

## بررسی تأثیر تعداد دفلکتورهای مثلثی بر استهلاک انرژی و طول پرتابه در سرریزهای جامی شکل

فردوس میرسالاری<sup>۱\*</sup> و محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳

### چکیده

در این مطالعه، با توجه به ناچیز بودن تعداد پژوهش‌ها در مورد کاربرد دفلکتور ممتد در سرریز جامی، به‌عنوان راهکاری جدید، تأثیر دفلکتور غیرممتد مثلثی در پرتاب‌کننده جامی بر میزان استهلاک انرژی و طول پرتابه به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها بر پرتاب‌کننده جامی در چهار دبی و سه عمق پایاب متفاوت برای دو، سه و چهار دفلکتور مثلثی با زاویه برخاست ۴۷ درجه و بدون دفلکتور اجرا شد. در مقایسه کلی، عملکرد پرتاب‌کننده با دفلکتور در استهلاک انرژی و طول پرتابه بهتر از پرتاب‌کننده بدون دفلکتور است. بیشترین میزان تلفات انرژی در برابر  $\frac{Y_c}{H}$  در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی کامل برای چهار دفلکتور در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷ معادل ۶۵/۸۷ درصد و کمترین میزان تلفات در برابر  $\frac{Y_c}{H}$ ، در شرایط تشکیل پرش مستغرق کامل برای حالت بدون دفلکتور در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ معادل ۴۷/۸۶ درصد است. بیشترین طول پرتابه در برابر  $\frac{Y_c}{H}$ ، با تشکیل پرش هیدرولیکی کامل، در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ در پرتاب‌کننده بدون دفلکتور معادل ۹۵/۶ سانتی‌متر و کمترین میزان طول پرتابه در برابر  $\frac{Y_c}{H}$ ، برای چهار دفلکتور در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، با تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق کامل معادل ۲۵/۶ سانتی‌متر است. به‌دلیل افزایش میزان تلفات انرژی (تحت تأثیر اختلاط جت‌های عبوری دفلکتورها و پرتاب‌کننده) و کاهش طول پرتابه، پرتاب‌کننده با دفلکتور مثلثی توصیه می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

پرش اسکی، پرش هیدرولیکی، سدها، عمق پایاب

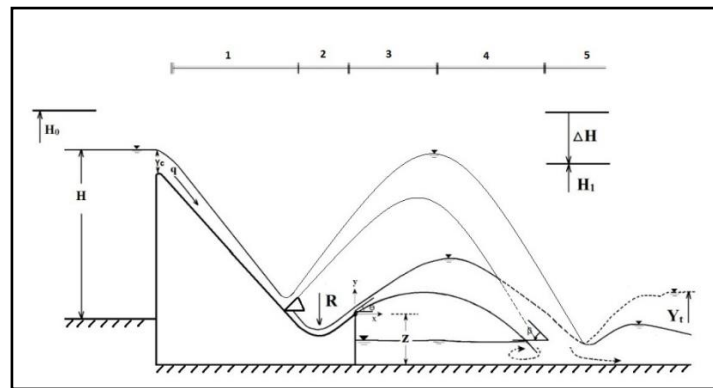
### مقدمه

استهلاک انرژی عبارات‌اند از: ۱- حوضچه‌های آرامش که در آنها برای کاهش انرژی جریان از پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود، ۲- مستهلک‌کننده‌های غلتانی که در آنها با ایجاد جریان چرخشی و غلتاندن آب، انرژی اضافی از بین می‌رود و ۳- مستهلک‌کننده‌های جامی شکل که با پرتاب کردن جت جریان به هوا، با استفاده از سیستم پرش اسکی، انرژی جنبشی اضافی جریان را از بین می‌برند تا اثرهای فرسایشی جریان بر سد و سازه‌های مهم

سرریزها از بخش‌های بسیار مهم سدهای مخزنی هستند و وظیفه عبور جریان مازاد بر حجم مخزن را به‌هنگام سیلاب به‌عهده دارند. سرریزها معمولاً تاج اوجی شکل دارند که جریان پس از عبور از تاج وارد تند آبی می‌شود و در انتهای سرریز، سازه مستهلک‌کننده انرژی تعبیه می‌شود تا انرژی جنبشی آب را کاهش دهد و از آبشستگی پایین‌دست سازه بکاهد. متداول‌ترین سازه‌های

1987) روی می‌دهد: (۱) قسمت جریان روی سرریز در ورودی جام، (۲) ناحیه جامی شکل که اتلاف انرژی در آن ناشی از تغییر جهت جریان و پرتاب است، (۳) ناحیه پخش جت در هوا که اتلاف انرژی در آن در اثر پخش جت و برخورد آن با هوای اطراف است، (۴) ناحیه برخورد جت خروجی با پایاب و (۵) ناحیه متلاطم و توأم با پرش در محدوده پایاب که استهلاك انرژی در آن در اثر تلاطم است. شکل ۱ نمای کلی سیستم پرش اسکی و پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

اطراف آن کاهش یابد. سازه‌های جامی شکل در شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی مناسب پایاب سدها، در جریان‌های با سرعت ۱۵-۲۰ متر بر ثانیه (Heller *et al.*, 2005) به‌عنوان اقتصادی‌ترین طرح استهلاك انرژی در سدهای بلند (Khatsuria, 2005) استفاده می‌شوند. اجرا و نگهداری آسان سازه‌های مستهلک‌کننده جامی شکل (Barani & Abbasi, 2009) سبب کاربرد فراوان این سازه‌ها در سرتاسر دنیا شده است. استهلاك انرژی در هر سیستم پرش اسکی در بخش‌های مختلفی (Anon,



شکل ۱- نمای کلی سیستم پرش اسکی

Fig. 1- Ski - jump system overview

استهلاك انرژی، آنگاه مؤثرتر است که عمق پایاب کم یا غیرقابل تخمین باشد. ماسون (Mason, 1993) در تحقیقات گسترده‌ای حالات مختلف هندسه پرتاب‌کننده جامی را بررسی کرد و شعاع سازه را حداقل ۳ تا ۵ برابر عمق جریان ورودی، زاویه لبه برخاست را بین ۲۰ تا ۳۵ درجه و زاویه توزیع جت در هوا را ۵ درجه توصیه کرده است. مومنی و صالحیان و همکاران (Momeni-Vesalian *et al.*, 2006) آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی را در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل بررسی و اعلام کردند شدت جریان مؤثرترین پارامتر در آبشستگی است و عمق پایاب تأثیر معکوس در عمق آبشستگی دارد. استاینر و همکاران (Steiner *et al.*, 2008)

بیشترین سهم استهلاك انرژی به‌هنگام پرتاب جریان، به‌عهدده مقاومت هوا در برابر حرکت فوران و هنگام برخورد جت خروجی با پایین دست است. از پرش اسکی برای اولین بار قبل از سال ۱۹۳۰ میلادی در فرانسه استفاده شد و از آن روز تاکنون انواعی از جام پرتابی با اندازه‌های مختلف در سرتاسر جهان در حال اجرا و بهره‌برداری است (Tuzandeh, 2011). Jani, لینو و کسیدی (Lenau & Cassidy, 1969) نشان دادند که اثر ویسکوزیته در جریان داخل جام پرتاب‌کننده ناچیز است. ماسون (Mason, 1993) استفاده از فرم پرش اسکی را بر اساس سرعت و دبی محدود کرد اما اضافه می‌کند که سیستم پرش اسکی، در مقایسه با سایر گزینه‌های

استهلاک انرژی یکی از مباحث مهم در زمینه کنترل و انتقال جریان است؛ از این رو برای یافتن راهکارهای جدید و توسعه روش‌های نوین، تأثیر تعداد دفلکتور در بدو ورود به پرتاب‌کننده، به‌عنوان مؤلفه سازه‌ای، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. این تحقیق بر این اصل استوار است که به‌دلیل تفکیک جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی به‌واسطه دفلکتورها، خصوصیات مسیر پرتابه، شرایط هیدرولیکی جریان خروجی و به‌تبع آن میزان استهلاک انرژی جریان تحت تأثیر قرار خواهد گرفت، به این‌صورت که در یک طول مشخص، پرتابه‌های تفکیک شده مجدداً به یکدیگر برخورد می‌کنند و این عمل باعث تداخل بیشتر جریان و بیشتر شدن اتلاف انرژی مازاد خواهد شد؛ نتیجه این امر کاهش فرسایش ساحل و بستر و کاهش تخریب سازه‌های پایین‌دست خروجی‌های سد است. از طرفی وجود دفلکتورها به کاهش طول پرتابه خواهد انجامید که این امر سبب خواهد شد تا حوضچه‌های استغراق و سازه‌های مرتبط کوچک‌تر ساخته شوند، نگهداری آنها آسان‌تر شود و هزینه‌ها کاهش یابد. با توجه به آنچه گفته شد، در این تحقیق به تعیین میزان این افزایش استهلاک نسبی انرژی و محاسبه مقدار کاهش طول پرتابه، تحت تأثیر تعداد دفلکتورهای مثلثی مستقر در عرض پرتاب‌کننده جامی، پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر تعداد دفلکتورهای مثلثی در پرتاب‌کننده جامی شکل بر میزان استهلاک انرژی آب و طول پرتابه خروجی از پرتاب‌کننده جامی، تحت تأثیر عمق‌های پایاب متفاوت، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی

آزمایشگاه خصوصیات جریان و توزیع فشار هیدرودینامیکی را در منحرف‌کننده‌های پرش اسکی مثلثی بررسی و آن را با پرتاب‌کننده‌های دایره‌ای مقایسه کردند. اریپکوم و همکاران (Eripicum *et al.*, 2010) تأثیر جداکننده را در پرتاب‌کننده‌ها بر هندسه حوضچه استغراق بررسی کردند و نشان دادند که جداکننده سبب کاهش طول حوضچه و در نتیجه کاهش هزینه اقتصادی است. صادقی‌عسکری و موسوی‌جهرمی (Sadeghi-Askari & Mousavi, 2012) تأثیر زاویه دفلکتور ممتد بر استهلاک انرژی در سرریزهای جامی دایره‌ای را در عمق پایاب منجر به تشکیل پرش کامل بررسی کردند و افزایش میزان استهلاک انرژی سرریز جامی با دفلکتور ممتد را نسبت به حالت بدون دفلکتور نشان دادند. امیدواری‌نیا و موسوی‌جهرمی (Omidvarinia & Mousavi Jahromi, 2013) تأثیر دفلکتور ممتد بر تجزیه جت را در سرریزهای جامی مثلثی بررسی کردند و نشان دادند میزان استهلاک انرژی در پرتاب‌کننده مثلثی بدون دفلکتور، نسبت به حالت معمول جامی شکل، بیشتر است. نوایی و همکاران (Navaei *et al.*, 2016) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی بر استهلاک انرژی و طول پرتابه پرداختند که نتایج این بررسی نشان‌دهنده افزایش ۴ تا ۱۸ درصد در استهلاک انرژی، نسبت به حالت بدون باکت و افزایش افت انرژی با کاهش شعاع باکت بود. احدیان و همکاران (Ahadian *et al.*, 2018) با مدل‌سازی عددی به روش Flow-3D، اثر زاویه انتهایی فلیپ باکت و دبی جریان خروجی از جام بر طول پرتابه بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش دبی در هر یک از زاویه‌ها و همچنین با کاهش زاویه در هر یک از دبی‌ها، طول پرتاب بیشتر می‌شود.

و پرش مستغرق رابطه کلی بدون بعد به صورت رابطه ۳ ساده می‌شود.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{q^2}{gH^3}; \frac{Y_C}{H}; \frac{L}{Y_t}\right) \quad (3)$$

در ادامه تجزیه و تحلیل ابعادی، پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها تحت شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی کلاسیک در رابطه ۴ ارائه شده‌اند و با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام، رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f(\rho; \mu; g; H; R; q; \theta; \beta; Z; L; Y_C) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{\rho q}{\mu}; \frac{q^2}{gH^3}; \frac{Y_C}{H}; \frac{L}{H}\right) \quad (5)$$

که در آنها،

$\frac{\rho q}{\mu}$  = عدد رینولدز جریان بالادست پرتاب‌کننده جامی. در تمام آزمایش‌ها به‌ازای دبی‌های اعمال شده، عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ بود و از این‌رو جریان در محدوده آشفته قرار دارد. پس از صرف‌نظر کردن از عدد رینولدز جریان بالادست پرتاب‌کننده جامی، تحت شرایط پرش هیدرولیکی کلاسیک رابطه کلی بدون بعد به صورت رابطه ۶ ساده می‌شود.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{q^2}{gH^3}; \frac{Y_C}{H}; \frac{L}{H}\right) \quad (6)$$

برای رسیدن به هدف‌های این تحقیق، آزمایش‌ها در فلومی از جنس پلکسی‌گلاس با مقطع مستطیلی اجرا شدند. طول، عرض و ارتفاع این فلوم به‌ترتیب ۷۳۰، ۵۶ و ۶۰ سانتی‌متر و شیب کف آن ثابت و معادل صفر است. سیستم گردش آب فلوم به‌صورت مدار بسته است و جریان آب مورد نیاز با

پرداخته شد که در استهلاک انرژی مؤثرند و با تجزیه و تحلیل ابعادی، روابط کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها تحت شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق در رابطه ۱ ارائه شده‌اند.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f(\rho; \mu; g; H; R; q; \theta; \beta; Z; L; Y_C; Y_t) \quad (1)$$

که در آن،

$\frac{\Delta H}{H_0}$  = افت نسبی انرژی؛  $H_0$  = انرژی کل جریان در مخزن؛  $\rho$  = جرم حجمی آب؛  $\mu$  = ویسکوزیته دینامیکی آب؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $H$  = عمق آب داخل مخزن؛  $R$  = شعاع جام؛  $q$  = دبی واحد عرض؛  $\theta$  = زاویه برخاست جت؛  $\beta$  = زاویه فرود جت؛  $Z$  = ارتفاع لبه جام تا کف فلوم؛  $L$  = مجموع طول دفلیکتورهای غیرممتد مثلثی؛  $Y_C$  = عمق بحرانی روی سرریز اوجی؛ و  $Y_t$  = عمق پایاب پرتاب‌کننده جامی. پارامترهای  $R$ ،  $\theta$ ،  $\beta$ ،  $Z$  به‌علت داشتن مقادیر ثابت، از پارامترهای مؤثر در آنالیز ابعادی حذف شدند. با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام، رابطه ۲ به دست می‌آید.

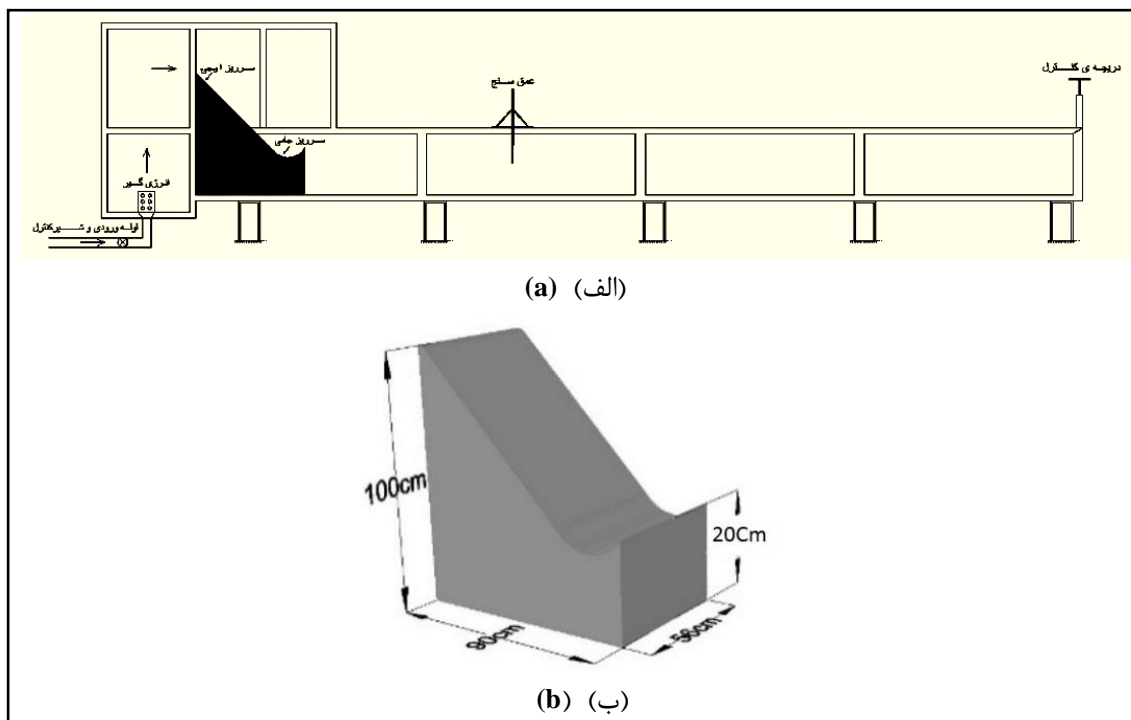
$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{\rho q}{\mu}; \frac{q^2}{gH^3}; \frac{Y_C}{H}; \frac{L}{Y_t}\right) \quad (2)$$

که در آن،

$\frac{\rho q}{\mu}$  = عدد رینولدز جریان بالادست پرتاب‌کننده جامی. در تمام آزمایش‌ها به‌ازای دبی‌های اعمال شده، عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ بود و از این‌رو جریان در محدوده آشفته قرار دارد که به این دلیل می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد. در نتیجه، تحت شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق

تعبیه شده است و نیز یک دریچه کشویی در انتهای فلوم برای تنظیم تراز پایاب و تعیین محل وقوع پرش هیدرولیکی نصب شده است. از یک عمق سنج مکانیکی برای قرائت عمق‌های پایاب استفاده می‌شود. شکل ۲ تصویر شماتیک فلوم و سرریز تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

به‌کارگیری مخزن‌های مرتبط به‌هم، از طریق پمپ موجود در بالادست فلوم تامین می‌شود؛ دبی جریان قبل از ورود به مخزن آرام‌کننده، با یک دبی‌سنج مغناطیسی با صفحه نمایش دیجیتال با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه، اندازه‌گیری می‌شود. در محل ورودی آب به مخزن، یک شیر فلکه برای تنظیم میزان دبی،



شکل ۲- الف) نمایی از پروفیل طولی فلوم و سرریز مورد استفاده و ب) تصویر سرریز و ابعاد آن

Fig. 2-a) View of the longitudinal profile of the flume and spillway used and b) Image of spillway and its dimensions

مشابه ندارد و از این‌رو ابعاد دفلکتورها بر اساس سعی و خطا اختیار شد که مهم‌ترین فاکتور در آن، ارتفاع دفلکتور است تا شرایط به‌گونه‌ای باشد که جریان از لبه فلوم خارج نشود و پرتابه حتماً در پایین‌دست سرریز فرود آید نه روی جام. بر این اساس، دفلکتورهای غیرممتد گوه‌ای شکل با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر با مقطع مثلث متساوی‌الساقین با ضلع‌هایی به طول ۶ سانتی‌متر و زاویه پرتاب ۴۷ درجه، از جنس پی‌وی‌سی فشرده برش داده شدند. برای این دفلکتورها نگهدارنده‌هایی گوه‌ای از

