



Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion

Seyed Mohsen Sajadi¹ , Farshad Esmaeilzadeh Feridani² , and Javad Ahadiyan³

1. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.sajadi@scu.ac.ir
2. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: Feridani0220@gmail.com
3. Corresponding author, Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 November 2024

Received in revised form 01

February 2025

Accepted 20 February 2025

Available online 25 March

2025

Keywords:

energy Dissipation,

hydraulic Jump,

cross Beam,

flow-3D Model,

asymmetric wave.

ABSTRACT

Objective: The main goal is to understand better the hydraulic jump mechanism in the sudden expansion channel and investigate the cross-beam system's effect as a roughness for the control and stability of the hydraulic jump.

Method: In this study, the hydraulic jump in a rectangular channel with a sudden diverging section (with a divergence ratio of $B=b_1/b_2=0.67$) was simulated using a cross-beam system as roughness to control an asymmetric S-type hydraulic jump. This type of jump generates wave impacts that cause flume bed and wall erosion. The simulation was conducted three-dimensionally using the Flow-3D software. The hydraulic jump characteristics were examined by analyzing the velocity at the bed and evaluating three different configurations of the cross-beam system. Variables included the distance of the beam system from the diverging section, the angle of the beams relative to the channel bed, and the number and thickness of the beams at various percentages of the reference tailwater depth.

Results: The results of the numerical simulations, validated by experimental data, demonstrated that using a floor roughness system with cross-beams in various numbers and angles—after optimizing the configuration using velocity coefficient relationships—stabilized and eliminated asymmetric waves and reverse flow in the S-type hydraulic jump across all tested tailwater depths. The cross-beam roughness system also resulted in the highest relative energy loss for configurations 1, 2, and 3, calculated at 36.06%, 74.67%, and 78.6%, respectively, across different sections and tailwater depths. In analyzing the water surface profile for the three cross-beam configurations, configuration 1 (C1) exhibited a more uniform distribution of flow depth in the channel's cross-section, particularly in the sections 0.3 to 2 meters from the end of the structural system. For the total hydraulic head (THH) and the energy dissipation endpoint (or hydraulic jump, $j*\Gamma*j*\Gamma$) in configuration C1, this point was identified after the third beam ($N=5$). The flow extended with concentrated lines after passing over and under the beams.

Conclusions: Based on the total hydraulic head index and energy dissipation control, configuration C1 demonstrated superior capability in controlling energy dissipation within the structural system before the flow exited the cross-beam roughness system.

Cite this article: Sajadi, S.M., Esmaeilzadeh Feridani, F., & Ahadiyan, J. (2025). Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 78-97. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11522.1148>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11522.1148>

Publisher: Razi University.

Introduction

Stilling basins are hydraulic structures designed to dissipate the kinetic energy of flow at the downstream end of spillways, gates, rapids, and other flow control structures. diverging basins are commonly used downstream of these structures To enhance energy dissipation in hydraulic jumps. Various methods have been employed to stabilize asymmetric hydraulic jumps. The performance of rough elements, such as sills, bed roughness, blocks, etc., has been investigated for increasing energy dissipation with various objectives, including reducing the stilling basin's length and project costs.

Energy Dissipation in Hydraulic Structures: Water is often released through spillways at high velocities during flood events, carrying significant kinetic energy. If this energy is not adequately controlled, it can cause erosion, structural damage, and other safety concerns downstream. Hydraulic structures, such as stilling basins, are designed to dissipate this energy safely. The efficiency of these structures depends on various factors, including the geometry of the spillway, the flow rate, and the tailwater conditions. **Role of Hydraulic Jumps:** A hydraulic jump is a phenomenon where high-velocity, supercritical flow transitions to low-velocity, subcritical flow. This transition results in significant energy dissipation through turbulence and mixing.

However, the length of the hydraulic jump is a critical design parameter. Longer jumps require larger stilling basins, which increase construction costs and space requirements. **Challenges with Flatbed Hydraulic Jumps:** On a flatbed, hydraulic jumps are longer, making them less economical for stilling basins downstream of spillways, especially ogee spillways commonly used in dams. To address this, engineers often incorporate appurtenances such as baffle blocks, sills, or roughened beds to shorten the jump length and enhance energy dissipation. **Importance of Research and Optimization:** Studies by researchers such as Sajadi et al. (2024), Fathi Moghadam et al. (2024), and Ahadian et al. (2022, 2024) have contributed to a better understanding of the physical mechanisms governing hydraulic jumps and energy dissipation. Their work highlights the importance of optimizing stilling basin designs to balance performance and cost, particularly in large-scale projects like dam spillways.

Method

This research aims to numerically investigate the S-type asymmetric jump control by using the system of crossed beams as a type of roughness with specific distributions in the form of the number, height, and different distances of the beams (as variables) in the stilling basin of sudden expansion using Flow-3D software. The geometry of the laboratory model was drawn in the AutoCAD software and then transferred as Stl to the Flow-3D software environment to carry out numerical simulation. According to the dimensions of the channel and the velocity of the flow, as well as the examination of the experimental data of the previous simulations and the numerical studies of other researchers concerning the subject of this research, the duration of the simulation of the flow was conservatively considered to be 180 seconds. Then, it was observed that the flow became stable in about 30 to 40 seconds after the start of the simulation, and the analyzed parameters of the flow did not change significantly with time. Therefore, the duration of the simulations was reduced to 60 seconds, and the results were recorded and checked at this time. With trial and error, the optimal meshing was chosen so that the analysis duration is also acceptable in addition to sufficient accuracy. The conditions of the three simulations, including the analysis time, initial and boundary conditions, and the turbulence model, were considered the same, and the difference was only in the number of mesh cells. In the simulations of this research, the RNG turbulence model was used. Finally, to determine the accuracy of each of the simulations and choose the optimal meshing, the indices of the

adaptation coefficient, the average errors, and the square of the average square of the errors were analyzed.

Results

Analyzing the results of numerical modeling according to what was stated for the use of the RNG disturbance model, the water level profile was analyzed by examining the flow depth in the transverse and longitudinal sections of the flow in optimal configurations. Transverse sections were considered based on the laboratory measurements (Hajialigol et al. 2021) for the width of 1 meter of the channel and at intervals of 0.1 meter, which were done for all three optimal combinations of tests and percentages of the depth of the channel. Using cross beams, the longitudinal profile of the flow depth from the section after the sudden expansion to the section 2 meters after the beam structure (following the laboratory observations) was drawn using the results of modeling with Flow3D software. The placement position of the cross-beam system for C1 and C3 configuration with $P = 80$ cm, between $X/Y1 = 8.34 \sim 4.67$, and for C2 configuration with $P = 60$ cm in $X/Y1 = 1.26$ It is $\sim 58/7$. Configuration 1 (C1) shows a low depth change and more flow uniformity than C2 and C3. This decrease in depth is due to the movement of eddies in the space between the beams with a greater amount and more energy changes, and as a result, higher wear and tear and exit with a more even flow. Based on the velocity outputs in configuration one and the depth of the tailwater from $h_s 0.7$ to h_s (height of tailwater) with the use of cross beams with the number of $n=5$, it can be seen that in the conditions of h_s (actual depth of tailwater) the flow lines after the effect of roughness (beams) closer to each other and according to the flow conditions after the structures, by forming eddies with a smaller wavelength between the spillway legs and finally the third beam, the turbulence is controlled. To quantitatively check the length of the jump, the jump length and roll length results for the S-type asymmetric jump modeled in Froude numbers of 7.4, 8.7 and 9.5 were analyzed based on the tailwater depth (y_t). Increasing the Froude number increases the change process of both dimensionless parameters under investigation. The modeling results are consistent with the research results of Taghinia et al. (2021). So, with the flow increase through the spillway, the Froude number decreases, and the length of the jump and the roll increase.

Conclusions

The effective parameters in hydraulic jump control were investigated by using different structural configurations consisting of cross beams with different percentages of tailwater depth. The results of the numerical simulations, confirming the laboratory results, showed the use of the bed roughness system using cross beams in different numbers and angles and after obtaining the optimal configurations using the relationships of the velocity coefficients in all depths of the case. The test ensures the stability and removal of asymmetric waves and reverses flow in the S-type asymmetric jump. In the check of jump control, the maximum percentage reduction in the length of S-type asymmetric hydraulic jump by using the simulated system was observed by 78.02% for configuration three and stable condition 0.9 h_s . The highest relative energy loss in the tested sections and depths of the tailwater for 3configuration was calculated as 36.06, 74.67, and 78.6 percent, respectively. Compared to the reference conditions, without

using the beam structure as a roughness, it causes more energy loss and, as a result, reduces the length of the stilling basin.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Acknowledgements

The authors would like to thank the Shahid Chamran University Research Deputy of Ahvaz, with Grant no. SCU.WH1403.260. the Khuzestan Water and Electricity Organization (KWPA), which provided financial and spiritual support to provide the conditions for conducting the research

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S در استفاده از بیم های مقاطع به عنوان زبری در بازشدگی ناگهانی

سید محسن سجادی^۱، فرشاد اسمعیل زاده فریدنی^۲، و جواد احدیان^۳

۱. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir

۲. گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: feridani0220@gmail.com

۳. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: J.ahadiyan@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: باتوجه به اهمیت حوضچه های آرامش و پرهزینه و زمان بر بودن مدل های آزمایشگاهی، به کارگیری مدل های عددی جهت شبیه سازی پدیده در موقعیت های مختلف و کاهش هزینه و زمان تأثیر زیادی دارند؛ بنابراین در این تحقیق شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن در مقاطع واگرای ناگهانی و تأثیر به کارگیری سیستم بیم های مقاطع در پایداری پرش به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار Flow-3D انجام شده است.

روش پژوهش: در این تحقیق پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی با مقطع واگرای ناگهانی با نسبت واگرایی $(B=b1/b2=0.67)$ و به کارگیری سیستم بیم های مقاطع به عنوان زبری جهت کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S که با ایجاد ضربه های موج موجب فرسایش کف و دیواره فلوم می گردد و با مدل سازی با نرم افزار Flow-3D به صورت سه بعدی شبیه سازی گردید. مشخصات پرش هیدرولیکی با بررسی سرعت در کف و تعیین سه ترکیب بندی مختلف از سیستم بیم های مقاطع با متغیرهایی شامل فاصله سیستم بیم ها از مقطع واگرا، زاویه سیستم بیم ها با کف کانال، تعداد و ضخامت بیم ها در درصدهای مختلف عمق پایاب مرجع مورد بررسی قرار گرفت.

