مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۵/ شماره ۳/ پیاپی ۴۲/ پاییز ۱۴۰۰ (۲۵-۳۶)

مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی ضریب دبی سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی

الهام ایزدی‌نیا[۱*] و مژده امیدوار[۲]

چکیده

سازۀ هیدرولیکی ترکیبی کالورت-سرریز در شرایطی که امکان عبور جریان از زیرسازه و همچنین روگذری آن فراهم باشد، به‌عنوان یکی از راهکارهای پیشنهادی درجهت 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 کلیدپیانویی با متغیر درنظرگرفتن 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 کلیدپیانویی بررسی شد و با سازۀ ترکیبی مورد مقایسه قرارگرفت. آزمایش‌ها، در محدودۀ دبی ۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه، برای سازۀ 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 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 سازۀ ترکیبی تأثیر بازشدگی کالورت بیش از ارتفاع سرریز است. با توجه به نتایج، سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز نسبت‌به 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 کاهشی و در سازۀ ترکیبی این روند افزایشی بود؛ بنابراین در شرایطی که دبی جریان زیاد است و امکان استفاده از سرریز کلیدپیانویی با ارتفاع بلند وجود ندارد، سازه ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی با ارتفاع کمتر گزینۀ 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 سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۲: ۲۵-۳۶.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکدۀ فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان.
۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکدۀ فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان.
*** نویسنده مسئول**: **e.izadinia@ashrafi.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۹

مقدمه

از دیرباز تاکنون به‌منظور انتقال آب از نقطه‌ای به نقطۀ دیگر از روش‌های متفاوتی ازجمله استفاده از نیروی ثقل در به حرکت درآوردن جریان با سطح آزاد توسط کانال‌ها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی مانند کالورت‌ها و سرریزها استفاده شده‌است. درصورتی‌که جریان از زیر جاده یا راه‌آهن عبور کند از کالورت[1] استفاده می‌شود. سرریزها اغلب درجهت عبور آب‌های مازاد از بالادست به پایین‌دست کاربرد دارند. سرریزها به دسته‌های کلی لبه‌تیز و لبه‌پهن یا نرمال و سرریزهای کناری تقسیم می‌شوند. سرریزهای کلید پیانویی از نوع سرریزهای لبه‌تیز هستند که گاهاً از آن‌ها به‌عنوان سرریز کناری نیز استفاده می‌کنند. سرریزهای کلید پیانویی برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ طراحی و در سال ۲۰۰۶ توسط شرکت دی‌فرانس[2] ساخته شده است. محققان پژوهش‌های متفاوتی برروی پارامترهای اصلی و فرعی تأثیرگذار بر ظرفیت تخلیه یا ضریب دبی این سازه انجام داده‌اند و نتایج عددی و آزمایشگاهی ارزشمندی را به‌دست آورده‌اند. هین و همکاران (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که اگر دهانۀ ورودی سرریزهای کلید پیانویی بزرگ‌تر از دهانۀ خروجی ساخته شود، باعث افزایش ظرفیت تخلیه می‌شود. کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نشان دادند لبه‌های آویزان پایین‌دست اثری روی دبی ندارند و نقش هواده جریان را داشته و از عواملی چون کاویتاسیون، خوردگی و فرسایش جلوگیری می‌کنند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد هرچه لبۀ آویزان بالادست بزرگ‌تر باشد، دبی عبوری از سرریز بیشتر است. سوپراتو (۲۰۱۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی به مقایسۀ سه سرریز اوجی و زیگزاکی (کنگره‌ای) و سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که توانایی گذردهی جریان در سرریزهای غیرخطی (زیگزاکی) و کلید پیانویی تقریباً ۱۷۰ درصد بیشتر از سرریزهای اوجی است. میشلز و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعۀ هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی با لبۀ آویزان برابر در بالادست و پایین‌دست پرداخته‌اند. آن‌ها با مقایسۀ نتایج عددی خود با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده 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 پیانویی مستطیلی، ذوزنقه‌ای و انحنادار در پلان پرداختند. براساس نتایج حاصل، استفاده از کلیدهای ذوزنقه‌ای‌شکل تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر افزایش ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دارد. نوسیدا و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه فرسایش و رسوبگذاری در بالادست سرریزهای کلیدپیانویی و همچنین قابلیت این سازه در گذردهی رسوبات پرداختند و منحنی‌های سنجه رسوب را برای این سرریز ارائه کردند. تولیس و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر مقیاس در سرریزهای غیرخطی و کلیدپیانویی پرداختند. آن‌ها نشان دادند با کاهش سایز مدل آزمایشگاهی مقدار هد آب بدون بعد موردنیاز برای صرف‌نظرکردن از اثر مقیاس افزایش می‌یابد. قادری و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعۀ میزان افت انرژی و خصوصیات جریان در سرریزهای غیرخطی مثلثی و ذورنقه‌ای پرداختند. آن‌ها نشان دادند ضریب دبی این سرریزها با کاهش زاویۀ دیوارۀ سرریز به‌علت 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 درخصوص نحوۀ طراحی و شرایط مختلف جریان در کالورت‌ها صورت گرفته است که ازجملۀ 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 مطالعۀ آزمایشگاهی کالورت‌های مربعی و دایره‌ای در جریان‌های دائمی و غیردائمی پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از تفاوت قابل‌توجه در تغییرات دبی جریان در بازوی بالارونده با بازوی پایین‌روندۀ هیدروگراف داشت که ناشی از تفاوت شرایط جریان در زمان پر و خالی‌شدن کالورت بود.

