

## تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی و شیب کلید بر ضریب آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی سه سیکل با دماغه مثلثی

بیژن کمایی عباسی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، محمد حیدر نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲

### چکیده

امروزه استفاده از سرریز کلید پیانویی یک راه حل مناسب جهت افزایش ظرفیت تخلیه نسبت به سرریزهای موجود محسوب می‌شود. طراحی مناسب این سرریزها، مستلزم دقت کافی در پیش‌بینی ظرفیت تخلیه می‌باشد. در این تحقیق نوع جدیدی از سرریزهای کلید پیانویی با دماغه مثلثی با شیب‌ها و نسبت عرض‌های مختلف، مورد آزمایش قرار گرفت و برای تعیین تأثیر پارامتر هندسی نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی سرریز، بر ضریب جریان، آزمایشات متعددی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بر روی سرریزهای سه سیکل با دماغه مثلثی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب جریان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی از ۰/۸ تا ۱/۲۵ و افزایش شیب از ۱۹/۲ تا ۲۵/۲ درصد، ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی افزایش می‌یابد. از داده‌های بدست آمده از آزمایشات این تحقیق یک رابطه ریاضی برای تعیین ضریب آبگذری سرریز کلید پیانویی ۳ سیکل بدست آمد. مقایسه با تحقیقات سایر محققین نشان داد که رابطه بدست آمده از این تحقیق خطای کمتری نسبت به روابط سایر محققین دارد. علاوه بر این سرریزهای کلید پیانویی در مرحله هوادهی کامل به بالاترین حد از ضریب آبگذری می‌رسند که این در محدوده  $0/2 \leq H_d/P \leq 0/1$  بوده است. همچنین مقدار ضریب آبگذری در کلیه مراحل در سرریزهای ۲ سیکل نسبت به ۳ سیکل بیشتر بوده است. بررسی نتایج نشان داد که نسبت  $W_i/W_0=1/25$  و شیب ۲۵/۲ درصد بیشترین مقدار ضریب جریان (۰/۵۹۲) را داشته است.

واژه‌های کلیدی: سرریز کلید پیانویی، ضریب آبگذری، مدل هیدرولیکی

### مقدمه

سال ۲۰۰۰ طرح اصلاح شده سرریزهای کنگره‌ای به منظور بهبود عملکرد هیدرولیکی و همچنین کاهش هزینه ساخت از طریق کاهش حجم بتن‌ریزی، بصورت سرریز کلید پیانویی ارائه گردید. در این نوع از سرریزها، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌ها یک در میان شیبدار به سمت داخل مخزن و بیرون می‌باشند (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۳). سرریزهای کلید پیانویی به عنوان نسل جدید سرریزهای آزاد غیر خطی، نسبت به سرریزهای سنتی آزاد قابلیت عبور دبی بیشتری با هد آب یکسان را دارند. در نتیجه می‌توان با جایگزینی سرریزهای سنتی سدها با این نوع سرریز، از کافی بودن ظرفیت تخلیه سد در هنگام سیلاب و در نتیجه تامین ایمنی سد اطمینان حاصل کرد (صفرزاده و همکاران، ۱۳۹۵). راندمان و ظرفیت تخلیه جریان بالای سرریزهای کلید پیانویی نسبت به انواع مختلف سرریزهای آزاد اعم از خطی (اوجی) و غیر خطی (کنگره‌ای) در تحقیقات مختلف به اثبات رسیده است. با توجه به فضای کم مورد نیاز برای احداث و حجم بتن‌ریزی مناسب، این نوع سرریزها، نسل جدید سرریزهای آزاد در پروژه‌های جدید سدسازی و پروژه‌های بهسازی (شامل افزایش ظرفیت مخازن

تخلیه آب از سرریزها معمولاً با مشکل اساسی خطر ناکافی بودن ظرفیت تخلیه سرریز همراه است. گزارش‌های اعلام شده از خرابی سدها نشان می‌دهند که یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سرریزها رخ داده است (کریمی چهار طاقی، ۱۳۹۳). به همین دلیل موسسه ICOLD<sup>۴</sup> توصیه کرده است که برای اطمینان از امنیت سرریزهای سدهای بلند ضروری است مجدداً مورد بررسی قرار گیرند. در سال ۲۰۰۰ طرح اصلاح شده سرریزهای کنگره‌ای به منظور بهبود عملکرد هیدرولیکی و همچنین کاهش هزینه ساخت از طریق کاهش حجم بتن‌ریزی، بصورت سرریز کلید پیانویی ارائه گردید. در

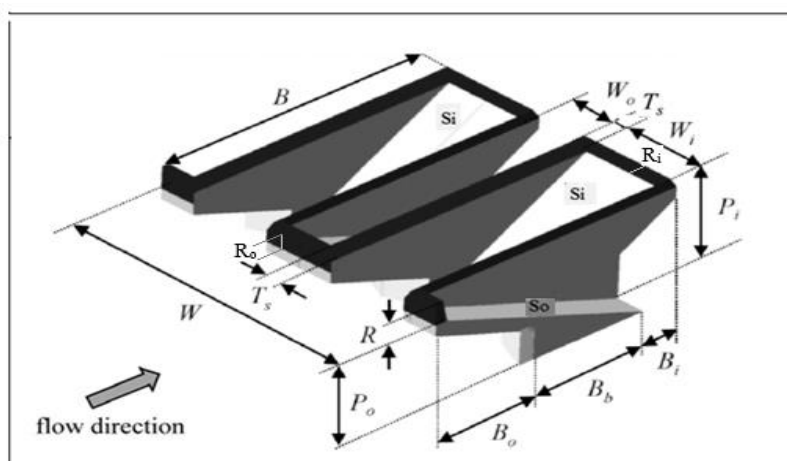
۱- دانشجوی دکتری رشته سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

طول شیروانی کلید ورودی ( $B_i$ )، طول شیروانی کلید خروجی ( $B_o$ )، طول پایه ( $B_b$ )، طول دیواره جانبی ( $B$ )، شیب کلید ورودی ( $S_i$ )، شیب کلید خروجی ( $S_o$ )، عرض کل سرریز ( $W$ )، ارتفاع دیواره هدایت کننده جریان ( $R$ )، ارتفاع دیواره هدایت کننده جریان کلید ورودی ( $R_i$ ) و ارتفاع دیواره هدایت کننده جریان کلید خروجی ( $R_o$ ).



شکل ۱- پارامترهای مختلف سرریز کلیدپیانویی

میلادی تا کنون، تحقیقات فشرده‌ای در خصوص بهینه‌سازی طراحی سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان راه حلی جدید انجام شده است. در همین راستا نتایج نشان داد که ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی می‌تواند تا ۵ برابر به ازای هد ثابت افزایش یابد بلزرنر و همکاران (۲۰۱۷)، به مطالعه سرریزهای کلیدپیانویی و زیگزاگی با در نظر گرفتن شرایط جریان آزاد و مستغرق این سرریزها پرداختند. آنان در تحقیق خود از مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای و سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و C بهره گرفتند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که حساسیت به استغراق در سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای و مستطیلی نسبت به کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی مثلثی بیشتر است اما سرریز زیگزاگی مثلثی راندمان هیدرولیکی کمتری دارد. گبهاردت و همکاران (۲۰۱۷)، به مقایسه سرریزهای جانبی و زیگزاگی در رودخانه ایلمونا پرداختند. آنان رابطه دبی اشل را برای سرریزهای جانبی و سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد ارزیابی قرار دادند. براساس نتایجی که از این تحقیق حاصل شد، سرریز زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیشتر می‌تواند جریان بیشتری را به ازای بارهیدرولیکی کمتر عبور دهد و در مقابل، هد بالادست سرریز زیگزاگی در مواقع سیلابی بیشتر از یک سرریز جانبی است. ضمن آنکه سرریز جانبی در شرایط جریان مستغرق بهتر عمل می‌کند.

