



بررسی عددی روند استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از روش حجم محدود

مجید پاسبانی خیایو^{۱*}، مرتضی علی قربانی^۲، میلاد یوسفی^۳

تاریخ ارسال ۱۳۹۸/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴

مقاله پژوهشی

چکیده

هدف این مقاله، بررسی استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی به روش عددی توسط نرم افزار ANSYS CFX می باشد. برای گسسته سازی معادلات از روش حجم محدود مبتنی بر المان و جهت کوپل کردن ترم های سرعت و فشار، الگوریتم تکراری SIMPLE به کار گرفته شده و میدان حل جریان تا رسیدن باقیمانده ها به مقدار 10^{-5} ادامه یافته است. برای ارزیابی آشفته گی از مدل $k-\epsilon$ RNG با بهره گیری از قابلیت نرم افزار CFX جهت مدل سازی اختلاط دو فاز آب- هوا و سطح آزاد جریان به نام Free Surface استفاده شده است. برای انجام صحت سنجی و نشان دادن قابلیت نرم افزار، در ابتدا یک سرریز لبه پهن مدل شده و نتایج مدل حل با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. سپس دو مدل سرریز پلکانی با آستانه ورودی سرریز اوجی و لبه پهن انتخاب شده و تحلیل به ازای دبی های مختلف انجام گرفته است. با توجه به نتایج و بررسی روند استهلاك انرژی در سرریزهای لبه پهن و پلکانی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، می توان دریافت که روش عددی هم مانند روش آزمایشگاهی توانایی ارائه نتایج قابل قبول در آنالیز میدان جریان در انواع سرریز پلکانی را دارا می باشد و از نتایج آنها می توان برای پیش بینی رفتار جریان برای شرایط مختلف استفاده کرد. نتایج حاصل از مدل عددی ارائه شده، بازدهی و قابلیت مناسب سرریزهای پلکانی را در استهلاك انرژی نشان داد. برای مدل با آستانه سرریز لبه پهن از ۵۵ تا ۸۰ اوجی میزان استهلاك برای دامنه دبی انتخاب شده از ۸۰ تا ۹۰ درصد و برای مدل با آستانه سرریز لبه پهن از ۵۵ تا ۸۰ درصد به دست آمد.

واژه های کلیدی: افت انرژی، سرریز پلکانی، سرریز لبه پهن، ANSYS CFX

۱. دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، pasbani@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، gorbani@uma.ac.ir

۳. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران - سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، yousefi.milad13@gmail.com

مقدمه

محدود و اجزای محدود مقایسه کردند. مقایسه نتایج، دقت خوب روش حجم محدود را نشان داد. پارسایی (۲۰۱۶) مدل جریان غیر ریزشی را بر روی سرریز پلکانی با استفاده از روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره بررسی کرد. روشنگر و همکاران (۲۰۱۷) استهلاک انرژی در جریان ریزشی سرریز پلکانی را با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و عصبی- فازی بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که عمق بحرانی، تعداد و ارتفاع پله پارامترهای مهمی در استهلاک انرژی در این‌گونه سرریزها هستند. سلماسی و صمدی (۲۰۱۸) روند استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را با مدل آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را باهم مقایسه کردند. قادری و همکاران (۲۰۲۰) نیز با مدل آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی را با توجه به نرخ جریان و عدد فرود مطالعه کردند. دانش‌فراز و همکاران (۲۰۲۰-a) اثرات انقباض ناگهانی را در استهلاک انرژی مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش انقباض، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. در ادامه دانش‌فراز و همکاران (۲۰۲۰-b) اثرات بلوک‌های زبر را بر سرریز اوجی با پرتابه جامی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج حاصل از مطالعه، قابلیت مناسب روش عددی استفاده شده را در مدل‌سازی سطح آزاد جریان در سرریزهای اوجی نشان داد.

با توجه به اهمیت استهلاک انرژی در سرریزها، در این مقاله به قابلیت نرم‌افزار Ansys CFX و روش VOF در روند استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی پرداخته می‌شود. برای این منظور در ابتدا یک مدل سرریز لبه‌پهن تحلیل می‌شود تا قابلیت و دقت نرم‌افزار بررسی شود و در ادامه دو مدل سرریز پلکانی با آستانه ورودی سرریز اوجی و لبه‌پهن مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته و وضعیت استهلاک انرژی برای دبی‌های مختلف ارزیابی می‌شود.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی مشخصه‌های آشفتگی جریان از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده شده است. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل اغتشاشی جهت

سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به دلیل نقش مهم‌شان در افزایش نرخ استهلاک انرژی و با توسعه مصالح ساختمانی جدید در قرن حاضر بیش از پیش مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. پله‌ها با افزایش شدت استهلاک در سطح سرریز، هزینه ساخت تاسیسات کاهش‌دهنده انرژی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند.

جریان بر روی سرریزهای پلکانی بسته به میزان دبی عبوری از روی بدنه و هندسه‌ی پله‌ها در سه دسته جریان ریزشی، انتقالی و لغزشی قرار می‌گیرند. برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای پلکانی، محققان روش‌های مختلفی را برای گسسته‌سازی معادلات توسعه داده‌اند.

چن و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از روش حجم محدود جریان عبوری از روی سرریز پلکانی را آنالیز کرده و از مدل $k-\epsilon$ به منظور تعیین آشفتگی جریان استفاده نمودند.

چتیلا و تابارا (۲۰۰۴) سرریز اوجی را با استفاده از روش اجزای محدود آنالیز نمودند و از مدل $k-\epsilon$ به منظور تعیین آشفتگی جریان استفاده کردند. در ادامه تابارا و همکاران (۲۰۰۵) سرریز پلکانی را با استفاده از روش اجزای محدود آنالیز نمودند و از مدل $k-\epsilon$ به منظور تعیین آشفتگی جریان در سرریزهای پلکانی بهره بردند. آنها برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریز پلکانی و سرریز اوجی از شرایط مرزی سرعت ورودی و برای شرایط مرزی اولیه از یک پروفیل جریان بر روی سرریز پلکانی یا سرریز اوجی استفاده کرده‌اند. به اعتقاد چتیلا و تابارا، شرایط مرزی اولیه که به صورت پروفیل جریان روی سرریز پلکانی و اوجی استفاده می‌شود، زمان اجرای برنامه را کاهش داده و به حل میدان جریان در زمان کمتر کمک می‌کند. در تحقیقات مذکور از نرم افزار ADINA و از روش اجزای محدود استفاده شده است.

دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۴) جریان را روی سرریز اوجی و پلکانی مدل کرده و نتایج را با روش‌های حجم



به دست آمده از رابطه (۲) کوچک تر و از (۳) بزرگ تر باشد، جریان انتقالی را نشان می‌دهد.

بوئس و هگر (۲۰۰۳) رابطه (۴) را برای تعیین نوع و مرز جریان در سرریزهای پلکانی در تحقیق خود ارائه دادند.

$$\frac{y_c}{h} = 0.91 - 0.41 \tan \alpha \quad (4)$$

در صورتی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\frac{y_c}{h}$ (۴) از رابطه (۴) بزرگ تر باشد جریان لغزشی و اگر این رابطه برقرار نبود جریان ریزشی خواهد بود.

چیناراسی و ونگوایز (۲۰۰۶) برای تعیین نوع جریان در سرریز پلکانی با پله‌های شیب‌دار رابطه (۵) و (۶) را ارائه نمودند که رابطه (۵) کمترین مقدار عمق بحرانی برای تشکیل جریان پیوسته و رابطه (۶) بیشترین عمق بحرانی برای تشکیل جریان ریزشی را در سرریزهای پلکانی ساده و شیب‌دار ارائه می‌دهد.

(۵)

$$\frac{y_c}{h} = (0.844 + 0.003\theta) \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.153+0.004\theta}$$

$$\frac{y_c}{h} = (0.927 + 0.005\theta) \left(\frac{h}{l}\right) \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، θ شیب کف پله می‌باشد که می‌توان در سرریزهای پلکانی لبه‌دار آن را با رابطه (۷) جایگزین نمود.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{m}{l} \quad (7)$$

برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریز پلکانی از روابط آزمایشگاهی ارائه شده توسط محققین مختلف استفاده می‌شود. چانسون محاسبه افت انرژی نسبی برای جریان ریزشی در سرریز پلکانی را به صورت رابطه (۸) بیان کرده است که در آن H_{Dam} ارتفاع کل سرریز و برابر حاصل ضرب تعداد پله ها (N) در ارتفاع پله (h) بوده، E_I انرژی کل در بالادست سرریز و E_L انرژی مستهلک شده می‌باشد.

$$\frac{E_L}{E_I} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_{Dam}}{y_c}} \quad (8)$$

برای بررسی استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی، چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۴) رابطه (۹) را ارائه نمودند که در آن سرریز پلکانی با طول افقی l برای هر

شبیه‌سازی سرریز پلکانی، سه مدل $K - \epsilon$ ، $RNG K - \epsilon$ و مدل تنش‌های رینولدز باهم مقایسه شده و پس از بررسی نتایج آنها، مدل آشفتگی $RNG K - \epsilon$ به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب گردید. این مدل آشفتگی قابلیت بالاتری را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی گردابه‌های بازچرخشی در گوشه‌ی پله‌های سرریز از خود نشان داد. مدل $RNG K - \epsilon$ نسبت به مدل $K - \epsilon$ اصلاح شده دارای برتری بوده و قابلیت آن در شبیه‌سازی جریان‌هایی که دچار جدایی و چرخش هستند، بیشتر می‌باشد.

معادلات حاکم بر جریان در سرریزهای پلکانی

ابتدا به معرفی روابطی که محققان مختلف برای تشخیص نوع جریان در سرریزهای پلکانی به صورت آزمایشگاهی ارائه نموده اند پرداخته می‌شود. چانسون (۱۹۹۴) رابطه (۱) را برای تعیین نوع جریان ارائه نمود.

$$\frac{y_c}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (1)$$

در رابطه (۱) y_c عمق بحرانی مورد نیاز برای جریان غیر ریزشی، h ارتفاع پله و l طول پله می‌باشد.

در صورتی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\left(\frac{y_c}{h}\right)$ از مقدار به دست آمده از رابطه (۱) بزرگ تر باشد جریان لغزشی و اگر نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\left(\frac{y_c}{h}\right)$ از رابطه (۱) کوچک تر باشد، جریان ریزشی خواهد بود.

در ادامه چانسون (۲۰۰۱) آزمایش‌هایی در مورد سرریز پلکانی انجام داد و نتایج کار خود را برای تشخیص نوع جریان در سرریزهای پلکانی در محدوده $0.05 \leq \tan \alpha \leq 1.7$ به صورت دو رابطه (۲) و (۳) ارائه نمود که در آنها، α شیب سرریز و y_c عمق بحرانی مورد نیاز برای تغییر نوع جریان می‌باشد.

$$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \tan \alpha \quad (2)$$

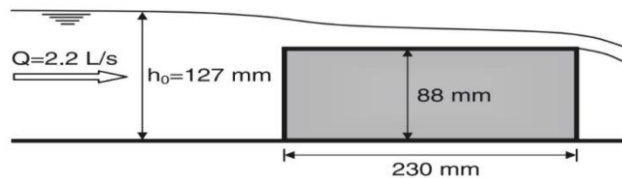
$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \tan \alpha \quad (3)$$

اگر نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\left(\frac{y_c}{h}\right)$ از مقدار

می‌شوند که توسط یک روش جبری حل خواهند شد.

مدل سرریز لبه پهن مستطیلی

در مرحله اول برای انجام صحت‌سنجی و نشان دادن قابلیت نرم‌افزار و حل عددی استفاده شده، یک سرریز لبه پهن مورد ارزیابی قرار گرفته است. سرریزهای لبه پهن به دلیل حساسیت کم به استغراق، هندسه ساده و هزینه ساخت پایین برای کاربرد زیاد در سیستم آبیاری هستند. هندسه این نوع سرریزها می‌تواند شرایط جریان و ظرفیت دبی را تحت تاثیر قرار دهد. دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۹) رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها را با استفاده از مدل عددی مطالعه کرده و تاثیر شیب تاج سرریز را بر موقعیت عمق بحرانی بررسی کردند. مدل سرریز لبه پهن شبیه‌سازی شده، مشابه کار آزمایشگاهی کیرکگوز و همکاران (۲۰۰۸) می‌باشد. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۲/۴ متر و عرض و ارتفاع ۰/۲ متر انجام شده است. طول سرریز ۰/۲۳ متر و ارتفاع آن ۰/۰۸۸ متر بوده و سرریز در فاصله یک متری از بالادست کانال مطابق شکل (۱) قرار گرفته است. دبی ورودی در طول آزمایش ثابت و برابر ۲/۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد. بعد از برداشت نتایج آزمایشگاهی، مدل بار دیگر به وسیله نرم‌افزار و به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ردیابی سطح آزاد جریان به کمک مدل VOF صورت گرفته و از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استفاده شده است.



