

# بهینه‌سازی زاویه جام پرتابی مثلثی و عرض سرریز شوت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سید حامی حجتی<sup>۱</sup>، سید هانی حجتی<sup>۲</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد مهندسی برق، و مخابرات دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

Salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۸/۲۹]

**چکیده** - سرریزهای پرش اسکی یکی از سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی جریان است. بیشتر ضوابط طراحی هیدرولیکی جام‌های پرتابی متکی بر روش‌های تحلیلی و تجربی به دست آمده از مدل‌های هیدرولیکی است. با توجه اهمیت سرریزها در ایمنی سدها، این سازه‌ها باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با راندمان بالا انتخاب شوند. زاویه جام مثلثی یکی از پارامترهای اساسی در طراحی جام محسوب می‌شود؛ چرا که میزان فشار دینامیکی روی جام، طول جت خروجی از جام، میزان استهلاک انرژی و عمق آبستگي و غیره متاثر از این پارامتر است. در این پژوهش به منظور افزایش راندمان سرریز، با به کارگیری روش بهینه‌سازی ژنتیک سعی در طراحی بهینه زاویه انحراف جام مثلثی و عرض سرریز تنداب شده است. برای دست‌یابی به اهداف یاد شده ابتدا، روابطی که به وسیله‌ی حجتی در سال ۱۳۹۲ برای ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام، طول جت خروجی از جام و عمق آبستگي معرفی شده است، به عنوان پارامترهای تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سپس وزن‌های مربوط به پارامترهای تابع هدف با استفاده از اطلاعات مربوط به سرریز سد کارون ۳ کالیبره شده و در پایان زاویه جام مثلثی و عرض سرریز شوت به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک طراحی شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی سرریز سد کارون ۳، میزان عرض سرریز تنداب و زاویه جام مثلثی طراحی شده به کمک الگوریتم ژنتیک بترتیب ۱۷/۴ متر و ۳۰ درجه و اختلاف آن‌ها با سرریز تنداب و زاویه جام مثلثی سرریز سد کارون ۳ به ترتیب ۱۶٪ و ۰٪ به دست آمده است که نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک پتانسیل بالایی برای طراحی پارامترهای گفته شده دارد.

**واژگان کلیدی:** جام پرتابی مثلثی، عرض سرریز تنداب، پرش اسکی، الگوریتم ژنتیک

## ۱- مقدمه

انرژی جنبشی زیاد جریان، منجر به خرابی‌هایی از قبیل فرسایش کانال پایاب، سایش سازه‌های هیدرولیکی، تولید امواج مخرب در پایاب و یا پدیده آبستگي شود، به کار می‌روند [۱].

مطالعات انجام شده در این زمینه بیشتر مربوط به جام پرتابی دایره‌ای بوده است. رون و پترکا در سال ۱۹۵۹ با بررسی چند نوع جام، منحنی‌های بی‌بعدی برای کمک به تعیین طول پرتابه جت، انتشار جت، فروکش کردن عمق پایاب و فشار روی کف و

در مهندسی هیدرولیک سازه‌هایی از قبیل حوضچه‌های آرامش<sup>۱</sup>، کف‌های مانع دار<sup>۲</sup> و شفت گردابه‌ای<sup>۳</sup>، تحت عنوان مستهلک‌کننده‌های انرژی استفاده می‌شود [۱]. وظیفه اصلی این نوع سازه‌ها، مستهلک یا تبدیل نمودن انرژی جنبشی اضافی جریان است. مستهلک‌کننده‌های پرش اسکی در مواردی که

- 1 Stilling Basins
- 2 Baffled Aprons
- 3 Vortex Shafts

دیواره های جانبی جام به دست آوردند [۲]. در سال ۱۹۶۱، بالوفت با فرض وجود جریان غیر چرخشی در جام، بیشینه فشار روی جام را محاسبه کرد و نتایج تئوری را با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه نمود. به عقیده وی در طراحی جام پرتابی مهمترین موضوع، تعیین نیروهای دینامیکی ناشی از جریان منحنی وار است که به سازه وارد می شود [۳]. چن و یو در سال ۱۹۶۵، روشی برای محاسبه توزیع فشار و پروفیل سطح آزاد یک جریان ماندگار، دوبعدی و پتانسیل در امتداد جام پرتابی استوانه‌ای شکل و با زوایای ۷۵ و ۹۵ درجه ارائه کردند و حداکثر هد فشاری به دست آمده تقریباً مشابه نتایج بالوفت بود [۴]. لنائو و کسیدی در سال ۱۹۶۹، روش چن و یو [۴] را ارتقاء داده و با در نظر گرفتن یک جریان غیر قابل تراکم و غیر چرخشی معادلاتی انتگرالی را به دست آوردند و با حل عددی آن توانستند توزیع سرعت و فشار را در جام ها به دست آورند [۵]. جوآن و هگر در سال ۲۰۰۰ با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر عدد فرود جریان و هندسه جام بر توزیع فشار دینامیکی روی جام پرتابی دایروی، و مقایسه نتایج خود با نتایج حاصل از روابط تئوری، و همچنین بررسی پروفیل سطح آزاد جت خروجی از جام پرداختند [۶]. هلر و همکاران در سال ۲۰۰۵ با گسترش آزمایش‌های جوآن و هگر و بررسی فشار در کف جام و ویژگی‌های جریان برای هندسه و اعداد فرود متفاوت، روابطی را برای محاسبه بیشینه فشار و مکان وقوع آن ارائه دادند. همچنین ایشان به بررسی پروفیل جت پرتابی از جام دایروی شکل با کانال منشوری، و اثر عدد فرود جریان ورودی و شعاع جام روی آن پرداختند [۷]. استینر و همکاران در سال ۲۰۰۸ کاری مشابه به کار هلر و همکارانش، اما، روی جام مثلثی، انجام دادند. همچنین ایشان به مقایسه پارامترهایی از قبیل فشار دینامیکی روی جام و استهلاك انرژی برای جام مثلثی و دایروی پرداختند [۸]. فیستر در سال ۲۰۰۸ با در نظر گرفتن شیب‌های مختلف برای کانال بالادست و پایین‌دست جام پرتابی مثلثی، رابطه‌ای برای طول جت خروجی از جام تا نقطه برخورد آن به پایاب ارائه داد [۹]. قلمبر در سال ۱۳۹۰ به شبیه سازی جریان دو فازی بر روی جام پرتابی دایره‌ای از طریق نرم‌افزار فلونت پرداخت [۱۰]. ایشان از مشخصات مدل

