



Gonbad Kavous University
Journal of New Approaches in
Water Engineering and Environment
Volume 2, Issue 1

Laboratory Study of Energy Losses in Simple and Toothed Triangular Spillway

Mohammad Ali Namavi Zadeh¹, Aslan Egdernezhad^{2*}, Ali Reza Masjedi³

¹ M.Sc. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran..

³ Associate professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Received:11.03.2023; Accepted:12.06.2023

Abstract:

With the construction of high dams along rivers, excess floods are discharged through overflows when the dam reservoir capacity is exceeded. As the flow in these overflows is supercritical, the kinetic energy of the flow at the end of the overflow is very high and can cause erosion downstream. Therefore, an overflow requires an energy-consuming structure at the end to reduce excess energy output and minimize erosion and scouring downstream. In this study, experiments were performed to investigate the relative energy losses in two models of simple triangular and toothed overflow made of fiberglass in four different landings at three depths of 100%, 90%, and 80%. The effective variables in this study were the landing number and the bottom depth at the end of the hydraulic jump. The results of this study showed that at three downstream depths, energy losses decrease with increasing landing number. Also, energy losses in the free projectile mode are higher than in the other two modes due to the full development of the hydraulic jump. In the general comparison mode, the performance of a toothed triangular overflow is better in energy dissipation than in the toothed mode, due to the fracture and compression of the flow lines in contact with the teeth at the end of the overflow projectile. In general, the use of teeth at the end of the overflow projectile causes energy loss in the conditions of 100% of the bottom depth in the toothed triangular overflow compared to the simple triangular overflow by an average of 7%, and in the conditions of 90% and 80% of the bottom depth by about 8% and 10%, respectively.

Keywords: Triangular overflow, bottom depth, energy dissipation, indentation

*. Corresponding author, Email: a_eigder@ymail.com



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست"

دوره دوم، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

بررسی آزمایشگاهی تلفات انرژی در سرریزهای جامی شکل مثلثی ساده و دندانه‌ای

محمدعلی نعمای زاده^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، علیرضا مسجدی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۲ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۳ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

چکیده

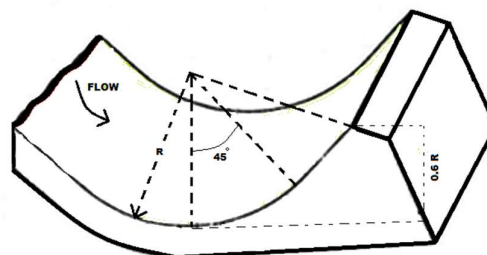
با احداث سدهای بلند در مسیر رودخانه‌ها، سیلاب مازاد بر گنجایش مخزن سد بوسیله سرریزها تخلیه می‌گردد. نظر به اینکه جریان در سرریزها فوق بحرانی می‌باشد، در نتیجه انرژی جنبشی جریان در انتهای سرریز بسیار زیاد بوده و می‌تواند موجب فرسایش در پایین دست سرریز شود. بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستهلک‌کننده انرژی در قسمت انتهایی داشته تا از انرژی مازاد خروجی کاسته و میزان فرسایش و آبستنگی در پایین دست سرریز به حداقل برسد. این تحقیق جهت بررسی آزمایشگاهی تلفات نسبی انرژی در دو مدل سرریز مثلثی ساده و دندانه‌ای از جنس فایبر گلاس در چهار عدد فرود مختلف و در سه عمق پایاب ۱۰۰، ۹۰ و ۸۰ درصد انجام شد. متغیرهای مؤثر در این تحقیق عدد فرود و عمق پایاب در انتهای پرش هیدرولیکی در سرریز جامی شکل بود. نتایج این تحقیق نشان داد در سه عمق پایاب، با افزایش عدد فرود تلفات انرژی کاهش می‌یابد. همچنین تلفات انرژی در حالت مسیر پرتابه آزاد نسبت به دو حالت دیگر به دلیل توسعه یافتگی کامل پرش هیدرولیکی در سرریز جامی شکل بیشتر می‌باشد. در حالت مقایسه کلی عملکرد سرریز مثلثی دندانه‌ای نسبت به حالت بدون دندانه، در اتلاف انرژی بهتر عمل نمود که علت این امر شکستگی و فشردگی خطوط جریان در برخورد با دندانه‌ها در انتهای قسمت پرتابه سرریز می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد استفاده از دندانه در انتهای پرتابه سرریز باعث اتلاف انرژی در شرایط ۱۰۰ درصد عمق پایاب در سرریز مثلثی دندانه‌ای نسبت به سرریز مثلثی ساده به‌طور متوسط به میزان ۷ درصد و در شرایط ۹۰ و ۸۰ درصد عمق پایاب نیز به‌طور متوسط به ترتیب حدود ۸ و ۱۰ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: عمق پایاب، استهلک انرژی، سد، رودخانه

