

بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی غیرخطی در پلان

علیرضا رضائی آهوانویی^۱، سید فرهاد موسوی^{۲*}، حجت کرمی^۳

- ۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- ۲- استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- ۳- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

fmousavi@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۹۷/۸/۱۳]

چکیده

در این پژوهش، به بررسی راهکارهایی برای بهبود عملکرد و همچنین افزایش ضریب آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی غیرخطی در پلان پرداخته شده است. بدین منظور، تغییراتی در شکل هندسی این نوع سرریز به وجود آورده و نتایج این تغییرات با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D بررسی شده است. یکی از این تغییرات، تغییر شکل تاج س رریز است. پس، سه مدل سرریز با تاج‌های مستطیلی، مثلثی و بیضوی طراحی شد. نتایج نشان داد که سرریز تاج مثلثی تا حدود ۶۰ درصد نسبت به سرریز تاج بیضوی و تا حدود ۶۵ درصد نسبت به سرریز تاج مستطیلی، از ظرفیت آبگذری بیشتری برخوردار بود. در قسمت دوم این پژوهش، به تأثیر وجود و یا عدم وجود و همچنین شکل هندسی پشت‌بند بر عملکرد این نوع از سرریزها پرداخته شد. بدین منظور، سه مدل سرریز با پشت‌بندهای مکعب مستطیلی، نیم‌استوانه‌ای و منشوری طراحی شده و با سرریز بدون پشت‌بند مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در دبی‌های کم، پشت‌بند باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز شده و همچنین در بین پشت‌بندها نیز پشت‌بند نیم‌استوانه‌ای عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به سایر پشت‌بندها داشت. ولی با افزایش دبی عبوری، از تأثیر عملکرد پشت‌بند کاسته شده و به تدریج ضریب دبی سرریزهای پشت‌بنددار و بدون پشت‌بند به یکدیگر نزدیک شدند. در آخر نیز تأثیر دیوار جان‌پناه بر عملکرد این نوع سرریزها بررسی شد. در این مورد، دیواره‌ای به ارتفاع ۱/۳ سانتی‌متر به تاج سرریز افزوده شد. نتایج نشان داد که این عمل تا حدود ۷ درصد باعث افزایش ضریب آبگذری می‌شود. به‌طور کلی، در هدهای زیاد جریان، عوامل بهبود دهنده اثر محسوسی در عملکرد سرریز ندارند.

واژه‌های کلیدی: سرریز کلیدپیانویی غیرخطی، شکل تاج، پشت‌بند، دیوار جان‌پناه، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

[1]. به لحاظ اقتصادی، بخش قابل توجهی از هزینه‌های ساخت سد مربوط به سرریز است. پژوهشگران، با بررسی انواع مختلف سرریزها، به این نتیجه رسیده‌اند که سرریزهای

سرریزها سازه‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری دبی و همچنین کنترل جریان در کانال‌ها و سدها استفاده می‌شوند

به صورت خطی در پلان قرار گرفته‌اند پرداخته و تأثیر مثبت این دو عامل در افزایش ضریب آبگذری را مشاهده نموده‌اند [11-12]. صفرزاده و نوروزی نشان دادند که اگر سرریز کلیدپیانویی به صورت غیرخطی در پلان اجرا شود می‌تواند تا حدود ۳۰ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی خطی با تعداد کلید یکسان، افزایش ضریب آبگذری داشته باشد [13].

افضلیان با بررسی هندسه‌های مختلف پایه سرریز کلیدپیانویی مشاهده نمود که پایه مثلثی بهترین عملکرد هیدرولیکی را در مقابل سایر پایه‌های بررسی شده از خود نشان می‌دهد [14].

روشنگر و همکاران با ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی انحنادار مشاهده نمودند که با افزایش زاویه سیکل قوسی، ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی افزایش می‌یابد [15].

البغدادی و خساف با بررسی تأثیر تغییر طول تاج سرریز کلیدپیانویی بر ظرفیت آبگذری آن مشاهده نمودند که افزایش طول تاج، تأثیر عمده‌ای بر ظرفیت آبگذری این مدل سرریز دارد [16].

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در زمینه سرریزهای کلیدپیانویی مطالعاتی انجام گرفته است. اما در خصوص عملکرد این نوع سرریز در پلان انحنادار و همچنین عوامل بهبود دهنده عملکرد هیدرولیکی آنها مطالعات اندکی صورت گرفته است. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی عواملی است که می‌توانند باعث بهبود عملکرد این نوع سرریز و همچنین افزایش کارایی هیدرولیکی آن شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

نرم‌افزار FLOW3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب احجام محدود حل می‌کند. به این صورت که، محیط جریان به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود و همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند، به غیر از سرعت، که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود. معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات اندازه حرکت و پیوستگی هستند که در ادامه به توضیح هر یک پرداخته شده است.

کلیدپیانویی نسبت به سایر سرریزها از دو مزیت عمده برخوردارند. یکی از مهمترین مزیت‌های سرریز کلیدپیانویی این است که این نوع سرریز برای اجرا به فضای کمتری نیاز داشته و می‌تواند ابعاد کوچکتری داشته باشد [2]. ابعاد کوچکتر باعث صرفه‌جویی در حجم بتن مصرفی و در نهایت کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌شود. از دیگر مزیت‌های مهم این نوع سرریز، قابلیت گذردهی جریان بیشتر نسبت به سایر سرریزها است، که این عامل می‌تواند به حفظ ایمنی سد کمک بسیاری کند [3]. سرریز کلیدپیانویی در واقع فرمت بهبودیافته سرریز کنگره‌ای است و تاکنون مطالعات گسترده‌ای در باره این دو نوع سرریز و همچنین راهکارهای بهبود عملکردشان انجام گرفته است. لیت ریبریرو و همکاران مشاهده نمودند که با اضافه کردن یک دیواره روی سرریز کلیدپیانویی، ظرفیت تخلیه افزایش می‌یابد [4]. اندرسون و تولیس نصب دماغه در زیر شیروانی‌های بالادست سرریز کلیدپیانویی را مؤثر گزارش نمودند [5]. نتایج کورکستون و تولیس در مورد سرریزهای کنگره‌ای غیرخطی نشان داده که توسعه سرریز به داخل مخزن، در شرایطی که سیکل‌های سرریز روی قوسی از دایره قرار گیرند، افزایش ضریب آبگذری را در پی دارد [6]. ماچیلِس با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار، سطح آب و همچنین ساخت مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی، به معادلاتی برای برآورد دبی کلیدهای ورودی، خروجی و تاج جانبی دست یافت [7].

کریستنسن اثر تعداد سیکل‌ها بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای قوسی را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسید که با افزایش تعداد سیکل‌ها، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد [8].

