

## Research Paper

## Laboratory evaluation of artificial roughness and adverse slope effect in control of hydraulic jump

Mehdi Zeinivand<sup>1\*</sup>, Seyed Mohsen Sajadi<sup>2</sup>, Mosaieb Haghghi Nejad<sup>3</sup>, Seyed Amin Asghari Pari<sup>4</sup>, Mahmood Shafai Bejestan<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2. Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3. Graduated in Water Engineering, Khatam Al Anbia Behbahan University of Technology, Khuzestan, Iran

4. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Khatam Al Anbia Behbahan University of Technology, Khuzestan, Iran

5. Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 2020/01/26

Revised: 2020/09/30

Accepted: 2021/05/01

Use your device to scan and read  
the article online



DOI:

[10.30495/wej.2021.23966.2226](https://doi.org/10.30495/wej.2021.23966.2226)

### Keywords:

Hydraulic jump, Roughness, reverse gradient, energy loss, hydraulic jump length

### Abstract

**Introduction:** Hydraulic jump is created at the end of shoots and many hydraulic structures. The occurrence of a hydraulic jump phenomenon leads to a decrease in the amount of energy in open channels. In the present study, in order to simultaneously evaluate the effect of roughness and the effect of reciprocal slope on reducing the secondary depth of the hydraulic jump, as well as reducing the length of the hydraulic jump.

**Methods:** In this study, two types of roughness in the form of rhombuses and triangles were compared in a laboratory with a reverse slope of zero to 0.1% compared to a flat surface. The results of experiments related to the effect of roughness in reducing the relative second depth of hydraulic jump showed that rhombic and triangular roughness (in the horizontal plane) were effective in reducing the relative depth of hydraulic jump by 9.6 and 9.1%, respectively. Also, the results related to the effect of reverse slope (at the surface without roughness) on controlling the relative second depth of hydraulic jump showed that creating and increasing the reverse slope in the tested interval alone will not have an effect on reducing the relative second depth of hydraulic jump.

**Findings:** After examining the effect of roughness and reverse slope in controlling the relative length of hydraulic jump, it was observed that at the highest rate, the relative length of hydraulic jump was reduced by 0.075% and the roughness of rhombic and triangular, by 52.8 and 56.8% was observed. Therefore, as a result of this research, it can be stated that if the goal is to reduce the secondary depth of the hydraulic jump, the best option to reduce the secondary depth of the hydraulic jump is to roughen the bed using triangular roughness.

**Citation:** Mehdi Zeinivand, Seied mohsen sajadi, Mosaieb haghghi nejad, Seied Amin Asghari pari, Mahmood shafai bejestan. Water Resources Engineering Journal. 2023; 16(57): 19-30.

**\*Corresponding author:** Mehdi Zeinivand

**Address:** Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

**Tell:** +989163363012

**Email:** M.Zeinivand@Scu.ac.ir

## Extended Abstract

### Introduction

Hydraulic jump is created at the end of shoots and many hydraulic structures. The occurrence of a hydraulic jump phenomenon leads to a decrease in the amount of energy in open channels. In the present study, in order to simultaneously evaluate the effect of roughness and the effect of reciprocal slope on reducing the secondary depth of the hydraulic jump, as well as reducing the length of the hydraulic jump.

### Materials and Methods

In this study, two types of roughness in the form of rhombuses and triangles were compared in a laboratory with a reverse slope of zero to 0.1% compared to a flat surface. The results of experiments related to the effect of roughness in reducing the relative second depth of hydraulic jump showed that rhombic and triangular roughness (in the horizontal plane) were effective in reducing the relative depth of hydraulic jump by 9.6 and 9.1%, respectively. Also, the results related to the effect of reverse slope (at the surface without roughness) on controlling the relative second depth of hydraulic jump showed that creating and increasing the reverse slope in the tested interval alone will not have an effect on reducing the relative second depth of hydraulic jump.

### Findings

The results of using both roughness and reverse slope showed that in slopes less than 0.05%, roughing the sloping bed (triangular roughness) up to 2.5% can be effective in reducing the relative second depth of the hydraulic jump. In order to control the relative length of the hydraulic jump, it was observed that the roughening of the bed of rhombic and triangular roughness in horizontal surfaces was effective in reducing the relative length of the hydraulic jump by 43.8% and 52.8%, respectively. Also, by examining the effect of reverse slope in controlling the relative length of hydraulic jump (at the surface without roughness), it was observed that the highest percentage of relative length reduction was observed in

the slope of 0.1% and 17.2%. Finally, after examining the effect of roughness and reverse slope in controlling the relative length of hydraulic jump, it was observed that at the highest rate, the relative length of hydraulic jump was reduced by 0.075% and the roughness of rhombic and triangular, by 52.8 and 56.8% was observed. Therefore, as a result of this research, it can be stated that if the goal is to reduce the secondary depth of the hydraulic jump, the best option to reduce the secondary depth of the hydraulic jump is to roughen the bed using triangular roughness (with the specifications in Table 1). Which reduces by 9.1% in the secondary depth of the hydraulic jump. Also, if it is necessary to reduce the relative length of the hydraulic jump, the use of triangle roughness with a reverse slope of 0.075% is recommended, which the sum of these two factors can reduce the relative length of the hydraulic jump by 56.8%.

### Discussion

The results of the tests showed that roughening the bed with rhombic and triangular elements was effective in reducing the relative depth of hydraulic jump by 9.6% and 9.1% respectively, and by 43.8% and 52.8% in reducing the relative length of hydraulic jump. Also, the reverse slope was only effective in reducing the relative length of the hydraulic jump, and the relative length of the hydraulic jump was reduced by 17.2% in the slope of 0.1%. Finally, the combination of roughness and reverse slope in the best case at a slope of 0.75% and with triangular roughness reduced the relative length of the hydraulic jump by 56.8%.

### Conclusion

The type of roughness is effective in increasing the amount of hydraulic jump energy loss. The simultaneous effect of applying bed roughness and creating a reverse slope can increase the amount of energy loss in the phenomenon of hydraulic jump. Therefore, with the combined use of bed roughness and reverse slope, it is possible to create economic savings by creating more energy loss.

### **Ethical Considerations compliance with ethical guidelines**

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### **Funding**

No funding.

### **Authors' contributions**

Design and conceptualization: Seied Mohsen Sajjadi;

Methodology and data analysis: Moseeb Haghigninejad, Seyed Amin Asghari Pari, Mahmoud Shafaei Bejestan;

Supervision and final writing: Mehdi Zeinivand.

### **Conflicts of interest**

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## مقایسه آزمایشگاهی تاثیر زبری مصنوعی و شیب معکوس بستر در کنترل پرش هیدرولیکی

مهدی زینی وند<sup>۱\*</sup>، سید محسن سجادی<sup>۲</sup>، مصیب حقیقی نژاد<sup>۳</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۴</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۵</sup>  
 ۱. استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
 ۲. استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
 ۳. دانش آموخته مهندسی آب، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، خوزستان، ایران  
 ۴. دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، خوزستان، ایران  
 ۵. استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** پرش هیدرولیکی در انتهای شوت‌ها و بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی ایجاد می‌گردد و در این پدیده جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود. وقوع پدیده پرش هیدرولیکی منجر به ایجاد افت انرژی در مجاری روباز می‌گردد. افزایش میزان افت انرژی می‌تواند به کاهش ابعاد حوضچه آرامش و صرفه اقتصادی منجر گردد.