موجود و افزایش ظرفیت تخلیه سرریز سدهای احداث شده می‌باشند. سرریز کلیدپیانویی دارای یک هندسه پیچیده است که هر یک از پارامترهای آن نقش مهمی در ظرفیت تخلیه دارد. پارامترهای اصلی سرریز کلیدپیانویی که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند عبارتند از ضخامت تاج ( $T_s$ )، ارتفاع کلید ورودی از تاج ( $P_i$ )، ارتفاع کلید خروجی از تاج ( $P_o$ )، عرض کلید ورودی ( $W_i$ )، عرض کلید خروجی ( $W_o$ )،

رستمی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای تک سیکل و دو سیکل کلید پیانویی و مقایسه آن با سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب جریان در سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای زیگزاگی مستطیلی حدود ۳۸٪ افزایش داشته است. روشنگر و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداختند، ایشان در مجموع ۵۵۴ آزمایش روی ۱۱ مدل فیزیکی انجام دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی با نسبت عرض دهانه‌ها باعث می‌شود که در این سرریز استغراق دیرتر به وجود آید. مهبودی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی آزمایشگاهی مقایسه سرریزهای خطی هم‌عرض کانال، مورب، زیگزاگی (مستطیلی و دوزنقه‌ای) و کلیدپیانویی (مستطیلی و دوزنقه‌ای) با یکدیگر به این نتیجه رسیدند که ظرفیت آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای حدوداً ۲۲ درصد بیشتر از نوع مستطیلی آن می‌باشد. اومانه و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی بیست سال پژوهش در دانشگاه بیسکرا بر روی سرریزهای زیگزاگی و کلیدپیانویی پرداختند. آنان بیان داشتند از بین ۳۴۰۰۰ پژوهش انجام شده در دانشگاه بیسکرا، ۴۰۰ پژوهش در زمینه هیدرولیک بوده است و تا قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی، تحقیقات بر روی بهینه‌سازی سرریزهای زیگزاگی متمرکز بود و از سال ۲۰۰۰

سرریزهای کلید پیاپویی مورد آزمایش از جنس پلکسی گلاس و براساس توصیه تویلیس و همکاران (۲۰۱۳) طراحی و ساخته شدند. شکل ۶. پارامترهای هندسی سرریزهای کلیدپیاپویی در تحقیق حاضر در جدول ۱ آورده شده اند.

جهت بدست آوردن ضریب آگذری از رابطه عمومی سرریزها که بصورت رابطه (۱) می باشد استفاده شد.

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

ضریب آگذری تابع پارامترهای مختلفی است که با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام بصورت پارامترهای بی بعد مطابق رابطه ۲ بدست آمد. با بررسی این پارامترهای بی بعد مشخص می شود که هر کدام معادل چه پارامتر بی بعد مهم در هیدرولیک می باشد که در رابطه ۳ آورده شده اند.

$$C_d = f\left(\frac{\mu H_d}{\rho Q}, \frac{\sigma}{\rho H_d}, \frac{g H_d}{V^2}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{L_t}{B_i}, n, N\right) \quad (2)$$

$$C_d = f\left(R_e, W_e, F_r, \frac{H_d}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{L_t}{B_i}, n, N\right) \quad (3)$$

با توجه به شرایط آزمایشات، پارامترهایی که اثر کمتری داشتند و یا اثر آنها در سایر پارامترها لحاظ شده بود حذف شدند. از آنجا که آزمایشات در محدوده جریانهای آشفتنه قرار داشت ( $5000 \leq Re$ ) بنابراین اثرات لزجت صرف نظر شد و عدد رینولدز از بین متغیرها کنار گذاشته شد. با توجه به متلاطم بودن جریان و همچنین جریانات عرضی شدید تأثیر کشش سطحی قابل صرف نظر کردن بود و در نتیجه پارامتر بی بعد عدد وبر حذف شد. از ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) نیز با توجه به شیشه ای بودن دیواره ها و کف فلوم صرف نظر گردید. در همه آزمایشات  $B_i/B_o=1$  بود؛ بنابراین این پارامتر نیز حذف گردید. از آنجا که  $B_i=B_o$  بود در تمام آزمایشات  $S_i=S_o$  بدست آمد. بنابراین از پارامتر  $S$  به عنوان شیب ورودی و خروجی استفاده شد. طول کل سرریز  $(L_t=2N(B-T_s)+W)$  متأثر از تعداد سیکل ( $N$ )، عرض کل ( $W$ )، طول کلیدهای ورودی و خروجی ( $B_i$ ) و  $(B_o)$ ، ضخامت دیواره ها ( $T_s$ ) می باشد اثر این پارامتر در بقیه پارامترها در نظر گرفته شد و پارامتر  $L_t/B_i$  حذف گردید. به دلیل اینکه  $B_i=B_o$  بود بنابراین یکی از پارامترهای  $B_i/P=B_o/P$  حذف شد و از آنجا که  $B_i/P$  متغیر بود از ترکیب با پارامتر  $B_i/B_o$ ،  $B_i/P$  بدست آمد. در نهایت  $C_d$  بصورت تابعی از پارامترهای زیر ارائه گردید:

$$C_d = f\left(Fr, \frac{H_d}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, S, N\right) \quad (4)$$

که در آن  $Fr$  عدد فرود کانال بالادست سرریز،  $H_d/P$  نسبت بار هیدرولیکی،  $W_i/W_o$  نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی،  $B_i/B_o$  نسبت طول پایه به طول شیروانی کلید ورودی،  $S$  شیب و  $N$  تعداد سیکل می باشد. با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که این تابع، تابع مناسبی می باشد و اثر همه پارامترهای موثر را در نظر گرفته است.

با توجه به آنکه دو پارامتر  $Fr$  و  $H_d/P$  از هم مستقل نمی باشند در

اولیایی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی عددی ضریب آگذری سرریز کلید پیاپویی پرداختند. آنها با انجام ۷۰ آزمایش با استفاده از چهار روش محاسباتی، ( $FFBPN^1$ )، ( $GEP^2$ )، ( $LSSVM^3$ ) و ( $ELM^4$ ) ضریب آگذری را در آن سرریزها تخمین زدند. مقایسه نتایج نشان داد که مدل های  $ELM$  و  $LSSVM$  به ترتیب با  $R^2 = 0.997$ ،  $RMSE = 0.016$ ،  $MARE = 0.027$  و  $NS = 0.986$  بهترین نسبت به دیگر مدل ها دارا هستند.

اگرچه تحقیقات مختلفی بر روی تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی ( $W_i/W_o$ ) انجام شده است ولی اکثر این تحقیقات برای سرریز کلید پیاپویی با دماغه مستطیلی بوده است. از طرفی تأثیر توأم نسبت عرض کلید ورودی به خروجی و شیب کلیدهای ورودی و خروجی مورد بررسی قرار نگرفته، همچنین بررسی نقش تعداد سیکل ها در یک عرض مشخص نیز در تحقیقات دیگر مورد سنجش قرار نگرفته است. در این تحقیق نوع خاصی از سرریز کلیدپیاپویی با دماغه مثلثی بررسی شده است و علاوه بر این اثر توأم ( $W_i/W_o$ ) و شیب کلیدهای ورودی و خروجی بر سرریزهای سه سیکل مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان و بر روی یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر انجام شد که حداکثر ظرفیت دبی عبوری از آن ۵۵ لیتر بر ثانیه بود (شکل های ۲ و ۳).

