



Research Article

Investigating the Influence of Submerged Block Arrangement and Angle of Incidence to Flow Direction on Boundary Layer Thickness in Stilling Basins

Manouchehr Heidarpour^{✉1}, Kimia Akhavan²

1. Corresponding Author :Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Graduated of Hydraulic Structures, Department of Water Sciences and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(✉ Corresponding Author: : heidar@iut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 3 January 2026

Revised: 25 January 2026

Accepted: 9 February 2026

Available Online: 4 May 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Heidarpour, M., Akhavan, K., (2026). Investigating the Influence of submerged block arrangement and angle of incidence to flow direction on boundary layer thickness in stilling basins. V.26, No.100, P: 1-14
[https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.371801.1637](https://doi.org/10.22092/idser.2026.371801.1637)

Extended Abstract

Introduction

Hydraulic jump is a type of rapidly varied flow in which the flow transitions from supercritical to subcritical. Incorporating rough beds at the channel bottom leads to the maximization of energy dissipation, resulting in a significant reduction in conjugate depth and roller length. These results have important implications for the cost-effective design of stilling basins, which commonly encounter hydraulic jumps. One feature that has attracted the attention of researchers studying jumps on rough beds is the velocity profile of the jump on rough beds. In this research, the effect of the arrangement of submerged vanes on the velocity profiles of the hydraulic jump in a stilling basin was measured for Froude numbers ranging from 4.8 to 9.14.

Methodology

Experiments were conducted in the hydraulic laboratory in a rectangular channel with physical dimensions of length 8 m, width 0.4 m, and height 0.6 m. Submerged vanes were used as roughness elements on the bed of the laboratory channel. These vanes are made of Teflon, and the geometry of a submerged vane, including its width (w), thickness (t), angle of attack (θ), and vane length (L), is one of the parameters affecting the characteristics of the hydraulic jump. For measuring the flow velocity, an instrument called a Pitot tube was used. In the present study, for 12 experimental models, velocity was measured at five cross-sections along the width, and at three points across the width in each cross-section. Measurements were taken at five points along the depth, with equal spacing ratios from the channel bed to the free water surface, and the readings were averaged across three different widths.

Results and Discussion

In general, the maximum velocity value decreases with distance from the beginning of the jump and occurs at a lower depth from the water surface. The bed with submerged vanes causes a reduction in the flow velocity magnitude, and its maximum value occurs at higher points compared to the classical jump. The significance of the non-dimensionalized velocity graphs lies in comparing the growth of the boundary layer across the cross-sections. The average value of δ/b is 0.62 and 0.72, and for $50 < x/D_1$, the ratio δ/b lies above the average line. Due to the low effect of turbulence and secondary currents caused by the presence of submerged vanes, the boundary layer thickness is greater in regions of calm flow (areas with

lower velocity). At values less than 50, the ratio δ/b decreases compared to the average line. The results showed that the value of the non-dimensional boundary layer thickness parameter, δ/b , was 0.72, which was highest in the parallel arrangement of submerged vanes at an attack angle of 75° compared to angles of 45° and 90°. Meanwhile, this value was obtained in the butterfly arrangement with an attack angle of 45° and increased from 0.56 to 0.01 compared to what other researchers have obtained.

Conclusions

Therefore, the best characteristic for the non-dimensional boundary layer thickness parameter, δ/b , on artificial roughness was achieved with the butterfly arrangement and a 45° attack angle of the submerged vanes, which proved to be an influential factor. In contemporary hydraulic jump research, the use of advanced techniques, such as machine learning tools and numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD), is increasing. Simulating hydraulic jumps with CFD is a complex task and requires careful attention to turbulence modeling, grid accuracy, boundary conditions, and various other factors. It is essential to employ advanced techniques for comprehensive three-dimensional (3D) velocity and bed shear stress measurements. Conducting turbulence analysis will contribute to a more refined understanding of the underlying flow dynamics. Furthermore, the challenge of hydraulic jump stability on adverse slopes persists. Introducing roughness elements and sills can enhance hydraulic jump stability on adverse slopes. Investigating the potential effects of scale in such conditions is necessary.

Keywords: hydraulic jump, velocity Profiles, Butterfly Arrangement

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article.

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by K. A. and all authors commented on previous versions of the manuscript (K. A. and M. H.). The final revisions have been applied by K. A. and Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.

Acknowledgement

The authors would like to thank all participants of the present study, especially the teachers and personal of agriculture engineering department of the Isfahan University of technology which made this research possible.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی

کیمیا اخوان و منوچهر حیدرپور[✉]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

چکیده

پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در آن، جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر حالت می‌دهد. گنجاندن بسترهای زبر در کف کانال، به حداکثرسازی اتلاف انرژی منجر می‌شود که نتیجه آن کاهش قابل توجه در عمق متوالی و طول غلتاب پرش است. این نتایج پیامدهای مهمی برای طراحی مقرون به صرفه حوضچه‌های آرامش دارد که معمولاً با پرش‌های هیدرولیکی مواجه می‌شوند. یکی از ویژگی‌هایی که توجه محققان پرش بر بستر زبر را جلب کرده است نیمرخ سرعت پرش است. در این پژوهش اثر آرایش صفحات مستغرق بر نیمرخ‌های سرعت پرش هیدرولیکی حوضچه آرامش در دامنه اعداد فرود $4/8$ تا $9/14$ اندازه‌گیری شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد مقدار پارامتر بی بعد ضخامت لایه مرزی δ/b ، 0.72 است که در آرایش موازی صفحات مستغرق با زاویه برخورد 75° نسبت به زاویه 45° و 90° بیشترین مقدار را داشته است، درحالی‌که این مقدار در آرایش پروانه‌ای با زاویه برخورد 45° بدست می‌آید و از 0.56 تا 0.1 نسبت به نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران افزایش داشته است. بنابر این بهترین مشخصه پارامتر بی بعد ضخامت لایه مرزی δ/b روی زبری مصنوعی با آرایش پروانه‌ای و زاویه برخورد 45° صفحات مستغرق با یک عامل تاثیرگذار بوده است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، نیمرخ‌های سرعت، آرایش پروانه‌ای

