

مطالعه آزمایشگاهی و عددی هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی با کلیدهای اصلاح شده

اکبر صفرزاده^{۱*}

بهزاد نوروزی^۲

چکیده

در این مقاله، تأثیر اصلاح کلیدهای ورودی و خروجی بر هیدرولیک سرریز کلید پیانویی مطالعه شده است. مدل‌های فیزیکی از سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی متداول (PKW) و با کلیدهای اصلاح شده (MPKW) از جنس PVC ساخته شده و آزمایش‌ها به ازای طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی برای تعیین الگوی جریان و همچنین منحنی‌های ضریب دبی انجام شده است. همچنین برای تحلیل دقیق هیدرودینامیک حاکم بر سرریزهای مختلف و به منظور بررسی اثر اصلاحات انجام شده بر عملکرد هیدرولیکی، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان بر روی سرریزهای تست شده نیز انجام شده است. عملکرد سرریزهای کلید پیانویی با کلید خروجی اصلاح شده (UPKW) به صورت افزایش عمق محدوده ریزشی بالادست کلید و همچنین ایجاد یک دیواره قائم در انتهای کلید ورودی (DPKW) مطالعه شده است. بر اساس نتایج حاصله، ایجاد دیواره قائم در بالادست کلید خروجی تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی ندارد. در حالی که با افزودن دیواره قائم در انتهای کلید ورودی، به واسطه توزیع مناسب جریان بر روی تاج‌های کناری و تاج پایین دست، برخورد سفره‌های ریزشی در داخل کلید خروجی به حد زیادی کاهش یافته و از وقوع استغراق موضعی جلوگیری می‌شود. در اثر این پدیده، عملکرد سرریز کلید پیانویی با وجود دیواره قائم در انتهای کلید ورودی باعث اصلاح الگوی جریان و افزایش ضریب دبی نسبت به سرریز کلید پیانویی معمولی می‌شود. خطوط جریان حاصل از مدل‌های عددی و همچنین روند تغییرات سطح آب بر روی سرریزهای تست شده، صحت نتایج حاصله را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

سرریز کلید پیانویی، استغراق موضعی، ضریب دبی، کلیدهای اصلاح شده.

۱. * دانشیار مهندسی عمران - آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی safarzadeh@uma.ac.ir

۲. کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی noroozibehzad@gmail.com

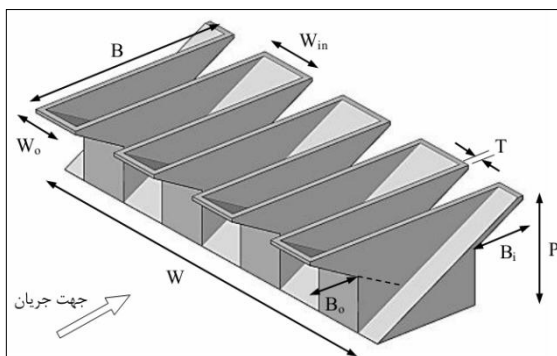
مقدمه

هیدرولیکی این سازه‌ها، لمپریه و اوامین^۳ (۲۰۰۳) نوع اصلاح شده این نوع سرریزها را تحت عنوان سرریزهای کلید پیانویی ارائه نموده‌اند. در شکل (۱) نمای سه‌بعدی از این نوع سرریز به همراه پارامترهای معرف هندسی نشان داده شده است. با توجه به شکل، برخلاف سرریزهای کنگره-ای، کف دهانه‌های سیکل‌های ورودی و خروجی (کلیدها) شیب‌دار به سمت داخل و خارج می‌باشند. علاوه بر آن، در بالادست و پایین دست ضمن خالی نمودن زیر کلیدها، بخش‌هایی تحت عنوان شیروانی^۴ بالادست و پایین دست ایجاد شده است.

در این شکل W_0 و W_i به ترتیب بیانگر عرض کلیدهای ورودی و خروجی بوده و B_0 و B_i به ترتیب طول شیروانی‌های بالادست و پایین دست سرریز می‌باشند. B طول تاج کناری بوده و P ارتفاع کل سرریز است. P_i ، B_0 و T ارتفاع کلید، عرض فونداسیون و ضخامت دیواره می‌باشد. طول توسعه یافته تاج (L_t) و همچنین عرض یک سیکل (W_u) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L_t = 2B + W_i + W_0 \quad (2)$$

$$W_u = W_i + W_0 + 2T$$



شکل (۱): سرریز کلید پیانویی به همراه پارامترهای هندسی معرف.

اولین سرریز کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ بر روی سد گلورس^۵ در کشور فرانسه اجرا شده است (لاوگیر^۶، ۲۰۰۷). بعد از طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ برای بهبود عملکرد تخلیه سیلاب سدهای مختلفی نظیر سنت مارک^۷، اترویت^۸، گلوریتس^۹ نیز از سرریزهای کلید پیانویی استفاده شد. مطالعات آزمایشگاهی اوامین و لمپریه^{۱۰} (۲۰۰۶) نشان داد که در

سرریزها سازه‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری دبی، انحراف یا کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها استفاده می‌شوند. اگرچه سرریزها عمدتاً برای حالت جریان آزاد در نظر گرفته می‌شوند، لیکن در برخی موارد احتمال وقوع استغراق آن‌ها نیز وجود دارد. بحث استغراق در سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها به دو دسته استغراق موضعی و کلی تقسیم‌بندی می‌شود. در حالت استغراق موضعی، به واسطه شرایط جریان محلی، بخشی از سازه سرریز توسط جریان عبوری از روی آن پر شده و باعث کاهش آبگذری سرریز می‌شود. سرریزها با توجه به شکل پلان به دو دسته کلی سرریزهای خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزهای غیرخطی نظیر سرریزهای انحنادار در پلان و یا سرریزهای کنگره‌ای ضمن افزایش طول عبوری جریان، باعث افزایش ظرفیت آبگذری سازه می‌شوند. سرریزهای کنگره‌ای^۱ به صورت سری زیگزاکی از سرریزهای خطی می‌باشند که در یک عرض ثابت، طبق رابطه زیر با وجود داشتن ضریب دبی (C_d) کمتر، حاصل ضرب طول و ضریب دبی ($C_d L_t$) در آن‌ها بزرگ‌تر از سرریزهای خطی بوده و عملکرد هیدرولیکی در حد سه تا چهار برابر بیشتر نسبت به سرریزهای خطی دارند (تولیس و همکاران ۲۰۰۷):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_t \sqrt{2gH_t}^{1.5} \quad (1)$$

در رابطه فوق، Q دبی عبوری از سرریز بوده و C_d ، L_t و H_t به ترتیب بیانگر ضریب دبی، طول تاج توسعه یافته و هد کل (مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی) بر روی سرریز می‌باشند. سرریزهای کنگره‌ای دارای دیواره‌های قائم بوده و به واسطه برخورد جریان (به‌ویژه جریان‌های تحتانی) به دیواره‌ها و شکل‌گیری نواحی چرخشی باعث افت انرژی و در نتیجه کاهش کارایی هیدرولیکی سرریز می‌شوند (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲). از دیدگاه اقتصادی نیاز به حجم بتن‌ریزی بالایی داشته و علاوه بر آن سطح فونداسیون بالایی نیاز دارند که در شرایط محدود بودن محل نصب (نظیر تاج سدهای بتنی و یا کانال کم‌عرض) استفاده از این نوع سرریزها با مشکل مواجه می‌شود (اندرسون و تولیس^۲ ۲۰۱۲). برای رفع مشکلات فوق و همچنین افزایش کارایی

