Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Autumn 2024: Vol 2, Issue 3
https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1185724

Research Article

Analysis of the effect of roughness height and spacing on hydraulic jump characteristics in the stilling basin downstream of an ogee spillway

Mohammad Hossein Ahmadi[1], Amir Vakili[1], Roozbeh Aghamajidi[2]

1 Department of Civil Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

2 Department of Civil Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

Email Corresponding Author: Mohamadh.ahmadi@iau.ac.ir

© The Author(s)2025

Received: 02 Oct 2024 Accepted: 08 Jan 2025 Published: 20 Jan 2025

Extended Abstract

Extended Abstract

Introduction

In hydraulic engineering, the management of energy dissipation downstream of spillways is crucial to prevent erosion, scouring, and structural damage. Hydraulic jumps are a common phenomenon used to dissipate energy in stilling basins. However, the efficiency of hydraulic jumps can be significantly influenced by the characteristics of the channel bed, particularly the presence of roughness elements. This study investigates the impact of roughness height and spacing on the characteristics of hydraulic jumps downstream of an ogee spillway.

The ogee spillway is widely used in dam structures due to its efficient flow control and energy dissipation capabilities. However, the high velocity of flow downstream of the spillway necessitates effective energy dissipation mechanisms to prevent damage to the channel bed and surrounding structures. Traditional stilling basins rely on hydraulic jumps to dissipate energy, but their performance can be enhanced by introducing roughness elements on the channel bed.

This research employs numerical simulations using the FLUENT software and the Volume of Fluid (VOF) method to model the flow patterns and hydraulic jump characteristics. The study aims to determine the optimal roughness height and spacing to minimize the length and secondary depth of hydraulic jumps, thereby improving the efficiency of energy dissipation in stilling basins.

Materials and Methods

The study utilized numerical simulations to analyze the effects of roughness on hydraulic jump characteristics. The FLUENT software was employed, and the Volume of Fluid (VOF) method was used to model the two-phase flow. The computational domain included an ogee spillway and a stilling basin with triangular roughness elements on the bed.

The mesh was generated using the Quad Pave method, with triangular elements near the roughness and quadrilateral elements elsewhere. A mesh sensitivity analysis was conducted, and a grid with 33,652 nodes was

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Autumn 2024: Vol 2, Issue 3
https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1185724

selected based on the lowest error (2.3%) compared to experimental data. Boundary conditions included velocity inlet at the upstream, pressure outlet at the downstream, and wall conditions for the channel boundaries. The RNG turbulence model was chosen for its accuracy in predicting flow behavior. The simulations were validated against experimental data, and the results showed excellent agreement, with a maximum error of 0.02%.

Results and Discussion

The results demonstrated that the introduction of roughness elements significantly reduced the length and secondary depth of hydraulic jumps. As the roughness height increased, the relative secondary depth decreased, and the hydraulic jump length shortened. This is attributed to the interaction of the flow with the roughness elements, which disrupts the flow pattern and enhances energy dissipation.

The optimal spacing between roughness elements was found to be 2 cm, which provided the most efficient reduction in hydraulic jump length and flow regulation. Closer spacing increased the turbulence and shear stress on the bed, leading to faster energy dissipation. However, spacing beyond 2 cm resulted in less effective energy dissipation.

The study also examined the impact of the Froude number on hydraulic jump characteristics. As the Froude number increased, the hydraulic jump length decreased, and the relative depth increased. This trend was consistent across all roughness configurations.

Conclusion

The study concludes that the use of roughness elements on the channel bed significantly improves the performance of hydraulic jumps in stilling basins. Increasing the roughness height reduces the length and secondary depth of hydraulic jumps, while a spacing of 2 cm between roughness elements provides optimal energy dissipation.

These findings have important implications for the design of stilling basins and energy dissipation structures in hydraulic engineering. By incorporating roughness elements, engineers can enhance the efficiency of energy dissipation, reduce the risk of erosion, and improve the stability of hydraulic structures. Future research could explore the effects of different roughness shapes and configurations to further optimize the design of stilling basins.

Keywords: Fluent software, Hydraulic jump, Ogee spillway, Roughness, Two-phase model

Extended Abstract

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Autumn 2024: Vol 2, Issue 3, 218-232
https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1185724

Research Article

Analysis of the effect of roughness height and spacing on hydraulic jump characteristics in the stilling basin downstream of an ogee spillway

Mohammad Hossein Ahmadi[1], Amir Vakili[1], Roozbeh Aghamajidi[2]

1 Department of Civil Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

2 Department of Civil Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

Email Corresponding Author: Mohamadh.ahmadi@iau.ac.ir

© The Author(s)2025

Received: 02 Oct 2024 Accepted: 08 Jan 2025 Published: 20 Jan 2025

Abstract

In the present study, the aim is to investigate the effect of roughness and the change in their height and distance on the characteristics of the hydraulic jump in the downstream stilling basin of the ogee spillway. For this purpose, numerical simulation of the flow pattern and analysis of the geometric characteristics of the ogee spillway with the gate were performed using the Fluent software. The simulation method used in this study is the volume of fluid (VOF) method, which is used to model multiphase flows. The results showed that the use of roughness in the channel bottom has a significant effect on reducing the length and secondary depth of the hydraulic jump. In particular, with increasing roughness height, the ratio of secondary depth to primary depth decreases, which is due to the shortening of the hydraulic jump length and the closer proximity of the primary and secondary depths due to the flow encountering the roughness. On the other hand, increasing roughness height leads to greater flow deflection in the channel bottom. Based on the results, the best spacing for the roughness's is 2 cm between them, which provides optimal performance in terms of reducing the hydraulic jump length and regulating the flow. The results clearly show that changes in the roughness parameters, especially their height and spacing, play an important role in improving the performance of the stilling basin and controlling the hydraulic jump.

Keywords: Fluent software, Hydraulic jump, Ogee spillway, Roughness, Two-phase model

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱
پاییز ۱۴۰۳، دوره دو، شماره ۳، ۲۳۲-۲۱۸
https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1185724

مقاله پژوهشی

تحلیل تأثیر ارتفاع و فاصله زبری بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز اوجی

محمد حسین احمدی[۱]، امیر وکیلی[۱]، روزبه آقا مجیدی[۲]

۱. گروه عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.

۲. گروه عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: Mohamadh.ahmadi@iau.ac.ir
© The Author(s) 2025

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ چاپ: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر زبری و تغییر ارتفاع و فاصله آن‌ها بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز اوجی است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و تحلیل مشخصات هندسی سرریز اوجی به همراه دریچه انجام شد. روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه، روش حجم سیال (VOF) است که برای مدل‌سازی جریان‌های چندفازی به‌کار می‌رود. نتایج نشان داد که استفاده از زبری در کف کانال تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی دارد. به‌طور خاص، با افزایش ارتفاع زبری، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کاهش یافت که این امر ناشی از کوتاه‌تر شدن طول پرش هیدرولیکی و نزدیک‌تر شدن عمق اولیه و ثانویه به یکدیگر به دلیل برخورد جریان با زبری است. از سوی دیگر، افزایش ارتفاع زبری منجر به انحراف بیشتر جریان در کف کانال می‌شود. بر اساس نتایج، بهترین فاصله برای زبری‌ها فاصله ۲ سانتی‌متری بین آن‌ها است که عملکرد بهینه‌ای از لحاظ کاهش طول پرش هیدرولیکی و تنظیم جریان ارائه می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که تغییرات در پارامترهای زبری، به ویژه ارتفاع و فاصله آن‌ها، نقش مهمی در بهبود عملکرد حوضچه آرامش و کنترل پرش هیدرولیکی دارند.

