

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Gabion Stepped Spillway Porosity on Energy Dissipation and Characteristics of Downstream Hydraulic Jump of Weir

R. Naseri^{1*} and S.M. Kashefipour²

1 - Corresponding Author, M.Sc. in Hydraulic Structures of Water Structures, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (raziye_ns@yahoo.com).*

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 25 June 2020

Revised: 23 October 2021

Accepted: 26 October 2021

Keywords:

Energy Dissipation, Stepped
Spillway, Gabion, Porosity,
Hydraulic Jump.

TO CITE THIS ARTICLE :

Naseri, R., Kashefipour, S. M. (2022). 'The Effect of Gabion Stepped Spillway Porosity on Energy Dissipation and Characteristics of Downstream Hydraulic Jump of Weir', *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), pp. 1-17. doi: 10.22055/jise.2019.18454.1337

Introduction

Today, gabion structures and especially gabion stepped spillways have become more popular due to the significant effect of stairs on flow energy dissipation, appropriate stability, being economic, easy implementation, and raising the oxygen level in the water. This type of weirs has more flexibility compared with its impervious type and is resistant to loads due to water pressure. The resistance to water load is likely to be related to flow passing through the porous media, and the gabion stairs can assist with the faster water drainage and reduce the water load behind the structure (Zhang & Chanson, 2016). Extensive studies have been performed on impervious stepped spillways, namely Gonzalez et al. (2016) and Zhang and Chanson (2015).

Reeve et al. (2019) used a numerical model to investigate the flow hydraulic properties on gabion stepped spillway. They studied gabion stepped spillways with four different stair geometries under similar conditions. Their results indicate that flat gabion steps can dissipate more energy than overlapping, inclined, and pooled steps.

Despite extensive investigations on impervious stepped spillways, there has not been sufficient research on gabion stepped spillways. Hence, the primary purpose of this study is to investigate the gabion stepped weirs features, including energy dissipation and characteristics of downstream hydraulic jump.

Methodology

The experiments were conducted in a 7.30×0.60×0.56m flume located in the Hydraulic Modeling laboratory of the Water Structures Department at the Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Five physical models were constructed, including three gabion stepped spillways with three porosities of 35% ($D_{50} = 8.75\text{mm}$), 40% ($D_{50} = 14.35\text{mm}$), and 45% ($D_{50} = 22.2\text{mm}$), an impervious stepped spillway and a chute. The slope and height of all models were considered constant and equal to 1:2

(vertical: horizontal) and 60cm. The discharge was regulated for each experiment using the inlet control valve and the rating curve. Utilizing the downstream control gate, the hydraulic jump was created, located, and stabilized in the toe of the weir model. The hydraulic jump characteristics, including jump length, roller length, and conjugated depths, were recorded during the experiments.

Results and Discussion

During the experiments, the flow hydraulic conditions were recorded on the stairs. The results indicated that by substituting the impervious stepped spillway with a gabion stepped spillway and increasing the porosity from 35% to 45%, the downstream regime was transformed from nappe flow to skimming flow at high discharges.

Figure (1) shows the ratio of relative energy dissipation to the dimensionless parameter $\frac{q^2}{gH^3}$ (drop number). According to the diagram, the gabion stepped spillway dissipates more energy than the impervious stepped spillway. In S, G-35, G-40, and G-45 models, by reducing the $\frac{q^2}{gH^3}$ ratio from 0.0038 to 0.0006, the energy dissipation rate increased 45%, 52%, 39%, and 45%, respectively. (The marks in the figure are: C for Chute, S for impervious stepped spillway, G-35 for gabion stepped spillway with porosity of 35%, G-40 for gabion stepped spillway with porosity of 40%, and G-45 for gabion stepped spillway with porosity of 45%, respectively).

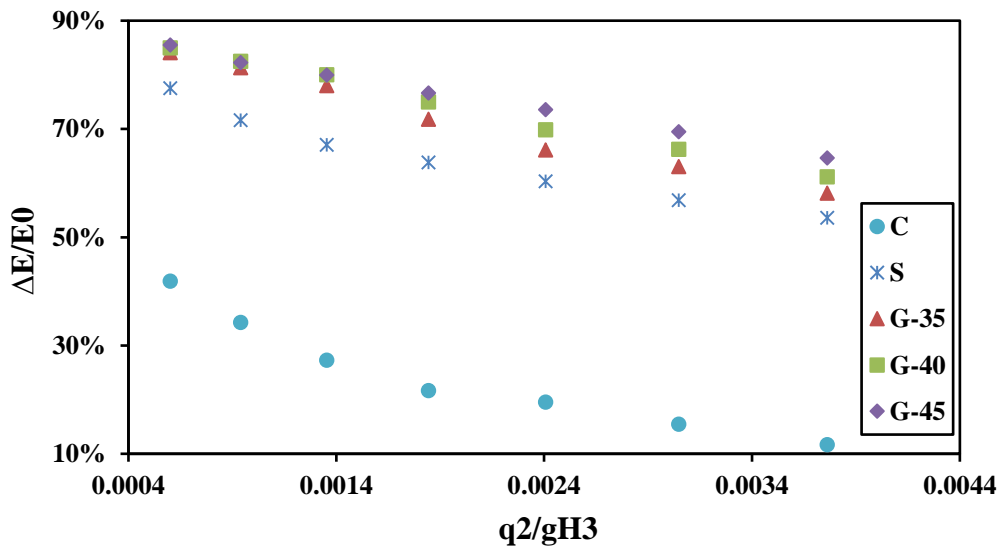


Fig. 1- Variation of relative energy dissipation relative to drop number for all models

Conclusions

The results illustrated that gabion stepped weirs can reduce the hydraulic jump characteristics (i.e., jump length, roller length, and conjugated depths) compared to the impervious type. The extent of this reduction depends on the porosity of the gabion structure and the drop number. In general, with the porosity increment of gabion structure, the rate of energy loss increases. At low discharges, where most of the flow is the seepage flow through the gabions, the increase in porosity does not cause much change in energy loss. It occurs because the energy loss is due to the friction of the aggregates of the porous medium, while at high discharges, increasing the porosity increases the energy loss.

Acknowledgment

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the second author's Grant (95/3/02/31400) by which

the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. In addition, the spiritual support of the scientific center "Improvement and maintenance of irrigation and drainage networks" is thanked and appreciated.

References

- 1- Gonzalez, C.A., Takahashi, M. & Chanson, H., 2008. An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 46(2). pp. 24-35.
- 2- Reeve, D.E., Zuhaira, A.A., Karunarathna, H., 2019. Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways. *Water Science and Engineering*, 12(1). pp. 62-72.
- 3- Zhang, G. & Chanson, H., 2015. Broad-crested weir operation upstream of a stepped spillway. *E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress*. The Hague, the Netherlands.
- 4- Zhang, G., Chanson, H., 2016. Gabion stepped spillway: Interactions between free-surface, cavity and seepage flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 142(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001120)



© 2022 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر تخلخل سرریز پلکانی گابیونی بر افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست سرریز

راضیه ناصری^{۱*} و سید محمود کاشفی پور^۲

*^۱- نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

raziye_ns@yahoo.com

^۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۱

دریافت: ۱۳۹۹/۴/۵

چکیده

امروزه طراحی و اجرای بناهای بتنی، سنگی و خاکی یکی از راه‌های مناسب برای کنترل و انحراف آب رودخانه‌ها می‌باشد. سازه‌های توری سنگی و مهم‌ترین آن‌ها، سرریزهای پلکانی گابیونی به دلیل تأثیر قابل ملاحظه پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، پایداری مناسب، اقتصادی بودن، سهولت اجرا و بالا بردن سطح اکسیژن مخلوط در آب رواج بیشتری یافته و توجه روز افزونی به آن می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی میزان افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی و همچنین ارزیابی نقش تخلخل سرریز پلکانی همراه با بسته‌های گابیون بر افت انرژی می‌باشد. برای این منظور پنج مدل فیزیکی شامل سه مدل سرریز پلکانی گابیونی با سه تخلخل ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد، یک مدل سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر و یک تندآب ساخته شد. شیب تمامی مدل‌ها ثابت و معادل ۱:۲ (افقی:عمودی) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرریزهای پلکانی گابیونی می‌توانند مشخصات پرش هیدرولیکی شامل اعماق مزدوج، طول پرش و طول غلتاب را نسبت به نوع نفوذ ناپذیر آن به مقدار قابل قبولی کاهش دهند. مقادیر افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی بزرگتر از سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر است. حداکثر افت انرژی مربوط به مدل پلکانی گابیونی با تخلخل ۴۵ درصد می‌باشد که مقدار آن در حدود ۸۶ درصد است که این مقدار نسبت به سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر هشت درصد بیشتر است.

کلید واژه‌ها: افت انرژی، سرریز پلکانی، گابیون، تخلخل، پرش هیدرولیکی.

مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی امکانات گسترده‌ای را برای ساخت سدهای بزرگ، مخازن و کانال‌ها بوجود آورده است. تندآب‌ها (Chute) و سرریزها برای عبور دادن دبی‌های زیاد از روی یک سازه هیدرولیکی مثل سد، سرریز انحرافی و غیره بگونه‌ای طراحی می‌شوند که هیچ گونه صدمه عمده‌ای به خود سازه و همچنین محیط اطراف آن وارد نشود. طرح سرریزهای پلکانی بیش از ۳۵۰۰ سال قدمت دارد (Chanson, 1994a). پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی مثل سیم گابیون با پوشش پلیمری و استفاده از بتن غلتکی، نوسازی در طراحی سرریزهای پلکانی را آغاز کرده است. سرریزهای توری سنگی پلکانی متشکل از مصالح توری فولادی نرم گالوانیزه و سنگ، یکی از انواع سرریزهای پلکانی با کارایی مناسب می‌باشد. سرریزهای پلکانی گابیونی در مسیر جریان آب، برای از بین بردن انرژی آب و کاهش قدرت فرسایشی آن به کار می‌روند تا ضمن کاهش انرژی جریان، مقداری از رسوبات معلق در بالادست را تله اندازی نمایند (Stephenson, 1979). استهلاک انرژی جریان به علت وجود جریان درون گذر از داخل جسم متخلخل سرریز زیاد بوده و لذا ابعاد و هزینه‌های ساخت حوضچه آرامش کاهش می‌یابد. همچنین به علت هوادهی جریان عبوری می‌تواند

به مقدار زیادی از پدیده خلاءزایی که یکی از مشکلات طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزهاست، جلوگیری کند. علاوه بر کاربرد در سرریزها و سدها می‌توان از سازه‌های گابیونی در عملیات آبخیزداری برای کنترل فرسایش در آبراه‌ها و یا ساحل‌سازی کناره‌های رودخانه در نزدیکی آبگیر یا قوس‌ها استفاده نمود. در این حالت علاوه بر حفظ و کمک به پایداری خاک، در مناطق دارای سنگ فراوان از هزینه ساخت سازه بتنی نیز کاسته می‌شود (Salmasi et al., 2011). این نوع سرریزها از انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به نوع نفوذ ناپذیر آن برخوردار بوده و در مقابل بارهای ناشی از فشار آب مقاوم و پایدار هستند. این مقاومت در برابر بار آب احتمالاً مربوط به عبور جریان از طریق محیط متخلخل است و پله‌های گابیونی می‌توانند به تخلیه سریعتر آب و کاهش بار آب در پشت سازه کمک کنند (Zhang and Chanson, 2016). استفاده از سرریز پلکانی گابیونی ضمن اینکه موجب کاهش سرعت و افت انرژی جریان از طریق ایجاد تلاطم در طول سازه می‌گردد، باعث افزایش قدرت خود پالایی رودخانه بواسطه هوا دهی مناسب در ناحیه پلکان‌های سرریز نیز می‌شود. همچنین این نوع سرریزها در دبی‌های کم منظره زیبایی ایجاد می‌نمایند.

هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی توسط Rajaratnam (1990) و Chanson (1995) به سه نوع جریان تقسیم می‌گردد.

وجود اینکه میزان هوادهی و نرخ شمارش حباب‌های هوا کمتر بود، ولی میزان آشفستگی در پایین دست سرریز کمتر از مدل نفوذناپذیر بود. همچنین در رژیم رویه‌ای سرعت بیشتری در پایین دست سرریز پلکانی گابیونی و نرخ اتلاف انرژی کمتری نسبت به مدل نفوذناپذیر اندازه‌گیری شد.

Salmasi et al. (2011) شرایط هیدرولیکی جریان از روی سرریز گابیونی پله‌ای را در نه مدل فیزیکی با سه تخلخل مختلف و دو شیب ۱:۱ و ۱:۲ (افقی: عمودی) بررسی کردند. برای بررسی نفوذپذیری پله‌ها در افت انرژی، وجه افقی و عمودی پله‌ها توسط ورق آهنی نفوذناپذیر شد. نتایج نشان می‌دهد که در دبی‌های بالا که رژیم جریان غیرریزشی اتفاق می‌افتد، استهلاک انرژی در سرریز گابیونی بیشتر است. همچنین استهلاک انرژی در سرریز دارای پله‌های نفوذناپذیر در دبی‌های کم، بیشتر از سایرین است. افزایش تخلخل از ۳۸ تا ۴۲ درصد و نیز کاهش شیب از ۱:۱ به ۱:۲ موجب افزایش استهلاک انرژی می‌گردد.

Azizi et al. (2008) آزمایش‌هایی را روی ۱۲ مدل سرریز پلکانی گابیونی دارای سه عدد پله با ارتفاع هر پله ۱۰ سانتی‌متر، با چهار تخلخل ۳۰، ۳۴، ۳۸ و ۴۰ درصد در محدوده دبی ۱۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام دادند. در تمام آزمایش‌ها شیب وجه بالادست ۱:۱ انتخاب گردید که علت آن پایداری بیشتر سازه در برابر نیروی هیدرواستاتیک آب بوده است. شیب پایین دست ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (افقی: عمودی) انتخاب شد. نتایج نشان داد که با افزایش تخلخل، مقدار افت نسبی انرژی جریان کاهش می‌یابد و شیب منحنی در تخلخل‌های بالاتر از ۳۸ درصد کاهش افت نسبی انرژی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد که این امر به دلیل افزایش مقدار جریان درون‌گذر نسبت به جریان روگذر است. روند منحنی‌های راندمان انرژی - تخلخل بیان‌گر این موضوع است که جریان روگذر باعث افت انرژی بیشتری نسبت به جریان درون‌گذر می‌شود. در دبی‌های پایین که قسمت عمده جریان به صورت درون‌گذر است، افزایش تخلخل باعث کاهش یکنواخت افت انرژی می‌گردد. زیرا افت انرژی به علت اصطکاک سنگ دانه‌های محیط متخلخل بوده در حالی که در دبی‌های زیاد افزایش تخلخل باعث تغییر قسمتی از جریان، از روگذر به درون‌گذر شده و با توجه به اینکه جریان درون‌گذر باعث افت اندکی نسبت به جریان روگذر می‌شود، افت نسبی انرژی به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. کاهش شیب پایین دست از ۱:۱ به ۱:۲ یا ۱:۳ باعث افزایش افت نسبی انرژی می‌گردد.

در مطالعه‌های Chinnarasri et al. (2008) نیز خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی بررسی شد و آن را با سرریز پلکانی نفوذناپذیر مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی در مقایسه با نوع نفوذناپذیر آن بیشتر است و در نتیجه سرعت در خروجی آن کمتر می‌باشد. همچنین در تحقیق خود با بررسی سه تخلخل مختلف ۲۷، ۳۰ و ۳۹ درصد نشان دادند که شکل و اندازه سنگدانه‌ها تأثیر بسیار کمی بر افت انرژی خواهد گذاشت.

جریان ریزشی (Nappe flow) این نوع جریان در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می‌شود. استهلاک انرژی بر اثر اختلاط جت جریان با هوا، تلاطم جریان روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص روی هر پله ایجاد می‌شود. جریان غیر ریزشی یا رویه‌ای (Skimming flow) در این نوع جریان یک بستر کاذب (Pseudo-bottom) که آستانه انتهایی پله‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌سازد، تشکیل می‌گردد. در زیر این بستر کاذب جریان‌های گردابی تشکیل می‌شود، به طوری که قسمت اعظم انرژی جنبشی جریان بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی در زیر بستر کاذب مستهلک می‌شود. جریان انتقالی (Transition flow) این جریان حد واسط دو نوع جریان ریزشی و غیر ریزشی می‌باشد.

تاکنون مطالعه‌های گسترده‌ای در رابطه با سرریزهای پلکانی سدهای بزرگ بتنی یا سرریزهای پلکانی نفوذناپذیر بدون تخلخل انجام گردیده است که می‌توان به مطالعه‌های Horner و Essery (1971)، Sorensen (1985)، Chanson (1994b)، Matos (1994)، Quintela و Chamani (1999)، Rajaratnam و Chanson (2008)، Gonzalez et al. (2015) و Zhang اشاره کرد. از جمله مطالعه‌های انجام گرفته روی سرریزهای پلکانی نفوذناپذیر در ایران، می‌توان به تحقیقات Heydari orojlo et al. (2010) اشاره کرد که بهینه سازی تعداد پلکان را با استفاده از مدل فیزیکی مورد توجه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که به ازاء انرژی ثابت بالادست، افزایش تعداد پله‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد، اما اگر چنانچه این تعداد از حد معینی تجاوز کند، اثر مثبت آن از بین می‌رود. Reeve et al. (2019) از یک مدل عددی برای بررسی

خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریزهای پلکانی گابیونی استفاده کردند. آنها ابتدا این مدل را با استفاده از نتایج مطالعه‌های منتشر شده اعتبار سنجی کردند. سپس سرریزهای پلکانی گابیونی با چهار هندسه پله‌ای مختلف (پلکان معمولی، پله‌های دارای هم پوشانی، پله‌های استخری و پله‌های شیبدار) را در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که پله‌های گابیونی معمولی می‌توانند انرژی بیشتری را نسبت به سایر مدل‌ها تلف کنند. Wüthrich و Chanson (2014) خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای پلکانی را با مقایسه دو مدل سرریز پلکانی گابیونی و سرریز پلکانی نفوذناپذیر با شیب ۱:۲ (افقی: عمودی) بررسی کردند. هر دو مدل دارای ۱۰ پله با ارتفاع هر پله ۱۰ سانتی‌متر ساخته شدند. برای هر حالت از این سرریزها خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله الگوی جریان، خصوصیات جریان آب - هوا (Air - water) و اتلاف انرژی بررسی شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فعل و انفعالات میان جریان درون‌گذر (Seepage flow) و روگذر (flow Over) تابعی از دبی، شکل گابیون، رژیم جریان و همچنین تغییر در جریان کایتاسیونی پلکان و الگوی چرخش می‌باشد. اندازه‌گیری و مقایسه خصوصیات جریان آب - هوا نشان داد که تفاوت اندکی بین دو مدل وجود دارد. در سرریز پلکانی گابیونی با

کنترل عمق آب پایین دست و محل تشکیل پرش هیدرولیکی نصب گردیده است. آب جریان یافته در فلوم به داخل یک مخزن در انتهای آن منتقل می‌گردد که با استفاده از سرریز مثلثی ۵۳ درجه نصب شده روی دیواره بتنی مخزن می‌توان با استفاده از منحنی دی-اشل مربوط به سرریز، دی را اندازه گرفت. دو ریل موازی در بالای بدنه فلوم، برای حرکت عمق‌سنج (Point Gauge) با دقت ۰/۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری عمق آب نصب گردید (شکل ۱).