**روش:** در تحقیق حاضر به منظور بررسی پارامترهای پرش هیدرولیکی، به صورت آزمایشگاهی اثر زبری و شیب معکوس در کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اثر دو نوع زبری با شکل مثلث و لوزی در مقایسه با سطح صاف در شیب معکوس در بازه صفر تا ۱۰ درصد و در اعداد فرود بین ۴/۱ تا ۱۰/۹۹ مورد ارزیابی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج آزمایشات نشان داد که زبر نمودن بستر با المان‌های لوزی و مثلثی به ترتیب ۹/۶ و ۹/۱ درصد در کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی و ۴۳/۸ و ۵۲/۸ درصد در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی موثر واقع شده است. همچنین شیب معکوس فقط در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی موثر بوده و در شیب ۰/۱ درصد به میزان ۱۷/۲ درصد طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش یافت. در نهایت بکارگیری توامان زبری و شیب معکوس در بهترین حالت در شیب ۰/۷۵ درصد و با زبری مثلثی باعث کاهش ۵۶/۸ درصد طول نسبی پرش هیدرولیکی گردید.

**نتیجه‌گیری:** نوع زبری در افزایش میزان افت انرژی پرش هیدرولیکی موثر می‌باشد. تاثیر همزمان اعمال زبری بستر و ایجاد شیب معکوس می‌تواند میزان افت انرژی در پدیده پرش هیدرولیکی را افزایش دهد. لذا با کاربرد توامان زبری بستر و شیب معکوس می‌توان با ایجاد افت انرژی بیشتر، صرفه اقتصادی ایجاد نمود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/wej.2021.23966.2226](https://doi.org/10.30495/wej.2021.23966.2226)

## واژه‌های کلیدی:

پرش هیدرولیکی، زبری، شیب معکوس، طول پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه.

\* نویسنده مسئول: مهدی زینی وند

نشانی: استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تلفن: ۰۹۱۶۳۳۶۳۰۱۲

پست الکترونیکی: [M.Zeinivand@Scu.ac.ir](mailto:M.Zeinivand@Scu.ac.ir)

مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس پرداختند. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که واگرایی و شیب معکوس کانال، نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهد و واگرایی نیز باعث افزایش افت نسبی انرژی پرش نیز می‌شود. اما در کانال با شیب معکوس، تغییر محسوس در افت نسبی پرش نسبت به حالت افقی مشاهده نشد. بنابراین نقش واگرایی در افزایش افت نسبی انرژی پرش بیشتر از شیب معکوس است. بنابراین پیشنهاد شد که از مقطع واگرا با شیب معکوس برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرام کننده جریان استفاده شود (۹). Ghazali et al. (2010) مطالعاتی را بر روی پنج نوع بستر موجدار مثلثی انجام دادند. ایشان مقدار ضخامت لایه مرزی بی بعد بر روی بستر موجدار را برابر ۰٫۳۹ بدست آوردند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد افت انرژی در پرش بر روی بستر موجدار به میزان ۱۱٫۳ درصد بیشتر از بستر صاف می باشد (۱۰). Saberi et al. (2020) در مطالعه ای به بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی دایروی روی سطوح مقعر پرداختند. در این مطالعه علاوه بر نتایج آزمایشگاهی، به بررسی شبیه سازی آزمایشگاهی با نرم افزار Fluent پرداخته شد. نتایج نشان داد شعاع پرش هیدرولیکی تابعی از شعاع جت ورودی، شعاع صفحه هدف مقعر و همچنین مقدار دبی جریان می باشد. علاوه بر این بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، مشاهده شد که با افزایش شعاع صفحه هدف مقعر، شکل این پرش ها از حالت دایروی خارج و پرش های هیدرولیکی به صورت چندضلعی ظاهر می شوند (۱۱). Carollo and Ferro (2007) مطالعه ای بر بسترهای طبیعی از جنس شن با پنج اندازه متناوب ۰٫۴۶ تا ۳٫۲ سانتی متر نشان دادند که زبری‌ها می توانند نسبت اعماق مزدوج و طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند و رابطه‌ی ۱ را برای ضریب کاهشی در معادله عمومی پرش هیدرولیکی (Bélanger 1828) ارائه دهند که در آن این ضریب وابسته به مشخصات زبری نسبی می باشد (۱۲) و (۱۳).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + 8(1 - \beta) Fr_1^2} \right] \quad (1)$$

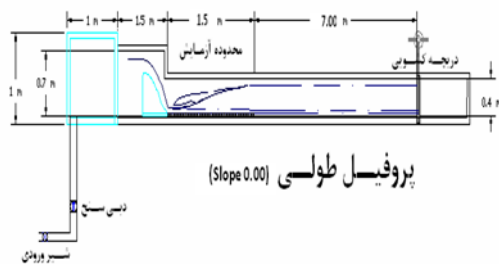
$$\beta = \frac{2}{\pi} \arctan \left[ 0.8 \left( \frac{k_s}{y_1} \right)^{0.75} \right] \quad (2)$$

Pagliara et al. (2008) به بررسی پرش هیدرولیکی در بستر با زبری های یکنواخت، غیریکنواخت و بلورهای کروی در موقعیت و تراکم های مختلف پرداخت. اندازه زبری های استفاده شده در این تحقیق در محدوده ۶/۲۶ تا ۴۵/۶ میلیمتر می باشد. در این تحقیق زبری های با دانه بندی یکنواخت و غیر یکنواخت با دانه بندی ها و تراکم های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت ضریب  $\beta$  در رابطه ۲ را به شکل رابطه ۳ استخراج و ارائه نمودند (۳).

