

ارزیابی تاثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیاپویی قوسی

کیومرث روشنگر^۱، مهدی ماجدی اصل^۲، محمد تقی اعلمی^۳، جلال شیری^۴

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران آب، دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه مراغه

۳. استاد گروه مهندسی عمران آب، دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۴. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۲۰

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیاپویی جزء سرریزهای غیرخطی بوده که می‌توانند دبی را برای یک عرض مشخص و بدون افزایش بار آبی، افزایش دهند. شکل قوسی این سرریزها باعث بهتر شدن جهت جریان به سمت سیکل‌ها شده و باعث کاهش نابرابری ورود جریان به سیکل‌های مختلف می‌شود. سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیاپویی قوسی، امروزه به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور سیل طراحی پیش‌بینی شده با مشکل روبرو هستند، به‌کار برده می‌شوند. در این تحقیق تعداد ۳۰۸ آزمایش بر روی ۱۵ مدل فیزیکی، با تغییر پارامترهای هندسی از جمله زاویه سیکل قوسی (θ)، ارتفاع سرریز (P)، فرم تاج سرریز، بزرگنمایی سیکل ($L_c\text{-cycle}/W$)، نسبت عرض سیکل (w/p) و طول دماغه سرریز (A)، جهت بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیاپویی قوسی انجام گردید و با سرریزهای خطی، کنگره‌ای خطی و کلید پیاپویی خطی مورد مقایسه قرار گرفت. با افزایش زاویه سیکل قوسی و اصلاح سرریزهای قوسی، کارایی این سرریزها افزایش یافته به طوری که متوسط و ماکزیمم اختلاف ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه ($ALW40$) با سرریز کنگره‌ای خطی (LW) به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۱ درصد و برای سرریز کلید پیاپویی قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه ($APK40$) با سرریز کلید پیاپویی خطی (PK) به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد بدست آمد. سرریزهای قوسی اصلاح شده کارایی بیشتری نسبت به سرریزهای اصلاح نشده آنها دارند ولی با افزایش H_t/P مقدار ضریب دبی در این سرریزها به هم نزدیک می‌شوند. این تحقیق نشان داد که با افزایش زاویه سیکل قوسی برتری سرریزهای کلید پیاپویی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سرریزهای قوسی، سرریز کنگره‌ای خطی، سرریز کلید پیاپویی خطی، ضریب شدت جریان

مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای اندازه‌گیری شدت جریان، کنترل سیلاب، ذخیره آب، انحراف جریان آب در کانالها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به کار برده می‌شوند. در صورتی که محل احداث سرریزها با محدودیت در عرض و سطح آب در بالادست مواجه باشد، یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت دبی، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیاپویی می‌باشد. که در این سرریزها، افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن سرریز در پلان صورت می‌گیرد. در دهه اخیر استفاده از سرریزهای غیر خطی (کنگه‌ای و کلید پیاپویی) در سراسر جهان رو به افزایش است، لذا در این راستا گرایش محققان به برآورد ضریب دبی و کارایی سرریزها رو به افزایش بوده و به

دنبال مطالعات تجربی و آزمایشگاهی، تحقیقات زیادی برای بهبود و پیشبرد روشهای تجربی جهت محاسبه ضریب دبی، انتخاب هندسه بهینه و افزایش کارایی سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است. هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای برای اولین بار توسط Gentilini (1940) مورد بررسی قرار گرفت. توسعه طراحی سرریزهای کنگره‌ای توسط Taylor (1968) و سپس توسط Hay and Taylor (1970) شروع شد و Tullis *et al.* (1995) بیان کردند که راندمان و دبی سرریزهای کنگره‌ای ۳ تا ۴ برابر بیشتر از سرریزهای خطی می‌باشد. Seamons (2014) تاثیر تغییرات هندسی سرریزهای کنگره‌ای بر روی کارایی آنها را مورد ارزیابی قرار داد. سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی توسط Mohamadi (2000)، Farhangi (2002) و Yasi and Mohamadi (2007) مورد بررسی قرار گرفت، آنها نشان دادند که شکل قوسی "دماغه سرریز" همگام با واگرایی بیشتر "کانال

در بسیاری از شرایط موجود، سرریزهای کلید پیاپویی جایگزین مناسب و اصلاح شده‌ای برای سرریزهای خطی و سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند (Ribeiro et al., 2007)، (2009)، (Laugier et al., 2009) Ho Ta Khanh et al.، (2011) Pinchard et al.، (2011) Erpicum et al. و (2011) Safarzadeh and Nourozi. (2014) هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیاپویی انحنادار را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که سرریزهای کلید پیاپویی انحنادار تلفیقی از سرریزهای ذوزنقه‌ای و سرریزهای انحنادار در پلان بوده و بر اساس مدل‌سازی‌های صورت گرفته، استفاده از این الگو منجر به بهبود قابل ملاحظه در رفتار هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی می‌شود.

سرریز کلید پیاپویی نوعی سرریز غیرخطی است که به طور خاصی برای کنترل سازه‌هایی که جریان سطح آزاد سطح تماس نسبتاً کوچک دارند، ایجاد می‌شود و تاج سرریز با پیش-آمدگی در بالادست و پایین دست پایه‌ها می‌تواند طول تاج بیشتری را به وجود آورد (شیروانی یا over hangs). در کاربردهای بعضی از سرریزها ممکن است، سطح تماس یا عرض پایه (فونداسیون، footprint) و عرض احداث سرریز (W) محدود باشد. در چنین مواردی مزایای بعضی از سرریزهای کنگره‌ای معمولی از بین خواهد رفت و طراحی سرریزهای غیرخطی جایگزین، بایستی مورد بررسی قرار گیرد. تا کنون مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی بر روی سرریزهای کلید پیاپویی انجام گرفته است ولی در حال حاضر، یک روش طراحی جامع و استاندارد پذیرفته شده (به دلیل پیچیدگی و سه بعدی بودن جریان و فراوانی پارامترهای هندسی) موجود نیست. همچنین شرایط قوسی بودن سرریزهای کلید پیاپویی تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته است که در مطالعه حاضر کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی قوسی با سرریزهای کنگره-ای قوسی و در شرایط هندسی مختلف مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

آزمایشهای این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه تبریز در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸ متر با سیستم جریان آزاد انجام گردید. فلوم دارای دیواره-های از جنس پلاکسی گلاس و کف فلزی (گالوانیزه) بود که جهت تامین دبی از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. فلوم در بالادست به یک منبع آرام کننده جریان مجهز بوده و جهت آرام کردن تلاطم جریان آب از دو صفحه مشبک و در پایین-

پایین دست سرریز" و سرریزهای زیگزاگی با دماغه قوسی باریکتر منجر به افزایش کارایی هیدرولیکی می‌گردد. Takhti (2015) تاثیر دو پارامتر ارتفاع و تعداد کلیدهای سرریز و همچنین دو پارامتر هیدرولیکی دبی و عمق بالادست سرریز بر عملکرد مورد بررسی قرار گیرد. Yarmohammadi and Ahadian (2015) اثر دیواره‌های سپری بدون شیب به صورت مقطعی روی تاج سرریز و همچنین دیواره‌های سپری شیبدار با طولهای مختلف بر روی تاج جانبی سرریز و همچنین تأثیر ارتفاع سرریز را بر روی راندمان سرریز کلید پیاپویی مورد بررسی قرار دادند. Ahadian and Afzalian (2016) تأثیر شکل هندسی پایه‌های نصب شده زیر کلیدهای خروجی بر راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی را بررسی نمودند.