* نویسنده مسئول، Email: E_eigder@ymail.com

مقدمه

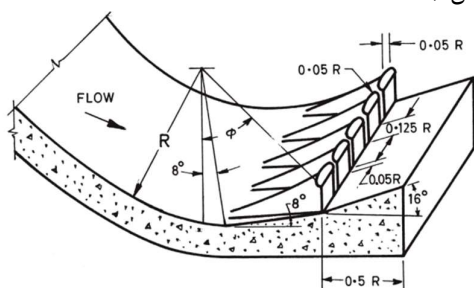
استهلاک انرژی در سرریزها و مجاری تخلیه سیلاب غالباً جهت حفاظت سازه و جلوگیری از بروز فرسایش به هنگام ایجاد جت‌های با انرژی زیاد ضروری است. در سال‌های اخیر با احداث سدهای بزرگ و مرتفع در دره‌های باریک و بالا رفتن استاندارد ایمنی سدها، علاقه عمومی مهندسین هیدرولیک نسبت به یک سیستم استهلاک انرژی اقتصادی و مطمئن در پایین‌دست مجاری اصلی تخلیه جریان خروجی از سد افزایش یافته است. در سدها، سرریزهای نوع آزاد و پرش اسکی به‌عنوان تولید کننده پودر قطرات آب در هوا عمل نموده و موفقیت آن‌ها در استهلاک انرژی نسبی است. پرتاب‌کننده‌های جامی شکل، سازه‌هایی هستند که برای استهلاک انرژی استفاده می‌شوند و استفاده از آن روز به روز در حال توسعه است. این سیستم، جت آب را در فاصله قابل ملاحظه‌ای به پایین‌دست پرتاب می‌کند، بنابراین از بروز آبشستگی بستر رودخانه در نزدیکی پنجه پایین‌دست سد و سازه انتهایی سرریز یا تخلیه‌کننده ممانعت می‌نماید. غالباً این سیستم را پرش اسکی می‌نامند. هنگامی که جریان از تند آب وارد جام می‌شود بخشی از انرژی جنبشی آن در جام مستهلک می‌شود. اما بخاطر طول نسبتاً کوتاه جام، اصطکاک بین بستر کانال با سطح زیرین جریان و مقاومت هوا با سطح آزاد جریان، نقش زیادی در استهلاک انرژی ندارد. در این حالت تغییر جهت جریان در جام به سمت بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب را رو به پایین وارد می‌کند، باعث کاهش شتاب حرکت و سرعت جریان در جام می‌شود. بخش عظیمی از انرژی جریان با پخش و پراکنده شدن جت خروجی جریان از سازه به صورت پرش اسکی مستهلک می‌شود (شکل ۱).



Tierney and Henderson (1963)

شکل (۱): باکت پیوسته

در باکت دندانه‌دار، زائده‌هایی دندانه مانند، قبل از انتهای آن می‌باشد که در نتیجه مقداری جریان از بین دندانه‌ها عبور نموده و به‌صورت جت‌هایی پخش می‌گردند و بقیه توسط دندانه‌ها به‌طرف بالا هدایت می‌شوند. بنابراین جریان آب در سطح وسیع‌تری پخش و پراکنده می‌گردد که از نظر استهلاک انرژی راندمان بیشتری دارد. همچنین دارای جوشش کمتر در سطح آب شده و پروفیل سطح آب از ثبات بیشتری برخوردار است. توضیح اینکه این دندانه‌ها باعث ایجاد جت‌های کوچکی می‌شوند که این جت‌ها نیز به‌نوبه خود در بین یکدیگر اصطکاک ایجاد می‌نمایند که در نهایت استهلاک انرژی آب را بالا می‌برد (شکل ۲).



شکل (۲): باکت دندانه‌دار

Tierney and Henderson (1963)

(Tierney and Henderson (1963) نشان دادند که برای نسبت‌های کوچک h_0/R با به‌کارگیری نظریه گرداب پتانسیلی بین محاسبات دو بعدی و مشاهدات، تطابق مناسبی وجود دارد مشروط بر اینکه زاویه انحراف حداقل ۴۵ درجه باشد. Chen and Yu (1965) توزیع فشار در امتداد یک باکت استوانه را با استفاده از معادلات پتانسیل جریان برای زاویه انحراف ۰/۷۵ و ۰/۹۵ محاسبه نمودند. نتایج هد فشار حداکثری آنها نزدیک به روش Balloffet (1961) بود. Lenau and Cassidy (1969) روش چن و یو را اصلاح نمودند آنها نشان دادند که اثر ویسکوزیته در جریان باکت ناچیز است. Mason (1993) شعاع باکت را حداقل ۳ تا ۵ برابر عمق جریان ورودی و زاویه لبه یا زاویه برخاست بین ۲۰ تا ۳۵ درجه و زاویه گسترش جت در هوا حدود ۵ درجه توصیه نمود. پرتابه‌های جامی هم به صورت یک کانال منشوری مستطیل شکل و هم به صورت جام دارای یک منحرف‌کننده جریان جانبی توسط Juon and Hager (2000) مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیق وی

