بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و زاویه دفلکتور گوه‌ای شکل بر تلفات انرژی جریان در سرریز جامی شکل

محدثه صادقی عسکری[1*]، حبیب موسوی جهرمی[2] و مهدی قمشی[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۳

چکیده

سرریزهای جامی شکل معمولاً برای انتقال جریان به پایین دست و اتلاف انرژی جریان در مواقعی که سرعت جریان زیاد باشد استفاده می‌شوند. یکی از راه‌های افزایش راندمان استهلاک انرژی در سرریز فلیپ باکت استفاده از دفلکتور می‌باشد. در این پژوهش دفلکتور سازه‌ای گوه‌ای شکل است که با تقسیم جریان در جام موجب تغییر مسیر قسمتی از جریان می‌شود. در مطالعه حاضر دفلکتور به‌صورت ممتد در سرتاسر عرض کانال استفاده شد و تلفات انرژی ناشی از آن اندازه گیری شد. جهت رسیدن به اهداف این مطالعه، پس از ساخت مدل فیزیکی آزمایش‌ها با چهار عدد فرود ۳/۱۳، ۳/۹۳، ٤/۷۲ و ۵/۵۵ به‌وسیله دفلکتورهایی با طول ۳، ٦ و ۹ سانتی‌متر و زاویه‌های °۱۲، °۱۷، °۲۲، °۲۷، °۳۲، °۳۷ و °٤۲ انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از دفلکتور با زاویه‌های متفاوت باعث افزایش میزان استهلاک انرژی شده است. با افزایش عدد فرود درصد تلفات انرژی افزایش می‌یابد، بیشترین اختلاف انرژی مستهلک شده با حالت شاهد مربوط به دفلکتور ٦ سانتی‌متری و زاویه ۲۷ درجه به مقدار ۲۲/۷ درصد است که در عدد فرود ۳/۹۳ اتفاق افتاده است. به طور متوسط زاویه ۲۷ درجه بیشترین استهلاک انرژی را داشته است، این مقدار استهلاک انرژی برای دفلکتورهای ۳، ٦ و ۹ سانتی‌متری به ترتیب برابر است با ٦۸/۲ ، ۷۲/۵ و ۵۱/٦ درصد است که در عدد فرود ۵/۵۵ اتفاق افتاده است.

کلید واژه‌ها: تلفات انرژی، دفلکتور، سرریز جامی شکل، مدل فیزیکی.

Investigation the Effect of Wedge-Shaped Deflector Length and Angle in Energy Dissipation on the Flip Bucket Spillway

M. Sadeghi Askari[1*], H. Mousavi[2] and M. Ghomeshi[3]

1*- Ph.D. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
3- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received :18 July 2014 Accepted:23 January 2016

Abstract

Flip buckets are commonly used to discharge flow from a hydraulic structure to the downstream as ski jump when flow velocity is large. One way to increase energy dissipation in flip bucket spillways is the deflector application. In this study deflector is a wedge-shaped structure which creates changes in part of flow trajectory. In this study, the deflector was continuously used across the channel, and energy dissipation caused by the mentioned deflector was measured. For the purpose of this study, after making the physical model, experiments were conducted by using four Froude's numbers 5.55, 4.72, 3.93 and 3.13 by using deflectors with 3, 6, 9 cm lengths, and angles equal to 12°,17°, 22°, 27°, 32°, 37° and 42°. Data analysis showed that deflectors with different angles

cause an increase in energy dissipation. Also when the Froude's number increases, the amount of energy dissipation will increase. The greatest difference of energy dissipation with state without deflector which occurs in Froude's number of 3.93 was equal to 22.7% and was belong to deflector with 6cm length and 27 degree. In average the deflector with angles of 27 degrees has the greatest energy dissipation. This amount of energy dissipation for deflectors with 3, 6, 9 cm in lengths were equals to 68.2%, 72.5%, 51.6%respenctively and which occur in Froude's number equal to 5.55

Keywords: Energy dissipation, Deflector, Flip bucket spillway, Physical model.

مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی کنترل سرعت جریان می‌باشد. سرعت جریان برای شرایط مختلف طراحی باید در محدوده قابل قبولی قرار گیرد تا از تخریب و خسارات جلوگیری شود (چانسون[1]، ۲۰۰۴). در بسیاری از مواقع به‌دلایل مختلف از جمله شیب زیاد عبور آب، انرژی جنبشی جریان بیش از حد می‌شود که در این حالت باید از سازه‌های مستهلک کننده انرژی استفاده شود (راجان و شیروانکارا[2]، ۱۹۸۰).

