

بررسی تأثیر فشردگی جانبی روی ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای

فاطمه نادری^{۱*}، محسن مسعودیان^۲ و کلاوس راتچر^۳

چکیده

از انواع سازه‌های اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز سرریزهای استوانه‌ای بوده که شکل مقطع کانال و هزینه‌های اقتصادی تعیین کننده طول تاج آن‌ها است. این پژوهش آزمایشگاهی تأثیر فشردگی تاج سرریزهای استوانه‌ای را بر خصوصیات جریان از جمله ضریب دبی بررسی می‌کند. آزمایش‌ها روی فلومی با ابعاد $7500 \times 300 \times 460$ میلی‌متر، با استفاده از مدل‌های سرریز استوانه‌ای با قطر $75 \leq P \leq 160$ میلی‌متر، درصدهای فشردگی (طول تاج سرریز به عرض کانال) تاج سرریز $0.12 \leq b/B \leq 1$ و ترکیبات مختلف دبی و عمق جریان برای جریان آزاد انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش عمق آب بالادست به ارتفاع سرریز (H/P) ضریب دبی تمام سرریزها افزایش یافته ولی با کاهش نسبت b/B شیب تغییرات ضریب دبی در مقابل H/P کاهش می‌یابد. همچنین برای هر قطر و H ثابت، با افزایش b/B ضریب دبی افزایش می‌یابد. ضریب فشردگی جریان روی تاج چنین سرریزهایی با به کارگیری تئوری سرریزها و همچنین داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده که در محدوده $1/2 \leq H/P \leq 2/4$ از 0.71 تا 0.98 تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش H/P ضریب فشردگی تمامی سرریزها کم می‌شود. از طرفی برای هر H/P ثابت، با کاهش نسبت b/B ضریب فشردگی جریان روی تاج سرریز کوچک‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انقباض جانبی، ضریب فشردگی، طول تاج سرریز، مطالعات آزمایشگاهی.

ارجاع: نادری ف. مسعودیان م. و راتچر ک. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر فشردگی جانبی روی ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۲۳-۲۲:۱۷

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۳- پروفسور دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کاربردی اوستفالیای آلمان.

* نویسنده مسئول: fateme_nadery@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۱۳

مقدمه

سرریزها سازه‌هایی هستند که به دلیل سهولت ساخت و دقت مناسب، به طور وسیعی برای تنظیم سطح آب، انحراف و اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز استفاده می‌شوند.

سرریزها را بر حسب مشخصات هیدرولیکی و هندسی در دو گروه کلی لبه‌پهن و لبه‌تیز طبقه‌بندی می‌نمایند. از نظر هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای در گروه لبه‌پهن قرار دارند که برتری آن‌ها در پایداری الگوی جریان، راحتی عبور اجسام شناور، و سادگی طراحی در مقایسه با سایر انواع سرریزها است.

از جمله شاخص‌هایی که در انتخاب نوع و شکل سرریز اهمیت دارد شکل مقطع عرضی کانال و هزینه‌های اقتصادی است که در اکثر مواقع سبب انتخاب سازه‌ای با طول تاج کمتر نسبت به عرض کانال می‌شود.

از طرف دیگر کاهش طول سرریز سبب فشردگی خط‌های جریان روی آن شده و در نتیجه طول مؤثر سرریز که جریان از روی آن عبور می‌کند از طول واقعی آن کمتر می‌شود. این مسئله پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله ضریب دبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

کاسیدی (۱۹۶۵) عامل‌های مؤثر روی ضریب دبی، توزیع فشار و پروفیل جریان روی سرریزهای ریزشی، با فرض غیرچرخشی بودن جریان را بررسی و برای سرریز لوله‌ای مشاهده کرد که با یک نسبت از هد آب روی سرریز به قطر آن (H_w / P) ، جدادگی تیغه جریان در پایین‌دست این سرریزها کمتر و در نتیجه فشار منفی ایجاد شده (مکش) بیشتر از سایر انواع سرریزهای ریزشی است که این امر سبب افزایش ضریب دبی آن می‌شود. بوس (۱۹۷۶) معادله دبی اشل در سرریزهای استوانه‌ای یا لوله‌ای را با توجه به اینکه معادله مزبور در چنین سرریزهایی از معادله مربوط به سرریزهایی با آستانه پهن پیروی می‌کند، به دست آورد. او اختلاف اساسی بین سرریزهای تاج دایره‌ای و سرریزهای لبه‌پهن را ناشی از انحنای خط‌های جریان روی آستانه آن‌ها دانست و معتقد بود که از این انحنای می‌توان صرف‌نظر کرد. رامامورتی و وو (۱۹۹۳) مشخصات جریان در سرریزهای تاج‌دایره‌ای را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت هد آب روی سرریز به شعاع آن (H_w / R) ، ضریب دبی افزایش

یافته و در H_w / R حدود ۵/۵ ضریب دبی به ماکزیمم مقدار خود (حدود ۰/۸۷) می‌رسد. سپس با افزایش بیشتر در این پارامتر ضریب دبی کم می‌شود. چرا که برای یک سرریز، با افزایش هد آب، انحنای خط‌های جریان روی تاج بیشتر شده و در نتیجه فشار منفی در تاج سرریز و ضریب دبی زیاد می‌شود. در مقادیر بیشتر H_w / R ، جریان از روی تاج سرریز جدا شده و تغییرات ضریب دبی سیر نزولی دارد.

