

# تعیین ابعاد بهینه جام پرتابی سدها با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

## مطالعه موردی: سد جره

موسی عرب<sup>۱</sup>، محمدرضا نیکو<sup>۲</sup>، سید حسین افزلی<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
- ۲- استادیار بخش بخش راه و ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
- ۳- استادیار بخش بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

afzali@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۱۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۸/۱۸]

**چکیده-** یکی از موضوعات مهم در مورد جام‌های پرتابی، تعیین ابعاد بهینه آنها در راستای افزایش استهلاک انرژی جریان همراه با کاهش فشار ماکزیمم جریان روی کف جام پرتابی است. در این پژوهش، با تدوین یک متدولوژی جدید شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بر مبنای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مدل FLOW-3D و مدل شبکه عصبی مصنوعی، ابعاد بهینه جام پرتابی مورد استفاده در انتهای سرریز سدها تعیین شده است. هدف از تعیین ابعاد بهینه، محاسبه شعاع انحنا و همچنین زاویه انحراف جام پرتابی است، به گونه‌ای که بیشینه فشار هیدرودینامیکی روی جام، کمینه و میزان استهلاک انرژی جت پرتابی بیشینه شود. بر مبنای این متدولوژی، پس از شبیه‌سازی مدل فیزیکی با نرم‌افزار FLOW-3D و کالیبراسیون آن، بر مبنای نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی جام پرتابی سد جره، جریان درون جام پرتابی برای شعاع-های مختلف و همچنین زوایای انحراف گوناگون شبیه‌سازی شده است. سپس با استخراج نتایج مربوط به بیشینه فشار روی کف جام و میزان اتلاف انرژی پس از برخورد جت پرتابی با کانال پایاب، یک فرامدل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، آموزش داده شده و درستی آن به وسیله بخشی از داده‌هایی که در مرحله آموزش از آن‌ها استفاده نشده بود، ارزیابی شده است. پس از تدوین فرامدل و اتصال آن به مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، ابعاد بهینه پرتاب‌کننده با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های آن تعیین شده است. در ادامه، برای بررسی درستی نتایج بهینه‌سازی، جام پرتابی سد جره بر مبنای ابعاد بهینه به دست آمده از متدولوژی گفته شده، دوباره با نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که میزان استهلاک انرژی در جام پرتابی با ابعاد بهینه، پس از برخورد جت حدود ۱۴ درصد افزایش یافته است.

**واژگان کلیدی:** جام پرتابی، الگوریتم ژنتیک، Flow-3D، استهلاک انرژی، شبکه عصبی مصنوعی.

### ۱- مقدمه

در توده آب انجام می‌گیرد [۱]. یکی از این سازه‌های استهلاک انرژی، جام‌های پرتابی هستند که وقتی سرعت در پای سرریز بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه باشد، استفاده می‌شود. زیرا استفاده از حوضچه‌های آرامش به دلیل پدیده کاویتاسیون در این سرعت‌ها امکان‌پذیر نیست [۲]. در این سیستم استهلاک انرژی با تغییر در شعاع و زاویه انحراف جام، جریان به سمت بالا منحرف می‌شود و در محلی دورتر از سد و سازه‌های وابسته به آن فرود می‌آید (شکل ۱).

وظیفه اصلی سازه‌های استهلاک انرژی، مستهلک نمودن انرژی جنبشی بسیار زیاد جریان، هنگام عبور از سرریز سد است. اگر جریان با چنین سرعت زیاد به‌طور مستقیم وارد کانال پایاب شود، باعث آبستگي شدید در کانال خواهد شد و اگر این آبستگي به‌طور مناسب کنترل نشود، به سمت سرریز و سد پیشروی کرده و پایداری سد و سازه‌های وابسته به آن را به خطر می‌اندازد. عموماً استهلاک انرژی به‌وسیله آشفته‌گی جریان به دلیل اصطکاک داخلی، ضربه و انتشار جریان با سرعت زیاد

انحنای نسبی جام  $\frac{h_0}{R}$  افزایش می‌یابد [۲]. همچنین استیتر و همکاران (۲۰۰۸) برای توسعه راهنمای طراحی جام‌های پرتابی، بر اساس مدل آزمایشگاهی بررسی شده به وسیله هلر و همکاران (۲۰۰۵)، افت نسبی انرژی را با تغییر مقطع جام دایره‌ای شکل به جام مثلثی شکل با زوایای انحراف  $8/2$  تا  $33/2$  درجه بررسی نمودند. ایشان نیز مانند روش پژوهش هلر و همکاران (۲۰۰۵)، با تعریف افت نسبی انرژی به صورت  $\eta = \frac{\Delta H}{H_0}$ ، رابطه زیر را پیشنهاد دادند.

$$\eta = 0.10(\tan \gamma)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{s}{h_0} \right), \text{ for } 1.7 < (\tan \gamma)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{s}{h_0} \right) < 5 \quad (1)$$

که در این فرمول،  $\gamma$  زاویه داخلی جام مثلثی شکل است و بقیه پارامترها مطابق شکل (۱) است. با توجه به بررسی‌های ایشان، با جایگزینی مقطع جام دایره‌ای با یک جام مثلثی شکل و در شرایط جریان مشابه، میزان استهلاك انرژی در پایاب تا حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد [۴]. لازم به گفتن است که این مقطع مثلثی شکل با اتصال ابتدای قوس دایره‌ای به انتهای آن ایجاد می‌شود. اکنون، به دلیل افزایش توانایی کامپیوتر به‌عنوان یک بزار محاسباتی قوی برای تحلیل مسائل پیچیده و همچنین توسعه تکنیک‌های مدل‌سازی عددی و مدل‌های هوش مصنوعی، استفاده از آن‌ها در مقایسه با مدل‌های فیزیکی وقت‌گیر و پرهزینه، بسیار رواج یافته است. به‌طوری‌که امروزه بیشتر پژوهشگران، پدیده‌های پیچیده مهندسی را در زمینه‌های مختلف با استفاده از این تکنیک‌ها و ابزارهای کامپیوتری، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند. یکی از این زمینه‌ها، دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> است که به‌عنوان یک شاخه از مدل‌سازی عددی برای تحلیل جریان سیالات توسعه یافته است. مدل‌های هوش مصنوعی نیز به دلیل تخمین و پیش‌بینی نتایج با ضریب همبستگی بالا و خطای کمتر در مقایسه با معادلات رگرسیون سنتی، به‌عنوان گزینه‌ای کارا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از کاربرد مدل‌های عددی در زمینه سد و طراحی سازه‌های هیدرولیکی، می‌توان به مدل‌سازی سرریز، سازه‌های استهلاك انرژی و نشت از بدنه