معمولی‌ترین سازه‌های استهلاک انرژی عبارتند از حوضچه‌های آرامش، جام غلتابی و جام پرتابی. در حوضچه‌های پرتابی که، جام پرتابی یکی از اجزای آن است، هنگامی که جریان از تندآب وارد جام می‌شود، مقداری از انرژی آن به دلیل تغییر شکل ناگهانی و انبساط جریان در جام مستهلک می‌گردد. اما به‌خاطر طول نسبتاً کوتاه جام، اصطکاک بین بستر جام با سطح زیرین جریان و مقاومت هوا با سطح آزاد جریان، نقش زیادی در استهلاک انرژی جریان در جام ندارد. بلکه تغییر جهت جریان در جام به سمت بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب رو به پایین وارد می‌کند، باعث کاهش شتاب حرکت و کاهش سرعت جریان در جام می‌شود و بخشی از انرژی جریان در جام مستهلک می‌گردد. بخش عظیمی از انرژی جریان با پخش و پراکنده شدن جت خروجی جریان از سازه به صورت پرش اسکی مستهلک می‌شود (جنتی[3]،۱۹۹۰). بدیهی است هرچه طول طی شده توسط جت بیشتر باشد استهلاک انرژی بیشتری نیز به وقوع خواهد پیوست. با برخورد جت پراکنده شده با حوضچه استغراق در پایاب و به‌وجود آمدن جریان آشفته و متلاطم در حوضچه فرایند استهلاک انرژی در سیستم پرش اسکی تکمیل می‌شود (بارانی و عباسی پروین،۱۳۸۸).

ساده‌ترین نوع جام پرتاب کننده به صورت یک قطاع دایره است که در بالادست مماس بر کف مجرای انتقال دهنده سیلاب (تنداب یا تونل) می‌باشد. این نوع جام پرتاب کننده پس از مطالعات و تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۳۳ در سد گرند کولی[4] جهت استهلاک انرژی احداث گردید (مهری و همکاران، ۱۳۸۷). بالوفت[5](۱۹۶۱) با استفاده از مدل پتانسیل جریان (به عنوان مثال خطوط جریان متحدالمرکز در باکت)، دریافت اگر نسبت عمق جریان (h_0) در باکت به شعاع انحنا (R) نسبتاً کوچک باشد حداکثر بار آبی فشار به طور متوسط ۴ درصد بزرگ‌تر از بار آبی فشار محاسبه شده است. هندرسون و تیرنی(۱۹۶۳)[6] نشان دادند که، برای نسبت‌های کوچک h_0/R با به‌کار گیری نظریه گرداب پتانسیلی بین محاسبات دو بعدی و مشاهدات تطابق مناسبی وجود دارد، مشروط بر این‌که زاویه انحراف حداقل ۴۵ درجه باشد. چن و یو[7](۱۹۶۵) توزیع فشار در امتداد یک باکت استوانه را با استفاده از معادلات پتانسیل جریان برای زاویه انحراف $\beta=0.75$ و 0.95 محاسبه نمودند. نتایج بار آبی فشار حداکثر آن‌ها نزدیک به روش بالوفت بود. لنو و وند کسیدی[8](۱۹۶۹) روش چن و یو(۱۹۶۵) را اصلاح نمودند. آنها نشان دادند که اثر ویسکوزیته در جریان جام ناچیز است. همچنین خلاصه‌ای از توصیه‌های طراحی توسط مانسون[9](۱۹۹۳) ارائه شد، ایشان شعاع باکت را حداقل سه تا پنج برابر عمق جریان ورودی و زاویه لبه یا زاویه برخاست را بین ۲۰ تا ۳۵ درجه و زاویه گسترش جت در هوا را حدود پنج درجه توصیه کرد. پرتاب کننده‌های جامی هم به صورت یک کانال منشوری مستطیل شکل و هم به صورت جام دارای یک منحرف کننده جریان جانبی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثر مقیاس در مدل‌های هیدرولیکی، توزیع فشار در باکت، تراژکتوری جریان، شرایط ایجاد امواج شوکی و روابط آب بند شدگی در جام‌ها بررسی گردیده است (جوان و هگر[10]، ۲۰۰۰). توزیع فشار در مستهلک کننده‌های پرش اسکی با جام مثلثی توسط مدل آزمایشگاهی مطالعه شده است (استاینر و همکاران[11]، ۲۰۰۸).

1- Chanson
2- Rajan and Shivashankara
3- Genetti

4- Grand Coulee
5-Balloffet
6- Henderson and Tierney
7- Chen and Yu
8- Lenau and Wand Cassidy
9- Mason
10- Juon and Hager
11- Steiner *et al.*



شکل۱- نمایی از فلوم مورد استفاده

میزان استهلاک انرژی یک بررسی مهم در سازه‌های هیدرولیکی به شمار می‌رود زیرا با کاهش استهلاک انرژی اثرات زیان‌آوری به سازه وارد می‌شود، این زیان‌ها حتی می‌تواند خطرات جانی را به همراه داشته باشد. بنابراین، بررسی استهلاک انرژی برای سازه‌های مهم از قبیل سرریز سدها یکی از مباحث مهم در زمینه کنترل و انتقال جریان می‌باشد و یافتن راهکارهای جدید و توسعه روش‌های نوین در این زمینه از اهمیت خاصی برخوردار است. از دیرباز مطالعات زیادی به دلیل اهمیت این موضوع صورت گرفته است و تا کنون ادامه دارد. با توجه به مروری بر منابع یاد شده هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر طول و زاویه دفلکتور بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب در سرریز جامی‌شکل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

