

بررسی عددی اثر بیم به عنوان زبری بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نوع S در بازشدگی ناگهانی

چکیده

حوضچه آرامش یکی از سازه‌های متداول استهلاک انرژی جنبشی جریان بوده و اغلب برای افزایش استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی از حوضچه‌های واگرایی ناگهانی یا تدریجی در پایین‌دست سازه‌هایی چون سرریزها، دریچه‌ها و تنداب‌ها استفاده می‌شود. در این تحقیق پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی با واگرایی ناگهانی و به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری جهت پایداری پرش هیدرولیکی نامتقارن با استفاده از نرم‌افزار Flow3D به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. مشخصات پرش هیدرولیکی با بکارگیری سه ترکیب‌بندی مختلف از سیستم بیم‌های متقاطع با متغیرهایی شامل فاصله سیستم بیم‌ها از مقطع واگرا، زاویه سیستم بیم‌ها با کف کانال، تعداد و ضخامت بیم‌ها در درصد‌های مختلف عمق پایاب مرجع (hs و $0.9hs$)، $hs/0.7$ مورد بررسی قرار گرفته. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با تایید نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین، نشان داد که بکارگیری سیستم بیم‌های متقاطع در همه عمق‌های پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج‌های نامتقارن و جریان برگشتی در پرش نامتقارن نوع S شده و طول پرش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. حداکثر درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با بکارگیری سیستم شبیه‌سازی شده، برای ترکیب‌بندی ۳ و شرایط پایاب $0.9hs$ به میزان 78.02% درصد مشاهده شد. در بررسی تغییرات طول پرش و طول غلطاب همچنین برای ترکیب‌بندی بهینه برای عدد فرود $9/5$ که با استفاده از سرعت سنج سه بعدی EMV برداشت گردید، مشخص شد، استفاده از بیم‌های متقاطع در همه حالات عمق پایاب و ترکیب‌بندی‌ها باعث کاهش طول پرش می‌شود. روند تغییرات طول بی بعد حوضچه (L_r/y_t) به‌عنوان شاخص کاهش طول و همچنین طول غلتاب (L_r/y_t) از $0.7hs$ به hs کاهش یافته به گونه‌ای که به‌طور متوسط طول غلتاب بی بعد شده در شرایط پایاب $0.7hs$ با مقدار $19/65$ بیشترین و پایاب hs با مقدار $11/63$ کمترین مقدار را دارد و نسبت به مقدار آزمایش مرجع (بدون استفاده از سازه‌های بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری) برای عدد فرود $9/5$ به ترتیب $54/77$ و $73/23$ درصد کاهش را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، بیم‌های متقاطع، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، کانال‌های واگرا.

Numerical investigation of beam effect as roughness on S-type hydraulic jump characteristics in sudden expansion

ABSTRACT

The stilling basin is a common structure for dissipating the kinetic energy of flow and is often used to increase energy dissipation in hydraulic jumps using sudden or gradual diverging basins downstream of structures such as spillways, gates, and chutes. In this study, the hydraulic jump in a rectangular channel with a sudden divergence and the use of an intersecting beam system as roughness to stabilize the asymmetric hydraulic jump was simulated in three dimensions using Flow3D software. The characteristics of the hydraulic jump were investigated using three different configurations of the intersecting beam system with variables including the distance of the beam system from the diverging section, the angle of the beam system with the channel floor, the number and thickness of the beams at different percentages of the reference tailwater depth (hs and $0.9hs$, $0.8hs$, $0.7hs$). The results of numerical simulations, confirming the experimental results of previous researchers, showed that the use of the intersecting beam system in all tested tailwater depths leads to the stability and elimination of asymmetric waves and return flow in the asymmetric S-type jump and significantly reduces the jump length. The maximum percentage reduction in the length of the asymmetric S-type hydraulic jump using the simulated system was observed for configuration 3 and $0.9hs$ tailwater conditions at 78.02% .

In examining the changes in the jump length and roller length also for the optimal configuration for a Froude number of 9.5, which was measured using a 3D EMV velocity meter, it was found that the use of intersecting beams in all cases of tailwater depth and configurations reduces the jump length. The trend of changes in the dimensionless length of the basin (L_j/yt) as an indicator of length reduction as well as the roller length (L_r/yt) from 0.7hs to hs was decreasing in such a way that on average, the dimensionless roller length in 0.7hs tailwater conditions with a value of 19.65 has the highest and hs tailwater with a value of 11.63 has the lowest value and compared to the reference test value (without the use of intersecting beam structures as roughness) for a Froude number of 9.5 showed a decrease of 54.77 and 73.23 percent, respectively.

Keywords: *Cross beams, Energy loss, Expanding channels, Hydraulic jump, Stilling basin*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

When the high-speed flow collides with the water mass moving at low speed, the high-speed flow moves under the water mass, spreading and expanding towards the water's surface. This action causes turbulence and the appearance of eddies inside and eddies on the surface of the water. In this case, the flow regime changes from the supercritical state to the subcritical state, associated with a sudden increase in the free water level and a significant energy loss. Discrete jump or S-type jump, in which the toe of the jump is located between the divergent section change point and the point that cuts the transverse waves of the downstream channel walls. This type of jump is more like a jet and is asymmetrical. The direction of its inclination to one side of the channel wall is completely random and may lead to the left or right. Due to the destructive nature of this phenomenon, in this research, a numerical model has been used for the numerical study of hydraulic jump, whose laboratory studies were carried out by Haji Ali Gol et al. (2021). The main goal is to understand better the hydraulic jump mechanism in the sudden expansion channel and to investigate the effect of the crossbeam system as a roughness for the control and stability of the hydraulic jump.

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 Flow3D software. To carry out the numerical simulation, the geometry of the laboratory model was drawn in the AutoCAD software and then transferred as Stl to the Flow3D software environment. 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 about 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 over 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, in addition to

sufficient accuracy, the analysis duration was also acceptable. 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 Haji Ali Gol's laboratory measurements (1401), 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 (in accordance with the laboratory observations) was drawn using the results of modeling with Flow3D software. The placement position of the crossbeam 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 compared to 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. In order to quantitatively check the length of the jump, the results of the jump length and roll length for the S-type asymmetric jump modeled in Froude numbers 7.4, 8.7, and 9.5 were analyzed based on the depth of tailwater (y_t). Increasing the Froude number increases the change process of both dimensionless parameters under investigation. The results of the modeling are consistent with the research results of Taghinia, Asghari Pari and Shafaei Bajestan (1400), Salami Asl et al. (2018), and Touzandeh Jani and Kashfipour (2013). So, with the flow increase through the spillway, the Froude number decreases, and the length of the jump and the roll increase.

Conclusions

In this research, the characteristics of hydraulic jump were investigated using different configurations of the crossbeam system with different percentages of reference tailwater. Investigating the three-dimensional velocity flow fields in the downstream channel of the crossbeam system as an energy dissipation structure in optimal configurations and stable variable conditions, the good ability of this structure in effective homogenization of flow in channels with sudden expansion, even in the conditions of downstream water level changes (h_s) showed. The dimensionless changes of jump length (L_j/yt) and roller length (L_r/yt) in comparison with different percentages of tailwater for using the beam roughness system in controlling the asymmetric jump created in the sudden expansion channel shows Basically, using this range of structures in optimal configurations reduces the jump length. The maximum percentage reduction in the S-type asymmetric hydraulic jump length using the simulated system was observed by 78.02% for configuration three and the stable condition of 0.9 h_s .

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgments

The authors express their utmost gratitude to the Khuzestan Water and Electricity Organization (KWPA), which provided financial and spiritual support to provide the conditions for conducting the research.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of ABCD (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

مقدمه

پرش هیدرولیکی در تعریف کلی، تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی که با افزایش ناگهانی سطح آزاد آب و افت انرژی قابل توجه همراه است (Hassanpour et al. 2017). هنگامی که جریان با سرعت زیاد با توده آب در حال حرکت با سرعت کم برخورد نماید، ابتدا جریان با سرعت زیاد در زیر توده آب حرکت کرده؛ سپس به سمت سطح آب پخش و گسترش می یابد. این عمل موجب تلاطم و پیدایش گرداب ها در داخل جریان و غلتاب ها در سطح آب می شود. غلتاب ها به طور پیوسته در سطح آزاد پرش تشکیل می شوند و در جهت عکس حرکت عقربه های ساعت حرکت می کنند (حاجی علی گل، ۱۴۰۱). در کانال ها، پرش هیدرولیکی در زیر دریچه های تنظیم کننده، در پای سرریزها و یا در محلی که کف یک کانال با شیب تند به طور ناگهانی مسطح شود، به شیب کندتر یا کانال افقی برخورد می کند، به وجود می آید. قدرت پرش به عدد فرود قبل از آن بستگی دارد. هر قدر عدد فرود بیشتر باشد، پرش قوی تر است (Hughes and Flack, 1984).

یکی از پارامترهای حساس در طراحی، طول پرش هیدرولیکی می باشد که در حالت کلی قابل محاسبه از طریق تحلیل های ریاضی نبوده و لازم است از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد (Izadjoo and Shafai-Bejestan, 2007). عموماً دو طول مختلف در پرش های هیدرولیکی مورد توجه قرار می گیرد: طول چرخش (L_r) که عبارت است از فاصله شروع پرش تا آخرین موج غلطان و دیگری طول پرش (L_j) که برابر است با فاصله شروع پرش تا نقطه ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان که در این صورت ارتفاع این نقطه تقریباً با ارتفاع پایاب برابر است.

با توجه به ماهیت جریان، می توان گفت نیروی مخصوص قبل و بعد از پرش هیدرولیکی ثابت باقی می ماند و اعماق y_1 و y_2 اعماق مزدوج متعلق به یک نیروی مخصوص ثابت می باشند. مقدار $(y_2 - y_1)$ ارتفاع پرش نامیده می شود (H_j). پس از تعیین اعماق مزدوج، مقدار افت انرژی در پرش (ΔE_L) و توان از دست رفته در طول پرش (P_j) با استفاده از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است (Chow 1959):

$$E_L = E_1 - E_2 = (y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (y_2 + \frac{V_2^2}{2g}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$P_j = \Delta E_L Q \gamma \quad \text{رابطه (۲)}$$

پرش هیدرولیکی در یک تقسیم بندی کلی به دو دسته آزاد و مستغرق تقسیم بندی می شوند. علاوه بر این، تقسیم بندی های دیگری برای پرش هیدرولیکی در نظر گرفته می شود که می توان به تقسیم بندی بر اساس عدد فرود، پرش روی بستر زبر، شیب بستر، استفاده از ضوابط کنترل کننده و منشوری یا غیر منشوری بودن کانال اشاره کرد. با توجه به هدف تحقیق، انواع پرش بر اساس عدد فرود، پرش در کانال غیر منشوری و پرش روی بستر زبر، مورد توجه قرار گرفته است.