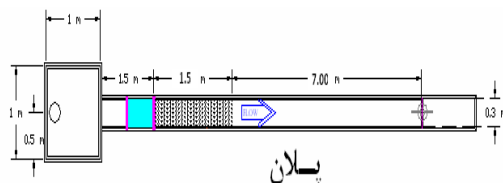
$$\beta = 0.05t \left[ 0.256 \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1.256 \left( \frac{y_2}{y_1} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

Shafai Bejestan and Nici (2009) در مطالعه ای جامع به بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف پرداخت. در این مطالعه اجزای زبر منشوری با مقاطع مختلف مستطیلی، مثلثی، دایره ای، لوزی و شش ضلعی در بستر فلوم و در محل وقوع پرش هیدرولیکی قرار داده شد. این شرایط در اعداد فرود محدوده ۴/۵ الی ۱۲ بررسی

پرش هیدرولیکی، که از نوع جریان های متغیر سریع می باشد، با تبدیل جریان زیر بحرانی به فوق بحرانی باعث ایجاد افت انرژی در یک مقطع نسبتا کوتاه طولی می شود. در این مقطع، با توجه به تلاطم و آشفتگی زیاد ایجاد شده و امکان رخ دادن انواع مختلف پرش هیدرولیکی، نیاز مبرم به تثبیت بستر و بدنه می باشد. لذا در این بازه اقدام به ساخت حوضچه آرامش می شود. حوضچه آرامش از انواع مختلف برخوردار می باشد. طول حوضچه آرامش از جمله مهمترین پارامترها می باشد که علاوه بر ایجاد شرایط هیدرولیکی مناسب، تاثیر زیادی بر هزینه ساخت حوضچه دارد (۱). لذا با کاهش طول حوضچه، صرفه اقتصادی ایجاد می گردد. از جمله روش های کاهش طول حوضچه، قرار دادن موانع در مسیر جریان و در واقع زبر نمودن بستر در محل رخ دادن پرش هیدرولیکی می باشد که با برخورد جریان به این زبری ها، باز شدگی جریان رخ داده و تلاطم و آشفتگی بیشتری رخ داده و در نتیجه افت انرژی بیشتری اتفاق می افتد. زبر نمودن بستر در محل ایجاد پرش هیدرولیکی، روند ورود هوا به آب را در جریان پرش هیدرولیکی به شدت افزایش می دهد (۲). یکی دیگر از روش های کاهش طول پرش هیدرولیکی، ایجاد شیب معکوس می باشد که با ایجاد مولفه افقی وزن سیال در جهت بالادست، می تواند در کاهش طول حوضچه آرامش مفید واقع گردد (۳). تاکنون محققین زیادی بطور جداگانه بر روی هر کدام از این پارامترها تحقیقاتی انجام داده اند. Ravar et al. (2011) در یک مطالعه به بررسی کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از زبری های مصنوعی پرداختند و بیان داشتند که متوسط کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر به شکل ذوزنقه تقریبا ۲۲ و ۴۱ درصد می باشد (۴). Ghazali et al. (2010) در جهت بررسی تاثیر زبری بر پارامترهای پرش هیدرولیکی، اقدام به زبر نمودن بستر کانال در محل پرش هیدرولیکی نمودند. نتایج نشان داد که زبر نمودن کف باعث می شود که در یک حجم کنترل، مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نباشند و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومت ناشی از زبری ها، کمتر از مومنتم ورودی شود (۵). Pourabdollah et al. (2015) به بررسی اثر زبری و شیب معکوس بر پروفیل سرعت و سطح آب در محل پرش هیدرولیکی پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که پروفیل سرعت اندازه گیری شده تشابه زیادی با پروفیل سرعت جت آب بر روی سطح صاف دارد (۶). Macián-Pérez Et al. (2020) در مطالعه ای آزمایشگاهی به بررسی پدیده پرش هیدرولیکی و پروفیل سرعت در حوضچه های آرامش پرداختند. نتایج این تحقیق نمایشی رضایت بخش از مشخصات سطح آزاد و توزیع سرعت را نشان داد. همچنین در بررسی شکل پرش هیدرولیکی و موقعیت رخ دادن حداکثر سرعت، تفاوت هایی بین پرش هیدرولیکی نوع کلاسیک مشاهده شد (۷). Ghassemi et al. (2016) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق و مقایسه آن با پرش هیدرولیکی آزاد پرداختند. نتایج نشان داد که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبی پرش مستغرق به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است (۸). Shoaieian et al. (2011) به بررسی ویژگی های پرش هیدرولیکی در



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) پروفیل طولی و (ب) پلان از فلوم مورد استفاده

زبری های استفاده شده به دو شکل لوزی و مثلث از جنس تفلون می باشند که با استفاده از نرم افزار اتوکد طراحی شده و توسط دستگاههای تراشکاری برش داده شدند. این زبری ها با ارتفاع یکسان ۱٫۶ سانتی متر در ردیفهایی به فواصل ۳٫۲ سانتی متر از یکدیگر با آرایش زیگزآگ به وسیله چسب آکوارיום بر روی صفحه گلاس به ضخامت ۱٫۵ میلی متر چسبانده شد و سپس صفحه در بستر فلوم مستقر گردید. قابل ذکر است که جهت انتخاب ارتفاع زبری ها و نحوه آرایش آنها از نتایج مطالعات انجام شده توسط Kazemianzadeh and shafaei Bejesta (2008) و همچنین خصوصیات پلان و سطح مقطع زبری ها از نتیجه مطالعه انجام شده توسط (۲۱) و (2009) Shafai Bejesta and Nici استفاده شد (۱۶) و (۱۴). در جدول ۱ خصوصیات و مشخصات زبری های مورد استفاده در این تحقیق نشان داده می شود.

جدول ۱- مشخصات زبری های استفاده شده

شکل زبری	جنس زبری	مساحت عمود بر جریان زبری (cm <sup>2</sup> )	درصد تراکم	طول تحت پوشش (cm)
لوزی	تفلون	۲/۲۶ × ۱/۶	۱۶/۱۰	۱۴۸
مثلث	تفلون	۲/۲۶ × ۱/۶	۱۶/۱۰	۱۴۸

جهت اندازه گیری عمق ثانویه پرش و همچنین عمق پایاب از عمق سنج استفاده شد جهت اندازه گیری طول پرش هیدرولیکی از مش بندی بدنه فلوم و متر نصب شده در روی بدنه فلوم استفاده شد. لازم به ذکر است طول پرش از ابتدای پرش هیدرولیکی تا مکانی که حباب های هوا مشاهده نمی شوند، اندازه گیری شد.

شکل ۲ بیانگر چیدمان زبری های مورد استفاده در این تحقیق می باشند.

گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق مزدوج پرش هیدرولیکی به دلیل وجود اجزای زبر کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی مربوط به قرارگیری اجزای زبر با مقطع مثلثی شکل می باشد (۱۴). Palermo and Pagliara (2017) به بررسی و مقایسه مطالعات انجام شده بر روی پرش هیدرولیکی در سطوح زبر و مقایسه آن با سطوح صاف و همچنین سطوح شیبدار پرداختند. در این مطالعه پس از بررسی داده های آزمایشگاهی محققین مختلف، رابطه ۴ جهت اصلاح رابطه بلنجر در شرایط پرش هیدرولیکی در بستر صاف و شیب معکوس ارائه گردید.

$$Y = 0.5 \left[ -1 + \sqrt{1 + 8(3.32^{1.52i} Fr_1)^2} \right] \quad (4)$$

در رابطه فوق  $i$  بیانگر درصد شیب معکوس می باشد. لذا رابطه ۴ را می توان جهت اندازه گیری و مقایسه نسبت عمق پایین دست به بالادست در سطوح صاف با شیب معکوس در محل پرش هیدرولیکی بکار برد (۱۵).