یافته ها: نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی با تأیید نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به کارگیری سیستم زبری کف با استفاده از بیم های مقاطع در تعداد و زوایای مختلف و پس از دریافت بهینه ترکیب بندی با استفاده از روابط ضرایب سرعت، در همه عمق های پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج های نامتقارن و جریان برگشتی در پرش نامتقارن نوع S می گردد. همچنین با استفاده از سیستم زبری با بیم های مقاطع، بیشترین افت نسبی انرژی در مقاطع و عمق های پایاب مختلف مورد آزمایش برای ترکیب بندی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۶/۰۶، ۷۴/۶۷ و ۷۸/۶ درصد محاسبه گردید. در بررسی پروفیل سطح آب در سه ترکیب بندی بیم های مقاطع، ترکیب بندی ۱ ($C1$) روند منظم تری در توزیع عمق جریان در مقطع عرضی کانال و در مقاطع ۰/۳ تا ۲ متر از انتهای سیستم سازه ای دارد. در بررسی خروجی از شبیه سازی مدل برای بار آبی کل (THH) و نقطه انتهای استهلاك انرژی یا پرش هیدرولیکی (Γ^*j) در ترکیب بندی $C1$ ، این نقطه بعد از بیم سوم ($N=5$) تشخیص داده شد که جریان پس از عبور از رو و زیر آن با خطوط متمرکزی امتداد یافته است.

نتیجه گیری: بر اساس شاخص بار آبی کل و کنترل استهلاك انرژی، شرایط ترکیب بندی $C1$ قابلیت کنترل استهلاك درون سیستم سازه و قبل از خروج جریان از سیستم سازه زبری با بیم های مقاطع را در شرایط مطلوب تری داراست.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

کلیدواژه ها:

استهلاك انرژی،

پرش هیدرولیکی،

بیم مقاطع،

Flow-3D،

موج نامتقارن.

استاد: سجادی، سید محسن؛ اسمعیل زاده فریدنی، فرشاد؛ و احدیان، جواد. (۱۴۰۴). مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S در استفاده از بیم های

مقاطع به عنوان زبری در بازشدگی ناگهانی. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۱)، ۹۷-۷۸.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11522.1148>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

در تخلیه سیلاب‌ها، نحوه کنترل انرژی جریان در سازه‌های هیدرولیکی تابع پارامترهای بسیاری است. در این شرایط فهم صحیح از شرایط فیزیکی حاکم بر پدیده می‌تواند به بهبود عملکرد سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی نماید (سجادی و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ فتحی مقدم و همکاران^۲، ۲۰۲۴؛ احدیان و همکاران^۳، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴؛ و نوروزی و احدیان، ۱۳۹۵). در حوضچه‌های آرامش پایین‌دست سرریزها بخصوص سرریزهای اوجی سدها، تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر صاف، بدلیل طول بیشتر آن مقرون بصرفه نبوده، در عمل برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه، تمهیداتی از قبیل استفاده از بلوک در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه به‌عنوان یک راهکار عملی در نظر گرفته می‌شود. کاهش طول پرش و ابعاد حوضچه، هدف اصلی این تمهیدات است (چاو^۴، ۱۹۵۹). باتوجه‌به اینکه کاربرد پرش هیدرولیکی برای جلوگیری از فرسایش کانال پایین‌دست و استهلاک انرژی اضافی جریان است، بنابراین مکانی که پرش در آن به وقوع می‌پیوندد باید در برابر کاویتاسیون و فرسایش در سرعت‌های بالای جریان مقاوم باشد. برای جلوگیری از کاویتاسیون، باید کف بستر صاف باشد یا عناصر کنترل پرش هیدرولیکی طوری قرار گیرند که سطح فوقانی آن‌ها، هم سطح کف بالادست کانال باشد و مانعی در برابر جریان ایجاد نکنند. پرش تشکیل شده روی این بستر، پرش هیدرولیکی روی بستر زبر نامیده می‌شود (اید و راجاراتنام^۵، ۲۰۰۲). زبری بستر می‌تواند به شکل زبری‌های ممتد به‌صورت موج دار سینوسی، مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای و یا زبری‌های غیرممتد با مقطع دایره‌ای، لوزی، مستطیلی، شش ضلعی و حتی سنگ‌چین باشد. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرای ناگهانی باتوجه‌به موقعیت پنجه پرش که وابسته به عمق پایاب است، به چهار نوع پرش تقسیم بندی می‌شود (برمن و هگر، ۱۹۹۳). پرش فرار^۶ پرشی که کاملاً در پایین دست مقطع عریض اتفاق می‌افتد، پرش گسسته^۷ در این پرش، پنجه بین محل تغییر مقطع واگرا و نقطه‌ای که امواج عرضی دیواره‌های کانال پایین دست را قطع می‌کند قرار دارد، پرش انتقالی^۸ پرشی است که پنجه پرش در بالادست مقطع واگرا و عمود بر خط مرکزی کانال و بخشی از آن در پایین دست رخ می‌دهد و پرش کلاسیک^۹ پرشی که تمام طول پرش (عمق اولیه و مزدوج پرش) در بالادست محل تغییر مقطع واگرا رخ می‌دهد. پرش نوع S در حقیقت حالت بحرانی پرش نوع T بوده و زمانی رخ می‌دهد که پنجه پرشی به مقطع انبساط می‌رسد. مطابق نظر برمن و هگر^{۱۰} (۱۹۹۴) در حالت تثوری وقتی که $X_1=0$ است X_1 فاصله بین پنجه پرش و انبساط)، در بسیاری مکان‌ها امتداد پایه‌های هدایت‌کننده پایین‌دست از سد می‌تواند نادیده گرفته شود (کارولو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۷) و سپس پرشی نوع T به پرشی S تبدیل می‌گردد پرشی نوع S طول پرش بزرگتری نسبت به نوع T دارد؛ بنابراین دارای عمق پایاب کمتر، عدم تقارن جریان بیشتر و آبستگی بیشتر از پرش نوع T است. طراحی حوضچه با امکان وجود پرش S دارای شرایط بحرانی بیشتر بوده و می‌بایست در حالت مطمئن تری از سازه آبی بالا دست حوضچه لحاظ شود. وجود پرش نوع S در انبساط نامتقارن حوضچه می‌تواند جریان نامتقارن و آبستگی را افزایش داده و اعماق مزدوج، افت انرژی و طول حوضچه را در مقایسه با حالت انبساط متقارن تغییر دهد (کاروالهو و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۸)؛ لذا در این تحقیق تمرکز بیشتر بر روی این نوع پرش (S-Type) است.

1. Sajjadi, et al
2. Fathi-Moghadam et al
3. Ahadiyan et al
4. Chow
5. Ead and Rajaratnam
6. R-jump or repelled hydraulic jump
7. S-jump or spatial hydraulic jump
8. T-jump or transitional hydraulic jump
9. Classical Hydraulic Jump
10. Bremen and Hager
11. Carollo et al
12. Carvalho et al

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

امروزه استفاده از خصوصیات جت‌های متقابل و همچنین جت‌های جانبی برای کنترل این نوع پرش‌ها بسیار کاربردی شده است. در این راستا برای کنترل پرش هیدرولیکی نرمال و استفاده از فناوری‌های نوین می‌توان به تحقیق احدیان و ورشوساز (۱۳۹۷) و خدری میرقاید و همکاران (۱۳۹۷) اشاره نمود که با استفاده از توپ‌های شناور قابل انعطاف تحقیق جامعی را انجام دادند. هوشیاری پور و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی پژوهش‌های انجام شده، باتوجه به اختصاص یافتن هزینه زیادی از طراحی و اجرای سدها به طرح سرریز و حوضچه آرامش آن، بیان کردند که استفاده از مدل‌های عددی در جهت کاهش هزینه و شبیه سازی جریان در حالت‌های مختلف می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد.

عادلی و همکاران (۱۴۰۰) استفاده از سیستم جت هوا همراه با اثر زبری را مورد بررسی قرار دادند. محجوبی و همکاران (۱۴۰۳) در خصوص استفاده از سیستم جت‌های چندگانه به کنترل پرش هیدرولیکی پرداختند. آنها در تحقیق خود از ۳ ترکیب بندی سیستم جت با هدف به کارگیری حداقلی و سه قطر جت استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که سیستم جت در شرایط بحرانی تر بسیار کارا بوده است.

احدیان و همکاران (۱۴۰۳) در یک مقطع واگرای تدریجی و مطالعه آزمایشگاهی تأثیر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن را بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که وجود جت مقابل به صورت مستغرق می‌تواند نوسان فشار وارده بر کف حوضچه‌های آرامش را بکاهد. نتایج دیگر آنها نشان داد که بستر موج‌دار در محدوده مقطع واگرای تدریجی، طول پرش را نسبت به عدم وجود آن کاهش داده و تغییرات عمق جریان نیز کمتر شده است.

۲. مطالعات خارجی

راجاراتنام^۱ (۱۹۶۸) فرضیات بلانگر را با اضافه نمودن نیروی برشی بستر به دست آورد. اگر نیروی برشی بستر F_T باشد، می‌توان نشان داد که ε (ضریب نیروی برشی بستر) فقط تابعی از عدد فرود است. اگر مقدار نیروی برشی طبق تحقیقات راجاراتنام (۱۹۶۸) به صورت مضربی از نیروی هیدرواستاتیکی قبل از پرش به صورت $F_T = \varepsilon(0.5\gamma b_1 y_1^2)$ بیان شود، با اعمال این نیرو در معادله مومنوم می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right) (1 - \varepsilon + 2Fr_1^2) + 2Fr_1^2 = 0 \quad (1)$$

اگر صفر باشد، رابطه (۱) به معادله بلانگر تبدیل می‌شود. نتایج ایشان نشان داد که اختلاف مقدار پیش‌بینی شده $\frac{y_2}{y_1}$ طبق معادله بلانگر و رابطه (۱) با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین رابطه (۲) را برای محاسبه ضریب تنش برشی در بستر صاف ارائه نمود.

$$\varepsilon = 0.0082 (Fr_1^2 - 1)^{1.535} \quad (2)$$

هگر و فلک^۲ (۱۹۸۴) پرش هیدرولیکی را روی بستر زبر در اعداد فرود ۳ تا ۹ روی ۵ بستر زبر شامل دو زبری نواری (میل‌های مربعی شکل موازی که به طور عمودی در جهت جریان و در یک ردیف قرار گرفته بودند) و سه زبری طبیعی (با ذرات کاملاً فشرده ماسه به ارتفاع ۳/۲ تا ۱۱/۳ میلی‌متر و زبری نسبی ۰ تا ۰/۹) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که زبری می‌تواند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهد و این کاهش به عدد فرود اولیه جریان و زبری نسبی بستگی دارد.