^۶ Laugier

^۷ St. Marc

^۸ Etroit

^۹ Gloriettes

^{۱۰} Ouamane, and Lempérière

^۱ Labyrinth

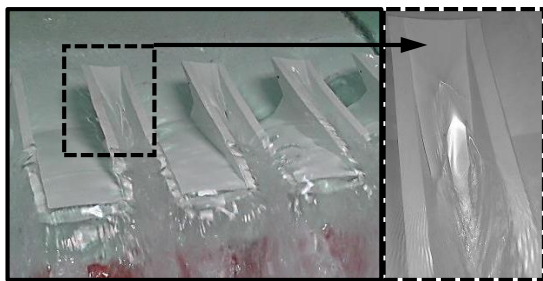
^۲ Anderson and Tullis

^۳ Lempérière, and Ouamane

^۴ Overhang

^۵ Golours

وقوع پدیده استغراق موضعی در کلید خروجی در دو حالت رخ می‌دهد. مطابق شکل (۲)، در بالادست کلید خروجی، به‌واسطه برخورد جریان عبوری از تاج بالادست با بخشی از جریان در بالادست تاج‌های کناری، ناحیه گرده‌ماهی شکل ایجاد شده و باعث ایجاد برآمدگی در سطح آب می‌شود. در پایین دست کلید خروجی نیز، برخورد سفره‌های ریزشی از طرفین به داخل کلید خروجی باعث ایجاد انسداد و پرشدگی کلید خروجی می‌شود. به‌واسطه پرشدن کلید خروجی، تخلیه جریان از کلید ورودی دچار مشکل شده و با توجه به وجود گرادیان عرضی مثبت فشار از روی تاج کناری به سمت میانه کلید خروجی، سطح آب در داخل کلیدهای ورودی نیز بالا آمده و در نهایت باعث پس‌زدگی سطح آب به سمت بالادست کلید می‌شود. این پدیده در نهایت به‌واسطه افزایش هد روی سرریز، طبق رابطه (۱) منجر به کاهش ضریب آگذری سرریز می‌شود.



شکل (۲): پدیده استغراق موضعی در ابتدا و انتهای کلیدهای خروجی سرریز کلید پیانویی مستطیلی

در این تحقیق، باهدف کاهش و یا حذف پدیده‌های استغراق موضعی، تأثیر دو راهکار جدید به‌صورت ذیل بر هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی مطالعه شده است:

الف: ایجاد دیواره قائم در تاج بالادست به‌صورت پایین‌افتادگی و یا به عبارت بهتر تعبیه یک دیواره قائم کوتاه در ابتدای کلید خروجی به‌منظور افزایش عمق و جلوگیری از وقوع استغراق موضعی در ابتدای کلید خروجی.

ب: تعبیه یک دیواره قائم در انتهای کلید ورودی به‌منظور اصلاح الگوی جریان در انتهای کلید ورودی و توزیع مناسب جریان بر روی تاج‌های کناری و تاج پایین دست به‌منظور کنترل و یا حذف تداخل سفره‌های ریزشی جانبی در پایین دست کلید خروجی.

برای بررسی تأثیر راهکارهای فوق بر بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی متداول مستطیلی

سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد: کلید ورودی جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب‌دار جریان از روی تاج ورودی به‌صورت ریزشی به سمت پایین دست تخلیه می‌شود. الگوی دوم بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این بخش، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود.

بر اساس مطالعات هین^۱ و همکاران (۲۰۰۶) مقدار بهینه برای نسبت W_i/W_o برابر ۱/۲ می‌باشد. روند طراحی این نوع سرریزها اولین بار توسط ماچیلز^۲ و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده است. ریبریو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی موجود یک معادله عمومی برای رابطه اشل-دبی این نوع سرریزها ارائه نمودند. بر اساس نتایج محققین مزبور، ظرفیت این نوع سرریزها عمدتاً به هد آب روی سرریز، طول کل، ارتفاع کلیدهای ورودی و عرض جانبی آن بستگی دارد. کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) ظرفیت آگذری این نوع سرریزها را در حالت کاربرد در کانال‌ها بررسی نموده و با استفاده از آنالیز ابعادی و نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب آگذری این نوع سرریزها ارائه نمودند. اندرسون و تولیس^۳ (۲۰۱۲) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی مستطیلی را مقایسه کردند. صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۲) هیدرودینامیک سرریزهای کلیدپیانویی، کنگره‌ای و کنگره‌ای با کلیدهای شیب‌دار را به‌صورت سه‌بعدی مطالعه کرده و نشان دادند در سرریزهای کلیدپیانویی به‌واسطه حذف فشردگی جریان در کلیدهای ورودی و همچنین توزیع بهتر جریان بر روی بخش‌های مختلف سرریز، ضریب آگذری بالاتر از دو نوع دیگر است. تأثیر دیواره جان‌پناه^۴ و شکل پشت‌بند نیز توسط محققین مزبور مطالعه شده است (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳). صفرزاده و نوروزی (۲۰۱۷) با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی، ساختار جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای را مطالعه نموده و به بهبود زیادی در ضریب دبی این نوع سرریزها در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و کنگره‌ای اشاره نموده‌اند. در تحقیق مزبور به اهمیت تاج کناری بر عملکرد هیدرولیکی سرریز تأکید شده است. صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۳) هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان را مطالعه نمودند.

^۲Anderson and Tullis
^۴Parapet wall

^۱Hien
^۲Machiels

با شیب ۱۱ درجه برای ورود آرام جریان به سرریز قبل از سکو اجرا گردیده است.

برای قرائت عمق و تراز آب از یک خط‌کش دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که بر روی یک ارابه متحرک نصب شده بود استفاده شده است (شکل ۳). با برداشت طولی پروفیل سطح آب در دبی‌های بالا، فاصله ۲/۳۶ متری از انتهای سکو به‌عنوان محل اندازه‌گیری عمق بالادست، انتخاب شد. در این ناحیه نرخ تغییر سطح آب (اختلاف عمق به اختلاف فاصله دو مقطع اندازه‌گیری شده) کم بوده و شاهد پروفیل سطح افقی، در نتیجه جریان یکنواخت بالادست هستیم.

در تفسیر و ارائه نتایج، بار آبی کل جریان به‌صورت مجموع هد استاتیکی روی سرریز (h) و بار سرعت ($V^2/2g$) مورد استفاده قرار خواهد گرفت که در آن، V سرعت متوسط جریان نزدیک شونده است. با استفاده از یک شیب‌سنج دیجیتال، کانال در وضعیت کاملاً افقی تنظیم شده است. هد آب بر روی سرریز و دبی متناظر با آن به‌عنوان خروجی سیستم در هر سری آزمایش قرائت شده است. در هر مرحله اندازه‌گیری، با افزایش دبی و قبل از قرائت عمق، حداقل ۴ دقیقه زمان صرف تثبیت جریان می‌شود. برداشت‌ها دو بار انجام گردیده و در صورت وجود مغایرت بین مقادیر قرائت شده عمق و دبی، برداشت داده‌ها برای بار سوم تکرار شده و از سه سری برداشت، میانگین‌گیری صورت گرفت. مدل سرریزهای کلید پیاپویی از صفحات PVC سفید با ضخامت ۹ میلی‌متر ساخته شده است.

