

بررسی تاثیر روزنه دایره‌ای بر ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی با استفاده از FLOW-3D

عباس امیری^۱، حجت کرمی^{۲*}، سعید فرزین^۳، محمدرضا نیک‌پور^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲ و ۳- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

*Hkarami@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

یکی از راهکارهای موثر و اقتصادی برای افزایش راندمان سرریزها، استفاده از سرریزهای غیرخطی بوده که با تغییر هندسه پلان و افزایش طول سرریز در عرض ثابت از کانال، ظرفیت عبور جریان افزایش می‌یابد. در این پژوهش، عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی توسط نرم افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مورد درستی آزمایشی قرار گرفته است. در ادامه، با ایجاد روزنه‌های دایره‌ای به صورت منفرد و دوتایی روی پاشنه سرریز (P_d)، ضریب آبگذری سرریز ترکیبی نسبت به پارامترهای بدون بعد فاصله به قطر، نسبت بازشدگی و نسبت آبی (نسبت ارتفاع آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز)، بررسی و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالی که دبی عبوری از روزنه نسبت به رابطه مستقل محاسبه دبی، تغییر محسوسی ندارد، افزایش قطر روزنه، ضریب آبگذری سرریز ترکیبی را با بیشینه نسبت بازشدگی ۰/۵، بین ۰/۵ تا ۶ درصد نسبت به سرریز کلید پیانویی بدون روزنه افزایش می‌دهد. در مقابل، با افزایش ارتفاع روزنه منفرد با قطر ثابت، ضریب آبگذری سرریز ترکیبی ۰/۵ تا ۳ درصد کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، استفاده از روزنه‌های دوتایی همسان با نسبت بازشدگی یکسان در مقایسه با روزنه منفرد، ضریب آبگذری سرریز ترکیبی را حداکثر ۳ درصد افزایش داده، به طوری که این روند با افزایش فاصله روزنه‌ها، در ابتدا کاهشی و سپس در نسبت فاصله به قطر بزرگتر از ۲ افزایشی است. در انتها با استفاده از پارامترهای بدون بعد، رابطه‌ای برای تخمین ضریب آبگذری با $R^2 = ۰/۹۵$ ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: روزنه، سرریز ترکیبی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب آبگذری، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

سرریزها با توجه به شکل پلان به دو دسته کلی سرریزهای خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزهای غیرخطی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که در دهه‌های اخیر برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. محور تاج این نوع سرریزها، غیرمستقیم است و در نمای سطح افقی، سرریز از دیواره‌های چسبیده به هم تشکیل شده و هندسه مثلثی، ذوزنقه‌ای، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان، تکرار می‌شود. از متداول‌ترین انواع سرریزهای غیرخطی، سرریز کنگره‌ای است. سابقه ساخت سرریزهای کنگره‌ای به قبل از سال ۱۹۲۰ می‌رسد (دارواس، ۱۹۷۱) [1]. در سال‌های اخیر نیز مطالعات روی هیدرولیک جریان سرریزهای کنگره‌ای ادامه یافته است. عیب عمده این نوع سرریزها، سطح پی بزرگ مورد نیاز برای نصب آنها روی سدهای بتنی است. به همین جهت در سال ۲۰۰۰ شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی، با عنوان سرریزهای کلیدپیانویی^۱ توسط مؤسسه هیدروکووپ^۲ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه بیسکارا^۳ الجزایر ارائه شد (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۳) [2]. طرح اولیه سرریزهای کلید پیانویی توسط بلانک و لمپیر (۲۰۰۱) برای بهبود عملکرد سرریزهای غیرخطی با فونداسیونی کوچک‌تر توسعه یافت [3]. پس از آن مطالعات روی هندسه سرریزهای کلیدپیانویی ادامه یافت. لیت ریبرو و همکاران (۲۰۰۷) با ارزیابی سه هندسه تاج مختلف سرریز کلید پیانویی، استفاده از تاج گرد در بخش بالادست را کارآمدتر دانستند [4]. همچنین مطالعات این پژوهشگران (۲۰۰۹) نشان داد که استفاده از دیواره سپری در مطالعه موردی سد اترویت، راندمان هیدرولیکی سرریز را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [5]. این پژوهشگران در سال (۲۰۱۲) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و با کنترل تاثیر شرایط پایین دست بر ارتفاع آبگذری، روابطی برای طراحی هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی با تاج نیم دایره‌ای ارائه کردند و برای

نسبت عرض کلید ورودی به خروجی مقدار ضریب ۱/۶ را پیشنهاد دادند [6]. در همین سال اندرسون و تولیس (۲۰۱۲) با مقایسه هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی و کنگره‌ای مستطیلی نشان دادند سرریز کلیدپیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی، از عملکرد بهتری برخوردار است [7].

ماچیلز و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای طراحی سرریز کلیدپیانویی پرداخته و آثار متغیرهای ارتفاع سرریز، عرض کلیدها و طول پیش آمدگی را روی ظرفیت آبگذری و مشخصات جریان بررسی کردند. نتایج این پژوهشگران به ارائه نسبت‌های بهینه برای ابعاد مختلف سرریز انجامید [8]. مهبودی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای پرداختند و نشان دادند ضریب آبگذری این نوع سرریزها بیشتر از نوع مستطیلی آن است [9].

میرنصری و عمادی (۲۰۱۴) عملکرد هیدرولیکی جریان سرریز کنگره‌ای را در مدل ترکیبی سرریز-دریچه مورد مطالعه قرار دادند. پژوهش این پژوهشگران نشان داد که دبی عبوری و ضریب آبگذری با افزایش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد [10]. کرمی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به پیش‌بینی دقیق ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای پرداختند [11].

صفرزاده و نوروزی (۲۰۱۷) به وسیله شبیه‌سازی عددی (RANS) به مطالعه هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای، پرداخته و تاثیر سطح کلید ورودی و زاویه وجه کناری را در حالتی که طول تاج ثابت باشد، بررسی کردند [12]. یوسف سعد و مصطفی فتوح (۲۰۱۶) در مدل آزمایشگاهی، به بررسی ضریب آبگذری سرریز اوجی در ترکیب با یک، دو و سه روزنه دایره‌ای پرداخته و معادلاتی را در این خصوص ارائه کردند. پژوهش این پژوهشگران نشان داد افزایش نسبت قطر روزنه به فاصله مرکز آن تا کف سرریز تاثیر مستقیم در افزایش ضریب آبگذری خواهد داشت [13]. ازجمله سرریزهای ترکیبی اجراشده، سرریز سد الفیوم^۴ در