تعداد پنج مدل فیزیکی شامل سه مدل سرریز پلکانی گابیونی با سه تخلخل ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد، یک مدل سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر و یک تندآب ساده ساخته شد. شیب و ارتفاع تمامی مدل‌ها ثابت و به ترتیب معادل ۱:۲ (افقی:عمودی) و ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. سرریز پلکانی با تعداد شش پله با ارتفاع هر پله معادل ۱۰ سانتی‌متر و طول هر پله ۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. در شکل (۲) ابعاد هندسی مدل فیزیکی نشان داده شده است.

برای سرریز پلکانی همراه با گابیون، بسته‌های گابیونی به طول ۳۰ سانتی‌متر (۱/۵ برابر طول هر پله) و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و عرض ۵۶ سانتی‌متر ساخته و پس از پرشدن توسط مصالح سنگی روی پله‌ها قرار داده شدند (شکل ۳). تخلخل بسته‌های گابیونی به کمک حجم آن‌ها، با توجه به ابعاد و حجم خالص سنگریزه‌ها مطابق رابطه (۱) تعیین گردید:

$$n = \frac{V_{Void}}{V_{Total}} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۱) V_{Void} حجم خلل و فرج و V_{Total} حجم کل بسته‌های گابیونی بر حسب سانتی‌متر مکعب می‌باشد. برای تعیین حجم خلل و فرج، بسته‌های گابیون را در ظرف حاوی مقدار مشخص آب قرار می‌دهیم. با قرار دادن بسته گابیون در آن، سطح آب درون ظرف بالا می‌آید. می‌توان با اندازه‌گیری مقدار افزایش حجم آب در ظرف، حجم بسته گابیون را تعیین نمود. با معلوم بودن حجم توری سنگ و تعیین اختلاف بین دو حجم اندازه‌گیری شده، می‌توان حجم توده سنگ را تعیین کرد.

از دیگر مسایل مطرح در این پژوهش اندازه مصالح سنگی به کار رفته داخل بسته‌های گابیون است. اندازه دانه‌های سنگی متناسب با الک‌های موجود بین قطرهای هشت تا ۹/۵۱ میلی‌متر ($D_{50} = 8.75mm$) تا ۱۲/۷ تا ۱۶ ($D_{50} = 14.35mm$) و ۱۹ تا ۲۵/۴ میلی‌متر ($D_{50} = 22.2mm$) انتخاب شدند و به‌طور جداگانه در محلی جمع‌آوری شدند. بدین ترتیب در هر مرحله از آزمایش ذرات سنگی با قطر مشخص برای ایجاد درصد تخلخل متفاوت درون بسته‌های گابیون ریخته می‌شد. لازم به ذکر است که برای ایجاد درصد تخلخل بیشتر از ذرات با دانه بندی بزرگتر استفاده شده است.

روش انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که بعد از قرار دادن مدل مورد نظر در فلوم، با روشن کردن پمپ و باز کردن شیر ورودی،

در مطالعه‌های (Ebrahimi et al. 2005) تعداد نه مدل از سرریز پلکانی گابیونی برای بررسی شرایط هیدرولیکی جریان در دو حالت نفوذ پذیر و نفوذ ناپذیر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. سرریزها دارای سه پله هر کدام به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع کل سرریز ۳۰ سانتی‌متر بود. شیب پایین دست ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (افقی:عمودی) انتخاب شد. برخی نتایج مهم عبارت بودند از: ۱- با افزایش دیب جریانی، درصد افت انرژی روی مدل کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در مدل نفوذ پذیر با شیب ۱:۳ و دیب حداکثر، کمترین درصد افت انرژی، و در مدل نفوذ ناپذیر با شیب ۱:۳ و دیب حداقل، بیشترین درصد افت انرژی ایجاد شد. ۲- کاهش شیب پایین دست عموماً به دلیل افزایش تلاطم جریان باعث اتلاف انرژی بیشتری در تمامی گزینه‌ها می‌گردد. ۳- عدم عبور جریان از داخل بدنه مدل باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌گردد.

Peyras et al. (1992) تحقیقاتی روی مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی گابیونی همگن و کوچک انجام دادند. هدف آن‌ها محاسبه استهلاک انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه آرامش بوده است. تغییر شکل گابیون و فاکتورهای تأثیرگذار روی مقاومت آن در مقابل سیلاب‌ها نیز مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصله برای سرریز پلکانی گابیونی نشان داد که در مقایسه با آزمایش‌های Rand (1955) روی پله بتنی به ارتفاع h ، سرریز گابیونی ۱۰ درصد استهلاک انرژی بیشتری را نشان داد که علت آن را می‌توان با نفوذ پذیری گابیون، اختلاف در زبری سطح گابیون - بتن و شیب سرریز تفسیر نمود.

غالب تحقیقاتی که تاکنون انجام شده در رابطه با سرریزهای پلکانی با بدنه تماماً گابیونی بوده است ولی در مقایسه با آن، مطالعه‌های انجام گرفته روی سرریزهای پلکانی گابیونی بسیار اندک بوده است. اما اخیراً برای سهولت اجرا و استحکام بیشتر سازه از بسته‌های گابیونی روی سرریزهای پلکانی استفاده می‌شود. لذا هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی شرایط افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست برای این‌گونه ترکیب پله با گابیون بوده که مطالعه‌های زیادی در منابع وجود ندارد.

مواد و روش‌ها

امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. آزمایشگاه دارای یک مخزن اصلی زیرزمینی است که از شبکه آب شهری تغذیه می‌گردد. آب مخزن توسط یک پمپ شناور به سمت فلوم‌ها هدایت می‌گردد. در محل ورودی آب به فلوم‌ها شیر فلکه برای کنترل میزان دیب ورودی قرار دارد. فلوم با مقطع مستطیلی، دارای اسکلت فلزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. طول فلوم ۷۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع دیواره آن متغیر می‌باشد. با توجه به ضخامت دیواره فلوم، عرض مفید فلوم ۵۶ سانتی‌متر می‌باشد. یک دریچه کشویی در انتهای فلوم برای

$$E_0 = H + y = H + \frac{3}{2}y_c \quad (3)$$

در رابطه فوق H برابر با رقوم تاج سرریز می‌باشد که با توجه به اندازه دقیق مدل پس از ساخته شدن، در فرمول قرار داده می‌شود. مقدار H در تمامی مدل‌ها ثابت و معادل ۶۰ سانتی‌متر است. همچنین نشان y_c نشان دهنده عمق بحرانی روی سرریز می‌باشد که از معادله $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ به دست آمده است که در آن q دبی در واحد عرض سرریز (متر مربع بر ثانیه) و g شتاب ثقل زمین و برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است (شکل ۵). برای محاسبه انرژی در پایین دست سرریز، عمق قبل از پرش توسط رابطه اعماق مزدوج به صورت زیر محاسبه گردید:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \quad (5)$$

در رابطه‌های (۳) تا (۵)، E_0 انرژی کل بالادست سرریز، E_1 انرژی کل در پایین دست سرریز، y_1 عمق اولیه پرش، y_2 عمق ثانویه پرش و y_c عمق بحرانی است. مقدار استهلاک انرژی نسبی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (6)$$

که پارامترهای آن قبلاً تعریف شده‌اند.