به منظور دست‌یابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاک انرژی مؤثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای موثر در این آزمایش‌ها در رابطه ۱ ارائه شده‌اند:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\ (\rho, \mu, g, V, y, R, L, \theta, \sigma) \qquad (۱)$$

که در آن ΔH/H0: افت نسبی انرژی، ρ: جرم حجمی آب، μ: ویسکوزیته دینامیکی آب، g: شتاب ثقل، V: سرعت جریان نزدیک شونده به باکت، y: عمق جریان نزدیک شونده به باکت، R: شعاع باکت، L: طول دفلکتور، θ: زاویه‌ی دفلکتور و σ: کشش سطحی می‌باشد. با تحلیل ابعادی و با استفاده از روش پی باکینگهام رابطه کلی زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\ (Fr, \mathrm{Re}, \theta, \frac{L}{R}, We) \qquad (۲)$$

در این رابطه Re ($\mathrm{Re}=\rho vR/\mu$) عدد رینولدز نزدیک شونده به دفلکتور می‌باشد. عدد رینولدز مرزی (Re^*) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\mathrm{Re}^* = \frac{U^* . K_S}{\upsilon} \qquad (۳)$$

که در آن U^* سرعت برشی، K_s اندازه زبری بستر که با توجه به جنس بستر از جداول مربوطه به‌دست می‌آید و $\upsilon=1.007*10^{-6}$ m^2/s ضریب گرانروی سینماتیکی می‌باشد.

با توجه به اینکه در سرتاسر کانال و سرریز در تمام آزمایش‌ها $\mathrm{Re}>2000$ و $\mathrm{Re}^*>200$ بود، لذا جریان آشفته و بستر از لحاظ هیدرولیکی زبر می‌باشد بنابراین می‌توان از عدد رینولدز صرف نظر نمود (چاو[1]، ۱۹۵۹). قابل ذکر است با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها حداقل ارتفاع آب روی سرریز ۵/۷ سانتی‌متر می‌باشد، و حداقل عمق مورد نیاز برای چشم پوشی از اثر کشش سطحی ۳ سانتی‌متر می‌باشد (نواک و همکاران[2] ۲۰۱۰)، می‌توان از اثر عدد وبر (W)، ($W=\rho v2l/\sigma$) نیز صرفنظر نمود. در نتیجه رابطه نهایی به صورت زیر ساده می‌شود:

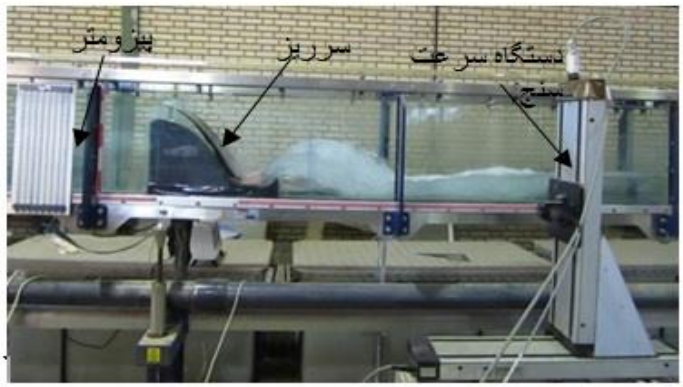
امکانات آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف این مطالعه آزمایش‌ها در فلومی با طول ۱۵ متر عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. سیستم گردش آب فلوم به‌صورت مدار بسته بوده و آب مورد نیاز از طریق مخازن مرتبط به‌هم تعبیه شده در کنار فلوم، تأمین می‌گردد. جریان ورودی ازطریق پمپ موجود دربالادست فلوم تأمین شده و میزان دبی جریان به‌وسیله یک دبی‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه قبل از ورود جریان به مخزن آرام کننده اندازه‌گیری می‌گردید. شکل(۱) نمایی از فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

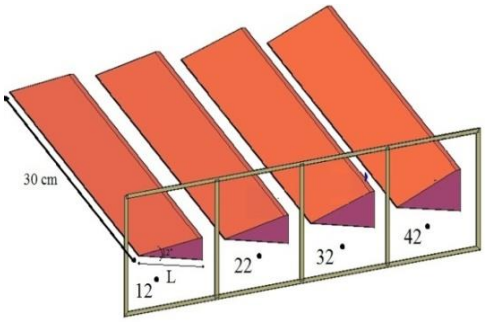
1- Chow
2 -Novak *et al.*

این فلوم دارای یک شیر فلکه برای تنظیم دبی جریان و یک دریچه در پایین دست جهت تنظیم تراز پایاب بود. برای انداره گیری سرعت جریان در مقاطع مختلف از دستگاه لیزر داپلر(LDV) و برای اندازه گیری پروفیل سطح آب از عمق سنج با دقت ۰/۰۰۰۵متر استفاده شد. در شکل (۲) سرریز و سرعت سنج مشاهده می‌شود.