شکل (۱) نمای کلی از جام‌های پرتابی [۲]

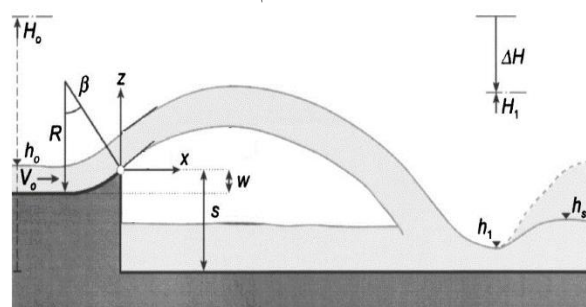


Fig. 1. Schematic view of flip bucket [2]

از جمله موضوعات مهم در طراحی جام‌های پرتابی، بررسی فشار هیدرودینامیکی روی بستر جام پرتابی و میزان استهلاك انرژی جریان پس از برخورد جت پرتابی با کانال پایین‌دست است. از جمله پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه محاسبه بیشینه فشار هیدرودینامیکی و چگونگی توزیع آن روی جام‌های پرتابی، پژوهش‌های آزمایشگاهی جون و هگر (۲۰۰۰) است که با تغییر عدد فرود، شعاع و زاویه انحراف جام، رفتار هیدرولیکی جریان و از جمله توزیع فشار هیدرودینامیکی را بررسی نمودند و یک سری روابط تجربی برای تخمین این مقادیر ارائه نمودند [۳]. هلر و هگر (۲۰۰۵) و استیتر و همکاران (۲۰۰۸)، در ادامه این پژوهش‌های آزمایشگاهی، روابط جامع‌تری را برای توزیع فشار هیدرودینامیکی روی جام‌های دایره‌ای و مثلثی بیان نمودند [۲ و ۴]. یمینی و کاویانپور (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سد گتوند در استان خوزستان، به بررسی توزیع فشار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی روی جام پرتاب‌کننده پرداختند و تأثیر هندسه جام و مشخصات جریان را روی توزیع فشار در جام پرتاب‌کننده بررسی نمودند [۵].

در زمینه محاسبه استهلاك انرژی ناشی از برخورد جت پرتابی با کانال پایاب، دوباره می‌توان به پژوهش‌های آزمایشگاهی هلر و هگر (۲۰۰۵) اشاره نمود. ایشان افت نسبی انرژی در کانال افقی در پایین‌دست جت پرتابی از پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای شکل را به صورت  $\eta = \frac{\Delta H}{H_0}$  بیان نمودند که  $H_0 = (s - w + \frac{v_0^2}{2g})$  هد انرژی متناسب با ارتفاع آب در کانال پایاب است. پارامترهای گفته شده مطابق شکل (۱) نشان داده شده است. ایشان بر مبنای مشاهده آزمایشگاهی نشان دادند که میزان افت انرژی در طول جام پرتابی، با افزایش زاویه انحراف  $\beta$  و کاهش

به بیشینه فشار روی کف جام و میزان اتلاف انرژی بعد از برخورد جت پرتابی با کانال پایاب، برای مدل شبیه‌سازی شده، یک فرامدل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه آموزش داده شده و درستی آن به وسیله‌ی بخشی از داده‌هایی که در مرحله آموزش از آن‌ها استفاده نشده بود، ارزیابی شده است. در ادامه با اتصال این فرامدل به مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، ابعاد بهینه پرتاب‌کننده با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های آن تعیین شده است.

## ۲- ساختار مدل پیشنهادی

در شکل (۲)، فلوچارت مربوط به متدولوژی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی برای تعیین ابعاد بهینه جام پرتابی ارائه شده است. مطابق شکل، در مرحله اول باید اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مربوط به مدل فیزیکی سیستم تخلیه سیلاب برای توسعه، کالیبراسون و درستی آزمایشی مدل عددی جمع‌آوری شود. در مرحله بعد، با واردکردن اطلاعات مدل در نرم‌افزار Flow-3D، شبیه‌سازی جریان صورت می‌گیرد. سپس آنالیز حساسیت شبکه، کالیبراسیون و درستی آزمایشی روی مدل شبیه‌سازی شده انجام می‌گیرد. بعد از این مرحله، براساس شرایط مدل عددی کالیبره‌شده، ابعاد مختلفی از جام پرتابی با تغییر در شعاع و زاویه انحراف جام در نظر گرفته شده و برای هرکدام، دوباره شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. در ادامه، با استخراج نتایج مربوط به بیشینه فشار و میزان استهلاک انرژی بعد از برخورد جت با پایاب و همچنین با داشتن ابعاد هندسی و مقادیر دبی، یک فرامدل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی چندلایه ایجاد می‌شود. در نهایت با اتصال فرامدل درستی آزمایشی شده به مدل بهینه‌ساز، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد بهینه جام پرتابی تدوین می‌شود.

### ۲-۱- مدل عددی

برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری روی جام پرتابی و برخورد آن با کانال پایاب، از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده است. این نرم‌افزار یک مدل عددی با قابلیت شبیه‌سازی رفتار

سد اشاره نمود [۶ و ۸]. همچنین با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، پژوهش‌های زیادی در خصوص بهینه‌سازی شکل سد و سرریز و پیش‌بینی میزان آبشستگی پایین دست جام‌های پرتابی صورت گرفته است [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴]. از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی ابعاد سازه‌های هیدرولیکی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸]. بنی هاشمی و مهرانی (۱۳۸۷) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی شکل سرریزهای کنگره‌ای با هدف کمینه‌کردن هزینه و ارضای ضوابط هیدرولیکی پرداختند. ایشان در پژوهش‌های خود نشان دادند که با بهینه‌سازی شکل سرریزهای کنگره‌ای نسبت به حالت اجرا شده، می‌توان به میزان ۲۰٪ هزینه‌ها را کاهش داد. فریناز شجاع و همکاران (۱۳۸۹)، به بررسی پارامترهای بهینه سرریزهای پلکانی از قبیل عرض و ارتفاع پله‌ها، شیب و ارتفاع سرریز با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. تابع هدف ایشان، بیشینه‌کردن میزان استهلاک انرژی در طول سرریز بود. عباسی پروین (۲۰۱۳) با استفاده از تئوری باکینگهام در مبحث آنالیز ابعادی و همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده از مدل‌های هیدرولیکی، یک معادله برای طراحی شعاع بهینه جام پرتابی براساس پارامترهای موثر ارائه شده به وسیله‌ی USBR ارائه نمود و آن را با معادله استخراج شده وسیله‌ی USBR مقایسه کرد. اشیک و ستار (۲۰۱۰)، با جمع‌آوری داده‌های ارائه شده در گزارش سد نای گاج، مستهلک‌کننده‌های مختلفی را با توجه به میزان استهلاک انرژی و هزینه اجرای آن‌ها مقایسه کرده و گزینه با کمترین قیمت را انتخاب نمودند.