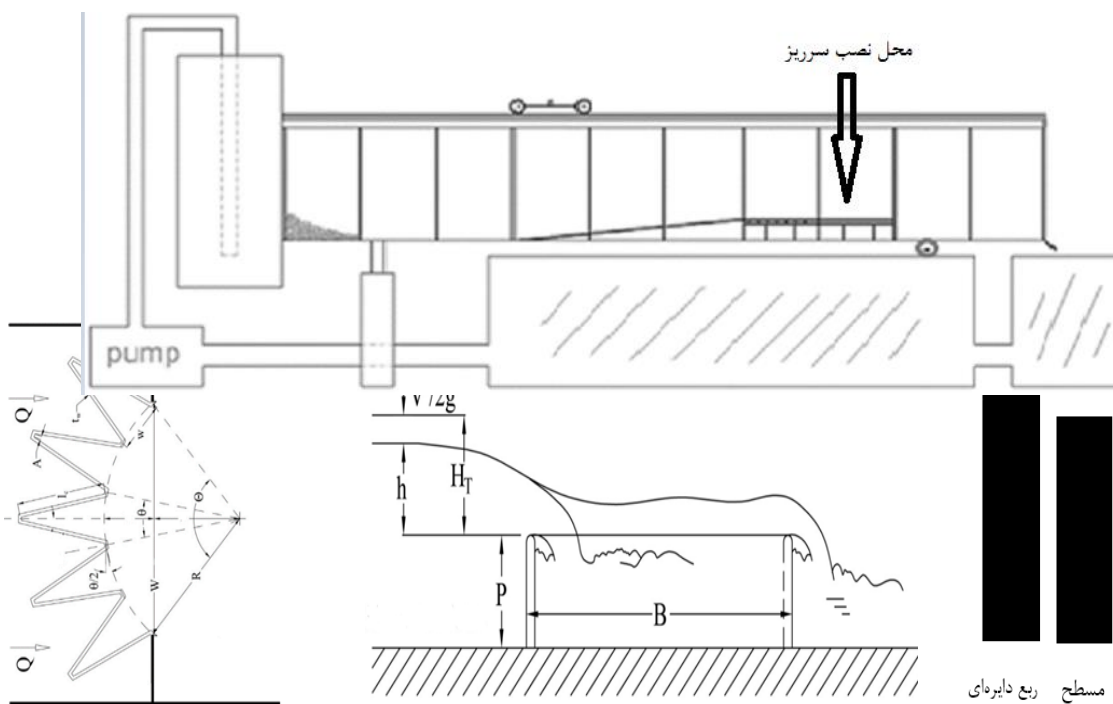
اگر در سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیاپویی، دماغه‌های پایین دست سیکل‌ها بر روی کمانی از یک دایره قرار بگیرند، این سرریزها، سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیاپویی قوسی نامیده می‌شوند. در صورتی که شرایط جریان نزدیک شونده به سرریز کانالیزه نباشد، سرریزهای قوسی کنگره‌ای گزینه مناسبتری خواهند بود. Copeland and Fletcher (2000) بیان کردند که ظرفیت سرریزهای کنگره‌ای به دو پارامتر اندازه و جهت جریان نزدیک شونده حساس می‌باشند. Yildiz and Uzeck (1996) تعیین کردند که سرریز سد ماربا کریستینا در اسپانیا (Maria cristina) با تغییر به سرریز کنگره‌ای قوسی، شرایط جریان نزدیک شونده و ظرفیت دبی بهبود یافت.

Corder page et al. (2007)، Tacail et al. (1990) بیان کردند که ظرفیت انتقال دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی در بیشترین بار آبی با سرریزهای کنگره‌ای تقریباً برابر است. Crookston (2010) بر مبنای نتایج آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای نتیجه گرفت که شکل قوسی سرریزهای کنگره‌ای کارایی هیدرولیکی بیشتری داشته و همچنین قوسی بودن این نوع سرریزها باعث می‌شود که جریان نزدیک شونده با زاویه‌ای تقریباً ۹۰ درجه و با ظرفیت دبی بیشتری سرریز گردد.

Roushangar et al. (2017) ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و کنگره‌ای قوسی را با استفاده از ماشین بردار پشتیبان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این روش دارای دقت بالایی برای پیش‌بینی ضریب شدت جریان سرریزهای کنگره‌ای دارد و دقت آن برای جهت‌گیری نرمال بیشتر از جهت‌گیری معکوس است. Crookston and Tullis (2012a) سرریزهای قوسی کنگره‌ای با زوایای دیواره سیکل مختلف (α) و زوایای سیکل قوسی مختلف (θ) بررسی نموده و پارامترها و اصطلاحات هندسی سرریزهای قوسی کنگره‌ای را نام‌گذاری نمودند.

افقی مسطح متصل کرده تا خطوط جریان به طور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابد. بر مبنای یافته های Willmore (2004) که اثرات صفحه شیب دار بالادست سرریزهای کنگره‌ای را مورد آزمون قرار داده است، نصب و هندسه این صفحه شیب دار تأثیری بر روی کارایی هیدرولیکی مدل‌های فیزیکی (نسبت به حالت نزدیک شدن افقی جریان) ندارد. برای هر دبی مشخص، جهت اطمینان از جریان پایدار در فلوم، اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی پس از ده دقیقه انجام می‌گرفت. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم از یک دریچه در انتهای پایین دست فلوم استفاده شده که شماتیکی کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی در شکل ۱ و پارامترهای هیدرولیکی در شکل ۲ آورده شده است. در این تحقیق ۱۵ مدل آزمایشگاهی مختلف ساخته شد و در مجموع ۳۰۸ آزمایش انجام شد که خلاصه‌ای از مدل‌های فیزیکی بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

دست آن از سنگریزه و در ادامه از یک صفحه شناور بر روی سطح آب استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از طول فلوم به داخل مخزنی در پایین دست ریخته شده و توسط یک پمپ این سیکل چرخشی تکرار می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال از دبی‌سنج آلتراسونیک نصب شده بر روی لوله مکش پمپ استفاده گردید و جهت کالیبره و اطمینان، روش حجمی نیز به کار گرفته شد. جهت اندازه‌گیری عمق آب از عمق‌سنج با دقت (۰/۱ mm) استفاده شد که این عمق سنج قادر بود در طول و عرض کانال حرکت کرده و ارتفاع تاج سرریز و عمق آب در کل کانال را اندازه‌گیری کند. شیب فلوم مورد آزمایش با استفاده از جک قابل تغییر بوده که در این تحقیق شیب فلوم برای تمامی آزمایشها در صفر درجه (افقی) ثابت قرار گرفت. تمامی مدل‌ها بر روی یک صفحه افقی مسطح (Platform) به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری نصب گردیده و یک صفحه شیب دار (Ramp) با زاویه ۵ درجه نسبت به افق، کف فلوم را به صفحه



شکل ۲- فرم تاج سرریز (الف)، پروفیل طولی جریان عبوری از سرریزها (ب)، پارامترهای هندسی سرریزهای قوسی (ج)

(شکل ۲-ب). همچنین چهار نسبت عرض سیکل ۱/۵۱، ۱/۷۷، ۱/۳۶، ۱/۲۵ (w/P=)، پنج حالت مختلف بزرگنمایی سیکل (L_{c-cycle}/w= ۳/۲۱، ۳/۵۷، ۳/۷۷، ۴/۲، ۴/۳۲) و حالت اصلاح شده این سرریزها یعنی تأثیر همزمان افزایش ۱۱/۵ درصدی ارتفاع سرریز و تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح (تخت) به حالت ربع دایره‌ای بر روی ضریب دبی و کارایی هیدرولیکی