1. Rajaratnam

2. Hughes and Flack

ما و همکاران^۱ (۲۰۰۱) اولین مطالعه روی رفتار جریان در کانال‌های زبر با بیم‌های متقاطع را انجام داد. ایشان کانال‌هایی با عناصر مربعی را مورد آزمایش قرار داد و همچنین پیشنهاد داد که جهت تضمین رژیم جریان آشفته، هندسه خاصی می‌بایست استفاده گردد. طبق نظر ایشان بیم‌های متقاطع به‌عنوان مقطع کنترل عمل کرده که موجب پرش‌های هیدرولیکی که منجر به افت انرژی بالا می‌شوند و توالی چرخشی سرریز جریان می‌گردد. ایشان نشان دادند، اگر یک جریان آشفته در طول کانال برقرار باشد، سرعت در خروجی کانال زیر سرعت بحرانی خواهد بود، زیرا جایی در طول بیم‌های متقاطع جریان به‌صورت نظری (تئوریک) به عمق بحرانی خواهد رسید. ما و همکاران (۲۰۰۱) برای دستیابی به این نوع رژیم، میزان $\frac{a}{L}$ را بین ۸/۵ و ۱۰ فرض نمود که در آن a ، ارتفاع بیم‌ها و L ، فاصله بین بیم‌های متقاطع است و رابطه (۳) را به‌عنوان تابعی از شیب (θ) و عمق بحرانی h_c جهت محاسبه ارتفاع بیم‌های متقاطع ارائه داد:

$$\frac{a}{h_c} = \frac{1}{(3-3.7\tan\theta)^{2/3}} \quad 8.5 < a/L < 10 \quad (3)$$

پرش هیدرولیکی روی بیم‌های متقاطع توسط کارالیو و همکاران (۲۰۰۸) در کانال‌های افقی و راجارانتام (۱۹۶۸)، اوتسو و همکاران^۲ (۱۹۹۱)، هاگر و لی^۳ (۱۹۹۲) و قادری و همکاران^۴ (۲۰۲۰) در کانال‌های شیب‌دار مورد مطالعه قرار گرفته است. حاجی علی‌گل^۵ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی الگوهای جریان در کانال‌های واگرایی ناگهانی با به‌کارگیری تیرک‌های متقاطع برای کنترل اثر پرش نامتقارن نوع S پرداختند. در این مطالعه، آزمایش‌های بیشتری بر روی سیستم تیرک متقاطع پیشنهاد شده توسط اسکورزینی و همکاران^۶ (۲۰۱۶) انجام شد تا اطلاعات بیشتری در مورد عملکرد سیستم تحت شرایط هندسی و هیدرولیکی متغیر، از جمله اعداد فرود بیشتر و نسبت‌های مختلف انبساط به دست آید. عملکرد هندسه‌های مختلف این سیستم ابتدا با در نظر گرفتن یکنواختی جریان و میانگین سرعت طولی نزدیک بستر کانال، با استفاده از دو عامل β_b و $\beta_b \cdot v_{mb}^2$ طبق رابطه (۴) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

$$\beta_b = \frac{\int_0^B v_b(x) \cdot |v_b(x)| dx}{B \cdot v_{mb}^2} \quad (4)$$

که در آن: B : عرض کانال، $v(x)$ پروفیل‌های سرعت در مقطع اندازه‌گیری و v_{mb} مقدار میانگین $v(x)$ است. طهماسبی پور و همکاران^۷ (۲۰۲۴) کنترل پرش نامتقارن از نوع T را با استفاده از سیستم ترکیبی جت و زبری سینوسی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها برای کنترل این نوع پرش‌ها بسیار قابل توجه و اثربخش بود. آنها نشان دادند حضور همزمان جت‌های کفی و عناصر زبری سینوسی باعث کاهش ۸۱ درصدی طول نسبی پرش T شکل می‌گردد.

در تحقیقی دیگر حاجی علی‌گل و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و خصوصیات تلاطمی ناشی از سازه‌های بیم جداکننده در کف برای کنترل پرش هیدرولیکی پرداختند. آنها تنش‌های رینولدزی و شدت تلاطمی جریان و همچنین نرخ کاهش انرژی جنبشی تلاطمی در اثر این سازه‌ها را بررسی نمودند. مهمترین نتایج آنها نشان داد که اثر عمق پایاب بر برخ پارامترهای تلاطمی بسیار مهم است. آرایش مناسب طراحی حوضچه‌های آرامش بر این روش را نیز این محققین پیشنهاد دادند.

مرووری بر مطالعات گذشته نشان داد که به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری در مقاطع واگرایی ناگهانی به طور قابل توجهی مقدار انرژی تلف شده در پرش هیدرولیکی نامتقارن را افزایش می‌دهند. علی‌رغم سابقه طولانی تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در این زمینه، به شبیه‌سازی عددی آن کمتر پرداخته شده است. با توجه به اهمیت حوضچه‌های آرامش و پرهزینه و زمان بر بودن مدل‌های آزمایشگاهی، به‌کارگیری مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی پدیده در موقعیت‌های مختلف و کاهش هزینه

1. Ma et al
2. Ohtsu et al
3. Hager and Li
4. Ghaderi et al
5. Hajjaligol et al
6. Scorzini et al
7. Tahmasbipour et al

و زمان تأثیر زیادی دارند؛ بنابراین در این تحقیق شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن در مقاطع واگرای ناگهانی و تأثیر به کارگیری سیستم بیم های متقاطع در پایداری پرش به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار Flow-3D انجام شده است.

روش پژوهش

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق و مدل سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به کارگیری سیستم بیم های متقاطع، مجموعه ای از آزمایش ها توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱)، در یک فلوم واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم مورد استفاده شامل یک کانال افقی مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸۷ متر، دارای جنس کف فلز و دیوارها از جنس شیشه و تجهیزات مربوط به آن، سیستم گردش آب (پمپ، لوله ها و مخازن)، سرریز اوجی، واگرایی ناگهانی با نسبت برابر با ۰/۶۷ و سازه های بیم های متقاطع در ابعاد هندسی مختلف به عنوان زبری بوده است. بنا بر هدف این تحقیق، بررسی پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش با مقاطع واگرای ناگهانی که با استفاده از ترکیب بندی شامل: تیرک های افقی در زوایای مختلف (θ)؛ ارتفاع تیرک های متفاوت (h_{beam})؛ تعداد مختلف (N)؛ فاصله بین تیرک های متوالی (S)؛ طول گستردگی تیر در جهت جریان (L) و فواصل مختلف از مقطع واگرا (P) به عنوان پارامترهای هندسی سازه تعریف گردید. در شکل شماره ۱ پارامترهای مورد نظر در این تحقیق آورده شده است.

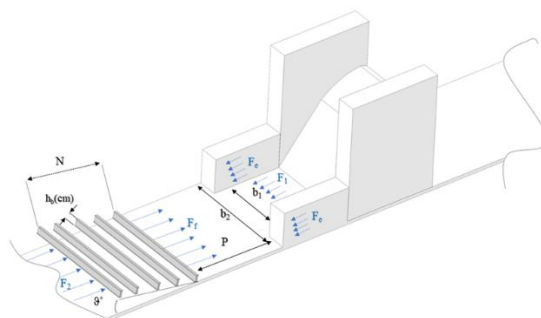
بر اساس تحلیل های ابعادی در مطالعه حاجی علی گل و همکاران (۲۰۲۱)، از مجموع آزمایش ها، ترکیب بندی های هندسی و هیدرولیکی انجام شده روی شرایط یکنواختی جریان و میانگین سرعت بستر بر اساس پارامتر β_b (ضریب تصحیح مومنوم اصلاح شده در نزدیکی بستر مطابق رابطه (۴)) و باتوجه به اثربخشی مشاهده شده سیستم بیم ها، ۳ هندسه بهینه بشرح زیر انتخاب شد:

Configuration 1: $P=0.8\text{ m}$, $N=5$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.05\text{m}$.

Configuration 2: $P=0.6\text{ m}$, $N=3$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.07\text{m}$.

Configuration 3: $P=0.8\text{ m}$, $N=3$, $\theta=15^\circ$, $h_b=0.05\text{m}$.

از این رو در تحقیق حاضر به بررسی عددی پرش نامتقارن نوع S و به کارگیری سیستم بیم های متقاطع جهت پایداری پرش نامتقارن نوع S برای ۳ هندسه بهینه مذکور با درصدهای ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد عمق پایاب آزمایش ها مرجع ($0/7h_s$), ($0/8h_s$, $0/9h_s$, h_s)، در اعداد فرود آزمایشگاهی ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ و با استفاده از مدل سازی عددی Flow-3D پرداخته شده است.



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای ناگهانی با بیم های متقاطع مورد استفاده در تحقیق

۱. تعریف مشخصات مدل آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی عددی

مراحل و تعریف مشخصات مدل آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این تحقیق، جهت انجام شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام گردید. باتوجه به ابعاد کانال و سرعت جریان و همچنین بررسی اطلاعات تجربی شبیه‌سازی‌های قبلی و مطالعات عددی محققین دیگر در رابطه با موضوع مورد مطالعه این تحقیق، در ابتدا مدت زمان شبیه‌سازی جریان به صورت محافظه کارانه ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد. سپس مشاهده شد که جریان در حدود ۳۰ تا ۴۰ ثانیه پس از آغاز شبیه‌سازی پایدار شده و پارامترهای مورد بررسی جریان با گذشت زمان تغییرات قابل توجهی ندارند؛ بنابراین مدت زمان شبیه‌سازی‌ها به ۶۰ ثانیه کاهش یافت و نتایج در این زمان ثبت و بررسی شد. از پارامترهای مختلف پیش‌فرض در مدل Flow-3D که برای هر شرایط هیدرولیکی و نوع پدیده قابل تغییر است، در تعریف فیزیک مسئله می‌توان استفاده کرد. باتوجه به شرایط مشاهداتی آزمایشگاهی (تحقیقات حاجی علی گل و همکاران، ۱۴۰۱)، ماهیت پرش نامتقارن نوع S و وجود آشفتگی به عنوان عامل اصلی اغتشاش جریان، در این تحقیق زبانه‌های مربوط به Gravity and Non-inertial Reference Frame و Viscosity and Turbulence برای شبیه‌سازی‌ها فعال گردید. شتاب گرانش برابر با $9/81 \text{ m/s}^2$ در خلاف جهت محور Z و در راستای عمق کانال در نظر گرفته شد. برای انجام شبیه‌سازی عددی، هندسه مدل آزمایشگاهی در اتوکد ترسیم و سپس به عنوان Stl به محیط نرم‌افزار Flow-3D منتقل گردید. نمایی از هندسه ایجاد شده شامل سرریز اوجی و مقطع واگرای ناگهانی به همراه سیستم بیم‌های متقاطع در محیط اتوکد و به صورت فایل Stl برای استفاده در مدل خروجی گرفته شد. در این تحقیق سه حالت مختلف مش‌بندی یعنی دارای تعداد سلول کم (مش درشت)، متوسط (مش متوسط) و زیاد (مش ریز) در نظر گرفته شد. مقایسه مش‌بندی‌های مختلف در جدول (۱) ارائه گردیده است.