مقدمه

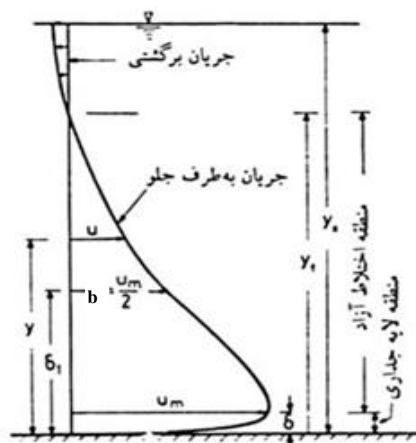
سرعت زیاد آب در کانال یا رودخانه طبیعی فرسایش بستر و جدارهای کانال را به همراه دارد. چنانچه آب در قسمتی از مسیر حالت فوق بحرانی داشته باشد و بنا به مشخصات و موقعیت خاص کانال بخواهد تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت نیز به اندازه قابل توجه کاسته می‌شود. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانالهای باز است و از ابتدا تا انتهای آن تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد و پرش هیدرولیکی یا پرش آبی نام دارد. پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریانهای متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی دیده می‌شود و آن عبارت

از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی است. در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر، لایه سطحی آب (که اغلب با هوا مخلوط می‌شود و چگالی کمتری دارد) نسبت به توده آب زیرین (با جرم بیشتر و اینرسی بالاتر) با سرعت بیشتری حرکت می‌کند. این اختلاف سرعت ناشی از کاهش اصطکاک در سطح آزاد و افزایش اتلاف انرژی در لایه‌های نزدیک بستر زبر است. لغزش شدید در سطح آب، باعث ایجاد لایه لغزشی آزادی خواهد شد که از بخش مایع فوقانی وارد می‌شود. لایه لغزشی کف بستر باعث کند شدن سرعت در لایه جدار می‌گردد، در نتیجه این اعمال توزیع سرعت در مقطعی به فاصله x از پاشنه پرش به صورت شکل (۱) خواهد بود (Farhoudi, 1993). نیمرخ سرعت

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

دانش آموخته سازه‌های آبی گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

اجزایی دارد با دو بخش متمایز: یکی جریانی به طرف جلو در جسم اصلی تحتانی و دیگری منطقه‌ای با سرعت منفی در بخش فوقانی. مطابق شکل (۱) در جریان به طرف جلو، کل میزان حجمی جریان بیش از جریان ورودی در پاشنه پرش خواهد بود. این امر به دلیل ورود جریان به لایه لغزشی است. برای برقراری پیوستگی جریان یک جریان برگشتی در قسمت فوقانی وجود خواهد داشت که در این شرایط باعث تشکیل گرداب می‌گردد. جریان برگشتی برای برقراری پیوستگی به وجود می‌آید این جریان برگشتی باعث



شکل ۱- توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی (Farhoudi, 1993)

Fig. 1 – Velocity distribution in a hydraulic jump (Farhoudi, 1993)

برای مقاطع مختلف در طول پرش با عدد فرود $7/0.4$ در ناحیه جریان جلو رونده اندازه‌گیری کرد و نشان داد که زبری بستر تأثیر محسوسی بر تغییر سرعت بیشینه در نیمرخ‌های سرعت نسبت به بستر صاف نمی‌گذارد. مطالعه داده‌های اوتسو و همکاران (Ohtsu *et al.*, 1990) روی پرش هیدرولیکی و داده‌های آزمایش هاگر (Hager, 1992) با عدد فرود $4/59$ که در آن پرش آزاد تشکیل شده است نشان می‌دهد که یکنواختی توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش تأثیر نامحسوسی بر روند کاهش اندازه سرعت دارد. نتایج مطالعات وو و راجاراتنام (Wu & Rajaratnam, 1995) نیز نشان داد که یکسان نبودن توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش، تأثیر بسیار نامحسوسی بر روند کاهش سرعت دارد.

بخمتمف و ماتزکه (Bakhmeteff & Matzke, 1936) راهنمایی‌هایی درخصوص اندازه‌گیری‌های سرعت ارائه دادند و راس و همکاران (Rouse *et al.*, 1959) میدان سرعت را برای سه عدد فرود رسم کردند. شرودر (Schroder, 1963) و راجاراتنام (Rajaratnam, 1967) الگوی جریان را به‌طور کامل تشریح کردند و میدان متوسط زمانی سرعت و فشار را ارائه دادند راجاراتنام (Rajaratnam, 1967) نشان داد که نیمرخ توزیع سرعت در پرش با کمی اصلاح شبیه به نیمرخ سرعت در جت دیواری کلاسیک است. او دلیل افت انرژی در پرش هیدرولیکی را تبدیل میانگین انرژی جنبشی به وسان‌های سرعت و سپس اتلاف گرمایی آن بر اثر لزوجت دانست. اولین بار سرعت روی بسترهای زبر را راجاراتنام (Rajaratnam, 1968) اندازه‌گیری کرد. وی در مطالعات خود نمودار سرعت را

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی

بی‌بعد را $0/71$ محاسبه کرده است که در مقایسه با بستر صاف قابل توجه است. تسلیمی (Taslimi, 2021) با بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با زبری دوزنقه‌ای و پله منفی ابتدایی و به این نتیجه دست یافت که مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در محدوده $0/3$ تا $0/95$ و به‌طور متوسط $0/63$ است، درحالی‌که این متغیر برای پرش کلاسیک به‌طور متوسط $0/16$ است. محمدزاده (Mohammadzadeh, 2021) روی تاثیر بلوک‌های زیگزاگی شکل بر پرش هیدرولیکی مطالعه کرده و نتیجه گرفته است که افزایش ارتفاع و فاصله زبری‌های روی بستر باعث کاهش سرعت در نزدیکی بستر شده است و دلیل آن را افزایش تنش برشی و افزایش شیب خط توزیع سرعت می‌داند.

هدف این مطالعه، بررسی تاثیر زبری صفحات مستغرق بر نیمرخ سرعت در طول پرش هیدرولیکی و مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین است. همانگونه که در قسمت بررسی منابع گفته شد، کلیه مطالعات پیشین روی بستر صاف و زبر طبیعی هستند. این مطالعه به تاثیر صفحات مستغرق بر نیمرخ سرعت در طول پرش هیدرولیکی پرداخته است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در کانالی با مقطع مستطیل شکل، با مشخصات فیزیکی طول 8 ، عرض $0/4$ و ارتفاع $0/6$ متر اجرا شده است. دیواره‌ها و کف کانال از جنس ورق پلکسی‌گلس شفاف است که موجب سهولت در برداشت داده‌ها می‌شود. کانال دارای دو دریچه یکی در ابتدا و دیگری در انتهایست. دریچه ابتدایی (بالا دست)، میزان آب ورودی به کانال را تنظیم و عدد فرود اولیه لازم را برای اجرای هر آزمایش را ایجاد می‌کند. با استفاده از دریچه پایین دست کانال که به صورت مکانیکی و به‌واسطه چرخ‌دنده‌های تعبیه شده اطراف آن بالا و پایین می‌شود، پرش هیدرولیکی در محل دلخواه در طول کانال تثبیت می‌گردد.

