



Effect of Triangular Zigzag Blocks on Hydraulic Jump Characteristics and Energy Dissipation in a Rectangular Stilling Basin

Ebrahim Asadi^{1*}, Sonia Mohammadzadeh², Amin Seyedzadeh³

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

M.Sc. Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Fasa University, Fasa, Iran.

Received: May 21, 2025

Accepted: September 22, 2025

Revised: September 7, 2025

Published online: September 20, 2025

* Corresponding Author's Email: Asadi@azaruniv.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Energy dissipation,
Hydraulic jump,
Stilling basin,
Triangular blocks,
Zigzag arrangement.

Introduction

Hydraulic jumps are fundamental phenomena in hydraulic engineering, serving as critical mechanisms for dissipating excess kinetic energy in supercritical flows. These abrupt transitions from high-velocity, shallow-depth regimes to slower, deeper states are critical for protecting downstream structures such as spillways, dams, and irrigation channels from erosion and structural damage. The efficiency of energy dissipation during a hydraulic jump directly influences the design, durability, and cost-effectiveness of hydraulic systems. Stilling basins, which are engineered structures designed to stabilize hydraulic jumps, often incorporate roughness elements like baffle blocks to enhance turbulence and energy dissipation. However, traditional designs with smooth beds or uniform block arrangements may fail to optimize performance, leading to oversized basins, higher construction costs, or insufficient energy dissipation under variable flow conditions. This study addresses these limitations by investigating the effects of non-uniform, zigzag-arranged triangular blocks on hydraulic jump characteristics. The primary objectives of this study are threefold: Quantify Performance Metrics: Evaluate the effects of triangular blocks with varying lengths (4.5 cm, 5.5 cm, and 6 cm), installation angles (30°, 45°, and 60°), and roughness densities (10%, 12.2%, and 13.3%) on key hydraulic jump characteristics, including sequent ratio, jump length, and energy dissipation efficiency. Identify Optimal Configuration: Determine the block geometry and arrangement that maximize energy dissipation while minimizing basin dimensions. Economic and Practical Implications: Develop actionable design guidelines for cost-effective stilling basins that achieve high hydraulic performance with adhering to material and construction constraints.

Materials and Methods

The experimental setup consisted of a 6 m long, 0.5 m wide, and 0.6 m high rectangular flume, with a steel bed and transparent Plexiglas sidewalls to facilitate flow visualization. A closed-loop recirculating system provided steady water supply, while discharge was continuously monitored using an ultrasonic flowmeter with $\pm 1\%$ accuracy. Supercritical inflow was generated by a sharp-edged sluice gate fixed at a 1.5 cm opening, yielding initial Froude numbers (Fr_1) ranging from 6.8 and 9.5. Downstream polypropylene tubes (2–12 cm diameter) were strategically placed perpendicular to the flow to control hydraulic jump location and ensure flow regime stability. Triangular blocks were fabricated from 1 cm thick Plexiglas sheets, featuring right-angled triangular profiles with a uniform height of 2 cm and base lengths of 4.5 cm, 5.5 cm,

How to cite:

Asadi, E., Mohammadzadeh, S., Seyedzadeh, A. Effect of Triangular Zigzag Blocks on Hydraulic Jump Characteristics and Energy Dissipation in a Rectangular Stilling Basin. *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35 (3):21-35.

<https://doi.org/10.22034/hws.2025.67444.1026>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



and 6 cm. The blocks were arranged in three rows spaced 10 cm apart, with each row oriented at 30°, 45°, or 60° relative to the channel centerline. Roughness density, defined as the ratio of total projected block area to stilling basin floor area, was 10%, 12.2%, and 13.3% for the respective base lengths. Each row comprised 15 blocks, yielding a total of 45 units per configuration. A smooth-bed control case was tested to establish baseline hydraulic jump characteristics. Dimensional analysis using the Buckingham π -theorem was employed to reduce governing parameters (block geometry, incoming Froude number Fr_1 , and Reynolds number) to dimensionless groups, facilitating systematic performance evaluation of block performance across the tested flow regimes. The effectiveness of each configuration was assessed by measuring sequent depth ratio (y_2/y_1), relative jump length (L_j/y_1), and relative energy dissipation ($\Delta E/E_1$), with all results compared against the smooth-bed reference condition.

Results and Discussion

Sequent Depth Reduction

The 12.2% roughness density configuration (5.5 cm base blocks at 45°) produced the greatest sequent depth reduction of 13%–24% relative to the smooth-bed case, with maximum effectiveness at higher incoming Froude numbers ($Fr_1 > 7$). This marked reduction in sequent depth ratio (y_2/y_1) lowers tailwater elevation, enabling shorter and more cost-effective stilling basin sidewalls. The 13.3% density arrangement (6 cm blocks at 30°) exhibited minimal influence at $Fr_1 < 6.8$, but performance improved progressively with increasing Fr_1 , achieving 12%–15% reduction at $Fr_1 = 9.5$. The 10% density configuration (4.5 cm blocks at 60°) displayed the lowest efficacy, yielding only 3%–10% sequent depth reduction and underscoring the critical role of intermediate block dimensions and optimal alignment angles in hydraulic jump control.

Jump Length Optimization

The 12.2% roughness density configuration (5.5 cm blocks at 45°) shortened jump length by 16%–24% across the tested Froude number range ($Fr_1 = 5.6$ – 6.8), consistently outperforming both the lower-density (10%) and higher-density (13.3%) arrangements. At $Fr_1 = 5.6$, jump length decreased from 0.62 m (smooth bed) to 0.47 m (12.2% density), corresponding to a 24% reduction in required stilling basin length. Paradoxically, the 13.3% configuration (6 cm blocks at 30°) increased jump length by 10%–15% at lower Froude numbers values ($Fr_1 = 6.8$ – 7.5), likely due to excessive turbulence disrupting jump cohesion and delaying transition to subcritical flow.

Energy Dissipation Efficiency

The 12.2% roughness density configuration achieved an average increase in relative energy dissipation ($\Delta E/E_1$) of 13.4% compared with the smooth-bed case, demonstrating the superior ability of optimally arranged zigzag triangular blocks to generate turbulent vortices that effectively break down residual kinetic energy. The 13.3% density arrangement attained an average increase of 11.9% at higher Froude numbers ($Fr_1 > 7.5$) but proved less effective at lower inflows, reflecting the sensitivity of excessive roughness to flow regime. The 10% density configuration lagged considerably, registering only 10.7% average increase and thereby emphasizing the necessity of balanced roughness density for maximizing energy dissipation efficiency within stilling basins.

Mechanisms of Performance Enhancement

Angled Block Arrangement

The 45° installation angle proved optimal for lateral flow redirection, generating strong cross-channel secondary currents and coherent roller vortices that significantly intensified turbulence intensity without compromising hydraulic jump stability or cohesion.

Zigzag Pattern

The staggered row spacing of 10 cm effectively disrupted coherent longitudinal flow structures, suppressing the formation of large-scale spanwise eddies that would elongate the hydraulic jump.

Block Geometry

The right-angled triangular profiles significantly minimized flow separation and form drag compared to rectangular or cylindrical baffle elements, thereby reducing undesirable head loss upstream of the hydraulic jump.

Conclusion

Triangular zigzag blocks with a 12.2% roughness density (5.5 cm base length, 45° orientation) emerged as the optimal design for rectangular stilling basins. This configuration reduced sequent depth ratio (y_2/y_1) by up to 24%, shortened relative jump length (L_j/y_1) by 24%, and increased relative energy dissipation ($\Delta E/E_1$) by an average of 13.4% compared with the smooth-bed reference, significantly outperforming traditional smooth-bed and alternative block arrangements. These findings provide practical, actionable design for hydraulic engineers, enabling the development of significantly more compact, cost-effective stilling basins without compromising hydraulic performance. By substantially reducing basin length, sequent depth, and required sidewall height, the proposed zigzag triangular block system minimizes concrete volume, excavation, and long-term maintenance costs while enhancing structural resilience against high-energy supercritical flows. Future research should investigate hybrid stilling basin configurations combining zigzag blocks with complementary dissipative elements, such as end sills, or chute blocks, to further optimize energy dissipation across extended Froude number regimes and variable approach flow conditions.