در ابتدای فلوم، طبق استاندارد USBR، سرریزی از نوع پرش اسکی هم‌عرض با فلوم، با ارتفاع ابتدایی و انتهایی ۱۰۰ و ۲۰ سانتی‌متر (نسبت به کف فلوم) و طول ۹۰ سانتی‌متر نصب گردید. شعاع انتهایی (۱۴ سانتی‌متر) از جنس ورق گالوانیزه ساخته و پس از نصب شدن، نسبت به فلوم، آب‌بندی شد (شکل ۲-ب). مشخصات شعاع سرریز در این تحقیق بیشتر از حداقل‌هایی است که پیتزکا (Peterka, 1983) و ماسون (Mason, 1993) توصیه کرده‌اند. این تحقیق، (دفلکتور منقطع)، تا امروز

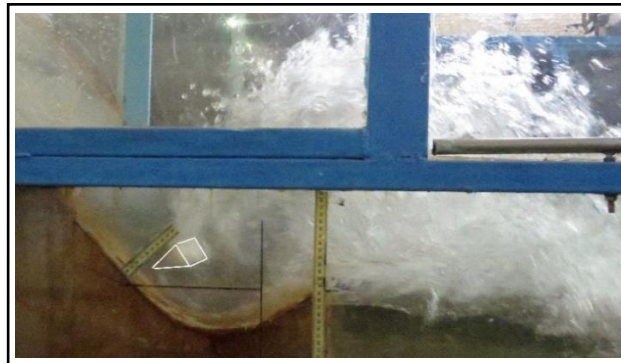
نصب دو دفلکتور، فاصله دفلکتور از دیواره فلوم برابر ۹ سانتی‌متر و فاصله بین دو دفلکتور برابر ۱۸ سانتی‌متر و در نصب سه دفلکتور، فاصله دفلکتور از دیواره فلوم برابر ۴/۳ سانتی‌متر و فاصله بین دو دفلکتور برابر ۸/۷ سانتی‌متر و در نصب چهار دفلکتور، فاصله دفلکتور از فلوم برابر ۲ سانتی‌متر و فاصله بین دو دفلکتور برابر ۴ سانتی‌متر محاسبه گردید. شکل ۳ تصویر قرارگیری دفلکتورها در پرتاب‌کننده جامی شکل و شکل ۴ تصویر جت عبوری دفلکتورها و پرتاب‌کننده جامی شکل را نشان می‌دهد.

جنس ورق گالوانیزه با مقطع مثلث قائم‌الزاویه متساوی‌الساقین با زاویه ۴۵ درجه تهیه شد. دفلکتورها به پایه‌ها پیچ و پایه‌ها با استفاده از چسب آهن و سیلیکون در امتداد عرض پرتاب‌کننده جامی قرار داده شدند. بدین ترتیب در هر مرحله، تعداد دفلکتورهای مورد نظر در فاصله ۲۸ سانتی‌متری از لبه جام (در نقطه شروع پرتاب‌کننده جامی با تعیین محل قرارگیری تراز سطح آب در جام) استقرار یافتند به گونه‌ای که ضلع پایین دفلکتورها موازی محور کف کانال (در راستای افق) و فاصله دفلکتور اول از دیواره فلوم نصف فاصله بین دفلکتورها بود. در



شکل ۳- تصویر قرارگیری دفلکتورها در پرتاب‌کننده جامی

Fig. 3- Image of deflectors in ski- jump spillway



شکل ۴- نمای جت پرتابی دفلکتورها و پرتاب‌کننده جامی (موقعیت واقعی دفلکتور با خطوط سفید مشخص شده است)

Fig. 4- Jet view of deflectors and ski- jump spillway (The actual position of the deflector is indicated by white lines)

پمپ روشن و دبی مدنظر جریان با تنظیم کردن شیر فلکه به داخل مخزن هدایت شد. دریچه کشوی پایین دست فلوم به منظور دسترسی به عمق پایاب مورد نظر به تدریج بسته شد. عمق پایاب تا جایی افزایش می‌یافت که پرش هیدرولیکی دقیقاً بعد از محل برخورد جت پرتابی به کف فلوم تشکیل شود.

در این تحقیق، آزمایش‌ها در پرتاب‌کننده جامی در چهار  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۲۷، ۰/۳۵، ۰/۴۳ و ۰/۴۹ برای سه عمق پایاب متفاوت اجرا شد. در این شرایط آزمایش، پرتاب‌کننده جامی بدون استفاده از دفلکتور (برای مقایسه) و با به کارگیری دو، سه و چهار دفلکتور بررسی شد. پس از مراحل نصب دفلکتورها،

کامل می‌شود. از این رو بعد از تشکیل پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل، با استفاده از روابط عمق‌های مزدوج پرش کلاسیک و بر اساس معادله مومنتم و پیوستگی، عمق استغراق از رابطه ۸ به‌دست می‌آید.

$$Y_3 = Y_1 \left[ (1 + S_r)\varphi^2 - 2Fr_1^2 + \frac{2Fr_1^2}{(1 + S_r)\varphi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

که در آن،

$Y_3 =$  عمق اولیه پرش مستغرق؛  $Y_1 =$  عمق اولیه پرش کلاسیک؛  $S_r =$  درجه استغراق؛  $\varphi =$  نسبت عمق‌های مزدوج در پرش کلاسیک؛ و  $Fr_1 =$  عدد فرود در عمق اولیه پرش هیدرولیکی کلاسیک.

میزان انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز جامی (رابطه‌های ۹ تا ۱۱) و درصد تلفات انرژی با اندازه‌گیری‌های عمق و سرعت از رابطه برنولی، با استفاده از رابطه ۱۲ در پرتابه‌های مختلف محاسبه می‌شود.

$$H_0 = H + \frac{V_a^2}{2g} + z_0 \quad (۹)$$

$$H_1 = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \quad (۱۰)$$

$$H_1 = Y_3 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \quad (۱۱)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} \% = \frac{H_0 - H_1}{H_0} * 100 = \Delta H_r \quad (۱۲)$$

که در آنها،

$H_0 =$  انرژی کل جریان در مخزن؛  $H_1 =$  انرژی کل جریان بلافاصله در محل عمق اولیه پرش در پایین‌دست سرریز جامی؛  $H =$  عمق آب در مخزن؛  $V_a =$  سرعت نزدیک‌شونده در مخزن؛  $Y_1 =$  عمق اولیه

هدف از ایجاد این پرش، اندازه‌گیری عمق جریان پس از عبور از پرتابه است. عمق پایاب یا عمق پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی در فاصله ۲ متری از لبه جام به‌دلیل جلوگیری از تأثیر امواج ایجاد شده ثبت شد. پس از آن، دریچه کشوی به‌منظور افزایش عمق جریان برگشتی تا ۵۰ درصد ارتفاع لبه جام سرریز بسته شد تا داده‌های پرش نیمه‌مستغرق برداشت شود؛ با بستن دوباره دریچه کشوی به‌منظور افزایش عمق جریان برگشتی تا ۱۰۰ درصد ارتفاع لبه جام سرریز، داده‌های پرش مستغرق کامل نیز برداشت گردید. این معیار از این‌رو اختیار شد که با بالارفتن سطح آب از لبه جام، الگوی طول پرتابه تغییر می‌کرد (تغییر ناگهانی زاویه شکست جت در پایاب). از آنجا که اندازه‌گیری عمق جریان قبل از پرش به‌دلیل اغتشاش زیاد و اختلاط با هوا هم مشکل و هم با خطای زیادی همراه است، در این مطالعه با برقراری پرش هیدرولیکی در این محل، به‌کمک افزایش عمق پایاب و با اندازه‌گیری عمق پایاب، مقدار آن از رابطه ۷ (Abrishami & Hosseini, 2003) تعیین گردید.

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1) \quad (۷)$$

که در آن،

$Y_1 =$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی کلاسیک؛  $Y_2 =$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک؛ و  $Fr_2 =$  عدد فرود در عمق ثانویه پرش هیدرولیکی. با بررسی داده‌ها در شرایط عمق پایاب صفر، میزان عمق اولیه محاسباتی در پرش هیدرولیک کلاسیک، کنترل گردید.

در ادامه آزمایش مشاهده شد با افزایش عمق پایاب، پس‌زدگی جریان به‌سمت مسیر پرتابه، باعث تشکیل پرش نیمه‌مستغرق و سپس پرش مستغرق

پژوهش برای بررسی نتایج، درصد استهلاک نسبی انرژی در مقابل  $\frac{Y_C}{H}$ ، با اجرای ۴۸ سری آزمایش و محاسبه انرژی در بالادست و پایین دست پرتاب کننده جامی در چهار  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۹ و سه عمق پایاب و نصب ۳ سری دفلکتور به صورت غیرممتد به تعداد دو، سه و چهار منحنی‌های استهلاک نسبی انرژی و طول پرتابه رسم شدند. نتایج استهلاک نسبی انرژی در برابر  $\frac{Y_C}{H}$ ، در جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۵ تا ۹ آورده شده است. با توجه جدول ۱ و شکل ۵ در پرتاب کننده بدون دفلکتور در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان استهلاک نسبی انرژی کاهش و با تشکیل پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل نیز با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان استهلاک نسبی انرژی کاهش می‌یابد.

در حالت بدون دفلکتور، بیشترین میزان استهلاک نسبی انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۲/۰۵ درصد و کمترین میزان استهلاک نسبی انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۴۷/۸۶ درصد است.