در جدول ۱، علامت اختصاری ALW، APK و M به- ترتیب بیانگر سرریز کنگره‌ای قوسی (Arced Labyrinth Weirs) ، سرریز کلید پیانویی قوسی (Arced Piano Key Weirs) و (Modified Weirs) بیانگر سرریزهای اصلاح شده می‌باشد. همان‌گونه که از جدول (۱) مشخص است، سه زاویه سیکل قوسی (۲۰، ۳۰ و ۴۰) بررسی شده که در آن $\Theta = N * \theta$ می‌باشد

اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی انجام گرفته. محدوده تغییرات دبی ۱۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد و برای محاسبه ضریب جریان آزاد (C_d) در سرریزهای کلید پیانویی از معادله عمومی جریان روی سرریزها مطابق رابطه (۱) استفاده شد (Henderson 1996).

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_t^{3/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه Q ، شدت جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی بر حسب متر مکعب بر ثانیه، L طول تاج سرریز بر حسب متر، H_t ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر حسب متر، C_d ضریب شدت جریان و g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

سرریزهای کلید پیانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی مورد آزمایش قرار گرفت. نسبت بزرگنمایی طول تاج سرریز ($n=L_c/W$) در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۴/۹۲ بود تعداد سیکل‌ها $N=4$ ، در همه سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی طول هر سیکل ۲۵ L_c سانتی‌متر و سرریزهای کلید پیانویی از نوع A و طول پایه-ها (Footprint) و طول پیش آمدگی‌ها (Overgangs) هر دو برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر بود و شیب کلیدهای خروجی و ورودی به ترتیب برابر ۱:۱،۵ و ۱:۱،۲ در نظر گرفته شد. در سرریزهای کلید پیانویی و کنگره‌ای خطی، زاویه دیواره سیکل ۱۰ درجه می‌باشد ($\alpha=10$). مدل‌های سرریز از جنس پلی‌اتیلن و با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شد. سرریزها در فاصله ۷ متری از بالادست کانال نصب گردید و با استقرار جریان پایدار

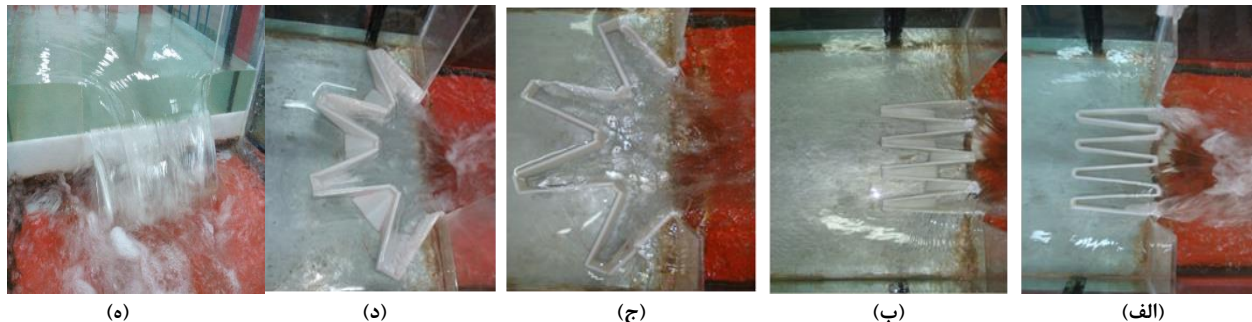
جدول ۱- مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده در این تحقیق

شماره مدل	طول دماغه سرریز (A_{cm})		فرم تاج سرریز	نسبت عرض سیکل ($\frac{W}{P}$)	بزرگنمایی سیکل ($L_c\text{-cycle}/W$)	ارتفاع سرریز (P_{cm})	زاویه سیکل قوسی (Θ)	نوع سرریز	نام اختصاری مدل
	پایین دست	بالا دست							
۱	-	-	مسطح	-	۱	۱۰	-	خطی (مستقیم)	Linear
۲	۲	۲	مسطح	۱،۲۵	۴،۳۲	۱۰	-	کنگره‌ای خطی	LW
۳	۲	۲	مسطح	۱،۲۵	۴،۳۲	۱۰	-	کلید پیانویی خطی	PK
۴	۲	۵	مسطح	۱،۳۶	۴،۲	۱۰	۲۰	کنگره‌ای قوسی	ALW20
۵	۲	۵	ربع دایره	۱،۳۶	۳،۵۷	۱۱،۵	۲۰	کنگره‌ای قوسی اصلاح شده	ALWM20
۶	۲	۵	مسطح	۱،۳۶	۴،۲	۱۰	۲۰	کلید پیانویی قوسی	APK20
۷	۲	۲	ربع دایره	۱،۵۱	۳،۷۷	۱۱،۵	۳۰	کنگره‌ای قوسی اصلاح شده	ALWM30-2
۸	۲	۵	مسطح	۱،۵۱	۳،۷۷	۱۰	۳۰	کنگره‌ای قوسی	ALW30
۹	۲	۵	ربع دایره	۱،۵۱	۳،۷۷	۱۱،۵	۳۰	کنگره‌ای قوسی اصلاح شده	ALWM30
۱۰	۲	۲	مسطح	۱،۵۱	۳،۵۷	۱۰	۳۰	کنگره‌ای قوسی	ALW30-2
۱۱	۲	۵	مسطح	۱،۵۱	۳،۷۷	۱۰	۳۰	کلید پیانویی قوسی	APK30
۱۲	۲	۵	مسطح	۱،۷۷	۳،۲۱	۱۰	۴۰	کنگره‌ای قوسی	ALW40
۱۳	۲	۵	ربع دایره	۱،۷۷	۳،۲۱	۱۱،۵	۴۰	کنگره‌ای قوسی اصلاح شده	ALWM40
۱۴	۲	۵	مسطح	۱،۷۷	۳،۲۱	۱۰	۴۰	کلید پیانویی قوسی	APK40
۱۵	۲	۵	ربع دایره	۱،۷۷	۳،۲۱	۱۱،۵	۴۰	کلید پیانویی قوسی	APKM40

موثر در ضریب دبی سرریزها در رابطه (۲) مشخص شده است.
(رابطه ۲)

$C_d = f(Fr, Re, We, H_T/P, \alpha/\theta, L_c/W, A/w, w/p, t_w/p, sc)$
در شکل (۳)، تصاویر سرریز خطی، سرریز کنگره‌ای خطی، سرریز کلید پیلانویی خطی، سرریز کنگره‌ای قوسی و سرریز کلید پیلانویی قوسی نشان داده شده است.

با استفاده از روش تحلیل ابعادی و با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی، سینماتیکی و دینامیکی، پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای شامل بار آبی در بالادست سرریز (H_T)، طول دماغه سرریز (A)، طول تاج مؤثر (L_c)، عرض کل سرریز (W)، زاویه دیواره‌ها (α)، ارتفاع سرریز (p)، ضخامت سرریز (t_w)، تعداد سیکل‌ها (N)، زاویه سیکل قوسی (θ)، شکل تاج سرریز و ... می‌باشند. پارامترهای بی بعد



شکل ۳- نمونه‌ای از مدل‌های آزمایشگاهی: الف- سرریز خطی ب- سرریز کنگره‌ای ج- سرریز کلید پیلانویی د- سرریز کنگره‌ای قوسی ($\theta=40^\circ$) ه- سرریز کلید پیلانویی قوسی ($\theta=40^\circ$).

