



تحلیل کاربردی سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان یک سد انحرافی

جواد احدیان^{*}، علیرضا افضلیان

گروه سازه‌های آبی، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ شهریور ۱۳۹۳
بازنگری: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ تیر ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

افزایش سطح آب
انحراف آب
تاج شیب‌دار
سرریز کلیدپیانویی

چکیده: در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی به بررسی توانایی این سرریزها در انحراف آب در مواقع کم‌آبی و نیز تخلیه‌ی جریان در هنگام سیلاب پرداخته شد. به این منظور ابتدا دو مدل سرریز کلیدپیانویی با نسبت ارتفاع به عرض یک سیکل، P/W_u ، $1/33$ (مدل ۱)، و $0/5$ (مدل ۲)، ساخته و برای هر کدام از این مدل‌ها از دیواره‌ی سپری با شیب‌های $5/5$ و 8 درجه در جهت جریان، مثبت، و در خلاف جهت جریان، منفی، استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ۲، در دبی‌های کم توانایی بیشتری در افزایش سطح آب دارد. در حالیکه در دبی‌های زیاد، این مدل ۱ است که توان تخلیه‌ی جریانش بیشتر است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که پارامتر H/R ، نسبت تاثیرگذاری بر ضریب تخلیه‌ی جریان، در حالت عدم استغراق کامل و در ارتفاع‌های کم آب پس از استغراق سرریز می‌باشد. رابطه‌ی بدست آمده برای ضریب دبی جریان قبل و بعد از استغراق کامل سرریز به ترتیب دارای حداقل مربعات خطای برابر با $0/976$ و $0/983$ می‌باشند.

۱- مقدمه و هدف

عمل کنند، که خود این موضوع باعث افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود [۱و۲]. دو مزیت عمده‌ی این سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی معمولی شامل کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه‌ی سیلاب می‌باشد. این ویژگی‌ها اجازه می‌دهد که این سرریزها به آسانی بر روی تاج بسیاری از سدهای وزنی موجود قابل احداث باشند [۳]. همچنین هندسه‌ی خاص این سرریز (شیب کلیدها، و نسبت عرض کلید ورودی به خروجی و وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست) باعث افزایش ظرفیت تخلیه، تا حدود ۴ برابر بیشتر از سرریزهای اوجی شده است [۴-۶]. شکل ۱ نمای سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی به همراه پارامترهای مهم سازه‌ای و هیدرولیکی را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل ۱ و براساس قرارداد نامگذاری سرریزهای کلیدپیانویی، T ، ضخامت تاج جانبی، P ، ارتفاع سرریز، P_d ، ارتفاع سد، W_o ، عرض کلیدخروجی، W_i ، عرض کلید ورودی، B_i ، طول شیروانی پایین‌دست، B_o ، طول شیروانی بالادست، B ، طول بالادست-پایین‌دست سرریز، R ، ارتفاع دیواره‌های سپری، n ، تعداد و W_u ، عرض یک سیکل^۷ می‌باشند.

در حالت عادی سطح آب رودخانه پایین‌تر از سطح مزارع اطراف آن می‌باشد. با احداث سد انحرافی می‌توان سطح آب را بالاتر آورد؛ به گونه‌ای که بر زمین‌های مزروعی اطراف سوار گردد. در نتیجه می‌توان آب رودخانه را از طریق دریچه‌های آبگیر با کانال هدایت کننده‌ی به سمت مزرعه منحرف نمود. در زمان‌های سیلابی، آب به اندازه‌ی نیاز آبیاری که توسط دریچه‌های آب‌گیر کنترل می‌گردد، منحرف می‌شود و بقیه‌ی جریان از روی سرریز سد انحرافی عبور می‌کند. چون مخزن تشکیل شده در جلوی سد انحرافی معمولاً دارای حجم بسیار کمی می‌باشد، به علت ارتفاع کم سد از حجم ذخیره‌ی آن صرفه‌نظر شده و سد انحرافی با این فرض طراحی می‌گردد که حداکثر دبی طرح را از خود بدون روندیابی در مخزن عبور می‌دهد [۱]. انحراف آب همزمان با تخلیه‌ی جریان در مواقع سیلابی معمولاً نیاز به دریچه‌هایی روی سد انحرافی دارد تا در هنگام سیلاب بتوان با باز نمودن آن‌ها جریان را از روی سد انحرافی با بار آبی حداقل عبور داد. مزیت این روش در این است که نیازی به افزایش ارتفاع خاکریزهای ساحلی^۱، که نقش زیادی در افزایش هزینه‌ها را به عهده دارد، نمی‌باشد. توانایی بالای سرریزهای کلیدپیانویی در تخلیه‌ی جریان یک مزیت عمده‌ی این نوع خاص از سرریزهای زیگزاگی است. این سرریزها به مخازن سدها این امکان را می‌دهند تا با تراز بالاتری