اثرات مقیاس در مدل‌های هیدرولیکی، توزیع فشار در باکت، مسیر پرتابه جریان، شرایط ایجاد امواج شوکی و روابط آب برگشتی در جام‌ها بررسی گردید. براساس نتایج این محققین مشخص گردید که ارتفاع امواج نوسانی یا شوک به عدد فرود در پای سرسره و همچنین زاویه پرتاب‌کننده وابستگی شدید دارد. (Steiner et al (2008) توزیع فشار در مستهلک کننده‌های پرش اسکی با جام مثلی توسط مدل آزمایشگاهی مطالعه نمودند و نتیجه گرفتند که پرتاب‌کننده‌های مثلی عملکرد بهتری در میزان استهلاك انرژی جنبشی دارند. Omidvarinia and Mousavijahromi (2014) تحقیقی در مورد مقایسه انرژی در پرتاب‌کننده‌های جامی دایره‌ای و مثلی شکل انجام دادند. در این تحقیق از یک مدل فیزیکی از سرریز اوجی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی ساخته شد و در چهار دبی و به دنبال آن در اعداد فرود مختلف آزمایش‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که در حالت مقایسه کلی عملکرد پرتاب‌کننده مثلی ۴۵ درجه به‌طور قابل توجهی در استهلاك انرژی بهتر از پرتاب‌کننده جامی می‌باشد. کمترین درصد استهلاك انرژی برای پرتاب‌کننده مثلی با زاویه ۲۲/۵ درجه و بیشترین استهلاك انرژی در پرتاب‌کننده مثلی با زاویه ۴۵ درجه و طول دسترسی ۷ سانتی‌متر می‌باشد. در حالت مثلی شکستگی خطوط جریان در برخورد با شیب مثلث رخ داده و این در حالی است که برای حالت معمولی این شکستگی به مراتب کمتر است. در نهایت با توجه به هندسه و اجرای راحت‌تر پرتاب‌کننده‌های مثلی و عملکرد بهتر آن در میزان استهلاك انرژی استفاده از این نوع پرتاب‌کننده توصیه می‌شود. (Abbasi Parvin and Barani (2009) با برخورد جت پودر شده با حوضچه استغراق در پایاب و بوجود آمدن جریان آشفته و متلاطم در حوضچه فرآیند استهلاك انرژی در سیستم پرش اسکی را مورد بررسی قرار داد. (Eskandari et al. (2020 تحقیق بر روی تأثیر شکل‌ها و پیکربندی‌های مختلف شکاف بر ابعاد آبشستگی پایین دست سرریزهای اوجی شکل انجام دادند. در این تحقیق آبشستگی پایین دست سرریز فلیپ را تحت دو سناریو اصلی بررسی کرد: (۱) شرایط آزاد، و (ب) شرایط شکافی با شکاف‌های مستطیلی و مثلی که تحت چهار

نرخ تخلیه متفاوت پیکربندی شده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از شکاف منحرف کننده تا حد زیادی بر وسعت و عمق آبشستگی تأثیر می‌گذارد، که منجر به کاهش آبشستگی بیشتر ۵۳ درصد در سطل شکاف مستطیلی هزارتویی نسبت به سطل جامد می‌شود. نتایج با معادلات تجربی مقایسه شد و همبستگی بالایی بین آنها مشاهده شد. (Safarinejadi et al. (2019) تحقیقی در خصوص پدیده آبشستگی پایین دست یک پرتابه جامی شکل در شرایط آزاد و همچنین در شرایط وجود دندان با اشکال دوزنقه‌ای و مثلی در پایاب با فواصل چیدمان مختلف انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که وجود دندان چه اثراتی بر گستره و عمق آبشستگی می‌گذارد، بدین ترتیب که پرتابه جامی شکل با دندان‌های مثلی یک در میان نسبت به حالت بدون دندان حدود ۱۲/۷ درصد کاهش آبشستگی را سبب می‌شود، همچنین حداکثر عمق آبشستگی در حالت باکت با دندان‌های دوزنقه‌ای یک در میان در بازه مطلوب تر از مابقی مدل‌ها به وقوع می‌پیوندد.

(Eskandari et al. (2020 تحقیق بر روی تأثیر شکل هندسی پایین دست پرتاب‌کننده جامی بر روی آبشستگی انجام دادند. ایت تحقیق در شرایط آزاد و در شرایط وجود دندان مستطیلی و مثلی در پایاب انجام شد. نتایج نشان داد وجود دندان در پایین دست سرریز با کنترل آبشستگی در پایین دست سرریزها می‌شود. همچنین پرتاب‌کننده جامی با دندان مستطیلی یک در میان نسبت به حالت بدون دندان حدود ۱۳ درصد کاهش آبشستگی ایجاد می‌کند.

همانطور که در بالا اشاره شد مطالعات گسترده‌ای روی سرریزهای جامی شکل انجام شده است اما تاکنون مطالعات جامعی در مورد اثر دندان در استهلاك انرژی در سرریزها انجام نشده است. در این پژوهش علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف روی مدل‌های گوناگون روی استهلاك انرژی در سرریزها، نسبت به مقایسه نتایج به دست آمده با برخی از محققین دیگر اقدام شده است.

