



بررسی اثر شیب طولی تاج سرریز لبه پهن در توزیع جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف یک پیچ آبراهه

عاطفه فرهادی بانسوله^۱، مهدی یاسی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

چکیده

احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر نبودن تقارن توزیع جریان در آبگیرهای طرفین رودخانه پدید می‌آورد. یکی از فرضیه‌ها جهت یکنواختی جریان عرضی، تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیب‌دار در عرض پیچ آبراهه است. در این پژوهش، کارکرد سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ آبراهه، با هدف یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرهای ساحل چپ و راست، در شرایط جریان آب صاف مورد ارزیابی قرار گرفته است. کارکرد سرریز با تاج افقی و شیب‌دار در مدل فیزیکی مورد آزمون قرار گرفت و مدل ریاضی FLOW-3D براساس این نتایج تجربی واسنجی و تأیید گردید. با اطمینان از قابلیت مدل ریاضی، سناریوهای جدید برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف (نظیر موقعیت سرریز در پیچ، شیب تاج سرریز، هندسه آبگیر شامل زاویه آبگیر، عرض آبگیر و ارتفاع آستانه آبگیر و شرایط جریان بالادست) مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که سرریز شیب‌دار عملکرد بهتری در کاهش شیب عرضی در مقاطع بالادست سرریز و افزایش بده جریان به آبگیرها دارد. بهترین شرایط برای یکنواختی بده جریان در آبگیرهای طرفین پیچ آبراهه، استقرار سرریز شیب‌دار (با زاویه تاج دو تا پنج درجه نسبت به افق و شیب به سمت دیواره خارجی) در موقعیت ۳۰ تا ۶۰ درجه در میانه پیچ، با زاویه آبگیری بین صفر و ۶۰ درجه، با نسبت (۱:۱۰) عرض آبگیر به آبراهه و همراه با آستانه آبگیر است. زاویه آبگیری صفر درجه بهترین است، ولی برای زاویه آبگیری ۹۰ درجه، احداث سرریز در موقعیت ۳۰ درجه از ابتدای پیچ توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آبگیر، پیچ آبراهه، سرریز با تاج شیب‌دار، سرریز لبه پهن، مدل FLOW-3D

Study of the effect of sloping-broad crested weir on the uniformity of flow into bilateral intakes in a channel bend

Atefeh Farhadi Bansoleh¹, Mehdi Yasi^{2*}

1. Former M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: April 25, 2020

Accepted: September 21, 2020

Abstract

Construction of weirs in river bends results in the non-uniformity of water flow across the channel bend and the poor performance of intake structures on both sides of the river. The main hypothesis for enhancing the uniformity is the change of the weir-crest profile from horizontal to sloping crest. The aim of the present study was to test the performance of horizontal and sloping broad-crested weirs in a channel bend under clear flow conditions, using both experimental and numerical models. The FLOW-3D model was calibrated and verified with the use of the experimental data. The numerical model was then applied for the simulation of different scenarios to test the effects of such parameters as the location of the weir at the bend; slope of the weir's crest; geometries of bilateral intakes including alignment, width and sills; and upstream flow conditions. The results indicate that the sloping crest weir provides an enhance performance by reducing transverse gradients of water surface at upstream control section, and thereby increasing the flow rates towards the two bilateral intakes. It is concluded that a weir with sloping crest (in the range of 2° to 5° toward the outer bank of the bend), at the position of 30 to 60 degrees along the bend, with the intake angle in the range of zero and 60 degrees (respect to the main channel flow), the ratio of intake to main channel width of (1:10), and with the use of entrance sill satisfies the requirements for a better performance. The intake angle of zero is the best choice. In the case of normal intakes, the weir is recommended to be placed at 30 degrees downstream of the bend entrance.

Keywords: Broad-crested weir, FLOW-3D model, River bend, River intake, Sloping crest weir.

مقدمه

بهترین موقعیت برای احداث سازه‌های آبی (نظیر سرریز یا بند انحرافی)، بازه مستقیم رودخانه (یا بازه مستقیم حد فاصل دو پیچ معکوس در رودخانه‌های پیچان‌رودی) است. براساس نتایج تجربی کارگروه مدیریت رودخانه استرالیا (۱۵)، پیچ بر خصوصیات جریان بالادست و پایین‌دست (تا حد قابل به فاصله دو برابر عرض رودخانه 2B) تأثیر دارد. بنابراین، احداث سازه‌های عرضی در فاصله بیش از 2B از بالا یا پایین پیچ مناسب‌تر است. شواهد زیادی از قرارگیری سد انحرافی در محدوده پیچ رودخانه در ایران و جهان وجود دارد و گاهی به دلیل محدودیت‌های طبیعی و یا مسائل اجتماعی مجبور به ساخت سرریز در پیچ هستند. همچنین نیاز آبی سواحل اطراف، ساخت آبگیر در دو طرف سرریز را ایجاب می‌کند. نوک و همکاران (۱۴) بهترین محل آبگیر برای هدایت جریان و جلوگیری از ورود بار بستر را ساحل خارجی پیچ معرفی نمود. احداث سرریز در محدوده پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر توزیع نامتقارن جریان آب و رسوب 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 می‌شود و مشکلاتی را در مراحل بهره‌برداری پدید می‌آورد. برای علاج بخشی، گزینه‌های مختلفی وجود دارد (نظیر احداث آب‌شکن برای هدایت جریان به آبگیرها، تغییر عرض و بازشدگی دهانه‌های آبگیر و ...).

یکی از فرضیه‌ها جهت یکنواختی بده جریان در واحد عرض تاج سرریز، تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیب‌دار است، که به تازگی مورد توجه و آزمون قرار گرفته است. عبدالله‌پور (۵) به بررسی تجربی اثر سرریز لبه تیز با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ ۹۰ درجه پرداخت. او با بررسی پروفیل‌های عرضی سطح آب در

مقطع کنترل و همچنین در ابتدای پیچ و بالادست پیچ به این نتیجه رسید که کارکرد سرریزهای لبه تیز با تاج شیب‌دار در مقاطع صفر درجه و 2B بالادست مناسب نبوده و سرریزهای لبه تیز با تاج افقی برای این مقطع پیشنهاد می‌گردد و سرریزهای لبه تیز با شیب تاج دو تا پنج درجه (زاویه تاج سرریز نسبت به افق) در مقاطع ۳۰ و ۶۰ درجه مناسب می‌باشند. ولی محمدی و یاسی (۸) به بررسی تجربی ساختار جریان روی سرریزهای لبه تخت با تاج افقی و شیب‌دار در موقعیت‌های مختلف پیچ ۹۰ درجه پرداخت. با مقایسه نتایج بده واحد عرض با نتایج نظیر از عبدالله‌پور (۵) به این نتیجه رسید که به‌طور کلی در محدوده پیچ آبراهه استقرار سرریزهای لبه‌پهن با تاج شیب‌دار مناسب‌تر بوده که شیب مناسب برای تاج سرریز در محدوده $2 < \theta < 5$ (زاویه تاج سرریز نسبت به راستای افق، برحسب درجه) به‌دست آمده است و بهترین موقعیت سرریز در مقطع ۳۰ درجه و پس از آن به ترتیب ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. حسینی‌میرا و یاسی (۲) به بررسی تجربی جریان بر روی سرریز کرامپ در پیچ ۹۰ درجه با شعاع انحنا سه متر آبراهه پرداختند. نتایج آزمون تجربی نشان می‌دهد که استقرار سرریز با تاج افقی در راستای مستقیم بالادست، ابتدا و انتها پیچ مناسب‌تر است. در محدوده پیچ استقرار سرریزهای کرامپ با تاج شیب‌دار (جهت شیب به سمت دیواره خارجی پیچ) کارایی بهتری دارد و شیب مناسب $2 < \theta < 5$ درجه است. با افزایش بار آبی یا بده جریان و با کاهش ارتفاع سرریز، توزیع متقارن‌تری از جریان در بالادست سرریز شیب‌دار ایجاد می‌شود.

