

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع بر هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی مستغرق

اکبر صفرزاده^{۱*}

سیامک خیاط رستمی^۲

چکیده

در این تحقیق، مدل فیزیکی از سرریزهای کلید پیانویی از جنس PVC در شرایط مختلف هندسی ساخته شده و آزمایش‌ها به ازای طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی برای تعیین رفتار جریان و همچنین منحنی‌های ضریب دبی، شاخص کاهش دبی و نسبت هد کل در حالات جریان آزاد و مستغرق انجام شده است. آزمایش‌ها در یک کانال به عرض یک متر انجام شده و برای اندازه‌گیری دبی از فلومتر مغناطیسی با دقت ۱ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. اندازه‌گیری پروفیل سه‌بعدی سطح آب با استفاده از یک خط کش دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام شده است. برای بررسی میزان کارایی سرریزهای موردنظر نسبت به سرریزهای خطی، جریان بر روی سرریز لبه‌تیز با عرض یک متر و به ازای شرایط هیدرولیکی متناظر با سرریزهای کلید پیانویی نیز مطالعه شد. بر اساس نتایج، رفتار هیدرولیکی سرریزهای مستغرق وابسته به ارتفاع سرریز است. با افزایش ارتفاع سرریز، آستانه استغراق کاهش یافته و بر میزان کاهش آبگذری در حالت مستغرق افزوده می‌شود. روابط کاربردی برای تعیین ضریب دبی، شاخص کاهش دبی و نیز هد کل بی‌بعد شده بر روی سرریزهای کلید پیانویی مستغرق ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

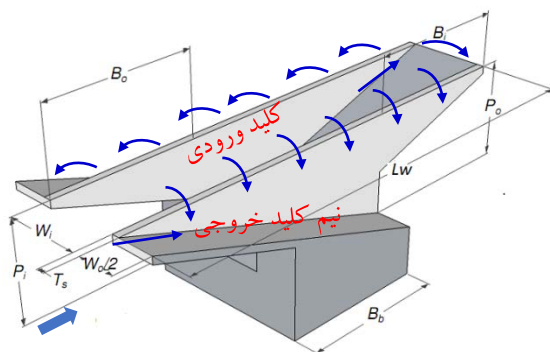
سرریز کلید پیانویی، استغراق، پروفیل سه‌بعدی سطح آب، ضریب دبی، کاهش دبی.

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

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

مقدمه

چرخشی باعث افت انرژی و در نتیجه کاهش کارایی هیدرولیکی سرریز می‌شوند (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲-۱). از دیدگاه اقتصادی نیاز به سطح پی و حجم بتن‌ریزی بالایی 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^۳، ۲۰۱۲). برای رفع این مشکلات و همچنین افزایش کارایی هیدرولیکی این سازه‌ها، لمپریه و اونامه^۴ (۲۰۰۳) نوع اصلاح‌شده این نوع سرریزها را تحت عنوان سرریزهای کلید پیانویی ارائه نمودند. در شکل (۱) نمای سه‌بعدی از یک سیکل این نوع سرریز به همراه پارامترهای معرف هندسی نشان داده شده است. با توجه به شکل، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، کف دهانه‌های سیکل-های ورودی و خروجی (کلیدها) شیب‌دار به سمت داخل و خارج هستند. علاوه بر آن، در بالادست و پایین‌دست ضمن خالی نمودن زیر کلیدها، بخش‌هایی تحت عنوان شیروانی^۵ بالادست و پایین‌دست ایجاد شده است.



شکل (۱): یک سیکل از سرریز کلید پیانویی به همراه پارامترهای هندسی معرف

در این شکل W_0 و W_1 به ترتیب نشان‌دهنده عرض کلیدهای ورودی و خروجی و B_0 و B_1 به ترتیب طول شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سرریز هستند. L_w طول تاج کناری بوده و P_0 ارتفاع کل سرریز است. P_i ، B_b و T_s ارتفاع کلید، عرض فونداسیون و ضخامت دیواره است. طول توسعه‌یافته تاج

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، ولی 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 توسط جریان عبوری از روی آن پر شده و باعث کاهش آبگذری سرریز می‌شود. در صورتی که تراز سطح آب پایاب فراتر از تراز تاج سرریز باشد، استغراق کلی سرریز رخ خواهد داد. این نوع حالت عمدتاً برای سرریزهای واقع در کانال‌ها و رودخانه‌ها رخ داده و در صورتی که سرریز به‌عنوان یک بند انحرافی عمل کند، در شرایط سیلابی و یا به واسطه افزایش مقاومت جریان در پایین‌دست ناشی از رشد بیش‌از‌حد پوشش گیاهی نیز احتمال وقوع این پدیده وجود دارد.

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 هستند 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^۲ و همکاران ۲۰۰۷):

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

که در آن Q دبی عبوری از سرریز و C_d ، L_t و H_t به ترتیب ضریب دبی، طول تاج توسعه‌یافته و هد کل (مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی) بر روی سرریز. سرریزهای کنگره‌ای دارای دیواره‌های قائم بوده و به واسطه برخورد جریان (به‌ویژه جریان‌های تحتانی) به دیواره‌ها و شکل‌گیری نواحی

⁵ Overhang

¹ Labyrinth

² Tullis

³ Anderson & Tullis

⁴ Lempérière & Ouamane

و کنگره‌ای با کلیدهای شیب‌دار را به صورت سه‌بعدی مطالعه کرده و نشان دادند در سرریزهای کلید پیانویی به واسطه حذف فشرده‌گی 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^۸ و شکل پشت‌بند نیز توسط محققین مطالعه شده است (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲-۲ و ۱۳۹۳-۱). دابلینگ و تولیس^۹ (۲۰۱۲) هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی واقع در کانال‌ها را مطالعه نموده و به این نتیجه رسیدند که در شرایط استغراق کم، سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای نیاز به انرژی بالادست کمتری برای عبور یک دبی ثابت دارند. فیستر^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر شکل تاج بر منحنی ضریب دبی این نوع سرریزها پرداختند. ماچیلِس و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه پارامتریک جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی پرداخته و روابط زیر را برای تعیین دبی عبوری از یک سیکل سرریز کلید پیانویی ارائه نمودند:

$$q = q_u \frac{W_o}{W_u} + q_d \frac{W_i}{W_u} + q_s \frac{2 L_w}{W_u} \quad (۳)$$

$$q_u = 0.374 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \times \left[1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right] \sqrt{2gH^3} \quad (۴)$$

$$q_d = 0.445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \times \left[1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right] \sqrt{2gH^3} \quad (۵)$$

$$q_s = 0.41 \left(1 + \frac{1}{0.833H + 1.6} \right) \times \left[1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833H + P_e} \right)^2 \right] \times \left[\frac{P_e^\alpha + \beta}{(0.833H + P_e)^\alpha + \beta} \right] K_{W_i} K_{W_o} \sqrt{2gH^3} \quad (۶)$$

