

# Laboratory Study of Crossbeam Structural Design in Control of Asymmetric S-type Jump of Sudden Expansion Sections

Saeed Hajjaligol<sup>1</sup>, Javad Ahadiyan<sup>2\*</sup>, Mohsen Sajjadi<sup>3</sup>, Anna Rita Scorzini<sup>4</sup>, Mahmood Shafai Bejestan<sup>5</sup>

1-Graduated Ph.D, in Dept. of Hydraulic Structures, College of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.


2-Associate Professor, Dept. of Hydraulic Structures, College of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3-Assistant Professor, College of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

4-Assistant Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Univ. of L'Aquila, Via G. Gronchi, L'Aquila, Italy.

5- Professor, Dept. of Hydraulic Structures, College of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

\* [j.ahadiyan@scu.ac.ir](mailto:j.ahadiyan@scu.ac.ir)

Received: 13 March 2022, Accepted: 3 November 2022  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** This paper presents an experimental study on a proposed dissipation structure consisting of a series of cross beams tested in different geometric configurations and hydraulic conditions. First, the effectiveness of this system was analyzed in terms of uniformity of flow and bed velocity. While observing the dissipating mechanisms, in the next step, the system performance under variable tailwater conditions by describing the three-dimensional flow patterns observed in the downstream channel with a gradual decrease in downstream level to 70%, 80%, and 90% of tailwater depth in the conditions the reference experiments were tested. Measurement of three-dimensional velocities to determine the parameters of flow uniformity, momentum, and energy coefficients, analysis of three-dimensional velocity distributions, turbulent kinetic energy, supplementary studies on the development of isothermal line concentration and drop energy losses of reference experiments, and optimal case compositions were examined. The results showed that in addition to the similar qualitative trends of  $\beta$  and  $\alpha$ , the flexibility of the dissipation structure has high efficiency in the effective homogenization of the flow in the abrupt expansion channel, even in the downstream water level conditions.

**Methodology:** The experiments were performed in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz and in a horizontal rectangular open channel with a length of 12 m and a width of 1 m with a height of 0.87 meters. Flow supply was provided through an open tank with dimensions of 7 m by 5 m at the height of 2.5 m. Hydraulic S-jump was performed with sudden expansion and design and construction of ogee weir. With the formation of S-jump, the conditions for the depth of  $h_s$  downstream in the end control section were set, equal to 0.19, 0.15 and 0.11 m, respectively, to create three 7.4, 8.7, and 9.5 Froude numbers. Measurement of longitudinal velocity at a fixed height of 0.5 cm from the bottom of the canal and longitudinal sections of 0.25 from each other in the first 2 m of the downstream canal, and the other ones at distances of 2.5, 3, 4, 6, and 8 m from sudden expansion. Finding

the best configurations to achieve a uniform flow and reduce the velocity distribution was done in most of the critical areas downstream of the structure. For the levels of reference experiments, 54 geometries of the energy dissipation system with different configurations were studied. Experiments showed less effective energy dissipation for downward system orientation. Therefore, 162 experiments were performed using the structural system in the first part of the laboratory study. For further studies of the performance of the energy dissipation system under variable downstream conditions, which gradually reach 70%, 80%, and 90%  $h_s$  with downstream water level decreasing.

**Results and discussion:** The results showed the values of  $\beta_b$  and  $v_{mb}^2$ .  $\beta_b$  calculated for three Froude numbers and different geometric parameters of the system, which means the absolute distance of 1.65, 1.85, and 2.55 meters from the expansion section for  $P = 0.4, 0.6,$  and  $0.8$  meters, respectively the effectiveness of the system (beam configurations) in homogenizing the flow and reducing the bed velocity is clearly evident, even for the worst performance settings. When using the structure, the mean  $\beta_b$  is almost less than 1.1 with  $v_{mb}^2$ ; the corresponding  $\beta_b$  was measured to be approximately  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . According to the observed efficiency of the beam system, 3 of the best performance settings of the structures were selected for  $Fr = 9.5$  to the flow characteristics along with the flow and downstream of the structure. Energy dissipation should be fully described. According to research results, the qualitative trends of  $\beta$  and  $\alpha$  are similar. Three-dimensional velocity distribution analysis showed that this type of structure has the flexibility to effectively homogenize the flow in abruptly expanding channels, even in the conditions of downstream water level varieties.

Analysis of the turbulence kinetic energy indicated that smaller vortices contribute to turbulence at the surface and promote mixing in the flow interface until they reach maximum value during the study period. This period was from  $x = 0.3 \text{ m}$  to  $x = 2$  according to the definition of the ratio of energy losses to initial energy as a relative energy loss or jump efficiency ( $\eta$ ).

**Conclusion:** The use of different geometric configurations of cross beams shows the effectiveness of beams' contribution in homogenizing flow and reducing bed velocity. Study of the effect of crossbeam system distance from expansion ( $P$ ), an essential parameter in the effectiveness of geometric configuration of the structure, was presented. The concentration of turbulent flow caused by the jet hitting the beam system, particularly the first beam, leads to a significant energy loss in the area between the first and 2nd beams. Before leaving the main system, the bubbles, leaving the system energy in the same evacuate the area and saw a calmer flow in after areas of the structure. The study of turbulent kinetic energy showed that the conversion rate of the high state from the mainstream after the beams (Conversion of mean flow) to turbulent flow occurs in some cases. Also, in all Froude numbers of reference experiments, the trend of increasing the relative energy loss to a cross-section of about 2.5 m after cross-section expansion is increasing. Hence, with a steady, almost linear trend, it extends to the end of the section, and with increasing Froude number, the amount of energy loss increases, which is the case with Neisi and Shafai Bajestan (2013) agree that the relative energy loss in expansion sections is a function of the initial Froude number and the  $\varepsilon$  ratio.

**Keywords:** Sudden expansion, cross beams, hydraulic S-jump, flow patterns, energy dissipation, stilling basin.

© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی آزمایشگاهی طرح سازه بیم‌های متقاطع در کنترل پرش نامتقارن نوع S مقاطع واگرای ناگهانی

سعید حاجی علی گل<sup>۱</sup>، جواد احدیان<sup>۲\*</sup>، سیدمحسن سجادی<sup>۳</sup>، آنا ریئا اسکورزینی<sup>۴</sup> و محمود شفاعی بجزستان<sup>۵</sup>

- ۱- فارغ التحصیل دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۴- استادیار گروه مهندسی عمران محیط زیست و معماری، دانشگاه L'Aquila, Via G. Gronchi, ایتالیا.
- ۵- استادگروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

\* j.ahadiyan@scu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** انبساط مقطع می‌تواند راه حل مناسبی برای افزایش کار حوضچه‌های آرامش باشد. با این حال، در برخی از شرایط اجرایی، پدیده نامطلوب ناپایداری جریان می‌تواند منجر به جریان نامتقارن و تمرکز سرعت موضعی بیشتر در آبراهه (کانال) پایاب شود. این مقاله نتیجه انجام یک تحقیق تجربی با استفاده از چند سری تیرهای متقاطع، آزمایش شده در ترکیب‌بندی‌های هندسی و شرایط هیدرولیکی مختلف می‌باشد. در آغاز، اثربخشی این سامانه از نظر یکنواختی جریان و سرعت در بستر آبراهه تجزیه و تحلیل شد. کار سامانه، در شرایط پایاب با توصیف الگوهای جریان سه بعدی، با کاهش تدریجی سطح آب پایین‌دست به ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ عمق پایاب در شرایط مرجع آزمایش شد. اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی برای تعیین فراسنجه‌های یکنواختی جریان، ضریب‌های مومنتم و انرژی، تجزیه و تحلیل توزیع سرعت‌های سه بعدی، انرژی جنبشی آشفته‌گی، بررسی‌های تکمیلی توسعه تمرکز خطوط هم‌تنش و افت انرژی پرش در شرایط آزمایش‌های مرجع و ترکیب بندی‌های بهینه، بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن بر روند کیفی همانند  $\beta$  و  $\alpha$ ، که ضریب‌های تصحیح انرژی جنبشی و مومنتم به عنوان فراسنجه‌های اساسی بررسی یکنواختی جریان می‌باشند، همچنین مشاهده شد که سازه هدررفت انرژی در همگن سازی موثر جریان، حتی در شرایط سطح آب پایین دست متغیر نیز دارای عملکرد مطلوبی است. در جریان آشفته پس از سازه، برای فرود ۹/۵ و سه ترکیب بندی بهینه، نوسان‌های سرعت در راستای افقی، عرضی و عمقی محاسبه شد و تغییرپذیرهای انرژی جنبشی آشفته‌گی (TKE) در برابر  $Z/Y_1$  نشان داده شد و مشخص شد، تمرکز بیشترین میزان TKE در حالت پایاب  $0.9h_0$  قرار دارد. در بررسی خطوط تمرکز، میزان‌های  $TKE \approx 0.3 \sim 0.6$  در حدود  $14/48$  درصد بزرگی میزان‌های انرژی جنبشی آشفته‌گی جریان را دارا می‌باشند. در نهایت تحلیل افت انرژی نسبی پرش با استفاده از بیم‌های متقاطع نشان داد که بیشترین افت انرژی در ترکیب بندی ۳ و در مقایسه با شرایط مرجع که روند افزایشی افت انرژی نسبی در آن تا فاصله ۲ متری با شیب  $11/41$  ادامه دارد، به طور میانگین به میزان  $44/78$  درصد افزایش افت انرژی نسبی را موجب می‌شود. لذا این سازه هدررفت انرژی با وجود انبساط مقطع و در عین پرهیز از گذاری‌های زیانبار آن توصیه می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** انبساط ناگهانی، تیرهای متقاطع، پرش هیدرولیک فاصله‌ای، الگوهای جریان، هدررفت انرژی، حوضچه‌های آرامش.

## ۱- مقدمه

یک پرش هیدرولیکی به هندسه آبراهه، جریان ورودی، و شرایط پایاب آبراهه وابسته است. در مواردی که امکان تامین عمق مورد نیاز برای یک پرش هیدرولیک کلاسیک وجود ندارد، یا حفاری برای پایین بردن کف حوضچه آرامش مقرون به صرفه نیست، یک راه حل مناسب برای

تشکیل انواع پرش‌های هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش یکی از پرکاربردترین و موثرترین راه‌حل‌ها برای از بین بردن انرژی سینماتیک آب در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند دریچه‌ها، ناوها و سرریزها است. تثبیت

رخ می‌دهد که بالا آمدن عمق پایاب باعث حرکت پنجه پرش به سمت بخش انبساط در بالادست شده که در این حالت جریان به شدت نامتقارن، شبیه به یک جت، در امتداد یک سمت دیوار جانبی متمرکز شده است و یک جریان معکوس برگشتی نیز در طرف مقابل ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه پرش S به یقین بحرانی‌ترین شرایط طراحی است که با افزایش بالقوه خطرناک تمرکز سرعت موضعی بالا که در بازه طولانی در آبراهه پایاب رخ می‌دهد، می‌تواند باعث تخریب کف و دیواره حوضچه آرامش پایین دست شود.