تأثیر بلوک‌های مثلثی زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی در حوضچه آرامش مستطیلی

ابراهیم اسدی^{۱*}، سونیا محمدزاده^۲، امین سیدزاده^۳

۱-استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۲-دانشجوی فارغ التحصیل گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۳-استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه فسا.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

* نویسنده مسؤل: Asadi47e@gmail.com

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر نصب بلوک‌های مثلثی قائم‌الزاویه با آرایش زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی پرداخته است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با ابعاد ۶ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع، مجهز به سیستم جریان چرخشی و دریچه کشویی برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی انجام شد. بلوک‌های پلکسی‌گلاس با طول‌های ۴/۵، ۵/۵ و ۶ سانتی‌متر، ارتفاع ۲ سانتی‌متر، و زوایای نصب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور کانال، در سه ردیف با فاصله ۱۰ سانتی‌متر طراحی گردیدند. عمق اولیه و ثانویه، طول پرش و اتلاف انرژی با عمق سنج نقطه‌ای و دبی‌سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری شدند. نتایج نسبت به بستر صاف نشان داد که تراکم بلوک‌ها (۱۰، ۱۲/۲ و ۱۳/۳ درصد) به‌طور معناداری طول پرش و عمق ثانویه را کاهش و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد. آرایش بهینه بلوک‌ها با تراکم ۱۲/۲ درصد (طول ۵/۵ سانتی‌متر و زاویه نصب ۴۵ درجه) شناسایی شد که منجر به کاهش حداکثر ۲۴/۷ درصدی عمق ثانویه، ۲۴/۵ درصدی طول پرش و افزایش راندمان اتلاف انرژی نسبی به ۱۳/۴ درصد گردید. این یافته‌ها، کاربرد بلوک‌های مثلثی زیگزاگی با تراکم بهینه رابه‌عنوان راهکاری مؤثر در بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش کارایی هیدرولیکی حوضچه آرامش تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: آرایش زیگزاگی، اتلاف انرژی، بلوک‌های مثلثی، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش.

۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی به عنوان یکی از پدیده‌های بنیادین در مهندسی هیدرولیک، نقش کلیدی در کنترل و اتلاف انرژی جریان‌های فوق بحرانی ایفا می‌کند. این پدیده، که با تبدیل ناگهانی جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی همراه است، با افزایش چشمگیر عمق و کاهش سرعت جریان، انرژی جنبشی را عمدتاً به گرما تبدیل می‌نماید. ایجاد آشفتگی شدید و اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی، کاربرد حوضچه‌های آرامش را برای تثبیت این پدیده در سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، دریچه‌ها و کانال‌های انتقال آب ضروری می‌سازد. طراحی بهینه حوضچه‌های آرامش نه تنها هزینه‌های ساخت و نگهداری را کاهش می‌دهد، بلکه کارایی هیدرولیکی سازه را نیز ارتقا می‌بخشد.

حوضچه‌های آرامش به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: حوضچه‌های آرامش با بستر صاف و حوضچه‌های آرامش با بستر زیر. حوضچه‌های آرامش با بستر صاف معمولاً برای جریان‌های با عدد فرود کمتر از $2/5$ به کار می‌روند، در حالی که حوضچه‌های آرامش با بستر زیر برای جریان‌هایی با عدد فرود بیشتر از $4/5$ و انرژی جنبشی بالاتر مناسب هستند. علاوه بر این، حوضچه‌های آرامش می‌توانند به اشکال مستطیلی، دوزنقه‌ای یا با دیواره‌های واگرا طراحی شوند. انتخاب شکل حوضچه به عواملی نظیر میزان انرژی جنبشی جریان، عدد فرود (Fr)، محدودیت‌های فضایی و شرایط زمین‌شناسی محل اجرا بستگی دارد. به عنوان مثال، حوضچه‌های مستطیلی برای جریان‌های یکنواخت با اعداد فرود متوسط مناسب هستند، در حالی که حوضچه‌های دوزنقه‌ای یا واگرا برای کنترل بهتر جریان‌های پرانرژی و کاهش آشفتگی به کار می‌روند. مطالعات Peterka (1958) و Rajaratnam (1966) نشان داده‌اند که حوضچه‌های آرامش با دیواره‌های واگرا می‌توانند طول پرش را تا ۲۲ درصد کاهش دهند و اتلاف انرژی را تا ۳۰ درصد افزایش دهند. کاربرد بلوک‌ها در حوضچه‌های آرامش به منظور افزایش اتلاف انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی بسیار رایج است. مشخصات هندسی بلوک‌ها شامل شکل، ابعاد (طول، عرض و ارتفاع)، زاویه نصب و فاصله بین آن‌ها از عوامل مؤثر بر کنترل انرژی پرش هیدرولیکی به شمار می‌روند. بلوک‌ها می‌توانند به اشکال مکعبی، مستطیلی، مثلثی یا نیم‌استوانه‌ای طراحی شوند که هر یک تأثیر متفاوتی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی دارند.

Mohamed Ali (1991) نشان داد که بلوک‌های مکعبی و مستطیلی می‌توانند طول پرش هیدرولیکی را ۲۷ تا ۶۷ درصد کاهش دهند. Ead & Rajaratnam (2002) در بررسی تأثیر بستر موج‌دار بر پرش هیدرولیکی دریافتند که این نوع عمق

ثانویه پرش را بستر تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. Tokyay (2005) با مطالعه پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار نشان داد که ناهمواری‌های بستر، عمق ثانویه را تا ۲۰ درصد و طول پرش را به طور متوسط تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهند. Abbaspour et al. (2009) پرش هیدرولیکی روی بسترهای سینوسی با طول موج نسبی $0/286$ تا $0/625$ و عدد فرود اولیه $3/8$ تا $8/6$ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از کاهش عمق پایین دست و طول پرش نسبت به بستر کانال صاف بود. همچنین، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد برای بستر سینوسی $0/57$ و برای پرش استاندارد روی بستر تخت $0/16$ گزارش شد. Parsamehr & Hosseinzadehdalir (2013) نشان دادند که کاهش فاصله بین بلوک‌ها تا ۲ سانتی‌متر طول پرش را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد.

بلوک‌ها می‌توانند به صورت موازی، عمود یا با زوایای مختلف نسبت به جهت جریان نصب شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که نصب بلوک‌ها با زوایای 30° تا 45° درجه نسبت به جهت جریان، بیشترین تأثیر را در کاهش طول پرش و افزایش اتلاف انرژی دارد. به عنوان مثال، Eshkou et al. (2018) نشان دادند که نصب بلوک‌ها با زاویه 30° درجه می‌تواند طول پرش را تا ۳۵ درصد و عمق ثانویه پرش را تا ۱۶ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، محل نصب بلوک‌ها در حوضچه آرامش (ابتداء، وسط یا انتها) تأثیر متفاوتی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی دارد. نصب بلوک‌ها در وسط حوضچه، جریان‌های ثانویه و آشفتگی را افزایش می‌دهد، در حالی که نصب در انتهای حوضچه، پرش را تثبیت کرده و طول آن را کاهش می‌دهد. Habibzadeh et al. (2012) گزارش کردند که نصب بلوک‌ها در انتهای حوضچه آرامش، طول پرش را تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. Nettleton & McCorquodale (1989) حوضچه آرامش شعاعی با بلوک‌های اتلاف انرژی را بررسی کردند. آن‌ها زاویه شعاعی حوضچه آرامش را $6/75^\circ$ درجه در نظر گرفتند و بهترین فاصله نصب بلوک‌ها را برابر $r_1 + 0.5L_j$ (که r_1 فاصله شعاعی از محل تشکیل عمق اولیه پرش و L_j طول پرش است) تعیین نمودند.

