



استهلاک انرژی جریان در پرتاب‌کننده‌های جامی همگرا در حضور دیواره جداکننده

امیر ملازاده صادقیون^۱، غلامرضا عزیزیان^{۱*}، محمدکریم بیرامی^۲

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، سیستان و بلوچستان، ایران.
^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

کلمات کلیدی:

استهلاک انرژی

تخلیه کننده‌های تحتانی

تنداب همگرا

سرریزها

فیلپ باکت

خلاصه: پرتاب‌کننده‌های جامی یکی از پرکاربردترین سازه‌های استهلاک انرژی هستند که در انتهای سرریزها و یا تخلیه کننده‌های تحتانی استفاده می‌شوند. در این تحقیق اثر زاویه همگرایی جام بر میزان استهلاک انرژی جریان بررسی و نتایج آن با مدل جام متداول مقایسه شد. بدین منظور چهار زاویه همگرایی شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه با استفاده از دفلکتورها در جام ایجاد شد. در ادامه اثر اضافه کردن دیواره جداکننده چه به صورت نصب در جام و چه به صورت سرتاسری به جام‌های متداول و همگرا بررسی شد. نتایج نشان داد پرتاب‌کننده‌های جامی حدوداً بین ۶۵ تا ۶۰ درصد انرژی جریان را مستهلک می‌کنند. در زاویه همگرایی ۲۰ درجه، استهلاک انرژی جریان حدود ۵ درصد افزایش می‌یابد ولی در زاویه همگرایی ۳۰ درجه میزان استهلاک انرژی جریان حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. به‌طور کلی با افزایش دبی جریان، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. اضافه کردن دیواره جداکننده در جام تأثیر معنی‌داری بر استهلاک انرژی جریان ندارد ولی اضافه کردن دیواره جداکننده سرتاسری به پرتاب‌کننده جامی همگرا، اثر کاهش استهلاک انرژی جریان ناشی از همگرایی جام را از بین می‌برد. با نصب دیواره جداکننده در جام، در الگوی جریان اختلال موضعی ایجاد می‌شود اما افت ناشی از آن در مقایسه با استهلاک انرژی ناشی از برخورد جت جریان با کف حوضچه آرامش پایین دست قابل ملاحظه نیست، حال آنکه دیواره جداکننده سرتاسری جام را به دو قسمت تقریباً مجزا تقسیم کرده و اختلال عمده‌ای نیز در الگوی جریان ایجاد نمی‌کند.

۱- مقدمه

انرژی جریان خروجی از سازه‌های نامبرده، پیشنهاد شده است [۳].
[۴، ۵]. طراحی و کاربرد هر یک از سازه‌های سرریز پلکانی و حوضچه آرامش در عمل با محدودیت‌های هیدرولیکی مواجه هستند. در پروژه‌هایی که سرعت جریان (بیش از ۲۰ m/s) و عدد فرود خیلی زیاد است استفاده از پرتاب‌کننده جامی توصیه می‌شود. پرتاب‌کننده‌های جامی یکی از پرکاربردترین سازه‌های استهلاک انرژی در پروژه‌های بزرگ سدسازی هستند که طراحی و اجرای نادرست، عملکرد آن‌ها را کاهش می‌دهد و ممکن است به سازه‌های پایین دست و حتی بدنه سد خسارت زیادی وارد کند [۶]. با توجه به اهمیت این سازه، مطالعات زیادی در خصوص هیدرولیک جریان عبوری از آن انجام شده است. به دلیل کوتاه بودن طول جام، استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک

حفاظت از منابع آب و خاک یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های توسعه طرح‌های صنعتی و کشاورزی و همچنین جوامع بشری است. ساخت سدهای بزرگ از مؤلفه‌های اصلی توسعه طرح‌های حفاظت از منابع آب و خاک بشمار می‌آید. سرریزها و تخلیه کننده‌های تحتانی از اصلی‌ترین اجزاء سدها هستند. جریان عبوری از روی سرریزها یا تخلیه کننده‌های تحتانی دارای انرژی زیادی است که اگر مستهلک نشود می‌تواند باعث آب شستگی جدی و یا خسارت زیاد به سازه‌های پایین دست شود [۱، ۲]. سازه‌های گوناگونی مانند انواع حوضچه‌های آرامش، سرریزهای پلکانی و پرتاب‌کننده‌های جامی برای استهلاک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: g.azizyan@eng.usb.ac.ir



بین سطح جام و جریان کم است. بیشتر افت انرژی به خاطر تغییر جهت جریان و همچنین اصطکاک سطح جریان با هوا است. با خروج جریان از جام به صورت پرش اسکی و پخش و پراکنده شدن آن در هوا بخش قابل توجهی از انرژی آن مستهلک می‌شود. باقی‌مانده انرژی جریان نیز بعد از برخورد جت با حوضچه آرامش مستغرق مستهلک می‌شود [۷]. مرکز استاندارد هند [۸] با مطالعه گسترده هیدرولیک جریان در پرتاب‌کننده‌های جامی ساده و دندانه‌دار، توانست راهنمای طراحی و اجرایی برای آن‌ها تهیه کند. در راهنمای طراحی آن‌ها ضوابطی برای تعیین تراز کف جام، شعاع جام، زاویه لبه جام و شیب لبه جام به نحوی که رسوبات از بستر رودخانه وارد جام نشوند ارائه شده است. جون و هگر [۹] به بررسی هیدرولیک جریان در جام و میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از آن در حضور دفلکتور پرداختند. آن‌ها مشاهدات و نتایج خود را با جام متداول مقایسه نمودند. تحقیقات شامل بررسی اثر مقیاس، توزیع فشار در جام و تیغه جریان است. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوی جریان در اطراف دفلکتور از یک منحنی درجه دوم تبعیت می‌کند. دفلکتور جهت جریان را به صورت ناگهانی منحرف می‌کند که موجب ایجاد یک موج شوک می‌شود. دفلکتور باعث پخشیدگی بیشتر جت خروجی از جام در مقایسه با نوع معمول آن می‌شود. آن‌ها اظهار داشتند که دفلکتور با زاویه نصب ۲۰ درجه انحراف قابل توجهی در الگوی جریان ایجاد می‌کند و بیشترین ارتفاع موج شوک را ایجاد می‌کند. ویچر و هگر [۱۰] به بررسی هیدرولیک جت جریان خروجی از جام با سطح مقطع غیر دایره‌ای پرداختند. آن‌ها نشان دادند ایجاد جت با سطح مقطع غیر دایره‌ای و ناهموار، درجه آشفستگی جت جریان خروجی را افزایش می‌دهد؛ که در نهایت استهلاک انرژی جریان بیشتر می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند با ورود ناگهانی جت به هوا، هوادهی جریان در انتهای جام و مخلوط شدن هوا با جت جریان می‌تواند میزان پاشش جریان را افزایش دهد که در نتیجه استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. آنتونیا و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی فیزیکی و عددی توزیع فشار و هندسه جت جریان خروجی از پرتاب‌کننده جامی پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی عددی از روش اجزاء محدود جزئی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی استفاده کردند. نتایج آن‌ها دقت مناسب مدل‌سازی عددی را نشان داد. استانیو و همکاران [۱۲] به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان در پرتاب‌کننده‌های جام مثلثی پرداختند. آن‌ها اظهار داشتند