در روابط فوق، q_u ، q_d و q_s = به ترتیب دبی عبوری از واحد طول تاج بالادست کلید خروجی، تاج پایین‌دست کلید ورودی و تاج کناری. بقیه پارامترها عبارتند از:

و همچنین عرض یک سیکل (W_u) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L_t = 2L_w + W_i + W_o \quad (۲)$$

$$W_u = W_i + W_o + 2T_s$$

اولین سرریز کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ بر روی سد گلورس^۱ در کشور فرانسه اجرا شده است (لاوگیر^۲ ۲۰۰۷). طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ برای بهبود عملکرد تخلیه سیلاب سدهای مختلفی نظیر سنت‌مارک^۳، اترویت^۴، گلوریتس^۵ نیز از سرریزهای کلید پیانویی استفاده شد. مطالعات آزمایشگاهی اوانامه و لمپریه (۲۰۰۶) نشان داد که در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد؛ کلید ورودی، جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه‌تیز با بدنه شیب‌دار جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پایین‌دست تخلیه می‌شود. الگوی دوم بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این بخش، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین‌دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود.

بر اساس مطالعات هین^۶ و همکاران (۲۰۰۶) مقدار بهینه برای نسبت W_i/W_o برابر ۱/۲ است. روند طراحی این نوع سرریزها اولین بار توسط ماچیلِس^۷ 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 این تحقیقات، 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 را ارائه نمودند. اندرسون و تولیس (۲۰۱۲) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی مستطیلی را مقایسه کردند. صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۲-۱) هیدرودینامیک سرریزهای کلید پیانویی، کنگره‌ای

⁶ Hien

⁷ Machiels

⁸ Parapet wall

⁹ Dabling & Tullis

¹⁰ Pfister

¹ Golours

² Laugier

³ St. Marc

⁴ Etroit

⁵ Gloriettes

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال شیب پذیر با مقطع مستطیلی به عرض (W) یک متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر انجام شد. کف کانال فلزی بوده و جداره‌های آن از جنس شیشه هستند. در شکل (۲) جزئیات تجهیزات آزمایشگاهی نشان داده شده است. جریان از طریق یک پمپ با ظرفیت اسمی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه از مخازن تحتانی پمپاژ و به مخزن بالادست تخلیه می‌شود. در مسیر جریان بین دو این مخزن، دبی‌سنج مغناطیسی از نوع مگاب ۳۰۰۰ با دقت ۱ لیتر بر ثانیه قرار گرفته است. جریان پس از تخلیه به مخزن بالادست توسط سه شبکه مشبک آرام شده و وارد کانال می‌شود. در ابتدای کانال برای استهلاک نوسانات سطحی جریان از یک صفحه یونولیت شناور به طول ۲ متر استفاده شده است. برای جلوگیری از تأثیر جریان پایین‌دست سرریز بر ظرفیت تخلیه آن در حالت آزاد، از یک رمپ و سکوی مستقیم برای استقرار سرریزهای مختلف استفاده شد. طول بخش‌های شیب‌دار و مستقیم به ترتیب نیم متر و یک متر بوده و ارتفاع سکو ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. سکوی موردنظر به نحوی طراحی شده است که امکان نصب سرریز لبه‌تیز با ارتفاع متغیر در بخش مقابل آن (شکل ۲-ب) و همچنین استقرار انواع دیگر سرریزها بر روی آن وجود دارد. سرریز لبه‌تیز از ورق آهنی با ضخامت ۶ میلی‌متر و با زاویه تاج ۶۰ درجه ساخته شده است. هدف از ساخت سرریز لبه‌تیز، کالیبراسیون دبی‌سنج، اطمینان از ابعاد سکوی استقرار و عملکرد رمپ بالادست و همچنین تهیه داده‌های دبی-اشل سرریز خطی برای اهداف بعدی تحقیق بوده است. معادله حاکم بر سرریز لبه‌تیز همان معادله (۱) بوده و در این نوع سرریز، رابطه زیر برای ضریب دبی ارائه شده است (رهبوک^۱، ۱۹۲۹):

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{P} \quad (13)$$

که در آن، P = ارتفاع سرریز و h = هد هیدرواستاتیکی بر روی سرریز. در شکل (۳) مقایسه هد تشکیل شده بر روی سرریز لبه‌تیز بر اساس روابط (۱) و (۱۳) و نیز هد اندازه‌گیری شده با خط‌کش دیجیتال به ازای دبی‌های مختلف ورودی به کانال نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، همخوانی بسیار

$$P_e = \frac{B_o}{L_w} P_T + (1 - \frac{B_o}{L_w}) \frac{P}{2} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{0.7}{S_i^2} - \frac{3.58}{S_i} + 7.55 \quad (8)$$

$$\beta = 0.029e^{-1.446/S_i} \quad (9)$$

$$K_{W_i} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + W_i^2}, \gamma = 0.0037 \left(1 - \frac{W_i}{W_o}\right) \quad (10)$$

$$K_{W_o} = \frac{2}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right)^3 - \frac{3(\delta_2 + \delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right)^2 + \frac{6\delta_2\delta_1}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right) + \frac{\delta_2^2(\delta_2 - 3\delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \quad (11)$$