پرش هیدرولیکی کلاسیک؛  $V_1 =$  سرعت متناظر عمق اولیه پرش هیدرولیکی کلاسیک؛  $Y_3 =$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی مستغرق؛  $Z_0 =$  فاصله کف مخزن از خط مبنا؛  $Z_1 =$  فاصله کف فلوم در محل عمق اولیه پرش هیدرولیکی از خط مبنا؛  $g =$  شتاب ثقل؛ و  $\Delta H_T =$  درصد تلفات نسبی انرژی جریان. رابطه ۱۰ در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی کلاسیک و رابطه ۱۱ در شرایط تشکیل پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل کاربرد دارد. در هر مرحله، متغیرهای مورد اندازه‌گیری عبارتند از: دبی،  $Q$ ؛ عمق آب در مخزن،  $H$ ؛ عمق آب در ابتدای سرریز جامی،  $Y_0$ ؛ عمق بعد از پرش هیدرولیکی،  $Y_2$  (یا همان تراز پایاب،  $Y_t$ ) و مسیر پرتابه جت. (با عکسبرداری و استفاده از نرم‌افزار Get Data Graph Digitizer، مسیر پرتابه جت به صورت مختصاتی  $x$  و  $z$  برداشت شد).

## نتایج و بحث

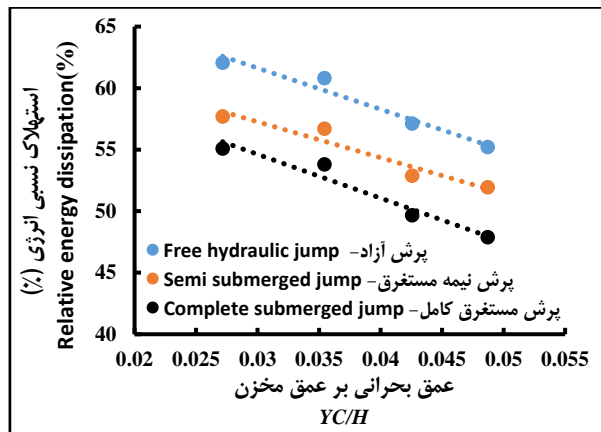
پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج به دست آمده در خصوص تلفات انرژی و طول پرتابه در پرتاب کننده جامی با حضور دفلکتورهای مثلثی و بدون حضور دفلکتورها آورده شده است. در این

جدول ۱- استهلاک نسبی انرژی در آزمایش‌های بدون دفلکتور

Table 1 - Relative energy dissipation in the non-deflector experiments

عمق بحرانی بر عمق مخزن	استهلاک نسبی انرژی در پرش آزاد (درصد)	استهلاک نسبی انرژی در پرش نیمه‌مستغرق (درصد)	استهلاک نسبی انرژی در پرش مستغرق کامل (درصد)
$\frac{Y_C}{H}$	Relative energy dissipation in free hydraulic jump (%)	Relative energy dissipation in semi submerged jump (%)	Relative energy dissipation in complete submerged jump (%)
0.027	62.5	57.68	55.08
0.035	60.8	56.69	53.79
0.043	57.11	52.87	49.65
0.049	55.19	51.93	47.86





شکل ۵- تلفات نسبی انرژی در پرتاب‌کننده بدون دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 5- Relative energy losses in the non-deflector ski-jump spillway versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths

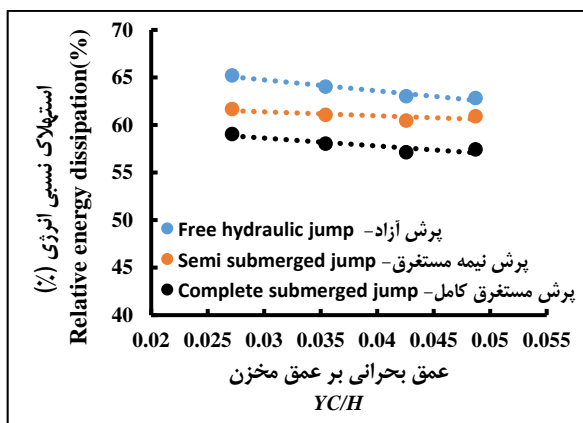
برخورد با هوای محیط اطراف است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در شکل ۷ مشخص گردید در پرتاب‌کننده با حضور سه دفلکتور با تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان استهلاک انرژی کاهش و برای پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان استهلاک انرژی با شیب نسبتاً کمی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۰/۰۴۳ و کمترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۳، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۰/۰۴۳، ۵۷/۱۲ درصد است. میزان استهلاک انرژی در پرتاب‌کننده با سه دفلکتور بیشتر از میزان استهلاک انرژی در پرتاب‌کننده با دو دفلکتور است که دلیل آن، تقسیم جت ورودی به تعداد جت‌های بیشتر و در نتیجه اختلاط بیشتر است.

با توجه به شکل ۸ در پرتاب‌کننده با حضور چهار دفلکتور نشان داده شد که در پرش هیدرولیکی آزاد و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  نیز میزان استهلاک انرژی کاهش و برای پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان

در شکل ۶ نشان داده شد که در پرتاب‌کننده با حضور دو دفلکتور در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان استهلاک انرژی کاهش و با تشکیل پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  نیز میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۰/۰۴۳ درصد و کمترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۰/۰۴۹، ۵۲/۶ درصد است. میزان استهلاک انرژی در برابر  $\frac{Y_C}{H}$ ، برای پرتاب‌کننده با دو دفلکتور نسبت به پرتاب‌کننده بدون دفلکتور بیشتر است زیرا به‌دلیل وجود دفلکتورها، جت جریان در ورودی پرتاب‌کننده جامی به دو گروه جت عبوری از روی دفلکتورها و جت عبوری از روی پرتاب‌کننده جامی تقسیم می‌شود و جت‌ها بعد از جام پرتاب‌کننده، با یکدیگر و با هوای محیط اطراف، اختلاط بیشتری می‌یابند، حال آنکه در آزمایش‌های شاهد جریان به‌صورت یک جت متمرکز از پرتاب‌کننده بدون دفلکتور خارج می‌شود که تنها عامل استهلاک انرژی این جت،

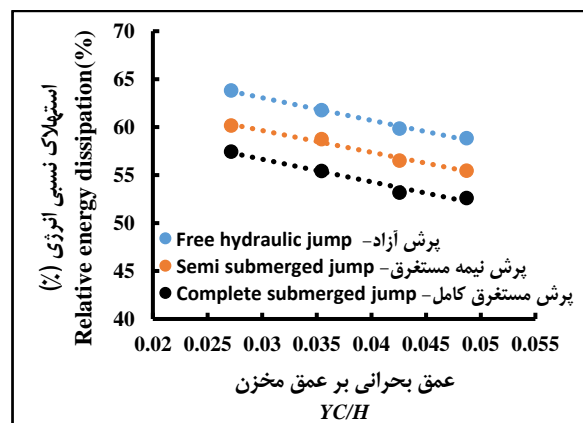
به‌طور کلی در پرتابه با دفلکتور، اتلاف انرژی در چهار  $\frac{Y_C}{H}$ ، در پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد به‌طور متوسط ۵ درصد کاهش می‌یابد و در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد، کاهش تلفات ۱۱ درصد است. همچنین در یک تعداد ثابت دفلکتور، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان تلفات انرژی کاهش می‌یابد زیرا با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  تحت تأثیر دبی واحد عرض جریان ورودی به پرتاب‌کننده با هندسه ثابت، هرچه دبی جریان واردشده به جام بزرگ‌تر شود با افزایش میزان سرعت پرتابه (فرض ثابت بودن عمق جریان در جام (Tierney & Henderson, 1963)، جت جریان با سرعت بیشتری در هوا پرتاب می‌شود که در برخورد جت پرتابی با هوا، اختلاط هوا و آب به‌عنوان عامل مقاوم حرکت، کمتر عمل می‌کند و انرژی جنبشی جریان را کم‌تر پایین می‌آورد و این روند تفاوت میزان انرژی در بالادست و پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

استهلاک انرژی با شیب نسبتاً کمی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۵/۸۷ درصد و کمترین میزان استهلاک انرژی در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۵۷/۵۱ درصد است. با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸، در  $\frac{Y_C}{H}$  ثابت هنگامی که شرایط جریانی به‌گونه‌ای است که پرش هیدرولیکی کامل در پایین‌دست تشکیل می‌شود، در مقایسه با پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل، مسیر پرتابه، سطح تماس بیشتری با هوای اطراف پرتابه دارد و هوا به‌عنوان عامل مقاوم حرکت، سبب استهلاک انرژی بیشتری می‌شود. به‌عبارتی دیگر، با افزایش عمق پایاب، میزان استغراق عمق اولیه پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد و قسمت انتهایی مسیر پرتابه، بیشتر در آب محو می‌شود و با کاهش مسیر طی شده پرتابه، سطح تماس با هوا کاهش و میزان استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد.