برای اندازه گیری شدت جریان از یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه استفاده شد. سرریز با استفاده از رابطه دبی-اشل سرریز مثلثی ۹۰ استاندارد، کالیبراسیون گردید و اندازه گیری دبی انجام شد. شکل ۴ رابطه دبی اشل سرریز مثلثی به کار برده شده را نشان می دهد که با مقادیر تئوری نیز مقایسه شده است.

قرائت عمق هیدرولیکی در بالادست سرریز با توجه به توصیه باس در فاصله ۳ تا ۴ برابر حداکثر عمق هیدرولیکی بر روی سرریز (۵۰ سانتی متر از بالادست نسبت به سرریز) و با استفاده از عمق سنج مکانیکی انجام شد (شکل ۵) (Bos, 1976).

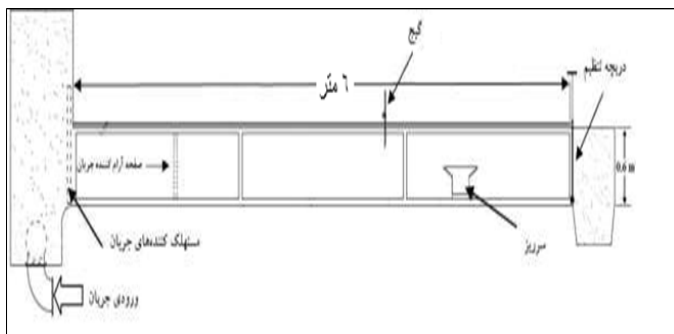
بمنظور بالابردن دقت و حذف خطا جهت قرائت عمق هیدرولیکی از یک عمق سنج مکانیکی با قابلیت حرکت طولی و عرضی با دقت ۱ میلی متر استفاده شد. قرائت از هر نقطه چندین بار (۳ بار) و در فواصل زمانی ۵ دقیقه انجام شد.

- 1- Feed Forward Back-Propagation Neural Network
- 2- Gene-Expression Programming
- 3- Least Square Support Vector Machine
- 4- Extreme Learning Machine

تعداد سیکل‌های سرریز می‌باشد. آزمایشات تحت شرایط آزاد جریان انجام گردید. دبی جریان بصورت گام به گام افزایش داده شد و بدین ترتیب نسبت‌های بار هیدرولیکی مختلف از روی سرریز عبور داده شدند. با توجه به اهمیت شرایط هیدرولیکی جریان، سرریزها در فاصله ۳/۵ متری از ابتدای فلوم آزمایشگاهی نصب، تراز و آب‌بندی شدند تا در قرائت بارهیدرولیکی خطا ایجاد نشود.

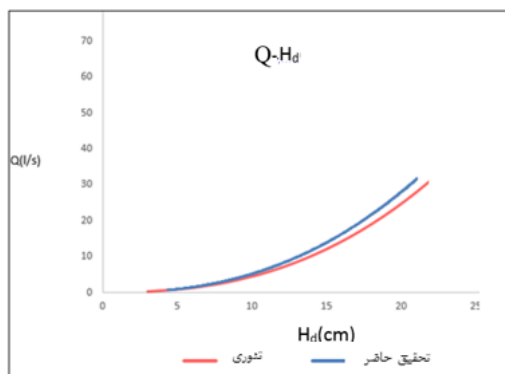
تحلیل انجام شده در نتایج فقط یکی از آنها در نظر گرفته شده است و با توجه به آنکه تعیین  $H_d/P$  ساده‌تر از  $Fr$  می‌باشد در مدل ریاضی بدست آمده فقط از  $H_d/P$  استفاده شده است.

محدوده داده‌های مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول،  $(Q)$  ظرفیت آبگذری،  $(H_d/P)$  نسبت بار هیدرولیکی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز،  $(W_i/W_o)$  نسبت عرض‌های سیکل سرریز،  $(B_i/B_o)$  نسبت طول دیواره جانبی به طول بالادست و  $(N)$



شکل ۳- شماتیک مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

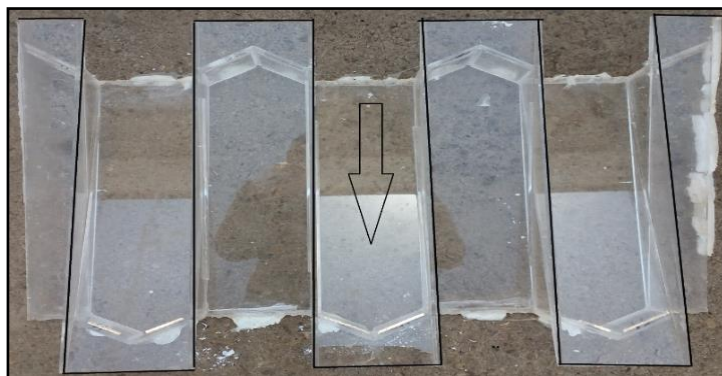
شکل ۲- فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر



شکل ۴- مقایسه نمودار دبی اشل سرریز مثلثی ۹۰ درجه از نظر تئوری و تحقیق حاضر



شکل ۵- عمق سنج مکانیکی



شکل ۶- نمونه‌ای از مدل فیزیکی سرریز کلیدپیانویی ساخته شده در تحقیق حاضر

جدول ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی در تحقیق حاضر

پارامترهای هندسی	
تعداد سیکل (N)	۳
ارتفاع کل تاج $(P)_{cm}$	۶/۷
عرض کل تاج $(W)_{cm}$	۶۰
عرض سیکل $(w)_{cm}$	۲۰
طول سرریز در جهت جریان $(L_1)_{cm}$	۴۰
ضخامت دیواره سرریز $(T_s)_{cm}$	۰/۵
طول دیواره جانبی $(B_i + B_o + B_b = B)_{cm}$	۴۰
طول شیروانی کلید ورودی و خروجی $(B_o = B_i)_{cm}$	۵/۳ - ۱۰ - ۱۳/۳
طول پایه $(B_b)_{cm}$	۲۹/۳۳ - ۲۰ - ۱۳/۳
شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی % $(S_o = S_i)$	۱۹/۲ - ۲۲/۲ - ۲۵/۲
طول موثر تاج سرریز $(L_1)$	۲۹۷

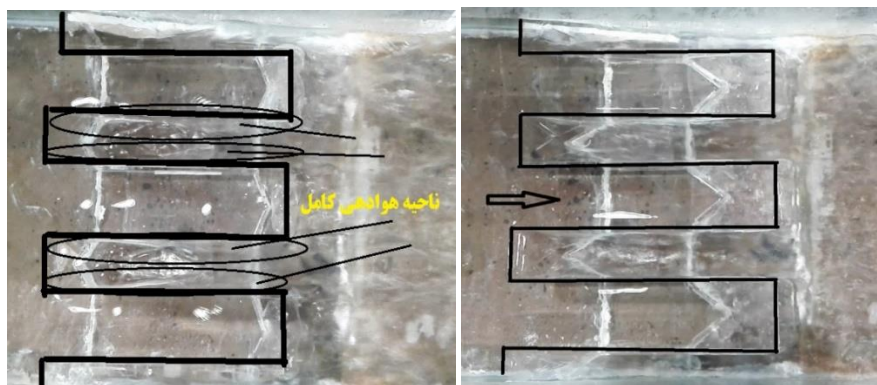
جدول ۲- طرح انجام آزمایشات سرریزهای کلیدپیانویی سه سیکل در تحقیق حاضر

$B_b/B_o$	$W_i/W_o$	$H_d/P$	تعداد مدل	تعداد سیکل
۱، ۲، ۵/۵	۰/۸، ۱، ۱/۲۵	۰/۰۵-۱/۱۷	۹	۳

## نتایج و بحث

در این تحقیق بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی سه سیکل نوع A با دماغه مثلثی انجام شد. در طول انجام آزمایش‌ها، پدیده‌های قابل ذکر از قبیل مراحل هواگیری تیغه جریان (چسبندگی، هواگیری و خفگی)، تاثیر پارامترهای نسبت عرض، شیب کلیدها و سیکل‌ها در سرریزهای مذکور، مشاهده و بررسی شدند (شکل ۷). نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سرریزهای سه سیکل با دماغه مثلثی در دو بخش آزمایشگاهی و آماری ارائه شده است.

