مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۱۶/ شماره ۶۵/سال ۱۳۹۴/ص ۷۰-۵۵

ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیبدار در پیچ آبراهه

اکبر ولیمحمدی و مهدی یاسی[*,**]

[*] نگارنده مسئول: گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. تلفن: ۳۲۲۴۱۱۱۹(۰۲۶)، پیام‌نگار: m.yasi@ut.ac.ir

** به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۹

چکیده

احداث سرریزها در محدودهٔ پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر اختلاف توزیع جریان در عرض و غیریکنواختی انتقال رسوب و انحراف آب به آبگیر طرفین رودخانه پدید می‌آورد. یکی از فرضیه‌ها برای برقراری توزیع یکنواخت انرژی جریان، تساوی بده جریان در واحد عرض تاج سرریز، از طریق تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیبدار است. در این تحقیق، کارکرد سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیبدار، با هدف یکنواختی توزیع بده واحد جریان در عرض پیچ آبراهه ارزیابی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استقرار سرریزهای با تاج افقی در مقاطع ورودی و خروجی پیچ، مناسب‌تر است. در محدودهٔ میانی پیچ، تاج شیبدار با زاویهٔ ۲ تا ۵ درجه با افق (به سمت دیوارهٔ خارجی) باعث یکنواختی بیشتر توزیع بده جریان در واحد عرض می‌شود. بهترین موقعیت سرریز در مقطع زاویه‌ای ۳۰ درجه، و پس از آن به ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. در این بررسی، معادلات جریان روی سرریز لبه پهن در محدودهٔ پیچ، با تلفیق روش تحلیل ریاضی و ابعادی ارائه شده است. ضریب بده جریان به صورت تابعی از موقعیت سرریز در پیچ، هندسه سرریز، بار آبی در بالادست سرریز و پارامتر استغراق، با آزمون تجربی ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی

پیچ رودخانه، سرریز با تاج شیبدار، سرریز لبه پهن، مقطع کنترل

مقدمه

مجاری طبیعی به ندرت مستقیم هستند و عموماً مسیری مارپیچ دارند با پیچ‌های معکوس و متوالی که با بازهٔ نسبتاً مستقیم و کوتاه به یکدیگر وصل می‌شوند (Yasi, 1989). بهترین موقعیت برای احداث سازه‌های آبی مانند سرریز یا بند انحرافی، پل- بند، و کف بند، بازه مستقیم رودخانه یا بازه مستقیم حد فاصل دو پیچ معکوس در رودخانه‌های پیچانرودی است. بر اساس نتایج تجربی، پیچ بر خصوصیات جریان بالادست و پایین‌دست (تا حداقل به فاصلهٔ ۲ برابر عرض رودخانه: 2B تأثیر دارد (Anon, 1991). بنابراین، احداث سازه‌های عرضی در فاصلهٔ بیش از 2B از بالا یا پایین پیچ مناسب‌تر است. شواهد میدانی در ایران و دیگر کشورها نشان می‌دهد که به دلایل گوناگون، سازه‌هایی مانند پل، کف بند، سرریز و سدهای انحرافی در محدودهٔ پیچ رودخانه‌ها یا کانال‌های بزرگ آبیاری احداث می‌شوند. گاهی پایداری بستر و تکیه‌گاه‌ها و نیز موقعیت منحصر به فرد آبگیری به دو سمت رودخانه، عامل اصلی در جانمایی سد انحرافی در محدودهٔ پیچ رودخانه است (شکل ۱- رودخانه نازلو، ایران). سرریز تنظیمی برای کنترل تراز سطح آب برای کشتیرانی به تازگی در پیچ رودخانه ای بزرگ ساخته شده است (شکل ۱- رودخانه قون، فرانسه). شواهد زیادی از

احداث پل‌های زیبا، تاریخی و جدید در پیچ رودخانه‌ها (پل- بند در پیچ رودخانه آر، سوئیس؛ و پل زمان خان در پیچ ۱۸۰ درجه زاینده رود، ایران)، و نیز در ساخت کف بندها (سرریز با ارتفاع کم برای کنترل آبشستگی پل‌ها و یا دهانه‌های آبگیر مستقیم) وجود دارد. در بیشتر این موارد، تراز افقی سرریز و یا کف بند عامل آسیب‌پذیری سازه است بدین معنا که غیر یکنواختی توزیع بار جریان آب و رسوب در دو سمت رودخانه را تشدید می‌کند. علاج بخشی این پدیده، اول بار در تنظیم طبیعی شکل مقطع عرضی پیچ آبراهه‌ها (شیب کف به سمت دیوارهٔ خارجی) شناسایی شد، و پس از آن به‌طور نظری برای طرح شیب عرضی کف در پیچ کانال‌ها (در شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی، هر دو) بررسی شد (Henderson, 1966). ضرورت کاربرد این نظریه برای تغییر پروفیل تاج سرریز در عرض پیچ آبراهه ها را کلر، شاگرد هندرسون، مطرح و برای مطالعات آینده پیشنهاد کرد (Keller, 1989).

در سدهای انحرافی، توزیع نامتقارن جریان آب و رسوب در عرض پیچ رودخانه و در طول تاج سرریز سبب غیر یکنواختی بار آبی در طرفین رودخانه و ایجاد تفاوت کارآیی آبگیرهای ساحل چپ و راست رودخانه می‌شود و مشکلاتی را در مراحل بهره‌برداری پدید می‌آورد. برای علاج بخشی، گزینه‌های مختلفی وجود دارد مانند احداث آبشکن برای هدایت جریان به آبگیرها، تغییر عرض و بازشدگی دهانه‌های آبگیر و مجرای تخلیهٔ رسوب، و ...). یکی از فرضیه‌ها جهت توزیع یکنواخت‌تر جریان در عرض پیچ رودخانه، تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیبدار است (Keller, 1989).

در منابع موجود، آزمون کاربرد سرریزها[1] در محدودهٔ پیچ آبراهه‌ها بسیار اندک است. در مطالعات مهندسی رودخانه اخیر توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE)، واژهٔ سرریز در پیچ آبراهه[2] به صورت غیر متداول به‌جای آبشکن مستغرق[3] برای حفاظت دیوارهٔ خارجی پیچ و هدایت جریان به دیوارهٔ داخلی پیچ به‌کار برده شده است. این واژهٔ نادرست، در جستجو برای منابع جدید در خصوص سرریزهای واقعی یا Weirs (سازه تقاطعی در تمام عرض آبراههٔ اصلی)، اشتباه انگیز شده است.

اولین مطالعه برای آزمون سرریزهای با تاج شیبدار، روی یک سریز کرامپ ساخته شده در مسیر مستقیم آبراههٔ شهری ملبورن، استرالیا اجرا شد. برای علاج بخشی مشکل آبگیری در شرایط کم آبی، تاج سرریز با زاویهٔ شیب حدود ۷ درجه به سمت ساحل آبگیر ساخته شد. مطالعات کلر (Keller, 1989) روی مدل فیزیکی با دو مقیاس هندسی (۱:۱۰) و (۱:۳) نشان می‌دهد که شیبدار کردن تاج سرریز در راستای مستقیم، مشکلات آبگیری و رسوبگذاری را بیشتر کرده است و اجرای این پیشنهاد تنها در پیچ آبراهه توصیه می‌شود. عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2010) و حسینی‌مبرا (Hosseini-Mobara, 2012) به ترتیب کارکرد سرریزهای لبه تیز و لبه کوتاه کرامپ با تاج افقی و شیبدار را در پیچ یک فلوم بزرگ بررسی کرده‌اند. نتایج آزمون تجربی جریان در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۴ متر، عرض ۰/۹ متر، عمق ۰/۸ متر با یک پیچ ساده ۹۰ درجه و شعاع انحنای نسبی ۳ نشان می‌دهد که سرریزهای لبه تیز با شیب تاج ۸۷ درجه (زاویهٔ تاج سرریز نسبت به قائم) و سرریزهای کرامپ با شیب تاج ۸۸-۸۵ درجه، در مقاطع ۳۰ و ۶۰ درجه پیچ مناسب هستند. ایاسه (Ayase, 2011) و سلامت (Salamat, 2011) با استفاده از دو مدل ریاضی FLUENT و FLOW-3D، سناریوهای بیشتری از شرایط جریان را روی سرریزهای لبه تیز و کرامپ فوق در پیچ آبراهه شبیه‌سازی کرده‌اند. آزمون سناریوهای مختلف مدل‌های تجربی و عددی نشان می‌دهد که کارآیی سرریزهای با تاج افقی در محدودهٔ ورودی و خروجی پیچ مناسب‌تر است؛ در میانهٔ پیچ (در مقاطع ۳۰ و ۶۰ درجه)،

1-Weirs/Spillways
2- Bendway Weir
3-Submerged Groynes

شیب تاج سرریز در یکنواختی نسبی جریان در عرض پیچ مؤثر است.