رستم‌آبادی (۳) در تعیین شرایط مناسب آبگیری جانبی از قوس، نسبت‌های بهینه $h_s/h_m = 0/8$ (ارتفاع آستانه آبگیر به عمق جریان)، $\alpha = 70^\circ$ (زاویه آبگیری)، $B_i/B_m = 0/55$ و $\theta_{ci}/\theta_c = 0/55$ که دارای بیش‌ترین ضریب

مطالعات توسط میرلس و همکاران (۱۳) برای سامانه آبگیر نیروگاه برقابی نوع تلمبه- ذخیره‌ای در پرتقال انجام یافت، که نتایج شبیه‌سازی مدل FLOW-3D در مقایسه با نتایج نظیر از مدل فیزیکی رضایت‌بخش بوده است.

در مجموعه پژوهش حاضر، کارکرد سرریزهای لبه پهن در پیچ یک آبراهه، با هدف یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرهای ساحل چپ و راست، در شرایط جریان آب صاف، با ترکیب مدل فیزیکی و مدل عددی FLOW-3D مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی برای سرریزهای با تاج افقی توسط فرهادی بانسوله و یاسی (۷) گزارش گردیده است. براساس این نتایج، بهترین شرایط برای یکنواختی بده جریان در آبگیرهای طرفین سرریز، استقرار سرریز در موقعیت ۶۰ درجه در میانه پیچ، با نسبت (۱:۱۰) عرض آبگیر به آبراهه، همراه با آب‌پایه و با زاویه آبگیری صفر درجه می‌باشد. کارایی زاویه آبگیری ۶۰ درجه بهتر از ۹۰ درجه بوده است. در تکمیل این مطالعات، با استفاده از مدل عددی واسنجی و تأییدشده FLOW-3D، اثربخشی شیب طولی تاج سرریز لبه پهن (شیب تاج سرریز در عرض آبراهه) در یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف پیچ آبراهه بررسی گردید. در پژوهش حاضر، نتایج آزمون‌های جانمایی سرریز با تاج شیب‌دار در موقعیت‌های مختلف پیچ آبراهه و با گزینه‌های مختلف هندسه دهانه آبگیر، ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی تجربی

پارامترهای متعدد هندسی و هیدرولیکی جریان در عملکرد سرریز در یکنواختی جریان در آبگیرها مؤثر می‌باشند. تابع عمومی برای ارزیابی بده جریان ورودی به آبگیر به صورت رابطه (۱) است:

$$f(q_{out}, q_{in}, U, h, S, B, b, P_t, P_1, P_2, W, R, \alpha, \beta, \mu, \rho, g, \theta) = 0 \quad (1)$$

پاد رسوبی (یک منهای رسوب نسبی واردشده نسبت به جریان نسبی واردشده به آبگیر) معرفی کرد. از میان پنج زاویه آبگیری (۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۰ و ۹۰ درجه) بهترین زاویه برای رسوب‌گیری را ۶۰ درجه و بهترین زاویه برای ورود بده بیش‌تر به آبگیر را ۳۰ درجه و بدترین زاویه رسوب-گیری را ۹۰ درجه اعلام کرد. امروزه مدل‌های ریاضی به‌علت صرفه‌جویی در وقت و هزینه بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرند. شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه با مدل‌های عددی مختلفی صورت می‌گیرد. شانل و دورینگ (۱۱) از مدل عددی FLOW-3D برای بررسی جریان روی سرریز اوجی شکل استفاده نمودند، که با نتایج مشابه حاصل از مدل فیزیکی، تطابق قابل‌قبولی داشته است. شبیه‌سازی الگوی جریان در پیچ ۹۰ درجه، در شرایط با و بدون سرریزهای لبه تیز و لبه پهن، با استفاده از مدل عددی FLUENT توسط ایاسه (۱) انجام یافت و با نتایج تجربی مقایسه گردید، که نتایج شبیه‌سازی توزیع عمق، سرعت متوسط عمقی و بده جریان رضایت‌بخش بوده است. سلامت‌روندی (۴) به شبیه‌سازی سرریز لبه تیز و لبه پهن در پیچ، با استفاده از مدل FLOW-3D پرداخت. در فرایند مدل‌سازی، مدل مناسب در نظر گرفته شده دارای مشخصات مدل تلاطم از نوع RNG، طول اختلاط تلاطم معادل ۷ درصد بار آبی سرریز، اندازه بهینه شبکه محاسبات عددی ۰/۰۲ متر، و زمان شبیه‌سازی ۶۰ ثانیه بوده است. حساسیت مدل به طول اختلاط و ارتفاع زبری بستر آبراهه ناچیز بوده است. کومکو (۱۲) مشخصات هیدرولیکی سد کاوسک و نیروگاه هیدرولیکی (HEPP) که در حال ساخت‌وساز برای تولید انرژی در ترکیه است، به‌صورت آزمایشی با مطالعات مدل فیزیکی (مقیاس ۱:۵۰) مورد بررسی قرار داد و با مدل عددی FLOW-3D مقایسه کرد. نتایج نشان داد که بین مدل فیزیکی و عددی در ویژگی‌های جریان، توافق خوبی وجود دارد. مشابه این

ابتدای پیچ و همچنین بده ورودی به آبگیرهای واقع در پیچ داخلی و خارجی اندازه‌گیری شد.

مدل‌سازی عددی FLOW-3D

مدل FLOW-3D نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسبات است. شرح مبانی علمی و قابلیت کاربری این مدل برای شرایط پژوهش حاضر توسط سلامت‌روندی (۴) و فرهادی بانسوله (۶) گزارش شده است. در این پژوهش، برای هندسه مرزهای جامد جریان، از نرم‌افزار Solid Works استفاده شد. برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی آبراهه و سرریز و برای شبکه‌بندی محاسباتی جریان از روش FAVOR استفاده گردید (شکل ۲). با توجه به جنس کانال و سرریز، ارتفاع معادل زیری آبراهه برابر با ۰/۰۰۰۳ متر به مدل معرفی شد. در فرایند مدل‌سازی، پنج تنظیم کاربردی (مدل تلاطم، طول اختلاط تلاطم، اندازه بهینه شبکه محاسبات عددی، زمان شبیه‌سازی و ارتفاع زیری بستر آبراهه) مورد آزمون قرار گرفتند.