این مطلب نیاز به بررسی و ارزیابی بیشتر برای ایجاد ساختارها و سازه‌های هدررفت انرژی جهت کاهش انرژی جنبشی جریان آب در این نوع پرش را توجیه می‌کند. بررسی‌هایی در این زمینه، با فرآیندهای هدررفت انرژی ناشی از طرح سازه‌ای که در آبراهه‌های با انبساط ناگهانی رخ می‌دهد، انجام شده است. به طور مثال، Bremen and Hager (1993) و Zare and Doering (2011) در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند، استفاده از یک آستانه صلب مرکزی یا تمام عرض واقع در پایین دست بخش انبساط، می‌تواند در بهبود ویژگی‌های جریان با بازپخش آن به صورت متقارن در پیرامون خط مرکزی آبراهه پایاب موثر واقع شود. محققان دیگر Neisi and Shafai Bajestan (2013)، Hassanpoor et al. (2017) و Torkemanzad et al. (2019) بازده هدررفت انرژی بسترهای زبر در آبراهه‌های دارای انبساط ناگهانی را بررسی کردند. Scorzini et al. (2016) یک پژوهش تجربی برای بررسی اثرگذاری‌های یک سامانه متشکل از تیرهای متقاطع I شکل برای بهبود الگوهای جریان در یک آبراهه با انبساط ناگهانی با نسبت انبساط برابر با ۰/۴۸، در یک شرایط جریان ورودی واحد را ارزیابی کردند. بنابراین نتایج تحقیق ایشان، کار سامانه بر مبنای یکنواختی جریان و کاهش میانگین طولی سرعت بستر را ارزیابی کردند و نشان دادند که سازه پیشنهادی می‌تواند در بهبود شرایط جریان در آبراهه پایاب عملکرد سامانه تحت تأثیر جهت‌گیری آن و

اطمینان از افت انرژی درون حوضچه، استفاده از یک انبساط عرضی ناگهانی است. (Herbrand, 1973; Hager, 1992; Bremen and Hager, 1993; Omid et al., 2007). با این حال، برای شرایط خاص عمق پایاب، پدیده‌های نامطلوبی مانند ناپایداری جریان، جریان نامتقارن، جداسازی جریان و نوسان‌های ناشی از جریان آشفته و گردابه‌های درون پرش، می‌تواند باعث آبشستگی و آسیب در آبراهه پایین دست شود. این پدیده‌ها می‌توانند در شرایط بهره‌برداری از آبراهه‌ها نیز رخ دهند موقعیت‌هایی که مسیر آبراهه انتقال به حوضچه آرامش توسط چندین دریچه کنترل می‌شود و تنها برخی از آنها باز هستند (Scorzini et al., 2016; Hajjaligol et al., 2021).

جریان‌های واگرا، شامل ناحیه‌های جداساز جریان، نوسان‌های درون جریان و شرایط نایکنواخت در عرض آبراهه انبساط می‌باشند. برای شرایط جریان تحت فشار و جریان زیر بحرانی در آبراهه انبساط، عنصرهایی مانند هواده‌ها، انحراف‌ها و جداکننده‌ها، همراه با دیگر روش‌های فنی، منجر به توسعه سازه‌هایی شدند که برای جلوگیری از شرایط جریان نامتقارن به کار می‌روند. (Blevins, 1984). در زمینه استفاده از حوضچه‌های دارای انبساط، بررسی‌های مختلفی در مورد پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های ساکن انجام شده است (Bremen and Hager, 1993).

مسئله اصلی انبساط ناگهانی، تمایل به جریان نامتقارن است که به دو عامل بستگی دارد: سطح بزرگ آب ساکن و عرض کم جت ورودی. این مورد به دلیل طول جریان نامتقارن بوده که در برخی زمان‌ها به عنوان یک جت عمل می‌کند، در نتیجه این تلاطم و برخورد آب با هوا، حجمی از هوا با آب مخلوط شده و به پایین دست منتقل می‌شود و در نهایت به شکل حباب‌های هوا آزاد می‌شود.

در حالت کلی، پرش‌های هیدرولیکی در آبراهه‌های با انبساط ناگهانی را می‌توان به سه نوع بسته به عمق پایاب و موقعیت پنجه پرش، شامل پرش هیدرولیکی دافعه<sup>۱</sup>، پرش هیدرولیکی فاصله‌ای یا مکانی<sup>۲</sup> و پرش انتقالی یا بینابین<sup>۳</sup> طبقه بندی کرد. پرش هیدرولیکی نوع S هنگامی

3 Transitional Hydraulic jump or T-jump

1 Repelled Hydraulic jump or R-jump

2 Spatial Hydraulic jump or S-jump

فاصله بیم‌ها به کار رود.

هدف از این تحقیق، تحلیل بیشتر فرآیندهای سازه هدررفت انرژی و الگوهای جریان برای ترکیب بندی های مختلف هندسی تیر متقاطع نصب شده در آبراهه با واگرای ناگهانی است. برای این منظور، در آغاز دامنه تحقیقات فیزیکی انجام شده توسط Scorzini et al. (2016) ارزیابی شد و پس از انجام آزمایش‌های مرجع برای سه فرود مختلف  $0.7/4$ ،  $0.8/7$  و  $0.9/5$  برای پرش نوع S و T با آزمایش چندین پیکربندی هدردهنده انرژی با نسبت انبساط متفاوت و چندین شرایط ورودی، موثرترین هندسه‌ها تحت متغیر عمق‌های پایاب برای بررسی رفتار سامانه در شرایط متفاوت از شرایط طراحی، آزمایش شدند. ترکیب بندی سازه‌های مورد استفاده در این تحقیق باعث ایجاد حرکت زیاد (اختلاط جرم با حرکت شدید) از زیر و بالای سازه و تا فاصله‌های پس از آن است. این حرکت شدید جریان در واقع تغییر سریع فراسنجه مکانی و زمانی سرعت و فشار است. لذا می‌توان گفت افزون بر شار جریان، انتشار تلاطم باعث اختلاط سریع و افزایش سرعت انتقال اندازه حرکت می‌شود. میدان جریان آشفته در پرش‌های هیدرولیک آزاد توسط محققان پرشماری بررسی و ارزیابی شده است. Rouse et al. (1958) نخستین محققانی بودند که اندازه‌گیری‌های دقیق تلاطم را در یک پرش هیدرولیکی انجام دادند. ساختار تلاطم در پرش‌های هیدرولیک آزاد چندی پیش با استفاده از سرعت‌سنجی تصویر ذرات (PIV) (Lin et al., 2012)، بادسنج لیزری داپلر (LDA) (Veeramony and Svendsen, 2000) و سرعت سنج داپلر آکوستیک (ADV) بررسی شد (Mignot and Cienfuegos, 2011; Liu et al., 2002).

Habibzadeh et al. (2016) اندازه‌گیری‌های آشفتگی در پرش‌های هیدرولیکی مستغرق با بلوک‌های بافل را بررسی کردند و دریافتند که در رژیم DSJ (جت سطحی منحرف شده)، انرژی جنبشی آشفته قابل توجهی (TKE) درست پایین دست بلوک‌ها ایجاد می‌شود و سرعت هدررفت TKE بسیار زیاد است، که منجر به فروپاشی سریع TKE می‌شود. در این تحقیق، فرضیه امکان یکنواختی جریان و

کنترل آشفتگی و اغتشاش ناشی از ضربه‌های جت موج پرش S توسط سامانه بیم‌های متقاطع با زاویه‌های قرارگیری مختلف بررسی شده و تحلیل کمی ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی ترکیب بندی سازه‌ها که توسط Scorzini et al. (2016) معرفی و با بازه بزرگتری از اعداد فرود تشریح شد. سپس با بررسی ترکیب بندی‌های مختلف سازه‌ها و اعداد فرود منطبق با شرایط رخداد آنها در پای سرریزها، بهینه‌های آن بر مبنای رگرسیون خطی محاسبه شده و با سرعت‌سنجی سه بعدی، فراسنجه‌های اساسی این ترکیب بندی‌ها تحلیل شد که می‌تواند در کنترل فرسایش ناشی از پرش نامتقارن S در مقاطع واگرا در سرریز سدها در شرایط انبساط ناگهانی بسیار موثر باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز و در آبراهه باز مستطیلی افقی به طول ۱۲ متر و عرض ۱ متر با ارتفاع ۸۷ سانتی متر انجام پذیرفت. مخزن روباز به ابعاد ۷ متر در ۵ متر در ارتفاع ۲.۵ متر و از طریق سامانه لوله کشی فولادی به لوله ورودی آبراهه متصل بوده و تأمین جریان فلوم را به عهده داشت. در انتهای آبراهه، کنترل جریان از پایین دست بوسیله دریچه ای از جنس پلکسی گلس و با ابعاد  $100 \times 80$  سانتی متر انجام شد. تغییر ارتفاع دریچه به جهت حساسیت بالای تغییر، در حد میلی متر برای ایجاد پرش‌های نامتقارن در آبراهه با انبساط ناگهانی از طریق سامانه برقی تأمین گردید. در شکل شماره ۱ طرح کلی سیستم تجهیزات آزمایشگاهی در این تحقیق نشان داده شده است.

### ۲-۲- فراسنجه‌های هیدرولیکی تحقیق

برای ایجاد پرش هیدرولیکی با انبساط ناگهانی با توجه به ابعاد مخزن ورودی آبراهه آزمایشگاهی، اقدام به طرح و ایجاد سرریز از نوع پیوند<sup>۱</sup> شد. بر این مبنا سرریز اوجی با ارتفاع ۶۰ سانتی متر طرح و اجرا شد که محدوده گسترده‌ای از اعداد فرود  $0.5/5$  تا  $0.4/17$  را پوشش داده و در این تحقیق با توجه به اعداد فرود محتمل در پای سرریزها

با ارتفاع ۰/۴۰ متر و طول ۰/۶۰ متر برای تشکیل پرش‌های S و T شد، که برای پرش نوع S کف‌بست تا با تنظیم دریاچه پایین‌دست و عمق Tw بتوان پنجه پرش را در مرز بین مقطع انبساط در پای دیوار مقطع واگرا نگه داشت.