سابقهٔ مطالعات جریان در پیچ آبراهه‌ها طولانی است (Rozovskii, 1957; Blanckaert & Graf, 2001) ولی جدول ۱ نشان می‌دهد که بررسی کارایی انواع سرریزها در محدودهٔ پیچ رودخانه‌ها بسیار محدود است. بررسی حاضر در تکمیل مطالعات پیشین، برای ارزیابی کارآیی سرریز لبه پهن[1] در پیچ آبراهه‌هاست. سرریزهای لبه پهن، در مقایسه با سرریزهای لبه گرد یا کرامپ، پشتوانهٔ نظری و هیدرولیکی قوی‌تری دارند (به‌طور مثال: تشکیل جریان بحرانی روی تاج سرریز) (Boss, 1988). ساخت و کاربرد سرریزهای لبه پهن در پیچ رودخانه های کوچک تا بزرگ ساده‌تر است و سابقهٔ باستانی دارد. این نوع سازهٔ قدیمی در حال حاضر از نظر اکو- هیدرولیکی (امکان پلکانی کردن پروفیل سرریز برای افزایش شدت انرژی کاهی، افزایش ظرفیت ورود هوا و بهسازی زیست محیط رودخانه‌ها، و گذر ماهیان) نیز مورد توجه است.

شکل ۱- نمونه‌های احداث سرریزها در محدودهٔ پیچ رودخانه، (الف) سد انحرافی در پیچ رودخانهٔ نازلو، ارومیه و (ب) سرریز در پیچ رودخانهٔ قون، فرانسه

جدول ۱- خلاصهٔ مطالعات تجربی استقرار سرریز در پیچ آبراهه‌ها

محقق	زاویهٔ پیچ (درجه)	حضور سرریز	نوع آزمون	خلاصهٔ نتایج
عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2010)	۹۰	سرریز لبه‌تیز	ارزیابی کارکرد سرریز لبه‌تیز در پیچ کانال	سرریزهای با تاج افقی در مسیر مستقیم و ابتدای پیچ مناسب‌تر است. در پیچ، شیب مناسب برای تاج سرریز در محدودهٔ ۸۸>θ>۸۵ است
ایاسه (Ayase, 2011)	۹۰	سرریز لبه‌تیز و لبه‌پهن	شبیه‌سازی سرریز در پیچ با مدل FLUENT	برای مقاطع میانی پیچ، سرریزهای شیب‌دار با شیب تاج θ=۸۷ بهترین عملکرد را دارند.
سلامت (Salamat, 2011)	۹۰	سرریز لبه‌تیز و لبه‌پهن	شبیه‌سازی سرریز در پیچ با استفاده از مدل FLOW-3D	در مقطع ۳۰ درجه و ۶۰ درجه در محدوده پیچ، سرریزهای با تاج شیب‌دار عملکرد بهتری دارند.
حسینی‌مبرا (Hosseini- Mobara, 2012)	۹۰	سرریز کرامپ	کارکرد سرریز کرامپ در پیچ	سرریزهای با تاج افقی در مسیر مستقیم و ابتدای پیچ مناسب‌تر است. در پیچ، شیب مناسب برای تاج سرریز در محدودهٔ ۸۸>θ>۸۵ است.

θ: زاویهٔ تاج سرریز نسبت به قائم

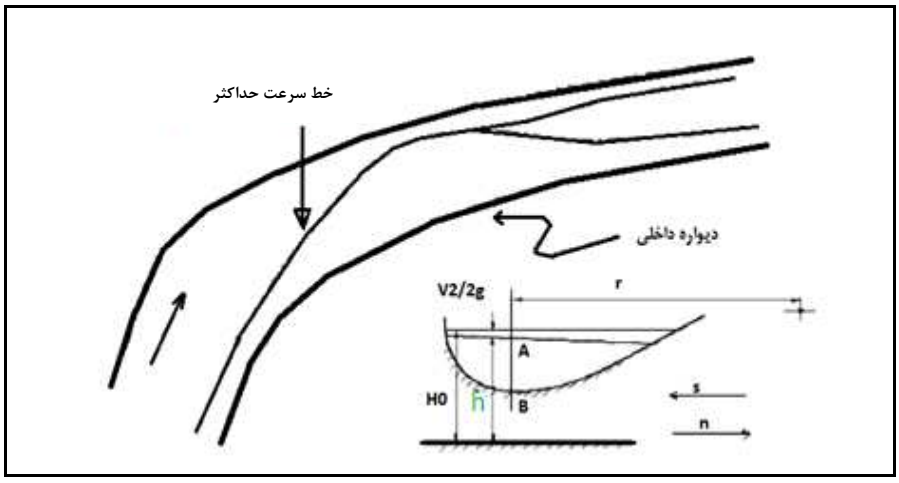
1- Broad-Crested Weir

در سرریزهای لبه پهن، طول تاج در امتداد جریان و به صورت افقی باید به حدی باشد که عمق جریان یکنواخت بحرانی روی تاج ایجاد شود (Boss, 1988). سرریز پهن در مقطع عرضی ممکن است به شکل مثلث، مستطیل، دایره و غیره باشد. این نوع سرریز در شرایطی که بار هیدرولیکی روی تاج در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۵ برابر طول تاج باشد، بهترین کارایی را دارد. لبهٔ ورودی سرریز ممکن است تیزگوشه یا گرد باشد. در رودخانه‌ها و مجاری با شیب انرژی زیاد، سرریزهای پهن مناسب‌تر هستند (Ackers *et al.*, 1989; Anon, 2000). هدف اصلی از تحقیق حاضر، آزمون میزان تأثیر شیب تاج سرریز بر یکنواختی توزیع جریان در عرض پیچ آبراهه در بالادست سرریز لبه پهن است. منظور از یکنواختی، کاهش شدت اختلاف "بده جریان در واحد عرض" در عرض آبراهه است. معادلهٔ جریان روی سرریز در پیچ و ضریب بده جریان آزاد و مستغرق نیز بررسی شده است.

تئوری طرح تاج سرریز در پیچ

با احداث سرریزها در پیچ، مشکلات زیادی از جمله توزیع غیر همسان جریان آب و رسوب در طرفین سرریز و دهانه‌های آبگیر به وجود می‌آید. از طریق همگرایی و تقارن نسبی توزیع جریان در عرض پیچ رودخانه، کاهش شدت جریان ثانویه امکان‌پذیراست (Bathurst & Hey, 1977; Abdollahpour, 2010). تئوری یکنواختی "بده جریان در واحد عرض" در عرض پیچ آبراهه را هندرسون (Henderson, 1966) برای محاسبهٔ "پروفیل عرضی کف در پیچ آبراهه" ارائه داده است. در این تحقیق، از این فرضیه برای توسعهٔ پروفیل عرضی کف به تاج سرریز استفاده شده است.