2 Width of Inlet Key

3 Width of Outlet Key

4 Inlet Overhang

5 Outlet Overhang

6 Parapet Wall

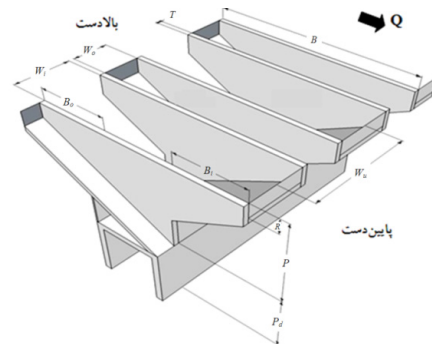
7 Width of a PKW unit [$W_u = W_i + W_o + 2T$]

^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: J.ahadiyan@scu.ac.ir

1 Dikes

همانطور که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است، در مدل A، شیروانی‌های بالادست و پایین دست وجود دارند؛ مدل B و C به ترتیب فقط دارای شیروانی‌های بالادست و فقط دارای شیروانی‌های پایین دست هستند و در مدل D هیچ کدام از شیروانی‌ها وجود ندارند. در مرجع [۹]، با بررسی آزمایشگاهی مدل‌های A و B، این نتیجه به دست آمده است که $n=6$ بهینه است. همچنین نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ را نیز، $1/20$ پیش‌بینی نموده است. در مرجع [۹] این نتیجه نیز بدست آمد، که با افزایش شیب کلیدها از ۲:۱ به ۳:۲ در هر دو مدل A و B، سرریز، افزایش راندمانی را در حدود ۲۵٪ از خود نشان می‌دهد. در مرجع [۱۰]، جزئیات و همچنین نامگذاری پارامترهای مختلف هندسی سرریزهای کلیدپیانویی آمده است؛ که در این بین ۲۴ مشخصه‌ی هندسی این سرریز معرفی شده است. مرجع [۴]، با مقایسه‌ی مدل A و D به این نتیجه رسید، که وجود شیروانی‌ها اثر مثبتی بر تخلیه‌ی جریان دارد، همچنین با بررسی نسبت‌های مختلف عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی، مقدار $1/50$ را برای این نسبت عددی بهینه معرفی نموده است. بررسی‌های این مرجع برای نسبت‌های بیشتر و کمتر از $1/50$ نتایج نامطلوبی را بر ضریب تخلیه‌ی سرریز نشان می‌دهد. در مرجع [۱۱]، با آنالیز داده‌های آزمایشگاهی موجود ضریب تخلیه‌ی برای سرریزهای کلیدپیانویی ارائه شده است. این ضریب تابعی از پارامترهای $\frac{W_i}{W_o}$ ، $\frac{(L-W)P_i}{WH}$ ، $\frac{P}{P}$ و $\frac{B_i+B_o}{B}$ است. مرجع [۶]، با بررسی مدل‌های آزمایشگاهی مختلف به ارائه‌ی یک ضریب دبی در حالت جریان آزاد پرداخته است. مرجع [۱۳]، جامع‌ترین و نسبتاً کامل‌ترین مطالعات را بر روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام داده است. در این مرجع آن‌ها با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار، سطح آب و همچنین عدد فرود، و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی که همگی بصورت غیرمتقارن جهت تمهیم مشخصات بر کل سرریز بود، نهایتاً به معادلاتی جهت برآورد دبی‌های کلید ورودی، خروجی، و تاج جانبی دست یافتند. پیچیدگی جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی و نیز پارامترهای تاثیرگذار هندسی زیاد آن‌ها، آزمایش روی مدل‌های فیزیکی را حتماً احتیاج خواهد داشت [۶، ۱۲، ۱۴]. در مرجع [۱۵] رابطه‌ی ضریب دبی در سرریزهای کلیدپیانویی تحت شرایط جریان آزاد ارائه شده است.

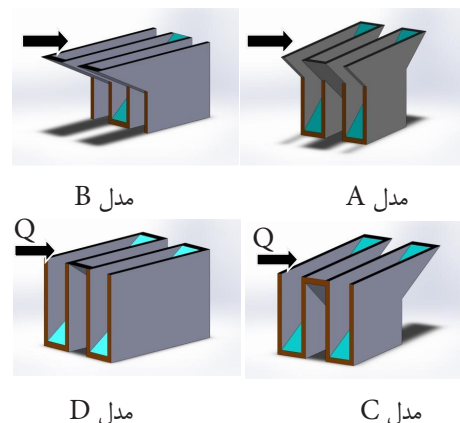
با توجه به توضیحات فوق و همچنین کاهش هزینه‌ها به ویژه هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، می‌توان از هندسه‌ی سرریزهای کلیدپیانویی بهره گرفت. به نحوی که با تغییر شیب روی دیواره‌ی سپری، از سویی در دبی‌های کم، بار آبی را افزایش داد و از طرفی با افزایش دبی جریان، از آنجا که طول موثر سرریز افزایش می‌یابد، راندمان تخلیه‌ی جریان را افزایش داد. در این پژوهش به منظور نیل به اهداف ذکر شده ابتدا دو مدل سرریز کلیدپیانویی با نسبت ارتفاع به عرض یک سیکل $1/33$ و $0/5$ ساخته شد که این دو مدل، مدل‌های شاهد می‌باشند؛ همچنین برای هر کدام از آن‌ها از دیواره سپری با سه شیب ۳، $5/5$ و ۸ درجه در جهت جریان (مثبت)، و ۳، $5/5$ و ۸ درجه در خلاف جهت جریان (منفی)، استفاده شد. در نهایت برای هر مدل سرریز، آزمایش‌های مختلفی با دبی‌های خیلی کم تا زیاد انجام شد و نتایج