پرش هیدرولیکی موجی، در محدوده اعداد فرود ۱ تا ۱/۷ رخ می دهد. افت بار در این نوع پرش ناچیز و محل مقاطع اولیه و نهایی پرش به طور دقیق، مشخص نیست و پرش به صورت امواج شکسته یا صاف انجام می گیرد. پرش هیدرولیکی ضعیف زمانی که عدد فرود اولیه بین ۱/۷ تا ۲/۵ باشد، در این حالت غلظاب های سطحی کوچکی در عدد فرود ۱/۷ ایجاد می شود و تدریجاً با افزایش و نزدیک شدن عدد فرود به ۲/۵ شدت آن ها افزایش می یابد. هرگاه $2/5 < Fr_1 < 4/5$ باشد، جریان بالادست به داخل پیشانی آشفته و به شکل یک جت نوسانی که باعث سطح موجی غیر منظم می گردد نفوذ می کند که پرش انتقالی یا نوسانی نامیده می شود (Jesudhas et al., 2020). چنانچه $4/5 < Fr_1 < 9$ ، در این حالت پرش دارای بهترین عملکرد است. پرش کاملاً پایدار بوده، افت انرژی قابل توجهی ایجاد شده و امواج سطحی نیز محدود می گردند. در مواقعی که مقدار $Fr_1 > 9$ گردد، جهش بسیار شدید و خشن بوجود آمده و افت انرژی زیادی نیز وجود خواهد داشت. جت ورودی که دارای سرعت بسیار زیادی می باشد قادر به باقی ماندن بر روی بستر نمی باشد که بنام پرش قوی یا متلاطم شناخته می شود (Chow, 1989).

کانال غیر منشوری به کانال هایی گفته می شود که سطح مقطع و شیب در طول آن ها تغییر کند. انواع واگرایی در مقطع به دو صورت واگرایی تدریجی و ناگهانی امکان پذیر می باشد (Keshavarzi and Hamidifar, 2018). واگرایی ناگهانی می تواند به

دو صورت متقارن و نامتقارن در مقطع تشکیل شود. هندسه واگرایی در کانال به صورت $B=b_1/b_2$ بیان می شود. پارامتر B برای واگرایی ناگهانی و پارامتر Φ برای واگرایی تدریجی به کار گرفته می شود (هوشیاری پور و همکاران، ۱۳۹۸). طبق تحقیقات هاگر (Hager, 1992) حوضچه های واگرا به ویژه حوضچه های واگرایی ناگهانی استهلاک انرژی به مراتب بیشتری نسبت به حوضچه های منشوری دارند. هنگامی که یک جریان فوق بحرانی بطور ناگهانی از یک مقطع منشوری به یک مقطع عریض تر با جریان زیربحرانی وارد شود، به طوری که عرض کانال پایین دست در مقایسه با عرض جریان فوق بحرانی بیشتر باشد، سبب می شود تا پرش هیدرولیکی به صورت غیرمنشوری رخ دهد (Kumar et al. 2018). از مهمترین خصوصیات این روش، نیاز به عمق پایاب کمتر است. همچنین در این نوع پرش با تشکیل گرداب های جانبی، بخشی از انرژی جنبشی مستهلک می شود. پرش گسسته یا پرش نوع S، که در آن پنجه، بین محل تغییر مقطع واگرا و نقطه ای که امواج عرضی دیواره های کانال پایین دست را قطع می کند قرار دارد. این نوع پرش، بیشتر شبیه یک جت بوده و نامتقارن است (Kordian Abustan, 2012). جهت تمایل آن به یک سمت دیواره کانال کاملاً تصادفی و ممکن است به سمت چپ و یا راست متمایل شود. این پرش نامتقارن، می تواند نامتقارن پایدار و یا نامتقارن نوسانی باشد. افزایش عمق پایاب باعث جابجایی پنجه به داخل مقطع واگرا شده و پرش را تبدیل به نوع T خواهد نمود. هربراند (Herbrand, 1973) پرش نوع S را در انبساط متقارن مورد بررسی قرار داد و با به کار بردن معادله مومنتم با فرضیات ساده کننده به یک رابطه ساده برای پیش بینی نسبت اعماق مزدوج دست یافت. برمن و هاگر (Bremen and Hager, 1993, 1994) پرش نوع T را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه ایشان، معادلات اولیه مختلفی را برای نسبت اعماق مزدوج معرفی نمود و طول پرش L_B و افت انرژی توسط نتایج آزمایشات ایشان محاسبه گردید.

به دلیل مقرون به صرفه نبودن تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر صاف با تمام طول خود در حوضچه های آرامش، در عمل برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه، تمهیداتی از قبیل استفاده از بلوک در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه آرامش در نظر گرفته می شود. کاهش طول پرش و ابعاد حوضچه، هدف اصلی این تمهیدات می باشد (Chow, 1959). با توجه به این که کاربرد پرش هیدرولیکی برای جلوگیری از فرسایش کانال پایین دست و استهلاک انرژی اضافی جریان می باشد، بنابراین مکانی که پرش در آن به وقوع می پیوندد باید در برابر کاویتاسیون و فرسایش در سرعت های بالای جریان مقاوم باشد. برای جلوگیری از کاویتاسیون، باید کف بستر صاف باشد یا عناصر کنترل پرش هیدرولیکی طوری قرار گیرند که سطح فوقانی آن ها، 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 می شود (Ead and Rajaratnam, 2002). زبری بستر می تواند به شکل زبری های ممتد به صورت موج دار سینوسی، مثلثی، مستطیلی و دوزنقه ای و یا زبری های غیر ممتد با مقطع دایره ای، لوزی، مستطیلی، شش ضلعی و حتی شش چین باشد. محمد علی (Mohamed Ali, 1991) با مطالعه پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با زبری مکعبی به ابعاد $1/6$ سانتی متر که ۱۰ درصد از سطح حوضچه را اشغال می کردند، نشان داد که طول پرش روی بستر زبر، نسبت به طول پرش کلاسیک به طور متوسط $47/4$ درصد کاهش می یابد. اید و راجاراتنام (Ead and Rajaratnam, 2002) پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار برای عدد فرود ۴ تا ۱۰ با زبری نسبی $0/25$ ، $0/43$ و $0/5$ را بررسی کردند. البان و سان (Ellayn and Sun, 2012) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با المان های گوه ای شکل با زبری نسبی $0/22$ تا $1/4$ در محدوده عدد فرود $3/06$ تا $10/95$ را بررسی کردند. نتایج حاصل از بستر زبر ایجاد شده در مقایسه با بستر صاف، کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به ترتیب ۳۰ تا 53 و $16/5$ تا ۳۰ درصد نشان داد. اسکورزینی و همکاران (Scorzini et al., 2016) به بررسی آزمایشگاهی کنترل پرش نامتقارن نوع S و T با استفاده از سیستم بیم های متقاطع I شکل بعنوان مستهلک کننده انرژی در کانال های با واگرایی ناگهانی پرداختند. نتایج نشان داد که بکارگیری سیستم بیم های متقاطع، بهبود قابل توجهی در الگوهای جریان در کانال پایاب ایجاد کرد. مهم ترین پارامترهای موثر بر عملکرد آن، جهت گیری سیستم و فاصله تیرک ها تعیین شد. هندسه مشخص شده با فاصله تیرک $0/4$ متر، ارتفاع تیرک $0/2$ متر با زاویه 15 درجه شیب پایین دست، بیشترین حساسیت به ارتفاع پایاب را در میان چهار هندسه مؤثر آزمایش شده داشت و کاهش عملکرد تدریجی بیشتری نشان داد. حاجی علی گل (۱۴۰۱) به بررسی آزمایشگاهی الگوهای جریان در کانال های واگرایی ناگهانی با بکارگیری تیرک های متقاطع برای کنترل اثر پرش نامتقارن نوع S پرداختند. در این مطالعه، آزمایش های بیشتری بر روی

سیستم تیرک متقاطع پیشنهاد شده توسط اسکورزینی و همکاران (Scorzini et al. 2016) انجام شد و یکنواختی جریان و میانگین سرعت طولی نزدیک بستر کانال، با استفاده از دو عامل β_b و β_{mb}^2 که از جنس ضرایب مومنتم و انرژی بودند (رابطه (۳)) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

$$\beta_b = \frac{\int_0^B v_b(x) \cdot |v_b(x)| dx}{B v_{mb}^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن:

B = عرض کانال، $v(x)$ پروفیل‌های سرعت در مقطع اندازه‌گیری و v_{mb} مقدار میانگین $v(x)$ می‌باشد. ضرایب تصحیح انرژی جنبشی (α) و مومنتوم (β) در کل سطح مقطع، به عنوان دو پارامتر کلی ویژگی جریان از نظر یکنواختی، با استفاده از سرعت‌های سه بعدی اندازه‌گیری شده و برای آزمایشات با ترکیب بندی بهینه بر اساس تعداد بیم‌ها، اندازه و زاویه قرارگیری آنها و فاصله تا سرریز اوجی ایجاد کننده پرش واگرای ناگهانی مورد بررسی قرار گرفت. شارونی زاده و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به بررسی آزمایشگاهی سیستم تزریق جت آب برای پایداری پرش نامتقارن نوع S پرداختند. نتایج نشان داد در پرش نامتقارن نوع S، مقادیر β_b به طور قابل توجهی بیشتر از ۱ در تمام مقاطع اندازه‌گیری شده بودند. این مقادیر به حداکثر مقادیر حدود ۳، نیز می‌رسیدند. همچنین مقادیر α_b نیز بین ۳ تا ۱۰ متغیر بود. درحالی‌که در همه ترکیب‌بندی‌های مختلف سیستم تزریق جت آب، β_b به کمتر از ۱/۴۶ کاهش پیدا کرده است.

