

R. Daneshfaraz*

Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Maragheh.

e-mail:
daneshfaraz@maragheh.ac.ir

M. Majedi-Asl

Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Maragheh.

e-mail:
majedi@maragheh.ac.ir

S. A. Mortazavi

Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Maragheh.

e-mail:
mortazavi.seyyedali@yahoo.com

M. Bagherzadeh

Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, Urmia
University.

e-mail:
m.bagherzadeh@urmia.ac.ir

Laboratory Evaluation of Energy Dissipation in the Combined Structure of the Vertical Drop with Gabion

Today, the use of stone materials, especially gabions, for easy access and abundance for the construction of rockfill dams, filtration, and stilling basin is increasing. In this study, first, the hydraulic flow by combining the gabion structure with a vertical drop and then the effect of porosity and length of the gabion structure on the energy dissipation values were investigated. For two modes of simple vertical drop and gabion, a total of 260 experiments including two heights of 15 and 20 cm drop, three porosities of 40, 45, and 50 percent, and eight different gabion lengths with a flow range of 150 to 800 liters per minute were performed. The results showed that in all the studied models, with increasing the relative critical depth parameter of the flow, the energy dissipation decreases and the downstream relative depth increases. The integration of the gabion structure caused the energy dissipation and the downstream Froude number to increase and decrease, respectively. On average, in all models, the use of gabions increased 57% of the energy dissipation of the current compared to the simple vertical drop and reduced the range of the Froude number from 3.5-8.7 to 0.52-2.5. The flow regime passing through the vertical drop gabion physical models includes inflow, transient, and overflow, of which the Inflow regime plays a Major contribution in energy dissipation. For a constant relative length, increasing the porosity of the gabion structure increases the volume of water passing through the porous medium and the energy dissipation of the flow, in contrast for a constant porosity, increasing the relative length of the gabion structure has little effect on the energy dissipation. On average, in vertical drop gabion with 50% porosity compared to 40% porosity, the downstream relative depth increased by 15%.

Keywords: Vertical drop, Gabion, Additional Structures, Energy dissipator, Flow Regime, Froude Number

* Corresponding author

Received 26 December 2021, Revised 17 February 2022, Accepted 21 February 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7720.1344

رسول دانشفراز*

گروه مهندسی عمران، دانشکده
فنی مهندسی، دانشگاه مراغه.
پست الکترونیک:
daneshfaraz@maragheh.ac.ir

مهدی ماجدی اصل

گروه مهندسی عمران، دانشکده
فنی مهندسی، دانشگاه مراغه.
پست الکترونیک:
majedi@maragheh.ac.ir

سیدعلی مرتضوی

گروه مهندسی عمران، دانشکده
فنی مهندسی، دانشگاه مراغه.
پست الکترونیک:
mortazavi.seyyedali@yahoo.com

محمد باقرزاده

گروه مهندسی عمران، دانشکده
فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه.
پست الکترونیک:
m.bagherzadeh@urmia.ac.ir

ارزیابی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در سازه تلفیقی شیب‌سکن قائم با گابیون

امروزه استفاده از مصالح سنگی به خصوص گابیون به جهت دسترسی آسان و فراوانی برای ساخت سدهای پاره‌سنگی، فیلتراسیون و حوضچه‌های آرامش رو به افزایش است. در این تحقیق ابتدا هیدرولیک جریان عبوری با تلفیق نمودن سازه گابیونی با شیب‌سکن قائم و سپس تاثیر تخلخل و طول سازه گابیونی بر روی مقادیر استهلاک انرژی بررسی شد. برای دو حالت شیب‌سکن قائم ساده و گابیونی در مجموع ۲۶۰ آزمایش شامل دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری شیب‌سکن، سه تخلخل ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصدی و ۸ طول مختلف گابیون با دامنه دبی ۱۵۰ الی ۸۰۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد در تمامی مدل‌های مورد بررسی، با افزایش پارامتر عمق بحرانی نسبی جریان، استهلاک انرژی جریان کاهش و عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد. تلفیق سازه گابیونی سبب گردید که استهلاک انرژی جریان و عدد فرود پایین‌دست به ترتیب افزایش و کاهش یابند. به طور میانگین در تمامی مدل‌ها استفاده از گابیون ۵۷٪ استهلاک انرژی جریان را نسبت به شیب‌سکن قائم ساده افزایش و بازه عدد فرود را از ۵/۷ - ۳/۸ به ۲/۵ - ۰/۵۲ کاهش داده است. رژیم جریان عبوری از مدل‌های فیزیکی شیب‌سکن قائم گابیونی شامل جریان درون‌گذر، انتقالی و روگذر می‌باشد که رژیم جریان درون‌گذر سهم عمده‌ای در اتلاف انرژی دارد. برای یک طول نسبی ثابت، با افزایش تخلخل سازه گابیونی حجم آب عبوری از محیط متخلخل و استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد در حالی که برای تخلخل ثابت، افزایش طول نسبی سازه گابیونی تاثیر چندانی بر میزان استهلاک انرژی ندارد. به طور میانگین در شیب‌سکن‌های قائم گابیونی با تخلخل ۵۰٪ نسبت به حالت تخلخل ۴۰٪، عمق نسبی پایین‌دست ۱۵ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی: شیب‌سکن قائم، گابیون، سازه‌های الحاقی، مستهلک‌کننده انرژی، عدد فرود

۱- مقدمه

شیب‌سکن‌های قائم، مایل و لوله‌ای تقسیم بندی می‌شوند. عمده دلیل تمایل طراحان حوزه هیدرولیک جهت احداث این سازه‌ها، همواره به خاطر استهلاک انرژی جنبشی جریان عبوری از روی شیب‌سکن عنوان شده است. به همین دلیل همواره ارائه راهکارهایی مقرون به صرفه و مناسب همانند استفاده از سازه‌های الحاقی مورد توجه بوده است [۱]. از سوی دیگر در پژوهش‌های اخیر استفاده از سازه‌های گابیونی نیز به عنوان روشی جهت مستهلک نمودن انرژی جریان رواج یافته است. تامین مصالح سازه گابیون از مصالح طبیعی موجود در منطقه صورت می‌گیرد که علاوه بر مزایای اقتصادی و کاهش هزینه اجرا،

هنگام احداث کانال‌های روباز به دلیل مغایرت شیب موجود طبیعی زمین با شیب طراحی شده، به طوری که با انجام عملیات عمرانی همانند خاکبرداری اصلاح صورت نگیرد بایستی از سازه شیب‌سکن استفاده نمود. شیب‌سکن‌ها براساس هندسه و کاربرد به سه گروه

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲
DOI: 10.22091/cer.2022.7720.1344 شناسه دیجیتال

افزایش می‌یابد [۷]. لیو^۶ و همکاران آزمایش‌هایی برای چهار ارتفاع شیب‌شکن و سه شیب ۲، ۴ و ۶ درصدی با در نظر گرفتن شیب در بالادست آن را بررسی نمودند. این محققین دریافتند که افزایش شیب بالادست شیب‌شکن، سبب کاهش عمق آب داخل استخر، زاویه برخورد جت، عمق لبه، عمق پایین‌دست و استهلاک انرژی می‌شود [۸]. در سال‌های اخیر استفاده از سازه‌های الحاقی جهت افزایش استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مد نظر محققان مختلفی قرار گرفته است، اهم تحقیقات در این زمینه به شرح زیر است:

کبیری سامانی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک کننده‌های افقی شبکه‌ای و شیاری پرداختند. استفاده از مستهلک کننده شبکه‌ای و شیاری در لبه شیب‌شکن استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین‌دست را افزایش داد [۹]. دانشفراز و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان شیب‌شکن‌های قائم با مجهز نمودن به صفحات مشبک افقی با دو نسبت تخلخل و سه نسبت بازشدگی درجه تحت شرایط جریان فوق بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بکارگیری این صفحات سبب افزایش استهلاک انرژی جریان، عمق نسبی پایین‌دست و عمق نسبی استخر می‌گردد. همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش عدد فرود بالادست و کاهش عمق بحرانی نسبی استهلاک انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد [۱۰]. دانشفراز و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با بکارگیری صفحات مشبک افقی دوبل و جریان زیربحرانی در بالادست مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فاصله نسبی صفحات تأثیری بر عمق نسبی و انرژی باقی‌مانده پایین‌دست ندارد [۱۱]. دانشفراز و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، تأثیر صفحه مشبک افقی بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم را بررسی نمودند.

