

## بررسی افت انرژی در پرتاب‌کننده جامی دندانهای و مثلثی دندانهای در شرایط آزمایشگاهی و عددی

مهدی نیروبخش، علیرضا مسجدي\*، محمد حیدر نژاد و امین بردبار<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۱)

### چکیده

استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی و مثلثی با شکل‌های مختلف، به دلیل ایمنی و استهلاک بهتر انرژی برای محافظت از بستر پایین دست ابنیه‌های آبی و همچنین مزایای اقتصادی نسبت به سایر مستهلک‌کننده‌های انرژی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش بررسی افت انرژی جریان عبوری در سرریز جامی دندانهای و مثلثی دندانهای در شرایط آزمایشگاهی و عددی است. مدل‌سازی فیزیکی و عددی در یک فلوم مستطیلی به طول ۹ متر، عرض ۵/۰ متر و ارتفاع ۵/۰ متر و سرریز جامی و مثلثی با دندان‌ها با ابعاد مشخص مطابق استاندارد USBR در شدت جریان‌های مختلف در شرایط آزمایشگاهی و عددی استفاده شد. میزان افت انرژی در سرریز جامی دندانهای استاندارد ۷۱/۴ درصد و مثلثی دندانهای ۷۴/۸ درصد در شرایط آزمایشگاهی به دست آمد که نشان داد سرریز مثلثی دندانهای در زمینه اتلاف انرژی عملکرد مناسب‌تری نسبت به سرریز جامی دندانهای دارد. نتایج به دست آمده نشان داد، شکل هندسه سرریز و وجود دندان‌ها در انتهای سازه عامل مهم و تأثیرگذاری در میزان اتلاف انرژی جریان‌های عبوری از سرریزهای جامی دندانهای و مثلثی دندانهای دارد که باعث شکسته و فشرده شدن بیشتر خطوط جریان عبوری و به تبع آن افزایش سرعت در لحظه پرتاب و در نهایت اتلاف نسبی انرژی بیشتر در پایین دست سازه می‌شود. پس از تعیین عملکرد بهتر سرریز مثلثی دندانهای در اتلاف انرژی، به شبیه‌سازی عددی سرریز مثلثی دندانهای به روش محاسبات عددی در نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد. نتایج تحلیل نشان داد که میزان اتلاف انرژی در سرریز مثلثی دندانهای در محاسبات عددی ۸۷/۵ درصد بود که نشان‌دهنده همسو بودن و صحت آزمایش‌های انجام‌شده با شرایط آزمایشگاهی است.

واژه‌های کلیدی: عدد فرود، افت انرژی، سرریز جامی دندانهای، سرریز مثلثی دندانهای، Flow-3D

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: drmasjedi.2007@yahoo.com

## مقدمه

حجم آب مازاد در مخازن سدها به وسیله سرریزها تخلیه می‌شود. جریان عبوری از سرریزها فوق بحرانی است؛ در نتیجه سرعت جریان عبوری در انتهای سرریزها بسیار زیاد است که اگر بستر پایین دست سرریزها از مقاومت لازم برخوردار نباشد، می‌تواند موجب آبشستگی و فرسایش شود. حفره‌های آبشستگی ایجادشده در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی موجب می‌شود، جریان زیر سازه‌ای افزایش یابد. پیشرفت و حرکت این حفره‌ها به سمت سازه موجب می‌شود پایداری سد، سرریز و سازه‌های مرتبط تهدید شده و حتی منجر به شکست آن‌ها شود؛ بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستهلک‌کننده انرژی در قسمت انتهایی دارد تا از سرعت زیاد جریان خروجی کاسته و میزان آبشستگی و فرسایش را کاهش دهد. امروزه استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی و مثلثی در مقایسه با سایر مستهلک‌کننده‌ها مثل حوضچه آرامش و بلوک‌های بتنی به دلیل مزایای اقتصادی بیشتر استفاده می‌شود.

غریب‌وند و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای خطی، زیگزگی دوزنقه‌ای و کلید پیانویی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد تطابق خوبی بین مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. ضریب دبی سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریزهای خطی و زیگزگی دوزنقه‌ای به ترتیب به میزان ۲۶ و ۲۴ درصد بیشتر بود (۵). باوان (۲۰۱۰) و ماگلا (۲۰۲۰)، نشان دادند پرتاب‌کننده‌های جامی ساده و جامی دندان‌های در حالت مستغرق به دلیل شرایط مناسب هیدرولیکی، استهلاک انرژی بهتری نسبت به حالت آزاد یا فیلپ دارد و آبشستگی کمتری ایجاد می‌کند (۱ و ۶). اسکندری و همکاران (۲۰۲۰)، به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر هندسه پایین دست پرتابه جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب پرداختند. نتایج نشان داد وجود دندان‌های جام اثر زیادی بر عمق آبشستگی دارد. پرتاب‌کننده‌های جامی شکل با دندان‌های مستطیلی یک‌درمیان نسبت به حالت بدون دندان حدود ۱۳ درصد کاهش آبشستگی را سبب می‌شود. همچنین بیشینه عمق آبشستگی در

حالت جام با دندان‌های مستطیلی یک‌درمیان در بازه مطلوب‌تری از سایر نمونه‌ها آزمایشگاهی به وقوع می‌پیوندد (۳). قنبری و حیدرناژاد (۲۰۲۰)، به تجزیه و تحلیل محاسبات عددی جریان هیدرولیکی در پرتاب‌کننده‌های کلید پیانویی مثلثی و مستطیلی پرداختند. نتایج نشان داد که داده‌های مدل عددی به‌طور مناسب با مدل آزمایشگاهی سازگار بود. ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی مثلثی ۲۵ درصد بیشتر از ضریب دبی پرتاب‌کننده‌های کلید پیانویی مستطیلی بود (۴). وطن‌دوست و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی جریان بحرانی و ضرایب فشار دینامیکی روی پرتاب‌کننده‌های جامی شکل پرداختند. تغییرات فشار یکی از مواردی است که به سازه‌های هیدرولیکی ضربه وارد می‌کند. در این مطالعه که روی جریان خروجی از سدهای مخزنی انجام شد، فشار وارده روی سه مدل مختلف با اعداد ۵ تا ۱۳ عدد فرود انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که ضرایب نوسانات فشار با افزایش عدد فرود جریان در پرتاب‌کننده‌های جامی افزایش می‌یابد (۱۵). ژوو و همکاران (۲۰۲۲)، به مطالعه هیدرولیکی زاویه شکل پرتاب‌کننده جامی و تأثیر آن بر الگوی جریان عبوری از پرتاب‌کننده با صفحه پایین جمع‌شونده پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که جریان‌های چرخشی با عرض ثابت با صفحات پایین جمع‌شده (CFB-R) و (WFB-R) بیشترین فشار ضربه را در کف استخر به ۷۰ تا ۸۶ درصد از آنچه در ابتدا بود، کاهش می‌دهد (۱۶). ران و همکاران (۲۰۲۳)، به شبیه‌سازی عددی زاویه جهش در قوس پرتاب‌کننده‌های جامی پرداختند. این پژوهش نشان داد، درجه انحراف سرعت جریان خروجی در جهت جانبی پرتاب‌کننده در زاویه‌های مختلف متفاوت است. وی تعدادی معادله برای تعیین زاویه پراکندگی ارائه داد (۱۲). نیروبخش و همکاران (۲۰۲۳)، به مطالعه و آزمایش پایداری سنگ‌چین در پایین دست چهار سرریز جامی ساده، مثلثی ساده، جامی دندان‌های و مثلثی دندان‌های پرداختند. نتایج نشان داد که شکل هندسه و وجود دندان عامل مؤثری در پایداری سنگ‌چین دارد. عدد پایداری در سرریزهای دندان‌های ۱۱ درصد و سرریزهای ساده ۷ درصد