شکل ۱: نمای سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی به همراه پارامترهای هندسی مهم

Fig. 1. 3D view of piano key weirs with important geometrical parameters.

افزایش دبی سیلاب و مسائل مربوط به ایمنی سدها باعث شده است که کمیته بین المللی سدهای بزرگ اعلام کند که: سرریز بسیاری از سدهای موجود مجدداً مورد بررسی و در صورت لزوم اصلاح شوند. از بین گزینه‌های موجود، یکی از مناسب‌ترین اقدامات ساخت و اصلاح به وسیله سرریزهای کلیدپیانویی است [۲، ۶]. اولین آزمایش‌ها بر روی نوع A و B سرریز کلیدپیانویی در مرجع [۷] و [۸] ارائه شده است. در این مراجع که در سال ۲۰۰۶ برای پارامترهای بدون بعد مختلف، توسعه یافته است، تأثیر پارامتر بدون بعد $\frac{L}{W}$ به عنوان پارامتری مهم در میزان تخلیه‌ی سرریز معرفی گردیده است [۷و۸]. در مرجع [۳] که بر روی سرریز کلیدپیانویی مدل A، انجام شده، مشخص گردیده است که مقدار $n=7$ برای مقادیر کم $\frac{H_i}{P}$ و 5 و $n=6$ برای مقادیر بیشتر $\frac{H_i}{P}$ ، باعث افزایش بازدهی سرریز می‌شود [۳]. مرجع [۸]، مدل‌های مختلف سرریزهای کلیدپیانویی را که از سال ۱۹۹۸ توسط موسسه‌ی Hydrocoop فرانسه مطالعه شده بود را به شکل ۴ مختلف دسته‌بندی کرده است. شکل ۲ مدل‌های مختلف سرریزهای کلیدپیانویی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: مدل‌های A, B, C و D سرریزهای کلید [۸]

Fig. 2. A, B, C, and D Piano Key Weirs Models

با یکدیگر مقایسه گردید.

۲- اصول و تئوری

۲-۱- تحلیل ابعادی

دبی عبوری از سرریزهای کلیدپانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار را می‌توان به صورت تابعی از کمیت‌های معرفی شده به صورت معادله ۱ نشان داد:

$$f(W_i, W_o, W_u, B_i, B_o, L, L_{wu}, B, R, P, P_{av}, W, Q, H, V, \rho, \sigma, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

در معادله ۱، W_i ، عرض کلیدهای ورودی، W_o ، عرض کلیدهای خروجی، W_u ، عرض یک سیکل، B_i ، طول شیروانی‌های ورودی، B_o ، طول شیروانی‌های خروجی، L ، طول تاج سرریز، L_{wu} ، $L = n[W_i + W_o + 2B]$ ، طول تاج یک سیکل (جدول ۱)، B ، طول تاج جانبی، R ، ارتفاع دیواره‌ی سپری، P_{av} ، ارتفاع متوسط سرریز، $(P_{av} = P + \frac{R}{2})$ ، W ، عرض محل احداث (عرض فلوم)، Q ، دبی جریان، H ، هد آب روی سرریز، V ، سرعت جریان، σ ، کشش سطحی، ρ ، جرم واحد حجم آب، μ ، لزوجت دینامیک (مطلق) آب و g ، شتاب ثقل می‌باشند. اگر ضریب دبی عبوری از سرریز را به صورت معادله ۲ در نظر گرفت، با تکنیک آنالیز ابعادی و به کمک قضیه‌ی Π باکینگهام می‌توان پارامترهای بدون بعد را به قرار معادله ۳، دسته‌بندی نمود:

$$CD_{PKW} = \frac{Q}{WH^{1.5}\sqrt{2g}} \quad (2)$$

$$f\left(\frac{W_i}{H}, \frac{W_o}{H}, \frac{W_u}{H}, \frac{B_i}{H}, \frac{B_o}{H}, \frac{L}{H}, \frac{L_{wu}}{H}, \frac{B}{H}, \frac{R}{H}, \frac{P}{H}, \frac{P_{av}}{H}, \frac{W}{H}, \frac{Q}{H^{2.5}\sqrt{g}}, \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{\rho H^{1.5}\sqrt{g}}{\mu}, \frac{\sigma}{\mu\sqrt{gH}}\right) = 0 \quad (3)$$