نتایج و بحث

سرریزهای کنگره‌ای قوسی

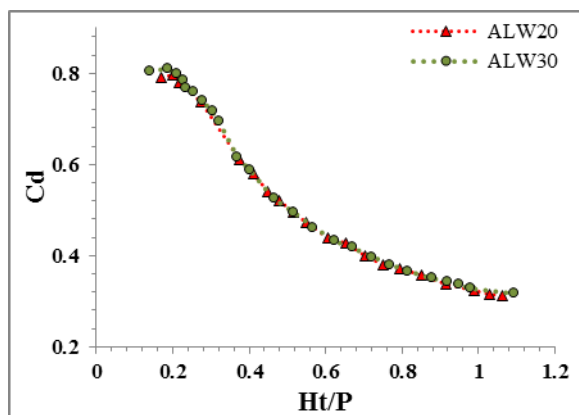
در این بخش تاثیر زاویه سیکل قوسی بر روی سرریزهای قوسی بررسی شده و با سرریزهای خطی و کنگره‌ای خطی مورد مقایسه قرار گرفته است. به طوری که در شکل ۴- الف دیده می‌شود ضریب دبی تمامی سرریزها تا محدوده $H_T/P < 0.2$ رو به افزایش بوده و در ادامه با افزایش این نسبت ضریب دبی کاهش یافته و در محدوده $H_T/P > 1$ این منحنی‌ها تقریباً افقی می‌باشند. ضریب دبی سرریز خطی با شکل تاج مسطح (تخت) در ابتدا کاهش جزئی (۵ درصد) داشته ولی با افزایش H_T/P ، ضریب دبی آن افزایش یافته است که با نتایج Aydin et al. (2011) مطابقت دارد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که ضریب دبی تمامی سرریزهای کنگره‌ای قوسی نسبت به سرریز کنگره‌ای خطی افزایش چشم‌گیری دارد به طوری که در $H_T/P = 0.3$ اختلاف ۱۶ تا ۲۱ درصدی مشاهده می‌شود که علت اصلی آن را می‌توان چنین بیان نمود که شکل قوسی این سرریزها باعث بهتر شدن جهت جریان به سمت سیکل‌ها گردیده بدین معنی که زاویه امتداد جریان با جهت دیواره سرریزها به ۹۰ درجه نزدیکتر می‌شود و همچنین باعث کاهش نابرابری ورود جریان به سیکل‌های مختلف می‌شود.

در شکل ۴- ب، دو سرریز کنگره‌ای قوسی با زوایای سیکل قوسی ۲۰ و ۳۰ درجه (ALW20 و ALW30) مورد مقایسه

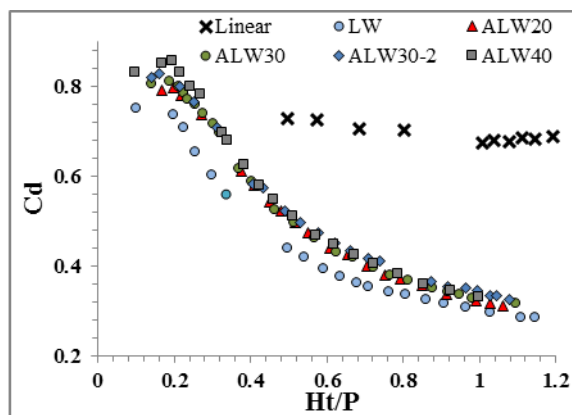
قرار گرفته‌اند. به طوری که مشخص است در محدوده $H_T/P > 0.4$ تفاوت محسوسی در ضریب دبی آنها مشاهده نمی‌شود ولی در محدوده $H_T/P < 0.4$ سرریز نوع ALW30 ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز نوع ALW20 دارد (حدود ۳ درصد). در شکل- های ۴- ج و ۴- د به ترتیب سرریزهای کنگره‌ای قوسی با زوایای سیکل قوسی ۲۰ و ۳۰ درجه با زاویه ۴۰ درجه مورد مقایسه قرار گرفته است. به طوری که مشاهده می‌شود در محدوده $H_T/P > 0.4$ برتری سرریز ALW40 نسبت به سرریزهای ALW20 و ALW30 کم بوده ولی در محدوده $H_T/P < 0.4$ ضریب دبی این سرریز افزایش قابل توجهی داشته است و با کاهش نسبت H_T/P این اختلاف بیشتر می‌گردد. بیشترین اختلاف ضریب دبی سرریز ALW40 نسبت به ALW30 و ALW20 به ترتیب برابر ۵ و ۸ درصد می‌باشد. همچنین متوسط و ماکزیمم اختلاف ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (ALW40) با سرریز کنگره‌ای خطی (LW) به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۱ درصد بدست آمد. ماکزیمم ضریب دبی سرریز کنگره‌ای LW در این تحقیق با ضریب دبی سرریز کنگره‌ای ($w/P=1/5$ و $R/w=0.15$) در مطالعه Yasi and Mohamadi (2007) برابری نموده و نسبت دیگر سرریزها دارای ضریب دبی بیشتری می‌باشد. ولی در نسبت $H_T/P=0.6$ تمامی سرریزهای با دماغه قوسی دارای ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای LW این تحقیق دارند. می‌توان چنین بیان نمود که استغراق موضعی در سرریزهای با دماغه قوسی دیرتر از

دبی بیشتری دارد. در جدول (۲) سرریزهای کنگره‌ای قوسی این تحقیق با سرریزهای کنگره‌ای قوسی مطالعه شده توسط Crookston (2010) مورد مقایسه قرار گرفته است. به طوریکه دیده می‌شود در نسبت بار آبی کم ($H_t/P=0/2$)، و در زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه نسبت به ۳۰ درجه، ضریب دبی افزایش چشمگیری داشته است.

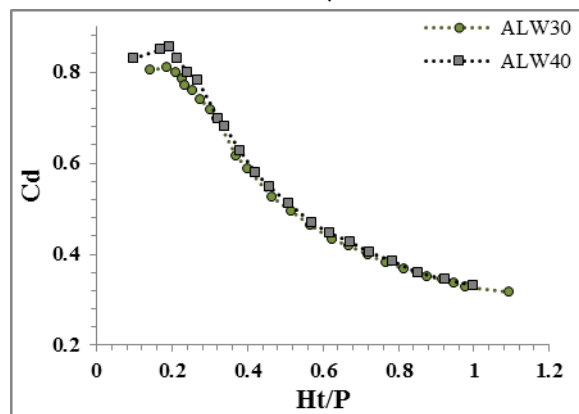
سرریز با دماغه دوزنقه‌ای اتفاق می‌افتد. همچنین شرایطی برای سرریز کنگره‌ای LW این تحقیق و سرریز کنگره‌ای U شکل در مطالعه Heydarpour *et al.* (2004) نیز مشاهده می‌شود. سرریز کنگره‌ای LW با سرریز کنگره‌ای بررسی شده در تحقیق Azhdary and Jafari (2013) با مشخصات $2A=Lt/10$ و $\alpha=10/5$ و در دبی‌های کم، برابری کرده و برای دیگر سرریزها با زوایای دیواره سیکل (α) بزرگتر، سرریز کنگره‌ای LW ضریب