آب به آرامی درون فلوم جریان می‌یافت. پس از تنظیم دبی به کمک اشل، با استفاده از دریچه انتهایی فلوم، محل پرش هیدرولیکی به گونه‌ای تنظیم می‌شد که دقیقاً در پنجه مدل قرار بگیرد و پرش تثبیت شود. در شکل (۴) نمونه‌ای از تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز پلکانی گابیونی با تخلخل ۴۰ درصد در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. در طی زمان آزمایش مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی برداشت شد. طول پرش هیدرولیکی توسط متری با دقت یک میلی‌متر به صورت چشمی برداشت شد. همچنین طول غلتابی که فاصله بین عمق اولیه پرش تا آخرین موج غلتان است توسط یک جسم شناور اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی در محلی که حباب‌های هوای اندکی در جریان آب وجود داشت، توسط عمق سنج انجام گرفت. با توجه به اینکه جریان در پایین دست سرریز دارای تلاطم زیاد و توام با ورود هواست، لذا اندازه‌گیری عمق اولیه پرش در پایین دست سرریز با خطای زیادی مواجه است. به همین دلیل برای محاسبه افت انرژی نسبی از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی استفاده گردید. انرژی کل در بالادست سرریز به صورت رابطه (۲) محاسبه گردید:

$$E_0 = H + y + \frac{q^2}{2g(H+y)^2} \quad (2)$$

نظر به اینکه ترم $\frac{q^2}{2g(H+y)^2}$ مقدار بسیار ناچیزی دارد، به عبارت دیگر سرعت جریان در مخزن بسیار کم می‌باشد، لذا می‌توان از این ترم صرف‌نظر نمود و رابطه (۲) به صورت زیر تعریف می‌شود:

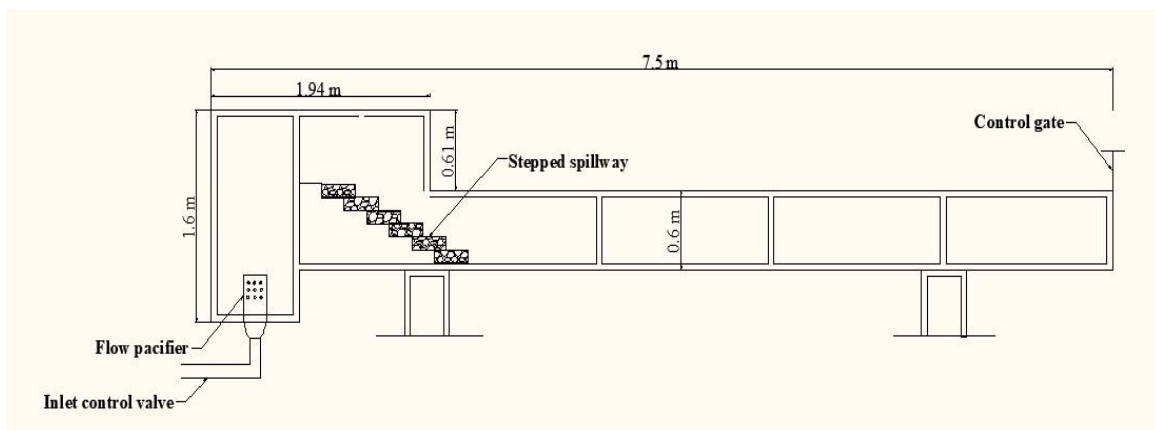


Fig. 1- Side view of laboratory flume with a 56 cm width

شکل ۱- شکل شماتیک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۵۶ سانتی‌متر

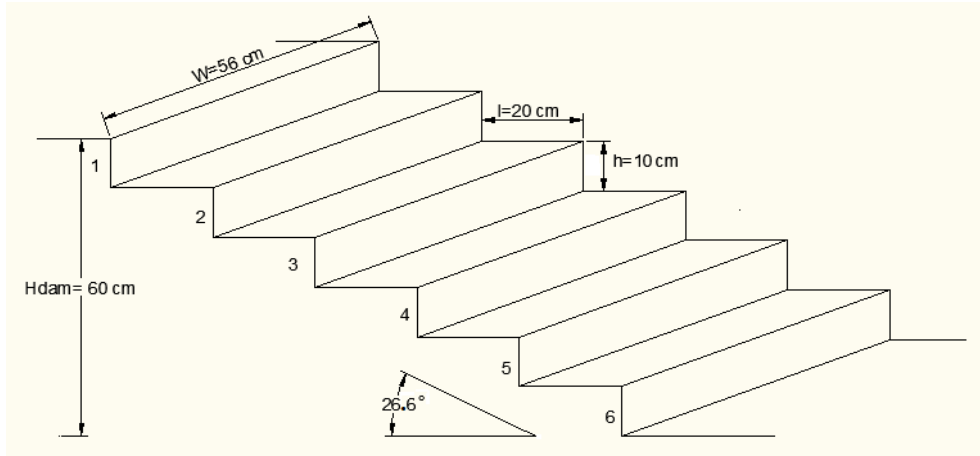


Fig. 2- Physical model geometric dimensions

شکل ۲- ابعاد هندسی مدل فیزیکی

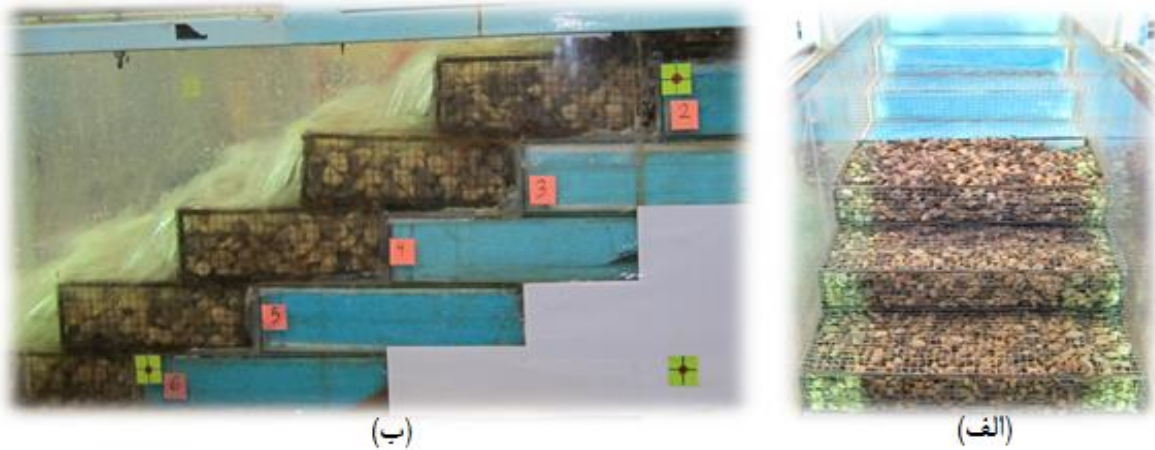


Fig. 3- Installing gabion packages on stepped spillway

شکل ۳- نحوه قرار گیری بسته های گابیون روی سرریز پلکانی



Fig. 4- Creation of hydraulic jump downstream of gabion stepped spillway with 40% porosity at 35 (l/s) discharge

شکل ۴- تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز پلکانی گابیونی با تخلخل ۴۰ درصد در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه

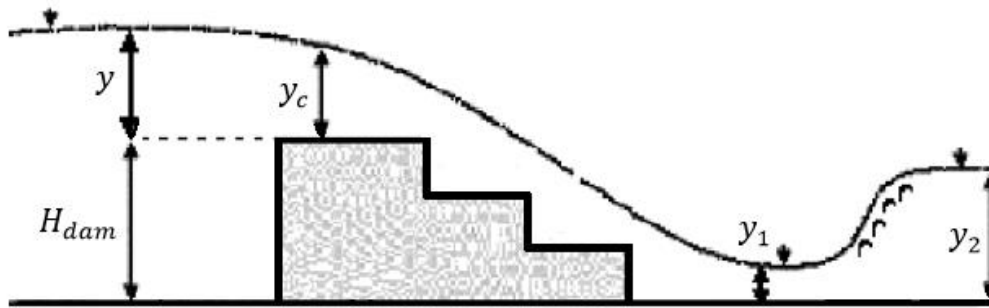


Fig. 5- Hydraulic dimensions of physical model

شکل ۵- ابعاد هیدرولیکی مدل فیزیکی

از این ترم در رابطه فوق می‌توان صرف‌نظر کرد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه حداقل ارتفاع آب روی سرریز ۵/۷ سانتی‌متر است می‌توان از اثرات عدد وبر (W_e) در بالادست سرریز نیز صرف‌نظر کرد. پس رابطه نهایی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{y_c}{H}, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{D_{50}}{y_2}, n, Fr_1\right) = 0 \quad (9)$$

با توجه به اینکه عدد فرود در تمامی آزمایش‌ها مقداری متغیر است، لذا پارامتر مناسبی برای تحلیل نتایج نمی‌باشد. همچنین نسبت $\frac{y_c}{H}$ در واقع ریشه سوم عبارت $\frac{q^2}{gH^3}$ می‌باشد که به عدد آبشار (Drop number) معروف است.

$$\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2} = f\left(n, \frac{q^2}{gH^3}\right) \quad (10)$$

در جدول (۱) دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق ارائه شده است.

نتایج و بحث

علامت‌های مشخص شده در کنار شکل‌ها به صورت جدول (۲)

تعریف می‌شوند.

