

بررسی تأثیر زاویه جام بر ابعاد آبشستگی در پایین دست پرتاب کننده جامی مستغرق

سحر پناهی^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۳، فرزین سلماسی^۴ و امیر حسین ناظمی^۵

چکیده

زاویه لبه جام به عنوان پارامتر اصلی طراحی پرتاب کننده جامی مستغرق، نقش به سزایی در استهلاک انرژی و آبشستگی در پایین دست این سازه دارد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر زاویه جام بر روند آبشستگی، تعیین بهترین زاویه جام و ارایه معادلات رگرسیونی غیر خطی برآورد ابعاد آبشستگی در پایین دست این سازه است. به همین منظور ۶۴ آزمایش در شرایط هیدرولیکی مختلف و روی ۴ مدل آزمایشگاهی با زوایای جام 30° ، 35° ، 40° ، 45° انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه جام از 30° به 45° حداکثر عمق حفره، گسترش طولی حفره، ارتفاع پشته بالادست و پایین دست و ارتفاع نسبی موج به ترتیب به مقدار متوسط 150% ، 27% ، 110% ، 24% و 213% افزایش می یابند. بر اساس نتایج این پژوهش زاویه 30° گزینه خوبی برای کاهش حداکثر عمق حفره آبشستگی، حجم آبشستگی، ارتفاع پشته ها و ناهمواری سطح پایاب تا کمینه حد ممکن و زاویه 40° نیز گزینه مناسبی جهت افزایش فاصله ابتدای حفره، عمیق ترین نقطه حفره و موج تا بیشینه حد ممکن است. هر یک از این زوایا دارای فواید کاهش آبشستگی بستر، کاهش خوردگی جام (در اثر گیر افتادن ذرات در عملکرد نامتقارن سرریز) و کاهش اثرات منفی ناهمواری سطح پایاب بر عملکرد تخلیه کننده ها و حاشیه رودخانه هستند.

واژه های کلیدی: آبشستگی، پرتاب کننده جامی مستغرق، رگرسیون غیر خطی، زاویه لبه جام، مستهلک کننده انرژی.

ارجاع: پناهی س. فرسادی زاده د. حسین زاده دلیر ع. سلماسی ف. و ناظمی ا. ح. ۱۳۹۲. بررسی تأثیر زاویه جام بر ابعاد آبشستگی در پایین دست پرتاب کننده جامی مستغرق. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳): ۱۸۵-۱۹۵.

۱- کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۵- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: panahi7346@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۹

مقدمه

با احداث سدهای بلند در مسیر رودخانه، تخلیه سیلاب مازاد بر گنجایش مخزن سد به وسیله سرریزها انجام می‌شود. با توجه به اینکه سرریز جریان را از حالت زیربحرانی به فوق‌بحرانی تبدیل می‌کند، انرژی جنبشی جریان در انتهای سرریز بسیار زیاد است و می‌تواند موجب فرسایش در پایین‌دست سرریز شود. بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستهلک کننده انرژی در قسمت انتهایی دارد تا انرژی مازاد جریان خروجی با عبور از آن کاهش یافته و میزان فرسایش و آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز به حداقل برسد. در سال‌های اخیر استفاده از پرتاب کننده‌های جامی به دلیل مزایای اقتصادی این سازه در مقایسه با سایر مستهلک کننده‌ها مثل حوضچه آرامش، بیشتر توجه شده است. همچنین پرتاب کننده جامی در حالت مستغرق به دلیل شرایط مناسب‌تر استهلاک انرژی، آب‌شستگی کمتری را نسبت به حالت آزاد ایجاد می‌کند که این مطلب بیانگر اهمیت کاربرد پرتاب کننده جامی مستغرق است. با این وجود عدم کنترل آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه باعث پیشرفت حفره آب‌شستگی به سمت سازه، کاهش طول تراوش از مخزن سد و افزایش جریان زیر سازه‌ای شده، می‌تواند پایداری سد، سرریز و سازه‌های مجاور را به خطر انداخته و حتی منجر به شکست آن‌ها شود. بنابراین پیش‌بینی موقعیت و دامنه گسترش آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه، به خصوص هنگامی که بستر پایین‌دست آبرفتی باشد ضروری است. با برآورد ابعاد حفره آب‌شستگی قبل از احداث این سازه، در صورت لزوم می‌توان از حوضچه کاهش انرژی، سنگ‌چین یا بلوک‌های بتنی به منظور مهار و یا کاهش آب‌شستگی استفاده کرد و از بروز خطرات احتمالی جلوگیری کرد. تاکنون مطالعات زیادی روی آب‌شستگی ناشی از جت‌های پرتابی انجام شده است. میسن و آروموگام (۱۹۸۵) تمام معادلاتی را که پژوهشگران جهت برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی جت‌های پرتابی ارائه کرده بودند، از جمله معادلات ورونزه (۱۹۳۷)، چی و پادیار (۱۹۶۹)، چی و کانگ (۱۹۷۴)، مارتینز (۱۹۷۵)، ماچادو (۱۹۸۰)، سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه^۱ (۱۹۸۰)،

مؤسسه ملی علم و فناوری آزمایشگاهی هیدرولیک^۲ (۱۹۸۱) را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کردند. میسن و آروموگام (۱۹۸۵) به منظور تعیین دقت معادلات مختلف، از ۴۷ داده مدل فیزیکی و ۲۶ داده صحرایی استفاده کرده و نتیجه گرفتند که بهترین جواب برای داده‌های مدل آزمایشگاهی را معادلات مارتینز (۱۹۷۵) و چی و کانگ (۱۹۷۴) و سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه (۱۹۸۰) ارائه داده‌اند. بر اساس مطالعات میسن و آروموگام (۱۹۸۵)، در نظر گرفتن پارامتر عمق پایاب، باعث افزایش دقت معادلات خواهد شد که فقط شامل پارامترهای دبی جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات هستند و به این ترتیب معادله جدیدی ارائه کردند. استرلچاک (۱۹۶۹) آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب کننده 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 30° به 45° حداکثر عمق آب‌شستگی ۱۶ درصد افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش مولفه قائم در اثر زاویه تندتر جت هنگام برخورد به پایاب است. عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب کننده‌های جامی آزاد را پیش‌بینی کردند و دریافتند که روش شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به معادلات رگرسیونی و تجربی متداول دارد، همچنین استفاده از اطلاعات شعاع و زاویه جام، اندازه ذرات و عمق پایاب به همراه اطلاعات مورد نیاز معادلات تجربی که دبی در واحد عرض و ارتفاع ریزش می‌باشند ضروری است و استفاده از متغیرهای بدون بعد نتایج بهتری نسبت به متغیرهای خام می‌دهد. معادلات ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند که q دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه بر متر)، θ زاویه جام (برحسب رادیان)، d_{50} و d_{90} قطری که به ترتیب ۵۰ و ۹۰ درصد ذرات از آن کوچک‌ترند، H ارتفاع ریزش، R شعاع جام، Y_t عمق پایاب و D حداکثر عمق آب‌شستگی از سطح پایاب برحسب متر هستند.