آزمایشگاهی بررسی شده به وسیله‌ی جوآن و هگر [۶] استفاده کردند. ایشان پارامتر فشار دینامیکی به دست آمده از حل عددی برای هندسه و شرایط مختلف جریان را، با رابطه هلر و همکاران [۷] مقایسه کردند، و در آخر به این نتیجه رسیدند که نتایج عددی هماهنگی خوبی با مدل آزمایشگاهی داشت [۱۰]. فیستر در سال ۲۰۱۲ به بررسی زاویه پرتاب جت پرداخت و در پایان رابطه‌ای برای آن ارائه داد. ایشان در این رابطه اثر شیب تنداب را نیز در نظر گرفت [۱۱]. حجتی در سال ۱۳۹۲ پس از راستی‌آزمایی مدل عددی خود (جام مثلثی) با مدل آزمایشگاهی استینر و همکاران [۸] به بررسی فشار دینامیکی روی جام، برد جت خروجی از جام، استهلاك انرژی و عمق آبستنگی پایاب پرداخت. ایشان برای بررسی این پارامترها کانال بالادست جام را تحت زاویه ۳۰ درجه قرار دادند [۱۲]. از جمله کارهای با ارزش انجام شده با استفاده از برنامه سازی تکاملی (ژنتیک) در زمینه جام پرتابی، می‌توان به کار انجام شده به وسیله‌ی آزماسولا و همکاران در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد. ایشان با استفاده از روش GP<sup>۱</sup> موفق به تخمین عمق آبستنگی در پایین‌دست جام مثلثی شده‌اند [۱۳].

تا کنون پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه جام‌های پرتابی بیشتر متکی به روش آزمایشگاهی و عمدتاً مرتبط با جام دایروی بوده است. طراحی این جام‌ها معمولاً بر اساس روابط تجربی و ساخت مدل فیزیکی که بسیار هزینه‌بر است، صورت می‌گیرد. جام مثلثی اولین بار در سال ۲۰۰۸ به وسیله‌ی استینر و همکاران معرفی شده است [۸]. این جام به دلیل آسانی در ساخت، می‌تواند جایگزین مناسبی برای جام دایروی باشد. زاویه جام مثلثی یکی از پارامترهای اساسی در طراحی جام محسوب می‌شود؛ چرا که میزان فشار دینامیکی روی جام، طول جت خروجی از جام، میزان استهلاك انرژی و عمق آبستنگی متأثر از این پارامتر است. نظر به اینکه تاکنون ضوابط مشخصی برای طراحی جام پرتابی مثلثی ارائه نشده است و همچنین طراحی‌های پیشین به صورت تجربی و مختص جام پرتابی دایروی بوده است، در این پژوهش با در نظر گرفتن افزایش

1 Genetic Programming

الگوریتم بهینه سازی ژنتیک طراحی شده است. سد کارون ۳ روی رودخانه کارون در جنوب کشور ایران احداث شده است. این سد از نوع بتنی قوسی، با ارتفاع ۲۰۵ متر و حجم مخزن سد ۲۷۵۰ میلیون متر مکعب است [۱۵]. این سد با ۳ نوع سرریز طراحی شده است. سرریز تنداب<sup>۴</sup> از نوع دریچه دار<sup>۵</sup>، به عنوان سرریز اصلی در تکیه گاه راست سد قرار گرفته، سرریز روزنه ای<sup>۶</sup> به عنوان سرریز سرویس در بدنه سد و در تراز ۷۵۲ متری قرار دارد، همچنین سرریز آبشاری یا تاج<sup>۷</sup> از نوع بدون دریچه به عنوان سرریز اضطراری پیش بینی شده است [۱۵]. در طرح اولیه مشاور در سال ۱۳۷۱ ظرفیت کل سیستم تخلیه سیلاب در تراز دیواره جان پناه تاج سد ( ۸۵۱/۵ متر بالاتر از سطح دریا) معادل ۲۱۶۷۰ متر مکعب بر ثانیه، پیش بینی شده بود. در این طرح سرریز تنداب دارای ۳ دهانه هر یک به عرض ۱۵ متر است. بیشینه ظرفیت سرریز در تراز ۸۵۱/۵، معادل ۱۳۹۰۰ متر مکعب بر ثانیه (مجموعاً برای هر سه سرریز تنداب) برآورد شده است. همچنین در انتهای سرریزهای تنداب این سد به منظور استهلاک انرژی، از جام دایره ای استفاده شده است [۱۵]. در این پژوهش از مشخصات جام مربوط به بزرگترین سرریز سد کارون ۳ که دارای شعاع جام ۳۰ متر با زاویه انحراف ۳۰ درجه است به منظور کالیبره کردن وزن های تابع هدف استفاده شده است.