در این پژوهش، با تدوین یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با استفاده از مدل هوش مصنوعی، ابعاد بهینه پرتاب‌کننده جامی مربوط به سد جره تعیین شده است. بدین صورت که با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و کالیبره کردن آن بر مبنای اطلاعات مربوط به مدل آزمایشگاهی سد جره، جریان درون جام‌های پرتابی برای شعاع‌های مختلف و همچنین زوایای انحراف گوناگون شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به نتایج مربوط

تناسب خروجی‌ها، از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون سه‌لایه و تعداد ۱۸ سلول عصبی در لایه میانی FLOW- برای پیش‌بینی بیشینه میزان فشار روی جام و از مدل شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چهارلایه و به ترتیب با تعداد ۱۰ و ۲۱ سلول عصبی در لایه‌های میانی اول و دوم برای پیش‌بینی میزان استهلاك انرژی در پایین دست جت پرتابی، استفاده شده است.

جدول (۱) اطلاعات شبکه‌بندی و شرایط مرزی

|                     |                                 |                    |
|---------------------|---------------------------------|--------------------|
| meshing             | number of mesh blocks           | 3                  |
|                     | type of mesh                    | rectangular        |
|                     | number of computational cells   | 653670             |
| boundary conditions | inlet                           | Specified Velocity |
|                     | outlet                          | Continuative       |
|                     | sides                           | Wall               |
|                     | Internal obstacle               | Solid              |
| governing equations | turbulence model                | k-ε (RNG)          |
|                     | Viscous stress solver algorithm | Explicit           |
|                     | pressure solver algorithm       | GMRES              |

Table 1. mesh and boundary condition data

همچنین توابع محرک در هر دو شبکه منتخب، با انجام سعی و خطا برای لایه‌های پنهان، از نوع لگاریتم سیگموئید و برای لایه خروجی نیز از نوع خطی انتخاب شده است. در ساختار هردو شبکه، لایه ورودی شامل سه پارامتر دبی جریان  $Q$ ، نسبت شعاع به عمق جریان ورودی به جام  $(R/h_0)$  و زاویه انحراف جام  $\beta$  است. لایه خروجی در ساختار شبکه پیش‌بینی بیشینه فشار شامل یک پارامتر بی‌بعد  $(P_{\max} / \rho v_0^2)$  و در ساختار شبکه پیش‌بینی استهلاك انرژی نیز شامل یک پارامتر بی‌بعد  $(\Delta E/E_0)$  است.

### ۲-۳- تدوین مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک مدل از الگوریتم‌های تکاملی است که رفتار از سازوکارهای تکاملی در طبیعت الگوبرداری شده است و بیشتر برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده و غیرخطی به کار می‌رود. مراحل مختلف الگوریتم‌های ژنتیک به شرح زیر است.

دینامیکی و یا پایدار جریان مایعات و گازها است که به وسیله شرکت Flow Science تدوین و توسعه یافته است. در این مدل از روش تفاضل محدود<sup>۱</sup> برای تحلیل معادلات حاکم بر سیال و از حجم سیال<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی سطح جریان استفاده می‌شود [۱۹]. در این مدل عددی، معادلات حاکم بر یک سیال تراکم‌ناپذیر، معادلات بقای جرم (معادله پیوستگی) و مومنتوم (معادلات ناور-استوکس) است که برای هر سلول محاسباتی، گسسته-سازی و محاسبه می‌شود. معادلات گفته شده، با توجه به ماهیت پیچیده جریان‌های آشفته، برای این‌گونه جریان‌ها با روش متوسط‌گیری (متوسط‌گیری زمانی رینولدز) ساده می‌شوند.

در این پژوهش برای تهیه مرزهای جامد مدل عددی از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شده است. برای انفصال میدان محاسبات نیز از سه بلوک محاسباتی به صورت تو در تو<sup>۳</sup> و با مجموع تعداد ۶۵۳۶۷۰ سلول محاسباتی استفاده شده است. بلوک‌های درونی در محل جام و محل برخورد جت با پایاب، برای دقت بهتر در محاسبه فشار با شبکه‌بندی ریزتر در نظر گرفته شده‌اند. در جدول (۱) اطلاعات شبکه‌بندی، شرایط مرزی و معادلات انفصال به‌طور خلاصه آمده است.

### ۲-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی از دسته مدل‌های هوش مصنوعی است که با پردازش روی داده‌های تجربی، قادرند دانش یا قانون نهفته در داده‌ها را حتی با درجه غیرخطی و پیچیدگی زیاد، به ساختار شبکه منتقل کنند. یکی از ساختارهای استفاده شده در شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار پرسپترون چندلایه است. این ساختار به ترتیب شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است و سلول‌های عصبی در لایه‌های موازی قرار دارند. در این پژوهش، برای تدوین فرامدل جایگزین مدل عددی FLOW-3D، بعد از استخراج سری اطلاعات ورودی-خروجی به دست آمده، ضمن اجرا و بررسی عملکرد شبکه‌های مختلف با هدف رسیدن به شبکه دقیق‌تر، به

1 Finite difference  
2 Volume Of Fluid (VOF)  
3 Embedded

شکل (۲) فلوچارت ساختار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی برای تعیین ابعاد بهینه پرتاب‌کننده جامی

