

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی بر استهلاك انرژی و طول پرتابه

بابک نوایی\*<sup>۱</sup>، علی اکبر اختری<sup>۲</sup>، رسول دانشفراز<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۳

<sup>۱</sup> - دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

<sup>۲</sup> - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

<sup>۳</sup> - دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [navaei.babak@yahoo.com](mailto:navaei.babak@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق تأثیر باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی بر میزان استهلاك انرژی و طول پرتابه به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها بر روی سرریز اوجی استاندارد برای باکتهای با زاویه برخاست ۳۲ و ۵۲ درجه و بدون باکت انجام شد. میزان افت انرژی در این نوع سرریز با انجام ۲۱ آزمایش برای دبی‌های بین ۳۳۰ تا ۸۶۴ لیتر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد در سرریز با باکتهای پرتابی با زاویه برخاست ۳۲ و ۵۲ درجه نسبت به سرریز بدون باکت، میزان استهلاك انرژی از ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش یافت. همچنین بیشترین استهلاك انرژی مربوط به باکت پرتابی با زاویه پرتابه ۵۲ درجه بود و افت نسبی انرژی با افزایش دبی در هر سه حالت کم شد. برای باکتهای با زاویه پرتاب ۳۲ و ۵۲ درجه، طول پرتابه نیز اندازه‌گیری شد که طول پرتابه برای باکت ۳۲ درجه بیشتر از ۵۲ درجه بود. با افزایش دبی، اختلاف طول پرتابه بین دو باکت کم شده و در دبی ۸۶۴ لیتر بر دقیقه طول پرتابه برای دو باکت تقریباً یکسان شد.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، باکت پرتابی، زاویه برخاست، سرریز اوجی، طول پرتابه

## Experimental Study of Flip Bucket Effect at the End of Ogee Spillway on Energy Dissipation and Jet Length

B Navaei<sup>\*1</sup>, AA Akhtari<sup>2</sup>, R Daneshfaraz<sup>3</sup>

Received: 24 January 2015 Accepted: 21 June 2016

1-Post graduated, Dept. of Civil Engineering, Razi Univ. of Kermanshah, Iran

2-Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Razi Univ. of Kermanshah, Iran

3-Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Univ. of Maraghe, Iran

\*Corresponding Author, Email: navaei.babak@yahoo.com

### Abstract

In this study, the effect of flip bucket at the end of ogee spillway on the energy dissipation rate and jet length has been investigated experimentally. Experiments on standard ogee spillway for buckets with take off angles of  $32^\circ$  and  $52^\circ$  and for no bucket condition were conducted. The rate of energy dissipation in this type of spillway was investigated with conducting 21 tests with discharge range between 330 to 864 L min<sup>-1</sup>. The results showed that at the spillway with flip buckets and take off angles of  $32^\circ$  and  $52^\circ$ , the rate of energy dissipation was increased from 10 to 20 percent compared to the spillway having no bucket. The highest energy dissipation was occurred in the flip bucket with take off angle of  $52^\circ$ . Also the relative energy dissipation was decreased in all three modes with increasing discharge. The length of jet for flip buckets with angles of  $32^\circ$  and  $52^\circ$  was measured and it was revealed that the length of jet for bucket of  $32^\circ$  was greater than that for bucket of  $52^\circ$ . By increasing the discharge, the difference between the jet lengths of the two buckets was decreased and at the discharge rate of 864 L min<sup>-1</sup>, the length of jet was equal for the two buckets.

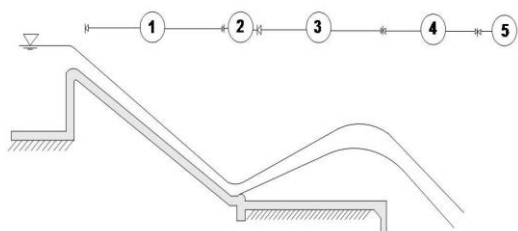
**Keywords:** Energy dissipation, Flip bucket, Jet length, Ogee spillway, Take off angle

### مقدمه

می‌شود. سازه‌های استهلاک انرژی معمولاً در انتهای سازه‌های آبی به منظور کاهش فرسایش، جلوگیری از آبشستگی پایین دست سازه و یا به کمینه رساندن آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین همان‌طور که از تعریف فوق برداشت می‌شود اغلب آن‌ها را در انتهای سرریز سدها مورد استفاده قرار می‌دهند. مکانیزم اثر بیشتر این سازه‌ها بر پایه اتلاف انرژی با تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی صورت می‌گیرد. در حوضچه‌های پرتابی که باکت پرتابی یکی

سرریز یکی از بخش‌های بسیار مهم سد به شمار می‌رود که در مواقع وقوع سیلاب نقش بسیار اساسی را در جهت حفظ و پایداری سازه برعهده دارد. برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌هایی که از بالادست به سمت پایاب سدها در حرکت هستند از این سازه‌ها استفاده می‌شود. از آنجا که جریان خروجی از سرریز، خصوصاً در سدهای بلند انرژی بسیار بالایی دارد، در انتهای آن‌ها از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده

- ۲) انحراف و برخاست
- ۳) پراکنش فوران آب در هوا
- ۴) برخورد و آبشستگی فوران
- ۵) ناحیه پایاب



شکل ۱- نمای کلی یک حوضچه پرتابی.