شکل (۱) هندسه و طرح کلی جام پرتابی مثلثی

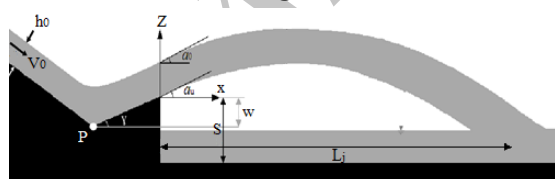


Figure 1. Schematic view of ski jump flow over a triangular flip-bucket

شکل (۱) هندسه و طرح کلی جام پرتابی مثلثی را نشان می دهد. در این شکل  $\gamma$  زاویه انحراف جام،  $w$  ارتفاع جام،  $S$

راندمان سرریز و با به کارگیری روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک سعی در طراحی بهینه زاویه انحراف جام مثلثی و عرض سرریز تنداب شده است.

## ۲- ابزار و روش انجام کار

در میان روش های بهینه سازی الهام گرفته شده از طبیعت جاندار، الگوریتم ژنتیک (وراثتی) از تکامل یافته ترین ها به شمار می رود. این الگوریتم با ایجاد مجموعه نقاط جستجوی اولیه ای به نام جمعیت اولیه که معمولاً به شکل تصادفی تعیین می شوند، آغاز می شود [۱۴]. الگوریتم های ژنتیک برای هدایت عملیات جستجو به طرف نقطه بهینه از تعدادی عملگر استفاده می کنند و در فرآیندی که به انتخاب طبیعی وابسته است، جمعیت موجود به تناسب برازندگی<sup>۱</sup> افراد آن برای نسل بعد انتخاب می شود. سپس، جمعیت جدید جایگزین جمعیت پیشین می شود و این چرخه ادامه می یابد. معمولاً جمعیت جدید برازندگی بیشتری دارد، این بدان معناست که از نسلی به نسل بعد، برازندگی میانگین جمعیت بهبود می یابد. هنگامی جستجو به پایان می رسد که به بیشینه نسل مورد نظر رسیده باشیم، یا همگرایی حاصل شده باشد و یا معیارهای توقف برآورده شده باشند [۱۴].

هدف نهایی مسائل بهینه سازی، کمینه کردن زیان و یا بیشینه کردن سود مورد نظر است. این زیان یا سود را می توان به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم<sup>۲</sup> (متغیرهای طراحی<sup>۳</sup>) تعریف کرد. به زبان ریاضی، بهینه سازی را می توان به دست آوردن شرایطی دانست که تابع یاد شده را بیشینه یا کمینه می کند.

در این پژوهش برای تشکیل تابع هدف، از روابط به دست آمده به وسیله حجتی در سال ۱۳۹۲ استفاده شده است [۱۲]. وزن های مربوط به پارامترهای تابع هدف با استفاده از اطلاعات مربوط به سرریز سد کارون ۳ کالیبره شده و در نهایت زاویه جام مثلثی و عرض سرریز شوت به کمک

4 Chute Spillway  
5 Gated  
6 Orifice Spillway  
7 Crest Spillway

1 Fitness  
2 Decision variable  
3 Design variable

می‌یابد، چرا که افزایش این پارامترها منجر به افزایش گرادیان سرعت روی جام می‌شود [۱۲]. همچنین با توجه به اینکه از بین ارتفاع و زاویه جام که پارامترهای طراحی هندسه جام است، تنها زاویه جام باعث تغییر جهت جریان شده، در نتیجه فشار دینامیکی حداکثر روی جام مستقل از ارتفاع جام است (فشار دینامیکی ناشی از تغییر در اندازه یا جهت سرعت جریان است)

فاصله لبه جام تا کف کانال پایین دست،  $V_0$  سرعت اولیه جریان،  $h_0$  عمق جریان ورودی کانال بالادست،  $a_0$  و  $a$  به ترتیب زوایای پروفیل فوقانی و تحتانی جت خروجی از منحرف کننده مثلثی است.

### ۳- معرفی تابع هدف

تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش به شکل زیر تعریف شده است:

$$f = w_{hp} hp / hp_{max} + w_{ze} ze / ze_{max} - w_{lj} lj / lj_{max} \quad (۱)$$

۲-۳ محاسبه برد جت خروجی از جام

برای محاسبه برد جت خروجی از جام ( $lj$ ) حجتی در سال ۱۳۹۲ رابطه زیر را به دست آورد [۱۲]:

$$\frac{lj}{h_0} = c \cdot Fr^a \cdot \tan^b \quad (۶)$$

در این رابطه پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  بترتیب با استفاده از روابط (۷)، (۸) و (۹) به دست می‌آیند [۱۲]:

$$a = 67.46h_0^2 - 14.72h_0 + 1.07 \quad (۷)$$

$$b = -2.14h_0 + 0.52 \quad (۸)$$

$$c = -744.5h_0^2 + 52.81h_0 + 16.75 \quad (۹)$$

با افزایش عدد فرود  $h_0$  و  $V_0 = Fr \cdot \sqrt{gh_0}$  که در آن  $V_0$  سرعت در بالادست جام و  $g$  شتاب گرانش زمین است، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه جت خروجی از جام به نقطه دورتری پرتاب می‌شود. همچنین بدیهی است برد جت مستقل از ارتفاع جام باشد، زیرا تغییر ارتفاع جام تنها باعث تغییر طول جام می‌شود که سهم ناچیزی در برد جت دارد.

در این رابطه  $f$  تابع هدف،  $hp$  حداکثر ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام،  $ze$  عمق آبشستگی،  $lj$  برد جت خروجی از جام است که در ادامه چگونگی محاسبه این پارامترها ارائه می‌شود. همچنین  $w_{hp}$ ،  $w_{ze}$  و  $w_{lj}$  به ترتیب وزن‌های مربوط به پارامترهای حداکثر فشار دینامیکی بر روی جام، عمق آبشستگی و برد جت است.  $hp_{max}$ ،  $lj_{max}$  و  $ze_{max}$  به ترتیب حداکثر مقدار پارامتر  $hp$ ،  $lj$  و  $ze$  می‌باشند. وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن در پروژه مورد نظر تعیین می‌شود. در این پژوهش برای به دست آوردن این وزن‌ها از مشخصات سرریز سد کارون ۳ استفاده شد.

