

## شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی هندسی سرریز پلکانی سد جرّه توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه

محمدهادی فتاحی<sup>۱\*</sup> و علی سینایی<sup>۲</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: استادیار؛ و کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۳  
نوع مقاله: علمی پژوهشی

### چکیده

با توجه به اهمیت ذخیره آب در کشور، احداث سد به عنوان یکی از مهمترین منابع ذخیره آب امری مهم و ضروری است. از آنجا که سرریز از مهمترین اجزای سد است، در این پژوهش شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D و بهینه‌سازی ابعاد هندسی سرریز پلکانی توسط الگوریتم ژنتیک با هدف ارائه طرحی بهینه به منظور کاهش هزینه‌های احداث سرریز بررسی شده است. در این راستا ابتدا مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد جرّه واقع در استان خوزستان، به منظور حل عددی و صحت‌سنجی در نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی و پس از آن برای بهینه‌سازی ابعاد هندسی از الگوریتم ژنتیک و به روش چندهدفه NSGAII استفاده گردیده است. در بخش مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Flow3D بعد از ورود هندسه مدل آزمایشگاهی به نرم‌افزار و پس از کالیبراسیون مدل، صحت‌سنجی به کمک مقایسه نتایج سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و خروجی‌های سرعت نرم‌افزار صورت گرفته است و در مرحله بهینه‌سازی پنج حالت هندسی مختلف برای مدل در نظر گرفته شد. تعداد پله‌ها از ۳ تا ۷ پله به‌عنوان قیود مسئله به الگوریتم وارد شد. آنالیز نتایج سرعت مدل فیزیکی توسط نرم‌افزار Flow3D با دو مدل RNG و K-ε به طور جداگانه محاسبه گردید. نتایج تحقیق نشان داد سرعت حاصل از حل عددی با مدل آشفتگی RNG با خطای کمتر از ۱۰ درصد تطابق مناسبی با نتایج سرعت آزمایشگاهی به‌دست می‌دهد. در مرحله بهینه‌سازی، پس از اتمام فرایند بهینه‌شدن پارامترهای ابعادی برای هر ۵ حالت هندسی تعریف شده تعداد پله، عرض پله و ارتفاع پله مشخص گردید. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده بهینه‌شدن ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی است. گزینه نهایی بهینه‌سازی حالت ۴ پله با در نظر گرفتن ملاحظات هیدرولیکی و اقتصادی و با عرض (۱:۵۰) ۰/۰۷۲ متر و ارتفاع (۱:۵۰) ۰/۰۶۵ متر انتخاب گردید.

### واژه‌های کلیدی

سرریز پلکانی، نرم‌افزار Flow3D، مدل آشفتگی RNG و K-ε، ملاحظات اقتصادی

### مقدمه

صحیح از آن از مهم‌ترین مسئولیت‌های مدیران منابع آب به‌شمار می‌رود. از آنجا که سرریز یکی از مهم‌ترین اجزای سد و نیز ضامن ایمنی سد است،

سد یکی از مهم‌ترین منابع ذخیره آب در پروژه‌های آبی است و از این رو ساخت و بهره‌برداری

سرریزها می‌توان سرریز سد زولا در فرانسه و سد یان‌یین و سرریز کوراواتا در استرالیا را نام برد. در ایران قدیمی‌ترین سرریز پلکانی سرریز پل خواجه در اصفهان را می‌توان نام برد که در سال ۱۶۵۰ میلادی به دستور شاه عباس صفوی اول ساخته شده‌است (Sohrabipour, 2002).

امروزه از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی بسیاری از سازه‌های آبی استفاده می‌شود. از نرم‌افزارهای معروف و پرکاربرد در این زمینه Flow3D، Fluent و Ansys هستند. به‌منظور تحلیل و آنالیز پارامترهای هیدرولیکی سرریزها، از نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند Flow3D استفاده می‌شود (Chadegani & Khosrojerdi, 2012). سازه هیدرولیکی مورد نظر (سرریز پلکانی) با نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی و پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت، فشار و عمق آنالیز می‌شود (Mansoori, 2013). پس از کالیبره کردن مدل و صحت‌سنجی، حالت‌های مختلف هندسی برای مدل پیش‌بینی و پارامترهای هیدرولیکی موردنظر در هر یک از این حالت‌ها از نرم‌افزار استخراج می‌شود. پارامترهای هیدرولیکی برای بهبود پارامترهای طراحی سرریز مانند عرض سرریز، ارتفاع و تعداد پله و تمامی داده‌های مورد نظر برای تحقیق بعد از مشخص شدن تابع هدف و قیود مسئله وارد الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌شود.

چانسون (Chanson, 1996 & 2001)، با بررسی استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی به این نتیجه رسید که با احداث این‌گونه سرریزها ابعاد حوضچه آرامش کاهش می‌یابد و در بعضی موارد به حذف حوضچه آرامش می‌انجامد و در نتیجه هزینه‌های احداث کاهش می‌یابد. این پژوهشگر سه نوع جریان را برای سرریزهای پلکانی مشخص کرد: نوع

بررسی آن امری ضروری به نظر می‌رسد. سرریز سازه‌ای است هیدرولیکی که برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پایین‌دست سدها از آن استفاده می‌شود. سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با راندمان بالا انتخاب شود که هر لحظه بتواند برای بهره‌برداری آمادگی داشته باشد، تخریب یا ناکارایی مناسب سرریزها باعث آسیب‌دیدگی شدید سد یا حتی باعث تخریب آن می‌شود. به همین دلیل است که طراحی و ساخت این قسمت از سد اهمیت بالایی دارد. هزینه ساخت و نگهداری سرریزها قسمت عمده‌ای از هزینه کل پروژه‌های سدسازی است، به‌طوری که در سدهای بلند و بزرگ تا ۲۰ درصد و در سدهای کوچک تا ۸۰ درصد کل هزینه را شامل می‌شود (Ashrafi, 2009).

در بعضی موارد، وقتی شیب برای احداث تندآب بسیار تند است برای انتقال آب از سراب به پایاب از سرریز پلکانی استفاده می‌شود. استهلاک بالای انرژی از مهم‌ترین ویژگی سرریزهای پلکانی است و در نتیجه استفاده نکردن از سازه‌های مستهلک‌کننده یا کاستن از ابعاد آنها موجب کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری می‌شود. به همین دلیل این سرریزها همچنان در طراحی و ساخت سدها مورد توجه‌اند و از نظر علمی، طراحی و اجرایی در حال پیشرفت هستند (Shoja et al., 2011). فکر استفاده از سرریزهای پلکانی از هزاران سال پیش وجود داشته است؛ قدمت این سرریزها را برخی محققان به بیش از ۳۵۰۰ سال گزارش کرده‌اند (James et al., 2001; Fathi, 2009) از قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی در جهان، سرریز پلکانی اکرانیان در یونان با قدمت ۱۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح است. سرریز سد تیلوت در فرانسه نیز با ۱۶۸ سال قدمت جزء قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی است. از قدیمی‌ترین

سروریان و همکاران (Sarvarian *et al.*, 2019) آنالیز جریان روی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه را با استفاده از مدل ریاضی Flow3D بررسی و به کمک الگوریتم بهینه سازی دو هدفه، بالادست سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه را طراحی بهینه کردند. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با داده های موجود حاکی از دقت بالای نرم افزار شبیه سازی Flow3D در شبیه سازی رفتار جریان روی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بود. این محققان همچنین نشان دادند که الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه توانایی لازم را در بهینه‌سازی ابعاد بالادست سرریز پلکانی دارد.