از آنجا که حاصل ضرب و توان اعداد بدون بعد، عدد بدون دیگری بدست می‌آید، به همین دلیل در این تحقیق رابطه‌ی ۴ جایگزین رابطه‌ی ۳ شده است.

$$f\left(CD_{PKW}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{L}{W}, \frac{T_a}{T_m}, \frac{H}{L_{wu}}, \frac{P}{W_u}, \frac{P_{av}}{W_u}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{H}{P}, \frac{H}{R}, \frac{R}{P}, \frac{L}{B}, Fr, Re, We\right) = 0 \quad (4)$$

با توجه به توضیحات مندرج در بندهای بالا و همچنین بنابر محدودیت‌های فلوم آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای W_i/W_o و L/W برای تمام مدل‌ها به ترتیب برابر ۱/۵۰ و ۴/۹۸ در نظر گرفته شدند. مدل‌های آزمایشگاهی همگی به صورت استاندارد مدل A، و با تعداد ۳/۵ سیکل،

ساخته شدند؛ لذا پارامتر B_i/B_o نیز برابر ۱ می‌باشد (مدل A). همچنین با توجه به اینکه عدد رینولدز در محدوده‌ی انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد، بنابراین جریان در محدوده‌ی آشفتنه بوده، و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد [۱۶]. در آزمایش‌های انجام شده مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار، قبل از استغراق کامل سرریز، تیغه‌ی جریان در تماس مستقیم با تاج جانبی می‌باشد. از طرفی پس از استغراق کامل، عمق آب روی کلید ورودی و خروجی به حدی است که نمی‌توان از تأثیر کششی سطحی و در نتیجه عدد وبر، بر بازدهی سرریز صرف‌نظر نمود. همچنین پارامتر $\frac{T_a}{T_m}$ ، نسبت تراز آب در مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار به تراز آب در مدل‌های شاهد می‌باشد. در نهایت رابطه‌ی ۵، اساس بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌های این پژوهش می‌باشد:

$$CD_{PKW} = f\left(\frac{T_a}{T_m}, \frac{H}{L_{wu}}, \frac{P_{av}}{W_u}, \frac{H_i}{P}, \frac{H}{R}, \frac{R}{P}, \frac{R}{B}, We\right) = 0 \quad (5)$$

جدول ۱ پارامتر L_{wu} را برای زوایای مثبت و منفی، و نیز در دو حالت عدم استغراق و استغراق کامل سرریز نشان می‌دهد:

جدول ۱: پارامتر L_{wu} برای زوایای مختلف دیواره‌ی سپری

Table 1. L_{wu} for different angles of parapet wall

L_{wu}	نسبت H/R	زاویه‌ی دیواره‌ی سپری
$2L_w^* + W_i + W_o$	$\alpha > 1$	در جهت جریان (مثبت)
$2L_w + W_i$	$\alpha \leq 1$	خلاف جهت جریان (منفی)

لازم به توضیح است که متغیر L_w طول موثر یک تاج جانبی در مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار می‌باشد.

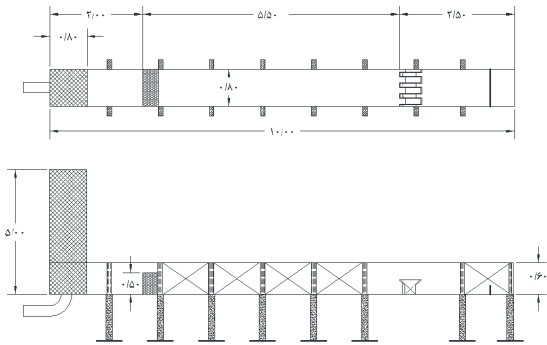
استغراق کامل *عدم استغراق

شکل ۳ نمایی از مدل‌های شیب‌دار مثبت و منفی و در حالت استغراق و عدم استغراق را نشان می‌دهد. همچنین در زیر کلیدهای خروجی از پایه‌هایی به شکل نیم‌استوانه استفاده شده است.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در کل محدوده‌ی تغییرات دبی از ۱ لیتر بر ثانیه تا ۱۷۰ لیتر بر ثانیه متغیر در نظر گرفته شد. فلوم مورد استفاده دارای طول ۱۰ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و شیب کف صفر و همچنین، دیواره‌ها از جنس شیشه و کف از نوع فولاد ضدزنگ می‌باشد. به جهت ساختار ویژه‌ی فلوم مورد استفاده که جهت آزمایش‌های مربوط به دبی‌های بالا ساخته شده است، در ابتدا به جهت آرام کردن جریان و کنترل نوسانات سطح آب در هنگام قرائت هد آب روی سرریز، از سیستم شبکه لوله‌های موازی همراه با دو توری فلزی که در انتهای آن نصب شده بود، استفاده شد؛ که به نحو بسیار مطلوبی شرایط را برای شروع آزمایش‌ها فراهم می‌آورد. مدل‌ها