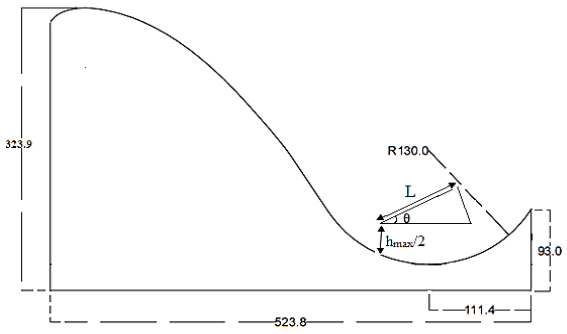
مدل سرریز جامی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۳۲/۴ سانتی‌متر و طول ۵۲/۴ سانتی‌متر و جام با شعاع ۱۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۹/۳ سانتی‌متر از جنس فایبر گلاس ساخته شد. مدل پس از ساخت در فاصله ۷/۷۱ متری از مخزن نصب شد.



شکل۲-سرریز و تجهیزات اندازه گیری



شکل۳- شکل هندسی دفلکتور ها



شکل٤- نمایی از سرریز و موقیت نصب دفلکتور

منحرف‌کننده‌ها گوه‌ای شکل با عرض ۳۰ سانتی‌متر با مقطع مثلث متساوی‌الساقین با ضلع‌های ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر (L در شکل۳) و زاویه بین ۱۲، ۱۷، ۲۲، ۲۷، ۳۲، ۳۷ و۴۲ درجه ساخته شدند.

دفلکتورها پس از ساخت در ارتفاع $h_{max}/2$ نصب شدند که h_{max} عمق آب به ازای دبی حداکثر در محل نصب دفلکتور است. در آزمایش‌ها، دفلکتورها ۲ سانتی متر بالاتر از کف باکت و در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از لبه جام نصب شدند. کف باکت ۳ سانتی متر از کف فلوم ارتفاع داشت. در شکل (۴) نمایی از سرریز و موقعیت نصب دفلکتورها مشاهده می‌شود. برای تعیین اندازه منحرف کننده‌ها، زاویه و موقعیت نصب آن‌ها از نرم افزار FLOW-3D استفاده شد.

بدین صورت که در ابتدا سریز مورد استفاده در نرم افزار مدل شد. برای بررسی صحت مدل عددی از داده‌های شاهد مدل آزمایشگاهی استفاده شد. سپس سازه منحرف‌کننده بر روی مدل عددی قرار گرفت و محل نصب و زاویه آن با سعی و خطا مشخص شد.

شکل (۵) نحوه تقسیم جریان در عدد فرود ۴/۷۲ و نحوه نصب دفلکتور با طول ضلع ۶ سانتی‌متر و زاویه۳۷ درجه را نشان می‌دهد. در این مطالعه منظور از عدد فرود، عدد فرود نزدیک شونده به دفلکتور می‌باشد که در مقطع عمود بر جریان در نقطه A (نقطه‌ی امتداد ضلع پایین دفلکتور با سریز) با اندازه‌گیری ارتفاع آب(با استفاده از گونیا) و سرعت جریان محاسبه شده است. برای پرهیز از ایجاد خطا در اندازه‌گیری ارتفاع آب، ارتفاع آب با استفاده از معادله پیوستگی و دبی جریان محاسبه و با ارتفاع خوانده شده به‌وسیله گونیا مقایسه می‌شد. در این آزمایش‌ها عدد فرود با افزایش دبی کاهش می‌یابد.

در هر مرحله دفلکتور با زاویه مورد نظر در محل به گونه‌ای نصب شد که ضلع پایین دفلکتور موازی محور کف کانال (در راستای افقی) بود. آزمایش‌ها با چهار دبی، سه طول ضلع دفلکتور و هفت زاویه متفاوت انجام شد و با چهار آزمایش شاهد (بدون دفلکتور برای مقایسه با حالت با دفلکتور) مجموعاً ۸۸ آزمایش انجام شد.

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دفلکتور در محل مورد نظر نصب می‌شد، سپس پمپ روشن می‌شد، جریان وارد فلوم می‌گردید، دبی با شیرفلکه مخصوص تنظیم دبی تنظیم می‌گردید، در هر دبی عمق و سرعت جریان در یک متر بالا دست سریز اندازه گیری می‌شد سپس دریچه پایین دست به تدریج بسته می‌شد تا عمق آب پایین دست سرریز یا همان عمق پایاب افزایش یابد. عمق پایاب تا جایی افزایش می‌یافت که پرش هیدرولیکی دقیقاً بعد از محل برخورد جت به کف فلوم تشکیل شود. هدف از ایجاد این پرش اندازه‌گیری عمق جریان بعد از پرتابه است. عمق پایین دست پرتابه به دلیل وجود هوای زیاد در جریان پایین دست پرتابه بطور مستقیم قابل اندازه گیری نیست برای اندازه گیری عمق پایین دست، به علت فوق بحرانی بودن جریان بعد از پرتابه با تشکیل یک پرش هیدرولیکی بلافاصله بعد از پرتابه و اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش با فرض ثابت بودن مومنتم در دو طرف پرش و صرف‌نظر از اصطکاک‌های جزیی، عمق اولیه پرش از رابطه اعماق مزدوج پرش در کانال مستطیلی به‌دست آمد. سپس انرژی دو طرف سرریز از رابطه برنولی محاسبه و تلفات انرژی بین پایین‌دست و بالادست نسبت به حالت شاهد مقایسه شد. در هر مرحله متغیرهای مورد اندازه گیری عبارت بودند از دبی(Q)، عمق بعد از پرش (y_2)، عمق آب پشت سرریز (ho)، ارتفاع آب روی سرریز(H)، ارتفاع آب انتهای سرریز، تراژکتوری پرتابه.