از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی موثر در طراحی سرریز سرعت و فشار هستند. با در نظر گرفتن توزیع این پارامترها روی سرریز پلکانی به میزان کارایی آن سازه می‌توان بهتر پی‌برد. یکی از روش‌های شبیه‌سازی در مسائل هیدرولیکی، استفاده از مدل ریاضی است. در گزارش سروریان و همکاران (Sarvarian *et al.*, 2019) پس از آنالیز سرعت و فشار روی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه و پس از سعی و خطاهای متعدد و مشاهده نتایج مشخص گردید نرم‌افزار Flow3D دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی جریان دارد و تطبیق مناسب بین نتایج مدل فیزیکی و نتایج ریاضی برقرار است.

فراری (Ferari, 2010) روشی جدید در جهت شبیه‌سازی جریان سطح آزاد در یک سرریز لبه تیز ارائه داد. به دلیل این‌که در این زمان فرضیات آب کم‌عمق درست نیست، از رابطه ناوراستوکس با حل روش SPH استفاده شده‌است که پروفیل سطح آزاد و فشار را ردیابی می‌کند. شبیه‌سازی‌ها در حدود یک میلیون بخش سیال و به‌صورت ذرات موازی با کارایی و قدرت محاسباتی بالا اجرا شده است. نتایج با آنالیز فشار واقعی و محاسباتی به دست آمده از

اول جریان فواره‌ای (غیر ریزشی) که در آن جریان به صورت فواره‌های متوالی است، نوع دوم جریان ریزشی که در آن جریان به صورت متغیر تدریجی است، و نوع سوم جریان انتقالی که یک جریان بینابین است و درصد قابل توجهی هوا با آن مخلوط می‌شود و حالت ناپایدار دارد.

پگرام و همکاران (Pegram *et al.*, 1999) با هدف بررسی تأثیر مشخصات هندسی پله‌ها و اثر مقیاس بر نوع جریان و میزان افت انرژی، با فرض ایجاد شرایط تعادل در پایین‌دست تندآب پله‌ای تحقیق جامعی کردند. در این تحقیق، اتلاف انرژی در سرریز پلکانی با اتلاف انرژی در سرریز اوجی صاف مقایسه شد. این محققان با اندازه‌گیری انرژی جریان در پایین‌دست سرریز پلکانی و اوجی مشابه از نظر ابعاد، میزان اتلاف انرژی در سرریز پلکانی را بیشتر از میزان اتلاف انرژی در سرریز صاف گزارش دادند. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که استهلاک انرژی با افزایش شیب سرریز کاهش می‌یابد.

مروتی و همکاران (Morovati *et al.*, 2016) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D، آنالیز هیدرولیک جریان روی سرریزهای پلکانی را بررسی کردند و با استفاده از این نرم‌افزار به مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پارامترهای هیدرولیکی جریان روی سرریز پلکانی با اعمال مدل تلاطم RNG پرداختند و نتایج مدل‌سازی را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار با توجه به کوچک‌بودن درصد خطا و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی، صحت کار روش عددی را نشان داد. با توجه به اینکه آزمایش‌های فیزیکی برای بررسی پارامترهای اصلی جریان روی سرریز پلکانی بسیار پرهزینه است، با اطمینان بالایی می‌توان از روش‌های عددی کم‌هزینه و با سرعت بالا استفاده کرد.

(2010)، برای یافتن ترکیب طراحی بهینه به منظور مینیم کردن هزینه‌های احداث سرریز و سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی (حوضچه آرامش و ...) از روش الگوریتم جفت‌گیری واقعی زنبورهای عسل HBMO استفاده و نتایج این روش را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند. به این ترتیب که سرریز پلکانی برای دبی ۸۰ مترمکعب بر ثانیه با ارتفاع ۵/۵ متر و شیب متوسط ۲۲/۵ درجه طراحی گردید. پس از بهینه‌سازی مسئله فوق با روش الگوریتم جفت‌گیری زنبورهای عسل و سپس مقایسه آن با روش الگوریتم ژنتیک نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این است که روش HBMO نسبت به روش GA در مورد تعداد پله‌ها و عرض سرریز بهبود نشان می‌دهد ولی از نظر استهلاک انرژی در GA جواب بهتری مشاهده شده است. نتایج مقادیر بهینه در الگوریتم HBMO به این ترتیب به دست آمد: عرض سرریز ۱۰ متر، تعداد پله‌ها ۶ و استهلاک انرژی ۶۴ درصد.

در مطالعات پیشین دیده شد که کاربرد روش‌های عددی قدرتمندی مانند روش Flow 3D یا روش SPH در شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی همانند سرریزها ابزار مناسبی در اختیار محققانی قرار می‌دهد که به دنبال کاربست روش‌های بهینه‌سازی ابعاد فیزیکی سازه‌های هیدرولیکی هستند و در این مسیر باید سناریوهای مختلفی از ابعاد سازه را بررسی کنند که قطعاً گردآوری این داده‌ها از مطالعه مدل‌های آزمایشگاهی بسیار پر هزینه و زمان بر است.

هدف از این پژوهش کاربرد مدل احجام محدود Flow3D در مدل‌سازی و حل عددی مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد جره در فراهم آوردن داده‌های لازم به منظور تولید سناریوهای مختلف از ابعاد و تعداد پله‌های سرریز پلکانی سد جره است.

مدل صحت‌سنجی شد و تطابق قابل‌قبولی به دست آمد. در این پژوهش، تغییرات سطح جریان آب عبوری از روی سرریز در روش‌های SPH و حجم محدود نشان داده شده اند. مطابق نتایج SPH، نیمرخ عبوری از روی سرریز پس از حدود ۰/۲۸ ثانیه به کف آبراهه برخورد می‌کند، در حالی که زمان مزبور برای روش حجم حدود ۰/۲۹ ثانیه است که می‌تواند به دلیل اختلاف اندک بازه‌های زمانی در این دو شبیه‌سازی مختلف باشد.

بزرگ حداد و همکاران (Bozorghadad et al., 2005)، برای یافتن بهترین ترکیب پارامترهای طراحی به جهت بهینه‌سازی و برای کاهش هزینه‌های ساخت از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده کردند. به این ترتیب که سرریز پلکانی به ارتفاع ۵/۵ متر و با شیب متوسط ۲۲/۵ درجه و برای دبی ۸۰ مترمکعب بر ثانیه طراحی گردید. هدف از این تحقیق به دست آوردن ترکیب عرض پله و تعداد پله‌ها به نحو بهینه بود تا باعث کاهش هزینه ساخت و اتلاف انرژی در پایین دست سرریز شود. در هر ترکیب از تعداد پله و عرض پله مقدار خاصی از انرژی اتلاف خواهد شد و مابقی اتلاف در پایین دست اتفاق می‌افتد که این اتلاف انرژی پایین دست سرریز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. دامنه تغییر تعداد پله بین ۱ تا ۵۰۰ و عرض پله بین ۸ تا ۴۰ متر متغیر است. پس از بهینه‌سازی به روش GA و مشاهده نتایج مشخص گردید که الگوریتم ژنتیک قادر به حل مسائل پیچیده با دقت و سرعت بالایی است، در حالی که روش‌های دیگر با دشواری‌هایی همراه است. نتایج مقادیر بهینه به این شکل به دست آمد: عرض سرریز ۲۸/۳ متر، تعداد پله‌ها ۹ و استهلاک انرژی ۸۱/۵ درصد.

