

مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی خطی و کلیدپیانویی غیرخطی در پلان

علیرضا رضائی، حجت کرمی* و سید فرهاد موسوی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵)

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D، ابتدا عملکرد سرریز کلیدپیانویی غیرخطی (قوسی) و سرریز کلیدپیانویی خطی در پلان، با طول سرریزی برابر، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نتیجه غیرخطی کردن سرریز کلیدپیانویی، ضریب دبی تا ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. بررسی کانتورهای سرعت برای این دو مدل سرریز نیز نشان می‌دهد که بیشینه سرعت در محدوده سازه سرریز کلیدپیانویی غیرخطی حدود ۳۰ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی خطی کمتر است. سپس، عملکرد سرریز کلیدپیانویی غیرخطی در دو حالت تحدب قوس رو به داخل و رو به خارج کانال بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که تحدب قوس رو به داخل کانال قرار گیرد، ضریب دبی در محدوده مورد بررسی به طور متوسط به میزان هشت درصد نسبت به زمانی که تحدب قوس رو به خارج کانال قرار گیرد، افزایش پیدا می‌کند. بررسی کانتورهای فشار برای این دو مدل سرریز نیز نشان می‌دهد که به طور متوسط، فشار در محدوده سازه سرریز کلیدپیانویی با تحدب قوس رو به داخل کانال حدود پنج درصد نسبت به سرریز با تحدب قوس رو به خارج کانال بیشتر است. این افزایش فشار منجر به کاهش سرعت و پخش بهتر جریان روی کلیدهای سرریز می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سرریز کلیدپیانویی خطی، سرریز کلیدپیانویی غیرخطی، ضریب آبگذری، مدل‌سازی عددی، FLOW3D

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

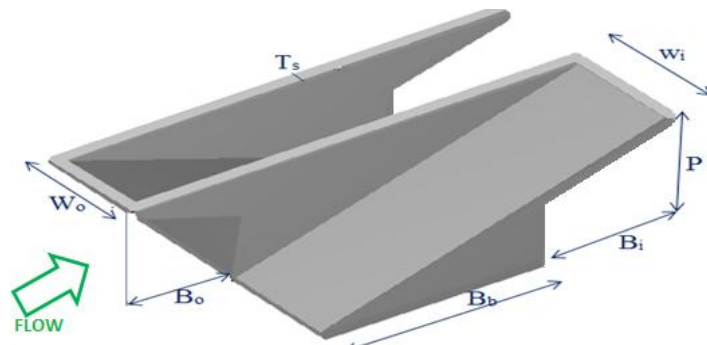
*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hkarami@semnan.ac.ir

مقدمه

ظاهری، آن را سرریز کلیدپیانویی نامیدند. این سرریزها به مخازن سدها این امکان را می‌دهند تا با تراز بالاتری عمل کنند که خود این موضوع باعث افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود (۱۵). مزیت‌های عمده دیگر این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره‌ای معمولی شامل کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه سیلاب است. در شکل (۱)، شمای یک سیکل از سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای هندسی آن، نشان داده شده است. در سرریز کلیدپیانویی، دو نوع کلید وجود دارد: کلید ورودی و کلید خروجی. کلید ورودی که به صورت شیب‌دار به سمت بالادست قرار گرفته است، جریان‌های نزدیک‌شونده را به سمت خود کشیده و جریان از روی تاج این کلیدها به صورت ریزشی به سمت پایین دست تخلیه می‌شود. همچنین، کلید خروجی که به صورت شیب‌دار به سمت پایین دست قرار گرفته است، جریان را مشابه یک جت به سمت پایین دست تخلیه می‌کند (۱۳).

پرالونگ و همکاران (۱۴) پارامترهای مختلف هندسی سرریزهای کلیدپیانویی را نامگذاری کردند. اندرسون و تولیس (۱) با مقایسه عملکرد سرریز کلیدپیانویی با شیروانی بالادست و پایین دست و همچنین سرریز کلیدپیانویی بدون شیروانی، به این نتیجه رسیدند که وجود شیروانی‌ها اثر مثبتی بر تخلیه جریان دارد. آنها همچنین با بررسی نسبت‌های مختلف Wi/Wo مشاهده کردند که مقدار $1/5$ برای این نسبت عددی بهینه است. ماچیلز و همکاران (۱۲) با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، در نهایت به معادلاتی برای برآورد دبی کلید ورودی، کلید خروجی و تاج جانبی دست‌یافتند. اندرسون و تولیس (۳) با مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی به این نتیجه رسیده‌اند که سرریزهای کلیدپیانویی به علت کاهش افت در کلیدهای ورودی، از عملکرد هیدرولیکی بهتری برخوردار هستند. کورکستون و تولیس (۵) در ادامه پژوهش‌های هاستون (۷) در مورد سرریز کنگره‌ای قوسی، حالات مختلف قرارگیری سرریز در مخزن را بررسی و مشاهده کردند که