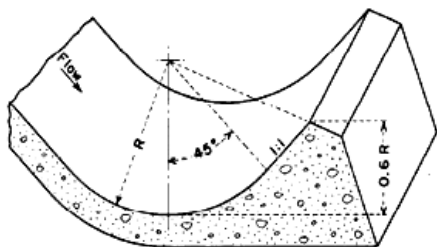
2- Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas Laboratorio de Hidráulica (INCYTH-LHA)

1- Societe Francaise d'Etudes et de Realisation d'Equipement Electriques (SOFRELEC)

جدول ۱- بعضی معادلات موجود برای پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی جت‌های پرتابی

پژوهشگر	سال	معادله
وروزنه	۱۹۳۷	$D = 1.9q^{0.54} H^{0.225}$
چی و پادیار	۱۹۶۹	$D = 2.126q^{0.67} H^{0.18} / d_{50}^{0.063}$
چی و کانگ	۱۹۷۴	$D = 1.663q^{0.6} H^{0.2} / d_{50}^{0.1}$
مارتینز	۱۹۷۵	$D = 1.5q^{0.6} H^{0.1}$
ماچادو	۱۹۸۰	$D = 1.35q^{0.5} H^{0.3145} / d_{90}^{0.0645}$
سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه	۱۹۸۰	$D = 2.3q^{0.6} H^{0.1}$
مؤسسه ملی علم و فناوری آزمایشگاهی هیدرولیک	۱۹۸۱	$D = 1.413q^{0.5} H^{0.25}$
میسن و آروموگام	۱۹۸۵	$D = (6.42 - 3.1H^{0.1})q^{(0.6-0.0033H)} H^{(0.15-0.005H)} Y_t^{0.15} g^{-0.3} d^{-0.1}$ برای مدل $d = d_{50}$ و برای پروتوتیپ $d = d_{90}$
استرلچاک	۱۹۶۹	$\frac{D}{H} = 3.695 \left(\frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.3} \left(\frac{H}{d} \right)^{0.1} (\theta)^{0.36}$
عظمت‌اله و همکاران	۲۰۰۵	$\frac{D}{Y_t} = 6.914 \left(\frac{q}{\sqrt{gY_t^3}} \right)^{0.694} \left(\frac{H}{Y_t} \right)^{0.0815} \left(\frac{R}{Y_t} \right)^{-0.233} \left(\frac{d_{50}}{Y_t} \right)^{0.196} (\theta)^{0.196}$

سرریز اوجی، شوت و پرتاب کننده‌های جامی غلتکی از جنس پلی‌اتیلن و توسط دستگاه برش CNC^۱ لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر ساخته شدند. مدل سرریز اوجی بر اساس استاندارد سازمان عمران اراضی ایالات متحده^۲ به عرض ۲۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر، طول ۳۹ سانتی‌متر طراحی شد که دارای یک شوت با شیب ۱:۰/۷ و پنجه با شعاع قوس ۱۲ سانتی‌متر در انتهای شوت بود. چهار مدل آزمایشگاهی جام با الگوبرداری از پرتاب کننده جامی مستغرق سد گراندکولی (شکل ۱) (که توسط سازمان عمران اراضی ایالات متحده در سال ۱۹۳۳ طراحی و اجرا شد) با شعاع ثابت ۱۲ سانتی‌متر و زوایای متفاوت ۳۰°، ۴۵°، ۴۰° در لبه جام ساخته شدند و به صورت متحرک در انتهای سرریز نصب شدند (شکل ۲).



شکل ۱- پرتاب کننده جامی مستغرق سد گراندکولی

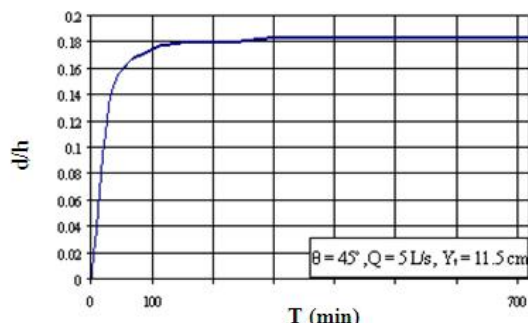
هدف از این پژوهش بررسی تأثیر زوایای مختلف لبه پرتاب کننده جامی مستغرق بر ابعاد آب‌شستگی در پایین دست سازه و تعیین بهترین زاویه برای کاهش ابعاد آب‌شستگی و ناهمواری سطح پایاب و همچنین استخراج معادلات بدون بعد برآورد ابعاد آب‌شستگی که کارایی بیشتری نسبت به معادلات با بعد دارند، است. به همین منظور ابتدا با تعیین پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی و تحلیل ابعادی روی آن‌ها پارامترهای بی‌بعد به دست آمد. سپس با انجام آزمایش‌های متعدد روی مدل‌های آزمایشگاهی، داده‌های لازم استخراج شد و نمودارهای تأثیر زاویه جام بر ابعاد حفره، پشته‌ها و موج تجزیه و تحلیل شد و روند تغییرات مشخص شد. همچنین به کمک روش آماری و برازش مدل‌های چند متغیره، معادلات رگرسیونی غیرخطی بی‌بعد با بهترین ضریب همبستگی انتخاب شدند و در انتها دقت نتایج به دست آمده با استفاده از داده‌ها و معادلات پژوهشگران دیگر، ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در یک فلوم مستطیلی فلزی- شیشه‌ای به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر با شیب کف ۰/۰۰۲۲ انجام شد. مدل آزمایشگاهی شامل

1- Computerized Numerical Controlled (CNC)
2- United State Bureau of Reclamation (USBR)

برابر زمان در طول ۱۲ ساعت در شکل ۴ رسم شد. مشاهده این نمودار و نمودارهای دیگر نشان داد که بعد از حدود ۵ ساعت، نرخ افزایش عمق آب‌شستگی کاهش یافته و تقریباً به صفر می‌رسد و آب‌شستگی به تعادل نسبی می‌رسد.



