

بررسی آزمایشگاهی اثر دیواره سپری پیوسته و ناپیوسته در جریان عبوری از سرریزهای کلید پیانویی

بهاره یارمحمدی^{۱*} و جواد احدیان^۲

چکیده

سرریزهای کلید پیانویی در بارهای آبی کم، ظرفیت تخلیه به نسبت بالایی داشته و در بارهای آبی زیاد به دلیل استغراق در ابتدای کلید خروجی سرریز از راندمان آن کاسته می‌شود. با کاربرد این سرریز در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، امکان تأمین بار آبی در دبی‌های کم وجود دارد. در این پژوهش از دیواره‌های سپری شیبدار با شیب‌های مختلف $B \times (1, 0/75, 0/5, 0/25) = B'$ ، با هدف کاهش استغراق ورودی سرریز و همچنین از دیواره‌های سپری بدون شیب با بررسی تأثیر عدم پیوستگی دیواره سپری در بخش کلید خروجی و ورودی بر عملکرد هیدرولیکی استفاده شد. آزمایش‌های این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. نتایج نشان داد که فرارگیری دیواره سپری شیبدار روی تاج‌جانبی سرریز تأثیر معنی‌داری بر عملکرد سرریز ندارد و دیواره سپری بدون شیب روی تاج سرریز با عدم پیوستگی در تاج کلید خروجی و ورودی، راندمان سرریز را در بارهای آبی بالا بهبود می‌بخشد. به طوری که در مدل دیواره سپری بدون شیب با ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر با عدم پیوستگی در بخش کلید خروجی در بارهای آبی زیاد، بیشترین درصد افزایش در ضریب دبی (۳۴٪) نسبت به مدل شاهد مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: استغراق، دیواره سپری پیوسته، دیواره سپری ناپیوسته، سرریزهای کلید پیانویی.

ارجاع: یارمحمدی ب. و احدیان ج. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی اثر دیواره سپری پیوسته و ناپیوسته در جریان عبوری از سرریزهای کلید پیانویی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۳: ۳۳-۴۱.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

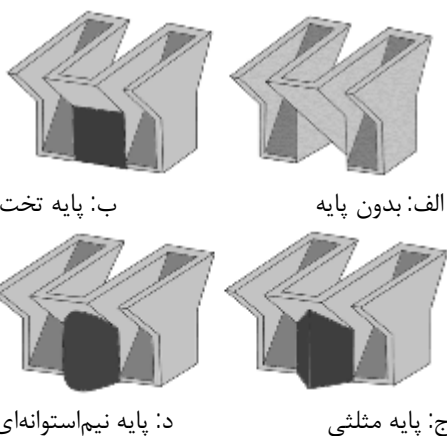
* نویسنده مسئول: bahareh_yarmohammadi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۶

مقدمه

استفاده از سرریزهای غیرخطی به عنوان سازه‌های اقتصادی با کارایی بالا به عنوان یک گزینه متداول مورد پذیرش و مناسب ارائه شده است. افزایش طول تاج سرریز، در سرریزهای زیگزاگی، در یک عرض ثابت آبراهه، دبی مؤثر این سرریزها را ۳ تا ۴ برابر نسبت به سرریز خطی افزایش می‌دهد (اندرسون، ۲۰۱۱؛ اندرسون و تالیس، ۲۰۱۳). سرریزهای کلید پیانویی سازه خاصی از سرریزهای زیگزاگی هستند که توسط مؤسسه هیدروکوپ فرانسه با همکاری آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بیسکرا در الجزایر بررسی شدند (ماچیلز، ۲۰۱۲). این سرریزها در هماهنگی با سرریزهای زیگزاگی دارای طول تاج مؤثر بیشتری در عرض سرریز هستند (لیت‌ریبیرو و همکاران، ۲۰۱۲-b). دو مزیت مهم استفاده از سرریزهای کلید پیانو در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی شامل کاهش فوندانسیون سرریز، و ظرفیت تخلیه بالا است (لیت‌ریبیرو و همکاران، ۲۰۱۲-a). علاوه بر عملکرد بالای این سرریزها، هزینه ساخت سرریزهای کلید پیانویی به نسبت کمتر است و در نتیجه سیکل‌های مکرر، این اجازه داده می‌شود که قطعات پیش‌ساخته استفاده شوند (ماچیلز، ۲۰۱۲؛ فیستر و اشلایس، ۲۰۱۳). براساس بررسی‌های لیت‌ریبیرو و همکاران (۲۰۱۳)، مشخص شده است که نوع ساختار سرریز کلید پیانویی مورد استفاده در مخازن سدها بر رفتار هیدرولیکی درچه‌های تخلیه تأثیر کمی داشته و از طرفی شکل سازه‌های آن به نوعی است که جریان‌های آواری را به‌سادگی از خود عبور می‌دهد. براساس طبقه‌بندی لمپرییر و همکاران (۲۰۱۱)، سرریز کلید پیانویی دارای انواع مختلف بوده که تفاوت آن‌ها در وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سرریز است. همچنین براساس بررسی‌های گذشته ساختار دماغه ورودی سرریز از عوامل مؤثر بر عملکرد سرریز کلید پیانویی است. این ساختار دارای ۴ حالت است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. براساس نتایج افضلیان (۱۳۹۳) از بین مدل‌های موجود، پایه مثلثی بهترین عملکرد هیدرولیکی را از خود نشان داده است، به همین جهت از بین مدل‌های دماغه ورودی سرریز در این پژوهش، پایه مثلثی مورد توجه قرار گرفته است.