سرریز از جمله سازه‌های مورد استفاده در سدهای مخزنی و شبکه‌های آبیاری و آبرسانی است. این سازه، در سدها به منظور کنترل ارتفاع، حجم آب و تخلیه سیلاب و در شبکه‌های آبرسانی برای تخلیه و پخش آب استفاده می‌شود (۲۰). ایمنی سدها ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد. بر اساس گزارش ICOLD، بیشتر شکست سدها بر اثر عبور آب از روی تاج آنها به وقوع می‌پیوندد که مهم‌ترین عامل آن کافی نبودن ظرفیت سرریز است. لذا، انتخاب مناسب نوع سرریز و همچنین طراحی هیدرولیکی آن می‌تواند در عملکرد درست کل طرح تأثیرگذار باشد. دبی جریان عبوری از سرریز به طور مستقیم با طول تاج آن متناسب است (۶). در صورتی که عرض کانال آب یا مخزن سدی که سرریز روی آن اجرا می‌شود، محدود باشد، یکی از راهکارهای بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز، اجرای آن به صورت غیرخطی در پلان است که این عمل باعث افزایش طول سرریزی آن می‌شود (۹). سرریزهای غیرخطی، نظیر سرریزهای انحنادار در پلان و یا سرریزهای کنگره‌ای، ضمن افزایش عرض عبور جریان، باعث افزایش ظرفیت آبدگذری نیز می‌شوند. تولیس و همکاران (۱۹) با مقایسه سرریز کنگره‌ای و سرریز خطی به این نتیجه رسیدند که در یک عرض ثابت، سرریز کنگره‌ای با وجود داشتن ضریب دبی کمتر، حاصل ضرب طول و ضریب دبی در آنها بزرگ‌تر از سرریز خطی بوده و کارایی هیدرولیکی آن در حد سه تا چهار برابر بیشتر از سرریز خطی است. یکی از معایب مهم سرریزهای کنگره‌ای، نیاز به سطح پی بزرگ برای نصب در سدهای بتنی است که این مورد باعث افزایش هزینه‌های کلی طرح می‌شود (۱۰). در سال ۲۰۰۰، مؤسسه هیدروکوپ فرانسه و دانشگاه محمد خیضر بسکره الجزایر شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی را ارائه کردند که تا حدودی مشکلاتی که در سرریزهای کنگره‌ای وجود داشت را برطرف می‌کرد و به سبب شکل



شکل ۱. نمای سه بعدی سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای مهم سازه‌ای آن: ضخامت تاج جانبی، P ارتفاع سرریز، W_o عرض کلید خروجی، W_i عرض کلید ورودی، B_b طول مینا، B_i طول شیروانی ورودی و B_o طول شیروانی خروجی

سرریزها به‌عنوان تابعی از H_0/P و θ (H_0 بیانگر هد استاتیک آب روی سرریز، P ارتفاع سرریز و θ زاویه انحنا) ارائه و عملکرد هیدرولیکی این سرریزها با سرریز خطی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که به‌ازای بار هیدرولیکی یکسان، افزایش θ منجر به کاهش ضریب آبگذری می‌شود. با این حال، افزایش طول مؤثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، می‌تواند بهبود راندمان را تا حدود ۴۵ درصد در پی داشته باشد. لمتر محمدی و همکاران (۱۱) پارامترهای مؤثر بر ضریب آبگذری سرریزهای قوسی، از جمله زاویه قوس، ارتفاع جریان روی سرریز و عرض قوس را بررسی کردند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که این پارامترها تأثیر بسزایی در ضریب آبگذری دارند.

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که مطالعاتی درخصوص سرریزهای کلیدپیانویی و همچنین سرریزهای قوسی انجام شده است. اما درباره ترکیب این دو موضوع، یعنی بررسی رفتار سرریزهای کلیدپیانویی در پلان انحنادار در کانال و بررسی پارامترهای فیزیکی برای بهبود عملکرد این نوع سرریزها، مطالعات اندکی شده است. هدف اصلی در این پژوهش، مدل‌سازی و تحلیل عددی سرریز کلیدپیانویی انحنادار و مقایسه عملکرد آن با سرریز کلیدپیانویی خطی در پلان و همچنین بررسی تفاوت عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز در دو حالت تحذب قوس به داخل و به خارج کانال است. در این پژوهش، تحلیل‌های عددی به کمک نرم‌افزار FLOW3D انجام شده و نتایج مربوط به تغییرات ضریب آبگذری در اثر تغییر

توسعه سرریز به داخل مخزن، عملکرد هیدرولیکی بهتری را در پی دارد. کبیری سامانی و جواهری (۸) با بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه دادند. سنگ سفیدی (۱۸) با بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی در پلان نشان داد که این تغییر شکل می‌تواند باعث افزایش حدود چهار برابری ظرفیت آبگذری نسبت به سرریزهای خطی در پلان شود. صفرزاده و خیاط‌رستمی (۱۷) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی در یک فلوم آزمایشگاهی، تأثیر ارتفاع سرریز بر هیدرولیک جریان‌های آزاد و مستغرق عبوری از روی آنها را مطالعه کردند. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش آنها، با افزایش ارتفاع، آستانه استغراق سرریز کاهش یافته و به‌عبارت دیگر، سرریز در مقدار نسبت هد پایاب به هد سراب کوچک‌تری مستغرق می‌شود. علاوه بر آن، با افزایش ارتفاع، ضریب دبی نیز کاهش یافته و در نسبت هد پایاب به هد سراب ۵/۰٪، بیشترین کاهش در عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی مستغرق رخ می‌دهد. افضلیان و احدیان (۴) با بررسی اثر دیواره سپری شیب‌دار بر راندمان سرریز کلیدپیانویی در جهت جریان و در خلاف آن، بیان کرده‌اند که استفاده از دیواره سپری شیب‌دار منجر به افزایش تراز آبی بالادست می‌شود. سنگ‌سفیدی و همکاران (۱۶) ضریب آبگذری و دبی عبوری از سرریز قوسی قرار گرفته در داخل مخزن را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. ضریب آبگذری این

w, v اجزای سرعت در جهات X, Y, Z و A_x, A_y, A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهات X, Y, Z است.

مدل آزمایشگاهی استفاده شده

برای صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی اندرسون (۲) استفاده شده است. برای این منظور، شکل سه‌بعدی سرریز در نرم‌افزار SOLIDWORK طراحی و سپس به نرم‌افزار FLOW3D انتقال داده شده و جزئیات ابعاد سرریز طراحی شده متناظر با ابعاد مدل آزمایشگاهی اندرسون در جدول (۱) نمایش داده شده است.

