

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی مهندسی

گروه: مهندسی عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی

موضوع:

بررسی بهبود عملکرد هیدرولیکی پرتابه‌های جامی شکل سرریزهای بلند بوسیله شبیه‌سازی عددی  
(مطالعه‌ی موردی سازه پایانه‌ی یک سرریز)

نگارنده:

وحید بابازاده

اساتید راهنما:

دکتر میر علی محمدی

دکتر محمد منافپور

خرداد ۱۳۹۱

تقدیم به مادر مهربان

و پدر فداکارم

که در تمام شرایط زندگی

مشوق و یاور من بودند

## تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که انسان را آفرید و به او آنچه را که نمی‌دانست آموخت. اکنون که این تحقیق به سرانجام رسیده است بر خود واجب می‌دانم که از زحمات فراوان و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید محترم جناب آقای دکتر مناف‌پور و دکتر محمدی کمال تشکر را داشته باشم. از دوستانم، حامد تقی‌زاده، مهدی حسینی، حسین محمدنژاد، حبیب محمدزاده، محمد فرهادیان، علی یوسفی، مهدی صحرانورد، حسن قربانی، منصور بیاضی و مجتبی نیک‌آذر که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند، سپاسگزارم.

وحید بابازاده

ارومیه- خرداد ۱۳۹۱

## چکیده

سرریز به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های هیدرولیکی وابسته سدها، جریان سیلاب ورودی به مخزن سد را در مواقع تکمیل ظرفیت آن، با ایمنی کافی به پایین دست انتقال می‌دهد. به منظور استهلاک انرژی جریان خروجی از سرریز و ممانعت از تخریب پایین دست، سازه پایانه در انتهای سرریز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پرتابه‌های جامی شکل بعنوان یکی از انواع مستهلک‌کننده‌های انرژی، با پرتاب جریان به فاصله‌ای دور از پای سرریز که با برخورد جریان آب با هوا و نهایتاً برخورد با پایاب رودخانه همراه است، انرژی جریان را مستهلک می‌کنند. برای کاهش هزینه‌های بالای ساخت سرریز، استفاده از سرریز با دیواره‌های همگرا راهکاری موثر و مقرون به صرفه‌ای می‌باشد. طراحی بهینه سازه پایانه با عملکرد موثر آن در استهلاک انرژی جریان خروجی بالاخص در سرریز سدهای بلند از اهمیت زیادی برخوردار است.

در این مطالعه جریان سه بعدی عبوری از سرریز سد گاوشان به صورت عددی مدل‌سازی شده و به کمک نرم‌افزار Flow-3D و مدل آشفتگی RNG میدان جریان مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی سطح آزاد جریان از روش VOF استفاده شده است. همچنین تأثیر همگرایی دیواره‌های سرریز سد گاوشان بر روی مشخصات جریان روی سرریز و پرتابه جامی شکل آن برای زوایای تنگ‌شدگی ۰، ۱، ۲، ۲/۵ و ۳ درجه و دبی‌های ۶۰۰، ۹۵۰ و ۱۳۵۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن عملکرد هیدرولیکی پرتابه جامی شکل با تغییر دادن پارامترهای موثر بر آن از جمله شعاع‌های انحناء ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴ و ۲۸ متر و زوایای ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه برای لبه جام مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این مدل قابلیت پیش‌بینی الگوی سه بعدی جریان با دقت مناسبی را داراست. در اثر جمع‌شدگی دیواره‌ها، یکسری موج‌های ضربدری در طول سرریز ایجاد می‌شود که باعث افزایش پروفیل سطح آب در نزدیکی دیواره‌ها می‌گردد. ارتفاع این موج‌ها با افزایش جمع‌شدگی سرریز بیشتر می‌شود. همچنین باعث افزایش عمق، سرعت جریان و فشار متوسط روی بستر پرتاب‌کننده جامی شکل می‌شود. در بررسی تغییر هندسه جام پرتابی نیز نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر زاویه ۳۰ درجه برای لبه جام و شعاع‌های انحناء مابین ۱۰ تا ۱۴ برابر عمق جریان ورودی به جام می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، پرتاب‌کننده جامی شکل، شبیه‌سازی

عددی، مدل آشفتگی RNG

## فهرست مطالب

ح	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
ط	فهرست جداول.....
ی	فهرست اشکال.....
۱	<b>فصل اول: مقدمه</b> .....
۱-۱	۱-۱- مقدمه.....
۲-۱	۲-۱- سیستم پرش اسکی.....
۳-۱	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....
۴-۱	۴-۱- هدف از انجام تحقیق.....
۵-۱	۵-۱- فصول پایان نامه.....
۵	<b>فصل دوم: کلیات و ادبیات پیشینه موضوع تحقیق</b> .....
۱-۲	۱-۲- مقدمه.....
۲-۲	۲-۲- جام.....
۱-۲-۲	۱-۲-۲- شعاع جام.....
۲-۲-۲	۲-۲-۲- توزیع فشار در جام.....
۳-۲	۳-۲- هیدرولیک جریان جت پرتابی از جام.....
۱-۳-۲	۱-۳-۲- ورود هوا به جت پرتابی از جام.....
۲-۳-۲	۲-۳-۲- هندسه مسیر جت پرتابی از جام.....
۳-۳-۲	۳-۳-۲- زاویه پرتاب جت.....
۴-۳-۲	۴-۳-۲- ارتفاع لبه جام.....
۵-۳-۲	۵-۳-۲- زاویه برخورد جت با پایاب.....
۴-۲	۴-۲- فرسایش پایین دست سرریزهای جامی شکل.....
۵-۲	۵-۲- تحقیقات اخیر.....
۲۹	<b>فصل سوم: مواد و روشها</b> .....
۱-۳	۱-۳- مقدمه.....
۲-۳	۲-۳- معرفی نرم افزار FLOW-3D.....
۱-۲-۳	۱-۲-۳- معادلات حاکم.....
۲-۲-۳	۲-۲-۳- مدل آشفتگی.....
۳-۳	۳-۳- مشخصات سد مورد بررسی و سرریز به کار رفته در مطالعه موردی.....
۴-۳	۴-۳- صحت سنجی.....