در شرایط نرمال مخزن، اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ بررسی شد. ۹۱  
برای ایجاد شکل باز شدگی پس از سرریز و تأمین شرایط واگرایی ناگهانی در امتداد بال‌های جانبی سرریز اوجی؛ اقدام به ساخت وجه امتداد با استفاده از ورق پلکسی گلس

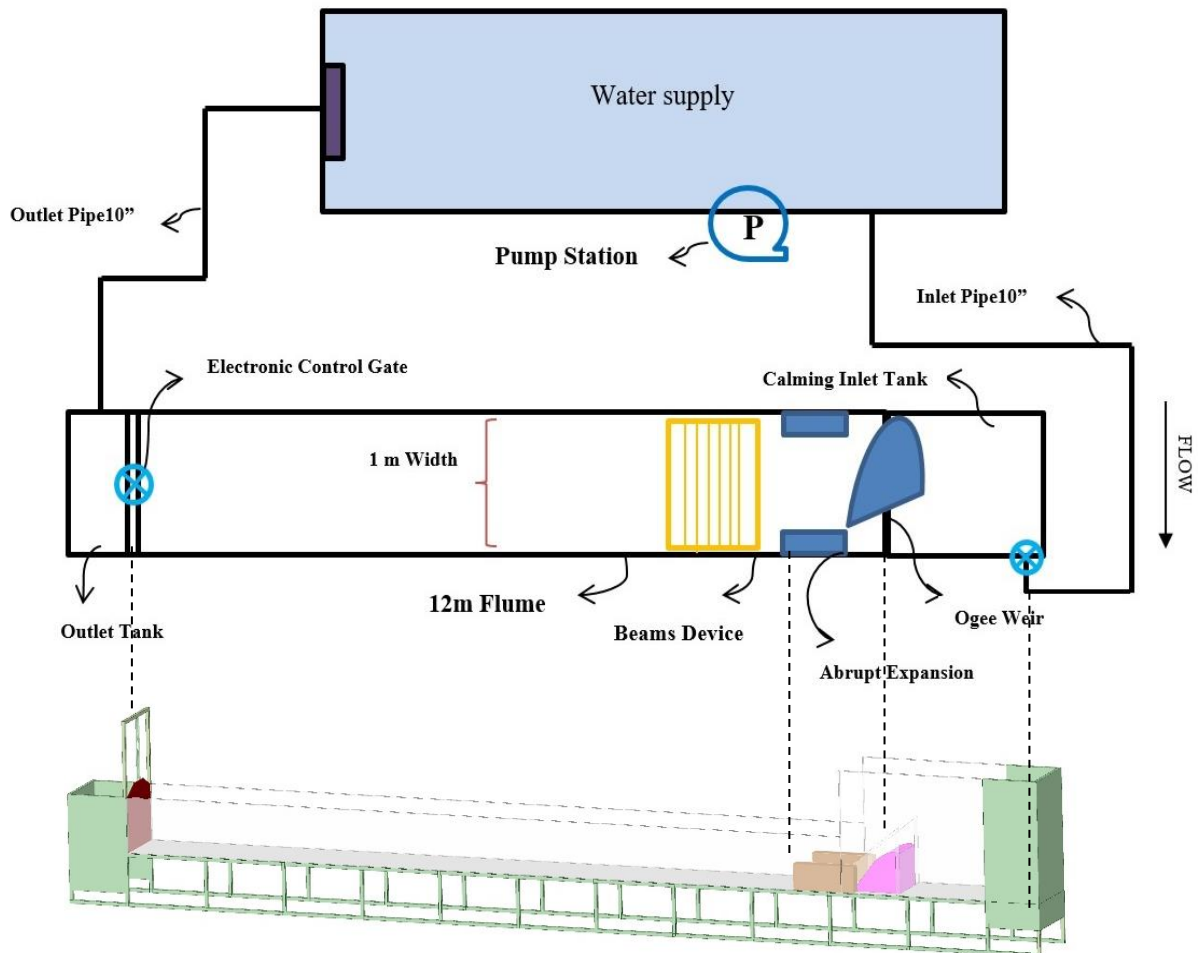


Fig. 1 Experimental Schematic plan in this Research

شکل ۱ طرح کلی سامانه تجهیزات آزمایشگاهی در این تحقیق

موردنظر (S-Jump) که با مشهود بودن فرارگیری پنجه پرش در یکی از کناره‌های محل انبساط برای پرش نوع S صورت پذیرفت. در جدول شماره ۱ فراسنجه‌های هیدرولیکی استفاده شده در آزمایش‌های شاهد در این تحقیق ارائه شده است. میزان‌های  $H_e$  ارائه شده ارتفاع متناظر بالادست سرریزو فراسنجه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها می‌باشد.

شرایط پرش S برای عمق پایاب  $h_s$  در قسمت کنترل انتهایی به ترتیب برابر با ۰/۱۹، ۰/۱۵ و ۰/۱۱ متر برای سه

## ۲-۳- اندازه‌گیری‌های مورد نیاز تحقیق

برای اندازه‌گیری دبی جریان در آغاز یک سرریز لبه تیز مستطیلی در موقعیت ۸ متری طول فلوم کار گذاشته شد، که با استفاده از این سرریز و در نهایت با استفاده از روش اندازه‌گیری حجمی در دو وجه فلوم دبی‌های مورد نیاز آزمایش شد.

آماده‌سازی مدل فیزیکی شامل تعیین اعداد فرود ( $Fr_1$ ) و دبی بر مبنای رابطه دبی - اشل موردنظر، تعیین ارتفاع گشودگی دریاچه انتهایی برای تشکیل نوع پرش‌های

جدول ۱ فراسنجه‌های هیدرولیکی در اعداد فرود استفاده شده در آزمایش های شاهد برای پرش نوع S و  $B=0/67$

Table 1 Hydraulic Parameters in Froude numbers used in reference experiments for S-Jump and  $B=0.67$

He (cm)	Q (m3/s)	$y_1$ (cm) Basin	$y_1$ (cm) S-Jump	$V_1$ (m/s)	$Fr_1$
12	0.03688	72	1.5	3.67	9.5
13.7	0.04447	73.7	1.8	3.68	8.7
15.5	0.05634	75.5	2.35	3.58	7.4

مقطع سرعت طولی  $v(x)$  و سرعت میانگین بستر  $v_{mb}$  در ۱۳ مقطع نماینده (شکل ۲، مقطع ۰/۲۵ متر تا ۸ متر) در ارتفاع ثابت ۰/۵ سانتی متر از بستر آبراهه اندازه‌گیری شده و برابر رابطه ۱،  $\beta_b$  (مشابه ضریب حرکت بوسینسک) برای به دست آوردن نیروی دینامیکی در واحد ارتفاع در عمق محاسبه شده که با رابطه  $\beta_b \rho v_{mb}^2$  معرفی می شود.

$$\beta_b = \frac{\int_0^B v(x) \cdot |v(x)| dx}{B \cdot v_{mb}^2} \quad (1)$$

در این رابطه:

B: عرض آبراهه پایین دست،  $v(x)$ : سرعت طولی در هر نقطه و  $v_{mb}$ : سرعت طولی میانگین جریان در کف آبراهه می باشد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، تاثیر زین بار جت پرش نامتقارن S در هر سه مورد برای اعداد فرود آزمایش شده تا انتهای فلوم ۱۲ متری امتداد داشته و پس از برخورد به دریچه انتهایی با ایجاد یک موج برگشتی و

عدد فرود بیان شده بدست آمد. اندازه‌گیری سرعت‌های طولی برای مشخص کردن جریان از نظر یکنواختی و سرعت میانگین (نزدیک) بستر بوسیله میکرو مولینه با تغییر پراب سرعت کم و زیاد، اندازه‌گیری شد (جریان سنج مدل Nixon با دقت ۱/۵٪ سرعت واقعی و در یک بازه زمانی ۳۰ ثانیه‌ای) انجام شد.

آزمایش‌های اولیه برای توصیف کامل الگوی جریان در شرایط مرجع S-Jump (بدون سازه) سه عدد فرود در امتداد فلوم انجام شد (شکل ۲). در این بخش از آزمایش‌ها برای تشریح الگوی جریان و مشاهده کامل نیروی دینامیکی وارد بر بستر و دیواره‌های حوضچه آرامش، اندازه‌گیری سرعت طولی در ارتفاع ثابت ۰/۵ سانتی متر از کف آبراهه و مقطع‌های طولی ۰/۲۵ از یکدیگر در ۲ متر اول آبراهه پایاب، و بقیه در فاصله‌های ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متری از انبساط ناگهانی و هر مقطع دارای ۹ نقطه در جهت عرضی با فاصله ۰/۱ متر برابر شکل ۲ انجام شد. سرعت موضعی رخ‌نماهای

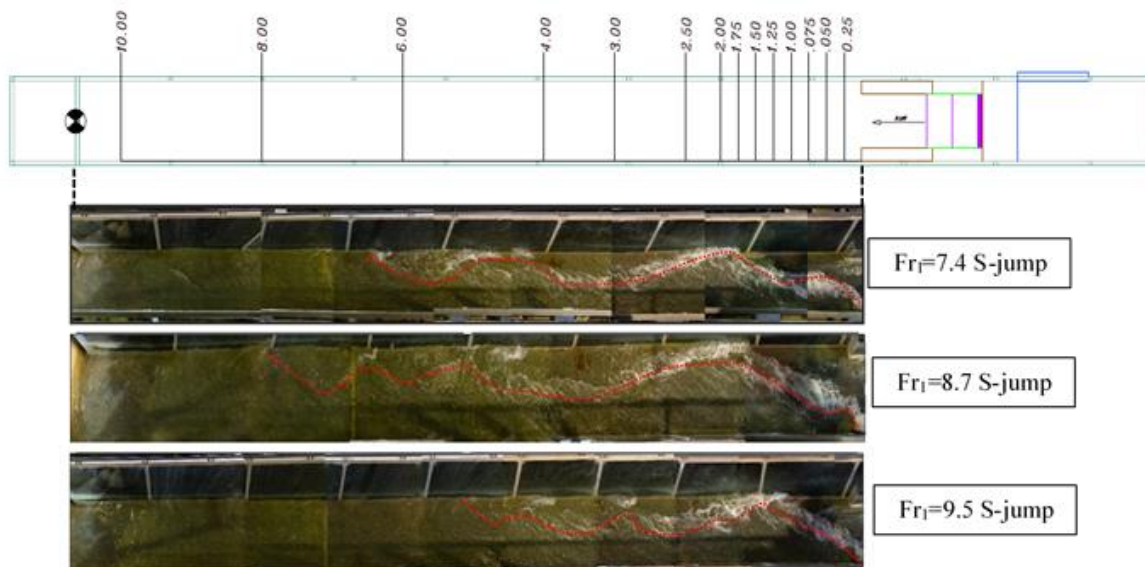


Fig. 2 Longitudinal plan for reference experiments and asymmetric jet jumps along the channel

شکل ۲ طرح طولی انجام آزمایش‌های مرجع و پرش نامتقارن با ضربه جت در امتداد کانال

برای تثبیت رقم‌های برداشت شده و با ۳ تکرار هر نقطه و بررسی میانگین داده‌ها انجام شد. بنابر نتایج این مرحله، برخی از موثرترین هندسه‌ها با معیار یکنواختی جریان برای بررسی‌های بعدی کار سامانه هدررفت انرژی، در شرایط پایاب متغیر و با کاهش تدریجی سطح پایاب به میزان ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ hs انتخاب شدند. برای توصیف کامل الگوهای جریان در پایین‌دست سازه با استفاده از یک سرعت سنج الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> با دقت: ± ۲٪ سرعت واقعی، اندازه‌گیری سرعت سه‌بعدی در چهار بخش از آبراهه، واقع شده در ۰/۳، ۰/۵، ۱، و ۲ متر پایین دست از سازه هدررفت، در زمان ۶۰ ثانیه (که با تکرار زمان‌های متوالی تا ۱۲۰ ثانیه و مشاهده روند یکنواخت، این زمان مناسب تشخیص داده شد) انجام شد. برای هر ۱ تا ۵ نقطه مساوی (با فاصله ۰/۲ متر) بسته به عمق آب که در جهت ارتفاع در نظر گرفته شدند در حالی که نقطه‌های اندازه‌گیری محور x برای ۹ نقطه و برابر با آزمایش‌های مرجع انجام شد. (با فاصله ۰/۱ متر در عرض فلوم). ضریب تصحیح انرژی جنبشی و مومنتم  $\alpha$  و  $\beta$  (شناخته شده به عنوان ضریب‌های Coriolis و Boussinesq)، به عنوان دو فراسنجه کلی که ویژگی‌های جریان از نظر یکنواختی که در تحقیق‌های پژوهشگرانی چون: Chow (1959); Hamidifar et al. (2016); Keshavarzi and Hamidifar (2018) مشاهده می‌شود، به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\alpha = \frac{\int_0^A v(x)^2 \cdot |v(x)| dA}{A \cdot v_m^3} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\int_0^A v(x) \cdot |v(x)| dA}{A \cdot v_m^2} \quad (3)$$

