

## کارکرد سرریزهای لبه کوتاه کرامپ در پیچ یک آبراهه

سید عرفان حسینی مبرا<sup>۱</sup> و مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر اختلاف توزیع جریان در عرض و غیریکنواختی راندمان آبیگرهای در دو ساحل چپ و راست رودخانه پدید می‌آورد. یکی از فرضیه‌ها برای برقراری توزیع یکنواخت جریان، تساوی بده جریان در واحد عرض تاج سرریز، از طریق تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیب‌دار است. در این پژوهش، کارکرد سرریزهای کرامپ با تاج افقی و شیب‌دار، با هدف همگرایی توزیع بده واحد جریان در عرض پیچ یک آبراهه، ارزیابی شده است. آزمون تجربی جریان در پیچ یک آبراهه در یک فلوم آزمایشگاهی با پیچ ۹۰ درجه انجام شد و خصوصیات جریان در استقرار سرریزهای با تاج افقی و شیب‌دار، با ارتفاع متغیر و در مقاطع مختلف پیچ کانال، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استقرار سرریزهای با تاج افقی در مقاطع ورودی و خروجی پیچ، مناسب‌تر است. در محدوده میانی پیچ، تاج شیب‌دار با شیب  $88^\circ < \theta < 85^\circ$  (زاویه تاج سرریز با امتداد قائم، به سمت دیواره خارجی پیچ) باعث همگرایی بیشتر توزیع بده جریان در واحد عرض می‌شود. بهترین موقعیت استقرار سرریز، به ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. در این بررسی، معادله جریان آزاد روی سرریز کرامپ در محدوده پیچ، با تلفیق روش تحلیل ریاضی و ابعادی ارائه شده است. ضریب بده جریان آزاد، با آزمون تجربی ارزیابی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پیچ آبراهه، سرریز کرامپ، سرریز با تاج شیب‌دار، مقطع کنترل.

**ارجاع:** حسینی مبرا س. ع. و یاسی م. ۱۳۹۵. کارکرد سرریزهای لبه کوتاه کرامپ در پیچ یک آبراهه. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۵۹-۶۷.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۲- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [m.vasi@ut.ac.ir](mailto:m.vasi@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۲۴

## مقدمه

مجاری طبیعی به ندرت مسیر مستقیم داشته، و به طور عموم در راستای مارپیچی (با پیچ‌های معکوس و متوالی) جریان و جابجایی دارند (یاسی، ۱۳۶۷). احداث سرریز و سدهای انحرافی در محدوده پیچ رودخانه‌ها در بعضی شرایط اجتناب‌ناپذیر است. توزیع نامتقارن جریان در عرض پیچ رودخانه و در طول تاج سرریز، سبب غیریکنواختی بار آبی در طرفین رودخانه و تفاوت کارایی آبگیرهای ساحل چپ و راست رودخانه شده و مشکلاتی را در مراحل بهره‌برداری پدید می‌آورد. از سوی دیگر، کارکرد سرریزها به عنوان سازه اندازه‌گیری جریان در پیچ آبراهه‌ها، نیازمند بررسی‌های بیشتر با استفاده از مدل فیزیکی است.

یکی از فرضیه‌ها برای برقراری توزیع یکنواخت جریان در عرض پیچ رودخانه، تساوی بده جریان در واحد عرض تاج شیب‌دار در محدوده پیچ رودخانه‌ها است. عبدالله‌پور و همکاران (۱۳۸۸) و ولی‌محمدی و یاسی (۱۳۹۰)، به ترتیب کارکرد سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌تخت با تاج شیب‌دار را در مقایسه با سرریزهای با تاج افقی، در یک کانال آزمایشگاهی با پیچ ۹۰ درجه بررسی کردند. سرریزهای لبه‌تیز با شیب تاج ۸۷ درجه (زاویه تاج سرریز نسبت به قائم)؛ و سرریزهای لبه‌تخت با شیب تاج ۸۵-۸۸ درجه، در مقاطع ۳۰ و ۶۰ درجه پیچ مناسب هستند. بررسی پژوهش‌های پیشین ارائه شده در جدول ۱، نشانگر فقدان پژوهش‌های کافی در مورد بهبود کارایی انواع سرریزها در محدوده پیچ رودخانه‌ها است. بررسی حاضر در تکمیل مطالعات پیشین، روی سرریز کرامپ (Crump weir) انجام شده است.

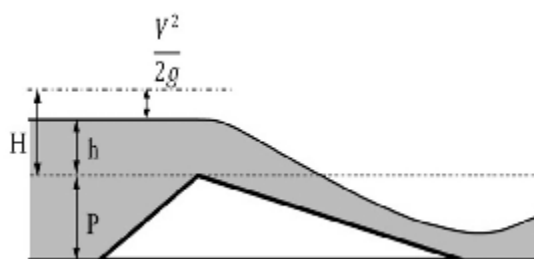
سرریز کرامپ از گروه سرریزهای لبه کوتاه است، که توسط کرامپ (۱۹۵۲) طراحی و ساخته شد. دیواره تاج سرریز از طریق تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیب‌دار است. آزمون کاربرد سرریزهای با بالادست و پایین‌دست تاج سرریز، شیب‌دار بوده؛ و شیب قسمت بالادست بیشتر از پایین‌دست است (شکل ۱).