۱-۳ محاسبه حداکثر ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام

برای محاسبه بیشینه ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام ( $hp$ ) حجتی در سال ۱۳۹۲ رابطه زیر را با بررسی ۸۱ مدل به دست آورد [۱۲]:

$$\frac{hp}{h_0} = c \cdot Fr^a \cdot \tan^b \quad (۲)$$

در این رابطه  $h_0$  عمق جریان ورودی،  $Fr$  عدد فرود،  $\gamma$  زاویه جام و پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب با استفاده از روابط (۳)، (۴) و (۵) به دست می‌آیند [۱۲].

$$a = 59.5h_0^2 + 13.43h_0 + 1.01 \quad (۳)$$

$$b = 12.22h_0^2 + 3.17h_0 + 0.27 \quad (۴)$$

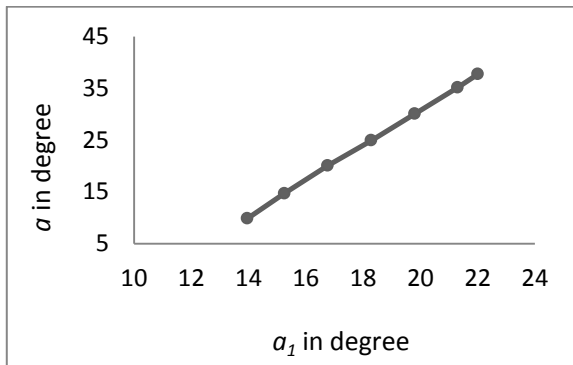
$$c = 351.03h_0^2 + 99.45h_0 + 10.87 \quad (۵)$$

رابطه (۲) نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود، عمق جریان ورودی و زاویه جام، فشار دینامیکی حداکثر روی جام افزایش

۳-۳ محاسبه عمق آبشستگی پایین دست

برای تخمین عمق و هندسه چاله آبشسته به وسیله‌ی جت پرتاب شده از پرتاب‌کننده جامی، روابط تجربی زیادی ارائه شده است که در اینجا به رابطه سن (رابطه ۱۰) در سال ۱۹۸۴ که با مطالعه و بررسی نمونه اصلی تعدادی جام به کار رفته در هندوستان و روسیه حاصل شده است، درسیستم متریک اشاره می‌شود [۱۶].

$$z_e = 0.9 \left( \frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} H_T^{\frac{1}{4}} \frac{\theta}{\alpha_1} \quad (۱۰)$$

شکل (۳) چگونگی محاسبه  $\alpha_1$  با استفاده از زاویه پرتاب جت [۱۶]Figure 3. Calculation of  $\alpha_1$  using Jet takeoff angle [16]

#### ۴- کالیبره کردن وزن‌های تابع هدف با

##### استفاده از سرریز سد کارون ۳

با توجه به اینکه مشخصات مدل عددی ساخته شده به وسیله‌ی حجتی در سال ۱۳۹۲ [۱۲]، با مشخصات هندسی و هیدرولیکی بزرگترین سرریز تنداب سد کارون ۳ هماهنگی دارد، بنابراین وزن‌های مربوط به تابع هدف ذکر شده با استفاده از این سرریز کالیبره شده است. مدل هیدرولیکی سرریز تنداب سد کارون ۳ با مقیاس ۱:۶۰ در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) ساخته شده است. آزمایش‌های انجام شده روی این مدل به ازای دبی‌های ۱۰۰۰ تا ۱۳۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه (۴۴۶۷ متر مکعب بر ثانیه برای بزرگترین سرریز سد کارون ۳) در حالتی که دریچه‌های سرریز کاملاً باز است، انجام شده است. با توجه به اینکه جام استفاده شده در انتهای سرریز تنداب این سد از نوع دایره‌ای است، بنابراین برای تبدیل پارامترهای مورد نیاز جام دایره‌ای به جام مثلثی، به صورت زیر عمل می‌شود:

➤ برای تبدیل  $R$  و  $\beta$  (شعاع و زاویه جام دایروی) به  $w$  و  $\gamma$  (ارتفاع و زاویه جام مثلثی) مطابق شکل (۴)،  $\gamma = \beta$  و ارتفاع جام از رابطه (۱۳) که با استفاده از روابط هندسی به دست آمده است، استفاده شده است [۸]. با توجه به اینکه بزرگترین سرریز تنداب سد کارون ۳ دارای جام دایره‌ای به شعاع  $R$  ۳۰ متر و زاویه  $\beta$  ۳۰° است بنابراین ارتفاع جام معادل برابر ۴ متر و زاویه انحراف آن برابر ۳۰° می‌شود.

$$w = R(1 - \cos \beta) \quad (13)$$

در این رابطه  $z_e$  عمق نهایی چاله آب شسته است،  $\theta$  زاویه برخورد جت زیرین،  $H_T$  هد پایین‌دست،  $q$  دبی در واحد عرض و  $\alpha_1$  زاویه بالادست چاله آب‌شسته است (مطابق شکل ۲).

شکل (۲) پارامترهای هندسی چاله آب‌شسته شده [۱۶]

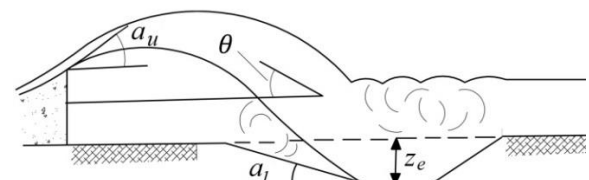


Figure 2. Geometrical parameters of scour [16]

پارامترهای این رابطه مربوط به جام پرتابی دایره‌ای می‌باشد، پس حجتی تغییرات زیر را برای محاسبه عمق آب‌شستگی برای جام مثلثی اعمال کرده است [۱۲]:  
زاویه برخورد جت با پایاب ( $\theta$ ) با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۱۲]:

$$\frac{\theta}{\gamma} = 0.586 \cdot fr^{-0.308} \cdot \left(\frac{s+w}{h_0}\right)^{0.4} \cdot \tan \gamma^{-0.774} \quad (11)$$

در این رابطه  $s$  اختلاف تراز انتهای جام تا کف کانال پایین دست و  $w$  ارتفاع جام است. این رابطه نشان می‌دهد زاویه برخورد جت به پایاب، تابع هندسه جام و شرایط هیدرولیکی بالادست است.