تأثیر هندسه سرریز در افت انرژی در شرایط آزمایشگاهی در پرتاب‌کننده جامی دندان‌های و مثلثی دندان‌های، و انتخاب بهترین عملکرد سرریز و محاسبات عددی است. بدین منظور از مدل آزمایشگاهی سرریز جامی و مثلثی با دندان‌های در انتهای آستانه پرتاب‌کننده با ابعاد مشخص، مطابق استاندارد USBR استفاده شد.

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی افت انرژی در پرتاب‌کننده‌های جامی دندان‌های و مثلثی دندان‌های با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال، معادله (۱) بین پارامترهای مؤثر بر افت انرژی در حالت تعادل برقرار است:

$$f_1(y_1, v_1, g, y_2, v_2) \quad (1)$$

$y_1$  عمق جریان در بالادست سرریز،  $v_1$  سرعت جریان در بالادست سرریز،  $g$  شتاب ثقل،  $y_2$  عمق جریان روی سرریز،  $v_2$  عمق جریان روی سرریز و  $v_2$  سرعت جریان روی سرریز است. این پارامترها با استفاده از تئوری باکینگهام به صورت معادله (۲) بدون بعد می‌شود:

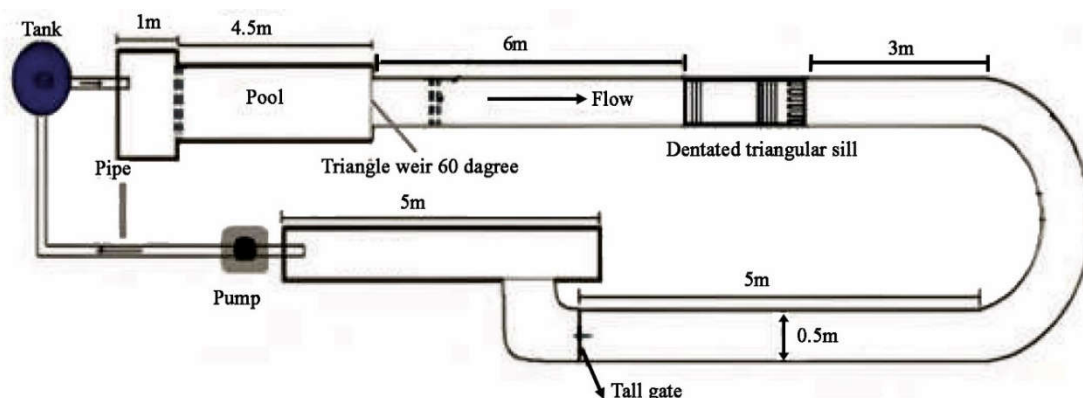
$$f_1\left(\frac{\Delta E}{E_1}, \frac{V^2}{gy}\right) \quad (2)$$

در معادله یادشده،  $V^2/gy$  عدد فرود روی سرریز ( $Fr$ ) و  $\Delta E/E_1$  افت نسبی انرژی در سرریز است.

برای بررسی اثر هندسه دندان‌های در انتهای پرتاب‌کننده جامی و مثلثی در اتلاف انرژی از مدل آزمایشگاهی استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۹ متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. آب مورد نیاز این آزمایش‌ها از طریق مخزن زیرزمینی در فلوم تهیه شد. سیستم چرخش آب در فلوم به صورت مدار بسته بود (شکل ۱). مدل سرریز مثلثی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر، طول ۵۳/۴ سانتی‌متر، شعاع قوس سرریز ۱۶ سانتی‌متر با طول آستانه ۵/۸ سانتی‌متر ساخته شد. دندان‌های استفاده شده در انتهای سرریز طبق استاندارد USBR دارای تعداد ۱۶ دندان‌های با طول ۸ سانتی‌متر،

افزایش داشت (۹). پارسایی و همکاران (۲۰۲۳)، با انجام محاسبات عددی توسط نرم‌افزار Flow-3D به بررسی تخمین اتلاف انرژی در پرتاب‌کننده‌های مثلثی و دوزنقه‌ای با استفاده از مدل GMDH پرداختند. پارامترهای بدون بعد به دست آمده از تحلیل، نسبت بزرگنمایی ( $Mr$ )، عدد فرود ( $Fr$ )، تعداد چرخه ( $Ncy$ ) و هد نسبی بالادست ( $ho/P$ ) به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شدند. بررسی ساختار شبکه GMDH نشان می‌دهد که ( $ho/P$ )، ( $Ncy$ ) و ( $Mr$ ) نقش‌های مهمی در شبکه توسعه ایفا می‌کنند (۱۱). ده‌مرد و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی آبشستگی در پایین دست پرتاب‌کننده پلکانی در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که ابعاد آبشستگی در پایین دست با افزایش عدد فرود و اندازه ذرات رسوبات، کاهش و عمق بحرانی کاهش می‌یابد. با کاهش عدد فرود ذرات، عمق آبشستگی نسبی، فاصله بیشینه عمق آبشستگی و طول نسبی آبشستگی به ترتیب ۶۸/۶ درصد، ۷۵/۶ درصد و ۷۳/۴ درصد کاهش یافت (۲). لورن و همکاران (۲۰۲۳)، در خصوص عبارات صریح پیش‌بینی‌کننده از مدل‌های داده‌محور برای تخمین عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده‌های جامی اسکی استفاده کردند. روش‌های پیشنهادی، معادلات صریح و واضح با کاربردهای ساده برای تخمین عمق آبشستگی بود. برای ارزیابی‌های کمی فرمول‌های توسعه یافته، سه معیار آماری رایج شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (CC) استفاده شد (۱۳).