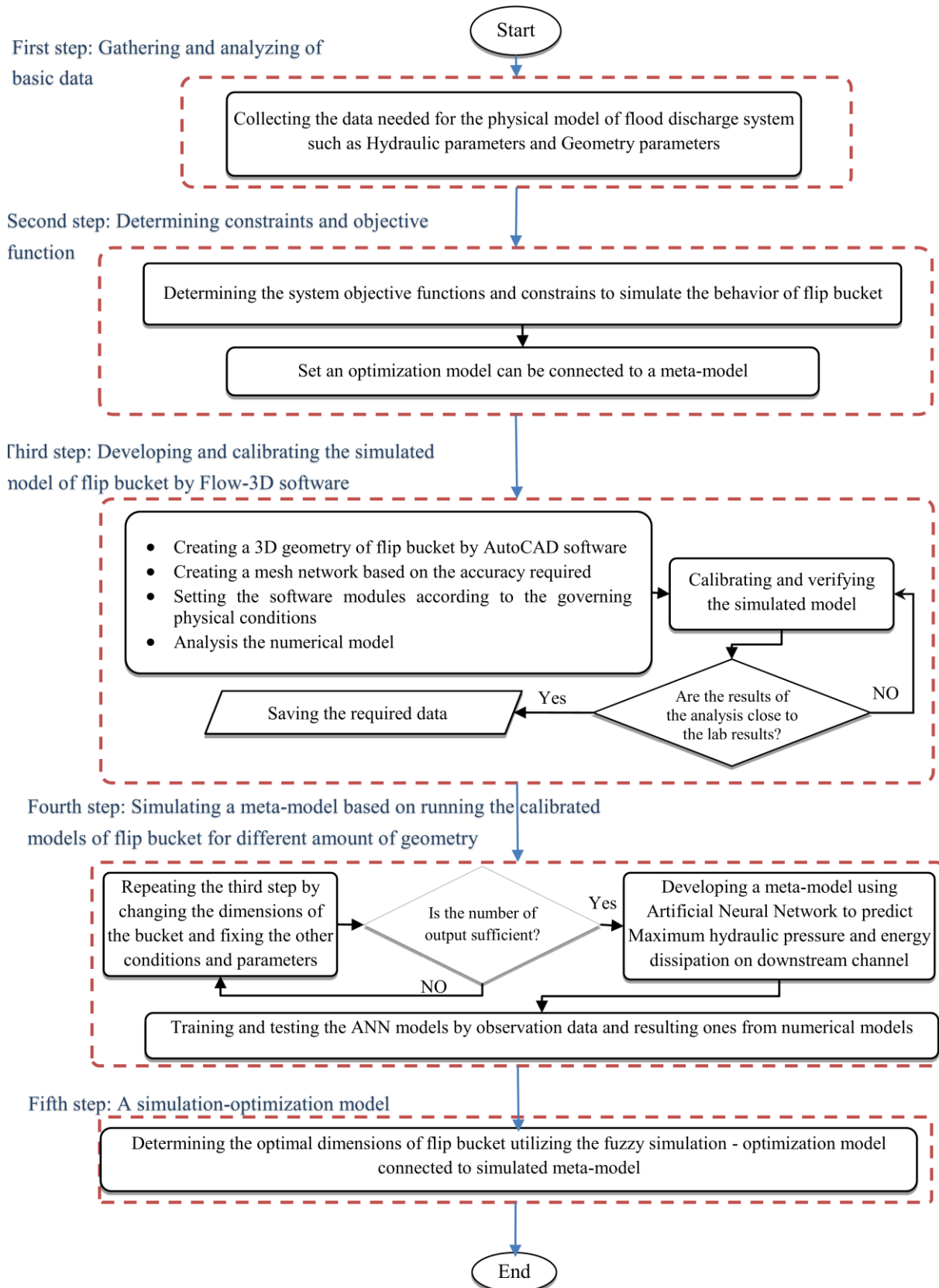


Fig. 2. Flowchart of the proposed methodology for simulation – optimization model to determine the optimum dimensions of flip bucket

ابتدا به‌طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برازندگی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌شود. در ادامه به‌وسیله عملگرهای پیوند و جهش، جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی بالاتر تولید می‌شود. تکرار یک‌بار حلقه باعث به‌وجود آمدن یک نسل می‌شود. در هر بار انجام حلقه، از جامعه قبلی چشم‌پوشی شده و به جای آن جامعه جدید ارزیابی می‌شود. نسل اول در واقع به‌طور تصادفی انتخاب و سپس با توجه به برازندگی افراد و عملگرهای موجود، جامعه به سمت افراد با برازش بالاتر سوق داده می‌شود.

در این پژوهش، ابعاد بهینه پرتاب‌کننده جامی بر اساس کمینه‌کردن میزان بیشینه فشار هیدرودینامیکی روی جام و بیشینه‌نمودن میزان استهلاك انرژی پس از برخورد جت پرتابی با کانال پایین‌دست تعیین شده است. پس تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

در این پژوهش، ابعاد بهینه پرتاب‌کننده جامی بر اساس کمینه‌کردن میزان بیشینه فشار هیدرودینامیکی روی جام و بیشینه‌نمودن میزان استهلاك انرژی پس از برخورد جت پرتابی با کانال پایین‌دست تعیین شده است. پس تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$\text{Min } f = w_1\{f_{1n}\} + w_2\{f_{2n}\} \quad (2)$$

$$f_1 = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)_i \quad \text{Where } \frac{\Delta E}{E_0} = e\left(\frac{R}{h_0}, \beta, Q\right) \quad (3)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{max}}{\rho v_0^2}\right)_i \quad \text{Where } \frac{P_{max}}{\rho v_0^2} = p\left(\frac{R}{h_0}, \beta, Q\right) \quad (4)$$

Subject To:

$$4 \leq \frac{R}{h_0} \leq 7 \quad (5)$$

$$33.5^\circ \leq \beta \leq 53.5^\circ \quad (6)$$

در روابط بالا  $Q$ ، دبی جریان به‌عنوان متغیر حالت سیستم تخلیه سیلاب است.  $R$  و  $\beta$  نیز به ترتیب، شعاع و زاویه انحراف جام است که به‌عنوان متغیرهای طراحی جام (متغیر تصمیم مدل بهینه‌سازی) در نظر گرفته شده‌اند.  $h_0$  عمق جریان در قسمت ورودی جام و  $n$  تعداد دبی مورد آزمایش است.  $w_1$  و  $w_2$  مقادیر وزن توابع (اهمیت نسبی اهداف) است که متناسب با اهداف اجرایی پرتابه جامی و اهمیت کاهش فشار روی کف جام و یا میزان استهلاك انرژی، می‌توانند تغییر کنند و در هر حال مجموع آنها برابر یک است.  $f_{1n}$  تابع استهلاك انرژی نرمال شده و  $f_{2n}$  تابع ماکزیمم فشار نرمال شده است. معادله ۳

### ۳- مطالعه موردی

سد مخزنی جره یک سد خاکی با هسته رسی است که روی رودخانه زرد در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهر رامهرمز در استان خوزستان واقع شده است. هدف از ساخت سد مخزنی جره، کنترل جریان‌های سطحی رودخانه به‌منظور بهره‌وری در اولویت‌های زیر است [۲۲].