شکل۵- نحوه تقسیم جریان به وسیله دفلکتور

جدول ۱- تلفات انرژی در آزمایش‌های شاهد

دبی لیتر بر ثانیه	عدد فرود	تلفات انرژی درصد
۱۰	۵/۵۵	۵۴/۸
۱۵	۴/۷۲	۴۵/۸
۲۰	۳/۹۳	۴۱
۲۵	۳/۱۳	۳۸/۷

نتایج و بحث

برای رسیدن به اهداف مورد نظر آزمایش‌های این تحقیق در دو گروه زیر انجام شد:

نتایج آزمایش‌ها مربوط به تلفات انرژی جریان در حالت شاهد

جدول (۱) تلفات انرژی در آزمایش‌ها بدون دفلکتور یا همان حالت شاهد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است منظور از عدد فرود در تمام موارد عدد فرود نزدیک شونده به دفلکتور است.

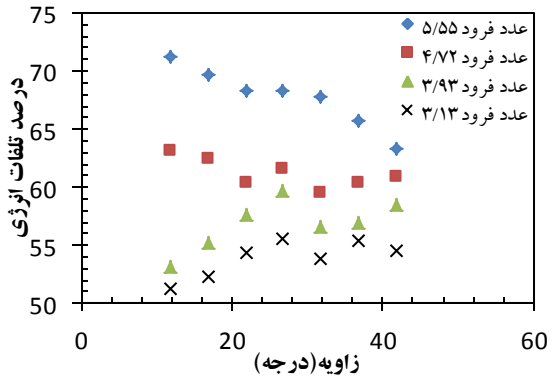
همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود با افزایش دبی، عدد فرود کاهش می‌یابد و با کاهش عدد فرود درصد تلفات انرژی کاهش یافته است، در دبی‌های بالا نقش سازه در استهلاک انرژی کمتر می‌شود. بیشترین تلفات ۵۴/۸ درصد است که در عدد فرود ۵/۵۵ اتفاق افتاده است.

نتایج آزمایش‌ها مربوط به تلفات انرژی جریان با حضور دفلکتور

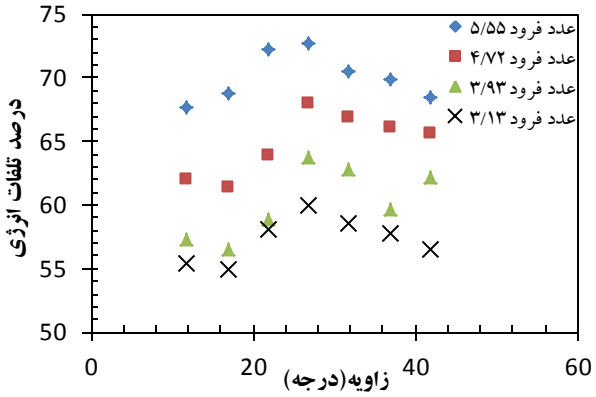
الف) دفلکتور با طول ضلع ۳ سانتی‌متر

شکل (۶) درصد تلفات انرژی نسبت به زاویه را در اعداد فرود مورد آزمایش نشان می‌دهد.

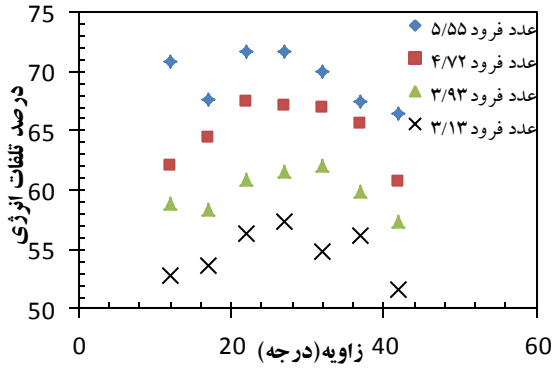
همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود تلفات انرژی افزایش یافته است. در دو عدد فرود ۳/۱۳ و ۳/۹۳ با افزایش زاویه دفلکتور تا زاویه ۲۷° استهلاک انرژی افزایش یافته است و از زاویه ۲۷° به بعد با افزایش زاویه دفلکتور، استهلاک انرژی کاهش یافته است. این روند را می‌توان برای دفلکتورهای ۶ و ۹ سانتی‌متری نیز مشاهده کرد. اما در دو عدد فرود ۴/۷۲ و ۵/۵۵ در دو زاویه ۱۲° و۱۷° استهلاک انرژی بیشتر از زاویه ۲۷° است، در این چهار آزمایش به دلیل سرعت زیاد جریان و همچنین طول کم دفلکتور و کمترین سطح تماس جریان با دفلکتور، جت ناشی از دفلکتور قبل از اینکه جت ناشی از جام تشکیل شود به جریان در جام برخورد کرده و سبب ایجاد غلطابه در جام می‌گردد. این غلطابه‌ها باعث ایجاد استهلاک انرژی بیشتری در جام می‌شوند.