از صفحات مستغرق به عنوان زبری در بستر کانال آزمایشگاهی استفاده شده است. هندسه یک صفحه

اید و همکاران (Ead et al., 2000) با آزمایش‌هایی در کالورت با بستر موج‌دار دریافتند که سرعت نزدیک مرز به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر از سرعت متوسط جریان بوده است و کاویتاسیون نیز به دلیل هم‌ترازی کف کانال با تاج سطح موج‌دار کمی کاهش می‌یابد. اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) با تحقیقات مفصل‌تر در زمینه نیمرخ سرعت پرش روی بستر زبر نشان دادند که نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت با هم مشابه‌اند اما با نیمرخ بی‌بعد سرعت روی بستر زبر متفاوت هستند تحقیقات آنان نشان داد که روی بستر زبر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد اندازه بزرگتری نسبت به بستر صاف دارد و زبری‌ها میزان رشد لایه مرزی را افزایش می‌دهد، این محققان مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/45$ گزارش کردند. عباسپور و همکاران (Abbaspour et al., 2009) و غزالی و همکاران (Ghazali et al., 2012) با تائید نتایج تحقیقات اید و همکاران (Ead et al., 2000) ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را به ترتیب $0/57$ و $0/39$ گزارش کردند. توزیع بدون بعد سرعت در فاصله‌های مختلف در طول جهش آزاد و مستغرق شبیه هم است (Nasr Abadi et al., 2010).

اثر تغییر طول زبری در سه بازه کوتاه، متوسط و بلند در محدوده طول موثر روی نیمرخ‌های سرعت توسط بزاز و همکاران (Bazzaz et al., 2011) انجام شد. نتایج نشان داد که هرچند نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در بستر زبر مشابه هستند اما شکل آنها با نیمرخ بی‌بعد سرعت در بستر صاف متفاوت است. بنی‌طبا (Banitaba, 2018) به بررسی و تحلیل آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب معکوس و زبری مصنوعی دوزنقه‌ای با ارتفاع مختلف پرداخته و مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/45$ گزارش کرده‌اند. باقری (Bagheri, 2018) پس از بررسی تاثیر شیب معکوس و ورقه‌های مستغرق روی مشخصات پرش هیدرولیکی، مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/51$ گزارش کرده است. پورعبدالله (Pourabdollah Ghafarkhi, 2019) اثر همزمان سه شیب منفی سه قطر زبری و دو ارتفاع پله مثبت انتهایی بر نیمرخ سرعت و نوسان‌های فشار در اعداد فرود 4 تا 10 را بررسی و ضخامت لایه مرزی

مستغرق از جمله پارامترهای موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی است و شامل عرض (w)، ضخامت (t)، زاویه حمله (θ) و طول ورقه‌ها (L) می‌شود. این صفحات از جنس تفلون هستند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده و هندسه و چیدمان آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاهی به نام لوله پیتوت استفاده شده است تا روش پژوهش برای مقایسه با نتایج پژوهش‌های قبلی یکسان باشد. اختلاف سطح آب بالا آمده در لوله‌های چسبیده به تخته نشان دهنده ارتفاع معادل سرعت در رابطه برنولی است. در پژوهش حاضر برای

۱۲ مدل آزمایشی، سرعت در پنج مقطع طولی و در هر مقطع در سه نقطه از عرض کانال اندازه‌گیری شده است. پنج نقطه در راستای عمق در تاج پرش با نسبت‌های مساوی از کف کانال تا سطح آزاد آب است و اندازه‌گیری در سه عرض مختلف میانگین‌گیری شده است. اندازه‌گیری سرعت در سطح آب به دلیل تلاطم‌های سطحی و بیرون قرار گرفتن لوله پیتوت از آب ممکن نشد، از این رو سرعت سطحی آب در عمق نزدیک سطح آزاد آب در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات صفحات مستغرق به کار رفته در بستر کانال
Table 1 - Specifications of the submerged plates used in the channel bed

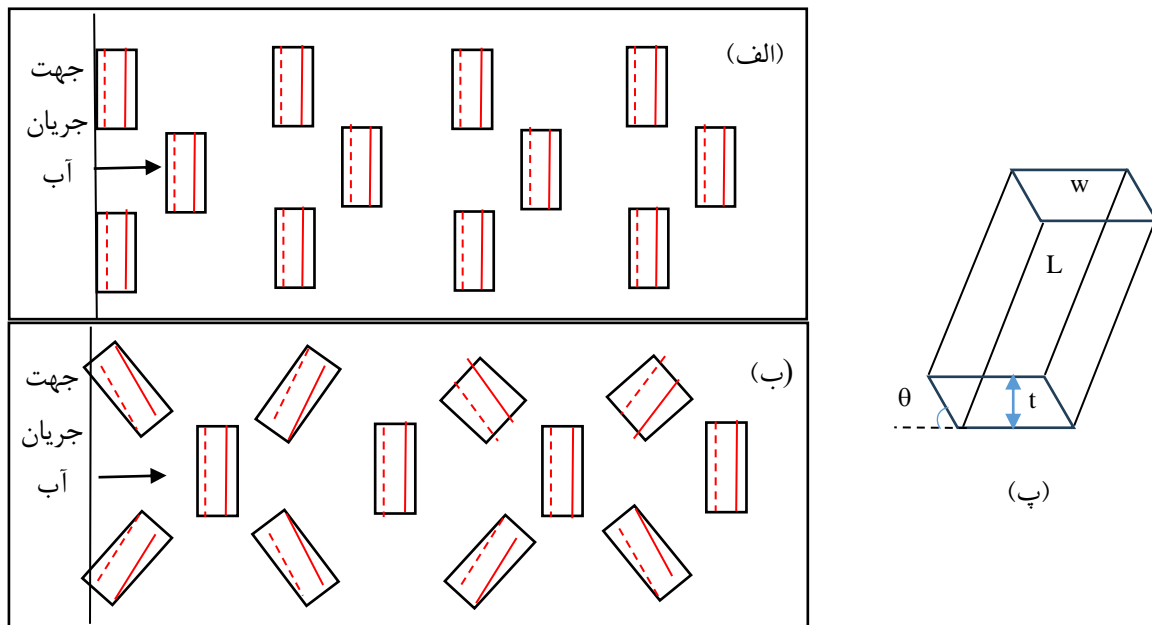
| Z یا θ (°) | t (cm) | W(cm) | L(cm) |
|-------------------|--------|-------|-------|
| ۹۰ و ۷۵، ۴۵ | ۱ | ۴ | ۱۲ |