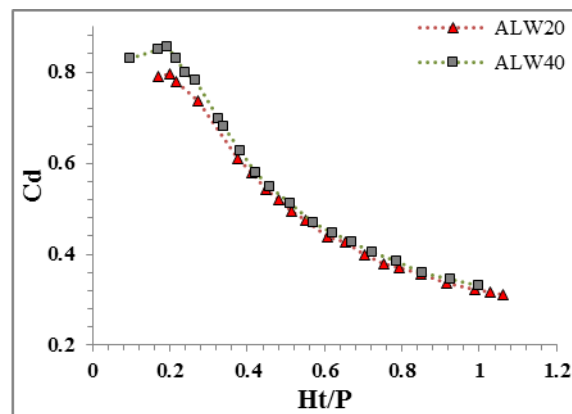
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۴- تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به H_t/P در سرریزهای کنگره‌ای قوسی
جدول ۲- مقایسه سرریزهای کنگره‌ای قوسی تحقیق حاضر با مطالعات کروکستون (۲۰۱۰)

تحقیق حاضر	۰/۶		۰/۴		۰/۲		H_t/P
	تحقیق حاضر	کروکستون (۲۰۱۰)	تحقیق حاضر	کروکستون (۲۰۱۰)	تحقیق حاضر	کروکستون (۲۰۱۰)	
	۴۰	۳۰	۴۰	۳۰	۳۰	۲۰	θ
	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۶	α
	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۲۱	۰/۵۸	۰/۵۷	Cd

رابطه (۳)، معادله سرریزهای کنگره‌ای قوسی بررسی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد که ضرایب مربوط به این رابطه در جدول (۳) ارائه شده است. که در آن $R^2 = 0/991$ و $R^2 = 0/159$ و $RMSE =$ (رابطه ۳)

$$Cd = a + b * \theta^c + d * \left(\frac{H_t}{p}\right)^1 + e * \left(\frac{H_t}{p}\right)^2 + f * \left(\frac{H_t}{p}\right)^3 + g * \left(\frac{H_t}{p}\right)^4$$

سرریزهای کلید پیلانویی قوسی

در این بخش ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی مورد بررسی قرار گرفته و با سرریزهای خطی و کلید پیلانویی خطی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نیز مشابه سرریزهای کنگره‌ای قوسی بوده و به وضوح برتری و بهبود سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نسبت به سرریز کلید پیلانویی خطی حتی در نسبت‌های بالای H_t/P هم مشاهده می‌گردد. و به طوری که در بخش قبلی بیان گردید علت آن، بهتر شدن جریان نزدیک شونده به سمت سیکل‌ها و در نتیجه کاهش نابرابری ورود جریان به سیکل‌های مختلف می‌باشد.

در این بخش از تحقیق تأثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر روی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی بررسی شده است. در شکل ۶-الف ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی خطی و کنگره‌ای خطی در مقابل H_t/p ترسیم شده و به طوری- که مشاهده می‌شود ضریب دبی این سرریزها در اکثر دبی‌ها بسیار به هم نزدیک بوده و فقط در محدوده $0/4 < H_t/p < 0/6$ سرریز کنگره‌ای یک برتری بسیار جزئی نسبت به سرریز کلید پیلانویی دارد. در شکل ۶-ب، ضریب دبی دو سرریز کلید پیلانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۲۰ درجه (APK20 و APK20) نمایش داده شده است که سرریز APK20 در تمامی دبی‌ها یک برتری نسبی (حدود ۷-۵ درصد) نسبت به سرریز ALW20 دارد که علت آن را می‌توان چنین بیان نمود که در سرریز کلید پیلانویی قوسی به دلیل وجود پیش آمدگی در بالادست (overhangs)، شرایط ورود جریان به دهانه‌های ورودی بهتر از سرریز کنگره‌ای قوسی بوده و لذا ضریب دبی و کارایی این سرریز نسبت به سرریز ALW20 افزایش یافته است. در شکل‌های ۶-ج و ۶-د، ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی با زوایای سیکل قوسی ۳۰ و ۴۰ درجه نمایش داده شده است. با دقت در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در $H_t/P = 0/2$ ضریب دبی این سرریزها با هم برابر می‌باشند ولی با افزایش دبی و افزایش نسبت H_t/p سرریزهای کلید پیلانویی قوسی کارایی بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای قوسی از خود نشان می‌دهند. به طور متوسط کارایی سرریز کلید پیلانویی قوسی نسبت به سرریز کنگره‌ای قوسی برای زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب (۷/۵) درصد و (۹) درصد بیشتر می‌باشد.

در این بخش ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی مورد بررسی قرار گرفته و با سرریزهای خطی و کلید پیلانویی خطی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نیز مشابه سرریزهای کنگره‌ای قوسی بوده و به وضوح برتری و بهبود سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نسبت به سرریز کلید پیلانویی خطی حتی در نسبت‌های بالای H_t/P هم مشاهده می‌گردد. و به طوری که در بخش قبلی بیان گردید علت آن، بهتر شدن جریان نزدیک شونده به سمت سیکل‌ها و در نتیجه کاهش نابرابری ورود جریان به سیکل‌های مختلف می‌باشد.

(رابطه ۳)

$$Cd = a + b * \theta^c + d * \left(\frac{H_t}{p}\right)^1 + e * \left(\frac{H_t}{p}\right)^2 + f * \left(\frac{H_t}{p}\right)^3 + g * \left(\frac{H_t}{p}\right)^4$$

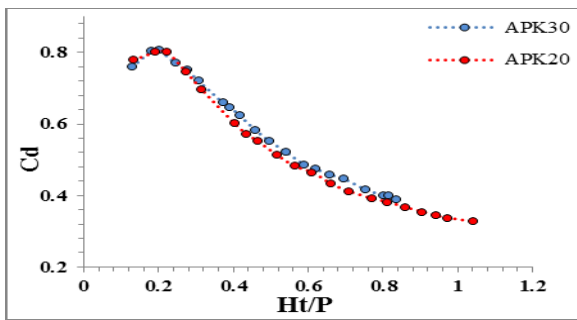
سرریزهای کلید پیلانویی قوسی

در این بخش ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی مورد بررسی قرار گرفته و با سرریزهای خطی و کلید پیلانویی خطی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نیز مشابه سرریزهای کنگره‌ای قوسی بوده و به وضوح برتری و بهبود سرریزهای کلید پیلانویی قوسی نسبت به سرریز کلید پیلانویی خطی حتی در نسبت‌های بالای H_t/P هم مشاهده می‌گردد. و به طوری که در بخش قبلی بیان گردید علت آن، بهتر شدن جریان نزدیک شونده به سمت سیکل‌ها و در نتیجه کاهش نابرابری ورود جریان به سیکل‌های مختلف می‌باشد.

