

## مقاله پژوهشی

# ارزیابی آزمایشگاهی ضریب دبی سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی

الهام ایزدی‌نیا<sup>۱\*</sup> و مؤذنه امیدوار<sup>۲</sup>

## چکیده

سازه هیدرولیکی ترکیبی کالورت-سرریز در شرایطی که امکان عبور جریان از زیرسازه و همچنین روگذری آن فراهم باشد، به‌عنوان یکی از راهکارهای پیشنهادی در جهت گذردهی سریع‌تر جریان آب و رسوب مطرح است. انتخاب سرریز مناسب برای تأمین این هدف اهمیت بالایی دارد. در این تحقیق از سرریز کلید پیانویی به‌دلیل گذردهی بالای آن، به‌عنوان سرریز این سازه ترکیبی استفاده شد. برای این منظور مدل‌های آزمایشگاهی کالورت-سرریز کلید پیانویی با متغیر در نظر گرفتن ارتفاع و طول سرریز و همچنین ارتفاع بازشدگی‌های متفاوت برای کالورت مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن عملکرد هریک از سازه‌های کالورت و سرریز کلید پیانویی بررسی شد و با سازه ترکیبی مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایش‌ها، در محدوده دبی ۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه، برای سازه سرریز کلید پیانویی، کالورت و کالورت-سرریز در شرایط جریان آزاد انجام شد. نتایج نشان داد با تغییر ۵۰ درصد در ارتفاع و ۶۳ درصد در عرض سرریز گذردهی جریان به ترتیب ۲۵ درصد و ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد؛ بنابراین تأثیر ارتفاع نسبت به عرض سرریز بر میزان گذردهی جریان بیشتر است. این در حالی است که در سازه ترکیبی تأثیر بازشدگی کالورت بیش از ارتفاع سرریز است. با توجه به نتایج، سازه ترکیبی کالورت-سرریز نسبت به هریک از سازه‌های سرریز کلید پیانویی و کالورت در حدود ۱۰ درصد راندمان بالاتری داشت. در سرریز کلید پیانویی تغییرات ضریب دبی با نسبت بدون بعد هد به ارتفاع سرریز کاهش و در سازه ترکیبی این روند افزایشی بود؛ بنابراین در شرایطی که دبی جریان زیاد است و امکان استفاده از سرریز کلید پیانویی با ارتفاع بلند وجود ندارد، سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی با ارتفاع کمتر گزینه مناسبی خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز کلید پیانویی، ضریب شدت جریان، منحنی دبی-اشل، کالورت.

ارجاع: ایزدی‌نیا. ا. و امیدوار. م. ۱۴۰۰. ارزیابی آزمایشگاهی ضریب دبی سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵: ۲۵-۳۶.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان.

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [e.izadnia@ashrafi.ac.ir](mailto:e.izadnia@ashrafi.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

## مقدمه

از دیرباز تاکنون به منظور انتقال آب از نقطه‌ای به نقطه دیگر از روش‌های متفاوتی از جمله استفاده از نیروی ثقل در به حرکت درآوردن جریان با سطح آزاد توسط کانال‌ها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی مانند کالورت‌ها و سرریزها استفاده شده‌است. در صورتی که جریان از زیر جاده یا راه‌آهن عبور کند از کالورت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. سرریزها اغلب در جهت عبور آب‌های مازاد از بالادست به پایین دست کاربرد دارند. سرریزها به دسته‌های کلی لبه‌تیز و لبه‌پهن یا نرمال و سرریزهای کناری تقسیم می‌شوند. سرریزهای کلید پیاپویی از نوع سرریزهای لبه‌تیز هستند که گاهی از آن‌ها به عنوان سرریز کناری نیز استفاده می‌کنند. سرریزهای کلید پیاپویی برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ طراحی و در سال ۲۰۰۶ توسط شرکت دی‌فرانس<sup>۲</sup> ساخته شده است. محققان پژوهش‌های متفاوتی بر روی پارامترهای اصلی و فرعی تأثیرگذار بر ظرفیت تخلیه یا ضریب دبی این سازه انجام داده‌اند و نتایج عددی و آزمایشگاهی ارزشمندی را به دست آورده‌اند. هین و همکاران (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که اگر دهانه ورودی سرریزهای کلید پیاپویی بزرگ‌تر از دهانه خروجی ساخته شود، باعث افزایش ظرفیت تخلیه می‌شود. کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نشان دادند لبه‌های آویزان پایین دست اثری روی دبی ندارند و نقش هواده جریان را داشته و از عواملی چون کوایتاسیون، خوردگی و فرسایش جلوگیری می‌کنند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد هرچه لبه آویزان بالادست بزرگ‌تر باشد، دبی عبوری از سرریز بیشتر است. سوپراتو (۲۰۱۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی به مقایسه سه سرریز اوجی و زیگزاکی (کنگره‌ای) و سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که توانایی گذردهی جریان در سرریزهای غیرخطی (زیگزاکی) و کلید پیاپویی تقریباً ۱۷۰ درصد بیشتر از سرریزهای اوجی است. میشلز و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه هیدرولیکی سرریز کلید پیاپویی با لبه آویزان برابر در بالادست و پایین دست پرداخته‌اند. آن‌ها با مقایسه نتایج عددی خود با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نشان دادند علاوه بر پارامترهای اصلی مانند طول تاج (B) و ارتفاع سرریز (P) که تأثیر مستقیم بر ظرفیت تخلیه دارند،

پارامترهای فرعی مانند نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی (Wi/Wo)، ارتفاع کلیدهای ورودی به خروجی (Pi/Po) و طول لبه‌های آویزان (Bi/Bo) بر ضریب دبی مؤثر هستند. صفرزاده و نوروزی (۲۰۱۷) به بررسی مدل‌سازی عددی سه الگوی جریان روی سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و انحنادار در پلان پرداختند. براساس نتایج حاصل، استفاده از کلیدهای دوزنقه‌ای شکل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ضریب دبی سرریزهای کلید پیاپویی دارد. نوسیدا و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه فرسایش و رسوبگذاری در بالادست سرریزهای کلید پیاپویی و همچنین قابلیت این سازه در گذردهی رسوبات پرداختند و منحنی‌های سنج رسوب را برای این سرریز ارائه کردند. تویس و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر مقیاس در سرریزهای غیرخطی و کلید پیاپویی پرداختند. آن‌ها نشان دادند با کاهش سایز مدل آزمایشگاهی مقدار هد آب بدون بعد مورد نیاز برای صرف نظر کردن از اثر مقیاس افزایش می‌یابد. قادری و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه میزان افت انرژی و خصوصیات جریان در سرریزهای غیرخطی مثلثی و دوزنقه‌ای پرداختند. آن‌ها نشان دادند ضریب دبی این سرریزها با کاهش زاویه دیواره سرریز به علت تداخل جهت خروجی جریان کاهش می‌یابد.