صحت‌سنجی

هندسه سه‌بعدی سرریز کلیدیابی استفاده شده در صحت‌سنجی به‌همراه شرایط مرزی و بلوک‌های مش در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل عددی دارای سه بلوک شبکه‌بندی است که برای صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی، تعداد مش‌ها در نواحی قرارگیری سرریز بیشتر و در سایر نواحی کمتر 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 مرزهای کناری و مرز کف مدل نیز از شرط مرزی دیوار (Wall) استفاده شده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، به‌منظور رسیدن جریان به شرایط پایدار، زمان ۱۳ ثانیه برای همگرایی مدل و شکل‌گیری جریان دائمی کفایت می‌کند. مدل‌سازی عددی به‌ازای پنج مقدار دبی ورودی از ۰/۰۶۶ تا ۰/۱۷۷ متر مکعب بر ثانیه صورت گرفته است.

برای تعیین بهترین مدل آشفتگی، پنج آزمایش بررسی شد و عملکرد مدل آشفتگی با توجه به معیارهای اندازه‌گیری خطا

شکل و همچنین خصوصیات هیدرولیکی و هیدرودینامیک جریان بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

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 می‌پردازیم.

معادلات اندازه حرکت

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z$$

در این معادلات فشار G_x, G_y, G_z و شتاب‌های بدنه f_x, f_y, f_z شتاب‌های ناشی از لزجت A_x, A_y, A_z جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهات X, Y, Z و چگالی جریان است.

معادله پیوستگی

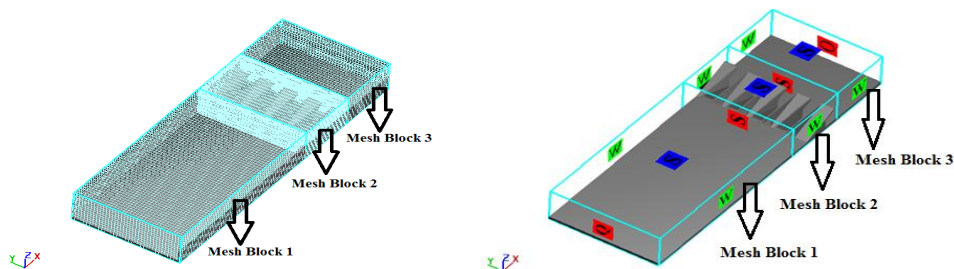
معادله پیوستگی به‌طور کلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این معادله V_F کسر حجمی جریان، ρ چگالی سیال u

جدول ۱. مشخصات هندسی سرریز کلیدپیانویی استفاده شده برای صحت‌سنجی

B_o (m)	B_i (m)	T (m)	W (m)	S_o	S_i	W_o (m)	W_i (m)	L (m)	P (m)
۰/۱۲۱	۰/۱۲۱	۰/۰۱۲	۰/۹۳	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۰۹۲	۰/۱۱۵	۴/۷۴	۰/۱۶۷



شکل ۲. هندسه سه‌بعدی سرریز کلیدپیانویی استفاده شده در صحت‌سنجی به همراه شرایط مرزی و بلوک‌های مش

عدد است. تغییرات ضریب آبگذری سرریزهای PKW-L و PKW-NL در شکل (۵) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در بارهای هیدرولیکی کم، هر دو سرریز عملکرد مناسبی دارند و ضریب آبگذری روند صعودی طی می‌کنند. اما با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود، روندی نزولی طی می‌کند. همچنین به‌ازای تمامی بارهای هیدرولیکی، سرریز PKW-NL عملکرد بهتری داشته و دارای ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریز PKW-L است. برای بررسی بیشتر در این خصوص، عملکرد این دو نوع سرریز در دو دبی مختلف به‌وسیله کانتورهای فشار، سرعت و همچنین توزیع خطوط جریان مشاهده شد تا به این سؤالات پاسخ داده شود که علت تفاوت عملکرد هیدرولیکی این دو نوع سرریز چیست؟ و چرا با افزایش دبی ورودی و هد آب روی سرریز، ضریب دبی جریان عبوری کاهش می‌یابد؟

شبیه‌سازی توزیع فشار

شبیه‌سازی توزیع فشار در دبی ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه در شکل (۶) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فشار جریان روی کلیدهای ورودی و همچنین کلیدهای خروجی در

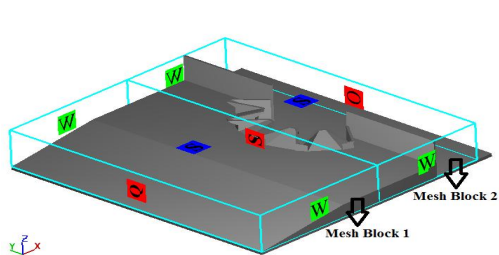
برای پارامتر بدون بعد نسبت عمق جریان روی سرریز به ارتفاع سرریز (H/P) میان مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه شد (جدول (۲)). نتایج نشان می‌دهد که در بین دو مدل ارزیابی‌شده، مدل RNG با دقت بیشتر و خطای کمتری نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.

نتایج و بحث

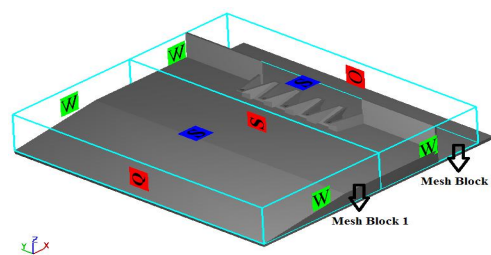
مقایسه عملکرد سرریزهای کلیدپیانویی خطی و غیرخطی در پلان
در این قسمت، عملکرد سرریز کلیدپیانویی خطی (PKW-L) با سرریز کلیدپیانویی غیرخطی (PKW-NL) در پلان به‌طوری که دارای تعداد سیکل و ابعاد کلیدهای ورودی و خروجی یکسان باشند، مقایسه می‌شود. برای مدل‌سازی عددی از دو بلوک شبکه‌بندی استفاده شده که بلوک‌های ذکر شده به‌همراه شرایط مرزی اعمالی در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین نمای این دو نوع سرریز در پلان در شکل (۴) و جزئیات هندسی مدل‌های مورد مطالعه در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از ایجاد حالت استغراق در پایین‌دست، سرریزها روی یک سکو به ارتفاع ۰/۰۸ متر قرار گرفته‌اند. در این بخش، هر یک از سرریزها در پنج دبی مختلف در مرز ورودی مورد بررسی قرار گرفته و تعداد کل شبیه‌سازی‌ها ۱۰