در پیچ آبراهه‌ای با مقطع عرضی طبیعی مطابق با شکل ۲، با حرکت از دیوارهٔ داخلی به سمت دیوارهٔ خارجی (با کاهش برداری n یا افزایش فاصلهٔ شعاعی r از مرکز انحنای داخلی پیچ)، ارتفاع سطح آب (h یا Z) افزایش و سرعت متوسط عمقی (V) کاهش می‌یابد. هندرسون (Henderson, 1966) شرح نظری این پدیده را با ترکیب معادلات انرژی و اولر (با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیکی در عمق و تساوی انرژی رشته‌های جریان در عرض پیچ آبراهه) به صورت دسته روابط عمومی ۱ گزارش داده است.



شکل ۲- جریان در عرض پیچ آبراهه (Henderson, 1966)

$$\frac{dh}{dn}+\frac{V}{g}\frac{dV}{dn}=0 \qquad (۱)$$
$$\frac{dV}{dn}+\frac{V}{r}=0$$
$$\frac{dh}{dn}=\frac{V^2}{gr}$$

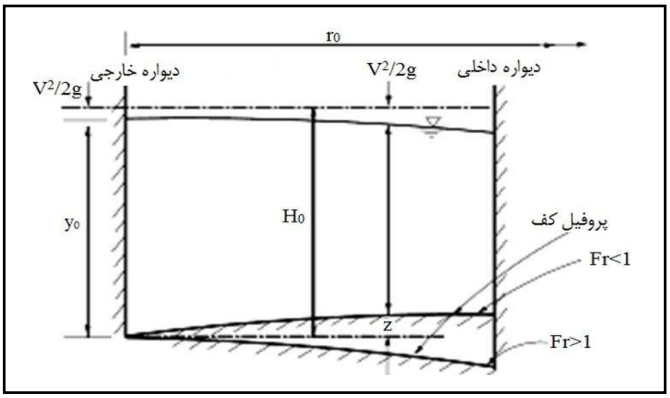
اگر بده واحد عرض در عرض مقطع (q) ثابت در نظر گرفته شود، خطوط جریان در عرض پیچ به شکل دایره‌های متحدالمرکز خواهند بود. در این شرایط، تلاطم موجود در جریان که به تغییر راستای خط ماکزیمم سرعت می‌انجامد، تعدیل می‌شود. همچنین، از آشفتگی امواج سطحی در پیچ کاسته می‌شود و با ایجاد رشته‌های جریان موازی با دیواره‌ها، الگوی جریان در پیچ بهبود می‌یابد (Bathurst & Hey, 1977).

با فرض ثابت بودن مقدار انرژی H در هر مقطع، ثابت بودن بده واحد عرض در امتداد شعاعی پیچ ($q=Vy=C$)، جریان متغیر تدریجی در عرض مقطع، و با استفاده از معادلهٔ سرعت جریان گردابی آزاد ($Vr=V_0r_0=C$) و معادلهٔ برنولی در ترکیب با روابط ۱، رابطهٔ ۲ به دست می‌آید (Henderson, 1966).

$$z=H_0-\frac{V_0^2r_0^2}{2gr^2}-\frac{qr}{V_0r_0} \qquad (۲)$$

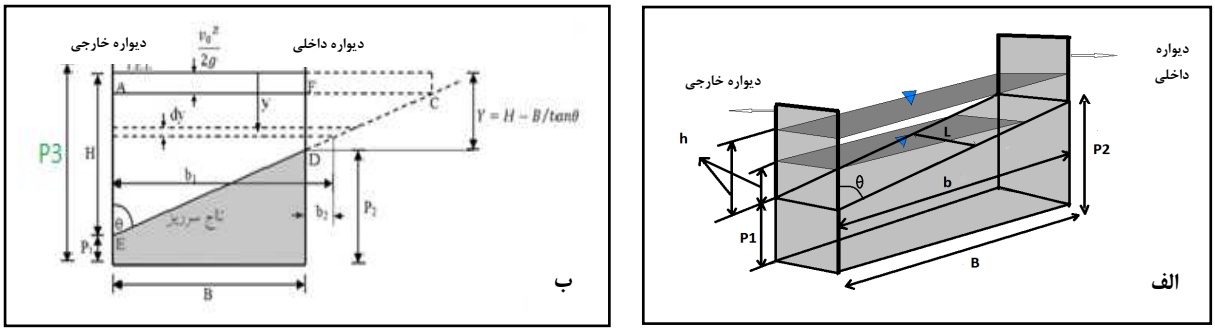
که در آن،

Z= ارتفاع کف بستر نسبت به کف بستر در مقطع بالادست پیچ؛ V_0 و H_0= مقادیر سرعت و بار آبی در بالادست پیچ؛ و r_0= شعاع خارجی پیچ است. شکل ۳ تغییر ارتفاع کف را بر حسب نوع رژیم جریان (زیر بحرانی یا فوق بحرانی) نشان می‌دهد. با توجه به معادلهٔ ۲ و شکل ۳، در جریان زیربحرانی با ایجاد افزایش ارتفاع کف بستر (به اندازه z) به سمت دیوارهٔ داخلی پیچ، می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر جریان در عرض پیچ آبراهه دست یافت.



شکل ۳- پروفیل عرضی کف آبراهه در یک پیچ ساده با هدف بده واحد عرض یکسان (Henderson, 1966)

پروفیل عرضی کف در پیچ آبراهه را می‌توان به صورت سرریزی با ارتفاع متوسط صفر در نظر گرفت. با انتخاب ارتفاع سرریز در دیوارهٔ خارجی (P_1)، و با توسعهٔ پروفیل عرضی کف به تاج سرریز، می‌توان به طرح تاج سرریزی با توزیع یکنواخت‌تر جریان در مقطع کنترل بالادست سرریز دست یافت. با فرض خطی بودن تاج سرریز در عرض پیچ، سرریز شبیه‌سازی شده با استفاده از رابطهٔ ۲، در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴، b_1= عرض فرضی تاج سرریز در جهت جریان با فرض تغییر جزئی dy در عمق؛ b= طول افقی تاج سرریز؛ b_2= اختلاف عرض فرضی b_1 با عرض واقعی؛ H= بار آبی در طرف دیوارهٔ خارجی سرریز شیبدار؛ و Y= بار آبی در طرف دیوارهٔ داخلی سرریز شیبدار.



شکل ٤- شبیه‌سازی مقطع عرضی سرریز لبه پهن با تاج شیب‌دار در پیچ یک آبراهه
(الف) تصویر سه بعدی و (ب) تصویر دو بعدی مقطع عرضی

معادلهٔ جریان روی سرریز پهن با تاج شیبدار

برای سرریز استاندارد لبه پهن با تاج افقی و در راستای مستقیم، معادلات جریان توسط باس (Boss, 1978) ارائه شده است. در بررسی حاضر و با توجه به پارامترهای شکل ۴، از تلفیق روش تحلیل ریاضی و ابعادی، معادلهٔ جریان آزاد روی سرریز لبه پهن (با تاج افقی یا شیب‌دار) در محدودهٔ پیچ، با استفاده از بسط تیلور و با تقریب درجهٔ چهارم، به صورت روابط ۳ و ۴ به دست آمده است (Valimohamadi, 2011).

$$Q = C_d \frac{4}{15}\sqrt{2g}\,\tan\theta h^{\frac{5}{2}} \qquad \text{if} \quad P/h > 1 \qquad (۳)$$

if P/h <1

$$Q = C_d \frac{4}{15}\sqrt{2g}\,\tan\theta h^{\frac{5}{2}}\left[\frac{5}{2}\left(\frac{P}{h}\right) - \frac{15}{8}\left(\frac{P}{h}\right)^2 + \frac{5}{16}\left(\frac{P}{h}\right)^3 + \frac{5}{128}\left(\frac{P}{h}\right)^4\right] \qquad (۴)$$

در این روابط، $P=P_2-P_1$، ارتفاع بخش شیبدار سرریز؛ P_1= ارتفاع سرریز در دیوارهٔ خارجی پیچ (کمترین ارتفاع سرریز)؛ P_2= ارتفاع سرریز در دیوارهٔ داخلی پیچ (بیشترین ارتفاع سرریز)؛ h= اختلاف سطح آب مقطع کنترل بالادست با تاج سرریز در دیوارهٔ خارجی؛ و θ= زاویهٔ تاج سرریز نسبت به محور قائم است. با توجه به هندسهٔ سرریز در این تحقیق (حداکثر شیب تاج ۵ درجه، در طول ۰/۹ متر، با اختلاف ارتفاع ۰/۸ متر) از رابطهٔ ۳ استفاده نشده است. مطابق شکل ۴، برای شرایط جریان در محدودهٔ مقطع مثلثی شیبدار سرریز (h<P)، پارامتر (P/h) مؤثر نخواهد بود. در شرایط جریان مرکب روی سرریز (h>P)، تأثیر پارامتر (P/h) مستقیماً در رابطهٔ ۴ مشخص است.