که در پرتاب‌کننده جام مثلثی حداکثر فشار در جام بسیار تحت تأثیر عدد فرود جریان ورودی به آن است و زاویه انحراف تأثیر چندانی ندارد. ژانگ و همکاران [۱۳] نوع جدیدی از مستهلک کننده انرژی به نام التوید را طراحی و ارائه کردند که دارای مزایای فیلپ باکت پاششی و جام با پایه‌های باریک است. این نوع مستهلک کننده باعث پاشش بهتر جریان می‌گردد. دنگ و همکاران [۱۴] نوع جدیدی از پرتاب‌کننده‌های جامی را پیشنهاد دادند. کف مدل آن‌ها دارای شیب و دیواره‌های جانبی آن دارای زاویه در امتداد جام است. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب کف ۳۰ تا ۴۵ درجه بهترین عملکرد هیدرولیکی را دارد؛ زیرا منجر به بهترین شکل پاشش جت خروجی می‌شود. کرمانی نژاد و همکاران [۱۵] به مطالعه آزمایشگاهی فشار ناشی از برخورد جت جریان خروجی از پرتاب‌کننده جامی با کف حوضچه آرامش پرداختند. آن‌ها ۲۵۰ عدد حس‌گر فشار در کف حوضچه آرامش برای ثبت نوسانات فشار نصب کردند. در تحقیقات آن‌ها پارامترهای دبی، زاویه خروج جریان از جام، فاصله افقی و عمودی از بدنه اصلی جریان و زاویه برخورد جریان با کف حوضچه به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب فشار نسبت به فاصله افقی و عمودی و همچنین زاویه برخورد بسیار حساس است. صادقی عسکری و موسوی جهرمی [۱۶] در آزمایشگاه به بررسی اثر موقعیت نصب دفلکتورهای گوه‌ای در جام بر میزان استهلاک انرژی پرداختند. آن‌ها اظهار داشتند که بیشترین میزان انرژی مستهلک شده بر اثر نصب دفلکتور با زاویه ۳۷ درجه در فاصله ۸ سانتی‌متری از لبه باکت و در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده است. صادقی عسکری و همکاران [۱۷، ۱۸] با ساخت مدل آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی ناشی از نصب دفلکتور در پرتاب‌کننده جامی متداول و پرتاب‌کننده جامی دارای کانال نزدیک‌شونده را بررسی نمودند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که سرریز جامی با کانال نزدیک‌شونده و دفلکتور عملکرد بهتری نسبت به سرریز جامی متداول دارد. کاکاش پور و همکاران [۱۹، ۲۰] جریان عبوری از روی پرتاب‌کننده جام مثلثی را در سه بعد با استفاده از روش حجم محدود مدل‌سازی نمودند. بدین منظور آن‌ها از نرم‌افزار Flow-۳D استفاده نمودند. آن‌ها در تحقیق خود مدل آشفستگی RNG را بررسی نمودند. در تحقیقات آن‌ها یک پرتاب‌کننده جام دایره‌ای و دو پرتاب‌کننده جام مثلثی ساخته و هیدرولیک جریان با پنج دبی مختلف بر روی آن‌ها بررسی شد. آن‌ها پارامترهای

نرم افزار ۳D-Flow پرداختند. آن‌ها از مدل آشفتگی ϵ -RNGk برای مدل‌سازی آشفتگی جریان استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از آن بود که مدل شامل کانال نزدیک‌شونده نسبت به مدل دیگر، طول پرتاب و استهلاك انرژی بیشتری دارد. قابل ذکر است که حداکثر سرعت در ابتدای کانال نزدیک‌شونده ثبت شده است. نتایج نشان داد که سرعت جریان در مدل شامل کانال نزدیک‌شونده ۳۲ درصد بیشتر از مدل شاهد است. بررسی و مقایسه پروفیل‌های فشار نیز نشان داد تغییرات فشار در دو مدل تفاوت محسوسی ندارد و حداکثر فشار، در مدل نخست در پنجه سرریز رخ می‌دهد. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تاکنون اثر زاویه همگرایی جام و دیواره جداکننده بر استهلاك انرژی مورد بررسی قرار نگرفته است؛ لذا در این تحقیق به بررسی اثر دیواره جداکننده و همچنین زوایای مختلف همگرایی جام بر میزان استهلاك انرژی جریان عبوری از پرتاب‌کننده‌های جامی پرداخته می‌شود.

هیدرولیکی از قبیل عمق و سرعت جریان، عدد فرود، کاویتاسیون ایجادشده را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که جام دایره‌ای در رابطه با کاویتاسیون عملکرد بهتری نسبت به جام‌های مثلثی دارد و الزاماً کاویتاسیون در حداکثر دبی رخ نمی‌دهد. امیدوارنیا و موسوی جهرمی [۲۱] عملکرد هیدرولیکی سرریز با جام مثلثی و جام دایره‌ای را از نظر میزان اتلاف انرژی جنبشی مورد مطالعه قراردادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که در حالت کلی عملکرد جام مثلثی ۴۵ درجه به‌طور قابل توجهی در استهلاك انرژی بهتر از پرتاب‌کننده جام دایره‌ای است. در عدد فرود ۳/۱۳ در حالت جت آزاد استهلاك انرژی در جام مثلثی و جام دایره‌ای به ترتیب ۶۶/۴ و ۵۴/۸ درصد مشاهده شد. کمترین درصد استهلاك انرژی برای جام مثلثی با زاویه ۲۲/۵ درجه و بیشترین استهلاك انرژی در جام مثلثی با زاویه ۴۵ درجه مشاهده شد. فرزین و همکاران [۲۲] به مدل‌سازی عددی جریان در پرتاب‌کننده جامی همراه با کانال نزدیک‌شونده با استفاده از

جدول ۱. خصوصیات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های پرتاب‌کننده جامی همگرا با دیواره جداکننده

Table 1. Geometric and hydraulic properties of converging bucket models with splitter wall