پژوهش‌های انجام شده نشان‌دهنده اهمیت پرتاب‌کننده‌های جامی و مثلثی به منظور انتقال جریان به پایین دست است. وجود دندان‌های در انتهای پرتاب‌کننده باعث استهلاک بهتر انرژی و کاهش آبشستگی می‌شود که موجب محافظت پایین دست پرتاب‌کننده‌ها و سازه‌های مرتبط می‌شود. همچنین پرتاب‌کننده‌های جامی دندان‌های و مثلثی دندان‌های با توجه به شکل هندسی از نظر میزان اتلاف انرژی جنبشی عملکرد متفاوتی دارند. هدف این پژوهش بررسی و



شکل ۱. نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی

هیدرولیکی ابتدا عمق ثانویه پرش اندازه‌گیری شده، سپس با فرض ثابت بودن مومتم در دو طرف پرش و صرف نظر از افت‌های اصطکاکی، عمق اولیه پرش از رابطه اعماق مزدوج پرش به دست آمد. پس از این مرحله انرژی دو طرف سرریز با اندازه‌گیری عمق و سرعت از رابطه برنولی محاسبه و تلفات انرژی در پرتابه محاسبه شد (۱۴).

#### مدلسازی عددی

Flow-3D یک نرم‌افزار مدل ریاضی با کاربرد وسیع و مناسب برای تحلیل و آنالیز مسائل پیچیده سیالات از جمله جریان‌های سه‌بعدی غیرماندگار با اشکال مختلف هندسی است. نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط Flow-3D، بیشترین تطابق را با نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی دارد. روش استفاده شده در این نرم‌افزار، استفاده از حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی است. در یک شبکه منظم به علت استفاده از روش حجم محدود، شکل معادلات مورد استفاده به صورت گسسته شده، نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود است. در این مطالعه از مدل RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شد. برای حل عددی از Flow-3D استفاده شده و معادلات غیر دائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی شده‌اند. در این نرم‌افزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود به کار رفته است. این الگوریتم

عرض ۲ سانتی‌متر، با فاصله ۱/۲ سانتی‌متر است که به صورت مثلثی در انتهای سرریز مثلثی استفاده شد (شکل ۲). کلیه آزمایش‌ها در این پژوهش در ۵ دبی ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. سپس سنگ‌چین مد نظر با ضخامت 2d50 و هم‌تراز با مصالح بستر در پایین دست سرریز قرار شد (۸). دبی مد نظر توسط سرریز مثلثی ۶۰ درجه در ابتدای ورودی فلوم اندازه‌گیری شد. در ابتدای هر آزمایش، سرریز مد نظر در فاصله شش متری از ابتدای فلوم نصب شد. پس از تنظیم دبی مد نظر، عمق جریان توسط دریچه در پایین دست به آهستگی کاهش داده شد. در انتهای هر آزمایش، پمپ خاموش و دریچه انتهایی بسته شد و آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شد. در کلیه آزمایش‌ها به منظور اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز، پس از تنظیم دبی توسط شیرفلکه، در هر دبی برای جلوگیری از تغییر پروفیل سطح آب، عمق و سرعت جریان یک متر بالادست سرریزها، اندازه‌گیری شد. سپس دریچه پایین دست در انتهای فلوم بسته شد تا عمق آب در پایین دست سرریز افزایش یابد. عمق آب پایین دست تا جایی افزایش می‌یافت که پرش هیدرولیکی بلافاصله پس از محل برخورد جت به کف فلوم تشکیل شود. هدف از ایجاد این پرش، اندازه‌گیری عمق جریان پس از عبور از پرتابه بود. چون جریان بعد از پرتابه فوق بحرانی است، اندازه‌گیری عمق اولیه پرش به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. با تشکیل پرش



شکل ۲. سرریز جامی دندانهای و مثلی دندانهای

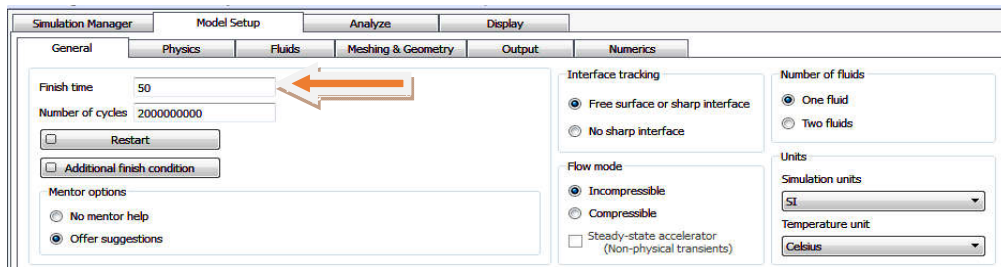
کالیبراسیون مدل آن است که تأثیرات عوامل خارجی کمینه شود تا شرایط مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد. به منظور کالیبراسیون و مدل‌سازی در نرم‌افزار FLOW-3D، نخست باید کلیات مسئله و در ادامه نیز خواص سیال تعیین شوند. بعد از این مراحل نوبت به تولید هندسه مسئله، شبکه‌بندی و بررسی شبکه ایجاد شده می‌رسد. در گام بعد شرایط مرزی تعیین می‌شود. سپس خروجی‌های مورد نیاز تنظیم می‌شود. در انتها، شبیه‌سازی آغاز خواهد شد. در شکل ۳ مراحل انجام مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

مدل عددی Flow-3D یک شبکه ساختاری سه‌بعدی، متشکل از سلول‌های مکعب‌مستطیلی برای میدان مد نظر است که ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Autocad، یک فایل stl مدل سرریز مثلی دندانهای سه‌بعدی منطبق بر مشخصات مدل آزمایشگاهی تهیه شد (شکل ۴). سپس نتایج حاصل به نرم‌افزار Flow-3D

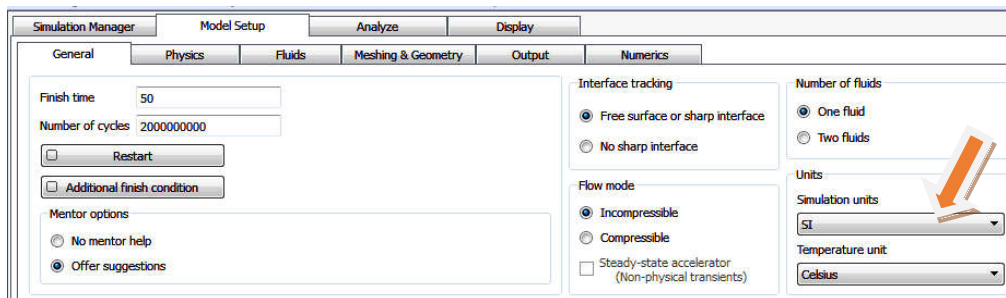
موانع داخل میدان در سلول‌های محاسباتی را به صورت مقدار جزء بین صفر و ۱ در نظر می‌گیرد؛ به طوری که اگر کل سلول توسط مانع پر باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر یک خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود. عبارت‌های سرعت و فشار به صورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت در زمان پیوستگی و مومتمت کوپل می‌شوند. در این نرم‌افزار معادلات شبه‌ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از فن‌های معادلات تخفیف حل می‌شود. در این مطالعه از فن GMRES به عنوان حل‌گر ضمنی فشار استفاده شد (۷).