واژه‌های کلیدی: نرم‌افزار فلوئنت، پرش هیدرولیکی، سرریز اوجی، زبری، مدل دوفازی

۱- مقدمه

در پایین‌دست سرریز سدها به دلیل اختلاف ارتفاع زیاد، سرعت جریان و نهایتا انرژی جنبشی، به شدت افزایش می‌یابد که عدم کاهش این انرژی باعث فرسایش کف و ایجاد گودال در پایین دست سد خواهد شد که در دراز مدت باعث واژگونی سد می‌شود؛ لذا برای کاهش این سرعت زیاد (انرژی جنبشی زیاد) در سیستم‌های هیدرولیکی باید راه حلی اندیشیده شود. از جمله راه‌های کاهش سرعت، استفاده از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی است. سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی سازه‌هایی هستند که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می‌شوند(Bahrevar, 2013). ساخت سرریز متداول‌ترین روش جهت استهلاک انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی است. سرریزها سازه‌هایی هستند که بدلیل کاربرد بسیار آن در علم هیدرولیک مطالعات بسیاری بر روی آن صورت گرفته است. با توجه به موارد بالا، بررسی جریان موجود بر روی سرریز و در پایین‌دست آن از اهمیت زیادی برخوردار است و با توجه به این موضوع که مطالعات آزمایشگاهی دارای هزینه‌های بالای اجرایی هستند و زمان بسیار زیادی را به خود اختصاص می‌دهند و همچنین پارامترهای بسیار زیادی در مطالعات آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری نیست؛ بنابراین مطالعات عددی دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. سرریزهای اوجی (آبریز) یک لبریز کنترل دارند که به شکل منحنی اوجی (پیوند) یا دارای پروفیل s شکل است. معمولاً قسمت بالایی منحنی پیوند به شکلی طراحی می‌شود که هر چه نزدیک‌تر، بر پروفیل زیرین سفره آبی که از روی یک لبه تند هوادهی شده، فرو می‌ریزد منطبق باشد. (Tullis & Neilson, 2008) عملکرد سرریز اوجی مستغرق و روابط دبی–ارتفاع جریان (اشل) آن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق چهار رابطه برای جریان مستغرق و یک رابطه برای جریان آزاد با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به منظور پیش‌بینی تراز آب در بالادست در شرایط مستغرق، مورد ارزیابی قرار گرفت. (Swamee et al., 2011) به بررسی خصوصیات دبی بر روی سرریزهای مورب پرداختند؛ ایشان رابطه جدیدی برای محاسبه ضریب دبی در این نوع سرریزها ارائه دادند که رابطه پیشنهادی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. (Kumar & Sreeja, 2012) به مطالعه ویژگی‌های دبی سرریز لبه‌تیز در شرایط قوس محوری به سمت بالادست پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که راندمان سرریز با افزایش نسبت هد موجود به ارتفاع سرریز، به دلیل تداخل امواج عرضی ناشی از همگرایی جریان در مقادیر بزرگ‌تر دبی، کاهش می‌یابد. (Morales et al., 2012) نیز به برررسی عملکرد سرریز اوجی یک سد انحرافی و نیمرخ سرعت و جریان روی آن با استفاده از مدل سه بعدی CFD[1] پرداختند. پارامترهای محاسبه شده از مدل عددی بر اساس داده‌های به دست آمده از یک مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج مربوط به نیمرخ سرعت نشان داد که مقدار حداکثر سرعت در وجه میانی سرریز رخ داده و این ناحیه با کاهش ارتفاع سرریز در دبی ثابت، به سمت بالادست و با کاهش دبی در ارتفاع ثابت سرریز به سمت پایین دست حرکت می‌کند.(Arvanaghi & Nasehi Oskuei, 2013) تاثیر ارتفاع سرریز را روی ضریب آبگذری در سرریزهای لبه‌تیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج CFD تشابه خوبی برقرار است.

(Haktanir & Citakoglu 2016) به بررسی الگوریتم‌های مختلف و یافتن الگوریتم بهینه در بررسی عملکرد سرریزهای اوجی در فرآیند عبور دبی‌های مختلف ار روی سرریز اوجی در حالاتی که دریچه بالادست دارای بازشدگی‌های مختلف است، پرداختند و نتایج این الگوریتم را با الگوریتم‌های مختلف مقایسه کردند. (Date et al., 2017) به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای اوجی با استفاده از مدل VOF[2] پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش مدل‌های CFD برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای اوجی بسیار موثر است. (Esmaeili Varak & Safarrazavi Zadeh, 2013) در مطالعه آزمایشگاهی خود سرریزهای کنگره‌ای با هندسه‌های خطی– نیم دایره‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان دریافتند که دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم حدود ۳۰ درصد بیشتر است. (Zhang et al., 2024) در تحقیق خود نشان دادند که استفاده از زبری با شکل

[1]CFD: Computational Fluid Dynamics
[2]VOF: Volume of fluid method

منشور مثلثی در کف کانال منجر به کاهش ۲۲ درصدی عمق ثانویه و ۵۰ درصدی طول پرش هیدرولیکی نسبت به کف صاف شده است. این نوع زبری با افزایش تنش برشی بستر و ایجاد آشفتگی بیشتر، به بهبود اتلاف انرژی کمک می‌کند. (Ahmadi et al., 2024) در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریز جانبی لبه تیز با ارتفاع تاج متغیر پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تغییر ابعاد و اندازه های سرریز تأثیر قابل توجهی در پارامترهای سرعت جریان و سرعت برشی داشته است. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر زبری، تغییر ارتفاع زبری و فواصل مختلف زبری بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز اوجی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل ساخته شده

یکی از عواملی که در نتایج مدل عددی بسیار تأثیرگذار است، نوع شبکه‌بندی و تعداد مش‌های استفاده شده در مدل‌سازی است. در این تحقیق به علت دارا بودن شکل خاص و هندسه مدل آزمایشگاهی از شبکه Pave Quad استفاده شد. خصوصیت این شبکه آن است که در نزدیکی زبری‌ها از شبکه مثلثی استفاده شده و با فاصله گرفتن از زبری، به شبکه‌های مربعی تبدیل خواهند شد. در این مرحله از شبیه‌سازی، فاصله شبکه در نزدیکی دیواره و زبری‌ها کم و با فاصله گرفتن از زبری‌ها افزایش خواهد یافت (شکل ۱). همانطور که از شکل (۱) مشخص است با افزایش تعداد نقاط شبکه از ۱۲۵۲۱ به ۳۳۶۵۲، تفاوت زیادی بین نتایج مدل عددی با هم و با مدل آزمایشگاهی وجود دارد. با تغییر تعداد سلول‌ها از۳۳۶۵۲ به تعداد ٤۰۰۵۲ در نتایج حاصل از مدل عددی تفاوت چندانی به وجود نیامده است و نتایج بدست آمده، به نتایج مدل آزمایشگاهی نزدیکتر گردیده است. بنابراین از شبکه‌بندی با تعداد نقاط ۳۳٦۵۲ استفاده گردید. با توجه به میانگین مربعات خطا که برای شبکه بندی با تعداد نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است، میزان کمترین خطا مربوط به شبکه‌بندی با تعداد نقاط ۳۳٦۵۲ است (۲/۳ درصد). لازم به ذکر است که این انتخاب بر مبنای عمق جریان جهت مدل‌سازی اولیه بوده است و در ادامه مدل شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی بر اساس پارامترهای دیگری مانند فشار، شرایط مرزی مورد مقایسه قرار گرفته است. در مدل آزمایشگاهی از یک فلوم به طول ۸ متر عرض، ۰/۳۵ متر و ارتفاع ۰/٤ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد واحد یاسوج استفاده شد و بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستری با زبری‌های عرضی مثلثی شکل، انجام شد. به این منظور تعداد ۹۰ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۱۹/۵ تا ۱۲/۵ انجام شده است و زبری‌های انتخابی با سه ارتفاع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- معرفی شرایط مرزی

پس از عملیات شبکه‌بندی، شرایط مرزی که محاسبه از این مقادیر شروع می‌شود به مدل معرفی می‌گردد. در این مدل از شرایط مرزی سرعت ورودی به عنوان شرایط مرزی بالادست، فشار ورودی برای سطح فوقانی و فشار خروجی برای پایین‌دست و از شرط مرزی دیواره برای جداره‌ها استفاده شد (شکل ۲).