الف) مشاهدات

با شروع هر آزمایش شرایط هیدرولیکی جریان روی پله‌ها ثبت می‌شد و مشاهده گردید با تغییر مدل از پلکانی نفوذ ناپذیر به پلکانی گابیونی و همچنین با افزایش تخلخل از ۳۵ درصد به ۴۵ درصد، تبدیل رژیم جریان ریزشی به رویه‌ای، در دبی‌های بیشتر صورت گرفت. به نظر می‌رسد با افزایش تخلخل، جریان درون‌گذر افزایش می‌یابد و چون بخشی از جریان از داخل سازه گابیونی عبور می‌کند، ضمن ایجاد تلاطم زیاد، دبی عبوری از روی سرریز کم می‌شود و در نتیجه جریان در دبی‌های بالاتری به حالت رویه‌ای می‌رود. نتایج

آنالیز ابعادی

هدف از بکارگیری آنالیز ابعادی پیدا نمودن رابطه‌ای بین کمیت‌های فیزیکی در یک پدیده طبیعی می‌باشد. به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق و تحلیل نتایج و استخراج پارامترهای بی بعد، آنالیز ابعادی صورت گرفت، و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بی بعد استخراج گردید. پارامترهای موثر در جریان عبوری از سرریز پلکانی همراه و یا بدون گابیون به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- خصوصیات مربوط به سیال شامل: جرم واحد حجم مایع (ρ)، لزجت دینامیکی مایع (μ)، کشش سطحی (σ) و شتاب ثقل (g).
 - ۲- خصوصیات مربوط به جریان شامل: سرعت جریان (v)، عمق اولیه پرش (y_1)، عمق ثانویه پرش (y_2)، عمق بحرانی (y_c)، طول پرش (L_j) و طول غلتاب (L_r).
 - ۳- خصوصیات مربوط به هندسه سرریز: قطر متوسط مصالح سنگی (D_{50})، تعداد پله‌ها (N)، ارتفاع هر پله (h)، طول افقی هر پله (l)، ارتفاع کل سرریز (H) و تخلخل بسته‌های گابیون (n).
- رابطه کلی به صورت رابطه (۷) ارائه شده است:

$$f(N, h, l, H, D_{50}, n, v, y_1, y_2, y_c, L_j, L_r, g, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (7)$$

با استفاده از روش π باکینگهام و ترکیب پارامترهای بدون بعد، رابطه کلی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{y_c}{H}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{D_{50}}{y_2}, \frac{h}{l}, n, N, Fr_1, Re, We\right) = 0 \quad (8)$$

در تمامی آزمایش‌ها تعداد پله، ارتفاع پله و طول افقی پله ثابت می‌باشد لذا می‌توان از نسبت $\frac{h}{l}$ و N صرف‌نظر کرد. در رابطه (۸)، Re عدد رینولدز بالادست سرریز (جریان ورودی به سرریز) می‌باشد که باتوجه به محدوده عدد رینولدز در آزمایش‌های ($30000 < Re < 66500$)، جریان ایجاد شده در محدوده متلاطم بوده و لذا

افزایش عدد آبشار (بیان گر افزایش دبی است) افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت عمق مزدوج نسبی با افزایش تخلخل سازه گابیونی، کاهش می‌یابد که نشان دهنده این امر است که عمق پایاب در پایین دست سرریز پلکانی گابیونی کمتر از سرریز پلکانی نفوذناپذیر است. برای محاسبه عمق مزدوج نسبی در سرریز پلکانی نفوذناپذیر و پلکانی گابیونی با تخلخل متفاوت، بر اساس عدد آبشار با رسم منحنی برازش، رابطه (۱۱) استخراج گردید. در شکل (۷) به عنوان نمونه برای مدل S منحنی برازش رسم شده و ضرایب معادله بدست آمده است. با توجه به روند تقریباً یکنواخت و شباهت نمودارهای دیگر مدل‌ها به مدل تشریح شده، فقط به ارائه ضرایب در جدول (۳) بسنده می‌کنیم.

$$\frac{y_2}{y_1} = a \left(\frac{q^2}{gH^3} \right)^b \quad (11)$$

آزمایش‌های انجام یافته نشان می‌دهد که شروع جریان رویه‌ای برای مدل‌های S، G-35، G-40 و G-45 به ترتیب در $\frac{q^2}{gH^3}$ برابر با ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۰۱۴، ۰/۰۰۱۸ و ۰/۰۰۲۴ اتفاق می‌افتد.

ب) عمق مزدوج نسبی

با توجه به رابطه (۱۰) عمق مزدوج نسبی $\left(\frac{y_2}{y_1}\right)$ تابعی از عدد آبشار $\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)$ و تخلخل بسته های گابیون (n) می‌باشد. با توجه به اینکه بر اساس رابطه (۵) بین عمق مزدوج نسبی و عدد فرود اولیه رابطه خطی برقرار است تمامی نقاط در امتداد یک خط قرار می‌گیرند. لذا برای نشان دادن تفادت بین اعماق مزدوج، از پارامتری بعد عدد آبشار استفاده می‌کنیم. به منظور بررسی اثر تخلخل، مطابق شکل (۶) نمودار عمق مزدوج نسبی به ازای عدد آبشار برای تمامی آزمایش‌ها رسم شده است. این شکل بیان گر آن است که عمق مزدوج نسبی در سرریزهای پلکانی نفوذناپذیر و پلکانی گابیونی با

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده این تحقیق

Range of changes	$(l/s)Q$	n	$\frac{y_c}{h}$	$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_2}$	$\frac{L_r}{y_2}$
Minimum	20	35%	0.51	2.47	2.60	0.52
Maximum	50	45%	0.93	10.29	6.03	3.08

جدول ۲- علامت‌های اختصاری مربوط به مدل‌های فیزیکی

Table 2- Symbols for physical models

Symbol	Model type
G - 35	Gabion stepped spillway with porosity 35%
G - 40	Gabion stepped spillway with porosity 40%
G - 45	Gabion stepped spillway with porosity 45%
S	Impervious stepped spillway
C	Chute

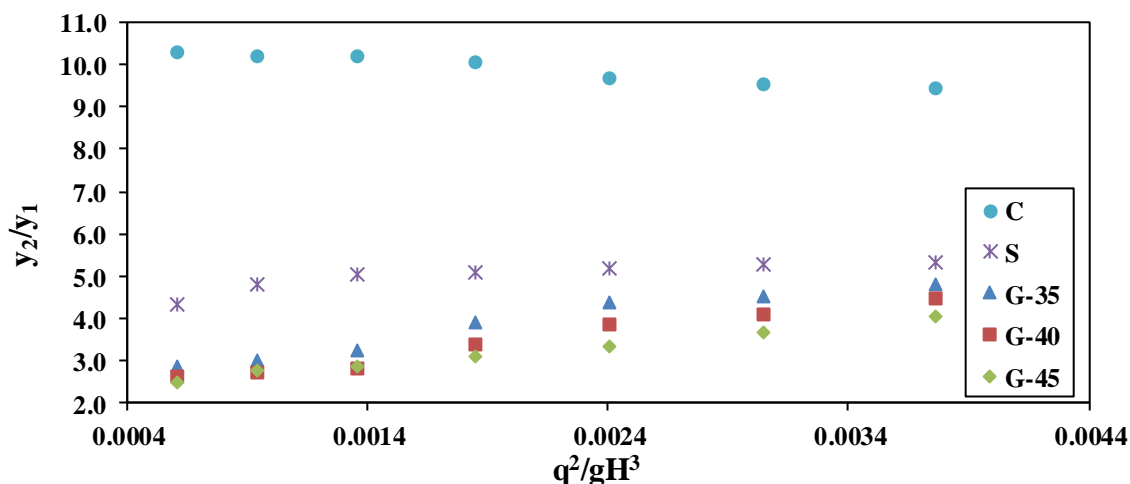


Fig. 6- Relative conjugate depth variation of hydraulic jump relative to drop number for all models

شکل ۶- تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به عدد آبشار برای تمامی مدل‌ها

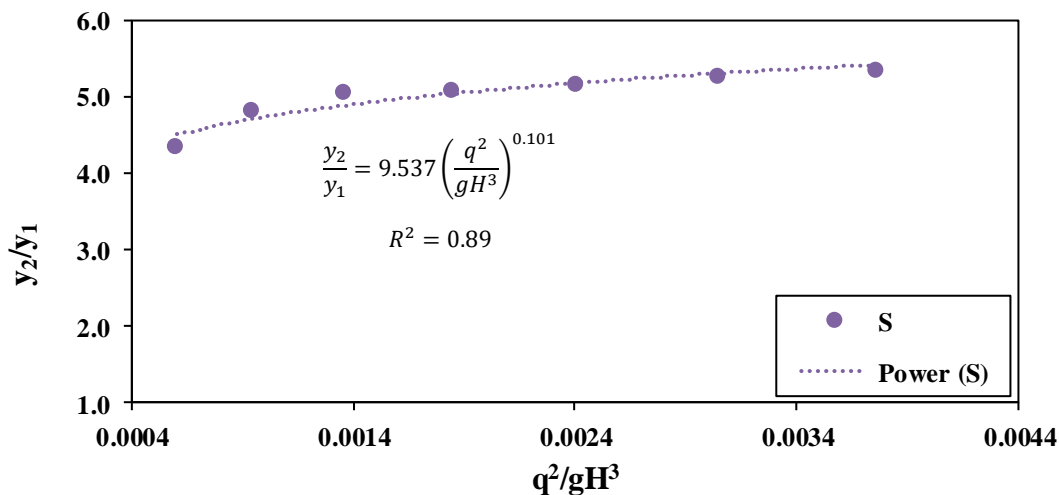


Fig. 7- Relative conjugate depth variation of hydraulic jump relative to drop number for S model

شکل ۷- تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به عدد آبشار برای مدل S

جدول ۳- ضرایب معادله (۱۱)

Table 3- Coefficients of equation (11)

Model type	a	b	R ²
S	9.537	0.101	0.89
G - 35	28.163	0.316	0.95
G - 40	25.086	0.315	0.93
G - 45	15.665	0.253	0.96