#### مدل‌سازی سرریز مثلی دندانهای

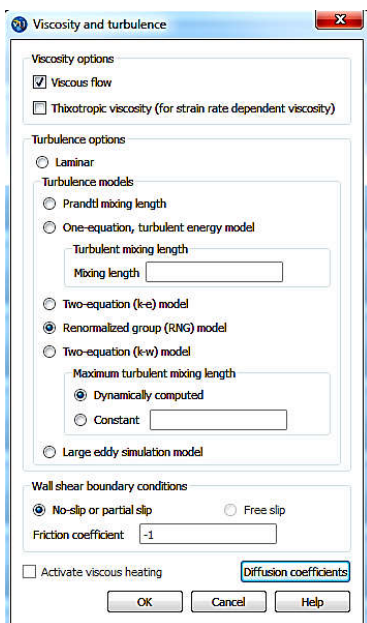
اولین گام در مدل‌سازی عددی، کالیبره کردن مدل است. مقصود از



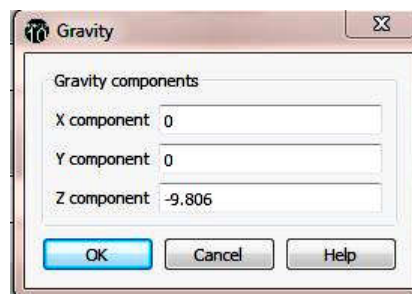
(الف): وارد کردن اطلاعات زمان



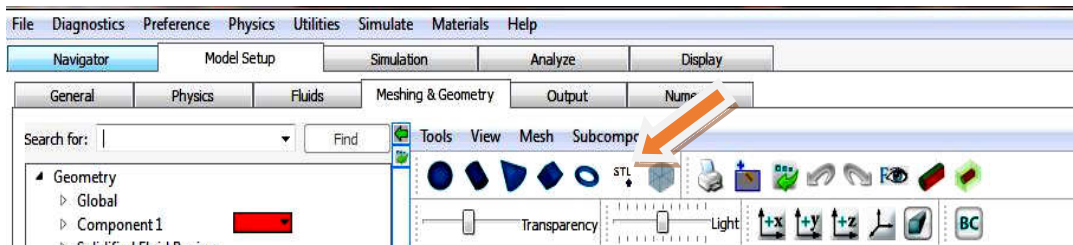
(ب): وارد کردن واحد شبیه‌سازی



(د): تعیین و انتخاب اطلاعات آشفتگی

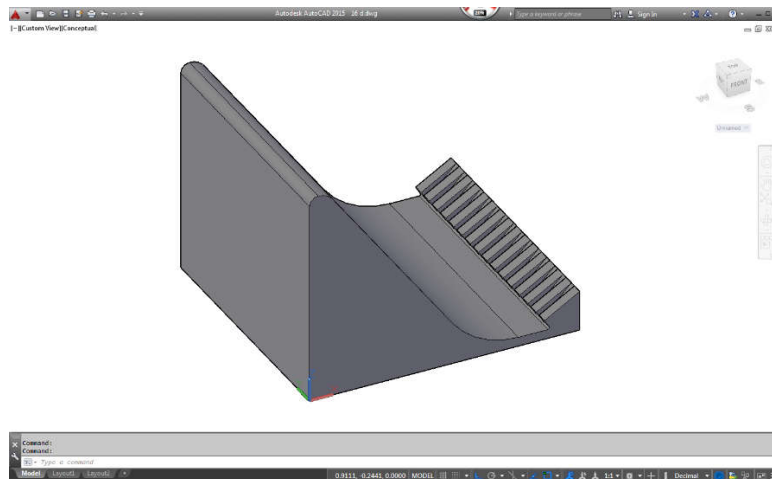


(ج): وارد کردن شتاب ثقل



(ه): وارد کردن اطلاعات فلوم

شکل ۳. مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار FLOW-3D



شکل ۴. ساخت فایل stl سه‌بعدی سرریز مثلثی دندانهای در AutoCad

جلوگیری شود. متوسط زمان برای شبیه‌سازی هر دبی به‌طور متوسط ۲۴ ساعت بود. برای حل معادلات ناویر استوکس از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. شرایط مرزی مطابق شکل ۶ به‌صورت زیر تعریف شد: شرط مرزی بالا: Pressure، شرط مرزی پایین: Wall، شرط مرزی ورودی: Volume Flow Rate و شرط مرزی خروجی: Outflow در نظر گرفته شد. همچنین دیواره جریان در چپ و راست Wall انتخاب شد. از پارامترهای ضریب زبری و مدل آشفتگی برای نزدیکی نتایج مدل‌های فیزیکی و نرم‌افزاری استفاده شد. در ابتدا نتایج آزمایش‌ها در حالت‌های مختلف زبری و آشفتگی با نتایج مدل فیزیکی مقایسه و بررسی شد. نتایج مقایسه مدل‌های آشفتگی نشان داد که نزدیک‌ترین نتایج را مدل آشفتگی RNG داشته است. همچنین تغییرات زبری اثر بسیار ناچیزی در نتایج داشت.

#### نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی سرریز جامی دندانهای و مثلثی دندانهای و عددی

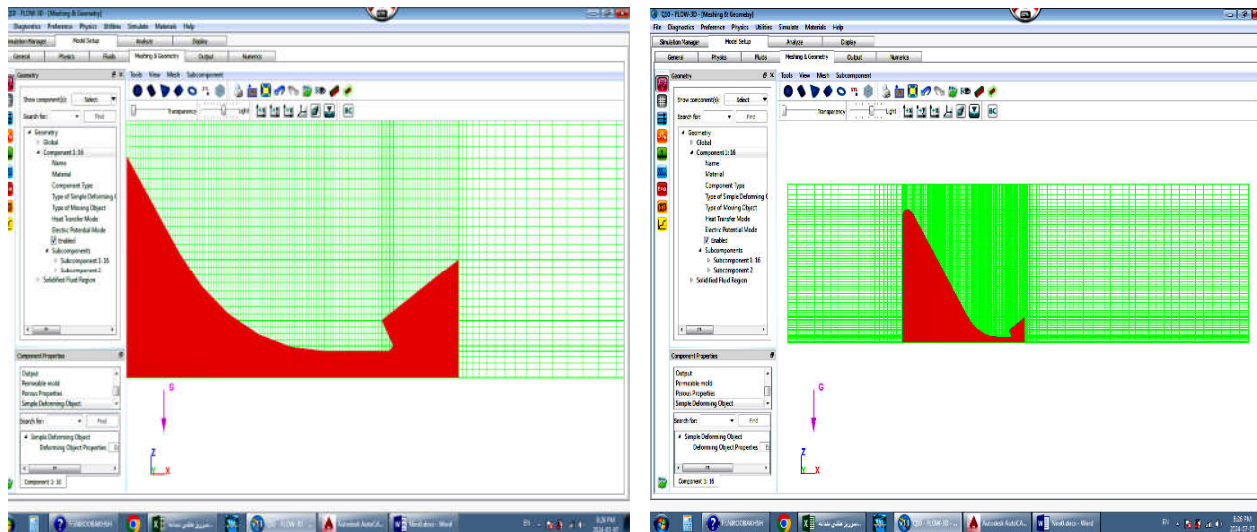
آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی در پنج دبی ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه و در مدل عددی در ۴ دبی ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. سپس میزان اتلاف انرژی در سرریز جامی دندانهای و مثلثی دندانهای محاسبه شد (جدول ۲). در (شکل ۷) الگوی شبیه‌سازی سرعت و فشار جریان در سرریز مثلثی دندانهای در مدل عددی نشان داده شد.