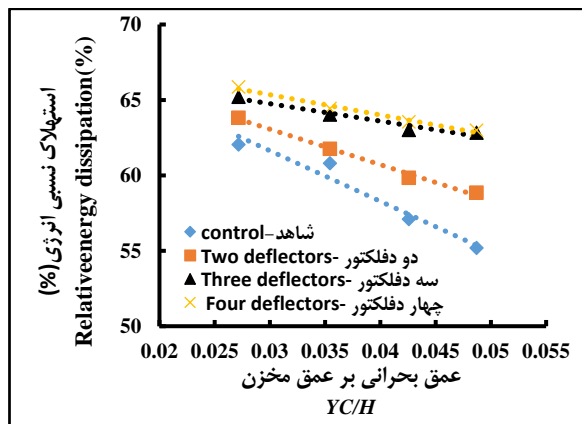
شکل ۷- تلفات نسبی انرژی در پرتاب‌کننده با سه دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 7- Relative energy losses in the ski-jump spillway with three deflectors versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths



شکل ۶- تلفات نسبی انرژی در پرتاب‌کننده با دو دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 6- Relative energy losses in the ski-jump spillway with two deflectors versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths



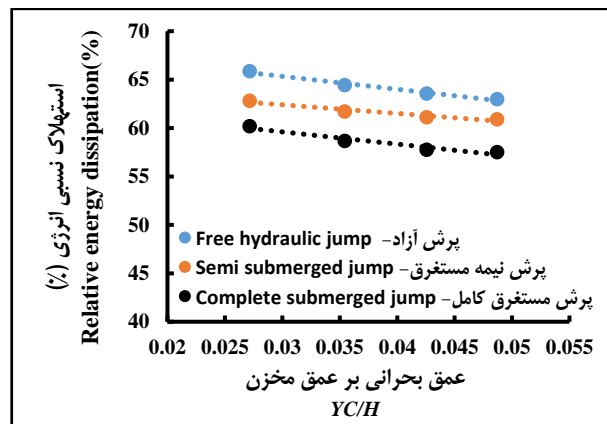
شکل ۹- تلفات نسبی انرژی در تمام پرتاب‌کننده‌ها در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  برای پرش هیدرولیکی آزاد

Fig. 9- Relative energy losses in all of ski-jump spillways versus  $\frac{Y_C}{H}$  for free hydraulic jump

می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد دفلکتورهای غیرممتد در مقایسه با حالت بدون دفلکتور، استهلاک انرژی بیشتری دارند و دلیل آن هم تقسیم جریان ورودی به جام به دو پرتابه و تداخل بیشتر با هوا و برخورد دو پرتابه با هم هست. در جدول ۲، میزان استهلاک نسبی انرژی در پرتاب‌کننده با دفلکتور آورده شده است.

بر اساس جدول ۲، بیشترین استهلاک نسبی انرژی در چهار دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷ در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۵/۸۷ درصد و کمترین استهلاک نسبی انرژی در دو دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۵۲/۶ درصد است.

با توجه به تحلیل ابعادی، به‌منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد موثر استخراج شده بر افت نسبی انرژی و ارائه رابطه‌ای ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از رگرسیون چند متغیره خطی و چند متغیره غیرخطی نرم‌افزار آماری (SPSS 22) استفاده شد.



شکل ۸- تلفات نسبی انرژی در پرتاب‌کننده با چهار دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 8- Relative energy losses in the ski-jump spillway with four deflectors versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths

در شکل ۹، تلفات نسبی انرژی در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  برای دو، سه و چهار دفلکتور و حالت بدون دفلکتور در چهار  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی آزاد مقایسه شده است. در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$ ، درصد تلفات انرژی در همه پرتاب‌کننده‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه تلفات نسبی انرژی در تمام پرتاب‌کننده‌ها، مشاهده می‌شود که بیشترین اتلاف انرژی مربوط است به پرتاب‌کننده با حضور چهار دفلکتور و بعد از آن به ترتیب پرتابه با سه دفلکتور و پرتابه با دو دفلکتور و در نهایت پرتابه بدون دفلکتور که کارایی آنها در اتلاف انرژی اندک است. یادآوری می‌شود که تفاوت میزان تلفات انرژی در سه و چهار دفلکتور در پرتاب‌کننده جامی چندان محسوس نیست، زیرا در سه دفلکتور نسبت به چهار دفلکتور اختلاط پرتابه عبوری از روی دفلکتورها و پرتاب‌کننده جامی بیشتر است و در چهار دفلکتور با عبور سهم بیشتر جریان از روی دفلکتورها، میزان اختلاط پرتابه‌ها کاهش و رشد افزایش تلفات نسبی انرژی در مقابل  $\frac{Y_C}{H}$  کم

جدول ۲- استهلاک نسبی انرژی در آزمایش‌های با دفلکتور

Table 2 - Relative energy dissipation in the whit deflector experiments

استهلاک نسبی انرژی در پرش مستغرق کامل (درصد) Relative energy dissipation in complete submerged jump (%)	استهلاک نسبی انرژی در پرش نیمه‌مستغرق (درصد) Relative energy dissipation in semi submerged jump (%)	استهلاک نسبی انرژی در پرش آزاد (درصد) Relative energy dissipation in free hydraulic jump (%)	عمق بحرانی بر عمق مخزن $\frac{Y_c}{H}$	تعداد دفلکتور Number of deflectors
57.45	60.16	63.82	0.027	2
55.42	58.75	61.76	0.035	2
53.17	56.52	59.84	0.043	2
52.6	55.47	58.85	0.049	2
59.06	61.7	65.2	0.027	3
58.04	61.1	64.04	0.035	3
57.12	60.47	63.02	0.043	3
57.43	60.92	62.8	0.049	3
60.2	62.83	65.87	0.027	4
58.67	61.7	64.43	0.035	4
57.77	61.13	63.56	0.043	4
57.51	60.9	63	0.049	4

که در آنها،

$\frac{\Delta H}{H_0} = \text{میزان افت نسبی انرژی}$ ؛  $\frac{q^2}{gH^3} = \text{نسبت دبی واحد عرض به شتاب ثقل در عمق آب در مخزن}$ ؛  $\frac{L}{H} = \text{نسبت مجموع طول دفلکتورها به عمق آب در مخزن}$ ؛ و  $\frac{L}{Y_t} = \text{نسبت مجموع طول دفلکتورها به عمق پایاب}$ . در جدول ۳، مقدار پارامترهای رابطه ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همه پارامترهای استفاده شده بدون بعد هستند.

رابطه ۱۳ برای پرش هیدرولیکی آزاد و رابطه ۱۴ برای پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل پس از تحلیل‌های متعدد استخراج گردید.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = A\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)^n \left(\frac{Y_c}{H}\right)^m + B\left(\frac{L}{H}\right)^g \quad (13)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = D + A\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + B\left(\frac{Y_c}{H}\right) + C\left(\frac{L}{Y_t}\right) \quad (14)$$

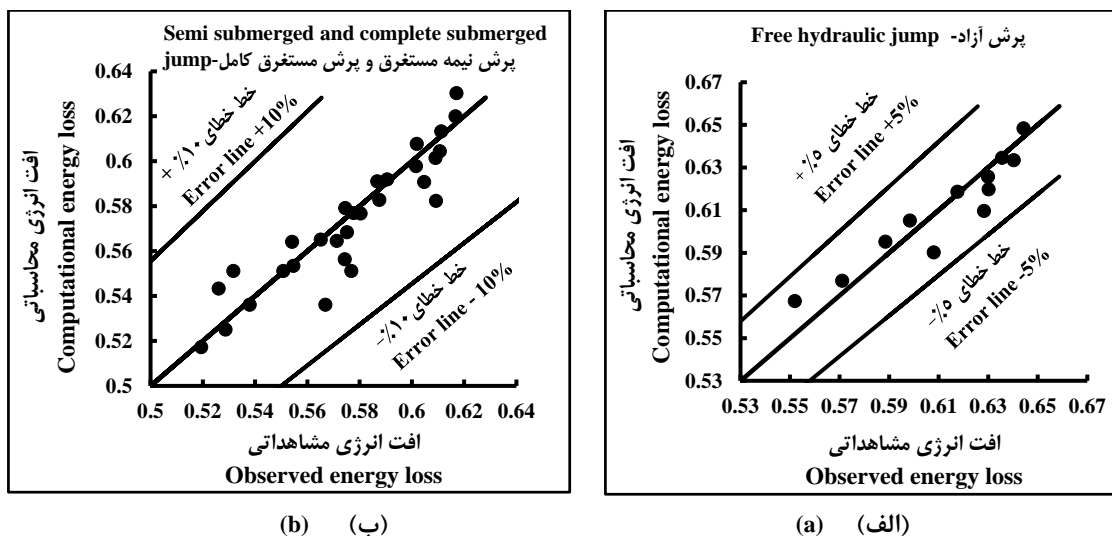
جدول ۳- مقدار پارامترهای استفاده شده در رابطه‌های ۱۳ و ۱۴

Table 3- The value of the parameters used in relations 13 and 14

R <sup>2</sup>	ضریب‌های رابطه Relationship coefficients							
	g	m	n	D	C	B	A	
0.891	1.029	-196.564	65.48	---	---	0.177	0.39	رابطه ۱۳ Relationship 13
0.834	---	---	---	0.61	0.028	-2.289	161.663	رابطه ۱۴ Relationship 14

و پرش مستغرق کامل آورده شده است. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی همبستگی نسبتاً خوبی دارند.

در شکل ۱۰، مقدار افت به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از روابط (محور عمودی) در پرش هیدرولیکی آزاد و در پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق



شکل ۱۰- مقایسه تلفات نسبی انرژی مشاهداتی و محاسباتی از (الف) رابطه ۱۳ و (ب) رابطه ۱۴  
 Fig. 10- Comparison of relative losses of observational and computational energy from (a) Relation 13 and (b) Relation 14

پرتاب‌کننده، از دو گروه پرتابه ایجاد شده بلندترین طول به‌عنوان طول پرتابه اختیار شد. در دو و سه دفلکتور، طول پرتابه برابر طول پرتابه سرریز و در چهار دفلکتور، طول پرتابه برابر طول پرتابه دفلکتور است. نتایج طول پرتابه در برابر  $\frac{Y_C}{H}$ ، برای سه عمق متفاوت پایاب در جدول‌های ۴ و ۵ و شکل های ۱۱ تا ۱۵ آورده شده است. جدول ۴ و شکل ۱۱ نشان می‌دهند که در پرتاب‌کننده بدون دفلکتور در پرش هیدرولیکی آزاد، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  طول پرتابه افزایش و در پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل نیز با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  میزان طول پرتابه افزایش می‌یابد و در یک  $\frac{Y_C}{H}$  ثابت، طول پرتابه در پرش آزاد بیشتر از طول پرتابه در پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق، و در پرش نیمه‌مستغرق بیشتر از پرش مستغرق کامل است. بیشترین میزان طول پرتابه در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۹۵/۵۵ سانتی‌متر و کمترین میزان طول پرتابه در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۵۷/۳۵ سانتی‌متر است.