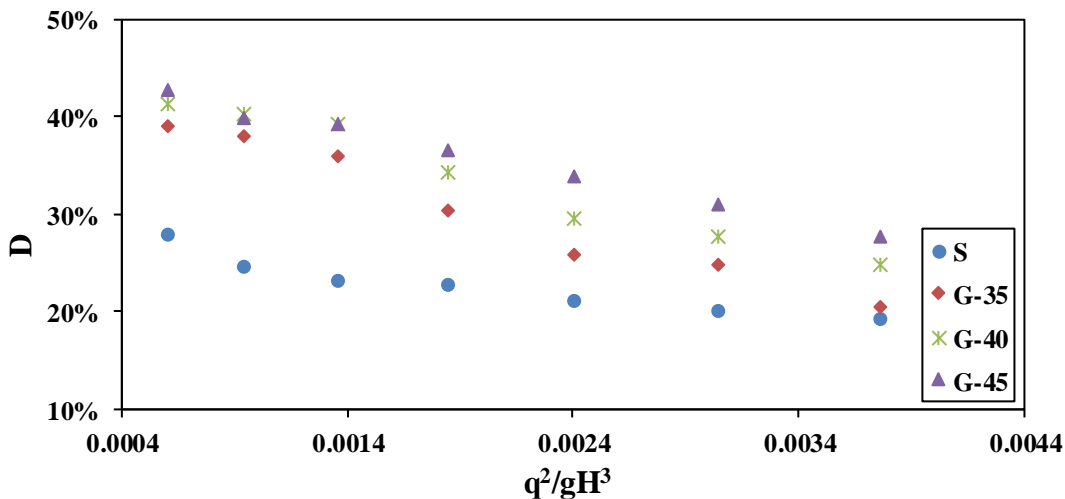


Fig 8- Variation of depth reduction parameter for stepped models compared to chute model versus drop number

شکل ۸- تغییرات پارامتر کاهش عمق برای مدل‌های پلکانی نسبت به مدل تندآب ساده در مقابل عدد آبشار

برای نشان دادن میزان اختلاف عمق مزدوج در سرریزهای پلکانی نفوذ ناپذیر و پلکانی گابیونی با مدل تندآب ساده، پارامتر کاهش عمق به صورت زیر تعریف می‌شود:

در این رابطه y_2^* عمق ثانویه پرش در مدل تندآب ساده و y_2 عمق ثانویه پرش در مدل‌های پلکانی نفوذ ناپذیر و پلکانی گابیونی است. تغییرات D با $\frac{q^2}{gH^3}$ در شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش عدد آبشار، D کاهش می‌یابد. یعنی در دبی‌های بالا که جریان به

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \times 100 \tag{۱۲}$$

روی مدل‌ها رویه‌ای می‌شود، تأثیری بر طول پرش هیدرولیکی ندارد. برای محاسبه درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده کرد. در این رابطه L_j^* طول پرش در پایین دست تندآب ساده و L_j طول پرش در مدل‌های پلکانی نفوذ ناپذیر و پلکانی گابیونی است.

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \times 100 \quad (13)$$

تغییرات T با $\frac{q^2}{gH^3}$ برای تمامی آزمایش‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که طول پرش در سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر به نسبت تندآب ساده، از ۲۲ تا ۴۱ درصد، و با قرار دادن بسته‌های گابیون، طول پرش از ۳۳ تا ۶۶ درصد کاهش می‌یابد. متوسط نسبت کاهش طول پرش برای مدل‌های S، G-35، G-40 و G-45 به ترتیب برابر ۲۷، ۴۱، ۴۶ و ۵۱ درصد می‌باشد.

در شکل (۱۱) رابطه طول نسبی غلتاب پرش $(\frac{L_j}{y_2})$ به ازای $\frac{q^2}{gH^3}$ نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این نسبت مربوط به تندآب ساده و معادل ۲/۹۵، و کمترین مقدار آن معادل ۰/۵۲ می‌باشد که در مدل پلکانی گابیونی با تخلخل ۴۵ درصد اتفاق افتاده است. همچنین متوسط نسبت کاهش طول غلتاب در مدل‌های S، G-35، G-40 و G-45 نسبت به مدل تندآب ساده به ترتیب برابر ۳۸، ۴۳، ۶۲ و ۶۸ درصد می‌باشد.

سمت رژیم رویه‌ای می‌رود میزان کاهش عمق، کمتر می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۲)، متوسط کاهش عمق مزدوج برای مدل‌های S، G-35، G-40 و G-45 نسبت به مدل تندآب ساده به ترتیب ۲۱، ۳۱، ۳۴ و ۳۶ درصد می‌باشد. این بدان معناست که به‌عنوان نمونه در تخلخل ۴۵ درصد گابیون‌ها، به‌طور متوسط مقدار عمق پایاب مورد نیاز فقط ۶۴ درصد عمق مزدوج در مدل تندآب ساده $(0/64y_2^*)$ می‌باشد که در مقایسه با عمق پایاب مورد نیاز حوضچه آرامش نوع II و III که به ترتیب $0/83y$ و $0/97y$ (عمق پایاب در بستر صاف) می‌باشد کمتر است (Peterka, 1958).

ج) طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب

برای بررسی طول پرش هیدرولیکی در مدل‌های مختلف، طول پرش (L_j) اندازه‌گیری شده با استفاده از مقادیر عمق ثانویه (y_2) بی بعد گردید. در شکل (۹) مقادیر طول نسبی پرش $(\frac{L_j}{y_2})$ به ازای اعداد آبشار نشان داده شده است و بیان‌گر آن است که در سرریزهای پلکانی گابیونی به‌طور کلی طول نسبی پرش کمتر از مدل سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای عدد آبشار کمتر از ۰/۰۱۸ نسبت $\frac{L_j}{y_2}$ در مدل G-45 از سایر مدل‌ها کمتر و در عدد آبشار بیشتر از ۰/۰۲۴ نسبت $\frac{L_j}{y_2}$ در تمامی مدل‌های گابیونی تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارد و می‌توان ادعا نمود که افزایش یا کاهش تخلخل در مدل‌های گابیونی در دبی‌های بالا که جریان

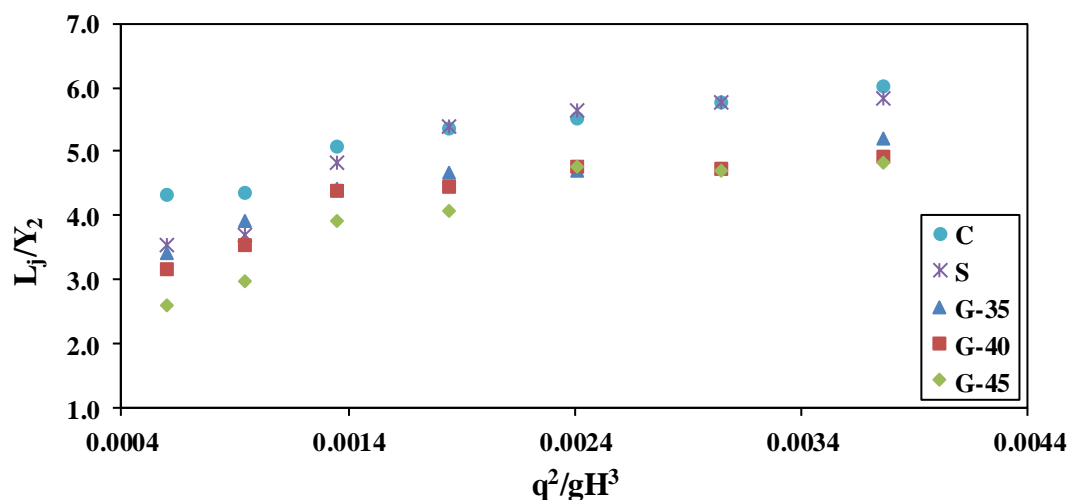


Fig. 9- Relative length variation of hydraulic jump versus drop number for all models

شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد آبشار برای تمامی مدل‌ها

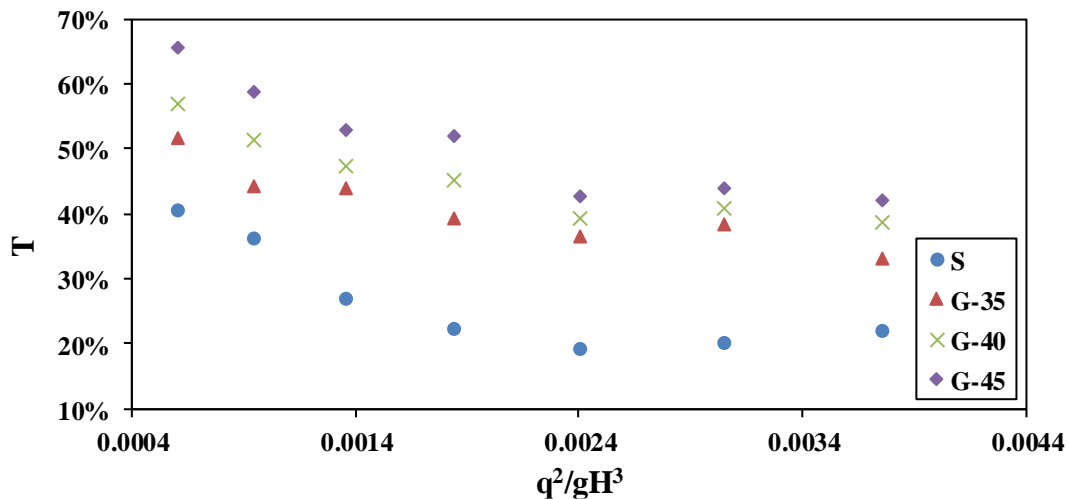


Fig. 10- Variation of hydraulic jump reduction ratio for stepped models compared to chute versus drop number