1 Piano Key Weirs

2 Hydro Coop

3 Biskra

چندی صورت گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر پژوهش‌ها در زمینه کاربرد سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه و سرریز-روزنه مورد توجه متخصصان امر واقع شده است. در این راستا، هدف از پژوهش حاضر بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از روزنه است. بدین منظور از روزنه‌های منفرد و دوتایی با مقطع دایره در ترکیب سرریزهای کلیدپیانویی استفاده شده است. پس با توجه به اینکه بالاترین راندمان سرریزهای غیرخطی در هد پایین جریان عبوری است، پیش‌بینی می‌شود با ایجاد روزنه، راندمان هیدرولیکی سرریز افزایش یابد. در این پژوهش از نرم‌افزار FLOW-3D برای حل عددی و شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات کلی حاکم بر مسئله، معادلات ناویر استوکس^۵ و پیوستگی برای جریان‌های تراکم ناپذیر است که با در نظر گرفتن متغیرهای VOF و FAVOR به شکل معادلات پیوستگی و مومتم درمی‌آیند که به ترتیب، معادلات (۱) و (۲) است (Flow Science, Inc., 2008):

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(U_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در معادلات بالا، متغیرهای u, v, w مولفه‌های سرعت، V_F نسبت حجم مایع در هر المان، A_x, A_y, A_z مساحت جزئی روی وجوه هر المان که سیال در آن جریان دارد، ρ چگالی، P' فشار، g_i نیروی گرانش و f_i تنش رینولدز است در حالتی که از مدل آشفتگی استفاده می‌کنیم. در المان‌هایی که پر از مایع است، V_F و A_j (سطح جانبی المان)، برابر ۱ است و

کشور مصر است. احمد البلاسی (۲۰۱۲) در پژوهش خود به مطالعه ترکیب سرریز ریزشی و روزنه در این سد پرداخته و روابط محاسبه دبی سرریز ترکیبی را توسعه داده است [14].

بلوچی و زینی‌وند (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز-روزنه در شرایط سیلابی را انجام داده و رابطه‌ای برای تخمین دبی سرریز ترکیبی ارائه کردند [15]. قره‌گزلو و همکاران (۱۳۹۲) اثر سرریز بر دبی دریچه، در مدل ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای را بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد جریان عبوری از سرریز به علت ایجاد فشار مثبت و افزایش عمق آب در پایین‌دست سبب کاهش ۱-۲۵ درصدی ضریب دبی دریچه نسبت به حالت بدون سرریز می‌شود [16].

صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۳) الگوی سه بعدی جریان روی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و انحنادار در پلان را به وسیله مدل‌سازی عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصل، استفاده از کلیدهای دوزنقه‌ای شکل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی دارد [2]. قلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) ضمن معرفی پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای قوسی، با توسعه سرریز به داخل مخزن، اثر شکل تاج، زاویه دیواره سرریز و بار هیدرولیکی بالادست بر عملکرد هیدرولیکی و ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی قرارگرفته در داخل مخزن را مورد بررسی قرار دادند [17].

ایلخانی پور زینالی و همکاران (۱۳۹۶) آثار متقابل سرریز و دریچه بر مشخصه‌های دبی در سازه جریان ترکیبی سرریز دریچه را بررسی کردند. این پژوهش نشان می‌دهد تأثیر دبی نسبی دریچه بر ضریب آبگذری دریچه در سازه جریان ترکیبی ناچیز بوده ولی تأثیر آن بر ضریب آبگذری سرریز به دلیل جا به جا شدن خط تقسیم جریان در بالادست سازه جریان ترکیبی قابل توجه است [18].

بررسی پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که در خصوص تحلیل هیدرولیک جریان با ایجاد تغییرات هندسی در شکل سرریزهای غیرخطی از جمله سرریز کلید پیانویی مطالعات

است. در رابطه آخر نیز $Cov(y_i^*, y_i)$ و $\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}$ به ترتیب عبارتند از کوواریانس داده‌های موجود در مدل عددی و اندازه‌گیری شده و انحراف معیارهای آن‌ها.

۲-۳- معرفی مدل‌های آزمایشگاهی

برای راستی‌آزمایی مدل عددی سرریز کلیدپیانویی، از نتایج آزمایشگاهی پژوهش ماچیلز و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد [8]. این پژوهشگران با ساخت ۳۱ مدل آزمایشگاهی با نسبت ابعاد متفاوت به بررسی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی پرداخته‌اند. در شکل (۱) نمای سه بعدی از یک سیکل سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای هندسی نشان داده شده است.

شکل ۱. نمای سه بعدی از یک سیکل سرریز کلیدپیانویی (ماچیلز و همکاران، ۲۰۱۴)

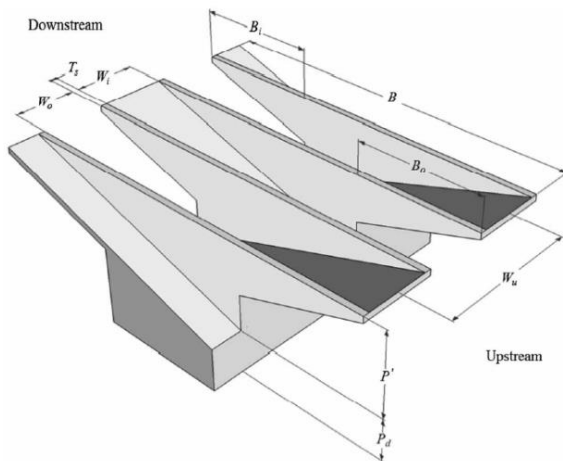


Fig. 1. 3D sketch of a type A PKW and main geometric parameters

همچنین باتوجه به عدم وجود مدل آزمایشگاهی ترکیب سرریز کلیدپیانویی با روزنه، برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزار در مدل‌سازی ترکیب سرریز با روزنه، از پژوهش یوسف سعد و مصطفی فتوح (۲۰۱۶) استفاده شد [13]. در این پژوهش سرریز ساده لبه پهن و روزنه به صورت ترکیبی در ۱۲ حالت مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته و در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه ضریب آبگذری سرریز ترکیبی، ارائه شده است. شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی سرریز-روزنه و پارامترهای موثر، در شکل (۲) نشان داده شده است.

معادلات به معادلات پایه RANS برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر تبدیل می‌شود. به طور کلی مولفه X معادله مومنتم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t^*} [\rho^* u^*] + \frac{\partial}{\partial x^*} [\rho^* u^{*2} + P^*] + \frac{\delta}{\delta y^*} [\rho^* u^* v^*] + \frac{\delta}{\delta z^*} [\rho^* u^* w^*] = \frac{\partial}{\partial x^*} [\tau_{xx}^*] + \frac{\partial}{\partial y^*} [\tau_{xy}^*] + \frac{\partial}{\partial z^*} [\tau_{xz}^*] \quad (3)$$

همچنین در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال از یک تابع به نام جزء حجم سیال استفاده می‌شود. شکل دیفرانسیلی تابع در حالت سه بعدی در رابطه (۴) نشان داده شده است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

نرم‌افزار FLOW-3D بر اساس قوانین بنیادی جرم، مومنتم و بقای انرژی، پایه‌گذاری شده است و در حالت پایدار نتایج را تحلیل می‌کند.