- مهار و کنترل آب‌های سطحی.
- تامین نیازهای آبی اراضی زیر کشت دشت رامهرمز.
- جمع‌آوری سیلاب‌های سالیانه.

سیستم تخلیه سیلاب این سد شامل یک سرریز دریاچه‌دار و یک سرریز اضطراری است که در سمت چپ بدنه سد، طراحی و جانمایی شده است (شکل ۳). سرریز اصلی دریاچه‌دار شامل کانال ورودی، سرریز دریاچه‌دار، تندآب، پرتاب‌کننده جامی شکل و پایاب پرتاب‌کننده است. این سیستم تخلیه دریاچه‌دار از ۶ بخش تشکیل شده است و برای استهلاك انرژی جریان عبوری از سرریز، در انتهای تندآب، پرتاب‌کننده جامی شکل طرح شده است.

برای بررسی هیدرولیکی جریان درون این سرریز، مدل آزمایشگاهی آن در محل مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو اجرا شده است و بعضی از پارامترهای هیدرولیکی جریان برای دبی‌های مختلف ورودی اندازه‌گیری شده است. مدل آزمایشگاهی این پرتاب‌کننده با شعاع ۰/۵ متر و تحت زاویه انحراف ۴۵/۵ درجه، در فاصله افقی ۶/۹۶ متر از آستانه سرریز

به تراز ۸/۵۹ متر قرار دارد.

نشان می‌دهد و شکل (۴-ب)، توزیع هد فشار و عمق جریان را به ازای دبی ۰/۰۸۵ و ۰/۰۵۶۶ مترمکعب بر ثانیه که از مدل‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، را روی جام و قسمتی از بالادست آن نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۵-الف)، مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان، مقدار بیشینه هد فشار هیدرودینامیکی روی جام افزایش یافته است که مدل‌های عددی نیز با دقت مناسب این مقادیر بیشینه را نشان داده‌اند. در شکل (۵-ب) می‌توان دقت مدل عددی در اندازه‌گیری عمق جریان را مشاهده کرد. همچنین با توجه به چگونگی توزیع هد فشار در این شکل می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این مقدار در قسمت تنداب برابر با ارتفاع جریان است و با ورود جریان به قسمت پرتاب‌کننده که از فاصله ۰/۱۱ متر شروع می‌شود، این مقدار افزایش می‌یابد و در انتهای پرتاب‌کننده به فشار اتمسفر خواهد رسید. برای بررسی دقت مدل‌های عددی در محاسبه مقدار هد فشار از شاخص MARE<sup>۱</sup> استفاده شده است که این مقدار برای مدل‌های عددی نسبت به نتایج مدل فیزیکی به ازای تمامی ۶ دبی اندازه‌گیری شده، بین ۶ تا ۱۳ درصد به دست آمده و نشان‌دهنده نتایج قابل قبول برای مدل‌های عددی است.

در مرحله بعد، در شرایط یکسان جریان، مدل Flow-3D برای شعاع و زوایای مختلف انحراف جام پرتابی اجرا شد و میزان ماکزیمم فشار در بستر جام و همچنین افت انرژی جریان بعد از برخورد جت پرتابی محاسبه شد. سپس با جمع‌آوری داده‌های ورودی و خروجی از مدل‌های عددی گفته شده، یک مجموعه داده برای تدوین فرامدل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه فراهم شد. قابلیت این فرامدل تدوین شده، پیش‌بینی بیشینه فشار هیدرودینامیکی روی جام پرتابی و همچنین میزان استهلاک انرژی، به ازای ابعاد مختلف جام است. (شکل ۵-الف)، توانایی فرامدل در پیش‌بینی میزان استهلاک انرژی نسبی ( $\Delta E/E_0$ ) جت هنگام برخورد با کانال پایاب و (شکل ۵-ب)، بیشینه فشار نسبی ( $P_{max}/\rho v_0^2$ ) کف جام در مرحله درستی آزمایشی را نشان می‌دهند. در این اشکال، خط  $Y=T$  به این معنی است که مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی برابر بوده یا به-

شکل (۳) موقعیت سد و جانمایی سرریز آن، برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای در Google Earth، استان خوزستان، ایران



Fig. 3. The schematic and Google Earth maps of the Dam and spillway, the Khuzestan Province in Iran

نتایج آزمایشگاهی به ازای این شعاع و زاویه انحراف جام، در شش دبی برداشت شده است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از متدولوژی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، ابعاد بهینه پرتابه جامی انتهایی سرریز دریچه‌دار گفته شده بهینه شود. در این راستا، برای کالیبراسیون و درستی‌آزمایی مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به این مدل هیدرولیکی استفاده شده است.

#### ۴- بررسی و تفسیر نتایج

در این پژوهش، ابتدا براساس اطلاعات هندسی و هیدرولیکی موجود در گزارش مدل فیزیکی سد جره و با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، جام پرتابی سد مذکور به همراه قسمتی از تنداب و کانال پایاب شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده از مدل آزمایشگاهی، کالیبراسیون و درستی‌آزمایی مدل عددی صورت پذیرفت. شکل (۴-الف)، توزیع هد فشار هیدرودینامیکی را به ازای ۵ دبی مختلف را

همچنین به منظور ارزیابی دقیق تر نتایج به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل های عددی، پنج معیار آماری مختلف براساس روابط ۷ تا ۱۱ برای هر دو مدل چند لایه، محاسبه و مطابق جدول (۲) ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i - h_i^*}{h_i^*} \right)^2} \quad (7)$$

$$RMRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{h_i - h_i^*}{h_i^*} \right|} \quad (8)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n h_i h_i^*}{\left( \sum_{i=1}^n h_i^2 \sum_{i=1}^n h_i^{*2} \right)^{1/2}} \quad (9)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - h_i^*) \quad (10)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( (h_i^* - H^*) - (h_i - H) \right)^2}}{H} \quad (11)$$

در روابط بالا،  $h_i^*$  و  $h_i$  به ترتیب  $i$  امین داده مشاهداتی و پیش بینی شده،  $H_i^*$  و  $H_i$  مقدار متوسط داده های مشاهداتی و پیش بینی شده و  $n$  تعداد داده ها را نشان می دهد. همچنین نام گذاری این معیارها به- ترتیب روابط گفته شده، مجذور مقدار متوسط مربعات خطا<sup>۱</sup>، مجذور مقدار متوسط خطای نسبی<sup>۲</sup>، ضریب همبستگی<sup>۳</sup>، اریب<sup>۴</sup> و شاخص پراکندگی<sup>۵</sup> است.