۳۵	۱-۴-۳- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی
۳۶	۲-۴-۳- انتخاب مقیاس و نسبت های تشابه
۳۷	۳-۴-۳- زمان شبیه سازی
۳۸	۴-۴-۳- حساسیت سنجی
۴۲	۵-۴-۳- ایجاد هندسه مرزهای جامد و شبکه بندی مدل عددی
۴۳	۱-۵-۴-۳- شرایط مرزی
۴۵	۵-۳- مدلسازی سرریزهای تنگ شونده
۴۶	۶-۳- مدلسازی شعاعها و زوایای لبه جام
<b>فصل چهارم: بررسی اثر تنگ شوندگی بر روی جریان سازه سرریز و پرتابه جامی شکل</b>	
۴۸	۱-۴- مقدمه
۴۸	۲-۴- نتایج صحت سنجی
۴۹	۱-۲-۴- پروفیل جریان
۵۱	۲-۲-۴- توزیع سرعت
۵۳	۳-۲-۴- توزیع فشار متوسط جریان در طول سرریز
۵۴	۱-۳-۲-۴- توزیع فشار در بستر پرتاب کننده
۵۶	۳-۴- بررسی نتایج مدلسازی
۵۶	۱-۳-۴- بررسی سرریز سد گاوشان بدون تنگ شوندگی
۵۸	۲-۳-۴- بررسی تاثیر تنگ شوندگی دیوارهای سرریز
۶۳	۱-۲-۳-۴- بررسی مقادیر فشار متوسط روی بستر سرریز
۶۴	۳-۳-۴- بررسی تاثیر تنگ شدگی بر روی جریان در پرتابه جامی شکل
۷۷۶	۴-۳-۴- بررسی هندسه جت پرتابی
<b>فصل پنجم: بررسی اثرات تغییر شعاع و زاویه پرتاب</b>	
۸۰	۱-۵- مقدمه
۸۱	۲-۵- بررسی اثر شعاع جام پرتابی
۹۰	۳-۵- بررسی اثر تغییرات زاویه لبه جام
<b>فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>	
۹۶	۱-۶- مقدمه
۹۶	۲-۶- نتایج
۹۷	۳-۶- پیشنهادات برای مطالعات آتی
۹۸	<b>مراجع</b>

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
شعاع جام	$R_b$
ارتفاع قائم بین تاج سرریز و تراز کف جام	$H_o$
عدد فرود جریان ورودی به جام	$F_b$
عمق جریان ورودی به جام	$y_1$
ارتفاع معادل فشار دینامیکی مجاز در گودی جام	$P_b$
سرعت جریان در ورودی به جام	$V_o$
شدت جریان در واحد عرض	$q$
ارتفاع معادل کل فشار مجاز در جام	$P$
چگالی آب	$\rho$
ارتفاع معادل حداکثر فشار دینامیکی	$h_{PM}$
فشار دینامیکی تئوری در جام	$H_{PT}$
ارتفاع معادل سرعت پرتابه	$H_e$
مسافت پرتاب شده بدون در نظر گرفتن مقاومت هوا	$L_o$
مسافت پرتاب شده با در نظر گرفتن مقاومت هوا	$L$
زاویه لبه جام	$\theta_b$
زاویه پرتابی جت	$\theta$
زاویه برخورد جت با پایاب	$\theta'$
حداکثر عمق آبشستگی	$D$
اختلاف ارتفاع بین سطح آب مخزن و پایاب	$H$
ترم نفوذپذیری آشفستگی	$RDIF$
منبع جرم	$RSOR$
ضریب نفوذ مومنتم	$\mu$
شتاب های بدنه در راستای X	$G_z$
شتاب ناشی از لزجت در راستای X	$f_x$
افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج در راستای X	$b_x$
تنش های روی دیواره در راستای X	$w_{sx}$
کسر های جزئی مساحت‌های جریان در راستای X	$A_x$
تابع حجم سیال	$F(x,y,z,t)$



## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۲-۱: تعدادی از روابط موجود در پیش بینی حداکثر عمق آبستنگی .....	۲۴
جدول ۳-۱: مشخصات سد گاوشان .....	۳۴
جدول ۳-۲: مشخصات شبکه بندی، شرایط مرزی بکار رفته والگوریتم انفصال معادلات .....	۴۴
جدول ۴-۱: موقعیت مقاطع اندازه گیری روی سرریز سد گاوشان .....	۴۹
جدول ۴-۲: مشخصات مقاطع اندازه گیری روی پرتاب کننده جامی .....	۶۴