مواد و روش‌ها

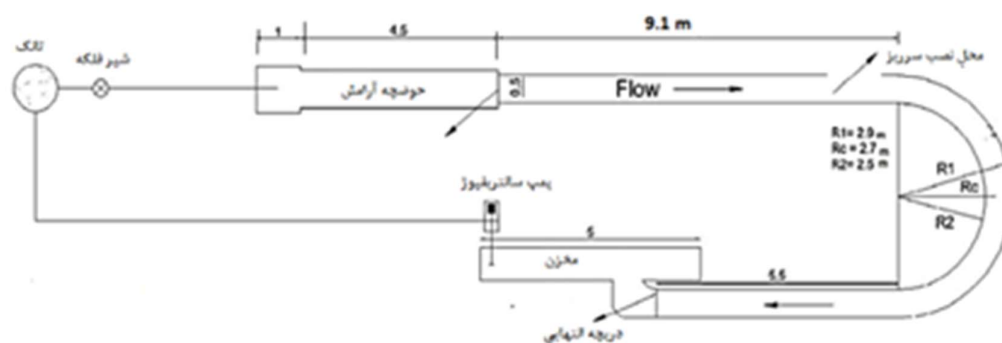
در مدل سازی استهلاک انرژی در سرریزها، مهم ترین هدف تعیین میزان افت انرژی در سرریز در اثر شرایط مختلف جریان در فلوم آزمایشگاهی است. پارامترهای مؤثر در این آزمایش با فرض ثابت بودن مشخصات جریان در کلیه آزمایش‌ها در حالت تعادل به صورت زیر می باشد:

$$\Delta E = (g, V, y) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ΔE افت انرژی بوده که برابر است با $(E_0 - E_1)$ که E_0 انرژی اولیه در بالادست سرریز که برابر است با $(E_0 = y_0 + V_0^2/2g)$ که در آن y_0 عمق جریان در بالادست سرریز و V_0 سرعت جریان در بالادست سرریز و E_1 برابر با انرژی جریان در پایان مسیر پرتابه که تقریباً برابر است با انرژی جریان در عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز که برابر است با $(E_1 = y_1 + V_1^2/2g)$ که در آن y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی و V_1 سرعت جریان عمق اولیه پرش هیدرولیکی، g شتاب ثقل، V سرعت جریان بر روی شیب باکت سرریز، y عمق جریان بر روی شیب باکت سرریز. با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه (۱) به صورت زیر بدون بعد می شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f(Fr) \quad (2)$$

در رابطه ۲، Fr عدد فرود بر روی شیب باکت سرریز و $\Delta E/E_0$ افت نسبی انرژی است. آزمایش های 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 انجام شد. دیواره های 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. جریان آب ابتدا از طریق پمپ از مخزن زمینی به سمت مخزن آرام کننده ورودی در بالادست فلوم هدایت شد. جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال و از روی سرریز عبور کرد. جریان آب پس از عبور از سرریز از طریق کانال پایین دست به مخزن پمپاژ شد. عمق آب در بالادست سرریز توسط عمق سنج لیزری با درصد خطای ۲ درصد میلی متر اندازه گیری شد. همچنین توسط سرریز لبه تیز مثلی در بالادست، دبی جریان در فلوم اندازه گیری شد.



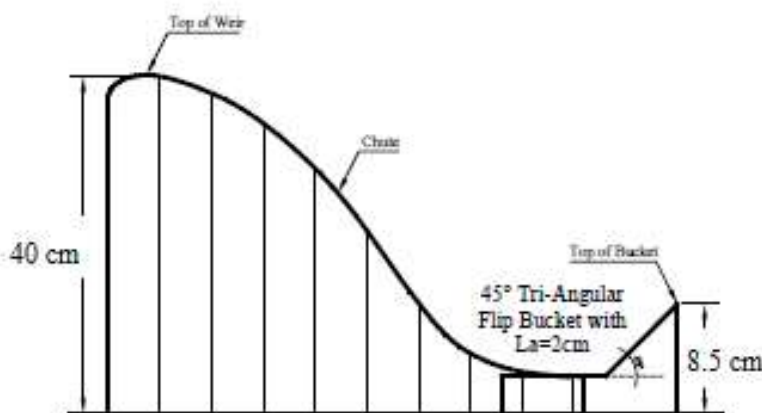
شکل (۳): نمای از فلوم آزمایشگاهی

هیدرولیکی باعث شد ۱۰ درصد از طول پرتابه وارد عمق پایاب گردد. حالت سوم عمق پایاب به حدی در نظر گرفته شد که ۸۰ درصد طول جت خروجی از پرتاب کننده ایجاد شد ۲۰ درصد دیگر طول آن در عمق پایاب محو گردید. یعنی در حالت اول که جت کامل بود و پرش در انتهای پای جت قرار گرفت طول جت اندازه گیری شد و ۹۰ و ۸۰ درصد آن محاسبه گردیده و با استفاده از درجه انتهایی عمق پایاب طوری تنظیم گردید که انتهای پرش در

به منظور کالیبراسیون سرریز لبه مثلی از روش حجمی استفاده شد. در این تحقیق ۴ دبی ۴، ۷، ۸، ۱۰ لیتر بر ثانیه و در هر دبی ۳ عمق پایاب برای اجرای آزمایش ها به کار گرفته شد. عمق پایاب اول حالتی است که پرش هیدرولیکی بالافاصله در محل فرود جت خروجی از پرتاب کننده قرار بگیرد (عمق پایاب ۱۰۰ درصد). حالت دوم عمق پایاب به حدی افزایش یافت که ۹۰ درصد طول جت خروجی از پرتاب کننده رخ داد، در این شرایط پرش

پرتاب‌کننده با طول آستانه ۲/۵ سانتی‌متر و زاویه ۴۵ درجه از جنس فایبر گلاس ساخته شد (شکل ۳).