دانشمندان و محققان بسیاری به بررسی پرتاب-کننده‌های جامی شکل در زمینه‌های مختلف پرداخته‌اند که برای مثال برخی از آنها به شرح ذیل می‌باشد:

استرلچاک (۱۹۶۹) آبشستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی آزاد را بر روی بستر شنی بررسی کرد. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که دو و سه برابر کردن دبی موجب افزایش ۵۰ و ۸۰ درصدی عمق حفره آبشستگی می‌شود. همچنین با افزایش زاویه پرتاب از ۳۰ درجه به ۴۵ درجه بیشینه عمق آبشستگی ۱۶ درصد افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش مؤلفه قائم در اثر زاویه تندتر جت هنگام برخورد به پایاب است. راجان و شیواشانکارا (۱۹۸۰) با بررسی بر روی برخی از سیستم‌های پرش اسکی، برای طراحی باکت پرتابی توصیه کردند شکل باکت به صورت استوانه‌ای و زاویه جام بین ۲۰ تا ۴۰ درجه باشد. شعاع جام تابعی از دبی واحد عرض و سرعت در جام و همچنین زاویه لبه جام در راستای مقابله با خلأزایی طراحی شود و رقوم آب در پایاب، زیر رقوم جام قرار گیرد. ماسون (۱۹۹۳) در تحقیقاتی حالت‌های مختلف هندسه پرتاب‌کننده‌های جامی شکل را مورد بررسی و آزمایش قرار داد. وی در پایان تحقیقات شعاع سازه را حداقل ۳ تا ۵ برابر عمق جریان ورودی، زاویه لبه یا زاویه برخاست را بین ۲۴ تا

از اجزای آن است، هنگامی که جریان از تندآب وارد جام می‌شود، مقداری از انرژی آن در جام مستهلک می‌گردد (چانسون ۲۰۰۴). اما به‌خاطر طول نسبتاً کوتاه باکت، اصطکاک بین بستر کانال با سطح زیرین جریان و مقاومت هوا با سطح آزاد جریان، نقش زیادی در استهلاک انرژی 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 سرعت جریان در جام می‌شود. چون از یک سو نحوه استهلاک انرژی در جام کاملاً شناخته شده نیست و از طرفی سهم خود جام در کل انرژی مستهلک شده در سیستم پرش اسکی کم است بخش عظیمی از انرژی جریان با پخش و پراکنده شدن جت خروجی جریان از سازه به صورت پرش اسکی مستهلک می‌شود. با برخورد جت پودر شده با حوضچه استغراق در پایاب و به‌وجود آمدن جریان آشفته و متلاطم در حوضچه فرآیند استهلاک انرژی در سیستم پرش اسکی تکمیل می‌شود (بارانی و عباسی پروین ۱۳۸۸).

باکت پرتابی، هر چند به تنهایی و به‌طور کامل یک سیستم مستهلک‌کننده انرژی نیست، اما بخش مهم و اصلی از یک سیستم پرش اسکی را شامل می‌شود. از پرش اسکی برای اولین بار قبل از سال ۱۹۳۰ میلادی در فرانسه استفاده شد و از آن روز تاکنون انواع گوناگونی از باکت پرتابی با اندازه‌ها و زاویه‌های مختلف در سراسر جهان در حال اجرا و بهره‌برداری است. بعد از آن در سال ۱۹۹۳ میلادی در سد گراند کولی واقع در واشنگتن جهت استهلاک انرژی از این سازه استفاده شده است که در سال ۱۹۴۵ نیز نوع اصلاح شده این سازه تحت عنوان سازه پرتاب‌کننده جامی شیاردار یا دنداندار، در سد آنگوسترا، واقع در داکوتای جنوبی احداث گردید. همچنین این سازه برای سد برانتلی، واقع در نیومکزیکو نیز احداث گردید.