یک عمق یاب نقطه‌ای مستقر روی فلوم استفاده و به جهت حساسیت در میزان جریان، دبی توسط یک دبی سنج آلتراسونیک دیجیتالی و یک سرریز مستطیلی به عرض ۱ متر، مستقر در انتهای فلوم خوانده و مقایسه و تنظیم می‌شد. همچنین تمام مدل‌های سرریز کلیدی پیاپی، با استاندارد مدل A و تعداد ۳/۵۰ سیکل ساخته شدند. شکل ۴ پلان و مقطع فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد (ابعاد بر حسب متر می‌باشند).



شکل ۴: طرح و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی و جانمایی سرریز درون فلوم

Fig. 4. Layout plan and longitudinal profile laboratory flume and weir into the flume

همانطور که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، سرریز در فاصله‌ی ۲/۵۰ متری از انتهای پایین دست فلوم و تقریباً در فاصله‌ی ۵/۵۰ متری از سیستم لوله‌های آرام کننده‌ی جریان نصب شده است. اندازه‌گیری‌ها بدین صورت انجام می‌شد که پس از تنظیم دبی در یک مقدار مشخص و ماندگار شدن جریان عبوری از روی سرریز، ابتدا پروفیل سطح آب از فاصله‌ی حدود ۴/۰ متری بالادست سرریز برداشت می‌گردید؛ بدین صورت که تا فاصله‌ی حدود ۱/۰ متری در بالادست با فاصله‌ی هر ۰/۵ متر، عمق آب به وسیله‌ی پوینت‌گیج^۲ برداشت می‌شد و از یک متری به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری این عمل انجام می‌گردید. از طرفی شرایط جریان عبوری به لحاظ آزاد یا مستغرق بودن نیز در هر آزمایش مورد کنترل می‌گرفت. شرایط مستغرق هنگامی به وقوع می‌پیوست که جریان عبوری از کلیدهای ورودی در اثر تداخل شدید تیغه‌ها باعث پر شدن آن‌ها می‌گردید. جدول ۲، برخی از ابعاد اصلی سرریزهای ساخته شده را نشان می‌دهد.

2 Point gage

جدول ۲: برخی از ابعاد سرریزهای کلید پیاپی ساخته شده

Table 2. Some dimensions of piano key weir

α°	Bi=Bo	P	Wu	Wo	Wi	مدل
(Tan ⁻¹ (R/B	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	
۵/۵۰، ۳۰، ۸۰	۱۰/۷۵	۳۰/۵۰	۲۲/۸۰	۸/۳۰	۱۲/۵۰	۱
		۱۱/۲۰				۲

تماماً از صفحات پلکسی گلاس با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شدند. جهت اتصال قطعات به یکدیگر پس از برش لیزری از چسب قطره‌ای و جهت آب‌بندی از سیلیکون آنتیا^۱ استفاده شد. این چسب سیلیکون امکان تسریع در فرآیند انجام آزمایش‌ها را فراهم می‌آورد، به نحوی که پس از ۱ ساعت از اتصال، امکان شروع آزمایش‌ها فراهم می‌شد. برای خواندن سطح آب از

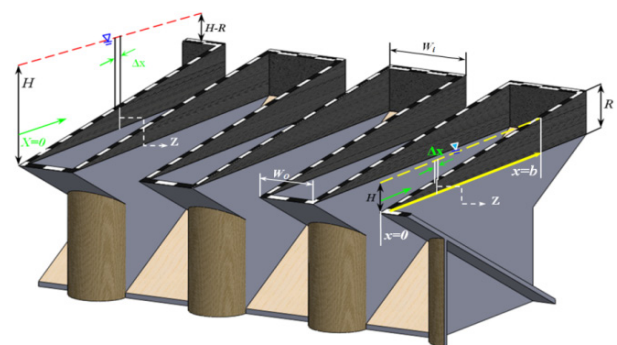
1 Antia



(الف) مدل ۱ (P/Wu برابر با ۱/۳۳)



(ب) مدل ۲ (P/Wu برابر با ۰/۵)



(ج) نمای سه بعدی دیوارهای سپری

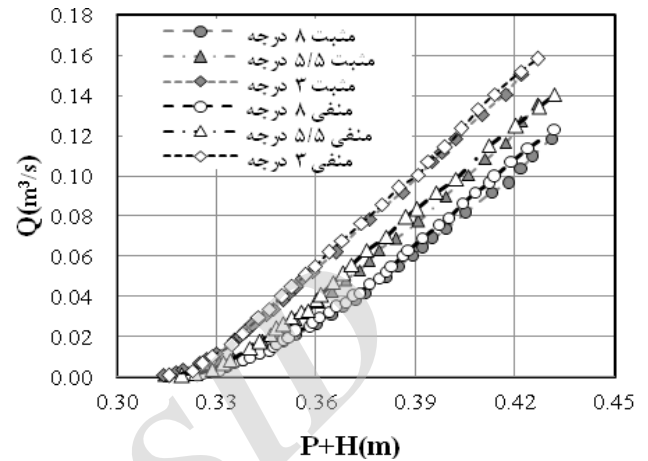
شکل ۳: استغراق و عدم استغراق (الف- مثبت ۵/۵ درجه، ب- منفی ۳ درجه)