۲-۳- تعیین مدل آشفتگی

در این بخش پس از حساسیت‌سنجی مدل عددی به شبکه‌بندی، به تعیین بهترین مدل آشفتگی پرداخته می‌شود. جدول (۱) محاسبه مقدار خطای مدل‌های آشفتگی مختلف (K-ε استاندارد، RNG K-ε، K-ω) را نشان می‌دهد. کمترین خطا مربوط به مدلی است که با مدل آشفتگی RNG حل گردیده است. شکل (۳) تغییرات عمق جریان در طول میدان را نشان می‌دهد که با مدل‌های مختلف آشفتگی شبیه‌سازی شده‌اند.

شکل۱- الف) شبکه بندی و ب) صحت سنجی میدان حل نسبت به ابعاد شبکه و مدل آزمایشگاهی

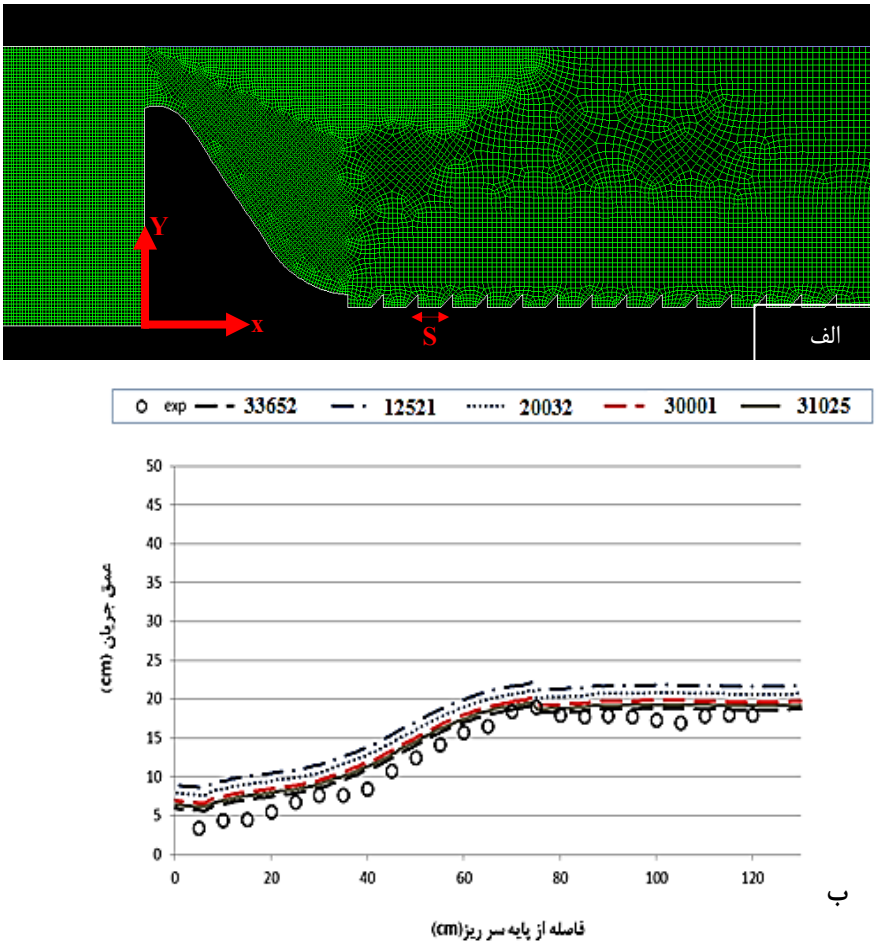


Fig 1. a) Gridding and b) Verification of the solution field with respect to the dimensions of the grid and the laboratory model

شکل۲- معرفی شرایط مرزی

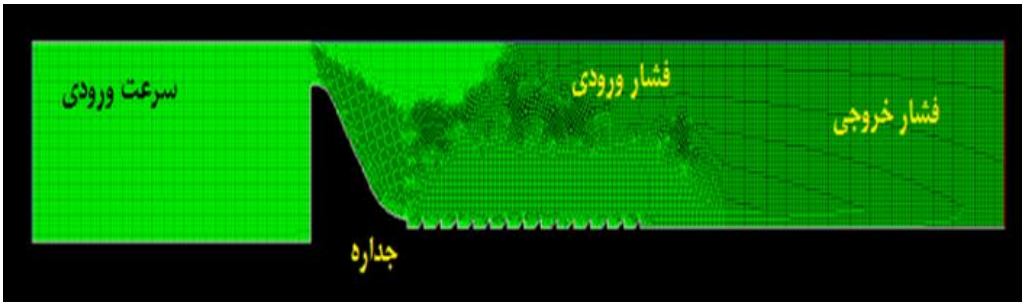


Fig 2. Introducing boundary conditions

جدول۱- محاسبه مقدار خطای مدل‌های آشفتگی مختلف

Table 1. Calculation of error value of different turbulence models

مدل آشفتگی	K-ε Stand-ard	K-ε RNG	K-ω Standard
میزان میانگین مربعات خطا(درصد)	۲/۹	۲/۳٦	۲/٤۸

شکل ۳- تعیین بهترین مدل آشفتگی

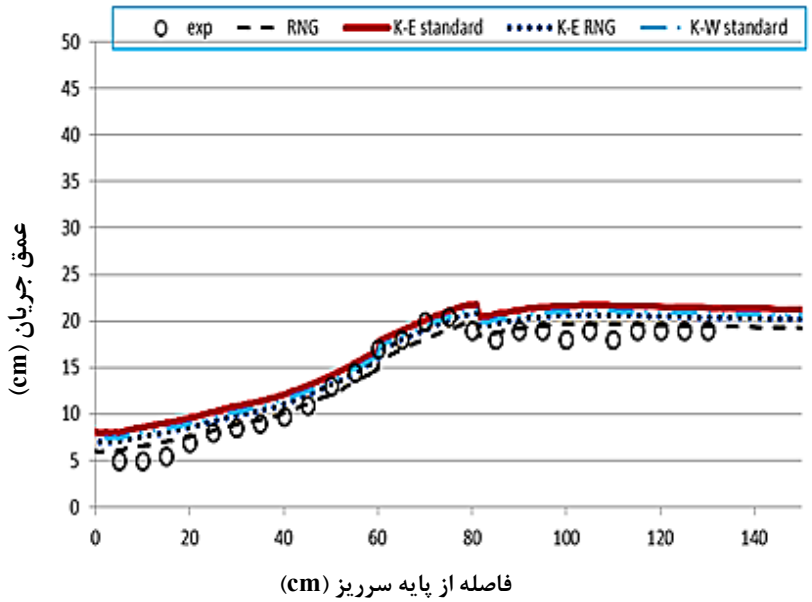


Fig 3. Determining the best turbulence model

۲-۴- بررسی صحت عملکرد مدل عددی

شکل (٤) به مقایسه پروفیل‌های سطح آب برای زبری‌ها با فواصل مختلف (S=4, 8, 12cm مطابق شکل ۱) در دو مدل عددی و آزمایشگاهی می‌پردازد. با اندازه‌گیری میزان مربعات خطا (RMSE) مشخص می‌گردد که حداکثر میزان خطا برابر با ۰/۰۲ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب مدل عددی است. در مدل عددی ارتفاع فاز هوا، ۰/۷۵ برابر با ارتفاع سطح آب در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر زبری بر پرش هیدرولیکی