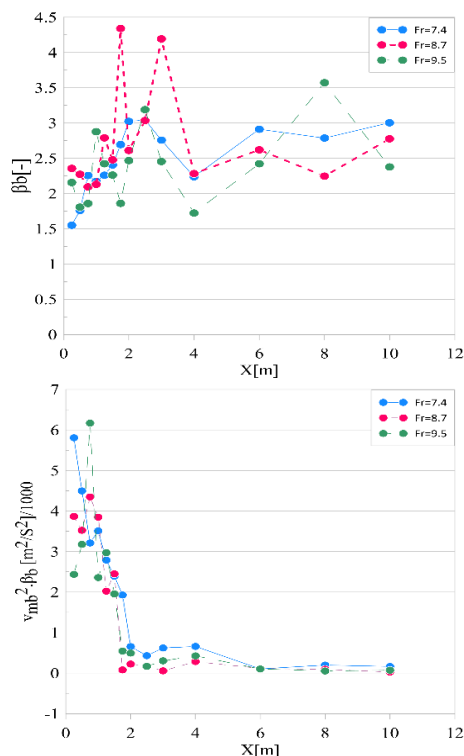
که در این روابط A کل سطح مقطع جریان و  $v_m$  میانگین سرعت جریان است. اگر به تفاوت جزئی بین  $\beta$  و  $\beta_b$  توجه شود مشاهده می‌شود که در واقع، اگرچه هر دو نشان دهنده ضریب یکنواختی جریان هستند، اما اولی به میدان سرعت در کل سطح مقطع اشاره دارد، در حالی که دومی آن را تنها در مجاورت کف آبراهه به شمار می‌آورد.

جریان آشفتته در هر دو سمت، حوضچه آرامش پس از سرریز را دچار فرسایش می‌سازد. شکل پرش S در هر سه عدد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ آزمایش شده مشابه، ولی با طول و ارتفاع موج متغیر مشاهده شد.

## ۲-۴-تئوری کاربرد بیم‌های متقاطع بعنوان سازه اتلاف انرژی

برای تعیین ترکیب بندی بهینه هندسه بیم‌های متقاطع با مشاهده جریان با توزیع سرعت یکنواخت در بیشتر ناحیه‌های بحرانی پایین‌دست سازه، اندازه‌گیری‌های سرعت انجام شد. فاصله مناسب اندازه‌گیری بخش کنترل، در چند آزمایش اولیه و با مشاهده شرایط جریان در فاصله‌های مختلف از انتهای سازه، برای شناسایی ناحیه‌های گسترش سرعت‌های جریان بزرگتر (بالقوه خطرناک برای تخریب مقطع) انتخاب شد. گردآوری داده‌ها در شبکه مش‌های تعریف شده که شامل اندازه‌گیری سطح آب با استفاده از یک عمق سنج<sup>۱</sup>، با دقت ۱ میلی متر انجام شد. برای ترازهای پایاب حالت مرجع (آزمایش‌های شاهد) و سه جریان ورودی اشاره شده، ۵۴ هندسه سامانه هدررفت انرژی با ترکیب مختلف فاصله‌های بیم‌ها، s (به عنوان مثال، شمار تیرها، N، با توجه به اینکه طول کل سازه هدررفت انرژی در جهت جریان در ۰/۷۵ متر ثابت نگه داشته شد) و ارتفاع  $h_b$ ، موقعیت بیم اول در آبراهه پایاب P و شیب سامانه  $\theta$  (جدول ۲ و شکل ۳) بعنوان آزمایش‌های اولیه بررسی شد. هر جزء سازه هدررفت شامل یک بیم I شکل، با عرض فلنج ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی متر بسته به  $h_b$ ، در جهت عرض آبراهه و به طور عمودی در راستای جریان اصلی می‌باشد. در این تحقیق تنها جهت‌گیری‌های شیب‌دار سامانه به سمت بالا (شکل ۳) با تکیه بر نتایج نشان داده شده توسط Scorzini et al. (2016)، آزمایش شدند که نشان داد هدررفت انرژی موثر کمتری برای جهت‌گیری سامانه رو به پایین نشان داده شده است. از این رو ۱۶۲ آزمایش با استفاده از سامانه سازه‌ها در بخش اول بررسی آزمایشگاهی انجام شد که شامل اندازه‌گیری سرعت بستر با استفاده از دستگاه میکرومولینه در ارتفاع ۰/۵ سانتی متر کف در زمان ۳۰ ثانیه





**Fig. 4** The values of  $\beta_b$  and  $v_{mb}^2$ .  $\beta_b$  recorded in measurements along the flume for S-type jump control test modes  
 شکل ۴ میزان  $\beta_b$  و  $v_{mb}^2$  ثبت شده در مقادیر اندازه‌گیری در طول فلوم برای حالت‌های آزمایش‌های شاهد پرش نوع S

### ۳-۲- ضریب‌های مومنتم و انرژی برای سازه‌ها

با توجه به اثربخشی مشاهده شده سامانه بیم‌ها، ۳ مورد از بهترین عملکردهای تنظیمات سازه‌ها برای  $Fr = 9/5$  (که شدیدترین وضعیت در مورد ویژگی‌های انرژی جریان ورودی بود) انتخاب شدند. ترکیب بندی‌های بهینه برابر با آزمایش‌های اولیه برای بیم‌های متقاطع و در شرایط اعداد فرود آزمایش‌های مرجع بر مبنای هندسه ارائه شده در جدول ۲ انتخاب شد. این انتخاب بر مبنای میزان یکنواختی جریان با محاسبه  $\beta_b$  و رگرسیون خطی انجام شده بوسیله نرم افزار متلب انجام شد. این ترکیب بندی بهینه بر مبنای کنترل پرش نامتقارن S در جدول شماره ۳ آورده شده است.

جدول ۳ فراسنجه‌های هندسی ترکیب بندی بهینه بیم‌ها در کنترل جریان پرش نامتقارن

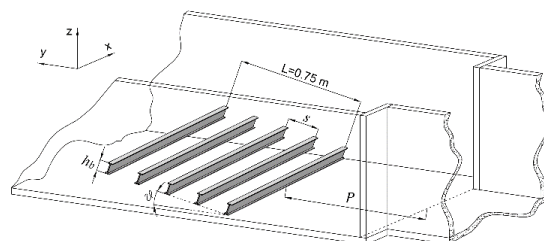
**Table 3** Geometric parameters of optimal beam configurations in controlling asymmetric jump current

Configuration	P(m)	N	$\theta^\circ$	$h_b$ (m)
1	0.8	5	11	0.05
2	0.6	3	11	0.07
3	0.8	3	15	0.05

**جدول ۲** فراسنجه‌های هیدرولیکی و هندسی آزمایش بیم‌ها

**Table 2** Tested hydraulic conditions and geometric parameters for Dissipator

parameter	Tested geometric parameters	Tested hydraulic conditions
P (m)	0.4-0.6-0.8	F=7.4, 8.7, 9.5
N	3,5,9	R=0.94, 0.74, 0.62.10 <sup>5</sup>
$\vartheta$ (degree)	7, 11, 15	$h_s = 0.19, 0.15, 0.11$ m
$h_b$ (m)	0.05, 0.07	-



**Fig. 3** Typical geometry of tested cross-beam dissipator

شکل ۳ هندسه بیم‌های متقاطع در آزمایش‌ها

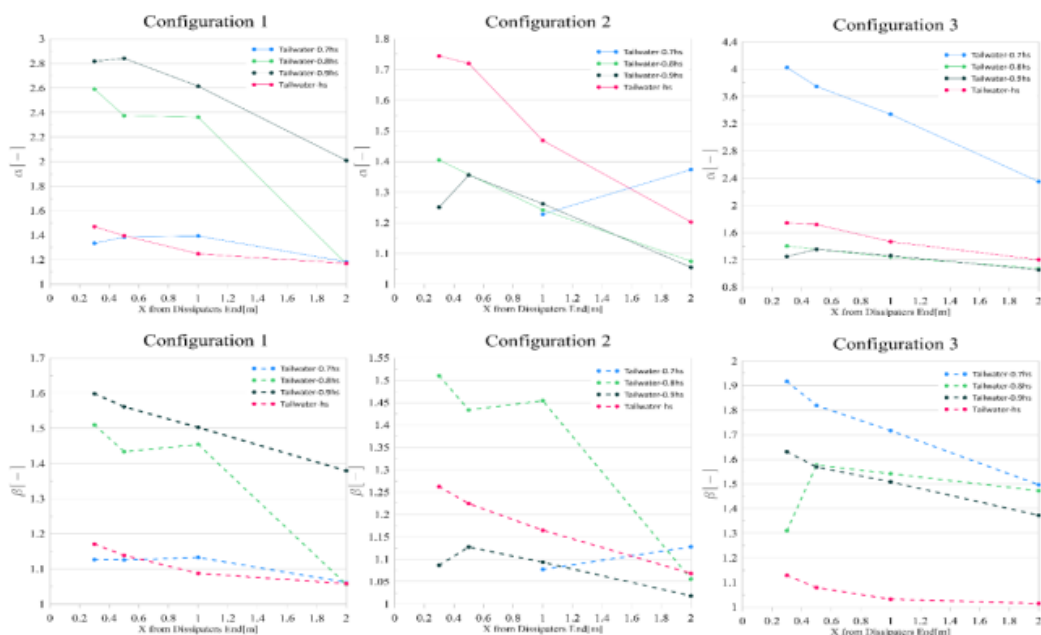
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی یکنواختی جریان

مقدارهای مربوط به  $\beta_b$  و  $v_{mb}^2$  محاسبه شده در مقطع‌های اندازه‌گیری در امتداد آبراهه در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که از نمودار  $\beta_b$  برمی‌آید، در بیشتر موارد در امتداد کل آبراهه بزرگتر از ۲ بوده و به حدود ۳ می‌رسد و در عدد فرود  $8/7$  به بیشتر از میزان ۴ در ۲ متری از مقطع انبساط می‌رسد. بررسی روند  $\beta_b \cdot v_{mb}^2$  نشان دهنده کاهش از  $0/8$  تا  $0/1$   $m^2/s^2$  می‌باشد و پس از مقطع انبساط، به  $0/4$  تا  $0/6$   $m^2/s^2$  در ۳ متری پایین دست و سپس به یک میزان ثابت نزدیک به  $0/2$   $m^2/s^2$  بعد از ۴ متر می‌رسد. مقدارهای  $\beta_b$  و  $v_{mb}^2$  محاسبه شده در مقطع کنترل، واقع در  $0/5$  متر پایین دست انتهای سازه هدررفت انرژی برای سه عدد فرود و فراسنجه‌های هندسی مختلف که به معنای فاصله مطلق  $1/65$ ،  $1/85$  و  $2/05$  متر از مقطع انبساط برای  $0/8$  و  $0/6$ ،  $0/4$  متر (به ترتیب). اثربخشی سامانه (ترکیب بندی بیم‌ها) در همگن‌سازی جریان و کاهش سرعت بستر به طور آشکار، حتی برای تنظیم‌های بدترین کارایی، مشهود است. در حالت استفاده از سازه، میانگین  $\beta_b$  همیشه تاحدودی کوچکتر از  $1/1$  با  $v_{mb}^2$  متناظر نزدیک به  $0/1$   $m^2/s^2$  اندازه‌گیری شد.