چانسون و مونتس (۱۹۹۸) با بررسی نحوه رفتار جریان در سرریزهای استوانه‌ای نتیجه گرفتند که تحذب دیواره سرریز باعث ایجاد فشار مکش در سطح سرریز شده و تیغه‌ای ریزشی ایجاد می‌کند که باعث چسبیدگی سطح آب به بدنه سرریز می‌شود، در نتیجه خط‌های جریان با انحنای بیشتر و جریان با سرعت بالاتری از روی سرریز عبور کرده و ضریب دبی نسبت به سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن مستطیلی افزایش می‌یابد. رفیعی (۱۳۸۲) نتیجه گرفت که حد استغراق سرریزهای استوانه‌ای با افزایش میزان دبی کاهش و با افزایش میزان قطر سرریز افزایش می‌یابد. همچنین ضریب دبی با افزایش میزان دبی، افزایش و با افزایش میزان قطر سرریز کاهش می‌یابد. بیگی‌پور و بیبا (۱۳۸۴) هیدرولیک جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای و استوانه‌ای را در ۷۵ مدل مختلف مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ضریب دبی در این سرریزها، با افزایش عمق آب بالادست، افزایش می‌یابد. فرسادی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) اثر بار هیدرولیکی روی سرریزهای استوانه‌ای را در ضریب جریان، با استفاده از مدل عددی FLUENT بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت بار هیدرولیکی کل در بالادست به قطر سرریز (H/D) ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۹) الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای روی پایه را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که شعاع استوانه و ارتفاع پایه تأثیری بر ضریب دبی ندارد و تنها شرایط جریان بالادست مؤثر است. همچنین معادله ۱ را برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای به دست آوردند که در محدوده $1 \leq H_w / R \leq 4$ دارای ضریب همبستگی ۰/۸ است.

$$C_d = 1.16(H_w / R)^{0.164} \quad (1)$$

قره‌گزلو و مسعودیان (۱۳۹۰) نشان دادند که ضریب دبی

$k_{\eta} = 0.001m$ برای همه مقادیر b/B و H_w/P پیشنهاد شده است. آن‌ها مقادیر تجربی k_1 ، k_2 و k_b را به صورت تابعی از b/B در قالب جدولی ارائه کرده و به این نتیجه رسیدند که چنین ضریب دبی از ۰/۵۷ تا ۰/۷۸ تغییر می‌کند. باقری و حیدرپور (۲۰۱۰a) به بررسی ضریب دبی سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز با فشردگی جانبی ($0.25 < b/B < 1$)، به طوری که b عرض سرریز و B عرض کانال) پرداخته و به این نتیجه رسیدند که نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (H_w/P) و نسبت عرض کانال به عرض سرریز (B/b) بر ضریب دبی تأثیر می‌گذارد، به گونه‌ای که در یک B/b ثابت، با افزایش پارامتر (H_w/P) ، ضریب آبگذری سرریز افزایش یافته و از طرفی برای هر سرریز، در یک هد آب ثابت، با افزایش نسبت (B/b) ضریب دبی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین معادله ۶ را براساس تئوری گردابی (Vortex Theory) برای تخمین ضریب دبی ارائه دادند که در محدوده آزمایش‌های بالا $0 < H_w/P < 1$ همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

$$C_d = 0.79 \ln \left[2.206 + 0.242 (H_w/P) (B/b)^{0.0615} \right] \quad (6)$$

آن‌ها در مطالعات خود مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها برای تخمین طول مؤثر تاج سرریز که جریان از روی آن عبور می‌کند، انجام دادند. برای هر مقدار هد آب روی سرریز، دو طول مؤثر، یکی در عمق نزدیک تاج و دیگری جایی که عرض مؤثر حداقل و فشردگی حداکثر بود، با کولیس (Caliper) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که عرض مؤثر جریان در نزدیکی تاج سرریزهای بالا $b_e = b - 0.15H_w$ بوده و در محل انقباض حداکثر جت آب، $b_e = b - 0.23H_w$ است. بنابراین آن‌ها متوسط عرض مؤثر سرریز را $b_e = b - 0.19H_w$ در نظر گرفتند که فرمول فرانسویس را تأیید می‌کند. آیدین و همکاران (۲۰۱۱) در آزمایش‌های خود برای بررسی معادله دبی-اشل در سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی فشرده شده، سرریزهای بالا را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول سرریزهای دارای فشردگی جزئی که $0.3125 \leq b/B \leq 1$ بوده و دسته دیگر سرریزهای کاملاً فشرده شده که در آن‌ها $0.312 < b/B < 0.625$ است. آن‌ها با بررسی معادله پارامترهای هد آب روی سرریز به ارتفاع سرریز H_w/P و ضریب دبی، به این نتیجه رسیدند که مورد

سرریزهای استوانه‌ای وابستگی مستقیم به دو پارامتر قطر سرریز و هد آب روی آن دارد. همچنین ضریب دبی در این نوع سرریزها در بیشتر موارد بزرگ‌تر از یک است. مسعودیان و همکاران (۱۳۹۱) ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای را با مشابه لبه‌تیز و لبه‌پهن آن‌ها مقایسه کرده و نتیجه گرفتند ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای بین ۰/۷۵ تا ۱/۳ متغیر است در حالیکه این مقدار برای سرریز لبه‌تیز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۶۵ و برای سرریز لبه‌پهن در محدوده ۰/۳ تا ۰/۴۶ متغیر است. مسعودیان و قره‌گزلو (۲۰۱۲) با بررسی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای در کانال آزمایشگاهی کوچک نشان دادند که ضریب دبی سرریز بالا با افزایش پارامترهای نسبت هد آب روی سرریز به شعاع سرریز (H_w/R)، هد آب روی سرریز به عمق آب بالادست (H_w/H)، عدد رینولدز جریان (Re) و عدد وبر جریان (We) افزایش می‌یابد.