شکل (۱): جزئیات هندسی سرریز لبه پهن مستطیلی آزمایش Kirkgoz et al., (2008)

یافتن تعداد بهینه شبکه (الگوهای متفاوتی آزمایش شده و مشخصات بهترین شبکه‌ای که انتخاب شده، در جدول ۱ ارائه شده است.

پله، تعداد کل N پله و ضریب افت انرژی α برای هر پله فرض شده است.

$$\frac{E_L}{E_1} = 1 - \frac{\{(1-\alpha)^N [1 + 1.5(\frac{y_c}{h})] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i\}}{N + 1.5(\frac{y_c}{h})} \quad (9)$$

چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۹) رابطه (۱۰) را برای محاسبه α ارائه نمودند.

$$\begin{cases} \alpha = a - b \times \log \left(\frac{y_c}{h} \right) \\ a = 0.3 - 0.35 \times \left(\frac{h}{l} \right) \\ b = 0.54 + 0.27 \left(\frac{S}{l} \right) \end{cases} \quad (10)$$

مدل‌سازی

در این پژوهش حل عددی و تحلیل توسط دینامیک سیالات محاسباتی با نرم‌افزار ANSYS CFX انجام شد.

روش بکار رفته برای دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار ANSYS CFX روش حجم محدود می‌باشد. در این روش ابتدا ناحیه سیال توسط تعدادی حجم از یکدیگر جدا می‌شوند و سپس معادلات دیفرانسیلی بقایی توسط انتگرال‌گیری در این احجام گسسته خواهد شد. بنابراین معادلات از حالت پیوسته به یک سری ترم‌های جبری خطی یا غیرخطی تبدیل

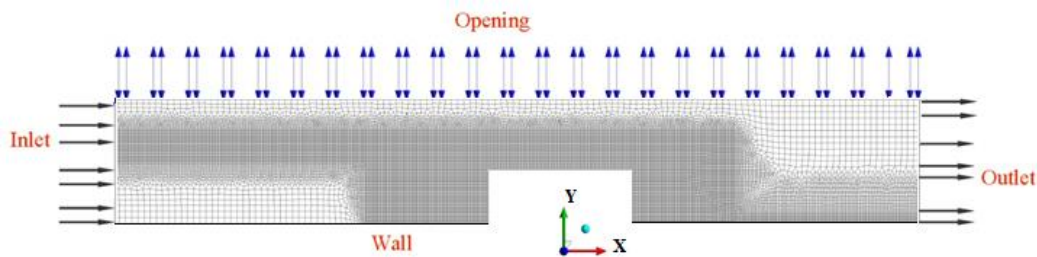
جهت مدل‌سازی مطابق با کار آزمایشگاهی صورت گرفته، ابتدا هندسه مورد نظر با ابعاد کاملاً منطبق با آزمایشگاه در محیط Geometry رسم شده است. سپس برای شبکه‌بندی مدل و جهت استقلال شبکه

جدو(۱): مشخصات بهترین شبکه در مدل سازی سرریز لبه پهن

تعداد سلول ها	تعداد گره	مدل
۸۸۰۴۶	۱۳۳۵۶۴	سرریز لبه پهن مستطیلی

است. شرایط مرزی به صورتی که در بخش قبل توضیح داده شد، اعمال شده است. در شکل (۲) شبکه بندی مدل و شرایط مرزی نشان داده شده است.

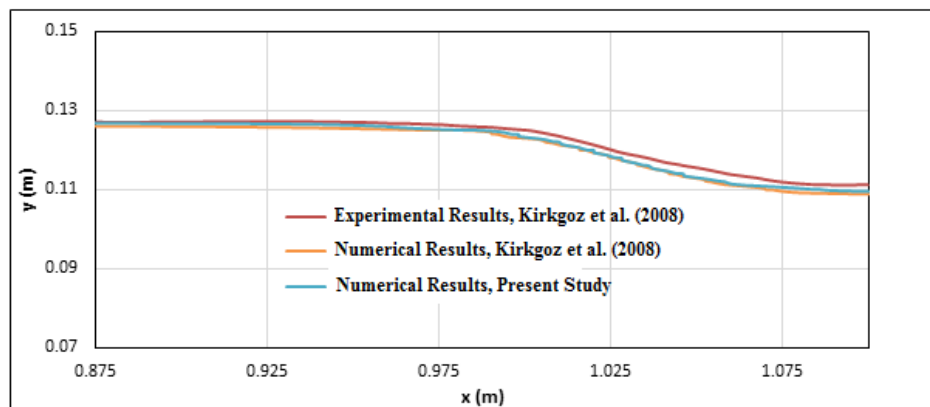
نوع آنالیز به حالت دائمی می باشد و تعداد درون یابی بر روی ۳۰۰۰ عدد تنظیم شده است. مقیاس زمانی به صورت فیزیکی و برابر ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده



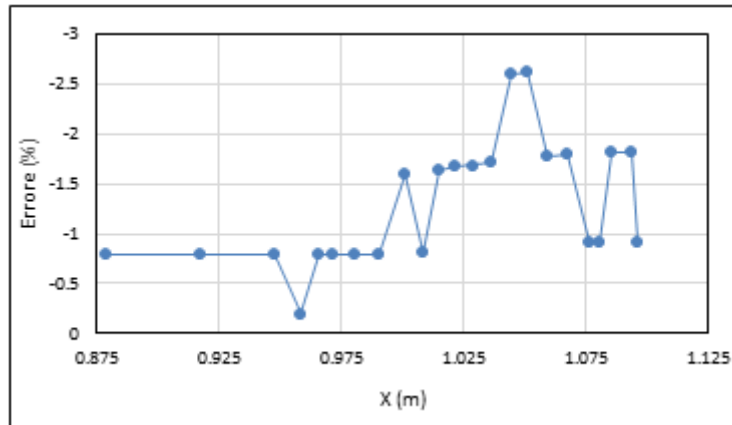
شکل(۲): نمایش شبکه بندی و شرایط مرزی در مدل سازی سرریز لبه پهن

(۳) نتایج حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی، تطابق مناسبی باهم دارند که نشان از صحت شرایط مرزی انتخابی و مناسب بودن شبکه بندی مورد استفاده دارد.

