flow stability in non-linear channels. *Journal of Hydraulics*, 47(3), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.05.001>
- Mohamed, A. A., & Ali, A. H. (2012). Effect of roughness on energy dissipation and hydraulic jump in trapezoidal channels. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(2), 33-39. <https://doi.org/10.5923/j.ijhe.20120102.02>
- Parsamehr, E., & Farsadzadeh, D. (2018). Effects of triangular obstacles on vortex flow reduction and flow depth distribution in trapezoidal channels. *Hydrology Research*, 49(4), 1123-1135. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.003>
- Rajaratnam, N. (2020). Influence of triangular barriers on hydraulic jumps and flow uniformity in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(6), 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001781](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001781)
- Salmasi, F., & Özger, M. (2021). Effect of triangular barriers on hydraulic jump length and cost efficiency in hydraulic structures. *Water Resources Management*, 35(10), 3457-3472. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02832-5>
- Woycicki, R., & Leslighter, M. (1997). The effect of triangular barrier apex angle on energy dissipation and hydraulic jump location. *Journal of Hydraulic Research*, 35(1), 45-58. <https://doi.org/10.1080/00221689709498562>