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مراحل مختلف استهلاک انرژی در سیستم پرش اسکی.....	۳
شکل ۱-۲: انواع جام‌های پرتاب کننده الف) جام ساده یا مسطح ب) جام مرکب ج) جام منحرف کننده.....	۵
شکل ۲-۲: جریان در جام مسطح (بارانی، ۱۳۸۲).....	۸
شکل ۳-۲: نمودار ارائه شده توسط لنائو و کسیدی برای فشار داخل جام.....	۹
شکل ۴-۲: نمودار ارائه شده توسط لنائو و کسیدی برای فشار داخل جام.....	۱۰
شکل ۵-۲: نمودار ارتباط مابین فشار تئوریک و عملی در طول جام.....	۱۰
شکل ۶-۲: ستون آب انتخابی در داخل جام مسطح (حسینی و همکاران، ۱۳۸۷).....	۱۱
شکل ۷-۲: عنصر منشوری در جام مسطح (حسینی و همکاران، ۱۳۷۸).....	۱۲
شکل ۸-۲: پارامترهای به کار رفته در روابط محاسباتی.....	۱۳
شکل ۹-۲: هواگیری جت‌ها از سطح آزاد.....	۱۴
شکل ۱۰-۲: تغییر شکل بیرونی فوران در فصل مشترک آب و هوا به علت وجود گردابه ها (H. Falvey, 1988) ....	۱۵
شکل ۱۱-۲: هندسه مسیر فوران پرتاب شده از جام.....	۱۶
شکل ۱۲-۲: مشخصات جت پرتابی.....	۱۷
شکل ۱۳-۲: ارتباط ضریب $k$ با سرعت جت پرتابی.....	۱۸
شکل ۱۴-۲: نمودار ضریب کاهش طول پرتابی.....	۱۹
شکل ۱۵-۲: زاویه‌ی پرتابی فوران $\theta = \alpha_b - s$ الف) پارامترهای هندسی ب) تعریف نسبت زاویه جام $\alpha_b/\beta_b$ .....	۲۰
شکل ۱۶-۲: ارتفاع لبه جام از کف آن.....	۲۱
شکل ۱۷-۲: تغییرات زاویه برخورد فوران با پایاب ( $\theta'$ ) بر حسب زاویه لبه جام ( $\theta_b$ ).....	۲۲
شکل ۱-۳: پلان و پروفیل جانمایی سد گاوشان.....	۳۴
شکل ۲-۳: موقعیت احداث سد مخزنی گاوشان بر روی نقشه جغرافیایی.....	۳۵
شکل ۳-۳: نحوه عبور جریان از روی سرریز در بازه‌های زمانی مختلف.....	۳۸
شکل ۴-۳: دبی عبوری از مرز خروجی مدل در زمان.....	۳۸
شکل ۵-۳: تغییر شکل موانع در شبکه بندی FLOW-3D به دلیل رویداد محل تقاطع چندگانه.....	۳۹
شکل ۶-۳: نحوه عملکرد روش FAVOR با مرزهای جامد.....	۴۰

- شکل ۳-۷: الگوهای مختلف شبکه بندی..... ۴۱
- شکل ۳-۸: هندسه مرزهای جامد و شبکه بندی مدل عددی سرریز سد گاوشان..... ۴۳
- شکل ۳-۹: شرایط مرزی اعمال شده ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۰: پلان سرریز سد گاوشان ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱: نمایش سه بعدی از سرریز سد گاوشان با زاویه جمع شونده..... ۴۶
- شکل ۳-۱۲: پروفیل طولی سرریز سد گاوشان ..... ۴۷
- شکل ۳-۱۳: شبکه بندی مدل عددی ..... ۴۷
- شکل ۴-۱: موقعیت مقاطع اندازه گیری سرعت و عمق و فشار جریان روی سرریز سد گاوشان ..... ۴۸
- شکل ۴-۲: مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی میانگین عمق جریان در امتداد طولی سرریز ..... ۵۰
- شکل ۴-۳: مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط جریان در امتداد طولی سرریز ..... ۵۲
- شکل ۴-۴: مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی میانگین فشار در امتداد طولی سرریز ..... ۵۴
- شکل ۴-۵: محل قرار گیری پیزومترها ..... ۵۵
- شکل ۴-۶: مقادیر توزیع فشار در کف پرتاب کننده جامی شکل ..... ۵۶
- شکل ۴-۷: پروفیل های عمق متوسط جریان آب روی سرریز سد گاوشان برای حالت بدون جمع شونده ..... ۵۷
- شکل ۴-۸: مقادیر سرعت متوسط جریان روی سرریز سد گاوشان برای حالت بدون جمع شونده ..... ۵۷
- شکل ۴-۹: پروفیل طولی فشار متوسط جریان در بستر سرریز برای دبی های مختلف (بدون جمع شونده) ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰: پروفیل طولی سطح آزاد جریان در سرریز جهت زوایای مختلف جمع شونده ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۱: موقعیت مینیمم عمق جریان روی سرریز جهت زوایای جمع شدگی مختلف دیواره ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۲: مقادیر میانگین سرعت آب روی سرریز جهت زوایای جمع شدگی مختلف دیواره ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات عمق جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای جمع شدگی مختلف ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات سرعت متوسط جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای جمع شدگی مختلف ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات عدد فرود جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای جمع شونده ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۶: پروفیل های طولی عمق جریان در محور کناری و مرکزی سرریز برای حالت جمع شونده دو درجه و دبی پیشینه ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۷: پروفیل های طولی عمق جریان در محور کناری و مرکزی سرریز برای جمع شونده سه درجه و دبی پیشینه ..... ۶۲