سازگاری خوبی با محیط زیست پیرامون داشته و وجود گابیون در مسیر جریان آب به جهت عبور جریان از میان سنگریزه‌ها و یا حتی از روی سازه متخلخل استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد [۲].

پیشینه تحقیق حاضر در حالت کلی در سه بخش قابل ارائه می‌باشد، ۱- تحقیقات اولیه بر روی سازه شیب‌شکن قائم که بیشتر به بررسی خود سازه و تأثیر عوامل مختلف هیدرولیکی بر میزان استهلاک انرژی می‌پردازد. ۲- تلفیق شیب‌شکن قائم با سازه‌های الحاقی و تأثیر این سازه‌های الحاقی بر میزان استهلاک انرژی. ۳- ترکیب سازه‌های گابیونی با سازه‌های هیدرولیکی و تأثیر آن بر میزان استهلاک. در ادامه اهم این تحقیقات ارائه شده است:

اولین تحقیق در زمینه جریان عبوری از شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست، توسط بختف^۱ صورت گرفت [۳]. راجاراتنام و چمنی^۲ به بررسی آزمایشگاهی جریان در داخل استخر زیر جت در حال سقوط پرداختند. نتایج نشان داد که عامل اصلی استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم، وجود تلاطم در داخل استخر می‌باشد. همچنین این محققین برای ارائه روابطی برای پیش‌بینی عمق استخر و استهلاک انرژی، علاوه بر داده‌های آزمایشگاهی خودشان از داده‌های مور^۳ و رند^۴ نیز استفاده نمودند [۴، ۵ و ۶]. در نظر گرفتن یک پله به ابعاد مربعی با با محدوده ارتفاع نسبی پله به ارتفاع شیب‌شکن ۰/۱۱ تا ۰/۶۱ در پایین‌دست شیب‌شکن قائم و چسبیده به آن در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم جهت بررسی استهلاک انرژی کل جریان توسط اسن^۵ و همکاران به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت. نتیجه مطالعات این محققین نشان داد که با افزایش ارتفاع پله، استهلاک انرژی و عمق پایین‌دست شیب‌شکن قائم

² Rajaratnam and Chamani

³ Moore

⁴ Rand

⁵ Esen

⁶ Liu

انرژی نیز افزایش می‌یابد [۱۶]. وسریچ و چانسون^۹ نشان دادند که در سرریزهای پلکانی گابیونی فعل و انفعالات رخ داده میان جریان روگذر و درون‌گذر تابعی از شکل گابیون، دبی، رژیم جریان و الگوی چرخش می‌باشد [۱۷]. ماجدی اصل و همکاران به ارزیابی آزمایشگاهی شرایط مختلف هیدرولیکی بر عملکرد سازه‌های تورسنگی در استهلاک انرژی نسبی پایین دست سرریز اوجی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع آب پایه تورسنگی، طول پرش هیدرولیکی نسبی افزایش یافته و میزان استهلاک انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با ایجاد بازشدگی و افزایش آن در عرض آب پایه دریافتند که این کار سبب کاهش استهلاک انرژی نسبی می‌گردد [۱۸]. دانشفراز و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، میزان استهلاک انرژی نسبی جریان کاهش می‌یابد. استفاده از گابیون در قسمت شیب‌دار شیب‌شکن مایل سبب می‌شود که میزان استهلاک انرژی جریان به طور متوسط ۸۲ درصد نسبت به شیب‌شکن مایل ساده افزایش یابد [۱۹]. باقرزاده و همکاران به مقایسه آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی به همراه حوضچه آرامش در پایین دست سازه پرداختند. با مقایسه دو نوع شیب‌شکن مشخص گردید که شیب‌شکن مایل گابیونی به ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی مانده پایین دست در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار گردید [۲۰].

با توجه به تحقیقات بالا، مشخص گردید که شیب‌شکن قائم متداول‌ترین و پرکاربردترین سازه جهت انتقال ثقلی جریان آب در مناطق کوهستانی می‌باشد. در دهه‌ی اخیر استفاده از گابیون به عنوان سازه‌ای در

در مجموع ۱۰۵ آزمایش برای سه ارتفاع شیب‌شکن و دو نسبت تخلخل انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن قائم می‌تواند عمق استخر نسبی، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی را در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش دهد [۱۲]. دانشفراز و همکاران تاثیر قطر صفحات مشبک افقی در استهلاک انرژی پایین دست شیب‌شکن قائم را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش قطر روزنه تاثیر چندانی بر میزان استهلاک انرژی جریان ندارد [۱۳]. میرزایی و همکاران به بررسی عددی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای افقی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین دست، طول ریزش جت و شدت آشفته‌گی ایجاد شده را افزایش می‌دهد. افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن‌ها نیز استهلاک انرژی جریان را افزایش داده و محدوده عدد فرود پایین دست را کاهش می‌دهد [۱۴].

عمده تحقیقات انجام شده بر روی سازه گابیونی جهت استهلاک انرژی نیز به شرح زیر ارائه می‌گردد:

پیراس^۷ و همکاران مطالعاتی بر روی مدلی از سرریزهای پلکانی گابیونی با هدف محاسبه استهلاک انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه آرامش انجام دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که بندهای پلکانی گابیونی قابلیت تحمل دبی جریان تا ۳ مترمکعب بر ثانیه در عرض واحد را دارد. همچنین ریختن یک لایه بتن بر روی پله‌ها و معکوس نمودن شیب باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود [۱۵]. پاگلیارا و چیاواچینی^۸ پژوهشی در مورد افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب نسبتاً کم انجام دادند. نتایج حاکی از این بود که با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان زیاد شده و لذا افت

^۷ Peyras^۸ Pagliara and Chiavaccini^۹ Wüthrich and Chanson

۱-۲- آنالیز ابعادی

با بررسی شرایط آزمایشگاهی پارامترهای تأثیرگذار بر استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم گابیونی را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$\Delta E = f_1(\rho, \mu, g, q, h, l, n, y_u, y_c, y_d) \quad (1)$$

که در آن، ΔE استهلاک انرژی، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش زمین، q دبی جریان، h ارتفاع شیب‌شکن، l طول سازه گابیونی، n تخلخل دانه‌های سنگی، y_c عمق بحرانی، y_u عمق بالادست شیب‌شکن و y_d عمق پایین‌دست شیب‌شکن قائم گابیونی می‌باشد.

