

Research Paper

Laboratory Study of the Effect of the Threshold Angle of Triangular Flip Bucket Spillways on the Stability of the RipRap in the DownstreamMehdi
Sayahi¹,Alireza
Masjedi^{2*},Amin
Bordbar³,Mohammad
Heidarnejad⁴,Aslan
Egdernezhad⁵

¹ Phd Student, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. . Email: mhs_8531@yahoo.com.

² Professor. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. 09166182574. Email: drmasjedi.2007@yahoo.com (Corresponding author)

³ Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Tel: 09171018480. Email: asefmn@yahoo.com.

⁴ Associate Professor. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Tel: 09113919533. Email: mo_he3197@yahoo.com

⁵ Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Tel: 09163111269. Email: a_eigder@ymail.com



10.22125/iwe.2023.420134.1757

Received:
December 5, 2023
Accepted:
April 15, 2024
Available online:
October 13, 2024

Keywords:
Triangular overflow,
water depth, energy
consumption, Riprap

Abstract

In this research, four triangular Flip bucket spillway replicas with four different threshold angles were made of fiberglass. Experiments were carried out using Ripraps with four different diameters in clear water. The results of this research showed that the highest stability number related to the spillway with a threshold of 45 degrees and the lowest stability number was observed in the spillway with a threshold of 15 degrees. In order to provide a relationship to estimate the relative diameter of the checkered stone, the variables of the investigation and the correlation coefficient of the results obtained from this relationship with the laboratory results for the triangular spillway were obtained as 0.85.

1. Introduction

Energy consumption in spillways is necessary to protect the structure and prevent erosion in the downstream of the structure. Flip bucket spillways are structures that are used for energy consumption and its use is developing day by day. Considering that the flow in spillways is supercritical, as a result, the kinetic energy of the flow at the end of the spillway is very high and can cause erosion downstream of the spillway. Therefore, a spillway needs an energy consuming structure at the end to reduce the excess energy output and to minimize the amount of erosion and scour downstream of the spillway. Downstream scouring of hydraulic structures is one of the major issues that have always attracted the

* **Corresponding Author:** Name

Address: Department, University, Country,

Email: Academic Email

Tel: Number

Mehdi Sayahi, Alireza Masjedi *, Amin Bordbar , Mohammad Heidarnejad Aslan Egdernezhad .. Laboratory Study of the Effect of the Threshold Angle of Triangular Flip Bucket Spillways on the Stability of the RipRap in the Downstream

attention of engineers and designers. Lochlan and Melville [3] considered the performance of the RipRAP layer acceptable before the depth of scour hole in it reaches 20 percent, the maximum depth of scour, without the presence of screed. Another design variable of the filter is determining its thickness and filter layer specifications. The tendency of the small particles in the cavities of the bottom of the gravel bed to get out leads to its destruction in the form of a sieve. The solution to prevent this type of destruction is to increase the thickness of the gravel layer and place a filter layer between the fine grain and the gravel. Masjedi et al. [4] conducted research on the effect of roughness on the stability of the RipRAP around the cylindrical bridge foundation. Experiments were carried out in a laboratory flume using two types of relative density of pebbles with four different diameters at a constant flow in clear water. The results of this research showed that the stability of the piles around the cylindrical base depends on two factors, the Froude number at the threshold of failure and the relative diameter of the piles. Also, under the same conditions, the presence of roughness in the cylindrical base in the arch increases the stability of the RipRAP formations around the cylindrical base.

Kikhaei and colleagues [2] conducted research on the RipRAP pattern at the construction site of the bridge foundation group. The results of this research showed that the area covered by RipRAP in the group of foundations has decreased for each foundation compared to a single foundation. Farhoudi and Sadat Helber [1] conducted research on the design of the diameter of RipRAP at the bottom of Stilling Basin using the Froude Number.

According to the review of the sources, in the current research, the aim of the study is to investigate the effect of the threshold angle of the triangular spillway on the stability of the RipRAP formations downstream of the spillway, which has not been studied much in this field.

2. Materials and Methods

The use of RipRap cover at the bottom of the spillway strengthens the bed and increases its resistance against the shear stress caused by the flow. One of the most important parameters for checking the resistance of RipRAP against shear stress caused by flow is the dimensionless parameter of stability number. Also, in the modeling of energy consumption in spillways, the most important goal is to determine the amount of energy loss due to different flow conditions.

the experiment the results of this research were carried out hydraulically in a laboratory flume located in the Islamic Azad University, Ahvaz branch, 8 meters long, 0.5 meters wide and 0.6 meters high. The walls of the flume were transparent and made of glass, so that the flow conditions were visible. The floor of the flume was considered to be smooth and stable and without slope. The triangular spillway model was made according to the USBR standard with a height of 40 cm and a length of 53.4 cm. In this research, four spillway models with a length of the spillway threshold of 2.5 cm and four spillway threshold angles of 15, 25, 35 and 45 degrees were made of fiberglass.

The RipRaps used in this research were made of round natural materials with a constant density of 2.1 with an average diameter of 9.52, 11.23, 12.7 and 23.1 mm. According to the criteria provided by Melville et al., the thickness of the RipRap layer was chosen to be twice the average tile diameter.