طول این سرریز در جهت جریان بیشتر از سرریزهای دیگر است. مقطع تاج سرریز، مستطیلی یا مثلثی است (وایت، ۱۹۷۱). از جمله امتیازات سرریزهای کرامپ می‌توان به کاهش شدت تلاطم جریان در پایاب سرریز (با شیب کم دیواره)، هدایت مواد جامد شناور و رسوبات معلق درشت

دانه، سهولت عبور ماهی‌ها، و دقت اندازه‌گیری شدت جریان اشاره کرد (باس، ۱۹۸۸؛ ایکرز و همکاران، ۱۹۸۹ و وزارت عمران آمریکا، ۲۰۰۰).

پیچ و همکاران (۱۹۸۴) نشان دادند که سرریزهای کوچک کرامپ در مسیر مستقیم، سازه‌های اندازه‌گیری دقیق برای جریان‌های کم است. در پژوهش پیچ و وایت (۱۹۸۴)، یک ناحیه چرخشی جریان در پایاب سرریز کرامپ شناسایی شد و یک فرمول تجربی برای شکل هندسی آن ارائه شد. اسمیت (۲۰۰۳) به این نتیجه رسید که سرریز کرامپ (با شیب ۱:۲ در بالادست و ۱:۵ در پایین‌دست)، مانع اصلی در برابر مهاجرت ماهی‌های آزاد، در شرایط جریان کم تا زیاد به حساب نمی‌آید. کلر (۱۹۸۹) با بررسی روی یک مدل فیزیکی نشان داد که، از کاربرد سرریز کرامپ با تاج شیب‌دار در مجاری مستقیم باید اجتناب کرد. در راستای مستقیم و در بارهای آبی به نسبت زیاد، این سرریز مانند نیمی از سرریز کرامپ با مقطع تاج V شکل عمل کرده؛ و میزان آبگذری آن نصف می‌شود. در بارهای آبی کم، مقطع غیرمتقارن جریان سبب کاهش زیاد ضریب بده شده؛ و رسوب‌گذاری در بالادست سرریز بیشتر می‌شود. کلر (۱۹۸۹) کاربرد سرریز کرامپ با تاج شیب‌دار را در نزدیکی پیچ، توصیه کرده است.

هدف اصلی از این پژوهش، آزمون یکنواختی توزیع جریان در عرض پیچ یک آبراهه، در بالادست سرریز کرامپ، از طریق شیب‌دار کردن تاج سرریز بوده است. منظور از یکنواختی، کاهش شدت اختلاف بده جریان در واحد عرض پیچ آبراهه است. همچنین در این مطالعه معادله جریان آزاد از روی سرریز، نیز بررسی شده است.



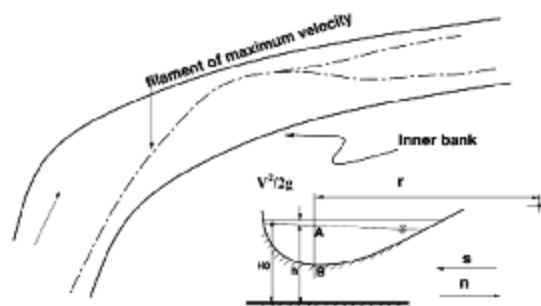
شکل ۱- جریان روی سرریز لبه کوتاه کرامپ

جدول ۱- خلاصه بررسی‌های تجربی انجام شده در پیچ آبراهه‌ها با و بدون استقرار سرریز

پژوهشگر	زاویه پیچ	وجود سرریز	نوع آزمون	خلاصه نتایج
شکری (۱۹۵۰)	۴۵ تا ۱۸۰ درجه	بدون سرریز	بررسی الگوی جریان در پیچ رودخانه	برای یک پیچ با انحنای کم، محل وقوع حداکثر سرعت در نیمه اول پیچ متمایل به جداره داخلی بوده؛ سپس به تدریج به سمت دیواره خارجی است.
روزوفسکی (۱۹۵۷)	۹۰ درجه	بدون سرریز	بررسی محل وقوع حداکثر سرعت در پیچ رودخانه	محل وقوع حداکثر سرعت بعد از رأس پیچ به سمت جداره خارجی پیچ متمرکز می‌شود.
بلانکارت (۲۰۰۱)	۱۲۰ درجه	بدون سرریز	بررسی الگوی جریان و آشفتگی در پیچ رودخانه	جریان ثانویه دوم عاملی برای جلوگیری از فرسایش پیچ بیرونی است و دلیل آن وقوع حداکثر سرعت در مرز قسمت‌های مختلف جریان و دور از جداره خارجی است.
عبدالله‌پور و همکاران (۱۳۸۸)	۹۰ درجه	سرریز لبه‌تیز	ارزیابی کارکرد سرریز لبه‌تیز در پیچ کانال	سرریزهای با تاج افقی در راستای مستقیم و ابتدای پیچ مناسب‌تر است. در پیچ، شیب مناسب برای تاج سرریز در محدوده $85^\circ < \theta < 88^\circ$ است (θ زاویه تاج سرریز نسبت به راستای قائم).
ولی محمدی و یاسی (۱۳۹۰)	۹۰ درجه	سرریز لبه تخت	ارزیابی کارکرد سرریز لبه تخت در پیچ کانال	در محدوده پیچ کانال، شیب مناسب برای تاج سرریز در محدوده $85^\circ < \theta < 88^\circ$ است (θ زاویه تاج سرریز نسبت به راستای قائم).

### تئوری جریان روی سرریز در پیچ

تئوری یکنواختی "بده جریان در واحد عرض" در عرض پیچ آبراهه، توسط هندرسون (۱۹۶۶) برای محاسبه "پروفیل عرضی کف در پیچ آبراهه" ارائه شد. در این پژوهش از این فرضیه برای توسعه پروفیل عرضی کف به تاج سرریز استفاده شده است. در پیچ یک آبراهه با مقطع عرضی طبیعی براساس با شکل ۲، با حرکت از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی (با کاهش برداری n یا افزایش فاصله شعاعی r از مرکز انحنای داخلی پیچ)، ارتفاع سطح آب (h یا Z) افزایش و سرعت متوسط عمقی (V) کاهش می‌یابد.