کینزواتر و کارتر (۱۹۵۷) مطالعاتی را برای محاسبه ضریب دبی و طول مؤثر جریان در سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی فشرده شده $0.3 < b/B < 1$ ، با توجه به اینکه فشرده کردن تاج سرریز سبب کاهش طول مؤثر جریان و تغییر در دبی عبوری از آن می‌شود، انجام داده و پارامتری با عنوان C_e (ضریب دبی مؤثر) معرفی کردند که مستقل از لزوجت و کشش سطحی بوده و تأثیر فشرده کردن جوانب سرریز را دربردارد.

$$Q = \frac{2}{3} C_e \sqrt{2g} b_e H_{we}^{3/2} \quad (2)$$

$$b_e = b + k_b \quad (3)$$

$$H_{we} = H_w + k_{\eta} \quad (4)$$

$$C_e = k_1 + k_2 (H_w/P) \quad (5)$$

در معادلات ۲ تا ۵، Q دبی عبوری از سرریز لبه‌تیز فشرده شده، P ارتفاع سرریز، H_{we} هد مؤثر آب روی سرریز بر حسب متر، b_e طول مؤثر تاج سرریز بر حسب متر، k_b فاکتور تصحیح برای به دست آوردن طول مؤثر سرریز، k_{η} فاکتور تصحیح هد آب بر حسب متر، و اندیس e معرف قسمت مؤثر پارامتر می‌باشند. فاکتور k_b با نسبت‌های مختلف طول تاج به عرض متوسط کانال b/B ، تغییر می‌کند. همچنین مقدار ثابت و مثبت

وی از آنالیز رگرسیونی برای محاسبه ضرایب معادلات بالا استفاده و نتایج را در قالب نمودارهایی ارائه کرد. مرور کارهای قبلی نشان می‌دهد آب تاکنون مطالعاتی در زمینه ضریب دبی سرریز استوانه‌ای با فشردگی جانبی انجام نشده است، پس در این پژوهش سعی شد که با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و به کارگیری فرمول‌های مربوطه، تأثیر فشردگی تاج سرریزهای استوانه‌ای بر ضریب دبی آن بررسی شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اوستفالیبا، در کشور آلمان روی کانالی افقی با طول ۷/۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر و مدل‌هایی از سرریز استوانه‌ای از جنس PVC و با ۴ قطر ۰/۷۵، ۱/۱۰، ۱/۲۵ و ۱۶۰ میلی‌متر انجام شد. برای فشردگی طول تاج سرریز از صفحه‌های PVC به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر استفاده شد. صفحه‌های بالا با طول‌های مختلف و با ارتفاعی معادل ارتفاع کانال برش داده شد و از آن‌ها برای فشردگی تاج سرریز از دو جانب آن استفاده شد، به گونه‌ای که طول تاج سرریز در محدوده $0/2 < b/B < 1$ تغییر کند. آزمایش‌ها در محدوده دبی ۲/۱ تا ۲۶/۱ لیتر بر ثانیه، برای جریان آزاد انجام شد. برای اندازه‌گیری جریان ورودی به فلوم از دبی‌سنجی که در ورودی آن نصب شده و مقدار جریان ورودی را بر حسب لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد و برای اندازه‌گیری عمق آب در کانال، از یک عمق‌سنج قائم با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها جریان، زیر بحرانی بوده است. جدول ۱ محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده، شکل ۱ پروفیل طولی سرریز استوانه‌ای بدون فشردگی و شکل‌های ۲ تا ۴ پروفیل طولی، مقطع عرضی و پلان فلوم و سرریز استوانه‌ای فشردگی شده را نشان می‌دهند.

جدول ۱ محدوده پارامترهای آزمایش‌های حاضر

H_w/H	H/P	b/B	$Q(\text{lit/s})$	$P(\text{mm})$
۰/۲۴-۰/۸۲	۱/۲۸-۵/۵۳	۰/۲-۱	۲/۱-۲۶/۱	۷۵-۱۶۰

بالا دارای دو روند متفاوت است. به این صورت که در یک H_w/P ثابت، ضریب دبی برای سرریزهای دارای فشردگی جزئی، با کاهش نسبت b/B کاهش یافته، اما برای سرریزهای دارای فشردگی کامل حالت عکس اتفاق می‌افتد. آن‌ها همچنین با مقایسه این مورد در $b/B=0/5$ با نتایج بالا در آزمایش‌های باقری و حیدریور (۲۰۱۰a) و سامی (۱۹۸۸) مشاهده کردند که گرچه نتایج آن‌ها نشان دهنده روند افزایش ضریب دبی با افزایش هد آب روی سرریز است، اما در بارهای آبی کم این روند عکس شده و به طور کلی با افزایش هد آب روی سرریز ضریب دبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. آن‌ها نتوانستند دلیل این کاهش را توضیح دهند و آن را به پیچیدگی رابطه ضریب دبی با پارامترهای مرتبط با آن نسبت دادند. سیزمن (۲۰۰۹) مطالعاتی روی سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی با و بدون فشردگی جانبی انجام داد. وی برای بررسی سرریزهای فشردگی شده از مدل‌هایی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و بازشدگی مختلف تاج $0.0625 \leq b/B \leq 1$ استفاده کرد. آزمایشات او نشان می‌دهد آبی که برای $0.0625 \leq b/B \leq 0.25$ تغییرات ضریب دبی بر حسب پارامتر H_w/b روند کاهشی دارد ولی برای $0.25 \leq b/B \leq 1$ روند نمودار بالا افزایشی است. وی دلیل این امر را این گونه بیان کرد که در سرریزهای شکافی، بازشدگی سرریز در مقایسه با هد آب روی سرریز خیلی کوچک بوده بنابراین هد آب روی سرریز نقش مهمی در سرریزهای بالا بازی می‌کند. از طرفی به دلیل بازشدگی کوچک در سرریزهای بالا تأثیر جداره‌ها ناچیز بوده در حالی که در سرریزهای فشردگی شده و بدون فشردگی تأثیر جداره‌ها باید در نظر گرفته شود. وی معادلات را به صورت تجربی برای محاسبه ضریب دبی در سرریزهای بالا به صورت تابعی از H_w/b ، H_w ، b و b/B ارائه کرد که به صورت زیر هستند.