بزرگ حداد و همکاران (Bozorghadad et al.,

بدنه سد جانمایی شده است. با توجه به موضوع پژوهش، در این بخش مشخصات سرریز پلکانی بررسی می‌گردد. سرریز پلکانی شامل سه جزء به طول کلی ۱۹۳ متر و سطح آستانه به عرض یک متر و در ادامه سه سطح پلکانی به عرض ۳ متر طرح گردیده است. ارتفاع پله اول ۰/۷ متر و بقیه پله‌ها ۰/۶ متر است. اختلاف تراز آستانه سد تا سطح آخرین پله ۲/۵ متر است. سرریز پلکانی در سمت چپ دریاچه به فاصله ۱۶۰ متری از راستای سرریز دریاچه‌دار جانمایی شده است. در مدل هیدرولیکی، تمام اجزای سرریز از جنس شفاف پلگسی‌گلاس ساخته شده است. اساس تحلیل ابعادی صورت گرفته پارامترهای ابعادی طول و مساحت و پارامترهای جریان سرعت و دبی جریان است.

بهینه‌سازی پارامترهای هندسی این مدل‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه به منظور دستیابی به بهترین حالت طراحی هیدرولیکی و اقتصادی سرریز پلکانی سد جره هدف نهایی است.

## مواد و روش‌ها

### ساخت مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی

سد مخزنی جره سدی است خاکی با هسته رسی بر رودخانه زرد در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهر رامهرمز در استان خوزستان. سیستم تخلیه سیلاب که در سمت چپ بدنه سد جانمایی شده است (Water Research Institute, 2009) از دو مجموعه سرریز جداگانه تشکیل یافته است:

- ۱- سرریز دریاچه‌دار، تندآب و سازه پرتاب‌کننده
- ۲- سرریز اضطراری (پلکانی) که در سمت چپ

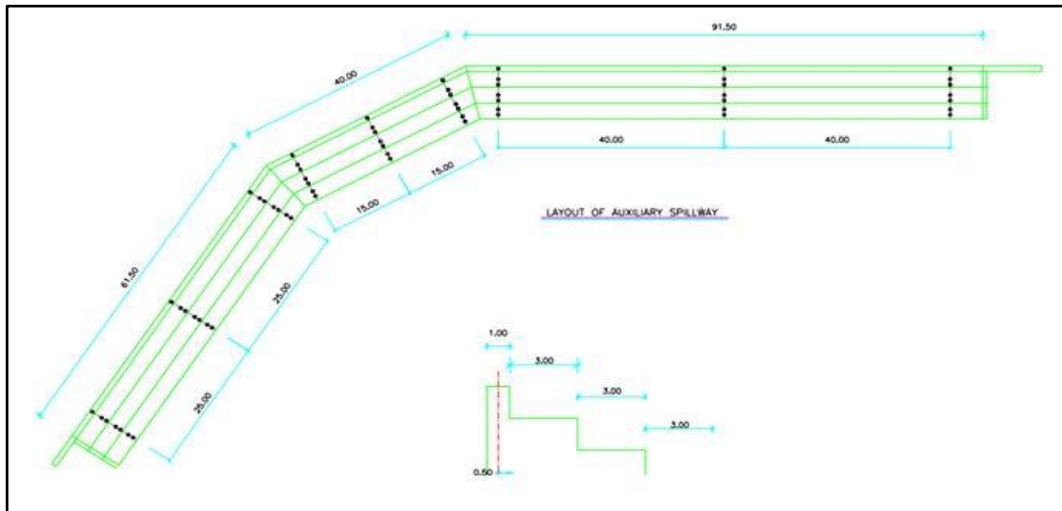


شکل ۱- ساخت و اجرای مدل آزمایشگاهی سرریز

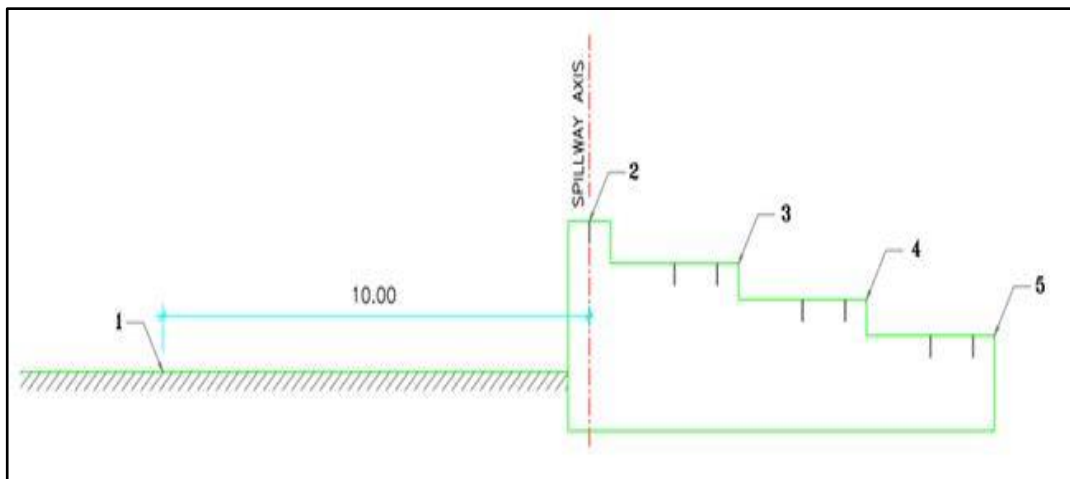
Figure 1- Model of laboratory spillway

تا پایاب مشخص و شماره‌گذاری شده است (شکل ۳). به ازای دبی ۵۰۰ مترمکعب برثانیه، روی ۹ مقطع عرضی در مکان‌های تعیین شده، سرعت با استفاده از دستگاه میکرومولینه آزمایشگاهی مدل FME03 اندازه‌گیری شده است.

اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی روی مدل آزمایشگاهی در طول سرریز از سمت راست به چپ ۹ مقطع عرضی در مدل تعیین شده است (شکل ۲). روی هر مقطع عرضی پنج مکان قبل از آستانه سرریز