مقدار همبستگی این دو (مشاهداتی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری در پرش آزاد ۸۹/۱ درصد و در پرش نیمه مستغرق و پرش مستغرق کامل ۸۳/۴ درصد است و هر دو رابطه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند.

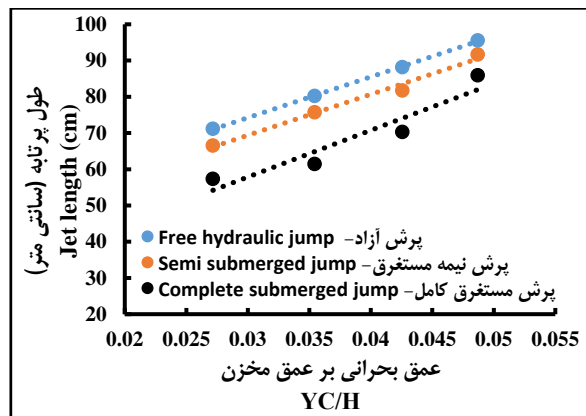
#### طول پرتابه

لازمه استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی‌شکل، دانستن رفتار پرتابه هنگام خروج از مخزن و ورود آن به پرتاب‌کننده است. چنانچه پرتاب‌کننده به درستی طراحی نشود و آب خروجی از مخزن در محدوده مورد نظر، همان حوضچه غوطه‌وری یا بستر رودخانه تخلیه نشود، خسارت‌هایی جبران‌ناپذیر به بار خواهد آمد که بعضاً در پایداری سد نیز تأثیرگذار خواهد بود. بدین‌منظور، طول پرتابه در برابر  $\frac{Y_C}{H}$ ، در چهار  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۹، برای سه عمق پایاب متفاوت، در پرتاب‌کننده جامی با دو، سه و چهار دفلکتور و پرتاب‌کننده بدون دفلکتور (برای مقایسه)، اندازه‌گیری شد. با وجود دفلکتورها، دو گروه پرتابه به‌صورت پرتابه دفلکتور و پرتابه سرریز ایجاد می‌شود. به‌دلیل حفاظت پایین دست

جدول ۴- طول پرتابه در آزمایش‌های بدون دفلکتور

Table 4- Jet length in the non-deflector experiments

عمق بحرانی بر	طول پرتابه در	طول پرتابه در پرش	طول پرتابه در پرش
عمق مخزن	پرش آزاد (سانتی‌متر)	نیمه‌مستغرق (سانتی‌متر)	مستغرق کامل (سانتی‌متر)
$\frac{Y_c}{H}$	Jet length in free hydraulic jump (cm)	Jet length in semi submerged jump (cm)	Jet length in complete submerged jump (cm)
0.027	71.19	66.53	57.35
0.035	80.23	75.74	61.47
0.043	88.15	81.74	70.28
0.049	95.55	91.67	85.94



شکل ۱۱- طول پرتابه در پرتاب‌کننده بدون دفلکتور در برابر  $\frac{Y_c}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 11- Jet length in the non-deflector ski-jump spillway versus  $\frac{Y_c}{H}$  and different tail water depths

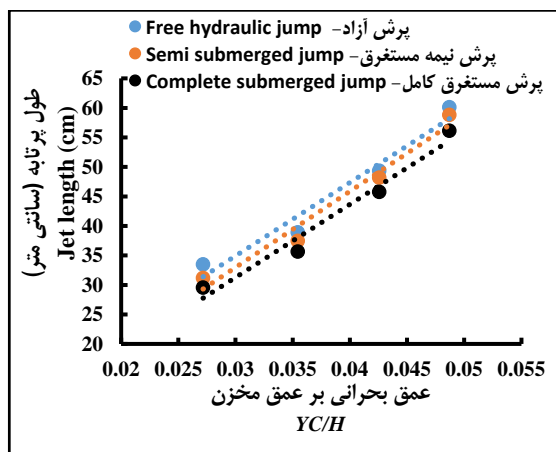
کاهش می‌دهند. بر اساس نتایج به‌دست آمده در شکل ۱۳ مشخص گردید در پرتاب‌کننده با سه دفلکتور در پرش آزاد با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$ ، طول پرتابه افزایش و برای پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل نیز با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$ ، طول پرتابه افزایش می‌یابد و در یک  $\frac{Y_c}{H}$  ثابت، طول پرتابه در پرش آزاد بیشتر است تا در پرش نیمه‌مستغرق و در پرش مستغرق کامل. بیشترین طول پرتابه در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۰/۱ سانتی‌متر و کمترین طول پرتابه در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷ در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۲۹/۵۳ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج شکل ۱۴، در پرتاب‌کننده با چهار دفلکتور نشان داده شد که در پرش هیدرولیکی آزاد، با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$  نیز طول پرتابه افزایش و برای

با توجه به نتایج شکل ۱۲، در پرتاب‌کننده با دو دفلکتور در پرش هیدرولیکی آزاد نشان داده شد که با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$ ، طول پرتابه افزایش و برای پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل، با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$  نیز طول پرتابه افزایش می‌یابد و در یک  $\frac{Y_c}{H}$  ثابت، طول پرتابه در پرش آزاد بیشتر است تا در پرش نیمه‌مستغرق و در پرش مستغرق کامل. بیشترین طول پرتابه در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۶/۸۴ سانتی‌متر و کمترین طول پرتابه در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷ و در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۳۶/۷۷ سانتی‌متر است. طول پرتابه در پرتاب‌کننده جامی با دو دفلکتور کوتاه‌تر از طول پرتابه در پرتاب‌کننده بدون دفلکتور است زیرا دو دفلکتور مستقر در مسیر مانند ضربه‌گیر عمل می‌کنند و شدت پرتاب جت را

تأثیر دبی جریان ورودی به پرتاب‌کننده با هندسه ثابت، هرچه دبی جریان وارد شده به جام بزرگ‌تر باشد، عمق جریان روی تنداب بیشتر، ضخامت زیرلایه ورقه‌ای بیشتر، تأثیر زیرلایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت (گرادیان سرعت به عمق) کمتر و تنش برشی به‌عنوان عامل مقاومت در برابر حرکت سیال کمتر می‌شود و از این رو جت جریان بیشتر در هوا پرتاب می‌شود و طول پرتابه بزرگتری طی می‌شود. با افزایش عمق پایاب به دلیل استغراق پرش هیدرولیکی و طی نکردن حداکثر مسیر ممکن برای جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی، طول پرتابه کاهش می‌یابد. در مجموع، طول پرتابه در پرش نیمه‌مستغرق نسبت به پرش آزاد به طور متوسط ۵ درصد کاهش می‌یابد و برای پرش مستغرق کامل نسبت به پرش آزاد، کاهش طول پرتابه ۱۳ درصد است.

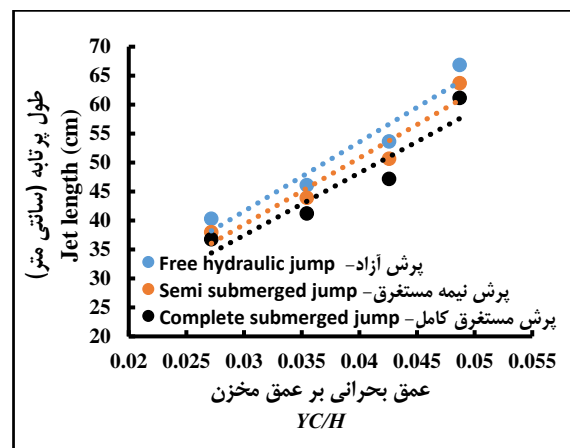
پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل نیز با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  طول پرتابه افزایش می‌یابد و در یک  $\frac{Y_C}{H}$  ثابت، طول پرتابه در پرش آزاد بیشتر است تا در پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و در پرش نیمه‌مستغرق بیشتر است تا در پرش مستغرق کامل. بیشترین طول پرتابه در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۴۶/۶۲ سانتی‌متر و کمترین طول پرتابه در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷ در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۲۵/۶۲ سانتی‌متر است. با توجه به نتایج مندرج در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴، هنگامی که شرایط جریان به‌گونه‌ای است که تشکیل کامل مسیر پرتابه امکان‌پذیر است، پرش هیدرولیکی آزاد در پایین‌دست تشکیل می‌شود و طول پرتابه طی شده نسبت به پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل افزایش می‌یابد.