نام مدل	ارتفاع (m)	شعاع (m)	زاویه همگرایی (درجه)	دیوار جداکننده جام	دیوار جداکننده سرتاسری	محدوده دبی (l/s)
مدل ۱ (شاهد) ^۱	۰/۴	۰/۱۶	خیر	خیر	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۲ ^۲	۰/۴	۰/۱۶	خیر	بله	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۳ ^۳	۰/۴	۰/۱۶	خیر	خیر	بله	۲۵-۱۶
مدل ۴ ^۴	۰/۴	۰/۱۶	۱۰	خیر	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۵ ^۵	۰/۴	۰/۱۶	۱۰	بله	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۶ ^۶	۰/۴	۰/۱۶	۱۰	خیر	بله	۲۵-۱۶
مدل ۷	۰/۴	۰/۱۶	۲۰	خیر	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۸	۰/۴	۰/۱۶	۲۰	بله	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۹	۰/۴	۰/۱۶	۲۰	خیر	بله	۲۵-۱۶
مدل ۱۰	۰/۴	۰/۱۶	۳۰	خیر	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۱۱	۰/۴	۰/۱۶	۳۰	بله	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۱۲	۰/۴	۰/۱۶	۳۰	خیر	بله	۲۵-۱۶
مدل ۱۳	۰/۴	۰/۱۶	۴۰	خیر	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۱۴	۰/۴	۰/۱۶	۴۰	بله	خیر	۲۵-۱۶
مدل ۱۵	۰/۴	۰/۱۶	۴۰	خیر	بله	۲۵-۱۶

^۱Baseline model

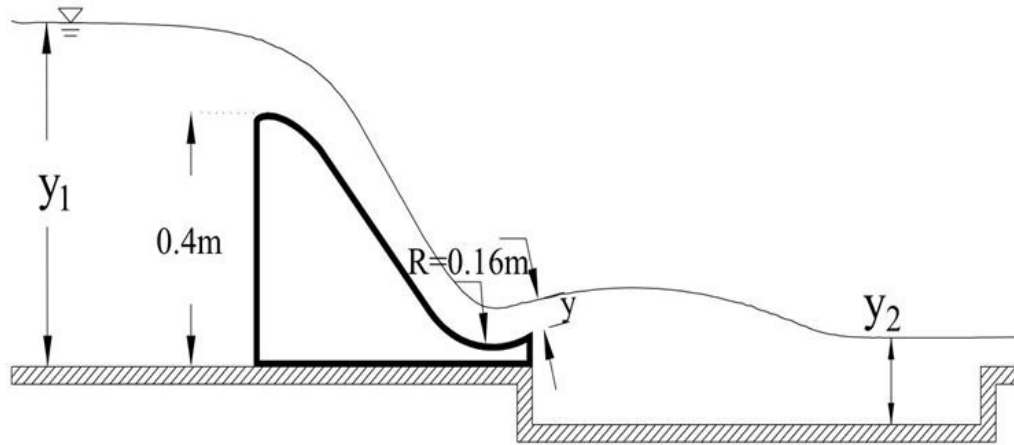
^۲Bucket with Splitter Wall

^۳Bucket with Full Separator wall

^۴Converged Bucket

^۵Converged Bucket with Splitter Wall

^۶Converged Bucket with Full Separator wall



شکل ۱. پرتاب کننده جامی همگرا با دیواره جداکننده در جام و دیواره جداکننده سرتاسری
Fig. 1. Converged bucket with the splitter wall in the bucket and the overall splitter wall

۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق به بررسی اثر زاویه همگرایی جام بر الگو و میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از آن می‌پردازد. بدین منظور چهار زاویه همگرایی شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب در جام تعبیه و نتایج آن با مدل جام متداول (شاهد) مقایسه شد. در ادامه به ترتیب دیواره‌های جداکننده به صورت نصب در جام و سرتاسری به مدل‌های شاهد و همگرا اضافه شد. پرتاب‌کننده‌های جامی در انتهای تنداب سرریز اوجی نصب گردید. قابل ذکر است که سرریز اوجی بر اساس استاندارد اداره مهندسی عمران امریکا طراحی شد. مدل‌ها از جنس فایبرگلاس و توسط دستگاه CNC لیزری با دقت ۰/۱ mm ساخته شدند.

ارتفاع سرریز برابر ۰/۴ m، شعاع جام ۰/۱۶ m و زاویه لبه جام ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. مدل‌های ساخته شده در کانالی به طول ۱۰/۵۶ m و عمق و عرض ۰/۱۶ m نصب شدند. مدل‌ها در فاصله ۱۰/۵ m از ابتدای فلولم نصب شد به نحوی که لبه انتهایی جام پرتابی دقیقاً در ابتدای حوضچه آرامش قرار گرفت. در طول آزمایش‌ها دبی جریان با ۱۰ مقدار در محدوده ۱۶ تا ۲۵ لیتر بر ثانیه بر روی مدل‌ها برقرار شد. جریان آب پس از عبور از روی سرریز مدل به درون حوضچه آرامش می‌ریخت. خصوصیات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در مرحله اول آزمایش‌ها، مدل جام متداول به عنوان مدل شاهد ارزیابی شد. در مرحله دوم به آن دیواره‌های جداکننده اضافه شد. در مرحله سوم، مدل جام‌های همگرا با زوایای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و در انتها نیز به هریک از جام‌های همگرا دیواره‌های جداکننده اضافه شد. تصاویری از مدل‌های آزمایشگاهی پرتاب‌کننده جامی با دیواره جداکننده جام، دیواره جداکننده سرتاسری و محل‌های اندازه‌گیری انرژی جریان (مقاطع بالادست و پایین دست) در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- آنالیز ابعادی

برای محاسبه مقدار اتلاف انرژی جریان عبوری از روی پرتاب‌کننده جامی، به کارگیری معادله برنولی برای بالادست و پایین دست سازه (معادلات ۱ و ۲) ضروری است.

$$E_1 = Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_1 + y_1 + \frac{Q^2}{2g(B \times y_1)^2} \quad (1)$$

$$E_2 = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{Q^2}{2g(By_2)^2} \quad (2)$$

در این معادله‌ها V_1, y_1, V_2, y_2 به ترتیب اعماق و سرعت جریان در بالادست و پایین دست سرریز، Q دبی جریان، g شتاب ثقل زمین، B عرض کانال و Z ارتفاع از سطح مبنا است. نرخ اتلاف انرژی جریان با تفاضل انرژی جریان در پایین دست و بالادست سرریز به صورت معادله (۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad (3)$$

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاک انرژی مؤثر هستند اقدام نموده و با آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه (۴) ارائه شده‌اند.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f(\rho, V, R, P, g, H_1, \theta, \Psi, \xi, \lambda) \quad (4)$$