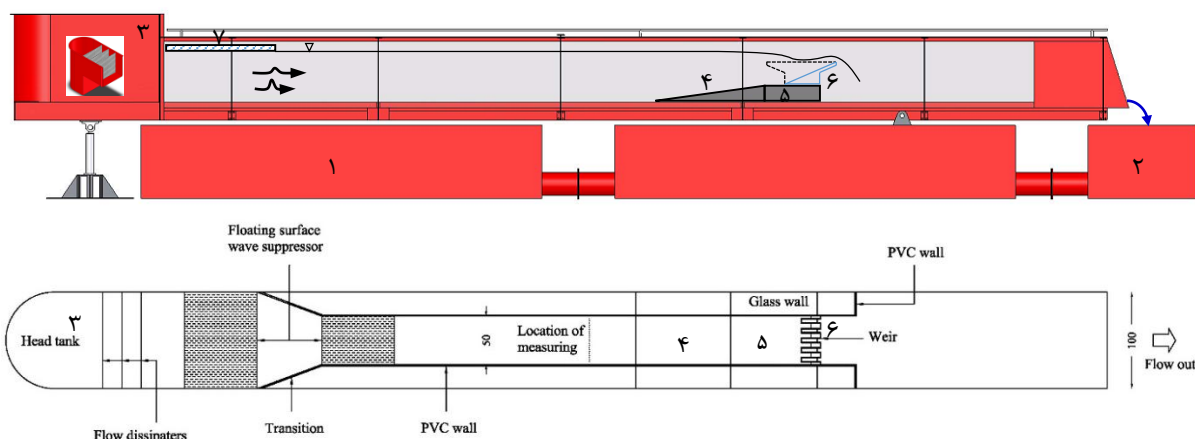
در شکل (۴) مدل شماتیک سه‌بعدی به همراه جزئیات هندسی سرریزهای تست شده نشان داده شده است. در جدول (۱) ابعاد هندسی مدل‌ها ارائه شده است. در این جدول، اندیس مدل‌های اصلاح شده، بیانگر نسبت ارتفاع دیواره‌های قائم بالادست یا پایین دست (P_u یا P_d) به ارتفاع کل سرریز (P) است.

(PKW)، مدل‌های فیزیکی از سرریزهای کلید پیاپویی با ابعاد بهینه هیدرولیکی مطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های گزارش شده قبلی ساخته شده و پروفیل‌های سطح آب و منحنی اشل-دبی به‌عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است. سپس سرریزهای کلید پیاپویی با کلیدهای خروجی اصلاح شده (MPKW) در دو حالت اصلاح بالادست کلید خروجی (UPKW) و پایین دست کلید ورودی (DPKW) آزمایش شده و نتایج با مدل پایه مقایسه شده است. در ادامه به‌منظور بررسی هیدرودینامیکی علل وجود اختلاف بین مدل‌های تست شده، شبیه‌سازی عددی سرریزهای مورد نظر انجام و پس از صحت سنجی با داده‌های بخش آزمایشگاهی، تحلیل‌های مختلف هیدرودینامیکی نظیر بررسی خطوط جریان در بخش‌های مختلف انجام شده است.

تجهیزات آزمایشگاهی و طرح‌ریزی آزمایش‌ها

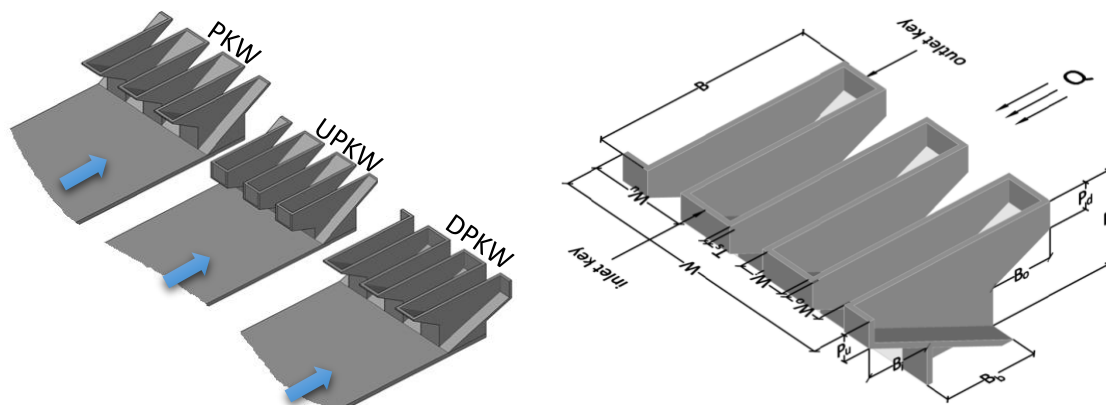
آزمایش‌ها مطابق شکل (۳) در یک فلوم شیب‌پذیر به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فولادی انجام شده است. مخزن اصلی ذخیره آب با ظرفیت ۱۲ مترمکعب در زیر فلوم قرار داشته و آب به‌وسیله پمپ با حداکثر ظرفیت ۹۵ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی توسط یک لوله پلی‌اتیلن به قطر ۲۰ سانتیمتر به مخزن بالادست فلوم (Head tank) رسانده می‌شود. مقدار جریان ورودی به پمپ از مخزن اصلی توسط یک شیر پروانه‌ای قابل تنظیم بوده و در مسیر لوله انتقال از یک فلومتر الکترومغناطیسی با دقت ± 1 لیتر بر ثانیه برای اندازه‌گیری دبی استفاده شده است. بعد از مخزن بالادست، سه توری مشبک برای آرام‌سازی جریان و همچنین دو صفحه یونولیتی مفید در راستای جریان و آزاد در ارتفاع برای گرفتن نوسانات سطح آب قرار داده شده است. به خاطر اهمیت بالای پارامتر h (عمق آب بر روی تراز تاج سرریز) در استخراج نتایج، نیاز است تا مقادیر بالای h (بیشتر از ارتفاع خود سرریز) قرائت شود. بدین منظور و با توجه به پایین بودن توان پمپ و ظرفیت مخزن بالادست فلوم، عرض فلوم به‌وسیله دیواره‌هایی از جنس PVC به ۰/۵ متر کاهش داده شد. این کاهش عرض به‌وسیله دو تبدیل در بالادست با زاویه ۲۲ درجه و طول ۶۷ سانتیمتری اعمال شده است (شکل ۳).

سکوئی به طول ۹۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر برای نصب سرریز به فاصله ۳ متری از انتهای فلوم برای جلوگیری از تأثیر پایاب بر جریان سرریز نصب گردیده است. یک رمپ



۱- مخزن تحتانی، ۲- مخزن انتهایی، ۳- مخزن بالادست، ۴- رمپ، ۵- سکوی استقرار سرریز، ۶- سرریز کلید پیانویی، ۷- صفحه یونولیت شناور

شکل (۳): فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری رمپ و سکوی استقرار سرریز کلید پیانویی بر روی آن



شکل (۴): انواع سرریزهای کلید پیانویی تست شده و پارامترهای هندسی معرف سرریزهای کلید پیانویی با کلیدهای اصلاح شده

جدول (۱): ابعاد سرریزهای اصلی کلید پیانویی تست شده

کد مدل / پارامتر	PKW	UPKW _{1/4}	UPKW _{1/3}	DPKW _{1/4}	DPKW _{2/5}
P			۱۶		
P _u	۰	۴	۵/۳	۰	۰
P _d	۰	۰	۰	۴	۶/۴
B _b			۱۵/۴		
B _i			۱۰/۳		
B _o			۱۰/۳		
W _i			۸/۳		
W _o			۶/۶		
T			۰/۹		
L _t			۲۶۰/۸		

در این تحقیق سرریزها به نحوی ساخته شدند که نسبت طول توسعه یافته تاج (L_t/W) به عرض کانال در تمامی آن‌ها برابر ۵ می‌باشد.