3. Results and Discussion

Results, In all experiments, after adjusting the flow intensity, the depth of water upstream of the spillway, immediately after the flow passed over the spillway, downstream of the spillway, the exit jet was formed from the triangular launcher, and then a hydraulic jump was formed. In each step, the desired variables were measured. Also, Froude number parameters in the condition of RipRAP instability, the relative diameter of the RipRAP in unstable conditions and RipRAP stability number were calculated. In this research, the tests were conducted to check the stability of the RipRap downstream in the triangular spillway at the angle of the threshold and the diameter of the RipRap at the threshold of movement. The effective variables in this research were the angle of the spillway threshold and the relative diameter of the RipRAP. The results of this research showed that the highest stability number related to the spillway with a threshold of 45 degrees and the lowest stability number

was observed in the spillway with a threshold of 15 degrees. Also, the relative diameter of the aggregates is also an effective factor in the stability of the aggregates, and the stability number at the threshold of movement in the four angles of the triangular spillway threshold decreases with the increase of the relative diameter of the aggregates. In order to provide a relationship to estimate the relative diameter of the RipRap, the variables of the investigation and the correlation coefficient of the results obtained from this relationship with the laboratory results for the triangular spillway were obtained as 0.85.

4. Six important references

- 1) Farhoudi, J. and Sadast Helbar, SM. 2009. Design of Stable Riprap Downstream of Stilling Basins Using Froud Number. J soil and water Vol (19) No1
- 2) Kikhaei, M. M. Hyderpour and S.F. Mousavi .2009. investigation of riprap covering pattern in the place of construction of cylindrical foundations in bridges, Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 13(49): 13-29. (In Persian)
- 3) Lauchlan, CS. Melville, BW. 2001. Riprap protection at bridge piers, ASCE J Hydr Eng 127: 5.30-38.
- 4) Masjidi, A. and Taeidi, A. 2017. Investigating the effect of roughness on the stability of stone slabs around the cylindrical foundation of the bridge in the river arch, Journal of Water Engineering/Year 10/Spring 10(32), 1-12. (In Persian).
- 5) Simarro, G., Chreties, C., & Teixeria, L. 2011. Riprap sizing for pile group. Journal of Hydraulic Engineering, 137(12): 1676-1679.
- Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers. J Hydr Eng ASCE, 115(12): 1615-1630.
- 6) Yoon, T. H., Yoon, S. B., & Yoon, K. S. 1995. Design of riprap for scour protection around bridge piers, 26th IAHR Congress, Vol. 1: 105-110. UK

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to

بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه آستانه سرریزهای جامی مثلثی در پایداری سنگ چین در پایین دست

مهدی صیاحی^۱، علیرضا مسجدی^۲، امین بردبار^۳، محمد حیدرنژاد^۴، اصلان اگدرنژاد^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

مقاله پژوهشی

چکیده

این تحقیق به منظور بررسی اثر زاویه آستانه سرریز جامی مثلثی در پایداری سنگ چین در پایین دست آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌هایی در چهار مدل سرریز جامی مثلثی با چهار زاویه آستانه متفاوت از جنس فایبر گلاس استفاده شد. آزمایش‌ها با استفاده از یک چگالی سنگ چین با چهار قطر مختلف در حالت آب زلال انجام شد. در هر آزمایش عمق جریان در شرایط آستانه حرکت اندازه گیری و سپس با استفاده از داده‌های بدست آمده عدد پایداری محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد بیشترین عدد پایداری مربوط به سرریز با آستانه ۴۵ درجه و کمترین عدد پایداری در سرریز با آستانه ۱۵ درجه می‌باشد. همچنین قطر نسبی سنگ چین‌ها نیز عامل موثر در پایداری سنگ چین‌ها بوده و عدد پایداری در آستانه حرکت در چهار زاویه آستانه سرریز مثلثی با افزایش قطر نسبی سنگدانه کاهش می‌یابد. به منظور ارایه رابطه‌ای جهت تخمین قطر نسبی سنگ چین متغیرهای بررسی و ضریب همبستگی نتایج حاصل از این رابطه با نتایج آزمایشگاهی برای سرریز مثلثی ۰/۸۵ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: سرریز مثلثی، عمق پایاب، استهلاک انرژی، سنگ چین

۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۲۵۰۰۹۵۰۱، پست الکترونیک: mhs_8531@yahoo.com

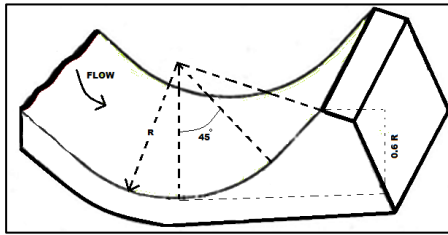
۲ استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۶۶۱۸۲۵۷۴، پست الکترونیک: drmasjedi.2007@yahoo.com

۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۷۱۰۱۸۴۸۰، پست الکترونیک: asefmm@yahoo.com

۴ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۱۳۹۱۹۵۳۳، پست الکترونیک: mo_he3197@yahoo.com

۵ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۶۳۱۱۱۲۶۹، پست الکترونیک: a_eigder@ymail.com