حوضچه پرتابی، متشکل از ۵ قسمت زیر است (شکل ۱):

۱) تندآب جریان عبوری

۳۵ درجه و زاویه توزیع جت در هوا را در حدود ۵ درجه توصیه نمود. جون و هاگر (۲۰۰۰) پرتاب کننده‌های جامی را هم به صورت یک کانال منشوری مستطیل شکل و هم به صورت جام دارای یک منحرف کننده جریان جانبی، مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق اثرات مقیاس در مدل‌های هیدرولیکی، توزیع فشار در باکت، مسیر پرتابه جریان، شرایط ایجاد امواج شوکی و روابط آب بندشدگی در جام‌ها بررسی گردید. در سال ۲۰۰۵ میلادی نیز یک پروژه تحقیقاتی جهت پاسخ گویی به ابهامات موجود توسط هلر و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد که آن را می‌توان ادامه کار جون و هاگر (۲۰۰۰) دانست. هلر و همکاران (۲۰۰۵) به مطالعه آزمایشگاهی پرتابه‌های جامی پرداختند و بیشینه فشار و محل وقوع آن را در پرتابه جامی بررسی کردند. لارس و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی منحنی مسیر پرتابه جت جریان و نیز مقادیر فشار در کف پرتاب کننده جامی در پایانه تنداب افقی پرداختند. آن‌ها تحلیل خود را در دو حالت، دو بعدی و سه بعدی، و با استفاده از مدل عددی اجزای محدود جزئی انجام داده و تأثیرافزایش عدد فرود و دبی جریان را بر روی طول پرتابه و فشار کف جام بررسی نمودند. مومنی و صالحیان و همکاران (۱۳۸۵) آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل را بررسی کردند و شدت جریان را به عنوان مؤثرترین پارامتر در پدیده آبشستگی معرفی کردند و ذکر کردند که عمق پایاب تأثیر معکوس در عمق آبشستگی دارد. مهری و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی آزمایشگاهی خلاءزایی بر روی سرریز سد بالارود که از نوع اوجی دریچه دار با تنداب و پرتاب کننده جامی است، پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت در طول تنداب به‌ازای هر شدتی از جریان، ضریب خوردگی کاهش یافته و در ابتدای پرتاب کننده جامی در محور وسط به کمترین مقدار خود می‌رسد و همچنین به‌ازای دبی ۱۶۲۵ مترمکعب بر ثانیه در سرعتی معادل ۲۰/۱۹ متر بر ثانیه کمینه ضریب خوردگی ۰/۵۴۵ شده، که بیشتر از ضریب خوردگی بحرانی می‌باشد و خوردگی رخ

نمی‌دهد. ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی پارامترهای جریان بر روی مدل سرریز سد سلمان فارسی پرداختند. از نتایج مطالعات مدل هیدرولیکی این‌گونه استنباط می‌شود که ابعاد سازه سرریز موجود اعم از عرض مفید تاج، ارتفاع سرریز از تاج تا لبه جام و نیز شعاع عمل خم سازه پرتاب کننده جامی، به‌منظور عبور مطمئن دبی سیلاب‌های خروجی مورد انتظار کافی نبوده و دلیل اصلی ایجاد اختلالات میدانی حین عبور جریان محسوب می‌شود. صفوی و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه آزمایشگاهی جام‌های پرتابی در انتهای سرریزهای آزاد و دریچه‌دار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نحوه بهره‌برداری از سرریز، به‌ازای دبی‌های کوچک، تأثیر زیادی در طراحی جام‌ها دارد و ممکن است پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی جام، در دبی‌های اولیه سیلاب، ایمنی جام را به خطر اندازد. اکبری (۱۳۹۰) جریان بر روی پرتاب کننده جامی را به‌روش حجم محدود مدل‌سازی کردند و خصوصیات جریان شامل فشار و سرعت را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار Flow-3D و مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. امیدوارنیا و موسوی جهرمی (۱۳۹۱) پرش اسکی در پرتاب کننده‌های نوع مثلثی که دارای ماهیتی مشابه سرریزهای جامی شکل ولی با هندسه متفاوت است را مورد بررسی قرار دادند. برای نیل به اهداف این تحقیق یک مدل فیزیکی از سرریز اوجی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی ساخته شد و در چهار دبی و به دنبال آن عدد فرود مختلف، آزمایش‌ها انجام شد. در این تحقیق مسیر کلی جت خروجی از فلیپ باکت و بیشترین طول طی شده جت برای حد بالایی و هم حد پایینی، در هر حالت پرتاب کننده مثلثی با زاویه‌ها و طول همگرایی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی ۳ حالت فلیپ باکت مثلثی با زاویه ۴۵ درجه و طول آستانه ۲ سانتی‌متر، فلیپ باکت مثلثی با زاویه ۴۵ درجه و طول آستانه ۷ سانتی‌متر و فلیپ باکت مثلثی با زاویه ۲۲/۵ درجه و طول آستانه ۲ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان دادند، بیشترین و کمترین طول