حالات دوم و سوم به ترتیب ۹۰ و ۸۰ درصد طول جت قرار گرفت. مدل سرریز مثلثی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و طول ۵۳/۴ سانتی‌متر و



شکل (۳): نمای از سرریز مثلثی

انتهایی به تدریج بسته تا عمق آب پایین دست سرریز یا عمق پایاب افزایش یابد. عمق پایاب تا جایی افزایش می‌یافت که پرش هیدرولیکی بالافاصله پس از محل برخورد جت به کف فلوام تشکیل شود. هدف از ایجاد این پرش اندازه‌گیری عمق جریان پس از عبور از پرتابه است. عمق اولیه پرش به دلیل وجود هوای زیاد در جریان لبه پایین دست پرتابه، به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبود. برای اندازه‌گیری این عمق، چون جریان بعد از پرتابه فوق بحرانی است با تشکیل پرش هیدرولیکی بالافاصله پس از پرتابه و اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش، با فرض ثابت بودن مومنتم در دو طرف پرش و صرف نظر از افت‌های اصطکاکی، عمق اولیه پرش از رابطه اعماق مزدوج پرش به دست 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 ۴ و ۵).

به منظور ایجاد دندان در قسمت خروجی پرتاب‌کننده جام از یک سری دندان طبق استاندارد USBR به تعداد ۱۶ عدد با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و طول وتر ۸ سانتی‌متر و عرض ۲ سانتی‌متر از جنس فایبر گلاس تهیه شد. همچنین فاصله بین دندان‌ها ۱/۲ سانتی‌متر انتخاب شد. دندان‌ها به صورت یکپارچه بر روی صفحه فایبر گلاس نصب و در انتهای پرتاب‌کننده مثلثی بعد از اتمام آزمایش‌های سرریز مثلثی ساده، نصب شد. مدل سرریز در محلی که ۷ متر از ابتدای فلوام مستقیم فاصله داشت نصب شد تا طول لازم برای ایجاد جریان یکنواخت در بالادست تأمین گردد (شکل ۲). نحوه انجام آزمایش بدین صورت بود که ابتدا پمپ روشن می‌شد، جریان وارد فلوام می‌گردید، سپس دبی با شیر فلکه مخصوص تنظیم شد در هر دبی عمق جریان در بالادست سرریز به فاصله ۶۰ سانتی‌متر به دلیل اینکه از تغییر پروفیل سطح آب در بالادست فاصله داشته باشد، اندازه‌گیری شد. سپس دریچه



شکل (۴): سرریز مثلثی ساده نصب شده در فلوم آزمایشگاه



شکل (۵): سرریز مثلثی دنداندار نصب شده در فلوم آزمایشگاه

نتایج و بحث

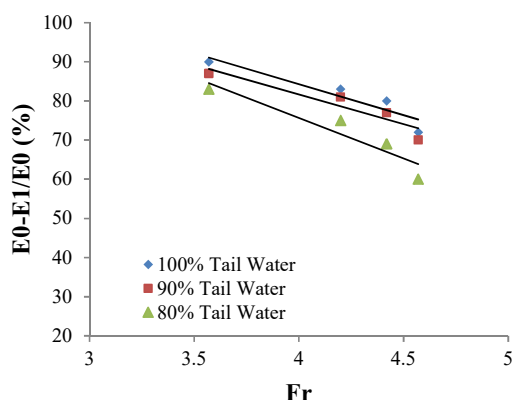
عمق آب قبل از پرش (y_1)، عدد فرود در پای پرتابه (Fr_3)، انرژی مخصوص در بالادست سرریز (E_0)، انرژی مخصوص در قبل از پرش (E_1) و افت نسبی انرژی سرریز ($\Delta E/E_0$) محاسبه شدند. جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایش‌ها ارائه شده است.

تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی ساده و دنداندار
شکل ۵ و ۶ تلفات نسبی انرژی در دو سرریز مثلثی ساده و دنداندار در مقابل عدد فرود در سه عمق پایاب

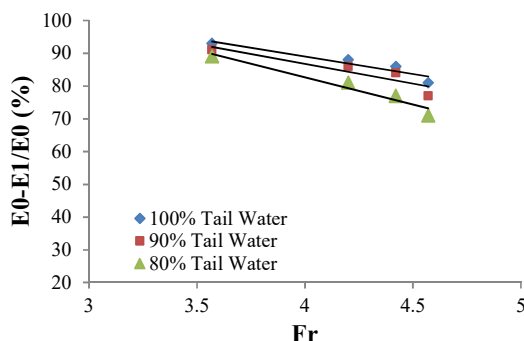
در همه آزمایش‌ها پس از تنظیم شدت جریان، عمق آب در بالادست سرریز، بلافاصله با عبور جریان از روی سرریز، در پایین‌دست سرریز جت خروجی از پرتاب‌کننده مثلثی تشکیل و بعد از آن پرش هیدرولیکی تشکیل شد. در هر مرحله متغیرهای مورد اندازه‌گیری شامل دبی (Q)، عمق بعد از پرش (y_2)، عمق آب پشت سرریز (h_0)، عمق آب روی سرریز (H)، طول جت (L)، عمق آب روی سطح شیب‌دار و پای پرتابه (y_3) بودند. همچنین پارامترهای