۲-۲- معیارهای ارزیابی دقت مدل

برای مقایسه کمی عملکرد مدل‌های ساخته شده می‌توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده بهره گرفت. در این پژوهش از میانگین مطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) برای ارزیابی عملکرد مدل عددی استفاده می‌شود. بیان ریاضی این آزمون‌ها در روابط (۵، ۶ و ۷) آورده شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i^* - y_i| \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (y_i^* - y_i)^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}} \quad (7)$$

منظور از y_i^*, y_i و n در روابط بالا به ترتیب داده‌های موجود در مدل عددی، داده‌های اندازه‌گیری شده و تعداد کل داده‌ها

نظر قرار گرفته و $2/5$ سیکل در نرم افزار استفاده شد. در مدل باد شده طول موثر برای یک سیکل با استفاده از رابطه (۹) محاسبه و برابر $3/75$ متر است. همچنین طبق رابطه (۱۰) عرض واحد یک سیکل، شامل مجموع یک کلید ورودی، دو برابر ضخامت مدل و دو نیم کلید خروجی، معادل یک سیکل و $0/30$ متر محاسبه می شود. مشخصات هندسی مدل سرریز کلیدپیانویی در نرم افزار شبیه ساز با توجه به متغیرهای شکل (۱) در جدول (۱) آورده شده است. منطبق بر مدل آزمایشگاهی مذکور، شکل مقطع تاج لبه تیز و ضخامت مدل 15 میلیمتر در نظر گرفته شد.

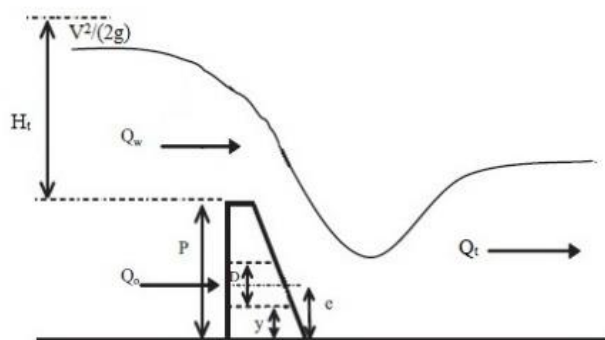


Fig. 2. Sketch of experimental model of combined weir with orifice

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد درصد بازشدگی مورد مطالعه بین ۱ تا ۵ درصد، به جهت عملکرد بهینه سرریز ترکیبی قابل قبول است. این مقدار بازشدگی در پژوهش ایلخانی پور زینالی و همکاران (۱۳۹۶) در خصوص آثار متقابل سرریز و درجه نب: مورد استفاده قرار گرفته است [18].

از طرفی با توجه به اینکه جریان در محدوده آشفته بوده و عمق جریان روی سرریز بیشتر از $\frac{2}{5}$ سانتی متر است، بنا به توصیه انجمن مهندسين عمران آمريكا (۲۰۰۰)^۶ می‌توان از اثر نیروی لزجت و كشش سطحی نیز چشم‌پوشي كرد (به نقل از قلی‌زاده و همكاران، ۱۳۹۵) [17]. همچنين با توجه به تراكم ناپذیری جریان در سرریزها، می‌توان از تغییر جرم مخصوص در آبگذری سرریز صرف نظر نمود. بنابراین با استفاده از تحلیل ابعادی و با در نظر گرفتن ابعاد بهینه سرریز و ابعاد آزمایشگاهی کانال و ثابت فرض کردن ویژگی‌های سیال، پارامترهای بدون بعد مهم این پژوهش به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$C_d = f(\frac{H_t}{P}, \frac{A_o}{A_w}, \frac{H}{D}) \quad (\Lambda)$$

که در آن H ارتفاع آب تا مرکز روزنه، H_t ارتفاع آب روی سرریز، P ارتفاع سرریز، D قطر روزنه، A_0 سطح روزنه و A_w سطح پاشنه تعبیه شده برای سرریز است. پارامترهای مورد اشاره در شکل (۲) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱) W_0 و W_i به ترتیب نشان‌دهنده عرض کلیدهای ورودی و خروجی و B_0 و B_i به ترتیب طول شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سرریز هستند. B طول تاج کناری و P' ارتفاع کلید است. P_d ارتفاع پاشنه سرریز و T_s ضخامت دیواره هستند. براساس پارامترهای معرفی شده، طول توسعه یافته تاج براساس رابطه (۹) و همچنین عرض واحد یک سیکل طبق رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L_f = 2B + W_i + W_o \quad (9)$$

$$W_u = W_i + W_o + 2T_s \quad (10)$$

بنابراین هماهنگی روی مدل آزمایشگاهی، نسبت‌های اصلی سرریز $W_u = 0.3$, $\frac{P'}{W_u} = 1.33$, $\frac{B_o}{B_i} = 1$, $\frac{W_i}{W_o} = 1.6$ به عنوان مبنای طراحی مدل عددی در سالدورک (Solid Works) مد

۲-۵- شبکه‌بندی محدوده جریان و کالیبراسیون مدل عددی با توجه به ابعاد سرریز کلیدپیانویی منتخب، کانالی به ارتفاع ۰/۸ و عرض ۰/۷۵ و طول ۲/۵ متر برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد. برای کاهش زمان شبیه‌سازی، طولی معادل دو برابر ارتفاع سرریز در بالادست برای کنترل دبی و عمق جریان در نظر گرفته شد. این مقدار در پژوهش اندرسون و تولیس (۲۰۱۳) در خصوص مقایسه هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی و کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [19]. در این مقطع ارتفاع جریان تحت تأثیر سرریز قرار نمی‌گیرد. بدین ترتیب برای استخراج مقادیر دبی و ارتفاع سیال و حصول اطمینان از پایداری جریان، دو مقطع یکی درست بالای سرریز (مقطع صفر) و یکی در دو برابر ارتفاع سرریز در بالادست (مقطع ۰/۸) در محیط نرم‌افزار تعریف شد و با توجه به مدل آزمایشگاهی، شرایط مرزی مدل عددی اعمال شد. برای پایداری سریعتر جریان، حجم اولیه آب در کانال قبل از سرریز تا ارتفاع سرریز به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده و برای جلوگیری از فشردگی جریان در ابتدای شبیه‌سازی سرعت اولیه در راستای جریان متناسب با دبی ورودی و سطح مقطع محاسبه و وارد نرم‌افزار شد. نمای FLOW-3D سازه ترکیبی سرریز-روزنه در شکل (۳) نمایش داده شده است.