با استفاده از روش پی‌باکینگهام و با انتخاب سه پارامتر تکراری ρ, g, h آنالیز ابعادی انجام گرفت و رابطه زیر بدست آمد.

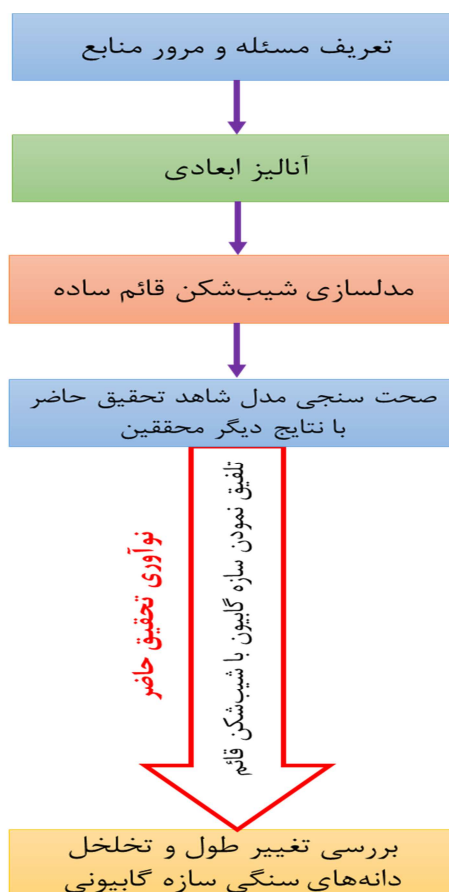
$$\Delta E = f_2\left(\frac{y_u}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{y_d}{h}, \frac{l}{h}, n, \frac{q}{h\sqrt{gh}}, \frac{q\rho}{\mu}\right) = 0 \quad (2)$$

در تمامی مدل‌ها جریان متلاطم است ($Re_u \geq 2000$)، لذا پارامتر بی‌بعد $\left(\frac{q\rho}{\mu}\right)$ که معرف عدد رینولدز بالادست Re_u می‌باشد، قابل نظر می‌باشد [۲۱ و ۲۲]. در رابطه (۲) عبارت $\left(\frac{q}{h\sqrt{gh}}\right)$ از نظر ابعادی بیانگر عدد فرود جریان می‌باشد. همچنین با ساده سازی و صرف نظر کردن از پارامترهای بی‌بعد غیر موثر همانند $\left(\frac{y_u}{h}\right)$ به خاطر زیر بحرانی بودن جریان در بالادست شیب‌شکن رابطه (۳) بدست می‌آید [۱۰ و ۲۳].

$$\frac{\Delta E}{E_u}, \frac{y_d}{h}, Fr_d = f_3\left(\frac{y_c}{h}, \frac{l}{h}, n\right) \quad (3)$$

طبق آنالیز ابعادی انجام گرفته مشخص گردید که استهلاک انرژی، عمق نسبی و عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن قائم گابیونی را می‌توان تابعی از عمق بحرانی

دسترس و ارزان قیمت در پروژه‌های عمرانی رواج یافته است. از طرفی در زمینه کنترل و استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن‌ها با استفاده از سازه‌های مستهلک کننده انرژی و سازه‌های الحاقی همانند صفحه مشبک و سازه گابیونی مطالعات وسیعی انجام گرفته است. اما در مورد بکارگیری سازه تلفیقی شیب‌شکن قائم با گابیون مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است. به همین دلیل در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی اثر تلفیق نمودن گابیون با سازه شیب‌شکن قائم و سپس در ادامه میزان تاثیر تغییر طول و تخلخل دانه‌های سنگی سازه گابیونی بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم گابیونی نظیر استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین‌دست در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده پرداخته خواهد شد. در شکل ۱ فلوچارت روند تحقیق حاضر ارائه شده است.



شکل ۱- فلوچارت روند تحقیق حاضر

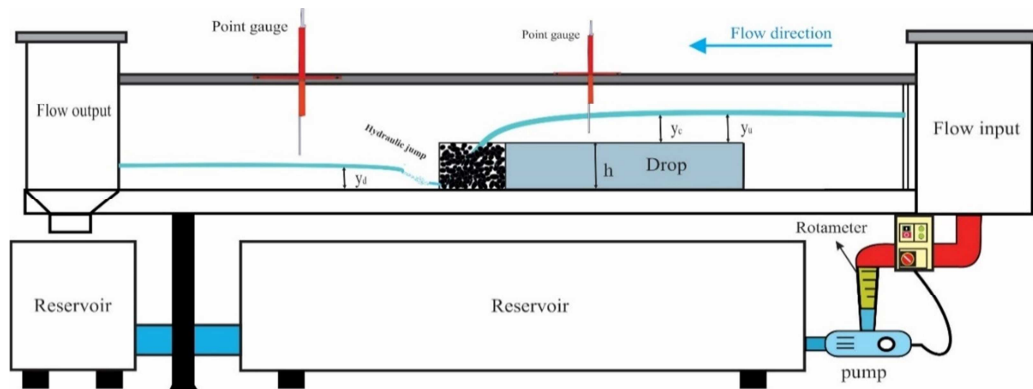
۲- مواد و روش‌ها

میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر، هم عرض کانال و در طول‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر و ۲ ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری ساخته شد. همچنین انتخاب طول سازه گابیونی در تحقیق حاضر تابعی از ارتفاع شیب‌شکن می‌باشد ($h, 2h, 3h, 4h$). از سه نوع دانه‌بندی با تخلخل‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد جهت پر نمودن سازه گابیونی استفاده شد. در تمامی مدل‌های آزمایشگاهی محدوده دبی ۱۵۰ الی ۸۰۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در شکل ۲ شماتیک مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه شده است.

نسبی، طول نسبی سازه گابیونی و تخلخل دانه‌های سنگی دانست.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات فلوم آزمایشگاهی به همراه مشخصات مدل پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. ساخت مدل‌های تحقیق حاضر در دو مرحله صورت گرفت به نحوی که ابتدا سازه شیب‌شکن قائم در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری و هم عرض کانال از جنس شیشه احداث شد. برای سازه‌های گابیونی نیز از باکس‌هایی از جنس



شکل ۲- نمای شماتیک مدل تحقیق حاضر به همراه تجهیزات آزمایشگاهی

جدول ۱- خصوصیات تجهیزات آزمایشگاهی و مدل‌های تحقیق حاضر

خصوصیات		تجهیزات و مواد		
سایر ویژگی‌ها	جنس	ابعاد (طول × عرض × ارتفاع) متر		
----	جنس دیواره و کف: پلکسی گلاس	$0/45 \times 0/3 \times 5$	فلوم	
	شیشه ۸ میلی‌متری	$0/2, 0/15$ و $0/3 \times 1/2$	مدل فیزیکی شیب‌شکن قائم ساده	
متشکل از دانه‌های سنگی با تخلخل‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰	میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر	$0/2, 0/15 \times 0/3 \times h, 2h, 3h, 4h$	مدل فیزیکی شیب‌شکن قائم گابیونی	
دقت اندازه‌گیری		ابزارهای اندازه‌گیری		
ظرفیت پمپ: ۴۵۰ تا ۱۵۰ لیتر بر دقیقه	۴ درصد	فلزی	۲ عدد	پمپ
	۲ درصد	روتامتر		دبی‌سنج
اندازه‌گیری اعماق	یک میلی‌متر	فلزی	----	عمق سنج نقطه‌ای