کالورت‌ها نیز یکی از رایج‌ترین سازه‌های مهندسی هستند که بیش از ۳۵۰۰ سال است مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات زیادی در خصوص نحوه طراحی و شرایط مختلف جریان در کالورت‌ها صورت گرفته است که از جمله آن می‌توان به مطالعات، داسیکا (۱۹۹۵)، مونتس (۱۹۹۷)، هگر و دل گویسی (۱۹۹۸)، جانسون و براون (۲۰۰۰) و انصار و همکاران (۲۰۰۲) اشاره کرد. میسل و هبرت (۲۰۰۷) به مطالعه آزمایشگاهی کالورت‌های مربعی و دایره‌ای در جریان‌های دائمی و غیردائمی پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از تفاوت قابل توجه در تغییرات دبی جریان در بازوی بالارونده با بازوی پایین‌رونده هیدروگراف داشت که ناشی از تفاوت شرایط جریان در زمان پر و خالی شدن کالورت بود.

گیون و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی ضریب دبی در سازه ترکیبی کالورت-سرریز لبه‌پهن به این نتیجه رسیده‌اند که ضریب دبی در سازه ترکیبی بیشتر از عملکرد جداگانه در هریک از سازه‌های کالورت و سرریز است؛ علاوه بر این،

1- Culvert  
2- D-france

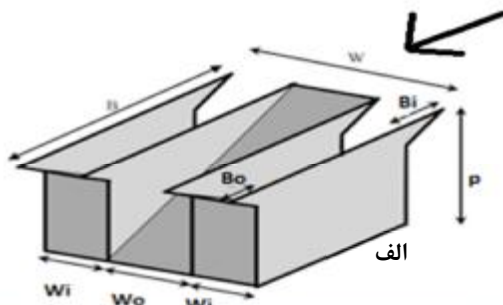
### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در کانالی با طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۷۵ متر و عرض ۰/۶۰ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس شیشه سکوریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و کف از جنس آهن ضدزنگ است که بر روی خرپاهای فلزی نصب شده بود. این کانال مجهز به ۴ مخزن مرتبط، به گنجایش ۱۰ مترمکعب و یک پمپ با حداکثر دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه است. مدل‌ها با استفاده از ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر ساخته شد. ضخامت ورق طوری تعیین شده که تاج این سرریز به صورت لبه‌تیز باشد. به‌طور کلی سرریزهای کلید پیانویی را می‌توان به ۴ نوع تقسیم‌بندی کرد. نوع A دارای لبه‌های آویزان برابر در بالادست و پایین‌دست است؛ انواع B و C شامل تنها یک لبه آویزان به ترتیب در بالادست یا پایین‌دست هستند و نوع D فاقد لبه‌های آویزان است. تیپ A این سرریزها که دارای لبه‌های آویزان برابر در بالادست و پایین‌دست است، در جهت مدل‌سازی مدل سرریز کلیدپیانویی در نظر گرفته شد. در این مطالعه در جهت ارزیابی تأثیر کالورت بر سرریز کلید پیانویی، سرریزها با ارتفاع و طول متغیر در بازشدگی‌های متفاوت کالورت مورد بررسی قرار گرفت. سایر مشخصات هندسی سرریزها از قبیل طول لبه‌های آویزان بالادست و پایین‌دست، عرض دهانه‌های ورودی و خروجی سرریز و عرض سرریز برابر با عرض کالورت ثابت و به ترتیب برابر با ۸، ۱۶، ۱۳/۵، ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس از روشن کردن پمپ، آب در یک سیکل بسته وارد ابتدای کانال شده و پس از عبور از صافی‌های آرام‌کننده و مشبک، در کانال جریان می‌یافت و پس از عبور از مدل آزمایشگاهی به مخزن انتهایی می‌ریخت. تنظیم دبی ورودی به کانال توسط شیرفلکه نصب‌شده در مسیر جریان و تنظیم سطح آب در کانال توسط دریچه کشویی در انتهای پایین‌دست کانال صورت می‌گرفت. محل نصب مدل‌ها در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال قرار داشت تا جریان قبل از رسیدن به مدل کاملاً توسعه‌یافته شود. برای اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و روی تاج سرریز از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. این عمق‌سنج به کمک ریل‌هایی که بر روی دیواره کانال نصب شده‌است، در طول کانال حرکت کرده و عمق آب را در

آنها به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی رابطه مستقیم با نسبت هد آب بالادست به ارتفاع کالورت دارد. اسماعیلوندی و اسدی (۲۰۱۹) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سازه ترکیبی کالورت دایره‌ای-سرریز لبه‌پهن پرداختند. نتایج آنها نشان داد به‌ازای یک هد مشخص، دبی سازه ترکیبی بیشتر از مجموع دبی کالورت و دبی سرریز است.

همان‌گونه که ذکر شد، غالباً به دلیل طراحی نادرست یا عدم‌نگهداری و نظارت صحیح، کالورت‌ها نمی‌توانند همه آب‌های جریان‌های بزرگ یا پیک سیلاب‌ها را از خود عبور دهند. از طرفی ساخت پل جز به‌ضرورت مقرون‌به‌صرفه نیست به‌همین‌منظور یکی از سازه‌های پیشنهادی جایگزین این دو سازه، سازه ترکیبی کالورت-سرریز است. هدف این پژوهش بررسی سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلیدپیانویی است تا از مزایای این سرریزها در افزایش راندمان و ضریب دبی کالورت استفاده شود. ایده استفاده از سرریز کلید پیانویی در حدود ۱۸ سال پیش مطرح شده‌است. مطالعات اولیه نشان داد این سرریز به‌طور چشمگیری دبی عبوری از سرریز را افزایش داده و با هوادهی کامل جریان احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را کاهش می‌دهد. هدف اولیه ساخت این نوع از سرریزها کاربرد آن در سرریز سدها به دلیل گذردهی بالای جریان بود؛ اما در سال‌های اخیر این سازه در رودخانه‌ها به‌منظور کنترل جریان نیز مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، یافتن راه‌حلی برای عبوردهی رسوبات حائز اهمیت فراوانی است. تاکنون مطالعات زیادی بر روی سرریز کلید پیانویی انجام گرفته و مزیت‌ها و خصوصیات هندسی و هیدرولیکی این سرریز ارائه شده‌است؛ اما باوجود مطالعات و آزمایش‌هایی که در این چند سال روی سرریز کلید پیانویی انجام شده‌است، ترکیب این سرریز به همراه کالورت مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از کالورت به همراه سرریز کلیدپیانویی می‌تواند محدودیت استفاده از این سرریز در رودخانه‌ها را به دلیل تجمع رسوبات برطرف کند؛ از این‌رو در مطالعه حاضر با تغییر پارامترهای هندسی این سازه از جمله ارتفاع سرریز و بازشدگی کالورت، ضریب گذردهی جریان ارزیابی می‌شود، علاوه بر آن عملکرد آن در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی و کالورت بررسی می‌شود.