شکل ۲- جریان در عرض پیچ آبراهه (هندرسون، ۱۹۶۶)

هندرسون (۱۹۶۶) این روند را با ترکیب معادلات انرژی و اولر (با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیکی در عمق و تساوی انرژی رشته‌های جریان در عرض پیچ آبراهه)، با معادلات عمومی (۱) گزارش کرده است.

$$\frac{dZ}{dn} = \frac{V^2}{gr} ; \frac{dh}{dn} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dn} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dn} + \frac{V}{r} = 0$$

اگر q بده واحد عرض در عرض مقطع ثابت در نظر گرفته شود، خطوط جریان در عرض پیچ به شکل حلقه‌های متحدالمرکز خواهند بود. با فرض ثابت بودن مقدار انرژی کل H در هر مقطع و ثابت بودن بده واحد عرض در امتداد شعاعی پیچ  $(q=Vy=C)$  و با فرض برقراری جریان متغیر تدریجی در عرض مقطع، می‌توان با استفاده از معادله سرعت جریان گردابی آزاد  $(Vr=V_0r_0=C)$  و معادله برنولی در ترکیب با معادلات (۱)، معادله زیر را به دست آورد (هندرسون، ۱۹۶۶).

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

که در آن z ارتفاع کف بستر نسبت به کف بستر در مقطع بالادست پیچ؛  $V_0$  و  $H_0$  مقادیر سرعت و عمق در بالادست؛ و  $r_0$  شعاع خارجی پیچ است. شکل ۳ تغییر ارتفاع کف

داده شده است. در این بررسی با تلفیق روش تحلیل ریاضی و ابعادی، معادله جریان آزاد روی سرریز کرامپ (با تاج افقی یا شیبدار) در محدوده پیچ، با تقریب درجه چهارم، به صورت زیر به دست آمده است.

$$Q = C_d \frac{4}{15} \sqrt{2g} \tan \theta h^{\frac{5}{2}}; \text{ If } \frac{P_2}{h} < 1 \quad (3)$$

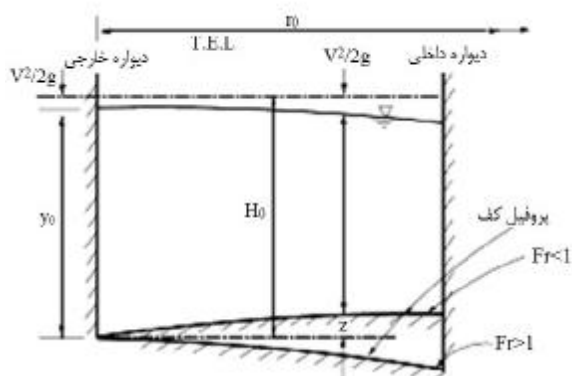
$$Q = C_d \frac{4}{15} \sqrt{2g} \tan \theta h^{\frac{5}{2}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{h} \right)^2 \right]; \text{ If } \frac{P_2}{h} > 1 \quad (4)$$

در این معادلات  $P_2$  ارتفاع سرریز در دیواره داخلی پیچ (ارتفاع بیشتر سرریز)؛  $h$  اختلاف سطح آب مقطع کنترل بالادست با تاج سرریز در دیواره خارجی؛  $\theta$  زاویه تاج سرریز نسبت به محور قائم، است. براساس شکل ۴، برای شرایط جریان در محدوده مقطع مثلی شیبدار سرریز ( $h < P_2$ )، پارامتر  $(P_2/h)$  مؤثر نخواهد بود. در شرایط جریان مرکب روی سرریز ( $h > P_2$ )، تأثیر پارامتر  $(P_2/h)$  به طور مستقیم در رابطه (۴) مشخص است. ضریب بده ( $C_d$ ) به صورت تابعی از انحنا نسبی پیچ، موقعیت سرریز در پیچ، هندسه سرریز و بار آبی در بالادست سرریز، از رابطه بدون بعد زیر ارزیابی می شود:

$$C_d = f_3 \left( \frac{h}{P_1}, \theta, \beta, \frac{r_c}{B}, \lambda, \alpha, \frac{b}{B} \right) \quad (5)$$

که در آن بر اساس شکل ۵،  $B$  عرض کانال؛  $b$  طول افقی تاج سرریز؛  $P_1$  ارتفاع سرریز در دیواره خارجی پیچ (ارتفاع کمتر سرریز)؛  $r_c$  شعاع انحنا مرکزی پیچ؛  $\lambda$  زاویه مرکزی پیچ؛  $\beta$  زاویه موقعیت قرارگیری سرریز در پیچ؛ و  $\alpha$  زاویه استقرار محور سرریز نسبت به ساحل، است. تأثیر پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی مشخص (مانند: تأثیر بار سرعت جریان در بالادست سرریز، هوادهی تیغه جریان، و عمق پایاب سرریز در استغراق جریان) و عوامل نامشخص (مانند کشش سطحی، عدد رینولدز) در ارزیابی تجربی ضریب بده جریان ( $C_d$ )، در نظر گرفته می شود. در این بررسی تجربی، پارامترهای پیچ  $(\lambda, \alpha, r_c/B)$ ؛ و فشردگی جانبی سرریز  $(b/B)$  ثابت بوده است.