شکل ۳. سازه ترکیبی سرریز-روزنه در محیط FLOW-3D

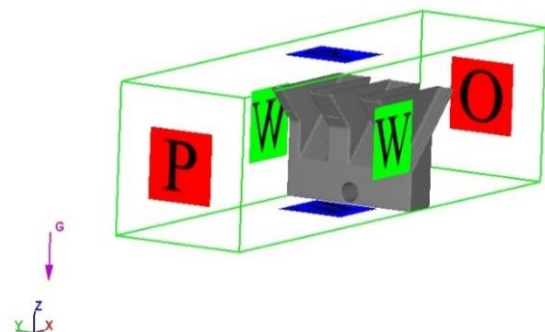


Fig. 3. Combined weir in FLOW-3D

در ابتدا راستی‌آزمایی مدل سرریز کلیدپیانویی با تعیین مش بهینه، با در نظر گرفتن ضخامت مدل آزمایشگاهی و با آزمون سه اندازه سلول‌های ۱۰، ۹ و ۸/۵ میلی‌متر به صورت بلوک

مش یکنواخت روی ابعاد سرریز ۰/۴×۰/۷۵×۰/۶ و استفاده از دو بلوک مش مجاور با اندازه سلول حداکثر ۲۵ میلی‌متر جهت پوشش‌دهی کانال انجام گرفت. استفاده از ۵ دبی در محدوده ۰/۰۷۵ تا ۰/۲۲۵ متر مکعب بر ثانیه برای سه اندازه سلول ۱۵ شبیه‌سازی را برای مدل RNG در بر داشت. در راستای افزایش دقت محاسبات، ابعاد بلوک مش سرریز در ابتدا و انتها با توجه به تغییرات شدید مشخصات جریان در این دو محدوده به اندازه ۵ میلی‌متر از هرطرف به داخل کانال افزایش یافت. ابتدا شبکه‌بندی درشت و یکنواخت روی بلوک مش سرریز آزمایش شد و ریزتر کردن مش تا جایی که نتایج مستقل از شبکه باشد ادامه یافت. بدین ترتیب که با تغییر اندازه شبکه بندی از ۱۰ به ۹ میلی‌متر معیار میانگین خطای مطلق از ۰/۰۲ به ۰/۰۱۲ تقلیل یافت، لیکن تغییر اندازه سلول‌ها از ۹ به ۸/۵ میلی‌متر تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج ایجاد نکرد، به علاوه اینکه زمان شبیه‌سازی حدود ۱/۵ برابر افزایش یافت. مقایسه ارتفاع آب روی سرریز در مدل عددی و آزمایشگاهی در محدوده دبی ۰/۰۷۵ تا ۰/۲۲۵ متر مکعب بر ثانیه، نشان داد هماهنگی خوبی بر اساس معیارهای راستی‌آزمایی بین دو مدل وجود دارد. مقادیر آماره‌های مورد اشاره بر اساس اندازه شبکه‌بندی حل، در جدول (۲) آورده شده است. پس از تعیین ابعاد و تعداد مش بهینه، ۵ شبیه‌سازی برای مش بهینه و دبی‌های منتخب ۰/۰۷۵-۰/۱۱۲۵-۰/۱۵-۰/۱۸۷۵ و ۰/۲۲۵ مترمکعب برثانیه با مدل k-ε انجام شد. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد نتایج حاصل از مدل RNG همخوانی بیشتری با مدل آزمایشگاهی دارد.

در مرحله بعد با به کارگیری داده‌های آزمایشگاهی یوسف سعد و مصطفی فتوح (۲۰۱۶)، سرریز لبه پهن در نرم‌افزار اتوکد (AutoCAD) طراحی و با استفاده از مدل عددی، شبیه‌سازی برای روزنه منفرد به قطر ۰/۲۵ در فاصله ۰/۱۴۵ از کف سرریز و دبی ۰/۰۲۲۱ انجام گرفت. مقایسه پروفیل سطح آب حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی شکل (۴)، حاکی از هماهنگی قابل قبول دو مدل و نشان‌دهنده قابلیت نرم‌افزار در شبیه‌سازی سرریز ترکیبی است. ضریب تعیین بین دو مدل ۰/۸۵ و میانگین خطای مطلق ۰/۰۱۵ محاسبه شد.

جدول ۲. مقادیر معیارهای راستی‌آزمایی مدل عددی سرریز کلیدپیانویی

Statistical indices	RNG			k-ε
	10 mm	9 mm	8.5 mm	9 mm
R ²	0.980	0.998	0.999	0.998
MAE	0.021	0.013	0.012	0.018
RMSE	0.022	0.014	0.014	0.020

Table 2. Statistical indices for validation of numerical model

در این رابطه C ضریب آگذری روزنه، A سطح روزنه، H ارتفاع آب تا مرکز روزنه است. نمای شماتیک روزنه و پارامترهای موثر در محاسبه دبی جریان عبوری در شکل (۵) نمایش داده شده است.

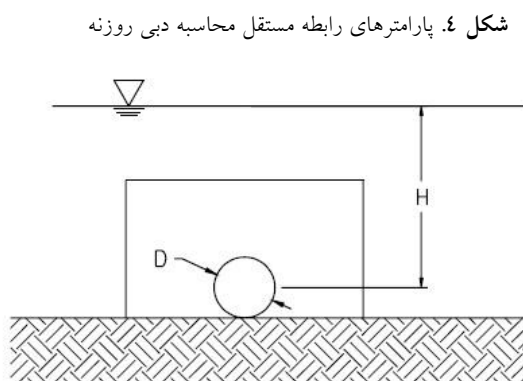


Fig. 5. Parameters of orifice equation

۲-۸- محاسبه ضریب آگذری سرریز ترکیبی

از آنجا که دبی عبوری از سرریز ترکیبی برابر با مجموع دبی سرریز شونده و دبی عبوری از روزنه است، پس محاسبه ضریب آگذری سرریز ترکیبی از تساوی دبی تئوری محاسبه شده از مجموع روابط (۱۱ و ۱۲) و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، امکان پذیر خواهد بود. به این ترتیب رابطه (۱۳) برای محاسبه ضریب آگذری مدل سرریز-روزنه مورد قابل استفاده است.

$$Q_{th} = \sqrt{2g} \left(NAH^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} L_e H_t^{\frac{3}{2}} \right) \quad (13-1)$$

$$C_d = \frac{Q}{Q_{th}} \quad (13-2)$$

در این رابطه Q دبی حاصل از شبیه‌سازی، N تعداد روزنه، A مساحت روزنه، H ارتفاع آب تا مرکز روزنه، L_e طول موثر سرریز شونده و H_t ارتفاع کل آب روی سرریز است.