برای تولید شبکه با به‌کارگیری دو ابزار مناسب VOF و FAVOR و تعیین مرزها و شبکه محاسباتی داده شد. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزهای کانال اصلی و فرعی، محدوده مد نظر با استفاده از روش‌های VOF و FAVOR شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکه میدان به‌گونه‌ای تنظیم شد که خطوط شبکه متعامد باشند. برای انجام محاسبات این تحقیق، در قسمت‌هایی از پرتاب‌کننده که برداشت داده انجام شد، اندازه مش‌ها ریزتر و در قسمت‌هایی که برداشت صورت نگرفت، محدوده مش‌بندی درشت‌تر انتخاب شد (شکل ۵). ابعاد مدل فیزیکی، طول کانال برای مدل عددی برابر ۹ متر، عرض کانال ۵۰ سانتی‌متر و بیشترین ارتفاع آن ۵۰ سانتی‌متر بود که مش‌بندی بر این اساس انجام شد. به‌طور میانگین مجموع تعداد مش‌بندی ایجادشده در جهت طول (X) تعداد ۱۲/۷۵۶۸، در جهت عرض (Y) تعداد ۵/۷۵۶۶۳ و در جهت ارتفاع (Z) تعداد ۱۲/۱۳۸۳ برای مدل‌ها است. پس از تولید شبکه محاسباتی، شرط مرزی و شرایط اولیه، شبیه‌سازی جریان آب انجام شد. (جدول ۱).

#### مدل آشفتگی و شرایط مرزی

برای نزدیکی نتایج به مقادیر آزمایشگاهی، در این پژوهش شبکه میدان به‌صورت یکنواخت و ابعاد شبکه تا حدی ریز در نظر گرفته شد تا از طولانی‌شدن زمان انجام محاسبات





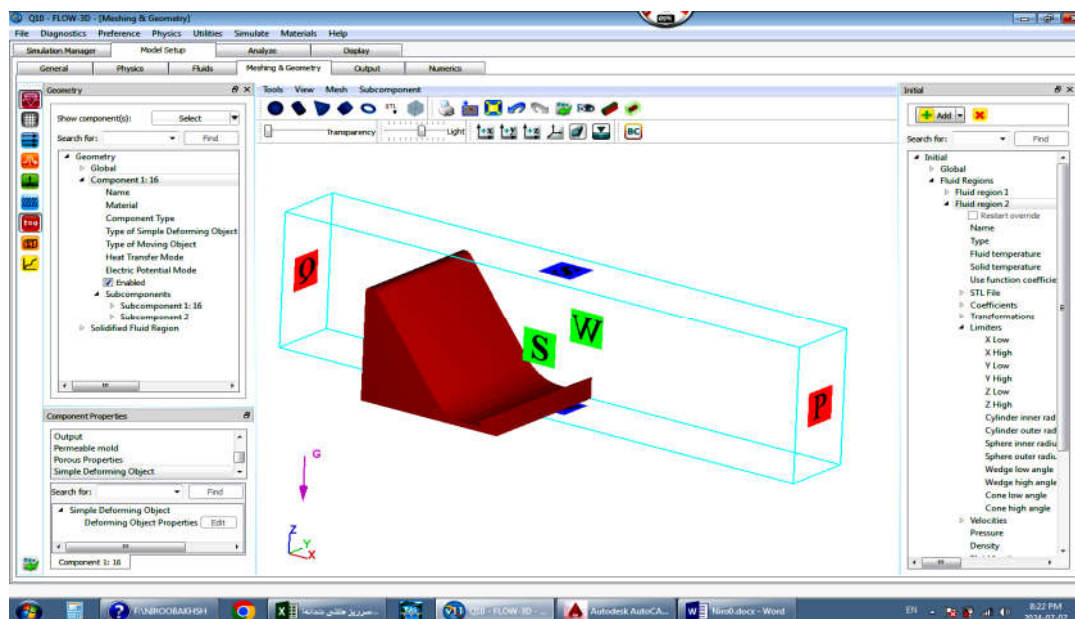
تراکم بیشتر مش‌ها در محدوده‌های تأثیر گذارتر

تراکم مش‌ها

شکل ۵. مش‌بندی سرریز مثلی دندانه‌ای در مدل Flow-3D

جدول ۱. اطلاعات مش‌بندی سرریز مثلی دندانه‌ای

Maximum Adjacent Cell Size Ratio	Maximum Cell Size	Minimum Cell Size	Total Number of Real Cells	Block	Subject	No.
۱/۷۳۰۲۵	۰/۰۴۱۲۷۰۲	۰/۰۰۱۶۹۹۹۸	۲۸۵	۱	X	
۱/۰۹۲۳۱	۰/۰۰۳۵۷۱۴۳	۰/۰۰۲۹۹۹۹۹	۷۸	۱	Y	۱
۱/۲۱۲۹۵	۰/۰۱۷۲۶۹۸	۰/۰۰۰۳۴	۶۸	۱	Z	