۲-۴- روابط محاسبه استهلاک انرژی

جهت محاسبه استهلاک انرژی و استهلاک انرژی نسبی در شیب‌شکن قائم گابیونی تحقیق حاضر از روابط (۴) و (۵) استفاده گردید.

$$\Delta E = E_u - E_d \quad (۴)$$

$$\frac{\Delta E}{E_u} = 1 - \frac{E_d}{E_u} \quad (۵)$$

که در آن E_u هد کل بالادست شیب‌شکن قائم گابیونی و E_d انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم گابیونی می‌باشد. همچنین رابطه (۶) توسط بختف^{۱۰} برای هد کل بالادست، شیب‌شکن قائم ارائه گردید و از رابطه (۷) نیز به عنوان رابطه عمومی انرژی در محاسبات بکار گرفته شد.

$$E_u = h + 1.5y_c \quad (۶)$$

$$E_d = y_d + \frac{q^2}{2gy_d^2} \quad (۷)$$

در روابط بالا h ارتفاع شیب‌شکن، y_c عمق بحرانی، q دبی واحد عرض کانال، g شتاب گرانش زمین و y_d عمق پایین‌دست شیب‌شکن قائم گابیونی می‌باشد.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

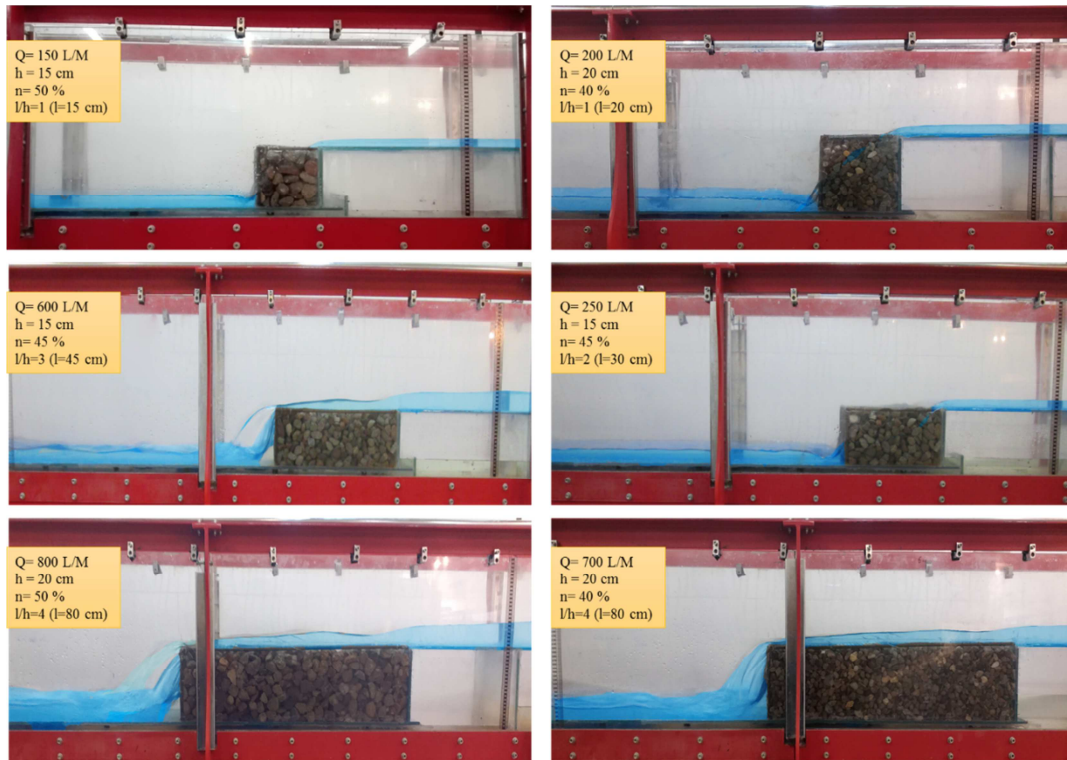
ابتدا در تحقیق حاضر ۲۰ آزمایش بر روی شیب‌شکن قائم ساده در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری و عرض ۳۰ سانتی‌متری به عنوان مدل شاهد انجام شد. در ادامه و در راستای هدف تحقیق حاضر به تلفیق نمودن شیب‌شکن قائم و سازه گابیونی مبادرت گردید. بدین منظور برای ایجاد سازه گابیونی از سه نوع دانه سنگی با تخلخل‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد و باکس‌های میلگردی

¹⁰ Bakhmeteff

با قطر ۱۰ میلی‌متر در طول‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متری و ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری استفاده شد. در این مرحله نیز ۲۴۰ آزمایش متفاوت به ازای ۱۰ دبی عبوری در محدوده ۱۵۰ الی ۸۰۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. در هر سری از آزمایش‌ها ابتدا پس از روشن نمودن پمپ، دبی مورد نظر با استفاده از روتامتر نصب شده بر روی پمپ تنظیم می‌شد. پس از پایداری شرایط جریان بر روی شیب‌شکن قائم، پارامترهای جریان اندازه‌گیری می‌گردید. در شکل ۳، نمایی از آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک و نحوه رفتار جریان در هنگام عبور از فضای متخلخل سازه گابیونی را نشان می‌دهد. در طی آزمایشات مشاهده گردید که هنگام برخورد جریان با سازه گابیونی سه نوع رژیم درون‌گذر، انتقالی و روگذر از گابیون تشکیل می‌شد. بدین نحو که رژیم جریان درون‌گذر در دبی‌های کم، در محدوده (۱۵۰ و ۲۰۰ لیتر بر دقیقه) اتفاق می‌افتد و در این دبی‌ها، جریان کاملاً از فضای متخلخل عبور کرده و پس از عبور جریان از داخل سازه گابیونی در پایین‌دست آن پرش هیدرولیکی و در نهایت جریان زیر بحرانی اتفاق می‌افتد. طی مشاهدات آزمایشگاهی مشخص گردید که در محدوده ۲۵۰ الی ۴۰۰ لیتر رژیم جریان انتقالی رخ می‌دهد که این مرحله آستانه شروع جریان همزمان از حالت درون‌گذر و روگذر می‌باشد، به نحوی که قسمتی از جریان به صورت درون‌گذر و قسمت دیگر تمایل به روگذری دارد و فضای متخلخل پر از آب هست. همچنین در این هنگام نیز تلاطم و آشفتگی جریان به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد و پس از این حالت تلاطم و آشفتگی کاهش می‌یابد و جریان نیز به صورت فوق بحرانی و همراه با پرش‌های موجی شکل است. پس از عبور از این حالت نیز رژیم جریان روگذر اتفاق می‌افتد و هنگام افزایش دبی جریان برای دبی‌های بیشتر از ۴۰۰ لیتر بر دقیقه نیز مشاهده می‌شود که بخش اعظم جریان علاوه بر عبور از میان دانه‌های سنگی به صورت روگذر از سازه گابیونی عبور می‌کند و به پایین‌دست ریزش می‌کند.

می‌یابد، سازه گابیونی زودتر مستغرق می‌شود و سبب کاهش تلاطم و استهلاک انرژی می‌شود. تمامی رخدادهای بیان شده در این بخش در شکل ۳ نشان داده شده است.