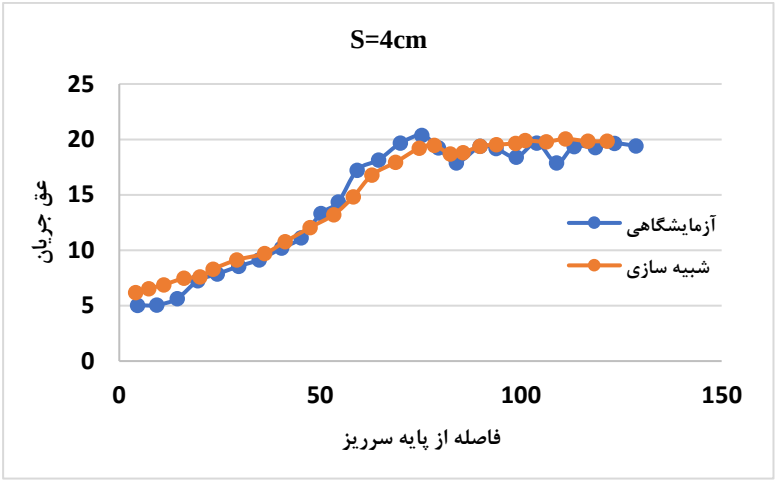
یکی از راه‌های کنترل پرش هیدرولیکی ایجاد زبری در کف کانال است، ایجاد زبری باعث تغییر خصوصیات پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌گردد. در این بخش پرش هیدرولیکی بر روی زبری مثلثی شکل و پرش هیدرولیکی کلاسیک با هم مقایسه می‌گردند. همانطور که ادر شکل (۵) مشخص است در حالتی که زبری در کف کانال وجود دارد. پرش هیدرولیکی به جداره فلوم نزدیک می‌گردد که این نشان‌دهنده تأثیر زبری بر استهلاک انرژی جریان است. به علت وجود زبری ارتفاع آب در فاصله کمتری از حالت زیر بحرانی به حالت فوق بحرانی می‌رسد و پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق می‌افتد که این امر نشان دهنده تأثیر زبری بر انرژی مستهلک شده است. ایجاد پرش هیدرولیکی باعث استهلاک انرژی تولید شده توسط جریان می‌گردد؛ این موضوع باعث کاهش قدرت آبشستگی جریان خواهد شد. در حالت وجود زبری طول پرش هیدرولیکی کاهش‌یافته و عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش پیدا می‌کند. بنابراین با استفاده از زبری در کف کانال طول پرش و عمق ثانویه نسبی پرش کمتر خواهد شد.

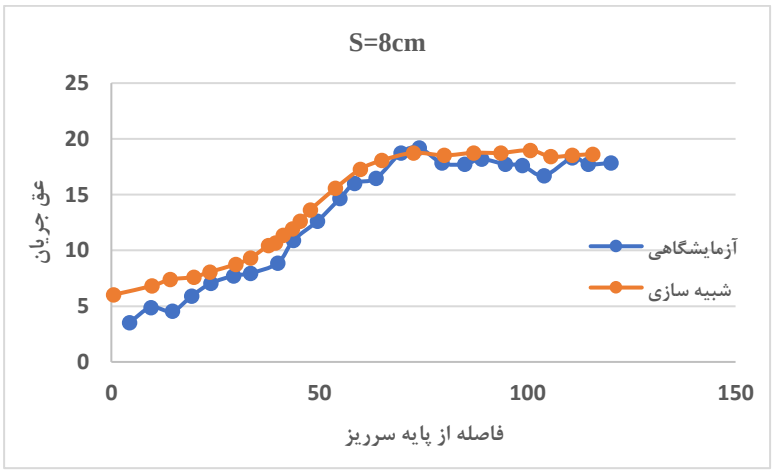
۳-۲- مقایسه الگوی جریان و کانتور فشار

در شکل(٦) خطوط جریان و کانتور فشار برای حالتی که بستر صاف بوده یا دارای زبری‌های مثلثی است با یکدیگر مقایسه گردیده است. همانطور که مشخص است در حالتی که کف کانال صاف است، خطوط جریان به صورت مستقیم حرکت می‌کنند و در کف

کانال هیچ انحرافی در خطوط جریان وجود ندارد؛ در حالی که خطوط جریان در بستر زبر دارای برگشت بوده و جریان حالت برگشتی به خود گرفته است که علت این امر برگشت جریان به ناحیه کم فشار پشت زبری است. این ناحیه کم فشار باعث کاهش سرعت جریان نسبت به حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک خواهد شد. جریان همواره از ناحیه پرفشار به سمت ناحیه کم‌فشار حرکت می‌کند؛ به علت برخورد جریان به زبری در پشت زبری یک ناحیه با سرعت کم و فشار کم ایجاد می‌شود که در خطوط کانتور مشخص است.

شکل ٤- مقایسه پروفیل سطح جریان در مدل عددی با نتایج ازمایشگاهی در فواصل مختلف زبری





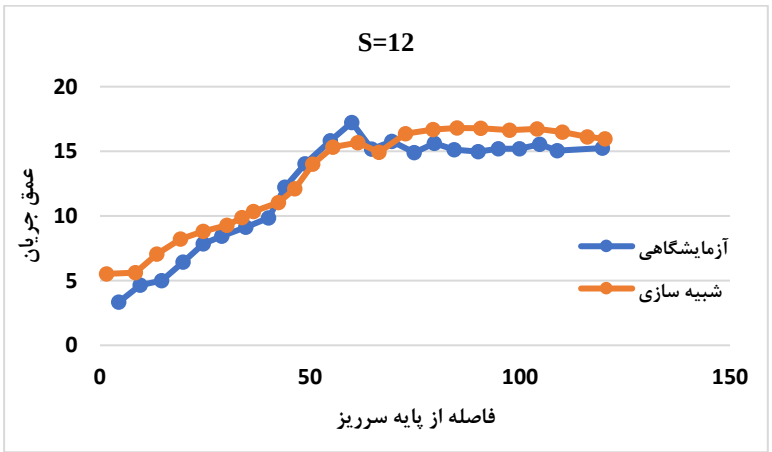
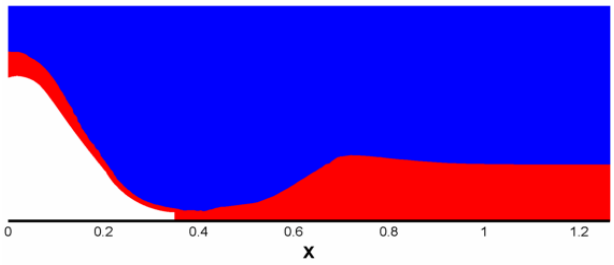
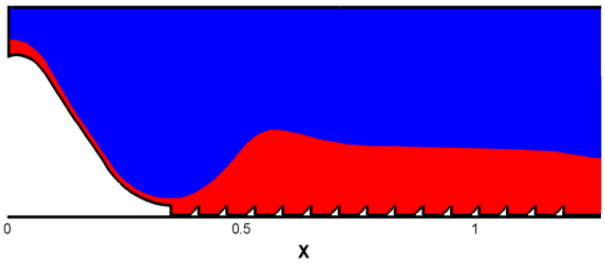