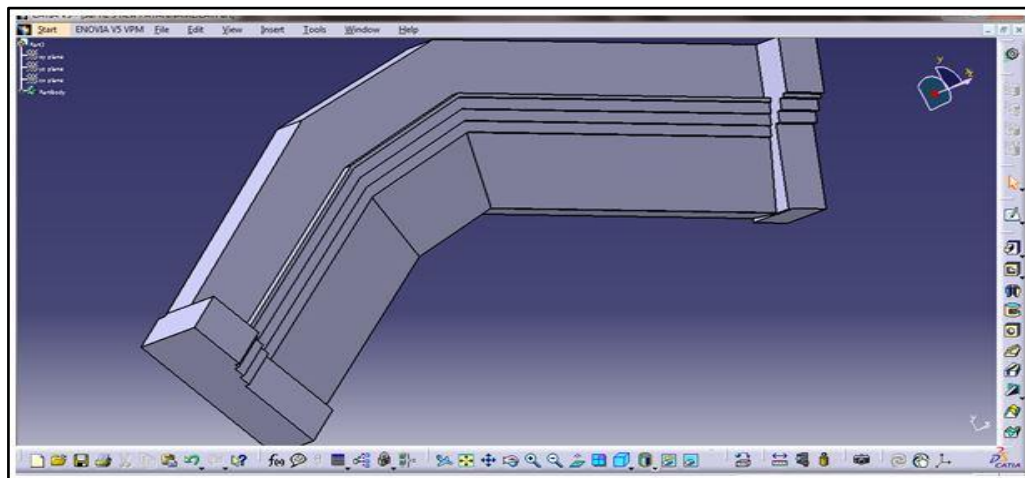
شکل ۲- موقعیت مکان‌های اندازه‌گیری  
Figure 2- Position of the measurement locations



شکل ۳- موقعیت نقاط عرضی  
Figure 3- Position of the cross point

متر و ارتفاعی معادل ۰/۰۵ متر در برنامه CATIA (از مجموعه برنامه‌های شرکت AUTO DESK)، تهیه گردید. در شکل ۴، تهیه هندسه مدل در نرم‌افزار CATIA نشان داده شده است.

شبیه‌سازی مدل فیزیکی با نرم‌افزار FLOW3D به منظور تهیه مدل عددی سرریز پلکانی سد جره در برنامه Flow3D، ابتدا هندسه سرریز در مقیاس ۱:۵۰ با طولی معادل ۳/۸۶ متر، عرض ۰/۷



شکل ۴- هندسه مدل در نرم افزار CATIA  
Figure 4- Geometry of the model in CATIA

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji}) \quad (1)$$

که در آن،

$u_i$  و  $x_i$  = به ترتیب سرعت و مختصات؛  $t$  = زمان؛  
 $p$  = فشار؛  $\rho$  = دانسیته و  $t_{ji}$  = تانسور تنش های  
ناشی از ویسکوزیته که به شکل زیر تعریف می شود:

$$t_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (2)$$

که در آن،

$\mu$  = ویسکوزیته مولکولی؛ و  $S_{ji}$  = تانسور آهنگ تغییر  
فرمها.

#### مدل های آشفتگی جریان

جریان های موجود در طبیعت اغلب به صورت  
آشفته هستند. جریان در اعداد رینولدز کمتر از  
۲۳۰۰ و بزرگتر از ۵۰۰۰ به ترتیب آرام و آشفته  
است. در این پروژه، برای بررسی جریان دو نوع مدل  
آشفتگی  $K-\epsilon$  و  $RNG$  بررسی شده است. در مدل  
 $K-\epsilon$  حل هم زمان دو رابطه دیفرانسیلی است که در  
آنها  $k$  بیانگر انرژی جنبشی (رابطه ۳) و  $\epsilon$   
توصیف کننده افت انرژی (رابطه ۴) است.

بعد از ورود هندسه مدل فیزیکی به محیط  
نرم افزار، با اجرای تنظیمات مربوط مراحل  
آماده سازی مدل برای شبیه سازی در فضای حل  
عددی و حصول نتایج مناسب اجرا گردید. نرم افزار  
Flow3D کل میدان جریان را به صورت حجم  
کنترل های مجزا در نظر می گیرد و از معادله های  
حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال  
می گیرد و با استفاده از روش های مختلف  
گسسته سازی، معادله های دیفرانسیل را گسسته  
می کند. در این پژوهش، در تحلیل مدل از روش  
Explicit و پس از سعی و خطاهای مختلف و  
مقایسه دو مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  و  $RNG$ ، مدل  
انتخاب شده است.

#### روابط حاکم بر میدان جریان

نرم افزار Flow 3D معادله های بقای جرم و  
ممنتوم را برای تمام جریان ها حل می کند. قوانین  
حاکم بر جریان هر سیال تراکم ناپذیر لزج با یک  
رابطه پیوستگی و سه رابطه مومنتم در جهات محور  
های سه گانه مختصات، که به رابطه ناویر-استوکس  
معروف هستند، بیان می شوند. این معادله ها در واقع  
بیانگر پایداری جرم و مومنتم به بیان ریاضی هستند.

دمایی و انتقال حرارت. همچنین  $\sigma_\varepsilon, \varepsilon$  = عدد اشمیت آشفته؛  $C_{\varepsilon 1}(1-C_{\varepsilon 3})\frac{\varepsilon}{\rho K} \kappa$  = اثرهای انتقال حرارت؛  $C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{K}$  = ترم تلفات؛ و  $\eta$  = نشانگر اثرهای غیرتعدادلی (Chanson, 1999).

### مش‌بندی و شرایط مرزی

برای تعیین ابعاد مش‌بندی، پس از سعی و خطاهای فراوان، سه بلوک مش بر طبق جدول و شکل زیر انتخاب گردید: تحلیل مش‌های صورت گرفته برای مدل‌سازی سرریز پلکانی سد جره به ازای ابعاد سلولی مکعبی به ترتیب  $75 \times 75 \times 25$  سانتی‌متر،  $40 \times 40 \times 25$  سانتی‌متر،  $55 \times 55 \times 25$  سانتی‌متر صورت پذیرفت. تحلیل خطای صورت گرفته به ازای مقادیر مختلف مش‌ها نشان داد که مش مکعبی  $40 \times 40 \times 25$  سانتی‌متر، در مقایسه با سایر گزینه‌ها، عملکرد مناسب‌تری دارد. این استدلال بر اساس همگرایی نتایج مدل، سرعت پردازش پردازنده و دقت نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. به منظور راستی‌آزمایی این مطلب درصد خطای محاسبات در هر مش‌بندی بر اساس سرعت جریان مقایسه گردید که همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود گزینه  $25 \times 25 \times 25$  کمترین میزان خطا را در بر دارد. اما با توجه افزایش یک و نیم برابری زمان محاسبه در این مش‌بندی، در مقایسه با مش‌بندی  $40 \times 40 \times 25$  و کاهش درصد خطا تنها به میزان ۲ درصد، گزینه مش‌بندی  $40 \times 40 \times 25$  به عنوان بهترین حالت انتخاب گردید. در جدول ۱ تحلیل مش‌بندی صورت گرفته و در جدول ۲ جزئیات مش‌بندی منتخب برای ۳ بلوک سرریز را می‌توان دید.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) - R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \left( \frac{1}{\rho} \times \kappa \right) - \varepsilon + (\nu \times \nabla^2 K) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = -C_{\varepsilon 1} \times \frac{\varepsilon}{K} \times R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \nu \nabla^2 \varepsilon + (C_{\varepsilon 1}(1-C_{\varepsilon 3})\frac{\varepsilon}{\rho K} \times \kappa) \quad (4)$$