Fig. 3. Submerge and not submerged (positive 5.5 degree & Negative 3 degree)

۳- نتایج و بحث

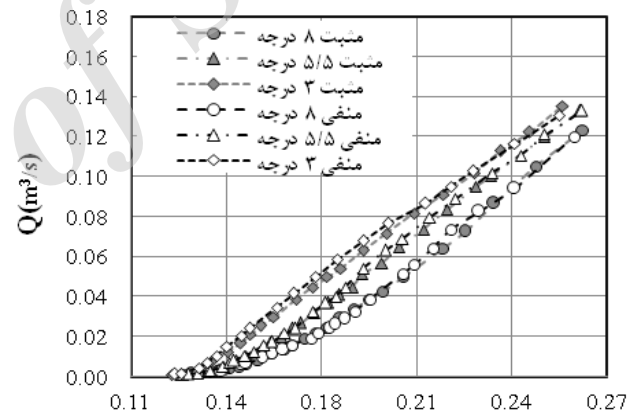
۳-۱- نمودارهای دبی، اشل

شکل ۵ نمودارهای دبی، اشل سرریزهای کلیدپیانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار را نشان می‌دهد.



P+H(m)

الف) مدل ۱



P+H(m)

ب) مدل ۲

شکل ۵: منحنی‌های دبی، اشل با وجود دیواره‌ی سپری شیب‌دار

Fig. 5. Head-discharge curves with sloped parapet wall

همانطور که از شکل ۵ مشخص است در هر دو مدل، در محدوده‌ی مشخصی از تراز سطح آب، به ازای یک هد ثابت، سرریز کلیدپیانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار منفی، نسبت به حالت مشابه مثبت، دبی بیشتری را عبور می‌دهد. این اتفاق با افزایش زاویه‌ی دیواره‌ی سپری در ترازهای آبی بالاتر مشاهده می‌شود. اگرچه در مدل‌های شیب‌دار مثبت، طول تاجی از سرریز که در تخلیه‌ی جریان شرکت می‌کند، به ازای هد یکسان (تا زمانی که سرریز کاملاً مستغرق نشده است) بیشتر از شیب منفی است و انتظار می‌رود که به ازای هد یکسان مدل‌هایی با دیواره‌های سپری مثبت، دبی

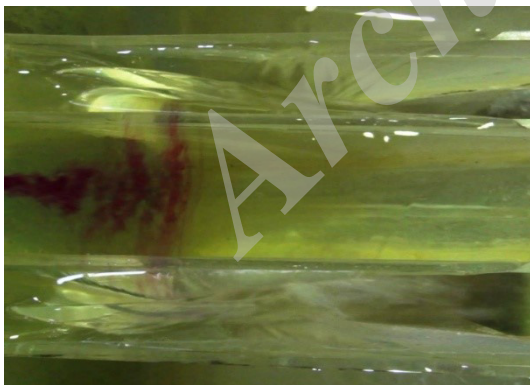
بیشتری را عبور دهد، اما مشاهدات نشان می‌دهد که به دو دلیل این اتفاق رخ نمی‌دهد؛ و شیب‌های منفی دیواره‌ی سپری، راندمانی بالاتر، البته قبل از استغراق کامل سرریز دارند:

۱- از آنجا که در مدل‌های دیواره‌ی سپری با شیب منفی، کلیدهای ورودی (که دارای عرض بیشتری نسبت به کلیدهای خروجی می‌باشند) متناسب با شیب مربوطه، بسته شده‌اند و تاج جانبی در خلاف جهت جریان شیب‌دار شده است، لذا مشاهده شد که خطوط جریان با تغییر جهت کاملاً ۹۰ درجه از تاج جانبی خارج می‌شوند که این اتفاق در شیب‌های مثبت دیواره‌ی سپری رخ نمی‌دهد.

۲- تغییر ۹۰ درجه‌ی خطوط جریان باعث می‌شود که تیغه‌ی جانبی در هنگام عبور از تاج سرریز در نزدیکی کلید خروجی، از زیر تیغه‌ی کلید خروجی عبور کند و این اتفاق عملاً باعث می‌شود طول موثری از سرریز که تا قبل از استغراق کامل، در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد، در مدل‌های شیب منفی بیشتر از شیب مثبت باشد. شکل ۶ این دو موضوع را نشان می‌دهد.