ماچیلِس و همکاران با بررسی اثر دیوار سپری بر عملکرد سرریز کلیدپیانویی مشاهده نمودند زمانی که ارتفاع کل سرریز کمتر از مقدار بهینه باشد، استفاده از دیوار سپری می‌تواند باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز شود [9].

اندرسون و تولیس مشاهده نمودند که ظرفیت آبگذری سرریز با افزایش نسبت W_i/W_0 ، W_i عرض کلید ورودی و W_0 عرض کلید خروجی، افزایش می‌یابد [10]. صفرزاده و نوروزی به بررسی تأثیر دیوار جان‌پناه و همچنین تأثیر شکل هندسی پشت‌بند بر عملکرد سرریزهای کلیدپیانویی که

۲-۱-۱- معادلات اندازه حرکت

معادلات اندازه حرکت برای اجزای سرعت سیال در سه جهت مختصات (u, v, w) ، معادلات ناویر-استوکس است که به شرح زیر مورد استفاده قرار می گیرند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_X \frac{\partial u}{\partial x} + vA_Y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_X + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_X \frac{\partial v}{\partial x} + vA_Y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_Y + f_y \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_X \frac{\partial w}{\partial x} + vA_Y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_Z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_Z + f_z$$

در معادله (۱)، فشار p ، G_x ، G_y و G_z شتابهای بدنه، f_x ، f_y و f_z شتابهای ناشی از لزجت و A_x ، A_y و A_z جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهات x ، y و z است.

۲-۱-۲- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی به طور کلی به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (2)$$

که V_F کسر حجمی جریان، ρ چگالی سیال، u و v و w اجزای سرعت در جهات x ، y و z است.

۲-۲- تعیین ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی

ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی با استفاده از معادله عمومی سرریزهای لبه پهن به کمک رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} L \sqrt{2gH}^{1.5}} \quad (3)$$

که در این رابطه، Q دبی عبوری از سرریز، L طول تاج، H هد روی سرریز و C_d ضریب دبی است.

۲-۳- درستی آزمایشی

به منظور درستی آزمایشی نتایج مدل عددی، از مدل آزمایشگاهی اندرسون استفاده شده است [17]. در جدول (۱)، مشخصات هندسی این مدل آزمایشگاهی و در شکل (۱)، شماتیک یک سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای هندسی آن نمایش داده شده است. در جدول (۱)، ارتفاع سرریز، L طول تاج، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، S_i شیب کلید ورودی، S_o شیب کلید خروجی، W عرض سرریز، T ضخامت تاج، B_i طول شیروانی ورودی و B_o طول شیروانی خروجی است.

هندسه سه بعدی سرریز کلیدپیانویی استفاده شده در درستی آزمایشی به همراه شرایط مرزی و بلوکهای مش در شکل (۲) نشان داده شده است. در مرز ورودی بلوک ابتدایی، از شرط مرزی دبی حجمی (Volume flow rate) استفاده شده و مقدار دبی مورد نظر اعمال شده است. در مرز خروجی بلوک انتهایی از شرط مرزی خروجی (Outflow)، در مرزهای بالایی میدان و همچنین مرزهای بین بلوکها از شرط مرزی تقارن (Symmetry) و در مرز کف و مرزهای کناری میدان نیز از شرط مرزی دیوار (Wall) استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل سازی از یک سیستم با مشخصاتی شامل CPU (core i5) با قدرت 2.5GHZ و حافظه 4GB (RAM) استفاده شده است. بر اساس بررسی های صورت گرفته، به منظور رسیدن جریان به شرایط پایدار، زمان ۱۴ ثانیه برای همگرایی مدل و شکل گیری جریان دائمی کفایت می کند (شکل ۳).

شکل ۱. شماتیک سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای هندسی

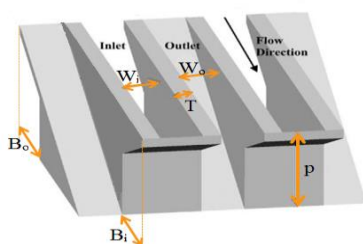


Fig. 1. Schematic diagram of piano-key weir with geometric parameters

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در درستی آزمایی

B_o	B_i	T	W	S_o	S_i	W_o	W_i	L	P
0.121	0.121	0.012	0.93	0.56	0.56	0.092	0.115	4.74	0.167

Table 1. Geometric properties of the laboratory model used for verification

جدول ۲. انتخاب تعداد سلولهای مش برای مدل عددی

Number of model	1	2	3
Mesh Block 1	31500	35000	38500
Mesh Block 2	270000	300000	330000
Mesh Block 3	13500	15000	16500
Time (hr)	6	7	9
R^2	0.99512	0.99604	0.99434
MAE	0.00606	0.00492	0.00711
RMSE	0.00003	0.00002	0.00005

Table 2. Select the number of mesh cells for the numerical model

شکل ۲. هندسه سه بعدی سرریز مورد استفاده در درستی آزمایی

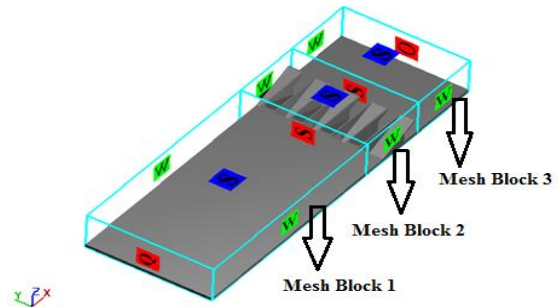


Fig. 2. Three-dimensional geometry of weir used for verification

برای تعیین بهترین مدل آشفتگی، پنج آزمایش بررسی شد و عملکرد مدل‌های RNG و K-ε با توجه به معیارهای اندازه-گیری خطا برای پارامتر بدون بعد H/P میان مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در بین دو مدل ارزیابی شده، مدل RNG با مقادیر ۰/۹۹۸۵۰، ۰/۰۰۸۰۴ و ۰/۰۰۹۵۲ نسبت به مدل K-ε با مقادیر ۰/۹۹۷۴۰، ۰/۰۱۰۹۴ و ۰/۰۱۱۴۶ به ترتیب برای شاخص‌های R^2 ، MAE و RMSE، با دقت بیشتر و خطای کمتری نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر شکل تاج در عملکرد سرریز