Fig 4. Comparison of flow surface profile in numerical model with experimental results at different roughness intervals

شکل ۵- مقایسه پرش هیدرولکی در بستر صاف و زبر



الف) پرش هیدرولیکی در بستر صاف



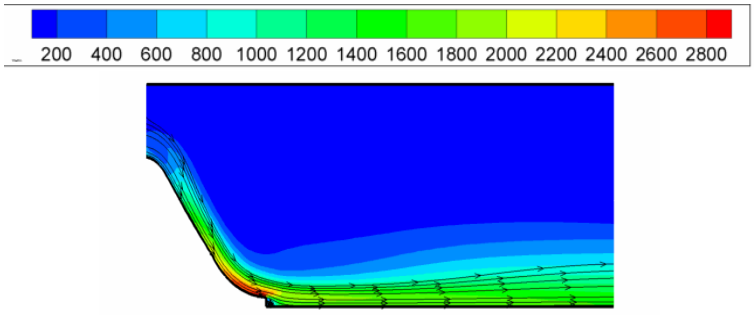
ب) پرش هیدرولیکی در بستر زبر

Fig 5. Comparison of hydraulic jump on smooth and rough bed

۳-۳- بررسی تغییر اثر عدد فرود بر خصوصیات فیزیکی جریان در بستر زبر

همانطور که در شکل‌های (۷) حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود (Fr) طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و همچنین نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه نیز دارای افزایش خواهد بود و دلیل این امر شدت گرفتن جریان و افزایش سرعت جریان است. این نتایج در شکل (۸) به صورت نموداری ارائه شده است. با افزایش عدد فرود عمق نسبی دچار افزایش می‌شود و تا عدد فرود ۱۱ ادامه خواهد داشت. پس از آن کاهش بسیار ناچیز در نتایج مشاهده شده است. نتایج آزمایشگاهی مورد نظر همان نتایج برای صحت سنجی مدل(Bahrevar, 2013) بوده است و علت تفاوت در اعداد فرود بالا محدودیت‌های آزمایشگاهی در بررسی پارامترها در اعداد فرود بالا به علت مشکلات مدل آزمایشگاه، فلوم و میزان دبی‌ها بوده است.

شکل٦- مقایسه کانتور فشار (برحسب پاسکال) و خط جریان در حالت وجود زبری و بدون زبری



الف) بستر صاف

ب) بستر دارای زبری

Fig 6. Comparison of pressure contour (in Pascals) and flow line in the presence and absence of roughness

شکل ۷- پروفیل طولی پرش هیدرولیکی با بستر زبر با عددهای فرود (Fr) مختلف

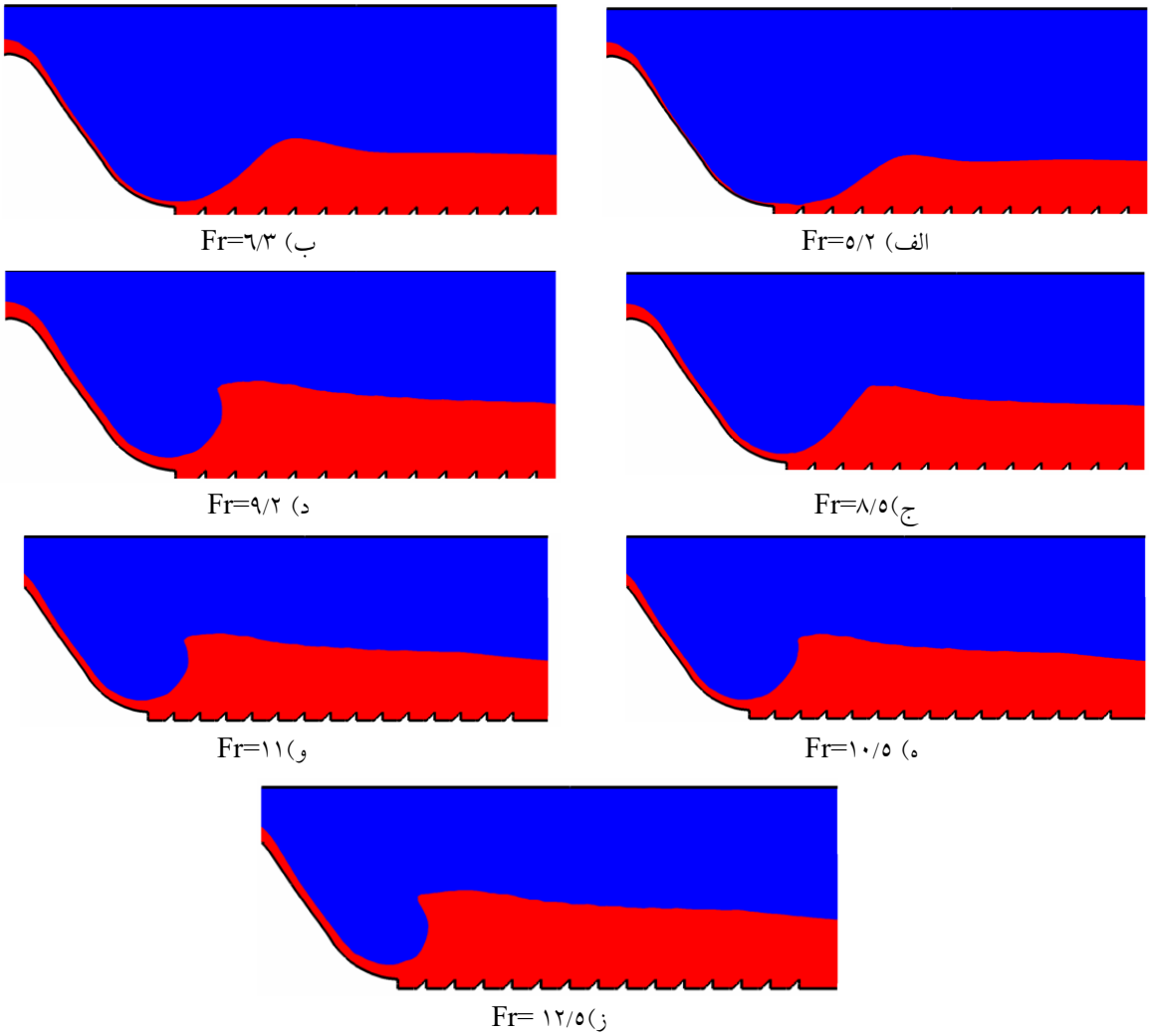


Fig 7. Longitudinal profile of rough bed hydraulic jump with different Froude numbers (Fr)