در این تحقیق استفاده از مدل Flow3d برای مطالعه عددی پرش هیدرولیکی که مطالعات آزمایشگاهی آن توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱) انجام گردید، استفاده شده است. هدف اصلی شناخت بهتر مکانیزم پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی و بررسی اثر سیستم بیم‌های متقاطع به عنوان زبری برای کنترل و پایداری پرش هیدرولیکی با بکارگیری مدل Flow3d سه بعدی می‌باشد که شامل بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی نظیر طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز، میزان استهلاک انرژی، توزیع سرعت جریان و نیز پروفیل سطح آب در کانال با واگرای ناگهانی، بررسی تأثیر ترکیب‌بندی‌های مختلف بیم‌های متقاطع و تأثیر دبی‌های مختلف جریان ورودی و اعداد فرود مختلف در به کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع با استفاده از مدل کالیبره شده می‌باشد.

در تحقیقات حاضر (Parsamehr et al., 2022) دو ارتفاع مختلف از عناصر زبری ناپیوسته را بر روی بسترافقی و دو شیب معکوس ۱/۵- و ۲/۵- درصد در حوضچه آرامش در اعداد فرود از ۴/۹ تا ۱۲/۴ مورد آزمایش قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که میانگین ضریب برشی بستر در شیب معکوس ۲/۵- درصد با عناصر زبری نسبی $L_j/y_1 = 1.33$ برابر در یک بستر صاف است. همچنین تنش برشی بستر ناشی از زبری بستر باعث کاهش نسبت عمق مزدوج و در نتیجه افزایش اتلاف انرژی با ایجاد گرداب‌های بزرگ و تلاطم بیشتر می‌شود. همچنین دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2021) تأثیر بسترهای ماسه‌ای بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های یادگیری ماشین جدید از جمله شبکه عصبی (EANN)، مدل Hammerstein (Weiner (HWM)، شبکه‌های عصبی المان ENN و شبکه‌های عصبی (ELNN) برای تخمین نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق اولیه آب اتخاذ شدند. ایشان نشان دادند که مدل Elman NN در تخمین نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق اولیه (L_j/y_1) نسبت به مدل‌های دیگر عملکرد بهتری داشت، در حالی که مدل HWM عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین L_j/y_1 داشت. در تحقیق دیگری که توسط دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2019) با عملکرد ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی اتلاف انرژی نسبی در کانال غیر منشوری و بستر زبر با عناصر دوزنقه‌ای بر روی ۱۳۶ سری از داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت، در دو سناریوی مختلف با ارتفاع عناصر زبری ۱/۵ و ۳ سانتی متر وارد شبکه ماشین بردار پشتیبان بدون بعد شد. نتایج نشان داد که در هر دو ارتفاع عناصر زبر، اتلاف انرژی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین نتایج ماشین بردار پشتیبان نشان داد که ارتفاع عنصر زبری در سناریوی اول ۱/۵ سانتی متر است، در ترکیب بندی ارائه شده توسط ایشان ترکیب شماره ۶ با

¹ Energy correction factor

² Boussinesq

$R^2 = 0.990$ و $RMSE = 0.0129$ برای حالت شاهد و $R^2 = 0.993$ و $RMSE = 0.032$ برای حالت تست و ارتفاع عنصر زبری ۳ در سناریوی دوم، ترکیب شماره ۶ با $R^2 = 0.989$ و $RMSE = 0.0112$ برای حالت آموزش، $R^2 = 0.994$ و $RMSE = 0.0224$ برای حالت تست به عنوان بهترین مدل ها انتخاب شدند.

تحقیق دیگری که توسط ترینخ و همکاران (Trinh et al., 2024) بر روی صفحه‌هایی به صورت افقی در لبه‌های عمودی با بستر صاف و زیر پایین دست برای بررسی اتلاف انرژی انجام گرفت. آزمایش‌های انجام شده بر روی دو تخلخل صفحه، عمق بحرانی نسبی $0.39 - 0.13$ و اندازه متوسط $1/9$ سانتی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که برای عمق بحرانی نسبی بیش از 0.3 در یک دراپ عمودی مجهز به صفحه ای با بستر زبر، طول افت نسبت به بستر صاف افزایش می یابد. درمقایسه با استفاده از حوضه آرامش نوع I، یک دراپ عمودی مجهز به صفحه ای با بستر صاف و ناهموار پایین دست، طول افت را تقریباً ۵۰ درصد کاهش می دهد.

مواد و روش‌ها

هدف این تحقیق بررسی عددی کنترل پرش نامتقارن نوع S با به کارگیری سیستم بیم های متقاطع به عنوان نوعی از زبری با پراکنش های مشخص در قالب تعداد، ارتفاع، فاصله مختلف بیم ها (بعنوان متغیر) در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با استفاده از نرم افزار Flow 3D می باشد. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش حاضر و مدل سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به کارگیری سیستم بیم های متقاطع، مجموعه ای از آزمایش‌ها 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 0.87 متر، دارای جنس کف فلز و دیواره‌ها از جنس شیشه و تجهیزات مربوط به آن، سیستم گردش آب (پمپ، لوله ها و مخازن)، سرریز اوجی، واگرایی ناگهانی با نسبت برابر با 0.67 و سازه ای بیم های متقاطع در ابعاد هندسی مختلف بعنوان زبری بوده است.

براساس تحلیل های ارائه شده در مطالعه حاجی علی گل و همکاران (Hajialigol et al., 2021)، از مجموع آزمایشات ترکیب بندی های هندسی و هیدرولیکی انجام شده روی شرایط یکنواختی جریان و میانگین سرعت بستر بر اساس کاهش پارامتر β_b (ضریب تصحیح مومنتوم اصلاح شده در نزدیکی بستر) با توجه به اثربخشی مشاهده شده سیستم بیم‌ها، ۳ هندسه بهینه به شرح جدول ۱ انتخاب شد:

جدول ۱. مشخصات هندسه بهینه انتخاب شده بر اساس کاهش پارامتر β_b (بر اساس تحقیق حاجی علی گل و همکاران، ۱۴۰۱)

پارامترها	ترکیب بندی
$P=0.8 \text{ m}$, $N=5$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.05 \text{ m}$	ترکیب بندی ۱
$P=0.6 \text{ m}$, $N=3$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.07 \text{ m}$	ترکیب بندی ۲
$P=0.8 \text{ m}$, $N=3$, $\theta=15^\circ$, $h_b=0.05 \text{ m}$	ترکیب بندی ۳

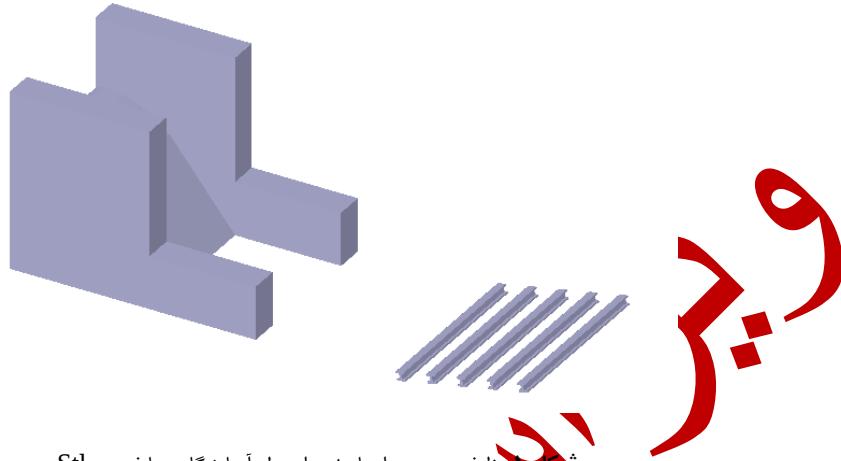
" در این ترکیب بندی‌ها پارامترهای P : فاصله سیستم بیم‌ها از مقطع واگرا، N : تعداد بیم‌ها، θ : زاویه سیستم بیم‌ها با کف فلوم و h_b : ضخامت بیم‌ها می‌باشند "

مشخصات مدل شبیه سازی

در این تحقیق، جهت انجام شبیه سازی عددی، از نرم افزار Flow3D استفاده گردید. باتوجه به ابعاد کانال و سرعت جریان و همچنین بررسی اطلاعات تجربی شبیه سازی های قبلی و مطالعات عددی محققین دیگر در رابطه با موضوع مورد مطالعه این تحقیق، در ابتدا مدت زمان شبیه سازی 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 شبیه سازی پایدار شده و پارامترهای مورد بررسی جریان با گذشت زمان تغییرات قابل توجهی ندارند. بنابراین مدت زمان شبیه سازی ها به ۶۰ ثانیه کاهش یافت و نتایج در این زمان ثبت و بررسی شد. همچنین واحدهای در نظر گرفته شده برای شبیه سازی: SI و برای دما، درجه سلسیوس تعریف شد. با توجه به شرایط مشاهداتی آزمایشگاهی، ماهیت پرش نامتقارن نوع S و وجود آشفتگی به عنوان عامل اصلی اغتشاش جریان، در این تحقیق زبانه های مربوط به Gravity and Non-inertial

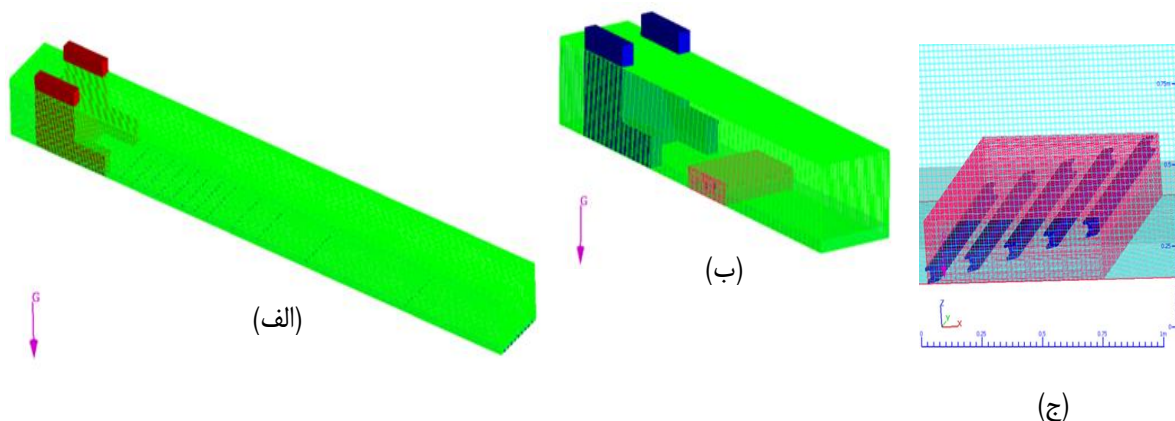
Reference Frame و Viscosity and Turbulence برای شبیه‌سازی‌ها فعال گردید. شتاب گرانش برابر با 9.81 m/s^2 در خلاف جهت محور z و در راستای عمق کانال در نظر گرفته شد.