شکل ۱۰- تغییرات نسبت کاهش طول پرش هیدرولیکی برای مدل‌های پلکانی نسبت به مدل تندآب ساده در مقابل عدد آبشار

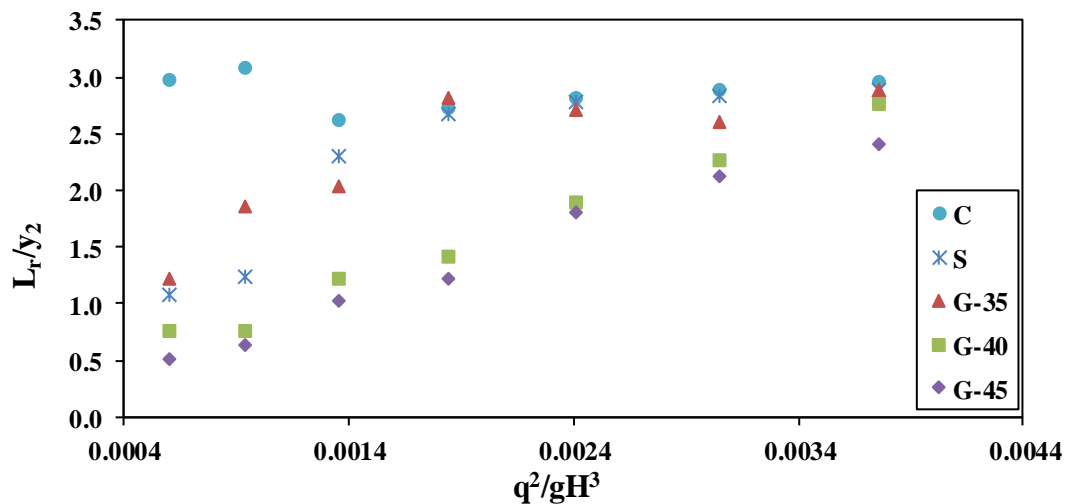


Fig. 11- Variation of the relative roller length versus the drop number for all models

شکل ۱۱- تغییرات طول نسبی غلتاب در مقابل عدد آبشار برای تمامی مدل‌ها

تمامی موارد استهلاك نسبی انرژی جریان با افزایش نسبت $\frac{q^2}{gH^3}$ (که نمایانگر افزایش دبی جریان است)، کاهش می‌یابد. به تعبیر دیگر کاهش دبی، سبب افزایش اثر زبری پله‌ها در استهلاك انرژی می‌شود. در مدل‌های S، G-35، G-40 و G-45 با کاهش نسبت $\frac{q^2}{gH^3}$ از ۰/۰۰۳۸ به ۰/۰۰۰۶ (به میزان ۸۴ درصد)، میزان استهلاك انرژی به ترتیب ۴۵، ۵۲، ۳۹ و ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

(د) افت نسبی انرژی

در شکل (۱۲) نسبت افت نسبی انرژی در مقابل پارامتر بی بعد $\frac{q^2}{gH^3}$ رسم شده است. همان‌طور که از روی شکل مشخص است مقادیر افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی بزرگتر از سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر است و این اختلاف با افزایش $\frac{q^2}{gH^3}$ اندکی بیشتر می‌شود. حداکثر افت انرژی مربوط به مدل G-45 می‌باشد که مقدار آن در حدود ۸۶ درصد است که نسبت به سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر هشت درصد بیشتر است. همچنین ملاحظه می‌شود در

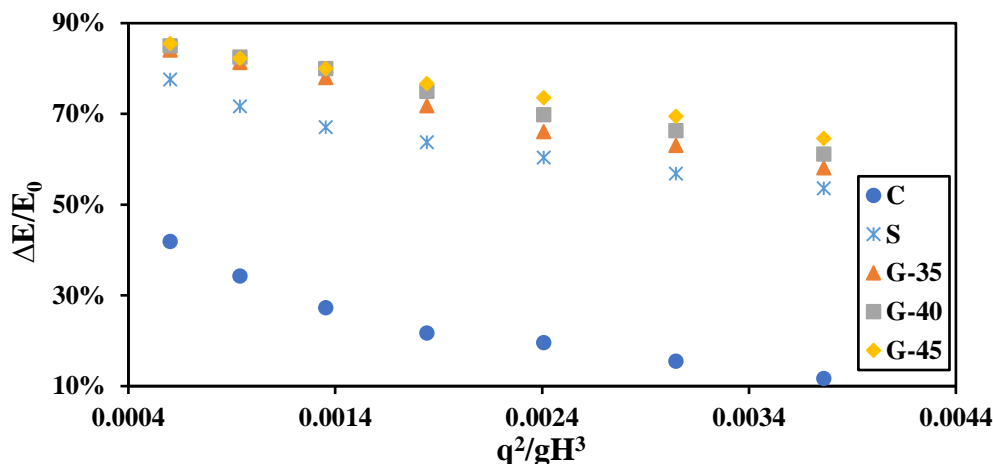


Fig 12- Variation of relative energy dissipation relative to drop number for all models

شکل ۱۲- تغییرات افت نسبی انرژی نسبت به عدد آبشار برای تمامی مدل ها

در رابطه فوق ΔE^* اتلاف انرژی در سرریز پلکانی نفوذ ناپذیر و ΔE اتلاف انرژی در سرریز پلکانی گابیونی است. جدول (۴) خلاصه نتایج درصد افزایش افت انرژی نسبت به مدل پلکانی نفوذ ناپذیر را برای مدل های پلکانی گابیونی نشان می دهد.

مقایسه نتایج با پژوهش های قبلی

شکل (۱۴) مقایسه نتایج تحقیق های Ebrahimi et al. (2005)؛ Azizi et al. (2008) و Salmasi et al. (2011) به همراه نتایج بهینه ترین مدل این تحقیق (G-45) را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود استهلاك انرژی در مدل های محققین نامبرده در محدوده عدد آبشار یکسان بیشتر از میزان استهلاك انرژی در تحقیق حاضر است. دلیل این امر عبور آب از تمام بدنه سرریز است. ولی با توجه به این نکته که پایداری و استحکام سازه پلکانی با بدنه تماماً گابیون، کمتر از سرریز پلکانی با بسته های گابیون است، لذا طراحی و اجرای این سازه در ابعاد بزرگ از نظر اجرایی سخت تر می باشد. توجه شود که این آزمایش ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه های مختلف پارامترها انجام شده است. جدول (۵) محدوده متغیرهای تحقیقات مقایسه شده را نشان می دهد.

برای بررسی اثر تخلخل بر افت نسبی انرژی جریان، در شکل (۱۳) نمودار افت نسبی انرژی در مقابل تخلخل به ازای دبی های مختلف رسم شده است. بررسی شکل مذکور نشان می دهد که با افزایش تخلخل سازه گابیونی میزان افت نسبی انرژی به اندازه ناچیزی افزایش می یابد. همچنین رابطه بین تخلخل و افت نسبی در تمامی دبی ها از روند یکسانی تبعیت می کند. در دبی های کم افزایش تخلخل تغییر چندانی در افت انرژی بوجود نمی آورد در حالی که در دبی های بالا افزایش تخلخل باعث افزایش افت انرژی می شود. دلیل این امر این است که در دبی های بالا که جریان به دو بخش روگذر و درون گذر تفکیک می شود، با افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش جریان درون گذر، رژیم جریان از رژیم رویه ای به رژیم انتقالی و یا ریزشی تغییر می کند و عمده استهلاك انرژی به واسطه تغییر رژیم جریان رخ می دهد در حالی که در دبی های پایین که قسمت عمده جریان به صورت درون گذر است و جریان کاملاً ریزشی است، افت انرژی به دلیل اصطکاک بین جریان و سنگدانه های محیط متخلخل می باشد. در اینجا به نظر می رسد که استهلاك به واسطه تغییر رژیم جریان بیشتر از استهلاك بواسطه جریان درون گذر است.

درصد افزایش افت انرژی به صورت رابطه (۱۴) تعریف می شود:

$$E_L = \frac{\Delta E - \Delta E^*}{\Delta E^*} \times 100 \quad (14)$$

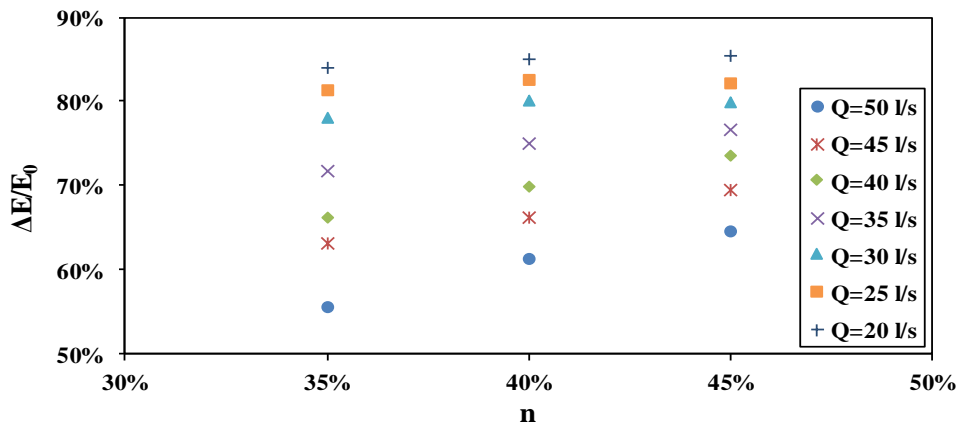


Fig. 13- Variation of relative energy dissipation with porosity for all discharges
 شکل ۱۳- تغییرات افت نسبی انرژی با تخلخل برای تمامی دبی‌ها