$$Q/bH_w = C_1 + C_2(H_w/b) + C_3(H_w/b)^{3/2} \quad (7)$$

$$C_1 = e_1 + e_2(b/B) + e_3(b/B)^2 \quad (8)$$

$$C_2 = f_1 + f_2(b/B) + f_3(b/B)^2 \quad (9)$$

$$C_3 = g_1 + g_2(b/B) + g_3(b/B)^2 \quad (10)$$

می‌توان نوشت و با استفاده از آنالیز ابعادی گروه‌های بدون بعد را به دست آورد.

$$f(H, H_w, B, b, \mu, g, S_0, V, P, \rho, \sigma, C_d, C_c) = 0 \quad (12)$$

که H عمق آب بالادست، H_w هد آب روی سرریز، B عرض کانال، b طول تاج سرریز، μ لزجت دینامیکی سیال، g شتاب ثقل، S_0 شیب کانال، V سرعت نزدیک شدن، P ارتفاع (قطر) سرریز، ρ جرم مخصوص سیال، σ کشش سطحی، C_d ضریب دبی سرریز و C_c ضریب انقباض جریان به دلیل فشردگی تاج سرریز. در نتیجه:

$$C_d = f_1(W_e, R_e, F_r, \frac{H_w}{H}, \frac{H}{P}, \frac{H}{b}, \frac{H}{B}, S_0, C_c) \quad (13)$$

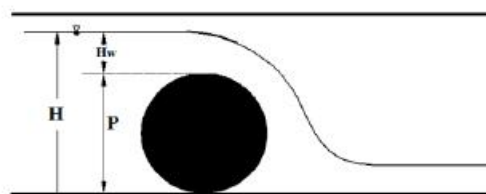
با ضرب کردن پارامتر بدون بعد H/B در عکس پارامتر H/b پارامتر b/B حاصل شده که ضریب دبی وابسته به آن است. با صرف نظر از شتاب ثقل g و شیب کانال S_0 به دلایل ناچیز بودن تأثیر شتاب ثقل و ثابت بودن مقدار S_0 ، و از طرفی با توجه به اینکه تیغه آب روی سرریز دارای ضخامت کافی برخورداری بوده و همین‌طور جریان روی سرریز آشفته است، می‌توان از تأثیر لزجت و کشش سطحی صرف نظر کرده (ایزدی‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷) و معادله بالا را به صورت زیر خلاصه کرد:

$$C_d = f_2(H_w/H, H/P, b/B, C_c) \quad (14)$$

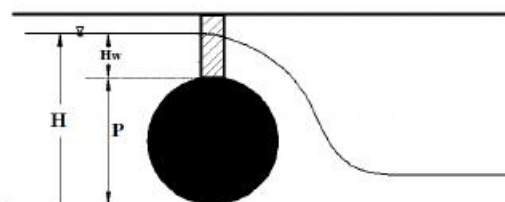
در این پژوهش تأثیر پارامترهای بالا روی ضریب دبی سرریز استوانه‌ای فشرده شده بررسی شده است.

نتایج و بحث

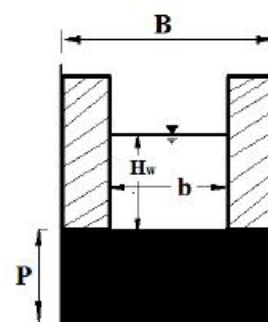
شکل‌های ۵ تا ۸ روند تغییرات ضریب دبی را نسبت به پارامتر بی‌بعد (H/P) برای هر ۴ قطر سرریز و با نسبت‌های مختلف (b/B) از حالت بدون فشردگی تا فشردگی ۸۰ درصد $(b/B = 0.2)$ نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر بی‌بعد نسبت عمق آب بالادست به ارتفاع سرریز (H/P) ، ضریب دبی برای تمام سرریزها و با درصدهای فشردگی مختلف افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش نسبت b/B شیب تغییرات ضریب دبی در برابر H/P در مقابل ضریب دبی کاهش یافته که این مسئله نشان می‌دهد هرچه طول تاج سرریز بیشتر فشرده شود نرخ



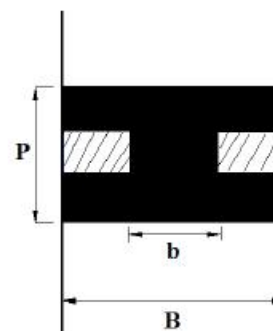
شکل ۱ پروفیل طولی سرریز استوانه‌ای هم‌عرض کانال



شکل ۲ پروفیل طولی سرریز استوانه‌ای فشرده شده



شکل ۳ مقطع عرضی فلوم و سرریز استوانه‌ای فشرده شده



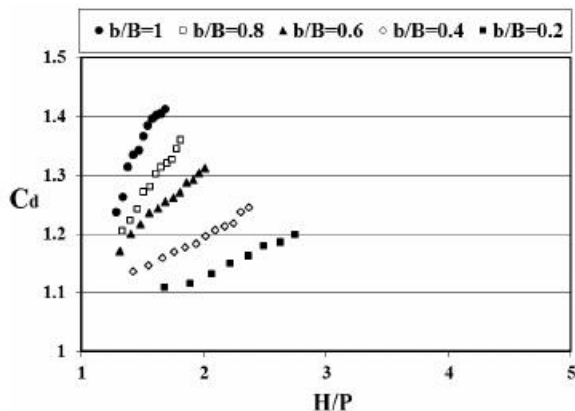
شکل ۴ پلان فلوم و سرریز استوانه‌ای فشرده شده