در پرش هیدرولیکی ثابت نیز با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  طول پرتابه افزایش می‌یابد زیرا با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$  تحت



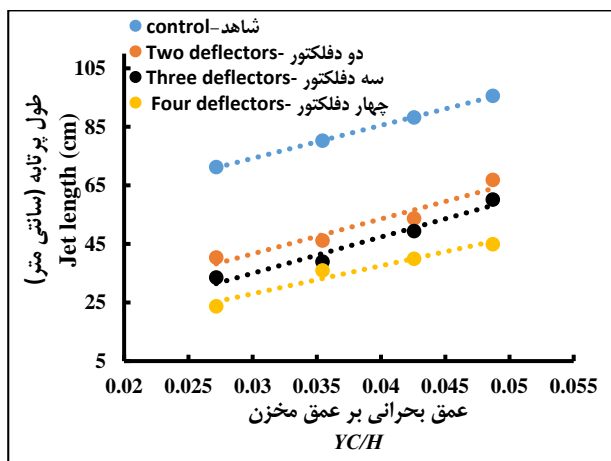
شکل ۱۳ - طول پرتابه در پرتاب‌کننده با سه دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 13- Jet length in the ski-jump spillway whit three deflectors versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths



شکل ۱۲ - طول پرتابه در پرتاب‌کننده با دو دفلکتور در برابر  $\frac{Y_C}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 12- Jet length in the ski-jump spillway whit two deflectors versus  $\frac{Y_C}{H}$  and different tail water depths



شکل ۱۵- طول پرتابه در تمام پرتاب‌کننده‌ها در برابر  $\frac{Y_c}{H}$  برای پرش هیدرولیکی آزاد

Fig. 15- Jet length in all of ski-jump spillways versus  $\frac{Y_c}{H}$  for free hydraulic jump

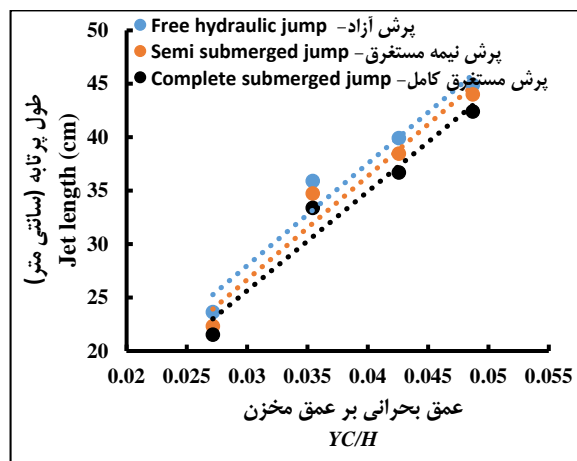
بر اساس جدول ۵، بیشترین طول پرتابه در دو دفلکتور، در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۶/۸۴ سانتی‌متر و کمترین آن در چهار دفلکتور، در  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی مستغرق برابر ۲۵/۶۲ سانتی‌متر است.

با توجه به تحلیل ابعادی، به‌منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد مؤثر استخراج شده بر افت انرژی نسبی و ارائه رابطه‌ای ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از رگرسیون چند متغیره خطی و چند متغیره غیر خطی نرم‌افزار آماری (SPSS 22) استفاده شد.

رابطه ۱۵ برای پرش هیدرولیکی آزاد و رابطه ۱۶ برای پرش هیدرولیکی نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل پس از تحلیل‌های متعدد استخراج گردید.

$$\frac{x}{x_{max}} = D + A\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + B\left(\frac{Y_c}{H}\right) + C\left(\frac{L}{H}\right) \quad (15)$$

$$\frac{x}{x_{max}} = D + A\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + B\left(\frac{Y_c}{H}\right) + C\left(\frac{L}{Y_t}\right) \quad (16)$$



شکل ۱۴- طول پرتابه در پرتاب‌کننده با چهار دفلکتور در برابر  $\frac{Y_c}{H}$  و عمق‌های متفاوت پایاب

Fig. 14- Jet length in the ski-jump spillway with four deflectors versus  $\frac{Y_c}{H}$  and different tail water depths

در شکل ۱۵، طول پرتابه‌ها در برابر  $\frac{Y_c}{H}$  برای دو، سه و چهار دفلکتور و حالت بدون دفلکتور در چهار  $\frac{Y_c}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۹ در پرش هیدرولیکی آزاد مقایسه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش  $\frac{Y_c}{H}$ ، طول پرتابه در همه پرتاب‌کننده‌ها افزایش می‌یابد و در  $\frac{Y_c}{H}$  ثابت، با افزایش تعداد دفلکتور، طول پرتابه کاهش می‌یابد. با مقایسه طول پرتابه‌ها در تمام پرتاب‌کننده‌ها مشاهده می‌شود که بیشترین طول پرتابه مربوط به پرتاب‌کننده بدون حضور دفلکتور و بعد از آن به ترتیب پرتابه با حضور دو دفلکتور، پرتابه با حضور سه دفلکتور و پرتابه با حضور چهار دفلکتور است که کارایی بیشتری در کاهش طول پرتابه دارند. دلیل اصلی اینکه پرتاب‌کننده با تعداد بیشتر دفلکتور غیرممتد گوه‌ای در کاهش طول پرتابه‌ها عملکرد بهتری نسبت به پرتابه‌های بدون حضور دفلکتور دارد ماهیت حضور پرتاب‌کننده‌ها در برابر جریان و زاویه پرتاب بزرگتر پرتابه‌ها نسبت به پرتاب‌کننده بدون دفلکتور است. در جدول ۵، طول پرتابه، در پرتاب‌کننده با دفلکتور آورده شده است.



عمق آب در مخزن و  $\frac{L}{Y_t}$  نسبت مجموع طول دفلکتورهای غیرممتد به عمق پایاب است. جدول ۶ مقدار پارامترهای رابطه ۱۵ و ۱۶ را نشان می‌دهد که همه بی‌بعد هستند.

که در آنها،  $\frac{X}{x_{max}} =$  میزان طول نسبی پرتابه؛  $\frac{q^2}{gH^3} =$  نسبت دبی واحد عرض به شتاب ثقل در عمق آب در مخزن؛  $\frac{L}{H} =$  نسبت مجموع طول دفلکتورهای غیرممتد به

جدول ۵- طول پرتابه در آزمایش‌های با دفلکتور

Table 5- Jet length in the whit deflector experiments

تعداد دفلکتور	عمق بحرانی بر عمق مخزن	طول پرتابه در پرش آزاد (سانتی‌متر)	طول پرتابه در پرش نیمه-مستغرق (سانتی‌متر)	طول پرتابه در پرش مستغرق کامل (سانتی‌متر)
Number of deflectors	$\frac{Y_c}{H}$	Jet length in free hydraulic jump (cm)	Jet length in semi submerged jump (cm)	Jet length in complete submerged jump (cm)
2	0.027	40.3	37.96	36.77
2	0.035	46.1	43.9	41.21
2	0.043	53.64	50.64	47.18
2	0.049	66.84	63.67	61.14
3	0.027	33.47	31.18	29.53
3	0.035	38.91	37.45	35.64
3	0.043	49.35	48.19	45.76
3	0.049	60.1	58.8	56.13
4	0.027	27.72	26.41	25.62
4	0.035	35.9	34.73	33.37
4	0.043	40.47	39.01	37.25
4	0.049	46.62	45.73	44.13

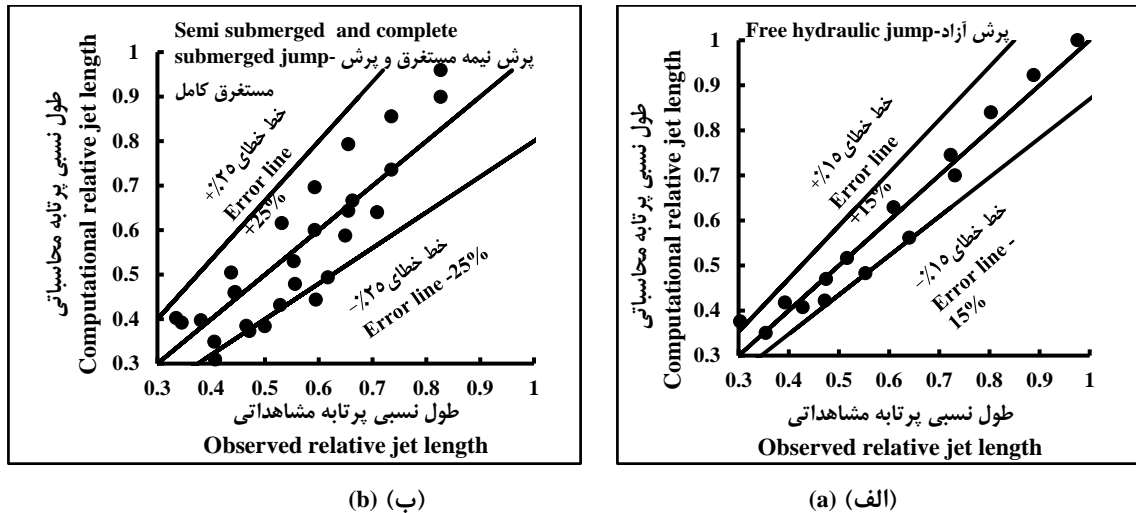
جدول ۶- مقدار پارامترهای استفاده شده در رابطه ۱۵ و ۱۶

Table 6- The value of the parameters used in relations 15 and 16

R <sup>2</sup>	ضریب‌های رابطه							
	g	m	n	D	C	B	A	
0.964	---	---	---	0.544	-1.475	5.552	1396.718	رابطه ۱۵ Relationship 15
0.8	---	---	---	0.522	-0.127	0.942	2239.379	رابطه ۱۶ Relationship 16

همبستگی نسبتاً خوبی دارند. همبستگی این دو مقدار (مشاهداتی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری در پرش آزاد ۹۶/۴ درصد و در پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل ۸۰ درصد است و هردو رابطه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند.

طول نسبی پرتابه به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و طول نسبی پرتابه محاسبه شده از روابط (محور عمودی) در پرش آزاد و در پرش نیمه‌مستغرق و پرش مستغرق کامل آورده شده است. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی



شکل ۱۶- مقایسه طول نسبی پرتابه مشاهداتی (آزمایشگاهی) و محاسباتی از (الف) رابطه ۱۵ و (ب) رابطه ۱۶  
 Fig. 16 - Comparison of the relative length of the observational (laboratory) and computational jet from (a) relation 15 and (b) relation 16

### نتیجه گیری

نیمه مستغرق و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل، بیشتر است زیرا در شرایط استغراق، افزایش عمق پایاب قسمتی از مسیر پرتابه را محو می کند و طول پرتابه کاهش می یابد. در حالت کلی مقایسه، عملکرد پرتاب کننده با حضور چهار دفلکتور در کاهش طول پرتابه بهتر است تا پرتاب کننده بدون دفلکتور، که دلیل آن پرتاب جریان ورودی به دفلکتورها از فاصله ۲۸ سانتی متر جلوتر از لبه جام سرریز است.