پس از تدوین فرامدل، با اتصال آن به مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک، مدل شبیه سازی-بهینه سازی ایجاد می شود. در مدت این فرآیند، شبکه حاصل از فرامدل، با توانایی پیش بینی رفتار هیدرولیکی پرتاب کننده به الگوریتم ژنتیک متصل می شود و این الگوریتم براساس قیود و توابع هدف ذکر شده در بخش ۲-۳، ابعاد بهینه را تعیین می کند. در مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک، تعداد کروموزومها در هر نسل (اندازه جمعیت) برابر ۲۰۰ و تعداد نسلها برابر ۴۰ در نظر گرفته شده است. در رابطه (۲) باتوجه به این که در سد جره اهمیت استهلاک انرژی در مقایسه با فشار بیشینه روی جام بیشتر در نظر گرفته شده

عبارتی مکان هندسی نقاطی است که در آنها جواب مدل عددی با مدل آزمایشگاهی کاملاً یکسان است. توانایی و میزان دقت شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی مقادیر، با محاسبه میزان انحراف خط برازش یافته بر این نقاط، نسبت به این محور سنجیده شده است.

شکل (۴) الف- توزیع هد فشار برکف جام برای ۵ دبی مختلف ب- توزیع هد فشار در مقایسه با عمق جریان برای دو دبی مختلف

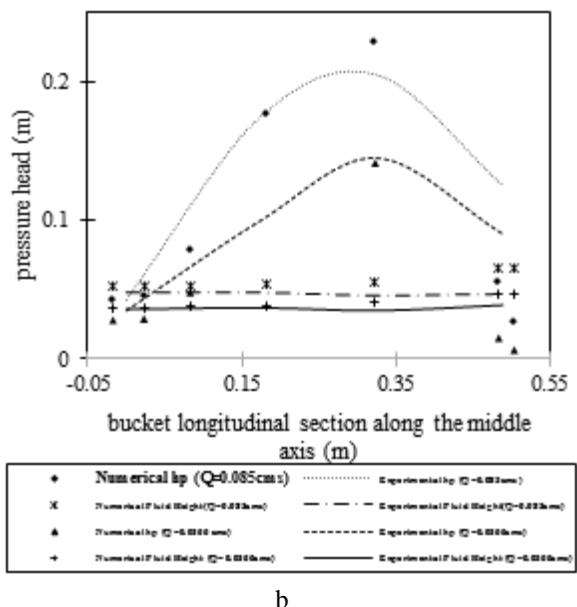
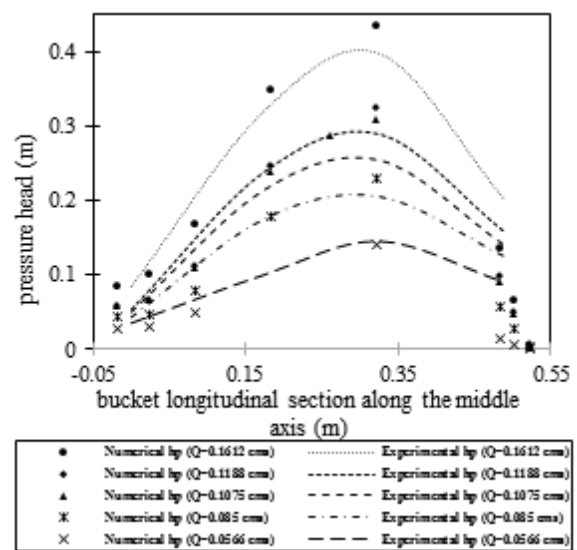


Fig. 4. a. The pressure head distribution along bucket for 5 different discharges b. The pressure head distribution in comparison with flow depth for 2 different discharges

1 Root Mean Square Error (RMSE)  
 2 Root Mean Relative Error (RMRE)  
 3 Correlation Coefficient (CC)  
 4 Bias  
 5 Scatter Index (SI)



مدل عددی، نشان داد که میزان استهلاك انرژی در پایاب به- مقدار ۱۴ درصد افزایش یافته است. جدول (۳)، مقادیر فشار بیشینه وارد شده بر کف جام پرتابی، میزان استهلاك انرژی و تابع هدف برای ابعاد مختلف (شامل ابعاد اولیه مدل فیزیکی) را در مقایسه با ابعاد بهینه‌شده جام پرتابی را نشان می‌دهد. این مقایسه به ازای دبی ۰/۱۶۱۲ مترمکعب در ثانیه انجام شده است.

جدول (۲) معیارهای خطا در دو مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی فشار و استهلاك انرژی

| error | pressure prediction model |          | energy dissipation prediction model |          |
|-------|---------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
|       | train                     | test     | train                               | test     |
| Bias  | 0.00004                   | -0.00077 | 0.00003                             | -0.01623 |
| SI    | 0.06308                   | 0.11826  | 0.11495                             | 7.10833  |
| RMSE  | 0.0806                    | 0.15578  | 0.1267                              | 0.20337  |
| RMRE  | 0.23475                   | 0.34509  | 0.29558                             | 0.40503  |
| CC    | 0.99834                   | 0.99487  | 0.99364                             | 0.98588  |

Table 2. Error criteria of both Artificial Neural Networks that predict Max. pressure head and energy dissipation

جدول (۳) مقایسه نتایج فشار بیشینه، میزان استهلاك انرژی و تابع هدف به ازای دبی ۰/۱۶۱۲ مترمکعب بر ثانیه در ابعاد مختلف جام پرتابی

|                | R(m) | $\beta^\circ$ | $\frac{P_{max}}{\rho V_0^2}$ | $\frac{\Delta E}{E_0}$ | Objective function |
|----------------|------|---------------|------------------------------|------------------------|--------------------|
| Physical model | 0.5  | 45.5          | 0.0151                       | 0.466                  | -1.05              |
| Model A        | 0.4  | 40            | 0.0161                       | 0.352                  | -0.42              |
| Model B        | 0.5  | 40            | 0.0142                       | 0.369                  | -0.22              |
| Model C        | 0.4  | 45.5          | 0.018                        | 0.446                  | -1.31              |
| Model E        | 0.5  | 44.5          | 0.0153                       | 0.422                  | -0.92              |
| Model F        | 0.4  | 44.5          | 0.0178                       | 0.433                  | -1.18              |
| Optimum model  | 0.28 | 44.5          | 0.0251                       | 0.544                  | -1.53              |