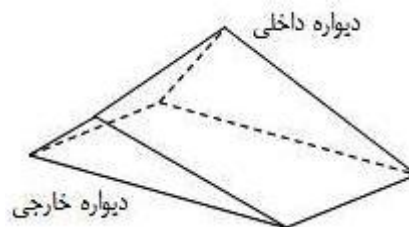
آبراهه را بر حسب رژیم جریان (زیر یا فوق بحرانی) که لازمه ثابت بودن دبی در واحد عرض است، نشان می دهد (هندرسون، ۱۹۶۶).



شکل ۳- پروفیل عرضی کف آبراهه در یک پیچ ساده در رژیم های مختلف جریان اقتباس از (هندرسون، ۱۹۶۶)

با توجه به معادله (۲)، در جریان زیر بحرانی، با ایجاد افزایش ارتفاع کف بستر (به اندازه  $z$ ) به سمت دیواره داخلی پیچ، می توان به توزیع یکنواخت تر جریان در عرض پیچ آبراهه دست یافت (بثورت، ۱۹۷۷).

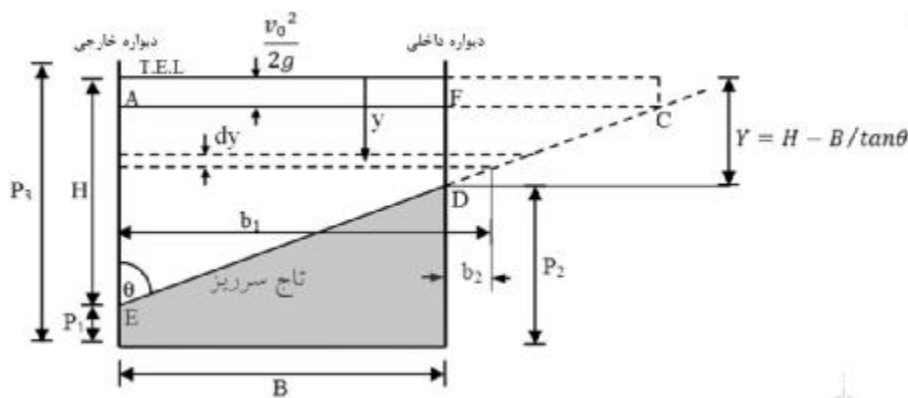
پروفیل عرضی کف در پیچ آبراهه را می توان به صورت سرریزی با ارتفاع متوسط صفر، در نظر گرفت. با توسعه پروفیل عرضی کف به تاج سرریز و با انتخاب ارتفاع  $P_1$  (ارتفاع سرریز در دیواره خارجی)، می توان به طرح تاج سرریزی با توزیع یکنواخت تر جریان در مقطع کنترل بالادست سرریز دست یافت. با فرض خطی بودن تاج سرریز در عرض پیچ، سرریز شبیه سازی شده با معادله (۲) در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- پروفیل عرضی تاج سرریز شیبدار کرامپ در پیچ

#### معادله جریان بر روی سرریز با تاج شیبدار

برای سرریز استاندارد کرامپ با تاج افقی و در راستای مستقیم، معادلات جریان توسط سلیشی (۲۰۰۹) شرح



شکل ۵- پروفیل عرضی تاج سرریز شیبدار در پیچ یک آبراهه

### مواد و روش‌ها

مطالعات تجربی در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، انجام شده است. آزمون تجربی جریان در یک فلوم آزمایشگاهی از جنس بتن مسلح، با پیچ ۹۰ درجه، طول ۲۴ متر، عرض ۱/۰ متر، عمق ۰/۸ متر، شعاع ۳ متر، و شعاع انحنای نسبی ۳، بررسی شد.

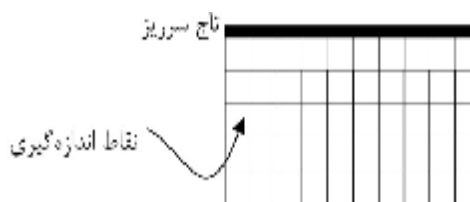
مدل سرریزها از نوع کرامپ، با تاج افقی و تاج شیبدار انتخاب شدند. سرریزها بدون فشردگی جانبی؛ با شیب دیواره بالادست 1V:2H و دیواره پایین دست 1V:5H؛ در سه ارتفاع مختلف ساخته شدند. خصوصیات جریان در شرایط مختلف استقرار سرریزهای با تاج افقی و شیبدار، بررسی شد. آزمایش‌ها برای ۳ آزمون جریان (کم، متوسط و زیاد)؛ با ۳ ارتفاع متغیر سرریز و ۴ شیب تاج سرریز (شامل یک آزمون برای تاج افقی) در ۶ موقعیت متفاوت از

کانال (یکی در راستای مستقیم بالادست و ۵ موقعیت در محدوده پیچ کانال) انجام گردید. دامنه تغییر متغیرهای هندسی سرریز و متغیرهای جریان در جدول ۲ ارائه شده است. در این بررسی، تعداد ۱۶۲ آزمون تجربی انجام شد. آزمون‌ها براساس فرضیه یکنواختی توزیع عرضی بده واحد عرض در مقطع کنترل بالادست سرریز، انجام شد. در هر آزمون، پارامترهای بده، ارتفاع سطح آب و سرعت دوبعدی (سطح افق) در نقاط مختلف عرضی و عمقی در مقاطع بالادست سرریز اندازه‌گیری شدند. شکل ۶ شبکه‌بندی نقاط اندازه‌گیری در پلان بالادست سرریز را نشان می‌دهد. ارزیابی توزیع عرضی بده واحد عرض (q)، در مقطع کنترل سرریز انجام شد. برای تعیین محل مقطع کنترل، پروفیل سطح آب در بالادست سرریز (در شبکه شکل ۶) اندازه‌گیری شده و فاصله آستانه افت سطح آب بالادست از تاج سرریز برداشت شد.