Tajabadi et al. (2018) با مدل‌سازی حوضچه آرامش سد خدا آفرین، تأثیر زاویه آستانه انتهایی حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که آستانه انتهایی با زاویه 60° درجه و اتلاف انرژی ۶۲ درصد بهترین عملکرد را دارد. Pillai & Kansal (2022) تأثیر زاویه‌دار کردن وجه بالادست بلوک‌های قائم‌الزاویه در حوضچه آرامش USBR-III را مطالعه کردند. آن‌ها بلوک‌های با پلان مثلثی و پنج ضلعی با زوایای داخلی متفاوت را آزمایش نمودند.

مقایسه عملکرد این طرح نوین با طرح‌های متعارف. در نهایت، نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی حوضچه‌های آرامش، ارائه یک الگوی بهینه از نظر هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی این سازه‌ها کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر بلوک‌های مثلثی قائم‌الزاویه بر مشخصات هیدرولیکی پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی، از فلوم مستطیلی آزمایشگاه هیدرولیک بخش آب دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان با ابعاد ۶ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع استفاده شد. کف فلوم از جنس فولاد و دیواره‌ها از پلکسی‌گلاس شفاف بود تا مشاهده پروفیل سطح آب و الگوی جریان امکان‌پذیر باشد. تأمین جریان از سیستم چرخشی شامل سه مخزن صورت گرفت. مخزن زیرین مجهز به پمپ سانتریفیوژ، آب را به مخزن بالایی پمپاژ می‌کرد. مخزن هوایی (قطر ۰/۵ متر و ارتفاع ۲/۱ متر) پشت دریچه کشویی، هد ثابت آب را تأمین می‌نمود. آب پس از عبور از دریچه به فلوم وارد و در نهایت به مخزن انتهایی تخلیه می‌شد. این چیدمان، دبی و ارتفاع آب را در طول آزمایش‌ها ثابت نگه داشت. دبی جریان با فلومتر اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی و تنظیم عمق اولیه جریان، دریچه لبه‌تیز فلزی با عرض ۰/۵ متر و طول ۰/۶ متر در ابتدای فلوم نصب گردید (شکل ۱). بازشدگی دریچه در تمام آزمایش‌ها ۱/۵ سانتی‌متر ثابت در نظر گرفته شد تا عمق اولیه جریان در تمام آزمایش‌ها یکسان باشد. کنترل محل پرش هیدرولیکی با موانع لوله‌ای پلی‌پروپیلن (قطرهای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر، طول ۰/۵ متر) در انتهای فلوم انجام شد.

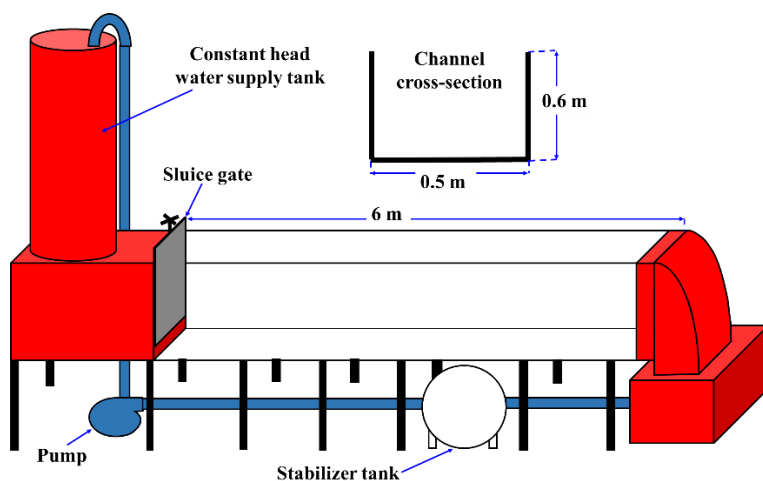
بلوک‌های مورد استفاده، بلوک‌های مثلثی قائم‌الزاویه از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱ سانتی‌متر، ارتفاع ۲ سانتی‌متر و طول پایه ۴/۵، ۵/۵ و ۶ سانتی‌متر بودند (جدول ۱). بلوک‌ها در زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور کانال، در سه ردیف با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر و در فاصله ۱ متر از دریچه بالادست به کف فلوم چسبانده شدند؛ به طوری که در هر ردیف ۱۵ قطعه و در مجموع ۴۵ قطعه نصب گردید (شکل ۲). عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی با عمق‌سنج نقطه‌ای (دقت ± 0.1 میلی‌متر) نصب شده بر روی ریلی متحرک اندازه‌گیری شد. پس از تثبیت پرش، کمترین عمق به عنوان عمق اولیه تعیین گردید. طول پرش هیدرولیکی به عنوان فاصله از نقطه شروع پرش تا محل حداقل تلاطم سطح آب، با متر نواری

نتایج حاکی از آن بود که در عدد فرود ثابت، طول حوضچه آرامش با بلوک‌های زاویه‌دار نصف طول حوضچه آرامش با بلوک‌های قائم‌الزاویه است. (Bestawy et al. (2013 تأثیر ۱۴ نوع مختلف شکل بلوک‌های مستهلک‌کننده پرش هیدرولیکی را بر آبشستگی پایین‌دست بررسی کردند. نتایج نشان داد که بلوک‌های مقعر به سمت بالادست بیشترین تأثیر را دارند. (Hussein (2017 تأثیر بلوک‌های W شکل با زوایای مختلف بر کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش را مطالعه کرد. نتایج نشان داد که بلوک‌های W شکل با زاویه ۶۰ درجه انرژی پرش هیدرولیکی را تا ۸۵ درصد کاهش می‌دهند. Negm (2002) با مطالعات آزمایشگاهی، طول بهینه حوضچه‌های آرامش منشوری با بلوک‌های مکعبی شکل را تعیین کرد و تحلیل ابعادی، روابطی برای مشخصات هندسی و هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش مستطیلی توسعه داد. همچنین Asadi et al. (2025) در مطالعات خود به بررسی تأثیر ارتفاع، زاویه نصب و تراکم بلوک‌های مثلثی در دو آرایش زیگزاگی A و B در یک حوضچه دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تراکم‌های ۶/۷ درصد در آرایش A و ۱۲/۲ درصد در آرایش B همراه با زاویه نصب ۴۵ درجه، بیشترین تأثیر را در کاهش عمق ثانویه و افزایش اتلاف انرژی داشته‌اند.

با توجه به مطالعات پیشین، کاربرد بلوک‌ها در حوضچه‌های آرامش نه تنها طول پرش را کاهش و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه پرش را تثبیت کرده و عملکرد هیدرولیکی سازه را بهبود می‌بخشد. با این حال، طراحی بهینه حوضچه‌های آرامش نیازمند درک دقیق تأثیر شکل، ابعاد و آرایش نصب بلوک‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی است. علی‌رغم پژوهش‌های گسترده بر بلوک‌های مستطیلی و مکعبی، مطالعات سیستماتیک کمتری به بررسی بلوک‌های مثلثی و به‌ویژه تأثیر آرایش زیگزاگی آن‌ها پرداخته است. بیشتر تحقیقات پیشین بر آرایش‌های موازی یا عمود متمرکز بوده‌اند و خلأ پژوهشی آشکاری در خصوص آرایش‌های زاویه‌دار غیریکنواخت و تأثیر همزمان تراکم و زاویه نصب بر عملکرد هیدرولیکی وجود دارد. نوآوری تحقیق حاضر در پر کردن این خلأ و ارائه راهکاری نوین مهندسی نهفته است. این مطالعه به صورت سیستماتیک تأثیر نصب بلوک‌های مثلثی قائم‌الزاویه با آرایش زیگزاگی در کانال مستطیلی بر پرش هیدرولیکی را بررسی می‌کند. هدف اصلی پژوهش، تعیین کمی تأثیر متقابل سه پارامتر کلیدی (شکل مثلثی، آرایش زیگزاگی و تراکم) بر مشخصات پرش شامل طول پرش، عمق ثانویه و اتلاف انرژی است. اهداف مشخص این مطالعه عبارتند از: ۱) تعیین تأثیر همزمان تراکم و زاویه نصب بلوک‌ها در آرایش زیگزاگی بر مشخصات پرش؛ ۲) شناسایی پیکربندی بهینه این آرایش برای بیشینه‌سازی اتلاف انرژی و کمینه‌سازی ابعاد حوضچه؛ و ۳)

جریان تنظیم و پارامترهای عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش ثبت گردیدند.