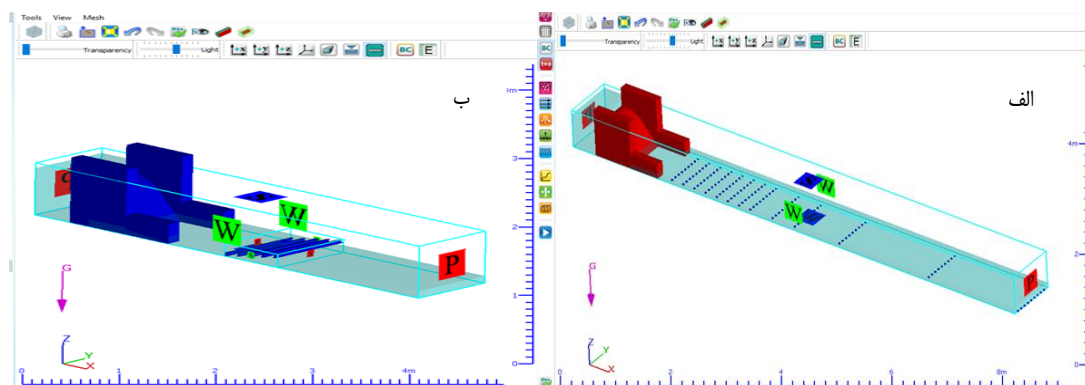
جدول ۱. مقایسه مش‌بندی‌های گوناگون در تعیین مش‌بندی ایده‌آل مدل عددی

شماره مش	تعداد سلول‌ها	مدت زمان شبیه‌سازی (ساعت، دقیقه، ثانیه)	زمان پایداری جریان (ثانیه)	زمان ثبت نتایج (ثانیه)	R ²	MAE	RMSE
۱	۱۳۵۵۲۰۰	۳۳hr ۰۵min ۲۹Sec	۴۲	۶۰	۰/۹۳۴	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲
۲	۹۹۰۰۰۰	۲۲hr ۴۲min ۷sec	۳۴	۶۰	۰/۹۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹
۳	۷۲۹۰۰۰	۱۸hr ۰۲min ۱۹Sec	۲۵	۶۰	۰/۸۹۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۶

مطابق جدول (۱) ابتدا یک مدل با مش‌بندی شماره ۲ و مدل آشفتگی RNG توسط نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. ضریب انطباق به دست آمده از این مش‌بندی دارای مقدار مناسبی می‌باشد. در مرحله بعد، مدل‌هایی با مش‌بندی‌هایی مشابه مش‌بندی ۳ ولی با سلول‌های ریزتر (مش ۱) و درشت‌تر (مش ۳) شبیه‌سازی شدند. تعداد سلول‌های مش ۱ حدود ۳۷ درصد بیشتر از مش ۲ است. مقادیر پارامترهای MAE و RMSE در مش ۱ و ۲ با اختلاف حدود ۳۰ درصد و کمتر از ۱ می‌باشند. ضریب انطباق مش‌های ۱ و ۲ هم حدود ۱ درصد اختلاف دارند. با این حال مدت زمان تقریبی شبیه‌سازی مش ۲ با مش ۱ بیش از ۳۰ درصد کمتر است.

با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که ریزتر کردن سلول‌ها نسبت به مش‌بندی ۲، تأثیر چندانی در افزایش دقت شبیه‌سازی نداشته و فقط مدت زمان تحلیل را به شدت افزایش می‌دهد و مش ۲ مناسب‌تر از مش ۱ و ۳ می‌باشد. به همین دلیل مش ۲ با ۹۹۰۰۰۰ سلول شامل ۴۹۵ سلول در راستای طول، ۵۰ سلول در راستای عرض و ۴۰ سلول در راستای عمق کانال به عنوان مش بهینه انتخاب شده و مدل آشفتگی ایده‌آل با آن تعیین گردید.

اگرچه درشت بودن مش، سرعت تحلیل را زیاد می‌کند؛ ولی ممکن است دقت مناسبی نداشته باشد (هوشیاری پور و همکاران، ۱۳۹۸). ریزتر کردن مش‌ها (افزایش تعداد سلول‌ها) در اغلب مواقع دقت را افزایش می‌دهد؛ اما مدت‌زمان شبیه‌سازی را زیاد میکند؛ بنابراین باید با سعی و خطا مش‌بندی بهینه‌ای را انتخاب کرد که علاوه بر داشتن دقت کافی، مدت‌زمان تحلیل نیز قابل قبول باشد. در تحقیق حاضر با هر یک از مش‌بندی‌های مذکور، یک شبیه‌سازی برای تشخیص میزان دقت انجام شد. شرایط سه شبیه‌سازی اعم از مدت‌زمان تحلیل، شرایط اولیه و مرزی و مدل آشفتگی یکسان در نظر گرفته شد و تفاوت فقط در تعداد سلول‌های مش بوده است. در این شبیه‌سازی‌ها مدل آشفتگی RNG به کار گرفته شد. در نهایت برای تشخیص میزان دقت هریک از شبیه‌سازی‌ها و انتخاب مش‌بندی بهینه، شاخص‌های ضریب انطباق، میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه گردید. شرایط مرزی و اولیه در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌های این تحقیق با نرم‌افزار Flow-3D شامل، شرط مرزی ورودی کانال (X_{min})؛ فشار بر اساس عمق سیال ورودی، شرط مرزی در خروجی (X_{max})، فشار بر اساس عمق سیال خروجی، شرط مرزی کف کانال (Z_{min}) و جداره‌های کانال (Y_{min} و Y_{max})، دیوار، شرط مرزی سطح جریان (Z_{max})؛ تقارن، شرط مرزی سیستم بیم‌های متقاطع در تمام وجوه مش؛ تقارن، شرط اولیه در ابتدای کانال و قبل از سرریز اوجی برای هر شبیه‌سازی؛ عمق آب پشت سرریز در شرایط آزمایشگاهی، شرط اولیه بعد از سرریز؛ عمق آب در پایاب کانال و متناظر با هر آزمایش. نمونه‌ای از شرایط مرزی و عمق اولیه برای شبیه‌سازی آزمایش‌های شاهد (بدون استفاده از بیم در کانال اصلی) و آزمایش‌های با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع در شکل‌های (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲. الف- شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های شاهد و ب- شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های عددی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، محورهای x ، y و z به ترتیب در راستای طول، عرض و عمق کانال در نظر گرفته شده‌اند. نحوه توزیع فشار نیز به صورت فشار هیدرواستاتیک در جهت عمق کانال انتخاب شده است.

یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پرش نامتقارن نوع S در اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ در پرش نامتقارن با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به عنوان زبری برای سه ترکیب‌بندی بهینه انتخاب شده از آزمایش‌ها در عمق‌های مختلف پایاب با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بررسی گردید. به این صورت که ابتدا جهت صحت سنجی مدل عددی، پروفیل طولی و توزیع سرعت عمق جریان با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱) مقایسه گردید. تغییرات پروفیل طولی و عرضی سطح جریان و راندمان آن در افت انرژی جریان و ارتفاع هیدرولیکی کل در کانال واگرایی ناگهانی با اعداد فرود و اعماق

پایاب مختلف در پرش نامتقارن نوع S و باوجود سیستم بیم‌های متقاطع در بستر کانال با استفاده از نتایج مدل عددی مقایسه گردید. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرای ناگهانی با شرایط جریان ورودی که عبارت‌اند از عمق اولیه پرش y_1 ، عدد فرود جریان ورودی F_1 و پنجه پرش (فاصله عمق اولیه پرش از محل تغییر مقطع) توصیف می‌شود. در مقاطع واگرای ناگهانی متغیر اصلی عمق پایاب (y_t) بوده و بسته به نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه $(Y=\frac{y_2}{y_1})$ برای هر نسبت بازشدگی $B=\frac{b_1}{b_2}$ که B نسبت بازشدگی و b_1 و b_2 به ترتیب عرض کانال بالادست و پایین‌دست است) و هر عدد فرودی پنجه پرش به سمت بالادست و یا پایین‌دست انتقال می‌یابد.

برمن و هاگر (۱۹۹۳) در مطالعه آزمایشگاهی در خصوص پرش نوع T و S در محدوده اعداد فرود اولیه $2/5$ تا 10 با عمق اولیه 0.13 تا 0.6 نشان دادند که مقدار نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود اولیه، نسبت بازشدگی مقطع و محل پنجه پرش (X_1) وابسته است و تأثیر B و X_1 در پارامتری بنام ψ که در پرش واگرای ناگهانی نشان‌دهنده حساسیت یا تأثیرپذیری پنجه پرش نسبت به تغییرات عمق آب پایین‌دست است. برمن و هاگر (۱۹۹۳) برای این پارامتر را برای پرش نوع T رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$\psi = (1 - \sqrt{B}) \cdot [1 - \tanh(1.9X)] \quad (5)$$

در این رابطه X پارامتر بی بعد پنجه که به وسیله محل پرش در بالادست مقطع واگرا تعریف می‌شود و عبارت است از:

$$X = \frac{x_1}{L_r} \quad (6)$$

مقدار x_1 فاصله از پنجه پرش است که از محل واگرایی در خلاف جهت جریان اندازه‌گیری می‌شود. رابطه فوق برای پرش نوع S، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$x_1 = 0 \rightarrow X = 0 \rightarrow \psi = 1 - \sqrt{B} \quad (7)$$

برمن و هاگر (۱۹۹۳) برای راندمان پرش که پارامتر حساسیت پنجه (ψ) در آن دخیل است روابط زیر را ارائه نمودند:

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} (1 - \psi) \right]^2 \text{ for Tjump} \quad (8)$$

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2B}}{Fr_1} \right]^2 \text{ for Sjump} \quad (9)$$

بر اساس مطالعات برمن و هاگر (۱۹۹۳)، برای پرش‌های نوع S و T در کانال واگرای ناگهانی و همچنین تطبیق آزمایش‌های انجام شده با نسبت بازشدگی ناگهانی $B = 0.67$ و همچنین اعداد فرود اولیه $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$ جهت تعیین طول غلطابی و طول پرش، پارامترهای راندمان پرش برای مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر ψ و η به عنوان پارامترهای حساسیت یا تأثیرپذیری پنجه و راندمان پرش در مقطع واگرای ناگهانی محاسبه گردید که در جدول (۲) برای پرش S آورده شده است.