در این بخش، اثر شکل تاج بر عملکرد سرریز کلیدپیانویی انحنادار بررسی شده و بهترین شکل تاج که بیشترین ضریب آبگذری را فراهم آورد معرفی می‌شود. بدین منظور، سه مدل سرریز کلیدپیانویی انحنادار با تاج‌های مستطیلی (PKW(rc))، مثلثی (PKW(tc)) و بیضوی (PKW(sc)) در نرم افزار SOLIDWORK طراحی و به نرم‌افزار FLOW3D انتقال یافت. در این قسمت، به لحاظ اینکه فقط تأثیر شکل تاج بر عملکرد هیدرولیکی سرریز بررسی شود، ابعاد کلی سرریز از جمله عرض کلیدها، شیب کلیدها، طول تاج و ... یکسان در نظر گرفته شده است. ابعاد هندسی این سرریز پایه (PKW) در جدول (۳) و پلان و نیم‌رخ طولی آن در شکل (۴) ارائه

شکل ۳. روند همگرایی مدل به حالت دائمی بر اساس تغییرات زمانی

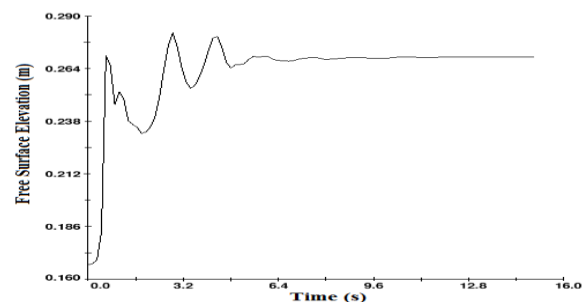


Fig. 3. Model convergence trend to permanent mode based on time variation

در مدل عددی شبیه‌سازی شده، از سه بلوک مش در بالادست، محل قرارگیری سرریز و همچنین پایین دست آن استفاده شده است. به علت عمومیت و کارایی بالا، مدل آشفتگی انتخابی برای گزینش شبکه مش مناسب، مدل RNG است. برای انتخاب مش بهینه، سه نوع مش بندی با تعداد سلول‌های متفاوت انتخاب و برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل مش بندی از معیارهای اندازه‌گیری خطا شامل ضریب تعیین (R^2)، میانگین مطلق خطا (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای پارامتر بدون بعد نسبت عمق جریان روی سرریز به ارتفاع سرریز (H/P) استفاده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) در رابطه با معیارهای اندازه‌گیری خطا و همچنین زمان صرف شده آنالیز برای سه مدل مش بندی مختلف، مدل شماره ۲ به عنوان مش بهینه برای مدل‌سازی سرریز کلیدپیانویی انتخاب شده است.

متفاوت نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش دبی از ۰/۰۶۵ به ۰/۰۷ متر مکعب بر ثانیه، نواحی بیشتری از سرریز دچار استغراق موضعی شده و این عامل باعث کاهش ضریب آبگذری شده است. با توجه به منحنی‌های ضریب دبی، در بارهای هیدرولیکی کم، سرریز PKW(tc)، ضریب آبگذری بسیار بیشتری نسبت به سرریزهای PKW(sc) و PKW(rc) دارد. ولی با افزایش بار هیدرولیکی، ظرفیت آبگذری هر سه سرریز به یکدیگر نزدیک می‌شود. در شکل (۸)، کانتور سطح جریان عبوری از سرریزهای PKW(rc) و PKW(sc) و PKW(tc) در $Q=0.01$ متر مکعب بر ثانیه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه ارتفاع جریان در محل ورود به کلید خروجی در سرریز PKW(rc)، حدود ۴۰ درصد نسبت به سرریز PKW(sc) و حدود ۶۸ درصد نسبت به سرریز PKW(tc) بیشتر است. هرچه ارتفاع جریان در این منطقه بیشتر باشد، احتمال ایجاد انسداد و گرفتگی جریان در کلیدهای خروجی افزایش می‌یابد. در محدوده مورد مطالعه، سرریز PKW(tc) به‌طور متوسط حدود ۵۴ درصد ظرفیت آبگذری بیشتری نسبت به سرریز PKW(sc) و سرریز PKW(sc) حدود ۱۳ درصد ظرفیت آبگذری بیشتری نسبت به سرریز PKW(rc) دارد.

شده است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از ایجاد حالت استغراق در پایین دست، سرریزها روی یک سکو به ارتفاع ۰/۰۸ متر قرار گرفته‌اند. محدوده تغییرات دبی در این بخش بین ۶/۵ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این محدوده، بررسی مقادیر کمینه و بیشینه میزان دبی ورودی به کانال در پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگر و سعی بر امکان پذیر بودن انجام این پژوهش عددی به صورت آزمایشگاهی است. شکل سه بعدی به همراه ابعاد تاج سرریزهای PKW(sc)، PKW(rc) و PKW(tc) در شکل (۵) ارائه شده است. در شکل (۶)، منحنی تغییرات ضریب دبی این سرریزها با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در سرریزهای PKW(rc) و PKW(sc) با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی طی می‌کند. همچنین، در سرریز PKW(tc)، ضریب آبگذری روندی کاملاً نزولی طی می‌کند. دلیل این امر این است که با افزایش دبی در مرز ورودی و به تبع آن افزایش بار هیدرولیکی، در اثر برخورد لایه‌های جریان عبوری از سرریز، یک ناحیه تداخل در کلیدهای خروجی شکل گرفته و این کلیدها حالت غوطه‌وری پیدا می‌کنند. در نتیجه سطح آب به صورت موضعی از تاج بالاتر رفته و این نواحی دچار استغراق موضعی می‌شوند. در شکل (۷)، کانتور حجم سیال در تراز تاج سرریز در دو دبی

جدول ۳. ابعاد هندسی سرریز پایه (PKW)

N	W	T	B _o	B _i	S _o	S _i	θ	γ	W _o	W _i	L	P
5	1.04	0.0127	0.0485	0.0485	0.55	0.55	12	28	0.037	0.0462	2.15	0.0668

Table 3. Geometric dimensions of base weir (PKW)

شکل ۴. سرریز پایه (PKW). الف) پلان و ب) نیم‌رخ طولی

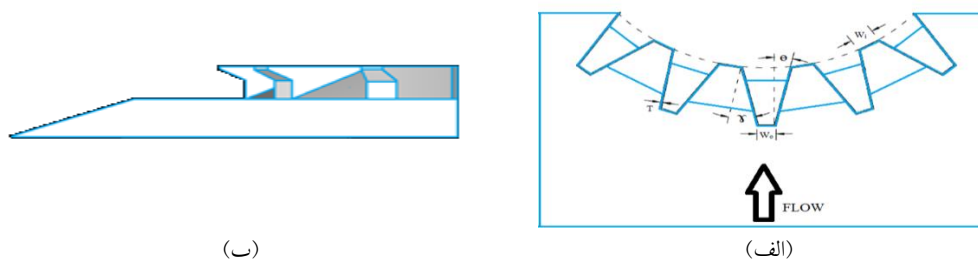


Fig. 4. Base weir (PKW), a) Plan and b) Longitudinal profile

شکل ۵. هندسه سه بعدی و ابعاد تاج (بر حسب متر) سرریزهای: الف) PKW(rc)، ب) PKW(sc) و ج) PKW(tc)