در تمامی مطالعات صورت گرفته توسط محققین، پارامترهای پرش هیدرولیکی به صورت جداگانه مورد بحث و بررسی و مطالعه قرار گرفتند. لذا نظر به اینکه تاکنون میزان تاثیر همزمان زبر نمودن مصنوعی بستر و ایجاد شیب معکوس بر کاهش طول پرش هیدرولیکی و همچنین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کمتر مطالعه شده است لذا در این تحقیق به بررسی میزان تاثیر همزمان این دو روش بر کاهش عمق ثانویه و همچنین طول پرش هیدرولیکی پرداخته شد و مقایسه های لازم به عمل آمد.

## مواد و روش ها

این تحقیق در یک فلوم شیب پذیر آزمایشگاهی با طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۴۰ سانتی متر از جنس بستر پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی متر و دیواره های شیشه ای به ضخامت ۱۰ میلی متر انجام شد. مخزن ورودی این فلوم به ظرفیت ۱ متر مکعب از جنس ورق گالوانیزه می باشد. سیستم پمپاژ مورد استفاده در این فلوم از قدرت ۱۰ کیلووات ساعت برخوردار می باشد. جهت ایجاد پرش هیدرولیکی نیاز می باشد که ابتدا جریان فوق بحرانی ایجاد گردد. لذا از سرریز اوجی از جنس ورق گالوانیزه با ارتفاع ۳۳ سانتی متر استفاده شد. جهت اندازه گیری دبی جریان از دبی سنج الکترومغناطیس با دقت یک هزارم لیتر بر ثانیه استفاده شد.

شکل ۱ (الف) نمایی از پروفیل طولی فلوم و شکل ۱ (ب) پلان فلوم مورد استفاده را نمایش می دهد. این فلوم دارای یک جک هیدرولیکی می باشد که در قسمت پایین دست آن نصب شده است و توانایی ایجاد شیب های مثبت و منفی را دارا می باشد.

### آنالیز ابعادی

در بحث آنالیز ابعادی ابتدا پارامترهای حاکم بر پدیده شناسایی می‌شوند و در ادامه اعداد بدون بعد استخراج می‌شوند. شکل ۳ بیانگر پارامترهای استفاده شده در این تحقیق می‌باشد.

در شکل فوق شماتیک مدل مورد استفاده در این تحقیق مشاهده می‌شود. همانگونه مشاهده می‌شود، پارامترهای موثر در تحقیق شامل عمق اولیه ( $Y_1$ )، ثانویه جریان ( $Y_2$ )، طول پرش هیدرولیکی ( $L_j$ )، سرعت اولیه جریان (سرعت در ابتدای پرش) ( $V_1$ )، شتاب ثقل زمین ( $g$ )، لزوجت دینامیکی آب ( $\mu$ )، جرم واحد حجم آب ( $\rho$ ) و شیب بستر ( $\theta$ )، شکل زبری ها ( $\zeta$ )، ارتفاع زبری ها ( $K_R$ ) عرض عمود بر جریان زبری ها ( $B_R$ )، نوع آرایش زبری ها ( $n$ ) می‌باشند. در تحقیق حاضر از بین پارامترهای ذکر شده، پارامترهای ارتفاع زبری ها، عرض عمود بر جریان زبری ها و نوع آرایش زبری ها ثابت می‌باشند. لذا با حذف این پارامترها و استفاده از قضیه باکینگهام می‌توان نوشت:

$$F(Y_1, Y_2, L_j, V_1, g, \mu, \rho, \theta, \zeta) = 0 \quad (5)$$

در ادامه با استفاده از تکنیک‌های آنالیز ابعادی رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$\frac{L_j}{Y_1} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} = f(F_n, Re_1, \theta, \zeta) \quad (6)$$

با توجه به اینکه مقدار عدد رینولدز در این تحقیق در محدوده  $98000 < Re < 128000$  قرار داشته است، می‌توان از اثر عدد رینالدز صرفنظر نمود (۱۷ و ۱۸). همچنین با توجه به جدول شماره (۱) و نظر به اینکه تصویر سطح مقطع زبری ها در راستای جریان مساوی انتخاب شدند لذا اثر شکل زبری نیز در محاسبات آنالیز ابعادی حذف گردید و نتایج برای هر نوع زبری بصورت جداگانه ارائه خواهد شد. در نهایت می‌توان نوشت:

$$\frac{L_j}{Y_1} = f(F_n, \theta) \quad (7)$$

$$\frac{Y_2}{Y_1} = f(F_n, \theta) \quad (8)$$

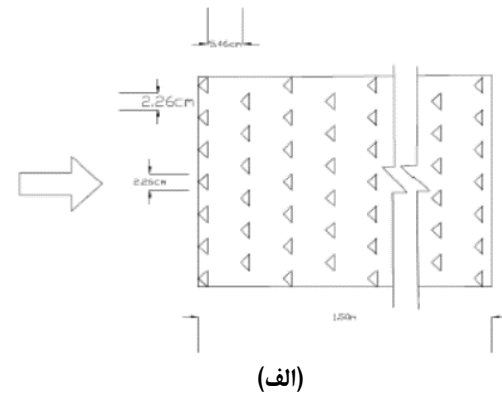
لذا نتایج نهایی بر اساس پارامترهای شیب معکوس و عدد فرود بالادست جریان ارائه خواهند شدند. با توجه به اهمیت پارامترهای موثر بر پدیده پرش هیدرولیکی، در جدول زیر دامنه تغییر این پارامترها در تحقیق حاضر ارائه می‌گردد.

جدول ۲- دامنه پارامترهای متغیر

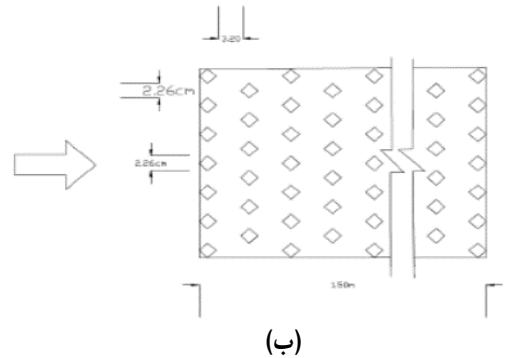
متغیر	دامنه تغییرات
دبی (لیتر بر ثانیه)	۲۰ - ۵/۶۵
شیب معکوس بستر (درصد)	صفر - ۰/۱
عدد فرود اولیه	۱۰/۹۹ - ۴/۱
عمق اولیه پرش هیدرولیکی (سانتی‌متر)	۳ - ۰/۵
عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (سانتی‌متر)	۲۱/۷ - ۵/۹۴
طول پرش هیدرولیکی (سانتی‌متر)	۱۴ - ۱۰۶

### نتایج

نتایج حاصل از این تحقیق در چهار بخش ارائه می‌شوند. در بخش اول نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی سطح افقی و صاف (بدون زبری



(الف)



(ب)

شکل ۲- آرایش استفاده شده برای زبری‌های مورد

نیاز (الف) زبری مثلی و (ب) زبری لوزی

در ادامه تصاویری از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده ارائه می‌گردد.