جدول ۲- مشخصات آزمون‌های تجربی، در هر یک از شش موقعیت استقرار سرریز کرامپ در بازه پیچ آبراهه

عدد رینولدز Re	عدد فرود در بالادست سرریز Fr	بار آبی h (m)×10 <sup>2</sup>	ارتفاع سرریز در دیواره داخلی P <sub>2</sub> : (m)×10 <sup>2</sup>	ارتفاع سرریز در دیواره خارجی P <sub>1</sub> : (m)×10 <sup>2</sup>	بده جریان Q (m <sup>3</sup> /s)×10 <sup>3</sup>
جریان متلاطم کامل Re> ۲۴۰۰۰	سه رژیم جریان ۰/۰۵ تا ۰/۲	سه تراز سطح آب ۲۲ تا ۴۴	چهار ارتفاع سرریز ۱۴ تا ۴۱	سه ارتفاع سرریز ۱۴، ۲۰ و ۳۰	سه بده جریان ۰/۲۵، ۵۰ و ۷۵

سرریزهای کرامپ با تاج افقی به عنوان شاهد، با سه ارتفاع مختلف، در مقاطع مختلف کانال (یک موقعیت در راستای مستقیم بالادست و ۵ موقعیت در محدوده پیچ) مستقر شده و شرایط جریان در مقطع کنترل بالادست آن‌ها ارزیابی شد. مقطع کنترل برای سرریزهای با تاج افقی در بالادست و ابتدای پیچ، به صورت خطی موازی با تاج



شکل ۶- پلان شبکه اندازه‌گیری در بالادست سرریز

با حرکت به سمت مقاطع پایین تر پیچ، توزیع جریان به سمت دیواره خارجی پیشروی کرده؛ و زاویه شیب تاج کمتری را نیاز دارد.

در یک بار آبی مشخص، با افزایش ارتفاع سرریز ( $P_i$ )، زاویه مورد نیاز برای شیب تاج سرریز کمتر می شود. با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع سرریز، سرعت بالادست کمتر شده؛ و یکنواختی سرعت و بده در عرض به نسبت بیشتر می شود، این امر دور از انتظار نیست. از سوی دیگر، افزایش بار آبی روی سرریز، تأثیر زیادی بر تغییر زاویه شیب تاج سرریز ندارد.

نتایج آزمون تجربی در طرح شیب تاج سرریز کرامپ در جدول ۳، خلاصه شده است. نتایج نشان می دهد که استقرار سرریزهای با تاج افقی در راستای مستقیم بالادست، ابتدای پیچ و پایین دست پیچ مناسب تر است. در محدوده پیچ، استقرار سرریزهای کرامپ با تاج شیب دار (برای شیب تاج به سمت دیواره خارجی پیچ) کارآیی بهتری دارد. بهترین موقعیت استقرار سرریزهای کرامپ (با تاج افقی یا شیب دار) در پیچ، به ترتیب در مقاطع زاویه ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. در محدوده پیچ، با افزایش بار آبی یا بده جریان و با کاهش ارتفاع سرریز، توزیع متقارن تری از جریان در بالادست سرریز شیب دار ایجاد می شود.

آزمون های تجربی عبدالله پور و همکاران (۱۳۸۸) در سرریزهای لبه تیز؛ و ولی محمدی و یاسی (۱۳۹۰) برای سرریزهای لبه تخت، نشان دهنده کارکرد بهتر سرریزهای شیب دار در پیچ بود. نتایج این بررسی ها نشان داد که، شیب مناسب برای تاج سرریز در محدوده  $85^\circ < \theta < 88^\circ$  است ( $\theta$ ، زاویه تاج سرریز نسبت با راستای قائم). براساس جدول ۳، دامنه شیب  $85^\circ < \theta < 88^\circ$  (انحراف زاویه ای ۲ تا ۵ درجه از سطح افق)، برای تاج سرریزهای کرامپ در محدوده میانی پیچ، نیز مناسب است.

در شرایط جریان آزاد، ضریب دبی ( $C_d$ ) برای سرریزهای افقی در محدوده ۰/۶۱ تا ۰/۷۸ و در سرریزهای با تاج شیب دار بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۵ است. تأثیر موقعیت سرریز در پیچ روی ضریب  $C_d$  معنی دار نبوده؛ و از میانگین آن در سه مقطع ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده است. با شیب دار شدن تاج سرریز در میانه پیچ، ضریب جریان آزاد کم می شود. متوسط ضریب  $C_d$  در سرریزهای با تاج افقی ۰/۷۰ و در سرریزهای با تاج شیب دار ۰/۵۴ است.

سرریز و عمود بر راستای جریان، در فاصله  $h(2.0-4.8)$  در بالادست سرریز قرار دارد ( $h$  بار آبی در مقطع کنترل بالادست نسبت به تراز متوسط تاج سرریز است). در محدوده پیچ، مقطع کنترل به صورت خطی مورب با زاویه  $0^\circ < \omega < 16^\circ$  = زاویه نسبت به راستای تاج سرریز در سطح افق)، و به فاصله  $h(1.0-7.6)$  از سمت دیواره خارجی، در بالادست سرریز قرار دارد (حسینی میرا و یاسی، ۱۳۹۱).