در این رابطه $\Delta E/E_1$ افت نسبی انرژی، P ارتفاع سرریز، ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل و V سرعت جریان خروجی از جام، R شعاع جام، θ زاویه لبه پرتاب‌کننده جام، Ψ زاویه همگرایی جام، H_1 هد جریان در بالادست و ξ اثر سازه جداکننده جام و λ اثر سازه جداکننده سرتاسری است. با انجام آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر در استهلاک انرژی جریان عبوری از جام به شرح رابطه (۵) استخراج می‌شود. در این رابطه y_c عمق بحرانی، Fr عدد فرود جریان خروجی از جام است.

$$\Pi_1(P) = \rho V R(P) \Rightarrow \Pi_1(P) = \frac{P}{R}$$

$$\Pi_2(H_1) = \frac{H_1}{R} \xrightarrow{H_1 = 1.5y_c} \Pi(H_1) = \frac{y_c}{R}$$

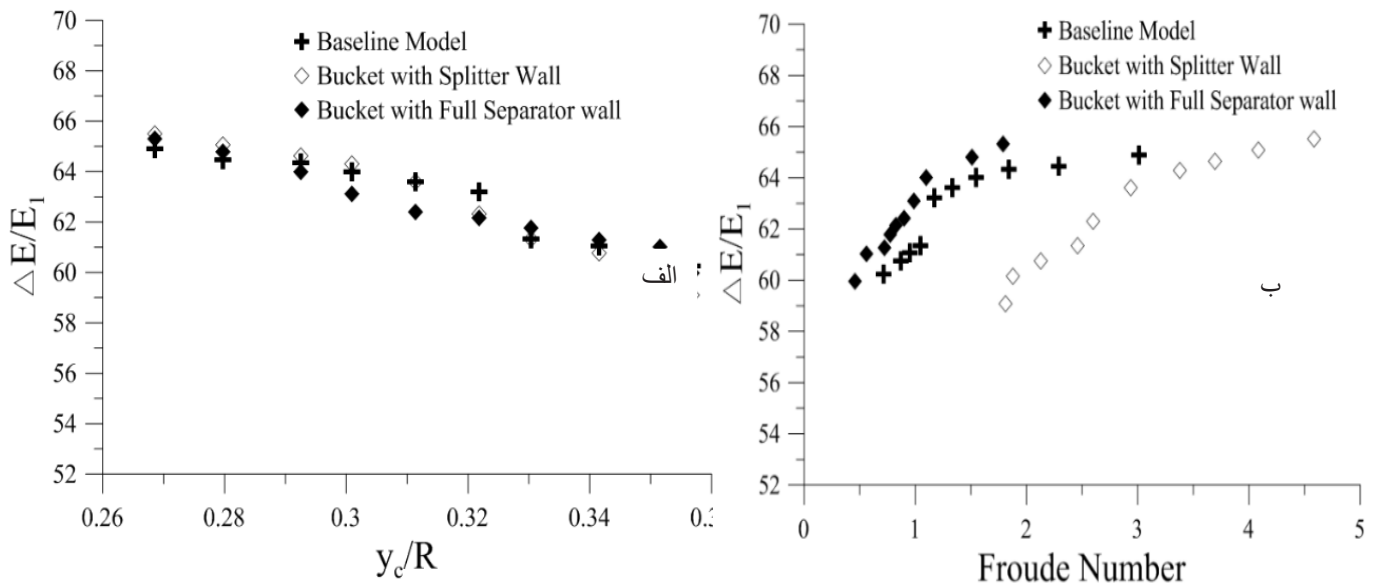
$$\Pi_3(g) = \frac{gR}{V^2}, \sqrt{\frac{1}{\Pi(g)}} = \frac{V}{\sqrt{gR}} = Fr \quad (5)$$

$$\Pi_4(\theta) = \theta$$

$$\Pi_5(\Psi) = \Psi$$

$$\Pi_6(\xi) = \xi$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f\left(\frac{y_c}{R}, \frac{R}{P}, Fr, \theta, \Psi, \xi, \lambda\right)$$

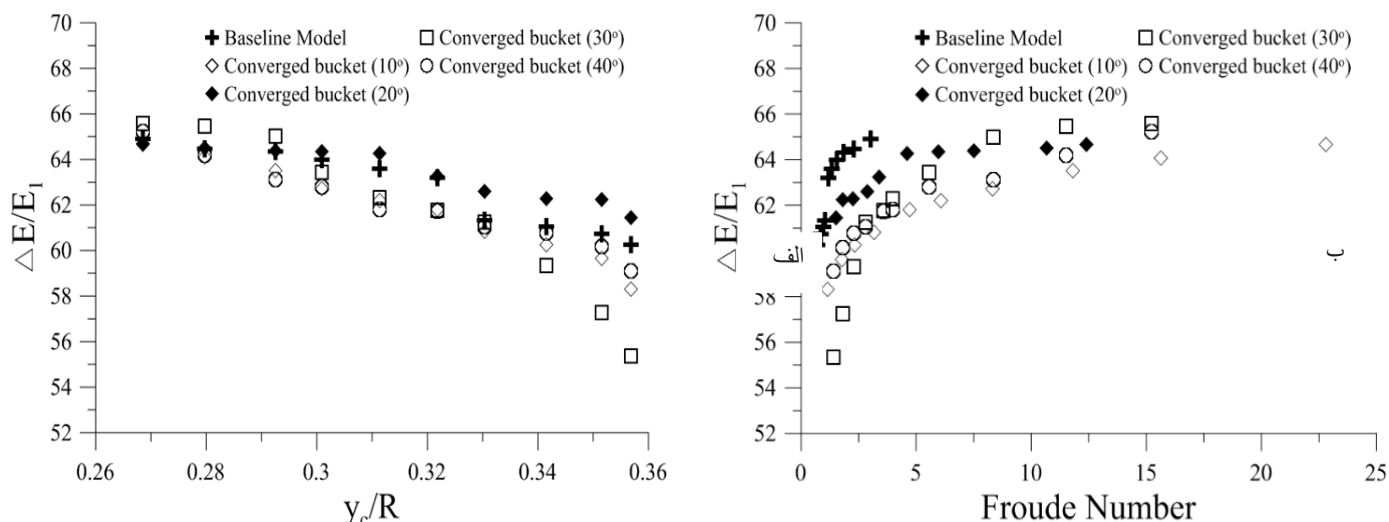


شکل ۲. استهلاک انرژی جریان در پرتاب‌کننده جامی با دیواره جداکننده جام و دیواره جداکننده سرتاسری
Fig. 2. Flow energy dissipation in the bucket with the bucket splitter wall and the overall splitter wall