ضریب بده جریان آزاد (C_d) به صورت تابعی از انحنای نسبی پیچ، موقعیت سرریز در پیچ، هندسهٔ سرریز و بار آبی در بالادست سرریز، از رابطهٔ بدون بعد ۵ ارزیابی می‌شود:

$$C_d = f_3\left(\frac{h}{p_1}, \theta, \beta, \frac{r_c}{B}, \lambda, \alpha, \frac{b}{B}\right) \qquad (۵)$$

که در آن،

مطابق شکل ۴، B= عرض کانال؛ b= طول افقی تاج سرریز؛ r_c= شعاع انحنای مرکزی پیچ؛ λ= زاویهٔ مرکزی پیچ؛ β= زاویهٔ موقعیت قرارگیری سرریز در پیچ؛ و α= زاویهٔ استقرار محور سرریز نسبت به ساحل است. تأثیر پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی معین (مانند تأثیر بار سرعت جریان در بالادست سرریز، هوادهی تیغهٔ جریان، و عمق پایاب سرریز در استغراق جریان) و عوامل نامعین (مانند کشش سطحی، عدد رینولدز) در ارزیابی تجربی ضریب دبی جریان منظور می‌شود. در بررسی تجربی حاضر، پارامترهای پیچ (λ، α، $\frac{r_c}{B}$) و فشردگی جانبی سرریز (b/B) ثابت بوده‌اند. بنابراین، معادلهٔ ضریب بده جریان آزاد (C_d) به صورت رابطهٔ ۶ خلاصه می‌شود:

$$C_d = F(\frac{h}{p_1}, \theta, \beta, \frac{r_c}{B}) \qquad (۶)$$

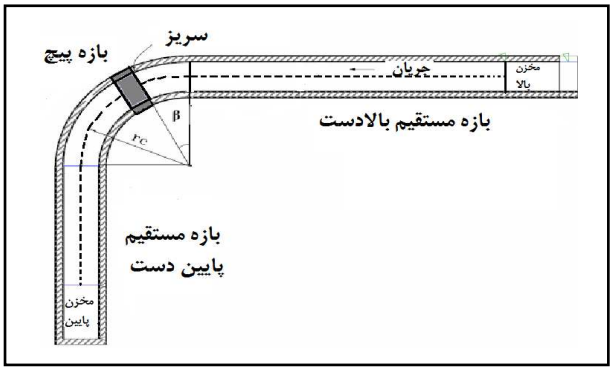
برای ارزیابی تأثیر استغراق جریان روی سرریز، به پارامتر عمق پایاب سرریز (H_d) نیاز خواهد بود. ضریب استغراق جریان ϕ به صورت تابعی از H_d/P_1 ارزیابی می‌شود. ضریب بده در حالت جریان مستغرق $(C_d)_s$ با احتساب ضریب بده جریان آزاد رابطهٔ ۶ و ضریب استغراق ϕ، از رابطهٔ ۷ قابل محاسبه است.

$$\varphi = \left(\frac{(C_d)_s}{C_d}\right) = F\left(\frac{H_d}{P_1}\right) \qquad (۷)$$

مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، انجام یافته است. آزمون تجربی جریان در یک فلوم آزمایشگاهی از جنس بتن مسلح، با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۹ متر، عمق ۰/۸ متر، با یک پیچ ساده ۹۰ درجه و شعاع انحنای نسبی (نسبت شعاع انحنای مرکزی پیچ به عرض فلوم) معادل ۳، انجام گرفت. قوس با انحنای نسبی ۳ به عنوان قوس پایدار، با شدت انحنای متوسط شناخته می‌شود (Yasi, 1989).

مدل سرریزها از نوع لبه پهن، با تاج افقی و تاج شیب دار انتخاب شدند. سرریزها بدون فشردگی جانبی، از نوع مستطیلی با شیب دیوارهٔ قائم، در ارتفاع‌های مختلف (جدول ۲) ساخته شدند. اندازهٔ طول تاج سرریز در امتداد جریان، بر اساس توصیهٔ باس (Boss, 1988) به صورت ضریبی از بار آبی بالادست سرریز در دامنهٔ جریان‌های مورد نظر تعیین می‌شود که در این آزمایش‌ها معادل ۰/۳ متر انتخاب شد. سیمای عمومی کانال و سرریز در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- پلان کانال منحنی و سرریز لبه پهن در بررسی حاضر

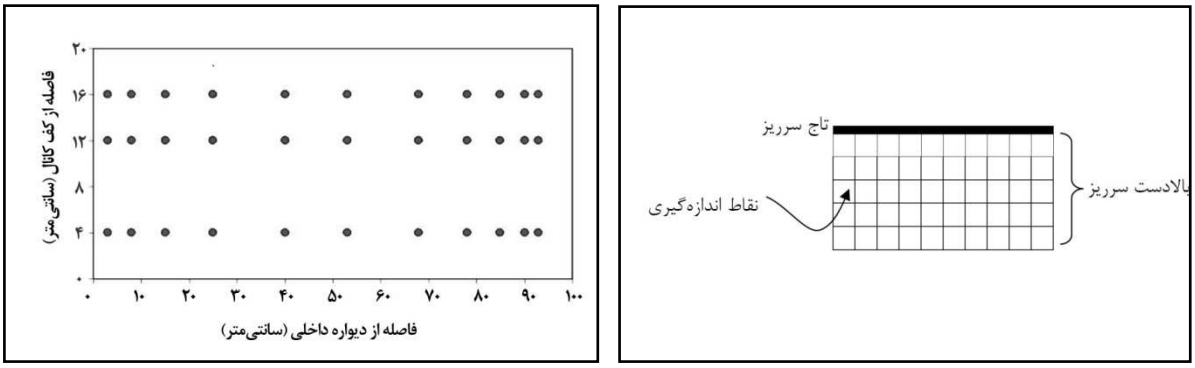
خصوصیات جریان در شرایط مختلف استقرار سرریزهای با تاج افقی و شیب‌دار بررسی شد. آزمایش‌هایی برای سه آزمون جریان (کم، متوسط و زیاد)، با سه ارتفاع متغیر سرریز، چهار شیب تاج سرریز (شامل یک آزمون برای تاج افقی)، در هفت موقعیت متفاوت از فلوم (پنج موقعیت در محدودهٔ پیچ در مقاطع زاویه‌ای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و دو موقعیت در بازه مستقیم بالادست و پایین‌دست پیچ) اجرا شد. از آنجاکه پیچ بر خصوصیات جریان بالادست و پایین‌دست (تا حداقل به فاصلهٔ دو برابر عرض رودخانه: 2B) تأثیر دارد، مقاطعی در فاصلهٔ 2B در بالا و پایین پیچ نیز آزمایش شد. برای انتخاب جهت شیب تاج در عرض و برآورد اولیهٔ مقدار شیب تاج سرریز، از حل تحلیلی رابطهٔ ۲ با استفاده از پارامترهای هندسهٔ هیدرولیکی فلوم، سرریز و جریان های مورد نظر استفاده شد. دامنهٔ تغییر متغیرهای هندسی سرریز و متغیرهای جریان، با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، در جدول ۲ ارائه

شده است. در این بررسی، ۲۵۲ آزمون تجربی اجرا شد. بر اساس نتایج جدول ۲ در تمامی آزمون‌ها، جریان بالادست سرریز متلاطم کامل و زیربحرانی بوده است. با توجه به دامنهٔ بار آبی (۰/۲۲ تا ۰/۴۴ متر)، تأثیر کشش سطحی (پارامتر عدد وبر) ناچیز است. شیب تاج سرریز تابعی از ارتفاع سرریز در دیوارهٔ داخلی (P_2) است.