متفاوت بوده و به دلیل این که احتمال تشکیل پرش نوسانی کاهش می‌یابد، در محدوده اعداد فرود آزمایش شده استهلاک انرژی تا حدی افزایش یافته است. ولی با توجه به عدم توسعه یافتگی کامل عمق اولیه پرش در مجموع اتلاف انرژی در سرریز مثلثی ساده در ۹۰ درصد پایاب نسبت به ۱۰۰ درصد پایاب به طور متوسط ۳ درصد کاهش یافته و برای پایاب ۸۰ درصد، کاهش تلفات به طور متوسط ۱۲ درصد می‌باشد. همچنین اتلاف انرژی در سرریز مثلثی دندانه‌ای در ۹۰ درصد پایاب نسبت به ۱۰۰ درصد پایاب به طور متوسط ۳ درصد کاهش یافته و برای پایاب ۸۰ درصد کاهش تلفات به طور متوسط ۷ درصد می‌باشد. که همان طور که بیان شد به دلیل عدم توسعه یافتگی کامل پرش هیدرولیکی می‌باشد.

۱۰۰، ۹۰ و ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در دو سرریز مثلثی ساده و دندانه‌ای در سه عمق پایاب، با افزایش عدد فرود تلفات نسبی انرژی کاهش می‌یابد. هنگامی که شرایط جریان به گونه‌ای است که امکان تشکیل کامل مسیر پرتابه وجود دارد (حالت عمق پایاب در حالت ۱۰۰ درصد تشکیل طول مسیر پرتابه)، پرش کامل در پایین دست تشکیل شده و از این رو امکان اتلاف انرژی بیشتری وجود دارد. زیرا در این حالت عمق اولیه پرش توسعه یافته و جریان به صورت توسعه یافته کامل امتداد می‌یابد. حال با افزایش عدد فرود در سرریز، شرایط پرش به صورت کامل انجام نشده و باعث ناپایداری آن گشته و از این رو استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. در اعماق پایاب ۹۰ و ۸۰ درصد مکانیزم عمل



شکل (۵): تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی ساده در برابر عدد فرود و اعماق پایاب مختلف



شکل (۶): تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی دندانه‌ای در برابر عدد فرود و اعماق پایاب مختلف

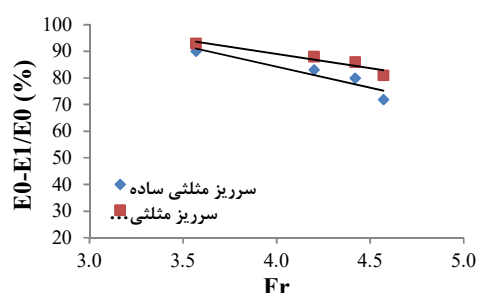
جدول (۱): مشخصات هیدرولیکی سرریز مثلثی ساده و دندانه دار مورد آزمایش

نوع سرریز	Q	h ₀	H	y ₁	y ₂	L	y ₃	V ₃	Fr	V ₀	E ₀	V ₁	E ₁	(E ₀ -E ₁)	ΔE/E ₀
	(Lit/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(m/s)	-	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(cm)	(%)
مثلثی ساده (۱۰۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۳۹	۷	۵۶	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۴۴	۰/۱۲	۰/۳۱	۷۲
مثلثی ساده (۱۰۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۱/۳۴	۵/۶	۴۵	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۱/۱۹	۰/۰۹	۰/۳۵	۸۰
مثلثی ساده (۱۰۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۱/۳۱	۴/۹	۴۰	۱/۰	۱/۴	۴/۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۱/۰۷	۰/۰۷	۰/۳۵	۸۳
مثلثی ساده (۱۰۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۱/۰۲	۳/۱	۲۵	۰/۴	۲	۱۰/۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۳۷	۹۰
مثلثی ساده (۹۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۳۳	۷/۲	۵۰	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۵۱	۱/۱۳	۰/۳۰	۷۰
مثلثی ساده (۹۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۱/۲۴	۵/۹	۴۱	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۱/۲۹	۰/۰۹	۰/۳۳	۷۷
مثلثی ساده (۹۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۱/۲۰	۵/۲	۳۶	۱/۰	۱/۴	۴/۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۱/۱۷	۰/۰۸	۰/۳۴	۸۱
مثلثی ساده (۹۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۰/۸۶	۳/۵	۱۸	۰/۴	۲/۰	۱۰/۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۰/۹۳	۰/۰۵	۰/۳۶	۸۷
مثلثی ساده (۸۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۱۲	۸	۴۵	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۷۹	۰/۱۷	۰/۲۶	۶۰
مثلثی ساده (۸۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۱/۰۴	۶/۶	۳۶	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۱/۵۴	۰/۱۳	۰/۳۰	۶۹
مثلثی ساده (۸۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۱/۰۱	۵/۸	۳۲	۱/۰	۱/۴	۴/۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۱/۳۸	۰/۱۱	۰/۳۲	۷۵
مثلثی ساده (۸۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۰/۷۲	۳/۹	۲۰	۰/۴	۲/۰	۱۰/۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۱/۱۱	۰/۰۷	۰/۳۴	۸۳
مثلثی دندانه ای (۱۰۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۷۵	۶	۳۶	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۱۴	۰/۰۸	۰/۳۵	۸۱
مثلثی دندانه ای (۱۰۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۱/۷۳	۴/۷	۳۰	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۰/۹۳	۰/۰۶	۰/۳۷	۸۶
مثلثی دندانه ای (۱۰۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۱/۶۸	۱/۴	۲۷	۱/۰	۱/۴	۴/۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۰/۸۳	۰/۰۵	۰/۳۷	۸۸
مثلثی دندانه ای (۱۰۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۱/۵۷	۲/۲	۱۵	۰/۴	۲/۰	۱۰/۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۰/۵۱	۰/۰۳	۰/۳۸	۹۳
مثلثی دندانه ای (۹۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۵۶	۶/۵	۳۲	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۲۸	۰/۱۰	۰/۳۳	۷۷
مثلثی دندانه ای (۹۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۱/۵۴	۵/۱	۲۷	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۱/۰۴	۰/۰۷	۰/۳۶	۸۴
مثلثی دندانه ای (۹۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۱/۴۸	۴/۵	۲۳	۱/۰	۱/۴	۴/۵	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۳۷	۸۶
مثلثی دندانه ای (۹۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۱/۱۷	۲/۸	۱۴	۰/۴	۲/۰	۱۰/۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۰/۶۸	۰/۰۴	۰/۳۸	۹۱
مثلثی دندانه ای (۸۰ درصد طول جت)	۱۰	۴۳/۳	۳/۳	۱/۳۶	۷/۱	۲۹	۱/۲۵	۱/۶	۴/۵۷	۰/۰۴۶	۰/۴۳۳۱	۱/۴۷	۰/۱۲	۰/۳۱	۷۱
مثلثی دندانه ای (۸۰ درصد طول جت)	۸	۴۳/۱	۳/۱	۰/۹	۶/۵	۲۴	۱/۱	۱/۴۵	۴/۴	۰/۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۱/۸	۰/۱۷	۰/۲۶	۶۱
مثلثی دندانه ای (۸۰ درصد طول جت)	۷	۴۲/۶	۲/۶	۰/۸۷	۵/۵	۲۲	۱/۰	۱/۴	۴/۳۷	۰/۰۳۳	۰/۴۲۶۱	۱/۶۳	۰/۱۴	۰/۲۸	۶۷
مثلثی دندانه ای (۸۰ درصد طول جت)	۴	۴۱/۱	۱/۱	۰/۷۶	۳/۷	۱۲	۰/۴	۰/۷۳	۲/۲۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱۱۱	۱/۰۵	۰/۰۶	۰/۳۵	۸۵