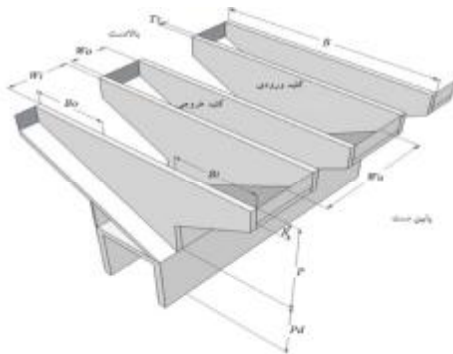
شکل ۱- نمایش ساختارهای مختلف دماغه‌ی ورودی سرریز

اولین طرح سرریز کلید پیانویی از سوی بلانک و لمپرییر (۲۰۰۱) برای بهبود عملکرد سرریز زیگزاگی با فوندانسیونی کوچک‌تر توسعه یافت. بررسی‌های بعدی برای توسعه این طرح انجام شد. لیت‌ریبیرو و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی تأثیر دیواره سپری بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی سد اترویت به این نتیجه رسیدند که با استفاده از دیواره سپری، راندمان هیدرولیکی سرریز تا ۱۵٪ افزایش می‌یابد. اندرسون (۲۰۱۱) با بررسی هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیانویی به این نتیجه رسید که ضریب دبی سرریز با افزایش نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ افزایش می‌یابد و محدوده بهینه آن را بین ۱/۲۵ و ۱/۵ تعیین کرد. بررسی‌های لیت‌ریبیرو و همکاران (۲۰۱۲b) با بررسی تأثیر دیواره سپری بر راندمان سرریز نشان داده است که قرار دادن دیواره‌های سپری به صورت مقطعی روی کلید ورودی تأثیری در بازدهی تخلیه ندارد در صورتی که اگر روی کلید خروجی قرار بگیرد بازدهی سرریز را بهتر می‌کند. ماچیلز و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی اثر دیواره سپری برای افزایش ارتفاع سرریز با ثابت نگه داشتن ارتفاع سرریز به این نتیجه رسیدند که تأثیر اصلی دیواره سپری روی تاج سرریزهای کلید پیانویی، افزایش ارتفاع کل سرریز است. اندرسون و تالیس (۲۰۱۳) با مقایسه سرریزهای کلید پیانویی با سرریزهای زیگزاگی ذوزنقه‌ای بیان نمودند که برای کاربردهایی که در آن محدودیت در طول و عرض وجود دارد، سرریز کلید پیانویی می‌تواند ظرفیت تخلیه بیشتری داشته باشد. جواهری (۱۳۹۰) با بررسی تأثیر پارامترهای هندسی

که در این معادله S نسبت R/B ، $(B \times 0.75)$ و 0.5 ، $B' = (0.25)$ است و H_t معرف بار آبی کل بالادست $(H_t = H + \frac{V^2}{2g})$ است و نسبت‌های $\frac{rVH}{m} \frac{V}{\sqrt{gH}}$ ، $\frac{Q}{\sqrt{gLH^{1.5}}}$ و $\frac{S}{rV^2H}$ به ترتیب به عدد فرود، Fr ، عدد رینولدز، Re ، عدد وبر، We و ضریب دبی جریان، C_d ، اشاره دارند.

با توجه به تأثیر کم لزجت جریان، از رینولدز جریان صرف‌نظر می‌شود. حداقل عدد رینولدز در کل آزمایش‌های این پژوهش برابر ۲۶۸۴ به دست آمده است که نشان دهنده آشفتگی کامل جریان است. همچنین با توجه به ثابت بودن هندسه سرریز و تلفیق پارامترهای یاد شده در معادله (۲)، معادله نهایی پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی در این پژوهش به شرح زیر خواهد بود:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H}{R}, S, We, Fr\right) \quad (3)$$



شکل ۲- نمایش سرریز کلید پیاپویی به همراه پارامترهای مهم هندسی (ماچیلز، ۲۰۱۲)

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز به طول ۱۰، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیوارهای فلوم از جنس شیشه و کف فلوم فولاد ضدزنگ است، همچنین شیب کف فلوم صفر و محدوده تغییرات دبی بین ۱ تا ۱۶۰ لیتر بر ثانیه است. مدل‌های سرریز از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر هستند که برای ساخت مدل، صفحات پلکسی‌گلاس با برش لیزری برش خورده و به وسیله چسب قطره‌ای قطعات به یکدیگر چسبانده شده و در نهایت برای

مختلف رابطه‌ای برای برآورد ضریب دبی عبوری در حالت جریان آزاد ارائه داد. براساس مروری بر منابع انجام شده مشخص است که به اثر دیواره سپری گسسته در پژوهش‌های گذشته کمتر توجه شده است. پس در تحقیق حاضر این موضوع بررسی شده و تغییرات آن با حالت پیوسته مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

با توجه به آنچه که در بخش مقدمه اشاره شد، دیواره سپری می‌تواند اثر مثبتی در عملکرد سرریز کلید پیاپویی به ویژه در فشارهای هیدرولیکی بالا داشته باشد؛ پس، این پژوهش اثر دیواره سپری پیوسته و ناپیوسته در امتداد بال سرریز را بررسی می‌کند. برای بررسی دقیق این موضوع، برنامه‌ریزی آزمایشگاهی انجام شد.