Table 3. Comparing the results of maximum pressure, energy dissipation, and objective function for flow rate 0.1612 cubic meter per second and different dimensions of flip bucket

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، متدولوژی جدیدی بر مبنای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مدل Flow-3D و مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور تعیین ابعاد بهینه جام پرتابی از منظر کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر کف جام به همراه افزایش میزان

است، پس وزن تابع فشار برابر ۰/۳ و وزن تابع استهلاك انرژی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است. در نهایت، ابعاد بهینه جام پرتابی بر اساس اهداف گفته شده و همچنین مقادیر وزن نسبت داده شده به هر کدام از اهداف، برابر شعاع ۱۴ متر (۰/۲۸ متر در مدل فیزیکی) و زاویه انحراف برابر ۴۴/۵ درجه به دست آمد.

شکل (۵) مقایسه (الف) -میزان استهلاك انرژی نسبی و (ب) - حداکثر فشار نسبی پیش‌بینی شده و مشاهداتی در مرحله صحت‌سنجی

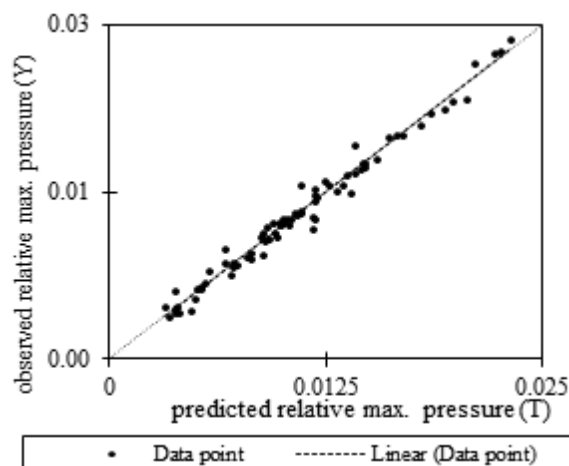
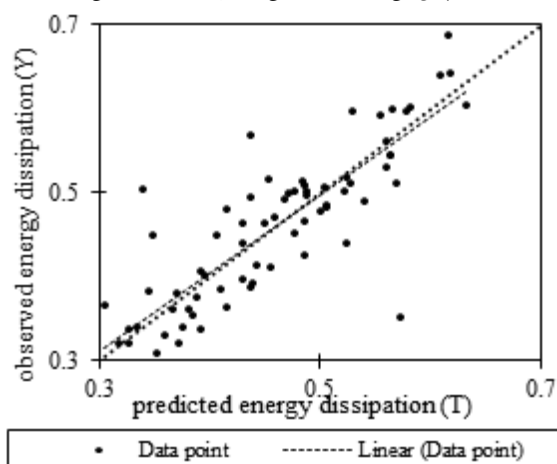


Fig. 5. the comparison between predicted data and observed data of a. relative energy dissipation b. maximum pressure head in the testing phase

بعد از تعیین ابعاد بهینه پرتاب‌کننده با مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، برای بررسی و ارزیابی نتایج به دست آمده، مدل عددی Flow-3D به ازای ابعاد بهینه اجرا شد تا شرایط هیدرولیکی ایجاد شده به ازای این ابعاد، نسبت به ابعاد اولیه مدل فیزیکی مقایسه شود. نتایج استخراج‌شده از شبیه‌سازی این

[3] Juon, R. and Hager, W.H., "Flip bucket without and with deflectors", *J. Hydraul. Eng.*, 126(11), (2000), pp. 837-845.

[4] Steiner, R., Heller, V., Hager, W.H. and Minor, H.E., "Deflector ski jump hydraulics", *J. Hydraul. Eng.*, 134(5), (2008), pp. 562-571.

[5] Yamini, O.A. and Kavianpour, M.R., "Experimental Study of Static and Dynamic Pressures over Simple Flip Bucket", *5th symposium on advances in science and technology*, (2011), Mashhad, Iran.

[۶] قلمبر، ف.، "شبیه سازی عددی جریان دو فازی بر روی جام های پرتاب کننده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۹۰)، دانشگاه شیراز، شیراز.

[7] Larese, A., Rossi, R., Onate, E. and Idelsohn, S.R., "Validation the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows", *International Journal of Engineering Computation*, 25(4), (2008), pp. 385-425.

[8] Jorabloo, M., Maghsoodi, R. and Sarkardeh, H., (2011), "3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams", *Journal of American Science*, 7 (6), pp. 931-936.

[9] Singh, R.M., "Optimal hydraulic structures profiles under uncertain seepage head", *World renewable energy congress*, Linköping, (2011), Sweden.

[۱۰] کاظمی، ف.، نیکو، م.ر.، کریمی، ا. و وثوقی، فر.ح.، "بهینه سازی شکل سدهای بتنی وزنی: کاربرد مدل بهینه سازی GAMS و مدل شبیه سازی MP5"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، (۱۳۹۲)، دانشگاه زاهدان، زاهدان.

[11] Kumar, Ch. and Sreeja, P., "Evaluation of selected equations for predicting scour at downstream of ski jump spillway using laboratory and field data", *Eng. Geology*, 129-130, (2012), pp. 98-103.

[12] Azmathullah, H.M., Deo, M.C. and Deolalikar, P.B., "Neural networks for estimation of scour downstream of a ski-jump bucket", *J. Hydraulic. Eng.*, ASCE, 131(10), (2005), pp. 898-908.

[13] Azmathullah, H.M., Deo, M.C. and Deolalikar, P.B., "Alternative neural networks to estimate the scour below spillways", *Adv. Eng. Software*, 39, (2008a), pp. 689-698.

[14] Azmathullah, H.M., "A review on application of soft computing methods in water resources engineering", *metaheuristics in water, Geotechnical and Transport Engineering*, (2013), pp.27-41.