سرریزها پس از نصب بر روی یک صفحه، روی سکوی قرار گرفته و پس از آب‌بندی کامل، آزمایش‌های موردنظر به صورت اندازه‌گیری هدهای ایجاد شده به ازای دبی بالادست بر روی آن‌ها انجام گردید. لازم به ذکر است که ابعاد سرریز متداول بر اساس نتایج تحقیقات قبلی نظیر Riberio et al. 2012 و Machiels et al. 2014 انتخاب شده است.

در ادامه، پس از ارائه جزئیات مدل عددی، نتایج حاصل از دو بخش مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ارائه شده است.

واحد تمامی اعداد جدول (۱) سانتیمتر میباشد.

مبانی تئوریک شبیه سازی عددی

در این مقاله از نرم افزار FLOW3D برای شبیه سازی عددی استفاده شده است. معادلات حاکم بر مسئله مورد نظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می باشند. این معادلات در جریان های دوفازی در سیستم مختصات کارترین (X_i) با مؤلفه های سرعت (u_i) و $i=1,2,3$ به صورت زیر بیان می شوند:

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u_i A_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_i \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x_i} + G_i + f_i \quad (4)$$

در این معادلات، ρ چگالی آب، V_F جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR و A_i جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت i ام است. در معادلات بقای اندازه حرکت، P بیان گر فشار بوده و (G_i) و (f_i) به ترتیب بیان گر مؤلفه های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت برای راستای i ام می باشند. شتاب لزجت شامل اثر لزجت دینامیکی سیال (μ_i) و نیز آشفتگی جریان (μ_t) می باشد. برای مدل سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل های دو معادله ای استفاده می شود. در این مقاله از مدل $k-\epsilon$ -RNG برای بیان لزجت گردابه ای استفاده شده است. نرم افزار Flow-3D از روش جزء حجمی (Volume-Fraction Method) برای مشخص کردن هندسه سرریز و سطح آزاد سیال در میدان حل استفاده می کند. روش های VOF و FAVOR مثال هایی از این روش ها هستند. الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود بکار رفته است. این الگوریتم موانع داخل میدان را در سلول های محاسباتی به صورت مقدار جزئی بین ۰ و ۱ در نظر می گیرد؛ به نحوی که اگر کل سلول توسط مانع پر شده باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر ۱ خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می شود. در این روش، زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول های محاسباتی پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول ها این است که کمیتی به نام F که بیانگر جزئی از سلول است که

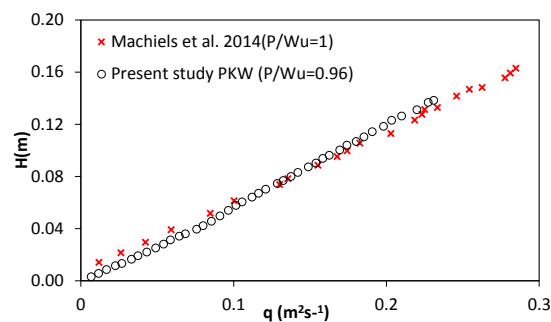
توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع جزء حجم سیال نامیده می شود. با دانستن مقدار F می توان محل سطح آزاد و زاویه آن را در میان سلول های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل نمودن مقدار سیال در سلول های مجاور امکان پذیر است. در این نرم افزار، معادلات غیردائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی می شوند. معادلات شبه ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از تکنیک های تخفیف حل می شوند که در این مقاله از تکنیک GMRES به عنوان حل گر ضمنی فشار استفاده شده است. الگوی حل و انفصال معادله مومنتوم از نوع صریح درجه ۱ می باشد که بر سرعت حل میدان می افزاید. برای انفصال میدان از شبکه بندی کارترین استفاده شده است. در این نرم افزار دو شرط زیر برای ایجاد شبکه بندی مناسب برای میدان حل ارائه توصیه شده است: الف) نسبت اندازه سلول های مجاور به ۱ نزدیک بوده و از ۱/۲۵ تجاوز نکند. ب) نسبت ابعادی سلول ها به ۱ نزدیک بوده و از ۳ تجاوز نکند. در بخش های آتی جزئیات ساخت مدل های عددی، همگرایی و صحت سنجی ارائه شده و نتایج حاصل از شبیه سازی ها برای تحلیل هیدرودینامیکی استفاده شده است.

ارائه نتایج بخش آزمایشگاهی

در شکل (۵) طرح سه بعدی سطح آب بر روی سرریز کلید پیانویی متداول به ازای دبی های مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل، در دبی پایین وقوع دو پدیده استغراق موضعی در ابتدا و انتهای کلید خروجی مشهود است. این نواحی به صورت خطوط کانتر هم مرکز در داخل خروجی ظاهر شده اند. با افزایش دبی ورودی، تداخل سفره های ریزشی از روی تاج های کناری تشدید شده (شکل ۵-ب) و دو ناحیه استغراق موضعی بالادست و پایین دست به یکدیگر متصل می شوند، به نحوی که کلید خروجی تا تراز پایینی تر از تراز تاج (بسته به دبی) پر می شود. در این حالت، به واسطه جریان ریزشی از روی تاج بالادست بر روی جریان داخل کلید خروجی، یک حفره در ابتدای کلید خروجی شکل می گیرد. با افزایش بیشتر دبی بالادست، تداخل سفره های ریزشی جانبی در پایین دست کلید خروجی تشدید شده و تراز آب به بالاتر از تراز تاج سرریز می رسد.

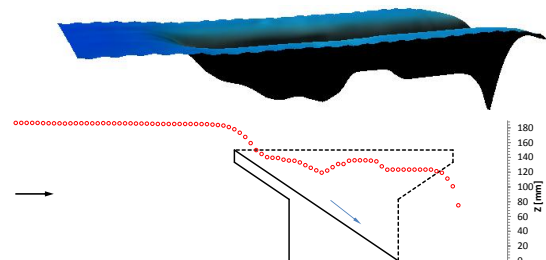
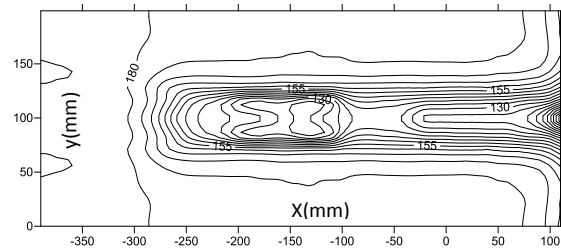
در این حالت یک موج ایستا در داخل کلید خروجی شکل گرفته و بخش عمده‌ای از کلید کاملاً مستغرق می‌گردد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش بیشتر شدت جریان ورودی به کانال، موج ایستای انتهای کلید خروجی تبدیل به یک پرش هیدرولیکی شده و در نهایت به ازای دبی‌های بسیار بالا و در شرایطی که نسبت هد جریان به ارتفاع سرریز، بزرگ‌تر از $0/6$ باشد، کل فضای کلیدها پر شده و عملاً سرریز کلید پیانویی به صورت یک سرریز لبه پهن عمل می‌کند.