برای انجام شبیه‌سازی عددی، هندسه مدل آزمایشگاهی در محیط نرم افزار اتوکد ترسیم و سپس بعنوان Stl به محیط نرم‌افزار Flow3D، منتقل گردید. نمایی از هندسه ایجاد شده شامل سرریز اوجی و مقطع واگرای ناگهانی به همراه سیستم بیم‌های متقاطع با خروجی فایل Stl در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. ظرفیت هندسه ایجاد شده از مدل آزمایشگاهی با فرمت Stl

سه حالت مختلف مش‌بندی یعنی دارای تعداد سلول کم (مش درشت)، متوسط (مش متوسط) و زیاد (مش ریز) در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت. در هر یک از این حالت‌ها، مش‌بندی یکنواخت و ابعاد سلول‌ها در یک راستا ثابت لحاظ شد. اگرچه درشت بودن مش، سرعت تحلیل را زیاد می‌کند ولی ممکن است دقت مناسبی نداشته باشد. ریزتر کردن مش‌ها (افزایش تعداد سلول‌ها) در اغلب مواقع دقت را افزایش می‌دهد اما مدت زمان شبیه‌سازی را زیاد می‌کند. بنابراین باید با سعی و خطا، مش‌بندی بهینه‌ای را انتخاب کرد که علاوه بر داشتن دقت کافی، مدت زمان 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 مدت زمان تحلیل، شرایط اولیه و مرزی و مدل آشفتگی یکسان در نظر گرفته شد و تفاوت فقط در تعداد سلول‌های مش بود. در شبیه‌سازی‌های این تحقیق، مدل آشفتگی RNG به کار گرفته شد. در نهایت برای تشخیص میزان دقت هر یک از شبیه‌سازی‌ها و انتخاب مش‌بندی بهینه، شاخص‌های ضریب انطباق، میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها که مورد تحلیل قرار گرفت. نمایی از مش‌بندی بهینه در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های شاهد پرش نامتقارن نوع S در شکل ۲-الف آورده شده است. شکل ۲-ب نیز مش‌بندی تو در تو انتخاب شده برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع و شکل ۲-ج مش‌بندی سیستم بیم‌های متقاطع را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. الف- مش بندی بهینه برای شبیه سازی عددی آزمایش های شاهد، ب- مش بندی تو در تو برای شبیه سازی آزمایش ها با به کارگیری سیستم بیم های متقاطع، ج- مش بندی سیستم بیم های متقاطع

شرایط مرزی و اولیه در نظر گرفته شده در شبیه سازی های این تحقیق بانرم افزار Flow-3D شامل: شرط مرزی کل کانال در ورودی (x_{min}): فشار بر اساس عمق سیال ورودی، شرط مرزی کل کانال در خروجی (x_{max}): فشار بر اساس عمق سیال خروجی، شرط مرزی کف کانال (z_{min}) و جداره های کانال (y_{min} , y_{max}): دیوار، شرط مرزی سطح جریان (z_{max}): تقارن، شرط مرزی سیستم بیم های متقاطع در تمام وجوه مش: تقارن، شرط اولیه در ابتدای کانال و قبل از سرریز اوجی برای هر شبیه سازی: عمق آب پشت سرریز در شرایط آزمایشگاهی و شرط اولیه بعد از سرریز: عمق آب در پایاب کانال و متناظر با هر آزمایش می باشند.

نتایج و بحث

برای بررسی تأثیرپذیری پنجه پرش نوع S نسبت به تغییرات عمق آب پایین دست، مطابق آزمایشات انجام شده توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱)، مراحل انجام آزمایشات شامل تعیین دبی بر مبنای احداث سرریز لبه تیز مستطیلی و کالیبره کردن ارتفاع آب بالادست سرریز اوجی براساس روش حجمی با اندازه گیری حجم آب درون فلوم و تخلیه آن با اندازه گیری زمان تخلیه و ثبت ارتفاع H_e بالادست سرریز اوجی جهت تعیین رابطه دبی-اشار و محاسبه اعداد فرود پایین دست سرریز بر اساس y_1 (عمق اولیه پرش) تشکیل شده قبل از پرش هیدرولیکی بوده است. بر این اساس با استفاده از معادله انرژی بالادست و پایین دست سرریز اوجی، عمق y_1 اندازه گیری شده با رابطه انرژی بررسی و صحت مقادیر اندازه گیری کنترل گردید. در این مرحله با رساندن ارتفاع بالای سرریز اوجی به میزان مورد نظر، دبی ورودی کنترل و پس از جریان از روی سرریز و خروج از مقطع واگرای جریان به صورت آزاد تخلیه می گردید. با تنظیم دریچه گیربکسی انتهایی عمق پایاب طوری تنظیم گردید که برای هر دبی، با رساندن پنجه پرش به لبه مقطع انبساط، پرش نوع S و با افزایش عمق پایاب و انتقال پنجه پرش به درون مقطع واگرا پرش نوع T تشکیل گردید. مراحل برداشت داده های آزمایشگاهی شامل برداشت ارتفاع سطح آب بوسیله دستگاه عمق سنج در ۱۴ مقطع شامل ۰/۲۵ متر بعد از مقطع انبساط تا ۱۰ متری در انتهای فلوم که بدلیل امکان تأثیر دریچه برداشت ها تا ۱ متری نزدیک به دریچه ادامه یافت. در این ۱۴ مقطع پس از برداشت عمق آب، اقدام به برداشت سرعت های کف بوسیله دستگاه میکرومولینه در ۱۴ مقطع متناظر برداشت عمق گردیده است. برای پرش های نوع S و T در کانال واگرای ناگهانی و همچنین تطبیق آزمایشات 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 اندازه گیری شده x_1 ، x ، Fr_1 ، L_r و همچنین مقادیر η و η بعنوان پارامترهای حساسیت یا تأثیرپذیری پنجه و راندمان پرش در مقطع واگرای ناگهانی محاسبه گردید.

ورود داده ها و صحت سنجی

برای صحت سنجی نتایج مدلسازی عددی، ابتدا نتایج نرم افزار Flow-3D با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاجی علی گل (۱۴۰۱) برای تعیین مش بندی و مدل آشفتگی مناسب در شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S و استفاده از سیستم بیم های متقاطع بعنوان زبری در ترکیب بندی های بهینه بررسی گردید. به این منظور ابتدا مطابق با شرایط آزمایشگاهی، یک پرش نامتقارن نوع S در کانال با طول ۱۰ متر از محل پای سرریز اوجی تا انتهای فلوم برای آزمایشات مرجع و همچنین پرش با بکارگیری

سیستم بیم های متقاطع بعنوان زبری به طول ۲ متر بعد از سیستم و عرض ۱ متر، توسط نرم افزار بصورت عددی شبیه سازی شد و نتایج پروفیل طولی و توزیع سرعت عمق جریان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. برای تشخیص میزان دقت هریک از شبیه سازی ها از سه شاخص، ضریب انطباق (R^2) میانگین خطاها (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)، استفاده شد. پرش هیدرولیکی نامتقارن مانند عمده جریان های مورد بررسی در مطالعات هیدرولیک جریان، آشفته است. یکی از شاخص های تشخیص آشفته گی این جریان، مقدار عدد رینولدز می باشد. عدد رینولدز پرش مورد بررسی در آزمایشات مرجع در پای سرریز و شروع جریان پرش از مقطع انبساط حدود $10^5 \times 0.94$ ، $10^5 \times 0.74$ ، $10^5 \times 0.62$ بترتیب در اعداد فرود $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$ می باشند که قطعاً جریان آشفته می باشد. در نرم افزار Flow-3D ابتدا باید تعیین شود که جریان آرام است یا آشفته. با انتخاب حالت آشفته باید یکی از مدل های آشفته گی نرم افزار انتخاب شده و شبیه سازی با آن انجام شود. پس از تعیین بهترین مش بندی باید بهترین مدل آشفته گی انتخاب شود. بدین ترتیب شبیه سازی مدل های آزمایشات مرجع برای اعداد فرود مورد بررسی و یک ترکیب بندی بهینه با چهار مدل آشفته گی اصلی برای پرش نامتقارن آزمایش شده توسط نرم افزار Flow-3D، با مش بهینه و شرایط اولیه و مرزی معرفی شده شبیه سازی گردید، سپس شاخص ضریب انطباق برای هریک از شبیه سازی ها مطابق روش معرفی شده مدل آشفته گی که شبیه سازی آن دارای بیشترین ضریب انطباق باشد به عنوان بهترین مدل آشفته گی انتخاب و شبیه سازی های اصلی این پژوهش با آن مدل آشفته گی انجام گردید. صحت سنجی مدل در آزمایشات این تحقیق، مش بندی در شرایط آزمایشات مرجع در فرود $7/4$ انجام گردید که بررسی ها برای ۳ اندازه سلول برای هر کدام از شرایط گفته شده آزمایشات انجام شده است. نتایج صحت سنجی در تعیین مش بندی ایده آل بر اساس موارد اشاره شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مقایسه مش بندی های گوناگون در تعیین مش بندی ایده آل مدل عددی

شماره مش	تعداد سلول ها	مدت زمان شبیه سازی (ساعت، دقیقه، ثانیه)	زمان پایداری جریان (ثانیه)	زمان ثبت نتایج (ثانیه)	R^2	MAE	RMSE
۱	۱۳۵۵۲۰۰	۲۹Sec ۲۳hr ۰۵min	۴۲	۶۰	۰/۹۳۴	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲
۲	۹۹۰۰۰۰	۷sec ۴۲min ۲۲hr	۳۴	۶۰	۰/۹۳۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹
۳	۷۲۹۰۰۰	۱۹Sec ۰۲min ۱۸hr	۲۵	۶۰	۰/۸۹۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۶