مشخصات کلی آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای شماره‌گذاری انحصاری آزمایش‌ها از سیستم شماره‌گذاری چهاربخشی به روش زیر عمل شده است: بخش اول: برای آرایش اول حرف A و برای آرایش دوم حرف B بخش دوم: برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه عدد ۱، برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه عدد ۲ و برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه عدد ۳

بخش سوم: حرف a لاتین برای بیشترین مقدار بازشدگی دریچه بخش چهارم: مقدار زاویه حمله صفحات مستغرق به لاتین درج می‌شود. به طور مثال شماره آزمایش B2a75 آزمایشی است که صفحات مستغرق با آرایش دوم و زاویه حمله ۷۵ درجه در بستر قرار گرفته‌اند و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی دریچه ورودی ۵۰ میلی‌متر است.

جدول ۲- مشخصات کلی آزمایش‌ها
Table 2 - General specifications of the conducted experiments

| شماره آزمایش | بازشدگی دریچه بالادست (cm) | دبی (lit/s) | زاویه حمله صفحات (Deg) | نوع آرایش | ردیف |
|--------------|----------------------------|-------------|------------------------|-----------|------|
| A1a0 | ۳/۴ | ۳۰ | | | ۱ |
| A2a0 | ۵ | ۴۰ | ۰ (بستر صاف) | | ۲ |
| A3a0 | ۶/۵ | ۵۰ | | | ۳ |
| A1a45 | ۳/۴ | ۳۰ | | | ۴ |
| A2a45 | ۵ | ۴۰ | ۴۵ | | ۵ |
| A3a45 | ۶/۵ | ۵۰ | | A | ۶ |
| A1a75 | ۳/۴ | ۳۰ | | | ۷ |
| A2a75 | ۵ | ۴۰ | ۷۵ | | ۸ |
| A3a75 | ۶/۵ | ۵۰ | | | ۹ |
| A2a90 | ۵ | ۴۰ | ۹۰ | | ۱۰ |
| A3a90 | ۶/۵ | ۵۰ | | | ۱۱ |
| B1a45 | ۳/۴ | ۳۰ | ۴۵ | | ۱۲ |
| B1a75 | ۳/۴ | ۳۰ | | | ۱۳ |
| B2a75 | ۵ | ۴۰ | ۷۵ | B | ۱۴ |
| B3a75 | ۶/۵ | ۵۰ | | | ۱۵ |



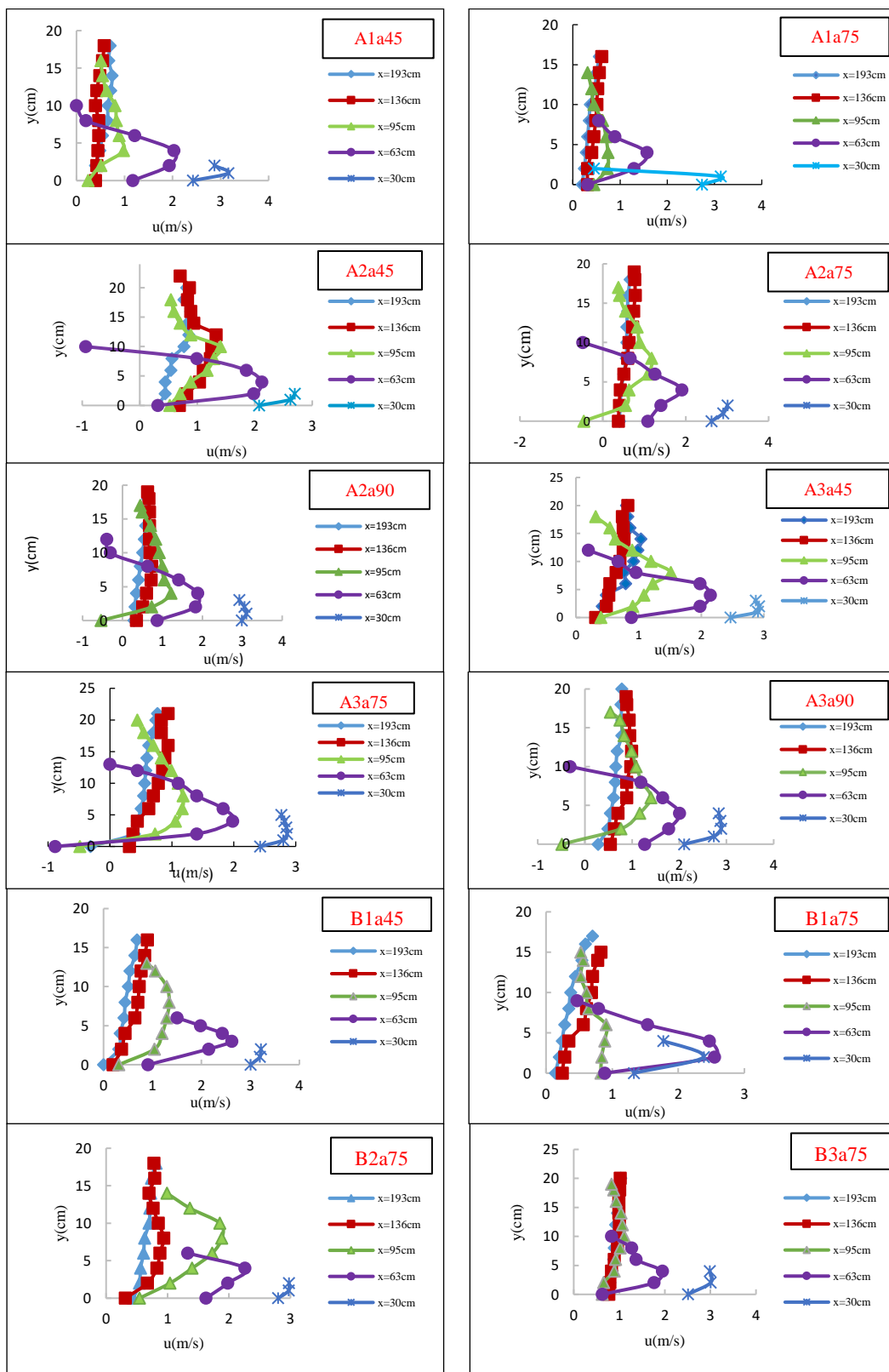
شکل ۲- صفحات مستغرق الف) آرایش اول ب) آرایش دوم پ) نمای سه بعدی
 Fig. 2 – Submerged vanes a) First Configuration b) Second Configuration c) Three-Dimensional View