شکل٦- تلفات انرژی در دفلکتور ۳ سانتی‌متری نسبت به زاویه دفلکتور



شکل۷- تلفات انرژی در دفلکتور ٦ سانتی‌متری نسبت به زاویه دفلکتور



شکل۸- تلفات انرژی در دفلکتور ۹ سانتی‌متری نسبت به زاویه دفلکتور

ب) دفلکتور با طول ضلع ۶ سانتی‌متر

شکل (۷) درصد تلفات انرژی نسبت به زاویه دفلکتور را در اعداد فرود مورد آزمایش برای دفلکتور ۶ سانتی‌متری نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت با افزایش عدد فرود در همه‌ی زاویه‌ها تلفات انرژی افزایش یافته است. دفلکتور ۶ سانتی‌متری در ۸۵٪ از داده‌ها تلفات بیشتری نسبت به دفلکتور ۳ سانتی‌متری داشته است همچنین دفلکتور با زاویه ۲۷ درجه در همه اعداد فرود تلفات بیشتری را نسبت به دفلکتور با سایر زاویه‌ها داشته است. تا زاویه ۲۷ درجه با افزایش زاویه، استهلاک انرژی افزایش و بعد از آن کاهش یافته است این روند نشان دهنده این است که دفلکتور ۶ سانتی متری در زاویه‌های۲۷ درجه و ۳۲ درجه عملکرد بهتری نسبت به سایر زاویه‌ها دارد. زاویه ۲۷ درجه حداکثر درصد تلفات انرژی را در فرود ۵/۵۵ به مقدار ۷۲/۲ درصد دارد. می‌توان گفت در این سری آزمایشات طول بهینه برای دفلکتور طول ۶ سانتی‌متری است

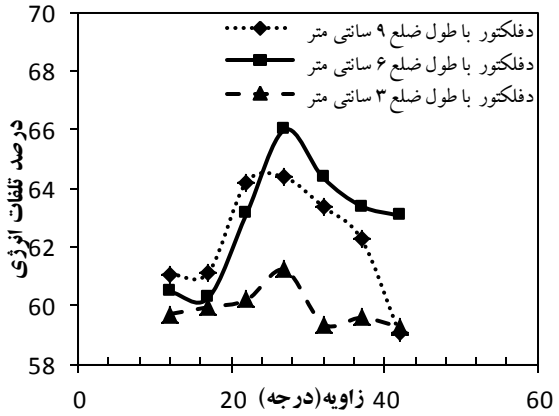
ج) دفلکتور با طول ضلع ۹ سانتی‌متر

شکل (۸) درصد تلفات انرژی نسبت به زاویه را در اعداد فرود مورد آزمایش برای دفلکتور ۹ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

شکل (۸) نشان می‌دهد که دفلکتور با زاویه‌های ۲۲، ۲۷ و ۳۲ درجه بیشترین درصد تلفات انرژی را نسبت به سایر زاویه‌ها دارد و زاویه ۴۲ درجه کم‌ترین درصد تلفات انرژی را دارد. در آزمایش‌ها مشاهده شد که در زاویه‌های بزرگ‌تر دو جت جدا از هم تشکیل شدند. این دو جت با یکدیگر برخورد نداشتند و این نشان می‌دهد که برخورد جت از روی دفلکتور با جت پرتابی از باکت سبب ایجاد استهلاک بیشتری در سرریز فلیپ باکت می‌شود.

د) میانگین تلفات انرژی

به منظور تحلیل بهتر داده‌ها، بین نتایج به‌دست آمده میانگین گیری انجام شد. ابتدا برای هر دفلکتور بین تمام دبی‌ها میانگین گیری انجام شد. یعنی برای هر زاویه میانگین تلفات انرژی در چهار دبی گرفته شده است. شکل (۹) این نتایج را نشان می‌دهد.



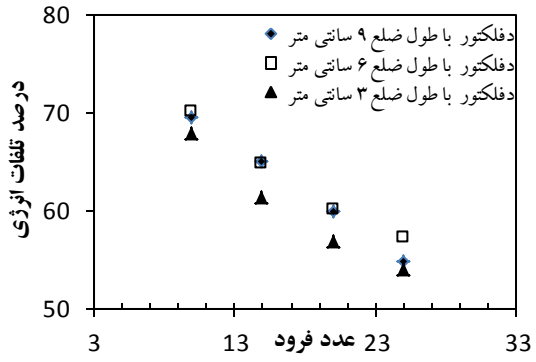
شکل۹-میانگین درصد تلفات انرژی نسبت به زاویه دفلکتور در عدد فرودهای های مختلف