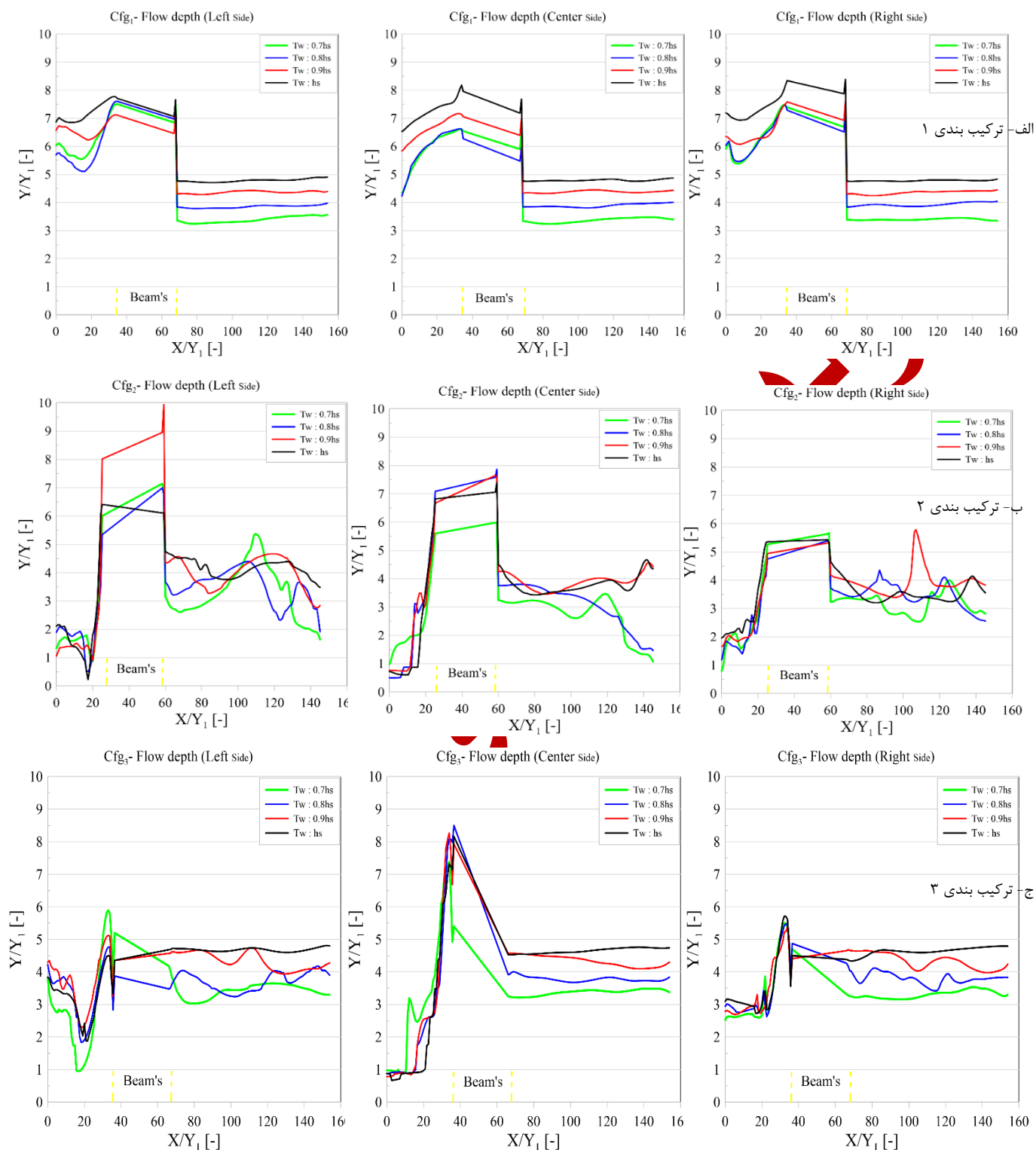
از آنجا که ریزتر کردن سلول ها نسبت به مش بندی ۲، تأثیر چندانی در افزایش دقت شبیه سازی نداشته و فقط مدت زمان تحلیل را به شدت افزایش می دهد و مش ۲ مناسب تر از مش ۱ و ۳ می باشد. به همین دلیل مش ۲ با ۹۹۰۰۰۰ سلول شامل ۴۹۵ سلول در راستای طول، ۵۰ سلول در راستای عرض و ۴۰ سلول در راستای عمق کانال به عنوان مش بهینه انتخاب شده و مدل آشفته گی ایده آل با آن تعیین گردید.

تحلیل نتایج پروفیل سطح آب

با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدلسازی عددی مطابق آنچه برای استفاده از مدل آشفته گی RNG بیان گردید، تحلیل پروفیل سطح آب با استفاده از بررسی عمق جریان در مقاطع عرضی و طولی جریان در ترکیب بندی های بهینه انجام گردید. مقاطع عرضی بر اساس برداشتهای آزمایشگاهی حاجی علی گل (۱۴۰۱)، برای عرض ۱ متر کانال و به فواصل هر ۰/۱ متر در نظر گرفته شد که برای هر سه ترکیب بندی بهینه آزمایشات و درصدهای عمق پایاب انجام گردید. با بکارگیری بیم های متقاطع، پروفیل طولی عمق جریان از مقطع بعد از واگرایی ناگهانی تا مقطع ۲ متری بعد از سازه بیم، با استفاده از نتایج حاصل از مدلسازی با نرم افزار Flow3D ترسیم گردید. نتایج مدلسازی بصورت بی بعد شده با عمق اولیه پای پنجه پرش در مقطع واگرایی ناگهانی (X/Y_1 و Y/Y_1) در شکل (۳) ارائه شده است. همچنین موقعیت بیم های کارگذاری شده در کانال برای سه ترکیب بندی، روی شکل (۳) نشان داده شده است. موقعیت قرارگیری سیستم بیم های متقاطع برای ترکیب بندی های C_1 و C_3 با $P=80$ سانتی متر، بین $34/8 \sim 67/4$ و X/Y_1 و برای ترکیب بندی C_2 با $P=60$ سانتی متر در $26/1 \sim 58/7$ و X/Y_1 می باشد.

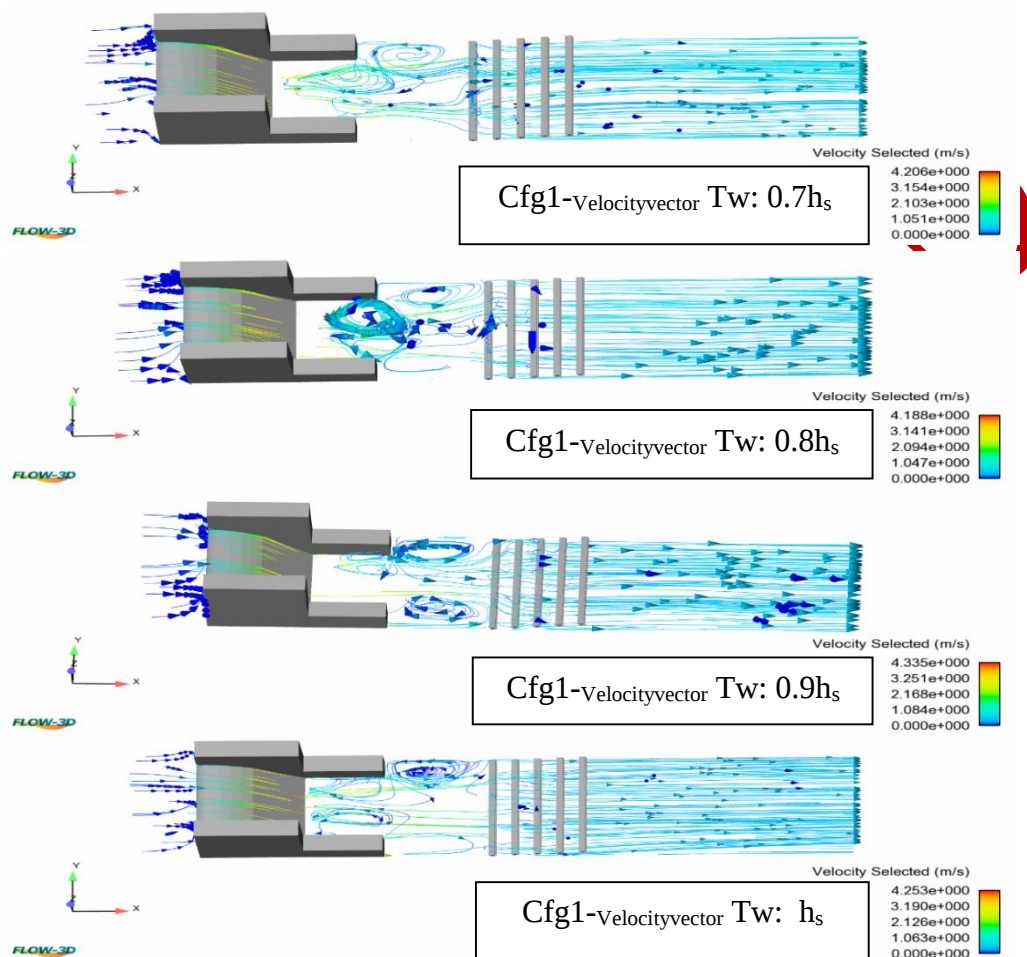
مطابق شکل ۳-الف ترکیب بندی ۱ نشان از تغییر عمق کم و یکنواختی بیشتر جریان نسبت به C_2 و C_3 دارد. این کاهش عمق به دلیل حرکت گردابه ها در فضای بین بیم ها با مقدار بیشتر و تغییرات انرژی بیشتر و در نتیجه استهلاک بالاتر و خروج پس از آن با جریان یکنواخت تر می باشد. نکته دیگر در بررسی شرایط طولی عمق جریان ترکیب بندی ۱ نسبت به بهینه های ۲ و ۳ این است که شرایط عمقی جریان پس از خروج از سیستم بیم های متقاطع در تمام عرض کانال (کرانه چپ، مرکز کانال و کرانه راست) یکسان می باشد که این امر نشان دهنده اثر بالای سیستم در کنترل شرایط آشفته جریان نامتقارن پرش S بوده که بر اساس مشاهده و مقایسه شرایط جریان در آزمایشات مرجع تا انتهای کانال ادامه داشته است. همچنین شرایط ترکیب بندی C_1 نشان می دهد که در گذار از درصدهای مختلف عمق پایاب نسبت به شرایط مرجع (h_s) تغییرات بصورت خطی و با درصد نسبت حدود $10/36$ از h_s تا $0/7 h_s$ می باشد. بررسی عمق آب در عبور از روی بیم ها در شکل ۳ نشان می دهد که ترکیب بندی ۱ مقدار افزایش عمق جریان آشفته تقریباً یکنواختی را در کناره ها و مرکز سیستم دارد که حداکثر مقدار آن $Y/Y_1 = 8/45$ در کناره سمت راست جریان می باشد. در ترکیب بندی ۲ روند افزایش عمق از سمت کرانه چپ به راست، کاهش می یابد و حداکثر مقدار آن در سمت چپ و شرایط پایاب h_s $0/9$ به میزان $Y/Y_1 = 9/92$ می باشد. این مقدار در ترکیب بندی ۳ در قسمت مرکز تمرکز داشته و مطابق با شکل ۳-ج در مرکز، مقدار حداکثرهای اعماق پایاب مختلف تقریباً یکسان بوده و در حداکثر مقدار $Y/Y_1 = 8/52$ تمرکز دارند.