مقدمه



شکل (۱): باکت بیوسته

در مطالعات مربوط به استفاده از سنگچین جهت محافظت از سازه‌های هیدرولیکی، روش‌های مختلف طراحی سنگ چین، تعیین اندازه متوسط سنگ ها، ضخامت لایه سنگ چین، عمق سنگ چین و نحوه استقرار سنگ چین‌ها و پایداری لایه‌های سنگ چین انجام شد. پوزی (۱۹۷۴) حرکت اولین دانه‌های سنگ چین را به عنوان معیار تخریب در نظر گرفت. پارولا (۱۹۹۳) از سنگ چین سه لایه‌ای با لایه میانی رنگین استفاده کرد. وی آستانه تخریب سنگچین را زمانی می‌داند که لایه رنگ آمیزی شده پس از ۳۰ دقیقه بدون حرکت نمایان شود. چیو (۱۹۹۵) در تحقیقات خود با در نظر گرفتن مدت زمان ۱۵ دقیقه برای مشاهده گسیختگی سنگ چین در اطراف پایه‌های پل، ناپایداری لایه سنگ چین را به شرایط گسیختگی کامل آن مرتبط نموده است. در واقع از نظر او حرکت چند سنگدانه از لایه سنگچین برای تخریب آن کافی نمی‌باشد.

لوجلان و ملویل (۲۰۰۱) عملکرد لایه سنگ چین را قبل از اینکه عمق حفره آبشستگی در آن به ۲۰ درصد، حداکثر عمق آبشستگی، بدون وجود سنگچین برسد قابل قبول دانستند. یکی دیگر از متغیرهای طراحی سنگچین، تعیین ضخامت آن و مشخصات لایه فیلتر است. تمایل خروج ذرات ریز موجود در حفره‌های بستر زیرین سنگچین منجر به تخریب آن از نوع غربالی می‌شود راه حل جلوگیری از این نوع تخریب، افزایش ضخامت لایه سنگچین و قرار دادن لایه فیلتر بین ریزدانه و سنگچین است. ورمن (۱۹۸۹) در آزمایش‌های خود نشان داد که اگر ضخامت لایه سنگچین کافی باشد نیازی به قرار دادن لایه فیلتر زیرین نخواهد بود. ورمن نتیجه گرفت که عملکرد یک سیستم سنگچین چندلایه ای با دانه بندی‌های مختلف، با یک لایه منفرد همگن با ضخامت لایه ای کمتر، یکسان خواهد بود. مسجدی و همکاران

استهلاک انرژی در سرریزها به منظور حفاظت سازه و جلوگیری از بروز فرسایش در پایین دست سازه ضروری است. سرریزهای جامی سازه‌های هستند که جهت استهلاک انرژی استفاده می‌شوند و استفاده از آن روز به روز در حال توسعه است. با توجه به اینکه جریان در سرریزها فوق بحرانی می‌باشد، در نتیجه انرژی جنبشی جریان در انتهای سرریز بسیار زیاد می‌باشد و می‌تواند موجب فرسایش در پایین دست سرریز شود. بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستهلاک کننده انرژی در قسمت انتهایی دارد تا از انرژی مازاد خروجی کاسته و میزان فرسایش و آبشستگی در پایین دست سرریز به حداقل برسد. آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از مسائل عمده‌ای است که همواره مورد توجه مهندسين و طراحان بوده است. حفره آبشستگی ایجاد شده در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی موجب افزایش جریان زیر سازه‌ای و در نتیجه پیشرفت حفره آبشستگی به سمت سازه می‌شود که می‌تواند پایداری سد، سرریز و سازه‌های مرتبط را تهدید کرده و حتی منجر به شکست آنها گردد. روش‌های مختلفی برای جلوگیری و کاهش آبشستگی در سازه‌های هیدرولیکی پیشنهاد شده است که می‌توان آنها را به دو روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی کرد. در روش مستقیم مقاومت بستر در مقابل تنش‌های وارده افزایش می‌یابد. این کار با تقویت مصالح موجود به مصالح مقاومت تر انجام می‌شود، از روش‌های معمول و اقتصادی استفاده از بلوک‌های بتنی و سنگچین می‌باشد. در روش غیر مستقیم با اصلاح الگوی جریان در اطراف سازه مورد نظر باعث کاهش نیروی مخرب و کاهش آبشستگی می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از پرتاب کننده‌های جامی به دلیل مزایای اقتصادی این سازه در مقایسه با سایر مستهلاک کننده‌ها مثل حوضچه آرامش بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱).

در خصوص اثر مانع با دندان در پرتاب کننده جامی شکل روی آبشستگی پایین دست انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد وجود دندان به شکل مثلثی باعث کاهش ۱۲/۷ درصد آبشستگی در پایین دست می‌شود. اسکندری و همکاران (۲۰۱۹)، تحقیقی بر روی تاثیر هندسه پایین دست پرتابه جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب آن انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد که وجود دندان در پرتاب کننده باعث کنترل عمق آبشستگی در پایین دست می‌شود. همچنین پرتاب کننده جامی شکل با دندان‌های مستطیلی حدود ۱۳ درصد کاهش آبشستگی ایجاد می‌کنند. همان طور که اشاره شد مطالعات گسترده‌ای روی سنگ چین در پایین دست سرریز جامی انجام شده است ولی تاکنون مطالعات جامعی در مورد اثر زاویه آستانه سرریز مثلثی روی پایداری سنگ چین در پایین دست آن انجام نشده است. در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف روی مدل‌های گوناگون، رابطه‌ای جهت تخمین اندازه قطر سنگ چین در پایین دست سرریز مثلثی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