مقایسه سازه ترکیبی با سرریز و کالورت هریک به تنهایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات آزمایشها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- الف) شماتیک و مشخصات هندسی سرریزهای کلید پیانویی، ب) یک نمونه از سرریزهای کلید پیانویی ساخته شده

نقاط مورد نظر اندازه گیری می کند. شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۱- نمایی از کانال آزمایشگاهی

شکل ۲ مشخصات هندسی سرریزهای کلید پیانویی و یک نمونه از سرریزهای کلید پیانویی ساخته شده و جدول ۱ پارامترهای هندسی مدل های آزمایشگاهی را نشان می دهد. در این شکل P ارتفاع سرریز، W عرض سرریز که برابر با عرض کالورت است، Wi عرض دهانه ورودی، Wo عرض دهانه خروجی، L طول کلی سرریز، Bi لبه آویزان بالادست، Bo لبه آویزان پایین دست و B طول جانبی سرریز (که برابر با طول کالورت است) و Ts ضخامت لبه تاج سرریز است. در جدول ۱، D برابر با ارتفاع بازشدگی کالورت در نظر گرفته شد.

به منظور شبیه سازی کالورت در زیر سرریز ساخته شده، ورق سرتاسری از جنس گالوانیزه با همان قطر ورق سرریز افزوده شد. با ارتفاع دادن سازه از کف کانال، فضای زیر سرریز به عنوان کالورت محسوب می شود. در جهت

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل های آزمایشگاهی

تعداد آزمایش	Q (l/s)	D (mm)	B (mm)	P (mm)	مدل	پارامتر
۴۶	۵-۵۰	-	۵۰۰,۳۵۰,۲۰۰	۲۰۰,۱۵۰,۱۰۰	سرریز	
۴۱	۵-۵۰	۸۰,۵۵,۳۰	۵۰۰,۳۵۰,۲۰۰	-	کالورت	
۵۳	۵-۵۰	۸۰,۵۵,۳۰	۵۰۰,۳۵۰,۲۰۰	۲۰۰,۱۵۰,۱۰۰	کالورت-سرریز	

که در معادله فوق شیب کف ( $S_0$ )، کشش سطحی سیال ( $\sigma$ )، لزجت دینامیکی ( $\mu$ ) و جرم مخصوص سیال ( $\rho$ ) است و سایر پارامترهای رابطه در بخش های قبل تعریف شد. از آنجایی که شیب کانال بسیار کم بود، می توان از پارامتر شیب کانال صرف نظر کرد (نواک و کابلکا، ۱۹۸۱). علاوه بر آن در صورتی که هد آب روی سرریز از ۳ سانتی متر بیشتر باشد، می توان از اثر کشش سطحی صرف نظر کرد. همچنین اگر عدد رینولدز جریان زیاد باشد، در جریان آشفته می توان اثر لزجت را نادیده گرفت (هندرسون،

برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی از معادله زیر استفاده می شود:

$$Q_w = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_{dw} W H_{uw}^2 \quad (1)$$

در معادله (۱) دبی عبوری از سرریز ( $Q_w$ )، عرض کانال ( $W$ )، هد آب روی تاج سرریز ( $H_{uw}$ )، ضریب دبی سرریز کلید پیانویی ( $C_{dw}$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) است. عوامل مؤثر بر ضریب دبی را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$C_{dw} = f_1(Q_w, H_{uw}, P, W, W_i, W_o, B, B_i, B_o, S_0, g, \sigma, \mu, \rho, L) \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{2 C_{dw}}{3} \frac{H_{uw}^2}{D} + C_{dg} \sqrt{H_{ug}} \quad (10)$$

### نتایج و بحث

#### مشاهدات آزمایشگاهی

همان‌گونه که ذکر شد، به‌منظور مقایسه نتایج در سازه ترکیبی کالورت-سرریز با کالورت و سرریز کلید پیانویی، هریک از آن‌ها به‌صورت مجزا نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش مشاهدات مربوط به آزمایش‌های صورت‌گرفته به تفکیک آورده شده‌است. به‌طور کلی جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی را می‌توان به دو بخش شامل: الف) جریان عبوری از تاج بالادست و پایین‌دست سرریز، ب) جریان متغیر مکانی از روی دیواره‌های جانبی سرریز تقسیم‌بندی کرد (شکل ۳-الف). این در حالی است که در کالورت-سرریز کلید پیانویی علاوه بر دو جریان فوق‌الذکر، جریان عبوری از کالورت نیز به آن اضافه می‌شود. در هر دو مدل سرریز و کالورت-سرریز، با عبور جریان از دیواره‌های جانبی سرریز ناحیه جدایی جریان روی تاج مشاهده شد. این ناحیه جدایش علاوه بر دبی جریان به مشخصات هندسی سرریز نیز بستگی دارد. مشاهدات نشان داد هنگامی که دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد، ناحیه جدایش افزایش یافته و به سمت پایین‌دست سرریز حرکت می‌کند. تغییر حالت از تیغه چسبیده به تیغه آزاد در قسمت‌های مختلف سرریز کلید پیانویی قابل‌مشاهده است. روی تاج جانبی سرریز، برای هدهای پایین ( $H/P < 0.05$ )، تیغه چسبیده در طول دیواره جانبی سرریز در تماس با تاج باقی می‌ماند. برای  $0.15 < H/P < 0.1$  جت عبوری به‌صورت آزاد درمی‌آید و در بیشتر طول دیواره جانبی سرریز از تاج جدا می‌شود. رفتار یکسانی در تاج پایین‌دست سرریز نیز مشاهده شد. انتقال از تیغه فشرده به تیغه آزاد در  $0.15 < H/P < 0.1$  اتفاق می‌افتد. در تاج بالادست نیز برای مقادیر کم  $H/P$ ، جت عبوری از سرریز کاملاً در تماس با دیواره‌هاست. در صورتی که برای  $H/P$  بین  $0.15$  تا  $0.2$ ، جت به‌صورت آزاد عمل می‌کند.