بیشترین طول پرتابه در دو دفلکتور، در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹، در پرش هیدرولیکی آزاد برابر ۶۶/۸۴ سانتی متر و کمترین طول پرتابه در چهار دفلکتور، در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۲۵/۶۲ سانتی متر است. با توجه به عملکرد پرتاب کننده با دفلکتور غیرممتد با مقطع مثلی در افزایش میزان استهلاک انرژی و کاهش طول پرتابه و به تبع آن افزایش پایداری سازه های پایین دست سد و صرفه جویی در هزینه های اجرایی و نگهداری، استفاده از پرتاب کننده با مولفه سازه های دفلکتور از نظر هیدرولیکی و اقتصادی توصیه می شود.

در حالت کلی، میزان استهلاک انرژی برای هر سه عمق پایاب، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$ ، کاهش می یابد و تلفات نسبی انرژی در حالت پرش هیدرولیکی آزاد، نسبت به دو حالت پرش نیمه مستغرق و پرش هیدرولیکی مستغرق کامل، به دلیل سطح تماس بیشتر پرتابه با هوای اطراف، بیشتر است. در حالت مقایسه کلی، عملکرد پرتاب کننده در اتلاف نسبی انرژی با حضور چهار دفلکتور به طور قابل توجهی بهتر است تا عملکرد پرتاب کننده بدون دفلکتور؛ دلیل اصلی آن، افزایش اختلاط جت های عبوری دفلکتورها و پرتاب کننده جامی است. بیشترین استهلاک نسبی انرژی در چهار دفلکتور در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۲۷، در پرش هیدرولیکی آزاد، برابر ۶۵/۸۷ درصد و کمترین آن در دو دفلکتور در  $\frac{Y_C}{H}$  برابر ۰/۰۴۹ در پرش هیدرولیکی مستغرق کامل برابر ۵۲/۶ درصد است. طول پرتابه در هر سه عمق پایاب، با افزایش  $\frac{Y_C}{H}$ ، افزایش می یابد و در حالت پرش هیدرولیکی آزاد، نسبت به دو حالت پرش

## قدردانی

هزینه‌های مالی این مطالعه از محل پژوهانه ۱۳۹۷ نویسنده دوم تأمین شده است که بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- Abrishami, J., & Hosseini, S. M. (2003). *Open Channel Hydraulics*. 11<sup>th</sup> Edition, Astan Ghods Razavi, Iran. (in Persian)
- Ahadian, J., Shahabi, M., & Paypolzadeh, S. (2018). *Investigation of the effect of ski-jump geometry on the downstream jet, case study of olia Gotvand dam. 5<sup>th</sup> National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management and Third National Congress on Iran's Irrigation and Drainage*. March 13, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Anon, 1987. *Design of Small Dams*. Third Edition, A Water Resources Technical Publication, Hardcover, United States Department of the Interior Staff. USA.
- Barani, Gh. A., & Abbasi-Parvin, E. (2009). *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. Jahad Daneshgahi of Amirkabir University of Technology. Iran. (in Persian)
- Epicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2010). Experimental investigation of the effect of flip bucket splitters on plunge pool geometry. *Journal of Wasser Wirtschaft*, 4, pp. 108-110.
- GovindaRao, N. S., & Rajaratnam, N. (1963). The submerged hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division*, 89(1):139-162
- Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2005). Ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5): pp. 347-355.
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipaters*. Marcel Dekker. New York.
- Lenau, C. W., & Cassidy, J. J. (1969). Flow Through spillway flip bucket. *Journal of Hydraulic Division*, 95(2): 633-648
- Mason, P. J. (1993). Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *Journal of Water Power and Dam Construction*. 45(9/10): pp. 40-45.
- Momeni-Vesalian, R., Mousavi-Jahromi, S. H., & Shafai-Bejestan, M. (2006). Scouring caused by rectangular jets at the bottom of ski-jump spillway. *The 7<sup>th</sup> Conference of International River Engineering*. Feb. 24-26. Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Navaei, B. Akhtari, A. A., & Daneshfaraz, R. (2016). Experimental study of flip bucket effect at the end of ogee spillway on energy dissipation and jet length. *Water and Soil Science*, 25(3): pp. 133-142. (in Persian)
- Omidvarinia, M., & Mousavi-Jahromi, S. H. (2013). Effect of continues deflector on jet separation in tri-angular flip bucket (M. Sc. Thesis) Water Science Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (in Persian)

- Peterka, A. J. (1983). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. *Journal of Engineering Monograph*, 25(7): pp. 91-125.
- Sadeghi-Askari, M., & Mousavi-Jahromi, S. H. (2012). Experimental investigation on the effect of deflector to angel of flip-bucket on its energy dissipation (M. Sc. Thesis) Water Science Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Steiner, R., Heler, 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 spillway. *Journal of La Houille Blanche*. 18(1): pp. 42-50
- Tuzandeh-Jani, M. (2011). The effect of flow interference from the body gap on the length of the hydraulic jump at the bottom of the Ogee Spillway (M. Sc. Thesis) Water Science Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)

## **Study of Effect of Number of Tri-angular Deflectors on Energy Dissipation and Jet Length at Ski-Jump Spillway**

**F. Mirsalari\* and M. Shafai-Bejestan**

\* Corresponding author: M. Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Mirsalari.Sazeh.Eng@gmail.com.

Received: 7 June 2019, Accepted: 12 February 2020

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

In reservoir dams, high kinetic energy at downstream of their spillways can cause destruction of the spillway and its surrounding areas which results significant loss of life and financial loss, so it is necessary to investigate the performance of energy dissipation structures during its operation. In this regard, the effects of the number of deflectors located just downstream of its chute on energy dissipation and its projectile length were investigated experimentally. Deflectors separate the incoming jet to few smaller jets, which pass through the slot between the deflectors or overflow above the deflectors. Therefore, more air mix with the jet flow and the separated jets hit each other, the results of which are increase in the amount of energy dissipation. On the other hand, the existence of deflectors reduces projectile length, makes smaller submerged ponds easier to maintain, and reduces costs.

#### **Methodology**

At the beginning of flume, a ski jump structure, with a height of 100 cm, a length of 90 cm and a radius of 14 cm was made by the galvanized sheet. Adjustment of the alignment and location of the hydraulic jump occurred by a slide gate located at the downstream of the flume. At each stage, the number of deflectors was deployed at the starting point of the jumper launcher such that the bottom side of the deflector was aligned to the horizon and the distance of the first deflector from the wall of the flume was halfway between the deflectors. Experiments were performed at four different ratios of critical depth to the total head (= 0.02, 0.035, 0.03 and 0.049) and three different tailwater depths. In these conditions, the deflector-free jumper launcher was tested using two, three and four deflectors. Relative energy dissipation was calculated by measuring the total energy in the upstream reservoir and downstream of the jetty overflow immediately after the ski jump, and projectile length was determined using projectile shooting and Get Data Graph Digitizer software.

## **Results and Discussion**

Data analysis showed that for both cases, with deflector and without deflector, the relative energy dissipation rate decreased with increasing ratio of  $(Y_c)/H$ , critical depth to the head, in each of the three adjoining depths. Because with increasing  $(Y_c)/H$  as the discharge increases, the jet flows more rapidly mix with the air, which is less effective in resisting the jet launcher, mixing air and water. At a constant number of deflectors and at a constant  $(Y_c)/H$ , the relative energy dissipation rate in the free hydraulic jump is greater than that in semi submerged jump and in the semi submerged jump more than that in full submerged jump, because by decreasing the projectile path, the air contact surface as a resisting agent of motion decreases. Also, at each of the three tailwater water depths, the relative energy dissipation rate increases as the number of deflectors at  $(Y_c)/H$  increases. This is due to the mixing of jets with each other and the ambient air around the projectiles.

In examining the effects of deflectors on the projectile length, the results showed that in both cases, without deflector and with deflector, the projectile length increased with  $(Y_c)/H$  because with increasing  $(Y_c)/H$  the flow rate increased, The greater depth of flow on steep slope, the greater slab thickness, the lower slab impact on slip velocity profile, and shear stress as a fluid impedance factor, and hence the more jet flows into the air and larger projectile lengths. At a constant  $(Y_c)/H$ , the projectile length in the free jump was greater than that of the semi submerged hydraulic jump, and in the semi submerged jump was greater than that in full submerged jump because of increased depth of passage due to submerged hydraulic jump and failure to max. The possible path for the jet outlet from the jumper launcher was to shorten the projectile length. At each of the three steady depths at constant  $(Y_c)/H$ , as the number of deflectors increased, the projectile length decreased because the path-based deflectors acted as bumpers and decreased the jet launch length and elongation.

## **Conclusions**

The highest relative energy dissipation in four deflectors at  $(Y_c)/H$  was 0.027 in free hydraulic jump, 65.87%, and the lowest in two deflectors at  $(Y_c)/H$  of 0.049 in submerged full hydraulic jump of 6.52% and maximum projectile length in two deflectors,  $(Y_c)/H = 0.049$  was obtained to be 66.84 cm in free hydraulic jump for the cases of complete submerged was equal to 25.62cm. Based on triangular cross section deflector launcher performance in increasing energy dissipation and decreasing projectile length and saving running and maintenance costs, it is recommended, in terms of hydraulic and economical issues, to use deflector on the ski-jump with structural component.

**Keywords:** Dams, Hydraulic Jump, Ski-Jump, Tailwater Depth