استفاده از پوشش سنگ چین در پائین دست سرریز باعث تقویت بستر و بالا بردن مقاومت آن در برابر تنش برشی ناشی از جریان می‌شود. یکی از پارامترهای مهم برای بررسی مقاومت سنگ چین در برابر تنش برشی ناشی از جریان، پارامتر بدون بعد عدد پایداری است. همچنین تعیین میزان افت انرژی در اثر شرایط مختلف جریان، یکی از پارامترهای مهم در استهلاک انرژی در سرریزها می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها با فرض ثابت بودن خصوصیات سیال، رابطه بین پارامترهای موثر بر پایداری سنگ چین و استهلاک انرژی در حالت تعادل بصورت ذیل ارایه می‌شود:

$$f1 = (B, \alpha, d50, y_r, V_r, g, G_s) \quad (1)$$

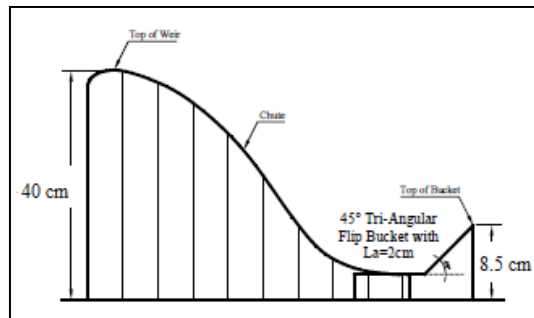
در رابطه (۱)، B عرض سرریز، α زاویه آستانه، $d50$ قطر متوسط سنگ چین، y_r عمق ناپایداری جریان، V_r سرعت جریان در شرایط ناپایداری، g شتاب ثقل، G_s چگالی سنگ چین است. با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه (۱) بصورت زیر بدون بعد می‌شود:

(۱۳۹۶) در خصوص بررسی تاثیر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه‌ای پل تحقیق انجام دادند. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با استفاده از دو نوع چگالی نسبی سنگ چین با چهار قطر متفاوت در دبی ثابت در حالت اب زلال انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که پایداری سنگ چین‌ها در اطراف پایه استوانه‌ای به دو عامل عدد فرود در آستانه شکست و قطر نسبی سنگ چین‌ها وابسته است. همچنین در شرایط یکسان، وجود زبری در پایه استوانه‌ای در قوس باعث افزایش پایداری سنگ چین‌ها در اطراف پایه استوانه‌ای می‌شود.

یون و همکاران (۱۹۹۵) با اصلاح و توسعه روش پارولا روشی دقیقتر و جامع تر را برای طراحی سنگچین دور پایه ارائه دادند. در این روش اثر واسنج‌های مختلف در پایداری سنگچین به صورت ضرایب تصحیح در مورد عدد پایداری اعمال می‌گردد.

تحقیقات متعددی در مورد قطر سنگچین پایدار در پایین دست حوضچه‌های آرامش صورت گرفته و روابط مختلفی برای تعیین قطر سنگچین ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روابط پیترکا (۱۹۶۸)، پیلارزیخ (۱۹۹۰)، اسکارامیا و می‌مرکز تحقیقات والینگفورد (۱۹۹۲)، فرهودی و ولیزادگان (۲۰۰۴) اشاره نمود. سیمارو و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقاتی در مورد تعیین اندازه سنگ چین به منظور حفاظت از پایه‌های پل در مقابل فرسایش انجام دادند. در این تحقیق اثر هیدرولیک جریان و همچنین فاصله بین پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی با چهار اندازه سنگ چین با شیب ۷ درصد انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد فاصله بین پایه‌های پل تأثیر کمی بر روی اندازه سنگ چین دارد. کیخانی و همکاران در خصوص الگوی سنگ چین در محل احداث گروه پایه‌های پل‌ها تحقیقی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد مساحت محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه‌ها برای هر پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است. فرهودی و سادات هلبر (۲۰۰۹) تحقیقی درباره طراحی قطر سنگچین پایدار در پایاب حوضچه‌های آرامش با استفاده از عدد فرود جریان انجام دادند. صفرنژادی و همکاران (۲۰۱۹)، تحقیقی

انجام شد. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه ساخته شد و در نتیجه شرایط جریان قابل مشاهده بود. کف فلوم صاف و ثابت و بدون شیب در نظر گرفته شد. مدل سرریز مثلثی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۴۰ سانتی متر و طول ۵۳/۴ سانتی متر ساخته شد. در این تحقیق از چهار مدل سرریز با طول آستانه سرریز ۲/۵ سانتی متر و چهار زاویه آستانه سرریز ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه از جنس فایبر گلاس ساخته شد (شکل ۲).



شکل (۲): نمای از سرریز مثلثی

بستر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به معیار ارائه شده توسط ملویل و همکاران ضخامت لایه سنگ چین دو برابر قطر متوسط سنگ چین انتخاب شد.