شکل ۴. مقایسه پروفیل سطح آب در سرریز ترکیبی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

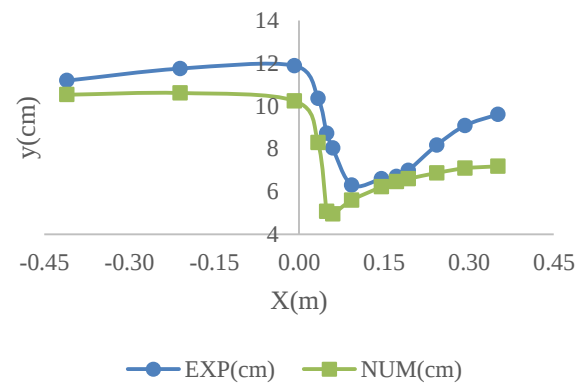


Fig. 4. Comparison of water surface profile for combined weir

۲-۶- رابطه عمومی سرریزهای ریزشی

دبی جریان عبوری از سرریزهای ریزشی آزاد طبق رابطه (۱۱) قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه C_d ضریب آگذری، L_e طول موثر سرریز شونده (طول توسعه یافته تاج)، H_t ارتفاع آب روی سرریز و Q دبی جریان عبوری از سرریز است.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_e H_t^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

۲-۷- رابطه عمومی محاسبه دبی روزنه

برای یک روزنه، دبی جریان عبوری با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است. در صورت برقراری جریان آزاد، ارتفاع مورد نظر، فاصله از مرکز روزنه تا سطح آب بالادست خواهد بود و در صورت استغراق روزنه اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین دست ملاک محاسبه دبی عبوری قرار می‌گیرد. ضریب آگذری عددی بی‌بعد بین ۰/۴ تا ۰/۶ است که برای روزنه یکنواخت مقدار بیشینه ملاک است (ConnDOT Drainage Manual, October 2000).

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل‌سازی ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه منفرد

در ابتدا برای بررسی تأثیر ارتفاع روزنه، مدل‌سازی سرریز ترکیبی، با تعبیه روزنه منفرد به قطر ۰/۱ در دو حد ارتفاعی پایین و بالا در مرکز پاشنه (P_d) و برای ۵ ارتفاع آبی ۱۰ شبیه‌سازی انجام گرفت. در مرحله بعد برای بررسی تغییرات نسبت بازشدگی، برای تک روزنه دایره‌ای به قطرهای ۰/۰۴۵ و ۰/۰۷ در مرکز پاشنه و در ارتفاع ۰/۰۵ از مرکز روزنه تا کف سرریز و با در نظر گرفتن پنج ارتفاع آب ورودی، ۱۰ شبیه‌سازی دیگر انجام گرفت. در جدول (۳) دسته‌بندی مدل‌های عددی ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه منفرد آورده شده است.

در ابتدا برای بررسی تأثیر ارتفاع روزنه، مدل‌سازی سرریز ترکیبی، با تعبیه روزنه منفرد به قطر ۰/۱ در دو حد ارتفاعی پایین و بالا در مرکز پاشنه (P_d) و برای ۵ ارتفاع آبی ۱۰ شبیه‌سازی انجام گرفت. در مرحله بعد برای بررسی تغییرات نسبت بازشدگی، برای تک روزنه دایره‌ای به قطرهای ۰/۰۴۵ و ۰/۰۷ در مرکز پاشنه و در ارتفاع ۰/۰۵ از مرکز روزنه تا کف سرریز و با در نظر گرفتن پنج ارتفاع آب ورودی، ۱۰ شبیه‌سازی دیگر انجام گرفت. در جدول (۳) دسته‌بندی مدل‌های عددی ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه منفرد آورده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه دوتایی

مدل‌سازی ترکیب سرریز کلیدپیانویی و روزنه دوتایی با تعبیه دو روزنه به قطر ۰/۰۷ و در سه فاصله ۰/۰۳۵، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۳۵ از یکدیگر و نسبت‌های فاصله به قطر $\frac{d}{D}$ ۰/۵، ۲ و ۵، برای سه ارتفاع آب ورودی انجام گرفت. شکل (۶) چگونگی استقرار دو روزنه در پاشنه سرریز را نمایش می‌دهد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن بیشینه نسبت بازشدگی $\frac{A_o}{A_w}$ و بیشینه نسبت $\frac{D}{y}$ ۹ شبیه‌سازی انجام شد.

شکل ۶. نمای جانمایی روزنه دوتایی در پاشنه سرریز

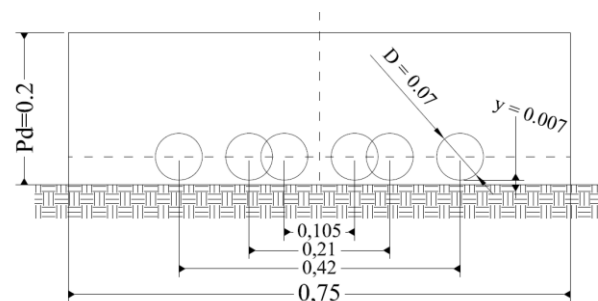


Fig.6. View of combined weir with double orifices

۳-۳- بررسی تأثیر ارتفاع قرارگیری روزنه

شکل (۷) نمودار تغییرات ضریب آبگذری را در مقابل نسبت آبی برای دو حد ارتفاعی پایین و بالا روزنه‌ای با قطر ۰/۱ را

شکل ۷. مقایسه ضریب آبگذری برای دو حد ارتفاعی پایین و بالا روزنه منفرد به قطر ۰/۱

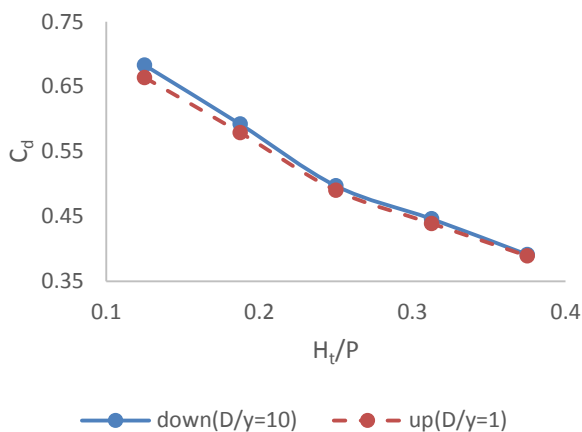


Fig.7. Comparison of (C_d) values for up and down single orifice position

۳-۴- بررسی تأثیر قطر روزنه (نسبت بازشدگی)

بررسی تأثیر نسبت بازشدگی $\frac{A_o}{A_w}$ ایجاد شده در پاشنه سرریز، در ترکیب سرریز کلیدپیانویی با سه قطر روزنه دایره‌ای ۰/۰۴۵، ۰/۰۷ و ۰/۱ متر و برای نسبت‌های بازشدگی متناظر ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ انجام گرفت. با افزایش نسبت آبی، همزمان با کاهش عملکرد روزنه، تأثیر تغییر قطر روزنه بر کارایی سرریز ترکیبی و ضریب آبگذری، کاهش می‌یابد. همچنین در محدوده بازشدگی ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ اثر تغییر قطر روزنه در کاهش نسبت آبی روی سرریز، تا دو برابر بیشتر از محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۰۲۵ است. تغییرات ضریب آبگذری سازه ترکیبی در مقابل نسبت بازشدگی برای نسبت‌های آبی مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است.