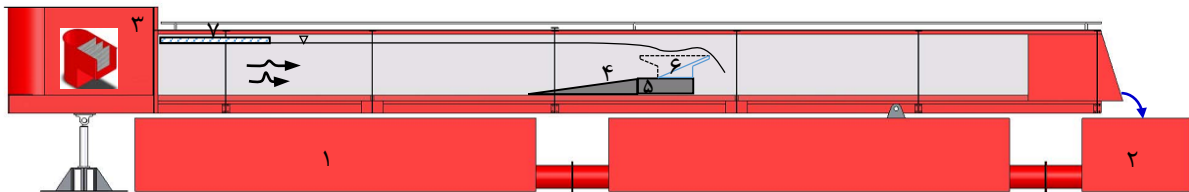
$$\delta_1 = -0.788S_i^{-1.88} + 5$$

$$\delta_2 = 0.236S_i^{-1.94} + 5 \quad (12)$$

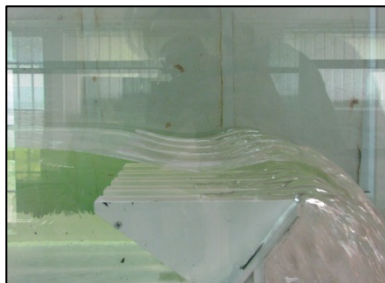
در روابط فوق، S_i = شیب کلید ورودی. صفرزاده و نوروزی (۲۰۱۵) با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی، ساختار جریان بر روی سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای را مطالعه نموده و به بهبود مناسب ضریب دبی این نوع سرریزها در سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی و کنگره‌ای اشاره نمودند که در آن به اهمیت تاج کناری بر عملکرد هیدرولیکی سرریز تأکید شده است. صفرزاده و نوروزی (۲-۱۳۹۳) هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیاپویی انحنادار در پلان را مطالعه نمودند. مرور مطالعات قبلی نشان می‌دهد که بخش اعظمی از تحقیقات صورت گرفته در مورد این موضوع مربوط به جریان آزاد بوده و در تحقیقات انجام شده برای رژیم جریان مستغرق (دابلینگ و تولیس (۲۰۱۲) و کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲))، ارتفاع سرریز ثابت در نظر گرفته شده است. در نتیجه تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریزها به‌طور کامل مشخص نیست. در این تحقیق، سرریزهای کلید پیاپویی با سه ارتفاع مختلف و نسبت طول تاج به عرض کانال (L_t/W) یکسان ساخته شده و تأثیر ارتفاع سرریز بر عملکرد هیدرولیکی آن در شرایط مستغرق به‌صورت روابط و منحنی‌های کاربردی ارائه شده است.

سرریزها)، مدل عددی سه‌بعدی جریان بر روی سرریز لبه‌تیز به ازای دبی ۵۳ لیتر بر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D ساخته شده و خطوط جریان حاصله در صفحه میانی مدل در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل، جریان بدون وجود اغتشاش بر روی رمپ و سکو سوار شده و طول کافی برای ایجاد خطوط جریان موازی بر روی سکو وجود دارد.

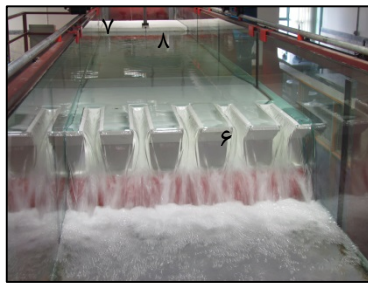
مناسبی بین مقادیر هد اندازه‌گیری شده و محاسباتی وجود دارد. دقت اندازه‌گیری دبی و میزان صحت آن، بیشترین تأثیر را در صحت نتایج عملکرد هیدرولیکی سرریزهای اصلی این تحقیق خواهد داشت. با توجه به نتایج این بخش، دبی‌سنج مورد استفاده از دقت کافی برخوردار است. برای بررسی عملکرد مجموعه سکو و رمپ و همچنین اطمینان از عدم شکل‌گیری جریان نامناسب بر روی بخش افقی سکو (قبل از محل نصب



(الف)



(د)



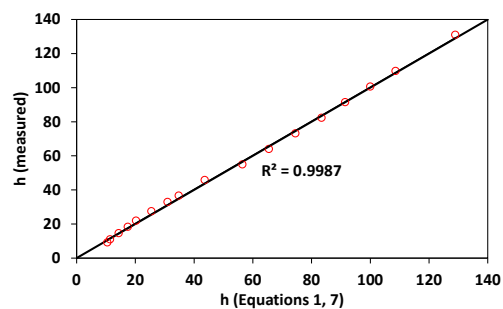
(ج)



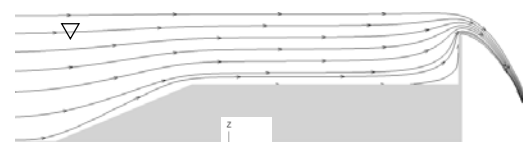
(ب)

۱- مخزن تحتانی، ۲- مخزن انتهایی، ۳- مخزن بالادست، ۴- رمپ، ۵- سکوی استقرار سرریز، ۶- سرریز کلید پیانویی، ۷- صفحه یونولیت شناور، ۸- خط کش دیجیتال شکل (۲): فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی. الف) نمای جانبی کانال و قرارگیری رمپ و سکوی استقرار سرریز کلید پیانویی بر روی آن، ب) سرریز لبه‌تیز، ج) جریان بر روی سرریز کلید پیانویی در حالت آزاد و د) نمای جانبی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی

این نکته با تزریق ماده رنگی در آزمایشگاه نیز تأیید شده است. مدل سرریزهای کلید پیانویی از صفحات پی‌وی‌سی سفید با ضخامت ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. در شکل (۵) مدل شماتیک سه‌بعدی به همراه جزئیات هندسی سرریزهای آزمون شده نشان داده شده است. در جدول (۱) ابعاد هندسی مدل‌ها ارائه شده است. در این تحقیق سه ارتفاع مختلف سرریز به نحوی ساخته شدند که نسبت طول توسعه‌یافته تاج به عرض کانال در تمامی آن‌ها برابر ۵ است. سرریزها پس از نصب بر روی یک صفحه، روی سکو قرار گرفته و پس از آب‌بندی کامل، آزمایش‌های موردنظر بر روی آن‌ها انجام گردید.