تئوری جریان در سرریز استوانه‌ای فشرده شده

بوس (۱۹۷۶) در مطالعه‌ای که در مورد سرریزهای لوله‌ای انجام داد به این نتیجه رسید که فرمول دبی در چنین سرریزهایی بر طبق معادله ۱۱ است.

$$Q_w = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{\frac{2}{3} g H_w^{1.5}} \quad (11)$$

بر اساس خصوصیات هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان، عامل‌های مؤثر در دبی عبوری را طبق معادله ۱۲



شکل ۴ تغییرات C_d در مقابل H/P برای قطر ۱۶۰ میلی‌متر

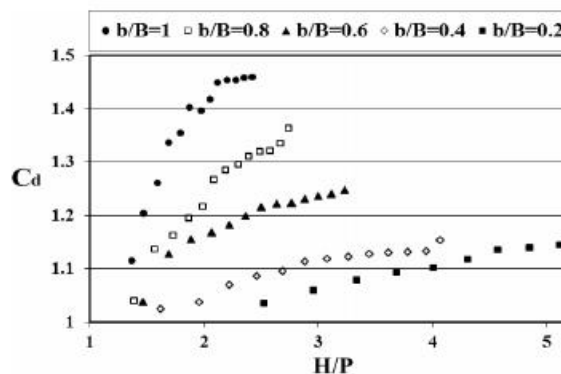
به طور کلی، برای هر قطر سرریز، در یک عمق آب ثابت در بالادست (H/P ثابت) با افزایش نسبت b/B ضریب دبی افزایش یافته و بیشترین ضریب دبی را سرریز هم‌عرض کانال دارد.

در عمق‌های کم آب در کانال، مقدار C_a برای نسبت‌های مختلف b/B برای هر قطر، به هم نزدیک می‌شوند؛ در این حالت سرعت جریان کم بوده و لذا انحنای خط‌های جریان عبوری از روی سرریز کمتر است در نتیجه تأثیر درصد فشردگی جوانب سرریز به خوبی خود را نشان نمی‌دهد. از طرف دیگر تأثیر عامل‌های دیگر مانند کشش سطحی و لزجت نیز در عمق‌های کم قابل توجه است. این مسائل می‌تواند روی نتایج حاصل و روند تغییرات C_a در عمق‌های کمتر از محدوده آزمایش تأثیرگذار باشد.

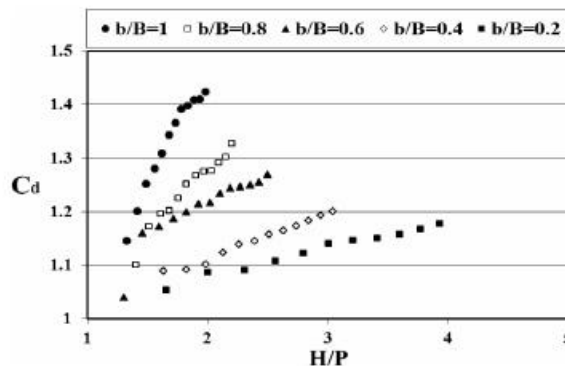
مقایسه محدوده ضریب دبی در آزمایش‌های حاضر با مطالعات پیشین

جدول ۲ محدوده ضریب دبی حاصل از آزمایش‌های حاضر را با محدوده ضریب دبی مطالعات گذشته مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که به طور کلی ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای با نسبت‌های مختلف فشردگی بیشتر از ضریب دبی سرریزهای لبه‌تیز است. این مسئله را می‌توان به شکل تاج سرریزهای استوانه‌ای نسبت داد. انحنای سطح سرریزهای استوانه‌ای سبب هدایت منظم خط‌های جریان و افزایش فشار مکش در سطح آن‌ها شده، در نتیجه خط‌های جریان با انحنای بیشتر و جریان با سرعت بالاتر شکل گرفته و سبب افزایش ضریب دبی سرریزهای بالا نسبت به سرریزهای لبه‌تیز مشابه می‌شود (چانسون و مونتس، ۱۹۹۸).

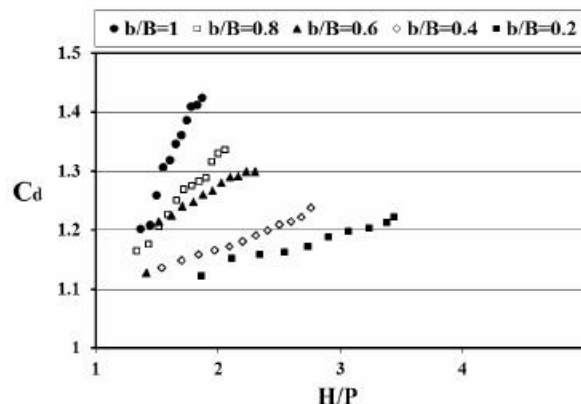
افزایش ضریب دبی با افزایش عمق آب در بالادست کمتر است. چرا که از یک طرف کوچک شدن مقطع عبور جریان بر روی سرریز و از طرف دیگر افزایش انقباض خط‌های جریان در کناره‌ها با کاهش نسبت b/B (که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد) به صورت عامل‌های بازدارنده در مقابل افزایش ضریب دبی با افزایش عمق آب بالادست عمل کرده و در نتیجه نرخ افزایش ضریب دبی با افزایش عمق آب بالادست کاهش می‌یابد.