تحلیل عددی با توجه به اطلاعات مقادیر آزمایشگاهی انجام شده و پروفیل سطح آزاد آب ایجاد شده با نتایج آزمایشگاهی و عددی کیرکگوز و همکاران (۲۰۰۸) در شکل (۳) مقایسه می گردد. با توجه به شکل

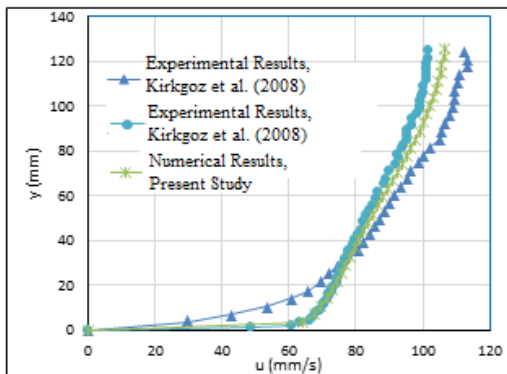


شکل (۳): مقایسه پروفیل های جریان در تحقیق حاضر با نتایج Kirkgoz et al., (2008)

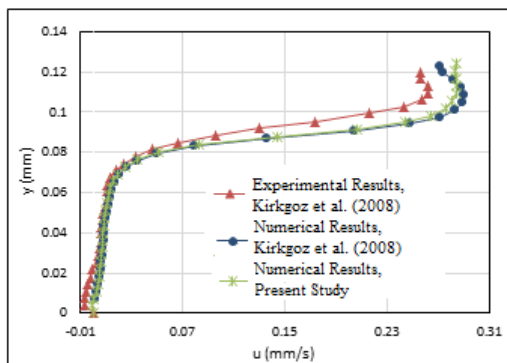


شکل (۴): مقایسه درصد خطای پروفیل سطح آب در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در سرریز لبه پهن

سرعت در دو مدل عددی به هم نزدیک‌تر بوده و به یک میزان با مدل آزمایشگاهی خطا دارند.



شکل (۵): گرادیان سرعت در نقطه $X=905$ mm در کانال سرریز مستطیلی لبه پهن



شکل (۶): گرادیان سرعت در نقطه $X=995$ mm در کانال سرریز مستطیلی لبه پهن

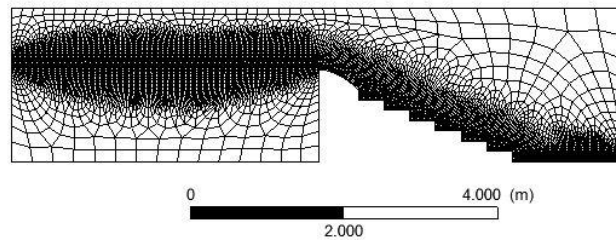
همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است مقدار ماکزیمم خطا برابر ۲/۶ درصد می‌باشد که قابل قبول می‌باشد. با ورود جریان بر روی سرریز میزان خطا افزایش یافته و به بالاترین حد خود می‌رسد.

در ادامه گرادیان سرعت در نقطه $X=905$ میلیمتر بررسی شده و در شکل (۵) ارائه شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد میزان خطا در مدل عددی این پژوهش و کار کیرگوز و همکاران (۲۰۰۸) نسبت به کار آزمایشگاهی در کف کانال زیاد بوده و رفته رفته در میانه و سطح آب این مقدار به حد قابل قبول می‌رسد. در حالی که میزان خطای دو مدل عددی، کم و همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. یکی از دلایل خطای زیاد گرادیان سرعت در کف کانال عدم تخصیص شبکه‌بندی ریزتر در دیواره‌های کف کانال می‌باشد. چون نتایج مربوط به سرعت در کف کانال نیاز نمی‌باشد، به منظور حل سریع‌تر مدل از شبکه‌بندی درشت‌تر استفاده شده است.

همچنین برای ارزیابی بهتر، مقدار گرادیان سرعت در نقطه $X=995$ میلیمتر نیز اندازه گرفته شده است. همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد مقدار خطای مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار کم بوده و از همخوانی قابل قبولی برخوردار می‌باشد. حداکثر مقدار این خطا به ۱۸ درصد می‌رسد. همچنین با مقایسه خطای بین دو مدل عددی می‌توان دریافت که گرادیان

مدل سرریز پلکانی

لوله ۴ اینچ به مخزن اصلی باز می‌گردد. در محل ورودی آب به فلوم‌ها شیر فلکه جهت کنترل میزان دبی ورودی قرار دارد. مدل مرکب از سرریزهای پلکانی با ۷ پله می‌باشد که با ورق پلگسی‌گلاس ۶ میلیمتری ساخته شده و آزمایشات با ۵ دبی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض) صورت می‌گیرد. شیب کلی سرریز ۲۱/۸ درجه، ارتفاع پله‌ها (h)، ۰/۱۳۴ متر و طول هر پله (l)، ۰/۳۳۵ متر می‌باشد. همچنین ارتفاع کلی سرریز ۱/۲ متر است که قسمت اوجی شکل بالادست از منحنی با معادله $Y = -0.1957X^{1.873}$ تبعیت می‌کند. نحوه شبکه‌بندی سرریز پلکانی مورد نظر در مدل عددی در شکل (۷) نمایش داده شده است.

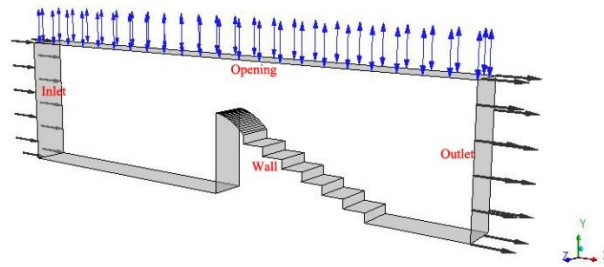


شکل (۷): نحوه شبکه‌بندی سرریز پلکانی در مدل عددی

اعمال می‌گردد. شرط مرزی خروجی در قسمت پایین دست اعمال می‌گردد. این شرط برای شبیه‌سازی خروج جریان از دامنه محاسباتی به کار گرفته می‌شود. مقدار فشار نسبی برای خروجی صفر در نظر گرفته می‌شود. به علت افزایش هزینه محاسبات نیاز است دامنه محاسباتی در محلی قطع گردد. در این صورت محل خروجی جریان مشخص نیست و باید از شرط مرزی Opening استفاده شود. در این شرط مرزی مقدار و اندازه فشار نسبی برابر صفر اعمال می‌شود. در کف کانال شرط مرزی دیوار برای دیواره‌ی بدون لغزش و صاف (بدون تخلخل) و در دو طرف کانال به دلیل متقارن بودن مسئله شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) دامنه حل مسئله و شرایط مرزی نشان داده شده است.