آنالیز ابعادی

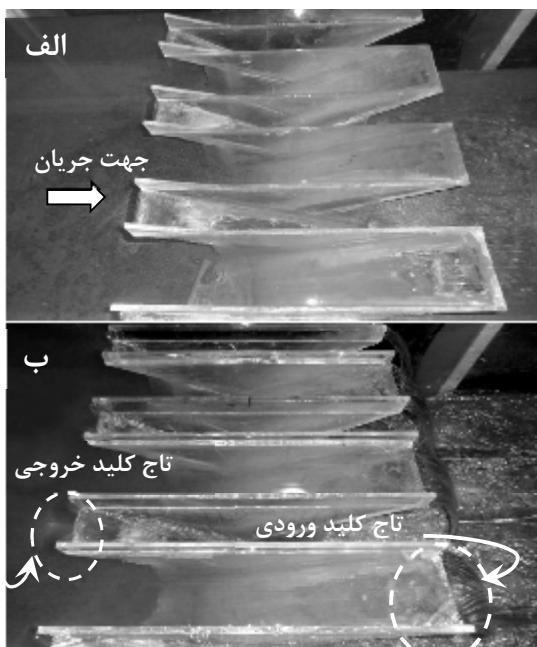
در شکل ۲ نمای سه بعدی سرریز کلید پیاپویی به همراه پارامترهای مهم هندسی آن نمایش داده شده است. تابع کلی پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه در این پژوهش به صورت زیر است:

$$f(H, W, W_i, W_o, B, B_i, B_o, P, R, T_s, S, N, L, g, S, r, m, V, Q) = 0 \quad (1)$$

پارامترهای هندسی شامل، W ، عرض فلوم، P ، ارتفاع سرریز، B ، طول سرریز، B_i ، طول فوندانسیون سرریز، B_o ، طول شیروانی پایین دست سرریز، B_o ، طول شیروانی بالادست سرریز، W_i ، عرض کلید ورودی، W_o ، عرض کلید خروجی، T_s ، ضخامت سرریز، R ، ارتفاع دیواره سپری، S ، زاویه دیواره سپری روی تاج جانبی، N ، تعداد سیکل، wu ، عرض واحد سرریز، L ، طول تاج توسعه یافته می‌باشند. پارامترهای مربوط به خصوصیات جریان و سیال نیز شامل، Q ، دبی جریان، H ، عمق جریان در بالادست سرریز، V ، سرعت بالادست، g ، شتاب ثقل، r ، جرم واحد حجم مایع، m ، لزجت دینامیکی، S ، کشش سطحی می‌باشند. در نهایت با استفاده از روش آنالیز ابعادی و با در نظر گرفتن ρ ، V و P به عنوان پارامترهای تکراری، پارامترهای مهم بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی به صورت زیر خواهد بود:

$$f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H}{R}, \frac{R}{P}, \frac{T_s}{P}, \frac{B}{L}, \frac{P}{B}, \frac{R}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{P}{W_i}, \frac{L}{W}, N, S, \frac{Q}{\sqrt{gLH^{1.5}}}, \frac{S}{rV^2H}, \frac{rVH}{m}, \frac{V}{\sqrt{gH}}\right) = 0 \quad (2)$$

با در نظر گرفتن ۴ طول مختلف دیواره سپری $B \times 1$ و $B' = (0.25, 0.5, 0.75)$ در شکل ۳ نمونه‌هایی از استقرار مدل‌های دیواره سپری بر تاج سرریز کلید پیانویی نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمایش دیواره سپری مستقر روی تاج سرریز کلید پیانویی. الف) شیب‌دار به طول $B' = 0.25B$ بدون شیب با عدم پیوستگی در بخش تاج کلید ورودی و خروجی

نتایج و بحث

بعد از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی و به دلیل پیچیدگی الگوی جریان روی این سرریزها، از معادله عمومی سرریزها استفاده شد. با توجه به قرائت بار آبی و دبی در هر آزمایش و با مشخص بودن مقطع فلوم، ضریب دبی مربوط به هر مدل با معادله عمومی سرریزها محاسبه شد. از طرفی با توجه به عدم پیوستگی دیواره سپری در بخش تاج کلیدهای ورودی و خروجی در مدل‌های بدون شیب، بار آبی روی تاج سرریز متغیر است. از این رو دبی نظری براساس معادله (۴)، براساس جدول ۱ محاسبه و سپس ضریب دبی براساس معادله (۵) برآورد شد.

$$Q_{tr} = Q_{wi} + Q_{wo} + Q_{sw} \quad (4)$$

در این معادله، Q_{tr} دبی نظری جریان، Q_{wi} دبی عبوری از بخش کلید ورودی، Q_{wo} دبی عبوری از بخش کلید خروجی، Q_{sw} دبی عبوری از تاج‌های جانبی می‌باشند.