چسبانده شده به دیواره فلوم ثبت شد. برای اعتبارسنجی، یک سری آزمایش‌هایی بر بستر صاف انجام شد تا نتایج با پرش کلاسیک مقایسه گردد. در این پژوهش، تأثیر طول بلوک (۴/۵، ۵/۵ و ۶ سانتی‌متر) و زاویه نصب (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی بررسی شد. در هر آزمایش، دبی



شکل ۱- نمای شماتیک و واقعی فلوم آزمایشگاهی، سیستم چرخشی و موقعیت دریچه کشویی.

Fig 1. Schematic and actual view of the laboratory flume, the circulation system, and the sluice gate position.



شکل ۲- آرایش نصب بلوک‌های مثلثی زیگزاگی در کف فلوم آزمایشگاهی.

Fig 2. Arrangement of zigzag triangular blocks installed on the floor of the laboratory flume.

جدول ۱- مشخصات هندسی بلوک‌های مورد آزمایش.

Table 1. Geometric specifications of the tested blocks.

تعداد کل بلوک‌ها Total number of blocks	تعداد بلوک در هر ردیف Number of blocks per row	تراکم بلوک‌ها (%) Block density	زاویه نصب (°) Installation angle	ارتفاع (cm) height	طول پایه (cm) Base length
45	15	10.0	60	2	4.5
45	15	12.2	45	2	5.5
45	15	13.3	30	2	6.0

پارامترهای L_b ، B و w در تمام آزمایش‌ها، این پارامترها از تحلیل حذف شدند. در نتیجه، رابطه ۲ به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$f\left(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, I, \frac{bz}{w^2}, \frac{L}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \phi, Re_1\right) = 0 \quad (3)$$

که در آن، Fr_1 عدد فرود در محل شروع پرش، I درجه تراکم بلوک‌ها و Re_1 عدد رینولدز در محل شروع پرش هیدرولیکی است. رابطه درجه تراکم بلوک‌ها به صورت $I = nbL/BL_b$ (n تعداد کل بلوک‌های نصب شده در حوضچه آرامش) است. تعداد بلوک‌ها در هر ردیف نیز به صورت محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، پارامتر I بیانگر تأثیر توأمان L و ϕ است. بنابراین می‌توان از تأثیر مجزای این پارامترها چشم‌پوشی کرد.

شرایط جریان در کنال‌های روباز به دلیل ناچیز بودن نیروی ویسکوزیته در مقایسه با نیروی گرانش، همواره آشفته است. بنابراین می‌توان از پارامتر Re_1 به عنوان عامل مؤثر بر پرش هیدرولیکی چشم‌پوشی کرد. از سویی دیگر در این مطالعه فاصله ردیف‌های نصب بلوک‌ها، ارتفاع و ضخامت بلوک‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، مقدار پارامتر $\frac{bz}{w^2}$ برای تمام آزمایش‌ها ثابت است. در نتیجه، می‌توان از تأثیر این پارامتر نیز صرف‌نظر کرد. در نهایت، رابطه ۳ به صورت زیر ساده‌سازی می‌شود:

$$f\left(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, I, \frac{L_j}{y_1}\right) = 0 \quad (4)$$

در رابطه ۴، هر یک از پارامترهای بی‌بعد را می‌توان به صورت تابعی از سایر پارامترها در نظر گرفت.

۲-۲- تحلیل ابعادی

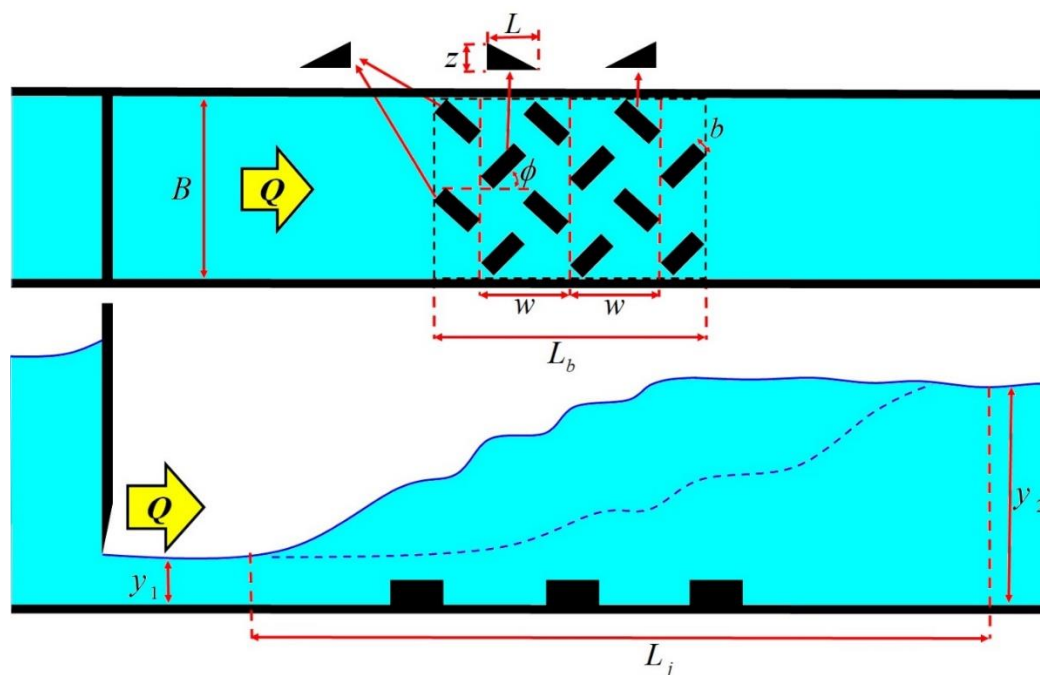
پارامترهای هیدرولیکی جریان فوق بحرانی خروجی از زیر دریچه کشویی نصب شده در کانال مستطیلی در حضور حوضچه آرامش مجهز به بلوک‌های مثلی با آرایش زیگزاگی، به طور قلیل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با توجه به شکل ۳، پارامترهای مؤثر به شرح زیر است:

$$f(Q, y_1, y_2, B, b, L, z, w, L_b, L_j, \phi, \rho, g, \mu) = 0 \quad (1)$$

که در آن، b عرض بلوک‌ها (m)، z ارتفاع بلوک‌ها (m)، L طول بلوک‌ها (m)، ϕ زاویه نصب بلوک نسبت به محور مرکزی کانال (°)، w فاصله ردیف‌های بلوک‌ها (m)، Q دبی جریان (m³/s)، B عرض کانال (m)، L_b طول حوضچه آرامش (m)، L_j طول پرش هیدرولیکی (m)، y_1 عمق اولیه (m)، y_2 عمق ثانویه (m)، g شتاب گرانش (m/s²)، ρ چگالی سیال (kg/m³) و μ لزجت دینامیکی سیال (kg/m.s) است. با بهره‌گیری از تئوری π -باکینگهام و انتخاب g ، ρ و y_1 به عنوان پارامترهای تکرار شونده، گروه‌های بی‌بعد مؤثر به صورت زیر تعیین شدند:

$$f\left(\frac{Q^2}{gy_1^5}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{z}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{L_b}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \phi, \frac{\mu}{\sqrt{g\rho^2 y_1^3}}\right) = 0 \quad (2)$$