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

1- Culvert
2- D-france

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

همان‌گونه که ذکر شد، غالباً به‌دلیل طراحی نادرست یا عدم‌نگهداری و نظارت صحیح، کالورت‌ها نمی‌توانند همهٔ 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، سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز است. هدف این پژوهش بررسی سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز کلیدپیانویی است تا از مزایای این سرریزها در افزایش راندمان و ضریب دبی کالورت استفاده شود. ایدهٔ 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 اولیهٔ ساخت این نوع از سرریزها کاربرد آن در سرریز سدها به‌دلیل 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 برروی 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 به‌دلیل تجمع رسوبات برطرف کند؛ ازاین‌رو در مطالعهٔ حاضر با تغییر پارامترهای هندسی این سازه ازجمله ارتفاع سرریز و بازشدگی کالورت، ضریب گذردهی جریان ارزیابی می‌شود، علاوه بر آن عملکرد آن در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی و کالورت بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

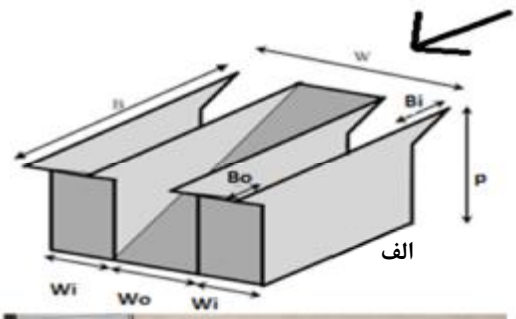
آزمایش‌های این تحقیق در کانالی با طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۷۵ متر و عرض ۰/۶۰ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس شیشه سکوریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و کف از جنس آهن ضدزنگ است که برروی خرپاهای فلزی نصب شده بود. این کانال مجهز به ۴ مخزن مرتبط، به گنجایش ۱۰ مترمکعب 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 به‌صورت لبه‌تیز باشد. به‌طورکلی 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 لبهٔ آویزان به‌ترتیب 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، درجهت مدل‌سازی مدل سرریز کلیدپیانویی در نظر گرفته شد. در این مطالعه درجهت 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 به‌ترتیب برابر با ۸، ۱۶، ۱۳/۵، ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس از روشن‌کردن 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 شیرفلکهٔ نصب‌شده در مسیر جریان و تنظیم سطح آب در کانال توسط دریچهٔ کشویی در انتهای پایین‌دست کانال صورت می‌گرفت. محل نصب مدل‌ها در فاصلهٔ 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 برروی دیوارهٔ کانال نصب شده‌است، در طول کانال حرکت کرده و عمق آب را در

نقاط مورد نظر اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

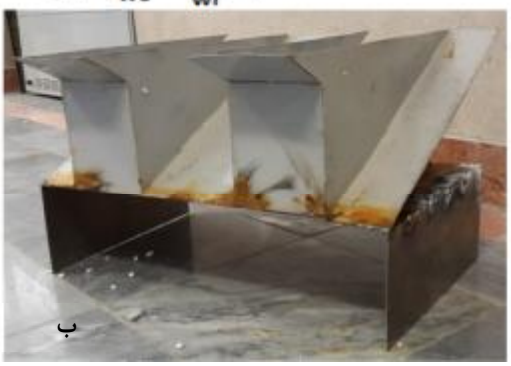
شکل ۱- نمایی از کانال آزمایشگاهی

شکل ۲ مشخصات هندسی سرریزهای کلیدپیانویی و یک نمونه از سرریزهای کلید پیانویی ساخته‌شده و جدول ۱ پارامترهای هندسی مدل‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این شکل P ارتفاع سرریز، W عرض سرریز که برابر با عرض کالورت است، Wi عرض دهانهٔ ورودی، Wo عرض دهانهٔ خروجی، L طول کلی سرریز، Bi لبهٔ آویزان بالادست، Bo لبهٔ آویزان پایین‌دست و B طول جانبی سرریز (که برابر با طول کالورت است) و Ts ضخامت لبهٔ تاج سرریز است. در جدول ۱، D برابر با ارتفاع بازشدگی کالورت در نظر گرفته شد.