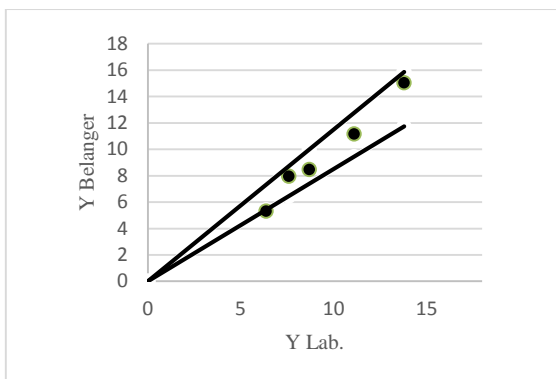
(الف)



(ب)

شکل ۳- تصاویری از فلوم مورد استفاده (الف) سیستم

ایجاد شیب معکوس و (ب) پایین دست سرریز اوجی



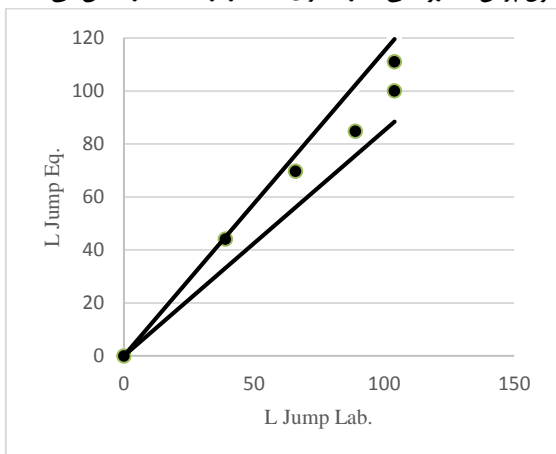
شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با رابطه بلنجر

همانگونه در شکل ۴ مشاهده می شود داده های آزمایشگاهی بدست آمده در این تحقیق با دقت  $\pm 15\%$  تطابق خوبی با رابطه بلنجر دارا می باشد. در ادامه به بررسی روابط مربوط به طول پرش هیدرولیکی در سطوح صاف و افقی پرداخته شد. در سال ۱۹۵۵ آزمایشات فراوانی توسط USBR انجام شد و روابط مختلفی برای بازه های مختلف عدد فرود بالادست پرش هیدرولیکی برای تعیین طول پرش هیدرولیکی استخراج شد که در ادامه مشاهده می شوند. (۲۱ و ۲۲).

$$2.5 < Fr_1 < 4.5 \rightarrow L_j = 5(y_2 - y_1) \quad (10)$$

$$4.5 \leq Fr_1 < 9 \rightarrow L_j = 6y_2 \quad (11)$$

برای اعداد فرود بالاتر از ۹ نیز توصیه شد که همچنان از رابطه ۱۱ استفاده شود. حال با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ و با استفاده از داده های آزمایشگاهی به استخراج طول پرش هیدرولیکی پرداخته شد و نتایج این بررسی با نتایج اندازه گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شد و نتیجه این بررسی در شکل ۵ مشاهده می شود. در این شکل محور عمودی بیانگر طول پرش بدست آمده از روابط ۱۰ و ۱۱ می باشد و محور افقی طول پرش هیدرولیکی اندازه گیری شده در آزمایشگاه را نشان می دهد.



شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با روابط ارائه شده توسط USBR

در این بخش نیز مشاهده می شود که با دقت  $\pm 15\%$  داده های آزمایشگاهی تطابق خوبی با روابط ارائه شده دارا می باشند. لذا نظر به بررسی های اخیر و اطمینان از صحت برداشت داده ها و انجام کنترل های لازم، در ادامه به بررسی اثر زبری و شیب معکوس پرداخته شد.

ارائه می شوند. این سری از آزمایشات بعنوان آزمایشات شاهد بیان و مورد استفاده قرار می گیرند. نتایج این بخش با معادلات ارائه شده توسط دیگر محققین بررسی و مقایسه لازم بعمل آمد. در بخش دوم به ارائه نتایج حاصل از اثر زبری بر روی کاهش عمق ثانویه و همچنین طول پرش هیدرولیکی پرداخته شد. در بخش سوم نیز نتایج حاصل از اثر شیب معکوس در کاهش دو پارامتر ذکر شده ارائه گردید. در بخش چهارم به بررسی اثر توامان استفاده از زبری بستر و شیب معکوس، جهت کاهش عمق نسبی ثانویه و طول نسبی پرش هیدرولیکی پرداخته شد و مقایسه های لازم به عمل آمد و نتایج لازم ارائه گردید.

۱-۲-۳- نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی سطح افقی و صاف (آزمایش های شاهد)

در تحقیق حاضر آزمایشات انجام شده بر روی سطح صاف افقی در اعداد فرود مختلف به عنوان آزمایشات شاهد مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایشات اعماق بالادست و پایین دست و همچنین طول پرش هیدرولیکی اندازه گیری شد و مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر بدست آمده توسط روابط تئوری دیگر محققین، که عموماً از مطالعات آزمایشگاهی بدست آورده اند، مقایسه شد و دقت آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. بلنجر (۱۸۲۸) اولین مطالعه اصولی را بر روی پرش هیدرولیکی انجام داد. این مطالعه در یک کانال مستطیلی افقی با بستر صاف انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی و عدد فرود اولیه جریان بود. نتایج این تحقیق منجر به رابطه ۹ گردید (۱۹).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \lambda Fr_1^2} - 1 \right) \quad (9)$$

در این رابطه  $\frac{y_2}{y_1}$  نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی به شکل اختصار با  $Y$  نشان داده می شود ( و  $Fr_1$  عدد فرود قبل از پرش هیدرولیکی می باشد. در ادامه پس از بررسی های تکمیلی، ضریب  $\lambda$  در تحقیقات آزمایشگاهی بلنجر برابر ۸ بدست آمد. Rao (1966) پس از انجام مطالعه ای جامع در زمینه پرش هیدرولیکی، بیان نمودند که ضریب  $\lambda$  در رابطه ۵ بستگی به توزیع سرعت دارد و این ضریب برای سطوح صاف افقی با توزیع فشار هیدرواستاتیک در مقاطع مستطیلی، کمتر از ۸ می باشد. در مطالعه حاضر پس از اندازه گیری اعماق بالادست و پایین دست و عدد فرود جریان بالادست در سطوح صاف و افقی، ضریب  $\lambda$  برابر  $7/8$  بدست آمد که به میزان  $2/5$  درصد با مقدار بدست آمده توسط بلنجر تفاوت دارد و این میزان از دقت خوبی برخوردار می باشد. همچنین مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه در این تحقیق با مقادیر بدست آمده از رابطه ۵ مقایسه شد و نتایج در شکل ۴ مشاهده می شود. در این شکل محور افقی بیانگر نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی اندازه گیری شده در آزمایشگاه و محور عمودی بیانگر همین نسبت که توسط رابطه شماره ۹ بدست آمده است (۲۰).