آب‌بندی سرریز از چسب آکواریوم استفاده شد. با توجه به بررسی‌های ماچیلز و همکاران (۲۰۱۲)، نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ بین اعداد $1/25$ و $1/5$ بیشترین راندمان را دارد، همچنین برای ساخت سرریز با شرایط بهینه هیدرولیکی نسبت‌های $\frac{P}{W_u}$ و $\frac{B_i}{B_o}$ برابر با $1/33$ و 0.333 و برای ساخت سرریز با شرایط بهینه اقتصادی این نسبت‌ها به ترتیب برابر 0.5 و 1 باید در نظر گرفته شوند، در این پژوهش نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ برابر با $1/5$ در نظر گرفته شد؛ با توجه به طرح‌های بررسی شده از بررسی‌های پیشین، و با توجه به محدودیت آزمایشگاهی و در نظر گرفتن عرض کل سرریز برابر با 80 سانتی‌متر و با در نظر گرفتن بهینه هیدرولیکی نسبت $\frac{P}{W_u}$ برابر $1/33$ و نسبت $\frac{B_i}{B_o}$ برابر 1 ، تیپ A سرریز کلید پیانویی با $3/5$ سیکل طراحی و ساخته شد. از آنجا که عرض سرریز کلید پیانویی برابر با عرض فلوم آزمایشگاهی در نظر گرفته شده بود، سرریز در عرض کانال ثابت شد و با چسب آکواریوم آب‌بندی شد. در هر آزمایش، پس از استقرار مدل‌های آزمایشی دیواره سپری روی تاج سرریز، اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب و دبی انجام شد. ارتفاع سطح آب بالادست سرریز در فاصله 2 متر بالادست سرریز، قبل از افت سطح آب، با عمق‌سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری شد و دبی جریان با یک سرریز مستطیلی کالیبره شده مستقر در انتهای فلوم تعیین شد. در ورودی فلوم از شبکه لوله‌های موازی و آرام‌کننده‌های جریان برای کاهش نوسانات سطح آب استفاده شد. آزمایش‌ها تحت شرایط جریان آزاد (0.5 $\frac{H_i}{p}$) و بدون کنترل پایین‌دست انجام شد و در نهایت محدوده وسیعی از جریان (حداقل 220 اندازه‌گیری) آزمایش شد. در این پژوهش در مجموع 22 مدل سرریز بررسی شد که مدل‌ها به شکل زیر ارائه شدند: ۱- مدل آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی بدون دیواره سپری به‌عنوان مدل شاهد، ۲- آزمایش‌های اثر دیواره سپری بدون شیب روی سرریز کلید پیانویی، در 3 ارتفاع دیواره سپری $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ سانتی‌متری روی (الف) تاج‌های جانبی (ب) تاج‌های جانبی و تاج کلید ورودی (ج) کل تاج سرریز، ۳- آزمایش‌های بررسی اثر دیواره سپری شیب‌دار در 3 ارتفاع $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ سانتی‌متری دیواره سپری و

که در این معادله، Q_a دبی واقعی جریان، Q_{tr} دبی نظری و C_d ضریب دبی می‌باشند. (۵)

جدول ۱- معادلات محاسبه دبی نظری با احتساب باز بودن کلیدها

معادله	محل قرارگیری دیواره سپری بدون شیب
$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L(H-R)^{1.5}$ (۶)	روی کل تاج سرریز
$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} [(N.W_i)(H-R)^{1.5} + (N.W_o)H^{1.5} + (2N.B)(H-R)^{1.5}]$ (۷)	روی تاج جانبی و کلید و ورودی
$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} [(2N.B)(H-R)^{1.5} + WH^{1.5}]$ (۸)	روی تاج جانبی

برای محاسبه دبی نظری در حالت استغراق دیواره‌ی سپری ($H > R$) و عدم استغراق دیواره‌ی سپری ($H < R$) در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ ارائه شده است.

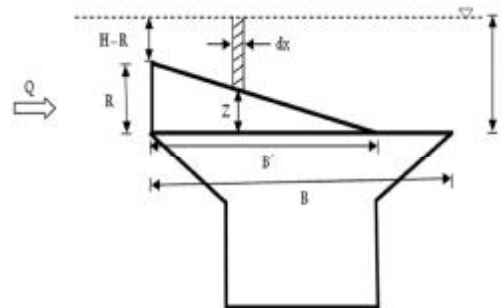
همچنین با توجه به اینکه استفاده از دیواره سپری شیب‌دار، طول مؤثر تاج سرریز را افزایش می‌دهد با فرضیاتی از جمله افقی بودن پروفیل سطح آب، با انتگرال‌گیری در طول تاج جانبی، معادلات اصلاح شده‌ای

جدول ۲- معادلات اصلاح شده دبی نظری برای استفاده از دیواره‌های سپری شیب‌دار

معادله	حالت استغراق
$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} WH^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (2N) \left[\frac{B'}{2.5R} (H^{2.5} - (H-R)^{2.5}) + H^{1.5} (B-B') \right]$ (۹)	$H > R$
$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} WH^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (2N) \left[\frac{B'}{2.5R} H^{2.5} + H^{1.5} (B-B') \right]$ (۱۰)	$H < R$