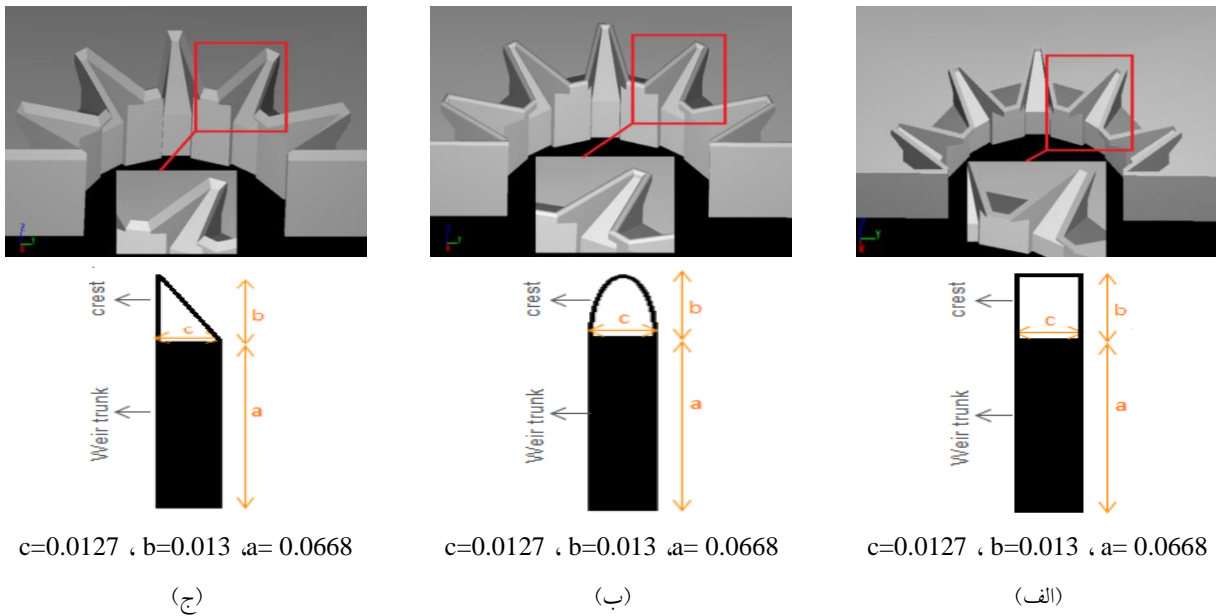


Fig. 5. Three-dimensional geometry and crown dimensions (m) of weirs: a) PKW(rc), b) PKW(sc) and c) PKW(tc)

شکل ۶. مقایسه ضرایب دبی در سرریزهای PKW(sc)، PKW(rc) و PKW(tc)

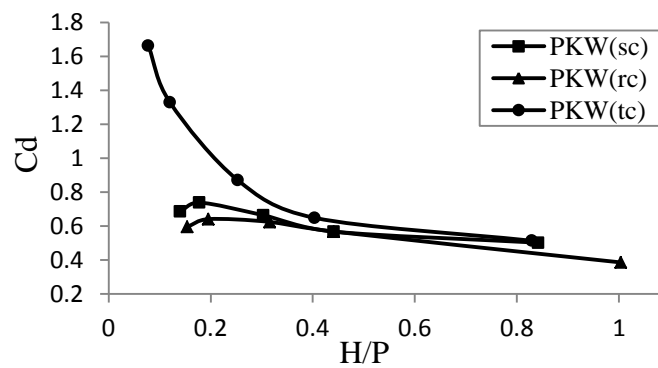


Fig. 6. Comparison of discharge coefficients in PKW(sc), PKW(rc) and PKW(tc) weirs

شکل ۷. کانتور حجم سیال در تراز تاج سرریز، الف) $Q=0.0065$ و ب) $Q=0.07$

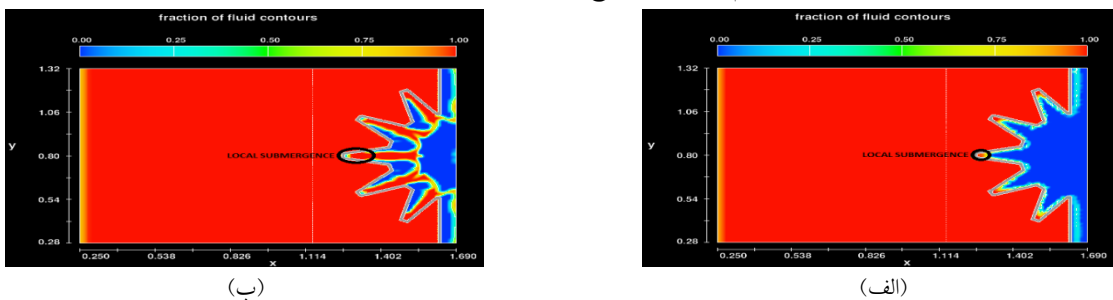


Fig. 7. Contour of fluid volume at the weir-crest level: a) $Q = 0.0065$ and b) $Q=0.07$

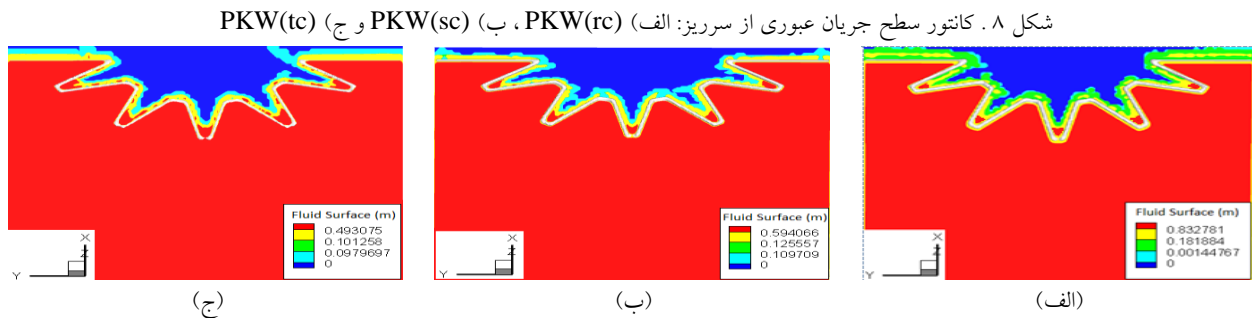


Fig. 8. Surface contour of flow through the weirs: a) PKW(rc), b) PKW(sc) and c) PKW(tc)