سن (۱۹۸۴) به منظور محاسبه زاویه بالادست چاله آب‌شسته ( $\alpha_1$ ) شکل (۳) را پیشنهاد می‌کند که مطابق این شکل برای به دست آوردن  $\alpha_1$  نیاز به محاسبه زاویه پروفیل تحتانی جت خروجی از جام ( $\alpha$ ) است. برای محاسبه  $\alpha$  از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۱۲]. بررسی انجام شده به وسیله حجتی در سال ۱۳۹۲ روی ۸۱ مدل عددی ساخته شده نشان می‌دهد که زاویه پروفیل تحتانی جت ( $\alpha$ ) تقریباً برابر زاویه انحراف جام ( $\gamma$ ) است، و سایر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی روی آن تاثیر نمی‌گذارند. بنابراین رابطه به دست آمده برای زاویه پروفیل تحتانی جت خروجی از جام (رابطه ۱۲) فقط تابع زاویه جام است [۱۲].

$$\alpha = 47.106 \cdot \tan \gamma^{0.856} \quad (12)$$

مشخصات مربوط به این الگوریتم در مرجع [۱۷] آمده است. برای محاسبه پارامترهای  $dh_{pmax}$ ،  $lj_{max}$  و  $ze_{max}$  به دلیل پیچیدگی روابط مربوط به محاسبه  $dh_p$  و  $lj$  از روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در پایان با در نظر گرفتن مشخصات سرریز سد کارون ۳  $dh_{pmax}$ ،  $lj_{max}$  و  $ze_{max}$  برای عدد فرود  $2/2$  به ترتیب  $64/8$ ،  $144$  و  $28/8$  متر و برای عدد فرود  $3/2$  به ترتیب برابر  $79/8$ ،  $166$  و  $32$  متر برای نمونه اصلی به دست آمدند.

در این پژوهش مقادیر پارامترهای الگوریتم BEGA بعد از حساسیت‌سنجی نتایج به صورت زیر به دست آمده است: جمعیت اولیه: ۲ کروموزوم، احتمال ترویج:  $0/9$ ، شاخص SBX در الگوریتم BEGA برابر  $0/5$  و تعداد نسل‌های الگوریتم ژنتیک برابر  $150$  در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از کمینه‌سازی تابع هدف (f) با استفاده از الگوریتم ژنتیک پس از کالیبره کردن وزن‌ها با استفاده از پارامتر بیشینه ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام برای دبی نزدیک به دبی طراحی بزرگترین سرریز تنداب سد کارون ۳ ( $4467$  متر مکعب بر ثانیه در نمونه اصلی)، عدد فرود  $2/2$  و ارتفاع جام  $4$  متر، در جدول (۱) آمده است. لازم به ذکر است که چگونگی انتخاب وزن‌های کالیبره شده به این شکل است که بیشینه ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام در مدل فیزیکی و مقدار آن در تابع هدف مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک برابر شدند. در این حالت عمق آبستگي برابر  $22/5$  متر و میزان برد جت برابر  $144$  متر به دست آمده است. مطابق جدول (۱) زاویه جام طراحی شده مانند زاویه طراحی سرریز سد کارون ۳ طراحی شد و عرض سرریز با  $16\%$  درصد اختلاف نسبت به سرریز این سد برابر  $17/4$  متر طراحی شد. وزن‌های مربوط به تابع هدف در این حالت مطابق حالت ۱ از جدول ۲ شد. با بررسی وزن‌های حالت ۱ مشخص شد پارامتر برد جت خروجی از جام، در کمینه‌سازی تابع هدف نقش بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر دارد (برد جت کمی کمتر از میزان بیشینه آن برای عدد فرود  $2/2$  به دست آمده است، اما میزان ارتفاع معادل حداکثر فشار دینامیکی و عمق آبستگي با میزان کمینه آنها، اختلاف بیشتری دارند).

شکل (۴) نحوه تبدیل جام مثلثی به دایروی

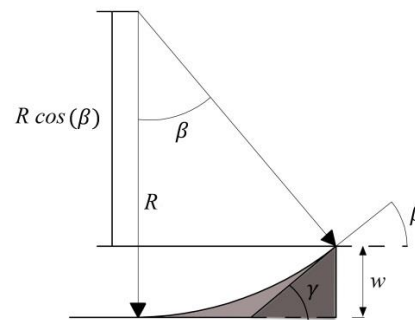


Figure 4. Conversion of triangular flip bucket to circular flip bucket with identical deflector

استینر و همکاران برای تبدیل بیشینه فشار دینامیکی جام دایروی به جام مثلثی پارامتر  $\eta_{pm}$  (بیشینه فشار نسبی جام مثلثی به جام دایره‌ای) را ارائه کردند. مطابق شکل (۵) میزان پارامتر  $\eta_{pm}$  به ازای زوایای مختلف جام محاسبه می‌شود. در نتیجه با ضرب بیشینه فشار دینامیکی جام دایره‌ای در پارامتر  $\eta_{pm}$  (بیشینه فشار نسبی جام مثلثی به جام دایره‌ای)، میزان بیشینه فشار دینامیکی معادل آن برای جام مثلثی به دست می‌آید [۸]. در این پژوهش مشخص شد  $\eta_{pm}$  برای بزرگترین سرریز تنداب سد کارون ۳، برابر  $1/75$  حاصل شد. با در نظر گرفتن این ضریب ارتفاع معادل فشار دینامیکی جام مثلثی معادل جام دایروی در سرریز سد کارون ۳، برابر  $46/55$  متر به دست آمده است.