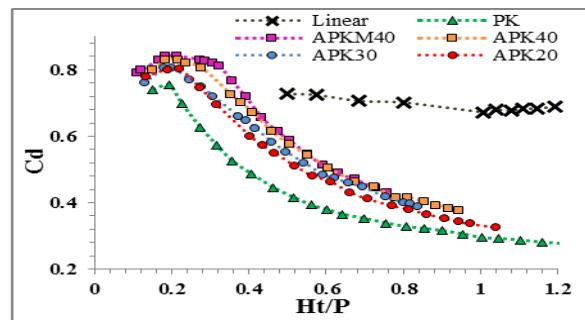
در شکل ۵-ب دو نوع سرریز کلید پیلانویی قوسی با زوایای سیکل قوسی ۲۰ و ۳۰ درجه (APK20, APK30) با هم مقایسه شده‌اند. در دبی‌های کم و نسبت‌های $H_t/P < 0/3$ تفاوت چندانی در کارایی این دو سرریز مشاهده نمی‌شود ولی با افزایش این نسبت، کارایی سرریز APK30 نسبت به سرریز APK20 بهتر شده که به طور متوسط این برتری حدود (۵-۴) درصد می‌باشد. شکل ۵-ج و ۵-د، منحنی تغییرات ضریب دبی دو سرریز کلید پیلانویی قوسی با زوایای ۲۰ و ۳۰ درجه (APK20 و APK30) را نسبت به سرریز کلید پیلانویی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (APK40) را نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود ضریب دبی سرریز APK40 در تمامی دبی‌ها به طور متوسط ۶ و ۹ درصد بیشتر از ضریب دبی سرریزهای APK30 و APK20 بوده و بیشترین اختلاف با سرریز APK30 در $H_t/P = 0/3$ و به مقدار ۷/۵ درصد و با سرریز APK20 در $H_t/P = 0/4$ به مقدار ۱۱/۵ درصد می‌باشد. متوسط و بیشترین اختلاف ضریب دبی سرریز کلید پیلانویی قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (APK40) با سرریز کلید پیلانویی خطی (PK) به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد می‌باشد. در حالی که

جدول ۳- ضرایب رابطه ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیلانویی قوسی

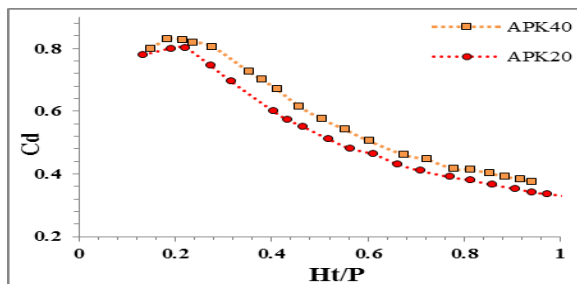
نوع سرریز	a	b	c	d	e	f	g
کنگره‌ای قوسی	۰/۷۹۴۵	-۳۷/۴۴۴	-۱۲۹/۷۵۸	۱/۱۳۰	-۷/۱۶۷	۹/۵۵۵	-۳/۹۸۳
کلید پیلانویی قوسی	۰/۶۰۷۷	-۳۷/۴۴۴	-۱۲۹/۷۵۸	۲/۵۹۳	-۱۰/۵۳۰	۱۲/۸۷۲	-۵/۲۰۶



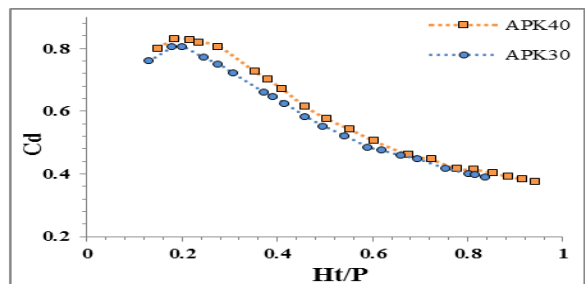
(ب)



(الف)

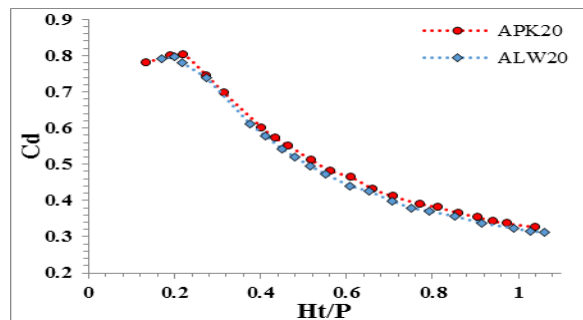


(د)

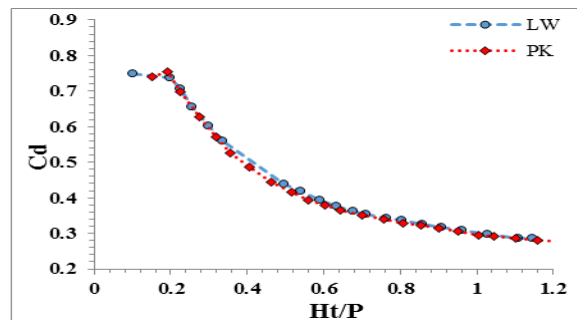


(ج)

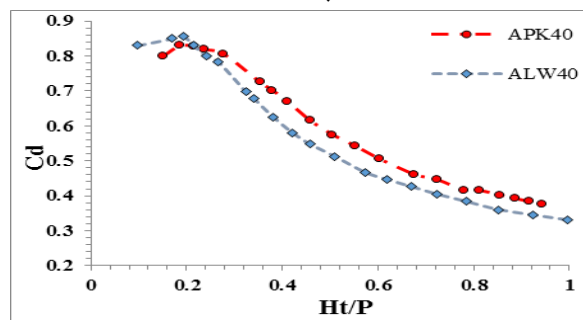
شکل ۵- تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به H_t/P در سرریزهای کلید پیانویی قوسی



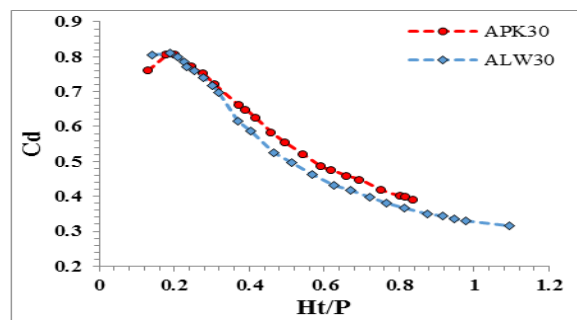
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به H_t/P در سرریزهای کلید پیانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی

قوسی نابرابری ورود جریان به سیکل‌ها نیز کمتر می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش این زاویه، یکنواختی جریان نزدیک شونده از بالادست و از سمت دیواره‌های کانال (در اثر فشردگی جانبی کانال) به سمت سیکل‌ها نیز بهبود می‌یابد لذا با افزایش این زاویه کارایی هر دو نوع سرریز افزایش یافته و مقدار افزایش برای سرریزهای کلید

می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش زاویه سیکل قوسی برتری سرریزهای کلید پیانویی قوسی نسبت به کنگره‌ای قوسی بیشتر می‌شود. همان‌گونه که بیان گردید علت آن به دلیل وجود پیش‌آمدگی در بالادست سرریزهای کلید پیانویی بوده که باعث بهتر شدن شرایط جریان ورودی به سیکل‌ها شده و باعث کاهش افت ورودی می‌شود و همچنین با افزایش زاویه سیکل

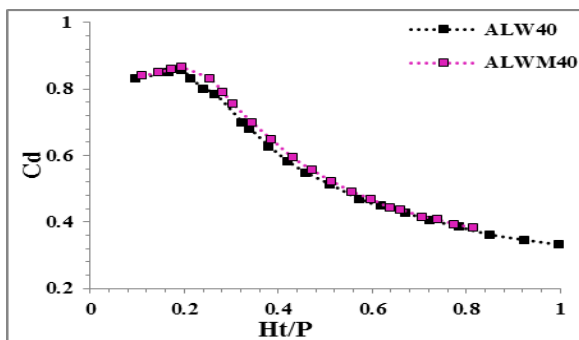
شکل‌ها مشخص است، روند تغییرات ضریب دبی هر دو سرریز مشابه بوده و در محدوده $H_t/P < 0.7$ سرریزهای اصلاح شده کارایی بیشتری (حدود ۲-۴ درصد) نسبت به سرریزهای اصلاح نشده دارند ولی با افزایش $H_t/P > 0.7$ مقدار ضریب دبی در سرریزها به هم نزدیک می‌شوند. علت آن را می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش ارتفاع آب روی سرریز، تداخل تیغه‌های ریزشی به خصوص در بالادست کلیدهای خروجی افزایش می‌یابد و استغراق موضعی ظاهر می‌گردد. همچنین در سرریزهای با فرم تاج مسطح، جریان از روی تاج به حالت پرش بوده و در سرریزهای با فرم تاج ربع دایره‌ای، جریان از روی تاج به شکل افقی بوده و در نتیجه ضریب دبی و کارایی سرریزهای اصلاح شده افزایش یافته است.