بده واحد عرض در نقطه  $i$  ام از عرض مقطع کنترل سرریز ( $q_i$ )، از حاصل ضرب سرعت متوسط عمقی  $V_i$  و عمق موضعی آب  $y_i$ ، از معادله زیر محاسبه می شود.

$$q_i = V_i \times y_i \quad (6)$$

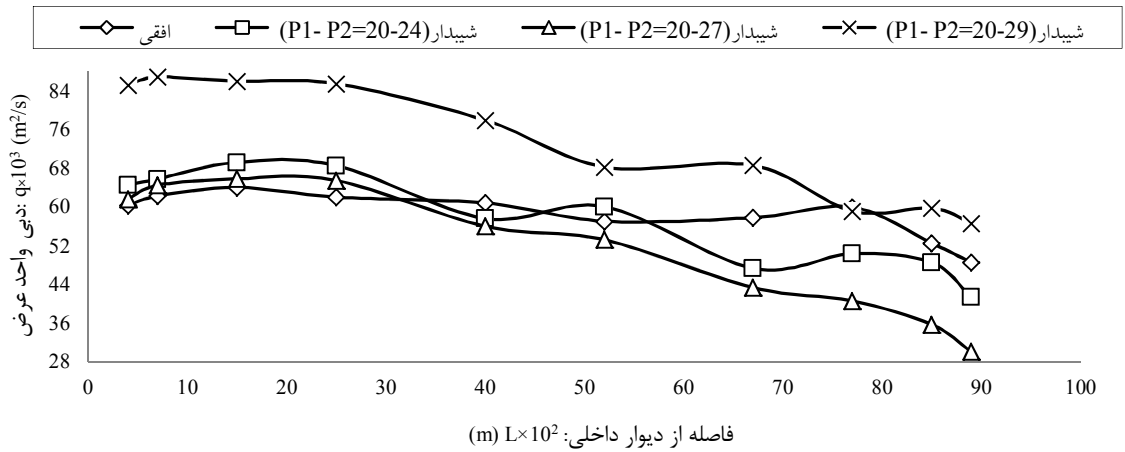
$V_i$  سرعت متوسط عمقی در نقطه  $i$  ام است؛ که از داده های برداشت شده از سه نقطه عمقی (در ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق موضعی آب)، محاسبه شده است.

### نتایج و بحث

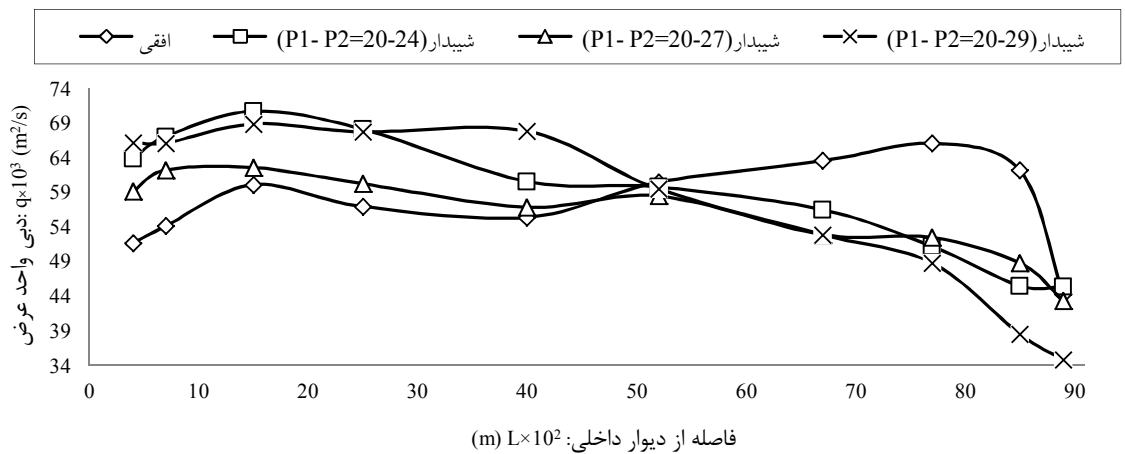
نتایج ارزیابی توزیع جریان در طول تاج سرریزهای کرامپ در عرض پیچ، به تفکیک برای آزمون های تاج افقی و تاج شیب دار در زیر ارائه می شود.

شکل ۷ تا ۱۰ نمونه هایی از توزیع عرضی بده واحد عرض ( $q$ ) در مقطع کنترل سرریز را برای بده جریان متوسط ( $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ )، و برای سرریز با ارتفاع  $P_1 = 0.2 \text{ m}$  (در دیوار خارجی، براساس شکل ۵)، نمایش می دهند. در هر یک از ۶ موقعیت استقرار سرریز در کانال منحنی، "سرریز با تاج افقی" به عنوان شاهد بوده؛ تا با سه شیب مختلف تاج مقایسه شود. همسان بودن  $q$  در عرض تاج انتظار نمی رود؛ بلکه توزیع یکنواخت تر  $q$  (یا شدت اختلاف کمتر  $q$ ) معیار شناسایی شیب برتر تاج سرریز است.