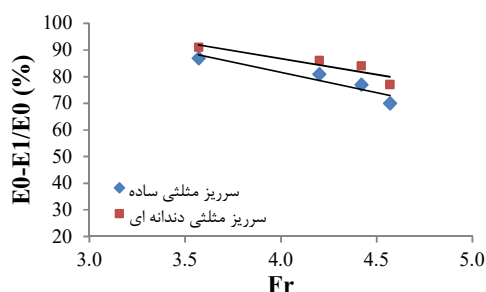
مقایسه تلفات نسبی انرژی در سرریز جامی ساده و دندانهای

اشکال ۷، ۸ و ۹ نمودارهای بدون بعد مقایسه تلفات نسبی انرژی در دو سرریز مثلثی ساده و دندانهای در مقابل عدد فرود در سه عمق پایاب ۱۰۰، ۹۰ و ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود در سه عمق پایاب ۱۰۰، ۹۰ و ۸۰ درصد اتلاف انرژی مربوط به سرریز مثلثی دندانهای بیشتر از سرریز مثلثی ساده است. بنابراین سرریز مثلثی دندانهای از نظر هیدرولیکی و اتلاف انرژی عملکرد بهتری نسبت به سرریز

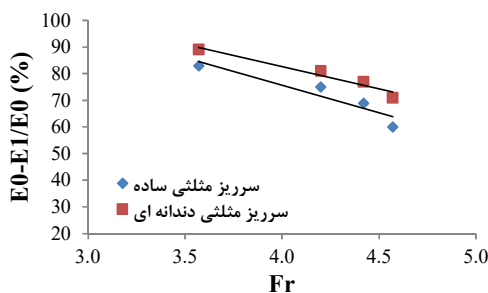
مثلثی ساده دارد. علت اصلی آن وجود دندانها در قسمت انتهایی سرریز بوده که باعث شکسته شدن و فشرده شدن بیشتر خطوط جریان و به تبع آن افزایش سرعت در لحظه پرتاب و در نهایت اتلاف نسبی انرژی بیشتر می‌باشد. همچنین مطابق جدول ۱، اتلاف انرژی در شرایط ۱۰۰ درصد عمق پایاب در سرریز جامی دندانهای نسبت به سرریز جامی ساده به‌طور متوسط ۷ درصد و در شرایط ۹۰ و ۸۰ درصد عمق پایاب به‌ترتیب به‌طور متوسط در حدود ۸ و ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل (۷): مقایسه تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی ساده و دندانهای در عمق پایاب ۱۰۰ درصد



شکل (۸): مقایسه تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی ساده و دندانهای در عمق پایاب ۹۰ درصد