۴- نتایج و بحث

خروجی از جام در نظر گرفته شده است. در این تحقیق به دلیل اینکه تمرکز بر روی تأثیر زاویه همگرایی جام و دیواره‌های جداکننده بر استهلاک انرژی جریان است؛ لذا تأثیر تغییرات پارامتر P/R (نسبت ارتفاع سرریز به شعاع جام) در نظر گرفته نمی‌شود و این نسبت در طول همه آزمایش‌ها ثابت و برابر با $0/4$ است. میزان انرژی مستهلک شده در همه مدل‌ها با استفاده از معادله برنولی محاسبه شد. بدین صورت که ابتدا عمق و سرعت جریان در بالادست (مقطع ۱) و پایین دست (مقطع ۲) اندازه‌گیری و سپس با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از روی پرتاب‌کننده جامی محاسبه شد. نتایج هریک از سناریوهای این تحقیق شامل اثر دیواره جداکننده، اثر زاویه همگرایی و اثر توأمان دیواره جداکننده و زاویه همگرایی بر استهلاک انرژی به صورت جداگانه ارائه خواهد شد. اثر دیواره جداکننده جام و دیواره جداکننده سرتاسری بر استهلاک انرژی جریان عبوری در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها اثر نصب دیواره جداکننده بر میزان استهلاک انرژی با مدل شاهد نیز مقایسه شده است. بررسی مدل شاهد (پرتاب‌کننده جامی متداول) نشان می‌دهد که این سازه می‌تواند حدوداً بین ۶۵ تا ۶۰ درصد انرژی جریان را مستهلک کند. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش دبی جریان عملکرد سازه در استهلاک انرژی کاهش

در این قسمت نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی عملکرد پرتاب‌کننده جامی شکل همگرا همراه با دیواره‌های جداکننده ارائه می‌شود. ایده اصلی از طرح پرتاب‌کننده جامی همگرا از هیدرولیک برخوردار است و ایده اصلی استفاده از دیواره‌های جداکننده از تقسیم جت جریان خروجی از جام گرفته شده است. استهلاک انرژی تابعی از نسبت عمق بحرانی نسبی (y_c/R) که بیانگر اثر شدت جریان ورودی به جام، عدد فرود (Fr) جریان خروجی از جام، زاویه لبه انتهایی جام θ ، زاویه همگرایی جام، Ψ ، اثر دیوار جداکننده جام و λ دیواره جداکننده سرتاسری است. با توجه به اینکه جریان همیشه بر روی تنداب‌ها و در پرتاب‌کننده‌های جامی به طور کامل آشفته است؛ لذا عدد رینولدز در نظر گرفته نمی‌شود. برای از بین رفتن کشش سطحی (عدد وبر) نیز سعی شده است که عمق جریان در آزمایش‌ها بیشتر از ۶ سانتی‌متر باشد. جریان در بالادست سرریزها به دلیل عمق زیاد و سرعت کم دارای اعداد فرود بسیار کمی است لذا عدد فرود مخزن بالادست در نظر گرفته نمی‌شود. البته به دلیل اینکه پرتاب‌کننده‌های جامی علاوه بر سرریزها در انتهای تخلیه کننده‌های تحتانی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند و همگرایی جام در شکل جریان خروجی از آن بسیار مؤثر است لذا عدد فرود جریان

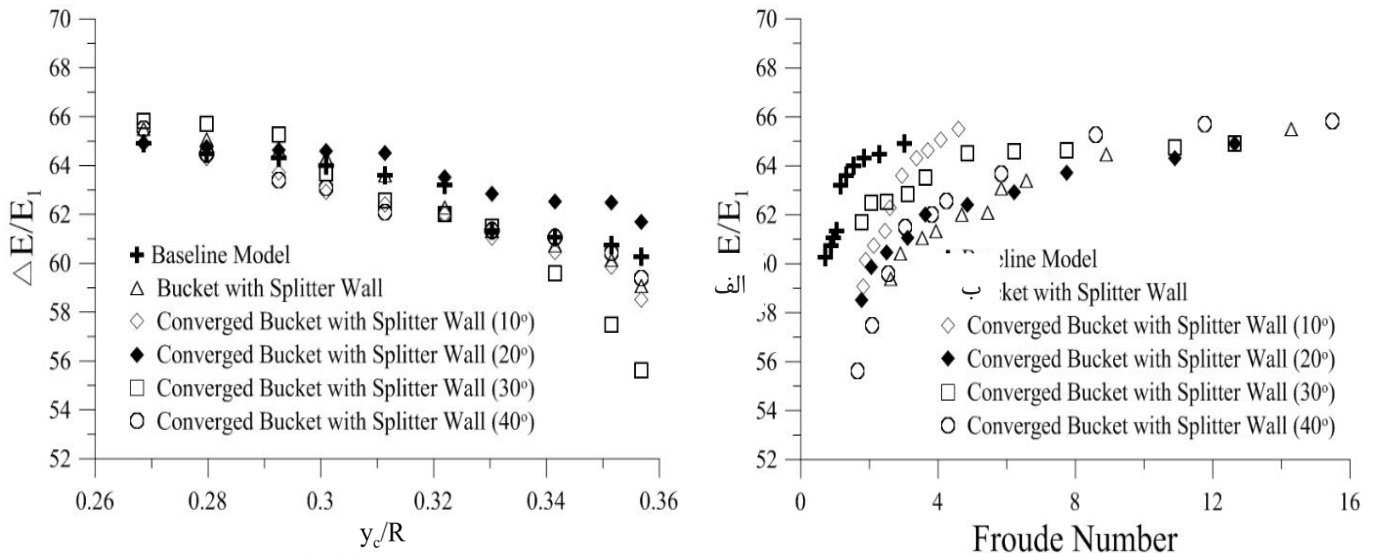


شکل ۳. تأثیر زاویه همگرایی بر میزان استهلاک انرژی جریان در پرتاب‌کننده جامی همگرا
Fig. 3. The effect of convergence angle on the rate of flow energy dissipation in a convergent bucket

نتیجه گرفت که افت موضعی ایجادشده در این حالت در مقایسه با استهلاک انرژی حاصل از برخورد جت جریان با کف حوضچه آرامش قابل‌ملاحظه نیست. در مورد جداکننده دیواره سرتاسری و با توجه به شکل ۱ باید گفت به دلیل گستره سرتاسری آن در طول سرریز و جام، این عارضه تقریباً اختلال قابل‌توجهی در الگوی جریان ایجاد نمی‌کند. این سازه جریان درروی سرریز را به دو قسمت تقسیم می‌کند که اثر آن در ابتدای تنداب به‌صورت یک اختلال کوچک در غالب موج شوک ضعیف پدیدار می‌شود. این موج شوک ضعیف نیز در طول تنداب با افزایش سرعت جریان اضمحلال می‌یابد. به‌صورت کلی می‌توان گفت که دیواره جداکننده سرتاسری، جام را به دو جام کوچک‌تر تقسیم کرده که هر یک عملکرد جداگانه‌ای دارند و در جت جریان خروجی هم‌آشفستگی قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌کند.

در شکل ۳ اثر زاویه همگرایی جام بر استهلاک انرژی جریان ارائه و نتایج آن با مدل شاهد مقایسه شده است. طبق آنالیز ابعادی انجام‌شده در قسمت مواد و روش‌ها، میزان استهلاک انرژی در مقابل پارامترهای عدد فرود جریان خروجی (Fr شکل ۳ الف) از جام و عمق بحرانی نسبی (yc/R شکل ۳ ب) ترسیم‌شده است. قابل‌ذکر است که به هیچ‌یک از این مدل‌ها دیواره‌های جداکننده جام و یا دیواره جداکننده سرتاسری اضافه نشده است. بررسی شکل ۳ ب نشان می‌دهد که اثر همه زوایای همگرایی تا عمق بحرانی نسبی $0/31$ تقریباً باهم برابر است. با افزایش دبی جریان عملکرد همه زوایای

می‌یابد؛ البته این میزان حدود ۵ درصد است. برای توجیه هیدرولیکی آن باید یادآور شد که مقداری از انرژی جریان خروجی از جام از طریق پاشش جت جریان خروجی از جام در هوا مستهلاک می‌شود. چون سطح مقطع جام ثابت است با افزایش دبی جریان، ضخامت تیغه جریان بیشتر شده که به دنبال آن میزان پاشش و پخشیدگی جت جریان در هوا کاهش می‌یابد که در نتیجه میزان استهلاک انرژی (به دلیل پخش جت جریان در هوا) را کاهش می‌دهد. در شکل ۲ عملکرد پرتاب‌کننده جامی در حضور دیواره جداکننده جام و دیواره سرتاسری در مقابل عمق بحرانی نسبی و عدد فرود جریان خروجی از جام ترسیم‌شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده‌شده است اضافه کردن دیواره جداکننده چه در جام و چه به‌صورت سرتاسری تأثیر معنی‌داری بر افزایش یا کاهش عملکرد پرتاب‌کننده جام در استهلاک انرژی جریان ندارد. برای توجیه هیدرولیکی این پدیده بهتر است به شکل ۱ دوباره توجه شود، همان‌طور که در این شکل نشان داده‌شده است اختلال ایجادشده توسط دیواره جداکننده جام در مقطع کوچکی رخ داده (اختلال و افت موضعی) و اثر آن به‌صورت موج شوک ظاهر می‌شود. قابل‌ذکر است که وقتی جریان به‌صورت جت پاششی وارد هوا می‌شود مقداری از اختلال ایجادشده را نیز اضمحلال و اثر آن را خنثی می‌کند. از طرف دیگر همان‌طور که گفته شد، مقدار زیادی از انرژی جریان در اثر برخورد جت جریان با کف حوضچه آرامش پایین‌دست مستهلاک می‌شود بنابراین می‌توان



شکل ۴. استهلاک انرژی جریان بر روی مدل‌های پرتاب‌کننده جامی همگرا با دیوار جداکننده جام
Fig. 4. Flow energy dissipation on converged bucket models with bucket splitter wall

ناشی از برخورد جت‌ها بیش از فشرده شدن جریان عمل می‌کند. به همین دلیل استهلاک انرژی مدل در این حالت بیش از مدل شاهد است. با افزایش زاویه همگرایی انحراف جریان بیشتر شده و برخورد جریان‌ها هم رخ می‌دهد ولی به نظر می‌رسد که استهلاک انرژی ناشی از برخورد جت‌های کناری باهم کمتر از اثر فشرده‌سازی جریان است؛ لذا عملکرد مدل‌ها کاهش پیدا می‌کند.

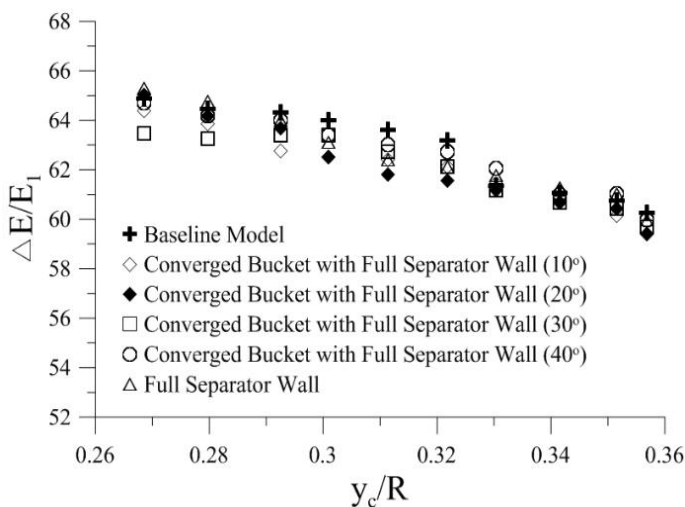
در ادامه اثر توأمان زاویه همگرایی جام و دیواره‌های جداکننده جام و دیواره جداکننده سرتاسری بر استهلاک انرژی جریان محاسبه و در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. اجرای این سناریوها بدین صورت بود که ابتدا جام همگرا ساخته شده و در ادامه دیواره جداکننده (به صورت نصب در جام و سرتاسری) به آن‌ها اضافه شد. بعد از آماده‌سازی مدل‌ها جریان آب بر روی سازه جدید برقرار شد. در این سناریوها نیز میزان استهلاک انرژی در مقابل عمق بحرانی نسبی و عدد فرود جریان خروجی از جام ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها پیدا است برای مقادیر کمتر از ۰/۳۳ عملکرد پرتاب‌کننده جام همگرا با انواع زوایای همگرایی در حضور دیواره جداکننده جام و دیواره جداکننده سرتاسری تقریباً با مدل شاهد برابر است. به عبارت دیگر نه زاویه همگرایی، نه دیواره جداکننده (چه به صورت جداکننده جام و چه به صورت سرتاسری) به صورت استفاده توأمان با دفلکتورها (زاویه‌های همگرایی) برای مقادیر کمتر از ۰/۳۳