به‌طور کلی در سرریزهای کلید پیانویی با افزایش دبی، سرریز وارد هوادهی جزئی شده و این مرحله تا خروج کامل هوا پیش می‌رود. با افزایش هد و دبی جریان، احتمال رخداد استغراق موضعی در کلیدهای سرریز

(۱۹۶۶). پارامترهای بدون بُعد با بهره‌گیری از آنالیز ابعادی با توجه به قضیه پی-باکینگهام و در نظر گرفتن متغیرهای  $Q_w$ ،  $\mu$  و  $P$  به‌عنوان متغیرهای تکرار به‌دست آمد؛ بنابراین پارامترهای بدون بُعد مؤثر در ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در مطالعه حاضر با توجه به ثابت بودن برخی از پارامترهای هندسی مدل‌ها همچنین صرف‌نظر از شیب کانال، عدد وبر و عدد رینولدز با توجه به موارد فوق‌الذکر را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد.

$$C_{dw} = f_2 \left( \frac{H_{uw}}{P}, \frac{B}{P}, \frac{W}{P} \right) \quad (3)$$

معادله عمومی دبی عبوری از کالورت با خروجی آزاد و بدون شیب به‌صورت زیر است:

$$Q_c = C_{dg} DW \sqrt{2gH_{ug}} \quad (4)$$

در معادله (۴)، دبی عبوری از کالورت ( $Q_c$ )، بازشدگی کالورت ( $D$ )، عرض کانال ( $W$ )، هد آب در بالادست کالورت ( $H_{ug}$ )، ضریب دبی کالورت ( $C_{dg}$ ) و شتاب ثقل ( $g$ ) است. عوامل مؤثر بر ضریب دبی کالورت را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$C_{dg} = g_1(H_{ug}, B, D, W, g, \mu, \nu, \sigma, \rho) \quad (5)$$

پارامترهای مؤثر بر ضریب آبگذری کالورت را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

$$C_{dg} = g_2 \left( \frac{H_{ug}}{D}, \frac{B}{W}, \frac{B}{D} \right) \quad (6)$$

میزان جریان عبوری از سازه ترکیبی کالورت-سرریز برابر با مجموع دبی خروجی از کالورت و سرریز است؛ بنابراین دبی عبوری از سازه ترکیبی را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد.

$$Q = Q_w + Q_c \quad (7)$$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_{dw} W H_{uw}^{\frac{3}{2}} + C_{dg} DW \sqrt{2gH_{ug}} \quad (8)$$

در صورتی که ضریب دبی گذردهی سازه ترکیبی را  $C_I$  نام‌گذاری کرده می‌توان آن را به‌صورت زیر محاسبه کرد.

با فاکتورگرفتن از پارامترهای  $D$  و  $\sqrt{2g}$ ،  $W$  از معادله (۸) رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{Q}{D W \sqrt{2g}} = \frac{2 C_{dw}}{3} \frac{H_{uw}^{\frac{3}{2}}}{D} + C_{dg} \sqrt{H_{ug}} \quad (9)$$

طبق معادله (۹) عبارت  $\frac{Q}{D W \sqrt{2g}}$ ،  $C_I$  نام‌گذاری می‌شود که درحقیقت نشان‌دهنده ضریب گذردهی سازه ترکیبی است و به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

در نوع ۴ کالورت کاملاً مستغرق است. در نوع ۵ سطح آب بالادست بالاتر از دهانه ورودی کالورت قرار داشته و در خروجی جریان آزاد است و به‌ازای هر شیبی شرایط جریان فوق بحرانی است. در نوع ۶ سطح آب در خروجی با ارتفاع کالورت برابر است و به‌ازای هر شیبی، جریان پر در کالورت برقرار است. از آن‌جا که در تحقیق حاضر تراز آب بالادست بالاتر از ورودی کالورت قرار داشته و در خروجی جریان آزاد است، شرایط جریان در دسته ۵ قرار می‌گیرد (شکل ۳-ب).

در آزمایش‌های انجام‌شده روی کالورت-سرریزها مشخص شد از دبی ۵ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه سازه ترکیبی تنها به‌صورت کالورت عمل کرده و از دبی ۲۰-۳۵ لیتر بر ثانیه کلیدهای ورودی سرریز شروع به پرشدن می‌کنند درحالی‌که این کلیدها عمل نمی‌کنند (شکل ۳-ج). با افزایش دبی کلیدهای خروجی شروع به عمل کرده و جریان ریزشی در بازه دبی‌های بیش از ۳۵ لیتر بر ثانیه برقرار می‌شود (شکل ۳-د). در ادامه نتایج مربوط به تغییرات دبی-اشل و همچنین ضریب دبی این سازه‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر به‌واسطه برخورد جریان عبوری از تاج بالادست با بخشی از جریان عبوری از دیواره‌های جانبی کلیدها، برآمدگی در سطح آب و ناحیه گرده ماهی‌شکلی ایجاد می‌شود. از طرف دیگر به‌واسطه برخورد سفره‌های ریزشی از طرفین به داخل کلید خروجی، احتمال انسداد و پرشدگی کلید خروجی وجود دارد. به‌دلیل پرشدن کلید خروجی تخلیه، جریان از کلید ورودی نیز دچار مشکل می‌شود. این پدیده در نهایت منجر به کاهش ضریب آبگذری جریان می‌شود.

آزمایش‌های مربوط به کالورت در سه بازشدگی به ارتفاع‌های ۰/۰۳، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۸ متر و سه طول ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ متر انجام گرفت. بدین (۱۹۷۶) شش دسته درجهت طبقه‌بندی جریان در کالورت‌ها ارائه کرد. براین اساس در نوع ۱، جریان در کالورت در قسمت ورودی و خروجی پایین‌تر از قطر کالورت بوده و جریان با سطح آزاد و شیب تند در کالورت برقرار است و عمق ورودی برابر با عمق بحرانی است. در نوع ۲ عمق بحرانی در انتهای کالورت برقرار بوده و جریان با سطح آزاد و شیب ملایم در کالورت جریان دارد. در نوع ۳ شرایط جریان زیر بحرانی است و جریان آزاد با شیب ملایم در کالورت برقرار است.