در شکل ۵- الف، نمودار دبی- اشل برای سرریز کلیدپیانویی با دیواره‌های سپری شیب‌دار با ارتفاع $2/5$ سانتی‌متری با طول‌های $B = (1 \text{ و } 0/75, 0/5, 0/25)$ نشان داده شده است. براساس این شکل مشخص می‌شود که در حالت $B' = B$ بیشترین درصد افزایش بارآبی بالادست در حدود ۱۰ درصد است. در مجموع حضور دیواره سپری روی تاج جانبی خیلی سبب جلوگیری از آشفتنگی و تداخل تیغه‌های جریان نمی‌شود. این موضوع در شکل ۵- ب، بدین صورت است که در دیواره‌های با ارتفاع ثابت اثر دیواره محسوس‌تر است. براساس بررسی‌های ارائه شده از سوی ماچیلز و همکاران (۲۰۱۳)، در صورتی که ارتفاع دیواره سپری به اندازه‌ای باشد که ارتفاع سرریز را به ارتفاع بهینه نزدیک کند، وجود آن تأثیر بیشتری خواهد داشت. با عدم پیوستگی دیواره سپری در بخش کلید خروجی مشاهده می‌شود که در یک دبی ثابت، ارتفاع آب حدود ۲۷ درصد افزایش یافته است. این افزایش بار آبی ممکن است به این دلیل باشد که با عدم پیوستگی

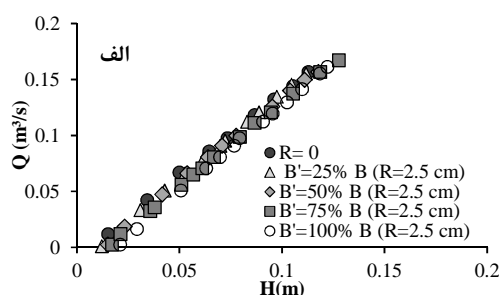
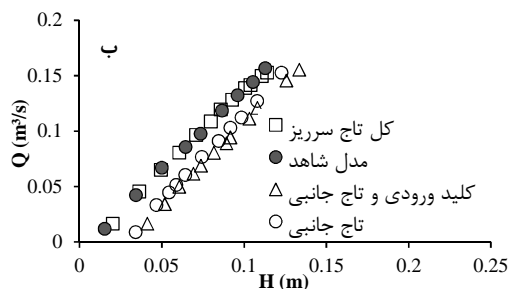
در شکل ۴ پارامترهای مذکور در معادلات روی تاج جانبی نمایش داده شده است.



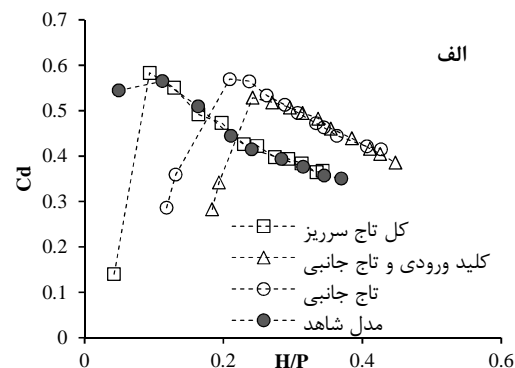
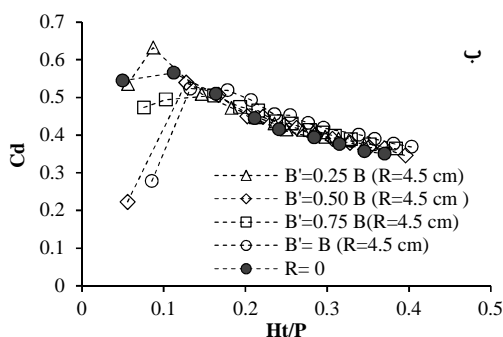
شکل ۴- نحوه المان‌گیری از تاج جانبی در حالت استغراق کامل

با استفاده از معادلات ارائه شده در بالا و محاسبه ضریب دبی برای مدل‌های مورد بررسی، نمودارهای لازم برای مدل‌های مختلف سرریز ترسیم گردید. شکل ۵ منحنی‌های دبی- اشل را برای مدل‌های آزمایشی با وجود دیواره سپری شیب‌دار و بدون شیب با ارتفاع $2/5$ سانتی‌متری دیواره سپری نشان می‌دهد.

خروجی افزایش می‌یابد. این موضوع سبب افزایش آشفستگی جریان و کاهش بازدهی تخلیه و در نهایت افزایش بارآبی بالادست می‌شود؛ ولی این افزایش بارآبی نسبت به حالت قبل حدود ۵ درصد کمتر است. بیشترین درصد افزایش بار آبی در بین مدل‌های آزمایشی در حالت بدون شیب با عدم پیوستگی دیواره سپری ۴/۵ سانتی‌متری در بخش کلید خروجی برابر با ۳۴ درصد مشاهده شد. شکل ۶ منحنی‌های ضریب دبی در مقابل H_t/P را برای مدل‌های دیواره سپری ۴/۵ سانتی‌متری نشان می‌دهد.