با ادغام برخی گروه‌های بی‌بعد در رابطه ۲، گروه‌های بی‌بعد جدیدی حاصل می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به ثلث بودن



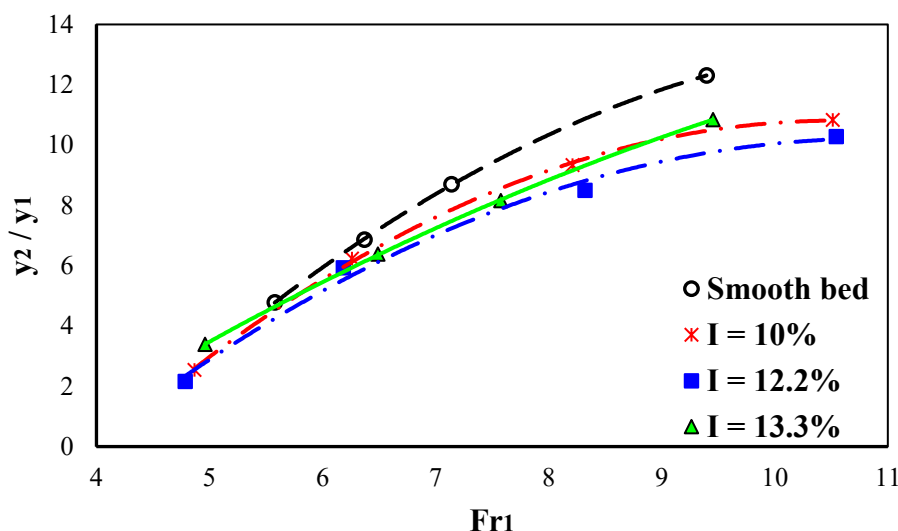
شکل ۳- شماتیک پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مسطیلی مجهز به بلوک‌های مثلثی با آرایش زیگزاگی.

Fig 3. Schematic of hydraulic jump in a rectangular stilling basin equipped with zigzag-arranged triangular blocks.

۳- نتایج و بحث

با توجه به رابطه ۴، تنها پارامتر تراکم بلوک‌ها (I) به مشخصات هندسی بلوک‌های حوضچه آرامش مربوط است و سایر پارامترها به مشخصات هیدرولیکی جریان وابسته‌اند. بنابراین، در این بخش تأثیر پارامتر I بر سایر پارامترها بررسی می‌شود. در پرش هیدرولیکی، کنترل و کاهش عمق ثانویه به‌منظور کاهش هزینه ساخت دیواره‌های جانبی کانال از اهمیت ویژه‌ای است. بنابراین یکی از معیارهای کارایی حوضچه‌های آرامش، توانایی آن‌ها در تغیی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی است. در شکل ۴، تغییرات عمق ثانویه نسبی (y_2/y_1) برای تراکم‌های مختلف بلوک در حوضچه آرامش نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ و محدوده اعداد فرود اولیه آزمایش‌ها ($4/5$ تا $9/5$)، پرش‌های تشکیل شده عمدتاً از نوع پایدار بودند و در موارد عدد فرود اولیه بیشتر از $9/5$ ، پرش قوی مشاهده شد. این پرش‌ها به دلیل آشفتگی یکنواخت و پایداری موقعیت، امکان تحلیل دقیق تأثیر بلوک‌های زیگزاگی بر مشخصات هیدرولیکی را فراهم نمودند.

با توجه به شکل ۴، در اعداد فرود کمتر از $6/5$ ، تأثیر تراکم‌های مختلف بر تغییرات عمق ثانویه ناچیز است؛ اما با افزایش عدد فرود، این تأثیر ملموس‌تر می‌شود. به‌طوری‌که تراکم $12/2$ درصد بیشترین تأثیر را در کاهش عمق ثانویه دارد. با این حال، تراکم $13/3$ درصد، علی‌رغم بلوک بیشتر کف حوضچه، در برخی موارد، تأثیر کمتری نسبت به تراکم 10 درصد نشان می‌دهد. این پدیده می‌تواند ناشی از ایجاد جریان‌های ثانویه قوی و آشفتگی‌های غیریکنواخت در تراکم‌های بالا باشد که توزیع انرژی جنبشی را مختل می‌کند. همچنین، زاویه نصب 30 درجه در تراکم $13/3$ درصد ممکن است هدایت جریان را به صورت غیربهرینه انجام دهد و از تشکیل پرش متمرکز جلوگیری کند. علاوه بر این، پدیده سایه هیدرولیکی (ایجاد جریان آرام بین بلوک‌ها) در تراکم‌های بالا، مناطق کم‌انرژی در پشت بلوک‌ها ایجاد می‌کند و از اتلاف مؤثر انرژی می‌کاهد. این یافته‌ها بر اهمیت تعادل میان تراکم بلوک، زاویه نصب و شرایط جریان در طراحی بهینه حوضچه‌های آرامش تأکید دارند.



شکل ۴- تغییرات عمق ثانویه نسبی برای تراکم‌های مختلف بلوک‌های کف حوضچه آرامش.

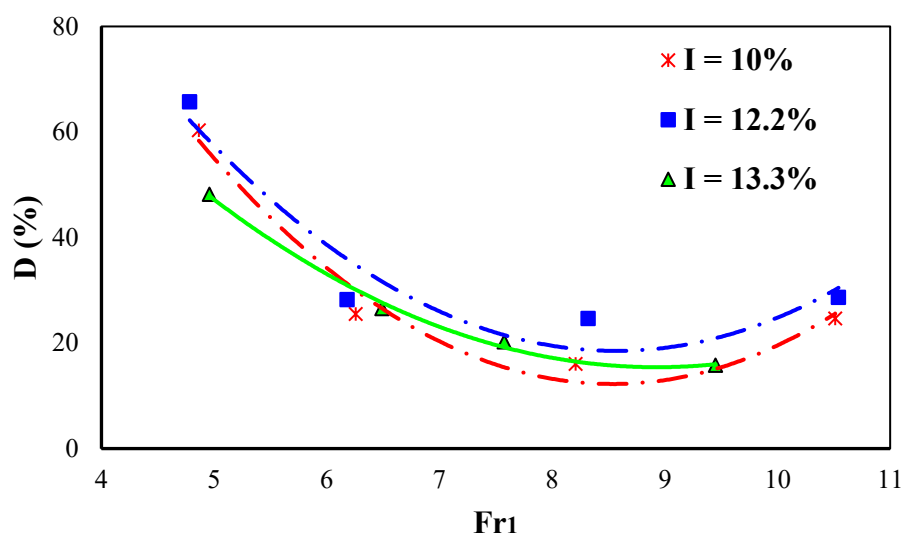
Fig 4. Variation of relative secondary depth for different densities of floor blocks in the stilling basin.

که در آن، y_2^* عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر کف بدون بلوک است. با توجه به شکل ۵، در اعداد فرود کمتر از ۶، تراکم ۱۳/۳ درصد دارای کمترین تأثیر را در کاهش عمق ثانویه دارد و با افزایش عدد، فرود تأثیر آن از تراکم ۱۰ درصد بیشتر می‌شود. با این حال، در کل بازه اعداد فرود آزمایش شده، تراکم ۱۲/۲ درصد بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق ثانویه پرش نشان می‌دهد. این تراکم مربوط به بلوک‌های با طول ۵/۵ سانتی‌متر و زاویه نصب ۴۵ درجه نسبت به جریان است. متوسط کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با تراکم‌های ۱۰، ۱۲/۲ و ۱۳/۳ درصد، در بازه اعداد فرود ۵/۶ تا ۹/۲، به ترتیب ۹/۶، ۱۵/۷ و ۱۲/۴ درصد است. بیشترین کاهش طول برای این تراکم‌ها نیز به ترتیب ۱۵/۳، ۲۴/۷ و ۱۵/۱ درصد می‌باشد.