در هر آزمون، پارامترهای بده جریان، ارتفاع سطح آب و سرعت دو بعدی (سطح افق) در نقاط مختلف عرضی و عمقی در مقاطع بالادست سرریز (مطابق شکل ۶) اندازه‌گیری شدند. برای بررسی الگوی جریان روی سرریز در محدودهٔ پیچ، انتخاب مقطع کنترل سرریز، و اندازه‌گیری بردار سرعت در لایه‌های عمقی مختلف در هر مقطع عرضی (برای محاسبه بده واحد عرض)، از سرعت سنج دو بعدی (سطح افق) الکترومغناطیسی مدل ACM2-RS با خروجی دیجیتالی استفاده شد. در آزمایش‌های قبلی در فلوم عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2010)، نتایج اندازه‌گیری بده جریان از سرریز مثلثی با مقادیر نظیر محاسباتی از اندازه‌گیری عمق- سرعت دو بعدی در مقاطع عرضی مختلف مقایسه شد که درصد خطا در محدوده ۵± و بنابراین، فرایند اندازه‌گیری عمق- سرعت- بده جریان دقیق بوده است. شکل ۶ شبکه‌بندی نقاط اندازه‌گیری در پلان و مقطع جریان را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. مقادیر سرعت دو بعدی در هر مقطع عرضی در ۱۱ امتداد قائم و در ۳ نقطهٔ عمقی ۰/۲، ۰/۶، ۰/۸ از سطح آب اندازه‌گیری شدند. از داده‌های موجود برای محاسبهٔ دقیق توزیع بده واحد عرض (در عرض مقطع پیچ) و همچنین برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های عددی استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات آزمون‌های تجربی در موقعیت های مختلف استقرار سرریز لبه پهن در فلوم منحنی

عدد رینولدز بالادست (Re)	عدد فرود بالادست (Fr)	بار آبی روی سرریز $h\times10^2$ (متر)	ارتفاع سرریز در دیوارهٔ داخلی $(P_2\times10^2)$ (متر)	ارتفاع سرریز در دیوارهٔ خارجی $(P_1\times10^2)$ (متر)	بده جریان $Q\times10^3$ (مترمکعب بر ثانیه)
>۲۴۰۰	(۰/۰۵ – ۰/۲۰)	(۲۲ - ۴۴)	(۱۴ - ۳۱)	(۱۴ - ۳۰)	(۲۵ - ۷۵)



شکل ٦- نمایش پلان و مقطع عرضی شبکهٔ اندازه‌گیری‌ها در بالادست سرریز

یکنواختی توزیع جریان در عرض آبراهه، به‌طور نسبی و با مشاهدهٔ دامنهٔ تغییرات "بده جریان در واحد عرض (q)" در طول تاج سرریز، تشخیص داده شده است. برای تعیین محل مقطع کنترل، پروفیل سطح آب در بالادست سرریز (در شبکه شکل ۶) اندازه‌گیری و فاصلهٔ آستانهٔ افت سطح آب بالادست از تاج سرریز برداشت شد. بده واحد عرض در هر نقطهٔ iام از عرض مقطع کنترل سرریز (q_i)، از حاصل ضرب سرعت V_i و عمق آب y_i قابل محاسبه است. V_i سرعت متوسط عمقی در نقطهٔ iام (در شکل ۶) است که از داده‌های برداشت شده از سه نقطهٔ عمقی (۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق موضعی آب) محاسبه می‌شود.

$$q_i = V_i \times y_i \qquad (۸)$$

طبق تعریف، آستانهٔ استغراق جریان حدی است که در آن جریان عبوری از روی سرریز تحت تأثیر سطح پایاب نباشد. برای اندازه‌گیری آستانهٔ استغراق، به ازای مقادیر متفاوت عمق پایاب (H_d)، عمق آب در بالادست سرریز (h) اندازه‌گیری شد. نسبتی از عمق پایاب به ارتفاع سرریز در سمت دیوارهٔ خارجی (H_d/P_1) که در آن سطح آب در بالادست (یعنی مقدار h) به شکلی قابل توجه تغییر کند، آستانهٔ استغراق در نظر گرفته می‌شود.

نتایج و بحث

آزمون طرح تاج سرریز (افقی یا شیبدار)، از طریق ارزیابی توزیع بده واحد عرض (q) در مقطع کنترل بالادست سرریز صورت می‌گیرد. برای این منظور، تعیین محل مناسب مقطع کنترل، برای اندازه‌گیری تراز آب روی سرریز (h) و توزیع عمق (y_i) و سرعت متوسط عمقی (V_i) در عرض مقطع کنترل اهمیت ویژه‌ای دارد.

جانمایی مقطع کنترل سرریز

مقطع کنترل در سرریزها مقطعی است عرضی که رابطه‌ای معین بین عمق و بده جریان برقرار شود. به‌طور تجربی این مقطع در بالادست سرریز، و قبل از آستانهٔ افت سطح آب تعیین می‌شود. از نتایج برداشت تراز سطح آب در شبکه شکل ۶، محور آستانه افت سطح آب نسبت به سرریز شناسایی شد. همچنین، یکنواختی توزیع جریان در عرض مورد توجه قرار گرفت. مقطع کنترل برای سرریزهای با تاج افقی در بالادست و ابتدای پیچ به صورت خطی موازی با تاج سرریز و عمود بر جریان، در فاصلهٔ L_u=(2.0-4.7)h در بالادست سرریز قرار دارد (h بار آبی نسبت به تراز متوسط تاج سرریز است). در محدودهٔ پیچ، مقطع کنترل به صورت خطی مورب با زاویهٔ (۰ تا ۸ درجه) نسبت به راستای تاج سرریز در سطح افق و به فاصلهٔ متغیر L_u=(1.0-4.7)h از سمت دیوارهٔ خارجی و در بالادست سرریز قرار دارد. جزئیات زاویهٔ استقرار مقطع کنترل و فاصلهٔ L_u از سمت دیوارهٔ خارجی، برای سرریزهای با تاج افقی و شیب‌دار را ولی‌محمدی (Valimohamadi, 2011) ارائه داده است.

جانمایی شیب تاج سرریز

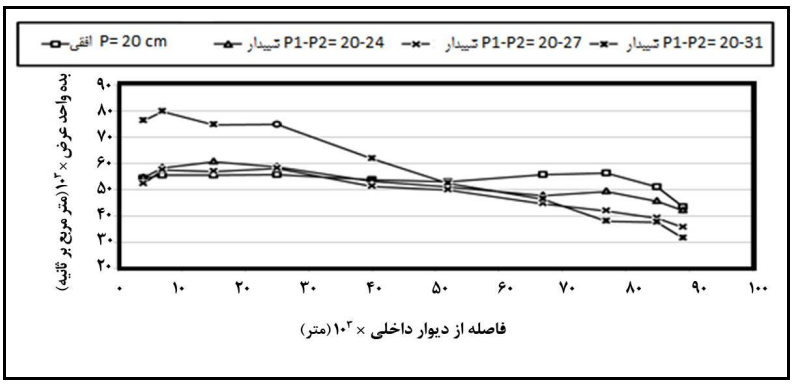
تناسب شیب تاج سرریز با بررسی یکنواختی توزیع بده واحد عرض (q) در عرض مقطع کنترل، ارزیابی شد. انتظار همسانی q را در طول تاج سرریز نباید داشت، ولی توزیع یکنواخت تر q (یا شدت اختلاف کمتر q) معیار شناسایی شیب مناسب تر تاج سرریز بوده است. شکل‌های ۸ تا ۱۲ نمونه‌ای از توزیع عرضی بده واحد عرض (q) را در مقطع کنترل سرریز برای شرایط جریان متوسط (Q=۵۰ لیتر بر ثانیه) با ارتفاع متوسط سرریز در دیوارهٔ داخلی (P_1=۲۰ سانتی‌متر)، برای چهار شیب مختلف تاج (۲۰، ۲۴، ۲۷ و P_2=۳۱ سانتی‌متر)، در پنج موقعیت استقرار سرریز در پیچ نشان می‌دهند.