پیانویی قوسی بیشتر از سرریزهای کنگره‌ای قوسی می‌باشد.

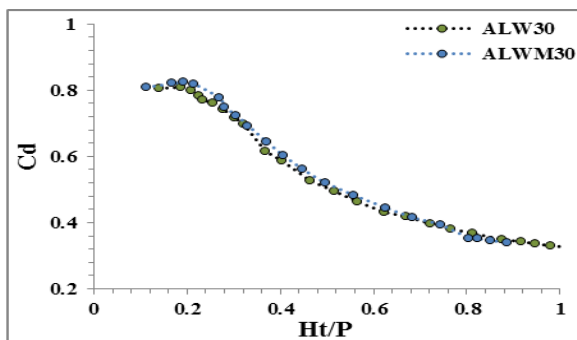
بررسی تاثیر اصلاح سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیانویی قوسی

در این بخش سرریزهای کلید پیانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی با سرریزهای اصلاح شده آنها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است که سرریزهای اصلاح شده شامل الف: تغییر فرم تاج سرریزها از حالت مسطح (تخت) به حالت ربع دایره در بالادست تاج ب: افزایش ۱۱/۵ درصدی ارتفاع سرریزها، می‌باشد.

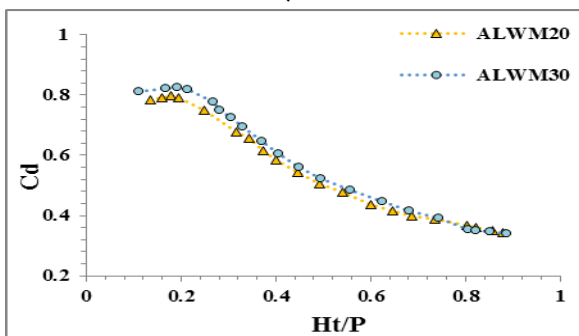
شکل ۷-الف و ۷-ب تغییرات ضریب دبی را نسبت به H_t/P برای دو سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۳۰ و ۴۰ درجه (ALW30 و ALW40) و اصلاح شده آنها (ALWM30 و ALWM40) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از



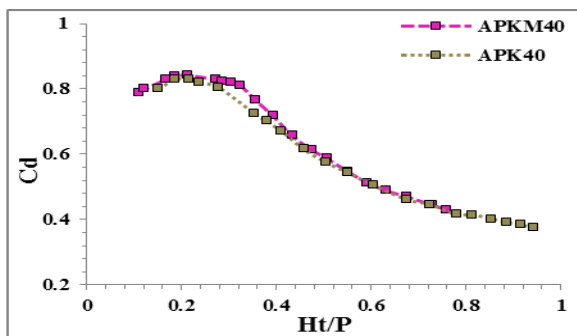
(ب)



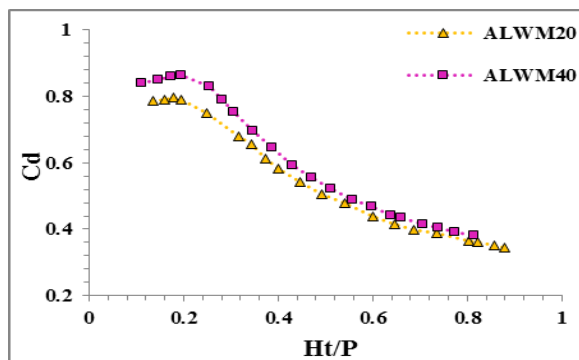
(الف)



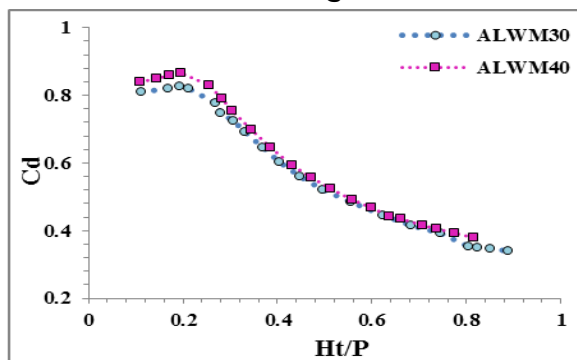
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۷- تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به H_t/P در سرریزهای کلید پیانویی قوسی اصلاح شده و کنگره‌ای قوسی اصلاح شده.

* در سرریزهای کلید پیانویی قوسی، ضریب دبی سرریز APK40 در تمامی دبی‌ها به‌طور متوسط ۶ و ۹ درصد بیشتر از ضریب دبی سرریزهای APK30 و APK20 بوده و بیشترین اختلاف با سرریز APK30 در $H/P=0/3$ و به مقدار ۷/۵ درصد و با سرریز APK20 در $H/P=0/4$ به مقدار ۱۱/۵ درصد می‌باشد. متوسط و بیشترین اختلاف ضریب دبی سرریز کلید پیانویی قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (APK40) با سرریز کلید پیانویی خطی (PK) به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد می‌باشد. این تحقیق نشان داد که با افزایش زاویه سیکل قوسی، برتری سرریزهای کلید پیانویی قوسی بیشتر می‌شود که با نتایج Safarzadeh and Nourozi (2014) مطابقت دارد.

* به‌طور متوسط کارایی سرریز کلید پیانویی قوسی نسبت به سرریز کنگره‌ای قوسی برای زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب (۷/۵) درصد و (۹) درصد بیشتر می‌باشد. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش زاویه سیکل قوسی برتری سرریزهای کلید پیانویی قوسی نسبت به کنگره‌ای قوسی بیشتر می‌شود، که علت آن به دلیل وجود پیش‌آمدگی در بالادست سرریزهای کلید پیانویی بوده که باعث بهتر شدن شرایط جریان ورودی به سیکل‌ها شده و باعث کاهش افت ورودی می‌شود و همچنین با افزایش زاویه سیکل قوسی نابرابری ورود جریان به سیکل‌ها نیز کمتر شده و مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش این زاویه، یکنواختی جریان نزدیک شونده از بالادست و از سمت دیواره‌های کانال (در اثر فشردگی جانبی کانال) به سمت سیکل‌ها نیز بهبود می‌یابد.