همگرایی به جز زاویه همگرایی ۲۰ درجه کاهش می‌یابد. در عمق بحرانی نسبی برابر با ۰/۳۶، در زاویه همگرایی ۲۰ درجه استهلاک انرژی جریان حدوداً ۵ درصد افزایش یافته و در زاویه همگرایی ۴۰ درجه حدوداً پنج درصد، زاویه همگرایی ۱۰ درجه حدوداً ۱۰ درصد و زاویه همگرایی ۳۰ درجه حدوداً ۱۵ درصد کاهش یافته است. دلیل اصلی کاهش عملکرد را می‌توان کاهش پخشیدگی جت جریان خروجی از جام دانست. جام همگرا با فشرده‌سازی جت جریان خروجی از شدت پخشیدگی آن در هوا می‌کاهد و همین باعث می‌شود که سطح اصطکاک جت جریان با هوا کاهش می‌یابد؛ لذا مقدار کمتری از انرژی جریان کاسته می‌شود. البته باید در نظر داشت که همگرایی جام سبب انحراف لایه‌های کناری جت جریان خروجی از جام به طرف مرکز جریان می‌شود تا جایی جت‌های جریان به هم برخورد نمایند. در زاویه همگرایی ۱۰ درجه، جت جریان خروجی از جام نسبت به مدل متداول فشرده‌تر می‌شود و پخشیدگی آن در هوا کمتر می‌شود. در این حالت انحراف لایه‌های کناری به سمت مرکز رخ می‌دهد ولی این انحراف به اندازه‌ای نیست که برخورد لایه‌های کناری به یکدیگر رخ دهد. لذا عملکرد مدل در رابطه با استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه همگرایی تا ۲۰ درجه انحراف بیشتری در لایه‌های کناری رخ داده به طوری که لایه‌های کناری منحرف شده بعد از خروج از جام به هم برخورد می‌نمایند. در این حالت میزان استهلاک انرژی

سرتاسری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است پرتاب‌کننده جامی همگرا با دیواره جداکننده سرتاسری می‌تواند انرژی جریان عبوری را حدوداً بین ۶۵ تا ۶۰ درصد مستهلک نماید. در این شکل‌ها علاوه بر جام‌های همگرا با دیواره جداکننده سرتاسری، مدل شاهد و مدل پرتاب‌کننده جامی معمول با دیواره جداکننده سرتاسری هم نشان داده شده است. بررسی نتایج ارائه شده در این شکل مشخص می‌نماید که اضافه کردن دیواره سرتاسری تأثیر چشمگیری بر روی عملکرد سازه پرتاب‌کننده جامی همگرا ندارد و عملکرد همه مدل‌های مورد آزمایش در حضور دیواره جداکننده سرتاسری با مدل شاهد تقریباً برابر است. نکته قابل توجه در مورد دیواره جداکننده سرتاسری این است که دیواره جداکننده سرتاسری اثر همگرایی سازه (زاویه همگرایی ۳۰ درجه) را در کاهش استهلاک انرژی را از بین می‌برد.

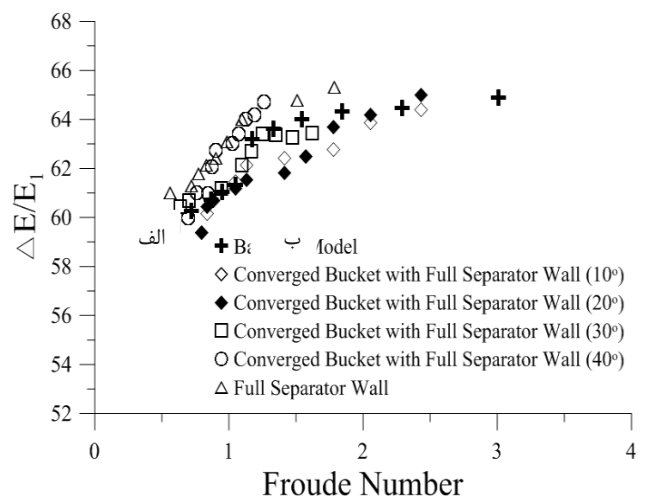
مقایسه کلی نتایج به دست آمده از مدل‌های مورد آزمایش ارائه شده در جدول (۱) نشان می‌دهد که زاویه همگرایی ۲۰ درجه عملکرد جام را در استهلاک انرژی حدوداً ۵ درصد افزایش می‌دهد. کمترین عملکرد مربوط به زاویه ۳۰ درجه است که عملکرد مدل را حدوداً ۱۵ درصد کاهش می‌دهد. قابل توجه است که اضافه کردن دیواره جداکننده در جام تأثیر معنی‌داری بر میزان استهلاک انرژی ندارد حال آنکه اضافه کردن دیواره سرتاسری کاهش عملکرد مدل را در اثر زاویه همگرایی ۳۰ درجه از بین می‌برد.

۵- نتیجه‌گیری



عمق بحرانی نسبی تأثیری بر عملکرد سازه در رابطه با استهلاک انرژی ندارند و با افزایش دبی جریان (عمق بحرانی نسبی) تأثیر هریک مشهود می‌شود. بررسی الگوی جریان نشان می‌دهد که استفاده از دیواره جداکننده مقداری از اختلال ایجاد شده توسط دفلیکتورهای همگرا را کاهش می‌دهد. بدین صورت که دیواره جداکننده در جام تولید یک موج شوک در خلاف جهت موج شوک ایجاد شده توسط دفلیکتورها می‌کند و در مقادیر کم دبی، مانع از برخورد جت‌های خروجی از جام همگرا می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ آورده شده است عملکرد جام همگرا با زوایای همگرایی ۴۰ و ۱۰ درجه همراه با دیواره جداکننده جام با مدل شاهد برای اعماق بحرانی نسبی کمتر از ۰/۳۳ تقریباً یکسان است. برای مقادیر بیش از ۰/۳۳ عمق بحرانی نسبی، جام همگرا با زاویه همگرایی ۲۰ درجه و دیواره جداکننده جام بیشترین بازده را در استهلاک انرژی دارد. این مدل می‌تواند انرژی جریان را حدوداً بین ۶۵ تا ۶۲ درصد مستهلک نماید و نسبت به مدل شاهد در مقادیر زیاد دبی حدوداً ۵ درصد بازده بیشتری دارد. جام همگرا با زاویه ۳۰ درجه نیز حدود ۱۲ درصد استهلاک انرژی را کاهش می‌دهد. مقایسه این مدل با مدل جام متداول همراه با دیواره جداکننده جام نشان می‌دهد که اضافه کردن دیواره جداکننده جام تأثیر معنی‌داری بر عملکرد آن ندارد.