- شکل ۴-۱۸: پروفیل‌های عمق متوسط جریان آب به ازای دبی‌های مختلف جریان جهت زاویه جمع‌شدگی سه درجه ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۹: پروفیل طولی فشار متوسط جریان در بستر سرریز به ازای زوایای جمع‌شوندگی مختلف ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۰: موقعیت مقاطع اندازه‌گیری سرعت و عمق جریان روی پرتابه ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۱: پروفیل‌های طولی عمق جریان در پرتابه جامی شکل به ازای زوایای جمع‌شوندگی مختلف (در مقاطع ۱، ۳، ۵) ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۲: مقادیر سرعت متوسط روی پرتابه جامی شکل به ازای زوایای جمع‌شوندگی مختلف (در مقاطع ۱، ۳، ۵) ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۳: کنتورهای توزیع سرعت در مقاطع عرضی پرتابه جامی شکل جهت  $\theta=0^\circ$  و  $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۴: کنتورهای توزیع سرعت در مقاطع عرضی پرتابه جامی شکل جهت  $\theta=3^\circ$  و  $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۲۵: نمودار سرعت خروجی در جهت x و z از پرتابه ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۶: مقادیر فشار در مقطع طولی روی محور پرتابه جامی شکل برای حالت  $\theta=3^\circ$  و  $\theta=0^\circ$  و  $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۲۷: مقادیر فشار در مقطع عرضی قعر پرتابه برای زوایای جمع‌شوندگی مختلف و دبی بیشینه ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۸: مقادیر فشار در قعر جام (محور راست، وسط و چپ) برای حالت  $\theta=3^\circ$  و دبی‌های متفاوت ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۹: مقادیر سرعت متوسط در مقطع عرضی قعر پرتابه برای زوایای جمع‌شدگی مختلف و دبی بیشینه ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۰: کنتورهای توزیع فشار در مقاطع عرضی پرتابه جامی شکل جهت  $\theta=0^\circ$  و  $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۱: کنتورهای توزیع فشار در مقاطع عرضی پرتابه جامی شکل جهت  $\theta=3^\circ$  و  $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$  ..... ۷۵
- شکل ۴-۳۲: پروفیل طولی رویه فوقانی و زیرین جت خروجی از پرتابه جامی شکل ..... ۷۶
- شکل ۴-۳۳: فاصله لایه فوقانی جت خروجی از پرتابه در محل برخورد با پایاب ..... ۷۷
- شکل ۴-۳۴: فاصله لایه زیرین جت خروجی از پرتابه در محل برخورد با پایاب ..... ۷۷
- شکل ۴-۳۵: کنتورهای فشار در محل برخورد با پایاب بر حسب فاصله طولی از تاج سرریز ..... ۷۸
- شکل ۵-۱: تصویری شماتیک از یک جام پرتابی و مولفه‌های مهم در طراحی ای سازه‌ها ..... ۸۰
- شکل ۵-۲: مشخصات هندسی مدل‌های ساخته شده برای پرتاب کننده جامی شکل ..... ۸۱
- شکل ۵-۳: مقادیر فشار وارده بر بستر جام پرتابی در طول محور مرکزی برای شعاع‌های مختلف ..... ۸۲
- شکل ۵-۴: منحنی تغییرات فشار و پروفیل سطح آزاد آب برای شعاع‌های مختلف و دبی بیشین ..... ۸۳
- شکل ۵-۵: منحنی تغییرات انرژی جریان داخل جام در ازای شعاع‌های متفاوت ..... ۸۴
- شکل ۵-۶: مقادیر عمق جریان در مقطع خروجی پرتابه برای شعاع‌های مختلف ..... ۸۴

- شکل ۵-۷: مقادیر سرعت جریان در مقطع خروجی پرتابه برای شعاع‌های مختلف ..... ۸۵
- شکل ۵-۸: فاصله افقی محل برخورد لایه فوقانی جت پرتابی با پایاب از انتهای جام ..... ۸۶
- شکل ۵-۹: فاصله افقی محل برخورد لایه زیرین جت پرتابی با پایاب از انتهای جام ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰: معادلات لایه فوقانی و زیرین پرتابه برای دبی‌های کمینه و بیشینه ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱: نمودار شاخص کابیناسیون در طول جام در ازای شعاع‌های متفاوت ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۲: مشخصات جام پرتابی با توجه به تغییر زاویه لبه جام برای  $R=20\text{ m}$  ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۳: مقادیر فشار روی محور جام در ازای زوایای مختلف ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۴: مقادیر سرعت خروجی از جام روی محور مرکزی برای زوایای مختلف ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۵: مقادیر عمق جریان خروجی از جام روی محور مرکزی برای زوایای مختلف ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۶: فاصله لایه فوقانی جت پرتابی از انتهای جام در محل برخورد با پایاب ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۷: فاصله لایه زیرین جت پرتابی از انتهای جام در محل برخورد با پایاب ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۸: مقدار بازشدگی جت پرتابی در محل برخورد با پایاب ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۹: معادلات لایه فوقانی و زیرین پرتابه برای دبی‌های کمینه و بیشینه ..... ۹۵