نقاط بالاتر رخ می‌دهد. سرعت منفی در تعدادی از نمودارها به دلیل جابه‌جا شدن پیوسته جریان‌های غلتابی و وجود آشفتگی در جریان است. اهمیت نمودارهای بی‌بعد شده سرعت برای مقایسه میزان رشد لایه مرزی در مقاطع عرضی است.

نمودار بدون بعد سرعت شکل (۴) ترسیم تغییرات نسبت عمق جریان (D) به پارامتر b در مقابل نسبت سرعت جریان (U) به سرعت بیشینه در مقطع مورد نظر U_m است. U_m سرعت بیشینه و b عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت بیشینه است. در شکل (۴) مختصات نقاط تجمعی بی‌بعد سرعت در تاج پرش آزمایش‌های مشخص شده با مختصات نقاط تاج پرش در آزمایش پرش کلاسیک مقایسه شده است همانطور که دیده می‌شود نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در پرش هیدرولیکی روی بستر صفحات مستغرق مشابه هستند اما با نیمرخ سرعت مربوط به بستر صاف در عمق بالاتری اتفاق افتاده‌اند.

نتایج و بحث

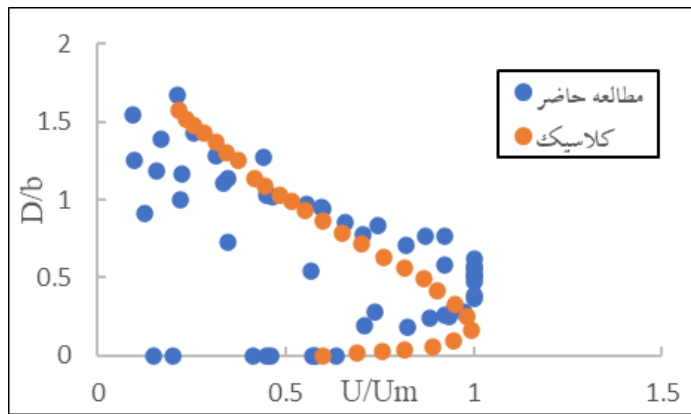
در این تحقیق نمودارهای عمقی سرعت برای ۱۲ آزمایش اندازه‌گیری و در نمودارهای ۳ رسم شده است. در هر شکل پنج نیمرخ رسم شده که نشان دهنده تغییرات سرعت از ابتدا تا انتهای پرش هستند. در هر نمودار سرعت، x فاصله مقطع عرضی از ابتدای پرش برحسب سانتی‌متر است. به دلیل ثبات بیشتر پرش، این نمودارها برای بیشترین بازشدگی در هر دبی رسم شده است. مطابق این نمودارها، مقدار بیشینه سرعت در آغاز پرش دیده می‌شود و هرچه به انتهای آن نزدیک می‌شویم مقدار آن کمتر می‌شود و یکنواخت‌تر می‌گردد که دلیل آن افت انرژی در طول پرش است. از طرفی در هر نمودار، سرعت از کف کانال به بالا افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشینه برسد و دوباره به دلیل جریان‌های ثانویه سطحی روند کاهشی دارد. به‌طور کلی مقدار بیشینه سرعت با دور شدن از آغاز پرش کاهش می‌یابد و در عمق پایین‌تری از سطح آب رخ می‌دهد. بستر صفحات مستغرق موجب کاهش سرعت جریان می‌شود و مقدار بیشینه آن نسبت به پرش کلاسیک در



شکل ۳- نمودارهای عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش در آزمایش‌ها

Fig. 3 - Depth-averaged velocity profiles along the stilling basin in the experiments

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی

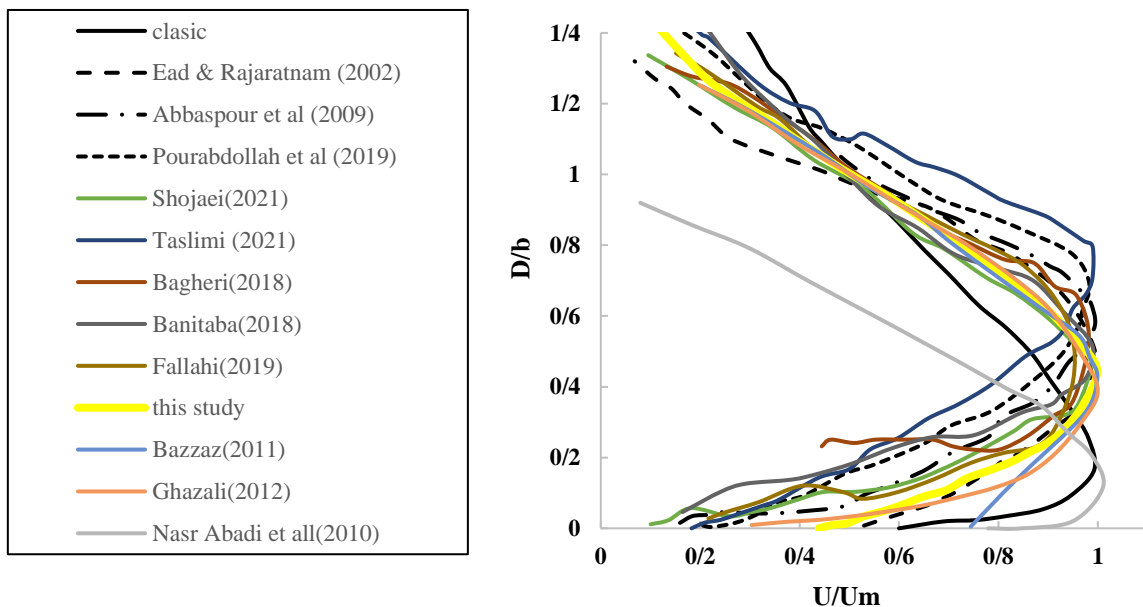


شکل ۴ - مقایسه نمودار بدون بعد سرعت با حالت کلاسیک

Fig. 4 - Comparison of the dimensionless velocity diagram with the classic case

تنهایی برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده شده است، افزایش قابل توجه عمق در بیشینه سرعت مشهود است، به‌گونه‌ای که نیمرخ‌های بالاتر از آن همگی از ترکیب دو یا چند عامل موثر برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده کرده‌اند. با این همه، اختلاف نتیجه ناچیز است.