مدل آشفستگی *RNG* جریان بر اساس انرژی جنبشی آشفته و برای جریان‌های با چرخش و تلاطم زیاد و همچنین جریان‌های غیر ماندگار یا وابسته به زمان بیشتر کاربرد دارد. با توجه به اختلاط جریان در پایین پله‌های سرریز پلکانی سد جره که به‌واسطه پلان تقریباً نعلی شکل این سرریز ایجاد می‌شود گمان می‌رود که مدل *RNG* توانایی مناسبی در مدلسازی آشفستگی جریان را نشان دهد. معادله‌های انرژی جنبشی و افت در مدل *RNG* به ترتیب در رابطه‌های ۵ و ۶ بیان شده است.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) - R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \left( \frac{1}{\rho} \times \kappa \right) - \varepsilon + (\nu \times \nabla^2 K) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = -C_{\varepsilon 1} \times \frac{\varepsilon}{K} \times R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \nu \nabla^2 \varepsilon + (C_{\varepsilon 1}(1-C_{\varepsilon 3})\frac{\varepsilon}{\rho K} \times \kappa) - \frac{C_\mu \eta^3 (1-\frac{\eta}{\eta^*}) \varepsilon^2}{(1+\beta \eta^3)^* k} \quad (6)$$

که در آن‌ها،

$$\begin{aligned} \sigma_k \varepsilon &= \text{ترم تلفات}; R_{ij} = \text{تنش‌های رینولدزی}; \\ &= \text{عددپرانتل} = \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i}; \text{ترم تلفات توربولانسی}; \\ &= \nu \times \nabla^2 K = \text{مربوط به پخش مولکولی}; \frac{1}{\rho} \times \kappa = \text{اثرهای} \end{aligned}$$



جدول ۱- تحلیل ابعاد مش بندی بر اساس درصد خطای سرعت جریان و زمان محاسبه توسط پردازنده

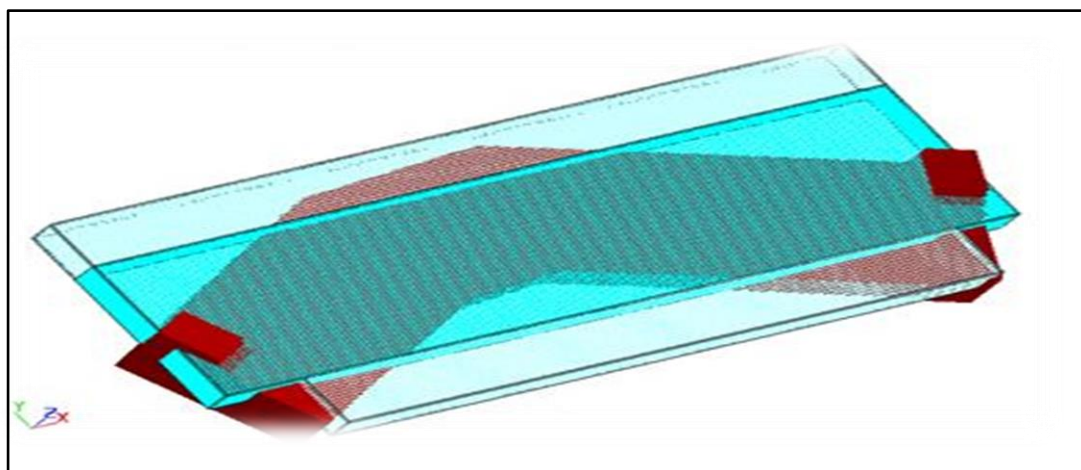
Table 1- Gridding analysis based on the error percentage of the flow velocity and the elapsed time

ابعاد مش بندی (سانتی متر)	خطا بر اساس سرعت جریان (درصد)	زمان پردازش (دقیقه)
۷۵×۷۵×۲۵	۱۱/۵۲	۱۶۲/۴
۵۵×۵۵×۲۵	۹/۳۸	۲۲۱/۴۵
۴۰×۴۰×۲۵	۶/۱۳	۲۸۰/۵
۲۵×۲۵×۲۵	۴/۰۴	۴۲۱/۸۵

جدول ۲- ابعاد و تعداد شبکه های مش روی بلوک های مش بندی

Table 2- Size and number of mesh in mesh blocks

بلوک	ابعاد در راستای X متر	ابعاد در راستای Y متر	ابعاد در راستای Z متر	تعداد شبکه مش
۱	۴/۱۲	۰/۶۷	۰/۱۷	۲۸۰۰۰
۲	۴/۱۲	۱/۰۲	۰/۱۷	۱۰۲۰۰۰
۳	۳/۴۰	۰/۳۵	۰/۱۷	۲۰۰۰۰



شکل ۵- تشکیل بلوک های مش بندی و شبکه های مش در مدل

Figure 5- Mesh block in flow3D

به منظور برقراری کامل جریان و شرایط مرزی براساس جدول ارتباط درست میان بلوک های مش، زیر مشخص گردید:

جدول ۳- اعمال شرایط مرزی  
Table 3- Boundary conditions

شرط مرزی	مختصات	بلوک مش
wall	X min	بلوک مش اول
wall	X max	
outflow	Y min	
specified pressure	Y max	
wall	Z min	
specified pressure	Z max	
wall	X min	بلوک مش دوم
wall	X max	
symmetry	Y min	
symmetry	Y max	
wall	Z min	
specified pressure	Z max	
wall	X min	بلوک مش سوم
outflow	X max	
continuative	Y min	
symmetry	Y max	
wall	Z min	
specified pressure	Z max	

### تعریف مسئله بهینه‌سازی

که در این میان باید به توانایی الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی این مسائل اشاره کرد. در بهینه‌سازی چندهدفی، همان‌گونه که گفته شد، چندین تابع هدف به طور هم‌زمان بهینه می‌شوند که در بهینه‌سازی به این صورت تعریف می‌شود: یافتن یک مجموعه بردار از متغیرهای طراحی که قیود را برآورده سازند و بردار هدف را بهینه کنند که عناصر

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در دنیای مهندسی، بهینه‌سازی مسائل چندهدفی هستند که در آنها چندین تابع هدف وجود دارند که باید به طور هم‌زمان بهینه شوند. نتیجه تحقیقات در سال‌های گذشته آن بوده است که روش‌های مختلفی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفی به وجود آمده‌اند

### تابع هدف

$$Z_4 = (h_1 * w_1) * (3.86) + ((m - n) * H * W * 3.86) + R \sum \left( \left( \frac{n}{m} - 1 \right)^2 + \left( 1 - \frac{m}{n} \right)^2 \right) \quad (7)$$

که در آن،

ارتفاع پله اول:  $h_1 = 0.14$  عرض پله اول:

$w_1 = 0.2$  کمترین ارتفاع در پنج حالت:

$H_1 = 0.06$ ؛ بیشترین ارتفاع در پنج حالت:  $0.18$

$$H_2 = (rand(1)) * H = H_1 + (H_2 - H_1)$$

کمترین عرض در پنج حالت:  $W_1 = 0.3$ ؛ بیشترین

عرض در پنج حالت:  $W_2 = 0.9$ ؛  $W = W_1 + (W_2 - W_1) * (rand(1))$

\* ضریب جریمه =  $R$ ، تعداد پله ها =  $n$

$$Z_3 = H \quad Z_2 = W \quad Z_1 = n \quad m = n - 1$$

### نتایج و بحث

#### مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

صحت سنجی پارامترهای هیدرولیکی مدل مورد مطالعه آخرین مرحله شبیه سازی و حل عددی مدل فیزیکی مورد نظر است. پس از اجرای تنظیمات صحیح و تکمیل تمامی مراحل مورد نیاز برای اجرای شبیه سازی مدل فیزیکی، نتایج پارامترهای مورد نظر مانند سرعت، فشار، عمق و غیره از نرم افزار استخراج و با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه می-شوند. چنانچه نتایج حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی به هم نزدیک و نسبت به هم خطای کوچکی (کمتر از ۱۵ درصد) داشته باشند، مدل آزمایشگاهی به درستی در نرم افزار و فضای حل عددی شبیه سازی شده است.