در ادامه میزان تأثیر تراکم‌های مختلف بر کاهش عمق ثانویه پرش بررسی می‌شود. برای این منظور، با استفاده از رابطه بلانگر (رابطه ۵) و مقادیر عمق اولیه (y_1) و عدد فرود (Fr_1) در مقطع اولیه هر آزمایش، عمق ثانویه در شرایط پرش بر کف بدون بلوک محاسبه شد. سپس، درصد کاهش عمق ثانویه پرش برای هر تراکم با استفاده از رابطه ۶ تعیین گردید. در شکل ۵، تغییرات درصد کاهش عمق ثانویه برای تراکم‌های مختلف نشان داده شده است.

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2}) \quad (5)$$

$$D(\%) = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \times 100 \quad (6)$$

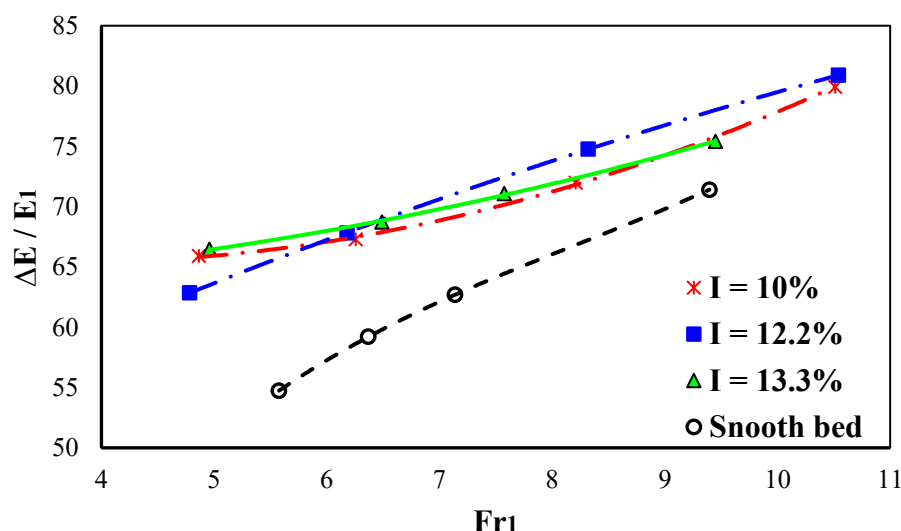


شکل ۵- تغییرات درصد کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی با تغییر درجه تراکم بلوک در حوضچه آرامش.

Fig 5. Variation in the percentage reduction of hydraulic jump secondary depth with changes in block density degree within the stilling basin.

بلوک‌های مثلثی زیگزاگی، با استفاده از اطلاعات عمق جریان و دبی در مقاطع ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی، مقادیر انرژی مخصوص محاسبه شد. سپس، مقدار اتلاف انرژی مخصوص نسبی برای هر تراکم تعیین گردید که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

یکی از مشخصه‌های بسیار مهم پرش هیدرولیکی، انرژی بالای آن است که می‌تواند باعث تخریب سازه‌های پایین‌دست و یا فرسایش کف کانال پایین‌دست شود. بنابراین، حوضچه آرامشی که بتواند انرژی مخرب پرش را به مقدار زیادی مستهلک و کنترل کند، کارایی بالاتری دارد. برای بررسی کارایی حوضچه‌های آرامش مجهز به



شکل ۶- تغییرات اتلاف انرژی مخصوص نسبی پرش هیدرولیکی با تغییر درجه تراکم بلوک در حوضچه آرامش.

Fig 6. Variations of the relative specific energy dissipation of the hydraulic jump with changes in block density degree within the stilling basin.

با توجه به شکل ۶، در اعداد فرود کمتر از ۷، تراکم بلوک ۱۳/۳ درصد بیشترین تأثیر را در اتلاف انرژی جریان دارد؛ اما در اعداد فرود بالاتر، تأثیر آن کاهش می‌یابد و تراکم ۱۲/۲ درصد بیشترین تأثیر را نشان می‌دهد. در مقابل، تراکم ۱۰ درصد در کل بازه اعداد فرود بررسی شده، کمترین تأثیر را در اتلاف انرژی دارد. به منظور بررسی میزان افزایش اتلاف انرژی ناشی از هر تراکم نسبت به پرش هیدرولیکی بر بستر صاف، روابطی رگرسیونی از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به هر تراکم برازش داده شد. سپس، با استفاده از روابط برازش

داده شده و رابطه ۷، درصد افزایش اتلاف انرژی (G) در بازه اعداد فرود ۵/۶ تا ۹/۲ محاسبه گردید. مقادیر کمینه، متوسط و بیشینه این پارامتر برای تراکم‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

$$G(\%) = \frac{\Delta E^* - \Delta E}{\Delta E^*} \times 100 \quad (7)$$

که در آن، ΔE^* اتلاف انرژی مخصوص در بستر صاف و ΔE اتلاف انرژی مخصوص در بستر مجهز به بلوک است.

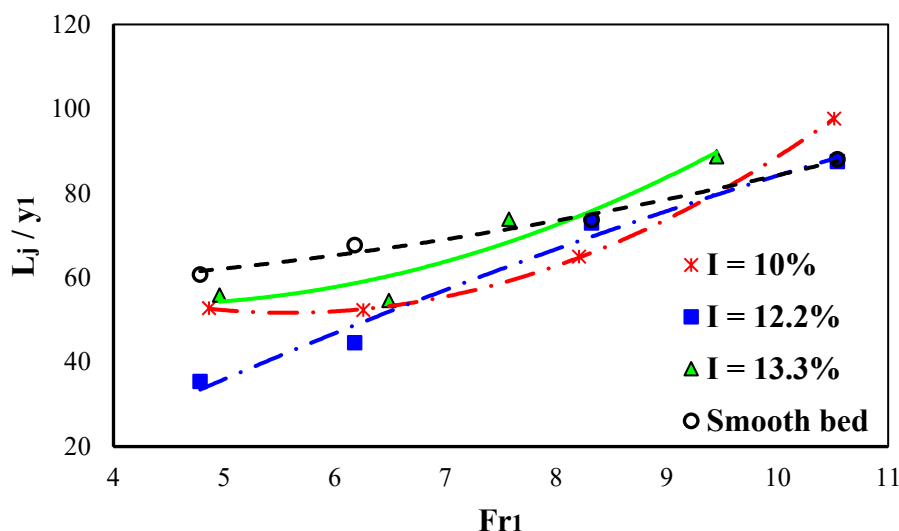
جدول ۲- مقادیر کمینه، متوسط و بیشینه افزایش اتلاف انرژی برای تراکم‌های مختلف بلوک نسبت به بستر صاف در بازه اعداد فرود ۵/۶ تا ۹/۲.

Table 2. Minimum, average, and maximum energy dissipation increase for various block densities compared to a smooth bed, within the Froude number range of 6.5 to 9.2.