شکل ۴- توسعه زمانی آب‌شستگی در ۱۲ ساعت

مراحل انجام هر آزمایش به ترتیب شامل تنظیم دبی (توسط شیر فلکه و سرریز مثلثی)، تراز کردن سطح بستر (توسط ماله) و تنظیم تراز پایاب (با باز کردن تدریجی دریچه انتهایی کانال) در هنگام شروع آزمایش، اندازه‌گیری تراز آب بالادست و پایین‌دست و تراز آب در ورودی جام و روی تقعر جام و ارتفاع موج (توسط سطح‌سنج‌ها) در حین آزمایش، قطع آزمایش بعد از ۵ ساعت با بستن دریچه و شیر فلکه ورودی کانال و تخلیه آب کانال و در نهایت برداشت پروفیل حفره آب‌شستگی و پشته‌های بالادست و پایین‌دست با سطح‌سنج است. با آزمایش هر یک از چهار پرتاب کننده جامی در چهار دبی و چهار عمق پایاب مختلف در مجموع ۶۴ آزمایش انجام شد. که محدوده تغییرات پارامترهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. مکانیسم آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب کننده جامی مستغرق ساده و پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی که شامل مشخصات جریان، مواد بستر و سازه هستند در شکل ۵ دیده و در جدول ۳ معرفی می‌شوند.



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی و پرتاب کننده‌های جامی متحرک با زوایای مختلف 30° ، 35° ، 40° و 45°

ارتفاع کف و لبه جام در تمام مدل‌ها به ترتیب ۴/۴ و ۱۱/۶ سانتی‌متر بود و لبه جام با یک شیب منفی ملایم 15° به اندازه 0.05 شعاع جام (۶ میلی‌متر) پایین آمده و هم‌تراز با مواد بستر قرار می‌گرفت. برای ایجاد بستر متحرک بعد از پرتاب کننده جامی، $1/4$ متر از طول فلوم به ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر از رسوبات یکنواخت شن به قطر متوسط ۳ میلی‌متر و انحراف معیار $1/3$ و چگالی $2/56$ پر شد و بقیه کانال توسط کف کاذب با منطقه مورد آزمایش هم‌تراز شد. شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مواد بستر را نشان می‌دهد.

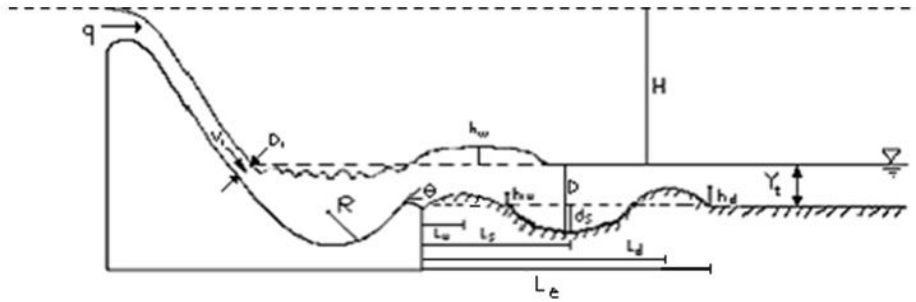


شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مواد بستر

برای تعیین زمان تعادل، یک آزمایش ۱۲ ساعته با دبی و عمق پایاب مشخص انجام شد و با اندازه‌گیری پروفیل طولی آب‌شستگی (توسط لیمینی‌متر) در محور کانال و در زمان‌های مشخص از شروع آزمایش، حداکثر عمق آب‌شستگی در هر زمان معلوم شد. سپس منحنی تغییرات حداکثر عمق حفره آب‌شستگی نسبت به ارتفاع سرریز در

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای مختلف

قطر متوسط ذرات (میلی‌متر)	شعاع جام (سانتی‌متر)	ارتفاع ریزش (سانتی‌متر)	عمق پایاب (سانتی‌متر)	دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه بر متر)	زاویه لبه جام (درجه)
۳	۱۲	۱۴/۸-۲۲/۷	۶-۱۶	۰/۰۱۳۷-۰/۳۶۳	30° - 45°



شکل ۵- پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب کننده جامی مستغرق

جدول ۳- معرفی پارامترهای دخیل در آب‌شستگی

q : دبی جریان در واحد عرض سرریز (مترمکعب بر ثانیه بر متر)	g : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)	h_u : ارتفاع پشته بالادست (متر)
Y_t : عمق پایاب بلافاصله پس از استهلاک جت (متر)	d_{50} : قطر متوسط مواد بستر (متر)	L_u : فاصله تاج پشته بالادست از لبه جام (متر)
θ : زاویه لبه جام (رادیان)	T : زمان از آغاز آب‌شستگی (ثانیه)	h_d : ارتفاع پشته پایین دست (متر)
R : شعاع جام (متر)	D : حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به سطح پایاب (متر)	L_d : فاصله تاج پشته پایین دست از لبه جام (متر)
D_1 : ضخامت تیغه آب ورودی به جام (متر)	d_s : حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به تراز اولیه بستر (متر)	L_e : طول کل محدوده آب‌شستگی (متر)
V_1 : سرعت جریان قبل از ورود به جام و در تراز پایاب (متر بر ثانیه)	L_s : فاصله حداکثر عمق آب‌شستگی از لبه جام (متر)	$(L_e - X_2)$: گسترش طولی پشته پایین دست (متر)
H : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب مخزن و پایاب (متر)	X_1, X_2 : نقطه ابتدا و انتهای حفره (متر)	h_w : ارتفاع نسبی موج (متر)
ρ_s, ρ_w, μ : لزجت آب، جرم حجمی آب، جرم حجمی مواد بستر	$(X_2 - X_1)$: گسترش طولی حفره (متر)	L_w : فاصله موج از لبه جام (متر)

آنالیز ابعادی

ابعاد حفره آب‌شستگی شامل D, L_s, X_1, X_2, L_e ابعاد پشته‌ها شامل h_u, L_u, h_d, L_d و ابعاد موج شامل h_w ، L_w توسط نماد ϕ و به صورت معادله ۱ نمایش داده می‌شوند. با توجه به این که شعاع جام ثابت می‌باشد و ابعاد آب‌شستگی در زمان تعادل مد نظر است، پارامترهای R و T حذف می‌شوند. با انتخاب سه متغیر تکراری q, Y_t, ρ_w و با روش باکینگهام پارامترهای بی‌بعد طبق معادله ۲ به دست می‌آیند.