شکل۱۰- ایجاد دو جت جدا در زاویه °۴۲ و دفلکتور ۹ سانتی متری

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش زاویه در طول‌های آزمایش شده، تلفات انرژی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. تا زاویه ۲۲ درجه به طور میانگین تلفات انرژی دفلکتور ۹ سانتی‌متری از بقیه بیشتر است و بعد از آن تلفات دفلکتور ۶ سانتی‌متری بیشتر می‌شود. علت کاهش درصد تلفات دفلکتور ۹ سانتی‌متری در زاویه‌های بزرگ‌تر این است که در این زاویه‌ها جت ایجاد شده به وسیله دفلکتور با جت باکت برخورد کمتری داشته است به طوری که در زاویه ۴۲ درجه دو جت کاملاً جدا از یکدیگر ایجاد شدند (شکل ۱۰). اگر چه در دو جت مجزا سطح بیشتری از جریان جت در تماس با هوا است ولی اتلاف انرژی ناشی از برخورد دو جت با یکدیگر خیلی بیشتر از اتلاف انرژی به وسیله تماس با هوا است.

در شکل (۱۱) برای هر دبی در میانگین درصد تلفات انرژی در تمام زاویه‌ها گرفته شده است. یعنی در هر عدد فرود مشخص بین تلفات انرژی در هفت زاویه مورد آزمایش میانگین گرفته شد.



شکل۱۱- میانگین درصد تلفات انرژی در مقابل عدد فرود در زاویه‌های مختلف

جدول۲- مقدار پارامترهای رابطه (٤)

R^2	ضرایب رابطه				
	g	D	C	B	A
۰/۸۵	۰/۳۷	-۰/۰۲	۰/۳۱	۰/۰۲	۰/۲

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود به طور میانگین کمترین درصد تلفات انرژی مربوط به دفلکتور ۳ سانتی‌متری و در عدد فرود ۳/۱۳ است، به این دلیل که در اعداد فرود کم و در زاویه‌های کوچک در این طول جدایی جریان اتفاق نمی‌افتاد و دفلکتور مانند مانع در برابر جریان عمل می‌کرد. با افزایش عدد فرود در آزمایش‌هایی که با دفلکتور ۹ سانتی‌متری انجام شد، دو جت کاملاً جدا از هم یکی روی دفلکتور و دیگری زیر دفلکتور و روی باکت، ایجاد شد که عدم برخورد دو جت با یکدیگر تلفات کمتری را سبب شد. با توجه به داده ها دفلکتور ۶ سانتی‌متری بیشترین تلفات انرژی را داشته است، که با افزایش عدد فرود درصد استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

۳- تحلیل آماری

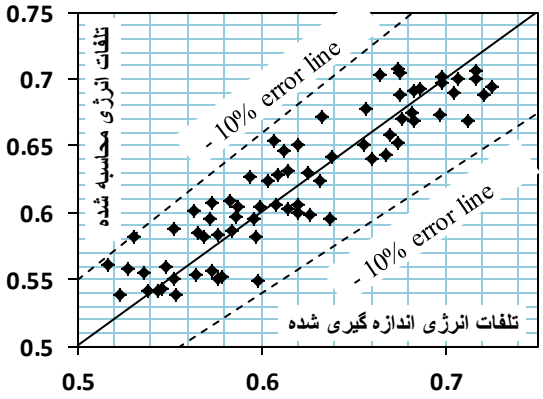
در ادامه با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بی‌بعد موثر استخراج شده روی مقدار افت انرژی نسبی و ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از رگرسیون‌گیری چند متغیره غیرخطی نرم افزار آماری(SPSS 17) استفاده شد و در نهایت رابطه (۴) پس از تحلیل‌های متعدد استخراج گردید. این رابطه برای ۸۵ درصد داده‌ها استخراج شد و از ۱۵درصد داده‌ها برای صحت سنجی رابطه استفاده شد.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = AF_r\left(B\theta^2 + C\left(\frac{L}{R}\right)^D\right) + g \qquad (۴)$$

رابطه (۴) در محدوده‌ی اعداد فرود بین ۳ تا ۵/۶ استخراج شده است. که در آن $\frac{\Delta H}{H_0}$: مقدار افت نسبی انرژی، F_r: عدد فرود نزدیک شونده به دفلکتور، $\frac{L}{R}$: نسبت طول دفلکتور به شعاع باکت و θ: زاویه دفلکتور است. جدول (۲) مقدار پارامترهای رابطه (۴) را نشان می‌دهد. تمامی پارامترهای استفاده شده در رابطه (۴) بی‌بعد هستند و θ بر حسب رادیان می‌باشد.

در جدول (۲) A : ضریب عدد فرود، B: ضریب θ، C: ضریب نسبت $\frac{L}{R}$، D: توان نسبت $\frac{L}{R}$ ، و g عدد ثابت در معادله است.

در شکل (۱۲) مقدار افت محاسبه شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی(محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از رابطه (۴) (محور قائم) با هم مقایسه شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتا خوبی می‌باشند.