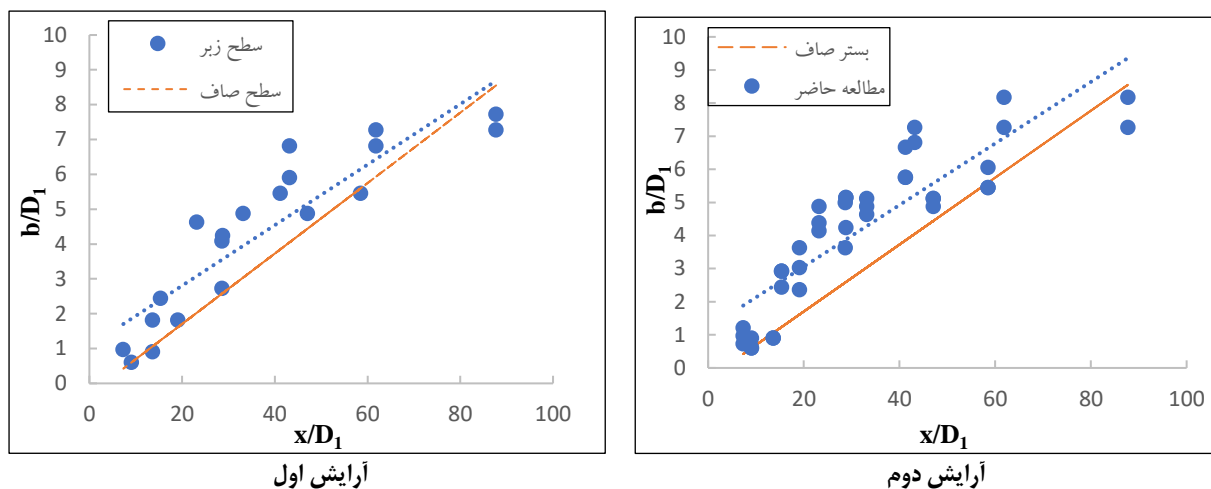
در شکل (۵) نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت برآزش داده شده آزمایش‌های مطالعه حاضر با نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت برآزش داده شده دیگر پژوهشگران مقایسه شده است، که توافق خوبی با نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها فقط از صفحات مستغرق به



شکل ۵ - مقایسه نمودار بدون بعد سرعت با نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران

Fig. 5 - Comparison of the dimensionless velocity diagram the results of other researchers

تغییرات معیار طولی بی‌بعد در فاصله‌های عرضی x ، مطابق شکل (۶) است.



شکل ۶- چگونگی تغییر معیار عمق b/D_1 در برابر معیار طول x/D_1
 Fig. 6 - Variation of the depth criterion b/D_1 versus the length criterion x/D_1

x اندازه فاصله تا پاشنه پرش هیدرولیکی و معادله‌های پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر دارای صفحات ۱ تا ۳ نشان‌دهنده ارتباط بین دو نسبت بی‌بعد b/D_1 در مستغرق است. برای بستر صاف:

$$\frac{b}{D_1} = 0.1011 \frac{x}{D_1} - 0.3161, \quad R^2 = 0.81 \quad (1)$$

برای بستر زیر با آرایش اول :

$$\frac{b}{D_1} = 0.0992 \frac{x}{D_1} + 0.7324, \quad R^2 = 0.8097 \quad (2)$$

برای بستر زیر با آرایش دوم :

$$\frac{b}{D_1} = 0.0883 \frac{x}{D_1} + 1.0459, \quad R^2 = 0.77 \quad (3)$$

اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002)، عباسپور و همکاران (Abbaspour *et al.*, 2009)، غزالی و همکاران (Ghazali *et al.*, 2012) و باقری (Bagheri, 2018) به ترتیب از محققانی هستند که ارتباط دو نسبت b/D_1 و x/D_1 را توسط رابطه‌های ۴ تا ۷ ارائه کرده‌اند.

$$\frac{b}{D_1} = 0.17 \frac{x}{D_1} + 0.5, \quad R^2 = 0.91 \quad (4)$$

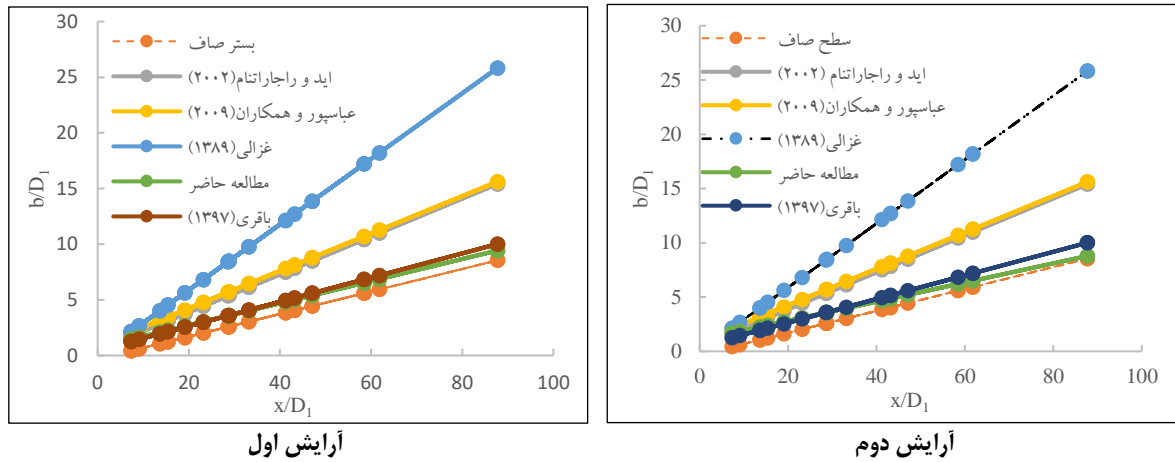
$$\frac{b}{D_1} = 0.168 \frac{x}{D_1} + 0.88, \quad R^2 = 0.83 \quad (5)$$

$$\frac{b}{D_1} = 0.2945 \frac{x}{D_1} + 0.0017, \quad R^2 = 0.91 \quad (6)$$

$$\frac{b}{D_1} = 0.1088 \frac{x}{D_1} + 0.4687, \quad R^2 = 0.8 \quad (7)$$

تغییرات معیار طولی b/D_1 در برابر x/D_1 برای بسترهای صاف، بسترهای همراه با صفحات مستغرق در مطابق نمودار (۷) است. آزمایش حاضر و نتایج دیگر محققان در محدوده مورد نظر