معادله ۱

$$\phi = f_1(q, Y_t, \theta, H, D_1, g, \rho_w, \rho_s, \mu, d_{50}, R, T) \quad (1)$$

معادله ۲

$$\phi/Y_t = f_2(q/\sqrt{gY_t^3}, H/Y_t, D_1/Y_t, d_{50}/Y_t, (\rho_s - \rho_w)/\rho_w, \mu/\rho_w q, \theta) \quad (2)$$

$$\phi/Y_t = f_3(Fr_t, SN, \theta, H/Y_t, d_{50}/Y_t) \quad (3)$$

می‌تواند هر یک از پارامترهای $L_s/Y_t, D/Y_t, h_w/Y_t, h_u/Y_t, h_d/Y_t, L_e/Y_t, (X_2 - X_1)/Y_t$ و ... باشد.

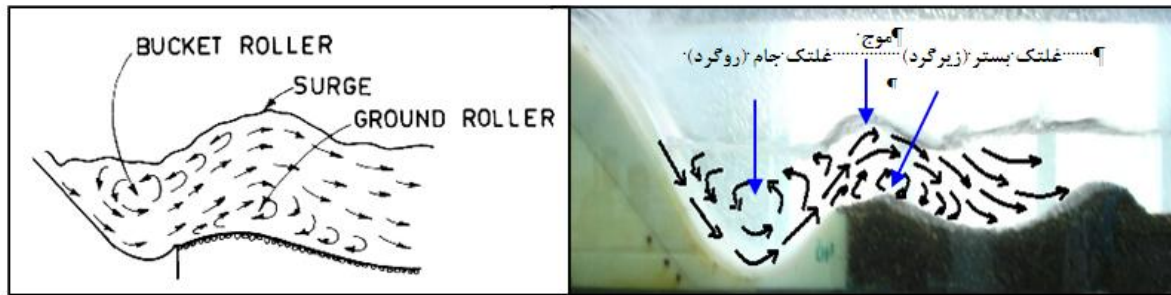
جریان در همه آزمایش‌ها متلاطم بوده و تأثیر لزوجت در جریان‌های متلاطم قابل صرف نظر کردن است، بنابراین پارامتر عدد رینولدز $Re = \mu/\rho q$ حذف می‌شود. پارامتر عدد فرود پایاب نامیده می‌شود. همچنین از ترکیب پارامترهای بی‌بعد $q/\sqrt{gY_t^3}$ و d_{50}/Y_t و D_1/Y_t پارامتر بدون بعد

نتایج و بحث

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود هیدرولیک پرتاب کننده جامی مستغرق بر اساس تحمیل پرش هیدرولیکی به جریان روی برآمدگی منحنی شکل جام و تحت استغراق شدید پایاب می‌باشد که موجب شکل‌گیری موج در سطح آب، جریان غلتکی زیرگرد روی بستر

آمیختن جریان‌ها به شکل غلتک موجب استهلاک انرژی و ایجاد آب‌شستگی در پایین دست می‌شود.

پایین دست جام و جریان غلتکی روگرد در سطح آب روی جام می‌شود که تلاطم و اصطکاک داخلی ناشی از در هم

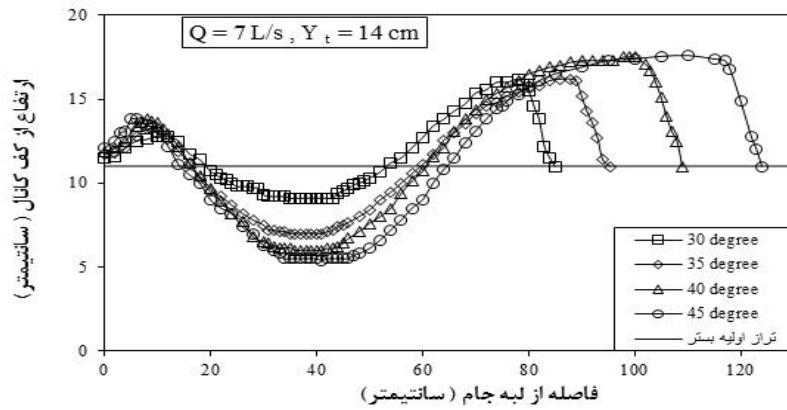


شکل ۶- الگوی جریان و مکانیسم آب‌شستگی پرتاب کننده جامی مستغرق

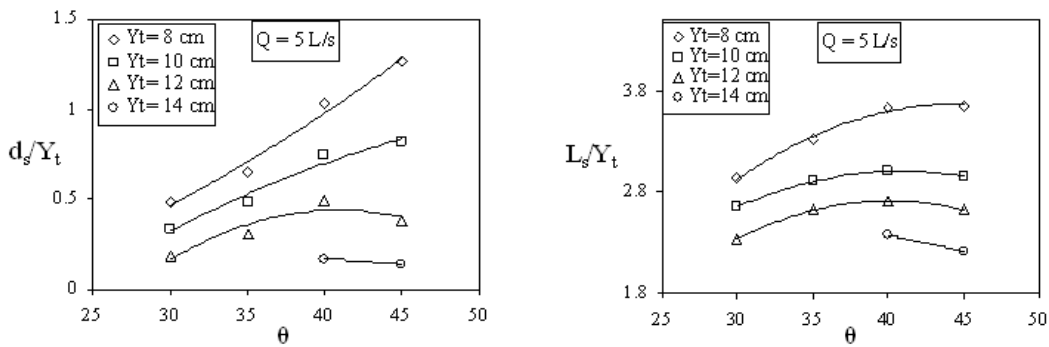
حداکثر عمق آب‌شستگی و فاصله موج روند افزایشی-کاهشی دارند و نمودار آن‌ها به شکل سهمی است. به طوری که با توجه به نمودارهای میله‌ای شکل ۱۲، محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی، با افزایش زاویه جام از 30° به 40° ، ابتدا ۱۹ درصد افزایش و سپس با افزایش زاویه از 40° به 45° ، ۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین عمیق‌ترین نقطه حفره، در زاویه 30° در نزدیک‌ترین فاصله به لبه جام و در زاویه 40° در دورترین فاصله از لبه جام ایجاد می‌شود. بر اساس نمودارهای میله‌ای شکل ۱۲، فاصله موج از لبه جام، با افزایش زاویه از 30° و رسیدن به 35° و 40° به طور متوسط ۴ درصد افزایش یافته سپس ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین موج در زوایای 35° و 40° در دورترین فاصله و در زاویه 45° در نزدیک‌ترین فاصله به لبه جام تشکیل می‌شود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که حفره آب‌شستگی در زاویه جام 40° در دورترین فاصله از لبه جام و در زاویه جام 45° در نزدیک‌ترین فاصله به لبه جام شروع می‌شود. همچنین با افزایش زاویه از 30° به 45° ، فاصله انتهای حفره به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش می‌یابد، فاصله تاج پشته بالادست به طور متوسط ۹ درصد کاهش می‌یابد، فاصله تاج پشته پایین دست به طور متوسط ۳۷ درصد افزایش می‌یابد و طول کل محدوده آب‌شستگی نیز به طور متوسط ۵۷ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۷ نمودار تأثیر زاویه جام بر پروفیل طولی آب‌شستگی در یک شرایط ثابت جریان است. برای تعیین روند قطعی و قابل تعمیم تغییرات در شرایط متفاوت دبی و پایاب، نمودارهای بی‌بعد تأثیر زاویه جام بر ابعاد آب‌شستگی در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و برای تعیین مقدار متوسط تغییرات، نمودارهای میله‌ای متوسط درصد تغییرات ابعاد حفره، پشته‌ها و موج با افزایش زاویه از 30° به 45° با میانگین‌گیری از داده‌های پانزده آزمایش در شرایط متفاوت دبی و عمق پایاب در شکل ۱۲ رسم شده است. مقایسه پروفیل‌های طولی شکل ۷ و نمودارهای بی‌بعد شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش زاویه جام از 30° به 45° پارامترهای حداکثر عمق آب‌شستگی، گسترش طولی حفره و پشته پایین دست، ارتفاع پشته بالادست و پایین دست و ارتفاع موج روند کاملاً افزایشی دارند.