شکل ۸. تغییرات ضریب آبدگزی در مقابل نسبت بازشدگی برای نسبت‌های آبی مختلف

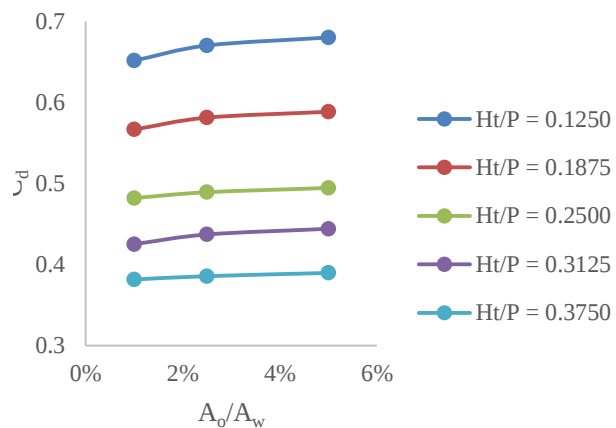


Fig. 8. Effect of changing A_o/A_w on C_d for different water head (H_t/P)

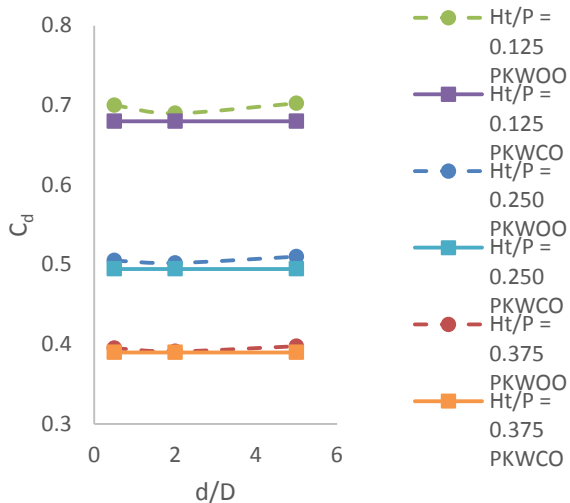


Fig. 9. Comparison of (C_d) values for single and double orifices

شکل (۹) تغییرات ضریب آبدگزی را در مقابل تغییرات نسبت‌های فاصله به قطر، برای نسبت‌های آبی مختلف نشان می‌دهد. در این نمودار PKWCO نماد سرریز ترکیبی با روزنه منفرد و PKWOO نماد سرریز ترکیبی با روزنه دوتایی است. همانطور که در نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود، با تغییر نسبت فاصله به قطر روزنه از ۰/۵ به ۲، افزایش ضریب آبدگزی، روند کاهشی و در محدوده ۲ تا ۵، روند افزایشی دارد. در نتیجه در نسبت $\frac{d}{D} = ۲$ ضریب آبدگزی کمترین افزایش و کمینه مقدار خود را می‌یابد.

۳-۵- بررسی تاثیر روزنه‌های دوتایی

با توجه به نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مشخص شد افزایش فاصله روزنه‌ها با حفظ نسبت بازشدگی، موجب افزایش دبی عبوری جریان، برای ارتفاع آبی یکسان خواهد شد. در نتیجه طبق رابطه (۱۳)، ضریب آبدگزی سرریز ترکیبی با افزایش فاصله دو روزنه در بهترین حالت (نسبت آبی ۰/۱۲۵ و نسبت فاصله به قطر ۵) حداکثر ۳ درصد در مقایسه با روزنه منفرد افزایش می‌یابد.

جدول ۳. مدل‌سازی‌های عددی انجام شده برای روزنه منفرد

D(m)		0.045	0.070	0.100	
y(m)		0.0275	0.015	0.01	0.1
D/y		1.6	4.7	10	1
H(m)	H_t/P	Numerical Models			
0.650	0.1250	H650045	H65007	H65010-down	H65010-up
0.675	0.1875	H675045	H67507	H67510-down	H67510-up
0.700	0.2500	H700045	H70007	H70010-down	H70010-up
0.725	0.3125	H725045	H72507	H72510-down	H72510-up
0.750	0.3750	H750045	H75007	H75010-down	H75010-up

Table 3. Numerical models of single orifice

شکل ۱۰. تغییرات ضریب آبگذری در مقابل نسبت آبی

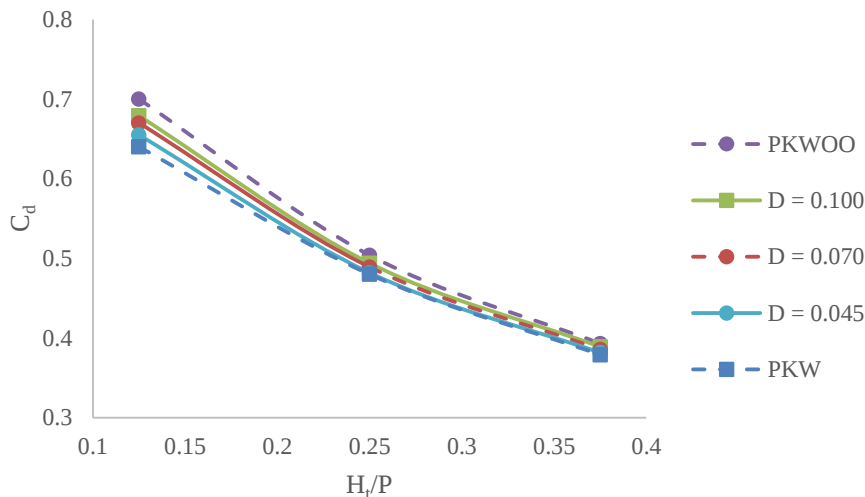


Fig. 10. Effect of changing H_t/P on C_d

است). همچنین در نسبت‌های آبی بزرگتر از ۰/۳ افزایش نسبت آبی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در دبی نسبی عبوری از روزنه نخواهد داشت. (شیب نمودارها به صفر میل می‌کند)

شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای دبی نسب روزنه برای قطرهای مختلف روزنه

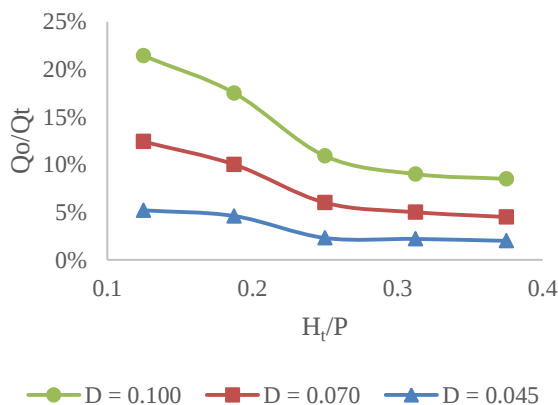


Fig. 11. Comparison of (Q_o/Q_t) values for different diameters

انتظار می‌رفت به علت تاثیر جریان ریزشی از سرریز بر دبی عبوری از روزنه، تغییرات دبی نسبی روزنه با پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر آن، در مدل ترکیبی و استفاده جداگانه، متفاوت باشد؛ لیکن دبی عبوری از روزنه بر خلاف انتظار با مقدار محاسبه شده از رابطه مستقل روزنه (۱۲)، برابر بوده و نتایج بدست آمده سهم یکسان از دبی عبوری را برای روزنه منفرد در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