جدول ۴- درصد افزایش افت انرژی در مدل‌های پلکانی با گابیون نسبت به مدل پلکانی نفوذ ناپذیر برای دبی‌های مختلف

Table 4- Percentage of energy dissipation increment in gabion stepped models compared to impervious stepped model for different discharges

Model type	Drop Number						
	0.0006	0.0009	0.0014	0.0018	0.0024	0.0030	0.0038
G - 35	8.4	13.5	16.4	12.6	9.6	11.0	3.5
G - 35	9.6	15.2	19.3	17.6	15.8	16.6	14.1
G - 45	9.2	14.8	19.3	20.2	21.9	22.3	20.6

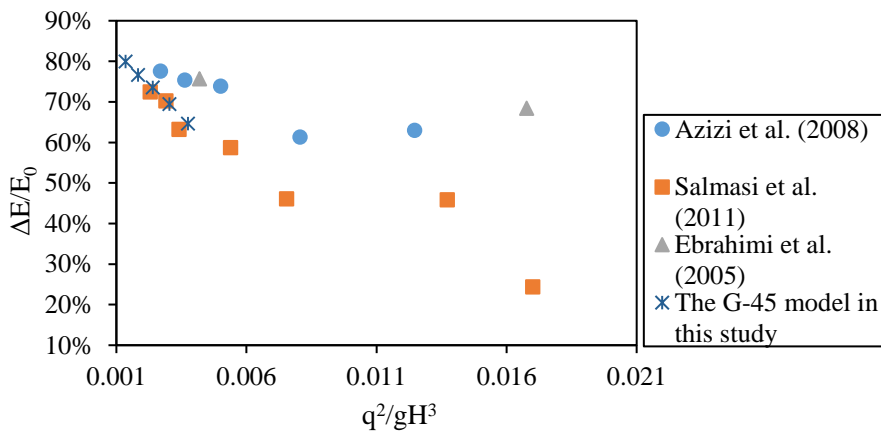


Fig. 14- Comparison of relative energy dissipation in the present study with other studies
 شکل ۱۴- مقایسه افت نسبی انرژی در تحقیق حاضر با سایر مطالعه‌ها

جدول ۵- محدوده متغیرهای تحقیق حاضر و سایر محققین

Table 5- Range of present study variables and other researchers

Researcher	Discharge (l/s)	Rock particle size (mm)	Slope	Flume width (cm)	Steps number	Step height (cm)
Ebrahimi et al. (2005)	20-100	4.75	1:2	60	3	10
Azizi et al. (2008)	10-40	31.3	1:1	60	3	10
Salmasi et al. (2011)	5-30	31.0	1:1	25	3	10
Present study	20-50	8.25-75.4	1:2	56	6	10

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر تخلخل سرریز پلکانی گابیونی بر افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه و به کمک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع ۳۵ آزمایش روی پنج مدل فیزیکی با هفت دبی مختلف صورت پذیرفت که مهم ترین نتایج به شرح زیر خلاصه می گردد:

- نتایج مطالعه های نشان داد که سرریزهای پلکانی گابیونی می توانند مشخصات پرش هیدرولیکی (شامل اعماق مزدوج، طول پرش و طول غلتابی) را نسبت به نوع نفوذ ناپذیر آن به مقدار قابل قبولی کاهش دهند. میزان این کاهش بستگی به تخلخل سازه گابیونی و عدد آبشار دارد. به طور کلی با افزایش تخلخل، درصد کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی افزایش می یابد.

- با افزایش تخلخل سازه گابیونی میزان افت نسبی انرژی افزایش می یابد.

- در دبی های کم که قسمت عمده جریان به صورت درون گذر است، افزایش تخلخل تغییر چندانی در افت انرژی بوجود نمی آورد. زیرا افت انرژی به دلیل اصطکاک سنگدانه های محیط متخلخل بوده، در حالی که در دبی های بالا، افزایش تخلخل باعث افزایش افت انرژی می شود.

- مقادیر عمق مزدوج نسبی پرش در مدل های همراه با گابیون نسبت به مدل پلکانی نفوذ ناپذیر کمتر بوده و افزایش عدد آبشار جریان از شدت این روند می کاهد.

- در کلیه مدل ها افت نسبی انرژی با افزایش عدد آبشار، کاهش می یابد. حداکثر افت انرژی در مدل G-45 اتفاق می افتد که معادل ۸۶ درصد است.

- در بازه اعداد آبشار ۰/۰۰۰۶ تا ۰/۰۰۳۸ حداکثر و میانگین پارامتر کاهش عمق مزدوج (D) به ترتیب ۴۳ و ۳۱ درصد می باشد که این میزان حداکثر متعلق به مدل G-45 است.

- افزایش تخلخل باعث کاهش طول نسبی پرش ($\frac{L_p}{y_2}$) می گردد ولی در مدل های پلکانی گابیونی در رژیم های رویه ای افزایش یا کاهش تخلخل تأثیر قابل ملاحظه ای بر طول نسبی پرش ندارد.

- درصد کاهش طول پرش (T) در مدل سرریزهای پلکانی نفوذ ناپذیر و گابیونی نسبت به تندآب ساده، بین ۲۲ تا ۶۶ درصد تغییر می کند. روند این تغییر با تبدیل مدل پلکانی نفوذ ناپذیر به گابیونی و همچنین افزایش تخلخل، افزایشی است.

- مقدار طول غلتاب حداکثر به میزان ۹۰ درصد نسبت به مدل تندآب ساده کاهش می یابد و افزایش عدد آبشار از شدت روند کاهش آن می کاهد.

- تخلخل ۴۵ درصد از بین سه تخلخل مورد بررسی در این مطالعه، بهترین نتایج را برای کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی در بر داشت.

تشکر و قدردانی

این مقاله از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم به شماره ۹۵/۳/۰۲/۳۱۴۰۰ تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می کنند ضمناً از حمایت معنوی قطب علمی "بهبودی و نگهداری شبکه های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی می گردد.

References

- 1- Azizi, A., Meftah Halaghi, M., Ziatabar Ahmadi, M.Kh., and Golmaei, S.H., 2008. Evaluating The Affection Of Used Material Porosity On Energy Dissipation In Gabion Stepped Weirs. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(1). pp. 150-158.
- 2- Chanson, H. 1994a. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research*. 32(3). pp. 445-460.
- 3- Chanson, H., 1994b. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 32(2). pp. 213-218.
- 4- Chanson, H., 1995. Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(5). pp. 441-442.
- 5- Chinnarasri, C., Donjadee, S. & Israngkura, U., 2008. Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(8). pp. 1147-1152.
- 6- Chamani, M.R. & Rajaratnam, N., 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(4). pp. 361-368.
- 7- Ebrahimi, N.Gh., Kashefipour, S.M. and Ebrahimi, K., 2005. Investigation of hydraulic characteristics of flow on a gabion stepped spillway model. *5th Iranian Conference on Hydraulics*. Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Persian)

- 8- Essery, I.T.S. & Horner, M.W., 1971. The hydraulic design of stepped spillways. *Report 33 ,Constr. Industry Res. and Information Assoc. London. England.*
- 9- Gonzalez, C.A., Takahashi, M. & Chanson, H., 2008. An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 46(2)*. pp. 24-35.
- 10- Heydari orjlo, S., Mousavi Jahromi, S.H., and Adib, A., 2010. Influence of the steeped spillway slope on the number of optimal steps. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 33(2)*. pp. 127-140. (In Persian).
- 11- Matos, J. & Quintela, A., 1994. Jet flow on stepped spillways. *Discussion, Journal of Hydraulic Engineering, 120(2)*. pp. 443-444.
- 12- Peterka, A.J., 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. *Engineering Monograph, No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA.*
- 13- Peyras, L., Royet, P. & Degoutte, G., 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(5)*. pp. 707-717.
- 14- Rajaratnam, N., 1990. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(4)*. pp. 587-591.
- 15- Rand, W., 1955. Flow geometry at straight drop spillway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 81(791)*. pp. 1-13.
- 16- Reeve, D.E., Zuhaira, A.A., Karunarathna, H., 2019. Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways. *Water Science and Engineering, 12(1)*. pp. 62-72.
- 17- Salmasi, F., Farsadizade, D., and Mohit, H., 2011. Experimental Evaluation of Energy Dissipation over Gabion Stepped Spillway. *Water and Soil Science, 21(4)*. pp. 152-164. (In Persian)
- 18- Sorensen, R.M., 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(12)*. pp. 1461-1472.
- 19- Stephenson, D., 1979. Gabion energy dissipaters. *Proceedings of the International Commission on Large Dams, New Dehli*. Pp: 33-43.
- 20- Wüthrich, D. & Chanson, H., 2014. Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a gabion stepped weir. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 140(9)*, 04014046.
- 21- Zhang, G. & Chanson, H., 2015. Broad-crested weir operation upstream of a stepped spillway. *E- Proceedings of the 36th IAHR World Congress*. The Hague, the Netherlands.
- 22- Zhang, G., Chanson, H., 2016. Gabion stepped spillway: Interactions between free-surface, cavity and seepage flows. *Journal of Hydraulic Engineering, 142(5)*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001120).