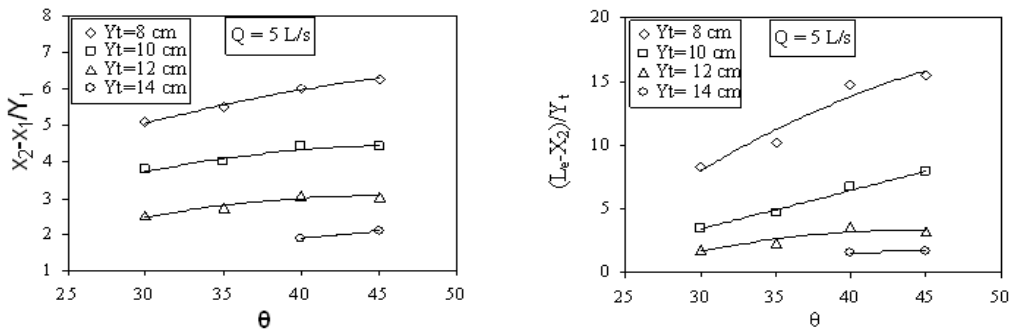
مقدار متوسط این تغییرات در نمودارهای میله‌ای شکل ۱۲ قابل مشاهده است به طوری که با افزایش زاویه جام از 30° به 45° حداکثر عمق آب‌شستگی به طور متوسط ۱۵۰ درصد، گسترش طولی حفره به طور متوسط ۲۷ درصد، ارتفاع پشته بالادست به طور متوسط ۱۱۰ درصد، ارتفاع پشته پایین دست به طور متوسط ۲۴ درصد، گسترش طولی پشته پایین دست به طور متوسط ۱۰۲ درصد و ارتفاع نسبی موج به طور متوسط ۲۱۳ درصد افزایش می‌یابند. در حالی که پارامترهای محل وقوع



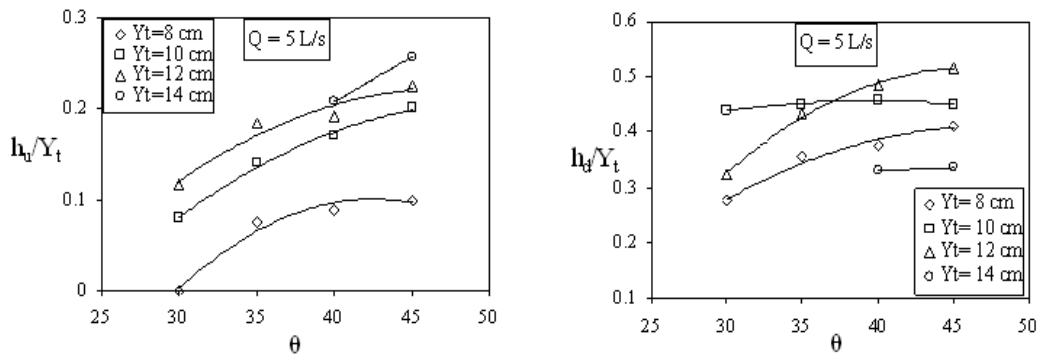
شکل ۷- تغییرات پروفیل طولی آب‌شستگی برای زوایای مختلف جام در یک دبی و عمق پایاب ثابت



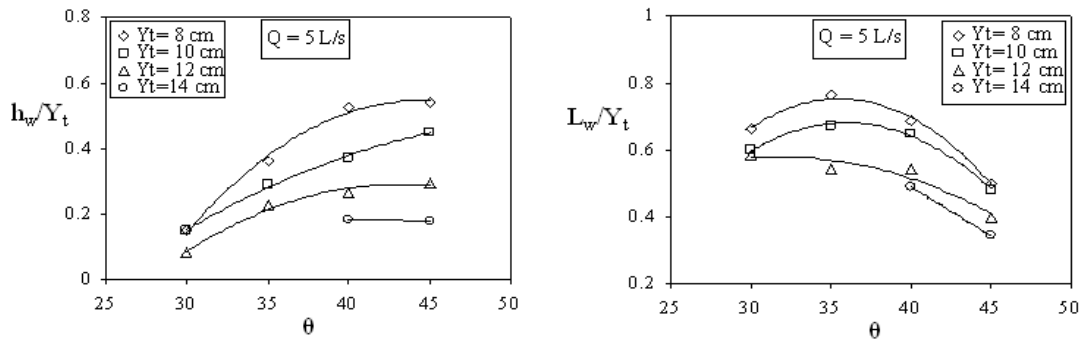
شکل ۸- نمودارهای بی‌بعد تأثیر زاویه جام بر حداکثر عمق حفره (d_s) و محل وقوع حداکثر عمق حفره (L_s)