شکل ۵- منحنی‌های دبی - اشل سرریز کلید پیانویی با حضور دیواره سپری (الف) شیب‌دار و (ب) بدون شیب



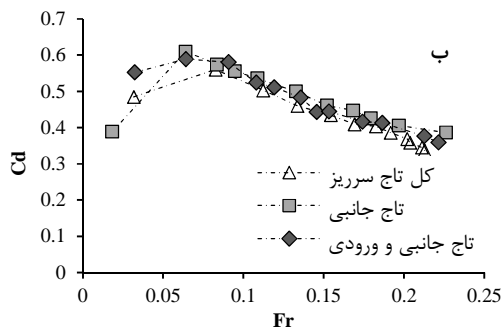
شکل ۶- منحنی ضریب دبی در مقابل H_t/P برای دیواره‌های سپری (الف) بدون شیب و (ب) شیب‌دار

در بارهای زیاد جریان را نشان می‌دهد. با قرار دادن دیواره سپری روی تاج جانبی و عدم پیوستگی در بخش تاج کلید خروجی و کلید ورودی، تداخل تیغه‌های جانبی و در نتیجه اثر استغراق در ابتدای کلید خروجی سرریز در بارهای آبی بالای جریان کاهش یافته است که این امر سبب افزایش ضریب دبی در بارهای آبی بالا، نسبت به مدل شاهد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶- الف، مشاهده می‌شود، در $H_t/P < 0.25$ ضریب دبی جریان نسبت به مدل شاهد کمتر بوده که با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که در این نسبت H_t/P ، افزایش بار آبی بالادست مشاهده

در بخش تاج کلید خروجی، حجم جریان عبوری از کلید خروجی افزایش یافته و در نتیجه استغراق زودتر رخ می‌دهد که این اتفاق سبب کاهش راندمان و افزایش بار آبی بالادست می‌شود. همچنین با قرارگیری دیواره سپری بدون شیب فقط روی تاج جانبی حدود ۲۲ درصد افزایش بارآبی نسبت به مدل شاهد مشاهده می‌شود. در این حالت هم به دلیل اینکه دیواره سپری روی تاج جانبی سبب کاهش جریان عبوری از روی تاج جانبی در بارهای کم می‌شود، حجم جریان عبوری از روی کلید ورودی و

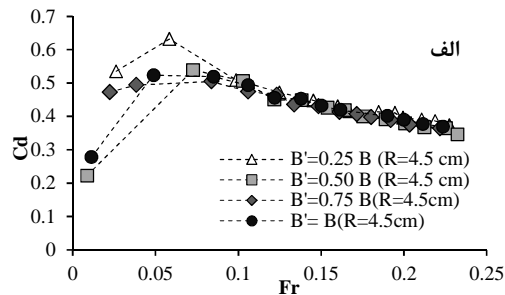
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است در محدوده $H_t/P < 0.25$ ، ضریب دبی جریان، C_d ، با افزایش سطح آب بالادست، افزایش می‌یابد تا به یک حد نهایی برسد. سپس با افزایش سطح آب بالادست، این ضریب به تدریج کاهش یافته که در نسبت H_t/P های زیاد، این روند کاهش با شدت بیشتری رخ می‌دهد. به دلیل اینکه با افزایش بارآبی بالادست به دلیل تداخل تیغه‌های جانبی، شدت تلاطم و استغراق در کلید خروجی نیز افزایش می‌یابد و سبب کاهش راندمان سرریز در بارهای بالا می‌شود. در حقیقت این شکل به روشنی عدم کارایی لازم سرریز کلید پیانویی

در مقابل H_t/P برای دیواره‌های سپری شیب‌دار براساس نتایج منحنی دبی- اشل است که دیواره سپری شیب‌دار تأثیر چندانی روی ضریب دبی و در نتیجه راندمان سرریز نداشته است. با توجه به افزایش طول تاج مؤثر در مدل‌های دیواره‌سپری شیب‌دار، انتظار افزایش عملکرد سرریز وجود داشت اما شاید ایجاد فشردگی جریان در تاج کلید خروجی سبب عدم تأثیر افزایش طول تاج دیواره سپری شیب‌دار می‌شود و در نهایت با حضور این دیواره‌های سپری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد سرریز مشاهده نمی‌شود. برای بررسی اثر عدد فرود، در شکل ۷ منحنی C_d در مقابل عدد فرود بالادست، برای دیواره سپری ۴/۵ سانتی‌متری ارائه شده است.



شکل ۷- منحنی C_d در مقابل Fr بالادست، در حالت الف) شیب‌دار، ب) بدون شیب

می‌شود، براساس بررسی‌های ماچیلز (۲۰۱۲)، به دلیل تأثیر کشش سطحی در اعداد وبر کمتر از ۵۰، راندمان مدل‌ها نسبت به مدل شاهد کمتر بوده است. از طرفی در نسبت $\frac{H_t}{p} \times 0.25$ با افزایش بار آبی جریان، ضریب دبی نسبت به مدل شاهد افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده این است که با عدم پیوستگی در کلید خروجی و ورودی در نسبت‌های بالای H_t/P ، اثر استغراق کاهش یافته و عملکرد هیدرولیکی سرریز بهتر شده است. در حالت عدم استغراق مدل‌های بدون شیب غیر پیوسته، با کاهش طول مؤثر تاج نسبت به مدل شاهد، سبب کاهش حجم جریان عبوری می‌شوند که این امر سبب کاهش راندمان تخلیه می‌شود. نتایج منحنی ضریب دبی