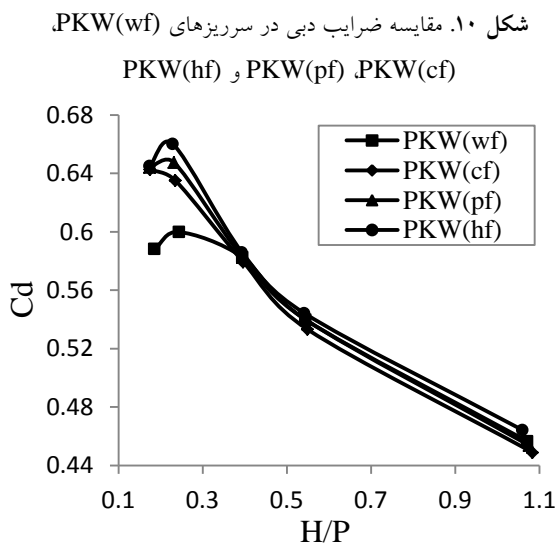


Fig. 10. Comparison of discharge coefficients of weirs: PKW(wf), PKW(cf), PKW(pf) and PKW(hf)

در شکل (۱۰) منحنی تغییرات ضریب دبی سرریزهای PKW(wf), PKW(cf), PKW(pf) و PKW(hf) با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر چهار سرریز، با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی طی می‌کند. همچنین به ازای تمام بارهای هیدرولیکی، سرریز PKW(hf) دارای ظرفیت آبگذری بیشتری نسبت به سایر سرریزها است.

برای بررسی بیشتر در این باره، ابتدا به بررسی توزیع خطوط جریان در دبی ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه در این سرریزها پرداخته می‌شود (شکل ۱۱). در سرریز PKW(wf)، جریان پس از برخورد به زیر کلید خروجی، به علت مسطح بودن پیشانی این کلیدها، دچار انحراف بسیار زیاد شده که در مقایسه با سرریزهای پشت‌بنددار این انحراف طولی بسیار

۳-۲- بررسی تأثیر شکل پشت‌بند در عملکرد سرریز

در این قسمت، تأثیر وجود یا عدم وجود و همچنین شکل هندسی پشت‌بند بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی انحنادار بررسی می‌شود. بدین منظور، سه مدل سرریز با پشت‌بندهای مکعب مستطیلی (PKW(cf)، نیم‌استوانه‌ای (PKW(hf) و منشوری (PKW(pf) طراحی شده و با سرریز بدون پشت‌بند (PKW(wf) مقایسه شده است. مشخصات هندسی سرریز پایه مطابق با ابعاد ذکر شده در جدول (۳) است و تمامی پشت‌بندها به سرریز پایه افزوده شده‌اند. شکل سه‌بعدی این سرریزها در شکل (۹) نمایش داده شده است.

شکل ۹. هندسه سه‌بعدی سرریزها، الف): PKW(wf)، ب) PKW(cf)، ج) PKW(pf) و د) PKW(hf)

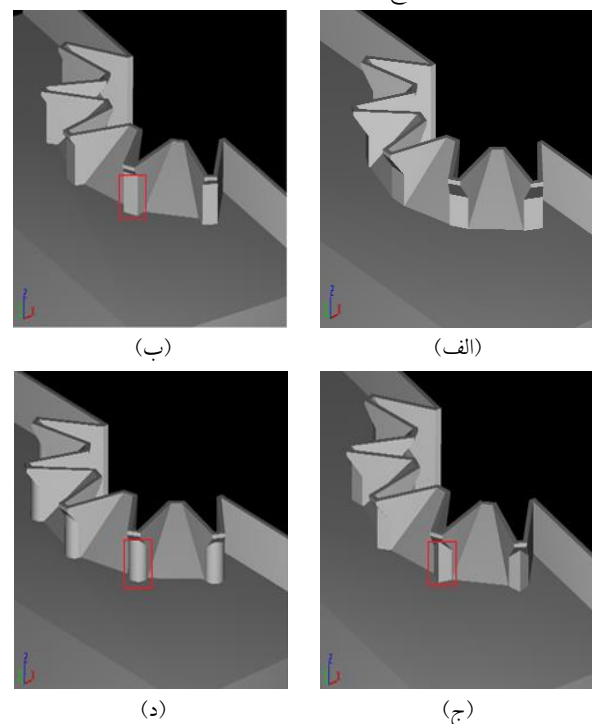


Fig. 9. Three-dimensional geometry of weirs, a) PKW(wf), b) PKW(cf), c) PKW(pf) and d) PKW(hf)

میانی در هر چهار سرریز انتخاب و دو نقطه، یکی نزدیک به رأس پیشانی‌بند (زیر کلید خروجی) و دیگری روی کلید خروجی در نظر گرفته شده و سپس اختلاف میانگین فشار در اطراف این دو نقطه محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف فشار روی کلید خروجی میانی در سرریز PKW(wf)، حدود ۳۰ درصد نسبت به سرریز PKW(hf)، ۲۰ درصد نسبت به سرریز PKW(pf) و ۸ درصد نسبت به سرریز PKW(cf) بیشتر است. با توجه به مفهوم فشار در این نقاط، هر چه اختلاف فشار کمتر باشد، دبی بیشتری می‌تواند از روی کلیدهای خروجی عبور کند.

بیشتر و زاویه انحراف تقریباً برابر ۹۰ درجه بوده و همین امر باعث کم شدن حجم آب ورودی به روی کلیدهای سرریز می‌شود. در بین سرریزهای پشت‌بنددار نیز در سرریز PKW(hf)، تغییر ناگهانی زاویه خطوط جریان پیش از برخورد با پشت‌بند در فاصله دورتری از انتهای پشت‌بند رخ داده که باعث ورود جریان با آشفتگی کمتر به داخل کلیدهای سرریز شده است. همچنین، جریان با خطوط ملایم‌تر و شکستگی کمتر به سمت کلیدهای ورودی هدایت شده است. پس از بررسی توزیع خطوط جریان، شبیه‌سازی توزیع فشار برای این چهار سرریز در دبی ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه بررسی می‌شود (شکل ۱۲). برای این منظور، کلید خروجی

شکل ۱۱. توزیع خطوط جریان برای سرریزهای: الف) PKW(wf)، ب) PKW(cf)، ج) PKW(pf) و د) PKW(hf)