شکل ۸- تغییرات نسبی عمق به عدد فرود

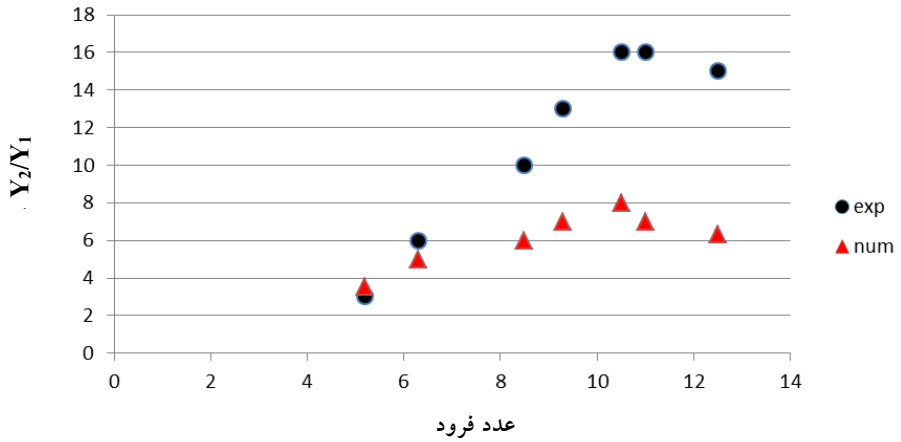
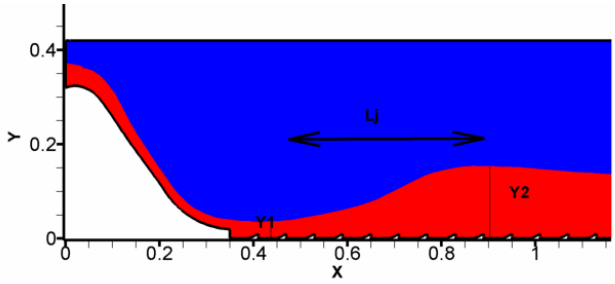


Fig 8. Relative changes in depth to Froude number

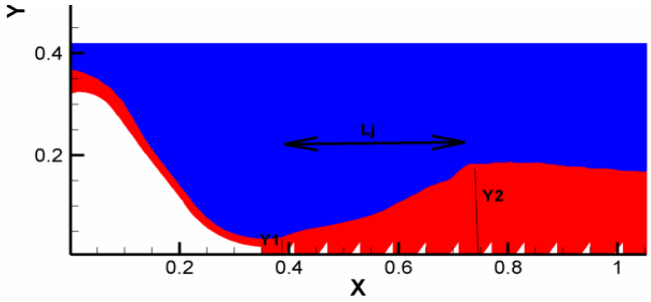
۳-۴- بررسی اثر تغییر ارتفاع زبری بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی

در این مرحله در کف کانال، زبری با چهار ارتفاع مختلف (۱، ۲، ۳، ٤ سانتی‌متر) شبیه‌سازی گردیده است. همانطور که مشخص است و در شکل (۹) نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع زبری کف کانال طول پرش کاهش یافته است. همچنین نسبت عمق ثانویه (Y_2) به اولیه (Y_1)، با افزایش ارتفاع کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن کوتاه شدن طول پرش هیدرولیکی (L_j) و نزدیک شدن ارتفاع عمق اولیه و ثانویه هم بر اثر برخورد جریان با زبری است (اشکال ۱۰ و ۱۱).

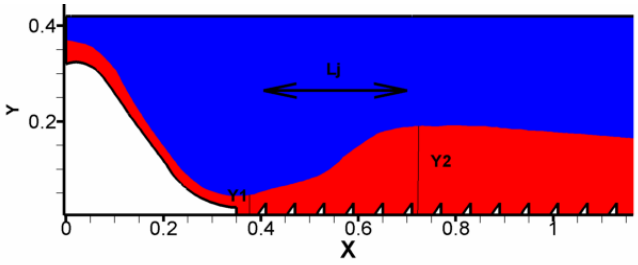
شکل ۹- مقایسه پروفیل طولی پرش هیدرولیکی با ارتفاع زبری مختلف



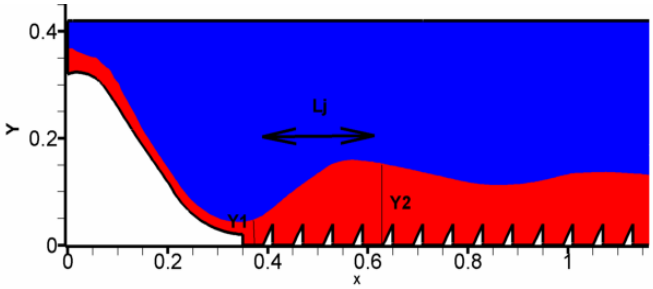
الف) ارتفاع زبری ۱ سانتی‌متر



ب) ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر



ج) ارتفاع زبری ۳ سانتی‌متر



د) ارتفاع زبری ٤ سانتی‌متر

Fig 9. Comparison of longitudinal profiles of hydraulic jumps with different roughness heights