به‌منظور شبیه‌سازی کالورت در زیر سرریز ساخته‌شده، ورقی سرتاسری از جنس گالوانیزه با همان قطر ورق سرریز افزوده شد. با ارتفاع‌دادن سازه از کف کانال، فضای زیر سرریز به‌عنوان کالورت محسوب می‌شود. درجهت مقایسهٔ سازهٔ ترکیبی با سرریز و کالورت هریک به‌تنهایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.



الف



ب

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

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی

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

برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی از معادلهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$Q_w = \frac{2}{3}\sqrt{2g}C_{dw}WH_{uw}^{\frac{3}{2}} \quad (۱)$$

در معادلهٔ (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 می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$C_{dw} = f_1(Q_w, H_{uw}, P, W, W_i, W_o, B, B_i, B_o, S_0, g, \sigma, \mu, \rho, L) \quad (۲)$$

که در معادلهٔ فوق شیب کف (S_0)، کشش سطحی سیال (σ)، لزجت دینامیکی (μ) و جرم مخصوص سیال (ρ) است و سایر پارامترهای رابطه در بخش‌های قبل تعریف شد. از آنجایی‌که شیب کانال بسیار کم بود، می‌توان از پارامتر شیب کانال صرف‌نظر کرد (نواک و کابلکا، ۱۹۸۱). علاوه بر آن درصورتی‌که هد آب روی سرریز از ۳ سانتی‌متر بیشتر باشد، می‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد. همچنین اگر عدد رینولدز جریان زیاد باشد، در جریان آشفته می‌توان اثر لزجت را نادیده گرفت (هندرسون،

۱۹۶۶). پارامترهای بدون بُعد با بهره‌گیری از آنالیز ابعادی با توجه به قضیهٔ پی-باکینگهام و درنظرگرفتن متغیرهای Q_w، μ و P به‌عنوان متغیرهای تکرار به‌دست آمد؛ بنابراین پارامترهای بدون بُعد مؤثر در ضریب دبی سرریز کلیدپیانویی در مطالعهٔ 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.

$$C_{dw} = f_2\left(\frac{H_{uw}}{P}, \frac{B}{P}, \frac{W}{P}\right) \quad (۳)$$

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

$$Q_c = C_{dg} D W \sqrt{2gH_{ug}} \quad (۴)$$

در معادلهٔ (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:

$$C_{dg} = g_1\left(H_{ug}, B, D, W, g, \mu, \nu, \sigma, \rho\right) \quad (۵)$$

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

$$C_{dg} = g_2\left(\frac{H_{ug}}{D}, \frac{B}{W}, \frac{B}{D}\right) \quad (۶)$$

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

$$Q = Q_w + Q_c \quad (۷)$$

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g} C_{dw} W H_{uw}^{\frac{3}{2}} + C_{dg}\, DW\sqrt{2gH_{ug}} \quad (۸)$$

درصورتی‌که ضریب دبی گذردهی سازهٔ ترکیبی را C_1 نام‌گذاری کرده می‌توان آن را به‌صورت زیر محاسبه کرد.

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

$$\frac{Q}{D\,W\sqrt{2g}} = \frac{2}{3}\frac{C_{dw}.H_{uw}^{\frac{3}{2}}}{D} + C_{dg}\sqrt{H_{ug}} \quad (۹)$$

طبق معادلهٔ (۹) عبارت $\frac{Q}{D\,W\sqrt{2g}}$، C_1 نام‌گذاری می‌شود که درحقیقت نشان‌دهندهٔ ضریب گذردهی سازهٔ ترکیبی است و به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$C_1 = \frac{2}{3}\frac{C_{dw}\ H_{uw}^{\frac{3}{2}}}{D} + C_{dg}\sqrt{H_{ug}} \quad (۱۰)$$

نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی

همان‌گونه که ذکر شد، به‌منظور مقایسهٔ نتایج در سازهٔ 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. به‌طورکلی 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-سرریزکلید 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 ناحیهٔ جدایی جریان روی تاج مشاهده شد. این ناحیه جدایش علاوه بر دبی جریان به مشخصات هندسی سرریز نیز بستگی دارد. مشاهدات نشان داد هنگامی‌که دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد، ناحیهٔ جدایش افزایش یافته و به سمت پایین‌دست سرریز حرکت می‌کند. تغییر حالت از تیغهٔ چسبیده به تیغهٔ آزاد در قسمت‌های مختلف سرریز کلید پیانویی قابل‌مشاهده است. روی تاج جانبی سرریز، برای هدهای پایین (H/P<۰/۰۵)، تیغهٔ چسبیده در طول دیوارهٔ جانبی سرریز در تماس با تاج باقی می‌ماند. برای ۰/۱< H/P < ۰/۱۵ جت عبوری به‌صورت آزاد درمی‌آید و در بیشتر طول دیوارهٔ جانبی سرریز از تاج جدا می‌شود. رفتار یکسانی در تاج پایین‌دست سرریز نیز مشاهده شد. انتقال از تیغهٔ فشرده به تیغهٔ آزاد در ۰/۱<H/P<۰/۱۵ اتفاق می‌افتد. در تاج بالادست نیز برای مقادیر کم H/P، جت عبوری از سرریز کاملاً در تماس با دیواره‌هاست. درصورتی‌که برای H/P بین ۰/۱۵ تا ۰/۲، جت به‌صورت آزاد عمل می‌کند.

به‌طورکلی 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

افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر به‌واسطۀ برخورد جریان عبوری از تاج بالادست با بخشی از جریان عبوری از دیواره‌های جانبی کلیدها، برآمدگی در سطح آب و ناحیۀ گرده ماهی‌شکلی ایجاد می‌شود. از طرف دیگر به‌واسطۀ 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 درنهایت 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. بدهاین (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.

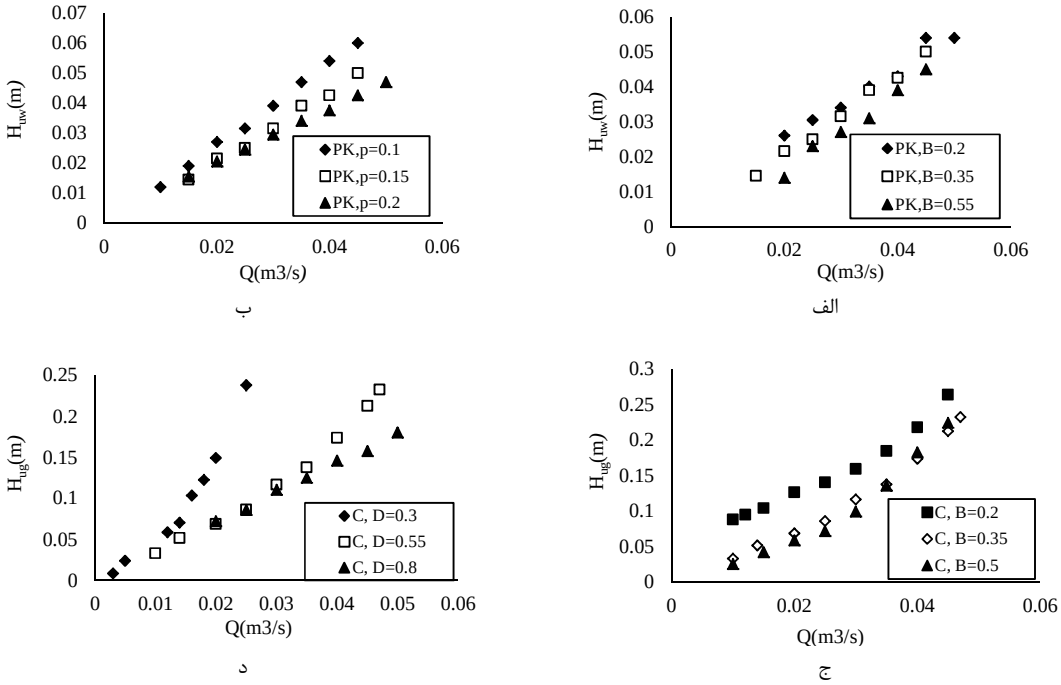
در نوع ۴ کالورت کاملاً مستغرق است. در نوع ۵ سطح آب بالادست بالاتر از دهانۀ ورودی کالورت قرار داشته و در خروجی جریان آزاد است و به‌ازای هر شیبی شرایط جریان فوق بحرانی است. در نوع ۶ سطح آب در خروجی با ارتفاع کالورت برابر است و به‌ازای هر شیبی، جریان پر در کالورت برقرار است. از آن‌جا که در تحقیق حاضر تراز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

در آزمایش‌های انجام‌شده روی کالورت-سرریزها مشخص شد از دبی ۵ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه سازۀ 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.