جدول ۲. محاسبات پارامتر حساسیت پنجه و راندمان پرش در پرش نوع S آزمایش شده

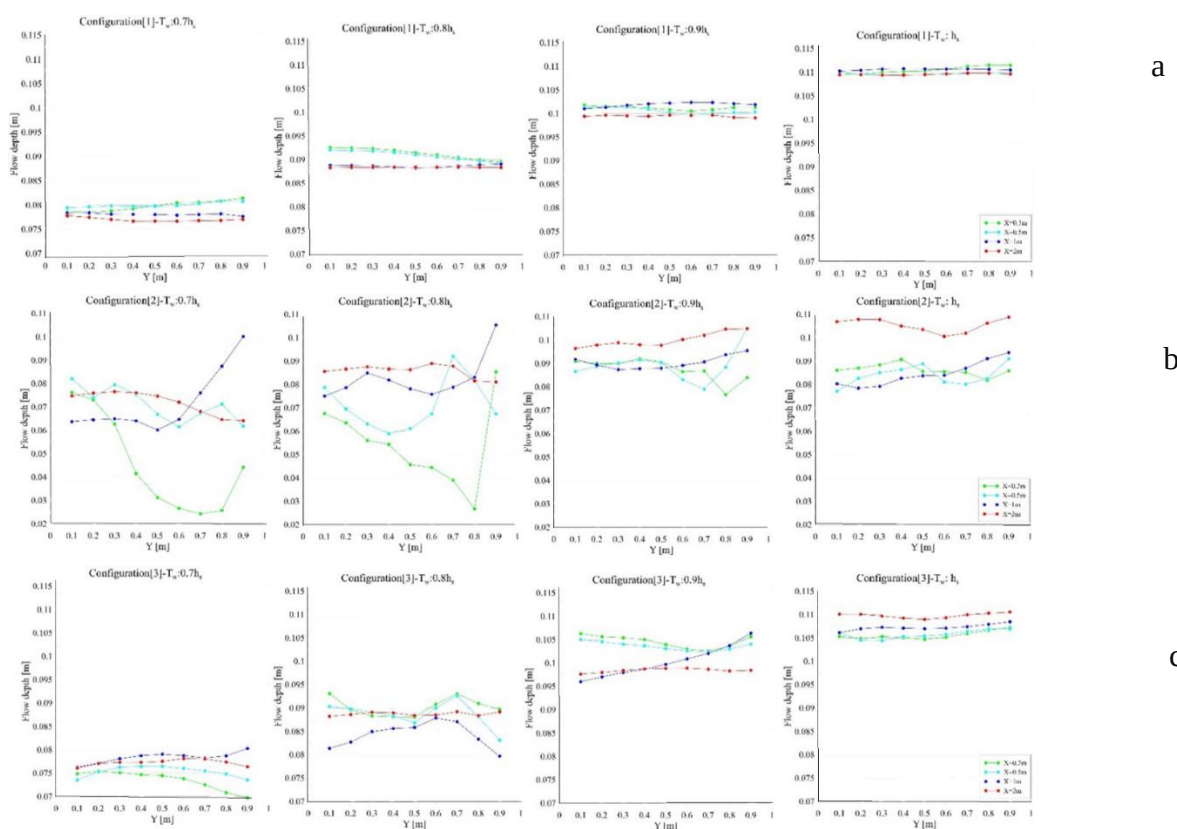
η	ψ	X	L_r	B	Fr_1
۰/۷۷۱۴۶	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۷	۰/۶۷	۹/۵
۰/۷۵۱۵۹۳	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۶/۸	۰/۶۷	۸/۷
۰/۷۱۱۶۱	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۶/۴۵	۰/۶۷	۷/۴

پارامتر حساسیت به دلیل ورود پنجه پرش در پرش نوع T به درون مقطع واگرایی دارای نمود بیشتری است و به همین دلیل در شرایطی که روابط برای پرش نوع S بیان می‌گردد دارای مقدار X (فاصله بازشدگی تا پنجه پرش) به صورت مقدار صفر لحاظ

می‌گردد. این مطلب موید این مطلب است که پرش نوع S تنها در یک حالت عمق پایاب d_s می‌تواند تشکیل گردد. این موضوع در بررسی راندمان پرش در پرش مورد بررسی (نوع S) که قابلیت تشکیل در پایاب سدهایی که سرریز آنها به صورت اوجی طراحی گردیده و در انتهای سرریز، مقطع تنگ شده تا بخشی از مسیر ادامه داشته و سپس به کانال پایاب متصل می‌شود، دارای اهمیت فراوانی است. در این شرایط بسته به عمق پایاب و اعداد فرود که عمدتاً مقادیری بالاتر از ۶ و تا ۱۰ است و به دلیل وجود بازشدگی ناگهانی مقطع، یکی از پرش‌های نوع S یا T را موجب می‌گردد که باتوجه به آزمایش‌های انجام شده (حاجی علی گل ۱۴۰۱)، طول پرش در نوع S بلندتر و با اندازه‌گیری‌های انجام شده برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ به ترتیب به میزان ۲/۳۸، ۲/۶۳ و ۲/۰۸ برابر بزرگ‌تر از طول پرش در نوع T اندازه‌گیری گردیده است.

۱. تحلیل نتایج پروفیل سطح آب

با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مطابق آنچه برای استفاده از مدل آشفتگی RNG بیان گردید، تحلیل پروفیل سطح آب با استفاده از بررسی عمق جریان در مقاطع عرضی و طولی جریان در ترکیب‌بندی‌های بهینه انجام گردید. مقاطع عرضی بر اساس برداشت‌های آزمایشگاهی حاجی علی گل (۱۴۰۱) در مدل وارد گردید. در این تحقیق پارامترهای مورد بررسی برای صحت سنجی، یک‌بار پروفیل عمق آب در آزمایش شاهد و با عدد فرود ۷/۴، بر اساس معادلات آشفتگی مختلف، در فاصله طولی از انتهای واگرایی تا پایاب و در فاصله ۰/۱ متری از دیواره کناری کانال در نظر گرفته شد. یک‌بار نیز پروفیل عمقی سرعت برای سه ترکیب‌بندی بهینه و در وسط کانال و در فاصله ۲ متری پس از سازه با تعیین ضریب انطباق، میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها به کار گرفته شده است که پس از استخراج مقادیر، محاسبه ضریب انطباق با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گردید. برای عرض ۱ متر کانال و به فواصل هر ۰/۱ متر در نظر گرفته شد که برای هر سه ترکیب‌بندی بهینه آزمایش‌ها و درصد‌های عمق پایاب در شکل (۳) (a تا c) آورده شده است.

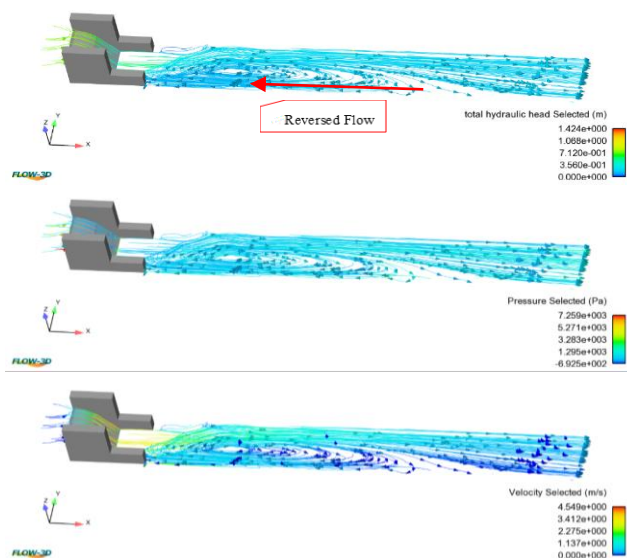


شکل ۳. نتایج عمق جریان در مقطع عرضی به فواصل ۰/۱ متر و فواصل طولی ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۲ متر بعد از سازه برای سه ترکیب‌بندی بهینه و درصد‌های مختلف پایاب