## فصل اول: مقدمه

### ۱ --۱ مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی، ساخت سازه‌های عظیم آبی به منظور توسعه منابع آب گسترش قابل توجهی نموده و با روند رو به رشد احداث سدهای بلند و بالا رفتن استاندارد ایمنی آنها، علاقه مهندسين هیدرولیک به طراحی سرریزهای اقتصادی و مطمئن جهت تخلیه سیلاب سدها، افزایش یافته است. هزینه بالا و مدت زمان طولانی احداث سازه‌های هیدرولیکی و اذعان به این واقعیت که انجام آزمایشات، هنوز هم به عنوان دقیق-ترین روش در بررسی مسائل و مشکلات طراحی این گونه سازه‌ها مطرح می‌باشد، محققان را بر آن داشته تا با ساخت مدل‌های فیزیکی از سازه‌های هیدرولیکی و انجام آزمایشات نسبت به رفع نواقص طرح همت گمارده و طراحی این سازه‌ها را تکمیل نمایند. از آنجائیکه تحلیل جریان عبوری از روی سرریز سد توسط مدل‌های فیزیکی، هزینه‌بر و زمانبر می‌باشد، امروزه استفاده از مدل‌های ریاضی و حل کامپیوتری آنها بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است.

جریان آب خروجی از دریاچه سد از شرایط جریان آرام زیر بحرانی در بالادست به شرایط جریان فوق بحرانی در پایین دست تاج سرریز تبدیل شده و پس از عبور از مجرای انتقال و سازه پایانه سرریز با استهلاك انرژی قابل توجه خود، بدون اینکه آسیبی به پایین دست سرریز برساند، وارد رودخانه می‌گردد. طراحی بهینه سازه‌های پایانه با عملکرد موثر آنها در استهلاك انرژی جریان خروجی بالاخص در سرریز سدهای بلند از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا شکست ناگهانی سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در یک سیلاب بزرگ می‌تواند منجر به خرابی سد و سازه‌های وابسته آن و ایجاد خسارات سنگین گردد.

بطور کلی سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- حوضچه‌های آرامش<sup>۱</sup>: استهلاك انرژی جریان با استفاده از پدیده پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد، ۲- پرتابه غلطکی مستغرق<sup>۲</sup>: با ایجاد جریان‌های چرخشی و غلطابه‌ای در سطح بالای جام یا در پایین دست آن انرژی مستهلک می‌گردد، ۳- پرتابه جامی شکل آزاد<sup>۳</sup>: که در آن جریان آب با انجام یک پرش اسکی<sup>۴</sup> از روی جام، بصورت یک جت به پایین دست پرتاب شده و انرژی آن در برخورد با هوا و پایاب رودخانه مستهلک می‌شود. از سازه جام پرتابی در سرریزهایی که سرعت جریان بیش از ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه بوده و امکان بروز پدیده کاویتاسیون<sup>۵</sup> و فرسایش و همچنین نیروی برگشت<sup>۶</sup> وجود دارد، استفاده می‌شود (USBR, 1990).

<sup>1</sup> Stilling Basins

<sup>2</sup> Roller Bucket

<sup>3</sup> Flip Bucket

<sup>4</sup> Ski jump

<sup>5</sup> Cavitation

<sup>6</sup> Uplift

## ۱-۲- سیستم پرش اسکی

جام‌های پرتاب کننده جریان هرچند به تنهایی و بطور کامل یک سیستم مستهلک کننده انرژی نیستند، اما بخش اصلی از یک مجموعه استهلاک کننده انرژی جریان به نام سیستم پرش اسکی را شامل می‌شوند. در یک سیستم پرش اسکی انرژی بالای جریان در پای سرریز یا انتهای مجاری تخلیه کننده سیلاب در سدها، در مراحل گوناگون مستهلک می‌شود. ورود هوا به جریان می‌تواند باعث کاهش قابل توجه نرخ انرژی در واحد سطح مقطع جریان شود. یکی از موثرترین روش‌ها برای ورود هوا به جریان آب خروجی از سرریزها، پرتاب کردن آن به هوا در مسافتی حتی‌الامکان دورتر از سازه‌های اصلی سد با استفاده از سیستم پرش اسکی است (Stenier, 2008).

در صورت مساعد بودن شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی پایاب استفاده از مستهلک‌کننده انرژی از نوع پرش اسکی با پرتاب کننده جامی شکل غالباً اقتصادی‌ترین روش استهلاک انرژی جریان در پای سرریز سدهای بلند محسوب می‌شود. اجرای ساده و نگهداری آسان این سازه از دیگر مزیت‌های آن نسبت به سایر مستهلک کننده‌های انرژی جریان است (Visher, 1998).

کاربرد سیستم پرش اسکی با پرتاب کننده جامی شکل به سال ۱۸۹۰ در سد ویرنیو<sup>۱</sup> فرانسه برمی‌گردد، اما بر بنا به گفته کوین (Coyen, 1951)، نخستین سیستم پرتاب کننده جامی شکل در سدی واقع در مرجس<sup>۲</sup> فرانسه بر روی رودخانه دوردوین<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۵ احداث شده‌است. وی نخستین کسی بود که این سیستم را پرش اسکی نامید (Joun, 2001).

به واسطه جریان ورودی با سرعت‌های بالا، پرتاب‌کننده جامی شکل، جریان خروجی را در مسافت قابل ملاحظه‌ای دورتر از سازه‌های اصلی، در کانال رودخانه یا در استخر استغراق<sup>۴</sup> پایین دست رها می‌نماید. میسون (Mason) در سال ۱۹۸۲ استفاده از فرم پرش اسکی را محدود به سرعت و دبی‌های خاصی نمود. سیستم پرش اسکی در مواقعی که عمق پایاب کم و یا غیر قابل تخمین باشد، نسبت به سایر گزینه‌های استهلاک انرژی موثرتر می‌باشد (Heller, 2005).