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

بحث

شکل ۴ نمودارهای دبی-اشل سرریز کلید پیانویی و کالورت را برای مقادیر مختلف B، P و D نشان می‌دهد. با توجه به شکل، دبی با هد آب روی سرریز رابطهٔ خطی دارد، ارتباط خطی دبی در مطالعات اندرسون (۲۰۱۱) نیز گزارش شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از مقایسهٔ شکل (۴-الف) و شکل (۴-ب) می‌توان به این نتیجه رسید که ارتفاع سرریز (P) نسبت‌به 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 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، به‌ترتیب 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- نمودار دبی اشل

الف) سرریزکلید پیانویی برای نسبت‌های مختلف P در (m)۰/۳۵= B ، ب) سرریزکلید پیانویی برای نسبت‌های مختلف B در (m)۰/۱۵=P، ج)کالورت برای نسبت‌های مختلف B در (m)۰/۰۵۵= D، د)کالورت برای نسبت‌های مختلف D در (m)۰/۳۵= B

شکل ۵ نمودار دبی-اشل را در سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی نشان می‌دهد. در این شکل منظور از H' ارتفاع آب بالادست سازهٔ 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 است؛ بنابراین می‌توان اذعان 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 نسبت‌به سرریز در سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز است، از طرفی در دبی‌های پایین (Q<۴۰ لیتر بر ثانیه) یا هدهای پایین (H'<۰/۱۵) از تأثیر ارتفاع سرریز کاسته شده و می‌توان بیان کرد پارامتر مؤثری بر

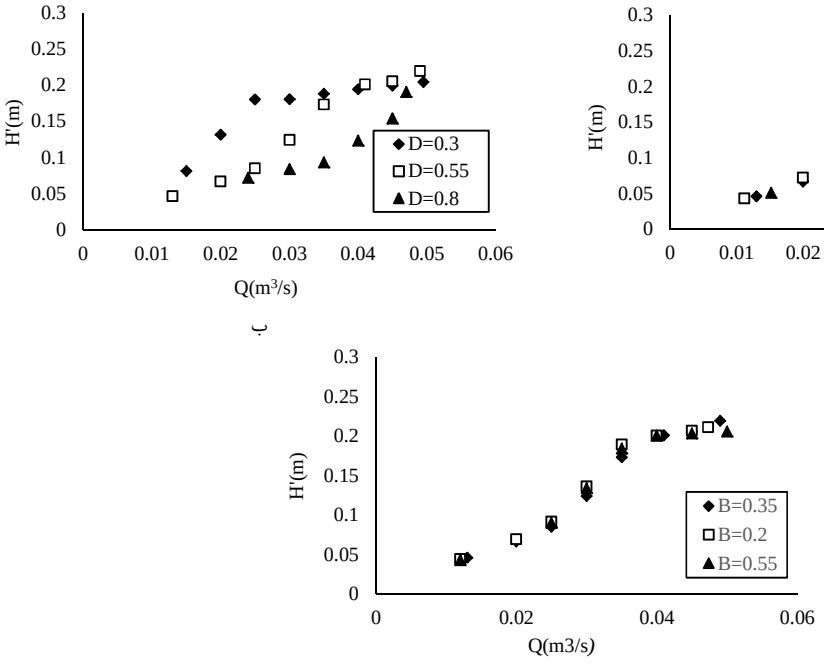
ضریب دبی نیست؛ بنابراین در شرایطی که دبی جریان زیاد است و به‌دلیل محدودیت‌های طراحی که امکان استفاده از سرریز کلیدپیانویی با ارتفاع بلند وجود ندارد کالورت-سرریز کلیدپیانویی با ارتفاع کمتر گزینهٔ مناسبی خواهد بود. به‌طورکلی نمودارهای دبی-اشل سازهٔ ترکیبی دارای یک تغییر شیب (نقطهٔ شکست) است که دلیل آن عملکرد کالورت به‌تنهایی در دبی‌های پایین و سپس با افزایش دبی عملکرد همزمان سرریز با کالورت است. در دبی‌های بالا مشاهده می‌شود که با افزایش دبی مقدار هد بالادست تقریباً ثابت یا دارای افزایش جزئی است (به‌عنوان نمونه در P=0.1m در دبی‌های بیش از ۴۰ لیتر بر ثانیه هد در حدود ۱۵ سانتی‌متر تقریباً ثابت است) که دلیل آن بالابودن ظرفیت گذردهی جریان در سازهٔ ترکیبی نسبت‌به میزان جریان وارد شده‌است؛ بنابراین با کاربرد کالورت همزمان با سرریز کلیدپیانویی راندمان سرریز افزایش یافته و محدودیت این سرریز در گذردهی‌های بالای جریان به‌دلیل استغراق موضعی کلیدها و کاهش راندمان سرریز بهبود می‌یابد. از مقایسهٔ شکل‌های (۵-الف، ب و ج) مشخص است که پارامتر ارتفاع کالورت (D) نسبت‌به ارتفاع سرریز (P) و طول کالورت (B) مؤثرتر است. با توجه به شکل (۵-ب) با افزایش بازشدگی کالورت میزان دبی عبوری افزایش می‌یابد. این روند مشابه عملکرد کالورت است و به‌عبارت‌دیگر مؤید تأثیر بیشتر رفتار کالورت در سازهٔ ترکیبی است.