محاسبه شده در طول فلوم برای سه هندسه ذکر شده را گزارش می‌کند. اگرچه با مقدارهای مطلق متفاوت، برای هر ترکیب‌بندی، به نظر می‌رسد روندهای کیفی  $\beta$  و  $\alpha$  بسیار همانند هستند و فراتر از ویژگی‌های منحصر بفرد پیکربندی‌ها، این نتایج نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری سازه هدررفت در همگن سازی موثر جریان در آبراهه‌های دارای انبساط ناگهانی، حتی در شرایط سطح آب پایین دست متغیر کارایی دارد.

توزیع بهینه جریان در پایین دست سازه، با کمینه مقدارهای  $\beta$  توصیف شد. در واقع، اگر چه کاهش عمق آب پایاب، کاهش یکنواختی جریان و افزایش آشکار در سرعت‌های میانگین جریان را تعیین می‌کند، نمودارها نشان می‌دهد که ویژگی‌های جریان به جز در برخی از موارد برای بحرانی‌ترین موقعیت‌های  $h_s$  ۰/۷ و  $h_s$  ۰/۸، که در آن یک جریان آشفته تر را می‌توان به ویژه در بخش‌های نزدیک انتهای سازه هدررفت انرژی تشخیص داد، به طور چشمگیری تغییر نمی‌کند. الگوهای نشان داده شده در شکل ۵ ضرایب  $\beta$  و  $\alpha$



**Fig. 5** Momentum and kinetic energy correction coefficients ( $b$  and  $\alpha$ ) downstream of the dissipation structure, under runoff adjustment conditions calculated for (70%, 80% and 90%  $h_s$ ) under the following conditions: (a) Configuration 1:  $P = 0.8$  m,  $N = 5$ ,  $\theta = 11^\circ$ , and  $h_b = 0.05$  m; (b) Configuration 2:  $P = 0.6$  m,  $N = 3$ ,  $\theta = 11^\circ$ , and  $h_b = 0.07$  m; and (c) Configuration 3:  $P = 0.8$  m,  $N = 3$ ,  $\theta = 15^\circ$ , and  $h_b = 0.05$  m

**شکل ۵** مقدار ضرایب‌های تصحیح مومنتوم و انرژی جنبشی ( $\beta$  و  $\alpha$ ) در پایین دست سازه هدررفت، در شرایط متغیر پایاب محاسبه شده برای (۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪  $h_s$ ) در شرایط: (a) Configuration 1:  $P = 0.8$  m,  $N = 5$ ,  $\theta = 11^\circ$ , and  $h_b = 0.05$  m; (b) Configuration 2:  $P = 0.6$  m,  $N = 3$ ,  $\theta = 11^\circ$ , and  $h_b = 0.07$  m; and (c) Configuration 3:  $P = 0.8$  m,  $N = 3$ ,  $\theta = 15^\circ$ , and  $h_b = 0.05$  m

سانتی متر، تأثیر فاصله سامانه بیم‌های متقاطع از واگرایی فراسنجه مهمی در اثربخشی آن می‌باشد. با مقایسه حالت‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که تمرکز جریان آشفته و اغتشاش ناشی از برخورد جت به سامانه بیم‌ها و به طور خاص بیم اول، منجر به افت انرژی زیاد در ناحیه بین بیم‌های ۱ و ۲ شده و پیش از خروج از سامانه عمده حساب‌ها با ایجاد افت، انرژی سامانه را در همان ناحیه تخلیه کرده و در ناحیه‌های پس از سازه، جریان آرامتری را شاهد می‌باشیم (شکل ۶).

بررسی تأثیر ترکیب‌بندی‌های بهینه ۱، ۲ و ۳ که در جدول ۳ آورده شده است در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل در نگاه اول ترکیب‌بندی شماره ۲ (Cf2) تمایل جریان برای حالت ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪  $h_s$  به سمت گوشه سمت راست آبراهه نشان از تمایل جریان به پرش S در حضور سازه‌های بیم می‌باشد. یا می‌توان گفت که تأثیر سازه‌های قدرت کمتری در انحراف جت پرش نسبت به حالت‌های دیگر ترکیب‌بندی‌ها دارد. با نگاهی به فراسنجه‌های هندسی سامانه، می‌توان گفت که در ترکیب‌بندی ۲ با وجود  $P=60$

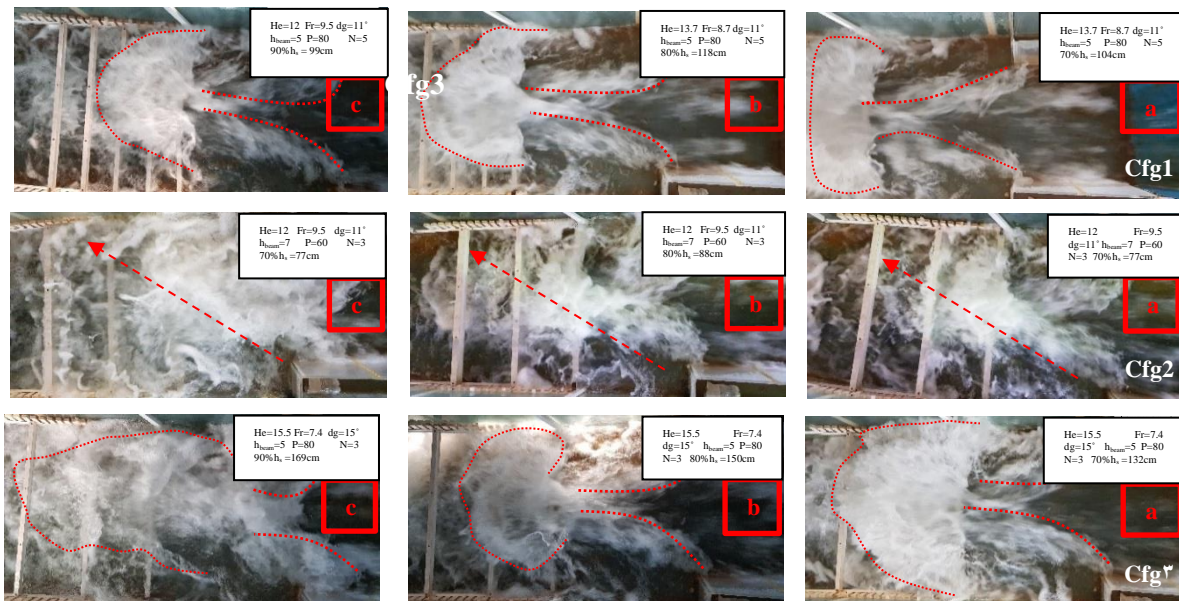


Fig. 6 Effect of optimal cross-beam configurations according to Table 3- a) 70% hs, b) 80% hs and c) 90% hs

شکل ۶ تأثیر ترکیب بندی بهینه بیم‌های متقاطع برابر جدول ۳- (a) 70% hs، (b) 80% hs و (c) 90% hs

### ۳-۳- آنالیز توزیع سرعت سه بعدی

با توجه به اثربخشی مشاهده شده دستگاه، همان‌طور که در تشریح فراسنجه‌های  $\beta_b$  و  $\beta_b \cdot v_{mb}^2$  نشان داده شد، با توجه به انتخاب ترکیب بندی‌های بهینه، تغییرپذیری آنها با ضریب کاهش  $h_s$  از بررسی شد (۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪  $h_s$ ).

در اینجا بررسی بیشتر روی میدان‌های سرعت سه بعدی (شکل ۷) و روند حرکت اندازه و میدان سرعت جریان در مش‌های اندازه‌گیری شده سرعت با استفاده از سرعت سنج EMV برای بهینه ترکیب بندی ۱ در جدول ۳ تجزیه و تحلیل می‌شود. توزیع سرعت‌های سه بعدی ارائه شده در شکل ۷ آشکارا توانایی تیرهای متقاطع در همگن‌سازی الگوی جریان در آبراهه با انبساط ناگهانی و در شرایطی متفاوت از حالت پایاب طراحی اصلی ( $h_s$ ) را نشان می‌دهد. در واقع، اگر چه کاهش عمق آب پایاب، کاهش یکنواختی جریان را تعیین می‌کند، بررسی بردارهای سرعت نشان می‌دهد که افزایش آشکار در سرعت‌های متوسط جریان که در آن ویژگی‌های جریان به طور چشمگیری تغییر نمی‌کند، به جز در برخی از موارد برای بحرانی‌ترین موقعیت‌های  $0.7h_s$  و  $0.8h_s$ ، که در آن یک جریان آشفته تر را می‌توان به ویژه در بخش‌های نزدیک انتهای بیم‌های متقاطع، به عنوان

سازه هدررفت انرژی پیشنهادی تشخیص داد. الگوهای کیفی نشان داده شده در قسمت‌های مختلف ترکیب بندی بهینه ۱ در شکل ۷ را می‌توان با تفسیر روشن‌تری از شکل ۵ تشریح نمود، که در آن تغییر ضریب‌های  $\beta$  و  $\alpha$  را در طول فلوم برای سه هندسه بهینه ذکر شده گزارش می‌کند. گرچه با مقادیر مطلق اختلاف، برای هر ترکیب بندی، به نظر می‌رسد روندهای کیفی  $\beta$  و  $\alpha$  بسیار مشابه هستند، ترکیب بندی ۱ (قسمت چپ شکل ۵) یک کاهش اولیه یکنواختی جریان برای حالت عمق پایاب  $0.8h_s$  و  $0.9h_s$ ، (با ضریب‌های  $\beta$  و  $\alpha$  به ترتیب در محدوده  $1/6-1/4$  و  $2/8-2/10$ ) را نشان می‌دهد و سپس بهبود دوباره به یک میدان جریان بسیار یکنواخت برای کمترین عمق پایاب مورد بررسی برمی‌گردد ( $0.7h_s$ ). وضعیت همانند برای پیکربندی ۳ (پانل سمت راست شکل ۵) مشاهده می‌شود، با این تفاوت که ضریب‌های  $\beta$  و  $\alpha$  به روند کاهش پایین آمدن میزان افزایشی  $h_s$  ادامه می‌دهند.