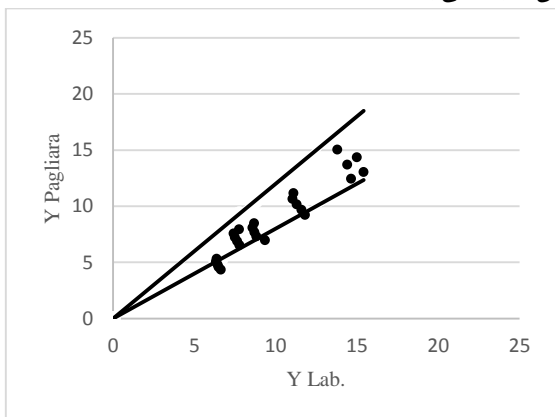


## نتایج حاصل از اثر شیب معکوس در کنترل عمق نسبی ثانویه و همچنین طول نسبی پرش هیدرولیکی

### نتایج حاصل از اثر شیب معکوس در کنترل عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی

جهت بررسی اثر شیب معکوس در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی ابتدا نتایج آزمایشات شاهد (سطح صاف بدون زبری در شیب افقی در اعداد فرود مختلف) مجدداً مورد استفاده قرار گرفت. سپس نتایج این آزمایشات با نتایج آزمایشات انجام شده در سطوح صاف و در شیب‌های مختلف معکوس (از ۰/۲۵ تا ۰/۱ درصد) و در اعداد فرود مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این قسمت از تحقیق نشان داد که با افزایش شیب معکوس، عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی افزایش یافته و این روند افزایشی با افزایش شیب معکوس، ادامه پیدا می‌کند. لذا نتایج این قسمت از تحقیق نشان می‌دهد که افزایش شیب معکوس به تنهایی، اثری در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی ندارد.

جهت مقایسه نتایج این بخش از تحقیق با نتایج دیگر محققان، با استفاده از رابطه ۴ به محاسبه عمق نسبی جریان (نسبت  $\frac{Y_2}{Y_1}$ ) پرداخته شد که جهت خلاصه سازی پارامترها، این نسبت در رابطه ۴ با  $\gamma$  نشان داده شد. لذا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از رابطه ۴ به استخراج عمق نسبی جریان پرداخته شد و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از اندازه گیری های آزمایشگاهی مقایسه شد و شکل ۶ بیانگر این مقایسه می باشد.



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با

رابطه ارائه شده توسط Palermo and Pagliara (2017)

همانگونه مشاهده می شود نتایج بدست آمده در این تحقیق تطابق نسبتاً خوبی ( $\pm 15\%$ ) با نتایج رابطه ارائه شده توسط پالمو و پالیارا دارا می‌باشد

### نتایج حاصل از اثر شیب معکوس در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی

جهت بررسی اثر شیب معکوس در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی، نتایج طول نسبی پرش هیدرولیکی در آزمایشات شاهد با نتایج آزمایشات انجام شده در ۴ شیب منفی با بستر صاف در اعداد فرود مختلف مورد بررسی و مقایسه انجام قرار گرفت و جهت تعیین درصد

## نتایج حاصل از اثر زبری در کنترل عمق نسبی ثانویه و همچنین طول نسبی پرش هیدرولیکی

### نتایج حاصل از اثر زبری در کنترل عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی

جهت بررسی اثر زبری در میزان کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی، ابتدا آزمایشات شاهد انجام شد. آزمایشات شاهد در سطح صاف و به صورت افقی در اعداد فرود مختلف انجام شدند. جهت بررسی میزان کمی تغییرات عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، از نسبت  $\frac{Y_2}{Y_1}$  که از آنالیز ابعادی بدست آمد، استفاده گردید و این نسبت به نام عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ادامه جهت بررسی میزان موثر بودن زبری در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، با استفاده از رابطه ۱۲ به محاسبه درصد کاهش عمق ثانویه بخاطر زبر نمودن بستر، پرداخته شد.

$$\%R = \frac{\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}} - \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{(D \text{ or } T) \text{ and } H \text{ Bed}}}{\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}}} \times 100 \quad (12)$$

در رابطه فوق اندیس های S, D, T, H به ترتیب بیانگر سطح صاف، سطح زبر از نوع لوزی، سطح زبر از نوع مثلث و سطح افقی می‌باشند. همچنین R% بیانگر درصد کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی بخاطر زبر نمودن بستر می‌باشد نتایج نشان داد زبری های از نوع لوزی و مثلث به ترتیب به میزان ۹/۶ و ۹/۱ درصد در کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی موثر واقع شدند. لذا مشاهده شد که زبری از نوع لوزی توانایی بیشتری در کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی دارا می باشد.

### نتایج حاصل از اثر زبری در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی

جهت بررسی اثر زبری در میزان کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی، ابتدا از آزمایشات شاهد انجام شده در سطح صاف و به صورت افقی استفاده شد. در این مرحله طول نسبی پرش هیدرولیکی  $\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)$  برای هر آزمایش محاسبه شد. جهت بررسی میزان موثر بودن زبری در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی از رابطه ۱۳ استفاده گردید.

$$\%R = \frac{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}} - \left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{(D \text{ or } T) \text{ and } H \text{ Bed}}}{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}}} \times 100 \quad (13)$$

در رابطه فوق R% بیانگر درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی بخاطر زبر نمودن بستر می‌باشد و دیگر اندیس ها قبلاً توضیح داده شدند. نتایج این بررسی نشان داد زبری های از نوع لوزی و مثلث به ترتیب به میزان ۴۳/۸ و ۵۲/۸ درصد در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی موثر واقع شدند و زبری از نوع مثلث نیز قابلیت بیشتری در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی از خود نشان داد.

$$\%R = \frac{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}} - \left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{(D \text{ or } T) \text{ and } A \text{ Bed}}}{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}}} \times 100 \quad (16)$$

در رابطه فوق  $R\%$  بیانگر درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی بخاطر زبر نمودن بستر در سطوح شیبدار با شیب معکوس می‌باشد. پس از استفاده از رابطه ۱۶، مشاهده شد که بسترهای زبر لوزی و مثلث در سطوح شیبدار مختلف بطور متوسط در تمامی شیب های معکوس مورد آزمایش به ترتیب به میزان  $43/8\%$  و  $55/1\%$  درصد در کاهش طول پرش هیدرولیکی موثر واقع شدند.

جهت بررسی میزان تغییر طول نسبی پرش هیدرولیکی در شیب‌های مختلف، با استفاده از رابطه ۱۶، میزان درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی در شیب های مختلف محاسبه شد و نتایج نشان داد که با افزایش درصد شیب معکوس، طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش یافت و در شیب معکوس  $0/075$  درصد کمترین درصد طول نسبی پرش هیدرولیکی مشاهده شد. در ادامه در شیب معکوس  $0/1$  درصد مشاهده شد که طول نسبی پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. لذا در شیب معکوس  $0/075$  درصد با استفاده از رابطه ۱۶ بیشترین میزان درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی مشاهده شد. این میزان به ترتیب برای زبری های از نوع لوزی و مثلث بطور متوسط برابر  $52/8\%$  و  $56/8\%$  درصد محاسبه شد. همچنین می‌توان بیان نمود که در تمامی شیب‌های معکوس استفاده از زبری از نوع مثلث قابلیت بیشتری در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی دارا می‌باشد بگونه ای که زبری از نوع مثلثی قابلیت کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی حداکثر تا  $56/8\%$  درصد ( در شیب معکوس  $0/075$  درصد) را از خود نشان داده است.