در این قسمت نتایج اثر اضافه کردن دیواره سرتاسری بر عملکرد پرتاب‌کننده جامی همگرا ارائه و بررسی می‌شود. شکل ۵ عملکرد پرتاب‌کننده جامی همگرا با چهار زاویه همگرایی و دیوار جداکننده



شکل ۵. استهلاک انرژی جریان بر روی مدل‌های پرتاب‌کننده جامی همگرا با دیوار جداکننده سرتاسری
 Fig. 5. Flow energy dissipation on converging bucket models with overall splitter wall

- spillways, 2002.
- [2] W.H. Hager, Energy dissipators and hydraulic jump, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, The Hydraulic Investigation of Circular Crested Stepped Spillway, Flow Measurement and Instrumentation, (2019) 101624.
- [4] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, M. Saneie, H. Torabi, Applications of soft computing techniques for prediction of energy dissipation on stepped spillways, Neural Computing and Applications, 29(12) (2018) 1393-1409.
- [5] A. Lauria, G. Alfonsi, Numerical Investigation of Ski Jump Hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, 146(4) (2020) 04020012.
- [6] S.H. Chen, Hydraulic Structures, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [7] V. Heller, W.H. Hager, H.-E. Minor, Ski Jump Hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, 131(5) (2005) 347-355.
- [8] B.o.I. Standards, Criteria of hydraulic design of bucket type energy dissipators, in, Bureau of Indian Standards New Delhi, India, 1985.
- [9] R. Juon, W.H. Hager, Flip Bucket without and with Deflectors, Journal of Hydraulic Engineering, 126(11) (2000) 837-845.
- [10] D. Vischer, W. Hager, Energy dissipators, Oceanographic Literature Review, 1(43) (1996) 87.
- [11] A. Larese, R. Rossi, E. Oñate, S. Idelsohn, Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows, Engineering Computations, (2008).
- [12] R. Steiner, V. Heller, W.H. Hager, H.-E. Minor, Deflector ski jump hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, 134(5) (2008) 562-571.
- [13] T. Zhang, H. Chen, W. Xu, Allotypic hybrid type flip bucket. II: Effect of contraction ratio on hydraulic characteristics and local scour, J. Hydroelec. Eng, 32 (2013) 140-146.
- [14] J. Deng, W. Wei, Z. Tian, F. Zhang, Design of A Streamwise-Lateral Ski-Jump Flow Discharge

در این تحقیق اثر دیواره جداکننده در جام، دیواره جداکننده سرتاسری و زوایای مختلف همگرایی جام بر میزان استهلاک انرژی جریان موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل پرتاب‌کننده جامی متداول در انتهای سرریز اوجی نصب شد. سپس به ترتیب دیواره جداکننده در جام و پرتاب‌کننده سرتاسری نصب شدند و اثر آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس دیواره‌ها از مدل سرریز و جام جدا شده و دفلکتورها با زاویه‌های مختلف به صورت جداگانه نصب و هیدرولیک جریان عبوری از آن‌ها مشاهده شد.

در ادامه علاوه بر دفلکتورهای همگرا، دیواره‌های جداکننده نیز به مدل‌ها اضافه شد و عملکرد آن‌ها در استهلاک انرژی محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که پرتاب‌کننده جامی حدوداً بین ۶۵ تا ۶۰ درصد انرژی جریان را می‌تواند مستهلک نماید. اضافه کردن دیواره جداکننده در جام و یا دیواره سرتاسری تأثیر معنی‌داری در افزایش استهلاک انرژی جریان عبوری از مدل پرتاب‌کننده جامی متداول ندارد. دلیل آن‌هم این است که اختلال ایجادشده توسط دیواره جداکننده جام در محدوده کمی (اختلال موضعی) رخ داده و در ادامه جریان به صورت جت پاششی به هوا وارد می‌شود.

وقتی جریان وارد هوا می‌شود اثر اختلال موضعی را نیز تا حد قابل قبولی اضمحلال می‌کند. از طرف دیگر افت موضعی ایجادشده در اثر آن در مقایسه با استهلاک انرژی که در اثر برخورد و سقوط جت جریان با حوضچه آرامش پایین‌دست است بسیار ناچیز است. در مورد دیواره سرتاسری باید گفت که این سازه تقریباً اختلال موضعی در الگوی جریان ایجاد نکرده و تقریباً جام را به دو قسمت با عملکرد مجزا تقسیم می‌کند. در مورد اثر زاویه‌های همگرایی دفلکتورها نیز باید گفت که زاویه همگرایی ۲۰ درجه حدوداً ۵ درصد استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد و ۳۰ درجه زاویه همگرایی عملکرد مدل جام همگرا حدوداً ۱۵ درصد کاهش می‌دهد. قابل ذکر است که اضافه کردن دیواره جداکننده در جام همگرا با زاویه ۳۰ درجه تأثیری بر عملکرد آن ندارد ولی اضافه کردن دیواره سرتاسری کاهش عملکرد آن را خنثی می‌کند.

منابع

- [1] H. Chanson, The hydraulics of stepped chutes and

- [19]M. Kakeshpour, M. Pirestani, M. Zakeri Niri, Numerical Simulation of Jet Flow and Investigation Effect of Triangular Shape of Bucket, and Gate Opening Ratio on Flip Bucket Jet Flow Characters, *Water and Soil Science*, 26(1-1) (2016) 291-303.
- [20]M. Kakeshpour, M. Pirestani, M. Zakeri Niri, Numerical simulation of overflow with consider of shape of flip bucket in chute spillway, *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(5) (2016) 223-237.
- [21]M. Omidvarinia, S. Mousavijahromi, Comparative Analysis of energy Losses in the Traditional and Triangular Flip Buckets, *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1) (2014) 133-142.
- [22] S. Farzin, H. Karami, M. Fazlollahnejad, S. Nayyer, Numerical Modeling and Analysis of Flow Hydrodynamics in Flip Bucket and Approach Channel, *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*, 13(41) (2018) 41-50.
- Spillway, *Water*, 10(11) (2018) 1585.
- [15]J. Kerman-Nejad, M. Fathi-Moghadam, B. Lashkarara, S. Haghighipour, Dynamic pressure of flip bucket jets, *World applied sciences journal*, 12(8) (2011) 1165-1171.
- [16]M. Sadeghi Askari, H. Mousavi, M. Ghomeshi, Investigation the Effect of Wedge-Shaped Deflector Length and Angle in Energy Dissipation on the Flip Bucket Spillway, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 39(4) (2017) 225 - 235.
- [17]M. Sadeghi Askari, M. Ghomeshi, Energy Dissipation due to Deflector in Simple Flip Bucket Spillway and Flip Bucket Spillway with Approach Channel, *Water and Soil Science*, 23(4) (2014) 131-140.
- [18]M. Sadeghi Askari, M. GHomeshi, Energy dissipation due to deflector in simple flip bucket spillway and flip bucket spillway with approach channel, *Iranian Water Research Journal*, 23(4) (2013) 131-141.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mollazadeh, G. R. Azizyan, M. K. Beirami., (2021). *Energy Dissipation of Converged Ski-jump Buckets by using Dividing Wall*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 2195-2206.

DOI: [10.22060/CEEJ.2021.17990.6729](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2021.17990.6729)