پس از روشن شدن پمپ، شیر کنترل جریان در جهت افزایش میزان دبی جریان به آرامی باز شد تا جریان در فلوم برقرار گردد. انرژی اضافی جریان و تغییرات سطح آب بوسیله یک ورق فلزی مشبک و یک عدد یونولیت گرفته شد. برای انجام هر آزمایش و برای برقراری جریان یکنواخت به مدت ۱۵ دقیقه زمان در نظر گرفته شد و پس از این مدت اقدام به قرائت دبی جریان و عمق سطح آب شد و داده‌های برداشت شده ثبت و به محیط نرم‌افزار جهت کشیدن نمودارهای مورد نظر و تجزیه و تحلیل وارد شدند.



شکل ب. نمایش مرحله هوادهی

شکل الف. نمایش مرحله چسبندگی



شکل ج. نمایش مرحله خفگی

شکل ۷- هواگیری تیغه جریان در سرریزهای سه سیکل تحقیق حاضر

این است که در همه آنها ضریب دبی در مقدار عدد فرود حدود ۰/۱، سیر افزایشی دارد و به تدریج با افزایش عدد فرود از ۰/۱ به بعد ضریب دبی کاهش می‌یابد که با تداوم این روند افزایشی عملکرد هیدرولیکی و مستقل سرریزها بیشتر خود را نشان می‌دهد به بیان دیگر کارایی آنها در افزایش عدد فرود نمایان می‌گردد.

#### ب: بررسی تاثیر $H_i/P$ بر ضریب آبگذری در $S$ و $W_i/W_o$ های مختلف در سرریزهای سه سیکل

بر طبق شکل ۹ آزمایشگاه نشان داد که در شیب‌های مورد بررسی سرریزها، در نسبت‌های عرض ۰/۸، ۱ و ۱/۲۵ در پایین‌ترین بار هیدرولیکی، سرریزها در مرحله چسبندگی قرار داشته که در این حالت نوسانات تیغه جریان، فشار منفی و احتمال وقوع کاویتاسیون وجود داشته است. با افزایش دبی و ضخیم تر شدن تیغه جریان، منحنی‌ها روند صعودی داشته و به حداکثر ضریب آبگذری رسیده است. در این مرحله با جدا شدن تیغه جریان از بدنه سرریز، حباب‌های هوا در جریان مشاهده شده و فشار منفی بر بدنه سرریز وارد نمی‌شود در این حالت احتمال وقوع کاویتاسیون وجود ندارد و سرریز در بهترین شرایط و عملکرد هیدرولیکی قرار دارد در این مرحله سرریز با نسبت

#### نتایج سرریز کلیدپیانویی سه سیکل

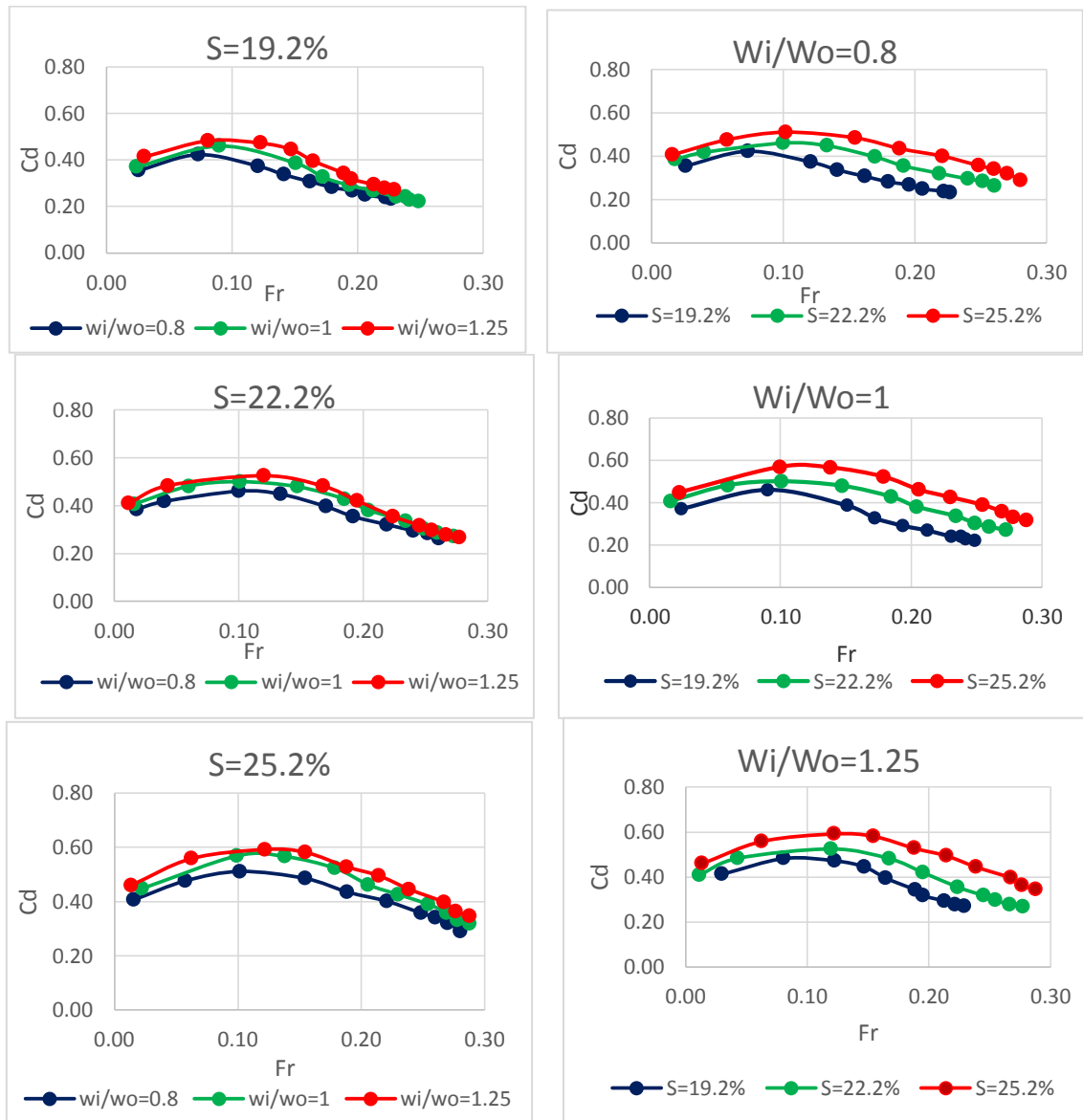
##### الف: بررسی اثر عدد فرود بر ضریب شدت جریان با $W_i/W_o$ و $S$ های مختلف در سرریزهای سه سیکل