شکل (۵) مقایسه بیشینه فشار دینامیکی بین جام پرتابی مثلثی و دایره‌ای [۸]

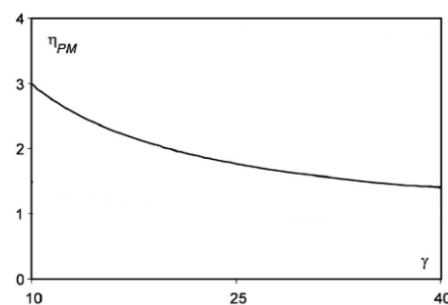


Figure 5. Compare the maximum dynamic pressure between throwing cup triangular and circular

در ادامه این بخش منظور از بیشینه فشار دینامیکی جام مثلثی در مدل هیدرولیکی، بیشینه فشار دینامیکی جام مثلثی معادل با جام دایره‌ای است.

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با نسخه‌سالاری ساده (BEGA) برای حل مساله بهینه‌سازی استفاده شده، که

جدول (۱) نتایج بدست آمده از کالیبره کردن وزن‌های تابع هدف با سرریز سد کارون ۳

	$h_0$ (m)	$V_0$ (m/s)	$hp$ (m)	$\gamma$ °	$B$ (spillway width)
Hydraulic model	13.38	24.5	46.55	30	15
Design by Genetic	10.8	22.64	50.4	30	17.4
Difference with	19	7.6	8.2	0	16

Table 1. Comparison of physical model and optimization results of Karoon III spillway

۳۶ متر، عمق آبستگي برابر ۱۵/۳ متر و برد جت برابر ۶۳ متر به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده در بخش ۳ (در این بخش کاهش زاویه جام و عمق جریان ورودی باعث کاهش فشار دینامیکی روی جام شده‌اند)، بدیهی است برای کمینه کردن پارامتر فشار، زاویه و عمق جریان ورودی کمتر از حالت ۱ شوند. در نتیجه عرض سرریز بسیار بیشتر از حالت ۱ به دست می‌آید. عرض سرریز به دست آمده در حالت ۳ نشان می‌دهد که نیاز به طراحی تعداد بیشتری سرریز تنداب است که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، اما میزان افت عمق آبستگي (به علت کاهش زاویه جام و سرعت جریان) در این حالت صرفه جویی اقتصادی را در بر دارد. همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری جام پرتابی و سرریز تنداب به دلیل کاهش فشار و سرعت جریان کمتر می‌شود (با کاهش سرعت احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون و تخریب تنداب کمتر می‌شود). طول جت به دلیل کاهش شدید زاویه جام و سرعت جریان نسبت به حالت قبل به اندازه ۵۶٪ کاهش یافت که مطلوب نیست. بنابراین طراحی عرض سرریز و زاویه جام بر اساس بیشینه فشار دینامیکی چندان توصیه نمی‌شود.

با تغییر وزن‌های تابع هدف مطابق حالت ۴ به گونه‌ای که پارامتر تاثیر گذار در تابع هدف پارامتر  $z_e$  باشد، عرض سرریز ۵۴/۵ متر، زاویه جام ۳۰ درجه و عمق آب ورودی ۵ متر طراحی شد. همچنین ارتفاع معادل بیشینه فشار دینامیکی برابر ۴۳/۲ متر، عمق آبستگي برابر ۱۳/۵ متر و برد جت برابر ۹۹ متر به دست آمده است. با توجه به این که افزایش  $w_{ze}$  معادل با افزایش  $w_{hp}$  است، روند تغییر پارامترها به غیر از زاویه جام، در حالت ۴ مطابق حالت ۳ است. در این حالت زاویه جام نسبت به حالت ۳ بیشتر شده که منجر به افزایش بیشینه فشار

جدول (۲) حالت‌های مختلف بررسی شده در این پژوهش

State No:	$w_{ze}$	$w_{hp}$	$w_{lj}$	$F_r$	$Q$ $m^3/s$
1	0.04	0.14	0.82	2.2	4467
2	0.04	0.1	0.86	3.2	1333
3	0.1	0.8	0.1	2.2	4467
4	0.8	0.1	0.1	2.2	4467
5	0.33	0.33	0.34	2.2	4467

Table 2. Different investigated scenario

## ۵- حساسیت سنجی

۵-۲- حساسیت سنجی نسبت به دبی طراحی و عدد فرود ورودی با فرض استفاده از وزن‌های استفاده شده در بخش ۴ به ازای دبی ۱۳۳۳ متر مکعب بر ثانیه (حالت ۲ از جدول ۲)، عدد فرود ۳/۲ و ارتفاع جام ۴ متر، عرض سرریز ۳/۶ متر، زاویه جام ۳۰ درجه، سرریز این سد طراحی شد. طبیعی است با کاهش دبی طراحی به میزان ۷۰٪، عرض سرریز شوت به میزان قابل توجهی (۸۰٪) کاهش یابد و در زاویه جام نیز با توجه به ثابت ماندن وزن‌ها، تغییری نسبت به حالت ۱ حاصل نشود. همچنین ارتفاع معادل بیشینه فشار دینامیکی برابر ۵۶/۷ متر، عمق آبستگي برابر ۲۶/۱ متر و برد جت برابر ۱۵۹/۳ متر به دست آمده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود ثابت در نظر گرفتن وزن‌ها، افزایش عدد فرود و کاهش عرض جام، باعث افزایش سرعت جریان و در نهایت باعث افزایش پارامترهای استفاده شده در تابع هدف در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ است.