طی شده جت برای پرتابکننده ۴۵ درجه با طول آستانه ۲ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه پرتابکننده، ضخامت جت خروجی کاهش پیدا می‌کند. از آنجا که استهلاک انرژی جریان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است بنابراین در تحقیق حاضر یکی از راه‌های استهلاک این انرژی مخرب به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. هدف از این تحقیق بررسی استهلاک انرژی با کاربرد باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی و اثر زاویه پرتابه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی بر میزان استهلاک انرژی آب و تأثیر زاویه انتهایی باکت پرتابی بر طول پرتابه با ساخت مدل فیزیکی سرریز طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۲۷/۲ سانتی‌متر، طول ۴۰ سانتی‌متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر، یک مکعب مستطیل با ارتفاع ۶/۶ سانتی‌متر، طول ۱۰ سانتی‌متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر و دو باکت پرتابی با طول و عرض به‌ترتیب ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر و شعاع‌های ۱۲ و ۱۹ سانتی‌متر از جنس پلی اتیلن توسط دستگاه CNC، و قرار دادن مکعب مستطیل و باکت‌ها در انتهای سرریز اوجی و سپس انجام ۲۱ آزمایش مختلف با دبی‌های ۳۳۰، ۴۱۹، ۵۰۸، ۵۹۷، ۶۵۹، ۷۷۵ و ۸۶۴ لیتر بر دقیقه میزان استهلاک انرژی سازه و طول پرتابه در دبی‌های ذکرشده برای باکت با شعاع ۱۲ و ۱۹ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.

مراحل عملی و آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه در فلومی به طول ۶ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ انجام گرفت. شکل ۲ مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. دبی جریان قبل از ورود به مخزن آرام‌کننده توسط دو دورسنج که در انتهای پمپ‌ها نصب شده بود با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری می‌شد. با توجه به اینکه هر دورسنج توانایی اندازه‌گیری دبی ۵۰۰

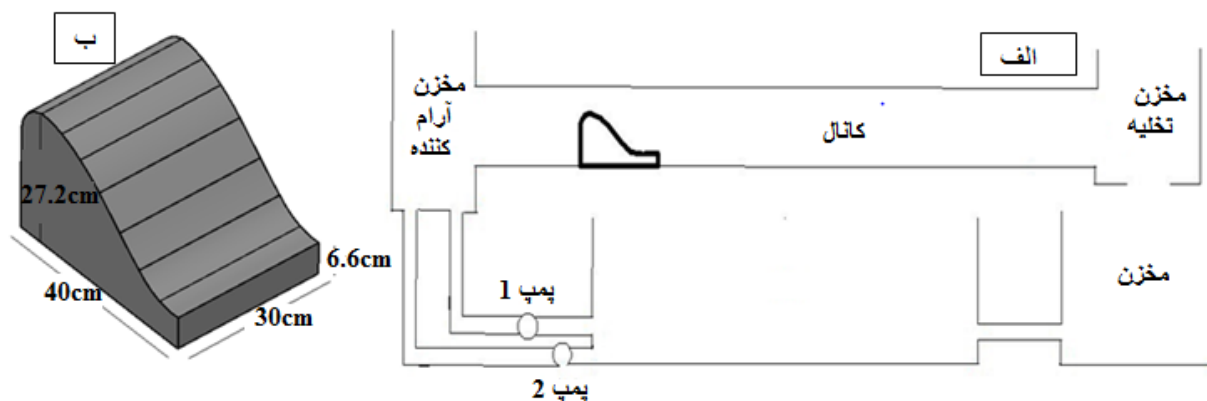
لیتر بر دقیقه را داشت از دو پمپ و دو دورسنج استفاده شده بود که در مجموع توانایی انتقال دبی ۱۰۰۰ لیتر بر دقیقه را داشته باشند. سرریز در فاصله ۰/۷ متری از ابتدای فلوم نصب گردید و برای جلوگیری از تلاطم در ابتدای کانال از دو صفحه مشبک استفاده شده بود که اولین صفحه مجهز به پوشال نیز بود که باعث می‌گردد تا عمق آب پشت سرریز کاملاً یکنواخت گردد. جهت اندازه‌گیری عمق از یک دستگاه عمق‌سنج استفاده شد که عمق آب قبل سرریز و همچنین پایین‌دست سرریز جایی که تغییرات به کمینه می‌رسید برداشت می‌شد و طول پرتابه توسط نوار مندرج در دو طرف فلوم اندازه‌گیری می‌شد. شکل ۲ مقطع فلوم آزمایشگاهی (الف) و سرریز اوجی (ب) و شکل ۳ تصویر باکت‌های پرتابی و مکعب مستطیل را نشان می‌دهد.