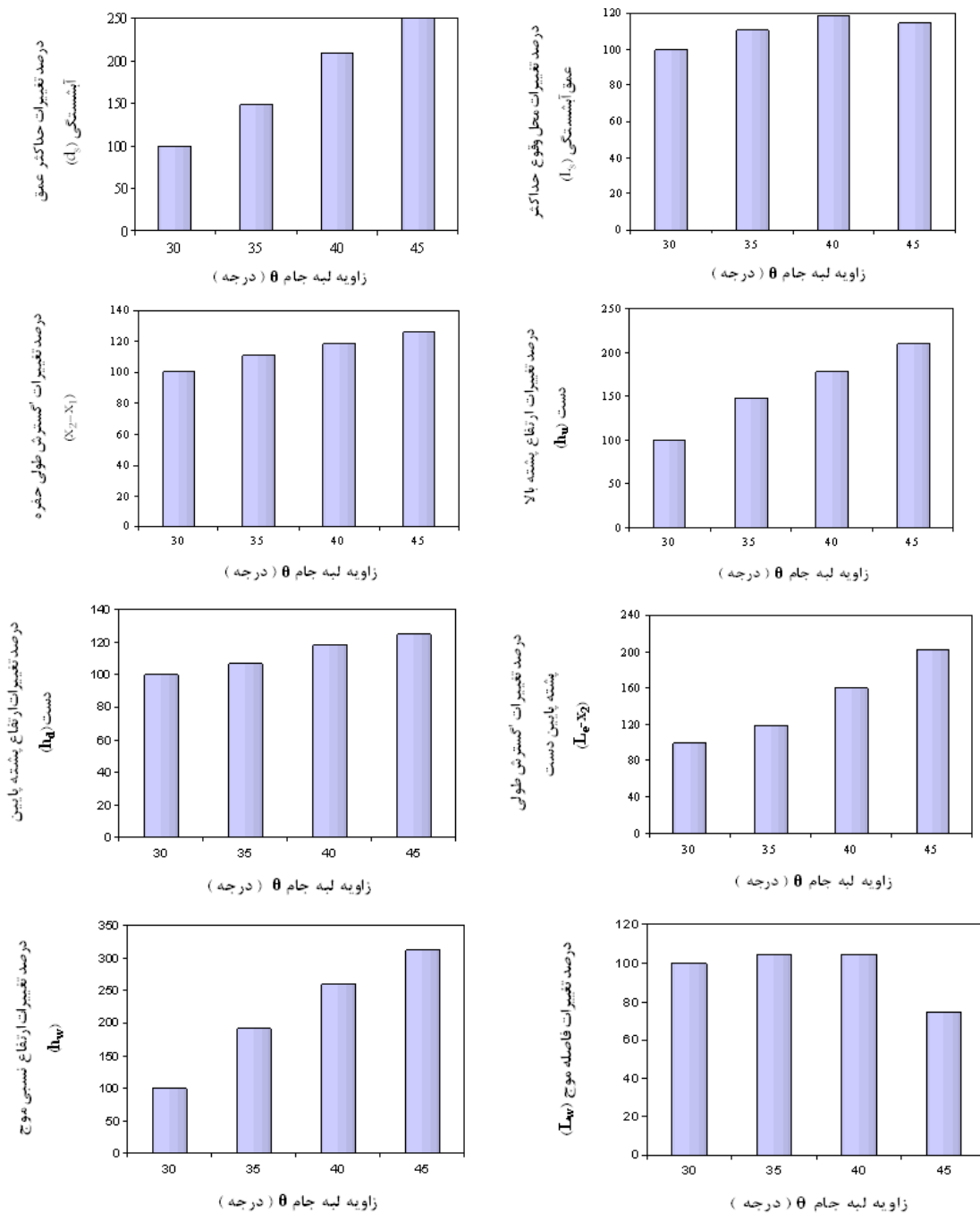
شکل ۹- نمودارهای بی‌بعد تأثیر زاویه جام بر گسترش طولی حفره ($X_2 - X_1$) و گسترش طولی پشته پایین دست ($L_e - X_2$)



شکل ۱۰- نمودارهای بی‌بعد تأثیر زاویه جام بر ارتفاع پشته بالادست (h_u) و ارتفاع پشته پایین دست (h_d)



شکل ۱۱- نمودارهای بی بعد تأثیر زاویه جام بر ارتفاع نسبی موج (h_w) و طول موج (L_w)



شکل ۱۲- نمودارهای میله‌ای متوسط درصد تغییرات ابعاد حفره، پشته‌ها و موج با افزایش زاویه از 30° به 45°

۴ استفاده شد. همان‌طور که دیده می‌شود معادلات رگرسیونی غیرخطی، ورونزه (۱۹۳۷)، ماچادو (۱۹۸۰)، سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه (۱۹۸۱)، مارتینز (۱۹۷۵) و چی و پادیار (۱۹۶۹) دارای کمترین درصد خطای میانگین هستند و بعد از معادله رگرسیونی غیرخطی، معادله ورونزه (۱۹۳۷) با کمترین مقدار توابع خطا، دارای بهترین تطابق بین مقادیر برآورد شده و مشاهدات می‌باشد. معادله ورونزه (۱۹۳۷) برای ذرات بستر با قطر متوسط کمتر از ۵ میلی‌متر به دست آمده و استفاده از این معادله توسط سازمان عمران اراضی ایالات متحده (۱۹۷۳) و سازمان استاندارد هندوستان^۱ (۱۹۸۵) توصیه شده است. در شکل ۱۳ مقادیر حداکثر عمق آب‌شستگی محاسباتی توسط معادلات مختلف با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد و اکثر داده‌ها در دامنه خطای $\pm 30\%$ درصد قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر معادله ۴، از پنج داده مشاهداتی حداکثر عمق آب‌شستگی در مطالعات امانیان (۱۹۹۳) برای حالت آزاد استفاده شد. حداکثر عمق آب‌شستگی برآورد شده توسط معادلات مختلف و درصد خطای میانگین هر معادله در جدول ۵ ارایه شده است. با توجه به اینکه معادله ۴، حداکثر عمق آب‌شستگی را برای حالت مستغرق برآورد می‌کند، بنابراین مقادیر برآورد شده توسط این معادله کمی کوچکتر از مقادیر مشاهداتی امانیان در حالت آزاد هستند. با این وجود مقادیر نزدیک بوده و مقایسه درصد خطای میانگین معادلات مختلف، نشان دهنده دقت قابل قبول این معادله در برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی است.