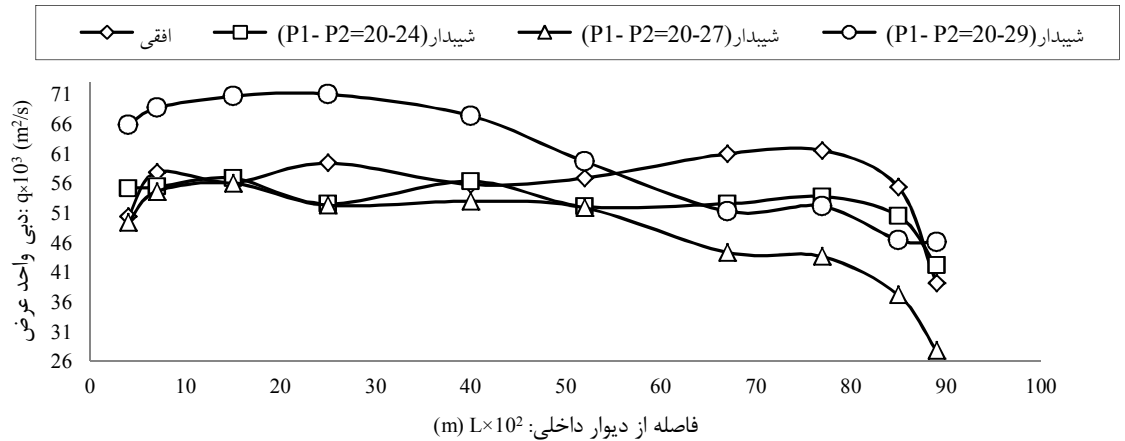
نتایج نشان می دهد که، موقعیت استقرار سرریز در پیچ روی توزیع عرضی  $q$  در مقطع کنترل سرریز، و در نتیجه روی شیب مورد نیاز تاج سرریز تأثیر دارد. در بازه های مستقیم بالا و پایین دست پیچ، و در مقطع ورودی پیچ، سرریز با تاج افقی مناسب تر است. با توجه به هدف همگرایی توزیع  $q$  در طول تاج سرریز، زاویه شیب تاج سرریز با حرکت از ابتدای پیچ به سمت میانه افزایش یافته؛ و سپس به سمت انتهای پیچ، به تدریج کاهش می یابد. در مقطع ۳۰ درجه که تمرکز سرعت و بده جریان به سمت دیواره داخلی است، شیب تاج بیشتری لازم است.



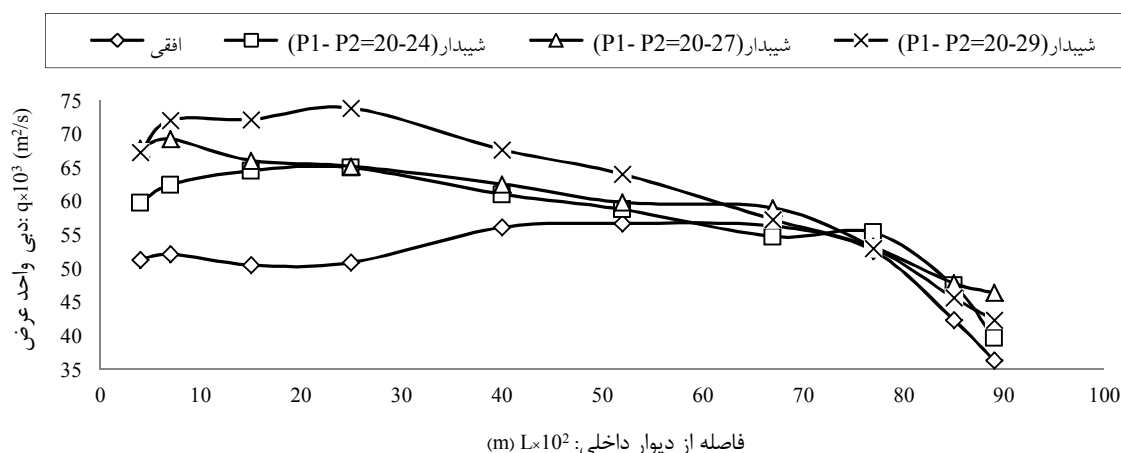
شکل ۷- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیب‌دار و افقی کرامپ در مقطع ورودی پیچ



شکل ۸- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیب‌دار و افقی کرامپ در زاویه ۳۰ درجه پیچ



شکل ۹- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیب‌دار و افقی کرامپ در زاویه ۴۵ درجه پیچ



شکل ۱۰- توزیع عرضی دبی واحد عرض برای سرریزهای شیبدار افقی کرامپ در زاویه ۶۰ درجه پیچ

جدول ۳- متوسط زاویه شیب تاج سرریز کرامپ به سمت دیواره خارجی (درجه)

نسبت بار آبی به ارتفاع تاج سرریز در دیواره خارجی ( $h/P_1$ )			موقعیت سرریز از ابتدای پیچ
۰/۷	۰/۵	۰/۳	ورودی پیچ (مقطع صفر درجه)
۰/۰	۰/۰	۰/۰	میانه پیچ (مقطع ۳۰ درجه)
۳/۱	۴/۱	۳/۸	میانه پیچ (مقطع ۴۵ درجه)
۲/۹	۲/۶	۲/۵	میانه پیچ (مقطع ۶۰ درجه)
۲/۵	۲/۷	۲/۱	خروجی پیچ (مقطع ۹۰ درجه)
۰/۰	۰/۰	۰/۰	

### نتیجه گیری

احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه‌ها، در بعضی شرایط اجتناب‌ناپذیر است. توزیع نامتقارن جریان در عرض پیچ رودخانه و در طول تاج سرریز، مشکلاتی را در مراحل بهره‌برداری پدید می‌آورد. فرضیه توزیع یکنواخت‌تر بده جریان در واحد عرض تاج سرریز ( $q$ )، 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 کرامپ با تاج افقی و شیبدار، در عرض پیچ یک آبراهه، به شرح زیر خلاصه می‌شود.

سرریزهای با تاج افقی در راستای مستقیم بالا و پایین دست پیچ؛ در ابتدای پیچ، و در ناحیه خروجی پیچ مناسب‌تر هستند.