شکل ۵ تغییرات C_d در مقابل H/P برای قطر ۷۵ میلی‌متر



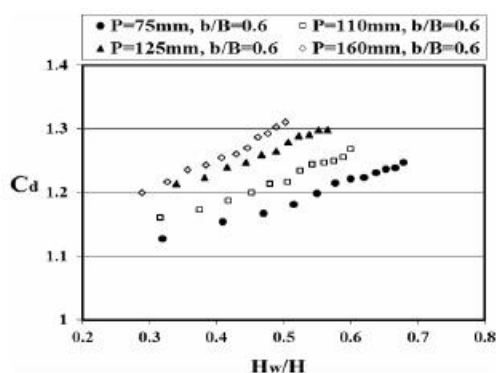
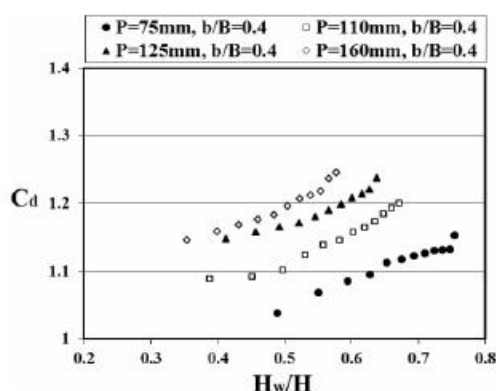
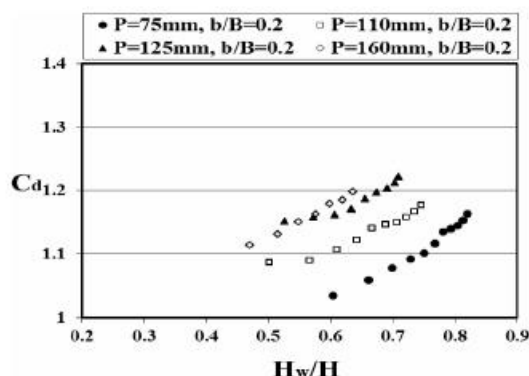
شکل ۶ تغییرات C_d در مقابل H/P برای قطر ۱۱۰ میلی‌متر



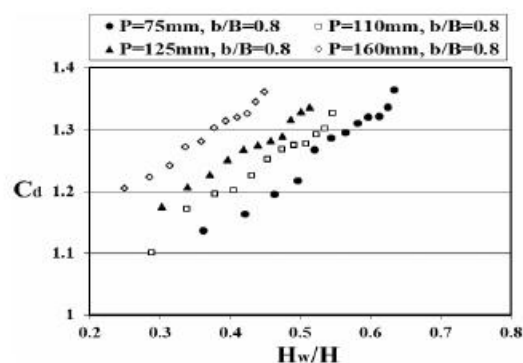
شکل ۷ تغییرات C_d در مقابل H/P برای قطر ۱۲۵ میلی‌متر

جدول ۲ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشین

محدوده ضریب دبی	پارامترها	نوع سازه	مرجع
۰/۸۶-۱/۴۵	$0.2 \leq b/B \leq 1, 0.3 \leq H_w/P \leq 4/6$	استوانه‌ای	مطالعه حاضر
۰/۵۷-۰/۷۸	$0.3 \leq b/B \leq 1, H_w/P \leq 2$	لبه‌تیز	کینزواتر و کارتر (۱۹۵۷)
۰/۶۱-۰/۷۸	$0.3 \leq b/B \leq 1, H_w/P \leq 2/8$	لبه‌تیز	سیزمن (۲۰۰۹)
۰/۶۲-۰/۷۲	$0.25 \leq b/B \leq 1, 0.2 \leq H_w/P \leq 2/2$	لبه‌تیز	باقری و حیدرپور (۲۰۱۰)
۰/۶۲-۰/۷۷	$0.25 \leq b/B \leq 1, 0.21 \leq H_w/P \leq 2/7$	لبه‌تیز	آیدین و همکاران (۲۰۱۱)

شکل ۱۰ تغییرات C_d در مقابل H/P برای $b/B=0.6$ شکل ۱۱ تغییرات C_d در مقابل H/P برای $b/B=0.4$ شکل ۱۲ تغییرات C_d در مقابل H/P برای $b/B=0.2$

شکل‌های ۹ تا ۱۲ که تغییرات ضریب دبی را در مقابل پارامتر نسبت هد آب روی سرریز به عمق آب بالادست (H_w/H) نشان می‌دهند، ثابت می‌کند که با افزایش ارتفاع سرریز و بدون در نظر گرفتن درصد فشردگی آن، با افزایش H_w/H ضریب دبی افزایش می‌یابد. افزایش قطر سرریز سبب می‌شود که شعاع انحنای خط‌های جریان افزایش یافته، و جریان با انحنای بیشتر و در نتیجه افت کمتر از روی سرریز عبور نماید، که این مسئله در افزایش ضریب دبی مؤثر است. تأثیر معکوس دو پارامتر قطر سرریز (P) و عرض بازشدگی سرریز نسبت به عرض کانال (b/B) بر ضریب دبی این امکان را فراهم می‌کند تا در شرایط واقعی، با توجه به مکان و محدودیت‌های موجود، با انتخاب یک ترکیب بهینه از این دو پارامتر هندسی وضعیتی ایجاد شود که هم از نظر اقتصادی باصرفه بوده و هم ضریب دبی مورد نظر را تأمین کند.

شکل ۹ تغییرات C_d در مقابل H/P برای $b/B=0.8$

مقایسه روندها نشان می‌دهد برای هر سرریز با یک b/B مشخص، با افزایش H/P ، ضریب فشردگی جانبی کم شده، به این معنی که با افزایش دبی و در نتیجه افزایش عمق آب بالادست، خط‌های جریان در محل سرریز بیشتر فشرده شده و ضریب دبی سرریز فشرده شده با یک b/B مشخص، نسبت به سرریز هم عرض کانال ($b/B=1$) کاهش بیشتری می‌یابد.