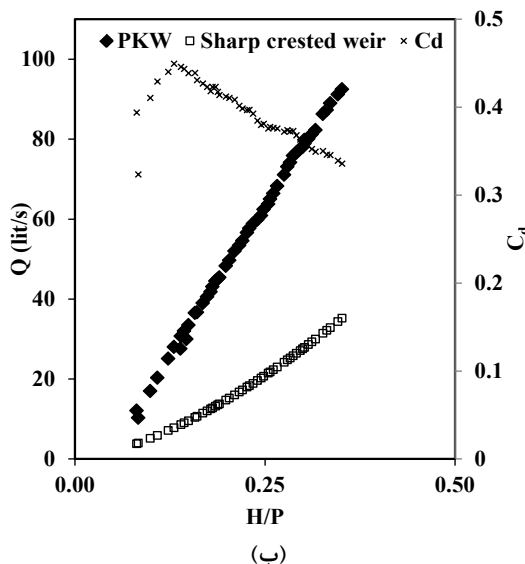
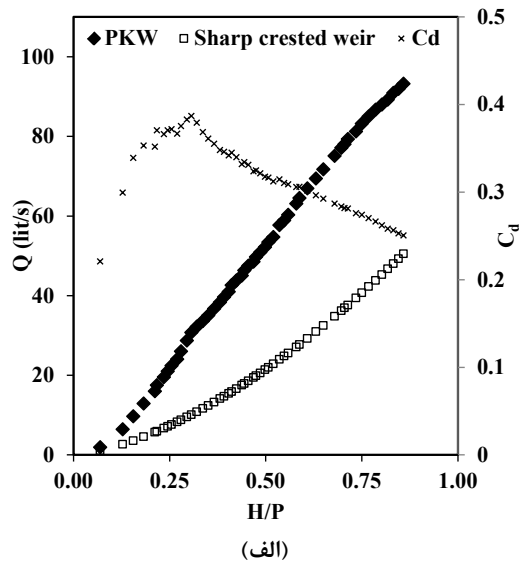
شکل (۳): مقایسه هد روی سرریز لبه‌تیز بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی



شکل (۴): خطوط جریان بر روی مجموعه رمپ و سکو در حالت وجود سرریز لبه‌تیز

نتایج

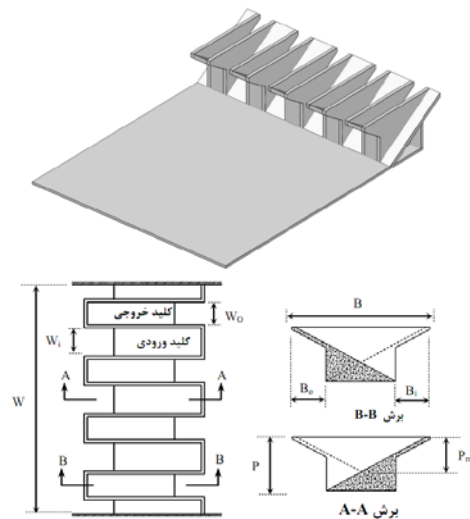
در شکل (۶) روند تغییرات دبی برای سرریزهای لبه تیز و کلید پیانویی با ارتفاعهای ۱۰ و ۲۰ سانتی متر نشان داده شده است. همچنین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و در شکل (۶) رسم شده است. با توجه به شکل، دبی سرریزهای لبه تیز به صورت غیرخطی تغییر کرده است؛ ولی در سرریزهای کلید پیانویی با افزایش هد، دبی به صورت خطی افزایش پیدا می کند. دبی سرریزهای کلید پیانویی PKW_{10} ، PKW_{15} و PKW_{20} به طور میانگین $۲/۶۳$ ، $۳/۰۵$ و $۳/۱۱$ برابر دبی سرریزهای خطی با ارتفاع یکسان است. با افزایش ارتفاع سرریز، نسبت دبی افزایش می یابد ولی شیب بهبود آگذری سرریز کاهش می یابد.



شکل (۶): روند تغییرات دبی و ضریب دبی با تغییر هد روی سرریز در حالت آزاد. الف) PKW_{10} و ب) PKW_{20}

هیدرولیک جریان آزاد

جریان آزاد بر روی سرریزهای مختلف به ازای دبی های مختلف ورودی و پایاب آزاد ایجاد شده و پس از اطمینان از ثابت ماندن دبی ورودی، اندازه گیری هد روی سرریز در فاصله ۷ برابر ارتفاع سرریز در بالادست انجام شد. دبی ورودی با گام های یک لیتر بر ثانیه تغییر داده شد. لازم به ذکر است که برای تمامی حالات آزمون شده، در مرحله واسنجی دبی سنج و کالیبراسیون سیستم آزمایشگاهی، اندازه گیری دبی-اشل سرریزهای لبه تیز با ارتفاع متناظر با سرریزهای کلید پیانویی انجام شده بود.



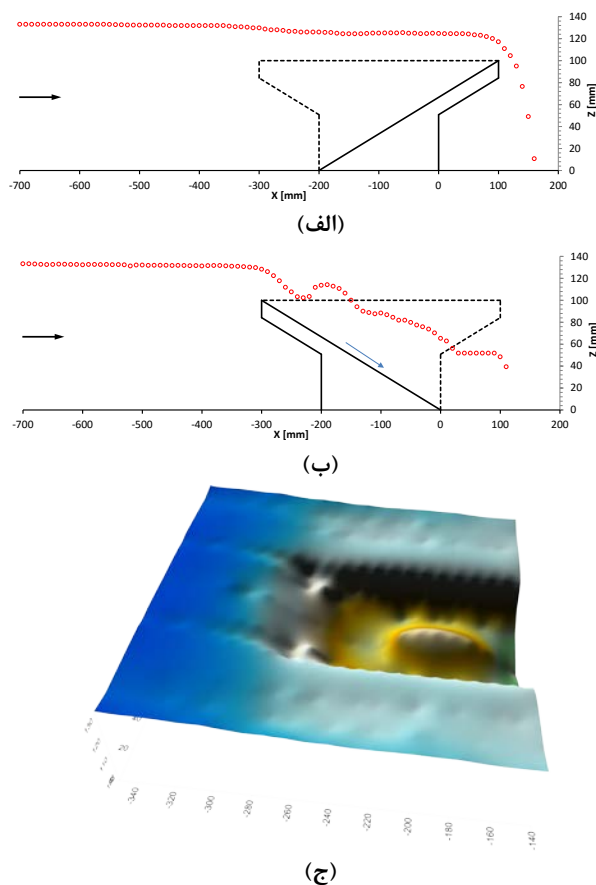
شکل (۵): هندسه سرریزهای کلید پیانویی آزمون شده به همراه جزئیات ابعاد برای سه ارتفاع مختلف