شکل ۸ نشان می‌دهد، با افزایش عدد فرود ضریب آبگذری ابتدا سیر صعودی و سپس سیر نزولی به خود می‌گیرد و با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به خروجی نیز ضریب آبگذری افزایش می‌یابد همچنین مشاهده می‌شود که عملکرد هیدرولیکی سرریز با نسبت عرض کلید ورودی به خروجی ۱/۲۵ به مراتب بهتر از دیگر سرریزها می‌باشد شکل ۸ نشان می‌دهد که از عدد فرود حدود ۰/۱ در شیب ۱۹/۲٪، سرریز با  $W_i/W_o=1/25$  نسبت به سرریزهایی با  $W_i/W_o=1$  و  $W_i/W_o=0.8$  به ترتیب به میزان ۸/۳ درصد و ۱۴ درصد دارای ضریب آبگذری بیشتری است. از عدد فرود حدود ۰/۱ در شیب ۲۲/۲٪، سرریز با  $W_i/W_o=1/25$  نسبت به سرریزهایی با  $W_i/W_o=1$  و  $W_i/W_o=0.8$  به ترتیب به میزان ۸/۳ درصد و ۱۳ درصد دارای ضریب آبگذری بیشتری است. از عدد فرود حدود ۰/۱ در شیب ۲۵/۲٪، سرریز با  $W_i/W_o=1/25$  نسبت به سرریزهایی با  $W_i/W_o=1$  و  $W_i/W_o=0.8$  به ترتیب به میزان ۴ درصد و ۱۵/۷ درصد دارای ضریب آبگذری بیشتری است. نکته قابل ذکر در مورد کلیه نمودارها



ضریب آبگذری بیشتری است. در سرریزهای مورد بررسی در شیب ۲۵/۲٪ حداکثر هوادهی کامل در  $0.1 \leq H_d/P \leq 0.2$  رخ داده است.

عرض ۱/۲۵ نسبت به دو نسبت عرض دیگر بترتیب در نسبت بار هیدرولیکی حدود ۰/۲ در (شیب ۱۹/۲٪) ۵٪ و ۱۴٪ در (شیب ۲۲/۲٪) ۴٪ و ۱۴٪ و در (شیب ۲۵/۲٪) ۴ درصد و ۱۶ درصد دارای



شکل ۸- تغییرات ضریب شدت جریان با عدد فرود، شیبها و نسبت‌های  $W_i/W_o$  مختلف در سرریزهای کلید پیاپویی سه سیکل

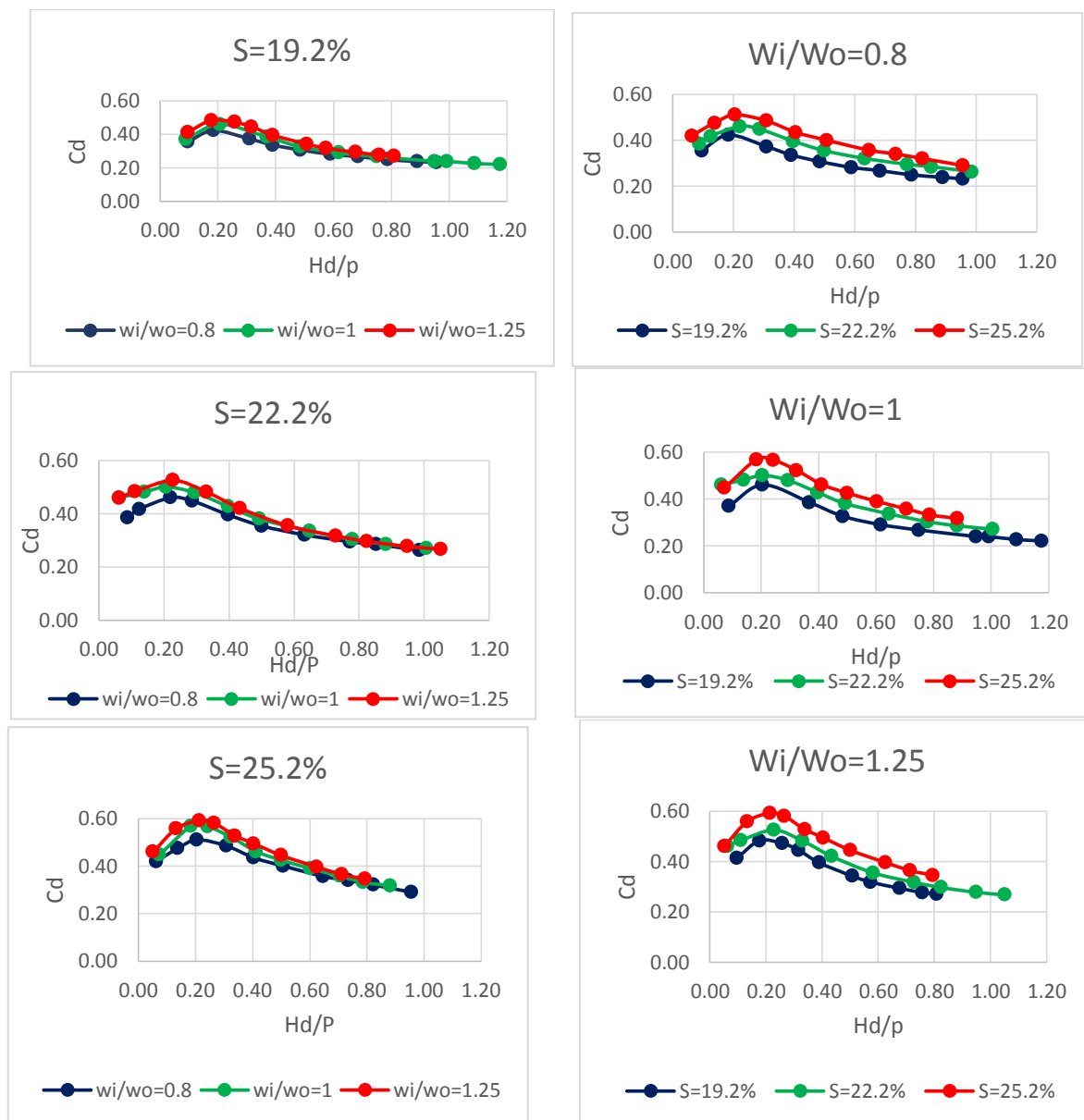
احتمال وقوع کاویتاسیون را افزایش می‌دهد لذا سرریز کارایی هیدرولیکی خود را از دست می‌دهد. با توجه به تغییرات نسبت عرض و شیب مشخص شد که با افزایش نسبت عرض در سرریزهای کلید پیاپویی مورد مطالعه، با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان و پارامترهای کیفی، هر چه نسبت عرض افزایش یابد جریان بیشتری به پایین دست منتقل شده و موجب افزایش ضریب آبگذری می‌شود و با افزایش شیب نیز به علت تسهیل انتقال خطوط جریان به پایین دست

با افزایش دبی کم کم حباب‌های هوا بصورت موضعی مشاهده شده و سرریز وارد هوادهی جزئی می‌شود. این مرحله تا خروج کامل هوا ادامه داشته و تا خفگی پیش می‌رود. در این مرحله که شیب نمودار روند نزولی دارد پشته‌های جریان تشکیل شده در پایین دست، که حاصل عبور جریان از روی کلیدها می‌باشد، تداخلی ایجاد نموده که موجب خروج کامل حباب‌های هوا از جریان می‌شود و تیغه ضخیم جریان به بدنه سرریز می‌چسبد و باعث ایجاد فشار منفی می‌شود و

که نسبت به عرض‌های دیگر در شیب‌های ۱۹/۲٪ و ۲۲/۲٪ دارای ۲۵٪ و ۱۲/۷٪ ضریب آبگذری بیشتری می‌باشد. علت این امر افزایش نسبت عرض بوده که موجب شده جریان‌های عبوری بیشتری را توسط کلید ورودی بصورت ریزشی به پایین دست منتقل نموده که وقتی با افزایش شیب همراه باشد به علت انتقال خطوط جریان به پایین دست و انتقال موج‌های برآمده به فاصله بیشتری از پایین دست موجب کاهش افت‌های موضعی و افزایش ضریب آبگذری می‌شود.