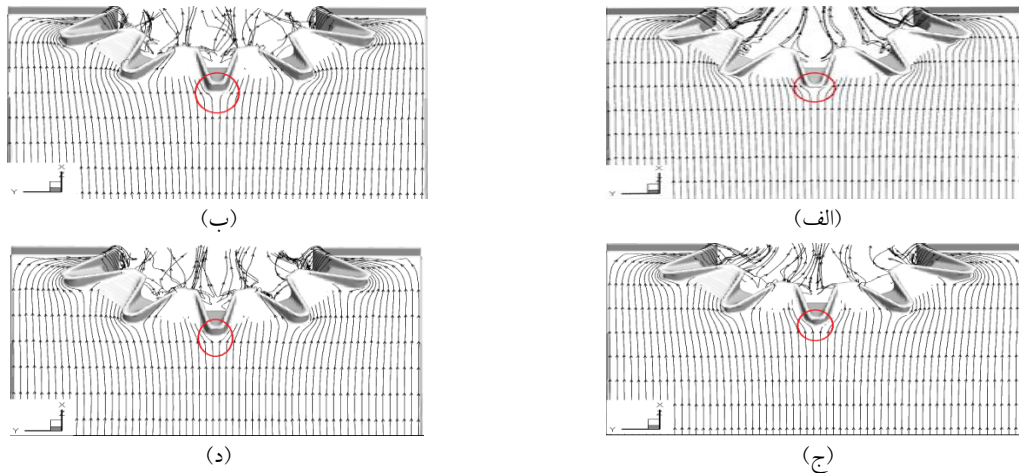


Fig. 11. Distribution of flow lines for weirs: a) PKW(wf), b) PKW(cf), c) PKW(pf) and d) PKW(hf)

شکل ۱۲. توزیع فشار برای سرریزهای: الف) PKW(wf)، ب) PKW(cf)، ج) PKW(pf) و د) PKW(hf)

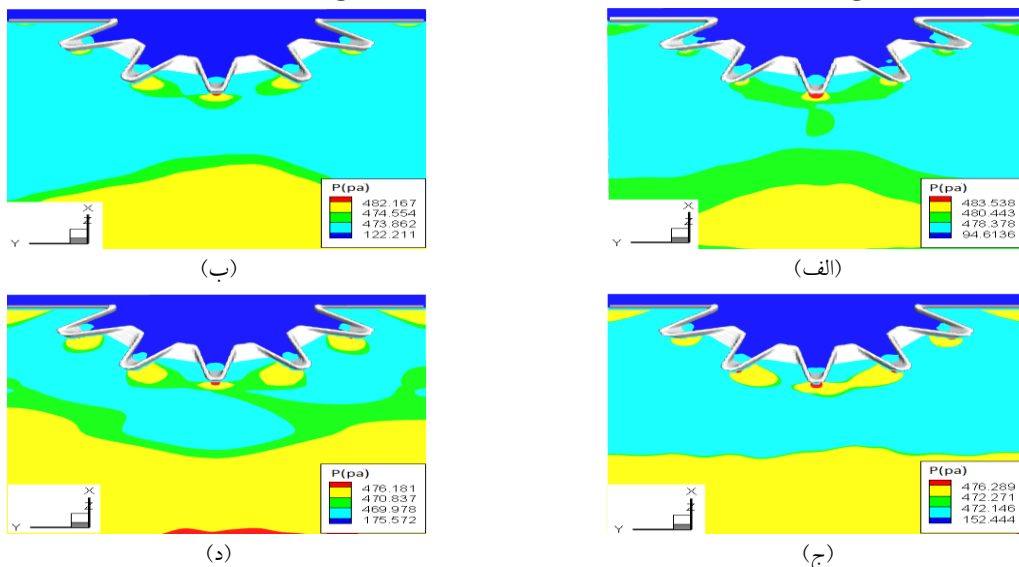


Fig. 12. Pressure distribution for weirs: a) PKW(wf), b) PKW(cf), c) PKW(pf) and d) PKW(hf)

محدوده سازه سرریز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش فشار منجر به کاهش سرعت در این محدوده می‌شود. کاهش سرعت در این محدوده باعث می‌شود جریان، فرصت بیشتری برای تخلیه از روی کلیدها داشته باشد و به صورت منظم‌تری به پایین دست تخلیه شود. همچنین، توزیع خطوط جریان در دو سرریز نشان می‌دهد که در سرریز PKW(hpw) نسبت به سرریز PKW(wpw)، جریان در فاصله کمتری از ابتدای کلید خروجی روی کلید فرود آمده و در واقع به‌طور مناسب‌تری از ظرفیت این کلید استفاده شده است. مجموعه این عوامل باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز PKW(hpw) شده است.

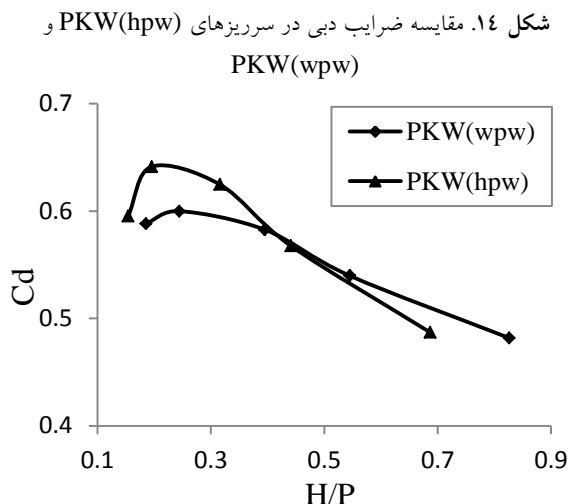


Fig. 14. Comparison of flow coefficients in PKW(hpw) and PKW(wpw) weirs

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عوامل تأثیرگذار بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی انحنادار در پلان بررسی شد و اثر عواملی همچون شکل تاج، پشت‌بند و دیوار جان‌پناه مشاهده شده، که نتایج حاصل به شرح زیر است:

- با افزایش دبی در مرز ورودی و به تبع آن افزایش هد جریان روی سرریز، به‌علت برخورد لایه‌های جریان و همچنین به‌وجود آمدن استغراق موضعی در کلیدها، ضریب آبگذری به‌طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند.

۳-۳- بررسی تأثیر دیوار جان‌پناه در عملکرد سرریز

در این بخش، تأثیر دیوار جان‌پناه بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی انحنادار بررسی می‌شود. بدین منظور، دیوارهای به ارتفاع ۱/۳ سانتی‌متر به تاج سرریز پایه اضافه شد. ابعاد سرریز پایه مطابق با جدول (۳) است. در شکل (۱۳)، فرم سه‌بعدی سرریز بدون دیوار جان‌پناه (PKW(hpw)) و سرریز دارای دیوار جان‌پناه (PKW(wpw)) نمایش داده شده است.