شکل (۵-ج) تغییرات دبی در مقابل هد آب بالادست (H') برای طول‌های مختلف کالورت (B) را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها با افزایش طول کالورت میزان دبی تغییری نکرده که نشان از بی‌تأثیربودن پارامتر طول سازه بر گذردهی سازه است. این در حالی است که در کالورت به‌تنهایی نیز پارامتر طول ازجمله پارامترهای مؤثر محسوب نمی‌شود؛ بنابراین در صورت استفاده از سازهٔ ترکیبی نیز، نیازی به طول زیاد کالورت، درجهت افزایش گذردهی آب نخواهد بود.

با توجه به شکل ۴ و ۵ در سازهٔ 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 نشان‌دهندهٔ بیشترشدن کارایی سازهٔ ترکیبی نسبت‌به کالورت است. بنابراین سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز نسبت‌به هریک از سازه‌های سرریز کلید پیانویی و کالورت در حدود ۱۰ درصد راندمان بالاتری دارد.

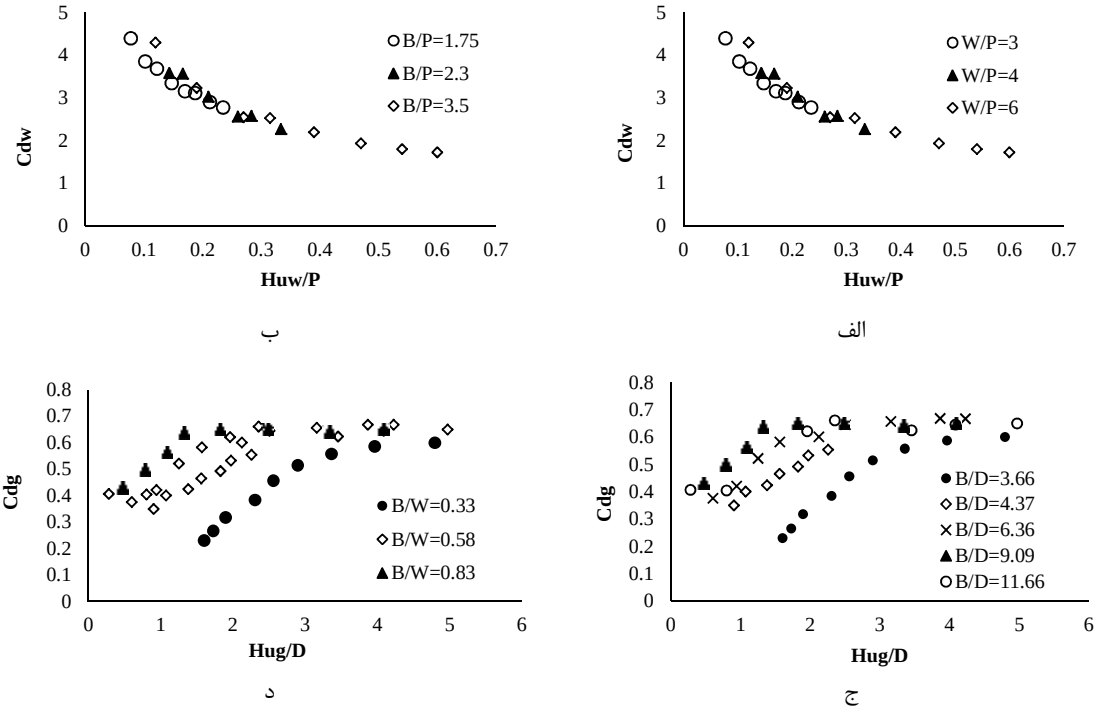
در شکل ۶ نمودار تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بدون بُعد هد بالادست به ارتفاع سرریز برای نسبت‌های W/P وB/P در سرریز (شکل‌های (۶-الف، ب)) و تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بدون بُعد هد بالادست به بازشدگی کالورت برای نسبت‌های B/D و B/W در کالورت (شکل‌های (۶-ج، د)) آورده شده‌است. نتایج نشان داد در سرریز کلیدپیانویی با افزایش نسبت Huw/P ضریب دبی کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش هد آب روی سرریز به‌دلیل استغراق دهانه‌های سرریز از کارایی آن‌ها کاسته می‌شود. این روند در مطالعات محققان پیشین ازجمله کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نیز دیده می‌شود. 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 داده‌ها ثابت و دارای همپوشانی هستند؛ بنابراین می‌توان بیان کرد پارامتر اصلی و تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریز، ارتفاع سرریز و به‌عبارت‌دیگر نسبت Huw/P خواهد بود.