### اندازه‌گیری طول پرتابه و عمق جریان آب

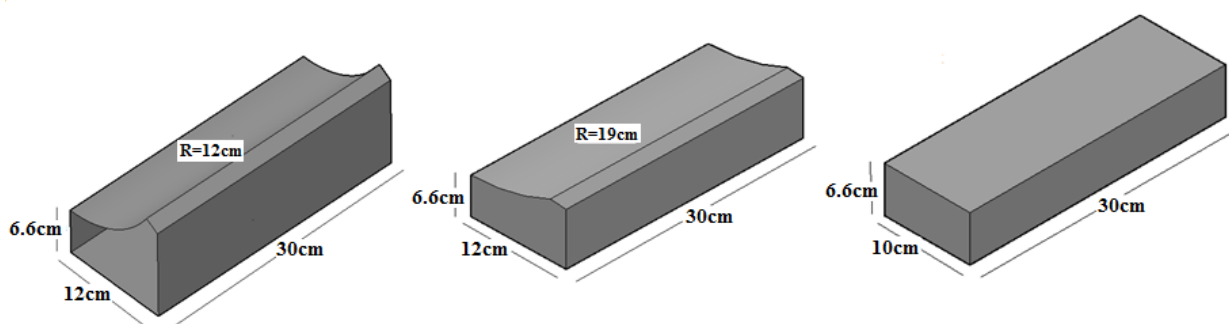
برای اندازه‌گیری دقیق طول پرتابه از دو طرف فلوم طول پرتابه اندازه‌گیری می‌شد و متوسط آن‌ها به‌عنوان طول پرتاب منظور می‌گردید. معیار برای اندازه‌گیری طول پرتابه فاصله بین انتهای باکت و محل فرود آب بود. با توجه به تغییرات مختصر عمق در عرض فلوم و برای اندازه‌گیری دقیق عمق، یک عمق در وسط فلوم و برای دو عمق به فاصله ۵ سانتی‌متر در نزدیک دیواره-های فلوم اندازه‌گیری و متوسط آن‌ها به‌عنوان عمق جریان منظور می‌گردید، سپس سرعت جریان با استفاده از معادله پیوستگی محاسبه می‌شد. مطابق شکل ۴ و پارامترهای مشخص روی آن، میزان افت نسبی انرژی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\Delta E_r = \frac{(E_0 - E_r)}{E_0} \quad [1]$$

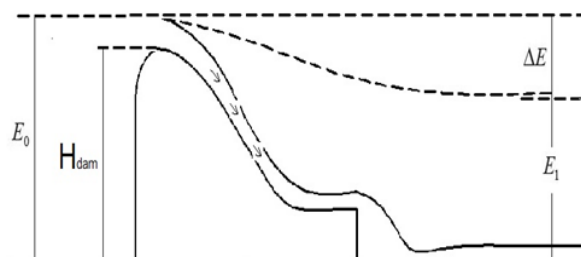
در این رابطه  $\Delta E_r$  افت نسبی انرژی،  $E_0$  انرژی کل جریان در بالادست و  $E_1$  انرژی کل پایین‌دست می‌باشد.



شکل ۲- الف) مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه، ب) تصویر سرریز و ابعاد سرریز.



شکل ۳- تصویر باکت‌ها و مکعب مستطیل.



شکل ۴- طرح شماتیک سرریز و اجزا آن.

## نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر زاویه باکت پرتابی بر میزان افت نسبی انرژی، با اندازه‌گیری عمق بالادست سرریز (۰/۵ متر قبل سرریز) و عمق پایین‌دست (انتهای کانال) و محاسبه سرعت متوسط با استفاده از رابطه پیوستگی، میزان افت انرژی محاسبه گردید. جدول ۱ افزایش مقادیر نسبی استهلاك انرژی نسبت به مدل شاهد (سرریز بدون باکت) را نشان می‌دهد.

در این تحقیق آزمایش‌ها برای دبی‌های ۳۳۰، ۴۱۹، ۵۰۸، ۵۹۷، ۶۵۹، ۷۷۵ و ۸۶۴ لیتر بر دقیقه بر روی مدل‌های ساخته شده انجام گرفت و میزان افت نسبی انرژی و طول پرتابه از داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار گرفت.

## افت انرژی

جدول ۱- افزایش مقادیر نسبی استهلاك انرژی نسبت به مدل شاهد.

دبی (L min <sup>-1</sup> )							زاویه برخاست باکت (درجه)
۸۶۴	۷۷۵	۶۵۹	۵۹۷	۵۰۸	۴۱۹	۳۳۰	
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۳۲
۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۷	۵۲

را به طور مؤثری کاهش دهد. به طور کلی می توان گفت استهلاك انرژی در این مدل ها نسبت به انرژی بالادست تا ۸۳ درصد افزایش می یابد و همچنین با توجه به جدول ۲ در مدل با باکت پرتابی میزان استهلاك انرژی از ۴ تا ۱۸ درصد نسبت به مدل شاهد (بدون باکت) افزایش می یابد.