* سرریزهای اصلاح شده کلید پیانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی کارایی بیشتری نسبت به سرریزهای اصلاح نشده آنها دارند ولی با افزایش H/P مقدار ضریب دبی در این سرریزها به هم نزدیک می‌شوند که علت آن را می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش ارتفاع آب روی سرریز، تداخل تیغه‌های ریزی به خصوص در بالادست کلیدهای خروجی افزایش یافته و استعراق موضعی ظاهر می‌گردد. همچنین بیشترین اختلاف ضریب دبی در بین ۱۵ مدل آزمایشگاهی بررسی شده (حدود ۴۵ درصد) در سرریز APKM40 و سرریز PK در $H/P=0/3$ مشاهده می‌شود.

در شکل ۷- ج تغییرات ضریب دبی نسبت به H/p برای دو سرریز کلید پیانویی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (APK40) و اصلاح شده آن (APKM40) نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که روند تغییرات ضریب دبی در این نوع سرریز مشابه سرریزهای کنگره‌ای قوسی با زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه بوده (با همان دلایل بیان شده در بالا) با این تفاوت که اصلاح سرریزهای کلید پیانویی قوسی در محدوده $H/P>0/55$ و سرریزهای کنگره‌ای قوسی در محدوده $H/P>0/7$ تأثیری بر روی ضریب دبی ندارد. همچنین می‌توان بیان نمود که بیشترین اختلاف ضریب دبی (حدود ۴۵ درصد) در سرریز APKM40 و سرریز PK در $H/P=0/3$ مشاهده می‌شود.

در شکل‌های ۷-د، ۷-ه و ۷-و به ترتیب ضریب دبی سرریزهای (ALWM20 با ALWM30)، (ALWM30 با ALWM30) و (ALWM40) و (ALWM20 با ALWM40) در مقابل H/p ترسیم شده است. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که در دبی‌های کم اختلاف ضریب دبی در این سرریزها بیشتر بوده و با افزایش دبی و نسبت H/p این اختلاف کمتر می‌شود به طوری که در شکل‌های ۷-د و ۷-ه به ترتیب در $H/P=0/75$ و در $H/P=0/6$ اختلاف به صفر می‌رسد ولی در شکل ۷-و برای سرریزهای ALWM20 و ALWM40 این اختلاف تا بیشترین دبی نیز مشاهده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با اصلاح این سرریزها و با افزایش زاویه سیکل قوسی، کارایی این سرریزها رو به افزایش می‌باشد.

نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی تاثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیانویی قوسی در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف بود. * بیشترین اختلاف ضریب دبی سرریز ALW40 نسبت به ALW20، ALW30 به ترتیب برابر ۵ و ۸ درصد بود. همچنین متوسط و ماکزیمم اختلاف ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه (ALW40) با سرریز کنگره‌ای خطی (LW) به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۱ درصد بدست آمده است.

REFERENCES

- Ahadiyan, J. and Afzalian, A.R. (2016). Effect of piers geometric on the hydraulic properties of Piano Key weirs. *Journal of water and soil conservation*. 23(2), 267-277. (In Farsi)
- Aydin, I. Altan-Sakarya, AB. and Sisman, C. (2011). Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*. 22 (2011): 144-151.
- Azhdary moghaddam, M. and Jafari nadoshan, E. (2013). Hydraulic design of a trapezoidal labyrinth spillway using computational hydrodynamics. *Modares Civil Engineering journal*. 13(2), 1-12. (In Farsi)
- Copeland, R. and Fletcher, B. (2000). Model study of

- Prado Spillway, California, hydraulic model investigation. *Report ERDC/CHL TR-00-17*, U.S. Army Corps of Engineers, Research and Development Center.
- Cordero, P. D. Elviro Garcia, V. and Granell Ninot, C. (2007). Aliviaderos en laberinto. Presa de Maria Cristina. *Ingenieria Civil* 146:15-18. (Spanish).
- Crookston, B. and Tullis, B. (2012a). Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 137(6): 555-562.
- Crookston, B. M. (2010). *Labyrinth Weirs*. Ph. D. dissertation, University of Utah State, Logan, UT.
- Ercicum, S. Nagel V., Laugier F. (2011). Piano Key Weir design of Raviege dam. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 43-50.
- Farhangi, A.S. (2002). Labyrinth weirs Model with Curved Planform. Master's thesis, University of urmia, Urmia, Iran. (In Farsi)
- Gentilini, B. (1940). Stramazzi con cresta a planta obliqua e a zig-zag. *Memorie Studi dell Instituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano*, No. 48 (in Italian).
- Ho Ta Khanh, M., Sy Quat D., Xuan Thuy, D. (2011a). P.K. weirs under design and construction in Vietnam. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 225-232.
- Hay, N. and Taylor, G. (1970). Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering Engrg.*, ASCE, 96(11), 2337-2357.
- Heydarpour, M. Mosavi, S.F and Roushani zarmehri, A.L. (2004). Investigating labyrinth weirs with rectangular and U-shaped plan. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 10(3), 1-11. (In Farsi)
- Henderson, FM (1966) open channel flow. Macmillan, New York, USA.
- Laugier, F. Lochu, A. Gille. C. Leite Ribeiro, M. and Boillat, J.L. (2009). Design and construction a labyrinth PKW spillway at St-Marc dam, France. *Hydropower & Dams* 15(5): 100-107.
- Lempérière, F. (2009). New Labyrinth weirs triple the spillways discharge. <http://www.hydrocoop.org> (Feb. 8, 2010).
- Mohammadi, M. (2000). Flow on labyrinth Spillways with Curved Planform. Master's thesis, University of urmia, Urmia, Iran. (In Farsi)
- Pinchard, T., Boutet. J. M., and Cicero, G. M. (2011). Spillway capacity upgrade at Malarce dam: Design of an additional Piano Key Weir spillway. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 233-240.
- Ribeiro, M. L., Boillat, J. L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C. (2007). Rehabilitation of St-Marc dam– Experimental Optimization of a Piano Key Weir.” *Proc. of 32nd Congress of IAHR.*, Vince, Italy.
- Roushangar K., Alami M. T., Shiri J. and Majedi Asl, M. (2017) Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology Research*. Available Online: 2017 Mar, nh2017214; DOI: 10.2166/nh.2017.214.
- Safarzadeh, A. and Nourozi, B. (2014). Three-dimensional hydrodynamic curvilinear piano key weirs in plan. *Journal of Hydraulics*. 9(3), 61-79. (In Farsi)
- Seamons, T.R., (2014). *LabyrinthWeir: A look into Geometric Variation and Its Effect on Efficiency and Design Method Pridictions*. M.Sc. thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Tacail, F. G., Evans, B. and Bibb, A. (1990). Case study of a labyrinth weir spillway. *Canadian J. Civ. Eng.* 17(1):1-7.
- Takhti, F. (2015). The study of the effect of geometric and hydraulic parameters on the changes in the discharge coefficient of piano key weirs in free flow conditions. Master's thesis, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran. (In Farsi)
- Taylor, G. (1968). *The performance of labyrinth weirs*. Ph.D. thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Tullis, P. Amanian, N. and Waldron, D. (1995). Design of labyrinth weir spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(3), 247-255.
- Willmore, C. (2004). Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. M.S. report, Utah State University, Logan, Utah.
- Yar Mohammadi, B. and Ahadiyan, J. (2015). Experimental Study of Flow Hydraulic in Piano Key Weirs at Different Parapet Wall. *Journal Of irrigation science and engineering*. 39(4), 47-58. (In Farsi)
- Yasi, M. Mohammadi, M. (2007) .Study of Labyrinth Spillways with Curved Planform. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 11(41), 1-13. (In Farsi)
- Yildiz, D. and Uzecek, E. (1996). Modeling the performance of labyrinth spillways. *Hydropower*, 3:71-76.