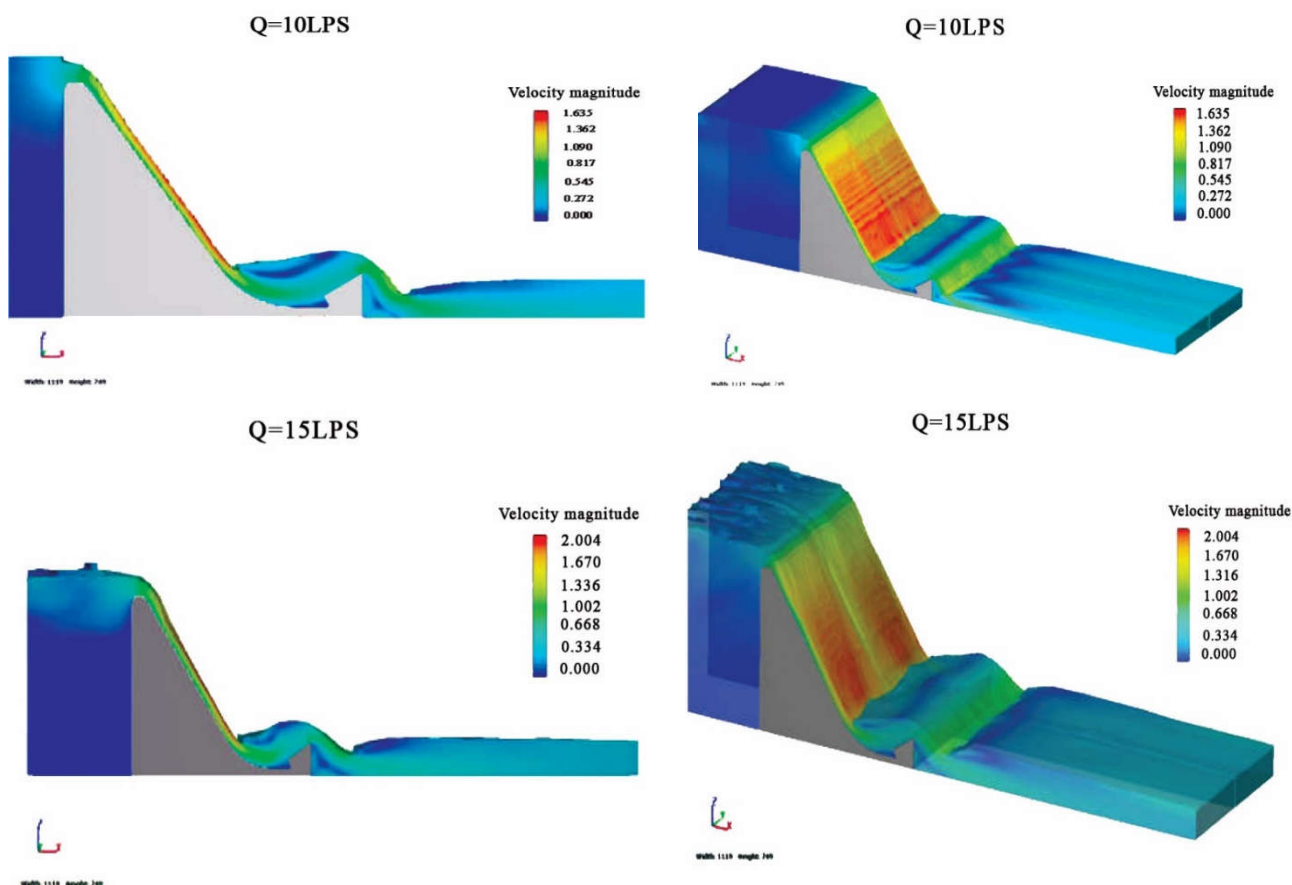


شکل ۶. شرایط مرزی ایجادشده سرریز مثلی دندانه‌ای



جدول ۲. آزمایش‌های هیدرولیکی سرریز جامی دندانهای و مثلثی دندانهای در شرایط آزمایشگاهی و محاسبات عددی

( $\Delta E$ )/E. (%)	E. - E1 (M)	E1 (M)	V1 (M/S)	E. (M)	V. (M/S)	Fr	V (M/S)	y2(cm)	y1(cm)	FR2	V2 (M/S)	H (cm)	h. (cm)	Q (l/s)	نوع سرریز
۷۵	۰/۳۱۸	۰/۱۰۸	۱/۳۸	۰/۴۲	۰/۰۳۳	۴/۳	۱/۳۷	۵/۸	۱/۱	۰/۳۵	۱/۱	۲/۶	۴۲/۶	۷	جامی دندانهای آزمایش‌های فیزیکی
۷۴	۰/۳۳۰	۰/۱۱۱	۱/۴	۰/۴۳	۰/۰۳۷	۴/۴	۱/۵۱	۶/۲	۱/۱۵	۰/۳۶	۰/۲۷	۳/۱	۴۳/۱	۸	
۷۲	۰/۳۱۴	۰/۱۲۰	۱/۴۴	۰/۴۳	۰/۰۴۶	۴/۵	۱/۶۵	۷	۱/۳۵	۰/۳۷	۰/۳	۳/۳	۴۳/۳	۱۰	
۶۹	۰/۳۰۱	۰/۱۳۵	۱/۵۳	۰/۴۴	۰/۰۵۵	۴/۸	۱/۷۸	۷/۹	۱/۵۲	۰/۳۸	۰/۳۲	۲/۶	۴۳/۶	۱۲	
۶۷	۰/۲۹۵	۰/۱۴۵	۱/۵۷	۰/۴۴	۰/۰۶۸	۵/۵	۲/۱۳	۸/۸	۱/۹۹	۰/۳۹	۰/۳۵	۴	۴۴	۱۵	
۷۸	۰/۳۳	۰/۰۹۳	۱/۲۷	۰/۴۲	۰/۰۳۳	۴/۳	۱/۳۷	۵/۵	۱/۱	۰/۳۵	۱/۱	۲/۶	۴۲/۶	۷	مثلثی دندانهای آزمایش‌های فیزیکی
۷۷	۰/۳۳	۰/۰۹۷	۱/۲۹	۰/۴۳	۰/۰۳۷	۴/۴	۱/۵۱	۵/۹	۱/۲۴	۰/۳۶	۰/۲۷	۳/۱	۴۳/۱	۸	
۷۵	۰/۳۳	۰/۱۰۷	۱/۳۵	۰/۴۳	۰/۰۴۶	۴/۵	۱/۶۵	۶/۷	۱/۴۹	۰/۳۷	۰/۳	۳/۳	۴۳/۳	۱۰	
۷۴	۰/۳۲	۰/۱۱۵	۱/۳۸	۰/۴۴	۰/۰۵۵	۴/۸	۱/۷۸	۷/۴	۱/۷۴	۰/۳۸	۰/۳۲	۳/۶	۴۳/۶	۱۲	
۷۰	۰/۳۱	۰/۱۳	۱/۴۷	۰/۴۴	۰/۰۶۸	۵/۵	۲/۱۳	۸/۵	۲/۰۵	۰/۳۹	۰/۳۵	۴	۴۴	۱۵	
۹۰	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۰۴۱	۴/۵	۱/۶۱	۹/۱	۳/۴	۰/۳۷	۰/۲۸	۳/۹	۴۵/۷	۸	مثلثی دندانهای flow-3d اجراشده اصلی
۸۹	۰/۴۱	۰/۰۵۲	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۰۴۳	۴/۶	۱/۶۵	۹/۵	۳/۶	۰/۳۹	۰/۳۱	۴/۱۴	۴۶/۲	۱۰	
۸۶	۰/۴۱	۰/۰۵۸	۰/۶	۰/۴۷	۰/۰۵۵	۴/۹	۱/۹۳	۷/۲	۳/۹	۰/۴	۰/۳۴	۴/۱۷	۴۶/۵	۱۲	
۸۵	۰/۴	۰/۰۶۱	۰/۶۱	۰/۴۸	۰/۰۶۶	۵/۶	۲/۱۵	۸/۳	۴/۳	۰/۴۱	۰/۳۷	۴/۶	۴۷/۱	۱۵	