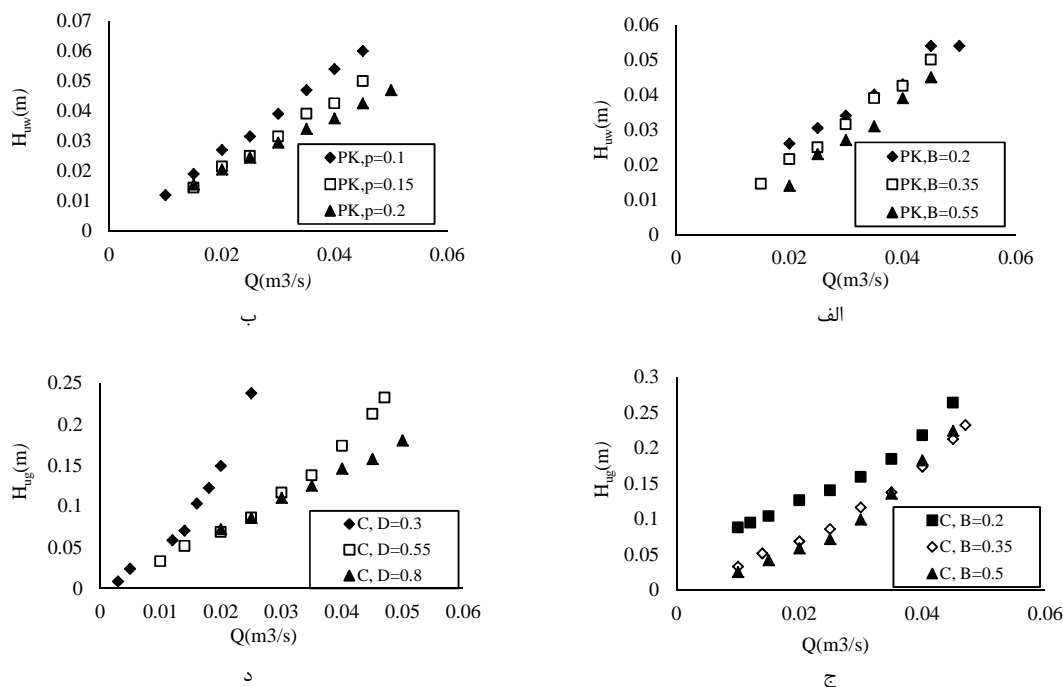


شکل ۳- نحوه عملکرد سازه الف) جریان عبوری سرریزهای کلیدپیانویی، ب) جریان عبوری از کالورت، ج) کارکرد کالورت در سازه ترکیبی، د) کارکرد کالورت و سرریز در سازه ترکیبی

## بحث

درصدی ارتفاع دبی عبوری در حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با تغییر عرض سرریز از ۰/۲ به ۰/۵۵ متر (تغییر ۶۳ درصدی عرض سرریز) در هد ثابت ۰/۰۴ متر دبی عبوری تنها در حدود ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد. در شکل (۴-ج، د) نمودارهای دبی-اشل کالورت، به ترتیب برای مقادیر B و D مختلف آورده شده است. با افزایش طول کالورت از ۰/۲ به ۰/۳۵، مقدار دبی افزایش یافته، ولی با تغییر طول کالورت از ۰/۳۵ به ۰/۵ مقدار دبی تقریباً ثابت است. این در حالی است که با افزایش بازشدگی کالورت میزان دبی نیز افزایش یافته و شیب تغییرات دبی-ارتفاع در کالورت با بازشدگی کمتر ملایم‌تر و با افزایش بازشدگی کالورت این شیب تندتر می‌شود.

شکل ۴ نمودارهای دبی-اشل سرریز کلید پیانویی و کالورت را برای مقادیر مختلف P، B و D نشان می‌دهد. با توجه به شکل، دبی با هد آب روی سرریز رابطه خطی دارد، ارتباط خطی دبی در مطالعات اندرسون (۲۰۱۱) نیز گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از مقایسه شکل (۴-الف) و شکل (۴-ب) می‌توان به این نتیجه رسید که ارتفاع سرریز (P) نسبت به عرض سرریز (B) پارامتر مؤثرتری در گذردهی دبی است. به‌عنوان مثال در هد ثابت ۰/۰۴ متر، دبی عبوری از سرریز با ارتفاع ۰/۱ متر برابر با ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه و در ارتفاع ۰/۲ متر برابر ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه است؛ به‌عبارت دیگر با افزایش ۵۰



شکل ۴- نمودار دبی اشل

الف) سرریز کلید پیانویی برای نسبت‌های مختلف P در  $B=0/۳۵(m)$  (ب) سرریز کلید پیانویی برای نسبت‌های مختلف B در  $P=0/۱۵(m)$  (ج) کالورت برای نسبت‌های مختلف B در  $D=0/۰۵۵(m)$  (د) کالورت برای نسبت‌های مختلف D در  $B=0/۳۵(m)$

است؛ بنابراین می‌توان ادعان داشت در هدهای پایین که تنها کالورت عمل می‌کند تغییرات ارتفاع سرریز، تأثیری در دبی عبوری جریان ندارد. این نتیجه نشان از تأثیر بیشتر عملکرد کالورت نسبت به سرریز در سازه ترکیبی کالورت-سرریز است، از طرفی در دبی‌های پایین ( $Q < ۴۰$  لیتر بر ثانیه) یا هدهای پایین ( $H' < 0/۱۵$ ) از تأثیر ارتفاع سرریز کاسته شده و می‌توان بیان کرد پارامتر مؤثری بر

شکل ۵ نمودار دبی-اشل را در سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی نشان می‌دهد. در این شکل منظور از ارتفاع آب بالادست سازه ترکیبی است. با توجه به شکل افزایش ارتفاع سرریز تا  $H'$  برابر با ۰/۱۵ تأثیری بر میزان دبی عبوری نداشته و در  $H'$  بیش از ۰/۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سرریز میزان دبی جریان کاهش می‌یابد که این روند برخلاف رفتار سرریز به‌تنهایی

همچنین در سازه ترکیبی با بازشدگی ۵ سانتی متر و هد آب ۰/۲ متر نیز دبی عبوری ۵۰ لیتر بر ثانیه و در کالورت با شرایط مشابه دبی عبوری ۴۵ لیتر بر ثانیه است که نشان دهنده بیشتر شدن ۱۰ درصد کارایی سازه ترکیبی نسبت به کالورت است؛ بنابراین سازه ترکیبی کالورت-سرریز نسبت به هریک از سازه های سرریز کلید پیاپویی و کالورت در حدود ۱۰ درصد راندمان بالاتری دارد.

در شکل ۶ نمودار تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بدون بُعد هد بالادست به ارتفاع سرریز برای نسبت های W/P و B/P در سرریز (شکل های (۶-الف، ب)) و تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بدون بُعد هد بالادست به بازشدگی کالورت برای نسبت های B/D و B/W در کالورت (شکل های (۶-ج، د)) آورده شده است. نتایج نشان داد در سرریز کلید پیاپویی با افزایش نسبت Hug/P ضریب دبی کاهش می یابد؛ زیرا با افزایش هد آب روی سرریز به دلیل استغراق دهانه های سرریز از کارایی آن ها کاسته می شود. این روند در مطالعات محققان پیشین از جمله کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نیز دیده می شود. با توجه به شکل (۶-الف، ب) تغییرات عرض کانال (W) و طول جانبی سرریز یا همان طول کالورت (B) تأثیری بر ضریب دبی سرریز نداشته زیرا با تغییر این دو پارامتر روند داده ها ثابت و دارای همپوشانی هستند؛ بنابراین می توان بیان کرد پارامتر اصلی و تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریز، ارتفاع سرریز و به عبارت دیگر نسبت Hug/P خواهد بود.