به طور کلی استهلاک انرژی در یک سیستم پرش اسکی در نواحی زیر به وقوع می‌پیوندد (شکل ۱-۱):

- ۱- ناحیه جریان روی سرریز و ورودی به جام.
- ۲- ناحیه جام که استهلاک انرژی در اثر تغییر جهت جریان و پرتاب انجام می‌شود.
- ۳- ناحیه واگرایی جت در هوا که استهلاک انرژی در اثر پخش شدن جت و برخورد آن با هوای اطراف انجام می‌گیرد.
- ۴- ناحیه برخورد جت خروجی با سطح پایاب<sup>۵</sup>.
- ۵- ناحیه متلاطم و توأم با پرش پایاب که استهلاک انرژی در اثر آشفتگی و تلاطم صورت می‌گیرد<sup>۱</sup>.

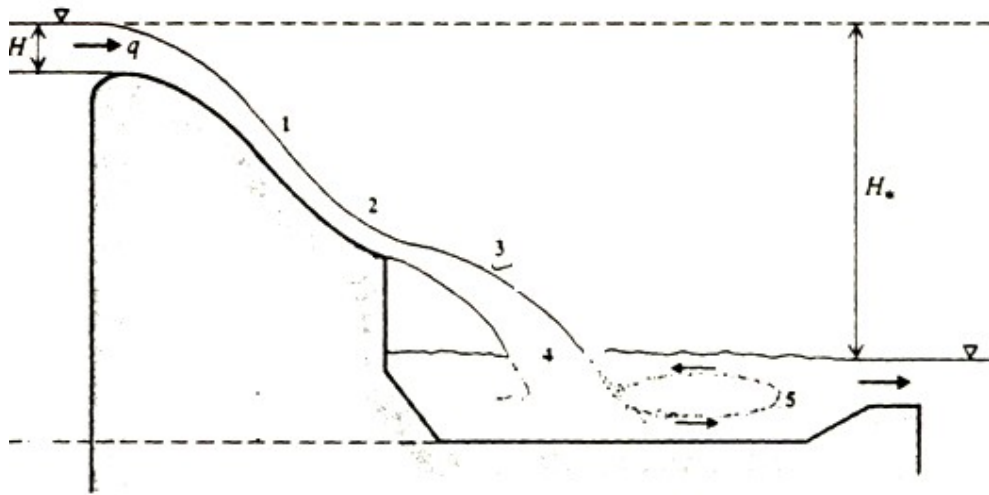
<sup>1</sup> Vyrnwy Dam

<sup>2</sup> Mareges

<sup>3</sup> Dordogne River

<sup>4</sup> Plung Pool

<sup>5</sup> Impact portion



شکل (۱-۱) - نواحی مختلف استهلاک انرژی در سیستم پرش اسکی

ناحیه سرریز و جام، سهم کمی از انرژی کل مستهلاک شده توسط سیستم پرش اسکی را به خود اختصاص می‌دهند (مگر در دبی‌های کم). در این ناحیه استهلاک انرژی عمدتاً ناشی از اصطکاک جریان با کف و جداره کانال و ورود آزادانه هوا از سطح فوقانی جریان به داخل آن می‌باشد. عمده استهلاک انرژی در موقع پرتاب شدن جت در هوا و نیز موقع اصابت جت به پایاب و نهایتاً به هنگام وقوع پرش هیدرولیکی در حوضچه استغراق صورت می‌گیرد (Novak, 1990).

### ۱-۳ - ضرورت انجام تحقیق

برای کاهش هزینه‌های بالای ساخت سرریزها، استفاده از سرریزهای با دیواره‌های همگرا راهکاری کارا و مقرون به صرفه‌ای است. استفاده از این نوع سرریزها با روند روبه رشدی در کشورمان مواجه بوده ولی در اکثر گزارشات مدل‌های هیدرولیکی و مطالعات انجام شده بر روی این نوع سرریزها توجهی به بررسی تأثیر همگرایی دیواره‌ها بر جریان روی سرریز و نیز تأثیر آن بر عملکرد سازه پایانه انتهایی سرریز نشده است. از این رو ضرورت دارد جریان عبوری از اینگونه سرریزها مورد مطالعه و بررسی بیشتری قرار گیرد. ضوابط طراحی هیدرولیکی پرتابه‌های جامی شکل عمدتاً متکی بر یکسری روابط تحلیلی و نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولیکی و نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی آنها در تعداد محدودی از سدها می‌باشند و در این روش‌های عددی و روابط تجربی موجود، شرایط جریان ورودی به جام و هندسه خاص جام که موثر در میزان پراکنش جت پرتابی در هوا و چگونگی متلاشی و تجزیه شدن آن می‌باشند، در نظر گرفته نمی‌شود. بررسی دقیق‌تر تأثیر این عوامل در طراحی این گونه سازه‌ها و بهینه نمودن عملکرد هیدرولیکی آنها ضروری به نظر می‌رسد.