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی



شکل ۷- مقایسه نمودار تغییرات معیار عمق b/D_1 برحسب معیار طول x/D_1 با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران
 Fig. 7 - Comparison of the variation diagram of depth criterion b/D_1 versus length criterion x/D_1 with the results of other researchers

ارتباط بین δ/D_1 و x/D_1 با رابطه (۸) مشخص است. رابطه‌های ۸ تا ۱۱ ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در راستای طول پرش هیدرولیکی برای بستر صفحات مستغرق هستند. مطابق نمودار (۷) مقدار δ/b به‌طور میانگین برای آرایش اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۷۲ است و برای $x/D_1 > 50$ نسبت δ/b از خط میانگین بالاتر واقع می‌شود. به دلیل کم بودن اثر آشفتگی و جریان‌های ثانویه ناشی از وجود صفحات مستغرق، ضخامت لایه مرزی در قسمت‌های آرام جریان (جاهایی با سرعت کمتر) بیشتر است. در مقادیر کمتر از ۵۰، نسبت δ/b در مقایسه با خط میانگین کاهش می‌یابد.

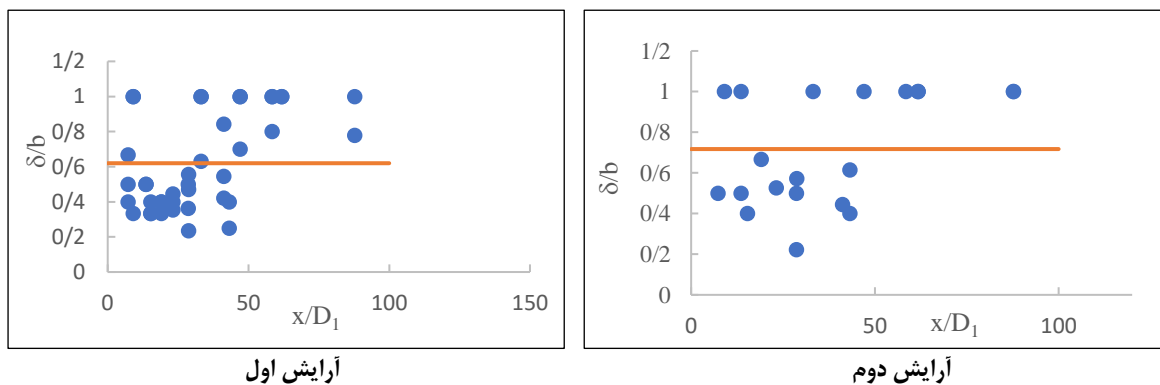
$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0967 \frac{x}{D_1} - 0.3614, \quad R^2 = 0.81 \quad (8)$$

$$\frac{\delta}{b} = 0.62 \quad (9)$$

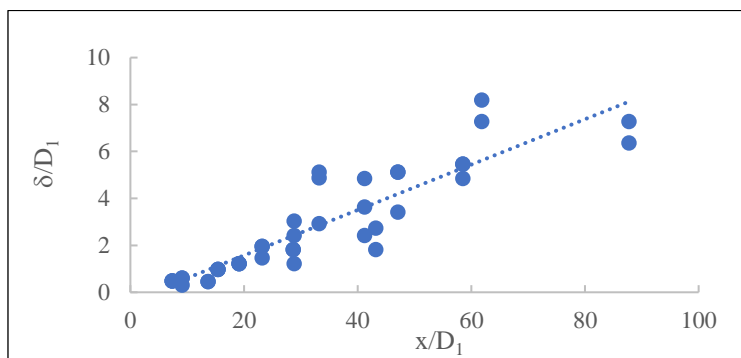
برای بستر زبر با آرایش دوم:

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0981 \frac{x}{D_1} - 0.4245, \quad R^2 = 0.87 \quad (10)$$

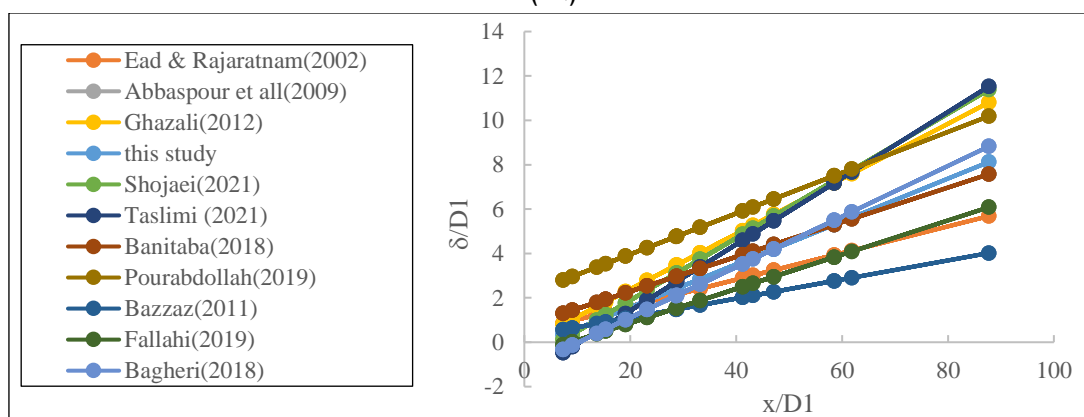
$$\frac{\delta}{b} = 0.72 \quad (11)$$



شکل ۸- تغییرات معیار ضخامت لایه مرزی δ/b برحسب معیار طول x/D_1
 Fig. 8 - Variation of the boundary layer thickness criterion δ/b versus the length criterion x/D_1



(الف)



(ب)

شکل ۹- الف) تغییرات معیار ضخامت لایه مرزی δ/D_1 برحسب معیار طول x/D_1 و ب) مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران
Fig. 9 – a) Variation of the boundary layer thickness criterion δ/D_1 versus the length criterion x/D_1 and b) comparison with the results of other researchers

نتیجه‌گیری

پروانه‌ای با زاویه برخورد 45° به دست می‌آید. بنابر این می‌توان گفت بهترین مشخصه پارامتر بی‌بعد ضخامت لایه مرزی، δ/b بر زبری مصنوعی با آرایش پروانه‌ای و زاویه برخورد 45° صفحات مستغرق نسبت به دیگر پژوهش‌ها با یک عامل تاثیرگذار بوده است.