در دو حالت برای اعداد وبر کمتر و بیشتر از ۵۰ برآورد شده است. بعد طولی جایگزین در عدد وبر، هد آب بالادست سرریز در نظر گرفته شد. دمای متوسط آب ۲۰ درجه و کشش سطحی (σ) ، در حدود 0.074 نیوتن بر متر اعمال شد. برای ارزیابی عملکرد معادلات ارائه شده از شاخص آماری اندازه‌گیری خطا استفاده شده است. معیار خطای استفاده شده در این پژوهش جذر میانگین مربعات خطا RMSE است. معادله به دست آمده از نرم‌افزار آماری SPSS به صورت زیر قابل ارائه است.

$$C_d = 0.07 \left(\exp\left(\frac{H_t}{P}\right) \right) - 0.21 \left(\ln(Fr) \right) \quad (We)50 \quad (11)$$

$$- 0.008 \left(\sqrt{S} \right) - 0.033$$

$$C_d = -0.9 \left(\exp\left(\frac{H_t}{P}\right) \right) + 0.03 \left(\frac{H_t}{R} \right) - 3.7(Fr) \quad (We)50 \quad (12)$$

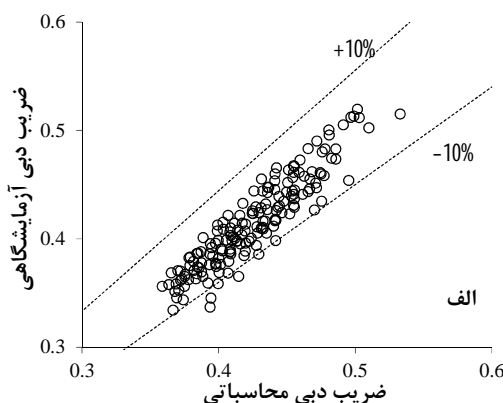
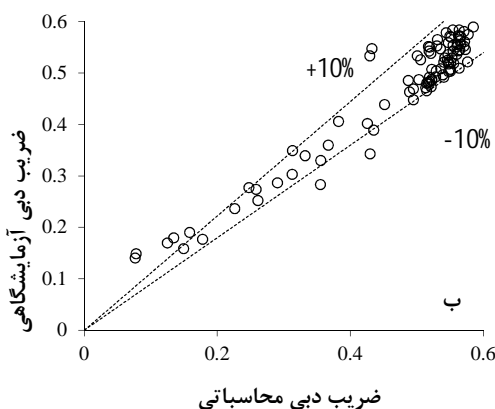
$$+ 0.12 \left(\ln(We) \right) + 0.01(S) + 1.55$$

شایان ذکر است که معادله (۱۱)، براساس محدوده $0.46 < \frac{H_t}{P} < 0.2$ و معادله (۱۲)، براساس محدوده‌های

براساس بررسی‌های ماچیلز (۲۰۱۲)، راندمان سرریز کلید پیانویی در بارهای آبی کم در امتداد کلید ورودی به طور اساسی تحت کنترل عدد فرود است. با توجه به منحنی ارائه شده در شکل ۷- الف، برای دیواره‌سپری شیب‌دار مشاهده می‌شود که در یک Fr ثابت، دیواره‌های سپری به طول $B' = 0.25B$ ، $B' = 0.50B$ ، $B' = 0.75B$ و $B' = B$ به ترتیب ضریب دبی بالاتری دارند، و همچنین با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۷- ب، برای دیواره سپری بدون شیب مشاهده می‌شود که در یک Fr ثابت، دیواره‌های سپری غیرپیوسته مستقر روی تاج سرریز ضریب دبی بالاتری دارند. با کاهش عدد فرود، سرعت جریان نیز کاهش یافته که سبب کاهش تداخل تیغه‌های جریان و تلاطم شده و سبب کاهش افت ورودی می‌شود و راندمان کلی سرریز افزایش می‌یابد. در نهایت با نرم‌افزار آماری SPSS رابطه‌ای برای تخمین ضریب دبی با ضریب تعیین R^2 ، با در نظر گرفتن تأثیر عدد وبر بالادست جریان،

گرفتند. همچنین هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب معادله ارائه شده است. همچنین برای مقایسه معادله ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی گراف خط ۴۵ درجه در شکل ۸ برای معادلات آماری ارائه شده دیواره سپری بدون شیب و شیب‌دار نمایش داده شده است.

در نظر گرفته شده $\langle \frac{H_i}{P} \rangle = 0.05$ و $\langle \frac{H_i}{R} \rangle = 0.08$ است. مقادیر R^2 و RMSE برای معادله (۱۱) به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۰/۰۲۳ و برای معادله (۱۲) به ترتیب برابر با ۰/۹۲۲ و ۰/۰۳۱ به دست آمده است. برای برآورد معادلات با نرم‌افزار آماری SPSS، ۸۰ درصد داده‌ها استفاده شد و با ۲۰ درصد دیگر معادلات موردنظر مورد آزمون قرار



شکل ۸- مقایسه ضریب دبی محاسباتی و آزمایشگاهی؛ الف) (We)50 و ب) (We)50

دیواره‌سپری در حال افزایش است. به طوری که با افزایش ۱۴/۷ درصدی ارتفاع دیواره سپری، ضریب دبی مدل‌های آزمایشی در این پژوهش در مقایسه با ضریب دبی مدل‌های آزمایشی افضلیان (۱۳۹۳)، حدود ۱۰ درصد افزایش داشته است. این افزایش، در ارتفاع کمتر دیواره سپری نامحسوس است.