جدول (۱): جزئیات ابعاد برای سه ارتفاع مختلف سرریزهای کلید پیانویی آزمون شده

پارامتر	کد مدل	PKW_{10}	PKW_{15}	PKW_{20}
	P	۱۰	۱۵	۲۰
	P_m	۶/۶۷	۱۰	۱۳/۳۳
	B	۴۰	۴۰	۴۰
	B_i	۱۰	۱۰	۱۰
	B_o	۱۰	۱۰	۱۰
	W_i	۱۰/۱۴	۱۰/۱۴	۱۰/۱۴
	W_o	۶/۷۶	۶/۷۶	۶/۷۶
	L_t	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰

تمامی ابعاد به سانتی متر هستند

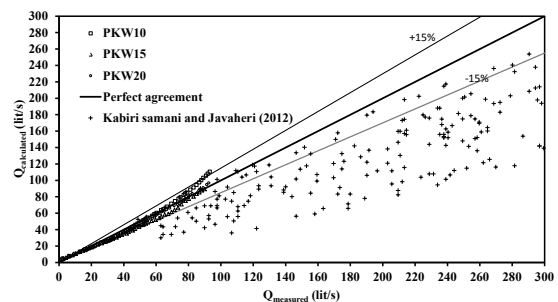
به صورت جت ریزی به پایین دست تخلیه می‌شود. الگوی جریان عبوری از کلید خروجی بسیار پیچیده‌تر از کلید ورودی است (شکل ۸-ب). در این بخش از سرریز، به واسطه تلاقی جریان ناشی از جت‌های ریزی از تاج‌های کناری با جریان تاج خروجی بالادست، بالا زدگی سطح آب رخ داده و بر روی شیب کلید خروجی، الگوی گرده‌ماهی شکل می‌گیرد. این نکته به خوبی در شکل (۸-ج) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات سطح آب بر روی سرریز PKW₁₀ برای دبی ۳۲/۲ لیتر بر ثانیه در حالت آزاد. (الف) پروفیل طولی سطح آب بر روی کلید ورودی، (ب) پروفیل طولی سطح آب بر روی کلید خروجی و (ج) تصویر سه‌بعدی و وقوع پدیده استغراق موضعی در کلید خروجی

وقوع این پدیده باعث کاهش ظرفیت تخلیه از تاج خروجی بالادست می‌شود. از طرف دیگر، جریان‌های ریزی از تاج‌های کناری در دبی‌های بالا به یکدیگر برخورد نموده و باعث پر شدن کلید خروجی می‌شوند. این دو پدیده باعث ایجاد استغراق موضعی و کاهش ظرفیت آبگذری سرریز کلید پیانویی در دبی‌های بالا می‌شوند. لازم به ذکر است که با توجه

با توجه به شکل (۶)، بیشترین مقدار ضریب دبی PKW₁₀ برابر ۰/۳۸ بوده و در سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، بیشینه ضریب آبگذری، ۰/۴۵ است. با افزایش ارتفاع سرریز، بیشینه ضریب دبی در نسبت هد به ارتفاع کمتری رخ می‌دهد. در شکل (۷) مقایسه هد روی سرریزهای مختلف بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر محاسباتی حاصل از رابطه (۳) به ازای دبی ۲ تا ۹۳ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. با توجه به شکل، همخوانی بسیار مطلوبی بین نتایج این تحقیق و رابطه ارائه‌شده توسط ماچلیس و همکاران (۲۰۱۴) وجود دارد. تمامی داده‌ها در محدوده خطای $\pm 1.5\%$ قرار گرفته و بیشترین خطا مربوط به سرریز با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر است. در این شکل، مقایسه داده‌های آزمایشگاهی کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) با رابطه (۳) نیز ارائه شده است. با توجه به شکل، همخوانی نتایج این تحقیق با آخرین نتایج ارائه‌شده بر روی رابطه هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی، بسیار بهتر از نتایج حاصل از تحقیقات این محققین است. به نحوی که مقادیر دبی اندازه‌گیری شده در تحقیق کبیری سامانی و جواهری، همواره کمتر از مقادیر دبی حاصل از رابطه (۳) است. علت این امر، ساخت سرریزهای از جنس صفحات گالوانیزه در تحقیق ایشان است به طوری که شکل تاج و ضخامت دیواره‌ها در آن لحاظ نشده است.

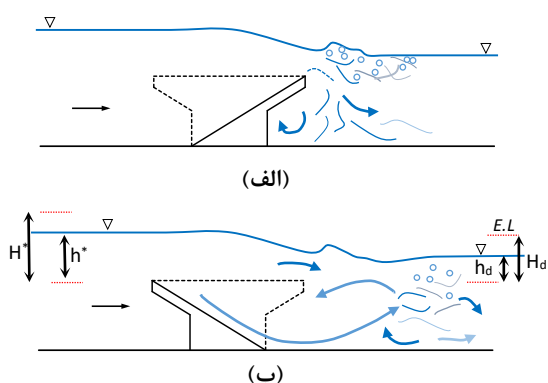


شکل (۷): مقایسه دبی اندازه‌گیری شده و محاسباتی بر روی سرریزهای کلید پیانویی با سه ارتفاع مختلف در حالت آزاد

در شکل (۸) تغییرات سطح آب در محدوده سرریز PKW₁₀ به ازای دبی ۳۲/۲ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. اندازه‌گیری در فواصل عرضی و طولی یک سانتی‌متری با استفاده از خط‌کش دیجیتال انجام شده است. با توجه به شکل (۸-الف) با توجه به زیربهرانی بودن جریان نزدیک شونده، بر روی کلید ورودی، ضمن افزایش تراز بستر، کاهش تراز سطح آب رخ داده و جریان پس از رسیدن به لبه تاج خروجی پایین‌دست،

هیدرواستاتیکی (h_0) و هد کل (H_0) ایجاد شده بر روی سرریزها در حالت جریان آزاد در بخش قبل اندازه گیری شده بودند.