شاخص Index	$G(\%)$		
تراکم بلوک‌ها (%) Block density (%)	10.0	12.2	13.3
کمینه مقدار Minimum value	6.4	9.8	6.0
متوسط مقدار Average value	10.7	13.4	11.9
بیشینه مقدار Maximum value	20.1	19.9	22.4

با توجه به نتایج جدول ۲، تراکم ۱۳/۳ درصد کمترین مقدار کمینه و بیشترین مقدار بیشینه را در افزایش اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به بستر صاف نشان می‌دهد. در مقابل، بر اساس مقایسه مقدار متوسط G ، تراکم ۱۲/۲ درصد بیشترین تأثیر را در افزایش اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی دارد. در طراحی حوضچه‌های آرامش، طول حوضچه یکی از پارامترهای کلیدی است که تأثیر

مستقیمی بر عملکرد هیدرولیکی و هزینه‌های اجرایی سازه دارد. کاهش طول حوضچه آرامش، نه تنها هزینه‌های اجرایی را کاهش می‌دهد، بلکه در محدودیت‌های طولی پروژه نیز مزایای قابل توجهی به همراه دارد. بنابراین، حوضچه‌های آرامش مجهز به بلوک‌های مثلی زیگزاگی از نظر طول پرش هیدرولیکی نسبی (L_f/y_1) مقایسه و بررسی شدند که نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- تغییرات طول پرش هیدرولیکی نسبی با تغییر درجه تراکم بلوک حوضچه آرامش.

Fig 7. Variation of relative hydraulic jump length with the degree of block density in the stilling basin.

نسبی طول پرش هیدرولیکی در این حوضچه‌ها نسبت به پرش بر بستر صاف، در بازه اعداد فرود ۵/۶ تا ۹/۲ محاسبه گردید. مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط کاهش طول پرش هیدرولیکی برای هر تراکم در جدول ۳ ارائه شده است.

$$M(\%) = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، L_j^* و L_j به ترتیب طول پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر بستر صاف و بستر مجهز به بلوک می‌باشند.

با توجه به شکل ۷، پرش هیدرولیکی تشکیل شده در حوضچه آرامش با تراکم بلوک ۱۳/۳ درصد، در کل بازه اعداد فرود بررسی شده، بیشترین طول نسبی را نسبت به سایر تراکم‌ها دارد. با این حال، برای تراکم‌های ۱۰ و ۱۲/۲ درصد، در اعداد فرود کمتر از ۶/۸ و بیشتر از ۹/۵، تراکم ۱۲/۲ درصد کمترین طول پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد. همچنین، در بازه اعداد فرود ۶/۸ تا ۹/۵، دو تراکم ۱۰ و ۱۲/۲ درصد تقریباً طول پرش هیدرولیکی یکسانی دارند. به‌منظور بررسی تأثیر تراکم‌های مختلف بلوک در حوضچه‌های آرامش مستطیلی بر طول پرش هیدرولیکی، روابط رگرسیونی از داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. سپس، با استفاده از رابطه ۸، اختلاف

جدول ۳- مقادیر کمینه، متوسط و بیشینه درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی برای تراکم‌های مختلف بلوک نسبت به بستر صاف در بازه اعداد فرود ۵/۶ تا ۹/۲.

Table 3. Minimum, average, and maximum percentages of hydraulic jump length reduction for various block densities compared to a smooth bed, within the Froude number range of 6.5 to 9.2.

شاخص Index	M (%)		
تراکم بلوک‌ها (%) Block density (%)	10	12.2	13.3
کمینه مقدار Minimum value	0.6	0.7	- 14.4
متوسط مقدار Average value	10.7	11.4	- 2.9
بیشینه مقدار Maximum value	14.1	24.5	10.4

با توجه به جدول ۳، تراکم $12/2$ درصد بیشترین مقادیر متوسط و بیشینه را در کاهش طول پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. در مقابل، متوسط و کمینه کاهش طول پرش هیدرولیکی مربوط به تراکم $13/3$ درصد است که نه تنها کاهش طولی رخ نداده، بلکه افزایش طول پرش هیدرولیکی نیز اتفاق مشاهده می‌شود. این پدیده می‌تواند ناشی از محبوس شدن بخشی از جریان درون بلوک‌ها، ایجاد بستر کاذب برای لایه‌های بالاتر جریان و در نتیجه ناکارآمد شدن بلوک‌ها در کاهش طول پرش هیدرولیکی یا به اختصار، به دلیل پدیده سایه هیدرولیکی باشد. این نتیجه در شکل ۷ نیز مشهود است. به این صورت که در اعداد فرود کمتر از $8/2$ ، نمودار تراکم $13/3$ درصد زیر نمودار بستر صاف قرار دارد که کاهش طول پرش را نشان می‌دهد؛ اما در اعداد فرود بالاتر، این نمودار بالای نمودار بستر صاف قرار می‌گیرد که بیانگر افزایش طول پرش و تأثیر معکوس این تراکم در کاهش طول است.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه اسدی و همکاران (۲۰۲۵) روی حوضچه دوزنقه‌ای نشان می‌دهد که اگرچه هندسه مقطع حوضچه متفاوت است، اما در هر دو مورد، تراکم بلوک‌ها در محدوده $12-13$ درصد و زاویه نصب 45 درجه به عنوان پیکربندی بهینه شناسایی شده‌اند. در تحقیق حاضر، تراکم $12/2$ درصد منجر به کاهش $24/7$ درصد در عمق ثانویه و افزایش $13/4$ درصد در اتلاف انرژی نسبی شد، در حالی که در

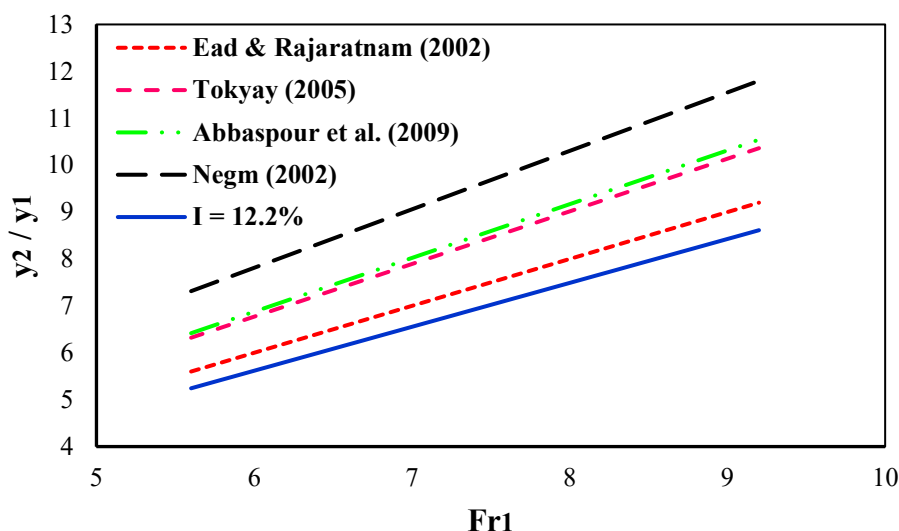
پژوهش مذکور، تراکم $12/2$ درصد در آرایش B باعث کاهش $18/6$ درصد در عمق ثانویه و افزایش $33/7$ درصد در اتلاف انرژی نسبی گردید. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تأثیر شکل مقطع حوضچه و الگوی جریان در کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای باشد.

به منظور بررسی کارایی حوضچه آرامش ارائه شده در این مطالعه در مقایسه با سایر حوضچه‌های آرامش مطالعه شده توسط سایر محققان، تغییرات عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی در حوضچه پیشنهادی با حوضچه‌های ارائه شده توسط Abbaspour et al. (2009)، Ead & Rajaratnam (2002)، Negm (2002) و Tokyay (2005) مقایسه شد. برای این منظور، روابط ارائه شده توسط این محققان برای عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی استخراج گردید (جدول ۴) و مقادیر عمق ثانویه نسبی در بازه اعداد فرود مورد مطالعه تعیین شد. همچنین، برای تراکم بلوک $12/2$ درصد (تراکم با بیشترین تأثیر بر عمق ثانویه) رابطه‌ای از داده‌ها برازش داده شد. در نهایت، تغییرات عمق ثانویه پرش در بازه اعداد فرود مورد مطالعه با استفاده از این روابط محاسبه گردید که نتایج آن برای هر حوضچه آرامش در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۸، حوضچه آرامش مستطیلی پیشنهادی با تراکم بلوک‌های $12/2$ درصد بیشترین تأثیر در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نسبت به سایر حوضچه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۴- روابط پیشنهادی برای عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش ارائه شده توسط محققان مختلف

Table 4. Proposed relationships for the relative secondary depth of hydraulic jump in stilling basins by various researchers.