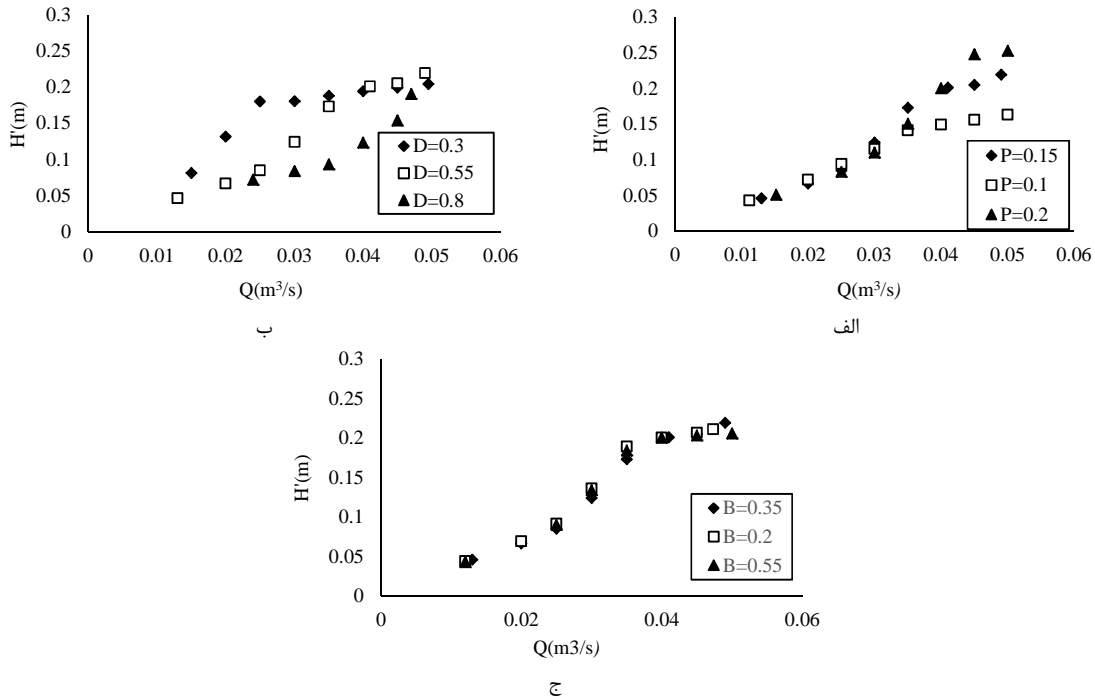
به طور کلی روند تغییرات ضریب دبی و Hug/D در کالورت کاهش یافته است و این روند در مطالعات بدهاین (۱۹۷۶) و گیون و همکاران (۲۰۱۳) نیز مشاهده شده است. با توجه به شکل های (۶-ج، د)، در  $Hug/D < 3/5$  با افزایش Hug/D مقدار ضریب دبی افزایش می یابد. در یک Hug/D ثابت با افزایش نسبت B/D ضریب دبی کالورت نیز افزایش می یابد. به ازای  $Hug/D > 3/5$  تغییرات B/D بر ضریب دبی کاهش یافته و ضریب دبی کالورت به سمت عدد ۰/۷ میل می کند. روند مشابهی به ازای تغییرات B/W در کالورت مشاهده شد. با افزایش B/W در  $Hug/D < 3/5$  ضریب دبی کالورت روند افزایشی داشته و به ازای یک Hug/D ثابت با افزایش B/W ضریب دبی نیز افزایش می یابد و به ازای  $Hug/D > 3/5$  ضریب دبی به سمت مقدار ثابت ۰/۷ میل می کند.

ضریب دبی نیست؛ بنابراین در شرایطی که دبی جریان زیاد است و به دلیل محدودیت های طراحی که امکان استفاده از سرریز کلید پیاپویی با ارتفاع بلند وجود ندارد کالورت-سرریز کلید پیاپویی با ارتفاع کمتر گزینه مناسبی خواهد بود. به طور کلی نمودارهای دبی-اشل سازه ترکیبی دارای یک تغییر شیب (نقطه شکست) است که دلیل آن عملکرد کالورت به تنهایی در دبی های پایین و سپس با افزایش دبی عملکرد همزمان سرریز با کالورت است. در دبی های بالا مشاهده می شود که با افزایش دبی مقدار هد بالادست تقریباً ثابت یا دارای افزایش جزئی است (به عنوان نمونه در  $P=0.1m$  در دبی های بیش از ۴۰ لیتر بر ثانیه هد در حدود ۱۵ سانتی متر تقریباً ثابت است) که دلیل آن بالا بودن ظرفیت گذردهی جریان در سازه ترکیبی نسبت به میزان جریان وارد شده است؛ بنابراین با کاربرد کالورت همزمان با سرریز کلید پیاپویی راندمان سرریز افزایش یافته و محدودیت این سرریز در گذردهی های بالای جریان به دلیل استغراق موضعی کلیدها و کاهش راندمان سرریز بهبود می یابد. از مقایسه شکل های (۵-الف، ب و ج) مشخص است که پارامتر ارتفاع کالورت (D) نسبت به ارتفاع سرریز (P) و طول کالورت (B) مؤثرتر است. با توجه به شکل (۵-ب) با افزایش بازشدگی کالورت میزان دبی عبوری افزایش می یابد. این روند مشابه عملکرد کالورت است و به عبارت دیگر مؤید تأثیر بیشتر رفتار کالورت در سازه ترکیبی است.

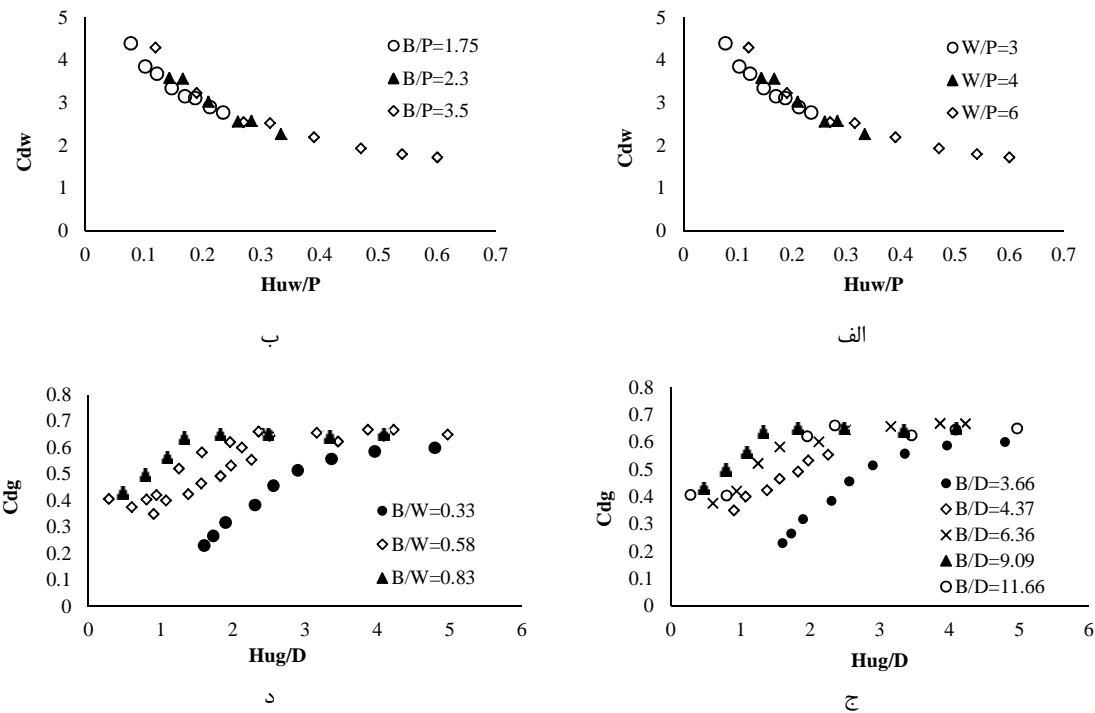
شکل (۵-ج) تغییرات دبی در مقابل هد آب بالادست (H) برای طول های مختلف کالورت (B) را نشان می دهد. با توجه به نمودارها با افزایش طول کالورت میزان دبی تغییری نکرده که نشان از بی تأثیر بودن پارامتر طول سازه بر گذردهی سازه است. این در حالی است که در کالورت به تنهایی نیز پارامتر طول از جمله پارامترهای مؤثر محسوب نمی شود؛ بنابراین در صورت استفاده از سازه ترکیبی نیز، نیازی به طول زیاد کالورت، در جهت افزایش گذردهی آب نخواهد بود.