در چنین حالتی ابتدا شاهد استغراق سازه گابیونی همراه با ریزش متوسط از روی آن هستیم و هنگامی که دبی افزایش می‌یابد به خصوص در دبی‌های انتهایی سازه گابیونی به صورت مستغرق با ریزش کامل همراه است. همچنین وقتی تخلخل دانه‌بندی سازه گابیونی کاهش



شکل ۳- نمایی از مدل‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر با تشکیل جریان‌های روگذر و درون‌گذر

و استهلاک انرژی به دلیل افزایش سرعت جت می‌گردد. مقایسه نتایج مربوط به استهلاک انرژی نسبی در شیب‌شکن‌های قائم ساده تحقیق حاضر با محققین پیشین نشان می‌دهد که نتایج تحقیق حاضر تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دانشفرز و همکاران، اسن^{۱۱} و همکاران و رابطه ارائه شده توسط راجاراتنام و چمنی^{۱۲} دارد [۴، ۷ و ۱۲].

۳-۳- استهلاک انرژی نسبی

پارامتر مهمی که در طراحی شیب‌شکن‌ها نقش دارد، میزان افت انرژی می‌باشد. بدین منظور یکی از

۳-۲- صحت سنجی مدل شاهد تحقیق حاضر با نتایج دیگر محققین

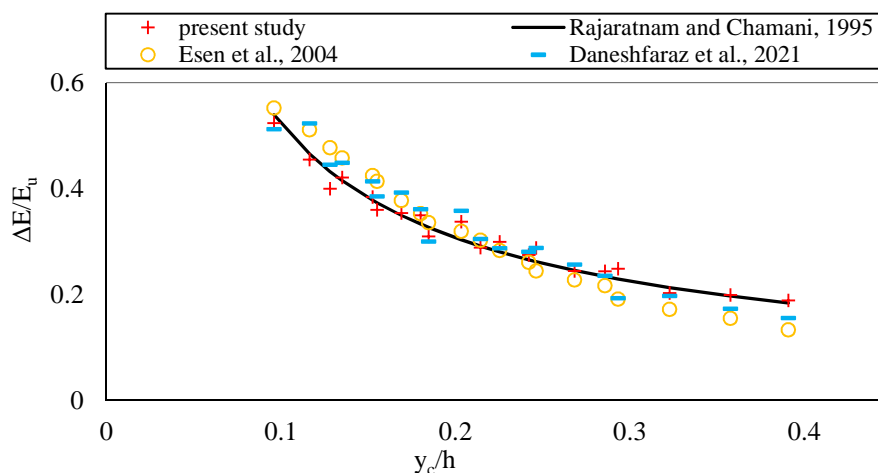
استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست به جهت اثر ضربه‌ای جت به کف استخر و تلاطم جریان در استخر زیر جت رخ می‌دهد [۴] و [۲۴]. در شکل ۴ تغییرات استهلاک انرژی نسبی نسبت به عمق بحرانی نسبی شیب‌شکن‌های قائم ارائه شده است. نتایج نشان داد که در تحقیق حاضر نیز مطابق نتایج دیگر محققین، با افزایش عمق بحرانی نسبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم ساده به دو عامل عمق بحرانی و ارتفاع شیب‌شکن وابسته می‌باشد لذا با افزایش ارتفاع و به تبع آن کاهش عمق بحرانی نسبی نیز در یک دبی ثابت، باعث افزایش قدرت ضربه‌ای

¹¹ Esen

¹² Rajaratnam and Chamani

بحرانی نسبی شیب‌شکن قائم گابیونی با ۳ نوع دانه‌بندی، ۲ ارتفاع شیب‌شکن و ۸ طول گابیون در شکل ۵ ارائه شده است.

اهداف تحقیق حاضر بررسی استهلاک انرژی سازه شیب‌شکن قائم گابیونی در مقایسه شیب‌شکن قائم ساده می‌باشد. نمودار تغییرات استهلاک انرژی نسبی و عمق



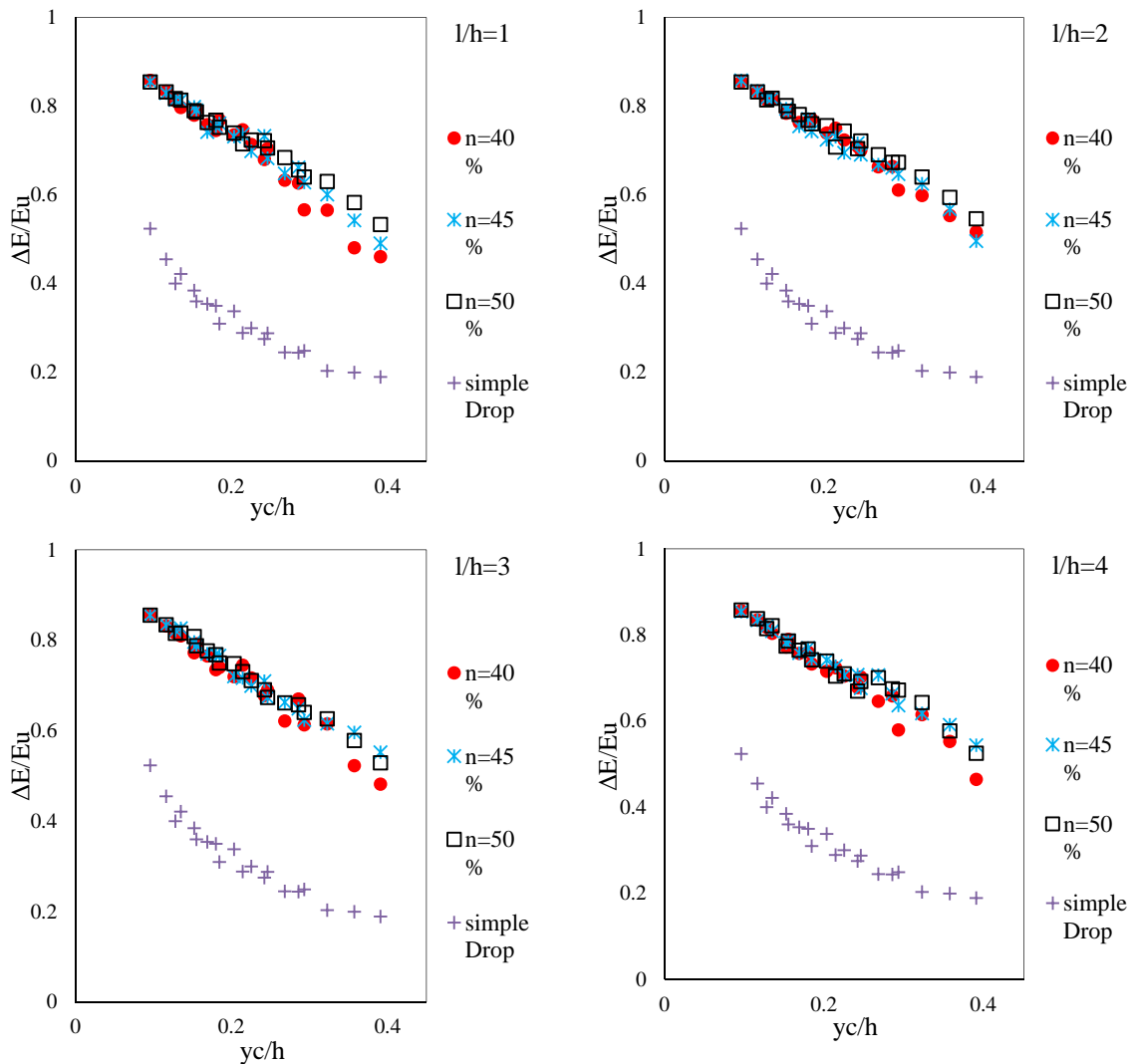
شکل ۴- مقایسه تغییرات استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن قائم ساده تحقیق حاضر با دیگر محققین