یافته‌های آزمایشی

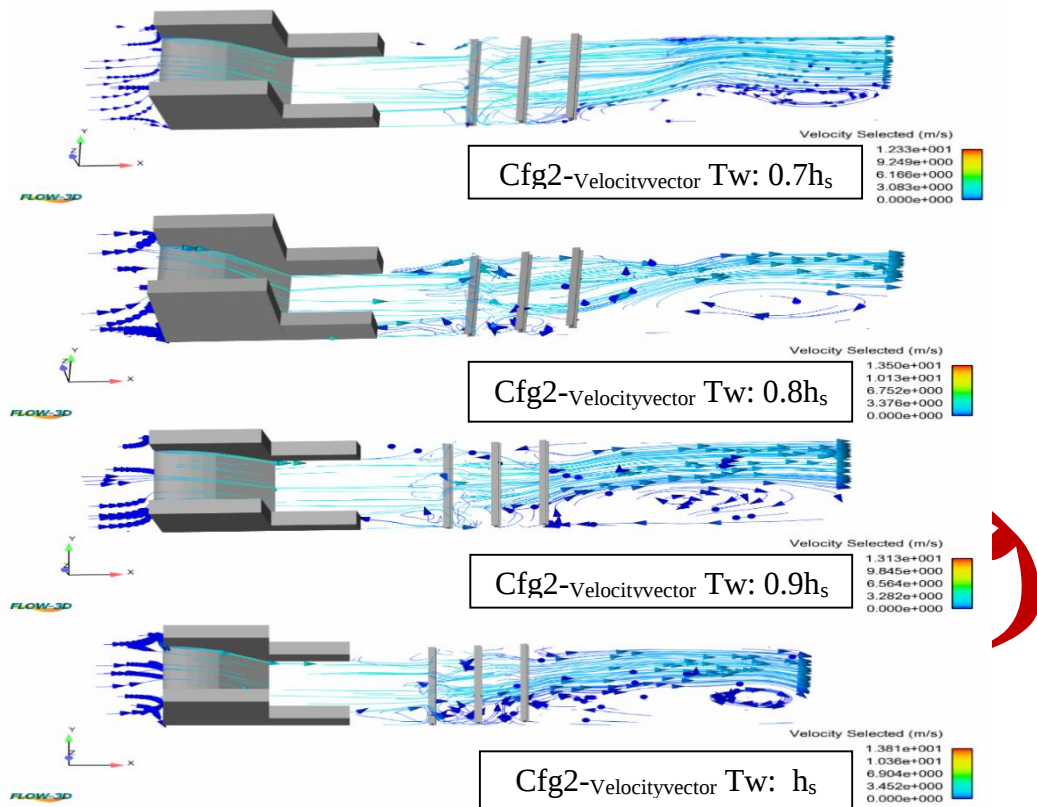


شکل ۳. پروفیل طولی عمق جریان از ابتدای واگرایی ناگهانی تا مقطع ۲ متری بعد از سازه در کرانه چپ، مرکز کانال و کرانه راست برای ترکیب بندی C₁~C₃

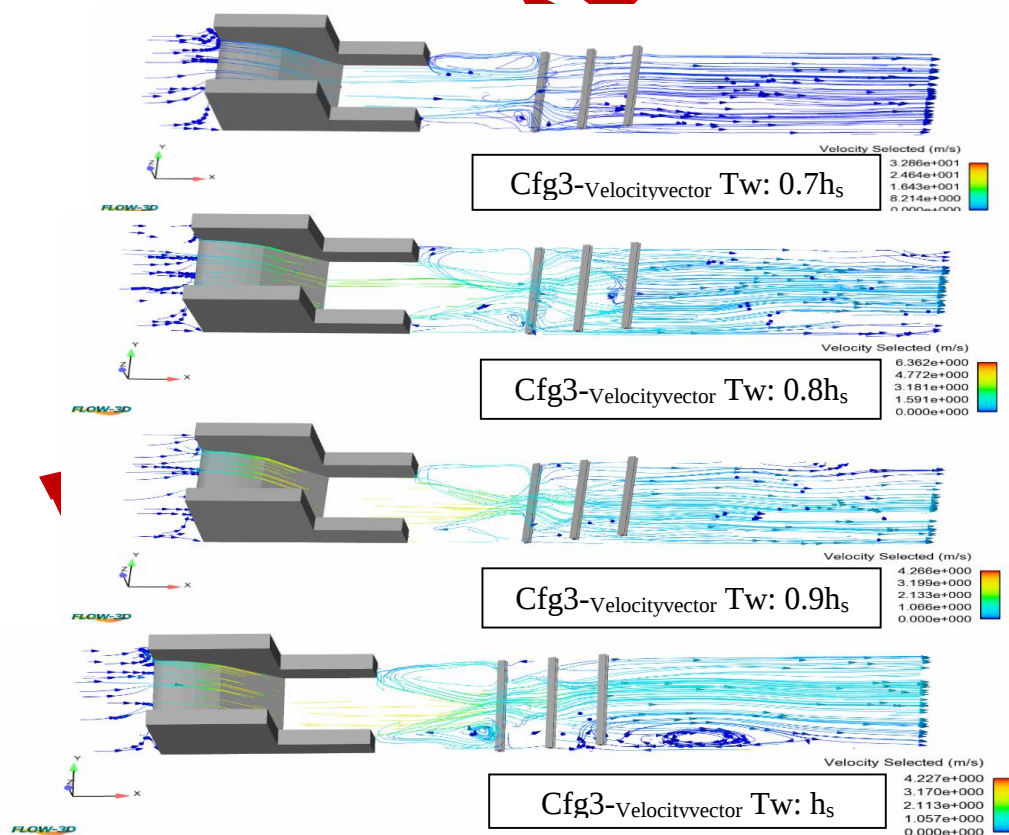
بر اساس آنچه در خصوص پروفیل‌های سطح آب با کارگزاری بیم‌های متقاطع گفته شد، در شرایط کارگذاری بیم‌های متقاطع در ترکیب‌بندی‌های C_1 ، C_2 و C_3 ، سرعت متوسط جریان درون کانال، کل بار آبی، مجموع فشارهای استاتیک و دینامیک در عبور از روی سرریز اوجی و بیم‌ها تا طول ۲ متری پس از آخرین بیم (انتهای سیستم بیم متقاطع در هر ترکیب‌بندی) در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج مورد بررسی قرار گرفته است. در این شکل‌ها برای تشریح چگونگی جریان در اثر تغییرات عمق احتمالی پایاب، درصدهای مختلف عمق پایاب $0/7h_s$ ، $0/8h_s$ ، $0/9h_s$ و عمق پایاب اصلی در آزمایشات مرجع (h_s) ترسیم گردید.