جدول ۲. ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی

پارامتر مورد بررسی	مدل آشفتگی	شاخص ارزیابی	
		MAE	RMSE
	RNG	۰/۰۰۸۰۴	۰/۰۰۹۵۲
H/P	K-ε	۰/۰۱۰۹۴	۰/۰۱۱۴۶

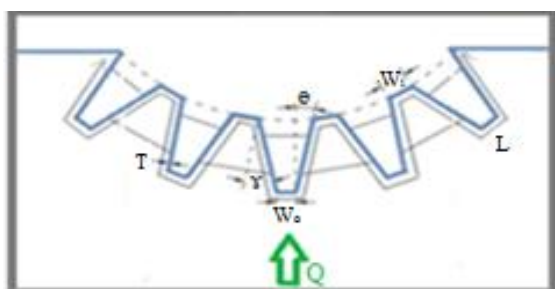


(ب)

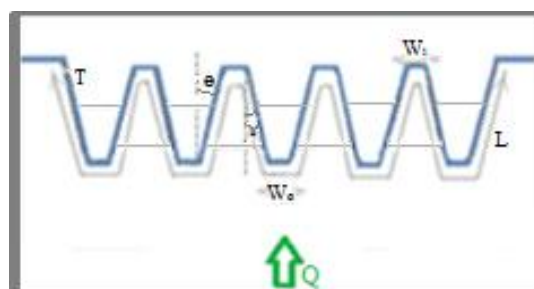


(الف)

شکل ۳. هندسه سه‌بعدی سرریز به همراه شرایط مرزی: الف) سرریز PKW-L و ب) سرریز PKW-NL



(ب)



(الف)

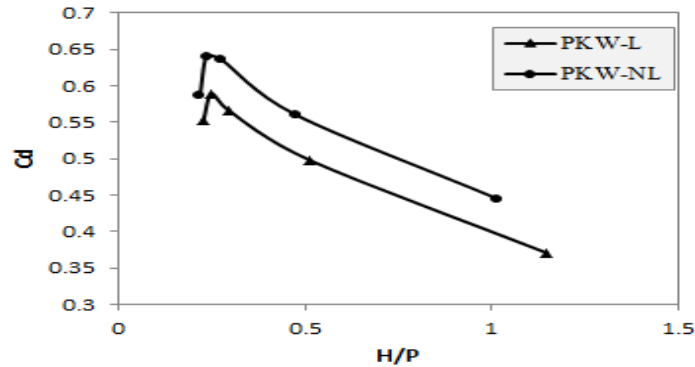
شکل ۴. نمای سرریز در پلان: الف) سرریز PKW-L و ب) سرریز PKW-NL

جدول ۳. ابعاد هندسی سرریز PKW-L

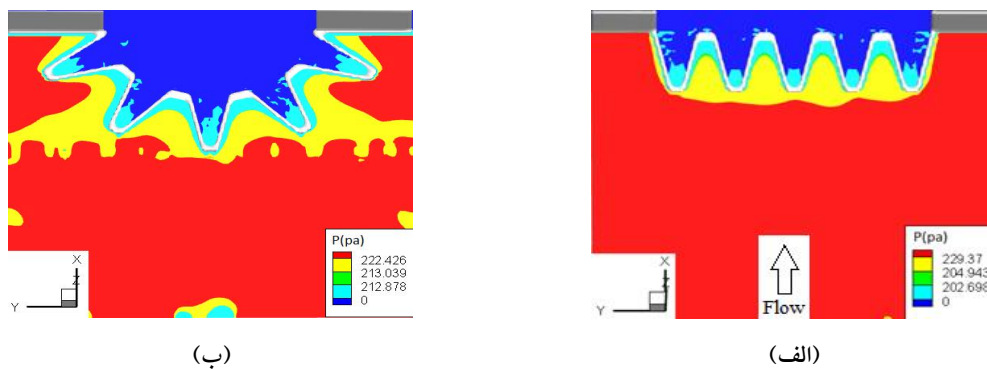
N	T (m)	B _o (m)	B _i (m)	S _o	S _i	θ (deg)	ϕ (deg)	W _o (m)	W _i (m)	L (m)	P (m)
۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۸۵	۰/۰۴۸۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۱۲	۱۲	۰/۰۳۷	۰/۰۴۶۲	۲/۱۵	۰/۰۶۶۸

جدول ۴. ابعاد هندسی سرریز PKW-NL

N	T (m)	B _o (m)	B _i (m)	S _o	S _i	θ (deg)	ϕ (deg)	W _o (m)	W _i (m)	L (m)	P (m)
۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۸۵	۰/۰۴۸۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۱۲	۲۷	۰/۰۳۷	۰/۰۴۶۲	۲/۱۵	۰/۰۶۶۸



شکل ۵. مقایسه تغییرات ضریب دبی در H/P های مختلف در سرریزهای PKW-L و PKW-NL



شکل ۶. توزیع فشار در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ برای سرریزهای: الف) PKW-L و ب) PKW-NL

سرریز PKW-L نسبت به سرریز PKW-NL، حدود ۳۰ درصد بیشتر است. این افزایش فشار، کاهش سرعت در محدوده سازه سرریز و پخش بهتر جریان روی کلیدها است. با توجه به کانتورهای فشار در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ بر ثانیه، بیشترین فشار در محدوده سازه سرریز PKW-NL حدود چهار درصد بیشتر از سرریز PKW-L است.