با توجه به شکل ۴ و ۵ در سازه ترکیبی کالورت-سرریز با ارتفاع سرریز ۰/۱۵ متر و هد بالادست ۰/۲ دبی عبوری در حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه و در سرریز با شرایط مشابه دبی عبوری ۴۵ لیتر بر ثانیه است که نشان دهنده ۱۰ درصد بیشتر شدن کارایی سازه ترکیبی نسبت به سرریز است.



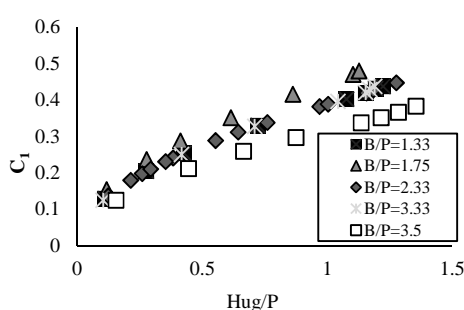


شکل ۵- الف) نمودار تغییرات دبی کالورت-سرریز کلید بیانویی در مقابل  $H'$  (الف) برای نسبت‌های مختلف  $P$  در  $B=0.35(m)$  و  $B=0.2(m)$  و  $D=0.55(m)$  (ب) برای نسبت‌های  $D$  در  $B=0.35(m)$  و  $B=0.2(m)$  (ج) ثابت،  $P=0.15$  (ج) ن برای نسبت‌های مختلف  $B$  در  $D=0.55(m)$  و  $D=0.55(m)$  و  $P=0.15(m)$

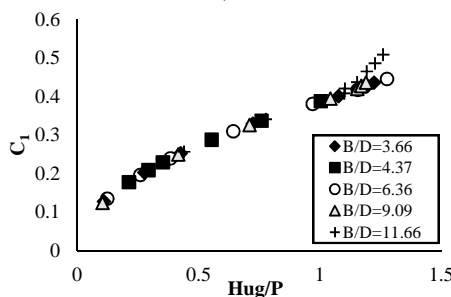


شکل ۶- نمودار تغییرات ضریب دبی (الف) در مقابل  $Hug/P$  در سرریز کلید بیانویی برای نسبت‌های مختلف  $B/P$  (ب) در مقابل  $Hug/P$  در سرریز کلید بیانویی برای نسبت‌های مختلف  $B/P$  (ج) در مقابل  $Hug/D$  در کالورت برای نسبت‌های مختلف  $B/D$  (د) در مقابل  $Hug/D$  در کالورت برای نسبت‌های مختلف  $B/W$

کالورت-سرریز کلید پیانویی مقادیر  $W/P \geq 4$  است. همچنین با توجه به شکل (۷-ب) مشخص است به ازای  $Hug/P = 3/5$  شیب افزایشی تغییرات ضریب دبی با  $Hug/P$  کاهش می‌یابد؛ بنابراین مقدار بهینه در جهت عملکرد مناسب سازه ترکیبی مقادیر  $B/P$  کمتر از  $3/5$  خواهد بود. با توجه به شکل (۷-ج، د) تغییرات پارامترهای بدون بُعد  $W/D$  و  $B/D$  در ضریب دبی سازه ترکیبی تأثیری نداشته و با تغییر آن‌ها ضریب دبی تقریباً ثابت می‌ماند.

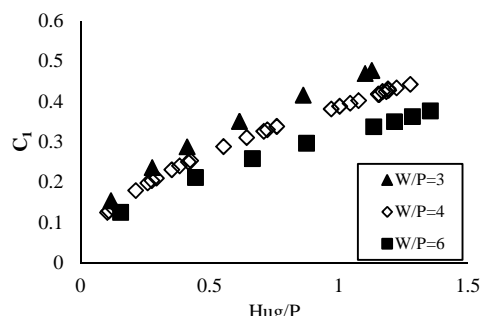


ب

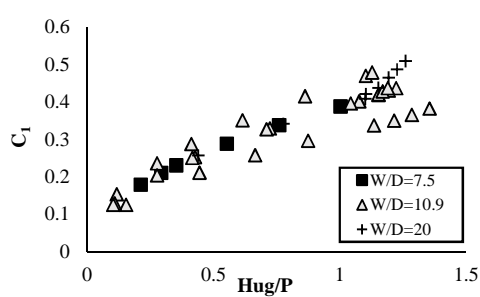


د

شکل ۷ تغییرات ضریب دبی سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی را در برابر  $Hug/P$  به ازای مقادیر مختلف  $W/D$ ،  $B/D$ ،  $W/P$ ،  $B/P$  با افزایش نسبت  $Hug/P$  همچون روند مشاهده شده در کالورت ضریب دبی سازه ترکیبی نیز افزایش یافته و به بیان دیگر عملکرد سازه ترکیبی سرریز-کالورت بیشتر تحت تأثیر عملکرد کالورت است. مشاهده می‌شود به ازای  $W/P$  بیش از ۴ شیب افزایشی ضریب دبی کاهش یافته؛ بنابراین مقدار پیشنهادی این پارامتر برای سازه ترکیبی



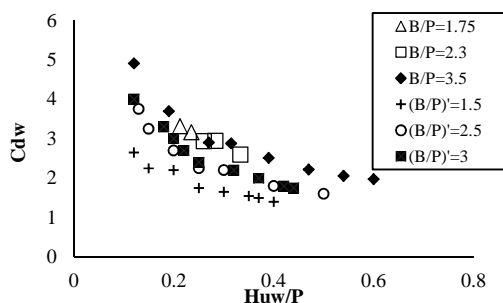
الف



ج

شکل ۷- نمودار تغییرات ضریب دبی کالورت-سرریز کلید پیانویی در مقابل  $Hug/P$  برای نسبت‌های مختلف، الف)  $W/P$ ، ب)  $B/P$ ، ج)  $W/D$  و د)  $B/D$

$Huw/P > 0.3$  روند نمودار ثابت می‌شود و به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند.