الف) عبور تیغه‌ی جانبی از زیر تیغه‌ی کلید خروجی

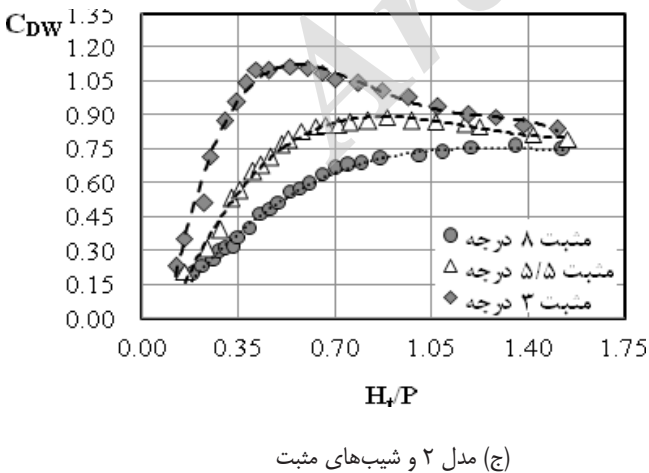
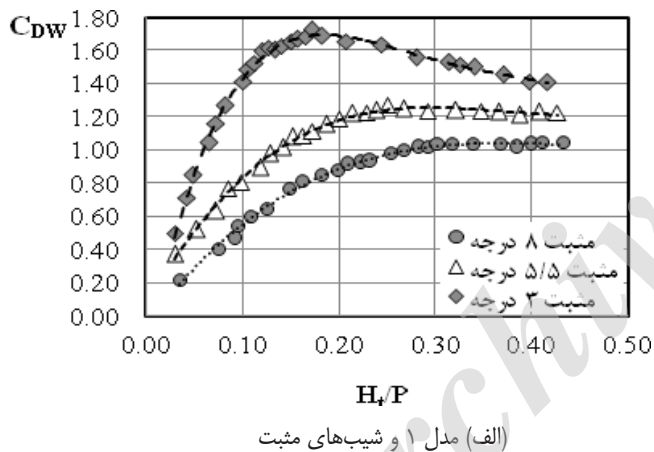


ب) تغییر ۹۰ درجه خطوط جریان

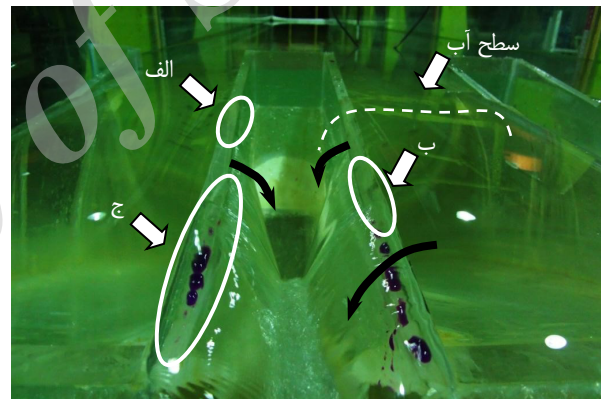
شکل ۶: نحوه‌ی عبور تیغه‌های جریان در سرریز کلیدپیانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار منفی

Fig. 6. Flow Nappes in piano key weir with negative sloping parapet wall

برای شیب‌های ۸ درجه مشاهده نمی‌شود؛ و در نسبت‌های زیاد H_t/P در این شیب‌ها (۸ درجه)، ضریب دبی ثابت می‌باشد. همچنین می‌توان به این نکته نیز اشاره داشت که مقدار بیشینه‌ی ضریب دبی برای شیب‌های ۳ درجه نسبت به شیب‌های ۵/۵ درجه و نیز شیب‌های ۵/۵ درجه نسبت به ۸ درجه، در H_t/P ‌های کمتری اتفاق می‌افتد. دلیل این رخدادها را می‌توان به این صورت بیان نمود که در شیب‌های ۳ درجه، به ازای یک هد ثابت، از آنجا که طول تاج جانبی که در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد، تا قبل از تداخل تیغه‌ها و استعراق کامل سرریز بیشتر از شیب‌های ۵/۵ درجه و ۸ درجه می‌باشد؛ بنابراین، ضریب دبی از سایر شیب‌ها بیشتر، و همچنین در نسبت‌های کمتر H_t/P به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که راندمان تخلیه‌ی جریان در مدل ۱، با نسبت ۱/۳۳، بیشتر از مدل ۲ با نسبت ۰/۵ است. که این موضوع را می‌توان در راندمان تاج جانبی در تخلیه‌ی جریان جست‌وجو نمود. در مدل ۲، نتایج نشان می‌دهد که در هد یکسان روی سرریز، تداخل تیغه‌ی جانبی و تیغه‌ی کلید خروجی شدیدتر از مدل ۱ است. لذا طول موثر تاج جانبی که در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد در مدل ۱ بیشتر از مدل ۲ می‌باشد.