برای به‌دست‌آوردن اطلاعات موردنیاز (عمق d و سرعت متوسط عمقی V) در نقاط مختلف هر یک از مقاطع عرضی و تحلیل نتایج به‌صورت بده واحد عرض $(q = v \times d)$ در هر مقطع، مختصات نقاط در فایلی به نرم‌افزار معرفی شد و نتایج به‌صورت فایل عددی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی یکنواختی جریان در بالادست سرریز از نمودار بده واحد عرض در مقطع کنترل بالادست سرریز استفاده شد. برای این منظور ۱۱ نقطه در عرض در نظر گرفته شد، که داده‌های عمق آب و سرعت متوسط عمقی از طریق خروجی NUTRAL File برداشت گردید. همچنین برای بررسی یکنواختی بده در آبگیرها، با استفاده از یک صفحه مجازی (Baffle) که در طول شبیه‌سازی می‌تواند اطلاعات مربوط به بده عبوری و نیروهای وارد بر آن را ثبت کند، استفاده شد.

که در آن، q_{in} و q_{out} به ترتیب بده ورودی به آبگیر خارجی و داخلی، h و U به ترتیب عمق آب و سرعت متوسط در مقطع کنترل بالادست سرریز، S ارتفاع آب‌پایه، B عرض کانال بالادست، b عرض دهانه آبگیر، P_1 ارتفاع دیواره آب‌پایه، P_2 ارتفاع داخلی سرریز، P_t ارتفاع خارجی سرریز، W طول سرریز، R شعاع انحنای پیچ، α زاویه قرارگیری سرریز در پیچ، β زاویه آبگیر، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت جریان، g شتاب ثقل و θ زاویه شیب تاج سرریز نسبت به راستای افق می‌باشد. بده بالادست کانال (Q) تابعی از h ، B و U است.

آزمون‌های تجربی برای ارزیابی مستقیم بده جریان در آبگیرهای طرفین یک سرریز لبه‌پهن با تاج افقی، در پیچ یک فلوم آزمایشگاهی موردنظر قرار گرفت (۶ و ۷). مطالعات در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، انجام گرفت. فلوم آزمایشگاهی از جنس بتن مسلح، با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۹۳ متر، عمق ۰/۸ متر، با یک پیچ ۹۰ درجه و شعاع انحنای نسبی (نسبت شعاع انحنای مرکزی پیچ به عرض فلوم) معادل ۳ بوده است. براساس گزارش یاسی (۹) قوس با انحنای نسبی ۳ به‌عنوان قوس پایدار، با شدت انحنای متوسط شناخته می‌شود. مدل سرریز از نوع لبه‌پهن با تاج افقی، بدون فشردگی جانبی، از نوع مستطیلی با شیب دیواره قائم ساخته شدند. اندازه طول تاج سرریز در امتداد جریان، براساس توصیه باس (۱۰) به‌صورت ضریبی از بار آبی بالادست سرریز در دامنه جریان‌های موردنظر و معادل ۰/۳ متر انتخاب گردید. دهانه‌های آبگیر در دو سمت سرریز با هندسه همسان (زاویه صفر یا در امتداد جریان آبراهه، با عرض ۰/۱ متر و با ارتفاع متفاوت آب‌پایه) ایجاد گردیدند. سیمای عمومی و ابعاد کانال، سرریز و آبگیرها در شکل (۱) و جدول (۱) آورده شده است. در آزمون تجربی، پروفیل سطح آب در مقطع‌های بالادست سرریز و در مقطع‌های صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه از

بررسی اثر شیب طولی تاج سرریز لبه پهن در توزیع جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف یک پیچ آبراه

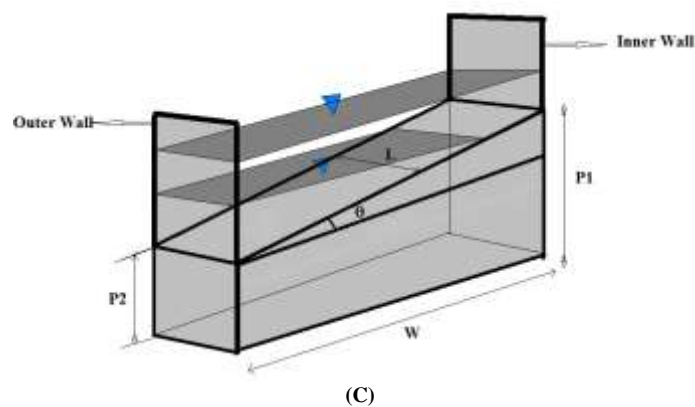
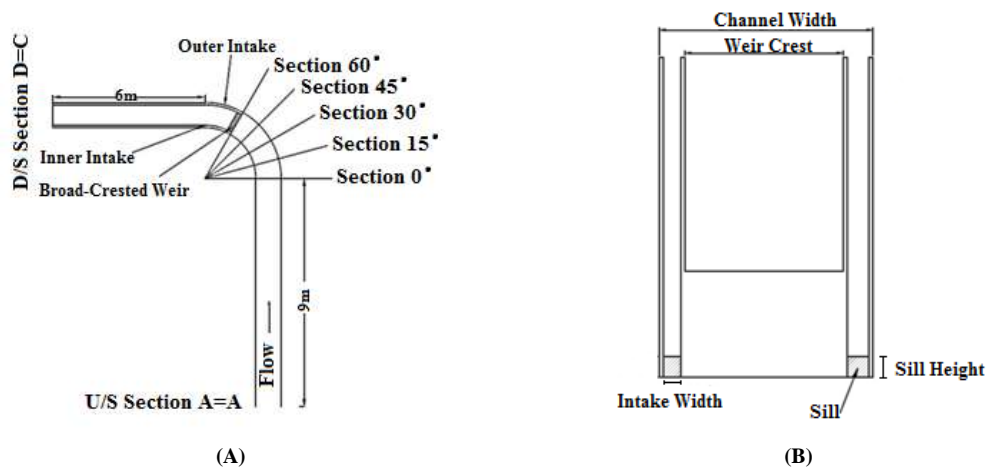


Figure 1. Layout of the weir and intakes. (A) Plan, (B) Cross section, (C) Weir, (D) Horizontal-crested weir, (E) Sloping-crested weir

Table 1. Geo-hydraulic characteristics of weirs and intakes in physical modeling

Weir geometry				Intakes geometry			Upstream flow		
Inner height, P_1 (cm)	Outer height, P_2 (cm)	Crest width, L (cm)	Location at bend, α ($^\circ$)	Crest length, W (cm)	Width, b (cm)	Height of sill to water depth (S/h_m)	Angle of intake to flow β ($^\circ$)	Channel flow rate Q (lit/s)	Froude number Fr
15	15	30	60	71.5	9.5	0.0, 0.16	0.0	75, 100	0.17, 0.21
15	19	30	60	71.5	9.5	0.0, 0.16	0.0	75, 100	0.17, 0.21