در محدوده پیچ، استقرار سرریزهای کرامپ با تاج شیبدار کارایی بهتری دارد. موقعیت استقرار سرریز در پیچ، روی زاویه شیب سرریز تأثیر دارد (جدول ۳).

شیب تاج سرریز با حرکت از ابتدای پیچ به وسط افزایش؛ و سپس به سمت انتهای پیچ، به تدریج کم می‌شود (برای شیب تاج به سمت دیواره خارجی پیچ است). بهترین

موقعیت استقرار سرریز، به ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. شیب مناسب برای تاج سرریز کرامپ، در محدوده  $85^\circ < \theta < 88^\circ$  است ( $\theta = 0$ ) زاویه تاج سرریز با راستای قائم). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که، تأثیر نوع سرریز (لبه‌تیز، لبه تخت و لبه کوتاه کرامپ) روی شیب تاج سرریز در محدوده پیچ، کم است. با افزایش ارتفاع سرریز، یکنواختی جریان در بالادست سرریز بیشتر شده؛ و زاویه شیب تاج سرریز کمتر خواهد بود. افزایش بار آبی روی سرریز، تأثیر زیادی بر زاویه شیب تاج سرریز ندارد.

مقطع کنترل برای سرریزهای با تاج افقی در بالادست و ابتدای پیچ، به صورت خطی موازی با تاج سرریز و عمود بر راستای جریان، در فاصله  $h(2.0-4.8)$  در بالادست سرریز قرار دارد ( $h$  بار آبی در مقطع کنترل بالادست نسبت به تراز متوسط تاج سرریز است). در محدوده پیچ، مقطع کنترل در بالادست سرریز به صورت خطی مورب با زاویه  $16^\circ < \omega < 0^\circ$  ( $\omega = 0$ ) زاویه نسبت به راستای تاج سرریز در سطح افقی، و به فاصله  $h(1.0-7.6)$  از سمت دیواره خارجی، قرار دارد.



12. Boss M. G. 1988. Discharge measurement structures, ILRI, Wageningen. 230 p.
13. Crump E. S. 1952. A new method of gauging stream flow with little afflux by means of a submerged weir of triangular profile. Proceedings of the institution, Civil Engineering, 1(1): 223-242.
14. Henderson F. M. 1966. Open channel flow. Macmillan Co. New York. N.Y. 320 p.
15. Keller R. J. 1989. Sloping crest crump weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 115(2): 231-238.
16. Sileshy R. 2009. Flow over a Crump weir. Water Resources Engineering Laboratory. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering. The University of Alabama. 25 p.
17. Shukry A. 1950. Flow around bends in an open flume. Transaction ASCE. 115 p.
18. Smite F. 2003. The Hydraulic of Crump Weir. Earth Surface Processes and Landform. Earth Surface Processes and Landform. 27(10): 1057-1085.
19. USBR. 2000. Water Measurement Manual, USBR, Chapters 5 and 7.
20. White W. R. 1971. The design and calibration of flat-V weirs. HRS Report No. INT 88. HR Wallingford. U.K. 84 p.

با شیب‌دار شدن تاج سرریز در میانه پیچ، ضریب جریان آزاد ( $C_d$ ) کم می‌شود. متوسط ضریب  $C_d$  در سرریزهای با تاج افقی ۰/۷۰؛ و در سرریزهای با تاج شیب‌دار ۰/۵۴ است.

#### منابع

۱. حسینی مبراس. ع. و یاسی م. ۱۳۹۱. مقاطع کنترل در سرریزهای کرامپ واقع در پیچ ۹۰ درجه. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. ۲۰ و ۲۱ شهریور ۱۳۹۱. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ساری.
۲. عبدالله‌پور م. یاسی م. و بهمنش ج. ۱۳۸۸. جریان بر روی سرریز لبه‌تیز با تاج شیب‌دار در پیچ رودخانه. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. ۲۴ تا ۲۶ آذر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران. تهران.
۳. ولی محمدی مقیم، ا. و یاسی م. ۱۳۹۰. مقایسه عملکرد سرریزهای لبه‌تیز و لبه تخت در پیچ ۹۰ درجه. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. ۱۳ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران.
۴. یاسی م. ۱۳۶۷. اصلاح مسیر و حفاظت دیواره رودخانه‌ها با روش‌های طبیعی - سازه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه آبیاری. دانشگاه شیراز. شیراز، ۳۴۰ ص.
5. Ackers P. White W. R. Harrison A. J. Perkins J. A. 1989. Weirs and flumes for flow measurement, John Wiely and Sons. 360 p.
6. Bathurst J. C. and Hey R. D. 1977. Direct measurements of secondary currents in river bends. Nature. 269: 504-506.
7. Bhuiyan F. Hey R. and Wormleaton P. 2007. Hydraulic evaluation of W-weir for river restoration, Journal of Hydraulic Research, ASCE. 133(6): 596-609.
8. Bitch S. 1984. Sloping line crest gauging weirs in graded rivers. Civil Engineering. Trans. Institute of Engineers, Australia. CE14(2): 142-146.
9. Bitch S. White W. R. and Sirout. J. 1984. Water resources engineering laboratory files for open channel. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 131(8): 682-693.
10. Blanckaert K. and Graf W. H. 2001. Mean flow and turbulence in open channel bend. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 127(10): 1-12.
11. Bonham A. J. 1972. Sloping line crest gauging weirs in graded rivers. Civil Engineering Transaction. Institute of Engineers, Australia. CE14(2): 142-146.