در پژوهش‌های امروزی در موضوع پخش هیدرولیکی، استفاده از روش‌های پیشرفته، مانند ابزارهای یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در حال افزایش است. شبیه‌سازی پخش‌های هیدرولیکی با CFD کاری پیچیده است و نیازمند توجه دقیق به مدل‌سازی آشفتگی، دقت شبکه، شرایط مرزی و عوامل مختلف دیگر است. ضروری است از روش‌های پیشرفته برای اندازه‌گیری سرعت سه‌بعدی (3D) و تنش برشی بستر یکپارچه استفاده شود.

در موضوع پخش بر بستر زبر، یکی از ویژگی‌هایی که توجه محققان را جلب کرده نیمرخ سرعت پخش بر بستر زبر است. در این پژوهش اثر آرایش صفحات مستغرق بر نیمرخ‌های سرعت پخش هیدرولیکی حوضچه آرامش در دامنه اعداد فرود $4/8$ تا $9/14$ اندازه‌گیری و با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در پخش هیدرولیکی روی بستر صفحات مستغرق مشابه هستند اما در بالای نیمرخ سرعت مربوط به بستر صاف واقع می‌شوند.

نتایج تحقیق نشان داد مقدار پارامتر بی‌بعد ضخامت لایه مرزی، δ/b ، $0/72$ است که در آرایش موازی صفحات مستغرق با زاویه برخورد 75° نسبت به زاویه 45° و 90° بیشترین مقدار را دارد، درحالی‌که این مقدار در آرایش

دسترسی به داده‌ها تحلیل آشفتگی به درک ظریف‌تر از دینامیک جریان زیرینایی کمک خواهد کرد. علاوه بر این، چالش پایداری پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس همچنان باقی است. معرفی زبری و آستانه‌ها (سیل) می‌تواند پایداری پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس را افزایش دهد. بررسی اثرهای احتمالی مقیاس در چنین شرایطی ضروری است.

مشارکت نویسندگان تمامی نویسندگان در مطالعه و طراحی مقاله و حصول اطمینان از اعتبارسنجی در برابر داده‌های آزمایشگاهی و شناخت محدودیت‌های رویکرد CFD برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد، بسیار مهم است. بنابراین، به نظر می‌رسد فرا رسیدن زمانی که بتوانیم فیزیک جریان پیچیده پرش‌های هیدرولیکی را در سناریوهای عملی گوناگون به کمک این تکنیک‌های پیشرفته مشاهده و درک کنیم نزدیک است.

تضاد منافع نویسندگان نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

منابع

- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *J. Hydro-environ Res.* 3:109-117.
- Bagheri, H. (2018). Investigation of the Effect of Adverse Slope and Submerged Vanes on Hydraulic Jump Characteristics. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
- Bakhmeteff, B. A and Matzke, A. E. (1936). The Hydraulic Jump in Terms of Hydraulic Similarity. *Trans. Am. Soc. Civ.Eng.* 101: 630-647
- Banitaba, Sh. (2018). Analysis of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope and Artificial Trapezoidal Roughness of Different Heights on a Laboratory Scale. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.
- Bazzaz, M., Ghorbani, B. and Samadi Brojeni, H. (2011). Assessment of Velocity Profile Variation of Hydraulic Jump in Relation to Changes in the length of Roughness. *Journal of Hydraulics*, 6(3), 13-24.
- Ead, S. A., Rajaratnam, N. and Katopodis, C. (2000). Turbulent open channel flow in circular corrugate culverts of hydraulic energy. *ASCE*, 126: 750-757.

- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 128: 656-663.
- Fallahi, B. (2019). An Experimental Study of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope, Rough Bed, and Sudden Channel Expansion. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Farhoudi, J. (1993). *Flow in Open Channels*. Urmia University Press.
- Ghazali, M. , Samadi brojni, H. , Ghorbani, B. and Rahmati, A. (2012). A Laboratory study of Velocity profile at Hydraulic Jump on Triangular Corrugated Bed. *Irrigation and Water Engineering*, 2(4), 117-128
- Hager, W. H. and Li, D. (1992). Sill-controlled energy dissipator. *J. Hydraul. Res.* 30: 165-181.
- Mohammadzadeh (2021). Investigation of the Effect of Zigzag-Shaped Blocks on Hydraulic Jump. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan
- Nasr Abadi, Mohsen; Omid, Mohammad Hossein; Farhoudi, Javad (2010). A Comparison between Free and Submerged Hydraulic Jumps Downstream of Sluice Gates. 9th Iranian Hydraulic Conference, Tehran, Iran
- Ohtsu, I., and Yasuda, Y. and Awazu, S. (1990). Free and Submerged Hydraulic Jumps in Rectangular Channels, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No. 35, Feb. 50 p.
- Pourabdollah Ghafarkhi (2019). Comparison of Analytical, Numerical, and Laboratory Results of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope, Rough Bed, and End Sill. Doctoral Dissertation, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.
- Rajaratnam, N. (1967). Advances in hydrosiences. In: hydraulic jumps. Department of Civil Engineering Univeercity of Alberta, Edmonton, Canada. 197-280.
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jump on rough bed. *Trans. Eng. Inst. Canada*, 11: 1-8.
- Rouse, H. Siao, T. T. and Nagaratnam, S. (1959). Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump, *Trans. ASCE*, 124: 926-966.
- Schroder, R. (1963). Die turbulente Stromung im freien Wechselsprung, Habilitationsschrift, Mitteilung 59, Institut fur Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, Berlin.
- Shojaei, M. (2021). Experimental Study of Hydraulic Jump in Stilling Basin with Artificial Roughness and Sudden Expansion. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Taslimi (2021). Characteristics of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Trapezoidal Roughness and Initial Negative Step on a Laboratory Scale. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
- Wu S. and Rajaratnam N. (1995). Free jumps supmerged jums and wall jets, *J. of Hydraulic Research*, 33(2): 197-212.