به‌طورکلی روند تغییرات ضریب دبی و Hug/D در کالورت کاهشی است و این روند در مطالعات بدهاین (۱۹۷۶) و گیون و همکاران (۲۰۱۳) نیز مشاهده شده‌است. با توجه به شکل‌های (۶-ج، د)، در Hug/D<۳/۵ با افزایش Hug/D مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد. در یک Hug/D ثابت با افزایش نسبت B/D ضریب دبی کالورت نیز افزایش می‌یابد. به‌ازای ۳/۵ < Hug/D تغییرات B/D بر ضریب دبی کاهش یافته و ضریب دبی کالورت به سمت عدد ۰/۷ میل می‌کند. روند مشابهی به‌ازای تغییرات B/W در کالورت مشاهده شد. با افزایش B/W در ۳/۵< Hug/D ضریب دبی کالورت روند افزایشی داشته و به‌ازای یک Hug/D ثابت با افزایش B/W ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد و به‌ازای ۳/۵ > Hug/D ضریب دبی به سمت مقدار ثابت ۰/۷ میل می‌کند.



شکل ۵- الف) نمودار تغییرات دبی کالورت-سرریز کلید پیانویی در مقابل 'H

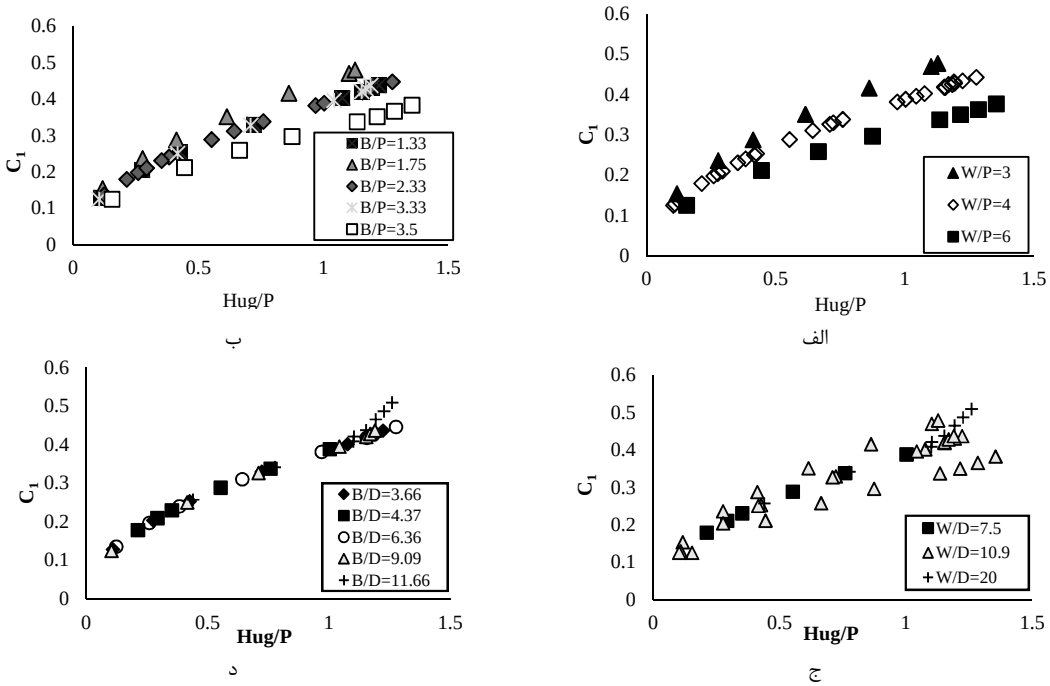
الف) برای نسبت‌های مختلف P در B=۰/۳۵(m) و D=۰/۰۵۵(m)، ب) برای نسبت‌های D در B=۰/۳۵(m) و P=۰/۱۵ (m) ثابت، ج) ن برای نسبت‌های مختلف B در D=۰/۰۵۵ (m) و P=۰/۱۵(m)