شکل۱۲- مقایسه بین افت انرژی نسبی مشاهده شده و محاسبه شده از رابطه (٤)

مقدار همبستگی این دو مقدار (آزمایشگاهی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری ۸۵ درصد و در سطح یک درصد معنی دار می‌باشد.

الف) صحت سنجی

برای صحت سنجی فرمول بدست آمده از ۱۵درصد داده‌ها که به طور کاملاً تصادفی انتخاب شدند، استفاده شد. نتایج صحت سنجی نشان داد که داده‌های مورد استفاده برای صحت سنجی دارای همبستگی ۸۶ درصد هستند. و در سطح یک درصد معنی دار هستند.

ب) تحلیل حساسیت رابطه ارائه شده

با تحلیل حساسیت رابطه(۴) مشخص شد که بیشترین تأثیر به ترتیب مربوط به افزایش و کاهش (g)، افزایش و کاهش ضریب (A)، افزایش و کاهش عدد فرود (Fr) افزایش و کاهش (C) می‌باشد. از میان نسبت‌های بی‌بعد معرفی شده، عدد فرود دارای بیشترین حساسیت و تأثیر می‌باشد و اندازه گیری آن باید با دقت بیشتری صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری

از مجموع آنچه که گفته شد، نتایج به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

در همه‌ی آزمایش‌ها با افزایش عدد فرود درصد تلفات انرژی افزایش می‌یابد و تلفات انرژی با وجود دفلکتور بیشتر از حالت شاهد است.

به طور متوسط با افزایش زاویه تلفات انرژی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. زاویه ۲۷ درجه بیشترین استهلاک انرژی را داشته است این مقدار استهلاک انرژی برای دفلکتورهای ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متری به ترتیب برابر است با ۶۸/۲ ، ۷۲/۵ و ۷۱/۶ درصد است که در عدد فرود ۵/۵ اتفاق افتاده است.

به طور متوسط دفلکتور ۶ سانتی‌متری بیشترین درصد استهلاک انرژی و دفلکتور ۳ سانتی‌متری کم‌ترین درصد استهلاک انرژی را داشتند.

کم‌ترین درصد استهلاک انرژی در عدد فرود ۳/۱ و برای دفلکتورهای ۳، ۶ و ۹ سانتی متری به ترتیب به مقدار ۵۱/۳ ، ۵۴/۸ و ۵۱/۶ درصد و به ترتیب در زاویه‌های ۱۲، ۱۷ و ۴۲ درجه اتفاق افتاده است.

بیشترین اختلاف نسبت به شاهد مربوط به دفلکتور ۶ سانتی‌متری و زاویه ۲۷ درجه به مقدار ۲۲/۷ درصد است که در عدد فرود ۳/۹۳ اتفاق افتاده است. و کم‌ترین اختلاف با شاهد به مقدار ۸/۲ درصد است که در دفلکتور ۹ سانتی‌متری و زاویه ۴۲ درجه و عدد فرود ۵/۵۵ اتفاق افتاده است.

منابع

۱- بارانی، غ.ع. و ی. عباسی پروین. ۱۳۸۸. استهلاک انرژی در سازه های هیدرولیکی (مطالعه میدانی سازه های مستهلک کننده انرژی). جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)،۲۳۰صفحه.

۲- مهری، م.، فتحی مقدم، م. و ر. ابن جلال، ۱۳۸۷. بررسی عملکرد پرتاب کننده جامی در پایاب سرریز سد بالارود به کمک مدل فیزیکی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز، مهرماه.

3- Balloffet, A. 1961. Pressures on spillway flip buckets. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 87(5): 87–98.

4- Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. Elsevier Butterworth Heinemann, 496p.

5- Chen, T.C. and Y, S. Yu. 1965. Pressure distribution on spillway flip buckets. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 91(2): 51–63.

6- Chow, V. T. 1959. Open–channel hydraulics. McGraw Hill Book Company. New York, 700p.

7- Genetti, A. J. 1990. Engineering and hydraulic design of spillways. U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC.

8- Henderson, F. M. and D. G. Tierney. 1963. Flow at the toe of a spillway. La Houille Blanche Grenoble France, 18(1): 42–50.

9- Juon, R. and W.H. Hager. 2000. Flip bucket without and with deflectors. Journal of Hydraulic Engineering, 126(11):837-845.

10- Lenau, C. and J. J. Wand Cassidy. 1969. Flow through spillway flip bucket. Journal of Hydraulic Division. ASCE, 95 (5): 633–648.

11- Mason, P. J. 1993. Practical guidelines for the design of flip bucket sand plunge pools. Water Power and Dam construction,U.K, 45(9):40-45.

12- Novak,P., Guinot,V. and A. Jeffre. 2010. Hydraulic modelling an introduction, principles, methods and application, Spon Press, an imprint of Tylor and Francis 592p.

13- Rajan, B. H. and K. N. Shivashankara. 1980. Design of trajectory buckets. Irrigation and Power, 37(1): 63–76.

14- Steiner, R., Valentina, H., Hager, W. H. and H.E. Minor. 2008. Deflector ski jump hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(5):562-571.