در شکل (۶) منحنی تغییرات دبی در عرض واحد در سرریز PKW ($q=Q/W_u$) در مقابل هد روی سرریز برای مقادیر هد و دبی قرائت شده، نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش هد روی سرریز، دبی در واحد عرض به صورت خطی افزایش می‌یابد. روند تغییرات و همچنین مقادیر H-q انطباق خوبی با نتایج محققین قبلی نظیر Machiels et al. 2014 برای نسبت ارتفاع به عرض کلید واحد (P/W_u) مشابه دارد.

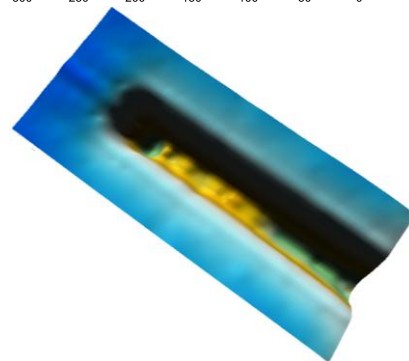
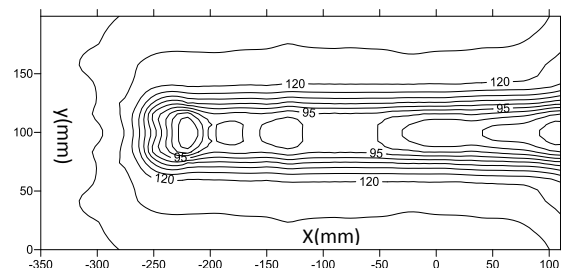


شکل (۶): منحنی تغییرات ضریب دبی سرریز PKW

با توجه به نتایج ارائه شده و همچنین مطالبی که در بخش مقدمه ذکر شد، کاهش پدیده استغراق موضعی در داخل کلید خروجی می‌تواند بر عملکرد سرریز کلید پیانویی تأثیرگذار باشد. به منظور بررسی حذف و یا کاهش استغراق موضعی در ابتدای کلید خروجی، مطابق جدول (۱) سرریزهای اصلاح شده با افزودن دیواره قائم در بالادست کلید و به عبارت بهتر پایین آوردن تراز ابتدای رمپ کلید خروجی (UPKW) ساخته شده است. در شکل (۷) مقایسه منحنی‌های ضریب دبی دو نوع سرریز کلید پیانویی اصلاح شده با سرریز متداول نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزودن دیواره قائم بالادست به ارتفاع $1/4$ ارتفاع کل سرریز (مدل $UPKW1/4$)، اندکی در هدهای پایین،



(الف)



(ب)

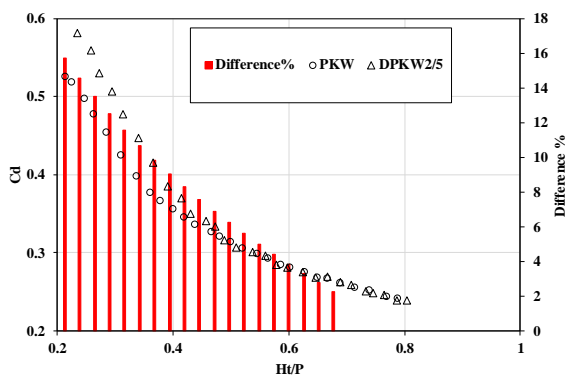


(ج)

شکل (۵): ساختار سه بعدی سطح آب اندازه‌گیری شده و مشاهداتی بر روی سرریز PKW در سه حالت (الف): دبی پایین، (ب): دبی متوسط و (ج): دبی بالا

بعدی، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی، این نکات با جزئیات بیشتر بررسی خواهند شد.

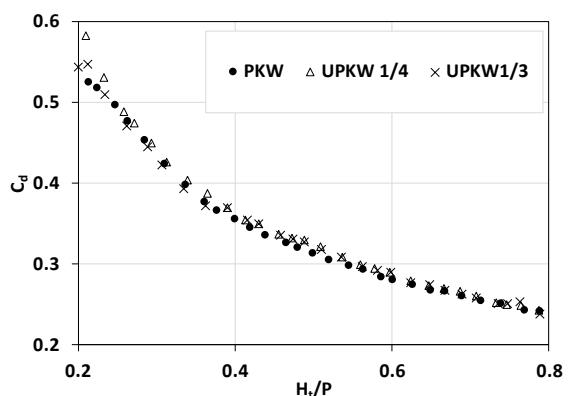
در شکل (۸) مقایسه منحنی‌های ضریب دبی سرریز متداول و سرریز کلید پیانویی اصلاح شده DPKW2/5 نشان داده شده است. با توجه به شکل، برخلاف اصلاح بخش بالادست کلید خروجی، تعبیه دیواره قائم در بخش پایین دست کلید ورودی، باعث بهبود چشم‌گیر در میزان ضریب دبی سرریز کلید پیانویی شده است. در این شکل، درصد بهبود مقدار ضریب دبی با نمودار میله‌ای نشان داده شده است. با توجه به شکل، در هدهای پایین، مقدار اختلاف حداکثر برابر ۱۶٪ بوده و با افزایش هد به ارتفاع، از میزان اختلاف کاسته می‌شود به نحوی که پس از هد به ارتفاع ۰/۴۵، نمودار ضریب دبی دو سرریز کلید پیانویی معمولی و اصلاح شده بر هم منطبق می‌شود.



شکل (۸): مقایسه منحنی تغییرات ضریب دبی سرریز PKW سرریز DPKW2/5

به منظور بررسی علل وجود اختلاف در منحنی‌های ضریب دبی دو سرریز، تصویر جریان ایجاد شده بر روی آن‌ها به ازای دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در سرریز متداول، عبور دبی مورد نظر باعث ایجاد استغراق کامل در کلید خروجی شده است؛ به نحوی که به واسطه برخورد کامل سفره‌های ریزشی از روی تاج‌های کناری به داخل کلید خروجی، سطح آب در بخش میانی کلید بالا آمده و جریان‌های خروجی از دو کلید ورودی با جریان خروجی از کلید خروجی کاملاً به هم چسبیده و در پایین دست سرریز، جریان به صورت به هم پیوسته تخلیه می‌شود. این در حالی است که در سرریز DPKW2/5 سفره‌های ریزشی از روی تاج‌های کناری، در ترازهای بسیار پایین‌تر نسبت به سرریز قبل و تقریباً بر روی

ضریب دبی نسبت به سرریز کلید پیانویی متداول افزایش یافته است، لیکن برای هدهای بالاتر، مقادیر ضریب دبی دقیقاً منطبق بر ضرایب دبی سرریز مستطیلی متداول می‌باشد. افزایش بیشتر ارتفاع دیواره قائم بالادست کلید خروجی (مدل UPKW1/3) باعث کاهش مجدد ضریب دبی در هدهای پایین نسبت به سرریز UPKW1/4 شده است. در هدهای بالاتر، منحنی ضریب دبی هر سه سرریز منطبق بر هم می‌باشند. با افزودن دیواره قائم بالادست، عمق بخش بالادست کلید خروجی افزایش پیدا کرده و باعث ممانعت از شکل‌گیری استغراق موضعی در این ناحیه و تخلیه بهتر جریان از روی تاج بالادست به داخل کلید می‌شود، لیکن دیواره قائم از دو جنبه می‌تواند اثر منفی بر عملکرد سرریز داشته باشد. اولاً دیواره قائم به عنوان یک مانع در برابر جریان نزدیک شونده به کلید خروجی عمل نموده و باعث می‌شود تا جریان به واسطه برخورد به بالادست کلید خروجی، دچار افت انرژی شده و پس از طی مسیر طولانی‌تر نسبت به سرریز کلید پیانویی متداول، از روی تاج بالادست به داخل کلید خروجی تخلیه شود. ثانیاً، کاهش تراز بخش بالادست رمپ کف کلید خروجی، منجر به کاهش شیب رمپ شده و در نتیجه جریان‌های تخلیه شده به داخل کلید، نسبت به سرریز متداول دیرتر تخلیه می‌شوند.