اجازه نمی‌دهد که موج برآمده حاصل از تداخل تیغه‌های جریان در نزدیکی کلیدهای خروجی تشکیل شود و این موج را به فاصله پایین تر هدایت می‌کند و موجب می‌گردد که  $C_d$  افزایش یافته و افت انرژی کاهش یابد.

با بررسی عملکرد سرریزها در نسبت‌های مختلف عرض و شیب‌های متفاوت مشخص شده که ضریب آبگذری در سرریزهای با نسبت عرض ۱/۲۵ و شیب ۲۵/۲٪ بیشترین مقدار (۰/۵۹۲) را داشته



شکل ۹- تغییرات ضریب شدت جریان با  $H_d/P$ ، شیب‌ها و نسبت‌های  $W_i/W_o$  مختلف در سرریزهای کلید پیانویی سه سیکل

هیدرولیکی کم روند صعودی و عملکرد هیدرولیکی بهتری داشته و با روندی صعودی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و بعد از آن روندی

بررسی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی موثر در سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی نشان می‌دهد که سرریز کلید پیانویی در بارهای



همچنین در تحقیقات میشلز (۲۰۱۲) محدوده  $W_i/W_o$  در محدوده ۱/۲۵ تا ۱/۵ بیشترین راندمان سرریز را به همراه داشته است، همچنین ایشان با بررسی فنی-اقتصادی، نسبت عرض  $W_i/W_o = ۱/۲۵$  را به عنوان بهینه هیدرولیکی و  $W_i/W_o = ۱/۵$  را بهینه اقتصادی معرفی کردند. در تحقیق انجام شده نسبت عرض‌ها جهت مقایسه با کار تولیس و اندرسون از ۰/۸ تا ۱/۲۵ در نظر گرفته شده و نتایج نشان داد که افزایش نسبت عرض موجب افزایش ضریب، بگذری سرریز و افزایش راندمان هیدرولیکی سرریز می‌شود. بطوری که با افزایش نسبت عرض از ۰/۸ تا ۱/۲۵ ضریب آنگذری به میزان ۱۸/۷٪ افزایش داشته است.

### تعیین مدل آماری سرریزهای کلید پیانویی سه سیکل

#### رابطه ضریب آنگذری برای سرریزهای سه سیکل

بمنظور تعیین ضریب آنگذری سرریزهای کلید پیانویی سه سیکل قرار گرفته در داخل کانال، معادله‌هایی در جداول ۳ و ۴ پیشنهاد شده که از روش‌های مختلف اقدام به استخراج آنها شده است. این معادله‌ها در واقع ارتباط بین ضریب آنگذری سرریزهای کلید پیانویی سه سیکل ( $C_d$ ) با نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز ( $H_d/P$ )، نسبت عرض کلید ورودی به خروجی سرریز ( $W_i/W_o$ ) و شیب کلیدهای سرریز ( $S$ ) را بیان می‌دارد.

نزولی دارد که دلیل آن این است که ضریب تخلیه با افزایش هد آب بخاطر تداخل تیغه‌های جریان کاهش می‌یابد. همچنین بالاترین کارایی سرریزهای مذکور در هدهای هیدرولیکی کم (مرحله هوادهی) اتفاق می‌افتد که نتایج بدست آمده در این تحقیق متناسب با تحقیقات قیر و همکاران (۲۰۰۸) و تولیس و همکاران (۱۹۹۵) می‌باشد که بر طبق تحقیقات ایشان حداکثر ضریب آنگذری را در  $0.2 \leq H_d/P \leq 0.8$  بیان نموده‌اند.

- اثر نسبت  $W/P$  مشخص شد، بر طبق نظر لاکس و هاجینکف (۱۹۸۵) و تیلور (۱۹۶۸) نسبت  $W/P$  باید بین ۲ تا ۶ باشد ( $6 \leq W/P \leq 2$ ) به همین دلیل این نسبت در تحقیق حاضر ۳ در نظر گرفته شده و ارتفاع سرریزهای ۲ و ۳ سیکل محاسبه شد. در این تحقیق مشخص شد که افزایش ارتفاع سرریز موجب افزایش ضریب آنگذری سرریز می‌شود چراکه با در نظر گرفتن این نسبت در محدوده توصیه شده، تداخل لایه‌های جریان، کمتر سبب کاهش کارایی هیدرولیکی سرریز می‌شوند.

- بررسی تعداد سیکل در یک نسبت عرض مشخص نشان داد با کاهش تعداد سیکل، به دلیل تداخل کمتر تیغه‌های جریان افزایش ضریب آنگذری ایجاد می‌شود به همین دلیل ضریب آنگذری سرریزهای دو سیکل بیشتر از سه سیکل بوده است.

- بررسی تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی نشان می‌دهد که مقدار بهینه این نسبت بر طبق تحقیقات محققین از جمله تولیس و اندرسون (۲۰۱۳) بین ۰/۸ تا ۱/۲۵ معرفی شده است.

جدول ۳- الگوهای معرفی شده

شماره الگو	الگوی معرفی شده
۱	$C_d = 0.073 - 0.233 \left(\frac{H_d}{P}\right) + 0.097 \left(\frac{W_i}{W_o}\right) + 0.015(S)$
۲	$C_d = 0.056 - 0.221 \left(\frac{H_d}{P}\right)^{1.375} + 0.096 \left(\frac{W_i}{W_o}\right) + 0.014(s)$
۳	$C_d = 0.207 - 0.222 \left(\frac{H_d}{P}\right)^{1.375} + 0.049(W_i/W_o)^{1.8} + 0.014(s)$
۴	$C_d = 0.394 - 0.223 \left(\frac{H_d}{P}\right)^{1.410} + 0.047 \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^2 + 0.011(\exp 0.11s)$

جدول ۴- ویژگی‌های آماری الگوهای ارائه شده

الگو	Adjusted R Square	R	Durbin Watson	F	VIF	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
۱	۰/۸۳۰	۹۱۴/۰	۱/۱۵۳	۱۴۶/۰۵	۱/۰۰۳	۰/۸۴	۰/۰۳۲۷	۰/۰۸۸۵
۲	۰/۸۴۲	۹۲۱/۰	۱/۳۷۷	۱۵۹/۳۷	۱/۰۰۲	۰/۸۵	۰/۰۲۶۱	۰/۰۶۸۵
۳	۰/۹۲۰	۹۶۳/۰	۱/۱۱۷	۱۶۳/۱	۱/۰۰۲	۰/۹۳	۰/۰۱۹۸	۰/۰۵۱۸
۴	۰/۹۵۶	۹۷۸/۰	۱/۰۴۲	۱۶۸/۳۰	۱/۰۰۱	۰/۹۶	۰/۰۱۸۵	۰/۰۴۸۵

اختصاص داده و بهترین برازش را با داده‌ها و شکل‌های این تحقیق دارد به عنوان رابطه مناسب برای تعیین ضریب دبی عبوری از