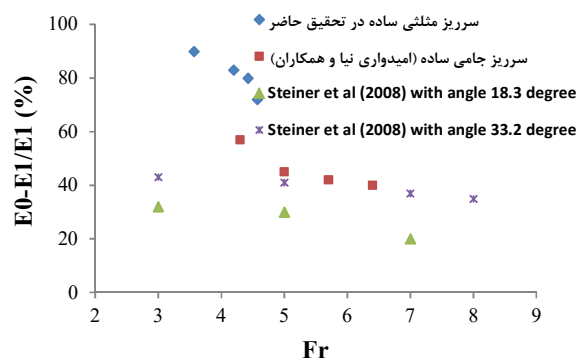


شکل (۹): مقایسه تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلثی ساده و دندانهای در عمق پایاب ۸۰ درصد

مقایسه تلفات نسبی انرژی در تحقیق حاضر با سایر تحقیقات

به منظور مقایسه تلفات نسبی انرژی در تحقیق حاضر با تحقیقات دیگران از تحقیق Omidvarinia and Mousavijahromi (2014) استفاده شد. با توجه به شکل ۱۰ نمودار بدون بعد تلفات نسبی انرژی در سرریز مثلی ساده در تحقیق حاضر و تحقیق Omidvarinia and

Mousavijahromi (2014) را نشان می دهد. در هر دو نمودار با افزایش عدد فرود تلفات نسبی انرژی کاهش می یابد و نتایج حاصل از این نمودارها تطابق مناسب این تحقیق با تحقیقات محققین دیگر را نشان می دهد و تفاوت بین دو نمودار به دلیل اندازه سرریزها و اعداد فرود به کار رفته در دو تحقیق است.



شکل (۱۰): مقایسه تلفات نسبی انرژی در تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات

نتیجه گیری

در این پژوهش تلفات نسبی انرژی در دو سرریز مثلی ساده و دندانهای در چهار عدد فرود مختلف و در سه عمق پایاب ۱۰۰، ۹۰ و ۸۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مؤثر در این تحقیق عدد فرود و عمق پایاب بود. نتایج این تحقیق نشان داد در سه عمق پایاب، با افزایش عدد فرود تلفات انرژی کاهش می یابد. همچنین تلفات انرژی در حالت مسیر پرتابه آزاد نسبت به دو حالت دیگر به دلیل توسعه یافتگی کامل پرش هیدرولیکی بیشتر می باشد. در حالت مقایسه کلی عملکرد سرریز مثلی

دندانهای نسبت به حالت بدون دندان، در اتلاف انرژی بهتر عمل می نماید که علت این امر شکستگی و فشردگی خطوط جریان در برخورد با دندانها در انتهای قسمت پرتابه سرریز می باشد. به طور کلی استفاده از دندان در انتهای پرتابه سرریز باعث اتلاف انرژی تحت شرایط ۱۰۰ درصد عمق پایاب در سرریز مثلی دندانهای نسبت به سرریز مثلی ساده به طور متوسط ۷ درصد و در شرایط ۹۰ و ۸۰ درصد عمق پایاب به ترتیب به متوسط در حدود ۸ و ۱۰ درصد می باشد.

منابع

- Abbasi Parvin Y., Barani Gh.A. 2009. Energy consumption in hydraulic structures (field study of energy consuming structures). Jihad University Publications (Amir Kabir University of Technology).
- An Experimental Study of the Effect of Barrier with Trapezoidal and Triangular Slots in a Flip Bucket Jet on Downstream Scour Using a Physical Model
- Balloffet A. 1961. Pressures on spillway flip buckets. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(5), pp.87-98.
- Chen T.C., Yu Y.S. 1965. Pressure distributions on spillway flip buckets. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(2), pp.51-63.
- Eskandari A., Heidarnejad M., Masjedi A., Pourmohammadi M.H., Kamanbedast A. 2020. Experimental investigation on the effect of different slot shapes and configurations on scour dimension downstream of flip buckets. *Water SA*, 46(3), pp.458-464.
- Eskandari A., Heidarnejad M., Masjedi A., Pourmohammadi M.H., Kamanbedast A.A. 2019. The experimental study of the effect of the geometry of the downstream flip bucket on the scouring of its tail water. *Water Resources Engineering*, 42(12), pp.65-77. (In Persian)
- Juon R., Hager W.H. 2000. Flip Bucket Without and With Deflectors. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), pp.837-845.
- Lenau C.W., Cassidy J.J. 1969. Flow through spillway flip bucket. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*. 95(5), pp.633-648.
- Mason P.J. 1993. Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *International water power and dam construction*, 45(9-10), pp.40-45.
- Mehri M. 2015. Simulation of the hydraulic behavior of water flow on the Balaroud Dam spillway using a physical model using a small-scale, Master's thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Omidvarinia M., Mousavijahromi S.h. 2014. Comparative Analysis of energy Losses in the Traditional and Triangular Flip Buckets. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 37(1), pp.133-142. (In Persian)
- Safarinejadi G., Heidarnejad M., Bordbar A., Pourmohammadi M.H., Kamanbedast A., 2019. An Experimental Study of the Effect of Barrier with Trapezoidal and Triangular Slots in a Flip Bucket Jet on Downstream Scour Using a Physical Model. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, Special Issue of Flood and Soil Erosion, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 23(4), pp.243-254.
- Steiner R., Heller V., Hager W.H., Minor H.E. 2008. Deflector ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), pp.562-571.
- Tierney D.G., Henderson F.M. 1963. Flow at the toe of a spill way. *La Houille Blanche*, Grenoble, France, 18(1), pp.42-50.