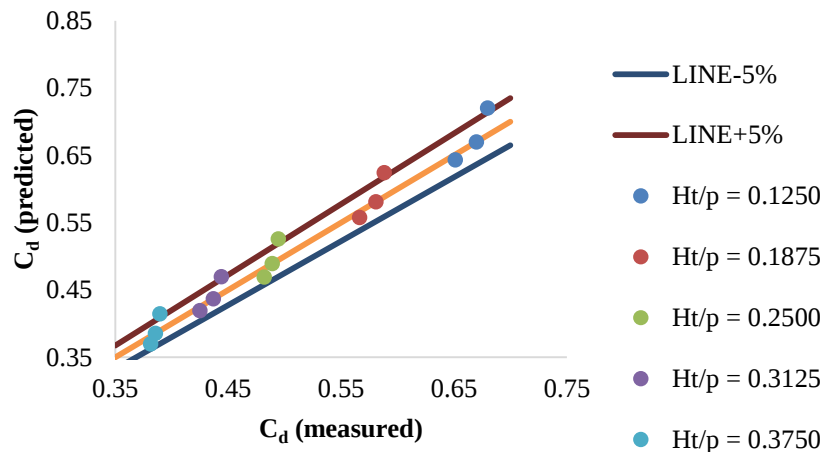
۳-۶- بررسی تاثیر ارتفاع آب روی سرریز

در شکل (۱۰) تغییرات ضریب آبگذری سرریز ترکیبی در مقابل نسبت آبی، برای سه نسبت بازشدگی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی بدون روزنه (PKW) و سرریز ترکیبی با روزنه دوتایی (PKWOO)، نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در نسبت‌های آبی پایین، تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{H_t}{P}$ بیشتر بوده و با افزایش نسبت آبی، نمودارهای ضریب آبگذری به یکدیگر همگرا می‌شوند. در بهترین حالت ضریب آبگذری سرریز ترکیبی با روزنه منفرد و دوتایی نسبت به سرریز کلیدپیانویی بدون روزنه به ترتیب ۶٪ و ۹٪ افزایش خواهد داشت. همچنین با افزایش نسبت $\frac{H}{D}$ ، ضریب آبگذری کاهش یافته، به طوریکه شدت تغییرات برای $\frac{H}{D}$ کمتر از ۱۰ بیشترین مقدار و برای نسبت‌های بزرگتر از ۱۵، تغییرات ضریب آبگذری ناچیز است.

۳-۷- بررسی دبی نسبی روزنه منفرد

برای محاسبه دبی نسبی روزنه از مقطع خوانش دبی که در بالای روزنه و در مقطع صفر تعبیه شد، استفاده شد. نمودار شکل (۱۱) درصد دبی عبوری از روزنه (دبی نسبی روزنه) را به ازای نسبت آبی $\frac{H_t}{P}$ برای مقادیر متفاوت قطر روزنه، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش دبی کل، سهم روزنه کاهش یافته و این تغییرات در نسبت بازشدگی بزرگتر، شدت بیشتری دارد (شیب نمودار بیشتر

شکل ۱۲. نمودار مقایسه ضریب آبگذری پیش بینی شده و آزمایشگاهی برای نسبت‌های مختلف آبی

Fig. 12. Comparison of measured and predicted discharge coefficient for different water head (H_t/P)

مطلوب این نوع سرریز در نسبت‌های آبی $\frac{H_t}{P}$ پایین‌تر، استفاده از روزنه به عنوان سازه ترکیبی با سازه اصلی از جمله راهکارهایی است که موجب بهبود کارایی سرریز می‌شود. در این پژوهش تغییرات ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی در ترکیب با روزنه در مرکز پاشنه سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد دبی عبوری از روزنه در مقایسه با نتایج رابطه مستقل محاسبه دبی روزنه‌ها، تغییر چشمگیری نخواهد داشت، لیکن راندمان هیدرولیکی سرریز ترکیبی افزایش خواهد یافت. کاهش ارتفاع روزنه منفرد با قطر ثابت برای نسبت‌های آبی مختلف ضریب آبگذری را بین ۰/۵ تا ۳ درصد افزایش می‌دهد. این افزایش برای نسبت بازشدگی $\frac{A_o}{A_w}$ بزرگتر، شدیدتر است. در بهترین حالت شامل حد ارتفاعی پایین و در ترکیب مقطع دایره‌ای روزنه منفرد با بیشینه بازشدگی ۰/۰۵، ارتفاع آبی روی لبه سرریزشونده ۶ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی بدون روزنه کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه ضریب آبگذری سرریز طبق رابطه عمومی سرریزها با کاهش هد افزایش می‌یابد، پس ضریب آبگذری سرریز ترکیبی در ترکیب با سه قطر ۰/۰۴۵، ۰/۰۷ و ۰/۱ و برای نسبت‌های آبی $\left(\frac{H_t}{P}\right)$ بین ۰/۱۲۵ تا ۰/۳۷۵، بین ۰/۵ تا ۶ درصد افزایش خواهد یافت. استفاده از روزنه‌های دوتایی و همسان با نسبت بازشدگی یکسان در مقایسه با روزنه منفرد، نشان از افزایش ضریب آبگذری، با افزایش فاصله برای قطر و تعداد یکسان روزنه دارد. به این ترتیب در بهترین حالت ضریب آبگذری سرریز ترکیبی نسبت به سرریز بدون روزنه حداکثر ۹ درصد افزایش می‌یابد.

۳-۸- ارائه رابطه پیشنهادی

طبق آنالیز ابعادی با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد رابطه (۸)، ضریب آبگذری سرریز ترکیبی را می‌توان به صورت ضرب توابعی از متغیرهای مستقل H_t/P ، A_o/A_w و H/D نوشت. رابطه (۱۴).

$$C_d = K1 \left(\frac{H_t}{P} \right) K2 \left(\frac{A_o}{A_w} \right) K3 \left(\frac{H}{D} \right) \quad (14)$$

پس در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اکسل، ابتدا توابع مورد نظر برای متغیرهای فوق برازش داده شده و سپس ضرایب مربوطه با هدف کمینه کردن تابع هدف میانگین خطای مطلق (MAE) تعیین شده است. بدین ترتیب رابطه (۱۵) برای پیش‌بینی ضریب آبگذری سرریز ترکیبی پیشنهاد می‌شود.

$$C_d = 0.5 \left(\frac{H_t}{P} \right)^{-0.5} \left(\frac{A_o}{A_w} \right)^{0.02} \left(-0.0025 \left(\frac{H}{D} \right) + 0.55 \right) \quad (15)$$

چنانکه در شکل (۱۲) نمایش داده شده است، مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی عددی و نتایج پیش‌بینی حاصل از رابطه (۱۵) با تقریب خوبی در محدوده خطای ۰/۹۵ قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