### روابط استخراج شده

پس از جمع بندی نهایی نتایج استخراج شده با استفاده از نرم افزار SPSS و بر اساس آنالیز ابعادی انجام شده به استخراج روابط بدون بعد پرداخته شد. فرم کلی ارتباط نسبت عمق پایین دست به بالادست بر حسب عدد فرود و شیب جریان به صورت رابطه ۱۷ می‌باشد.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = aF_n^b S^c \quad (17)$$

در جدول ۳ مقادیر بدست آمده برای ضرایب موجود در روابط فوق که با استفاده از نرم افزار SPSS بدست آمد مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است با توجه به نزدیک بودن نتایج زبری های لوزی و مثلث، روابط استخراج شده بر مبنای هر دو زبری بوده و از نتایج هر دو نوع زبری بصورت همزمان جهت استخراج روابط استفاده شد.

جدول ۳- ضرایب بدست آمده مربوط به رابطه ۱۷

$R^2$	C	b	A	
0.99	$-2.7 \times 10^{-8}$	0.92	1.64	سطح صاف
0.99	$-4.3 \times 10^{-9}$	0.98	1.42	سطح زبر

در ادامه جهت بررسی نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق جریان در بالادست پرش هیدرولیکی از رابطه ۱۸ استفاده شد.

$$\frac{L_j}{Y_1} = aF_n^b S^c \quad (18)$$

کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی بخاطر اعمال شیب معکوس از رابطه ۱۴ استفاده شد.

$$\%R = \frac{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}} - \left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } A \text{ Bed}}}{\left(\frac{L_j}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}}} \times 100 \quad (14)$$

در رابطه فوق اندیس A بیانگر شیب معکوس می‌باشد و بقیه اندیس‌ها قبلاً معرفی شدند. همانگونه فرمول ۱۴ نیز نشان می‌دهد در این قسمت از بررسی، از هیچ نوع زبری استفاده نشده و فقط از سطوح صاف جهت انجام آزمایشات استفاده شده است تا اثر شیب معکوس به تنهایی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد با افزایش شیب معکوس، طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و این روند تا شیب معکوس  $0/1$  ادامه یافت. همچنین با استفاده از رابطه ۱۴ مشاهده شد که میزان درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی در شیب  $0/1$  برابر  $17/2\%$  درصد بدست آمد.

### نتایج حاصل از اثر توام زبری و شیب معکوس در کنترل عمق نسبی ثانویه و همچنین طول نسبی پرش هیدرولیکی

### نتایج حاصل از اثر توام زبری و شیب معکوس در کنترل عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی

جهت بررسی و کنترل نهایی اثر توام زبری و شیب معکوس در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی، آزمایشاتی در شیب‌های معکوس ذکر شده در بخش ۲-۲-۳ انجام شد با این تفاوت که بستر این شیب‌ها با زبری‌های مثلث و لوزی طبق جدول ۱ پوشش داده شدند و نتایج این آزمایشات با نتایج آزمایشات شاهد (آزمایشات انجام شده در سطوح بدون زبری و افقی) مقایسه گردید. جهت بررسی روند تغییر عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی با زبر نمودن بستر به همراه ایجاد شیب معکوس، با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبات لازم انجام شد.

$$\%R = \frac{\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}} - \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{(D \text{ or } T) \text{ and } A \text{ Bed}}}{\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)_{S \text{ and } H \text{ Bed}}} \times 100 \quad (15)$$

با بررسی اندیس های رابطه ۱۵ مشاهده می‌شود که در این رابطه اثر همزمان زبری ( لوزی و مثلثی ) و شیب معکوس جهت بدست آوردن درصد کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی لحاظ شده است. این بررسی نشان داد که بهترین نتیجه در کنترل عمق نسبی پرش هیدرولیکی در شیب معکوس  $0/025$  درصد و استفاده از زبری‌های نوع لوزی و مثلث به ترتیب به میزان  $2/2\%$  و  $2/5\%$  درصد مشاهده شدند.

### نتایج حاصل از اثر توام زبری و شیب معکوس در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی

در ادامه بررسی روند کنترل و کاهش طول پرش هیدرولیکی به بررسی اثر توام زبری و شیب معکوس در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی پرداخته شد. جهت محاسبه درصد کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی از رابطه ۱۶ استفاده شد.

در جدول ۴ مقادیر بدست آمده برای ضرایب موجود در روابط فوق که با استفاده از نرم افزار SPSS بدست آمد مشاهده می شوند.

**جدول ۴: ضرایب بدست آمده مربوط به رابطه ۱۸**

	$R^2$	$C$	$b$	$a$
سطح صاف	0.96	$-0.087 * 10^{-8}$	1.04	5.32
سطح زبر	0.60	$-2.6 * 10^{-8}$	0.4	12.78

همانگونه در جدول های ۳ و ۴ مشاهده می شود مقدار ضریب C بسیار کوچک و ناچیز می باشد و می توان از آنها صرف نظر نمود. لذا روابط ۱۹ تا ۲۲ به ترتیب برای نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی و همچنین نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش هیدرولیکی در سطوح صاف و زبر ارائه می شوند.

همانگونه در جدول های ۳ و ۴ مشاهده می شود مقدار ضریب C بسیار کوچک و ناچیز می باشد و می توان از آنها صرف نظر نمود. لذا روابط ۱۹ تا ۲۲ به ترتیب برای نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی و همچنین نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش هیدرولیکی در سطوح صاف و زبر ارائه می شوند.

**جدول ۴: ضرایب بدست آمده مربوط به رابطه ۱۸**

	$R^2$	$C$	$b$	$a$
سطح صاف	0.96	$-0.087 * 10^{-8}$	1.04	5.32
سطح زبر	0.60	$-2.6 * 10^{-8}$	0.4	12.78

همانگونه در جدول های ۳ و ۴ مشاهده می شود مقدار ضریب C بسیار کوچک و ناچیز می باشد و می توان از آنها صرف نظر نمود. لذا روابط ۱۹ تا ۲۲ به ترتیب برای نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی و همچنین نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش هیدرولیکی در سطوح صاف و زبر ارائه می شوند.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = 1.64F_n^{0.92} \quad (۱۹) \text{ سطوح صاف}$$

$$\frac{Y_2}{Y_1} = 1.42F_n^{0.98} \quad (۲۰) \text{ سطوح زبر}$$

$$\frac{L_j}{Y_1} = 5.324F_n^{1.04} \quad (۲۱) \text{ سطوح صاف}$$

$$\frac{L_j}{Y_1} = 12.78F_n^{0.4} \quad (۲۲) \text{ سطوح زبر}$$

بنابراین روابط فوق را می توان برای زبری با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ استفاده نمود.