در ادامه بر اساس تحلیل انجام شده بر روی داده های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار Minitab 16 فرمول رگرسیونی خطی زیر به دست آمده است:

$$\Delta E_r = 0.839 - 4.29 \frac{Y_c}{H_{dam}} - 0.42 \frac{Y_b}{B} + 0.173 \tan(\theta)$$

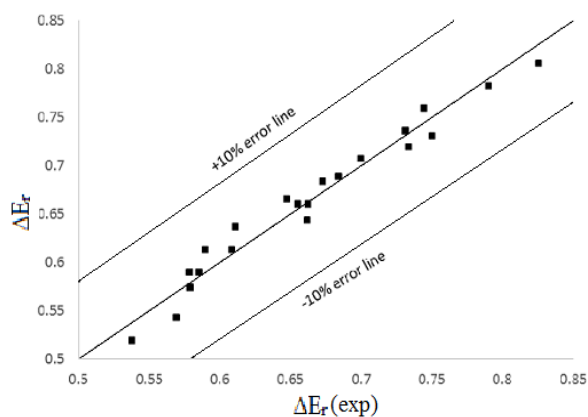
[۲]

که در آن  $\Delta E_r$  مقدار افت نسبی انرژی،  $H_{dam}$  نسبت  $Y_c/B$  نسبت عمق بحرانی به ارتفاع تاج سرریز،  $Y_b/B$  نسبت ارتفاع انتهای باکت به عرض باکت و  $\theta$  زاویه پرتاب باکت با افق می باشد. همه پارامترهای استفاده شده در رابطه بی بعد هستند و  $\theta$  بر حسب رادیان می باشد.

در شکل ۶ مقدار افت محاسبه شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از رابطه ۲ (محور قائم) باهم مقایسه شده اند. پراکندگی نقاط نسبت به رگرسیون نشان می دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای هم بستگی نسبتاً خوبی می باشند.

جهت بررسی تأثیر باکت پرتابی بر میزان افت انرژی صورت گرفته در آزمایش ها، با رسم نمودار شکل ۵ نتایج نمایش داده شده و روند نمودار توصیف می شود. در شکل ۵ روند استهلاك انرژی در سرریز بدون باکت و با باکت های ۳۲ و ۵۲ درجه نمایش داده شده است. در این نمودار محور عمودی استهلاك انرژی نسبی و محور افقی دبی بر حسب لیتر بر دقیقه می باشد. با توجه به شکل ۵ مقدار افت انرژی نسبی با افزایش دبی در هر سه حالت کم می شود. زیرا با افزایش دبی و به دنبال آن افزایش عمق (با توجه به ثابت بودن عرض فلوم) از اثرات زیر لایه ورقه ای بر پروفیل سرعت کاسته شده و متعاقباً تنش برشی وارد به جریان کم می شود. با کاهش تنش برشی وارد به جریان، اثر عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی کم می شود، در نتیجه از اثرات زبری ها بر مقاومت جریان کاسته شده و افت انرژی کمتری اتفاق می افتد. با افزایش زاویه برخاست باکت میزان افت نسبی انرژی افزایش می یابد و در باکت با زاویه پرتاب ۵۲ درجه بیشترین استهلاك انرژی رخ می دهد، زیرا با افزایش زاویه باکت جهت جریان به میزان بیشتری رو به بالا عوض می شود و سرعت جریان کاهش یافته و همچنین باعث پراکنده شدن بیشتر آب در هوا شده و انرژی بیشتری تلف می شود. در کل استهلاك انرژی نسبی سرریز اوجی با باکت پرتابی نسبت به سرریز بدون باکت بیشتر است و نشان می دهد که باکت پرتابی می تواند انرژی جنبشی

است و در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه بین افت نسبی انرژی مشاهده شده و محاسبه شده از رابطه ۲.

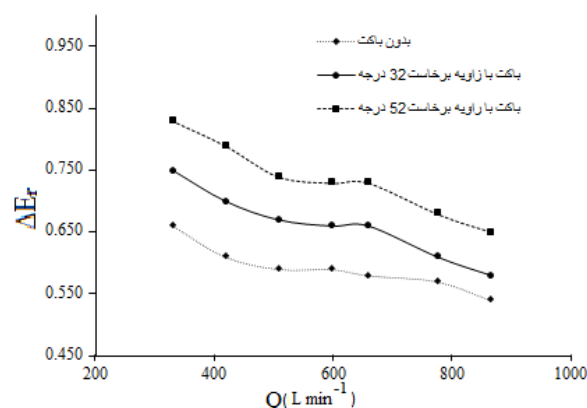
تخلیه نگردد منجر به خسارات جبران ناپذیری خواهد شد که بعضاً در پایداری سد نیز تأثیرگذار خواهد بود. بدین منظور در آزمایشات انجام شده طول پرتابه برای سرریز با باکت ۳۲ و ۵۲ درجه اندازه گرفته شده و نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردید. طول پرتابه‌های ارائه شده در جدول ۲ برحسب میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲- طول پرتابه اندازه‌گیری شده برای باکت‌های ۳۲ و ۵۲ درجه.