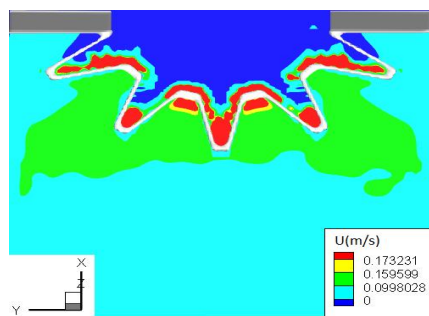
سرریز PKW-L نسبت به سرریز PKW-NL، حدود ۳۰ درصد بیشتر است. این افزایش سرعت روی کلیدها باعث ایجاد اغتشاش موضعی و همچنین گرفتگی جریان در برخی از نقاط سرریز PKW-L می‌شود. در ضمن، این افزایش سرعت باعث می‌شود جریان فرصت کمتری برای تخلیه از تاج‌های کناری کلیدهای ورودی داشته باشد. مجموعه این عوامل باعث کاهش ظرفیت آبگذری سرریز PKW-L نسبت به PKW-NL شده است.

با افزایش دبی ورودی، سرعت جریان نیز افزایش پیدا می‌کند و این افزایش سرعت باعث می‌شود جریان گذرنده از کلیدهای ورودی که به صورت ریزشی به پایین دست تخلیه می‌شوند، در ترازهای بالاتری با جریان گذرنده از کلیدهای خروجی که به صورت شوت به پایین دست تخلیه می‌شوند برخورد کرده و این عامل باعث ایجاد استغراق موضعی در این نواحی و در نتیجه کاهش ضریب دبی جریان عبوری از سرریز شده است.

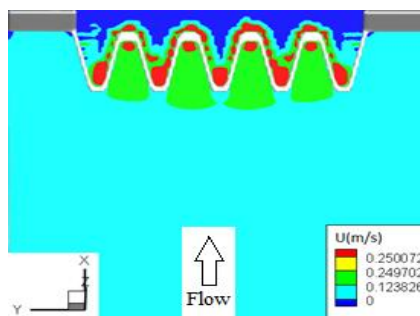
سرریز PKW-NL نسبت به سرریز PKW-L بیشتر است. علت این افزایش فشار، کاهش سرعت در محدوده سازه سرریز و پخش بهتر جریان روی کلیدها است. با توجه به کانتورهای فشار در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ بر ثانیه، بیشترین فشار در محدوده سازه سرریز PKW-NL حدود چهار درصد بیشتر از سرریز PKW-L است.

شبیه‌سازی توزیع سرعت

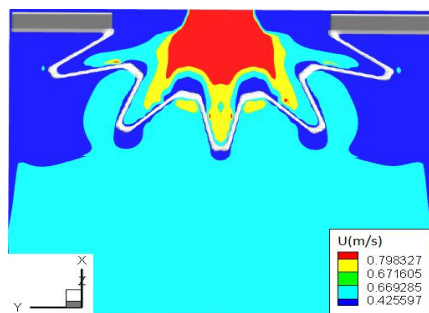
شبیه‌سازی توزیع سرعت در سرریزهای PKW-L و PKW-NL در دبی‌های $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ و $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ بر ثانیه در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت جریان روی کلیدهای ورودی و خروجی در سرریز PKW-L مقدار بیشتری نسبت به سرریز PKW-NL دارد. با توجه به کانتورهای سرعت در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ بر ثانیه، حداکثر سرعت روی کلیدهای خروجی مشاهده شده و سرعت جریان روی این کلیدها در سرریز



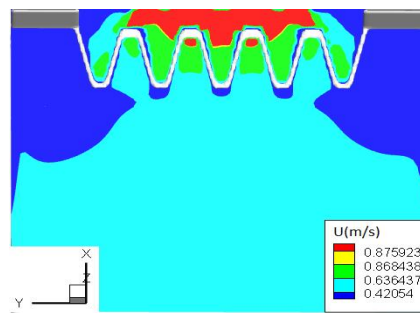
(ب)



(الف)



(د)

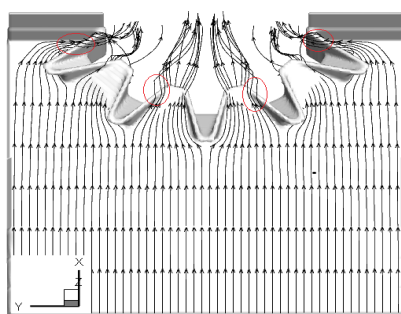


(ج)

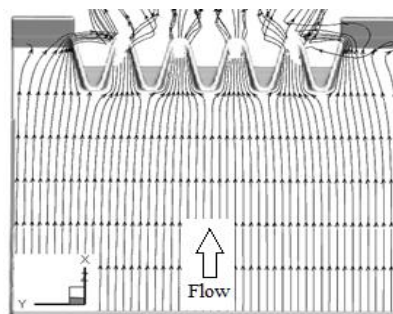
شکل ۷. توزیع سرعت در دبی‌های متفاوت برای سرریزهای PK(L) و PK(NL).

الف) سرریز PKW-L در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ ب) سرریز PKW-NL در $Q = 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$

ج) سرریز PKW-L در $Q = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ د) سرریز PKW-NL در $Q = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$



(ب)



(الف)

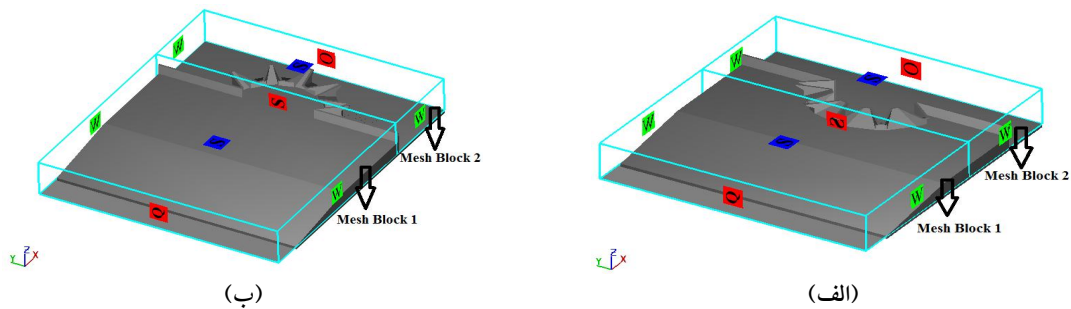
شکل ۸. توزیع خطوط جریان برای سرریزهای PKW-L و PKW-NL.