آن نشان دهنده مقادیر توابع هدف مسئله هستند. این توابع هدف که بیان کننده عناصر بردار هدف هستند اغلب با یکدیگر در تضادند. در این گونه مسائل، هدف یافتن جواب قابل قبولی است که مقادیر تمام توابع هدف را به طراح می دهد. رابطه ۷ تابع هدف در بهینه سازی مسئله این پژوهش را نشان می دهد.

به منظور بهینه سازی ابعاد هندسی مدل فیزیکی که شامل بهینه شدن تعداد پله ها، عرض پله ها و ارتفاع پله ها است، پنج حالت مختلف در نظر گرفته شد. بازه تغییرات در این پنج حالت از سه پله تا هفت پله انتخاب گردید. روشن است که با تغییر تعداد پله ها عرض پله و ارتفاع نیز تغییر می کند و در نتیجه این سه پارامتر به عنوان متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک وارد می شوند. روش به کار گرفته شده به منظور بهینه سازی فوق، الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAI است که در نرم افزار متلب پیاده سازی شده است.

#### مشخصات پارامترهای ورودی به الگوریتم

##### ژنتیک

تعداد متغیرهای تصمیم = ۳

تعداد تکرار = ۲۰

تعداد جمعیت = ۱۰

درصد تولیدمثل = ۰.۷

درصد جهش = ۰.۴

آهنگ جهش = ۰.۰۲

نوع جهش = گوسی

نوع تولیدمثل = آریتماتیک

قیود  $3 \leq n \leq 7$  = تعداد پله ها

است یادآوری شود مقدار خطا از رابطه ۸ محاسبه می‌شود که در آن مقدار اندازه‌گیری آزمایشگاهی  $x_p$  و مقدار اندازه‌گیری شده عددی برای هر مقطع از جریان است. از آنجا که خطا به صورت قدرمطلق محاسبه نشده است برخی اعداد درصد خطا در جدول‌های ۴ و ۵ به صورت منفی ظاهر شده‌اند که نمایانگر بیشتر بودن سرعت مدل عددی نسبت به سرعت مدل آزمایشگاهی در این موارد است.

$$e_i = \left( \frac{x_p - x_m}{x_m} \right) * 100 \quad (۸)$$

در این پژوهش، به ازای دبی ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه و بار آبی روی سرریز ۱/۵ متر، صحت‌سنجی نتایج سرعت در دو حالت مدل آشفتگی RNG و K-ε با مدل آزمایشگاهی صورت گرفته است که همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نتایج سرعت حاصل از حل عددی با مدل RNG به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی نزدیک‌تر است و نسبت به مدل K-ε درصد خطای کمتری دارد.

در جدول‌های ۴ و ۵ مقدار خطای بین مدل فیزیکی و مدل عددی نشان داده شده است. لازم

جدول ۴- محاسبه خطای نتایج سرعت مدل عددی و آزمایشگاهی در حالت RNG

Table 4- Comparing the result of laboratory and numeric measured velocity in RNG model

خطا	سرعت (مدل عددی) m/s	سرعت (مدل آزمایشگاهی) m/s
٪۷	۰/۴۸۲	۰/۵۱۸
٪۰	۰/۸۸۳	۰/۸۸۲
٪۱	۰/۵۴۷	۰/۵۵۰
٪۴	۰/۷۸۵	۰/۸۱۶
-٪۷	۰/۴۴۷	۰/۴۱۹
-٪۲	۰/۸۳۶	۰/۸۱۶
٪۶	۰/۸۹۱	۰/۹۴۹
٪۶	۰/۹۵۷	۱/۰۱۵
٪۱	۰/۸۱۰	۰/۸۱۶
٪۲	۰/۷۹۸	۰/۸۱۶
٪۱	۰/۸۴۱	۰/۸۵۰
٪۲	۰/۴۷۳	۰/۴۸۵
٪۰	۱/۱۴۶	۱/۱۴۸
٪۰	۰/۵۲۰	۰/۵۱۸
٪۴	۰/۶۵۴	۰/۶۸۳
-٪۳	۰/۷۷۱	۰/۷۵۰
٪۶	۰/۵۵۰	۰/۵۸۴
٪۶	۰/۷۶۹	۰/۸۱۶
٪۸	۰/۸۷۸	۰/۹۴۹

جدول ۵- محاسبه خطای نتایج سرعت در مدل عددی و آزمایشگاهی در حالت K-ε

Table 5- Comparing the result of laboratory and numeric measured velocity in K-ε model

خطا	سرعت (مدل عددی) m/s	سرعت (مدل آزمایشگاهی) m/s
٪-۱۳	۱/۰۰۰	۰/۸۸۲
٪۲۴	۰/۹۲۴	۱/۲۱۵
٪۱۲	۰/۴۸۴	۰/۵۵۰
٪۴	۰/۷۸۱	۰/۸۱۶
٪۲۸	۰/۷۸۴	۱/۰۸۲
٪۱۴	۰/۷۰۲	۰/۸۱۶
٪۱۳	۰/۸۲۱	۰/۹۴۹
٪۱۴	۰/۸۷۶	۱/۰۱۵
٪۸	۰/۷۵۱	۰/۸۱۶
٪۲	۰/۷۹۸	۰/۸۱۶
٪۹	۰/۸۶۴	۰/۹۴۹
٪۳۰	۰/۵۷۳	۱/۰۸۲
٪۲	۰/۴۷۳	۰/۴۸۵
٪۱۳	۰/۸۲۷	۰/۹۴۹
٪-۱	۰/۵۲۲	۰/۵۱۸
٪-۱۲	۰/۷۶۶	۰/۶۸۳
٪-۱۸	۰/۸۸۱	۰/۷۵۰
٪۲۹	۰/۴۱۵	۰/۵۸۴
٪۶	۰/۷۷۰	۰/۸۱۶
٪۱۱	۰/۸۴۸	۰/۹۴۹

### نتایج به دست آمده از پیاده سازی الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب

بعد از بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه و مشخص شدن نتایج، با مجموعه ای از جواب ها مواجه می شویم؛ در این مورد، حالت ۴ پله و ۵ پله به عنوان جواب های قابل قبول و گزینه های بهینه مورد قبول هستند. اما با توجه به اهمیت کاهش هزینه و توجیه اقتصادی طرح، حالت ۴ پله به عنوان جواب نهایی بهینه سازی انتخاب می گردد.

### بهینه سازی تعداد پله ها

همان طور که مشاهده می شود، برای حجم ۱۶ مترمکعب، که به عنوان حجم بهینه انتخاب گردیده است بهینه سازی تعداد پله ها در حالت ۴ پله در نظر

گرفته می شود.