[۱۵] بنی هاشمی، م.ع.، مهرانی، س.، "بررسی تحلیلی معیارهای طراحی بهینه سرریزهای کنگره ای"، چهارمین کنگره

استهلاک انرژی در برخورد جت با پایاب معرفی شده است. در این پژوهش، پس از واسنجی و درستی آزمایشی مدل Flow-3D با استفاده از نتایج حاصل از مدل فیزیکی جام پرتابی سد جره، نسبت به شبیه سازی رفتار آن اقدام و با استفاده از مدل شبکه عصبی، رفتار هیدرولیکی جام مذکور بررسی و پیش بینی شده است. سپس با توجه به اطلاعات مراحل قبل و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، شعاع و زاویه بهینه جام بدست آمده است. در راستای انجام مراحل فوق، موارد زیر قابل بیان است:

۱- مدل سازی عددی می تواند با کاهش تعداد آزمایش ها، زمان و هزینه انجام مدل های آزمایشگاهی را به میزان زیادی کاهش دهد.

۲- قابلیت شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی مقادیر بیشینه فشار هیدرودینامیکی و میزان استهلاک انرژی، این امکان را بوجود می آورد که بتوان از مدل های هوش مصنوعی برای پیش بینی رفتار سازه های هیدرولیکی، به عنوان مکمل مدل های آزمایشگاهی و عددی استفاده نمود. در این صورت می توان، به دور از مشکلات و پیچیدگی های محاسبات مربوط به روش های عددی و صرف زمان کمتر، رفتار هیدرولیکی پرتاب کننده را پیش بینی نمود.

۳- پس از انجام فرآیند شبیه سازی-بهینه سازی روی جام پرتابی، ابعاد بهینه مدل جام پرتابی سد جره برابر با ۱۴ متر، شعاع پرتابه و ۴۴/۵ درجه، زاویه آن به دست آمد که نسبت به ابعاد موجود آن، ۴۴ درصد کاهش شعاع و ۲ درصد، کاهش زاویه را نشان می دهد. این موضوع درحالی است که جام پرتابی دارای عملکرد هیدرولیکی بهتری بوده و میزان استهلاک انرژی جریان نیز به میزان ۱۴ درصد افزایش یافته است.

## References

## ۶- مراجع

[۱] گلزاری، ف.، "بررسی عملکرد هیدرولیکی پرتاب کننده جامی در پایانه سازه های تخلیه کننده سیلاب سدهای بلند به کمک مدل فیزیکی"، *کنفرانس بین المللی سازه های هیدرولیکی*، (۱۳۸۰)، کرمان.

[2] Heller, V., Hager, W.H. and Minor, H.E., "Ski jump hydraulics", *J. Hydraul. Eng.*, 131(5), (2005), pp. 347-355.

[19] Flow science Inc., Flow-3D user Manual (Version 9.3), 2008.

[20] USACE Engineering and Design; *Hydraulic Design of spillways*, Engineer Manual EM 1110-2-1603, January, 1990.

[21] Mason, P.J., "Practical guidelines for the Design of Flip Buckets and Plunge pools", *Water Power and Dam Construction*, 45(9/10), (1993), pp. 40-45.

[۲۲] گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد جره، مؤسسه تحقیقات آب، (۱۳۸۷)، وزارت نیرو.

ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۷)، دانشگاه تهران، تهران.

[۱۶] شجاع، ف.، سلماسی، ف.، فرسادی زاده، د.، ناظمی، ا.ح. و نیک پور، م. ر.، "تعیین پارامترهای بهینه در افزایش استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۹)، تهران.

[17] Abbasi Parvin, Y., "Optimization of flat flip-bucket energy spilling radius by using dimensional analysis", *Jokull Journal*, (2013), pp. 95-101.

[18] Ashiq, M. and Sattar, A., "Optimization of Energy Dissipation Works for Nai Gaj Dam Project", *World Environmental and Water Resources Congress, Challenges of Change*, (2010), ASCE.

# Determination of Optimal Dimensions of Flip Buckets by Simulation-Optimization Approach Case Study: Jareh Dam

M. Arab<sup>1</sup>, M.R. Nikoo<sup>2</sup>, S.H. Afzali<sup>3\*</sup>

1- M.Sc. of Hydraulic Structures Eng., Dept. of Civil and Environmental Eng., School of Eng., Shiraz University.

2- Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., School of Eng., Shiraz University.

3- Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., School of Eng., Shiraz University (Corresponding Author).

afzali@shirazu.ac.ir

## Abstract:

Downstream energy dissipation of large dams is one of the most important concerns in the design procedure of dams. Flip buckets are employed when the velocity of flow at the downstream of the spillway is in excess of typically 20 m/s because of problems with stilling basins in terms of cavitation, abrasion and uplift. One of the most important issues in flip buckets is determining their optimal dimensions in order to increase energy dissipation and reduce maximum pressure on the surface of the flip bucket, simultaneously. Nowadays, the increase in computational power of computers for analyzing complex problems has led to the development of numerical modeling techniques and representing artificial intelligence models. Therefore, numerical models became more popular, in contrast with physical models which are often very time consuming and expensive. Hence, most of the researchers utilize these methods to analyze complex engineering problems. In this research, by developing a new simulation-optimization methodology, the optimum dimensions of the flip bucket were determined based on the FLOW-3D model, artificial neural network (ANN) model and Genetic Algorithm (GA) models. The aim of determining the optimum dimensions is to calculate the radius of curvature and also the deflection angle of the flip bucket such that the maximum pressure on the surface of the bucket be minimum and the relative energy dissipation be maximum. Based on this methodology, firstly, the flip bucket of the Jareh dam is simulated for different radii and deflection angles using Flow-3D software. The calibration process is carried out on the basis of the experimental results which were obtained from the laboratory model. This laboratory model is built in the Water Research Institute of Tehran. Thereafter, an artificial neural network (ANN) as a meta-model is trained using the maximum pressure on the surface of the bucket and the amount of energy dissipation after the impact of trajectory jet with the downstream channel bed. Afterwards, it is evaluated by the data that were not used during the training phase. The ability of this meta-model is to predict the values of the maximum pressure on the surface of the flip bucket and the amount of energy dissipation after the impact of trajectory jet with the downstream channel bed for different dimensions of flip bucket. By combining this neural network meta-model, with the genetic algorithm (GA) optimization model, the optimum dimensions of the mentioned flip bucket are determined. The optimum dimensions of flip bucket based on the mentioned objectives are found to be equal to the radius of 14 meters (0.28 m at physical model) and angle of 44.5 degrees. The results show that despite the reduction of dimensions in comparison with the original size of flip bucket, the rate of energy dissipation has been increased (about 14% for the PMF flow).

**Keywords:** Flip bucket, Genetic Algorithm, FLOW-3D, Energy dissipation, Artificial Neural Network.