شکل ۸- مقایسه بین داده‌های مطالعه حاضر با داده‌های کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲)

شکل ۸ مقایسه بین داده‌های مطالعه حاضر با داده‌های کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) مربوط به سرریز کلید پیانویی را نشان می‌دهد. در این شکل،  $B/P$  مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش انجام شده در تحقیق حاضر و  $(B/P)$  نتایج به دست آمده مطالعه کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود روند داده‌های مطالعه حاضر مشابه داده‌های مطالعه کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) است. با افزایش  $Huw/P$  ضریب دبی کاهش یافته و سپس به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. با توجه به نمودار به ازای  $0.1 < Huw/P < 0.3$  با افزایش نسبت  $B/P$  ضریب دبی افزایش می‌یابد و در

## نتیجه‌گیری

جهت طراحی این سازه با عملکرد مناسب مقادیر  $W/P \geq 4$  و  $B/P \leq 3/5$  پیشنهاد می‌شود.

## منابع

1. Ansar M. Alexis A. and Damisse E. 2002. Flow computations at Kissimmee River gated structures: A comparative study. Rep., Hydrology and Hydraulics Dept., South Florida Water Management District, Fla. .
2. Anderson R. M. 2011. Piano Key Weir Head Discharge Relationships. All Graduate Theses and Dissertations. 880. Utah State University. 80 p.
3. Bodhaine G. L. 1976. Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods. Government Printing Office, US Geological Survey, Washington (DC). 69 p.
4. Dasika B. 1995. New approach to design of culverts. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 121(3): 261-264.
5. Esmayilvandi M. and Asadi-Aghbolaghi M. 2019. Experimental Study of Discharge Coefficient of Broad Crest Weir-Circular Culvert Combined Structure. Ferdowsi Civil Engineering. 32(2): 45-60.
6. Ghaderi A. Daneshfaraz R. Dasineh M. and Di Francesco S. 2020. Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal-triangular labyrinth weirs. Water 12(7): 1992.
7. Guven A. Hassan M. and Sabir S.H. 2013. Experimental investion on discharge coefficient for combined broad creste weir-box culvert structure. Journal of Hydrology, 500: 97-103.
8. Hager W. and Del Giudice G. 1998. Generalized culvert design diagram. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 124(5): 271-274.
9. Henderson F.M. 1966. Open channel flow. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
10. Hien T. C. Son H. T. and Khanh M. H. T. 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam, Proc. 22nd ICOLD Congress, CIGB/ICOLD, Barcelona. Q87(R39). 581-596.
11. Johnson P. A. and Brown E. R. 2000. Stream assessment for multicell culvert use. Journal of Hydraulic Engineering. 126(5): 381-386.
12. Kabiri-Samani A. and Javaheri A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research. 50(1): 114-120.
13. Machiels O. Piroton M. Pierre A. Dewals B. and Erpicum S. 2014. Experimental parametric study and design of Piano Key

در زمان وقوع سیلاب‌ها به‌دلیل دبی زیاد همراه با بار رسوبات بالای حمل‌شده توسط جریان، عملکرد سرریزها و کالورت‌ها با کاهش مواجه می‌شود. یکی از راهکارهای حل این مشکل استفاده از سازه ترکیبی کالورت-سرریز است که علاوه بر داشتن قابلیت روگذری جریان، رسوبات را نیز از بازشدگی کالورت عبور داده و باعث ارتقای عملکرد سازه می‌شود. در تحقیق حاضر از سرریز کلید پیانویی که دارای کاربرد به‌عنوان سرریز سدها و کانال‌ها هستند استفاده شد. از مزایای این سرریزها ضریب گذردهی و راندمان بالای آن‌ها در مقایسه با سایر انواع سرریزها است. به‌دلیل پیچیدگی جریان بروی سازه ترکیبی، مدل‌سازی به‌صورت آزمایشگاهی و در شرایط جریان آزاد انجام گرفت.

نتایج نشان داد با تغییر ۵۰ درصد در ارتفاع و ۶۳ درصد در عرض سرریز گذردهی جریان به‌ترتیب ۲۵ درصد و ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد؛ بنابراین تأثیر ارتفاع نسبت‌به عرض سرریز بر میزان گذردهی جریان بیشتر است. این در حالی است که در سازه ترکیبی تأثیر بازشدگی کالورت بیش از ارتفاع سرریز است. از مقایسه آبگذری جریان در یک هد آب مشابه مشخص شد، سازه ترکیبی کالورت-سرریز نسبت به هریک از سازه‌های سرریز کلید پیانویی و کالورت در حدود ۱۰ درصد راندمان بالاتری دارد.

مقایسه نتایج ضریب دبی در سرریز کلید پیانویی با مطالعه کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نشان‌دهنده روند مشابه و کاهش ضریب دبی با نسبت هد به ارتفاع سرریز بود که علت آن مستغرق‌شدن دهانه‌های سرریز در دبی‌های بالا است. همچنین روند تغییرات ضریب دبی و  $Hug/D$  در کالورت کاهش و مشابه مطالعات بدهاین (۱۹۷۶) و گیون و همکاران (۲۰۱۳) به‌دست آمد. این در حالی است که در سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی رابطه مستقیم خطی بین نسبت هد به ارتفاع سازه و ضریب دبی برقرار بوده و با افزایش این نسبت ضریب گذردهی جریان نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین در شرایطی که دبی جریان زیاد است و به‌دلیل محدودیت‌های طراحی که امکان استفاده از سرریز کلید پیانویی با ارتفاع بلند وجود ندارد، سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی با ارتفاع کمتر گزینه مناسبی خواهد بود. با توجه به ضریب گذردهی جریان عبوری از سازه ترکیبی مقادیر بهینه در

- Weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 52(3): 326-335.
14. Meselhe E. A. and Hebert K. 2007. Laboratory Measurements of Flow through Culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(8): 973-976.
15. Montes J. S. 1997. Discussion of New approach to design of culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123(1): 71-72.
16. Nosedá M. Stojnić I. Pfister M. and Schleiss A. J. 2019. Upstream erosion and sediment passage at piano key weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 145(8): 04019029.
17. Novak P. and Cabelka J. 1981. *Models in hydraulic engineering*. Pitman, London, UK.
18. Safarzadeh A. and Noroozi B. 2017. 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. *International Journal of Civil Engineering*. 15(1): 89-101.
19. Suprpto M. 2013. Increase spillway capacity using Labyrinth Weir. *Procedia Engineering*. 54: 440-446.
20. Tullis B. P. Crookston B. M. and Young N. 2020. Scale effects in free-flow nonlinear weir head-discharge relationships. *Journal of Hydraulic Engineering*. 146(2): 04019056.