لازم به ذکر است که اعمال چهار دبی مختلف در ورودی، معادل با ایجاد چهار حالت H_0/P در هر سرریز است. در شکل (۱۰) منحنی تغییرات H_d/H_0 در مقابل H^*/H_0 برای سرریزهای مختلف و برای سه دبی مختلف ورودی نشان داده شده است.



شکل (۹): الگوی جریان پایین دست سرریز مستغرق. الف) کلید ورودی و ب) کلید خروجی

با توجه به شکل‌های ارائه شده، با افزایش تراز آب در پایین دست، هد مورد نیاز برای عبور یک دبی معین، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بخش‌های ابتدایی منحنی‌ها به صورت خطی بوده و داده‌ها بر روی خط ($H^*/H_0=1$) قرار دارند. در یک محدوده خاص، مقدار هد بالادست به صورت نمایی افزایش می‌یابند. در واقع استغراق عمومی سرریز، از این محدوده به بعد شروع می‌شود. ویلمونته (۱۹۴۷) و تولیس و همکاران (۲۰۰۷) پارامتر زیر را به عنوان شاخص آستانه استغراق معرفی نموده‌اند:

$$S = \frac{H_d}{H^*} \quad (14)$$

بر اساس تحقیق آزمایشگاهی کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) در صورتی که $S \geq 0.6$ باشد، استغراق رخ خواهد داد. این مقدار در کار دابلینگ و تولیس (۲۰۱۲) برابر 0.48 گزارش شده است.

در این تحقیق با توجه به منحنی‌های (۱۰-الف) الی (۱۰-ج)، مقدار پارامتر آستانه استغراق در محدوده $0.3 < S < 0.5$ قرار دارد به طوری که، با افزایش ارتفاع سرریز، آستانه استغراق کاهش می‌یابد.

به نتایج تحقیقات قبلی (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۳) به علت شیب‌دار بودن کف کلیدهای خروجی، کاهش دبی ناشی از استغراق موضعی سرریزهای کلید پیانویی کم‌تر از سرریزهای کنگره‌ای با کف افقی است. در ادامه، تأثیر افزایش تراز آب در پایاب به بالاتر از تراز تاج سرریز و وقوع استغراق کلی بر هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی پرداخته شده و نقش ارتفاع سرریز در نحوه عبور جریان مستغرق از این نوع سرریزها بررسی شده است.

هیدرولیک جریان مستغرق

در صورتی که تراز پایاب به دلایلی مانند وقوع سیلاب و یا مقاومت ناشی از حضور پوشش گیاهی افزایش یافته و برابر یا بیشتر از تراز تاج سرریز شود، استغراق عمومی رخ داده و مطابق شکل (۹) تخلیه جریان از هر دو کلید ورودی و خروجی را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

جریان خروجی از کلید ورودی به سطح آب در پایین دست برخورد نموده و باتوجه به تراز آب پایاب (h_d) به صورت چرخش سطحی (در تراز پایاب کم) و اغتشاش سطحی (در تراز پایاب زیاد) ظاهر می‌شود. بخش کمی از جریان نیز به سمت پایین منحرف شده و پس از برخورد با بستر پایاب، ناحیه چرخشی ضعیفی در زیرشیروانی پایین دست کلید ورودی ایجاد می‌کند. جریان کلید خروجی به صورت یک جت مستغرق وارد ناحیه پایین دست شده و به واسطه اعمال مومنتم شدید بر سیال فوقانی، منجر به شکل‌گیری ناحیه چرخشی شدید در مقابل کلید خروجی می‌شود. ناحیه چرخشی شکل گرفته، علاوه بر مقاومت در برابر جریان‌های تحتانی کلید خروجی، جریان‌های سطحی عبوری از روی کلید خروجی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. عوامل فوق باعث می‌شوند تا برای تخلیه یک دبی ثابت نسبت به جریان آزاد، نیاز به هد بیشتری باشد. در نهایت، انتظار می‌رود که ضریب دبی حالت مستغرق، کمتر از حالت آزاد باشد.

برای بررسی هیدرولیک حاکم بر حالت مستغرق، چهار مقدار دبی $32/2$ ، $41/6$ ، $58/4$ و 72 لیتر بر ثانیه در ورودی کانال برای هر سه مدل سرریز برقرار شده و ضمن تغییر تراز آب در پایاب با استفاده از سرریز بادبزی انتهای کانال، تراز آب در بالادست (h^*) در هر حالت اندازه‌گیری شد. مقادیر هد

ولی در هر سرریز، روند تغییرات منحنی‌ها مستقل از مقدار دبی ورودی است. در این شکل‌ها، منحنی قرمز بیانگر بهترین منحنی برازش داده‌شده بر داده‌های هر مدل سرریز بوده و در شکل (۱۰-ج) مقایسه منحنی‌های برازش داده‌شده، نشان داده شده است.

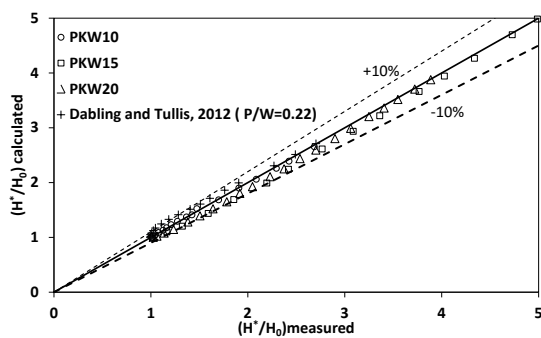
با توجه به این شکل، به ازای یک مقدار معین (H_d/H_0) با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار هد بی‌بعد بالادست برای عبور یک دبی معین افزایش می‌یابد. رابطه (۱۵) با استفاده از کل داده‌ها برای تعیین هد بالادست به ازای تغییر هد پایین‌دست در سرریزهای کلید پیانویی استخراج شده است.