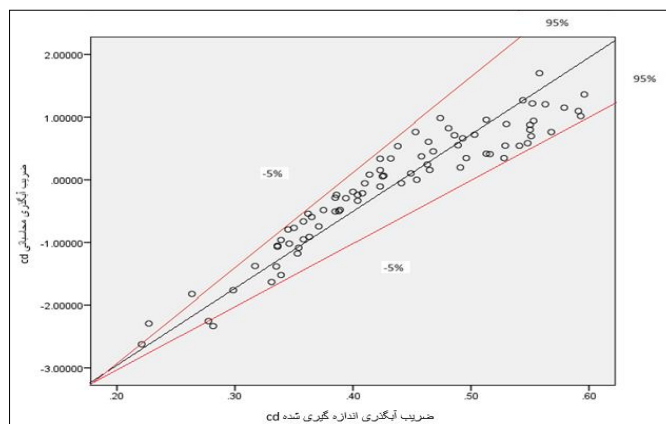
براساس جداول ۳ و ۴، الگوی شماره ۴ با توجه به اینکه بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر NRMSE و RMSE را به خود

محاسبه شده با استفاده از رابطه ۵ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر  $C_d$  اندازه‌گیری شده و محاسباتی با خطای کمتر از ۵٪ قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده مناسب بودن رابطه می‌باشد.

سرریزهای کلید پیانویی سه سیکل تحقیق حاضر ارائه شد:

$$C_d = 0.394 - 0.223 (H_d/P)^{1.410} + 0.047(W_i/W_o)^2 + 0.011 (\exp 0.11 S) \quad (5)$$

شکل ۱۰ مقادیر  $C_d$  اندازه‌گیری شده را در برابر مقادیر  $C_d$

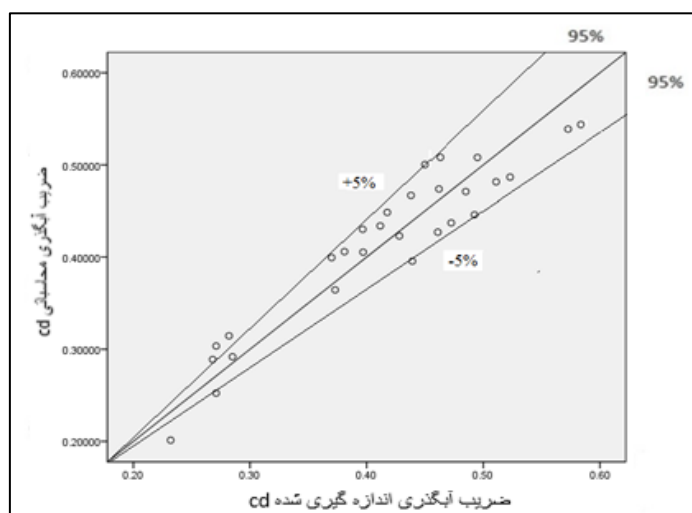


شکل ۱۰ - مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی  $C_d$

بدست آمده برای سرریزهای دو سیکل، از ۳۰ مابقی داده‌ها استفاده گردیده است. شکل ۱۱ مقادیر  $C_d$  محاسبه شده و اندازه‌گیری شده را برای داده‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر  $C_d$  با خطای کمتر از ۵٪ صحت و تناسب رابطه بدست آمده برای محاسبه ضریب آبگذری سرریز کلید پیانویی را بیان می‌کند.

صحت‌سنجی و کنترل رابطه ضریب آبگذری سرریزهای سه سیکل

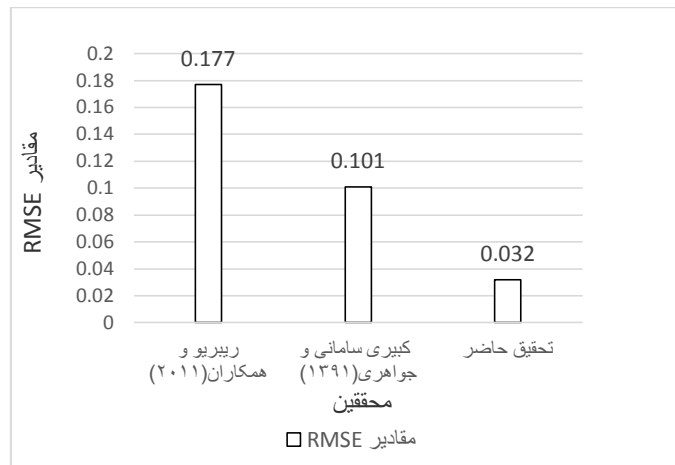
بمنظور بدست آوردن رابطه ضریب آبگذری در سرریزهای ۳ سیکل از ۷۰ درصد داده‌ها که بصورت تصادفی انتخاب شده بودند استفاده شد و برای صحت‌سنجی و کنترل رابطه ضریب آبگذری



شکل ۱۱ - مقایسه مقادیر  $C_d$  محاسباتی و اندازه‌گیری شده

ترتیب ۰/۱۰۱ و ۰/۱۷۷ بوده و این مقدار در پژوهش حاضر برابر ۰/۰۳۲ می‌باشد. با مقایسه ضرایب خطا مشاهده شد که در پژوهش حاضر کمترین مقدار RMSE حاصل شده است.

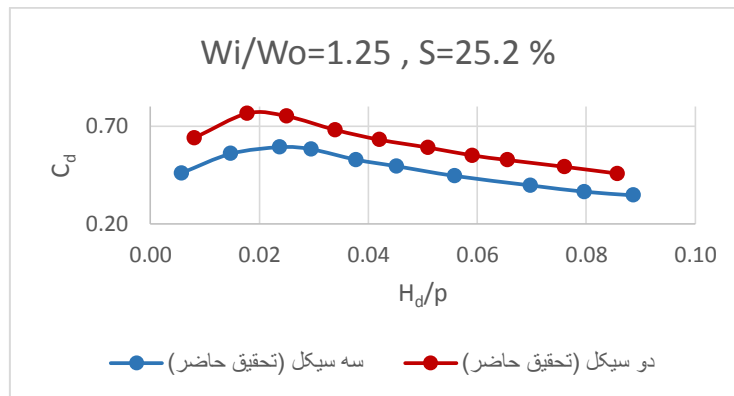
به منظور تحلیل بهتر نتایج ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج آماری این تحقیق با نتایج تحقیقات ریبریو و کبیری سامانی انجام شد. نتایج مقایسه معیار ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد (RMSE) در روابط کبیری سامانی و جوهری و ریبریو به



شکل ۱۲- مقایسه بدست آمده از تحقیق حاضر با دیگر محققان

است در حدود ۲۹٪ بیشتر می‌باشد. علت این امر افزایش تعداد سیکل با طول موثر یکسان در یک عرض مشخص، پیچیده تر شدن شرایط جریان در سرریز سه سیکل و تداخل خطوط جریان، استغراق موضعی و افت انرژی بیشتر در این شرایط می‌باشد.

همچنین مقایسه‌ای جهت بررسی اثر تعداد سیکل بر ضریب آبگذری بین سرریز سه سیکل تحقیق حاضر با سرریزهای دو سیکل با شرایط یکسان انجام گردید و نتایج نشان داد که حداکثر ضریب آبگذری در سرریز دو سیکل بین ۰/۶ تا ۰/۷۶ متغیر می‌باشد که از حداکثر ضریب آبگذری سرریز سه سیکل که بین ۰/۴ تا ۰/۵۹ متغیر



شکل ۱۳- مقایسه ضریب آبگذری بین سرریز سه سیکل تحقیق حاضر با سرریزهای دو سیکل

نیز خطر کاویتاسیون، سرریز را تهدید نمی‌کند که دلیل آن فاصله مناسب تیغه جریان عبوری از روی سرریز با بدنه آن است. فاصله تیغه جریان از بدنه سرریز موجب ایجاد هوا در زیر تیغه شده و نتیجه آن هوادهی و کیفیت مناسب جریان است.