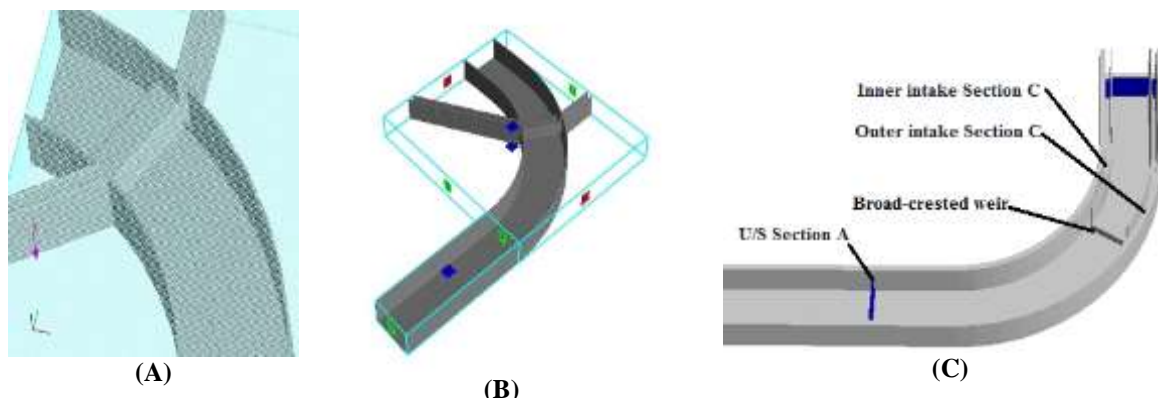


Figure 2. FLOW-3D modelling. (A) Computational cells, (B) Boundary condition, (C) Control section

خروجی (Outflow)، برای کف و دیواره‌ها از دیوار (Wall)، برای سطح جریان از تقارن (Symmetry) و مرز مشترک بین دو بلوک تقارن در نظر گرفته شد (شکل ۲).

در مدل‌سازی عددی، با توجه به متغیرهای رابطه (۱)، تابع رابطه (۲) در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

$$q_i = f(Q \text{ or } Fr, \theta = (P_2 - P_1)/W, \alpha, \beta, b, S) \quad (2)$$

در این رابطه، q_i بده ورودی به هر یک از دو آبگیر طرفین تابعی از بده جریان (Q) یا عدد فرود (Fr) بالادست سرریز، ارتفاع سرریز (P1) در پیچ داخلی و P2 در پیچ خارجی) یا زاویه شیب تاج سرریز نسبت به راستای افق (θ)، زاویه قرارگیری سرریز در پیچ (α)، زاویه آبگیر (β)، عرض دهانه آبگیر (b) و ارتفاع آبپابه (S) است. W طول تاج سرریز می‌باشد.

نتایج و بحث

با استفاده از مدل تنظیم‌یافته FLOW-3D، تعداد ۲۱ سناریو مطابق جدول (۳) مورد آزمون قرار گرفت. متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در این آزمون‌ها شامل ۱- بده آبراهه اصلی در بالادست سرریز (۷۵ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه)، ۲- عدد فرود بالادست (۰/۱۸ و ۰/۲۱)، ۳- موقعیت قرارگیری سرریز از ابتدای پیچ (۳۰ و ۶۰ درجه)، ۴- ارتفاع سرریز در پیچ داخلی (صفر و ۲۰ سانتی‌متر)،

شرح کامل واسنجی و تنظیمات کاربری مدل FLOW-3D برای شرایط پژوهش حاضر توسط فرهادی بانسوله (۶) گزارش شده است. برای واسنجی و تنظیم مدل از آزمون‌های تجربی شاهد برای چهار شرایط مختلف استفاده شد (در حالت سرریز افقی و شیب‌دار در مقطع ۶۰ درجه و با وجود آبپابه و بدون آبپابه). مدل FLOW-3D برای شبیه‌سازی شرایط متناظر با این چهار حالت به کار رفت. برای ارزیابی مدل، خطای برآورد مربوط به عمق آب در مقطع کنترل سرریز و بده جریان در آبگیرهای دو طرف سرریز، با سه شاخص آماری (جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین خطا مطلق MAE، و ضریب تعیین R^2) مورد مقایسه قرار گرفت. نمونه ارزیابی عمق آب برای مدل ریاضی تنظیم‌شده در جدول (۲) ارائه شده است، که دامنه خطاها در چهار آزمون قابلیت خوب مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان در شرایط این پژوهش را تأیید می‌کند. در مدل تنظیم‌یافته، از مدل تلاطم RNG استفاده گردید. اندازه هر شبکه ۰/۱۵ متر در ناحیه سرریز و آبگیر و ۰/۰۲ متر برای ناحیه مستقیم بالادست، طول اختلاط تلاطم به میزان ۷ درصد بار آبی روی سرریز، زبری معادل ۰/۰۰۰۳ متر (حساسیت مدل به طول اختلاط و ارتفاع زبری بستر آبراهه و دیوارها ناچیز بود)، جریان تک‌فازی، برای شرط مرزی ورودی از شدت جریان (Volume Flow Rate)، برای شرط مرزی خروجی از جریان

بررسی اثر شیب طولی تاج سرریز لبه پهن در توزیع جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف یک پیچ آبراهه

پیچ آبراهه (β) به شرح زیر است.

اثر جریان ورودی (عدد فرود) بر یکنواختی جریان

در مدل سازی تجربی، دو بده جریان (۷۵ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه) در نظر گرفته شد، که اثر افزایش حدود ۳۰ درصد بده را مورد آزمون قرار می دهد. عدد فرود متناظر با این دو بده جریان، به ترتیب معادل ۰/۱۷ و ۰/۲۱ است. اثرات عدد فرود جریان (Fr) بر تغییرات عرضی عمق آب، سرعت متوسط عمقی و بده واحد جریان در مقطع کنترل بالادست سرریز افقی و شیب دار، به طور نمونه در شکل های (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

۵- ارتفاع سرریز در پیچ خارجی (صفر و ۲۰ و ۲۴ سانتی متر)، ۶- زاویه آبگیری (صفر و ۶۰ و ۹۰ درجه)، ۷- عرض دهانه آبگیر (۱۰ و ۱۵ سانتی متر)، و ۸- ارتفاع آستانه آبگیر (صفر و ۵ سانتی متر) بوده است. یکنواختی جریان عرضی در ورود به سرریز، در "مقطع کنترل بالادست سرریز" (قبل از افت سطح آب در بده حداکثر) با شاخص بده واحد در عرض مقطع کنترل (q) بررسی گردید. نتایج کاربرد مدل عددی تنظیم یافته برای بررسی تأثیر پارامترهای بده ورودی (Q)، عرض آبگیر (b)، ارتفاع آستانه آبگیر (S)، زاویه آبگیری (α)، و موقعیت سرریز در

Table 2. Tests on the prediction errors of water depth in numerical modeling with FLOW-3D

Weir crest type	Run No.	Section at bend (°)	Correlation (R^2)	Error index (MAS)	Error index (RMSE)	Range of error (%)	
Horizontal	1	0	0.89	0.004	0.004	1.7	
		15	0.93	0.002	0.002	1.0	
		30	0.92	0.003	0.003	1.3	
		45	0.92	0.002	0.002	1.1	
	2	0	0.90	0.003	0.003	1.3	
		15	0.86	0.002	0.003	1.1	
		30	0.93	0.002	0.002	1.0	
		45	0.96	0.003	0.003	1.3	
	Sloped	3	0	0.88	0.001	0.001	2.2
			15	0.81	0.001	0.001	1.3
			30	0.89	0.001	0.001	2.5
			45	0.85	0.001	0.001	2.6
4		0	0.94	0.001	0.001	2.5	
		15	0.94	0.001	0.001	1.0	
		30	0.87	0.001	0.001	0.7	
		45	0.92	0.001	0.001	1.1	

Table 3. Geo-hydraulic characteristics of weirs and intakes in numerical modeling