شکل ۴. الف- خط جریان بر اساس سرعت در ترکیب بندی ۱ با درصدهای مختلف عمق پایاب



شکل ۴. ب- خط جریان بر اساس سرعت در ترکیب بندی ۲ با درصدهای مختلف عمق پایاب

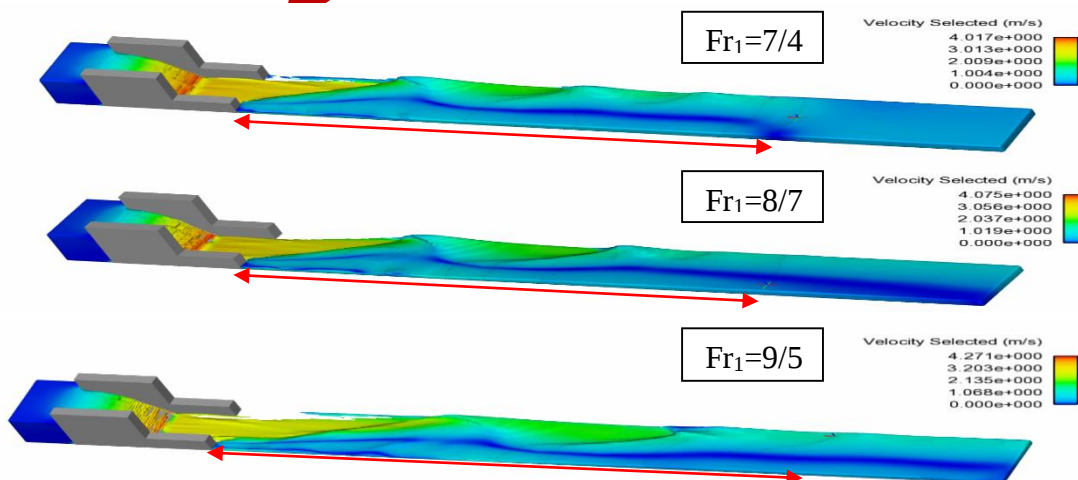


شکل ۴. ج- خط جریان بر اساس سرعت در ترکیب بندی ۳ با درصدهای مختلف عمق پایاب

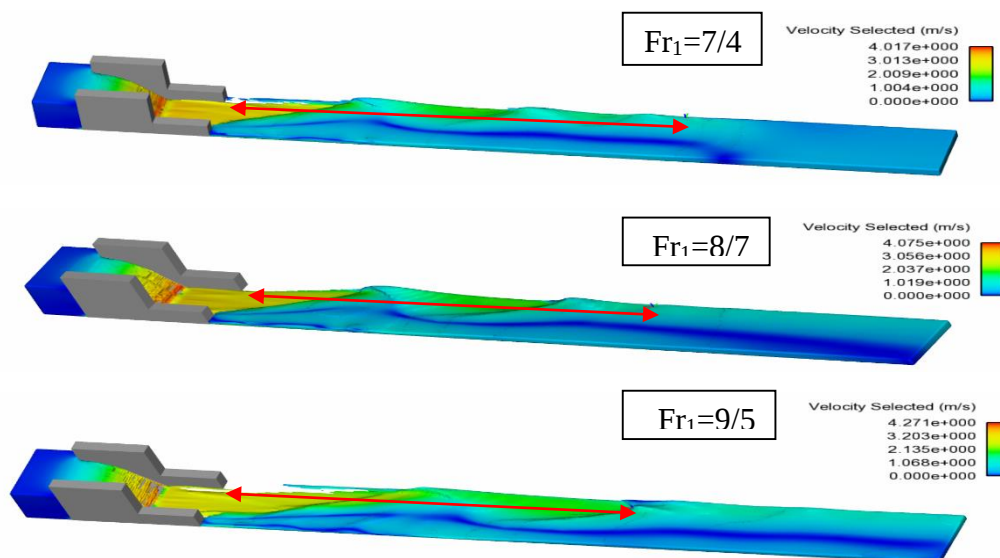
بر اساس خروجی های سرعت در ترکیب بندی ۱ و عمق های پایاب 0.7 hs تا hs با کارگذاری بیم های متقاطع به تعداد $n=5$ می توان مشاهده نمود که در شرایط hs (عمق پایاب واقعی) خطوط جریان پس از اثر زبری (بیم ها) به هم نزدیکتر و مطابق شرایط جریان پس از سازه ها با تشکیل گردابه ها با طول موج کوچکتر در بین پای سرریز تا نهایتاً بیم سوم کنترل آشفتگی صورت می گیرد. هرچه میزان عمق پایاب تا 0.7 hs کاهش می یابد خطوط جریان پس از خروجی از سیستم سازه ها، از هم بازتر شده و گردابه ها در فضای بین پای سرریز اوجی تا اولین بیم بزرگتر می شوند که در صورت چنین شرایطی به تقویت کف حوضچه آرامش بیشتری نیاز است. اما سرعت جریان پس از عبور از سازه در شرایط 0.9 hs با مقادیر بردارهای سرعت پایین تر 0 تا $1/0.4$ متر بر ثانیه امتداد می یابد و این موضوع برای شرایط 0.8 hs که خطوط جریان با سرعت پایین تا روی بیم ها نیز کشیده شده است مشهودتر می باشد. مطابق شکل ۴-ب آنچه از بررسی نوسانات سرعت در ترکیب بندی ۲ برمی آید، به دلیل اثر ۲ بیم به عنوان زبری و با همان زاویه ۱۱ درجه ترکیب بندی ۱ مشاهده می شود به دلیل کاهش پارامترهای زبری، خط اثر موجی پرش S در همه پایاب های مورد بررسی باقی مانده است و تمایل جریان در تمامی حالات به سمت چپ کناره جریان وجود دارد. وجود گردابه های بزرگ در دو حالت بینابینی پایاب 0.8 hs و 0.9 hs مشاهده می گردد، درحالی که برای 0.7 hs و hs یک گردابه اصلی در انتهای موج جریان دیده می شود و لذا برای این ترکیب بندی حالات 0.8 hs و 0.9 hs شرایط حدی دارند. برای ترکیب بندی شماره ۳ تنها حالت زاویه ۱۵ درجه می باشد. لذا در مقایسه با سایر ترکیب بندی های بهینه اثر زاویه در این حالت می بایست لحاظ گردد. در این حالت مطابق شبیه سازی شکل ۴-ج در توزیع سرعت، گردابه های مشخص که در ترکیب های قبلی مشاهده گردید وجود ندارد و جریان بصورت اغتشاشات موضعی در پای سرریز تا شروع سازه زبری بیم ها مشاهده می شود. با لحاظ اینکه در این حالت $P=80 \text{ cm}$ می باشد می تواند تا اندازه ای موثر واقع گردد. وجود گردابه ها پس از عبور از ترکیب سازه تنها در سمت راست جهت جریان در حالت hs (پایاب اصلی) مشاهده می گردد و در صورت کاهش عمق پایاب تا 0.7 hs نیز جریان با موج های کوتاه امتداد می یابد به نحوی که با کاهش عمق پایاب تا 0.7 hs توزیع سرعت به ترتیب نرمال تر شده و نهایتاً در پایین دست سازه ها در حالت 0.7 hs توزیع سرعت نرمال و در حد 0.82 - 0 متر بر ثانیه امتداد می یابد.

بررسی تغییرات طول پرش و طول غلطاب

نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که طول پرش نامتقارن نوع S از پنجه پرش در محل واگرایی شروع شده و جریان با موج های متوالی و شرایط ناپایدار از بعد از مقطع واگرایی تا نزدیک به قسمت انتهایی علوم و نزدیک به دریچه امتداد دارد. جهت پرش نامتقارن نوع S تصادفی بوده و شروع آن از یکی از لبه های مقطع واگرایی ناگهانی می باشد. شکل های ۵-الف و ۵-ب پرش نامتقارن نوع S مدل سازی شده و طول پرش و غلطاب ایجاد شده برای اعداد فرود $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$ را نشان می دهند.



شکل ۵. الف- نمایش L (طول کل پرش) در پرش نامتقارن نوع S مدل سازی شده برای اعداد فرود $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$



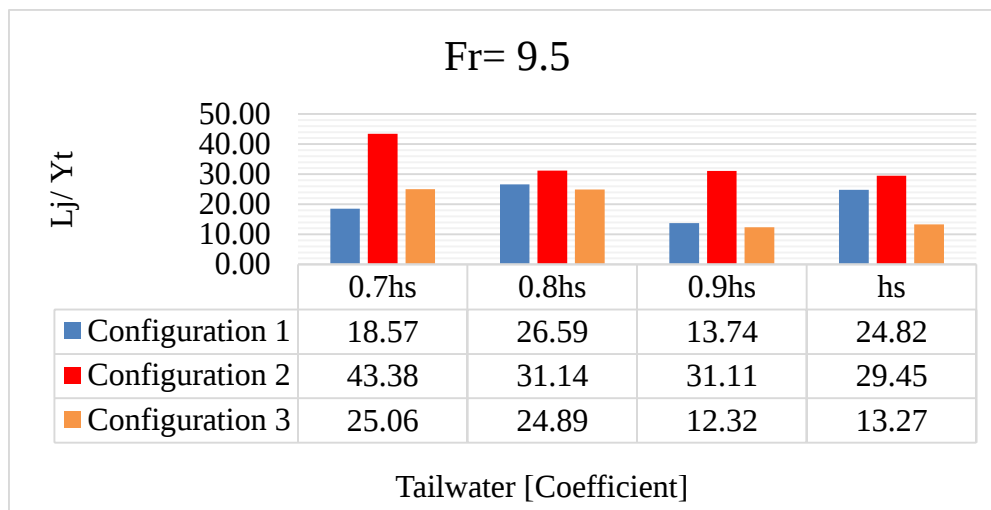
شکل ۵. ب- نمایش L_T (طول غلطاب) در پرش نامتقارن نوع S مدل سازی شده برای اعداد فرود $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$

برای بررسی کمی میزان طول پرش، در شکل های فوق، نتایج طول پرش و طول غلطاب برای پرش نامتقارن نوع S مدلسازی شده در اعداد فرود $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$ بر اساس عمق پایاب (y_t) تحلیل گردید. مطابق شکل های فوق با افزایش عدد فرود، روند تغییرات هردو پارامتر بی بعد مورد بررسی افزایش می یابد. نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج تحقیقات تقی نیا و همکاران (۱۴۰۰)، هوشیاری پور و همکاران (۱۳۹۸) و صاحبی و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارند. به طوری که با افزایش دبی عبوری از سرریز، عدد فرود کاهش و طول پرش و طول غلطاب افزایش می یابد. برای طول بی بعد شده پرش و غلطاب، میزان افزایش برای اعداد فرود مورد بررسی با استفاده از روابط پلی نومیال (۴) و (۵) تعریف می شود:

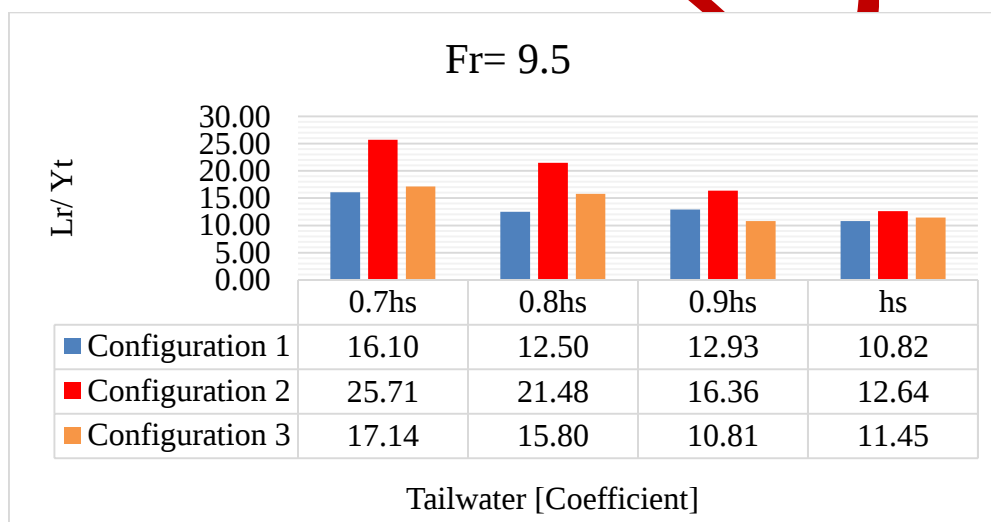
$$\text{For } L_j/y_t \quad \frac{L_j}{y_t} = -3/278F_r^2 + 18/713F_r + 23/821 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\text{For } L_T/y_t \quad \frac{L_T}{y_t} = -3/187F_r^2 + 16/393F_r + 22/965 \quad (\text{رابطه ۵})$$

در شرایط استفاده از سیستم بیم های متقاطع بر اساس باز شدگی در چپه انتهایی طبق آزمایشات مرجع، مشاهده گردید که گردابه هایی روی بیم ها در ترکیب بندی های منتخب، به صورت عمدتاً متقارن تشکیل گردیده که بر اساس ارتفاع، زاویه قرارگیری و فاصله اولین بیم از مقطع واگرایی ناگهانی تغییر می نماید. برای بررسی حضور سیستم بیم های متقاطع در پرش نوع S در مقطع با واگرایی ناگهانی، تغییرات بی بعد طول پرش (L_j/y_t) و طول غلطاب (L_T/y_t) در مقایسه با در صدهای مختلف عمق پایاب ($0/7 \text{ hs}$ تا hs) برای ۳ ترکیب بندی مدلسازی شده در شکل های ۶-الف و ۶-ب آورده شده است.