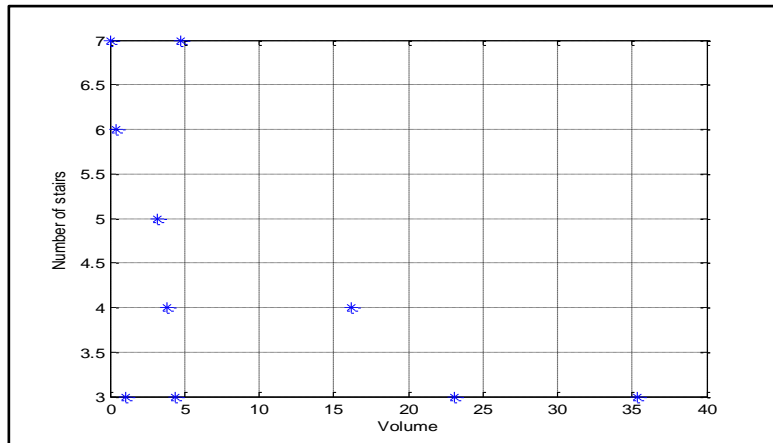
### بهینه سازی عرض پله ها

همان طور که مشاهده می شود برای حجم ۱۶ مترمکعب، عرض ۰/۰۷۲ متر به عنوان عرض بهینه انتخاب می گردد.

### بهینه سازی ارتفاع پله ها

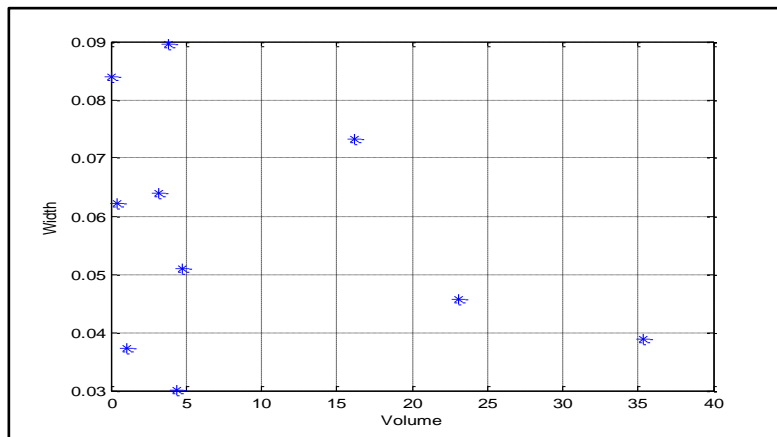
همان طور که مشاهده می شود برای حجم ۱۶ مترمکعب، ارتفاع ۰/۰۶۵ متر به عنوان ارتفاع بهینه در نظر گرفته می شود.

نتایج نهایی حاصل از پیاده سازی الگوریتم ژنتیک به روش چندهدفه NSGAIII در مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد جره در جدول های ۶ و ۷ ارائه شده است.



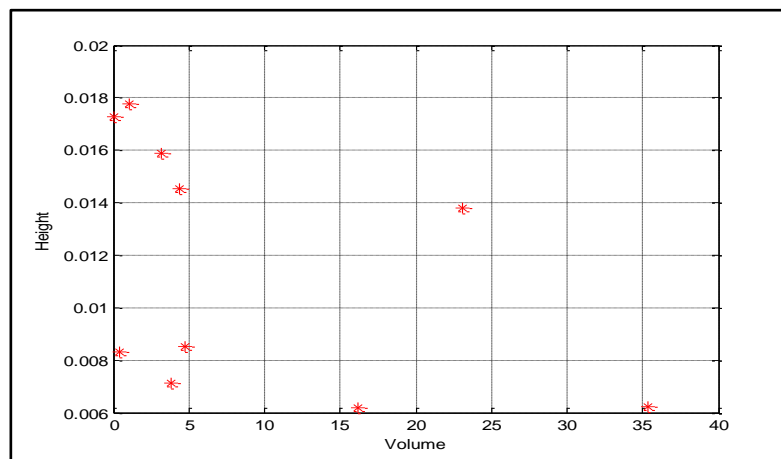
شکل ۶- بهینه‌سازی تعداد پله‌ها

Figure 6- Optimization of the number of stairs



شکل ۷- بهینه‌سازی عرض پله‌ها

Figure 7- Optimization of the width of stairs



شکل ۸- بهینه‌سازی ارتفاع پله‌ها

Figure 8- Optimization of the height of stairs

جدول ۶- نتایج نهایی مدل آزمایشگاهی در الگوریتم ژنتیک ۴ پله

Table 6- Final result of in vitro model in genetic algorithm 4 stairs

نام پارامتر	نتایج الگوریتم ژنتیک	نتایج مدل آزمایشگاهی	درصد تغییرات
تعداد پله	۴	۴	۰٪
عرض پله متر (۱:۵۰)	۰/۰۷۲	۰/۰۶	+۲۰٪
ارتفاع پله متر (۱:۵۰)	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۲	٪-۴۶

جدول ۷- نتایج نهایی مدل آزمایشگاهی در الگوریتم ژنتیک ۵ پله

Table 7- Final result of in vitro model in genetic algorithm 5 stairs

نام پارامتر	نتایج الگوریتم ژنتیک	نتایج مدل آزمایشگاهی	درصد تغییرات
تعداد پله	۵	۴	+۲۵٪
عرض پله متر (۱:۵۰)	۰/۰۶۴	۰/۰۶	+۶٪/۱۶۶
ارتفاع پله متر (۱:۵۰)	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۲	+۳۲٪/۱۵

## نتیجه گیری

مدل در نظر گرفته شد و به این ترتیب تعداد پله‌ها از ۳ تا ۷ پله به‌عنوان حالت‌های هندسی مختلف انتخاب گردید و به‌عنوان قیود مسئله برای ارائه به الگوریتم ژنتیک انتخاب شد. از آنجا که با تغییر تعداد پله، عرض و ارتفاع پله‌ها نیز تغییر پیدا می‌کند، بهینه‌سازی هندسی با سه پارامتر تعداد، عرض و ارتفاع اجرا خواهد شد.

بهینه‌سازی صورت گرفته در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGAI) بوده است. پس از پیاده‌سازی این الگوریتم در نرم‌افزار متلب نتایج بهینه‌سازی به شرح زیر مشخص گردید:

با توجه به تشکیل جبهه Pareto در روش چند هدفه حالت ۴ پله و ۵ پله به عنوان جواب‌های بهینه و قابل قبول مسئله انتخاب شدند اما با توجه به اهمیت اقتصادی تر شدن طرح و توجیه اقتصادی، گزینه سرریز پلکانی با تعداد ۴ پله به‌عنوان جواب نهایی بهینه‌سازی انتخاب گردید.

به منظور شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد جره در نرم‌افزار Flow3D، پس از ترسیم هندسه مدل در نرم‌افزار CATIA و فراخوانی در نرم‌افزار Flow3D، حل عددی این مدل در برنامه فوق صورت گرفت. پس از کالیبره شدن مدل و اجرای همه تنظیمات موردنظر در نرم‌افزار، صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی به کمک استخراج نتایج سرعت از نرم‌افزار صورت پذیرفت.