متخلخل در مستهلک کردن انرژی می‌تواند مدنظر باشد. به همین دلیل استفاده از دانه‌بندی با تخلخل بالا سبب عبور جریان حاوی رسوب از فضای متخلخل و عدم انباشت رسوبات ریز در داخل سازه گابیونی می‌شود، بنابراین سازه گابیونی با تخلخل ۵۰٪ نسبت به سایر تخلخل‌های این تحقیق، می‌تواند گزینه مناسبی جهت طراحی باشد. طبق نتایج آزمایشات مشخص گردید که در یک دبی ثابت برای مدل شیب‌شکن قائم گابیونی با طول نسبی و دانه‌بندی ثابت، کاهش ارتفاع شیب‌شکن منجر به کاهش میزان استهلاک انرژی نسبی جریان می‌شود. با مقایسه طول نسبی سازه گابیونی نیز مشخص شد که افزایش طول تاثیر ناچیزی در مقادیر استهلاک انرژی دارد. افزایش طول نسبی از $(l/h=1)$ به $(l/h=2)$ سبب افزایش استهلاک می‌گردد اما پس از این طول نسبی، افزایش طول سازه گابیونی تاثیر بسزایی در استهلاک انرژی ندارد. همچنین از منظر مهندسی و اقتصادی، با افزایش طول سازه گابیونی میزان پایداری سازه و مهار نمودن آن و همچنین هزینه اجرا و نگهداری آن افزایش می‌یابد. لذا استفاده از طول زیاد سازه گابیونی هنگام تلفیق با شیب‌شکن قائم توجیه اقتصادی ندارد و طول

استهلاک انرژی تمامی مدل‌های تحقیق حاضر با افزایش دبی جریان روندی نزولی دارد و کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۵ برای یک طول نسبی گابیون با افزایش تخلخل دانه‌های سنگی بکار رفته در سازه گابیونی، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. افزایش تخلخل دانه‌بندی سازه گابیونی هرچند به میزان کمی در استهلاک انرژی تاثیرگذار می‌باشد اما با افزایش تخلخل، فضای میان دانه‌های سنگی افزایش می‌یابد. با افزایش تخلخل جریان بیشتری به صورت درون‌گذر از فضای متخلخل عبور می‌نماید و افزایش درون‌گذری جریان نیز باعث استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. بنابراین برای یک مدل سازه گابیونی با طول نسبی ثابت، مدل با تخلخل ۵۰٪ در مقایسه با مدل‌های با تخلخل ۴۵٪ و ۴۰٪، نسبت جریان درون‌گذر به جریان روگذر افزایش می‌یابد و سازه گابیونی در بازه زمانی زیادی مستغرق می‌شود. در واقع با کاهش تخلخل سازه گابیونی جریان خیلی زود تمایل زیادی به تغییر رژیم جریان به حالت روگذر نشان می‌دهد و استغراق سازه گابیونی و کاهش استهلاک انرژی اتفاق می‌افتد. از دیدگاه اقتصادی تخلخل سازه گابیونی به لحاظ انباشت رسوبات در داخل سازه گابیونی و کاهش تاثیر و دخالت فضای

مستهلك نموده است. این مدل در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده نیز به طور میانگین ۵۸٪ انرژی جریان را بیشتر مستهلك می‌نماید که مزیت قابل توجهی نسبت به شیب‌شکن قائم است.

نسبی سازه گابیونی ($l/h=2$) در مقایسه با دیگر مدل‌ها عملکرد مطلوب و اقتصادی‌تر دارد. به طور کلی از میان مدل‌های تحقیق حاضر بهترین مدل در استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم گابیونی با طول نسبی ($l/h=2$) و تخلخل ۵۰٪ می‌باشد که به طور متوسط ۷۶٪ انرژی جریان را



شکل ۵- نمودار تغییرات استهلاك انرژی نسبی و عمق بحرانی نسبی برای طول و دانه‌بندی‌های متفاوت سازه گابیونی

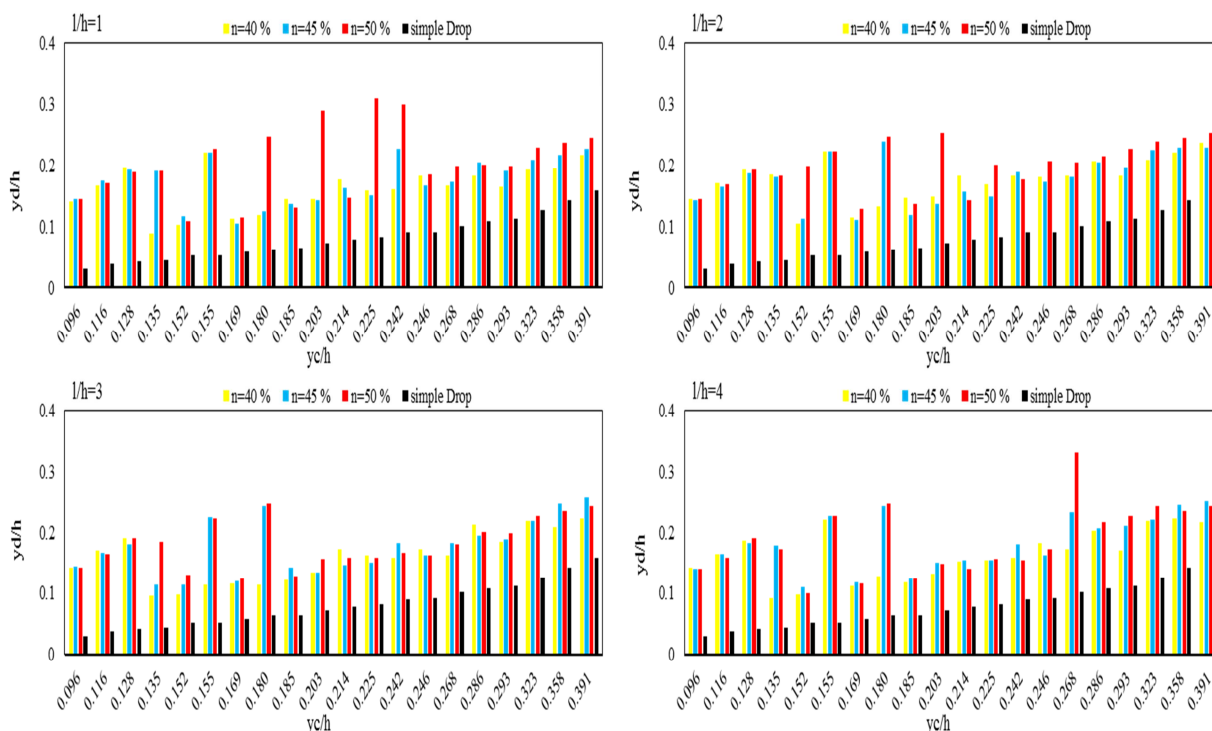
نسبت به حالت تخلخل ۴۰٪، عمق نسبی پایین‌دست ۱۵ درصد افزایش یافت. از آنجایی که رابطه مستقیمی میان استهلاك انرژی و عمق نسبی پایین‌دست وجود دارد، لذا این افزایش عمق آب در پایین‌دست اتفاقی طبیعی است. بنابراین با توجه به اینکه در بخش قبلی نیز اشاره شد، افزایش تخلخل باعث بروز استهلاك نسبتاً بیشتر انرژی می‌شود، به همین دلیل نیز عمق نسبی پایین‌دست را