### ۳-۴- بررسی انرژی جنبشی آشفتگی ۱

میزان هدررفت انرژی جنبشی آشفتگی، که به عنوان اتلاف آشفتگی نامیده می‌شود، یک فراسنجه کلیدی برای تعیین میزان سطح تلاطم، اختلاط حاصل و ویژگی‌های انتقال

1 Turbulent kinetic energy (TKE)

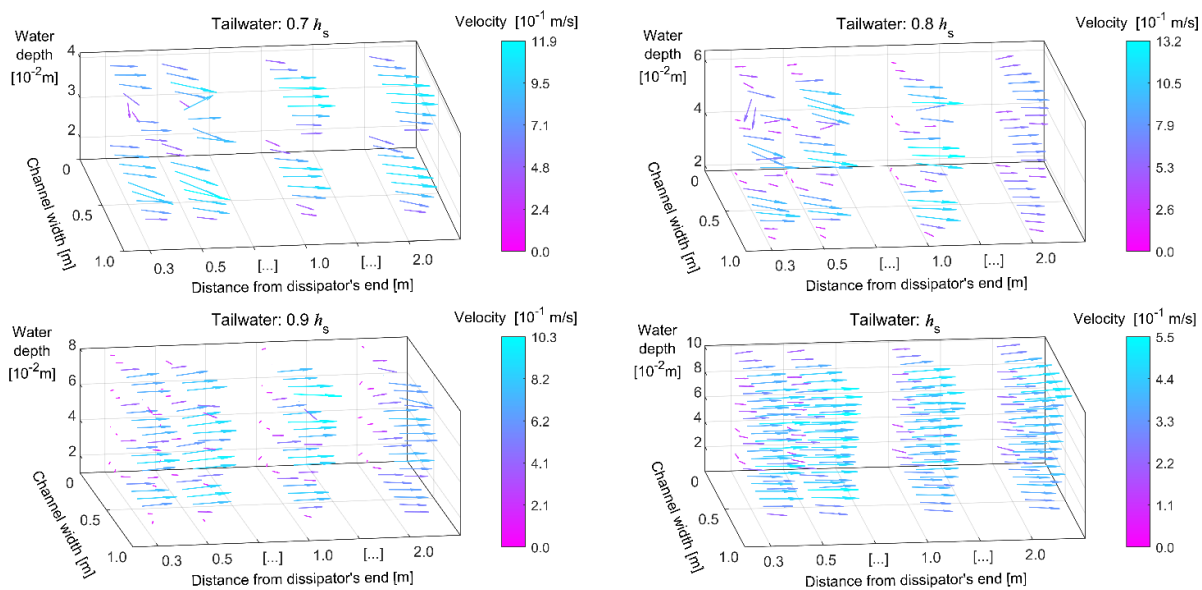


Fig. 7 3D velocity flow fields measured in the channel downstream from the dissipator, under variable tailwater conditions: Configuration 1 ( $P=0.8$  m,  $N=5$ ,  $\theta=11^\circ$  and  $h_b=0.05$  m)

شکل ۷ میدان‌های جریان سرعت سه‌بعدی در آبراهه پایین‌دست سازه اتلاف انرژی، در شرایط متغیر پایاب اندازه‌گیری شده: ترکیب بندی ۱: ( $P=0.8$  m,  $N=5$ ,  $\theta=11^\circ$  and  $h_b=0.05$  m)

آشفته‌نگی است. در جریان‌های آشفته، گردابه‌هایی که به طور پیوسته تولید و ناپدید می‌شوند، عامل نوسان‌ها هستند. لذا برای توصیف آن، میانگین زمانی از نوسان‌های آن جدا می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در جریان آشفته پس از سازه برای عدد فرود  $9/5$  و سه ترکیب بندی بهینه ارائه شده، نوسان سرعت در راستای افقی جریان، راستای عرضی و عمقی  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  محاسبه شده و تغییر انرژی جنبشی آشفته‌نگی (TKE) در برابر  $Z/Y_t$  در شکل ۸ نشان داده شده است. برداشت‌های سرعت در یک طرح مش بندی شده که در عرض فلوم، شمار نقطه‌ها ۹ (۱۰ سانتی متر تا ۹۰ سانتی متر عرض فلوم) در بُعد طولی و در جهت جریان، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر پس از سازه بیم‌های متقاطع و در جهت عمق به فاصله هر ۲ سانتی متر برحسب ارتفاع آب در ترکیب‌بندی‌های مختلف انجام گرفت.

در شکل ۸ ترکیب بندی ۱، بزرگترین میزان TKE در فاصله ۲ متر از انتهای سازه و در ۹۰ درصد عمق پایاب رخ می‌دهد ( $0/9h_s$ ). در این آزمایش که با تغییر عمق پایاب به  $0/9h_s$  اندازه‌گیری‌ها برای  $Z/Y_t = 0/2 \sim 0/8$  انجام گرفته است، در  $Z/Y_t = 0/2 \sim 0/4$  که عمق آب ۲ و ۴ سانتی متر می‌باشد، میزان TKE تغییری نمی‌کند اما از

$0/4 \sim 0/8$  و برای عمق‌های ۴، ۶ و ۸ سانتی متر، با شیب  $\Delta H = 0/3$  افزایش می‌یابد. در این ترکیب بندی، نایکنواختی برای مقطع‌های ۳۰ سانتی متر و ۲۰۰ سانتی متر مشهود است. که در حالت کلی نشانه این است که با توجه به اینکه مقطع برای بازه ابتدا (۳۰ سانتی متر پس از سازه) تا انتها و پس از سازه بیم (۲۰۰ سانتی متری) دارای نایکنواختی انرژی جنبشی آشفته‌نگی می‌باشد، اما نرخ تغییر حالت بالایی از جریان اصلی پس از بیم‌ها (conversion of mean flow) به جریان آشفته در این حالت رخ می‌دهد و نشان از تلاطم و آشفته‌نگی بیشتر و استهلاک و اختلاط هوای بیشتری در این ترکیب بندی است.

بر مبنای موارد مورد بررسی در شکل ۸ و برای تفسیر بیشتر ترکیب بندی ۱ اقدام به تشریح گستره انرژی جنبشی آشفته‌نگی در صفحه x-y و x-y-z شده و توسعه تمرکز خطوط هم تنش بررسی شد.

تمرکز بیشترین میزان TKE در حالت پایاب  $0/9h_s$  قرار دارد. در بررسی خطوط تمرکز، میزان  $TKE \equiv 0/3 \sim 0/6$  در حدود ۱۴/۴۸ درصد بزرگی میزان انرژی جنبشی توربولنت جریان را دارا می‌باشند. این میزان تنش‌های بزرگتر که با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی برای این ترکیب بندی و میزان درصد پایاب، حاوی موج‌های غلطان ایستاده یا

که توسعه میزان بالای خطوط هم تنش از خطوط  $X/Y_t \sim 6$  آغاز شده و تا انتهای بازه ادامه دارد. بر این مبنای، گردابه‌های کوچکتر که تا رسیدن به بیشینه میزان خود در طول بازه مورد بررسی که از طول  $x=30$  cm تا  $x=200$  cm بوده است، بیشتر به آشفتگی در سطح و ترویج اختلاط در جریان مشارکت می‌کنند.

متحرک می‌باشند. بنابراین فرضیه (Banerjee et al. (1968) و (Lamont and Scott (1970) کنترل بخش انتقال آشفتگی، توسط گردابه‌ها انجام می‌گیرد. وجود دو چشمه تمرکز تنش در  $X/Y_t=10$  و  $X/Y_t=20$  که مرکز چشمه تنش‌ها می‌باشد. ضمن اینکه با بررسی حالت پایاب  $0.9h_s$  مشخص می‌شود

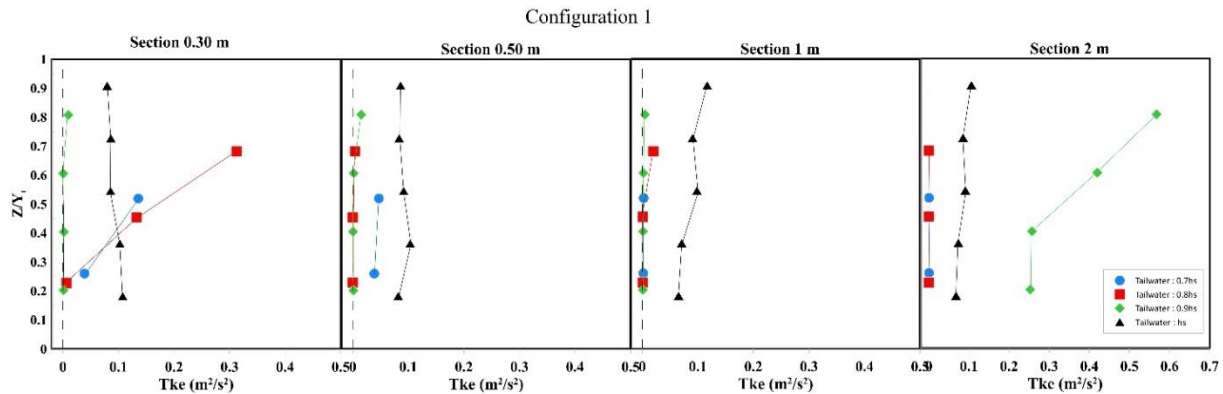


Fig. 8 Variation of the normalized turbulent kinetic energy (TKE  $m^2/s^2$ ) with dimensionless vertical distance ( $Z/Y_t$ ) for Configuration 1 of  $Fr_1=9.5$  and Sections 30, 50, 100 and 200 cm from Device

شکل ۸ تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی آشفتگی نرمال شده ( $TKE \ m^2/s^2$ ) با فاصله عمودی بدون بعد ( $Z/Y_t$ ) برای ترکیب بندی مربوط به  $Fr_1=9.5$  و فاصله‌های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر از سامانه

در شکل ۲ آورده شد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در همه اعداد فرود آزمایش شده روند افزایش افت انرژی نسبی تا مقطع حدود  $2/5$  متر پس از واگرایی، افزایشی بوده و در حدود  $X/X_{exp} = 4$  به بیشینه مقدار رسیده و از آنجا با یک روند ثابت خطی تا انتهای مقطع و پایاب امتداد می‌یابد. در این بین با افزایش عدد فرود، میزان افت انرژی افزایش

### ۳-۵- افت انرژی پرش

با توجه به این تعریف که اختلاف انرژی ویژه در مقطع جریان در قسمت ورودی و مقطع جریان در قسمت خروجی، افت انرژی پرش نامیده می‌شود و در صورتی که آن را با  $\Delta E$  نشان دهیم، می‌توان نسبت افت انرژی پرش به میزان انرژی اولیه را به عنوان افت نسبی یا بازده (راندمان) پرش برابر با رابطه زیر تعریف کرد :

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (4)$$

در اینجا با توجه به انجام آزمایش‌های مرجع برای اعداد فرود  $7/4$ ،  $8/7$  و  $9/5$  با اندازه‌گیری عمق‌های میانگین مقطع بازشدگی در پنجه پرش  $S$  به عنوان عمق  $y_1$  پیش از پرش و سرعت میانگین متناظر ( $v_1$ ) در این مقطع و عمق و سرعت‌های مقطع‌های اندازه‌گیری شده از  $0.25$  متر تا مقطع  $8$  متری پس از بازشدگی ناگهانی، محاسبه افت انرژی قبل از پرش و همچنین در مقطع‌های مورد نظر اندازه‌گیری گردیده و برابر رابطه (۴) در شکل ۹ ترسیم شد. در این شکل  $X_{exp}$  معادل طول واگرایی که برابر  $60$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد و طول  $X$  فاصله‌های اندازه‌گیری از واگرایی که