الف) سرریز PKW-L در $Q = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ و ب) سرریز PKW-NL در $Q = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$

توزیع خطوط جریان

توزیع خطوط جریان برای این دو نوع سرریز در دبی ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه در شکل (۸) نمایش داده شده است. تعداد این خطوط در هر دو نوع سرریز یکسان است. با توجه به شکل‌های

مزبور، زمانی که جریان وارد کلیدهای ورودی سرریز PKW-L می‌شود، خطوط جریان به یکدیگر بسیار نزدیک شده و در این نواحی فشردگی زیادی در خطوط جریان ایجاد می‌شود. در حالی که این فشردگی به میزان بسیار کمتری در کلیدهای



شکل ۹. هندسه سه بعدی سرریز به همراه شرایط مرزی: الف) سرریز PKW-IC و ب) سرریز PKW-OC

جدول ۵. ابعاد هندسی سرریز PKW-IC

N	T (m)	B _o (m)	B _i (m)	S _o	S _i	θ (deg)	ϕ (deg)	W _o (m)	W _i (m)	L (m)	P (m)
۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۸۵	۰/۰۴۸۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۱۲	۲۷	۰/۰۳۷	۰/۰۴۶۲	۲/۷۱	۰/۰۶۶۸

جدول ۶. ابعاد هندسی سرریز PKW-OC

N	T (m)	B _o (m)	B _i (m)	S _o	S _i	θ (deg)	ϕ (deg)	W _o (m)	W _i (m)	L (m)	P (m)
۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۴۸۵	۰/۰۴۸۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۲۷	۱۲	۰/۰۴۶۲	۰/۰۳۷	۲/۷۱	۰/۰۶۶۸

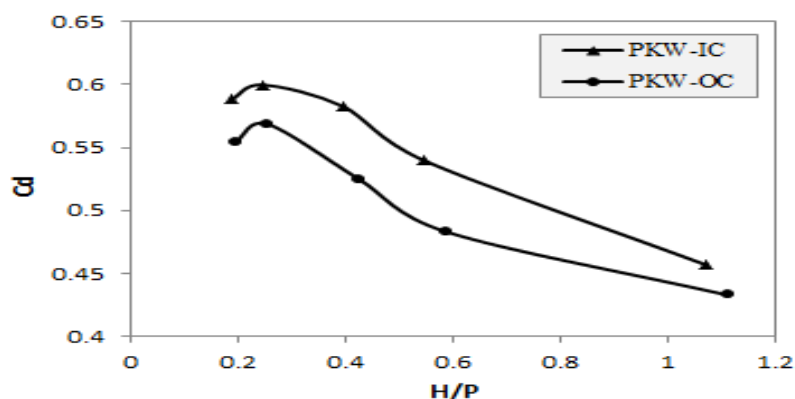
بلوک‌های ذکر شده به همراه شرایط مرزی اعمالی در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. در واقع، این دو سرریز، تصویر آینه‌ای یکدیگر هستند. جزئیات هندسی مدل‌های مورد مطالعه در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. برای جلوگیری از ایجاد حالت استغراق در پایین دست، سرریزها روی یک سکو به ارتفاع ۰/۰۸ متر قرار گرفته‌اند. در این قسمت، تعداد کل شبیه‌سازی‌ها ۱۰ عدد است.

منحنی ضریب آبگذری سرریزهای PKW-IC و PKW-OC در شکل (۱۰) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در بارهای هیدرولیکی کم، هر دو سرریز عملکرد مناسبی داشته و ضریب آبگذری روند صعودی دارد. اما با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود، روندی نزولی را طی می‌کند. همچنین، به‌ازای تمامی بارهای هیدرولیکی، سرریز PKW-IC عملکرد بهتری داشته و دارای ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریز PKW-OC است.

ورودی سرریز PKW-NL مشاهده می‌شود. همچنین، به‌علت زاویه‌دار بودن کلیدها در سرریز PKW-NL، سطح مقطع کلیدهای ورودی افزایش پیدا کرده و این افزایش سطح مقطع باعث پخش بهتر جریان روی آنها شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ (ب) با دایره‌های قرمز رنگ مشخص شده، در سرریز PKW-NL لبه‌های کناری کلیدها در انتقال جریان به پایین دست نسبت به سرریز PKW-L بسیار فعال‌تر عمل کرده و بخشی از جریان از این نواحی تخلیه شده است.

مقایسه عملکرد سرریز کلیدپیانویی غیرخطی در دو حالت تحذب قوس به داخل و خارج کانال

در این بررسی، به مقایسه عملکرد سرریز کلیدپیانویی انحنا دار در دو حالت تحذب قوس رو به داخل (PKW-IC) و یا خارج کانال (PKW-OC) پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی عددی، از دو بلوک شبکه‌بندی استفاده شده است که



شکل ۱۰. مقایسه تغییرات ضریب دبی در H/P های مختلف برای سرریزهای PKW-OC و PKW-IC

خطوط جریان به یکدیگر بسیار همگرا شده و این همگرایی در کلیدهای ورودی نیز به وضوح مشخص است. در صورتی که در سرریز PKW-IC جریان بسیار یکنواخت تر روی کلیدها پخش شده و این فشردگی خطوط جریان در آن کمتر مشاهده می شود. تمامی این عوامل باعث می شوند که سرریز PKW-IC ظرفیت آبگذری بهتری نسبت به سرریز PKW-OC داشته باشد.