رابطه Equation	ضریب تعیین رابطه (R^2) Relationship's determination coefficient	محدوده عدد فرود Froude number range	محقق Researcher
$y_2/y_1 = 0.9362Fr_1$	0.97	4.7-10	مطالعه حاضر ($I = 12.2\%$) This Research
$y_2/y_1 = 1.24Fr_1 + 0.336$	0.99	4-10	Negm (2002)
$y_2/y_1 \cong Fr_1$	0.99	4-10	Ead & Rajaratnam (2002)
$y_2/y_1 = 1.1223Fr_1 + 0.0365$	0.94	4-12	Tokyay (2005)
$y_2/y_1 = 1.146Fr_1$	0.91	3.8-8.8	Abbaspour et al. (2009)



شکل ۸- تغییرات عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش ارائه شده توسط محققان مختلف

Fig 8. Variation of Relative Secondary Depth of Hydraulic Jump in Stilling Basins Proposed by Different Researchers

درصد بود که نشان‌دهنده کارایی بالای این آرایش در اتلاف انرژی جنبشی جریان است.

- بر خلاف انتظار، تراکم بالاتر (۱۳/۳ درصد) در محدوده اعداد فرود بالاتر (بالاتر از ۸) نه تنها بهبود محسوسی ایجاد نکرد، بلکه در برخی موارد منجر به افزایش طول پرش نسبت به بستر صاف شد. این امر می‌تواند ناشی از ایجاد جریان‌های ثانویه قوی، آشفتگی‌های غیریکنواخت و پدیده سایه هیدرولیکی در تراکم‌های بسیار بالا باشد.

- مقایسه با مطالعات پیشین نشان داد که حوضچه آرامش مجهز به بلوک‌های مثلثی با آرایش زیگزاگی و تراکم ۱۲/۲ درصد، عملکرد برتری در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در طیف وسیعی از اعداد فرود دارد.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از بلوک‌های مثلثی با آرایش زیگزاگی و تراکم بهینه (۱۲/۲ درصد) می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای طراحی حوضچه‌های آرامش مستطیلی کم‌هزینه با کارایی هیدرولیکی بالا به کار رود. در مطالعات آتی، تأثیر ترکیب این بلوک‌ها با المان‌های مستهلک‌کننده دیگر (مانند آستانه انتهایی یا بلوک‌های پاشنه)، شبیه‌سازی عددی میدان جریان و آشفتگی، آزمایش در حوضچه‌های با اشکال مختلف تحت جریان غیردائمی، بررسی اثر مقیاس و شرایط صحرایی، مطالعه دوام سازه‌ای بلوک‌ها در برابر نیروهای هیدرودینامیکی و کاویتاسیون، تأثیر آرایش زیگزاگی بر شیب‌های مختلف کانال و جریان‌های ثانویه قوی، و آنالیز اقتصادی مقایسه‌ای هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبت به

۴- نتیجه‌گیری نهایی

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر آرایش زیگزاگی بلوک‌های مثلثی قائم‌الزاویه بر مشخصات پرش هیدرولیکی و کارایی حوضچه‌های آرامش مستطیلی انجام شد. آزمایش‌هایی در کانال آزمایشگاهی با ابعاد مشخص و تحت جریان فوق‌بحرانی کنترل شده انجام گرفت. بلوک‌ها در سه تراکم ۱۰، ۱۲/۲ و ۱۳/۳ درصد و زوایای نصب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور کانال آزمایش شدند. پارامترهای هیدرولیکی شامل عمق ثانویه، طول پرش و اتلاف انرژی اندازه‌گیری و با حالت پایه (بستر صاف) مقایسه شدند. نتایج به شرح زیر است:

- نصب بلوک‌های مثلثی به صورت زیگزاگی تأثیر معناداری بر بهبود عملکرد حوضچه آرامش دارد. در بین تراکم‌های مختلف، پیکربندی با تراکم ۱۲/۲ درصد (متعلق به بلوک‌های با طول ۵/۵ سانتی‌متر و زاویه نصب ۴۵ درجه) به عنوان بهینه‌ترین حالت تعیین شد.
- پیکربندی بهینه (تراکم ۱۲/۲ درصد) بیشترین کاهش را در عمق ثانویه پرش (به طور متوسط ۱۵/۷ درصد و حداکثر ۲۴/۷ درصد) و همچنین بیشترین کاهش را در طول پرش هیدرولیکی (به طور متوسط ۱۱/۴ درصد و حداکثر ۲۴/۵ درصد) نسبت به بستر صاف ایجاد کرد.
- همین پیکربندی بیشترین اتلاف انرژی نسبی را ایجاد کرد و میانگین افزایش اتلاف انرژی نسبت به بستر صاف ۱۳/۴

Journal of Civil Engineering, 16(4), 489-497, <https://doi.org/10.1139/l89-079>.

- Parsamehr P and Hosseinzadehdalir A, 2013. Experimental study of effect of rough bed on sequent depth ratio of hydraulic jump on adverse slope. Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE), 36(1), 89-101, <https://doi.org/10.1139/l89-079>. (In Persian).
- Peterka AJ, 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters (No. 25). United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver. Colorado. USA, 240 p.
- Pillai NN and Kansal ML, 2022. Stilling basins using wedge-shaped baffle blocks. Proceedings of the 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures – 9th ISHS, 24-27 October 2022, IIT Roorkee, Roorkee, India. Palermo, Ahmad, Crookston, and Ericum Editors. Utah State University, Logan, Utah, USA, 10 pages.
- Rajaratnam N, 1966. The hydraulic jump in sloping channels. Irrigation and Power, 32(2), 137–149.
- Tajabadi F, Jabbari E, and Sarkardeh H, 2018. Effect of the end sill angle on the hydrodynamic parameters of a stilling basin. The European Physical Journal Plus, 133(1): 10, <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11837-y>.
- Tokyay ND, 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, Anchorage, Alaska, USA, 408-416, [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)408](https://doi.org/10.1061/40792(173)408).

حوضچه‌های متعارف انجام شود تا کاربرد عملی این پیکربندی تأیید گردد.

منابع

- Abbaspour A, Dalir AH, Farsadizadeh D, and Sadraddini AA, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-Environment Research, 3(2), 109-117, <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.05.003>.
- Asadi, E., Mohammadzadeh, S., Mirzaei, N., & Seyedzadeh, A. (2025). Hydraulic characteristics of a trapezoidal stilling basin with triangular blocks. ISH Journal of Hydraulic Engineering. 31(2), 173-187. <https://doi.org/10.1080/09715010.2025.2456793>
- Bestawy A, Hazar H, Ozturk U, and Roy T, 2013. New shapes of baffle piers used in stilling basins as energy dissipaters. Asian Transactions on Engineering (ATE), 3(1), 1-7.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7), 656-663, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7).
- Eshkou Z, Dehghani AA, and Ahmad A, 2018. Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 144(8), 06018004, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001328).
- Habibzadeh A, Loewen M, and Rajaratnam N, 2012. Performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering, 138(10), 902-908, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000587).
- Hussein HH, 2017. Evaluation the hydraulic performance of W shape baffles in stilling basins. 3rd International Engineering Conference on Developments in Civil and Computer Engineering. Northern Technical University. Iraq, 1-10, <https://doi.org/10.23918/iec2017.01>.
- Mohamed Ali HS, 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering, 117(1), 83-93, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:1](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1).
- Negm AM, 2002. Optimal roughened length of prismatic stilling basins. In Proceedings of the 5th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Poland, 1-10.
- Nettleton PC and McCorquodale JA, 1989. Radial flow stilling basins with baffle blocks. Canadian