تحلیل آماری از شدت یکنواختی توزیع عرضی جریان نیازمند داده‌های کافی از آزمون‌های تجربی در شرایط مختلف (فلوم پیچ‌دار با زاویه‌های مختلف و با انحنای نسبی متفاوت) است. با محدودیت داده‌های موجود در این بررسی، یکنواختی توزیع جریان در عرض آبراهه، به‌طور نسبی و با مشاهدهٔ دامنهٔ تغییرات "بده جریان در واحد عرض" در طول تاج سرریز، تشخیص داده شده است. در هر موقعیت استقرار سرریز "سرریز با تاج افقی" به عنوان شاهد در نظر گرفته شد تا با سه شیب مختلف تاج مقایسه شود.

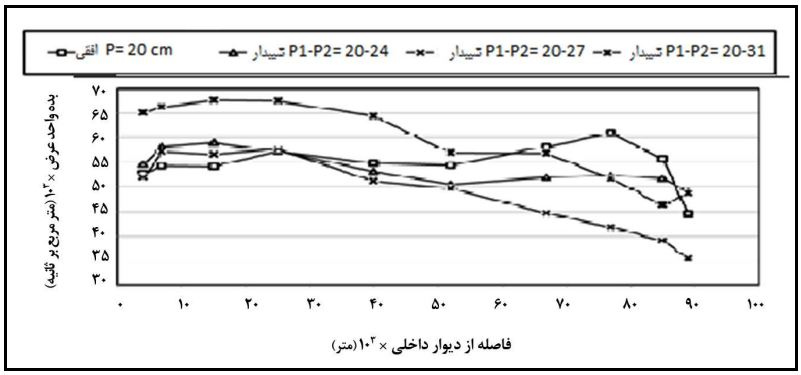
نتایج بررسی شرایط متفاوت جریان و ارتفاعات مختلف سرریز را ولی‌محمدی (Valimohamadi, 2011) گزارش داده است. تأثیر موقعیت استقرار سرریز در پیچ بر توزیع عرضی بده واحد عرض (q) و در نتیجه بر شیب مورد نظر تاج سرریز، به‌طور نمونه در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نظیر در بازه‌های مستقیم بالادست و پایین‌دست پیچ و نیز در مقطع ورودی پیچ نشان می‌دهد که سرریز با تاج افقی مناسب‌تر است. در محدودهٔ پیچ، استقرار سرریز با تاج شیبدار (جهت شیب تاج به سمت دیوارهٔ خارجی پیچ) کارآیی بهتری دارد. در بار آبی معین، با افزایش ارتفاع سرریز (P_1)، زاویهٔ مورد نیاز برای شیب تاج سرریز کمتر می‌شود. با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع سرریز، سرعت بالادست کمتر و یکنواختی سرعت و دبی در عرض نسبتاً بیشتر می‌شود، این امر نیز قابل انتظار است. افزایش بار آبی روی سرریز تأثیر چندانی بر زاویهٔ شیب تاج سرریز ندارد.

مقایسهٔ نتایج در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان می‌دهد که سرریزهای با تاج شیبدار در موقعیت ۳۰ درجه از ابتدای پیچ (شکل ۸)، بهترین عملکرد را نسبت به دیگر موقعیت‌های زاویه ای دارند. توزیع عرضی q در هر سه ارتفاع مختلف سرریز و در سه شرایط مختلف جریان یکنواخت‌تر است. مطالعات پیشین برای سرریزهای لبه تیز و لبه کوتاه کرامپ نیز برتری موقعیت ۳۰ درجه را تائید کرده است (Abdollahpour, 2010; Hosseini-Mobara, 2012). مقایسهٔ نتایج با دیگر سرریزها نشان می‌دهد که در شرایط مساوی، شیب لازم تاج برای سرریز لبه پهن کمتر از شیب تاج مورد لزوم برای سرریزهای لبه تیز و کرامپ است. بهترین موقعیت سرریز لبه پهن در پیچ، به ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است.

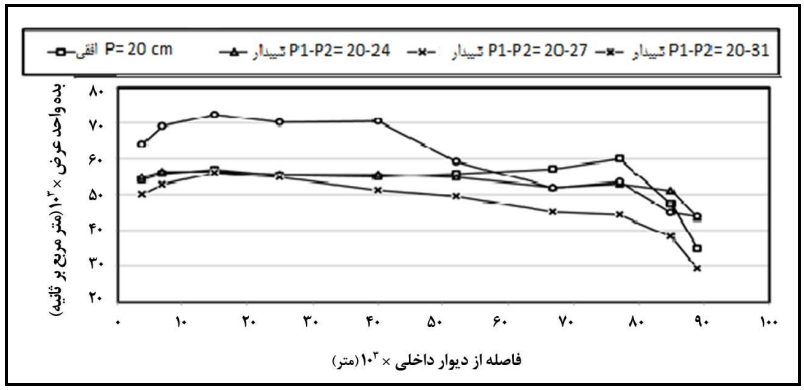
از بررسی مجموع آزمون‌ها، متوسط زاویهٔ شیب تاج سرریز لبه پهن به صورت تابعی از نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز در دیوارهٔ داخلی (h/P_1)، در جدول ۳ ارائه و پیشنهاد شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محدودهٔ پیچ، زاویهٔ شیب تاج سرریز با حرکت از ابتدای پیچ به سمت میانه افزایش و پس از آن به سمت انتهای پیچ به تدریج کاهش می‌یابد. در مقطع ۳۰ درجه که تمرکز سرعت و بده جریان به سمت دیوارهٔ داخلی است، شیب تاج بیشتری مورد نیاز است. با حرکت به سمت مقاطع پایین‌تر پیچ، توزیع جریان به سمت دیوارهٔ خارجی پیشروی می‌کند و به زاویهٔ شیب تاج کمتری نیاز دارد. نتایج مطالعات عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2010) و حسینی‌مبرا (Hosseini-Mobara, 2012) در سرریزهای لبه تیز و کرامپ در پیچ نشان می‌دهد که شیب مناسب برای تاج سرریز در میانهٔ پیچ در محدودهٔ ۲ تا ۵ درجه نسبت به افق است. این محدودهٔ شیب برای تاج سرریز های لبه پهن نیز صادق است (۲/۵ تا ۴/۵ درجه). بنابراین، به نظر می‌رسد که شیب مناسب تاج سرریز مستقل از نوع سرریز باشد.