۳-۴- عمق نسبی پایین‌دست

روند تغییرات عمق نسبی پایین‌دست برای شیب‌شکن قائم ساده و گابیونی در برابر عمق بحرانی نسبی در شکل ۶ ارائه شده است. با مقایسه نمودارهای شکل ۶ مشخص می‌شود که با افزایش تخلخل دانه‌های سنگی، عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد. به طور میانگین در شیب‌شکن‌های قائم گابیونی با تخلخل ۵۰٪

قائم گابیونی با طول نسبی $(l/h=2)$ و $(l/h=1)$ دارای بیشترین عمق نسبی پایین‌دست هستند. با توجه به میزان استهلاک این مدل‌ها، استفاده از آن‌ها به لحاظ فنی و اقتصادی توجیه پذیر است. با بکارگیری مدل‌های $(l/h=3)$ و $(l/h=4)$ طول سازه گابیونی افزایش می‌یابد که در نتیجه هزینه‌های اجرایی افزایش می‌یابد و از دیدگاه پایداری سازه گابیونی نیز بایستی تمهیداتی اندیشید. همچنین با دقت در شکل‌ها می‌توان دریافت که آستانه شروع جریان همزمان درون‌گذر و روگذر به صورت لحظه‌ای (در یک‌الی دو دبی) بیشتر افزایش می‌یابد و سپس روند قبلی را ادامه می‌دهد. به عبارتی دیگر هنگام تبدیل جریان از حالت درون‌گذر به روگذر (رژیم جریان انتقالی) این اتفاق رخ می‌دهد و عمق نسبی پایین‌دست کمی بیشتر افزایش می‌یابد.

افزایش می‌دهد. همچنین مقایسه شیب‌شکن قائم گابیونی با حالت ساده نشان می‌دهد که در تمامی دبی‌ها عمق نسبی پایین‌دست با افزایش همراه است. در واقع وقتی جریان به جای بتن از فضای متخلخل گابیون عبور می‌نماید، در این ناحیه با نوعی گرفتاری مواجه می‌شود و اصطکاک رخ داده میان آب با دانه‌های سنگی باعث مستهلک شدن بیشتر انرژی و افزایش عمق آب پایین‌دست می‌شود. به منظور بررسی بهتر طول نسبی گابیون نمودارهای شکل ۶ به ازای هر طول نسبی تفکیک و ترسیم شده است. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که افزایش طول نسبی سازه گابیونی که با شیب‌شکن قائم تلفیق شده است عملاً تاثیر چندانی بر میزان استهلاک انرژی ندارد. به طور میانگین در هر سه تخلخل سازه گابیونی بکار رفته در تحقیق حاضر، مدل‌های شیب‌شکن



شکل ۶- نمودار تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در مقابل عمق بحرانی نسبی برای طول و دانه‌بندی‌های متفاوت سازه گابیونی

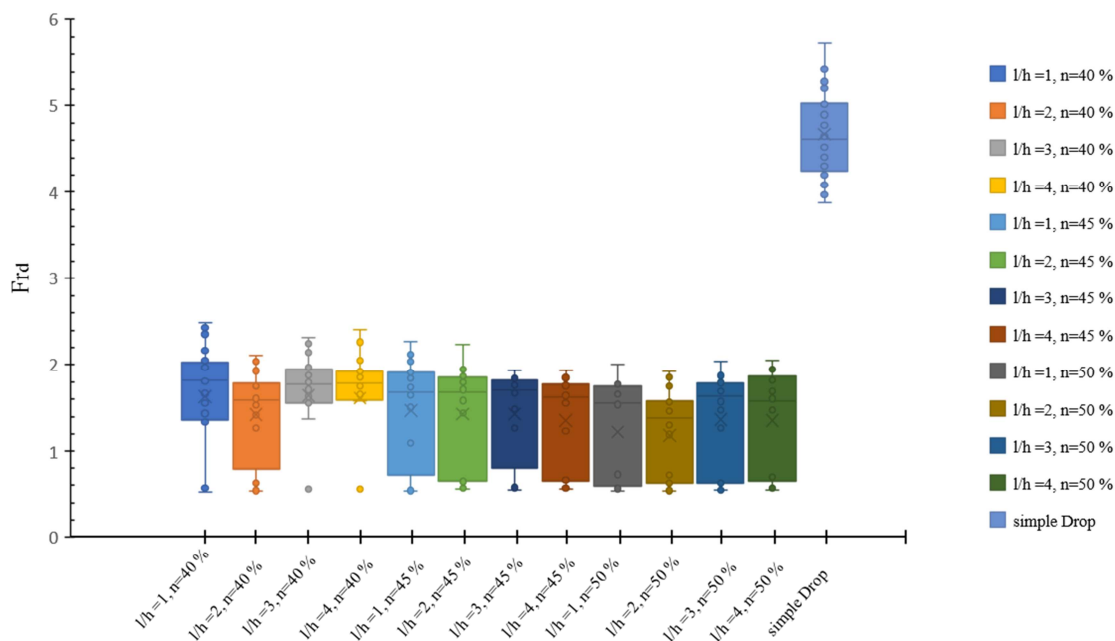
آزمایشگاهی، عدد فرود جریان با افزایش دبی جریان افزایش یافته است. بررسی تخلخل و طول نسبی گابیون نشان داد که تغییر این پارامترها تاثیری کمی در تغییر بازه مدل‌های شیب‌شکن قائم گابیونی دارد اما با این حال افزایش تخلخل سبب کاهش عدد فرود به خاطر استهلاک

۳-۵- عدد فرود پایین‌دست

محدوده تغییرات عدد فرود پایین‌دست تمامی مدل‌های شیب‌شکن قائم ساده و گابیونی تحقیق حاضر در شکل ۷ نمایش داده شده است. در تمامی مدل‌های

کاهش مناسب بازه عدد فرود را می توان عبور جریان به دو حالت رژیم درون گذر و روگذر از فضای متخلخل گابیون دانست. به لحاظ هیدرولیکی این کاهش چشمگیر بازه عدد فرود پایین دست بسیار مناسب می باشد و با توجه به اهمیت عدد فرود در تعیین نوع حوضچه آرامش می تواند در طراحی حوضچه آرامش اقتصادی مدنظر باشد. از دیگر مزایای این نتیجه می توان کاهش میزان آبستکی و کف کنی بستر کانال در پایین دست، استفاده های تفریحی همانند قایقرانی و پرورش ماهی نیز اشاره نمود.

بیشتر انرژی جریان می شود. از طرفی با توجه به شکل ۷ مشخص است که استفاده از سازه تلفیقی گابیون به صورت چشمگیری بازه عدد فرود پایین دست را کاهش داده است. در حین آزمایشات مشاهده شد که در دبی های پایین و هنگامی که جریان به صورت درون گذر بود، وجود سازه گابیونی باعث زیر بحرانی نمودن جریان در پایین دست شیب شکن می شد. با مقایسه دو نوع شیب شکن تحقیق حاضر مشخص شد که با بکارگیری گابیون محدوده عدد فرود پایین دست شیب شکن قائم، از بازه $۵/۷ - ۳/۸$ به $۲/۵ - ۰/۵۲$ کاهش می یابد. دلیل اصلی



شکل ۷- نمودار محدوده تغییرات عدد فرود پایین دست تحقیق حاضر

۱- در تمامی مدل های آزمایشگاهی تحقیق حاضر با

افزایش عمق بحرانی نسبی، میزان استهلاك انرژی جریان کاهش و عمق نسبی آب در پایین دست شیب شکن قائم افزایش می یافت. همچنین افزایش ارتفاع شیب شکن برای تمامی مدل های شیب شکن قائم ساده و گابیونی در یک عمق بحرانی نسبی با طول نسبی و دانه بندی ثابت منجر به افزایش میزان استهلاك انرژی نسبی جریان می گردد.