۵-۳- حساسیت سنجی نسبت به وزن‌های تابع هدف با تغییر وزن‌های تابع هدف مطابق حالت ۳ به طوری که پارامتر تاثیر گذار در تابع هدف پارامتر  $hp$  باشد، عرض سرریز ۶۴ متر، زاویه جام ۱۲/۷ درجه و عمق آب ورودی ۴/۵ متر طراحی شد. همچنین ارتفاع معادل بیشینه فشار دینامیکی برابر

نتایج مشخص شد پارامتر برد جت خروجی از جام، در کمینه-سازی تابع هدف نقش بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر دارد. با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی سرریز سد کارون ۳، میزان عرض سرریز تنداب و زاویه جام مثلثی طراحی شده به کمک الگوریتم ژنتیک به ترتیب  $17/4$  متر و  $30$  درجه و اختلاف آن-ها با سرریز تنداب و زاویه جام مثلثی سرریز سد کارون ۳ به ترتیب  $16/1\%$  و  $0/0\%$  به دست آمده است که نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک پتانسیل بالایی برای طراحی پارامترهای گفته شده دارد. با کاهش دادن دبی به میزان  $70/7\%$ ، افزایش عدد فرود به میزان  $45/4\%$  و ثابت ماندن وزن‌های تابع هدف و ارتفاع جام، عرض سرریز  $3/6$  متر و زاویه جام  $30$  درجه به دست آمده است. طبیعی است که با کاهش دبی طراحی عرض سرریز به میزان قابل توجهی کاهش یابد و زاویه جام با ثابت ماندن وزن‌ها تغییر نکند. همچنین با ثابت در نظر گرفتن وزن‌ها، افزایش عدد فرود و کاهش عرض سرریز، سرعت جریان افزایش یافته و در آخر باعث افزایش پارامترهای استفاده شده در تابع هدف شد. با ثابت ماندن پارامترهای طراحی سرریز سد کارون ۳ و تغییر وزن‌های تابع هدف مطابق حالت ۳ و ۴، عرض سرریز بسیار زیاد طراحی شد که مقرون به صرفه نیست. همچنین با ثابت ماندن پارامترهای طراحی سرریز سد کارون ۳ و کاهش وزن‌های مربوط به برد جت به گونه‌ای که اثر هر سه پارامتر در کمینه کردن تابع هدف به یک اندازه لحاظ شود، میزان بیشینه فشار دینامیکی به اندازه  $7/0\%$ ، عمق آبستگي به اندازه  $16/1\%$  بهبود یافته است، اما برد جت به اندازه  $12/1\%$  کاهش و عرض سرریز به اندازه  $38/3\%$  افزایش یافته است، که چندان مطلوب نیست. در نتیجه کاهش وزن برد جت با توجه به تغییر ناچیز عمق آبستگي و بیشینه فشار روی جام و افزایش زیاد عرض سرریز مقرون به صرفه نیست. بنابراین در طراحی‌ها بهتر است تاثیر پارامتر برد جت از دو پارامتر دیگر بیشتر باشد. چراکه افزایش برد جت باعث استهلاک بیشتر انرژی جریان که هدف اصلی سازه مستهلک کننده پرش اسکی است می‌شود.

## References

[1] Vischer, D. L., and Hager, W. H. "Energy dissipators." IAHR Hydr. Struct. Des. Manual 9,

## ۸- مراجع

دینامیکی روی جام می‌شود، ولی میزان عمق آبستگي بهبود یافته است. هر چند عرض سرریز به نسبت حالت ۳ کمتر شده است، ولی باز هم برای طراحی یک سرریز، زیاد به نظر می‌رسد. میزان برد جت خروجی از جام نسبت به حالت ۱،  $32/0\%$  کاهش یافته است. با توجه به تاثیر زیاد برد جت در حالتی که وزن‌ها، با سرریز سد کارون ۳ کالیبره شده‌اند (حالت ۱)، در این حالت وزن مربوط به برد جت کاهش داده شده است، به گونه‌ای که اثر هر سه پارامتر در کمینه کردن تابع هدف به یک اندازه لحاظ شود (مطابق حالت ۵ از جدول (۲)). در این صورت عرض سرریز  $24$  متر، زاویه جام  $30$  درجه و عمق آب ورودی  $8/6$  متر طراحی شد. همچنین ارتفاع معادل بیشینه فشار دینامیکی برابر  $46/8$  متر، عمق آبستگي برابر  $18/9$  متر و برد جت برابر  $126$  متر به دست آمده است. در این حالت میزان بیشینه فشار دینامیکی به اندازه  $7/0\%$ ، عمق آبستگي به اندازه  $16/1\%$  بهبود یافته (کاهش یافته) است، اما برد جت به اندازه  $12/1\%$  کاهش و عرض سرریز به اندازه  $38/3\%$  افزایش یافته است (نسبت به حالت ۱). علت این تغییرات بیشتر به خاطر کاهش سرعت جریان است، که چندان مطلوب نیست. در نتیجه کاهش وزن برد جت با توجه تغییر ناچیز عمق آبستگي و بیشینه فشار روی جام و افزایش زیاد عرض سرریز مقرون به صرفه نیست. بنابراین در طراحی‌ها بهتر است تاثیر پارامتر برد جت از دو پارامتر دیگر بیشتر باشد.