$$\frac{H^*}{H_0} = \left(A + B \left(\frac{P}{W} \right)^C \right) \left(\frac{H_d}{H_0} \right) + e^{D \left(\frac{H_d}{H_0} \right)} \quad (15)$$

$$A = 0.95, B = 4, C = 2, D = -1.13$$

$$R^2 = 0.998$$

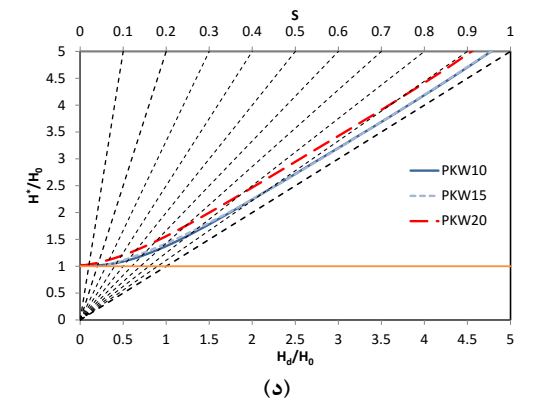
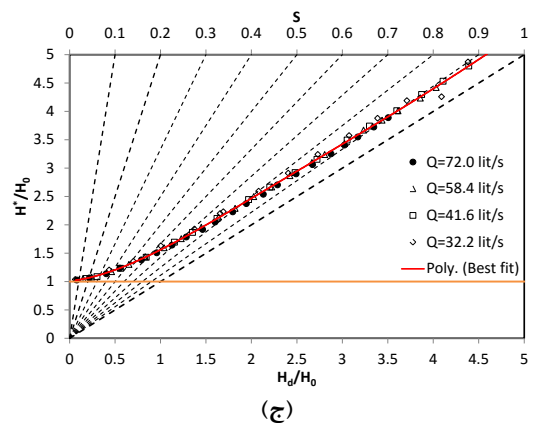
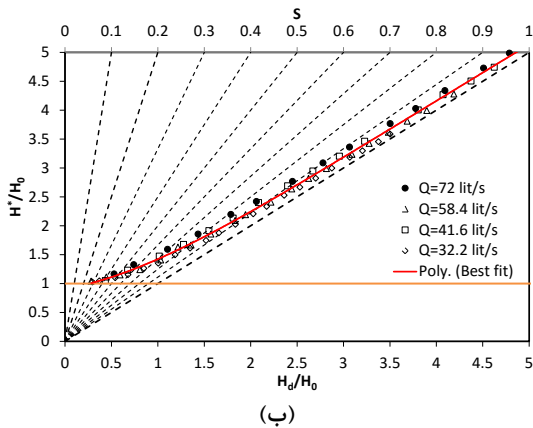
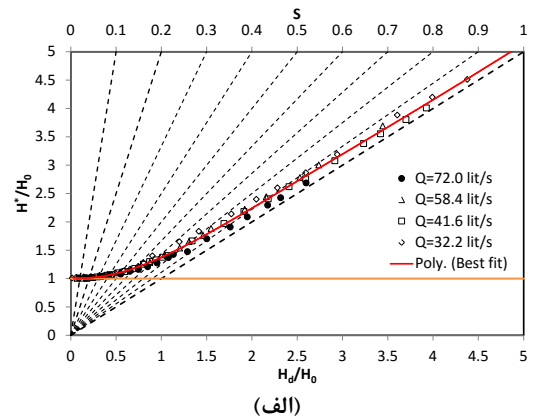
در شکل (۱۱) مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسبه‌شده از رابطه (۱۵) نسبت H^*/H_0 ، برای سه سرریز آزمون شده و همچنین داده‌های دابلینگ و تولیس (۲۰۱۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل، رابطه ارائه‌شده ضمن لحاظ نمودن تأثیر ارتفاع سرریز، به‌خوبی قادر به پیش‌بینی هد بالادست به ازای اعمال ترازهای مختلف در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی مستغرق است.



شکل (۱۱): مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی H^*/H_0

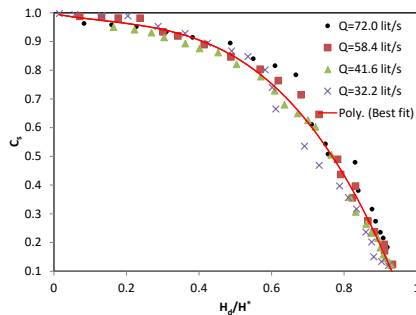
دبی عبوری از روی یک سرریز کلید پیانویی مستغرق (Q_s) به ازای یک هد معین، کمتر از سرریز آزاد بوده و ضریب زیر به‌عنوان ضریب کاهش دبی مورد استفاده است:

$$C_s = \frac{Q_s}{Q} \quad (16)$$

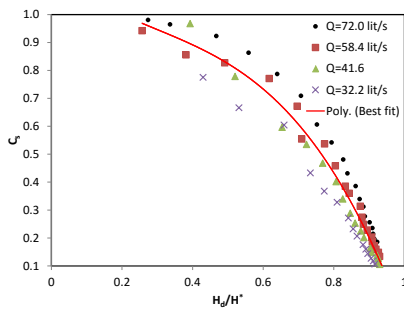


شکل (۱۰): تغییرات H^*/H_0 در مقابل H_d/H_0 برای سه نوع سرریز در حالت مستغرق. الف) PKW10، ب) PKW15، ج) PKW20 و د) مقایسه منحنی برازش یافته بین سه مدل

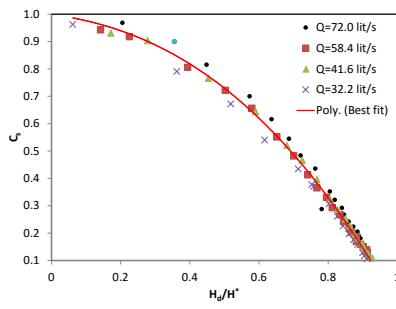
بیشترین کاهش در عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی مستغرق، با افزایش ارتفاع رخ می دهد.