شکل (۷): مقایسه منحنی تغییرات ضریب دبی سرریز PKW با دو سرریز UPKW

در سرریز اصلاح شده UPKW1/4 اثر مثبت دیواره قائم در افزایش عمق بخش بالادست کلید، بیشتر از اثرات منفی ذکر شده بوده و با افزایش بیشتر ارتفاع دیواره قائم، اثرات منفی بر اثرات مثبت دیواره غالب می‌شوند. در بخش‌های

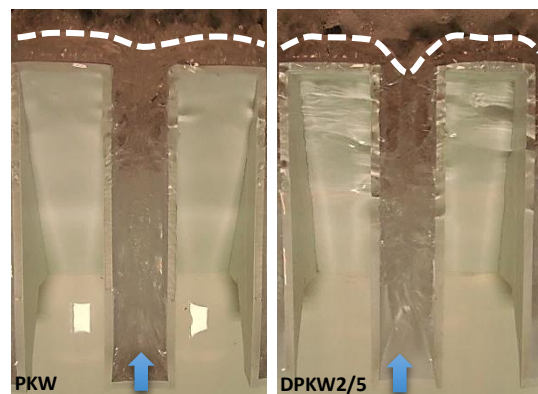
به حدی ریز می‌باشد که ضمن شناخت کامل هندسه سرریز، سکو و رمپ با استفاده از الگوریتم FAVOR، جزئیات ریز میدان در نواحی اطراف سرریز نظیر نواحی جدایی جریان با دقت بالا توسط مدل عددی قابل شبیه‌سازی می‌باشد. شرایط مرزی مورد استفاده در شکل بر روی وجوه مختلف بلوک محاسباتی نمایش داده شده است. در وجه بالادست ضمن استفاده از شرط مرزی فشار، هد آب مورد نظر به ورودی میدان اعمال شده و ضمن اعمال شرط مرزی خروجی به انتهای پایین دست بلوک محاسباتی، دبی خروجی از میدان به ازای هد اعمالی در ورودی محاسبه می‌شود. مرزهای کناری و بالای میدان از نوع متقارن بوده و در کف بلوک از شرط مرزی دیواره استفاده شده است.

به‌عنوان شرط اولیه، یک ستون آب ساکن با جزء حجم برابر با یک ($VOF=1$) در داخل میدان در نظر گرفته شد؛ به‌نحوی که گسترش طولی آن از مرز بالادست بلوک تا پایین دست سرریز بوده و تراز سطح آب اولیه، برابر با سطح آب اعمالی در مرز ورودی به‌عنوان شرط مرزی است. ستون آب ساکن، کل عرض بلوک محاسباتی را پوشش می‌دهد.

به‌منظور اطمینان از همگرایی حل و همچنین تثبیت کامل شرایط اعمالی به مدل، دبی خروجی از میدان و همچنین تغییرات زمانی سطح آب در ورودی مدل، در طول حل کنترل شد. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، زمان ۱۵ ثانیه برای همگرایی مدل و همچنین شکل‌گیری جریان دائمی کفایت می‌کند.

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، جریان بر روی سرریز کلید پیانویی PKW به ازای ۶ هد مختلف اجرا شده و دبی حالت دائمی در هر مدل تعیین و ضرایب دبی حاصله مطابق شکل (۱۱) با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به شکل، روند و مقادیر دبی حاصل از مدل‌سازی عددی انطباق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. میانگین خطای مدل‌سازی عددی، ۳/۵ درصد است.

رمپ کف کلید خروجی با یکدیگر برخورد نموده و به همین دلیل، سطح آب در بخش میانی کلید خروجی بالازدگی نداشته و پایین‌تر از تراز تاج کناری قرار گرفته است. به همین علت، جریان نهایی تخلیه‌شده از سرریز (خط‌چین نشان داده شده در انتهای سرریز) به نحوی است که به‌واسطه عدم برخورد سفره‌های ریزشی جانبی در انتهای کلید خروجی، جریان‌های کلیده‌های ورودی طرفین و کلید خروجی به‌هم‌پیوسته نمی‌باشند. در بخش آبی ضمن ارائه خطوط جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی، این پدیده با جزئیات دقیق‌تر تشریح شده است. در هد‌های بالاتر از نصف ارتفاع سرریز، کلیده‌های ورودی و خروجی هر دو مدل کاملاً پر شده و مطابق شکل (۸)، عملکرد هیدرولیکی هر دو سرریز مشابه هم است.

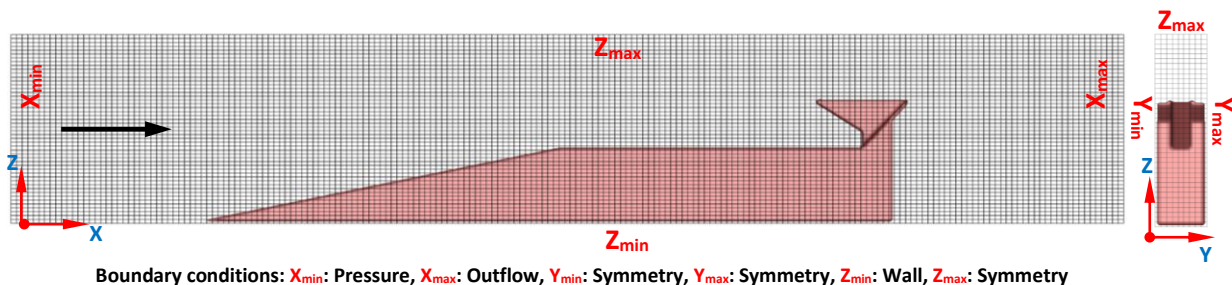


شکل (۹): مقایسه ساختار سطح آب بر روی سرریز PKW با سرریز DPKW2/5 به ازای دبی ثابت ۳۵ لیتر بر ثانیه

تنظیم مدل‌های عددی

برای شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای تست‌شده در بخش آزمایشگاهی، به دلیل وجود تقارن در مسئله، مدل عددی تک کلید واحد شامل یک کلید خروجی به همراه دو نیم کلید در طرفین مطابق شکل (۱۰) ساخته شده است. هندسه سرریز همراه با سکو و رمپ بالادست مشابه با حالت آزمایشگاهی در نظر گرفته شده و از یک بلوک محاسباتی با شبکه‌بندی کارتیزین برای انفصال میدان حل استفاده شده است.