۲- براساس مشاهدات آزمایشگاهی، هنگام عبور جریان از روی مدل های شیب شکن قائم گابیونی

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر تلفیق نمودن سازه گابیونی با سازه شیب شکن قائم بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان بررسی شد. بدین منظور آزمایشاتی بر روی مدل فیزیکی شیب شکن قائم ساده و گابیونی انجام شد. براساس آنالیز ابعادی مشخص گردید که پارامترهای استهلاك انرژی نسبی، عدد فرود و عمق نسبی پایین دست تحقیق حاضر تابعی از عمق بحرانی نسبی، طول نسبی و تخلخل سازه گابیونی می باشد. بر این اساس نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

مدل، استهلاک انرژی جریان را به طور میانگین ۵۸٪ در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده نیز افزایش داده است.

۶- به طور میانگین در شیب‌شکن‌های قائم گابیونی با تخلخل ۵۰٪ نسبت به حالت تخلخل ۴۰٪، عمق نسبی پایین‌دست ۱۵ درصد افزایش یافت.

۷- در تمامی دبی‌ها شیب‌شکن قائم گابیونی نسبت به حالت ساده عمق نسبی پایین‌دست بالایی دارد که به خاطر استهلاک انرژی بالای سازه گابیونی است.

۸- با مقایسه و بررسی نتایج دو نوع شیب‌شکن تحقیق حاضر مشخص شد که با تلفیق سازه گابیونی بازه عدد فرود پایین‌دست به طور چشمگیری کاهش یافت. محدوده تغییرات عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن قائم ساده از بازه ۵/۷ - ۳/۸ به محدوده ۲/۵-۰/۵۲ در سازه گابیونی کاهش یافت.

۹- با توجه به تجربیات حاصل از تحقیق حاضر پیشنهاد می‌گردد که جهت ادامه تحقیق حاضر به بررسی آبستتگی پایین‌دست تحقیق حاضر به صورت آزمایشگاهی و عددی، تاثیر رسوبات بالادست بر عملکرد سازه گابیونی و مدلسازی عددی تحقیق حاضر پرداخته شود.

سه نوع رژیم جریان درون‌گذر، انتقالی و روگذر از گابیون تشکیل گردید. در دبی‌های کم، جریان به صورت درون‌گذر و با افزایش دبی و استغراق سازه گابیونی جریان به حالت انتقالی و سپس با استغراق کامل گابیون جریان به حالت روگذر عبور می‌نمود.

۳- در مدل شیب‌شکن قائم گابیونی با افزایش تخلخل سازه گابیونی برای یک طول نسبی ثابت، حجم آب عبوری از محیط متخلخل و استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد. تخلخل دانه‌های سنگی سازه گابیونی رابطه مستقیمی با زمان استغراق سازه و تبدیل جریان از حالت درون‌گذر به روگذر دارد.

۴- بررسی افزایش طول نسبی سازه گابیونی نشان داد که این پارامتر تاثیر ناچیزی در مقادیر استهلاک انرژی دارد. به طور کلی از میان مدل‌های تحقیق حاضر بهترین مدل در استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم گابیونی با طول نسبی $(l/h=2)$ و تخلخل ۵۰٪ می‌باشد.

۵- تلفیق نمودن سازه گابیونی به همراه شیب‌شکن قائم باعث افزایش قابل توجه استهلاک انرژی جریان شده است و مدل شیب‌شکن قائم گابیونی با طول نسبی $(l/h=2)$ و تخلخل ۵۰٪ به طور متوسط ۷۶٪ انرژی جریان را مستهلک نمود. این

مراجع

- [1] Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bagherzadeh, M. (2021). Experimental Investigation of the Energy Dissipation and the Downstream Relative Depth of Pool in the Sloped Gabion Drop and the Sloped simple Drop. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9), 4-4. doi: 10.22060/ceej.2020.18059.6751.
- [2] Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bagherzadeh, M. (2021). Experimental Investigation of the Performance of Inclined Gabion Drop Equipped with a Horizontal Screen. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 81-93. doi: 10.22059/ijswr.2020.308412.668705.
- [3] Bakhmeteff, M.W. (1932). *Hydraulics of open channels*, New York and London, McGraw-Hill book company, Inc.
- [4] Rajaratnam, N., and Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- [5] Moore, W. L. (1943). Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), 1343-1360.
- [6] Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. *In Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13.

- [7] Esen, I. I., Alhumoud, J. M., & Hannan, K. A. (2004). Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base. *Water international*, 29(4), 523-529.
- [8] Liu, S. I., Chen, J. Y., Hong, Y. M., Huang, H. S., & Raikar, R. V. (2014). Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 476-486.
- [9] Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- [10] Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Hasanniya, V. (2019). Experimental investigation of energy dissipation in vertical drops equipped with a horizontal screen under supercritical flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1421-1436.
- [11] Daneshfaraz, R., Asl, M. M., Razmi, S., Norouzi, R., & Abraham, J. (2020). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-10.
- [12] Daneshfaraz, R., Hasannia, V., Norouzi, R., Sihag, P., Sadeghfam, S., & Abraham, J. (2021). Investigating the Effect of Horizontal Screen on Hydraulic Parameters of Vertical Drop. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-9.
- [13] Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Di Francesco, S., & Khajei, N. (2021). Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop. *Water Supply*.
- [14] Mirzaee, R., Hosseini, K., mousavi, F. 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*, 16(1), 23-36. doi: 10.30482/jhyd.2021.256774.1486.
- [15] Peyras, L. A., Royet, P., & Degoutte, G. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717.
- [16] Pagliara, S. and Chiavaccini, P. 2006. Energy dissipation on block ramps. *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, 132(1): 41-48.
- [17] Wüthrich, D., and Chanson, H. (2014). Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir. *Journal of hydraulic engineering*, 140(9), 04014046.
- [18] Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., Ghorbani, B. (2021). Laboratory Study of the Performance of Gabion Sill on the Energy Dissipation of Downstream of Ogee Weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 67-80. doi: 10.22059/ijswr.2020.309322.668725.
- [19] Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Di Francesco, S., & Asl, M. M. (2021). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*.
- [20] Bagherzadeh, M., Mohammadi, M., Daneshfaraz, R., & Dasineh, M. (2021). Comparison of Hydraulic Parameters of Simple and Gabion Inclined Drops with Stilling Basin in The Downstream of The Structure. *International science and innovation congress*, Page39-45.
- [21] Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Esmaeeli, R., Norouzi, R., & Abraham, J. (2021). Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water Supply*, 21(1), 217-231.
- [22] Hager, W. H., & Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of hydraulic research*, 27(5), 565-585.
- [23] Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bagherzadeh, M. (2020). Experimental Analysis of Inclined Gabion Drop Behavior in Comparison to the Standard Stilling Basins (USBR). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2531-2541. doi: 10.22059/ijswr.2020.303078.668625.
- [24] White, M.P. (1943). Discussion of Moore (1943), *ASCE*, 108, 1361-1364.