شکل ۱۰- بررسی تغییرات عمق نسبی به ارتفاع زبری

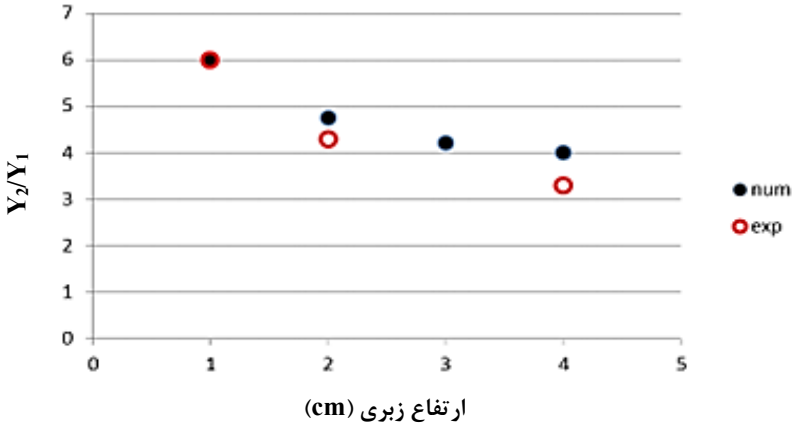


Fig 10. Investigating changes in relative depth to roughness height

شکل ۱۱- تغییرات نسبی طول پرش هیدرولیکی به تغییرات ارتفاع زبری

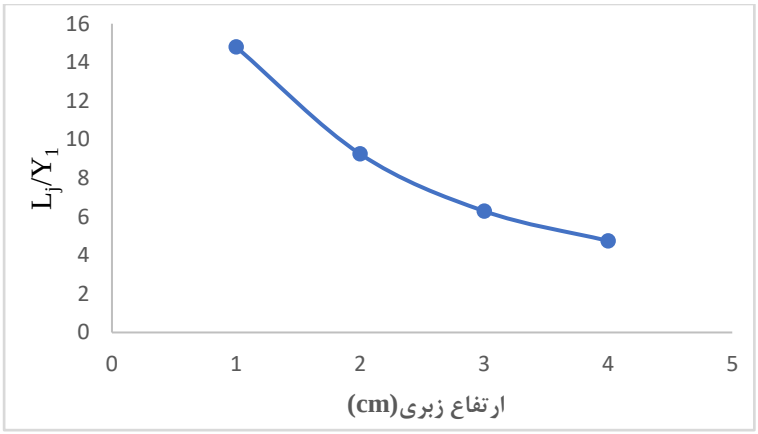


Fig 11. Relative changes in hydraulic jump length to changes in roughness height

۳-۵- خطوط جریان طولی

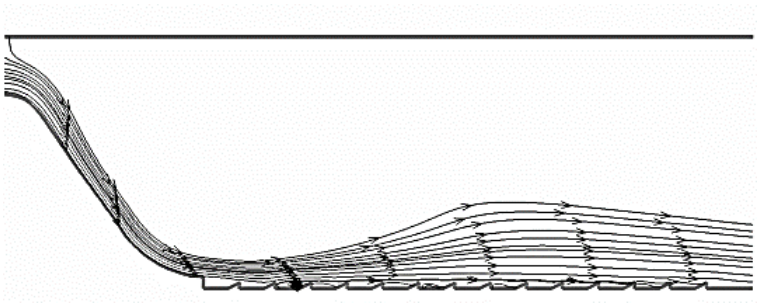
با برخورد جریان به زبری موجود در کف کانال جریان در پشت زبری حالت برگشتی پیدا کرده و یک گردابه در پشت آن به وجود می‌آید که می‌تواند در واقعیت باعث ایجاد چاله آبشستگی در اطراف شود. با افزایش ارتفاع زبری ابعاد این گردابه‌ها دارای افزایش است که به خوبی مشخص است. این گردابه‌ها نواحی با حداقل فشار هستند که باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون در پشت زبری‌ها خواهند گردید. هر چقدر این گردابه‌ها در کف کانال بزرگ‌تر باشند عاملی برای استهلاک بیشتر انرژی خواهند بود و طول پرش را کوتاه‌تر خواهند کرد و بنابراین عاملی برای اقتصادی‌تر شدن حوضچه خواهند بود. در حالتی که ارتفاع زبری یک سانتی‌متر است انحراف جریان زیاد نبوده و خطوط جریان شبیه به حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌شود؛ اما با افزایش ارتفاع زبری میزان انحراف جریان در کف کانال بیشتر می‌گردد. علت تفاوت خطوط جریان برای زبری ۳ و ٤ سانتیمتر میزان بحرانی بودن ارتفاع ٤ سانتیمتری است که باعث ایجاد تغییرات گسترده شده است. در واقع با توجه به دبی جریان در نظر گرفته شده ارتفاع ٤سانتی‌متری یک مانع قابل توجه بوده و تغییرات زیادی در خطوط جریان را ایجاد کرده است. (شکل ۱۲).

۳-۶- بررسی تأثیر فواصل مختلف زبری بر روی خصوصیات فیزیکی پرش هیدرولیکی

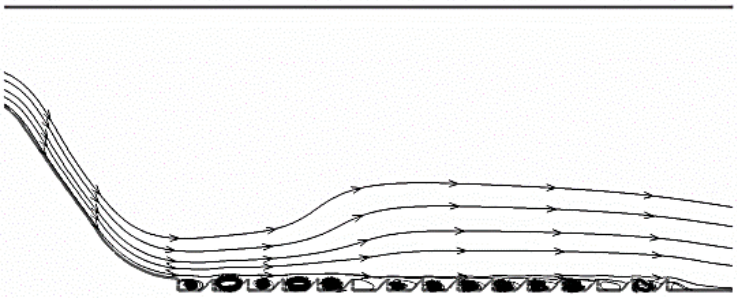
در این بخش به جایگذاری زبری‌های مختلف در فواصل ۲، ٤، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری از هم پرداخته شده است و تأثیر آن‌ها بر روی خصوصیات فیزیکی پرش هیدرولیکی تعیین گردید. با نزدیک شدن زبری‌ها به هم دیگر طول نسبی پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه

کاهش می‌یابد. کاهش عمق ثانویه بسیار نامحسوس است و بنابراین مشخص می‌شود که تغییر فاصله زبری‌ها تأثیر چندانی بر ارتفاع ثانویه پرش ندارد و پارامتر تأثیرگذاری بر روی این خصوصیت فیزیکی جریان نیست. به دلیل نزدیک بودن زبری‌ها به همدیگر و فشرده بودن آن‌ها آب سریعا از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تغییر وضعیت داده و پرش هیدرولیکی در طول کمتری تشکیل می‌گردد و علت این امر آشفته شدن بیشتر جریان در این حالات نسبت به حالات دیگر است. این امر نشان دهنده این موضوع است که با نزدیک شدن زبری‌ها به یکدیگر استهلاک انرژی جنبشی زودتر اتفاق می‌افتد که باعث طراحی اقتصادی حوضچه آرامش می‌گردد. بنابراین با توجه به این قسمت و نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت و فاصله زبری‌ها فاصله ۲ سانتی‌متری آن‌ها از یکدیگر است. این موضوع به خوبی در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.

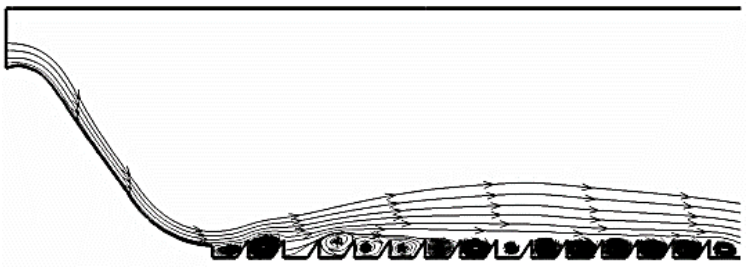
شکل ۱۲- خطوط کانتور در بستر با زبری‌های مختلف