از طرف دیگر شیب تغییرات در نمودارهای ۱۳ تا ۱۶ برای هر سرریز ابتدا زیاد بوده و به تدریج کاهش می‌یابد که این مسئله نیز بیان کننده این موضوع است با افزایش دبی و در نتیجه عمق آب بالادست، سرعت کاهش ضریب فشردگی جریان کاهش می‌یابد. از آنجا که اطلاعاتی برای بررسی این موضوع در عمق‌های زیاد آب در کانال در دسترس نیست، نمی‌توان صد درصد در مورد روند نمودارهای بالا در عمق‌های زیاد جریان قضاوت کرد. اما با توجه به اینکه در نمودارهای ۵ تا ۸ مشاهده شده که ضریب دبی سرریز در عمق‌های زیاد به سمت ثابت شدن پیش می‌رود، پس می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی ضریب فشردگی جریان نیز باید به سمت ثابت شدن پیش رود.

با کاهش نسبت b/B ، شیب نمودارهای نزولی ضریب فشردگی در مقابل H/P تندتر می‌شود، به عبارتی هرچه سرریز بیشتر فشرده شود و خط‌های جریان بیشتر منقبض شود، نرخ کاهش ضریب فشردگی جانبی جریان با افزایش نسبت H/P بیشتر می‌شود.

مسئله دیگر درصد فشردگی سرریز بر ضریب فشردگی آن است. مشاهده می‌شود که در یک عمق ثابت، کاهش نسبت b/B در هر قطر سرریز، سبب کاهش ضریب C_c می‌شود که نشان می‌دهد افزایش انقباض جوانب سرریز سبب می‌شود خط‌های جریان بر روی تاج بیشتر فشرده شده و ضریب دبی آن نسبت به سرریز هم‌عرض کانال کاهش بیشتری یابد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش که تأثیر فشردگی تاج سرریزهای استوانه‌ای را در دبی عبوری از آن‌ها بررسی می‌کند، نشان می‌دهد که ضریب دبی چنین سرریزهایی رابطه مستقیم با نسبت‌های عمق آب بالادست به ارتفاع سرریز H/P و طول تاج سرریز به عرض کانال b/B دارد، در حالیکه با کاهش

محاسبه ضریب فشردگی جریان در سرریزهای استوانه‌ای فشرده شده

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در سرریزهایی که عرضی کمتر از عرض کانال دارند، به دلیل سه بعدی شدن میدان جریان، طول مؤثر سرریز از طول اجرایی آن کمتر است که اثر آن در معادله ضریب دبی در قالب ضریب فشردگی جریان در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی در این حالت، علاوه بر انقباض ایجاد شده در جهت عمودی، در برای عرضی نیز جریان با کناره‌های سرریز منقبض می‌شود. فرانسیس (۱۸۸۳) تأثیر انقباض خط‌های جریان را در سرریزهای لبه‌تیز دارای فشردگی جانبی تحت عنوان طول مؤثر سرریز بیان می‌کند (به نقل از حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۱):

$$b_e = b - 0.2H_w \quad (15)$$

که H_w هد آب روی سرریز، b طول اجرایی تاج سرریز و b_e طول مؤثر تاج سرریز است.

بر اساس معادله ۱۱ دبی عبوری در سرریزهای استوانه‌ای دارای فشردگی جانبی به صورت زیر خواهد بود:

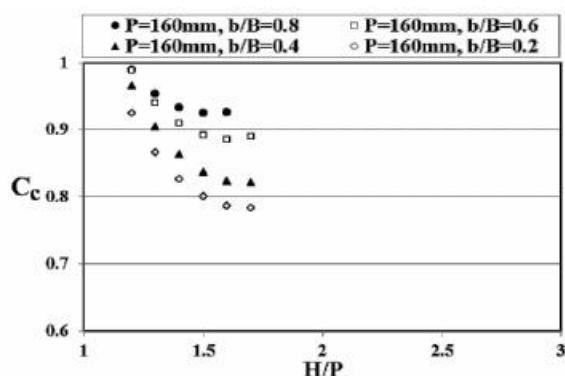
$$Q_{wc} = \frac{2}{3} C'_d b \sqrt{\frac{2}{3} g H_w^{1.5}} \quad (16)$$

C'_d که نسبت دبی واقعی به دبی ایده‌آل را در سرریزهای فشرده شده در شرایطی نشان می‌دهد که عمق آب در کانال H' باشد، تأثیر عوامل مؤثر در فشرده شدن خط‌های جریان روی تاج سرریز، از جمله نسبت طول مؤثر سرریز به طول واقعی آن را در بر دارد. پس کسری از ضریب دبی سرریز در حالتی است که هیچ فشردگی جانبی به آن اعمال نشده باشد. بنابراین در یک عمق آب ثابت، اگر C_c ضریب فشردگی جریان در یک سرریز با نسبت b/B مشخص باشد، رابطه ۱۷ برقرار خواهد بود.

$$Q_{wc} = \frac{2}{3} C'_d C_c b \sqrt{\frac{2}{3} g H_w^{1.5}} \quad (17)$$

$$C_c = C'_d / C_d \quad (18)$$

برای مقادیر مشخص عمق آب در کانال در قطرها و فشردگی‌های مختلف، ضریب C_c محاسبه شده و نمودار تغییرات آن در مقابل پارامتر بی‌بعد H/P ، برای عمق‌های مشترک انتخاب شده در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ رسم شده است. ضریب فشردگی در محدوده بالا $2/4 < H/P < 1/2$ از ۰/۷۱ تا ۰/۹۸ تغییر می‌کند.