در این مرحله برای بررسی بهتر روند استهلاک انرژی، دو مدل سرریز پلکانی با آستانه ورودی سرریز اوجی و لبه‌پهن به صورت عددی تحلیل می‌شوند. در اولین گام به منظور صحت‌سنجی مدل عددی سرریز پلکانی با آستانه سرریز اوجی از مدل آزمایشگاهی سیاوش حیدری ارجلو (۱۳۸۷) که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است، استفاده می‌شود. آزمایشگاه دارای یک مخزن اصلی زیرزمینی است که از شبکه آب شهری تغذیه می‌گردد. آب مخزن توسط یک پمپ گریز از مرکز با الکتروموتور به قدرت ۲۵ اسب بخار به درون فلوم، منتقل می‌گردد. آب اضافی، توسط یک

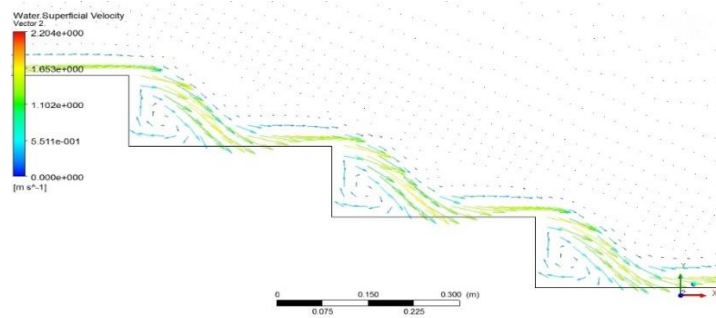
همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، جهت افزایش دقت محاسبات اندازه شبکه‌ها در نواحی که تغییرات سطح جریان آب بیشتر بوده، ریزتر انتخاب شده است. المان‌ها به صورت منظم و غیرمنظم در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در پایین دست سرریز به علت دقت اندازه‌گیری بالا از المان‌های ریزتر و منظم استفاده شده است. در نهایت با حساسیت‌سنجی اندازه شبکه، تعداد المان‌ها ۲۰۵۲۳۷ عدد به دست آمده است. به منظور در نظر گرفتن فرض‌های در نظر گرفته شده در نقاط مرزی مسئله، باید ورودی‌های دقیقی برای نرم‌افزار تعریف شود. در قسمت بالادست سرریز شرط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای ورود آب با دبی مشخص، فشار هیدرواستاتیکی متناظر با دبی مورد نظر، شدت آشفتگی و طول مشخصه به نرم‌افزار



شکل (۸): دامنه حل مسئله و شرایط مرزی بکار رفته در مدل عددی

محاسبه استهلاک انرژی برای ۵ دبی مختلف محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان دهنده تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

پروفیل جریان شکل گرفته و بردارهای سرعت برای دبی در واحد عرض ۵۰ لیتر بر ثانیه در شکل (۹) ارائه شده است که نشان دهنده شکل‌گیری جریان ریزشی می‌باشد. در ادامه پارامترهای خروجی از نرم‌افزار و



شکل (۹): بردارهای سرعت شکل گرفته در دبی در واحد عرض ۵۰ لیتر بر ثانیه

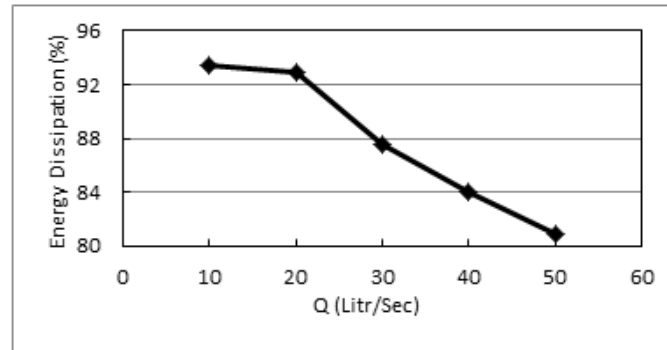
جدول (۲): مقایسه استهلاک انرژی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

خطا (%)	استهلاک انرژی در مدل آزمایشگاهی (%)	استهلاک انرژی در مدل عددی (%)	عمق پایین دست در مدل آزمایشگاهی (متر)	عمق پایین دست در مدل عددی (متر)	دبی در واحد عرض (m ² /s)
-۱/۵۵	۹۳/۹۷	۹۳/۴۵	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۸۸	۱۰
۰/۹۵	۹۲/۰۶	۹۲/۹۳	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۶۸	۲۰
-۰/۲۹	۸۷/۷۵	۸۷/۴۹	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۸	۳۰
۱/۰۰	۸۳/۱۲	۸۳/۹۶	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۱	۴۰
-۰/۶۲	۸۱/۴۶	۸۰/۹۴	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۳۹	۵۰

جریان را به خوبی دارا می‌باشد. در ادامه برای درک بهتر ارتباط بین میزان استهلاک با دبی جریان، نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی با

با توجه به جدول (۲) مقدار حداکثر خطا بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ۱/۵۵ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل عددی نیز مانند مدل آزمایشگاهی توانایی مدل‌سازی و تحلیل میدان

دبی جریان استخراج شده و در منحنی (۱۰) ارائه شده است.

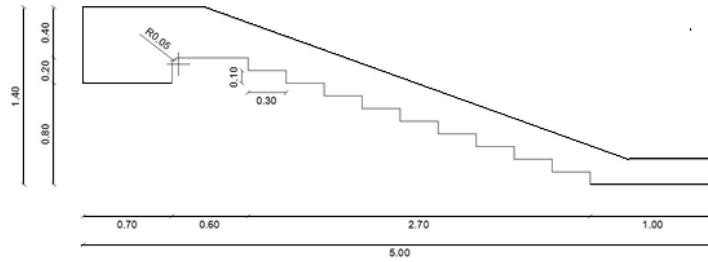


شکل (۱۰): نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی با دبی جریان در مدل سرریز پلکانی

استهلاک انرژی در این نوع سرریزها بهتر درک شود. مدل سرریز پلکانی در این حالت، در کانالی به طول ۵ متر و عرض ۰/۵ متر قرار دارد و دارای ۹ پلکان می‌باشد. ارتفاع پله‌ها ۰/۱ متر و طول آنها ۰/۳ متر و شیب شوت سرریز ۱۸/۴۳ درجه می‌باشد. در ابتدای سرریز پلکانی، یک سرریز لبه‌پهن به طول ۰/۶ متر و بالادست گرد گوشه به شعاع ۰/۰۵ متر قرار دارد. سرریز در فاصله ۰/۷ متر از بالادست کانال قرار گرفته و به منظور کاهش محاسبات کف مخزن به اندازه ۰/۸ متر بالاتر از کف مبنا در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۱) پلان اندازه‌گذاری برش طولی کانال مشاهده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، برای مدل انتخاب شده با افزایش دبی از ۱۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه مقدار افت انرژی نسبی از ۹۳/۵ درصد به حدود ۸۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. از نتایج به دست آمده می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در سرریزهای پلکانی با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی کاهش پیدا می‌کند، اگر چه میزان استهلاک برای دبی‌های بالاتر، کمتر می‌باشد. با مقایسه مقادیر عددی حاصل از نرم‌افزار Ansys CFX و نتایج آزمایشگاهی از روی جدول (۲) می‌توان به قابلیت مناسب روش عددی ارائه شده در برآورد استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی، برای مقادیر مختلف دبی پی برد.