دبی (L min <sup>-1</sup> )							زاویه برخاست باکت (درجه)
۸۶۴	۷۷۵	۶۵۹	۵۹۷	۵۰۸	۴۱۹	۳۳۰	
۴۲۸	۴۰۳	۳۷۷	۳۲۷	۲۹۵	۲۴۵	۲۰۵	
۴۳۰	۳۸۵	۳۱۰	۲۵۱	۱۹۲	۱۵۵	۱۲۴	

میلی‌متر و محور افقی دبی بر حسب لیتر بر دقیقه می‌باشد. با توجه به شکل ۷ طول پرتابه با افزایش دبی در هر دو حالت بیشتر می‌شود. طول پرتابه برای باکت ۳۲ درجه بیشتر از ۵۲ درجه است و با افزایش دبی

مقدار همبستگی این دو مقدار (مشاهداتی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری ۹۶/۳ درصد



شکل ۵- تغییرات افت نسبی انرژی به‌ازای دبی در باکت‌های مختلف.

## طول پرتابه

لازمه استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی شکل دانستن رفتار پرتابه هنگام خروج از مخزن و ورود آن به سرریز می‌باشد. چنانچه سرریز به درستی طراحی نشود و آب خروجی از مخزن در محدوده مورد نظر که همان حوضچه غوطه‌وری و یا بستر رودخانه می‌باشد

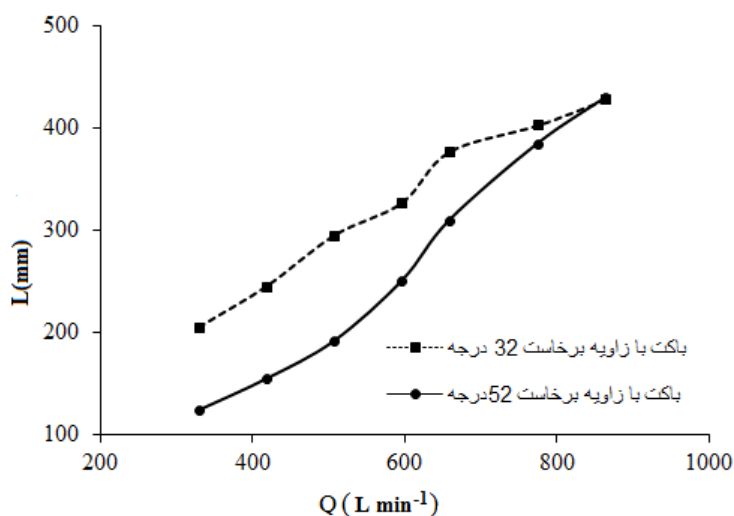
جهت بررسی تأثیر باکت پرتابی بر مقدار طول پرتابه صورت گرفته در آزمایشات، با رسم نمودار زیر نتایج نمایش داده شده و روند نمودار توصیف می‌شود. در این نمودار محور عمودی طول پرتابه بر حسب



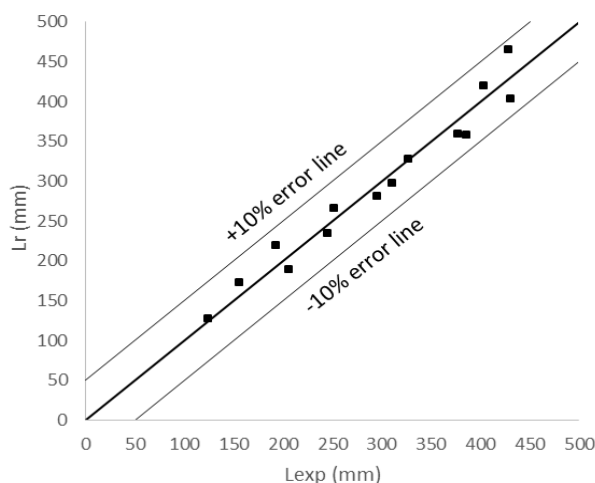
$$L = 77.4 + 8457 \frac{Y_c}{H_{dam}} - 94.4 \tan(\theta) \quad [3]$$

در این رابطه  $L$  طول پرتابه،  $Y_c/H_{dam}$  نسبت عمق بحرانی به ارتفاع تاج سرریز و  $\theta$  زاویه برخاست باکت می‌باشد. در این رابطه  $L$  برحسب میلی‌متر و  $\theta$  بر حسب رادیان می‌باشد.