شکل ۷. الگوی شبیه‌سازی سرعت و فشار جریان در سرریز مثلثی دندانه‌ای

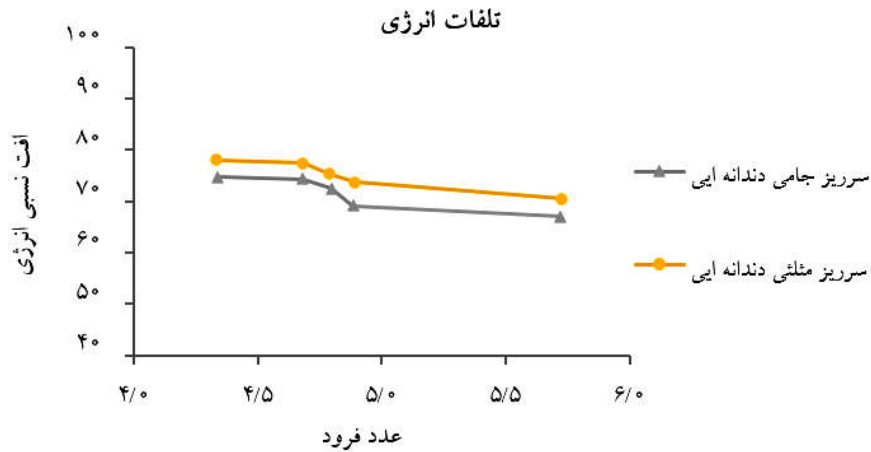
اطلاعات به روش محاسبات عددی در نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد. نتایج تحلیل نشان داد که میزان اتلاف انرژی در سرریز مثلثی دندانه‌ای در محاسبات عددی ۸۷/۵ درصد بود که نشان‌دهنده همسوی بودن و صحت آزمایش‌های انجام‌شده با شرایط آزمایشگاهی است (شکل ۹).

#### مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر

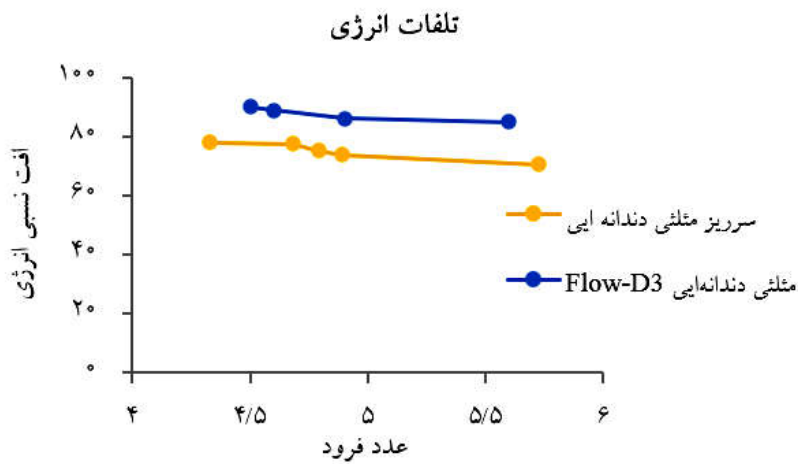
شکل ۱۰ مقایسه نتایج تلفات انرژی بر اساس عدد فرود، با نتایج پژوهش‌های دیگر مانند استینر و همکاران (۲۰۰۸)، امیدواری نیا و موسوی (۲۰۱۴) نشان داد، با افزایش عدد فرود سرعت جریان بیشتر شده و افت نسبی انرژی جریان کاهش می‌یابد. نتایج نمودار شکل ۱۰ نشان داد تلفات انرژی این پژوهش با نتایج پژوهش سایر پژوهشگران در شرایط آزمایشگاهی و عددی همسو و در یک راستاست (۱۴ و ۱۰).

نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی در سرریزهای جامی دندانه‌ای و مثلثی دندانه‌ای نشان داد، با افزایش عدد فرود در سرریز، افت انرژی کاهش می‌یابد. وجود دندانه در قسمت انتهایی سرریزهای جامی و مثلثی باعث شکسته و فشرده‌شدن بیشتر خطوط جریان عبوری و به تبع آن افزایش سرعت در لحظه پرتاب و در نهایت موجب اتلاف نسبی انرژی بیشتر می‌شود. متوسط میزان اتلاف انرژی در سرریز جامی دندانه‌ای ۷۱/۴ و مثلثی دندانه‌ای در شرایط آزمایشگاهی ۷۴/۸ درصد به‌دست آمد که نشان داد سرریز مثلثی دندانه‌ای در زمینه اتلاف انرژی به دلیل شکل هندسی مناسب، عملکرد بهتری نسبت به سرریز جامی دندانه‌ای دارد (شکل ۸).

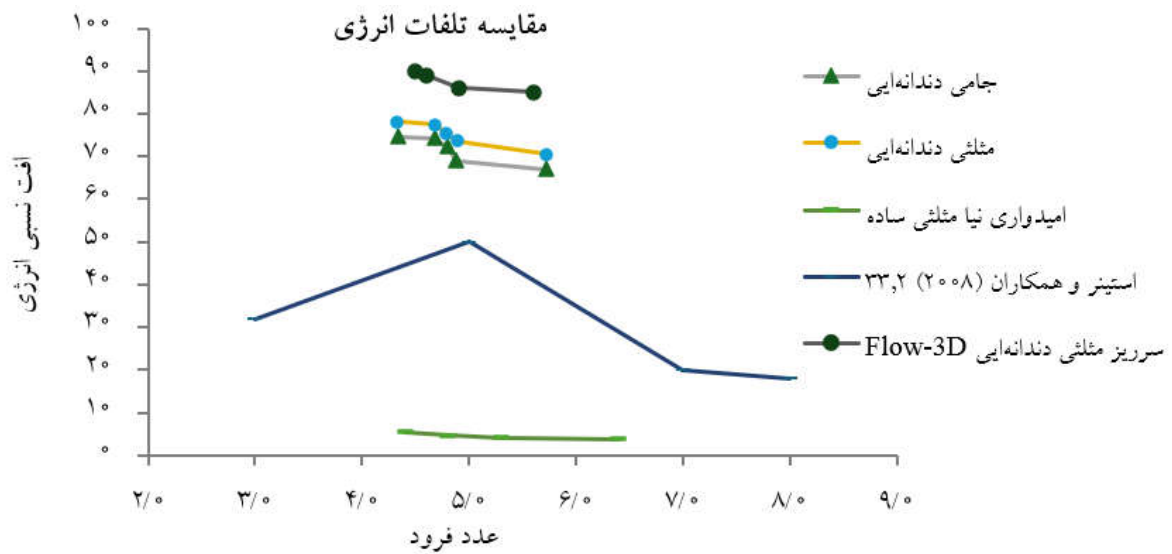
پس از تحلیل و آنالیز داده‌های آزمایشگاهی و تعیین عملکرد بهتر سرریز مثلثی دندانه‌ای در اتلاف انرژی، به شبیه‌سازی عددی سرریز مثلثی دندانه‌ای و بررسی و تحلیل



شکل ۸. تلفات نسبی انرژی در سرریز جامی دندان‌های ایبی و مثلثی دندان‌های ایبی



شکل ۹. نمودار اتلاف انرژی در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی



شکل ۱۰. مقایسه افت انرژی در پژوهش حاضر با نتایج پژوهشگران دیگر در شرایط آزمایشگاهی و عددی

## نتیجه گیری نهایی

انجام شده، میزان افت انرژی در سرریز مثلثی دندانهای در چهار دبی ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه با انجام محاسبات عددی توسط نرم افزار Flow-3D انجام شد. میزان اتلاف انرژی در سرریز مثلثی دندانهای توسط نرم افزار Flow-3D، با انجام محاسبات عددی ۸۷/۵ درصد به دست آمد. نتایج آزمایش نشان داد وجود دندان در انتهای سرریز جامی و مثلثی، عامل مهم و تأثیرگذاری در میزان اتلاف انرژی جریان عبوری در پایین دست سرریز است که می تواند نقش مهمی در محافظت سازه های مرتبط و کاهش فرسایش بستر پایین دست داشته باشد.