بعد از ارزیابی دقت و قابلیت نرم‌افزار استفاده شده، در ادامه تحقیق مدل دیگری از سرریز پلکانی با آستانه سرریز لبه‌پهن، بررسی و تحلیل می‌شود تا روند

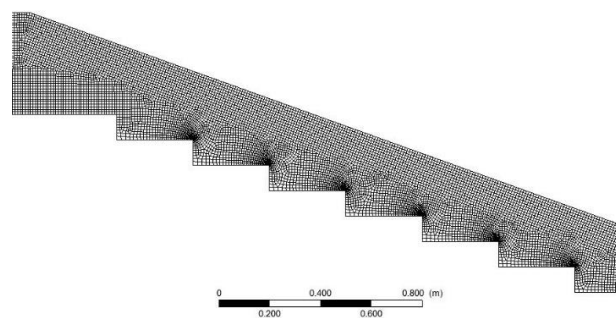


شکل(۱۱): پلان اندازه‌گذاری سرریز پلکانی (مقیاس به متر)

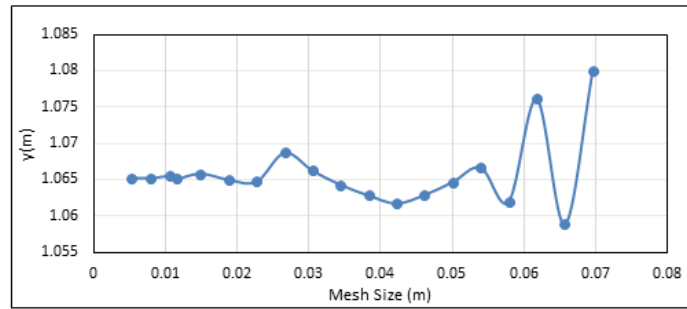
نواحی ابعاد روزنه‌ها درشت‌تر انتخاب می‌گردد (شکل ۱۲).

به‌منظور بهینه‌سازی شبکه‌بندی مدل، حساسیت عمق آب بالادست نسبت به اندازه شبکه‌ها مطابق شکل (۱۳) بررسی شده است. با توجه به شکل، اندازه شبکه‌ها برابر $0/01$ متر و در نوک پله‌ها به دلیل اینکه عامل اصلی تغییر جریان می‌باشند و گرادیان سرعت در این نقاط بیشتر است اندازه مش $0/005$ متر انتخاب شده است. مشخصات بهترین شبکه انتخاب شده در جدول (۳) آمده است.

در این مدل برای شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان از شبکه‌بندی در محیط نرم‌افزار بهره گرفته شده است. از آنجایی که مسئله مورد نظر به شدت به شبکه‌بندی جریان بویژه در محدوده سطح پله‌ها تا سطح مشترک آب و هوا حساس است و شبکه‌بندی در این محدوده کاملاً در نتایج حاصل از تحقیق تأثیرگذار می‌باشد، بنابراین تعداد گره‌های موجود در قسمت‌های مختلف سرریز متفاوت بوده و بعد از چند مرحله حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به شبکه‌بندی، با کاربرد فرایند روزنه‌بندی تطبیقی، شبکه‌بندی مناسب انتخاب می‌گردد. ابعاد شبکه‌بندی در محدوده سطح پله و دیواره‌ها تا سطح مشترک آب و هوا ریزتر و در سایر



شکل (۱۲): نحوه مش بندی در مدل عددی سرریز پلکانی



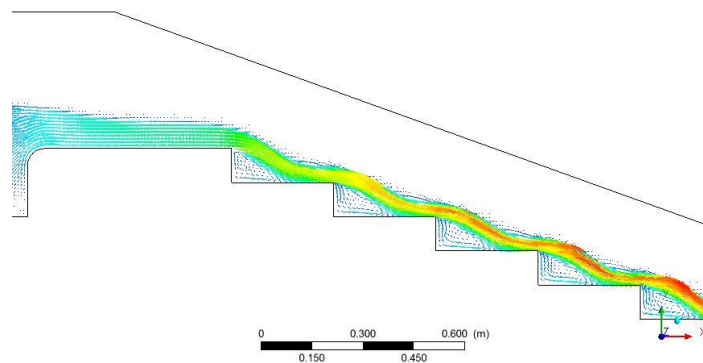
شکل (۱۳): نمودار تغییرات عمق آب بالادست نسبت به اندازه شبکه‌ها در مدل عددی

جدول (۳): مشخصات شبکه‌بندی در مدل‌سازی عددی سرریز پلکانی

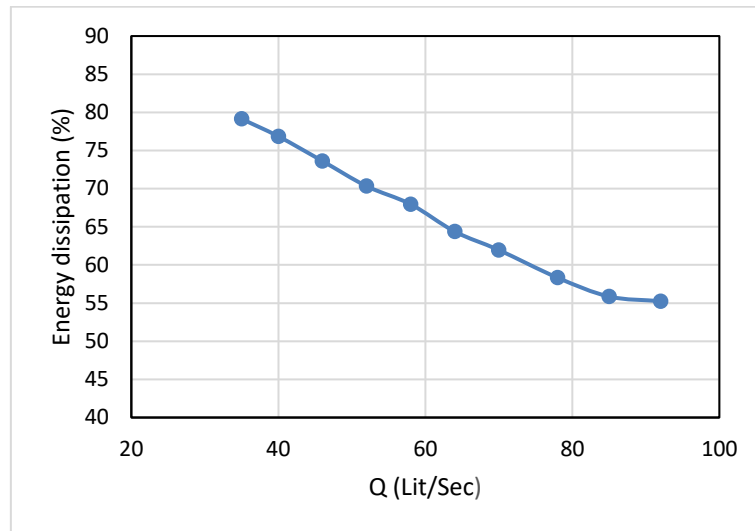
تعداد گره	تعداد المان	نوع
۲۸۰۱۹۵	۲۵۱۶۹۲	سرریز پلکانی

بازچرخشی در گوشه پلکان‌ها بوده و در دبی‌های پایین عامل اصلی استهلاک انرژی تشکیل آبشارهای متوالی و برخورد آنها با کف پله‌ها مطابق با شکل (۱۴) می‌باشد. برای بررسی بهتر این روند در سرریز پلکانی، مدل عددی مورد مطالعه در برای دبی‌های مختلف تحلیل شده و نتایج مربوط در شکل (۱۵) ارائه شده است.