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مدل سرریز در محلی که ۷ متر از ابتدای فلوم مستقیم فاصله داشت نصب شد تا طول لازم برای ایجاد جریان یکنواخت در بالادست تامین گردد. سپس سنگ چین مورد نظر با ضخامت دو برابر قطر متوسط سنگ چین و هم تراز با مصالح بستر در پایین دست سرریز قرار داده شد (شکل ۲). نحوه انجام آزمایش بدین صورت بود که ابتدا پمپ روش می‌شد، جریان وارد فلوم می‌گردید، سپس دبی با شیر فلکه مخصوص تنظیم و توسط سرریز لبه تیز مثلثی در بالادست فلوم اندازه گیری شد. به منظور کالیبراسیون سرریز لبه مثلثی از روش حجمی استفاده شد. در هر دبی با استفاده از اشل، عمق جریان در بالادست سرریز به فاصله ۶۰ سانتی متر به دلیل اینکه از تغییر پروفیل سطح آب در بالادست فاصله داشته باشد، اندازه گیری شد. پس از تنظیم دبی مورد نظر، دریچه انتهایی به تدریج بسته تا عمق آب پایین دست سرریز یا عمق پایاب افزایش یابد. عمق پایاب تا جایی افزایش می‌یافت که پرش هیدرولیکی بافاصله پس از محل برخورد جت به کف سنگ

$$f_2 = \left(\frac{d50}{y_t}, \alpha, Fr_t, SN_t \right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، $d50/y_t$ قطر نسبی سنگ چین، α زاویه آستانه سرریز، Fr_t عدد فرود در شرایط ناپایداری و SN_t عدد پایداری است. آزمایش‌های این تحقیق به صورت هیدرولیکی در فلوم آزمایشگاهی واقع در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به طول ۸، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۶ متر

سنگ چین‌های بکار رفته در این تحقیق از مصالح طبیعی گرد گوشه با چگالی ثابت ۲/۱ با اندازه قطر متوسط ۹/۵۲، ۱۱/۲۳، ۱۲/۷ و ۲۳/۱ میلی متر استفاده شد. برای تعیین مساحت سنگ چین در پایین دست سرریز، آزمایش زمان تعادل بدون قرار گیری سنگ چین در پایین دست سرریز به منظور بررسی حداکثر ابعاد چاله آبشستگی انجام شد. در این آزمایش به مدت ۴ ساعت بر روی هر یک از مدل سرریزها بطور جداگانه بدون سنگ چین در یک لایه از ماسه به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر با دبی حداکثر ۲۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. در انتهای آزمایش، پمپ خاموش و دریچه انتهایی بسته شد تا آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شود تا تاثیری بر روی توپوگرافی بستر ایجاد نگردد. پس از تخلیه کامل آب از درون کانال، محدوده چاله آبشستگی در پایین دست سرریزها توسط عمق سنج لیزری با دقت میلی متر اندازه گیری شد. در انتهای آزمایش پس از زهکشی کانال، محدوده چاله آبشستگی برای انجام آزمایش‌ها بصورت مستطیلی با طول ۵۰ سانتی متر و عرض ۴۰ سانتی متر در پایین دست سرریز انتخاب شد. بر اساس مطالعات ملویل و همکاران (۲۰۰۷) شکل چیدمان سنگ چین در پایین دست سرریزها بصورت مستطیلی و هم تراز مصالح

اینکه عمق اولیه پرش به دلیل وجود هوای زیاد در جریان لبه پایین دست پرتابه، بطور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبود لذا برای اندازه‌گیری این عمق، چون جریان بعد از پرتابه فوق بحرانی است با تشکیل پرش هیدرولیکی بافاصله پس از پرتابه و اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش، با فرض ثابت بودن مومنتم در دو طرف پرش و صرفنظر از افت‌های اصطکاکی، عمق اولیه پرش از رابطه اعماق مزدوج پرش بدست آمد. پس از این مرحله انرژی دو طرف سرریز با استفاده از اندازه‌گیری‌های عمق و سرعت از رابطه برنولی محاسبه و تلفات انرژی در پرتابه‌های مختلف محاسبه شد (شکل ۳).

چین تشکیل شود. هدف از ایجاد این پرش اندازه‌گیری عمق جریان ناپایدار پس از عبور از پرتابه است. سپس دریچه انتهایی به آهستگی باز شد تا شرایط جریان برای جابجایی کم ذرات سنگ چین به وجود آید. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق جریان در طول فلوم نحوه حرکت ذرات سنگ چین بصورت چشمی بررسی گردید. در شرایطی که ذرات سنگ چین به آرامی شروع به حرکت کردند، این شرایط را آستانه حرکت گفته و در این لحظه عمق جریان در یک نقطه ثابت در فلوم اندازه‌گیری و به عنوان عمق جریان ناپایداری در نظر گرفته شد. در کلیه آزمایش‌ها با توجه به



شکل (۳): سرریز مثلثی با سنگ چین در پایین دست

متغیرهای مورد نظر اندازه‌گیری شدند. همچنین پارامترهای عدد فرود در شرایط ناپایداری سنگ چین (Fr_t) ، قطر نسبی سنگ چین در شرایط ناپایداری $(d50/y_t)$ و عدد پایداری سنگ چین (SN_t) محاسبه شدند. جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایش‌ها ارائه شده است.