Run No.	Inner height of weir (P_1 : cm)	Outer height of weir (P_2 : cm)	Weir location at bend (α°)	Intake angle (β°)	Height of intake sill (S : cm)	Intake width (b : cm)	Channel flow rate (Q : l/s)	Upstream Froude number (Fr)
1	20	20	60	0	0	15	75	0.17
2	20	20	60	0	0	15	100	0.21
3	20	20	60	0	0	10	75	0.17
4	20	20	60	0	5	10	75	0.17
5	20	20	60	60	5	10	75	0.17
6	20	20	60	90	5	10	75	0.17
7	20	24	60	0	0	15	75	0.17
8	20	24	60	0	0	15	100	0.21
9	20	24	60	0	0	10	75	0.17
10	20	24	60	0	5	10	75	0.17
11	20	24	60	60	5	10	75	0.17
12	20	24	60	90	5	10	75	0.17
13	0	0	60	0	5	10	75	0.17
14	0	0	60	60	5	10	75	0.17
15	0	0	60	90	5	10	75	0.17
16	20	20	30	0	5	10	75	0.17
17	20	20	30	60	5	10	75	0.17
18	20	20	30	90	5	10	75	0.17
19	20	24	30	0	5	10	75	0.17
20	20	24	30	60	5	10	75	0.17
21	20	24	30	90	5	10	75	0.17

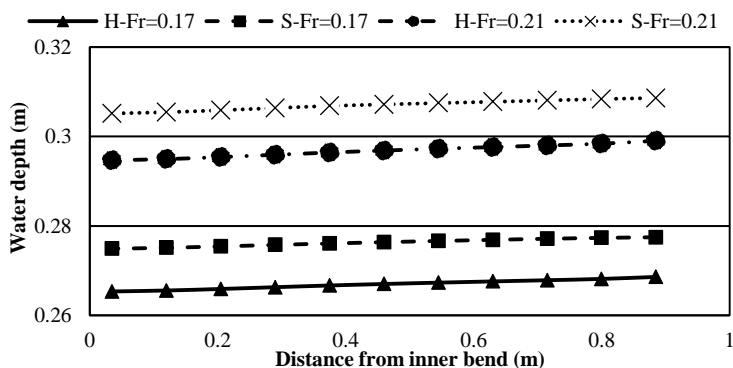


Figure 3. Effect of Froude number (Fr) on transverse water depth at upstream control section of the weir

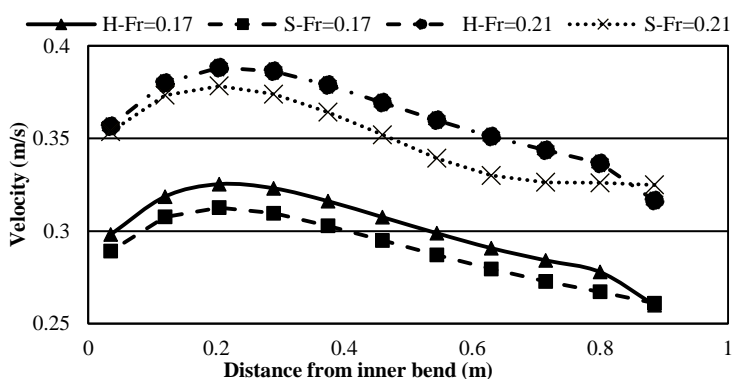


Figure 4. Effect of Froude number (Fr) on transverse depth-averaged velocity at upstream control section of the weir

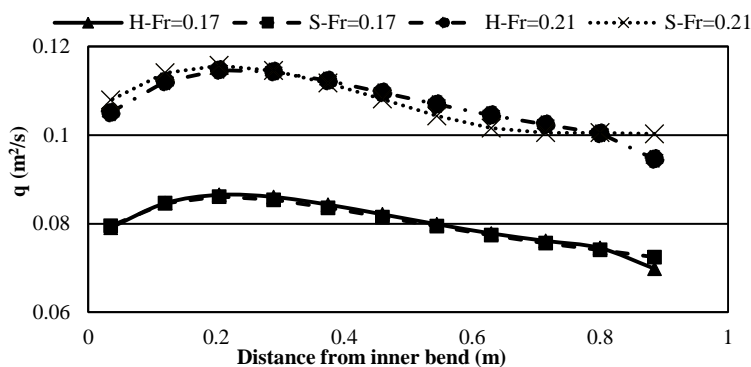


Figure 5. Effect of Froude number (Fr) on transverse unit discharge (q) at upstream control section of the weir

یکدیگر بوده‌اند، ولی در نزدیکی دیواره خارجی شدت تغییرات در سرریز شیب‌دار مقداری بیش‌تر است. سرریز شیب‌دار باعث افزایش عمق، سرعت و بده ورودی به سمت آبگیرها نسبت به سرریز افقی گردیده و نسبت q_{in}/Q و q_{out}/Q بیش‌تر است. در هر دو سرریز (افقی و شیب‌دار)،

افزایش شدت جریان باعث بیش‌تر شدن شیب عرضی سطح آب در مقطع بالادست سرریز افقی و شیب‌دار می‌شود. شیب عرضی سطح آب در بالادست سرریز شیب‌دار، کم‌تر از سرریز افقی است. شدت تغییرات سرعت و بده واحد عرض در بالادست سرریز افقی و شیب‌دار تقریباً مشابه

اثر نسبت ارتفاع آستانه آبگیر به عمق جریان

وجود آستانه آبگیر سبب کاهش شیب عرضی سطح آب در مقطع بالادست هر دو سرریز افقی و شیب‌دار می‌شود. تأثیر آستانه آبگیر بر شیب عرضی سطح آب در سرریز افقی بیش‌تر است (در سرریز افقی ۰/۰۰۰۹ و در سرریز شیب‌دار ۰/۰۰۰۲ کاهش می‌یابد). در سرریز شیب‌دار، اثر آستانه آبگیر در کاهش شدت تغییرات سرعت و بده واحد عرض بیش‌تر بوده، ولی بر شیب عرضی سطح آب تأثیری نداشته است. شکل (۷) به‌طور نمونه، اثر بودن یا نبودن آستانه بر تغییرات عرضی بده واحد جریان (q) در بالادست هر دو سرریز افقی و شیب‌دار را نشان می‌دهد. در سرریز افقی وجود آستانه آبگیر باعث کاهش نسبت q_{in}/Q و q_{out}/Q می‌شود. در سرریز شیب‌دار نیز، این اتفاق می‌افتد ولی شدت کاهش در سرریز شیب‌دار بیش‌تر است. در سرریز افقی حداکثر ۰/۰۰۰۵ ولی در سرریز شیب‌دار حداکثر ۰/۰۱۶ کاهش می‌دهد. در واقع آستانه آبگیر نسبت آبگیری را کاهش می‌دهد ولی به یکنواختی جریان در دو طرف پیچ کمک می‌کند. سرریز شیب‌دار نسبت به سرریز افقی باعث ورود جریان بیش‌تر به آبگیرها می‌شود (شکل ۷). به‌طور کلی، بیش‌ترین یکنواختی خصوصیات جریان، در سرریز شیب‌دار، با وجود آستانه یا بدون وجود آستانه است.

یکنواختی نسبی بده ورودی به آبگیرها با توجه به نسبت q_{in}/q_{out} برقرار است. بیش‌ترین یکنواختی عمق، سرعت متوسط عمقی و بده واحد عرض در بالادست سرریز شیب‌دار و با بده جریان کم‌تر ($Fr=0.17$) است.