علاوه بر تحلیل کیفی داده‌ها، تحلیل کمی نیز با نرم‌افزار آماري SPSS انجام شد و معادلات رگرسیونی غیرخطی چند متغیره برای برآورد حداکثر عمق حفره (D/Y_t) ، محل وقوع حداکثر عمق حفره (L_s/Y_t) ، گسترش طولی حفره $(x_2 - x_1)/Y_t$ ، طول کل محدوده آب‌شستگی (L_e/Y_t) و ارتفاع مطلق موج (h_w/Y_t) به صورت زیر به دست آمد که ضریب همبستگی بالا و خطای میانگین کم نشان دهنده دقت بالای این معادلات است در حالی که معادلات به دست آمده برای برآورد ابعاد پشته‌ها از دقت کمتری برخوردار بودند.

$$D/Y_t = 0.1524(q/\sqrt{gY_t^3})^{0.313}(SN)^{1.415}(\theta)^{0.672} \quad (4)$$

$$r = 0.95, AE \% = 4.45$$

$$L_s/Y_t = 0.4477(q/\sqrt{gY_t^3})^{0.618}(H/Y_t)^{-0.323}(SN)^{1.481}(\theta)^{0.39} \quad (5)$$

$$r = 0.943, AE \% = 4.77$$

$$(x_2 - x_1)/Y_t = 0.0011535(q/\sqrt{gY_t^3})^{1.019}(H/Y_t)^{-0.545}(SN)^{4.746}(\theta)^{0.544} \quad (6)$$

$$r = 0.989, AE \% = 4.26$$

$$L_e/Y_t = 76.033(q/\sqrt{gY_t^3})^{1.62}(SN)^{0.461}(\theta)^{0.993} \quad (7)$$

$$r = 0.985, AE \% = 6.4$$

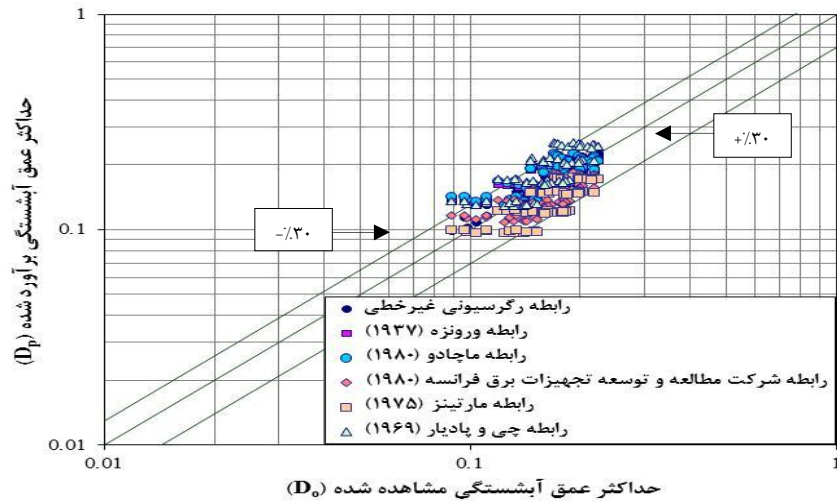
$$h_w/Y_t = 0.040272(q/\sqrt{gY_t^3})^{0.097}(H/Y_t)^{-0.153}(SN)^{1.803}(\theta)^{0.492} \quad (8)$$

$$r = 0.929, AE \% = 2.85$$

برای صحت‌سنجی نتایج، مقادیر دیده شده حداکثر عمق آب‌شستگی در این پژوهش، با مقادیر برآورد شده با معادلات پژوهشگران در جدول ۱ مقایسه شد. برای تعیین دقت معادلات مختلف، از توابع خطا شامل متوسط نسبت عمق آب‌شستگی محاسبه شده به عمق آب‌شستگی مشاهده شده $m = (\overline{D_p}/D_o)$ و ضریب تغییرات آن، جذر میانگین مجذورات خطا و درصد خطای میانگین در جدول

جدول ۴- مقایسه مقادیر توابع خطای معادلات مختلف در برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی

معدلات	درصد خطای میانگین	جذر میانگین مجذورات خطا	متوسط نسبت عمق آب‌شستگی محاسبه شده به مشاهده شده	ضریب تغییرات
معادله رگرسیونی غیرخطی	۴/۳۲۴	۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	۵/۸۴۵
ورونزه (۱۹۳۷)	۱۳/۳۳۷	۰/۰۲۴	۱/۰۷۵	۱۴/۷۴۶
ماچادو (۱۹۸۰)	۱۴/۱۳۷	۰/۰۲۶	۱/۰۹۳	۱۵/۴۱۴
سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه (۱۹۸۰)	۱۴/۸۷۶	۰/۰۰۳	۰/۸۹۲	۱۴/۹۹۳
مارتینز (۱۹۷۵)	۱۷/۶۸۵	۰/۰۳۶	۰/۸۳۲	۱۴/۲۴۴
چی و پادیار (۱۹۶۹)	۱۷/۷۷۸	۰/۰۳۵	۱/۱۴۶	۱۵/۲۰۳
میسن و آروم‌گام (۱۹۸۵)	۲۶/۵۳۷	۰/۰۴۹	۰/۷۳۵	۱۴/۹۴۷
چین (۱۹۷۳)	۲۶/۶۱۵	۰/۰۵۱	۰/۷۳۶	۱۴/۸۶۲
عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵)	۲۶/۹۹۱	۰/۰۴۹	۰/۷۲	۱۳/۰۸۷
موسسه ملی علم و فناوری آزمایشگاهی هیدرولیک (۱۹۸۱)	۲۷/۶۵۶	۰/۰۰۵	۱/۲۷۶	۱۴/۲۴۴
استرلچاک (۱۹۶۹)	۳۲/۶۴۲	۰/۰۵۶	۱/۳۲۶	۱۰/۴۱۶
چی و کانگ (۱۹۷۴)	۳۹/۸۵۱	۰/۰۶۹	۱/۲۹۹	۱۴/۷۴۲



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر مشاهداتی حداکثر عمق آبشستگی با مقادیر برآورد شده توسط معادلات مختلف

جدول ۵- دقت معادلات مختلف در برآورد حداکثر عمق آبشستگی برای داده های مشاهداتی امانیان (۱۹۹۳)

دبی در واحد عرض (فوت مکعب بر ثانیه بر فوت)	ارتفاع ریزش (فوت)	عمق پایاب (فوت)	متوسط ذرات بستر (فوت)	زاویه لبه جام (درجه)	حداکثر عمق آبشستگی مشاهده شده در مطالعات امانیان (۱۹۹۳) (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله ماچادو (۱۹۸۰) (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله ورونزه (۱۹۳۷) (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله سازمان مطالعه و توسعه تجهیزات برق فرانسه (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله این پژوهش (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله چی و پادیار (۱۹۶۹) (فوت)	حداکثر عمق آبشستگی برآورد شده توسط معادله چی و کانگ (۱۹۷۴) (فوت)
۱/۷۱	۳/۴۸۴	-۰/۹۶۱	۰/۰۴۱	۲۲/۵	۲	۲/۳۲	۲/۳۴	۲/۵۲	۱/۴۱	۲/۷۱	۲/۸۴
۱/۱۰۱	۳/۷۶	-۰/۵۳۵	۰/۰۶۷	۲۲/۵	۱/۵۱	۱/۸۶	۱/۸۸	۱/۹۵	۰/۷۱	۱/۹۸	۲/۱۱
۱/۱۰۱	۳/۳۳	-۰/۹۶۱	۰/۰۶۷	۲۲/۵	۱/۳۷	۱/۷۹	۱/۸۳	۱/۹۳	۱/۰۵	۱/۹۴	۲/۰۶
۱/۷۱	۳/۴۶	-۰/۹۷۴	۰/۰۶۷	۳۰	۱/۹۸	۲/۲۶	۲/۳۴	۲/۵۲	۱/۲۶	۲/۶۳	۲/۷
۱/۴	۳/۵۷	-۰/۷۹۴	۰/۰۶۷	۴۵	۱/۷۴	۲/۰۷	۲/۱۱	۲/۲۴	۱/۴۵	۲/۳۱	۲/۴۱
درصد خطای میانگین						۲۰/۶	۲۲/۹	۳۰/۴	۳۱/۷	۳۴/۷۶	۴۱/۴