<sup>1</sup> Jump type Tailwater Portion



## ۱-۴ هدف از انجام تحقیق

در این مطالعه، با استفاده از مدل‌سازی عددی اثر تنگ‌شوندگی سازه سرریز سد گاوشان بر روی الگوی جریان عبوری از روی سرریز و مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند نحوه توزیع سرعت، عمق جریان، فشار روی بستر سرریز، و همچنین هندسه جت خروجی از جام مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه عملکرد هیدرولیکی پرتابه جامی شکل با تغییر دادن پارامترهای موثر بر عملکرد پرتابه و استهلاک انرژی جریان مثل شعاع انحناء و زاویه لبه جام مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۱-۵ - فصول پایان نامه

مطالب این پایان نامه علاوه بر فصل اخیر به ترتیب در فصول ذیل ارائه گردیده است:

فصل دوم: کلیات و ادبیات پیشینه موضوع تحقیق گردآوری شده که در آن بررسی عوامل موثر در طراحی جام‌های پرتابی پرداخته شده است. مجموعه نظریات و روابط ارائه شده توسط محققین قبلی در حد ممکن جمع‌آوری گردیده است.

فصل سوم: در این فصل روش انجام تحقیق حاضر و نحوه شبیه‌سازی مدل‌های عددی بکار گرفته بیان گردیده است.

فصل چهارم: ضمن ارائه نتایج مربوط به صحت‌سنجی، تاثیر همگرایی دیواره‌های سرریز بر جریان روی تنداب و پرتابه جامی شکل با ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل پنجم: نتایج مربوط به تاثیر شعاع انحناء و زاویه لبه جام بر روی عملکرد جام ارائه شده است.

فصل ششم: خلاصه نتایج حاصل از تحقیق اخیر ذکر شده است، همچنین پیشنهاداتی در زمینه ادامه کار داده شده است.

## فصل دوم: کلیات و ادبیات پیشینه موضوع تحقیق

### ۲- ۱- مقدمه

با توجه به اینکه نحوه استهلاک انرژی در جام کاملاً شناخته شده نیست و از طرفی سهم خود جام در کل انرژی استهلاک شده در سیستم پرش اسکی کم است، لذا در این فصل ابتدا به بررسی خود جام، انواع جام و مشخصات هندسی آن و سپس به بررسی شعاع جام و توزیع فشار در آن پرداخته شده است در ادامه نیز زاویه خروجی جت، زاویه لبه جام و ارتفاع قرارگیری لبه جام که در ارتباط با هندسه و هیدرولیک جت خروجی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- ۲- جام<sup>۱</sup>

هنگامی که جریان از تنداب وارد جام می‌شود، مقداری از انرژی آن در جام مستهلک می‌گردد اما به خاطر طول نسبتاً کوتاه جام، 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 طرف بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب رو به پایین وارد می‌کند، باعث کاهش شتاب حرکت و سرعت جریان در جام می‌شود.

در بین انواع جام‌های پرتاب کننده سه نوع کلی که رایج‌ترند عبارتند از:

- جام ساده<sup>۲</sup>
- جام مرکب<sup>۳</sup>
- جام منحرف کننده<sup>۴</sup>

شکل جام ساده غالباً به صورت قوسی از دایره است که شعاع آن معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ متر اختیار می‌شود. هر گاه شعاع خیلی کوچک طراحی شود، منجر به پاشیده شدن زیاد آب به اطراف، ارتعاش سازه، تلاطم سطح آب و حتی تخریب سازه‌ای جام خواهد شد و بزرگ بودن زیاد شعاع جام باعث خواهد شد فاصله قائم لبه جام از کف جام افزایش یابد و در دبی‌های کم پرتاب جریان از جام به خوبی انجام نگیرد (Mays, 2002) (شکل ۲-۱ الف).

جام مرکب دارای سطح مقطعی است که در طول آن تغییر می‌کند. به کمک این جام می‌توان جهت جریان را در امتداد طولی و هم در امتداد عرضی تغییر داد (شکل ۲-۱ ب). از این نوع جام‌ها مواقعی استفاده می‌شود که سرریز سد در کناره‌ها قرار گرفته باشد و جت پرتاب شده از جام در راستای محور رودخانه قرار نداشته باشد. در این صورت با استفاده از این جام می‌توان تا حد امکان راستای جت پرتاب شده از جام را با

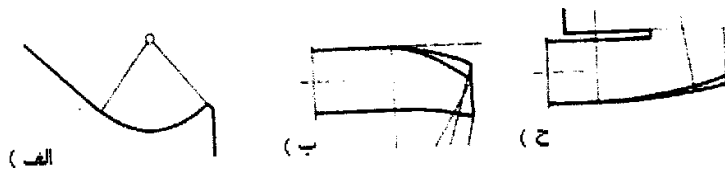
<sup>1</sup> Bucket

<sup>2</sup> Plan Bucket

<sup>3</sup> Composite Bucket

<sup>4</sup> Deflector Bucket

راستای محور رودخانه نزدیک و در صورت امکان منطبق نمود. منطبق نبودن راستای جت با راستای محور رودخانه در محل برخورد، باعث به وجود آمدن موج‌های قابل ملاحظه‌ای در محل برخورد جت با پایاب می‌شود که این موج‌ها در چهار جهت منتشر شده و می‌توانند، ساحل رودخانه را با خطرات جدی روبرو کنند. جام‌های منحرف کننده معمولاً در خروجی تخلیه‌کننده‌ها به کار می‌روند که مشتمل بر یک سطح منحنی ساده با یک ارتفاع لبه و شیب خروجی مناسب هستند که جت را به محلی دورتر از تخلیه کننده پرتاب کنند (Ranga, 2004) (شکل ۱-۲-ج).