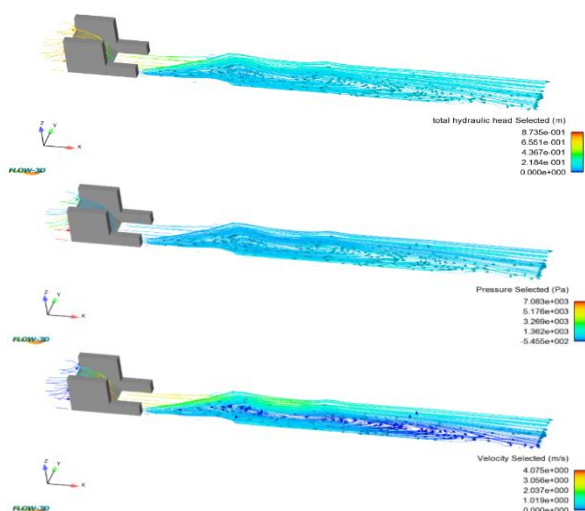
همان طور که در شکل (۳)-a مشاهده می شود، ترکیب بندی ۱ (Configuraion 1 در شکل ۳-a) روند منظم تری در توزیع عمق جریان در مقطع عرضی کانال و در مقاطع ۰/۳ تا ۲ متر دارد. در ترکیب بندی ۲ و خصوصاً مقطع ۰/۳۰ متری از انتهای سازه (Y=0.30m)، روند بسیار نامنظم است و وجود اغتشاش جریان از دوطرف کناره ها و اثر برخورد به بیم کاملاً مشهود است. همچنین مشاهده می شود در توزیع عمق در عرض کانال تنها در ترکیب بندی ۱ عمق جریان در فاصله ۲ متری از سازه به مرور کاهش یافته است. این کاهش بر اساس یک روند خطی از مقدار ۲/۸۸، ۲/۰۹، ۱/۷۴ و ۰/۶۱۱ درصد به ترتیب برای 0/7hs، 0/8hs، 0/9hs و hs متغیر است و نشان می دهد هر چه به سمت عمق پایاب اصلی (hs) پیش می رویم عمق جریان از ۰/۳ متر به سمت ۲ متری جریان تا انتها (yt) یکنواخت تر می شود؛ لذا می توان گفت اثر چرخش جریان در این ترکیب بندی کمتر بوده و سازه های استفاده شده، در ترکیب بندی ۱ توانایی بیشتری در یکنواختی جریان و شکستن آبشارهای انرژی (Cascades) دارند. با نگاهی به شرایط هندسی سازه ترکیب بندی ۱ ($\theta = 11$, $h_b = 0.05$, $N = 5$, $P = 0.8$ m) و تفاوت بارز آن نسبت به سایر ترکیب بندی ها می توان اثر تعداد بهینه بیم ها را در آن نسبت به ترکیب بندی ۲ و ۳ موثر دانست. تعداد بیم بیشتر (۵ در مقابل ۳) باعث می گردد تا غلطابه ها در بین بیم ها و با عبور از زیر و روی بیم های متقاطع با زاویه بیشتر (θ) عبور نموده و در نتیجه انرژی بیشتری از جریان را مستهلک نموده و لذا با گذر از آخرین بیم تا مقطع ۲ متری شرایط جریان آرام تری را شاهد باشیم که در مقطع ۲ متر بعد از سازه، در کلیه مقاطع (از ۰/۳۰ تا ۲ متر بعد از سیستم سازه) تقریباً یکنواخت گردد. (شکل (۴) - a - ترکیب بندی ۱ و $T_w:hs$).

۲. بررسی نتایج سرعت جریان، فشار و بار آبی کل

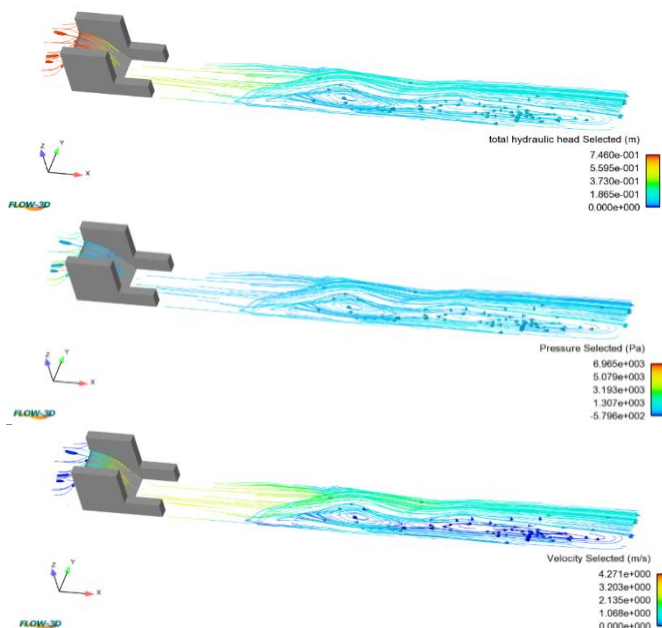
شکل های ۴-الف تا ۴-ج نمایی از خروجی مدل در زمان نهایی انجام آزمایشات (۶۰ ثانیه) برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ در آزمایشات مرجع بدون بیم را نشان می دهد. در این شکل ها کل بار آبی (m)، مجموع فشارهای استاتیک و دینامیک (pa) و سرعت متوسط جریان (m/s) درون کانال به صورت بردار نشان داده شده اند. بیشترین اثر وجود پرش نامتقارن شکل گرفته در گردابه های سطحی که بدلیل جریان نزدیک بستر ایجاد می شوند، در این شکل ها مشاهده می شود. این گردابه های سطحی که تحت اثر مومنتم جریان بستر ایجاد می شوند عامل مهمی برای ایجاد جریان برگشتی (قسمت اول شکل (۵)-الف) برای فرود ۷/۴ می شوند. این جریان های برگشتی با ایجاد تنش برشی در کف در کنار اثر تخریبی جت جریان نامتقارن و اثرات گردابه های سطحی که در عدد فرود ۷/۴ و ۸/۷ به ترتیب تا حدود ۶۵ و ۸۹ درصد طول فلوم و در عدد فرود ۹/۵ تا انتهای فلوم امتداد دارد، موجب می گردد تا اثر سازه بیم های متقاطع طرح شده در این تحقیق و کاهش اثرات مذکور بدون ایجاد مانع مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۴. الف - خروجی بار آبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 7/4



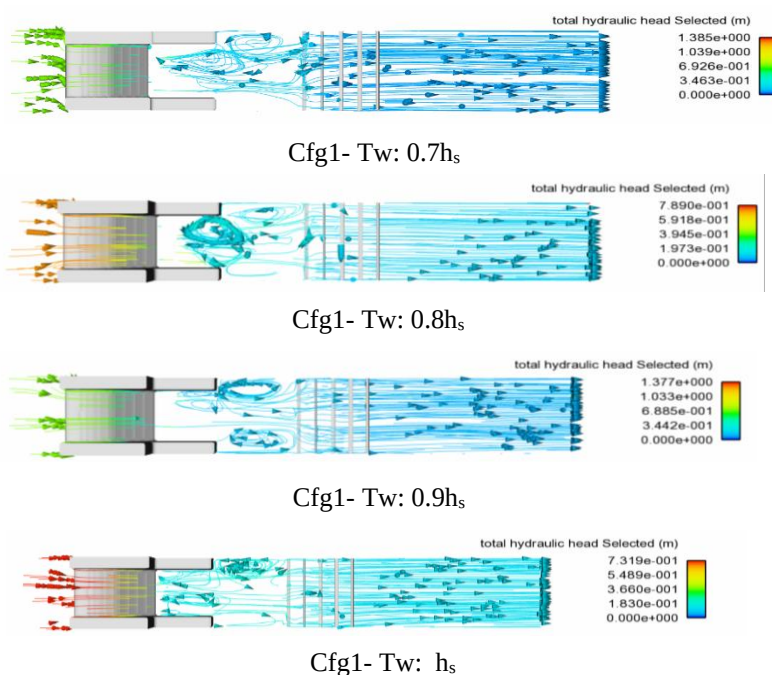
شکل ۴. ب- خروجی بارآبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 8/7



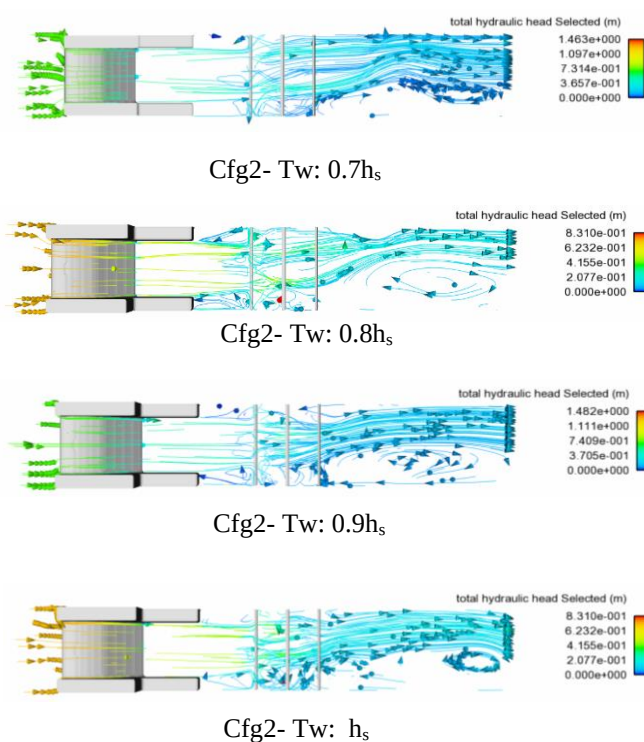
شکل ۴. ج- خروجی بارآبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 9/5

حال برای بررسی بار آبی کل (که عبارت است از جمع ارتفاع معادل سرعت $V^2/2g$ ، ارتفاع معادل فشار P/γ و ارتفاع از مبنا Z که به عنوان Total Hydraulic Head نامیده و در مدل با خروجی THH تعریف می گردد) مدل سازی انجام شده، مشاهده می گردد که جت مایع عمودی سرازیر شده از سرریز اوجی که بر سطح جامد و افقی کف برخورد کرده و سپس با برخورد به اولین بیم به عنوان زبری، مایع شروع به پخش شعاعی روی سطح می کند تا زمانی که یک افزایش ناگهانی در ارتفاع سیال اتفاق می افتد و یک پرش هیدرولیک دایره ای تشکیل می شود. این موضوع به خصوص در شرایط $hs/0.8$ و $hs/0.9$ قابل مشاهده است. طبق نتایج تحقیق پسندیده فرد و همکاران^۱ (۲۰۱۱) هنگامی که ارتفاع پایین دست افزایش می یابد، شعاع پرش هیدرولیکی دایره ای تا حد معینی کاهش می یابد که پس از آن هیچ پرش پایداری وجود نخواهد داشت. اگر گرانش کاهش یابد، شعاع پرش و طول منطقه