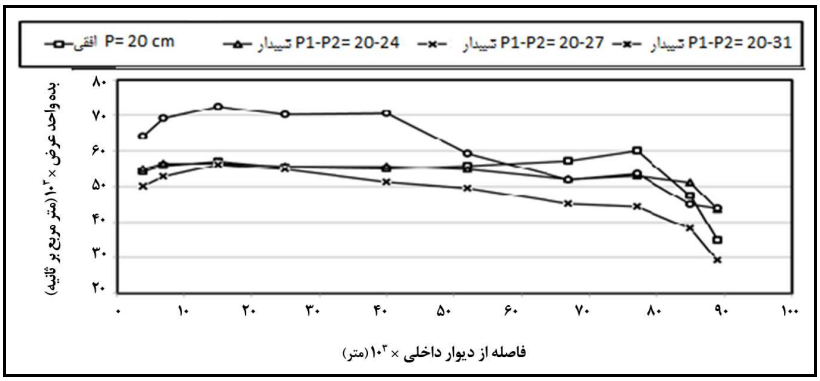
شکل ۷- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریز لبه پهن در مقطع ورودی پیچ



شکل ۸- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیبدار و افقی لبه پهن در زاویهٔ ۳۰ درجه پیچ



شکل ۹- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیبدار و افقی لبه پهن در زاویهٔ ٤٥ درجه پیچ



شکل ۱۰- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیبدار و افقی لبه پهن در زاویهٔ ٦٠ درجه پیچ

جدول ۳- زاویهٔ شیب متوسط تاج سرریز لبه پهن (به سمت دیوارهٔ داخلی: درجه)

موقعیت استقرار	نسبت بار آبی بالادست سرریز (h/P_1)		
سرریز	۰/۷	۰/۵	۰/۳
2B-U/S	۰	۰	۰
0-Degree	۰	۰	۰
30-Degree	۳/۱	۴/۳	۳/۱
45-Degree	۳/۱	۲/۵	۳/۱
60-Degree	۰	۲/۵	۰
90-Degree	۰	۰	۰
2B-D/S	۰	۰	۰

ضریب بده جریان روی سرریز

معادلات جریان آزاد و مستغرق روی سرریز لبه پهن به صورت روابط ۳ تا ۷ ارائه شده است. روابط نهایی برای محاسبهٔ ضریب بده جریان آزاد (C_d) در جدول ۴ نشان داده شده است. ضریب C_d با آزمون تجربی متغیرهای رابطهٔ ۶ تعیین شده است. به‌طور نمونه، شکل ۱۱ نتایج ارزیابی C_d را برای سرریز برتر در موقعیت ۴۵ درجه پیچ در نسبت‌های h/P_1 نشان می‌دهد.

نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند که در شرایط جریان آزاد، ضریب بده (C_d) برای سرریزهای افقی در محدودهٔ ۰/۶۱ تا ۰/۷۸ و در سرریزهای شیبدار واقع در میانه پیچ بین ۰/۴۳ و ۰/۶۵ (با متوسط ۰/۵۲) است. برای سرریزهای پهن در پیچ آبراهه، نتایج مشابه گزارش نشده است ولی مشابه این روند در مطالعات حسینی‌مبرا (Hosseini-Mobara, 2012) برای سرریز کرامپ (با متوسط C_d برای تاج افقی ۰/۷ و برای تاج شیبدار واقع در میانه پیچ معادل ۰/۵۴) دیده می‌شود. بنابراین، با شیب‌دار شدن سرریز، ضریب جریان آزاد کاهش می یابد. کاهش ضریب C_d در میدان تلاطم زیاد جریان در پیچ نسبت به فضای با جریان متقارن و تلاطم کم در راستای مستقیم، قابل انتظار است و نتایج تجربی نیز آن را تائید می‌کند.

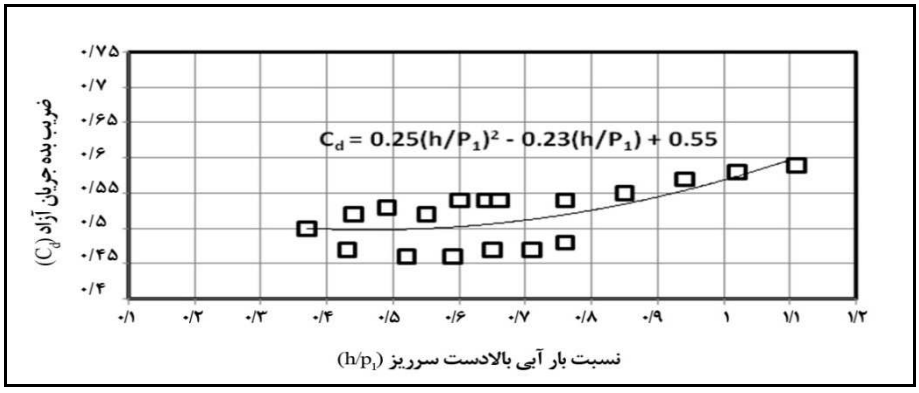
آستانهٔ استغراق جریان به صورت تابعی از عمق پایاب به ارتفاع سرریز در سمت دیوارهٔ خارجی (H_d/P_1) به‌طور تجربی ارزیابی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر بحرانی برای آستانهٔ استغراق (H_d/P_1)، برای سرریزهای افقی در دامنهٔ ۱/۰ تا ۱/۷ و برای سرریزهای شیبدار در دامنهٔ ۱/۱ تا ۱/۹ قرار دارد. مقادیر متناظر برای سرریز کرامپ با تاج افقی بین ۱/۰ تا ۱/۸ و برای تاج شیبدار در میانه پیچ بین ۱/۱ تا ۱/۹ است (Hosseini-Mobara, 2012).

ضریب بده جریان مستغرق (C_{ds}) به صورت تابعی از عمق نسبی پایاب سرریز (H_d/P_1) به طور تجربی ارزیابی و نمونهٔ آن در شکل ۱۲ ارائه شده است. ضریب C_{ds} برای سرریزهای افقی در دامنهٔ ۰/۴ تا ۰/۶ و برای سرریزهای شیبدار در دامنهٔ ۰/۳۵ تا ۰/۵۸ (متوسط ۰/۴۴) قرار دارد. مقادیر متناظر برای سرریز کرامپ با تاج افقی بین ۰/۴ تا ۰/۶ و برای تاج شیبدار در میانه پیچ بین ۰/۳ تا ۰/۵۷ است (Hosseini-Mobara, 2012). مشابه این مطالعات در خصوص سرریزهای دیگر اجرا نشده است و بنابراین نمی‌توان آنها را مقایسه کرد. مشابه این مطالعات در خصوص سرریز لبه تیز عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2010) اجرا نشده و از این‌رو قابل مقایسه نیست. به‌طورکلی برای جریان روی سرریز در پیچ، مقادیر ضریب C_d در جریان

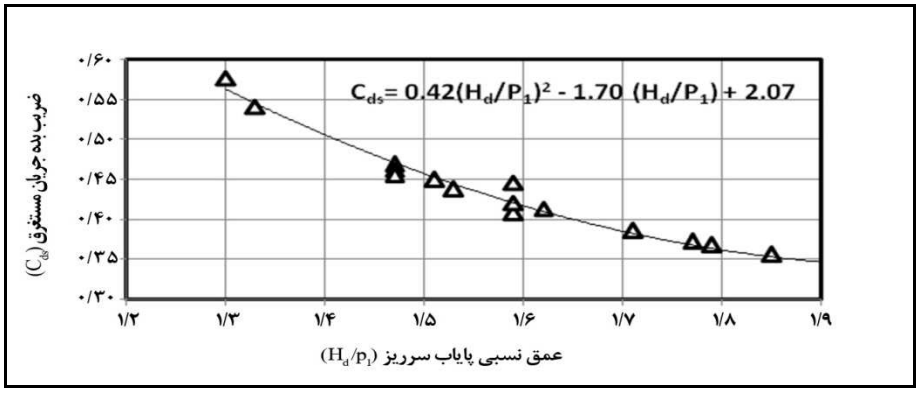
آزاد بیشتر و دامنهٔ تغییرات آن کمتر از جریان مستغرق است. متوسط ضریب بده جریان آزاد و مستغرق، به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۴۴ است. اطلاعات کامل را ولی‌محمدی (Valimohamadi, 2011) گزارش داده است.