شکل ۱۳. هندسه سه‌بعدی سرریزهای: الف) PKW(wpw) و ب)

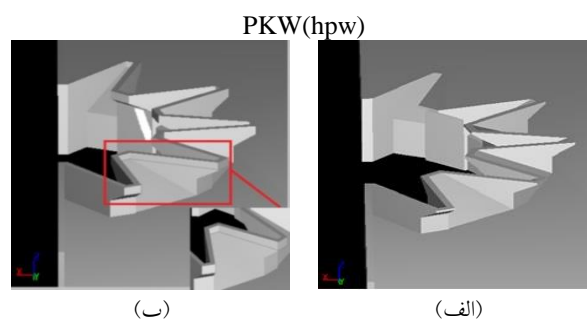


Fig. 13. Three-dimensional geometry of weirs: a) PKW(wpw) and b) PKW(hpw)

در شکل (۱۴)، منحنی تغییرات ضریب دبی سرریزهای PKW(hpw) و PKW(wpw) با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن دیوار جان‌پناه در هد‌های آب کم باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی و افزایش ظرفیت آبگذری سرریز شده است. اما با افزایش هد آبی، ظرفیت آبگذری هر دو سرریز کاهش یافته و تقریباً به یکدیگر نزدیک می‌شود. دلیل این امر این است که در بار هیدرولیکی کم، برخورد تیغه جریان عبوری از روی کلید خروجی و تاج جانبی رخ نداده و این امر باعث می‌شود که استغراق محلی روی کلید خروجی به‌وجود نیاید. اما با افزایش بار هیدرولیکی، استغراق محلی روی کلید خروجی به‌وجود آمده و این امر باعث کاهش ظرفیت تخلیه کلیدهای خروجی و در نتیجه کاهش ضریب آبگذری سرریز شده است. در شکل (۱۵) کانتورهای فشار، سرعت و همچنین توزیع خطوط جریان برای سرریزهای PKW(hpw) و PKW(wpw) در دبی ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱۵)، با افزودن دیوار جان‌پناه به سرریز، فشار در

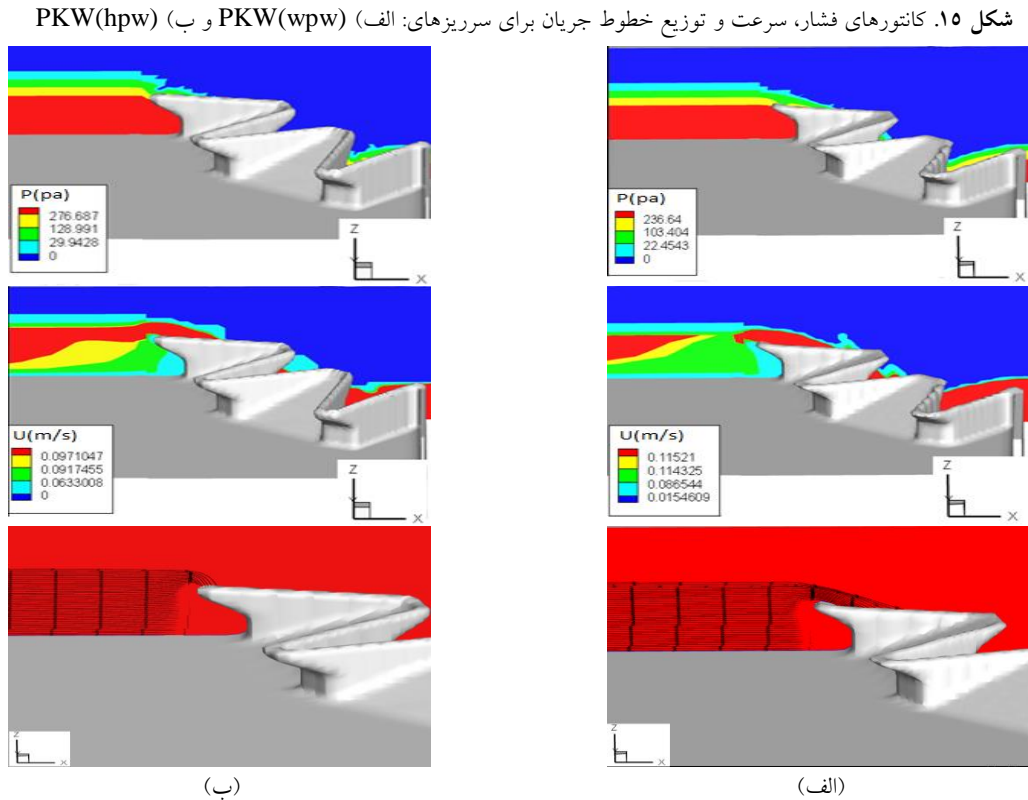


Fig. 15. Contours of pressure, speed and distribution of flow lines for weirs: a) PKW (wpw) and b) PKW(hpw)

گونه‌ای که بیشترین ضریب دبی که در هر سه مدل در دبی در مرز ورودی $Q=0/01$ متر مکعب بر ثانیه رخ داده برای مدل با پشت‌بند مکعب مستطیلی $C_d=0/63$ ، پشت‌بند منشوری $C_d=0/64$ و پشت‌بند نیم‌استوانه‌ای $C_d=0/66$ است. همچنین، در هدهای زیاد، عملاً تأثیر پشت‌بند در عملکرد هیدرولیکی سرریز بسیار ناچیز بوده و مقدار ضریب آبگذری سرریزهای پشت‌بنددار و بدون پشت‌بند به یکدیگر بسیار نزدیک می‌شود. - افزودن دیوار جان‌پناه به تاج سرریز کلیدپیانویی انحنادار باعث بالا آمدن سطح آب در این محدوده و در نتیجه کاهش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سازه سرریز می‌شود. این کاهش سرعت باعث می‌شود که احتمال ایجاد انسداد و گرفتگی کاهش یافته و همچنین جریان فرصت بیشتری برای خروج از کلیدهای سرریز داشته باشد. در نتیجه، افزودن دیوار جان‌پناه باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌شود.

- در بازه مطالعاتی $0/07 \leq Q \leq 0/065$ متر مکعب بر ثانیه، در بین سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار با شکل تاج‌های مثلث، بیضوی و مستطیل، بیشترین ظرفیت آبگذری متعلق به سرریز با شکل تاج مثلث است. با افزایش دبی در مرز ورودی، ضریب آبگذری سرریزهای با شکل تاج بیضوی و مستطیلی در ابتدا کمی روند افزایشی و سپس کاهشی به خود می‌گیرد. ولیکن در سرریز با شکل تاج مثلث، ضریب آبگذری با شدت بسیار زیادی افت می‌کند. به گونه‌ای که کمینه و بیشینه مقدار ضریب آبگذری این سرریزها در محدوده مورد مطالعه برای سرریز با شکل تاج مستطیل $(C_d)_{min}=0/38$ و $(C_d)_{max}=0/64$ ، تاج بیضوی $(C_d)_{min}=0/5$ و $(C_d)_{max}=0/73$ و تاج مثلث $(C_d)_{min}=0/51$ و $(C_d)_{max}=1/66$ است که این نشان‌دهنده افت محسوس ظرفیت آبگذری سرریز با شکل تاج مثلث در اثر افزایش دبی است.