## نتیجه گیری

در این تحقیق دو نوع زبری به شکل های لوزی و مثلث در مقایسه با سطح صاف، در شیب معکوس صفر تا ۰/۱ درصد مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج آزمایشات مربوط به بررسی اثر زبری در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی نشان داد که زبری های از نوع لوزی و مثلثی (در سطح افقی) به ترتیب به میزان ۹،۶ و ۹،۱ درصد در کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی موثر واقع شدند. همچنین نتایج مربوط به اثر شیب معکوس (در سطح بدون زبری) بر کنترل عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی نشان داد که ایجاد و افزایش شیب معکوس در بازه مورد آزمایش، به تنهایی تاثیری در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی نخواهد داشت. نتایج استفاده توأم زبری و شیب معکوس نشان داد که در شیب های کمتر از ۰،۰۵ درصد، زبر نمودن بستر شیب دار (از نوع زبری مثلثی) حداکثر تا ۲،۵ درصد می تواند در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی موثر واقع شود. جهت بررسی کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی مشاهده شد که زبر نمودن بستر از نوع زبری لوزی و مثلثی در سطوح افقی بطور متوسط به ترتیب

کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی در شیب ۵۲/۸ و ۴۳/۸ درصد در کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی موثر واقع شد. همچنین با بررسی اثر شیب معکوس در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی (در سطح بدون زبری)، مشاهده شد که بیشترین درصد کاهش طول نسبی در شیب ۰/۱ درصد و آن هم به میزان ۱۷/۲ درصد مشاهده شد. در نهایت پس از بررسی توأم اثر زبری و شیب معکوس در کنترل طول نسبی پرش هیدرولیکی، مشاهده شد که در بیشترین میزان، کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی در شیب ۰،۰۷۵ درصد و زبری از نوع لوزی و مثلثی، به ترتیب به میزان ۵۲/۸ و ۵۶/۸ درصد، مشاهده شد. لذا در مجموع به عنوان نتیجه این تحقیق می توان بیان نمود که اگر هدف، کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی باشد، بهترین گزینه جهت کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، زبر نمودن بستر با استفاده از زبری های از نوع مثلث (با مشخصات مندرج در جدول ۱) می باشد که باعث کاهش ۹/۱ درصدی در عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می شود. همچنین چنانچه نیاز به کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی باشد، استفاده از زبری مثلث با اعمال شیب معکوس ۰/۰۷۵ درصد توصیه می شود که مجموع این دو عامل می تواند به میزان ۵۶/۸ درصد طول نسبی پرش هیدرولیکی را کاهش دهد.

## ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

## حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

## مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: سید محسن سجادی؛  
روش شناسی و تحلیل داده ها: سید محسن سجادی، مصیب حقیقی نژاد، سید امین اصغری پری، محمود شفاعی بجستان، مهدی زینی وند؛  
نظارت و نگارش نهایی: مهدی زینی وند.

## تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

## References

1. Akan AO. Open channel hydraulics. Elsevier; 2011 Feb 24. 200-265.
2. Pagliara S, Palermo M. Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-

sloped beds. Journal of Hydraulic Research. 2015 Mar 4;53(2):243-52.

3. Pagliara S, Das R, Palermo M. Energy dissipation on submerged block ramps. Journal of irrigation and drainage engineering. 2008 Aug;134(4):527-32.
4. RAVAR Z., FARHOUDI J., NAJANDALI A.. EFFECT OF VERTICAL TRAPEZOIDAL ROUGH BED ON HYDRAULIC JUMP

- CHARACTERISTICS AND ENERGY LOSS. JOURNAL OF WATER AND SOIL (AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)[Internet]. 2012;26(1):85-94. Available from: <https://sid.ir/paper/141778/en>.
5. Ghazali, M., Samadi brojni, H., Ghorbani, B., & Rahmati, A. A Laboratory study of Velocity profile at Hydraulic Jump on Triangular Corrugated Bed. *Irrigation and Water Engineering*, 2012. 2(4), 117-128.
  6. Pourabdollah N, Honar T, Fatahi R. Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope. *Water and Soil Science*. 2015 May 22;25(1):143-52.
  7. Macián-Pérez JF, Vallés-Morán FJ, Sánchez-Gómez S, De-Rossi-Estrada M, García-Bartual R. Experimental Characterization of the Hydraulic Jump Profile and Velocity Distribution in a Stilling Basin Physical Model. *Water*. 2020 Jun;12(6):1758.
  8. Ghassemi A, Omid MH, NasrAbadi M, Raeesi Estabragh A. Evaluate and develop new relationships to estimate submerged hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2016 Dec 21;47(4): 755-64.
  9. Shojaeian Z, Dalir AH, Farsadzadeh D, Salmasi F. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Rectangular Sections on Inverse Slope. *Water and Soil Science*. 2011 Nov 22;21(3):49-60.
  10. Ghazali, M., Samadi Boroujeni, H., Ghorbani, B., and Fattahi Nafchi, R. 2010. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *J. Iran Water*. 4th year. No. 7th, Pp: 99-107. (In Persian)
  11. Saberi A, Mahpeykar MR, Teymourtash AR. Experimental Study and Numerical Simulation of the Circular Hydraulic Jump on the Concave Target Plate. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 Feb 1;20(2).
  12. Bélanger, J. B. 1828. "Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes Essay on the numerical solution of some problems relative to steady flow of water." Carilian-Goeury, Paris. (In French).
  13. Carollo FG, Ferro V, Pampalone V. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007 Sep;133(9):989-99.
  14. Shafai Bejestan M, Nici K. Effect of Roughness Shape on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump. *Water and Soil Science*. 2009 Jun 22;19(1):165-76.
  15. Palermo, M., & Pagliara, S. A review of hydraulic jump properties on both smooth and rough beds in sloping and adverse channels. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, .2017. 16(1), 91.
  16. Kazemianzadeh, A. And the shafaei Bejestan, M. (2008), "Experimental study of the effect of roughness arrangement on hydraulic jump characteristics in relaxation ponds". *Third Iranian Water Resources Management Conference*, October 387, Tabriz. (In Persian)
  17. Heller V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*. 2011 Jun 1;49(3):293-306.
  18. Hosseini, S. M. Abrishami, J. *Open Channel Hydraulics*. Mashhad: Emam Reza. 2005. (In Persian)
  19. Chanson H. *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier; 2004 May 25.
  20. RAO NG. Application of momentum equation in the hydraulic jump. *La Houille Blanche*. 1966 Jun 1(4):451-3.
  21. Kazemianzadeh, A. And Allah Daddy, K. and Shafaei Bejestan, M., "Experimental Investigation of the Impact of Roughness Height on Concentrated Depth Ratio and Rolling Length of Hydraulic Jump in Relaxation Ponds". *Third Iranian Water Resources Management Conference*, 2008. October 387, Tabriz. (In Persian)
  22. Peterka AJ. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation; 1964.