نتایج و بحث

در همه آزمایش‌ها پس از تنظیم شدت جریان و عمق آب در بالادست سرریز، بلافاصله با عبور جریان از روی سرریز، جت خروجی از پرتاب کننده مثلثی در پایین دست تشکیل و بعد از آن پرش هیدرولیکی به وجود آمد. در هر مرحله

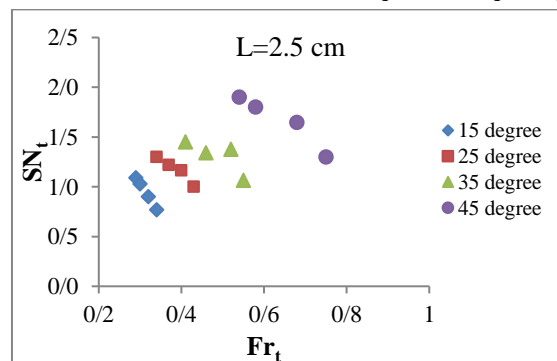
جدول (۱): مشخصات سنگ چین در پایین دست سرریز مثلثی مورد آزمایش

شماره آزمایش	α (degree)	d50 (mm)	y_t (cm)	V_t (m/s)	Fr_t	d_{50}/y_t	SN_t
۱	۱۵	۹/۵۲	۱۴/۳	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۰۷	۱/۰۹
۲	۲۵	۹/۵۲	۱۲/۹	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۰۷۴	۱/۳
۳	۳۵	۹/۵۲	۱۱/۵	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۰۸۳	۱/۴۵
۴	۴۵	۹/۵۲	۹/۶	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۰۹۹	۱/۹۰
۵	۱۵	۱۱/۲۳	۱۳/۹	۰/۳۶	۰/۳	۰/۰۸۱	۱/۰۳
۶	۲۵	۱۱/۲۳	۱۲/۲	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۰۹۲	۱/۲۲
۷	۳۵	۱۱/۲۳	۱۰/۷	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۱۰۵	۱/۳۴
۸	۴۵	۱۱/۲۳	۹/۱	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۱۲۳	۱/۸۰
۹	۱۵	۱۲/۷	۱۳/۵	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۰۹۴	۰/۹
۱۰	۲۵	۱۲/۷	۱۱/۶	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۱۰۹	۱/۱۶۴
۱۱	۳۵	۱۲/۷	۹/۸	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۱۲۹	۱/۳۷۸
۱۲	۴۵	۱۲/۷	۸/۲	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۱۵۵	۱/۶۴۷
۱۳	۱۵	۲۳/۱	۱۳	۰/۳۸	۰/۳۴	۰/۱۷۸	۰/۷۷
۱۴	۲۵	۲۳/۱	۱۱/۱	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۲۰۸	۱/۰
۱۵	۳۵	۲۳/۱	۹/۴	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۲۴۶	۱/۰۶۵
۱۶	۴۵	۲۳/۱	۷/۷	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۳۰	۱/۳۰۰

بررسی پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود ناپایداری در پایین دست سرریز

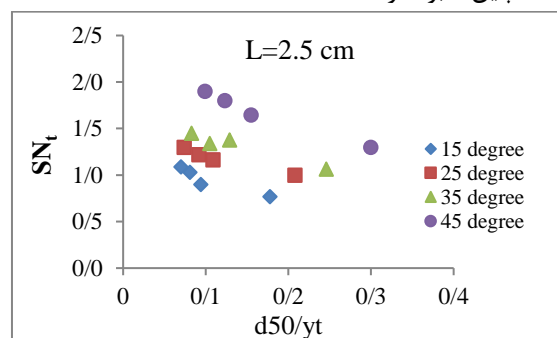
متوسط سنگ چین در کلیه زوایای آستانه سرریز می‌شود. همچنین مطابق شکل (۵) بیشترین عدد پایداری مربوط به سرریز با آستانه ۴۵ درجه و کمترین عدد پایداری در سرریز با آستانه ۱۵ درجه مشاهده شد. افزایش طول آستانه سرریز باعث افزایش طول مسیر حرکت جریان در روی سرریز شده و این موضوع باعث افزایش استهلاک انرژی در سرریز شده که در نتیجه جریان با انرژی کمتر به پایین دست منتقل می‌شود و سنگ چین‌ها پایداری بیشتر در این شرایط دارند.

در شکل ۴ نمودار بدون بعد پایداری سنگ چین و عدد فرود ناپایداری در چهار زاویه آستانه و چهار قطر سنگ چین نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد عدد فرود ناپایداری در آستانه حرکت عامل موثر در پایداری سنگ چین‌ها بوده و در یک چگالی ثابت، عدد پایداری در آستانه حرکت در زوایای مختلف آستانه سرریز با افزایش عدد فرود ناپایداری کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود در عمق ناپایداری در آستانه حرکت، سرعت جریان افزایش یافته و باعث کاهش پایداری سنگ چین‌ها در کلیه قطرهای



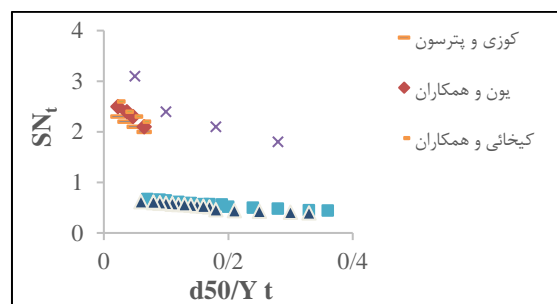
شکل (۴): پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود ناپایداری در پایین دست سرریز

پایداری در آستانه حرکت در چهار زاویه آستانه سرریز مثلثی با افزایش قطر نسبی سنگدانه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش اندازه سنگدانه‌ها، اثر درگیری آنها نسبت به هم کاسته شده و در نتیجه پایداری آنها کاهش می‌یابد. همچنین در کلیه قطرهای نسبی سنگدانه، عدد پایداری در سرریز با زاویه آستانه ۴۵ درجه به مراتب بیشتر از سرریز با زاویه آستانه ۱۵ درجه مشاهده بود.