به جهت ارزیابی نتایج به دست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج این پژوهش با نتایج ارائه شده بررسی‌های پیشین انجام شده، که در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق این جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضریب دبی مدل‌های آزمایشی در این پژوهش در مقایسه با ضریب دبی مدل‌های آزمایشی افضلیان (۱۳۹۳)، با افزایش ارتفاع

جدول ۳- مقایسه ضریب دبی دیواره‌های سپری، با بررسی‌های پیشین

منابع مورد استفاده	مدل دیواره‌سپری	درصد افزایش ارتفاع سرریز با دیواره سپری	نسبت $\frac{H_i}{P}$	ضریب دبی (C_d)	دماغه ورودی سرریز
افضلیان (۱۳۹۳)	شیب‌دار پیوسته	۸	۰/۱	۰/۵۷	
		۱۴/۷	۰/۱۳	۰/۵۰	پایه نیم استوانه‌ای
		۲۱	۰/۱۶	۰/۴۶	
پژوهش حاضر	شیب‌دار ناپیوسته	۸	۰/۱۳	۰/۵۲	
		۱۱/۵	۰/۱۳	۰/۵۵	پایه مثلثی
		۱۴/۷	۰/۱۳	۰/۵۶	

راندمان، عملکرد سرریز بررسی شد و معادلاتی برای برآورد ضریب دبی ارائه شده است. نتایج نشان داد که قرارگیری دیواره‌های سپری شیب‌دار روی تاج جانبی سرریز سبب افزایش ترازآبی بالادست شده است. همچنین قرارگیری پیوسته‌ی دیواره سپری بدون شیب روی کل تاج

نتیجه‌گیری

سرریزهای کلیدپیانویی سازه‌های به نسبت جدیدی با عملکرد بالای هیدرولیکی در بارهای آبی کم هستند. در این پژوهش با استفاده از دیواره‌های سپری شیب‌دار و بدون شیب برای کاهش استغراق ورودی سرریز و افزایش

- International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs. CRC Press, Boca Raton. pp. 273-281.
10. Lempérière F. Vigny J. P. and Ouamane A. 2011. General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs The past and present. Proceedings International Conferences Labyrinth and Piano Key Weirs. Liège B. CRC Press, Boca Raton FL. pp. 17-25.
 11. Machiels O. 2012. Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs. PhD Thesis ULgetd, Univerity of Liège (B). 298 p.
 12. Machiels O. Ercicum S. Piroton M. Dewals B. and Archambeau P. 2012. Experimental analysis of PKW hydraulic performance and geometric parameters optimum. Proceedings of International workshop on Piano Key Weir for In-stream Storage and Dam Safety. 97-114.
 13. Machiels O. Ercicum S. Archambeau P. Dewals B. and Piroton M. 2013. Parapet Wall Effect on Piano Key Weir Efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Enginering. 139(6): 506-511.
 14. Pfister M. and Schleiss A. J. 2013. Comparison of hydraulic design equations for A-type Piano Key weirs. International Conferences Water Storage and Hydropower Development for Africa. p. 1-8.
- سرریز تأثیری بر عملکرد سرریز نداشته و از آن در راستای افزایش ارتفاع سرریز می‌توان استفاده کرد. از این رو با استقرار غیرپیوسته دیواره سپری بدون شیب، در بارهای آبی کم، افزایش بارآبی بالادست و در بارهای آبی زیاد، افزایش راندمان نسبت به حالت بدون دیواره سپری (مدل شاهد) مشاهده شد. این افزایش در راندمان تخلیه به دلیل افزایش حجم کلید خروجی و کاهش افت ورودی ناشی از استقرار دیواره سپری غیرپیوسته است.
- ### منابع
۱. افضلیان ع. ر. ۱۳۹۳. بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای PKW تحت هندسه متفاوت پایه و تاج جانبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۰۷ ص.
 ۲. جواهری ا. ۱۳۹۰. هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۸۲ ص.
 3. Anderson R. M. 2011. Piano Key Weir Head Discharge Relationships. All Graduate Theses and Dissertations, Utah State University. 80 p.
 4. Anderson R. M. and Tullis B. 2013. Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. Journal of Irrigation and Drainage Enginering. 139(3): 246-253.
 5. Blanc P. and Lempérière F. 2001. Labyrinth spillways have a promising future, International Journal of Hydropower and Dams. 8(4): 129-131.
 6. Leite Ribeiro M. Bieri M. Boillat J. L. Schleiss A. J. Delorme F. and Laugier F. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways - Design of Piano Key Weirs. in proceedings of 23rd congress of CIGB/ICOLD, Brasilia. 19 p.
 7. Leite Ribeiro M. Pfister M. Schleiss A. J. and Boillat J. L. 2012-a. Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research. 50(4): 400-408.
 8. Leite Ribeiro M. Pfister M. Boillat J. L. Schleiss A. J. and Laugier F. 2012-b. Piano key weirs as efficient spillway structure. 24th ICOLD Congress on Large Dams, Kyoto (J), Q.94-R.13.
 9. Leite Ribeiro M. Pfister M. and Schleiss A. J. 2013. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. Proceedings of the 2nd