اختلاف طول پرتاب بین دو باکت کم شده و در دبی ۸۶۴ لیتر بر دقیقه طول پرتابه برای دو باکت تقریباً یکسان می‌شود. در ادامه برای طول پرتابه نیز بر اساس تحلیل انجام شده بر روی داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار Minitab16 فرمول رگرسیونی خطی زیر ارائه گردید:



شکل ۷- تغییرات طول پرتابه به ازای دبی در باکتهای مختلف.



شکل ۸- مقایسه بین طول پرتابه مشاهده شده و محاسبه شده از رابطه ۳.

رگرسیون نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای هم‌بستگی نسبتاً خوبی می‌باشند.

در شکل ۸ طول پرتابه آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار طول پرتابه محاسبه شده از رابطه (محور قائم) باهم مقایسه شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط

برخاست ۵۲ درجه محسوس‌تر است. همچنین با افزایش دبی جریان، میزان افت انرژی در هر سه مدل کمتر می‌شود.

طول پرتابه با افزایش دبی در هر دو حالت باکت با زاویه پرتاب ۳۲ و ۵۲ درجه بیشتر می‌شود. طول پرتابه برای باکت ۳۲ درجه بیشتر از ۵۲ درجه است و با افزایش دبی اختلاف طول پرتاب بین دو باکت کم شد. علاوه بر نتایج فوق بر اساس تحلیل انجام شده بر روی داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار Minitab16 فرمول رگرسیونی خطی برای افت انرژی و طول پرتابه ارائه شد که از دقت بالایی برخوردار بودند.

مقدار همبستگی این دو مقدار (مشاهداتی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری ۹۶ درصد است و در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق آزمایشات بر روی سرریز اوجی با باکتهای پرتابی و دبی‌های متفاوت انجام گرفت و نتایج آزمایشات نشان داد استهلاك انرژی در سرریز با باکت پرتابی میزان استهلاك انرژی از ۴ تا ۱۸ درصد نسبت به سرریز بدون باکت افزایش می‌یابد. افزایش زاویه برخاست باکت (کاهش شعاع باکت) باعث افزایش افت انرژی می‌گردد. این مقدار در باکت با زاویه

### منابع مورد استفاده

- ابراهیمی ن، رستمی راوری ا و اکبری م، ۱۳۸۸. بررسی پارامترهای جریان بر روی مدل سرریز سد. صفحه‌های ۱ تا ۱۳، همایش ملی مدیریت بحران آب، ۱۶ اسفند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.
- اکبری غ، ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی اثر تغییرات دبی و عمق پایاب بر بیشترین عمق آبشستگی. صفحه‌های ۱ تا ۷، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ آبان ماه، دانشگاه گیلان، رشت.
- امیدوارنیا م و موسوی جهرمی ح، ۱۳۹۱. تأثیر طول آستانه و زاویه در پرتاب کننده‌های مثلثی بر مسیر کلی پرتابه خروجی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، جلد ۱، شماره ۴، صفحه‌های ۱ تا ۱۸.
- بارانی غ و عباسی پروین ی، ۱۳۸۸. استهلاك انرژی در سازه‌های هیدرولیکی (مطالعه میدانی سازه‌های مستهلک کننده انرژی). انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر).
- صفوی خ، خراسانی زاده ع و غفوری س، ۱۳۸۹. ملاحظات در طراحی جام‌های پرتابی در پایین‌دست جت‌های ریزشی آزاد. صفحه‌های ۱ تا ۷، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ آبان ماه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- مومنی وصالیان ر، موسوی جهرمی س و شفاعی بجستان م، ۱۳۸۵. آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل. صفحه‌های ۱ تا ۱۰، هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، ۲۴ تا ۲۶ بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- مهری م، فتحی مقدم م و ابن جلال ر، ۱۳۸۷. بررسی خلاءزایی بر روی سرریز سد بالارود با استفاده از مدل فیزیکی. صفحه‌های ۱ تا ۸، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ماه، دانشگاه تهران.
- Chanson H, 2004. The Hydraulic of Open Channel Flow. Elsevier, 496p.
- Heller V, Hager WH and Minor HE, 2005. Ski jump hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 131(5): 347-355.
- Juon R and Hager WH, 2000. Flip bucket with and without deflector. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 126(11): 837- 845.
- Larrese A, Rossi R, Onate E, Idelsohn SR, 2008. Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows. Engineering Computations 25(4): 385 – 425.
- Mason PJ, 1993. Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. Water and Dam Construction 45(9/10): 40-45.
- Rajan BH and Shivashankara KN, 1980. Design of trajectory buckets. Irrigation and Power 37(1): 63–76.
- Stelchuck DL, 1969. Scour at the base of spillway buckets. M.Sc. Thesis., University of Windsor, Ontario.