سرریزهای کلیدپیانویی از جمله سرریزهای هستند که در عرض محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به عملکرد

- [10] Mirnaseri M., Emadi A. 2014 Hydraulic Performance of Combined Flow Labyrinth Weir-Gate. *Advance in Agriculture and Biology*, 2(2), 54-60.
- [11] Karami H., Karimi S., Bonakdari H., Shamshirband Sh. 2016 Predicting discharge coefficient of triangular labyrinth weir using extreme learning machine, artificial neural network and genetic programming. *Neural Comput & Applic*, 29(11), 983-989.
- [12] Safarzadeh A., Noroozi B. 2017 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. *Int J Civ Eng*, 15, 89-101.
- [13] Saad Neveen Y., Fattouh Ehab M. 2016 Hydraulic characteristics of flow over weirs with circular openings. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(4), 515-522.
- [14] El-Belasy, A.M. 2012 Developing Formulae for combined weir and orifice (case study: EL-Fayoum weirs). *Alexandria Engineering Journal*. 52, 763-768.
- [15] Balouchi B., Zinivand M. 2012 Experimental Investigation on Discharge Coefficient for Combined Structure of Weir-Gate under Flood Conditions. *Water and Soil Science*, 22(2), 151-164. (In Persian)
- [16] Gharahgezlou M., Masoudian M., Haber B., Salehi Neyshaboury S.A.A. 2013 Effect of weir flow on gate discharge in combined cylindrical weir-gate. *Journal of Irrigation and Water eng.*, 11(3), 86-95. (In Persian)
- [17] Gholizadeh M., Ghodsian M., Panahi R. 2016 Numerical study of effect of Crest shape on Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weir. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(4), 225-237. (In Persian)
- [18] Ilkhanipour Zeynali R., Kashefipour Dezfouli M., Mousavi Jahromi H., Fathimoghadam M. 2017 Influence of the Gate and Weir Interaction on Discharge characteristics of the Weir-Gate Combined Flow Structure. *Water and Soil Science*, 27(2), 283-291. (In Persian)
- [19] Anderson, R. M. and Tullis, B. P. 2013 Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 139(3), 246-253.

References

۵- مراجع

- [1] Darvas L.A. 1971 Discussion of 'Performance and design of labyrinth weirs,' by Hay and Taylor. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 97(80), 1246-1251.
- [2] Safarzadeh A., Noroozi, B. 2014 Three Dimensional Hydrodynamics of Arced Piano Key Spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3), 61-79. (In Persian)
- [3] Blanc P. & Lempérière F. 2001 Labyrinth spillways have a promising future. *International Journal of Hydropower and Dams*, 8(4), 129-131.
- [4] Leite Ribeiro M., Albalat C., Boillat J. L., Schleiss A. J. & Laugier F. 2007 Rehabilitation of St-Marc dam: Experimental optimization of a piano key weir. In *Proceedings of 32th IAHR Congress*, Venice, Italy.
- [5] Leite Ribeiro M., Bieri M., Boillat J. L., Schleiss A. J., Delorme F. & Laugier F. 2009 Hydraulic capacity improvement of existing spillways, Design of piano key weirs. In *Proceedings of 23rd congress of CIGB/ICOLD*, Brasilia.
- [6] Leite Ribeiro M., Pfister M., Schleiss A.J. & Boillat J-L. 2012 Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 400-408.
- [7] Anderson R.M. & Tullis B.P. 2012 Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 138(4), 358-361.
- [8] Machiels O., Piroton M., Pierre A., Dewals B., Erpicum B. 2014 Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 52(3), 326-335.
- [9] Mehboudi A., Attari, J., Hosseini, S.A. 2016 Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal pianokey weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50(2), 65-72.

Evaluation of Circular Orifice Effect on Discharge Coefficient Of Piano-Key Weirs, Using FLOW-3D

A. Amiri¹, H. Karami^{2*}, S. Farzin², M.R. Nikpour³

1- M.Sc. Student of Water Eng. and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

2- Assistant Professor, Department of Water Eng. and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

3- Assistant Professor. Department of Water Engineering. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Hkarami@semnan.ac.ir

Abstract

Weirs are types of the hydraulic structures that are used in water supply systems and irrigation channels for different purposes including; increasing the upstream water depth, to measure the flow discharge, to divert or evacuate the excess water flow from dams and open channels. One of an effective and economical solution in order to weir efficiency is using nonlinear weirs, Which can cause the increase of the flow over weir by changing in geometric plan and increasing in weirs length in fixed widths of the channel. These structures increase the water level and water storage volume in the reservoirs of dam. Piano Key Weir (PKW) is one of the nonlinear hydraulic structures that its geometrical shape increases the discharge coefficient of flow over weir. Discharge coefficient at these weirs is a function of upstream water head to weir height ratio (H_t/P).

In this study, the hydraulic performances of PKW has been simulated by using FLOW-3D software and also it has been validated by the experimental model with 5 different discharges ($75 < Q < 225$ Lit/s).

For this aim the laboratory data of Machiels et al. (2014) is used to validate the numerical model. A PKW located in a channel with (0.75 m wide $\times$ 3 m long $\times$ 0.8 m high) and was simulated for 2.5 units of a 0.3 m wide PKW model. These researchers show that a PKW design with a height ratio P/W_u equal to 1.3, a keys widths ratio W_t/W_o equal to 1.25 and an overhangs lengths ratio B_o/B_i equal to 3 was found to provide the highest discharge capacity when the L/W ratio is equal to 5. Therefore these ratios were used in this study for numerical modeling.

In the following K- ϵ and RNG turbulence models were used to select the appropriate turbulence model for modeling of this PKW. For evaluating the simulation accuracy, three statistical indices of R^2 , RMSE and MAE were used. Results revealed that RNG model presented the best responses for ratio of upstream water head to weir height (H_t/P).

In the following, the discharge coefficient (C_d) has been measured and evaluated with the creation of single and double circular orifice on the heel of weir (P_d), For the different water head and in relation to without dimension parameters $\frac{H}{D}, \frac{H_t}{P}, \frac{A_o}{A_w}, \frac{d}{D}$.

Findings shown with the expansion orifice diameter, discharge coefficient of combined weir -with the maximum opening $A_o/A_w = 0.5$ - is increasing between 0.5 to 6% in comparison to without orifice PKW., besides, with the rise in the high of single orifice ,which has a fixed diameter, the discharge coefficient is reducing. From the other side, the usage of double orifices increase the discharge coefficient in comparison to the single type at the same opening size, in a way that by increase in the distance of orifices, at first, it faces to the decreasing trend and then by reaching to $d/D = 2$ it starts revising. Maximum increasing in this type for the best position is 9% in comparison to without orifice PKW. Finally, an equation is provided for the estimation of the discharge coefficient by benefiting without dimension parameters with $R^2 = 0.95$.

Keywords: Combined weir, Discharge Coefficient, Numerical Modeling, Orifice, Piano-Key weir.