نتیجه گیری

جام در صورت عملکرد نامتقارن سرریز بیشتر خواهد بود. در زاویه ۴۵° ارتفاع پشته پایین دست حداکثر است و احتمال تأثیر منفی بر عملکرد تخلیه کننده ها وجود خواهد داشت. همچنین در زاویه ۴۵° موج دارای بیشترین ارتفاع و کمترین فاصله از لبه جام است که موجب ناهمواری بیشتر سطح پایاب و تشدید ورود مواد به درون جام و ایجاد جریان های گردابی در حاشیه پایین دست رودخانه خواهد شد. بنابر موارد ذکر شده، زاویه ۳۰° گزینه خوبی جهت کاهش حجم آبشستگی و ابعاد آن شامل حداکثر عمق حفره، ارتفاع پشته ها، گسترش طولی حفره و طول کل محدوده آبشستگی و همچنین کاهش ناهمواری سطح پایاب و دور نمودن پشته بالادست از لبه جام است.

نتایج نشان داد که با افزایش زاویه جام از ۳۰° به ۴۵°، حداکثر عمق آبشستگی به میزان قابل توجه ۱۵۰ درصد افزایش یافته و ۲/۵ برابر می شود و گسترش طولی حفره ۲۷ درصد افزایش می یابد که با افزایش حجم آبشستگی، افزایش ارتفاع پشته بالادست به میزان ۱۱۰ درصد، افزایش ارتفاع پشته پایین دست به میزان ۲۴ درصد و افزایش طول کل محدوده آبشستگی به میزان ۵۷ درصد همراه است. در زاویه ۴۵°، حفره آبشستگی در نزدیکترین فاصله به لبه جام شروع می شود و پشته بالادست بیشترین ارتفاع و کمترین فاصله از لبه جام را دارد، بنابراین احتمال ورود و گیر افتادن ذرات بستر درون

5. Chee S. P. and Kung T. 1974. Piletas de derrubio autoformadas. 6th Latin American Congress of the International Association for Hydraulic Research. Bogata. Cholumbia.
6. Chee S. P. and Padiar P. V. 1969. Erosion at the base of flip buckets. Engineering Journal. November. 52(11):22-24.
7. Doddiah D. 1960. Study of bucket type energy dissipators with speshial reference to surge characteristics. Irrigation and Power . CBIP (India). July.
8. Hiranandani M. G. and Wadekar G. T. 1962. Spillways and energy dissipators-Hydraulic model investigation. CWPRS Tech. Memo. Hyd1. April.
9. INCYTH LHA. Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas Laboratorio de Hidráulica 1981. Estudio sobre modelo del aliviadero de la presa casa de piedra. Informe Final. DOH-044-03-82. Ezeiza. Argentina.
10. Machado L. I. 1980. Formulas para calcular o limite da erosao em leitos rochosos ou granulares. XIII Seminario Nacional de Grandes Barragemns.Rio de Janeiro.Brazil. Apr.35-52.
11. Martins R. B. F. 1975. Scouring of rocky river beds by free jet spillways. International Water Power and Dams Construction. England. Apr. 27(4):152-153.
12. Mason P. J. Arumugam K. 1985. Free jet scour below dams and flip bucket. J. Hyd. Eng. ASCE. 111(2):220-235.
13. Peterka A. J. 1983. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Engineering Monograph. No. 25. U.S.Bureau of Reclamation. Chap. 7:91-125.
14. SOFRELEC. 1980. Societe Francaise d'Etudes et de Realisation d'Equipement Electriques. Kandadji Dam. Niger. 3rd Phase Design Report. Paris. France. Feb.
15. Strelchuck D. L. 1969. Scour at the base of spillway buckets. M.S Thesis. University of Windsor. Ontario.
16. Veronese A. 1937. Erosion de fondo a valle di uno scarico. Annali dei Lavori Pablicci. Italy. Sept 75(9):717-726.

اما باید توجه داشت که در زاویه جام 30° ، حداکثر عمق حفره در نزدیکترین فاصله به لبه جام ایجاد می‌شود و زاویه جام 40° گزینه مناسبی برای افزایش فاصله ابتدای حفره و کف حفره (عمیق‌ترین نقطه حفره) تا حداکثر مقدار ممکن است. همچنین زوایای 35° و 40° گزینه‌های خوبی جهت دور کردن موج از جام تا حداکثر حد ممکن هستند و با اثرات مفیدی در کاهش آب‌شستگی و خوردگی جام همراهند. زوایای ذکر شده مطابق با نظر هیراناندانی و وادکار (۱۹۶۲) و دادیاح (۱۹۶۰) که زوایای کوچکتر از 45° و بین زوایای 30° تا 40° را به دلیل فواید کاهش آب‌شستگی توصیه کردند، است. معادلاتی برای برآورد ابعاد آب‌شستگی در بسترهای کاملاً آبرفتی ارائه شد که دارای دقت خوبی بودند و معادله ورونزه (۱۹۳۷) با کمترین خطا، بهترین تطابق را با نتایج مشاهداتی این پژوهش نشان داد.

سپاس‌گزاری

از دانشگاه تبریز و اساتید محترم گروه مهندسی آب برای فراهم کردن امکانات این پژوهش تشکر می‌شود.

منابع

1. Amanian N. 1993. Scouring Below a Flip Bucket Spillway. Ph.D. Thesis. Utah State University. Logan. Utah.
2. Azmathullah H. Md. Deo M. C. and Deolalikar P. B. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. J. Hyd. Eng. ASCE. 131(10):898-908.
3. BIS. Bureau of Indian Standards. 1985. Criteria of Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators. BIS: 7365-1985. New Delhi. India.
4. Chain M. W. 1973. Scour at downstream end dam in Taiwan. Proc. IAHR Symp. On River Mechanics. Bangkok. Thailand. Vol I. A13:1-6.