شکل (۵): پایداری سنگ چین براساس قطر نسبی سنگدانه‌ها در سرریزها

(۱۹۷۳) استفاده شد. با توجه به شکل (۶) عدد پایداری اندازه گیری شده برای قطرهای نسبی مختلف این تحقیق با نتایج سایر محققین دیگر بصورت کاهشی بوده و نتایج همسو می‌باشد.



شکل (۶): مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج پژوهش‌های دیگر

$$\frac{d50}{y_t} = \frac{a}{(G_s - 1)^b} Fr^c \alpha^d \quad Fr \geq 0 \quad (3)$$

متغیرهای a ، b ، c و d مقادیر تجربی بوده که براساس روش کم‌ترین مربعات محاسبه گردید. با وارد کردن داده‌های آزمایشگاهی به نرم افزار SPSS و ایجاد رابطه‌ای معنادار بین پارامترهای بدون بعد ضرایب رابطه (۱) برای سرریز با چهار زاویه آستانه محاسبه شد که نتایج در جدول (۲) ارائه گردید. سپس مدل با ۷۰ درصد داده‌ها واسنجی و با ۳۰ درصد آنها صحت‌سنجی انجام گرفت. آنالیز آماری مربوط به ارزیابی

پایداری سنگ چین براساس قطر نسبی سنگدانه‌ها در سرریزها

شکل ۵ پایداری سنگ چین براساس قطر نسبی سنگ چین در چهار زاویه آستانه ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه و چهار قطر سنگ چین ۹/۵۲، ۱۱/۲۳، ۱۲/۷ و ۲۳/۱ میلی متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد قطر نسبی سنگ چین‌ها نیز عامل موثر در پایداری سنگ چین‌ها بوده و عدد

به منظور مقایسه تاثیر قطر نسبی سنگدانه‌ها بر پایداری سنگ چین در تحقیق حاضر با سایر محققین، از نتایج تحقیقاتی کیخانی و همکاران (۱۳۸۸)، مسجودی و همکاران (۱۳۹۶)، یون و همکاران (۱۹۹۵)، کوزی و پترسون

ارائه رابطه جهت تخمین اندازه قطر سنگ چین در پایین دست سرریز مثلثی

به منظور تخمین اندازه قطر نسبی سنگ چین‌ها در پایین دست سرریز با استفاده از نرم افزار SPSS بین عدد فرود در آستانه حرکت و قطر نسبی سنگدانه‌ها رابطه‌ای با استفاده از رگرسیون غیر خطی بین ماکزیمم قطر نسبی سنگدانه، چگالی سنگدانه و عدد فرود ناپایداری ایجاد گردید. از نتایج حاصل از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۳) در شرایط آستانه حرکت استخراج گردید.

معادله ارائه شده با ۳۰ درصد داده‌های که در توسعه این مدل‌ها استفاده نشده بودند در جدول (۲) آمده است.

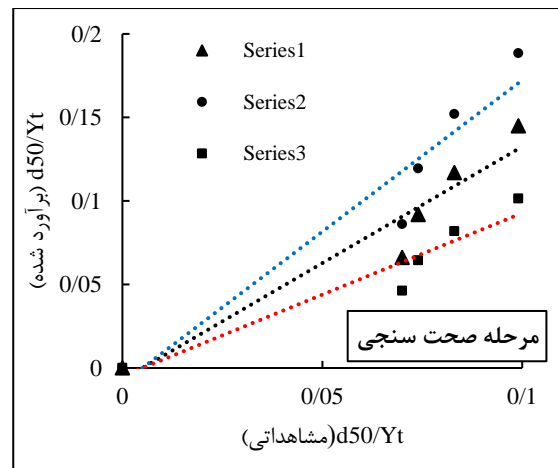
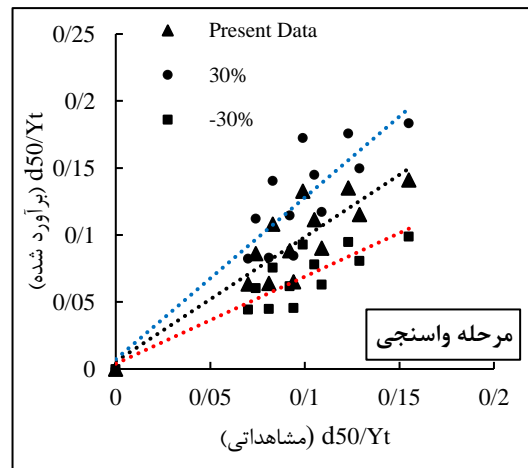
جدول (۲): برآورد پارامترهای رابطه ۳ در سرریز مثلثی با چهار زاویه آستانه مختلف

Max	Min	Std.error	Stimate	parameter
۱۰	-۱۰	۰/۱۳۳	۰/۰۲۱	A
۵	-۵	۰/۰۶۹	۰/۰۱۳	B
۱۶	-۱۶	۰/۱۹۸	۰/۲۷۰	C
۴۰	-۴۰	۰/۵۱۳	۰/۵۲۰	D