اثر نسبت عرض آبگیر به عرض آبراهه بر یکنواختی جریان

اثرات نسبت عرض دهانه آبگیر به عرض آبراهه بالادست (b/B) بر تغییرات عرضی عمق آب، سرعت و بده واحد جریان در مقطع کنترل بالادست سرریز افقی و شیب‌دار، در دو نسبت ۰/۱۰ و ۰/۱۶ بررسی گردید. با کاهش نسبت آبگیر به عرض آبراهه، شیب عرضی سطح آب در بالادست هر دو سرریز افقی و شیب‌دار کاهش می‌یابد، ولی اثر سرریز شیب‌دار بر شدت کاهش تغییرات عرضی سرعت و بده واحد عرض بیش‌تر است. شکل (۶) به‌طور نمونه تغییرات عرضی بده واحد جریان را نشان می‌دهد. در سرریز شیب‌دار، نسبت q_{in}/Q و q_{out}/Q افزایش می‌یابد. در زاویه آبگیری صفر، نسبت q_{in}/q_{out} در هر دو سرریز، تقریباً یکسان و برابر یک است. بیش‌ترین یکنواختی عمق و سرعت متوسط عمقی در نسبت عرضی آبگیر به آبراهه ۰/۱ با سرریز شیب‌دار و بیش‌ترین یکنواختی بده واحد عرض، در هر دو نسبت عرضی (نسبت ۰/۱۰ و ۰/۱۶) در بالادست سرریز شیب‌دار است.

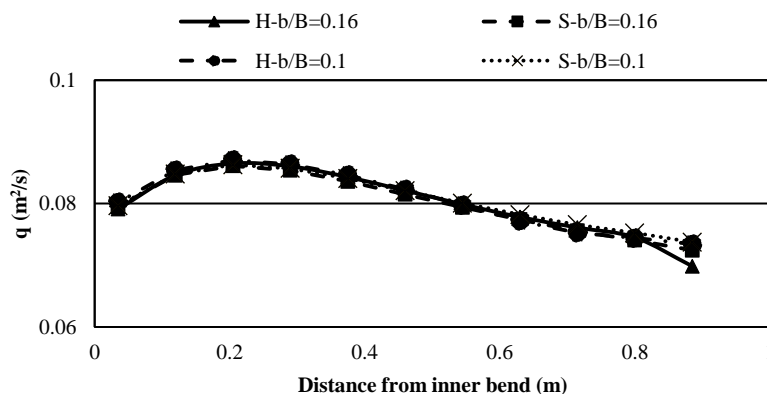


Figure 6. Effect of the ratio of intake to channel width (b/B) on transverse unit discharge (q) at upstream control

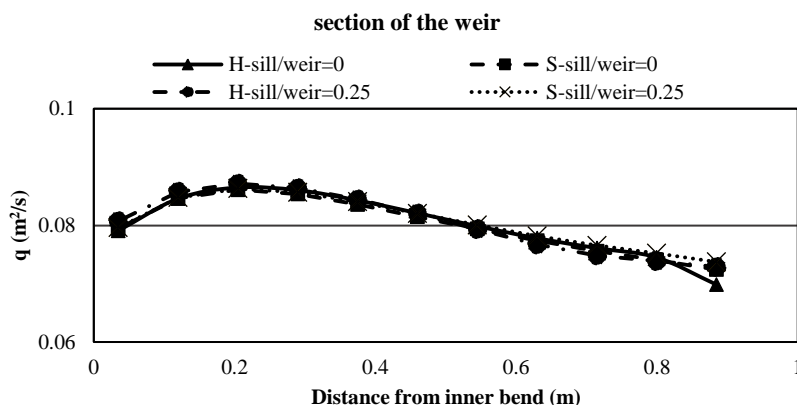


Figure 7. Effect of the ratio of intake sill to weir height (S/P) on transverse unit discharge (q) at upstream control section of the weir

آزمون‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مربوط به شرایط شاهد بدون سرریز است. کم‌ترین شیب عرضی مربوط به آزمون ۱۹ با مشخصات سرریز شیب‌دار در موقعیت ۳۰ درجه از ابتدای پیچ، زاویه آبگیری صفر درجه، نسبت عرض آبگیر به آبراهه ۰/۱ و با آستانه است. کم‌ترین اختلاف حداقل و حداکثر سرعت متوسط عمقی در عرض و بده واحد عرض مربوط به آزمون‌های ۹ و ۱۰ با مشخصات سرریز شیب‌دار در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ، زاویه آبگیری صفر درجه، نسبت عرض آبگیر به آبراهه ۰/۱، با و بدون آستانه است. وجود سرریز شیب‌دار به کاهش شیب عرضی در مقطع بالادست سرریز کمک کرده و بده ورودی به آبگیرها را زیاد می‌کند. در موقعیت ۳۰ درجه با وجود سرریز افقی و شیب‌دار در تمام زاویه‌های آبگیری، تقریباً یکنواختی بده در آبگیرها برقرار است. در موقعیت ۶۰ درجه با وجود سرریز افقی و شیب‌دار با زاویه‌های آبگیری صفر و ۶۰ درجه یکنواختی بده تقریباً برقرار است. در زاویه آبگیری ۹۰ درجه غیریکنواختی بده در آبگیرها بسیار شدید است که با وجود سرریز شیب‌دار از این غیریکنواختی کاسته شده است. به‌طورکلی، بیش‌ترین یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرها، در زاویه آبگیری صفر درجه با سرریز شیب‌دار و افقی در موقعیت ۳۰ و ۶۰ درجه می‌باشد.

اثر زاویه آبگیری بر یکنواختی جریان

اثرات راستا و زاویه دهانه آبگیر (β) بر تغییرات عرضی ویژگی‌های جریان در مقطع کنترل بالادست سرریز افقی و شیب‌دار بررسی شد. برای سه زاویه آبگیری، شدت کاهش شیب عرضی در بالادست هر دو سرریز افقی و شیب‌دار تقریباً یکسان است. شکل (۸) به‌عنوان نمونه، تغییرات عرضی بده واحد جریان را در سه زاویه آبگیری صفر و ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. با وجود سرریز در پیچ، اثر راستا و زاویه آبگیری در هر دو نوع سرریز افقی و شیب‌دار کم است. در سرریز شیب‌دار، یکنواختی بده جریان در دو آبگیر چپ و راست، هم‌چنین هدایت بیش‌تر بده جریان به آبگیرها بیش‌تر است. بیش‌ترین یکنواختی، در سرریز شیب‌دار با زاویه آبگیری صفر درجه می‌باشد.

اثر موقعیت سرریز در پیچ بر یکنواختی جریان

تغییرات شیب عرضی سطح آب و دامنه تفاوت سرعت متوسط عمقی و بده واحد عرض در مقطع کنترل بالادست سرریز برای هر یک از ۲۱ آزمون (جدول ۳) در نمودار ستونی شکل (۹) نشان داده شده است. هم‌چنین، مشخصات توزیع بده جریان در آبگیرهای طرفین سرریز برای تمام آزمون‌ها در جدول (۴) ارائه گردیده است.