جدول ٤- روابط نهایی برای تعیین ضریب بده جریان آزاد روی سرریز لبه پهن

تاج سرریز	موقعیت استقرار سرریز		معادلهٔ ضریب بده جریان آزاد
تاج افقی	بالادست پیچ ناحیهٔ ورودی به پیچ ناحیهٔ خروجی پیچ	(۹)	$C_d = \frac{Q}{\left[\frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{3}g}\right] b h^{\frac{3}{2}}}$
تاج شیبدار	ناحیهٔ میانی پیچ (۱۵ تا ۷۵ درجه)	(۱۰)	$C_d = \frac{Q}{\left[(\frac{4}{15}\sqrt{2}) g^{\frac{1}{2}} \tan\theta\right]\left[h^{\frac{5}{2}} - (h-P)^{\frac{5}{2}}\right]} = \frac{Q}{\left[(\frac{4}{15}\sqrt{2}) g^{\frac{1}{2}} \tan\theta\right] h^{\frac{5}{2}}} . f_5(\frac{P}{h})$



شکل ۱۱- ضریب بده جریان آزاد (C_d) روی سرریز بهینه- با تاج شیبدار در مقطع ٤٥ درجه



شکل ۱۲- ضریب بده جریان مستغرق (C_{ds}) روی سرریز بهینه- با تاج شیبدار در مقطع ٤٥ درجه

نتیجه‌گیری

فرضیهٔ توزیع یکنواخت‌تر بده جریان در واحد عرض تاج سرریز، از طریق تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیبدار، سبب بهبود توزیع جریان در عرض پیچ در بالادست سرریز می‌شود. نتایج ارزیابی کارکرد سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیبدار، در عرض پیچ آبراهه به شرح زیر خلاصه می‌شود.

- سرریزهای با تاج افقی در راستای مستقیم بالادست و

پایین‌دست پیچ، در ابتدای پیچ، و در ناحیهٔ خروجی پیچ مناسب‌تر هستند.

- شیبدار کردن تاج سرریز نه تنها در مقاطع بالای پیچ و پایین پیچ، بلکه حتی در مقطع ورودی پیچ (زاویهٔ صفر) و در ناحیهٔ خروجی پیچ (زاویهٔ ۶۰ تا ۹۰ درجه) نیز ضرورت ندارد. در میانهٔ پیچ، استقرار سرریز با تاج شیبدار کارایی بهتری دارد. موقعیت سرریز در پیچ، روی زاویهٔ شیب سرریز تأثیر دارد.

- زاویهٔ بهینهٔ شیب تاج سرریز، با حرکت از ابتدای پیچ به وسط افزایش و پس از آن به سمت انتهای پیچ به تدریج کاهش می‌یابد. جهت شیب تاج به سمت دیوارهٔ خارجی پیچ است. بهترین موقعیت استقرار سرریز، به ترتیب در مقاطع زاویه ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. شیب مناسب تاج سرریز لبه پهن در محدوده ۲/۵ تا ۴/۵ درجه قرار دارد.

- در محدودهٔ پیچ، مقطع کنترل به صورت خطی مورب با زاویهٔ (صفر تا ۸) درجه، نسبت به تاج سرریز، و به فاصلهٔ (1.0-4.7)h در بالادست سرریز و در سمت دیوارهٔ خارجی قرار دارد.

- ضریب جریان آزاد و مستغرق برای سرریز بهینه، در هر موقعیت از نصب سرریز تعیین شده است. ضریب بده جریان C_d برای سرریز با تاج افقی در بازه مستقیم رودخانه، نسبت به سرریز در پیچ رودخانه، بیشتراست. مقادیر ضریب C_d در جریان آزاد بیشتر و دامنهٔ تغییرات آن در جریان مستغرق کمتراست. در میانهٔ پیچ، متوسط ضریب بده جریان در محدودهٔ جریان آزاد ۰/۵۲ و در محدودهٔ جریان مستغرق ۰/۴۴ است. حد عددی آستانهٔ استغراق جریان به صورت تابعی از عمق پایاب به ارتفاع سرریز در سمت دیوارهٔ خارجی (H_d/P_1) برای سرریزهای افقی در دامنهٔ ۱/۰ تا ۱/۷ و برای سرریزهای شیبدار در میانهٔ پیچ در دامنهٔ ۱/۱ تا ۱/۹ قرار دارد.

ساخت و کاربرد سرریزهای پهن در پیچ رودخانه ساده‌تر و از نظر اکو- هیدرولیکی (امکان پلکانی کردن پروفیل سرریز برای افزایش شدت انرژی کاهی و نیز افزایش ظرفیت ورود هوا و بهسازی زیست محیط رودخانه ها) نیز قابل توجه است. گزینهٔ پلکانی کردن تاج در عرض پیچ (به عنوان جایگزین شیبدار بودن تاج)، تحت بررسی است. مطالعات تکمیلی برای همسانی بده انحراف آب و نیز همسانی انتقال رسوب به آبگیرهای دو سمت آبراهه (پیچ داخلی و پیچ خارجی) در نظر گرفته شده است.

مراجع

Abdollahpour, M. 2010. Performance of sharp-crested weirs in a channel bend. M. Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

Ackers, P. White, W. R., Harrison, A. J. and Perkins J. A. 1989. Weirs and Flumes for Flow Measurement. John Wiely and Sons Pub. USA.

Anon, 1991. Guidelines for stabilizing waterways. Working Group on Waterway Management (WGWM), Standing Committee on Rivers and Catchments, Rural Water Commission of Victoria. Victoria, Australia.

Anon, 2000. Water measurement manual. Chapters 5 and 7. USBR Pub. USA.

Ayase, A. 2011. Simulation of flow over weirs in a channel bend. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

Blanckaert, K. and Graf, W. H. 2001. Mean flow and turbulence in open channel bend. J. Hydraul. Eng. ASCE. 127(10): 835-847.

Boss, M. G. 1988. Discharge Measurement Structures. ILRI Pub. Wageningen.

Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan Co. Pub. New York. USA.

Hosseini-Mobara, S. E. 2012. Performance of Crump weirs in a channel bend. M. Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

Keller, R. J. 1989. Sloping crest crump weir. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 115(2): 231-238.

Rozovskii, I. L. 1957. Flow of Water in Bend of Open Channel. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering.

Salamat, N. 2011. Simulation of flow over weirs in a channel bend with Flow-3D. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

Shukry, A. 1950. Flow around bends in an open flume. Trans. ASCE. 115, 751-779.

Valimohamadi, A. 2011. Performance of broad-crested weirs in a channel bend. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

Yasi, M. 1989. Training and bank protection of alluvial rivers by Bio-technical means. M.Sc. Thesis. Shiraz University. Shiraz. Iran. (in Persian)

AERI *Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering/Vol.16/No.65/2016/P:55-70*

Hydraulic Evaluation of Horizontal and Sloping Broad-Crested Weirs in a Channel Bend

A. Valimohamadi and M. Yasi*

* Corresponding Author: Associate Professor, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran, Iran. Email: m.yasi@ut.ac.ir
Received: 21 September 2015, Accepted: 9 January 2016

Construction of weirs in river bends results in non-uniformity of water flow across a channel bend and can reduce the performance of intake structures on both sides of the river. It was hypothesized that more uniform distribution of flow across the bend can be achieved by changing the weir-crest profile from horizontal to sloping. The present study tested the performance of horizontal and sloping broad-crested weirs in a channel bend to achieve the most uniform distribution of unit flow rates across the river bend. The results indicate that horizontal crested weirs were sufficient at the entrance and exit of the bend, but within the bend reach, sloping crest weirs provided better convergence of the unit flow rates across the bend. It is recommended that the slope of the weir crest incline 2º to 5º toward the outer bank of the bend. The best location for the weir inside the bend is at that angular sections at 30°, 60°, and 45°, respectively. The flow equation over the weir was derived using mathematical and dimensional analysis. Discharge coefficient Cd was examined for free to submerged flow as a function of the position of the weir along the bend, geometry of the weir, upstream head water, and downstream tail water.

Keywords: Broad-Crested Weir, Control Section, River Bend, Sloping Crest Weir