شکل ۶. الف- تغییرات طول بی بعد پرش (L_j/y_t) در برابر درصدهای مختلف عمق پایاب برای ۳ ترکیب بندی بهینه



شکل ۶. ب- تغییرات طول بی بعد غلطاب (L_r/y_t) در برابر درصدهای مختلف عمق پایاب برای ۳ ترکیب بندی بهینه

همانگونه که در شکل‌های فوق نشان داده شده است و با توجه به نتایج آزمایشگاهی حاجی علی گل (۱۴۰۱) در خصوص بررسی بهینه ترکیب بندی‌ها برای عدد فرود ۹/۵ که با استفاده از سرعت سنج سه بعدی EMV برداشت گردید، مشخص می‌گردد، اساساً استفاده از بیم‌های متقاطع در همه حالات آن و ترکیب بندی‌ها باعث کاهش طول پرش می‌شود. روند تغییرات طول بی بعد حوضچه (L_j/y_t) بعنوان شاخص کاهش طول و همچنین طول غلتاب (L_r/y_t) از ۰/۷ hs به hs کاهش یافته بوده به گونه‌ای که به‌طور متوسط طول غلتاب بی‌بعد شده در شرایط پایاب ۰/۷ hs با مقدار ۱۹/۶۵ بیشترین و پایاب hs با مقدار ۱۱/۶۳ کمترین مقدار را دارد و نسبت به مقدار آزمایش مرجع برای عدد فرود ۹/۵ به ترتیب ۵۴/۷۷ و ۷۳/۲۳ درصد کاهش را نشان می‌دهند. این موضوع برای طول بی بعد شده پرش L_j/y_t تقریباً مشابه با طول غلتاب بوده با این تفاوت که حداقل مقدار با کمی تغییر در ۰/۹ hs به مقدار ۱۹/۰۵ و بیشترین مقدار تغییرات طول پرش هیدرولیکی در ۰/۷ hs و به مقدار ۲۹ رخ می‌دهد که به ترتیب نسبت به شرایط مرجع ۶۲/۲۳ و ۴۲/۵۲ درصد کاهش طول پرش محاسبه می‌گردد. توضیح شرایط حداقل کاهش طول بی بعد شده پرش برای ترکیب بندی شماره ۳ و شرایط پایاب ۰/۹ hs قابل بیان می‌باشد. در اینجا یکی از پارامترهای اصلی میزان P (فاصله سیستم

از مقطع واگرایی ناگهانی) می‌باشد که امکان تو سعه یافتگی جریان قبل از برخورد به بیم اول را می‌دهد و جریان پس از برخورد به بیم اول و حرکت چرخشی در بین بیم‌ها با زاویه بیشتر نسبت به ترکیب‌بندی‌های بهینه دیگر ($\theta=15^\circ$) درون سیستم بیم‌ها انرژی خود را مستهلک نموده و به فاصله کمتری پس از سازه جهت استهلاک انرژی نیازمند است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی با واگرایی ناگهانی و به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری جهت پایداری پرش هیدرولیکی نامتقارن با استفاده از نرم افزار Flow3D به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. مشخصات پرش هیدرولیکی با به‌کارگیری ترکیب‌بندی‌های مختلف سیستم بیم‌های متقاطع با در صدهای مختلف عمق پایاب مرجع مورد بررسی قرار گرفت. بررسی میدان‌های جریان سرعت سه‌بعدی در کانال پایین‌دست سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان سازه اتلاف انرژی در ترکیب‌بندی‌های بهینه و شرایط متغیر پایاب، قابلیت خوب این سازه در همگن‌سازی موثر جریان در کانال‌های با واگرایی ناگهانی، حتی در شرایط تغییرات سطح آب پایین دست (h_s) را نشان داد. تغییرات بی‌بعد طول پرش (L_j/y_t) و طول غلطاب (L_T/y_t) در مقایسه با در صدهای مختلف عمق پایاب برای بکارگیری سیستم زبری بیم در کنترل پرش نامتقارن ایجاد شده در کانال واگرایی ناگهانی نشان می‌دهد که اساساً استفاده از این طیف سازه در ترکیب‌بندی‌های بهینه باعث کاهش طول پرش می‌شود. حداکثر درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به‌کارگیری سیستم شبیه‌سازی شده، برای ترکیب‌بندی ۳ و شرایط پایاب h_s ۰/۹ به میزان ۷۸/۰۱ درصد مشاهده شد.

قدردانی

نویسندگان نهایت تشکر و قدردانی خود را از سازمان آب و برق خوزستان که حمایت‌های مالی و معنوی خود را برای فراهم کردن شرایط انجام پژوهش به عمل آورد، ابراز می‌دارند.

"هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- تقی نیا، آبرین؛ 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): ۱۷-۲۸.
- حاجی علی گل، سعید. (۱۴۰۱). تأثیر زاویه قرارگیری و تعداد تیرکهای افقی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با مقطع واگرایی ناگهانی، پایان نامه دکتري، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شارونی زاده، شکوفه. (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی و عددی کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از سیستم تزریق جت مستغرق چندگانه هم فاز، پایان نامه دکتري، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- صاحبی، فرزانه، فرسادی زاده، داوود، اسمعیلی ورکی، مهدی، عباسپور، اکرم، و حسین زاده دلیر، علی. (۱۳۹۲). مقایسه مدل‌های آشفتگی k- ϵ در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم‌افزار FLUENT. نشریه دانش آب و خاک. ۲۷(۱): ۲۳۵-۲۴۶.
- هوشیاری‌پور، فرهاد؛ دهقان، مصطفی و مهاجری، سید حسین. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر زاویه واگرایی حوضچه آرامش و موقعیت آب پایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی با مدل‌سازی عددی. مهندسی عمران/میرکبیر، ۵۱(۱): ۸۵-۶۸.

REFERENCES

- Bremen, R., & Hager, W.H. (1993). T-jump in abruptly expanding channel. J. Hydraul. Res., 31(1), 61-78.
- Bremen, R., & Hager, W.H. 1994. Expanding stilling basin. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy. 106(3), 215-228.
- Chow, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, USA.
- Chow, V.T. (1989). Hand book of Applied Hydrology. Mc Graw Hill Book Co, New York.
- Daneshfaraz, R., Mirzaee, R., & MajediAsl, M. (2019). The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. AUT Journal of Civil Engineering.

- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Mirzaee, R., & Abraham, J., 2021. Predicting the energy dissipation of a rough sudden expansion rectangular stilling basins using the SVM algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 8(2), pp.98-106.
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic engineering*, 128(7), 656-663.
- Ellayn, A.F., & Sun, Z.L. (2012). Hydraulic jump basins with wedge-shaped baffles. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(7), 519-525.
- Hager, W. H. (1992). Energy dissipators and hydraulic jump, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.
- Hager, W. H., & D. Li. (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., & Shafai Bejestan, M. (2021). Crossbeam Dissipators in Abruptly Expanding Channels: Experimental Analysis of Flow Patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11), 06021012.
- Hajialigol, S. (1401). *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, Faculty of Water and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., & Gualtieri, C. (2017). An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), 945.
- Herbrand, K. (1973). *The spatial hydraulic jump*. *Journal of Hydraulic Research*, 11(3), 205-218.
- Hooshyaripor, F., Dehghan M., & Mohajeri, S.H. (2019). *Investigation of the effect of the divergence angle of the stilling basin and the position of the base water on the characteristics of hydraulic jump with numerical modeling*. *Amirkabir Civil Engineering*, 51(1), 68-85. (In Persian)
- Hughes, W. C., & Flack, J. E. (1984). "Hydraulic jump properties over a rough Bed." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE. 110 (12): 1755-1771.
- Izadjoo, F., & Shafai-Bejestan, M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*, 7(8), 1164-1169.
- Jesudhas, V., Balachandar, R., & Bolisetti, T. (2020). Numerical study of a symmetric submerged spatial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 58(2), 335-349.
- Keshavarzi, A., & Hamidifar, H. (2018). Kinetic energy and momentum correction coefficients in compound open channels. *Natural Hazards*, 92(3), 1859-1869.
- Kordi, E., & Abustan, I. (2012). Transitional expanding hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 105-110.
- Kumar, N.S and S.V.S.N.D.L. Prasanna, 2018. Turbulence modeling for estimation of hydraulic jump height. *STM Journals*, 5(3), 1-11.
- Mohamed Ali, H.S. (1991). Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* ASCE, 117(1), 83-93.
- 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>.
- Sahebi, F., Farsadi Zadeh, D., Esmaili Varki, M., Abbaspour, A., & Hosseinzadeh Dalir, A. (2013). Comparison of k-ε turbulence models in the simulation of hydraulic jump in divergent rectangular sections using FLUENT software. *Journal of Water and Soil Science*. (27)1, 235-246. (In Persian)
- Scorzini, A. R., Di Bacco, M., & Leopardi, M. 2016. Experimental investigation on a system of crossbeams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *J. Hydraul. Eng.* 142(2), 06015018.
- Sharonizadeh, Sh. (1401). *Laboratory and numerical investigation of hydraulic jump control using a multiple in-phase submerged jet injection system*, PhD thesis, Faculty of Water and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
- Taghinia, I., Asfari-Pari, S. A., Shafaei-Bajestan, M., & Ahmadian-Far, I. (2021). 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. doi: 10.30482/jhyd.2021.268704.1504. (In Persian)
- Trinh, C.T., Zhang, J., & Tran, C.T. (2024). Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps. *Applied Sciences*, 14(2), 594.
- Parsamehr, P., Kuriqi, A., Farsadizadeh, D. et al. (2022). Hydraulic jump over an adverse slope controlled by different roughness elements. *Water Resour Manage.*, 36, 5729–5749.