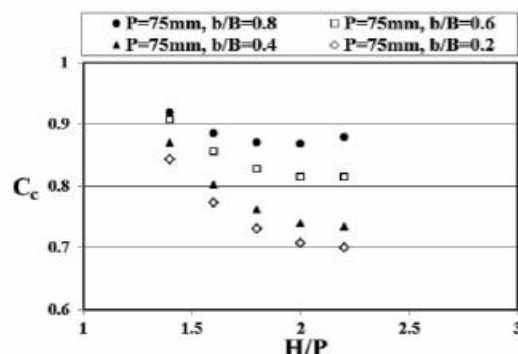
شکل ۱۶ تغییرات C_c در مقابل H/P (قطر ۱۱۰ میلی‌متر)

منابع

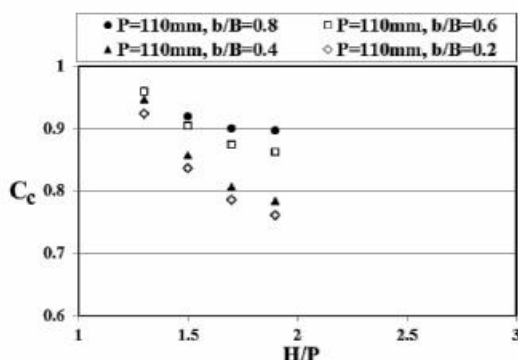
۱. ایزدی‌نیا، ا. حیدرپور، م. و کبیری سامانی، ع. ر. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر شیب پایین‌دست سرریزهای جانبی تاج‌دایره‌ای بر ضریب شدت جریان. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس‌پور). تهران. ۲۱-۲۳ آبان.
۲. اسماعیلی، ک. نقوی، ب. کورش‌وحید، ف. و یزدی، ج. ۱۳۸۹. مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۴(۱): ۱۶۶-۱۷۹.
۳. بیگی‌پور، غ. ح و بیبا، م. ۱۳۸۴. هیدرولیک جریان در سرریزهای تاج‌دایره‌ای و استوانه‌ای. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۷-۱۹ آبان.
۴. حسینی، س. م. و ابریشمی، ج. ۱۳۸۱. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات آستان قدس رضوی، ۶۱۳ ص.
۵. رفیعی، ز. ۱۳۸۲. تعیین حد استغراق در سرریزهای استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی دانشگاه مازندران. ساری. ۷۵ ص.
۶. فرسادی‌زاده، د. خسروی‌نیا، پ. و ورجاوند، پ. ۱۳۸۷. بررسی ضریب جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی FLUENT چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران. ۱۷-۱۹ اردیبهشت.
- قره‌گزلو، م. و مسعودیان، م. ۱۳۹۰. اثر قطر و هد آب روی سرریز استوانه‌ای روی ضریب دبی. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران. ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت.

نسبت b/B نرخ تغییرات ضریب دبی در مقابل تغییر پارامتر H/P کاهش می‌یابد. قطر سرریز نیز بر روی ضریب دبی مؤثر بوده به طوری که در یک H/P ثابت، با افزایش قطر، ضریب دبی صرفنظر از نسبت b/B افزایش می‌یابد.

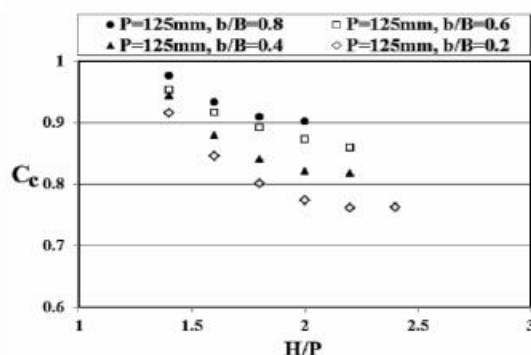
ضریب فشردگی جریان روی تاج چنین سرریزهایی (C_c) با به کارگیری داده‌های آزمایشگاهی و تئوری سرریزها به دست آمد و از معادله به دست آمده با عمق جریان در کانال، می‌توان برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای فشرده شده با استفاده از ضریب دبی سرریز بدون فشردگی مشابه آن‌ها استفاده کرد. این ضریب در محدوده $0.71 < H/P < 2.0$ تا 0.98 تغییر می‌کند.



شکل ۱۳ تغییرات C_c در مقابل H/P (قطر ۷۵ میلی‌متر)



شکل ۱۴ تغییرات C_c در مقابل H/P (قطر ۱۱۰ میلی‌متر)



شکل ۱۵ تغییرات C_c در مقابل H/P (قطر ۱۲۵ میلی‌متر)

۷. مسعودیان م. قره‌گزلو م. نادری ف. و سوری ا. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای با مشابه لبه‌تیز و لبه‌پهن آن. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۹-۲۱ اردیبهشت.
8. Aydın I. Sakaryaa A. B. and Sisman C. 2011. Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 22(2):144-151.
9. Bagheri s. and Heidarpour M. 2010. Application of free vortex theory to estimating discharge coefficient for sharp-crested weirs. *Journal of Biosystems Engineering*. 105(3):423-427.
10. Bos M. G 1976. *Discharge Measurement Structures*. International Institute for Land Reclamation and Implovment/ LIRI Wageningen. The Ntherlands. 107-126.
11. Cassidy J. 1965. Irrotational flow over spillways of finite height. *Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE*. 91(6):155-173.
12. Chanson H. and Montes J. S 1998. Over flow characteristics of circular weirs: effects of inflow condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 32:152-161.
13. Kindsvater C. E and Cater R. W 1957. Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs. *Journal of Hydraulics Division*. 83(6):1-36.
14. Masoudian M. and Gharahgezlou M. 2012. Flow characteristics of cylindrical weirs in a small laboratory canal. *Journal of Science Series Data Report*. 4(4):12- 23.
15. Ramamurthy A. S. and Vo N. D. 1993. Characteristics of circular- crested weir flow. *Journal of Applied Mechanics. ASCE*. 114(1):61-73.
16. Sisman H. C. 2009. Experimental Investigation on Sharp Crested Rectangular Weirs. A Thesis for the Degree of Master of Science. Civil Engineering Department. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University (METU). Ankara. Turkey.
17. Swamee P. K 1988. Generalized Rectangular Weir Equations. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(8):945-949.