شکل ۶- نمودار تغییرات ضریب دبی

الف) در مقابل Huw/P در سرریزکلید پیانویی برای نسبت‌های مختلف B/P، ب) در مقابل Huw/P در سرریز کلید پیانویی 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

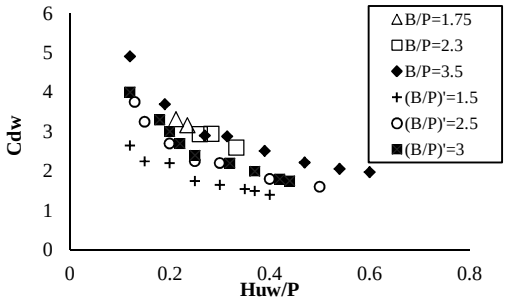
شکل ۷ تغییرات ضریب دبی سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی را در برابر *Hug/P* به‌ازای مقادیر مختلف *B/P*، *W/P*، *B/D* و *W/D* نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش نسبت *Hug/P* همچون روند مشاهده‌شده در کالورت ضریب دبی سازهٔ ترکیبی نیز افزایش یافته و به بیان دیگر عملکرد سازهٔ ترکیبی سرریز-کالورت بیشتر تحت تأثیر عملکرد کالورت است. مشاهده می‌شود به‌ازای *W/P* بیش از ۴ شیب افزایشی ضریب دبی کاهش یافته؛ بنابراین مقدار پیشنهادی این پارامتر برای سازهٔ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی مقادیر *W/P*≥۴ است. همچنین با توجه به شکل (۷- ب) مشخص است به‌ازای *B/P*= ۳/۵ شیب افزایشی تغییرات ضریب دبی با *Hug/P* کاهش می‌یابد؛ بنابراین مقدار بهینه درجهت عملکرد مناسب سازهٔ ترکیبی مقادیر *B/P* کمتر از ۳/۵ خواهد بود. با توجه به شکل (۷- ج، د) تغییرات پارامترهای بدون بُعد *B/D* و *W/D* در ضریب دبی سازهٔ ترکیبی تأثیری نداشته و با تغییر آن‌ها ضریب دبی تقریباً ثابت می‌ماند.



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

شکل ۸ مقایسهٔ بین داده‌های مطالعهٔ حاضر با داده‌های کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) مربوط به سرریز کلید پیانویی را نشان می‌دهد. در این شکل، B/P مربوط به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش انجام‌شده در تحقیق حاضر و (B/P)' نتایج به‌دست‌آمده مطالعهٔ کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) است.

همان‌طورکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود روند داده‌های مطالعهٔ حاضر مشابه داده‌های مطالعهٔ 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 به‌ازای ۰/۱<Huw/P<۰/۳ با افزایش نسبت B/P ضریب دبی افزایش می‌یابد و در Huw/P>۰/۳ روند نمودار ثابت می‌شود و به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند.



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

نتیجه‌گیری

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 سازۀ 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 برروی سازۀ 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 سازۀ ترکیبی تأثیر بازشدگی کالورت بیش از ارتفاع سرریز است. از مقایسه آبگذری جریان در یک هد آب مشابه مشخص شد، سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز نسبت به هریک از سازه‌های سرریز کلید پیانویی و کالورت در حدود ۱۰ درصد راندمان بالاتری دارد.

مقایسۀ نتایج ضریب دبی در سرریز کلید پیانویی با مطالعۀ کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) نشان‌دهندۀ روند مشابه و کاهشی 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 کاهشی و مشابه مطالعات بدهاین (۱۹۷۶) و گیون و همکاران (۲۰۱۳) به‌دست آمد. این در حالی است که در سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز کلیدپیانویی رابطۀ 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 کلیدپیانویی با ارتفاع بلند وجود ندارد، سازۀ ترکیبی کالورت-سرریز کلید پیانویی با ارتفاع کمتر گزینۀ مناسبی خواهد بود. با توجه به ضریب گذردهی جریان عبوری از سازۀ ترکیبی مقادیر بهینه در 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. Measurment 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 coeffient 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 Engineerig. 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. Pirotton 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.
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. Noseda M. Stojnic 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. Suprapto 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.