بررسی اثر شیب طولی تاج سرریز لبه پهن در توزیع جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف یک پیچ آبراه

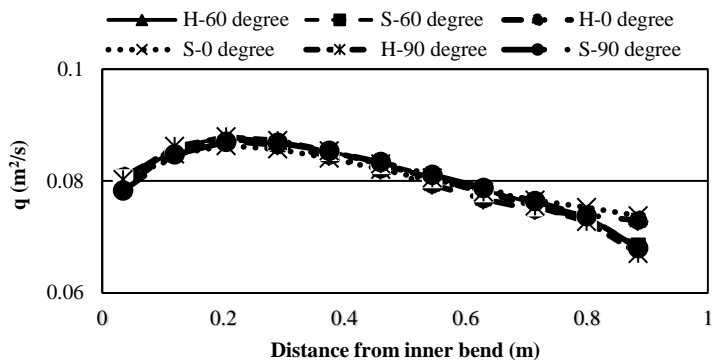


Figure 8. Effect of intake angle (β) on transverse unit discharge (q) at upstream control section of the weir

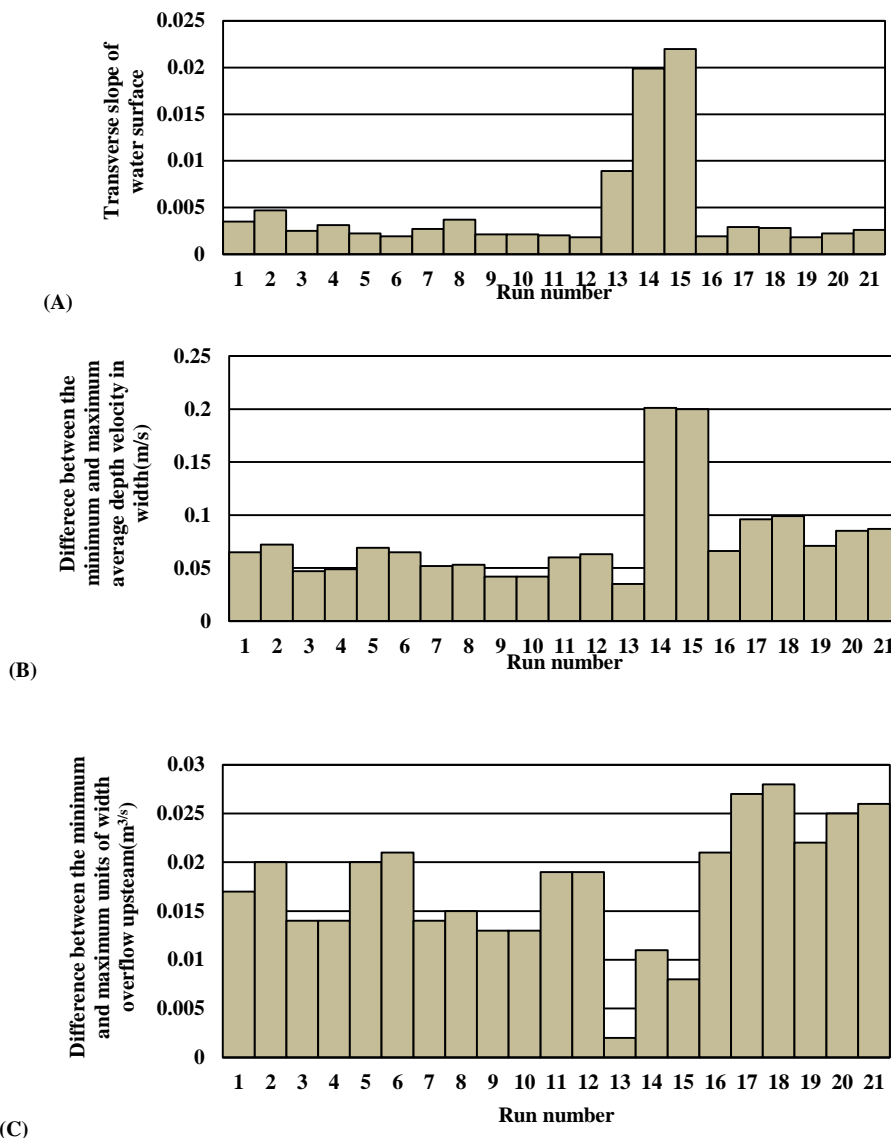


Figure 9. Range of variation of: Transverse water surface slope (A), Depth-averaged velocity (B), Unit discharge (C), at upstream control section of the weir in 21 scenarios

Table 4. Flow characteristics at bilateral water intakes in different scenarios

Run No.	Channel flow rate (Q: l/s)	Upstream Froude number (Fr)	Intake flow rate (l/s)		Velocity at intake (m/s)		Depth at intake (m)		Inner intake flow to channel flow (q_{in}/Q)	Outer intake flow to channel flow (q_{out}/Q)	Inner to outer intake flow (q_{in}/q_{out})
			Inner bend (q_{in})	Outer bend (q_{out})	Inner bend	Outer bend	Inner bend	Outer bend			
1	75	0.17	28.4	28.4	0.89	0.92	0.21	0.20	0.38	0.38	1.00
2	100	0.21	34.6	34.3	1.00	1.02	0.23	0.22	0.35	0.34	1.00
3	75	0.17	19.7	19.9	0.85	0.89	0.23	0.22	0.26	0.27	0.99
4	75	0.17	19.8	19.5	0.86	0.88	0.23	0.22	0.26	0.26	1.00
5	75	0.17	17.3	17.1	0.86	0.93	0.20	0.18	0.23	0.23	1.01
6	75	0.17	7.7	0.1	0.21	0.01	0.36	0.36	0.10	0.00	0.86
7	75	0.17	30.3	29.9	0.92	0.94	0.22	0.21	0.40	0.40	1.01
8	100	0.21	36.4	36.2	1.01	1.05	0.24	0.23	0.36	0.36	1.0
9	75	0.17	22.5	22.5	0.90	0.94	0.24	0.25	0.30	0.30	1.0
10	75	0.17	21.3	21.6	0.88	0.95	0.24	0.23	0.28	0.29	0.99
11	75	0.17	15.5	13.4	0.57	0.55	0.27	0.25	0.21	0.18	1.14
12	75	0.17	5.8	0.1	0.17	0.01	0.34	0.35	0.08	0.00	0.58
13	75	0.17	4.8	6.1	0.47	0.54	0.10	0.10	0.06	0.08	0.79
14	75	0.17	0.9	2.6	0.16	0.27	0.06	0.10	0.01	0.03	0.36
15	75	0.17	0.3	1.7	0.07	0.34	0.04	0.05	0.00	0.02	0.17
16	75	0.17	22.1	23.0	0.93	0.98	0.24	0.23	0.29	0.03	0.96
17	75	0.17	16.3	17.3	0.54	0.65	0.30	0.27	0.22	0.23	0.94
18	75	0.17	16.7	17.6	0.72	1.00	0.23	0.18	0.22	0.24	0.94
19	75	0.17	20.3	21.4	0.89	0.97	0.23	0.22	0.27	0.29	0.95
20	75	0.17	18.0	18.8	0.56	0.65	0.32	0.29	0.24	0.25	0.96
21	75	0.17	18.4	19.3	0.74	0.99	0.25	0.19	0.24	0.26	0.96

عرضی در بالادست سرریز افقی و شیب‌دار در پیچ یک آبراهه و یکنواختی بده جریان در آبگیرهای دو طرف سرریز، تحت شرایط جریان آب صاف، به شرح زیر است.