جدول (۳): آنالیز آماری رابطه پیشنهادی در سرریز مثلثی با چهار زاویه آستانه مختلف

صحت‌سنجی	واسنجی	آماره مورد بررسی	توضیح
۰/۹۷	۰/۹۹	d	شاخص توافق
-۶/۲۳	۰/۴۰	EF	کارایی مدل
۰/۳۶	۰/۱۸	NRMSE	جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده
۰/۰۲۳	-۰/۰۰۱۲	MBE	میانگین خطای اریب
۰/۰۲۹	۰/۰۱۸	RMSE	جذر میانگین مربعات خطا
۰/۹۳	۰/۵۶۰	R ²	ضریب تعیین
۱/۲۰	۱/۶۰	% Error	درصد خطا

در رابطه (۳) به منظور همبستگی میان مقادیر قطر نسبی سنگدانه‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده، نمودار شکل (۷) برای ۳۰ درصد باقی مانده داده‌ها نشان داده شد و دو خط چین +۳۰ و -۳۰ درصد معرف انحراف نسبی نسبت به خط ۴۵ درجه می‌باشد.



شکل (۷): همبستگی میان مقادیر قطر نسبی سنگ چین‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها به منظور بررسی پایداری سنگ چین در پایین دست در سرریز مثلثی در چهار زاویه آستانه و چهار قطر سنگ چین در آستانه حرکت مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای موثر در این تحقیق زاویه آستانه سرریز و قطر نسبی سنگ چین بود. نتایج این تحقیق نشان داد بیشترین عدد پایداری مربوط به سرریز با آستانه

۴۵ درجه و کمترین عدد پایداری در سرریز با آستانه ۱۵ درجه مشاهده شد. همچنین قطر نسبی سنگ چین‌ها نیز عامل موثر در پایداری سنگ چین‌ها بوده و عدد پایداری در آستانه حرکت در چهار زاویه آستانه سرریز مثلثی با افزایش قطر نسبی سنگدانه کاهش می‌یابد. به منظور ارزیابی رابطه‌ای جهت تخمین قطر نسبی سنگ چین متغیرهای بررسی و ضریب همبستگی نتایج حاصل از این رابطه با نتایج آزمایشگاهی برای سرریز مثلثی ۰/۸۵ بدست آمد.

منابع

- حیدرنژاد، م.، اسکندری، ا.، مسجدی، ع.، پورمحمدی، م.، و کمان بدست، ا. ۱۳۹۸. مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر هندسه‌ی پائین دست پرتابه‌ی جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب آن. مجله مهندسی آب، ۱۲(۴۲): ۶۵-۷۷.
- صفرنژادی، غ.، حیدرنژاد، م.، بردبار، ا.، پورمحمدی، م.، و کمان بدست، ا. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی اثر مانع با دندان‌های دوزنقه‌ای و مثلثی در پرتابه جامی شکل روی آبشستگی پایین دست با استفاده از مدل فیزیکی. علوم آب و خاک - ویژه‌نامه سیل و فرسایش خاک، ۲۳(۴): ۲۴۳-۲۵۴.
- کیخایی، م.، حیدرپور، م.، و موسوی، ف. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ چین در محل احداث گروه پایه های استوانه ای در پل ها. فصلنامه علوم آب و خاک، ۴۹(۱۳).
- مسجدی، ع.، و تائیدی، ا. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه ای پل در قوس رودخانه. مجله مهندسی آب، ۱۰(۳۲): ۱-۱۲.
- Chiew, Y. 1995. Mechanics of riprap failure. *J Hydr Eng ASCE*, 121(9): 635-643.
- Escarameia, M., & May, R. 1992. Channel protection downstream of structures: HR Wallingford Report SR 313.
- Farhoudi, J., & Sadast Helbar, S. 2009. Design of Stable Riprap Downstream of Stilling Basins Using Froud Number. *J soil and water*, 19(1).
- Farhoudi, J., & Valizadegan, E. 2004. Bed protection criterion downstream of stilling basins. Yichang, China: ISRS.
- Lauchlan, C., & Melville, B. 2001. Riprap protection at bridge piers. *ASCE J Hydr Eng*, 127(5): 30-38.
- Melville, B. W., Van Ballegooy, S., Coleman, S. E., & Barkdoll, B. 2007. Riprap size selection at wing-wall abutment. *ASCE, J. Hydraul. Eng*, 133: 1265-1269.
- Parola, A. C. 1993. Stability of riprap at bridge piers. *J Hydr Eng ASCE*, 119(10): 1080-1093.
- Peterka, A. 1968. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators engineering monograph. USA: USBR.
- Pilarczyk, K. W. 1990. Stabiuty criterisi for revetments, proc. In H. H. Chang, & J. C. Hill (Eds.), National Conf. on Hydraulics Eng, Am Soc Civ Eng: 15-26. San Diego, USA.
- Posey, C. J. 1974. Tests of scour protection for bridge piers. *J Hydr Div ASCE*, 100(12): 1773-1783.
- Quazi, M. E., & Peterson, A. W. 1973. A method for bridge pier riprap design, Pro. First Can. Hydraul. Conf: 96-106. Edmonton, AB: CSCE.
- Simarro, G., Chreties, C., & Teixeira, L. 2011. Riprap sizing for pile group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12): 1676-1679.
- Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers. *J Hydr Eng ASCE*, 115(12): 1615-1630.
- Yoon, T. H., Yoon, S. B., & Yoon, K. S. 1995. Design of riprap for scour protection around bridge piers, 26th IAHR Congress, Vol. 1: 105-110. UK.