در انتخاب مدل آشفتگی در شبیه‌سازی موردنظر از دو مدل K-ε و RNG استفاده گردیده است. پس از مشاهده نتایج سرعت در دو مدل K-ε و RNG، مدل آشفتگی RNG با کمترین درصد خطا (کمتر از ۱۰ درصد) تطابق مناسبی با نتایج سرعت آزمایشگاهی نشان داد و به این ترتیب مدل فیزیکی در فضای حل عددی نرم‌افزار Flow3D صحت‌سنجی شد. در مرحله بعد به‌منظور بهینه‌سازی ابعاد هندسی سرریز موردنظر، پنج حالت هندسی مختلف برای

## مراجع

- Ashrafi, F. (2009). Numerical Analysis Flow on Stepped Spillway Using Flow3D and CCHE2D Software. Kerman. Shahid Bahonar. M.Sc. Thesis. (In Persian)
- Bozorghaddad, O. Mirmomeni, M. and Marino, M. (2010). Optimal Design of Environment System, stepped spillways using The HBMO Algorithm. *Civil Engineering*, 1 (27):81-94.
- Bozorghaddad, O. Sharifi, E. and Naderi, M. (2005). Optimum Design of Stepped spillways using Genetic Algorithm. *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on EVOLUTIONARY COMPUTING*, Lisbon, Portugal, 325-331.
- Chanson H. (1995). Hydraulic design of stepped cascade, channels, weirs and spillways. Pergamon, Oxford, UK.
- Chanson, H. (1996). Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. *Journal of Hydraulic Research*, 30 (34). Chanson, H. (2001). A transition flow regime on stepped spillways: the facts. *Proceeding 29th LAHR congress*, Beijing, China.
- Chadgani, A. and Khosrojerdi, A. (2012). Hydraulic Analysis of Flow on Stepped Spillways Using Software Flow3D. 9th International River Engineering Conference. Shahid Chamran University. (In Persian)
- Fathi, A. (2009). Survey of Effect of Downstream Crest Chute Slope on the Natural Air Entrainment Point in Skimming Flow in Stepped Spillway. *Journal of Water and Solid*, 23(3):1-12.
- Ferrari, A. (2010). Simulation of free surface flow over a sharp-crested weir. *Advances in Water Resources*, 3 (33): 270-276.
- James, C.S., Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahasi, M., Tatewar, P., Ingle, N. and Porey, D. (2001). Discussion of 'onset of skimming flow on stepped spillways' by Chamani, M.R., Rajaratnam, N. *Journal of Hydraulic Eng*, 127 (6): 519- 525.
- Mansori. (2013). Analysis Flow on Stepped Spillway of Siahbishe dam with Flow3D. *7th Congress Civil Engineering*. Zahedan. Shahid Nikbakht University. (In Persian)
- Morovati, Kh., Eghbalzadeh, A., Soori S. (2016). Numerical Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways. *Civil Engineering Journal*, 2(5):32-43.
- Pegram, GS., Officer, AK. And Mottram, SR. (1999). Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 500-510.
- Sarvarian J., Mamizadeh J. (2019). Development a two-objective simulation - optimization model to the optimal design of geometric dimensions and slope of the stepped spillway of upstream Siah-Bisheh Dam using NSGA-II algorithm. *Iranian Journal of Soil & Water Rsearch*, 51 (2): 469-478. (In Persian)
- Shoja F., Salmasi F., Farsadizadeh D., Nazemi A.H. (2011). Optimal Design of Stepped Spillways for Maximizing Energy Dissipation Using Genetic Algorithm.
- Sohrabipour, N. (2002). Survey energy dissipation on stepped spillways. Kerman, Shahid Bahonar University. (In Persian)
- Water research Institute (2009). Final report: Hydraulic model of Jare Dam flood drainage system. Khuzetan water and Power Corporation. (In Persian)



## **Numerical Simulation and Geometric Optimization of the Stepped Spillway of Jare Dam Using a Multi Objective Genetic Algorithm**

**M.H. Fattahi\* and A. Sinaee**

\* Corresponding Author: Assistant professor, Civil engineering Dept., Marvdasht Branch, Islamic azad university, Marvdasht, Iran. Email: fattahi.mh@gmail.com

Received: 13 November 2020, Accepted: 5 February 2021

### **Extended Abstract**

#### **Introduction:**

Concerning the importance of water saving in Iran, as an arid and semi-arid country, dam construction plays a crucial role in water resources management. Spillways are one of the most important components of a dam. They are different in shape and function. Stepped spillway is one of the most designed and operated ones. Numerical simulation of the stepped spillway of Jare dam using FLOW 3D software and the geometric optimization of the steps' dimension using the multi-objective genetic algorithm is investigated in this research. The idea of using stepped spillways goes back to 3500 years ago (James et al., 2001). The oldest stepped spillway built in Iran has been recorded from 600 years ago. Studying the geometric features of stepped spillways in order to optimize the size and dimension of steps has also been the issue of interest for researchers (Chanson, 1996 and 20021; Pegram et al., 1999; Ferrari, 2010).

#### **Methodology:**

An experimental model of Stepped spillway of Jare Dam has been set up first in order to calibrate and verify the numerical model. Flow 3D software is applied for numeric simulation of the spillway and the multi objective genetic algorithm (NSGAI) is implemented to optimize the geometric dimensions. Calibration of the model has done after introducing the experimental models' geometry to FLOW 3D. Comparing the velocity data recorded by the numerical model and the experimental velocity data, the software has been verified.

Turbulence models are simplified constitutive equations that predict the statistical evolution of turbulent flows. K-epsilon ( $k-\epsilon$ ) turbulence model is a practical model to simulate the mean flow characteristics for turbulent flow conditions. It is a two-equation model which gives a general description of turbulence condition of the ambient flow by means of two transport equations (PDEs). The RNG model was developed using Re-Normalisation Group (RNG) methods to renormalize the Navier-Stokes equations, to monitor the effects of smaller scales of motion especially those of vortex movements. In  $k-\epsilon$  model the eddy viscosity is determined from a single turbulence length scale, so the diffusion seen in the calculated turbulence is that which occurs only at the specified scale, although in real physical situations, all scales of motion will contribute to the turbulent diffusion especially those with more curvature streams. RNG turbulent model, as mathematical method that can be utilized to extract turbulence similar to the  $k-\epsilon$ , results in a modified form of the epsilon equation. We have implemented both methods to simulate the turbulent in the flow over the stepped spillway and to compare the effectiveness of both models when flow is dealing with a complicated solid as the Jare Dam spillway.

Five different types have been considered for the geometry of the stepped spillway. Numbers of steps are designated 3 to 7 steps and are earmarked as the algorithm constrains. The variables are then defined and the fitness function of the algorithm is extracted. The multi objective genetic algorithm is then coded in MATLAB. In optimization procedure the geometric

features including width, height and the number of steps in each five discussed type are calculated.

**Results and Discussion:**

Velocity results using two turbulent models, RNG and K- $\epsilon$ , have been calculated separately. The results of the RNG model depict better match in accordance to the physical model's velocity data with less than 10 percent error. In optimization procedure the stepped spillway with 4 steps, 0.072<sup>m</sup> width (1:5) and 0.0665<sup>m</sup> height (1:5), is considered as the most optimum choice regarding the economic and hydraulic concerns.

**Conclusion:**

Flow 3D software simulated the flow over the stepped spillway of Jare Dam quite acceptable. The simulating model depicted the most accuracy using the RNG turbulent model and the multi objective genetic algorithm used (NSGAI) suggested the 4 steps spillway as the most economic and functional choice for Jare stepped spillway.

**Acknowledgments:**

Authors would like to express their sincere respect to Khuzestan Province water and power regional organization for their supports.

**Keywords:** Economic assessment, FLOW 3D, K- $\epsilon$ , RNG,,Stepped spillway, turbulent model.