## ۶- نتیجه گیری

با توجه اهمیت سرریزها در ایمنی سدها، این سازه‌ها باید سازه-ای قوی، مطمئن و با راندمان بالا انتخاب شوند. در این پژوهش به منظور تشکیل تابع هدف، ابتدا روابط ارائه شده به وسیله حجتی در سال ۱۳۹۲ برای ارتفاع معادل فشار دینامیکی روی جام، طول جت خروجی از جام و عمق آبستگي معرفی شده است. سپس وزن‌های مربوط به پارامترهای تابع هدف با استفاده از اطلاعات مربوط به سرریز سد کارون ۳ کالیبره شده و در پایان زاویه جام مثلثی و عرض سرریز شوت به کمک الگوریتم بهینه سازی ژنتیک طراحی شده است. با بررسی بیشتر



- [۱۰] قلمبر؛ فاطمه؛ "شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی روی جام های پرتابی"؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۰.
- [11] Pfister, M. "Jet impact angle on chute downstream of aerator. Proc, 4th IAHR Int, Symp, on Hydraulic Structures, 2012.
- [۱۲] حاجتی، سید حامی. "بررسی عددی هیدرولیک جریان جام پرتابی مثلثی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۲.
- [13] Azamathulla H. MD., Ghani A. AB., Zakaria N. A., Lai S. H., Chang C. K., Leow C. S., and Abuhasan Z. "Genetic programming to predict ski-jump bucket spillway scour." *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 20.4, 2008, 477-484.
- [14] Goldberg, D. E. "Genetic algorithm." *Search, Optimization and Machine Learning*, 1989, 343-349.
- [۱۵] مرکز تحقیقات آب. "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی جامع سد مخزنی کارون ۳". نشریه شماره ۱۶۴، ۱۳۷۱.
- [16] Sen, P. "Spillway scour and design of plunge pool." *Water and Energy International* 41.1, 1984, 51-68.
- [17] Goldberg, D. E. "Genetic algorithm." *Search, Optimization and Machine Learning*: 1989, 343-349.
- Balkema, Rotterdam, The Netherlands., 1995.
- [2] Rhone, T., and Peterka, A. "Improved tunnel spillway flip buckets." *Journal of the Hydraulics Division*, 85(12), 1959, 53-76.
- [3] Balloffet, A. "Pressures on spillway flip buckets." *J. Hydr. Div., ASCE*, 87(5), 1961, 87-98
- [4] Tiochun, C., and Sheng, Y. "Pressure distribution on spillway flip buckets." *Journal of The Hydraulics Division*, ASCE 91, 1965.
- [5] Lenau, C. W., and Cassidy., J. J. "Flow through spillway flip bucket." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE 95, 1969.
- [6] Juon, R., and Hager, W. H. "Flip bucket without and with deflectors." *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 2000, 837-845.
- [7] Heller, V., Hager, W. H., and Minor, H.-E. "Ski jump hydraulics." *J. Hydraul. Eng.*, 131(5), 2005, 347-355.
- [8] Steiner R, Heller V, Hager WH, and Minor, HE. "Deflector ski jump hydraulics." *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 2008, 562-571.
- [9] Pfister, M. "Schussrinnenbelüfter: Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur (Chuteaerators: Air transport due to internal flow features)." *Laboratory of Hydraulic, Hydrology and Glaciology (VAW), H.-E. Minor, ed. ETH: Zurich (in German)*, 2008.

Archive

## [The optimization design of triangular flip bucket angle and width of the spillway chute using genetic algorithm]

S.Hami.Hojati<sup>1</sup>, S.Hani.Hojati<sup>2</sup>, S.A.Salehi.N<sup>3\*</sup>

- 1- M.Sc. Student of Hydraulic Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University
- 2- M.Sc. Student of Communication Systems Engineering, Faculty of Electrical Eng., Babol Noshirvani University of Technology
- 3- Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng. and Water Eng. Research Center, Tarbiat Modares University

Salehi@modares.ac.ir

### Abstract:

Ski jump is one of the flow energy dissipators which is applicable downstream of spillway chutes with velocity over 20 m/s. The criteria for hydraulic design of flip buckets are based on the analytical and experimental methods obtained from physical models. Due to the importance of spillways in the safety of dams, these structures should be secure and highly efficient. In the present study, in order to increase the efficiency of the spillway, it has been attempted to optimally design wide- triangular flip bucket angle and chute spillway by applying genetic optimization method. To achieve the aforementioned objectives, firstly, the equations derived for dynamic pressure head on the flip bucket, the exit jet length, and scour depth have been used as the parameters of objective function (Hojjati, 1392). Thereafter, the weights of objective function parameters have been calibrated using data related to the spillway of Karoon 3 dam, and eventually triangular flip bucket angle and chute spillway have been designed with the help of genetic optimization algorithm. Taking into consideration the design parameters of Karoon 3 spillway, the spillway length and angle of triangular flip bucket were obtained as 17.4 meters and 30 degrees, respectively by means of genetic algorithm. However, their difference with the spillway length and angle of triangular flip bucket of Karoon 3 dam has been obtained as 16% and 0%, respectively which indicates that the genetic algorithm enjoys high potential for designing the aforementioned parameters. The width of downstream and deflector angle have been obtained 3.6 meters and 30 degrees, respectively with 70% decrease of discharge, 45.4% increase of Froude number, and consistency of the weights of objective function and flip bucket height. Also by assuming the weight constant, increasing Froude number and decreasing the width of spillway, the flow rate increases and results in the increase of the parameters used in the objective function. With the design parameters of Karoon 3 dam remaining constant and the significant increase of weights associated with the parameters of pressure and scour depth independently of each other; spillway width was designed very largely which is not cost-effective. As well, with the design parameters of Karoon 3 dam remaining constant and the decrease of weights associated with the exit jet length in a way that all the three parameters can be viewed equally effective in minimizing the objective function, maximum dynamic pressure and scour depth have been reduced as much as 7% and 16%, respectively; however, the jet length has undergone a reduction of 12% and its width has undergone an increase of 38% which is not fully desirable. As a result, the weight reduction of jet length is not cost effective due to the slight change of scour depth and the maximum increase of pressure on the flip bucket and also the big increase of spillway width. Therefore, it seems preferable that the effect of jet range parameter outweigh the other two parameters because increasing the jet range results in the further depreciation of flow energy which is the main focus of the ski jump dissipator construction.

**Keywords:** triangular flip bucket, chute spillway, ski jump, genetic algorithm