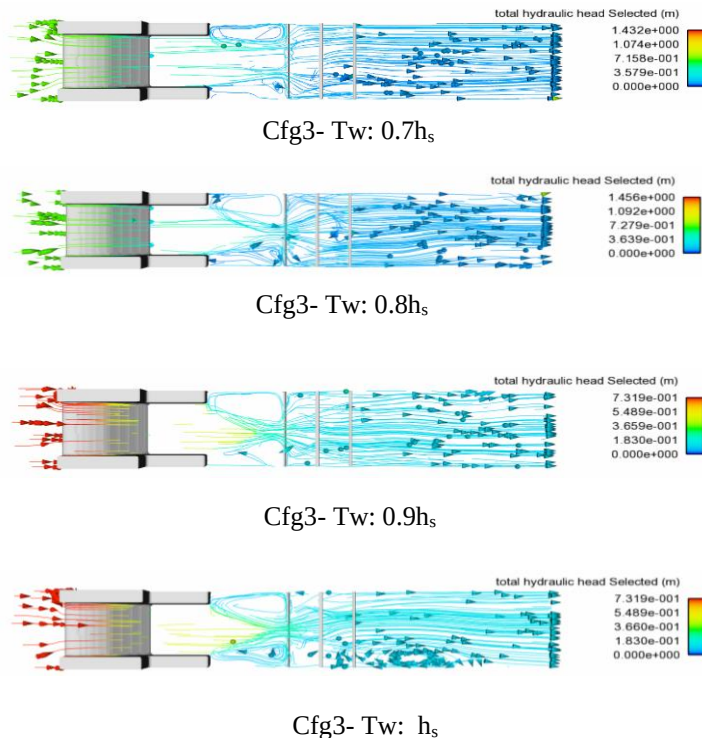
انتقال هر دو افزایش می‌یابد. در اینجا به دلیل شرایط گرانث یکسان، علاوه بر تأثیر تغییرات پایاب (از $0.7h_s$ تا h_s)، تغییرات سازه‌ها مطابق با ترکیب‌بندی‌های بهینه نیز عامل اصلی تغییر گردابه‌ها هستند. نقاط مشخصه پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از پای سرریز تا محل سازه شامل نقاط جداشدگی جریان بیشتری در حالات $0.8h_s$ و $0.9h_s$ هستند. علاوه بر اینکه تمرکز خطوط جریان پس از سازه نیز در این حالات بهتر قابل مشاهده است. یکی از پارامترهایی که می‌توان در این نوع خروجی از شبیه‌سازی تشخیص داد و خصوصاً برای بار آبی کل (THH) نقطه انتهای استهلاك انرژی یا پرش هیدرولیکی (Γ^*) است. برای ترکیب‌بندی C_1 می‌توان این نقطه را بعد از بیم سوم ($N=5$) تشخیص داد که جریان پس از عبور از رو و زیر آن با خطوط متمرکز امتداد می‌یابد. در شرایط C_2 که $N=3$ و زاویه قرارگیری $\Theta=11^\circ$ است، باتوجه به اینکه گردابه‌های چرخشی پس از سیستم بیم‌ها نیز امتداد دارد، عملاً پس از 80 cm بعد از آخرین بیم، این شرایط قابل مشاهده است (شکل ۵-ب). برای C_3 با زاویه قرارگیری $\Theta=15^\circ$ و $N=3$ باوجود ناحیه چرخشی جریان در شرایط پایاب h_s نزدیک به انتهای سازه، می‌توان تا حدود 30 cm - 50 cm پس از سازه نقطه انتهای استهلاك انرژی را تشخیص داد (شکل ۵-ج)؛ لذا می‌توان گفت بر اساس شاخص بار آبی کل و کنترل استهلاك انرژی، شرایط ترکیب‌بندی C_1 قابلیت کنترل استهلاك درون سیستم سازه و قبل از خروج جریان از سیستم سازه زبری با بیم‌های متقاطع را در شرایط مطلوب‌تری داراست.



شکل ۵. الف- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب‌بندی ۱ و درصدهای مختلف عمق پایاب



شکل ۵. ب- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب بندی ۲ و درصد های مختلف عمق پایاب



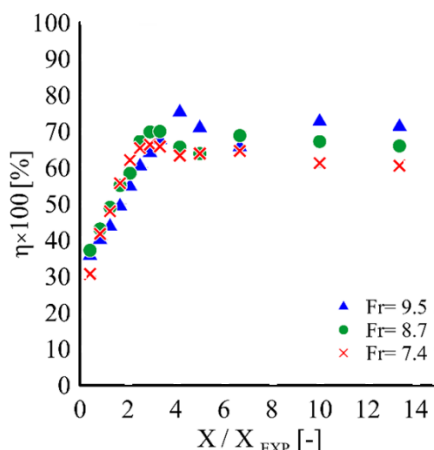
شکل ۵. ج- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب بندی ۳ و درصد های مختلف عمق پایاب

۳. بررسی افت انرژی در مقطع واگرایی ناگهانی در حالت مرجع و استفاده از بیم‌های متقاطع

باتوجه 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 ΔE نشان دهیم، می‌توان نسبت افت انرژی پرش به میزان انرژی اولیه را به عنوان افت نسبی یا راندمان پرش مطابق با رابطه زیر تعریف نمود:

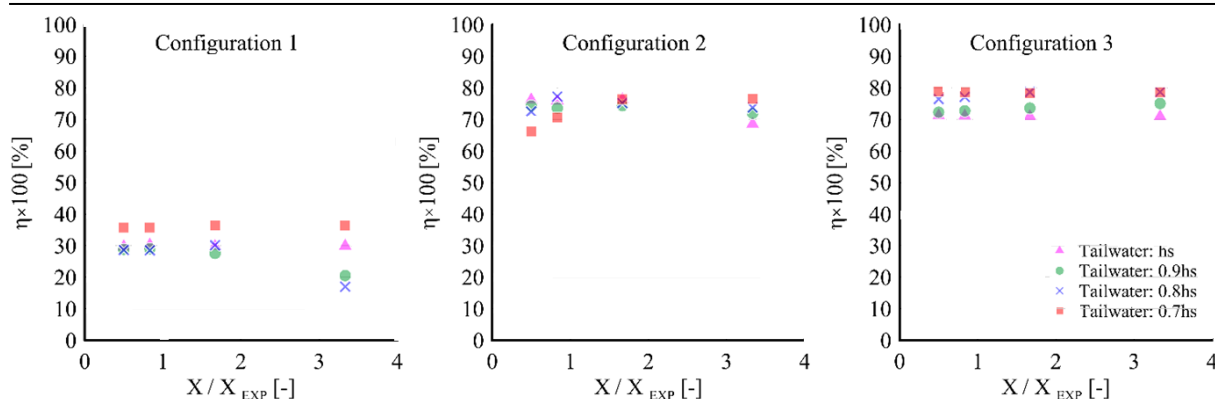
$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (۱۰)$$

باتوجه به پرش نامتقارن نوع S مدل‌سازی شده برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵، افت انرژی در مقاطع ۰/۲۵ متر تا مقطع ۸ متری بعد از واگرایی ناگهانی، مطابق با شکل (۶) ترسیم گردید. در این شکل X_{exp} معادل طول واگرایی که برابر ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و طول X فواصل اندازه‌گیری از واگرایی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در همه اعداد فرود روند افزایش افت انرژی نسبی تا مقطع حدود ۲/۵ متر بعد از واگرایی مقطع، افزایشی بوده و در حدود $X/X_{exp} = 4$ به اوج خود رسیده و از آنجا با یک روند ثابت تقریباً خطی تا انتهای مقطع و پایاب امتداد می‌یابد. در این بین با افزایش عدد فرود میزان افت انرژی افزایش می‌یابد بطوریکه عدد فرود ۹/۵ از این قله بیشترین مقدار را دارد. افت نسبی انرژی در مقاطع واگرا تابع عدد فرود اولیه و نسبت بازشدگی مقطع است بطوریکه طبق تحقیقات نیسی (۱۳۹۲)، در یک نسبت بازشدگی ثابت، میزان راندمان پرش نوع S با بستر زبر شده بیش از راندمان پرش با بستر صاف است. در اینجا اثر زبری با استفاده از بیم‌های متقاطع در نظر گرفته شده و نتایج تحقیقات محققینی چون نیسی (۱۳۹۲) و الحمید^۱ (۲۰۰۴) را تأیید می‌نماید. ضمن اینکه عدد فرود، یکی از پارامترهای اصلی تعیین میزان افت انرژی پرش در مقاطع واگرایی ناگهانی است که در اینجا بخوبی مشهود است.



شکل ۶. افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی برای پرش نامتقارن

برای بررسی اثر سازه بر افت انرژی نسبی در ترکیب‌بندی‌های بهینه و باتوجه به بیشترین مقدار آن در عدد فرود ۹/۵ پس از $X/X_{exp} \sim 4$ در ترکیب‌بندی‌های بهینه اشاره شده، مقدار افت انرژی نسبی در مقابل فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۷. افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی برای سه ترکیب بندی بهینه در عدد فرود ۹/۵

همان گونه که از شکل برمی آید، برای ترکیب بندی ۱ و در مقاطع ۱۰۰، ۵۰، ۳۰ و ۲۰۰ سانتی متر از سازه بیم های متقاطع به طور متوسط افت انرژی نسبی برای hs ۰/۷، hs ۰/۸، hs ۰/۹ و hs به ترتیب ۳۶/۰۶، ۲۶/۰۸، ۲۶/۴۸ و ۲۹/۹۵ است. این مقادیر برای ترکیب بندی ۲ به ترتیب ۷۲/۴۳، ۷۴/۶۷، ۷۳/۵۳ و ۷۴/۲۸ و برای ترکیب بندی ۳ به صورت ۷۸/۶، ۷۷/۷۲، ۷۳/۴۱ و ۷۱/۰۶ به دست می آید. مقایسه روند افزایشی افت انرژی در بازه مورد نظر تا ۲ متری بعد از سیستم سازه های بیم های متقاطع نشان می دهد که بیشترین افت انرژی در ترکیب بندی ۳ رخ می دهد. در مقایسه با شرایط مرجع که روند افزایشی افت انرژی نسبی در آن تا فاصله ۲ متری با شیب ۱۱/۴۱ ادامه دارد، می توان گفت به طور متوسط استفاده از سیستم بیم های متقاطع با ترکیب بندی ۳ به میزان ۴۴/۷۸ درصد افزایش افت انرژی نسبی را باعث می گردد و از طرفی بر اساس شرایط جریان بعد از سیستم بیم ها، جریان به صورت یکنواخت تا انتهای فلوام امتداد دارد.