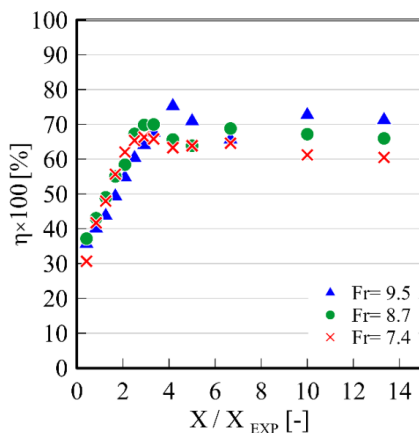


Fig. 9 Relation between relative energy losses and dimensionless distance from abrupt expansion section for reference experiments (without beams)

شکل ۹ ارتباط افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی برای آزمایش‌های مرجع

ترکیب بندی ۱ و در مقاطع ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر از سازه بیم‌های متقاطع به طور میانگین افت انرژی نسبی برای  $0.7h_s$ ،  $0.8h_s$ ،  $0.9h_s$  و  $h_s$  به ترتیب ۲۶/۴۸، ۲۶/۰۸، ۳۶/۰۶ و ۲۹/۹۵ درصد اندازه گیری شده است. این میزان ها برای ترکیب بندی ۲ به ترتیب ۷۲/۴۳، ۷۴/۶۷، ۷۳/۵۳ و ۷۴/۲۸ درصد و برای ترکیب بندی ۳ به صورت ۷۸/۶، ۷۷/۷۲، ۷۳/۴۱ و ۷۱/۰۶ درصد به دست می‌آید. مقایسه روند افزایشی افت انرژی در بازه مورد نظر تا ۲ متری پس از سامانه سازه‌ای بیم‌های متقاطع نشان می‌دهد بیشترین افت انرژی در ترکیب بندی ۳ رخ می‌دهد. در مقایسه با شرایط مرجع که روند افزایشی افت انرژی نسبی در آن تا فاصله ۲ متری با شیب ۱۱/۴۱ ادامه دارد، می‌توان گفت به طور میانگین، استفاده از سامانه بیم‌های متقاطع با ترکیب بندی ۳ به میزان ۴۴/۷۸ درصد افزایش افت انرژی نسبی را باعث می‌شود و از سویی بر مبنای شرایط جریان پس از سامانه بیم‌ها، جریان به صورت یکنواخت تا انتهای فلوام امتداد دارد.

می‌یابد به طوری که فرود ۹/۵ از این قله بیشترین میزان را دارد. افت نسبی انرژی در مقطع‌های واگرا، تابع عدد فرود اولیه و نسبت بازشدگی مقطع می باشد به طوری که طبق تحقیقات (Neisi and Shafai Bajestan (2013) در یک نسبت بازشدگی ثابت، میزان بازده پرش نوع S با بستر زیر شده بیش از بازده پرش با بستر صاف می‌باشد. در اینجا تأثیر زبری با استفاده از بیم های متقاطع در نظر گرفته شده و نتایج تحقیقات محققانی چون Neisi and Shafai Bajestan. (2013) و Alhamid. (2004) را تأیید می‌کند. ضمن اینکه عدد فرود یکی از فراسنجه های اصلی تعیین میزان افت انرژی و افت انرژی نسبی پرش در مقطع واگرای ناگهانی می باشد. برای بررسی تأثیر سازه بر افت انرژی نسبی در ترکیب بندی های بهینه و با توجه به بیشترین میزان آن در فرود ۹/۵ پس از  $X/X_{exp} \sim 4$  در ترکیب بندی های بهینه اشاره شده، میزان افت انرژی نسبی در مقابل فاصله بی بعد از مقطع واگرای ناگهانی در شکل ۱۰ آورده شده است. همان گونه که از شکل بر می آید، برای

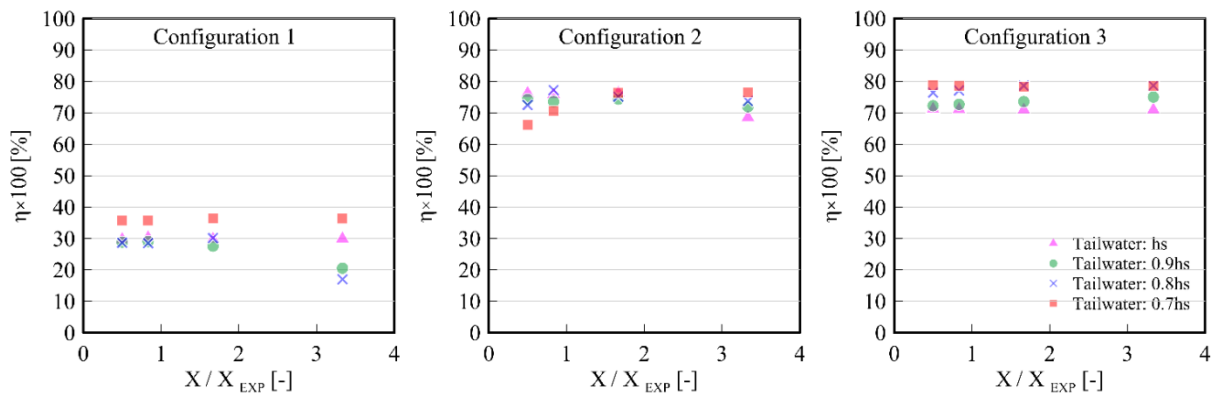


Fig. 10 Relative energy losses and dimensionless distance from abrupt expansion section for three Configurations of  $Fr_1=9.5$  and Sections 30, 50, 100 and 200 cm from Device

شکل ۱۰ افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرای ناگهانی برای آزمایش‌های سه ترکیب بندی بهینه مربوط به  $Fr_1=9.5$  و فاصله‌های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر از سامانه

ایجاد مقطع واگرا از جنس پلکسی گلاس، ۸/۷، ۷/۴ و ۹/۵ انتخاب شد. برای مشخص کردن جریان به لحاظ یکنواختی و سرعت میانگین نزدیک بستر، سرعت‌های طولی اندازه گیری شد. نیمرخ های مقطع سرعت طولی  $v(x)$  و سرعت میانگین بستر  $v_{mb}$  در ۱۳ مقطع نماینده، برای ۰/۲۵ متر تا ۸ متر در ارتفاع ثابت ۰/۵ سانتی متر از بستر آبراهه اندازه‌گیری شده و برابر رابطه ارائه شده،  $\beta_b$  برای به دست

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به شبیه سازی آزمایشگاهی طرح کاربرد یک سازه جدید با ترکیب بندی های مختلف هندسی بیم‌های متقاطع به صورت مجموعه‌ای از تیرهای بال پهن جهت کنترل پرش نامتقارن نوع S مقاطع واگرای ناگهانی پرداخته شد. اعداد فرود ( $Fr_1$ ) قابل کاربرد در آزمایش‌ها بر مبنای پرش تشکیل شده در پای سرریز اوجی و پس از دیواره‌های

نشان می‌دهد. لذا فراتراز ویژگی‌های منحصر بفرد پیکربندی‌ها، انعطاف‌پذیری سازه هدررفت در همگن‌سازی موثر جریان در آبره‌های دارای انبساط ناگهانی، حتی در شرایط سطح آب پایین‌دست متغیر کارایی دارد.

(۴) بررسی تأثیر فاصله سامانه بیم‌های متقاطع از واگرایی (P) فراسنجه مهمی در اثربخشی ترکیب بندی هندسی سازه می باشد. با مقایسه حالت‌های دو ترکیب بندی بهینه ۲ و ۳ مشاهده شد که تمرکز جریان آشفته و اغتشاش ناشی از برخورد جت به سامانه بیم‌ها و به طور خاص بیم اول، منجر به افت انرژی زیاد در ناحیه بین بیم‌های ۱ و ۲ شده و قبل از خروج از سامانه، عمده حباب‌ها با ایجاد افت، انرژی سامانه را در همان ناحیه تخلیه کرده و در ناحیه‌های پس از سازه می‌توان شاهد جریان آرام تری بود.

(۵) بررسی میدان‌های جریان سرعت سه‌بعدی در آبراهه پایین‌دست سازه هدررفت انرژی، در شرایط متغیر پایاب اندازه‌گیری شده برای ترکیب‌بندی‌های بهینه نیز نشان از انعطاف‌پذیری این سازه در همگن‌سازی موثر جریان در آبراهه‌های در حال انبساط ناگهانی، حتی در شرایط تغییر سطح آب پایین دست ( $h_s$ ) را دارد.

(۶) در بررسی میزان هدررفت انرژی جنبشی آشفستگی (TKE) در حالت کلی برای مقطع بازه ابتدای بررسی (۳۰ سانتی متر پس از سازه) تا انتهای پس از سازه بیم (۲۰۰ سانتی متری) نایکنواختی انرژی جنبشی آشفستگی مشاهده شد اما نرخ تغییر حالت بالایی از جریان اصلی پس از بیم‌ها (Conversion of mean flow) به جریان آشفته در برخی حالت‌ها رخ می‌دهد که نشان از تلاطم و آشفستگی بیشتر و همچنین استهلاک و اختلاط هوای بیشتری در ترکیب‌بندی‌های بهینه در حالت کلی است.

(۷) تحلیل طرح  $Z/Y_t$  در مقابل  $X/Y_t$  در صفحه  $X-Y$  وجود چشمه‌های تمرکز تنش که توسعه میزان بالای خطوط هم تنش در آن آغاز شده و گاهی تا انتهای بازه امتداد دارد، نشان از تأیید فرضیه Banerjee et al. (1968) و Lamont and Scott (1970) دارد که در آن، کنترل بخش انتقال آشفستگی، توسط گردابه‌ها انجام می‌شود.

(۸) بررسی شمار بیم‌های درگیر در ترکیب‌بندی‌ها ( $N$ )، در مقایسه بین پایاب  $h_s$  و  $0.7h_s$  می‌توان گفت در عمق

آوردن نیروی دینامیکی در واحد ارتفاع در عمق محاسبه شد که با رابطه  $\beta_b \rho v_{mb}^2$  معرفی شد. اثر تخریبی جت پرش نامتقارن  $S$  در هر سه عدد فرود تا انتهای فلوام ادامه و در انتها با ایجاد یک موج برگشتی و جریان آشفته در هر دو سمت، حوضچه آرامش پس از سرریز را دچار فرسایش نمود. شمار ۱۶۲ هندسه سامانه هدررفت انرژی با ترکیب مختلف فاصل‌های بیم‌ها  $S$  (شمار تیرها،  $N$ ، ارتفاع،  $h_b$ ، موقعیت بیم اول در آبراهه پایاب،  $P$  و شیب سامانه،  $\theta$ ) به عنوان آزمایش‌های اولیه سازه‌ها بررسی و ارزیابی شد. سپس برخی از موثرترین هندسه‌ها برای بررسی بیشتر بر مبنای رگرسیون خطی فراسنجه  $\beta_b \rho v_{mb}^2$  در کمینه میزان  $\beta_b$  و یکنواختی جریان انتخاب شدند تا برای بررسی‌های بعدی کار سامانه هدررفت انرژی در شرایط پایاب متغیر با کاهش تدریجی سطح آب پایین دست به  $0.70$ ،  $0.80$  و  $0.90 h_s$ ، تعریف شد و با اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی در فواصل  $0.3$ ،  $0.5$ ،  $1$  و  $2$  متر پس از سامانه سازه نتایج زیر به دست آمد:

(۱) محاسبه میزان  $\beta_b$  و  $v_{mb}^2$  در مقطع کنترل،  $0.5$  متر پایین دست انتهای سازه هدررفت انرژی معرفی شده برای سه عدد فرود و فراسنجه‌های هندسی مختلف سامانه، نشان از اثربخشی ترکیب بندی مختلف بیم‌ها به صورت کلی در همگن‌سازی جریان و کاهش سرعت بستر دارد.