از مهم‌ترین عوامل ساخت سرریزهای پلکانی قابلیت این نوع سرریز در کاهش قابل توجه انرژی پایین دست سرریز نسبت به عمق بالادست آن می‌باشد. روند کاهش استهلاک در دبی‌های مختلف صورت‌های متفاوتی دارند به طوری که در دبی‌های بالا با لغزشی شدن جریان، عمده سهم استهلاک انرژی مربوط به وجود جریان‌های



شکل (۱۴): بردارهای سرعت در مدل سرریز پلکانی ساده در جریان ریزشی



شکل (۱۵): نمودار درصد استهلاک انرژی در سرریز پلکانی ساده مدل ۹ پلکانی

ایده‌ال خود انجام شده است و نتایجی که به دست می‌آید تحت تأثیر شرایط حاکم بر آزمایش قرار دارد، در حالی که با روش عددی هر نوع شرایط یا تغییر مد نظر طراح را می‌توان در مدل سرریز پلکانی ایجاد نمود و وضعیت سرریز را در اثر هر تغییر مشاهده نمود و بهترین شرایط را برای طراحی سرریز منظور نمود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که منحنی عملکرد سرریز پلکانی در استهلاک انرژی برای دبی‌های مختلف به صورت منحنی تقریباً دوخطی می‌باشد. برای دبی‌های پایین میزان استهلاک برای هر دو مدل سرریز پلکانی بررسی شده در حدود ۸۰ الی ۹۰ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به منحنی تغییر میزان استهلاک با دبی برای دو مدل سرریز پلکانی می‌توان گفت که در مدل اول تغییر شیب منحنی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و برای مدل دوم در میزان دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه رخ می‌دهد. با توجه به شیب منحنی‌ها می‌توان میزان استهلاک انرژی را برای مقادیر دیگر دبی پیش‌بینی کرد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد برای این مدل سرریز، با افزایش دبی از ۳۵ تا ۹۲ لیتر بر ثانیه مقدار افت انرژی نسبی از ۷۹/۱۳ درصد به ۵۵/۲۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. از نتایج به دست آمده می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در سرریزهای پلکانی با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی کاهش پیدا می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله روند استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی و نرم افزار ANSYS CFX مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شد. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌توان به این نتیجه رسید که روش عددی هم مانند روش آزمایشگاهی توانایی ارائه نتایج قابل قبول در آنالیز میدان جریان در سرریز پلکانی را دارا بوده و از نتایج آنها می‌توان برای صحت‌سنجی برنامه و مدل عددی به کار رفته استفاده نمود. هر کار آزمایشگاهی در شرایط

منابع

حیدری ارجلو، س. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی تعداد پلکان‌ها در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.



- Chen, Q., G. Dai and H. Liu. 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(7): 683-688.
- Chatila, J. and M. Tabbara. 2004. Computational modeling of flow over an ogee spillway. *Computers and Structures*, 82(22): 1805–1812.
- 4 Tabbara, M., J. Chatila and R. Awwad. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Journal of Computers and Structures*, 83(27): 2215-2224.
- Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(2): 213-218
- Chanson, H. and L. Toombes. 2001. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(1): 145-156.
- Boes, R.M. and W.H. Hager. 2003. Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(9): 671- 679.
- Chinnarasi, C. and S. Wongwises. 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 132(1): 70-76.
- Chamani, M.R. and N. Rajaratnam. 1994. Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(2): 254-259.
- Chamani, M.R. and N. Rajaratnam. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(4):361-368.
- Daneshfaraz, R., B. Kaya, S. Sadeghfam and H. Sadeghi. 2014. Simulation of flow over ogee and stepped spillways and comparison of finite element volume and finite element methods. *Journal of water resource and hydraulic engineering*, 3(2): 37-47.
- Parsaie, A., A.H. Haghiabi, M. Saneie and h. Torabi. 2016. Prediction of energy dissipation on the stepped spillway using the multivariate adaptive regression splines. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 22(3): 2811-292.
- Roushangar, K., S. Akhgar, F. Salmasi and J. Shiri. 2017. Neural networks- and neuro-fuzzy-based determination of influential parameters on energy dissipation over stepped spillways under nappe flow regime. *ISH J Hydraulic Engineering*, 23(1):57–62.
- Salmasi, F., A. Samadi. 2018. Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways. *Applied Water Science*, 8(229): 1-11.
- Parsaie, A. and A.H. Haghiabi. 2019. The hydraulic investigation of circular crested stepped spillway. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70: 101624.
- Parsaie, A. and A.H. Haghiabi. 2019. Evaluation of energy dissipation on stepped spillway using evolutionary computing. *Applied Water Science*, 9: 144.
- Ghaderi, A., A. Daneshfaraz, M. Torabi and, J. Abraham. 2020. Experimental investigation on effective scouring parameters downstream from stepped spillways. *Water Supply*, 20(4): 1-1
- Daneshfaraz, R., E. Aminvash, R. Esmali, S. Sadeghfam and J. Abraham. 2020a. Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 8(4): 396-406.
- Daneshfaraz, R., R. Ghaderi, A.A. Akhtari and S. Francesco. 2020b. On the Effect of block roughness in ogee spillways with flip buckets. *Fluids*, 4(5): 182.
- . Daneshfaraz, R., M. Dasineh, A. Ghaderi and S. Sadeghfam. 2019. Numerical modeling of hydraulic properties of sloped broad crested Weir. *AUT Journal of Civil Engineering*, In Press, doi: 10.22060/ajce.2019.16184.5574.
- Kirkgoz, M.S., M. Akoz and A. Oner. 2008. Experimental and theoretical analyses of two-dimensional flow upstream of broad-crested weirs. *Canadian journal of civil engineering*, 35(9): 975-986.