نتیجه گیری

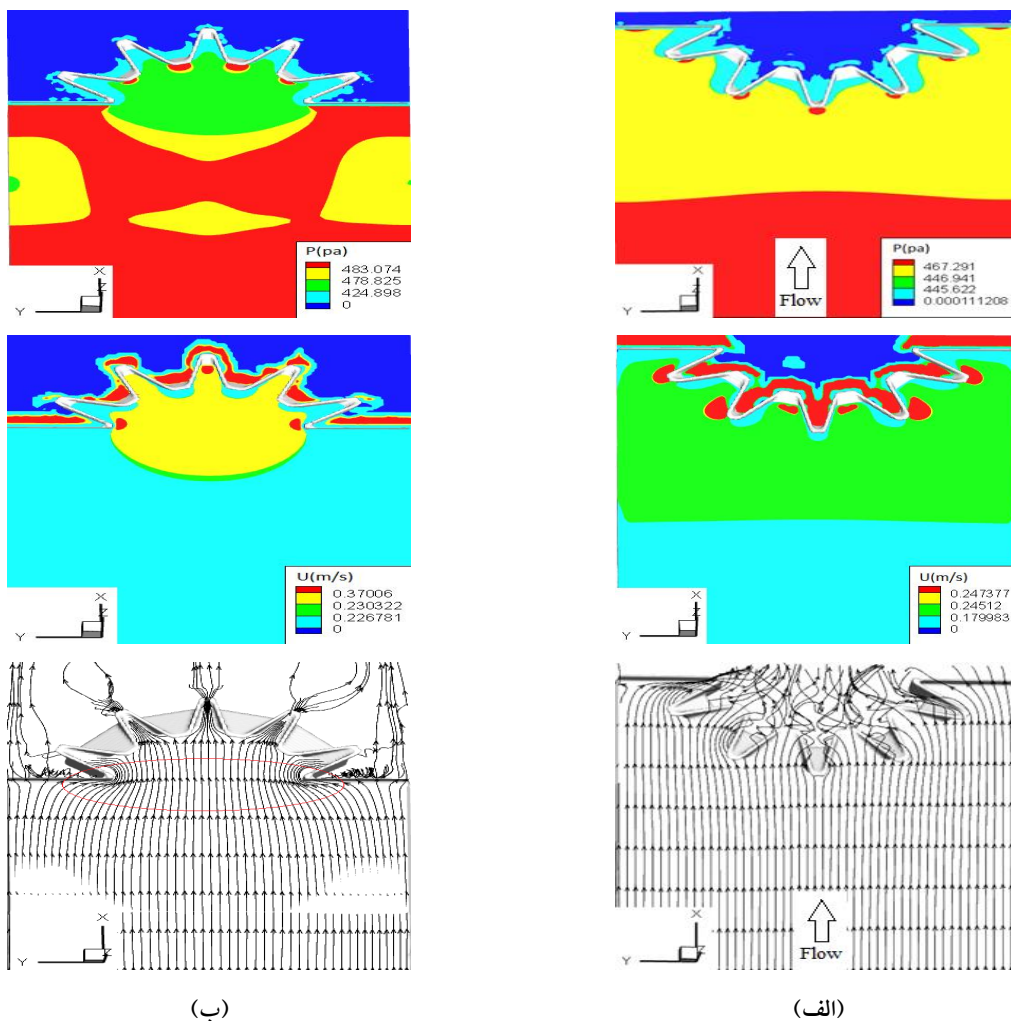
در این پژوهش، ابتدا عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی خطی و کلیدپیانویی غیرخطی در پلان با تعداد کلید و طول تاج یکسان، مقایسه و پس از آن، جهت قرارگیری تحذب قوس در سرریز کلیدپیانویی انحنادار بررسی شد. نتایج حاصل به شرح زیر است:

ضریب دبی جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی غیرخطی در پلان به نسبت سرریز کلیدپیانویی خطی تا ۲۰ درصد افزایش پیدا می کند. علت این امر را می توان به این صورت بیان کرد که در سرریز کلیدپیانویی انحنادار، به علت قرارگیری کلیدها روی قوسی از دایره، لبه های کناری کلیدهای ورودی، زاویه انحراف بیشتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی خطی دارند. این عامل باعث افزایش سطح مقطع کلیدهای ورودی می شود. این افزایش سطح مقطع، باعث کاهش سرعت روی کلیدها و فراهم آوردن

در ادامه به منظور بررسی بیشتر درباره علت تفاوت عملکرد هیدرولیکی سرریزهای PKW-OC و PKW-IC، کانتورهای فشار، سرعت و همچنین توزیع خطوط جریان در این دو نوع سرریز در $Q=0/02$ متر مکعب بر ثانیه تحلیل شد. لازم به ذکر است که محل قرارگیری کانتورها و خطوط جریان، اندکی پایین تر از تاج سرریز بوده و همچنین تعداد خطوط جریان در هر دو سرریز یکسان است.

تحلیل هیدرولیکی

شبیه سازی توزیع فشار، سرعت و توزیع خطوط جریان به ترتیب از بالا به پایین، برای سرریزهای PKW-OC و PKW-IC در $Q=0/02$ متر مکعب بر ثانیه به صورت دوبعدی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، جریان نزدیک شونده به سرریز PKW-IC نسبت به سرریز PKW-OC دارای سرعت کمتر و فشار بیشتری است. به طور متوسط، فشار در محدوده سازه سرریز PKW-IC حدود پنج درصد بیشتر از سرریز PKW-OC است. با توجه به کانتورهای فشار و سرعت در سرریز PKW-OC، در محدوده ای که جریان به سازه سرریز نزدیک می شود، فشار و سرعت جریان به یکباره دچار تغییر زیادی شده و این تغییر ناگهانی باعث ایجاد آشفتگی در مسیر جریان می شود. در رابطه با خطوط جریان نیز در سرریز PKW-OC در محدوده ای که با رنگ قرمز مشخص شده است،



شکل ۱۱. توزیع فشار، سرعت و خطوط جریان در $Q=0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ برای
 الف) سرریز PKW-IC و ب) سرریز PKW-OC

قرار گیرد، ضریب آبگذری به طور متوسط به میزان هشت درصد نسبت به زمانی که تحذب قوس رو به خارج کانال قرار گیرد، افزایش پیدا می کند. زیرا که زمانی که تحذب قوس سرریز رو به خارج کانال است، تغییر ناگهانی سرعت و فشار در محدوده‌ای که جریان به سازه سرریز نزدیک می شود، رخ داده و این عامل باعث ایجاد آشفتگی در مسیر جریان می شود. همچنین سرریز کلیدپیانویی انحنادار با تحذب قوس رو به داخل کانال، جریان را بسیار بهتر روی سازه خود پنخس کرده و فشردگی خطوط جریان بسیار کمتری در محدوده سازه آن مشاهده می شود.