- در هدهای کم جریان، افزوده شدن پشت‌بند باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی انحنادار می‌شود. ولی تفاوت چشم‌گیری بین ظرفیت آبگذری سرریزهای پشت‌بنددار با شکل‌های هندسی متفاوت پشت‌بند وجود ندارد. به-

References

۵- مراجع

[1] Vischer, D. L. and Hager, W. H. 1998. Dam hydraulics. Wiley, Switzerland.
 [2] Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., Delorme, F. and Laugier, F. 2009. Hydraulic

weir hydraulic performance. Fifth Conference on Water Resources Management, Tehran (In Persian).

[12] Safarzadeh, A. and Noroozi, B. 2013b. Numerical investigation of the effect of geometry shape of bundle on hydrodynamics of piano-key weir. Eighth National Congress on Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol (In Persian).

[13] Safarzadeh, A. and Noroozi, B. 2014. Three-dimensional hydrodynamics of curvilinear piano-key weirs in the plan. *J. Hydraulic*, 9(3), 61-79. (In Persian).

[14] Afzalian, A. R. 2014. Investigating hydraulic properties of PKW weirs under different base and lateral crest geometries. MSc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahwaz (In Persian).

[15] Roushangar, K., Alami, M.T., Shiri, J. and Majedi Asl, M. 2018. Evaluation of the effect of changing the cycle arc angle on discharge coefficient of arced labyrinth and arced piano key weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 341-351. (In Persian).

[16] Al-Baghdadi, M.B.N. and Khassaf, S.I. 2018. Evaluation of crest length effect on piano key weir discharge coefficient. *International Journal of Energy and Environment*, 9(5), 473-480.

[17] Anderson, R. M. 2011. Piano-key weir head discharge relationships. MSc. Thesis, Department of Hydraulic Structures, Utah State University, Logan, Utah, USA.

capacity improvement of existing spillways- Design of piano key weirs. Proceedings of 23rd Congress of CIGB/ICOLD, Brasilia.

[3] Lempérière, F. and Ouamane, A. 2003. The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *Int. J. Hydropower Dams*, 10(5), 144-149.

[4] Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. and Boillat, J. L. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at St-Marc Dam, France. *Int. J. Hydropower Dams*, 15(5), 100-107.

[5] Anderson, R. M. and Tullis, B. 2011. Influence of piano-key weir geometry on discharge. Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège, Belgium.

[6] Crookston, B. M. and Tullis, B. P. 2012. Discharge efficiency of reservoir-application-specific labyrinth weirs. *ASCE, J. Hyd. Eng.*, 138(6), 564-568.

[7] Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs. PhD Thesis, University of Liège, Belgium.

[8] Christensen, N. A. 2013. Flow characteristics of arced labyrinth weirs. MSc. Thesis, Utah State University, Logan, Utah, USA.

[9] Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. 2013. Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139(6), 506-511.

[10] Anderson, R. M. and Tullis, B. 2013. Piano-key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139(3), 246-253.

[11] Safarzadeh, A. and Noroozi, B. 2013a. Numerical investigation of the effect of parapet wall on piano key

Improvement of Hydraulic Performance of Nonlinear Piano-key Weirs in Plan

A.Rezaei Ahvanooei¹, S.F.Mousavi^{2*}, H.Karami

1 - MSc., Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University.

2* - Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University. Email: (fmousavi@semnan.ac.ir)

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

Abstract:

Weirs are structures used to measure discharge and flow control in canals and dams. Economically, a significant part of the cost of building a dam is due to weirs. By investigating different types of weirs, researchers have concluded that the piano-key weirs have two major advantages over other weirs. One of the most important advantages of a piano-key weir is that this kind of weir needs less space to run and can have smaller dimensions. Another important advantage of this type of weir is the ability to transmit more water than other weirs, which can safely protect the dam. A review of previous studies suggests that some studies have been carried out in the field of piano-key weirs. But, there are not sufficient studies on the performance of these types of weirs in curved plans as well as their hydraulic performance improvement factors. The main objective of the present research is to investigate the factors that can improve the performance of curvilinear piano-key and increase their hydraulic efficiency. In order to verify the results of the numerical model, the Anderson (2011) laboratory model has been used. Numerical modeling has been done for 5 inflow discharges in FLOW3D software. In order to quantitatively compare the results of the numerical model with laboratory values, some error criteria including R^2 , MAE and RMSE have been used. The values of these parameters were 0.9985, 0.00804 and 0.009521, respectively. Results showed that numerical model has acceptable adaptation to experimental results. In the next part of the paper, factors that can be effective in increasing the discharge capacity of the curvilinear piano-key weirs are investigated and analyzed based on the discharge coefficient curves and contours. In the first step, effect of crown shape on weir hydraulic performance was investigated and for this purpose three curvilinear piano-key weir models with rectangular, triangular and elliptical shapes were designed. Results showed that the weir with triangular crown had up to 60% higher discharge coefficient than the elliptical-crown weir and up to 65% more than the rectangular-crown weir. According to the general pattern of flow, in weirs with rectangular and elliptical crowns, the flowing flow clinging to trunk weir is discharged to downstream, while in weir with triangular crown, adhesion among flow and trunk of the weir is decreased. This factor increases discharge capacity of the weir with triangular crown in comparison to the other two weir types. In the next section, effect of existence or absence, as well as the geometric shape of the bundle, on the performance of these types of weirs was investigated. For this purpose, three weir models with cubic rectangular, half-cylindrical and prism bundles were designed and compared with a weir without bundle. Results showed that the bundle improved hydraulic performance of the weir. Also, for all the studied range of hydraulic heads, weir with half-cylindrical bundle had higher discharge capacity than the other weirs. The reason is that in the weir with half-cylindrical bundle, the sudden change in the angle of flow lines before collision with the bundle occurred further away from the end of the bundle, which caused flow entrance with less disturbance to the weir keys. Finally, the impact of a parapet wall on the weir operation was investigated. A 1.3 cm high parapet wall was added to the weir crown. Results showed that addition of the parapet wall increased the water level in the weir crown area and resulted in decreasing the velocity of approaching flow to the weir structure. Reduction of the velocity decreases the possibility of flow blockage and the flow has more time to run away from the weir keys. The set of these factors cause the weir with parapet wall to have higher discharge capacity than weir without the parapet wall.

Keywords: Nonlinear piano-key weir, Crest shape, Bundle, Parapet wall, Numerical modeling.