شکل (۱-۲)- مقطع طولی انواع جام‌های پرتاب کننده الف) جام ساده یا ساده ب) جام مرکب ج) جام منحرف کننده

طراحی پرتاب کننده جامی شکل ساده، شامل تعیین شیب سرریز در ابتدای آن، شعاع جام، زاویه خروجی و لبه جام نسبت به گودی آنست. در مورد شیب سرریز در محل اتصال به جام باید حد بالای ۴ به ۱ (قائم به افقی) رعایت شود زیرا شیب‌های تندتر باعث بوجود آمدن جریان متلاطم در داخل جام خواهند شد. طراحی نامناسب جام ممکن است، منجر به اشکالات زیر شود:

- استهلاک ناقص انرژی جت خروجی در موقع پخش کردن، به خصوص در صورتی که زاویه پرتاب خیلی کوچک باشد.
- موقعیت نامناسب برخورد جت، مثلاً اصابت آن به دیواره‌های دره رودخانه به جای فرود در حوضه استغراق در پایاب.
- گسیختگی سازه‌ای جام در اثر بار فشاری یا توزیع نامناسب فشار در آن.

## ۲- ۲- ۱- شعاع جام

شعاع جام باید به قدر کافی بزرگ باشد تا بتواند به نحو مؤثری جریان را در امتداد انحنای جام منحرف نماید و انحنای مورد نظر را در جت خروجی ایجاد کند. در طراحی، حداقل شعاع مجاز برای جام مطلوب است زیرا شعاع‌های بزرگتر سازه را طولی‌تر نموده و باعث افزایش اختلاف ارتفاع بین کف جام و لبه آن می‌شود، جریان در دبی‌های کم به طور مناسب پرتاب نشود و از لبه آن سرریز کند و سرریز جریان از لبه جام باعث تخریب لبه جام و بستر پایین دست در زیر لبه جام می‌شود.

روش‌های اولیه برای تعیین شعاع جام ( $R_b$ ) معمولاً بر اساس تنها یک پارامتر، عمق جریان در ورودی به جام ( $t_b$ ) بوده‌است. مقادیر توصیه شده توسط خاستوریا (Khasturia, 2005) برای حداقل شعاع جام مابین ۷-۳ برابر عمق جریان در ورودی جام می‌باشد. دملی (Damle) و همکاران وی در سال ۱۹۶۶ که رابطه زیر را برای محاسبه شعاع جام ارائه نموده:

$$R_b = (H_0 t_b)^{1/2} \quad (1-2)$$

که در آن  $H_0$  ارتفاع قائم بین تاج سرریز و تراز کف جام است.

وارشنی و باجاج (Varshney and Bajaj, 1970) با آنالیز ابعاد سازه‌های مختلف، رابطه زیر را ارائه کردند:

$$F_b^{0.5} = 0.06 \frac{R_b}{t_b} + 1.96 \quad (2-2)$$

راجان (Rajan, 1970) بر اساس مطالعه هندسی تعدادی از جام‌های بکار رفته در سیستم‌های تخلیه سیلاب چند سد موجود در هندوستان شعاع لازم برای جام از نوع ساده را به صورت تابعی از عدد فرود

جریان در مقطع ورودی جام  $F_1 = \frac{q}{(gt_b^3)^{1/2}}$  مطابق رابطه زیر پیشنهاد کردند:

$$R_b = 17 \left( F_1^{1/2} - 2 \right) \quad (3-2)$$

شیواشانکارا (Shivashankara, 1978) بر اساس مطالعاتش بر روی جام‌های مختلف رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$\frac{R_b}{y_1} = 11.534 F_b^{0.5} - 9.113 F_b^{0.25} \quad 3 < F_b < 5.5 \quad (4-2)$$

$$\frac{R_b}{y_1} = 4.037 (F_b - 3.7627) \quad 5.5 < F_b < 10 \quad (5-2)$$

راجان (Rajan) و همکاران وی در سال ۱۹۸۰ هشت فرمول مختلف را برای محاسبه شعاع جان بدست آوردند. از جمله رابطه زیر که در سال ۱۹۸۷ توسط اداره عمران و آبادانی آمریکا (USBR) ارائه شده است:

$$R_b = \frac{2qV_0}{p_b} \quad (6-2)$$

که در آن  $P_b$ ، ارتفاع معادل فشار دینامیکی مجاز در گودی جام،  $V_0$  سرعت جریان در ورودی به جام و  $q$  شدت جریان در واحد عرض است. رابطه‌ای که در آیین نامه طراحی هیدرولیکی سرریزها در سال ۱۹۹۵ از طرف USBR برای محاسبه حداقل شعاع جام ارائه شده، بصورت زیر است:

$$R_b = \frac{\rho V_0^2 t_b}{p - \gamma t_b} \quad (7-2)$$

در رابط فوق  $P$  ارتفاع معادل کل فشار مجاز در جام است (USBR, 1995). آیین نامه مذکور از سال ۱۹۹۵ تا به امروز در طراحی بسیاری از سدهای بلند بعنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲-۲-۲ - توزیع فشار در جام

زمانیکه جریان از سرریز وارد می‌شود، به سمت بالا هدایت خواهد شد که در این حالت فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌شود. اگرچه این فشار را نمی‌توان بصورت دقیق محاسبه نمود اما با فرضیاتی می‌توان آن را به شکل تقریبی معین نمود. اگر فرض شود عمق جریان در مرکز جام برابر عمق جریان در ورودی به جام باشد، فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز در نقطه  $O$  برابر خواهد بود با (بارانی، ۱۳۸۲):