۱- برای زاویه آبگیری صفر درجه، بده ورودی به آبگیرهای داخلی و خارجی تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند، که نشان‌دهنده اثر مثبت سرریز در یکنواختی جریان عرضی و بده ورودی به آبگیرها است.

۲- وجود آستانه آبگیر باعث کاهش نسبت q_{in}/Q و q_{out}/Q می‌شود و یکنواختی بده در آبگیرها در هر دو حالت (با و بدون آستانه آبگیر) تقریباً برقرار است و با وجود سرریز شیب‌دار این نسبت کم‌تر خواهد شد.

۳- در صورت استفاده از سرریز شیب‌دار، شیب عرضی سطح آب از ابتدای پیچ تا مقطع ۳۰ درجه افزایش و از مقطع ۳۰ درجه به سمت سرریز کاهش می‌یابد و یکنواختی جریان در عرض بیش‌تر می‌شود. با افزایش عدد فرود، شیب عرضی در سرریز شیب‌دار افزایش پیدا می‌کند ولی شدت افزایش آن کم‌تر از سرریز افقی است.

۴- در سرریز افقی و شیب‌دار با افزایش نسبت عرض

اثربخشی شیب تاج سرریز در پیچ بر یکنواختی جریان

براساس نتایج آزمون‌ها در نمودار ستونی شکل (۹) و جدول (۴)، قرارگیری سرریز شیب‌دار (با زاویه θ در شکل ۱) در تمام حالات باعث کاهش شیب عرضی سطح آب در مقاطع عرضی بالادست سرریز در پیچ شده است. کم‌ترین شیب عرضی سطح آب، در حالت سرریز شیب‌دار در موقعیت ۳۰ درجه از پیچ با زاویه آبگیری صفر درجه و همچنین سرریز در موقعیت ۶۰ درجه با زاویه آبگیری ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. در موقعیت ۳۰ درجه با وجود سرریز افقی و شیب‌دار در تمام زاویه‌های آبگیری تقریباً یکنواختی بده در آبگیرها برقرار است. در موقعیت ۶۰ درجه با وجود سرریز افقی و شیب‌دار با زاویه‌های آبگیری صفر و ۶۰ درجه یکنواختی بده تقریباً برقرار است و با زاویه آبگیری ۹۰ درجه غیریکنواختی بده در آبگیرها بسیار شدید است، که با وجود سرریز شیب‌دار از این غیریکنواختی کاسته شده است.

نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج مدل تجربی و عددی در بررسی توزیع جریان

بررسی اثر شیب طولی تاج سرریز لبه پهن در توزیع جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف یک پیچ آبراهه

سرریزهای لبه کوتاه کرامپ در پیچ یک آبراهه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰(۱): ۵۹ - ۶۷.

۳. رستم آبادی، م. (۱۳۹۲). تعیین شرایط مناسب آبگیری جانبی از پیچ با استفاده از مدل عددی. رساله دکتری آب، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴. سلامت‌روندی، ن. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی جریان روی سرریز در پیچ یک آبراهه با استفاده از مدل عددی FLOW-3D. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۵. عبدالله‌پور، م. (۱۳۸۹). ارزیابی کارکرد سرریزهای لبه تیز با تاج شیب‌دار در پیچ ۹۰ درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۶. فرهادی بانسوله، ع. (۱۳۹۷). بررسی یکنواختی بده جریان در آبگیرهای طرفین سرریز لبه‌پهن در پیچ یک آبراهه با مدل FLOW-3D. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۷. فرهادی بانسوله، ع. و یاسی، م. (۱۳۹۸). بررسی یکنواختی جریان در آبگیرهای طرفین سرریز لبه‌پهن در پیچ یک آبراهه. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۵): ۱۲۹۴ - ۱۳۰۶.

۸. ولی‌محمدی، ا. و یاسی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای لبه‌پهن با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ یک آبراهه. تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۶ (۶۵): ۵۵ - ۷۰.

۹. یاسی، م. (۱۳۶۷). اصلاح مسیر و حفاظت دیواره رودخانه‌ها با روش‌های طبیعی - ساختمانی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

آبگیر به عرض آبراهه (نسبت ۰/۱ و ۰/۱۶) شیب عرضی سطح آب در مقطع بالادست سرریز با یک شدت افزایش پیدا می‌کند، که در سرریز شیب‌دار این تغییرات کم‌تر دیده می‌شود.

۵- وجود آستانه آبگیر اثری بر کاهش شیب عرضی در مقطع بالادست سرریز شیب‌دار نداشته است. در نتیجه سرریز شیب‌دار تأثیر خاصی روی کاهش شیب در حالت با آستانه آبگیر نداشته است، ولی باعث ورود بده بیش‌تر به آبگیرها می‌شود.

۶- سرریز شیب‌دار در پیچ اثر زیادی بر روی یکنواختی عرضی در بالادست سرریز، یکنواختی بده ورودی به آبگیرها و ورود بده بیش‌تر به آبگیرها نسبت به حالت بدون سرریز داشته است.

۷- در آبگیری با زاویه صفر و ۶۰ درجه، بهترین محل قرارگیری سرریز شیب‌دار در مقطع ۶۰ درجه می‌باشد. در زاویه آبگیری ۹۰ درجه، بهترین موقعیت سرریز شیب‌دار در مقطع ۳۰ درجه می‌باشد، گرچه غیر یکنواختی بده جریان به آبگیرها بیش‌تر از زوایای دیگر آبگیری است. در موقعیت ۳۰ و ۶۰ درجه وجود سرریز شیب‌دار باعث ورود بده بیش‌تر به آبگیرها شده است.

۸- بهترین شرایط برای یکنواختی بده جریان در آبگیرهای طرفین پیچ آبراهه، استقرار سرریز شیب‌دار در میانه پیچ با موقعیت ۶۰ درجه، با زاویه آبگیری صفر درجه، با نسبت کم عرض آبگیر به آبراهه (۱:۱۰) و همراه با آستانه می‌باشد.

منابع

۱. ایاسه، ا. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی جریان روی سرریز در پیچ یک آبراهه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲. حسینی مبری، س. ع. و یاسی، م. (۱۳۹۵). کارکرد

10. Boss, M.G. (1989). Discharge measurement structures. Published by ILRI, Wageningen, The Netherlands, 394 p.
11. Chanel P.G., & Doering J.C. (2008). Assessment of spillway modeling using computational fluid dynamics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(12), 1481-1485.
12. Kumcu, S. Y. (2017). Investigation of flow over spillway modeling and comparison between experimental data and CFD analysis. *ASCE Journal of Civil Engineering*, 21(3), 994-1003.
13. Meireles, I., Siva, S., Viseu, T. & Sousa, V. (2014). Experimental and numerical study of water intakes: Case study of the Foz Tua hydropower plant. Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress. Porto, Portugal.
14. Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C. & Narayanan, R. (2007). Hydraulic structures, Published by Taylor & Francis, USA, 725 P.
15. WGWM (1991). Guidelines for stabilizing waterways. Working Group on Waterway Management (WGWM), Rural Water Commission of Victoria, Victoria·Australia, 301 p. (<https://www.worldcat.org/>).