Numerical investigation of the energy dissipation process in stepped spillways using finite volume method

Majid Pasbani Khiavi¹, Mortaza Ali Ghorbani², Milad Yousefi³

Abstract:

The purpose of this paper is to investigate the energy dissipation in stepped spillways using numerical method with ANSYS CFX software. In this study, finite volume method based on element was applied for modeling and the SIMPLE iterative algorithm was applied to couple the velocity and pressure terms. Field of flow solution was continued until reaching to remaining with amount of 10^{-5} . The RNG k- ϵ model was used to evaluate the turbulence using CFX software to model the mixing of two-phase water-air and free-surface flow called Free Surface. This research has been continuously analyzed. To perform the validation and capability of software, at first a broad-crested weir mode were modeled and the results of model were compared with the laboratory model. Then the laboratory model of stepped spillway was selected and analyzed for various discharge. Consider to results of the energy dissipation in stepped spillway and broad-crested weir and comparing with experimental results, it can be concluded that numerical method as well as laboratory method has the ability to provide acceptable results in field analysis of flow in different types of stepped spillways and their results can be used to predict flow behavior for different conditions. The results of the presented numerical model showed the appropriate efficiency of stepped overflows in energy dissipation. For the model with the ogee crest, the dissipation rate for the selected flow discharge obtained from 80 to 90% and for the model with the broad cast weir, the energy dissipation obtained from 55 to 80%.

Keywords: Energy dissipation, stepped spillway, broad-crested weir, ANSYS CFX

1.*Associate Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, pasbani@uma.ac.ir

2. Assistant Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, gorbani@uma.ac.ir

3- M.Sc. Graduated in Civil Engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, yousefi.milad13@gmail.com



Numerical investigation of the energy dissipation process in stepped spillways using finite volume method

Majid Pasbani Khiavi¹, Mortaza Ali Ghorbani², Milad Yousefi³

Introduction

Stepped spillways are among the hydraulic structures that have become more popular with designers because of increasing energy dissipation rates in the present century. Steps reduce the cost of building of the energy dissipater installations significantly by increasing the dissipation intensity at the spillway level.

Depending on the passing discharge over the body and the geometry of the steps, the flows over the stepped spillway fall into three categories: Nappe flow, transitional flow, and skimming flow. At low discharges, the flow through the stepped structure will be in the form of successive free-fall small spray jets or nappe flow. The outflow from each step collides with the downstream step bed by a free fall spray, depending on the passing discharge rate, it may be either a complete or incomplete hydraulic jump, or without a hydraulic jump formation. The main causes of the dissipation in this flow are the propagation of spray in the air, the collision of the spray with step bed, or the formation of a complete or incomplete hydraulic jump.

In skimming flow in large discharges, the current flows down the sloping steps as a frictional flow attached to the edge of the steps. The flow moves over the skimming flow line, has a power velocity profile, and begins to emerge gradually below the flow line as the rotational flows.

The purpose of this paper is to investigate the energy dissipation in stepped spillways using numerical method with ANSYS CFX software.

Fluid dynamics is a scientific computation that predicts fluid field, mass and heat transfer, chemical reactions and related phenomena using numerical solution of a series of mathematical equations. The equations that need to be solved for prediction of the phenomena are the well-known conservation equations consist of mass conservation, momentum and energy .

Methodology

In this research, modeling and analysis is performed by computational fluid dynamics software of ANSYS CFX. Finite volume method based on element was applied for modeling and the SIMPLE iterative algorithm was applied to couple the velocity and pressure terms. In this method, the fluid region is first separated by a number of volumes and then the conservation differential equations will be solved by integrating these separated volumes. Therefore, the equations are transformed continuously into a series of linear or nonlinear algebraic terms that will be solved by a numerical method .

Field of flow solution was continued until reaching to remaining with amount of $10e-5$. The RNG k- ϵ model was used to evaluate the turbulence using CFX software to model the mixing of two-phase water-air and free-surface flow called Free Surface. This research has been continuously analyzed. To perform the validation and capability of software, at first a broad-crested weir mode were modeled and the results of model were compared with the laboratory model. Then the two models of stepped spillway was selected and analyzed for various discharge. In order to consider the assumptions at the model boundaries, accurate input must be defined to the software .

1.*Associate Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, pasbani@uma.ac.ir

2. Assistant Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, gorbani@uma.ac.ir

3- M.Sc. Graduated in Civil Engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, yousefi.milad13@gmail.com



Discussion and conclusion

In this research Ansys CFX software is used to solve the flow equations. The software output parameters and the energy dissipation calculation for 5 different discharges were calculated and compared with the experimental results. The results show that the numerical and laboratory results are in good agreement. Therefore, it can be concluded that the numerical model, similar to laboratory model, has good capability for modeling and analyzing the flow field.

Consider to results of the energy dissipation in stepped spillway and broad-crested weir and comparing with experimental results, it can be concluded that numerical method as well as laboratory method has the ability to provide acceptable results in field analysis of flow in different types of stepped spillways and their results can be used to predict flow behavior for different conditions. The results of the presented numerical model showed the appropriate efficiency of stepped overflows in energy dissipation. For the model with the ogee crest, the dissipation rate for the selected flow discharge obtained from 80 to 90% and for the model with the broad cast weir, the energy dissipation obtained from 55 to 80%.

The most important references

- .Chen, Q., G. Dai and H. Liu. 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(7): 683-688.
- .Chatila, J. and M. Tabbara. 2004. Computational modeling of flow over an ogee spillway. *Computers and Structures*, 82(22): 1805-1812.
- .Tabbara, M., J. Chatila and R. Awwad. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Journal of Computers and Structures*, 83(27): 2215-2224.
- .Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(2): 213-218
- .Chanson, H. and L. Toombes. 2001. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(1): 145-156.
- .Chamani, M.R. and N. Rajaratnam. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(4):361-368.
- .Parsaie, A., A.H. Haghiabi, M. Saneie and h. Torabi. 2016. Prediction of energy dissipation on the stepped spillway using the multivariate adaptive regression splines. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 22(3): 2811-292.
- .Salmasi, F., A. Samadi. 2018. Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways. *Applied Water Science*, 8(229): 1-11 .
- .Parsaie, A. and A.H. Haghiabi. 2019. Evaluation of energy dissipation on stepped spillway using evolutionary computing. *Applied Water Science*, 9: 144.
- . Kirkgoz, M.S., M. Akoz and A. Oner. 2008. Experimental and theoretical analyses of two-dimensional flow upstream of broad-crested weirs. *Canadian journal of civil engineering*, 35(9): 975-986.