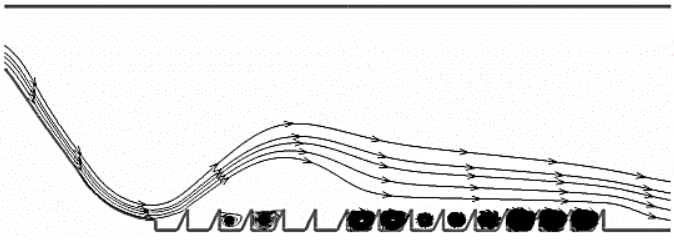
الف) ارتفاع زبری ۱ سانتی‌متر



ب) ارتفاع زبری ۲ سانتی‌متر



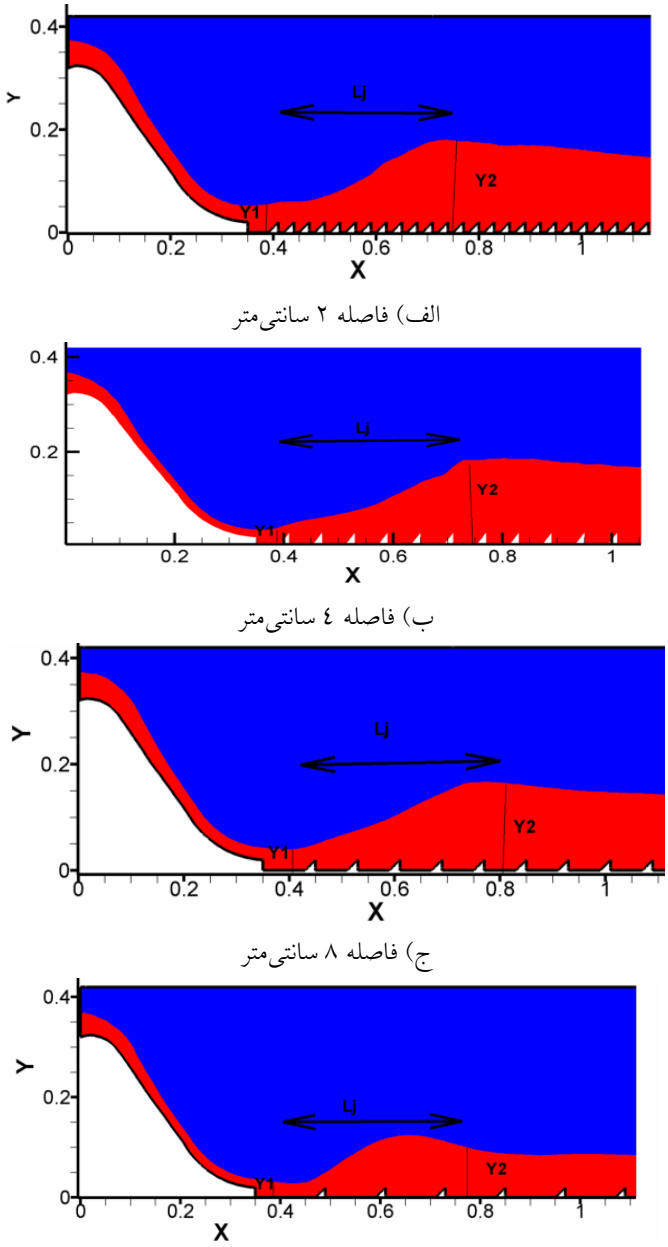
ج) ارتفاع زبری ۳ سانتی‌متر



د) ارتفاع زبری ٤ سانتی‌متر

Fig 12. Contour lines on the bed with different roughnesses

شکل ۱۳- مقایسه خصوصیات پرش



الف) فاصله ۲ سانتی‌متر

ب) فاصله ٤ سانتی‌متر

ج) فاصله ۸ سانتی‌متر

د) فاصله ۱۲ سانتی‌متر

Fig 13. Comparison of jump characteristics

در روی جداره فلوم به علت زیاد بودن سرعت جریان آب تنش برشی دارای حداکثر مقدار خود است؛ اما با برخورد جریان به زبری‌ها سرعت جریان به شدت کاهش یافته و تنش برشی کف کانال نیز دارای کاهش خواهد بود. نکته قابل توجه افزایش تنش برشی در فاصله بعد از زبری‌ها است. هدف اصلی از کاربرد زبری افزایش تنش برشی کف بوده تا این تنش برشی انرژی پرش هیدرولیکی را مستهلک کرده و طول آن را کاهش دهد. شکل (١٤) مقدار تنش برشی میانگین در فاصله انتهای فلوم تا انتهای زبری‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با کاهش فاصله، میزان تنش برشی کف کانال افزایش پیدا می‌کند که این امر نشان می‌دهد در این حالت انرژی پرش هیدرولیکی زودتر مستهلک گردیده و کارایی این فاصله از حالات دیگر بیشتر است. با عبور جریان از زبری‌ها سرعت جریان دارای کاهش است؛ بنابراین ناحیه با حداقل تنش برشی پس از زبری‌ها به وجود می‌آید (شکل ١٤).

شکل ١٤- تغییرات میانگین تنش برشی بستر

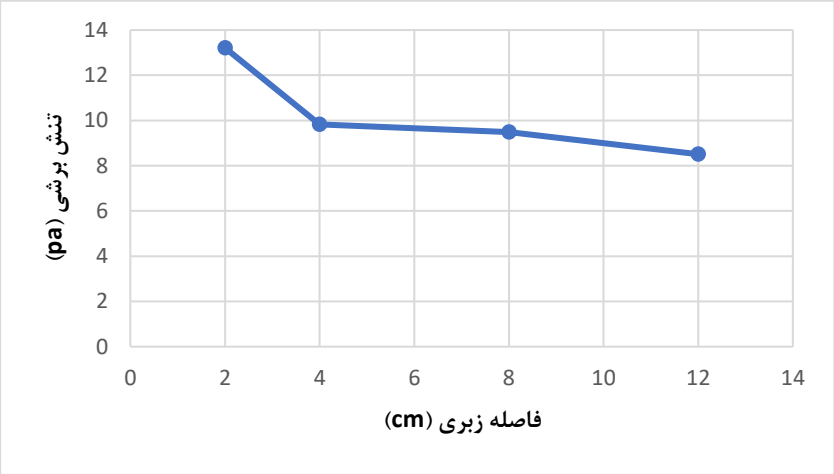


Fig 14. Changes in average bed shear stress

۴- نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر زبری بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان داده است که استفاده از زبری در کف کانال می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد هیدرولیکی ایفا کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع زبری، طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه نسبی کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل برخورد جریان با زبری و ایجاد تغییر در الگوی جریان در کف کانال است. زبری‌ها موجب می‌شوند که عمق اولیه و ثانویه به هم نزدیک‌تر شده و در نتیجه پرش کوتاه‌تر شود. همچنین، مشاهده شده است که با افزایش ارتفاع زبری، میزان انحراف جریان در کف کانال نیز بیشتر می‌شود. این انحراف باعث می‌شود که انرژی جریان به صورت مؤثرتری در کانال پخش شده و به کاهش عمق ثانویه و طول پرش کمک کند. این موضوع خصوصاً در کانال‌های با جریان سریع و پرش‌های بزرگ اهمیت دارد، چرا که می‌تواند به کاهش نیروهای مخرب و بهبود استحکام سازه‌های هیدرولیکی کمک کند. در نهایت، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که فاصله بهینه زبری‌ها از یکدیگر در حدود ۲ سانتی‌متر است. این فاصله باعث می‌شود که زبری‌ها بتوانند به طور مؤثری جریان را منحرف کرده و اثرات مطلوبی روی کاهش طول و عمق ثانویه پرش داشته باشند. در فاصله‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر، این تأثیر کمتر شده و نمی‌تواند به صورت مطلوبی انرژی جریان را کنترل کند. با این توضیحات، می‌توان نتیجه گرفت که زبری‌ها، علاوه بر کنترل طول و عمق پرش، نقش مهمی در پایداری جریان و کاهش انرژی مخرب در کانال‌های هیدرولیکی دارند و استفاده مناسب از آن‌ها می‌تواند به بهبود طراحی سازه‌های آبی کمک کند.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- منابع

Ahmadi, M. H, Aghamajidi, R., & Saeedifar, G. (2024). Numerical investigation of flow hydraulics in the side weir of a sharp edge with variable crown height. *Technical Strategies in Water Systems*, 1(2), 23-35.

Arvanaghi, H., & Nasehi Oskuei, N. (2013). Sharp-crested weir discharge coefficient. *Journal Civil Engineering. Urban*, 3(3), 87-91.

Bahrevar, V. (2013). Laboratory investigation of the effect of width and height of continuous triangular roughness on hydraulic jump coordinates in horizontal stilling basin, Master's thesis, Yasouj Azad University, Iran.

Date, V., Dey, T., & Joshi, S. (2017). Numerical modeling of flow over an ogee crested spillway under radial gate: VOF and MMF model. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 6(5), 195-203.

Esmaeili Varak, M., & Safarrazavi Zadeh, M. (2013). Study of hydraulic features of flow over labyrinth weir with semi-circular plan form. *Water and Soil*, 27(1), 224-234. http:\\doi.org.\10.22067/jsw.v0i0.22234

Haktanir, T., & Citakoglu, N. (2016) An efficient algorithm for ogee spillway discharge with partially- opened radial gates by the method of design of small dams and comparison of current and previous methods. *Hydrological Sciences Journal*, 58(5), 1013–1031.

Kumar, C., & Sreeja, P. (2012). Evaluation of selected equations for predicting scour at downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data. *Engineering Geology*, 129, 98-103.

Morales V., Tokyay T.E., & Garcia M. (2012). Numerical modeling of ogee crest spillway and Tainter gate structure of a diversion dam on canar river. XIX *International Conference on Water Resources*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Ecuador, USA. 17-22

Swamee, P.K., Shekhar, C.H. & Talib, M. (2011). Discharge characteristics of skew weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 817-820

Tullis, B.P. & Neilson, J. (2008). Performance of submerged ogee-crest weir head-discharge relationships, *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 134(4), 486-491.

Zhang, C., Li, X., Zhou, R., Engel, B. A., & Wang, Y. (2024). Hydraulic characteristics and flow measurement performance of portable primary and subsidiary fish-shaped flumes in U-shaped channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 96, 102539.