در این مطالعه به بررسی میزان افت انرژی در شرایط آزمایشگاهی در سرریزهای جامی دندانهای و مثلثی دندانهای در پنج دبی ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه پرداخته شد. بررسی اطلاعات محاسبه شده نشان داد، متوسط میزان اتلاف انرژی در حالت آزمایشگاهی در سرریز جامی دندانهای ۷۱/۴ و مثلثی دندانهای ۷۴/۸ درصد به دست آمد که نشان داد، سرریز مثلثی دندانهای در زمینه اتلاف انرژی به دلیل شکل هندسی مناسب عملکرد بهتری نسبت به سرریز جامی دندانهای دارد. همچنین به منظور مقایسه و صحت آزمایش های

## منابع مورد استفاده

- Bhavan, M. and B. Shahzafar Marge. 2010. Bureau of indian standards Central for hydraulic design of bucket type energy dissipators (Second Revision ed.). Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- Dah-Mardeh, A., G. Azizyan, M.S. Bejestan, A. Parsaie, and S.H. Rajae. 2023. Laboratory investigation of scour downstream of the Stepped spillway. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03587-w>.
- Eskandari, A., M. Heidarnejad, A. Masjedi, M. Purmohammadi, and A. Kamanbedast. 2020. Experimental investigation on the effect of different dentate shapes and configurations on scour dimension downstream of flip buckets. *Water SA*. 46(3): 458–464. 10.17159/wsa/2020.v46.i3.8656. ISSN 1816-7950.
- Ghanbari, R. and M. Heidarnejad. 2020. Experimental and numerical analysis of flow hydraulics in triangular and rectangular piano key weirs. *Water Science* 34(1): 32-38. DOI: 10.1080/11104929.2020.1724649.
- Gharibvand, R., M. Heidarnejad, H. A. Kashkoli, H. Hasounizadeh, and A. A. Kamanbedast. 2020. Numerical analysis of flow hydraulic in trapezoidal labyrinths and piano key weirs. *Journal of Water and Soil Science* 24(1): 45-56 (in Farsi). <https://sid.ir/paper/364629/fa>.
- Magela, P. G. 2020. Spillway design - step by step (1st ed.). CRC Press. doi:10.1201/9780367816902.
- Marusi, M., R. Roshan, and H. Sarkardeh. 2014. Flow 3D design and analysis, Translation. Fadak Isatis Publications, Iran.
- Melville, B.W., S. Van Ballegoov, S.E. Coleman, and B. Barkdoll. 2007. Riprap size selectin at wing-wall abutments. *ASCE. Journal of Hydraulic Engineering* 133(11): 1265-1269.
- Niroubakhsh, M., A. Masjedi, M. Heidarnejad, and A. Bordbar. 2023. Investigation of riprap stability at downstream of spillway flip bucket without and with energy dissipators. *Water science* 38(1): 65–76. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2300210>.
- Omidvarinia, M. and S.H. Mousavi Jahromi. 2014. Comparison of energy losses in circular and triangular cup launchers. *Scientific Journal of Agriculture* 37(1): 133-142 (in Farsi).
- Parsaie, A., S. Dehdar-Behbahani, A. Anil Chadee and AH. Haghghiabi. 2023. Estimating the energy dissipation of flow passing over triangular and trapezoidal plan weirs using the GMDH model. *Water Practice and Technology* 18(5): 1115-1124. doi: 10.2166/wpt.2023.073.
- Ran, Y.B., C. Liu, J. Deng, W.R. Wei, and Q. Long. 2023. Numerical simulation study on spread angle in oblique cut flip bucket. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 17(1): 2236673.
- Shafagh Loron, R., M. Samadi, and A. Shamsai. 2023. Predictive explicit expressions from data-driven models for estimation of scour depth below ski-jump bucket spillways. *Water Supply* 23 (1): 304–316.
- Steiner, R., V. Heler, W.H. Hager, and H.E. Minor. 2008. Deflector Ski Jump Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(5): 571-562.
- Vatandoust, H., H. Yarmohammadi, and M. Kavianpour. 2021. Investigation of supercritical flow and shape of flip bucket spillways on coefficients of dynamic pressure. *Journal of Energy Resources Technology* 143(6): 061301.
- Zhou, M., J. Zhang, W. Xu and X. Li. 2022. Hydraulics of Wedge-shaped Flip Bucket to Investigate Flow Pattern with Retracted Bottom Plate. *KSCE Journal of Civil Engineering* 26(11): 4552-4562.

## Investigating the Energy Loss in the Dentated Flip Bucket and Dentated Triangular Sill Spillways in Laboratory and Numerical Conditions

M. Niroubakhsh, A. Masjedi\*, M. Heidarnejad and A. Bordbar<sup>1</sup>

(Received: August 20-2024 ; Accepted: October 12-2024)

### Abstract

The application of flip bucket and triangular launchers with different shapes has been given more attention due to safety and better energy consumption to protect the downstream bed of water structures, as well as economic benefits compared to other energy consumers. The objective of this research was to investigate the energy loss of the passing flow in the dentated flip bucket and dentated triangular sill spillways in laboratory and numerical conditions. Physical and numerical modeling was used in a rectangular flume with a length of 9 meters, a width of 0.5 meters, and a height of 0.5 meters, flip bucket, and triangular spillways with dentated with specific dimensions according to the USBR standard in different discharges intensities in laboratory and numerical conditions. The amount of energy loss in the dentated flip bucket spillway was 71.4% and the dentated triangular sill spillway was 74.8% in laboratory conditions, which showed that the dentated triangular sill spillway has a better performance in terms of energy loss than the flip bucket and triangular spillway. The results showed that the shape of the spillway geometry and the presence of the dentated at the end of the structure is an important and influential factor in the amount of energy loss of the currents passing through the dentated flip bucket and dentated triangular sill spillways, which causes more broken and compressed flow lines and, as a result, an increase in speed at the moment. The launch and finally the relative loss of energy is more downstream of the structure. After determining the better performance of the dentated triangular sill spillway in energy loss, the numerical simulation of the dentated triangular sill spillway was performed using the numerical calculation method in Flow-3D software. The results of the analyses indicated that the amount of energy loss in the dentated triangular sill spillway in the numerical calculations was 87.5%, which showed the alignment and correctness of the tests performed with the laboratory conditions.

**Keywords:** Froud number, Energy loss, Dentated flip bucket, Dentated triangular sill, Flow-3D software

---

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

\*: Corresponding author, Email: drmasjedi.2007@yahoo.com