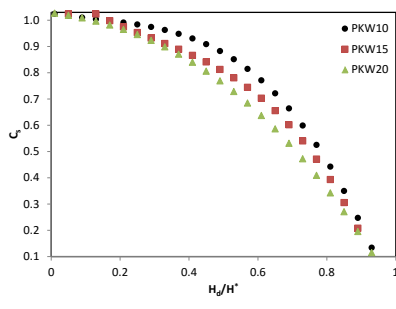
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۲): تغییرات نسبت دبی مستغرق (C_s) در مقابل H_d/H^* برای سه نوع سرریز. (الف) PKW₁₀, (ب) PKW₁₅, (ج) PKW₂₀ و (د) مقایسه منحنی برازش یافته بین سه مدل

در شکل (۱۲) تغییرات این پارامتر در مقابل هد نسبی پایاب برای سرریز کلید پیانویی با ارتفاع‌های مختلف و چهار دبی حالت جریان آزاد نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مزبور، با افزایش تراز پایاب، ضریب کاهش دبی کوچک‌تر شده و به عبارت دیگر، دبی عبوری از روی سرریز مستغرق به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.

بهترین منحنی برازش یافته برای چهار دبی مختلف در هر مدل سرریز با خط پر نشان داده شده و در شکل (۱۲-ج) مقایسه بین سرریز با ارتفاع‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل، با افزایش ارتفاع سرریز، از میزان کارایی آن در حالت مستغرق کاسته می‌شود. با لحاظ نمودن نسبت $\frac{P}{W}$ ، رابطه زیر برای تعیین ضریب کاهش دبی برای داده‌های برداشت‌شده در این تحقیق استخراج شده است:

$$C_s = (1 - (S)^\alpha)^\beta$$

$$\alpha = 1.48 \left(\frac{P}{W}\right)^{-0.25}, \beta = 2.15 \left(\frac{P}{W}\right)^{0.3} \quad (16)$$

$$R^2 = 0.94$$

در شکل (۱۳) مقایسه مقادیر بی‌بعد شده هد کل بالادست بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با رابطه (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل، همخوانی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه (۱۶) مناسب بوده و تمامی داده‌ها در محدوده خطای $\pm 10\%$ واقع شده‌اند. کمترین میزان خطا مربوط به مقادیر بالای ضریب کاهش دبی است.

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی در یک فلوم آزمایشگاهی، تأثیر ارتفاع سرریز بر هیدرولیک جریان‌های آزاد و مستغرق عبوری از روی آن‌ها مطالعه شد. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق، با افزایش ارتفاع، آستانه استغراق سرریز کاهش یافته و به عبارت دیگر، سرریز در مقدار نسبت هد پایاب به هد سراب کوچکتری، مستغرق می‌شود. علاوه بر آن با افزایش ارتفاع، ضریب کاهش دبی نیز کاهش یافته و در نسبت هد پایاب به هد سراب $0/5$ ،

hydraulic model tests in Vietnam.” Proceedings of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain.

8- Kabiri-Samani, A. R. and Javaheri, A. (2012). “Discharge coefficient for free and submerged flow over piano key weirs.” *Journal of Hydraulic Research*. 50(1), 114-120.

9- Laugier, F. (2007). “Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam.” *Hydropower & Dams*. 14(5), 94-101.

10- Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). “The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways.” *International Journal on Hydropower & Dams*. 5(2003), 144-149.

11- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. (2011). “Influence of Piano Key weir height on its discharge capacity.” Proceedings of International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 59-66.

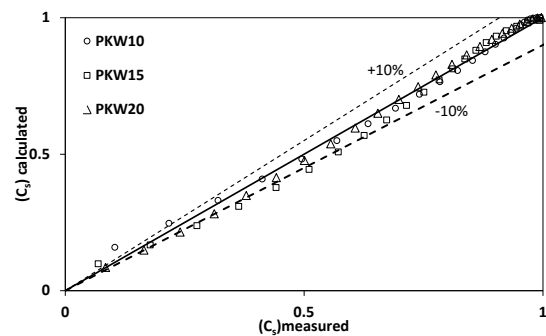
12- Machiels, O., Piroton, M., Pierre., A., Dewals, B. and Erpicum, S. (2014). “Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs.” *Journal of Hydraulic Research*. 52(3), 326-335.

13- Ouamane, A. and Lempérière, F. (2006). “Design of a new economic shape of weir.” Proceedings of International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain, 463-470.

14- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B. and Schleiss, A. (2013). “Debris-blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir-Type approach flow.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 139(11), 1134-1141.

15- Riberio, M., Pfister, M., Schleiss, A. J. and Boillat, J. L. (2012). “Hydraulic design of A-type Piano Key weirs.” *Journal of Hydraulic Research*. 50(4), 400-408.

16- Safarzadeh, A., Noroozi, B. (2015). “3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways.” *International Journal of Civil Engineering*. 13(6), 345-358.



شکل (۱۳): مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی C_p

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی برای انجام این تحقیق تشکر می‌نمایند.

مراجع

- ۱- صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (۱۳۹۲). "مقایسه هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی و کنگره‌ای مستطیلی." کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز.
- ۲- صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (۱۳۹۲). "بررسی عددی تأثیر دیوار جان‌پناه بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی." پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- ۳- صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (۱۳۹۳). "بررسی عددی تأثیر شکل هندسی پشت‌بند بر هیدرودینامیک سرریز کلید پیانویی." هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.
- ۴- صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (۱۳۹۳). "هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان." مجله علمی پژوهشی هیدرولیک، ۹(۳)، ۶۱-۷۹.
- 5- Anderson, R. M. and Tullis, B. P. (2012). “Comparison of Piano Key and rectangular labyrinth weir hydraulics.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(4), 358-361.
- 6- Dabling, M. R. and Tullis, B. P. (2012). “Piano key weir submergence in channel application.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(7), 661-666.
- 7- Hien, T. C., Son, H. T. and Khanh, M. H. T. (2006). “Results of some piano keys weir

submerged labyrinth weirs.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(3), 248-254.

19- Villemonte, J. (1947). “Submerged Weir Discharge Studies.” *Engineering News Record*, December 25, 866-869.

17- Rehbock, T. (1929). “Discussion of precise weir measurements by EW Schoder and KB Turner.” *Transaction ASCE* 93. 1143-1162.

18- Tullis, B. P., Young, J. C. and Chandler, M. A. (2007). “Head-discharge relationships for