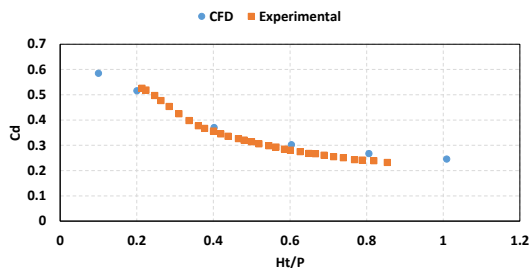
شبکه‌بندی میدان به‌صورت یکنواخت و شامل ۲۰۴، ۳۶ و ۶۵ خط به ترتیب در راستای طولی، عرضی و قائم می‌باشد به‌نحوی که تعداد کل سلول‌های محاسباتی ۴۷۷۳۶۰ عدد است. نسبت ابعاد در هر جهت برابر یک بوده و شبکه‌بندی



شکل (۱۰): جزئیات هندسی، شبکه‌بندی و تنظیم شرایط مرزی مدل عددی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی با کلید واحد

نمی‌کنند. مقایسه ساختار سطح آب بین سرریز DPKW و دو نوع سرریز دیگر نشان می‌دهد که طول ناحیه استغراق موضعی در سرریز DPKW به مراتب کمتر از دو سرریز دیگر است. با ایجاد افتادگی در پایین دست کلید ورودی (DPKW) سرعت جریان در کلید ورودی به دلیل برخورد با دیواره قائم کاهش یافته و پایین افتادگی سطح آب بسیار محدودتر شده و جریان‌های عبوری از روی تاج‌های کناری، بدون ایجاد استغراق موضعی و بدون برخورد به هم از روی تاج کناری تخلیه شده و پس از ترکیب با جریان سرریزی از تاج بالادست کلید خروجی، باعث ایجاد یک برآمدگی طولی به صورت گرده‌ماهی بر روی رمپ کف کلید خروجی می‌شوند. این درحالی‌که است که در دو سرریز دیگر، برخورد سفره‌های ریزشی از روی تاج‌های کناری در ترازهای نزدیک به تراز تاج سرریز رخ داده و باعث استغراق موضعی انتهایی کلیدهای خروجی شده است.

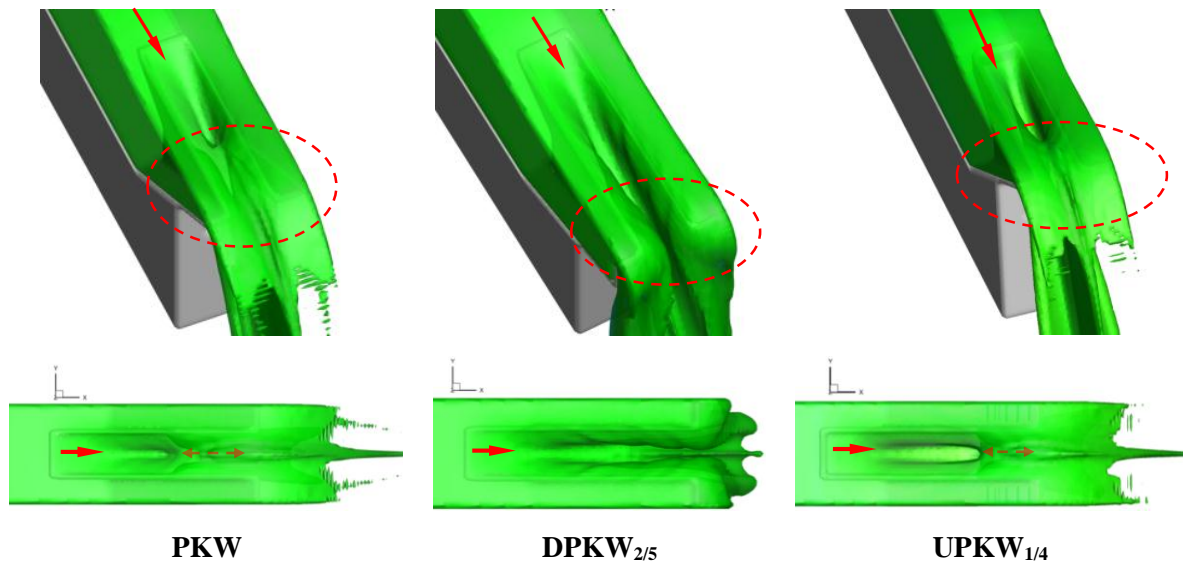
برای بررسی دقیق‌تر موضوع، خطوط جریان عبوری از صفحات قائم نزدیک به دیواره‌های کناری سرریزهای تست شده، تهیه و مطابق شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل، طول جریان ریزشی از روی تاج بالادست به داخل کلید خروجی (L) بین سه مدل متفاوت می‌باشد؛ به نحوی که در سرریز UPKW طول جریان ریزشی کوتاه‌تر از دو سرریز دیگر می‌باشد. در سرریز DPKW به علت عدم استغراق کلید خروجی، جریان عبوری از روی تاج بالادست راحت‌تر از سرریز PKW به داخل کلید تخلیه می‌شود. در سرریز UPKW، اولاً دیواره قائم بالادست به صورت یک سرریز لبه تیز عمل نموده و ضمن انحراف جریان به سمت بالا، باعث فرود قائم جریان تاج بالادست به داخل کلید خروجی می‌شود. نکته دیگر اینکه، در اثر پایین بودن تراز کف کلید خروجی، استغراق موضعی در بالادست رخ نداده و جریان عبوری از روی تاج بالادست، در اثر دو علت فوق‌الذکر، سریع‌تر و راحت‌تر از دو سرریز دیگر به



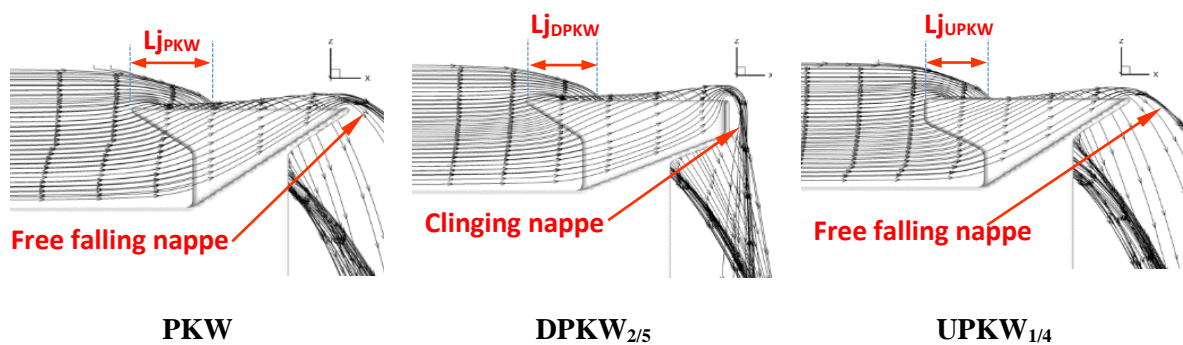
شکل (۱۱): مقایسه منحنی‌های ضریب دبی حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی سرریز PKW

ارائه نتایج مدل‌های عددی

مدل‌های عددی از سرریزهای مختلف تست شده در بخش آزمایشگاهی ساخته شده و پس از اطمینان از همگرایی و صحت نتایج در همه مدل‌ها، خروجی آن‌ها به صورت الگوی عمومی جریان و همچنین خطوط جریان عبوری از بخش‌های مختلف در محیط نرم‌افزار Tecplot تهیه شده است. در شکل (۱۲) برای سه نوع سرریز مختلف، ساختار سه‌بعدی جریان به ازای نسبت هد به ارتفاع یکسان ۰/۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مربوط به سرریزهای PKW و UPKW پیداست، جریان عبوری از روی سرریز دارای پایین افتادگی شدید در بین دو دیواره کناری بوده و در انتهای سرریز بالادستی شدید سطح آب رخ داده است. این پدیده نشان از ایجاد استغراق موضعی شدید و اغتشاش در جریان به هنگام عبور از روی سرریز دارد. ناحیه استغراق موضعی به صورت یک بیضی خط‌چین نشان داده شده و در پلان ارائه شده از سطح آب، طول ناحیه استغراق موضعی نیز مشخص شده است. با تبدیل سرریز به DPKW، رژیم جریان بر روی سرریز کاملاً تغییر یافته و به دلیل کاهش سرعت علاوه بر کاهش فراوان در پایین افتادگی سطح آب، ناحیه استغراق موضعی از بین رفته و اغتشاش شدید در سطح آب مشاهده نمی‌شود. در این حالت تیغه جریان تشکیل شده بر روی تاج‌های کناری، به هم برخورد