بحث

پرش هیدرولیکی در کانال به عرض ۱ متر و طول ۱۲ متر با واگرایی ناگهانی و به کارگیری سیستم بیم های متقاطع به عنوان زبری جهت پایداری پرش هیدرولیکی نامتقارن با استفاده از نرم افزار Flow-3D شبیه سازی گردید. پارامترهای مؤثر در کنترل پرش هیدرولیکی با به کارگیری ترکیب بندی های مختلف سازه ای متشکل از بیم های متقاطع با درصدهای مختلف عمق پایاب اصلی مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی، با تأیید نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به کارگیری سیستم زبری کف با استفاده از بیم های متقاطع در تعداد و زوایای مختلف و پس از دریافت بهینه ترکیب بندی با استفاده از روابط ضرایب سرعت، در همه عمق های پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج های نامتقارن و جریان برگشتی در پرش نامتقارن نوع S می گردد. در بررسی کنترل پرش، حداکثر درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به کارگیری سیستم شبیه سازی شده، برای ترکیب بندی ۳ و شرایط پایاب hs ۰/۹ به میزان ۷۸/۰۲ درصد مشاهده شد. همچنین به کارگیری و ایجاد سیستم زبری با بیم های متقاطع، افت نسبی انرژی قابل توجهی را در پرش نامتقارن نوع S نشان داد. بیشترین افت نسبی انرژی در مقاطع و عمق های پایاب مختلف مورد آزمایش برای ترکیب بندی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۶/۰۶، ۷۴/۶۷ و ۷۸/۶ درصد محاسبه گردید که در مقایسه با شرایط مرجع بدون استفاده از سازه بیم به عنوان زبری باعث افت انرژی بیشتر و در نتیجه کاهش طول حوضچه آرامش را موجب می گردد. در نهایت در بررسی مدل عددی انجام شده برای ترکیب بندی های بهینه مشاهده گردید، دقت نتایج مدل آشفتگی RNG، بیشتر از سایر مدل ها بوده و این مدل به عنوان مدل آشفتگی ایده آل برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با اجرای ترکیب بندی های بهینه می تواند کاربرد داشته باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

سید محسن سجادی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.
فرشاد اسمعیل زاده فریدنی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله.
جواد احدیان: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چران اهواز به دلیل حمایت‌های مالی و معنوی بر اساس پژوهانه نویسنده دوم و سوم مقاله مطابق با قرارداد SCU.WH1403.260 و همچنین از سازمان آب و برق خوزستان که با حمایت‌های مالی و معنوی، امکان فراهم نمودن شرایط انجام تحقیق را محقق نمودند، نهایت تشکر و قدردانی خود را به عمل آورند.

منابع

- احدیان، جواد، حکمی، مسعود، شفاعی بجستان، محمود، و سجادی سید محسن. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی تأثیر جت مستغرق در بستر موج‌دار با مقطع واگرای تدریجی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن. نشریه مهندسی عمران مدرس، ۲۴(۱)، ۱۶۰-۱۵۱. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-70953-fa.html>
- احدیان، جواد، و ورشوساز، امین. (۱۳۹۷). مدل‌سازی فیزیکی تأثیر طول مهارهای انعطاف‌پذیر موانع شناور کروی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۱)، ۳۰۸-۲۹۷. <https://www.doi.org/10.22069/jwsc.2018.12965.2762>
- تقی نیا، آیرین، اصفری پری، سید امین، شفاعی بجستان، محمود، و احمدیان فر، ایمان. (۱۴۰۰). تأثیر استهلاک انرژی ناشی از جت آب خروجی از کف و انتهای حوضچه آرامش بر طول پرش هیدرولیکی. نشریه هیدرولیک، ۱۶(۳)، ۲۸-۱۷. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.268704.1504>
- حاجی علی گل، سعید. (۱۴۰۱). تأثیر زاویه قرارگیری و تعداد تیرکهای افقی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با مقطع واگرای ناگهانی. پایان نامه دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- خدیری میرقاید، پوریا، احدیان، جواد، و ورشوساز، امین. (۱۳۹۷). بررسی اثر بلوک‌های معلق کروی مهاری نوع جدید بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله مهندسی عمران مدرس، ۱۸(۵)، ۷۰-۶۱. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-12907-fa.html>
- عادل، عاطفه، احدیان، جواد، قمشی، مهدی، و فتحی مقدم، منوچهر. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب- هوا در پرش هیدرولیکی تحت تأثیر پوشش گیاهی انعطاف‌ناپذیر. مجله اکوهیدرولوژی، ۸(۳)، ۷۷۵-۷۶۳. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.327831.1528>
- نیسی، کبری. (۱۳۹۲). تعیین اثر زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با واگرایی ناگهانی. پایان نامه دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- محبوبی، افشین، احدیان، جواد، سجادی، سید محسن، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۴۰۳). کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن در کانال‌های با مقطع واگرای ناگهانی توسط سیستم جت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵(۱۰)، ۱۹۲۰-۱۹۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669>
- نوروزی، سحر، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تیغه‌های گرداب‌شکن ۴۵ درجه بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری با استفاده از مدل FLOW-3D. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۱)، ۲۰۰-۱۹۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.12677>
- هوشیاری پور فرهاد، دهقان، مصطفی، و مهاجری، سیدحسین. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر زاویه واگرایی حوضچه آرامش و موقعیت آب پایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی با مدل‌سازی عددی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۱(۱)، ۸۵-۶۸. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13151.5337>

References

- Adeli, A., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., & Fathi Moghadam, M. (2021). Experimental study of two phase Air-water Flow Parameters in Hydraulic Jumps with vegetated Rough Bed. *Journal of Ecohydrology*, 8(3), 763-775. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.327831.1528> (In Persian)
- Ahadian, J., & Varshosaz, A. (2018). Effect of the Floating Sphere Objects Flexible Bearing Length on the Characteristic of the Hydraulic Jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 297-308. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12965.2762> (In Persian)
- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A., Gualtieri, C., & Khoshkonesh, A. (2022). Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Non-cohesive Protective Levees. *Journal of Water Resources Management*, 36, 625–639. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6>
- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>
- Ahadiyan, J., Hakami, M., Shafaei Bajestan, M., & Sahadi, S.M. (2024). Laboratory investigation of the Effect of a Submerged Jet in a Wavy Bed with a Gradually Diverging Cross-section on the Characteristics of Asymmetric Hydraulic Jump. *Modares Civil Engineering Journal*, 24(1), 151-160. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-70953-fa.html> (In Persian)
- Alhamid, A. A. (2004). S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), 657-662. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628319>
- Bremen, R., & Hager, W.H. (1993). T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), 61–78. <https://doi.org/10.1080/00221689309498860>
- Bremen, R., Hager, W.H. (1994). Expanding stilling basin. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*. 106(3), 215-228. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1994.26934>
- Chow, V. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, USA. <https://www.scribd.com/document/684578636/19-Ven-Te-Chow-Open-Channel-Hydraulics-Mcgraw-Hill-College-1959>
- Chow, V.T. (1989). Hand book of Applied Hydrology. Mc Graw Hill Book Co, New York, USA. <https://wecivilengineers.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/applied-hydrology-ven-te-chow.pdf>
- Carollo, F.G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 133(9), 989-999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:9\(989\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:9(989))
- Carvalho, R.F., Lemos, C.M., & Ramos, C.M. (2008). Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*, 46(6), 739-752. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521919>
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic engineering*, 128(7), 656-663. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656))
- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., & Sajadi, M. (2024). Drag Coefficient of Rigid and Flexible Deciduous Trees in Riparian Forests. *Journal of Hydraulic Engineering*, (ASCE), 150(5), 04024027, 1-10. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13709>
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., & Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. *Journal of Hydroinformatics*, 22, 1554–1572. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.298>

- Hager, W. H., & D. Li. (1992). Sill-controlled energy dissipater. *J. Hydraul. Res.*, 30 (2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>
- Haghdoost, M., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., & Ahadiyan, J. (2022). Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply*, 22 (11), 8337–8352. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.376>
- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Rita Scorzini, A., Di Bacco, M., & 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622)
- Hajialigol, S. (2021). The effect of the placement angle and the number of horizontal beams on the characteristics of the hydraulic jump in stilling ponds with a sudden divergent section. PhD thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Ahvaz, Iran. (In persian)
- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., & Kirby, J. T. (2024). Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, 21, 101829. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829>
- Hooshyaripor, F., Dehghan, M., & Mohajeri, S. (2019). Numerical Simulation of Effect of Expansion Angle and End-sill Location on the Hydraulic Jump in Gradually Expanding Stilling Basins. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1), 85-98. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13151.5337>
- Hughes, W. C., & Flack, J. E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110 (12), 1755-1771. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1755\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1755))
- Khedri Mirghaied, P., Ahadiyan, J., & Varshosaz, A. (2018). Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics. *Modares Civil Engineering Journal*, 18 (5), 61-70. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-12907-fa.html> (In Persian)
- Ma, F., Hou, Y., & Prinos, P. (2001). Numerical calculation of submerged hydraulic jumps. *Journal of hydraulic research*, 39(5), 493-503. <https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628274>
- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S.M., & Kashefipour, S.M. (2024). Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), 1903-1920. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.66972> (In Persian)
- Nisi, K. (2013). Determining the effect of roughness on hydraulic jump characteristics in stilling basins with sudden divergence. PhD thesis in hydraulic structures, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- Nouroozi, S., & ahadiyan, J. (2017). Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D. *Irrigation Sciences and Engineering Journal*, 40(1), 191-200. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.12677> (In Persian)
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Yamanaka, Y. (1991). Drag on vertical sill of forced jump. *Journal of Hydraulic Research*, 29(1), 29-47. <https://doi.org/10.1080/00221689109498991>
- Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R., & Khavari, M. (2011). Numerical study of circular hydraulic jump using volume-of-fluid method. *Journal of Fluids Engineering*, 133, 011401. <https://doi.org/10.1115/1.4003307>
- Rajaratnam, N., & Subramanya, K. (1968). Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 94 (2), 481–504. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001780>
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. (2024). Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning

- System: An Application of Flood Management. *Water*, 16(24), 3694. <https://doi.org/10.3390/w16243694>
- Scorzini, A. R., Di Bacco, M., & Leopardi, M. (2016). Experimental investigation on a system of cross-beams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2), 06015018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001088)
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A. R., Di Bacco, M., Sajjadi, M., & Moghadam, M. F. (2021). Experimental Analysis on the Use of Counterflow Jets as a System for the Stabilization of the Spatial Hydraulic Jump. *Water*, 13(18), 2572. <https://doi.org/10.3390/w13182572>
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Fathi Moghadam, M., Sajjadi, M., & Di Bacco, M. (2022a). Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system. *Journal of Hydraulic Structures*, 7(4), 58-75. <https://doi.org/10.22055/jhs.2022.40233.1203>
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Mario, D. B., Sajjadi, S.M., & Fathi-Moghafdam, M. (2022b). Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter flow jets in expanding channels. *Acta Mech*, 233, 3867–3880. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2>
- Taghinia, Iyrin., Asfari-Pari, Seyed Amin., Shafaei-Bajestan, Mahmoud., & Ahmadian-Far, Iman. (1400). The effect of energy dissipation from the water jet exiting from the bottom and end of the stilling pond on the length of the hydraulic jump. *Hydraulic Journal*, 16(3), 17-28. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.268704.1504> (In Persian)
- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. (2023). Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. <https://doi.org/10.3390/w16233513>