قسمت نزولی منحنی ضریب آبگذری نشان‌دهنده کاهش ضریب آبگذری به ازای مقادیر بالاتر نسبت‌های بارهیدرولیکی است و سرریز نیز بتدریج در مرحله هوادهی جزئی می‌باشد و در نهایت به مرحله خفگی می‌رسد. آزمایشات نشان داد که در مراحل ذکر شده ناحیه استغراق موضعی در ابتدای دماغه و بتدریج در طول تاج سرریز

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر می‌توان بیان داشت که:

افزایش نسبت عرض کلید ورودی به خروجی ( $W_i/W_0$ ) رابطه مستقیم با افزایش ضریب آبگذری ( $C_d$ ) به ازای یک شیب ثابت کلید سرریز دارد. افزایش شیب کلید ( $S$ ) رابطه مستقیم با افزایش ضریب آبگذری ( $C_d$ ) به ازای یک نسبت ثابت عرض کلید ورودی به خروجی ( $W_i/W_0$ ) دارد. آزمایشات نشان داد که در قسمت بیشینه، مقدار ضریب آبگذری سرریز در مرحله هوادهی کامل قرار دارد و از طرفی

- Belzner F., Merkel J., Gebhardt M. and Thorenz, C. 2017. Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
- Bos, M.G. 1976. Discharge measurement structures, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, the Netherlands.
- Gebhardt, M., Merkel, J., Belzner, F. and Thorenz, C. 2017. A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
- Ghare, A.D., Mhaisalkar, V.A., and Porey, P.D. 2008. An approach to optimal design of trapezoidal Labyrinth weirs. World applied sciences journal 3:934-938.
- Leite Ribeiro, M., Boillat, J.L. and Schleiss, A.J. 2011. Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs, Labyrinth and piano key weirs-PKW, CRC press, London, 183-190 .
- Lux, F.L. and Hinchcliff, D. 1985. Design and construction of labyrinth spillways. Proceedings. 15th International Congress. Large Dams, ICOLD, Paris, France, 4:249-274.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Pirotton, M. 2012A. Influence of weir height and keys slope on PKW discharge, in proceedings of 4<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal.
- Machiels, O., Erpicum, S., Pirotton, M., Dewals, B. and Archambeau, P. 2012B. Experimental analysis of PKW hydraulic performance and geometric parameters optimum, in proceedings of Piano Key Weir for in-stream storage and dam safety (PKWISD-2012), New Delhi, India, 97-114.
- Olyaie, E., Heydari, M., Banejad, H. and Chau, K.W. 2019. laboratory investigation on the potential of computational intelligence approaches to estimate the discharge coefficient of piano key weir., DOI: 10.22075/jrce.2018.13233.1241., Article 3, Volume 7, Issue 1 - Serial Number 13, Winter 2019, Page 42-61.
- Ouamane, A., Debabeche, M., Lempérière, F. and Vigny J.P. 2017 Twenty years of research in Biskra University for Labyrinths and Piano Key Weirs and associated fuse plugs Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5
- Taylor, G. 1968. "The performance of labyrinths افزایش می‌یابد و در ادامه، همین روند تداخل شدید تیغه‌های عبوری جریان از روی سرریز موجب ایجاد موج برآمده‌ای شده که در این شرایط کاهش شدید ضریب آبگذری را ایجاد می‌کند. با بررسی نسبت‌های عرض و شیب مشخص گردید که سرریزها در نسبت عرض کلید ۱/۲۵ و شیب ۲۵٪ بیشترین راندمان هیدرولیکی را داشته‌اند.
- ### منابع
- صفرزاده، ا.، خیاط رستمی، س. ۱۳۹۴. ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر ارتفاع بر هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی مستغرق، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، سال دوم، شماره ۷.
- صفرزاده گندشمین، ا و نوروزی، ب. ۱۳۹۲. بررسی عددی تاثیر دیوار جان پناه بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- رستمی، ه.، بردبار، ا.، کمان بدست، ا.، حیدر نژاد، م.، و حسین پور، م. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای تک و دوسیکل کلید پیانویی و مقایسه آن با سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی. نشریه تحقیقات مهندسی آبیاری و زهکشی. شماره ۷۱. تابستان ۱۳۹۷. صفحات ۶۶-۷۶.
- روشننگر، ک.، ماجدی اصل. م.، اعلمی. م ت و شیرینی. ج. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی جریان آزاد و مستغرق در سرریزهای کلید پیانویی. تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی. مقاله ۹، دوره ۱۹، شماره ۷۰، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۱۳-۱۲۶.
- مهبودی، ع.، عطاری، ج.، حسینی، ع.، و جلیلی قاضی زاده، م. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی مقایسه سرریز کلید پیانویی با سرریزهای کنگره‌ای و خطی، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تبریز، دانشگاه تبریز - گروه مهندسی آب.
- کبیری سامانی، ع. و جواهری، ا. ۱۳۹۱، تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی.
- کریمی چهارطاقی، م.، و نظری، س. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی مقایسه ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی با تاج‌های متغیر، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی.
- Anderson, R.M., and Tullis, B.P. 2013. "Piano Key Weir hydraulics and labyrinth weir comparison", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 139, No. 3, PP: -246-253.

“Design of Labyrinth Spillways”, Journal of  
Hydraulic Engineering 121.

weirs.”Ph.D. thesis, Univ. of Nottingham,  
Nottingham, UK.

Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D. 1995.

## Efficient of Input to Output Key width and Key Gradient on Flow Rate Coefficient on Three-Cycle Piano Key Weirs with Triangle Nose

B. Kamaei<sup>1</sup>, S.R. Khodashenas<sup>2\*</sup>, M. Heidarnejad<sup>3</sup>

Recived: Jan.23, 2020

Accepted: Mar.21, 2020

### Abstract

Today, using piano key weirs is a proper solution to increase the discharge capacity compared to existing weirs. The appropriate design of these weirs requires sufficient precision to predict the discharge capacity. In the current study, a new type of piano key weirs with a triangular nose has been used and to determine the effects of geometric parameters of the inlet to outlet key width ratio on the flow coefficient, various experiments have been carried on three-cycle weirs with a triangular nose under hydraulic conditions. The results of the study indicated that with the increase of hydraulic charge, the flow coefficient increases firstly and then decreases. The flow coefficient also shows an increase in Piano Key weir when the ratio of input key to output key increases from 0.8 to 1.25 and from 19.2 to 25.2%. A mathematical equation has been obtained using the results of the experiment to determine the discharge coefficient of three-cycle piano key weirs. This equation has less errors than other equations found in the previous findings. Furthermore, throughout the whole process of adhesion-aeration, piano key weirs reached the highest discharge coefficient ( $0.1 \leq H_d/P \leq 0.2$ ) and two-cycle weirs gave a significantly higher discharge coefficient than three-cycle weirs. The results of this study revealed that the proportion of  $W_i/W_o=1.25$  and the slope of 25.2 percent had the highest discharge coefficient (0.592).

**Keywords:** Piano key weirs, Discharge coefficient, Hydraulic model

1- Ph.D. Student, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

3- Department of water Science engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

(\* - Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)