فرصت بیشتر برای تخلیه جریان از روی تاج‌های کناری سرریز کلیدپیانویی انحنادار می شود. با افزایش دبی در مرز ورودی، ضریب آبگذری ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی طی می کند. علت این موضوع این است که با افزایش بار هیدرولیکی، تداخل لایه‌های جریان و استغراق موضعی رخ داده و این عوامل باعث می شود ضریب آبگذری پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود، سیر نزولی یابد. بررسی جهت قرارگیری تحذب قوس در سرریز کلیدپیانویی انحنادار نشان می دهد زمانی که تحذب قوس رو به داخل کانال

منابع مورد استفاده

1. Anderson, R. M. and B. Tullis. 2011. Influence of Piano Key Weir Geometry on Discharge. In: Proceedings of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège, CRC Press, Boca Raton, FL.
2. Anderson, R. M. 2011. Piano key weir head discharge relationships. MSc. Thesis, Faculty of Hydraulic Structures, Utah State University.
3. Anderson, R. M. and B. P. Tullis. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering* 138: 358-361.
4. Afzalian, A and J. Ahadian. 2016. Piano key weirs with positive parapet wall. *Water and Soil Science Journal* 25 (4):97-107. (In Farsi).
5. Crookston, B. M. and B. P. Tullis. 2012. Arced labyrinth weirs. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering* 138(6): 555-562.
6. Falvey, H. T. 2002. Hydraulics Design of Labyrinth Weirs. ASCE Press, USA.
7. Houston, K. L. 1982. Hydraulic Model Study of the Ute Dam Labyrinth Spillway. Report No. GR-82-7, U.S. Bureau of Reclamations, Denver, Co.
8. Kabiri-Samani, A. and A. Javaheri. 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(1): 114-120.
9. Lux, F. and D. L. Hinchliff. 1985. Design and construction of labyrinth spillways. In: Proceeding of the 15th Congress of ICOLD, Lausanne, Switzerland.
10. Lempérière, F. and A. Ouamane. 2003. The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal of Hydropower and Dams* 10(5): 144-149.
11. Lamtar Mohammadi, M., B. Amin Nezhad and H. Ahmadi. 2016. Numerical Study of Hydraulic Characteristics of Flow in Arched Weirs in the Reservoir. In: Proceeding of the National Conference on Civil Engineering and Demand Oriented Researches, Mashhad. (In Farsi).
12. Machiels, O., S. Erpicum, B. Dewals, P. Archambeau and M. Piroton. 2011. Experimental observation of flow characteristics over a piano key weir. *Journal of Hydraulic Research* 49(3): 359-366.
13. Ouamane, A. and F. Lempérière. 2006. Design of a new economic shape of weir. In: Proceeding of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain.
14. Pralong, J., J. Vermeulen, B. Blancher, F. Laugier, S. Erpicum, O. Machiels, M. Piroton, J. L. Boillat, M. Leite Ribeiro and A. J. Schleiss. 2011. A naming convention for the piano key weirs geometrical parameters. In: Proceeding of the International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B., CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 271-278
15. Ribeiro, M. L., M. Pfister, A. J. Schleiss and J. L. Boillat. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4): 400-408.
16. Sangsefidi, Y., M. Mehraein and M. Ghodsian. 2015. Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Arced Weirs. *Modares Civil Engineering Journal* 15(2): 51-63. (In Farsi).
17. Safarzadeh, A. and S. khayyatrostami. 2016. Laboratory Evaluation of Height Effects on Hydraulics of Submerged Piano Key Weirs. *Dam and Hydroelectric Powerplant* 2(7) :1-12. (In Farsi).
18. Sangsefidi, Y. 2013. Experimental Investigation of Flow Discharge Coefficient in Arc Labyrinth Overflows with Trapezoidal Plan. MSc. Thesis, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
19. Tullis, B. P., J. C. Young and M. A. Chandler. 2007. Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(3): 248-254.
20. Vischer, D. L. and W. H. Hager. 1998. Dam Hydraulics. Wiley, Switzerland

Comparison of Hydraulic Performance of Linear and Nonlinear Piano-Key Weirs in Plan

A. Rezaei, H. Karami* and S. F. Mousavi¹

(Received: October 9-2018 ; Accepted: February 4-2019)

Abstract

In this research, by using FLOW3D, the performance of non-linear (arced) piano key (PKW-NL) in plan and linear piano key weir (PKW-L), with equal length of weir, was compared. Results showed that nonlinearity of the weir caused 20% increase in the discharge coefficient. Investigating the velocity contours for these two weir models also showed that maximum velocity within the PKW-NL weir structure is about 30% lower than the PKW-L weir. Also, the performance of non-linear piano key weir was evaluated under inward (PKW-IC) and outward (PKW-OC) curvatures to the channel. Results showed that in the case of PKW-IC weir, the discharge coefficient was increased by 8% as compared to the PKW-OC weir. Investigating the pressure contours for these two weir models also shows that the average pressure within the PKW-IC weir structure is about 5% higher than the PKW-OC weir. This increase in pressure leads to a decrease in the speed and better distribution of flow over the weir keys.

Keywords: Weir, Linear piano key, Non-linear piano key, FLOW3D, Discharge coefficient, Numerical modeling

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

*: Corresponding Author, Email: hkarami@semnan.ac.ir