شکل (۱۲): ساختار سه‌بعدی جریان عبوری بر روی سرریزهای تک کلید تست‌شده به ازای $H/P=0.4$



شکل (۱۳): خطوط جریان عبوری بر روی سرریزهای تست‌شده تک کلید به ازای $H/P=0.4$

شکل (۱۳) مشهود است. با توجه به شکل، وجود دیواره قائم در انتهای کلید ورودی، باعث بالادستی سطح آب در انتهای کلید و عبور جریان از روی تاج پایین‌دست مشابه سرریز لبه تیز قائم شده است. مقایسه خطوط جریان بر روی تاج‌های کناری سرریزهای PKW و DPKW نشان می‌دهد که عبور بهتر جریان از روی تاج پایین‌دست سرریز DPKW و همچنین عدم استغراق موضعی در داخل کلید خروجی این سرریز با توزیع بهتر و با فشردگی کمتر خطوط جریان بر روی تاج‌های کناری همراه است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی متداول و همچنین کلید پیانویی با کلیدهای اصلاح‌شده مطالعه شده و ضمن تشریح ساختار عمومی جریان، منحنی‌های ضرایب دبی آن‌ها استخراج و

داخل کلید خروجی تخلیه می‌شود. همین پدیده باعث بهبود نسبی عملکرد هیدرولیکی سرریز UPKW1/4 نسبت به سرریز PKW (شکل ۷) شده است. بررسی جریان در پایین‌دست کلیدهای ورودی سرریزهای تست‌شده نشانگر وجود تفاوت آشکار بین سرریز DPKW با دو سرریز دیگر است. در سرریز متداول و همچنین UPKW، جریان عبوری از روی تاج‌های پایین‌دست، به صورت جت آزاد ریزشی بوده و همان طوری که در شکل (۱۲) نیز نشان داده شد، جریان علاوه بر عبور از روی تاج پایین‌دست، به سمت کلید خروجی نیز منحرف شده و باعث برخورد جت‌های ریزشی از روی تاج‌های کناری به یکدیگر در انتهای کلید خروجی می‌شود. در حالی که در سرریز DPKW، جریان از روی تاج پایین‌دست به صورت چسبیده (Clinging) تخلیه شده و به واسطه ریزش قائم از روی تاج به پایین، منجر به تداخل سفره‌های ریزشی در انتهای کلید خروجی نمی‌شود. این نکته با توجه به خطوط جریان در بالادست دیواره قائم انتهای کلید ورودی مدل DPKW در

- 5- Kabiri Samani, A. R. and Javaheri, A. (2012). "Discharge coefficient for free and submerged flow over piano key weir", *Journal of Hydraulic Research*, 50(3), 114-120.
- 6- Laugier, F. (2007). "Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam." *Hydropower & Dams*, 14(5), 94-101.
- 7- Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). "The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways." *The Int. J. of Hydropower and Dams*, 5(2003), 144-149.
- 8- Machiels, O. Piroton, M. Pierre. A. Dewals, B. Erpicum, S. (2014). "Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs." *Journal of Hydraulic Research*, 52(3), 326-335.
- 9- Ouamane, A. Lempérière, F. (2006). "Design of a new economic shape of weir." *Proc. Intl. Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century*, Barcelona, Spain, 463-470.
- 10- Riberio, 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.
- 11- Safarzadeh, A. Noroozi, B. (2017). "3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways." *International Journal of Civil Engineering*, 15(1), 89-101.
- 12- Tullis, B.P. Young, J.C. Chandler, M.A. (2007). "Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(3), 248-254.

تشریح گردید. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق در سرریزهای کلید پیانویی با کلید خروجی اصلاح شده به صورت تعبیه یک دیواره قائم در تاج بالادست (UPKW)، عوامل مثبت و منفی در عملکرد هیدرولیکی سرریز اثر همدیگر را خنثی نموده و عملاً ضریب آبگذری سرریز در این حالت تفاوت چندانی با سرریز متداول ندارد. در حالی که در سرریز کلید پیانویی با کلید ورودی اصلاح شده به صورت تعبیه دیواره قائم در تاج پایین دست (DPKW) جریان خروجی از تاجهای پایین دست و کناری اصلاح شده و از برخورد سفره های ریزشی جانبی در انتهای کلید خروجی تا حد زیادی جلوگیری می کند. در اثر این پدیده، ضریب دبی سرریز اصلاح شده نسبت به سرریز متداول حداکثر ۱۶ درصد افزایش یافته و تا نسبت هد به ارتفاع ۰/۴۵ تأثیر دیواره قائم در اصلاح عملکرد هیدرولیکی سرریز حفظ می شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل از طرح پژوهشی مورد حمایت دانشگاه محقق اردبیلی است.

منابع و مراجع

- ۱- صفرزاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۲). "مقایسه هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی و کنگره ای مستطیلی." *کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز.*
- ۲- صفرزاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۳). "هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان." *مجله علمی پژوهشی هیدرولیک، ۶۱-۷۹، (۳)۹.*
- 3- Anderson, R.M. Tullis, B.P. (2012). "Comparison of Piano Key and rectangular labyrinth weir hydraulics." *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 358-361.
- 4- Hien, T.C. Son, H.T. Khanh, M.H.T. (2006). "Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam." *Proc. of the 22nd Congress of ICOLD*, Barcelona, Spain.

Experimental and Numerical Study on Hydraulics of the Pianokey Weirs with Modified Keys

Akbar Safarzadeh¹

Behzad Norouzi²

Abstract

In this paper effect of the inlet and outlet keys modification on the hydraulics of the Pianokey weirs has been studied. Physical models of common rectangular Pianokey weirs (PKW) and modified Pianokey weirs (MPKW) have been made using PVC plates. Experiments are conducted for a wide range of the hydraulic conditions in order to determine the general flow field and head-discharge curves. Furthermore, detailed hydrodynamics of the tested Pianokey weirs are predicted using three dimensional numerical simulations to investigate the effects of the geometrical modifications on the hydraulic performance of the common Pianokey weirs. Discharge capacity of the Pianokey weirs with vertical wall at the upstream end of the outlet keys (UPKW), as an idea to increase the flow depth at the beginning of the key, and also a vertical wall at the downstream end of the inlet key (DPKW), as a technique to modify the flow pattern at the downstream of the weir, are evaluated. Results show that the UPKW performs almost the same as the PKW, while in the DPKW, the vertical wall at the downstream end of the inlet key, results in better distribution of the flow over the side crests and prevents the napes collision at the downstream end of the outlet keys. The improved flow field over the different parts of the DPKW increases the discharge coefficient compared to the PKW. Flow streamlines and 3D water surface maps obtained from numerical simulations, confirm these findings.

Keywords

Piano key weir, Local Submergence, Discharge coefficient, Modified keys.

¹ Associate Professor of Water Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, safarzadeh@uma.ac.ir

²MSc of Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, noroozibehzad@gmail.com