(۲) انتخاب ترکیب‌بندی‌های بهینه برای سازه هدررفت بر مبنای میزان یکنواختی جریان با محاسبه فراسنجه  $\beta_b$  معرفی شده و رگرسیون خطی برابر با آزمایش‌های اولیه برای بیم‌های متقاطع و در شرایط اعداد فرود آزمایش‌های مرجع بر مبنای هندسه ارائه شده برای کنترل پرش نامتقارن  $S$ ، قابلیت اتکای بالایی در شناخت بهینه ویژگی‌های هندسی دارد.

(۳) در بررسی ضریب‌های مومنتم و انرژی در کارکرد سازه‌ها، اگرچه با مقادارهای مطلق متفاوت، برای هر ترکیب بندی، به نظر می‌رسد روندهای کیفی  $\beta$  و  $\alpha$  بسیار همانند هستند ولی ترکیب بندی ۱، یک کاهش یکنواختی جریان برای  $0.9h_s$  و  $0.8h_s$  (که در آن  $h_s$  عمق پایاب آزمایش مرجع می‌باشد) با ضریب‌های  $\beta$  و  $\alpha$  به ترتیب در محدوده  $1/4-1/6$  و  $2/10-2/8$ ، اولیه را

$\beta_b \rho v_{mb}^2$	نیروی دینامیکی در واحد ارتفاع ( $m^2 s^{-2}$ )
$N$	شمار بیم‌ها
$s$	فاصله بیم‌ها (m)
$h_b$	ارتفاع بیم (m)
$P$	فاصله شروع سازه از مقطع واگرا
$\theta$	شیب سامانه
$A$	کل سطح مقطع جریان ( $m^2$ )
$Z$	عمق آب درون فلوم (m)
$Y_t$	عمق پایاب (m)
$X$	فاصله از مقطع واگرا (m)
$\Delta E$	افت انرژی پرش (m)
$\eta$	افت انرژی نسبی
	علائم یونانی:
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
	زیرنویس‌ها:
exp	مقطع واگرا



#### ۵- سپاسگزاری و پیوست‌ها

پژوهشگران و نویسندگان این مقاله از دانشکده آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز و سازمان آب و برق خوزستان به دلیل حمایت‌های مالی ایشان تشکر و قدردنی می‌نمایند.

#### ۶- منبع‌ها

- Alhamid, A.A. (2004). S-jump characteristics on sloping basins. *J. Hydraul. Res.*, 42(6), 657–662. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628319>.
- Banerjee, A.K. (1968). Influence of kinetic friction on the critical velocity of stick-slip motion. *Wear*, 12(2), 107-116.
- Blevins, R.D. (1984). *Applied fluid dynamics handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., 558 p.
- Bremen, R. and Hager, W.H. (1993). T-jump in abruptly expanding channel. *J. Hydraul. Res.*, 31 (1), 61–78. <https://doi.org/10.1080/00221689309498860>.
- Bremen, R. and Hager, W.H. (1994). Expanding stilling basin. *Proc. ICE Water Marit. Energy*, 106(3), 215–228.

$0/Vh_s$  نسبت به  $h_s$  شمار بیم‌های کمتری درگیر شده و زیر سطح آب قرار می‌گیرد در صورتی که در حالت پایاب  $h_s$  همه بیم‌ها زیر سطح آب می‌باشند. مشخص شد در این حالت هنگامی که جریان جت پرش به بیم‌ها برخورد می‌کند، یک حالت گردابه عمودی شکل می‌گیرد. این گردابه‌های عمودی یکدیگر را تقویت می‌کنند و آنقدر بزرگ می‌شوند که در نهایت منجر به شکست می‌شوند و به اصطلاح شکست آبشار رخ می‌دهد که در حالت پایاب  $0/Vh_s$ ، عمق آب کمتر، اجازه توسعه به این آبشارها نمی‌دهد، لذا زودتر شکسته می‌شوند و این شکسته شدن باعث یکنواخت تر شدن در پایین دست شده و زودتر انرژی تلاطمی از بین می‌رود که حالت مطلوب‌تری است.

(۹) در همه اعداد فرود آزمایش شده آزمایش‌های مرجع، روند افزایش افت انرژی نسبی تا مقطع حدود ۲/۵ متر پس از واگرایی مقطع، افزایشی بوده و در حدود  $X/X_{exp} = 4$  به اوج خود رسیده و از آنجا با یک روند ثابت تا حدودی خطی تا انتهای مقطع و پایاب امتداد می‌یابد و با افزایش عدد فرود میزان افت انرژی افزایش می‌یابد که با نتایج Neisi and Shafai Bajestan (2013) مبنی بر اینکه افت نسبی انرژی در مقطع‌های واگرا تابع عدد فرود اولیه و نسبت بازشدگی مقطع می‌باشد همخوانی دارد.

#### ۵- فهرست نشانه‌ها

$b$	عرض آبراهه بالادست (m)
$B$	عرض آبراهه پایین دست (m)
$\varepsilon$	نسبت انبساط
DSJ	جت سطحی منحرف شده
$TKE$	انرژی جنبشی آشفته ( $m^2 s^{-2}$ )
$T_w$	عمق پایاب (m)
$Fr$	عدد فرود
$H_e$	عمق بالادست سرریز اوجی (m)
$h_s$	عمق پایاب که موجب تشکیل پرش (m)
$v(x)$	هیدرولیکی $s$ در شرایط مرجع می‌گردد (m)
	سرعت طولی ( $ms^{-1}$ )
$v_{mb}$	سرعت میانگین بستر ( $ms^{-1}$ )
$\beta_b$	فراسنجه یکنواختی جریان



- Kordi, E., and Abustan, I. (2012). Transitional expanding hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.*, 138(1), 105–110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000479).
- Lamont, J.C. and Scott., D.S. (1970). An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid. *AIChE Journal*, 16(4), 513-519.
- Lin, C., Hsieh, S.-C., Lin, I-J. (2012). Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps. *Exp Fluids*, 53, 1591–1616. <https://doi.org/10.1007/s00348-012-1377-2>.
- Liu, M., Zhu, D.Z. and Rajaratnam, N. (2002). Evaluation of ADV measurements in bubbly two-phase flows. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods*. In: Paper Presented at the Hydraulic Measurement and Experiment Methods 2002, Proceedings of the Specialty Conference July (2002).
- Mignot, E. and Cienfuegos, R. (2011). Spatial evolution of turbulence characteristics in weak hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 49(2), 222-230. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.554208>.
- Neisi, K. and Shafai Bejestan, M. (2013). Characteristics of S-jump on roughened bed stilling basin. *J. Water Sci. Res.*, 5(2), 25–34.
- Nosedá, G. (1964). Un fenomeno di instabilità del risalto lungo una corrente veloce in espansione. [An instability phenomenon of hydraulic jump in enlarging supercritical flow], *L'Energia Elettrica*, 41(4), 249–254. (In Italian)
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Ishikawa, M. (1999). Submerged hydraulic jumps below abrupt expansions. *J. Hydraul. Div.*, 125(5), 492–499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:5\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:5(492)).
- Omid, M.H., Esmaceli Varaki, M. and Narayanan, R. (2007). Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 512-518.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2012). Effect of stilling basin geometry on the dissipative process in the presence of block ramps. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138 (11), 1027–1031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000505](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000505).
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1968). Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. *J. Hydraul. Div.*, 94 (2), 481–504. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001780>.
- Chanson, H. and Gualtieri, C. (2008). Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps. *J. Hydraul. Res.*, 46(1), 35–44. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521841>.
- Chow, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Elsayed, H., Helal, E., El-Enany, M. and Sobeih, M. (2021). Impacts of multi-gate regulator operation schemes on local scour downstream. *ISH J. Hydraul. Eng.* 27(1), 51–64. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1511386>.
- Ferreri, G.B., and Nasello, C. (2002). Hydraulic jumps at drop and abrupt enlargement in rectangular channel. *J. Hydraul. Res.*, 40 (4), 491–505. <https://doi.org/10.1080/00221680209499891>.
- Habibzadeh, A., Loewen, M.R. and Rajaratnam, N. (2016). Turbulence measurements in submerged hydraulic jumps with baffle blocks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(6), 553-561.
- Hager, W.H. (1992). *Energy dissipators and hydraulic jump*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer.
- Hager, W.H. and Li, D. (1992). Sill-controlled energy dissipater. *J. Hydraul. Res.*, 30 (2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>.
- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Rita Scorzini, A., Di Bacco, M. and Shafai Bejestan, M. (2021). Cross-Beam Dissipators in Abruptly Expanding Channels: Experimental Analysis of Flow Patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11), 06021012.
- Hamidifar, H., Omid, M.H. and Keshavarzi, A. (2016). Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain. *Journal of hydrology*, 537, 10-17.
- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D. and Gualtieri, C. (2017). An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), 945. <https://doi.org/10.3390/w9120945>.
- Herbrand, K. (1973). The spatial hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.*, 11(3), 205–218. <https://doi.org/10.1080/00221687309499774>.
- Keshavarzi, A. and Hamidifar, H. (2018). Kinetic energy and momentum correction coefficients in compound open channels. *Nat. Hazards*, 92(3), 1859–1869. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3285-0>.

- Rodi, W. (2017). *Turbulence models and their application in hydraulics: A state-of-the-art review*, Routledge.
- Rouse, H., Siao T.T., Nagaratnam, S. (1958). Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE* 84(1), 1-30, <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000161>.
- Scorzini, A.R., Di Bacco, M. and Leopardi, M. (2016). Experimental investigation on a system of crossbeams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *J. Hydraul. Eng.*, 142(2), 06015018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001088).
- Torkamanzad, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F. and Abbaspour, A. (2019). Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed. *Water*, 11(9), 1756. <https://doi.org/10.3390/w11091756>.
- Vaghefi, M., Akbari, M. and Fiouz, A.R. (2016). An experimental study of mean and turbulent flow in a 180-degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1582-1593.
- Veeramony, J. and Svendsen, I.A. (2000). The flow in surf-zone waves. *Coastal Engineering*, 39(2-4), 93-122. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00058-7).
- Zare, H.K. and Doering, J.C. (2011). Forced hydraulic jump below abrupt expansions. *J. Hydraul. Eng.*, 137(8), 825-835. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000369](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000369).