شکل (۶-الف)، عبور تیغه‌ی جانبی از زیر تیغه‌ی کلید خروجی و شکل (۶-ب)، تغییر ۹۰ درجه‌ی خطوط جریان در هنگام عبور از تاج جانبی را نشان می‌دهد. دلیل دیگر عدم تفاوت چشمگیر میان زوایای مثبت و منفی دیواره‌های سپری را می‌توان در نوع تیغه‌های عبوری از تاج جانبی در حالت مثبت بیان نمود. مرجع [۱۷]، انواع تیغه‌های عبوری از روی سرریز براساس ارتفاع آب را بدین صورت تقسیم‌بندی نموده است که، در هدهای بسیار کم، تیغه‌ی جریان به بدنه‌ی پایین دست سرریز کاملاً می‌چسبد؛ این تیغه‌ی جریان با افزایش ارتفاع آب به سمت تیغه‌های چسبیده و فشرده متمایل می‌شود. همچنین در هدهای بالا، شکل تیغه‌ی جریان حالت آزاد یا جهشی و نهایتاً با افزایش بسیار زیاد ارتفاع آب حالت کاملاً آزاد بخود می‌گیرد. در کل بیشترین ضریب دبی مربوط به حالت گذار از تیغه‌ی فشرده به آزاد می‌باشد. در این تحقیق بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که برای سرریزهای کلیدپیانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار مثبت، همگی این تیغه‌ها در یک هد مشخص آب روی سرریز، بر روی تاج جانبی قابل مشاهده هستند که این اتفاق در حالت منفی مشاهده نشد. شکل ۷ این پدیده را نشان می‌دهد.



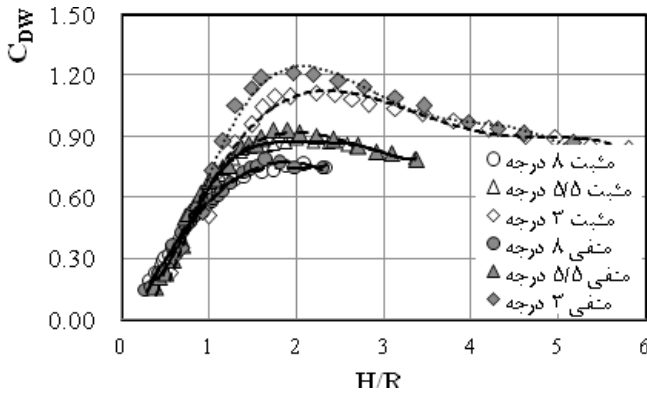
شکل ۷: تیغه‌های جریان روی مدل ۱، زاویه‌ی مثبت ۸ درجه

Fig. 7. Flow nappes on the model 1, positive 8 degree

براساس شکل ۷ در هد ۴/۵۰ سانتی‌متر، در انتهای بالادست تاج جانبی (الف)، تیغه‌ی کاملاً چسبیده، در میانه‌ی تاج جانبی (ب)، تیغه‌ی فشرده و در انتهای پایین دست تاج جانبی (ج)، تیغه‌ی آزاد یا پرشی مشاهده می‌شوند.

۳-۲- ضریب دبی در مقابل H_t/P

شکل ۸، ضریب دبی را در مقابل نسبت H_t/P برای مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار نشان می‌دهد. براساس شکل ۸، در تمامی شیب‌های ۳ درجه (مثبت و منفی) و در هر دو مدل (۱ و ۲)، ضریب دبی ابتدا روندی صعودی دارد؛ در یک نسبت H_t/P به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و سپس با افزایش H_t/P کاهش می‌یابد. روند کاهشی برای شیب‌های ۵/۵ درجه با دقت بیشتری همچنان قابل مشاهده است، اما این سیر نزولی



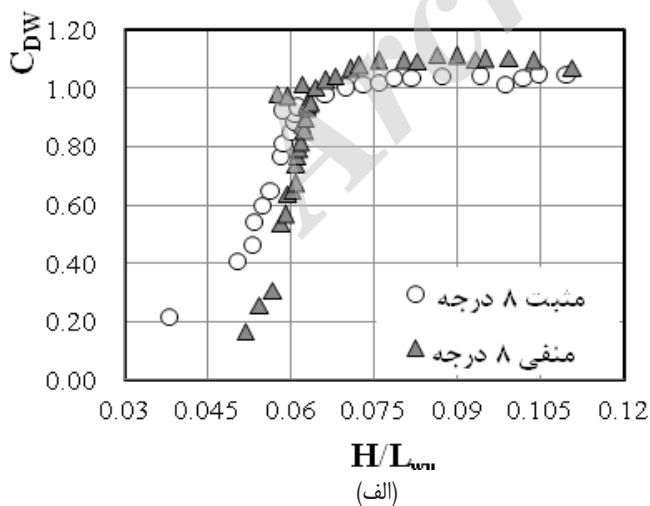
(ب) مدل ۲

شکل ۹: ضریب دبی در مقابل H/R

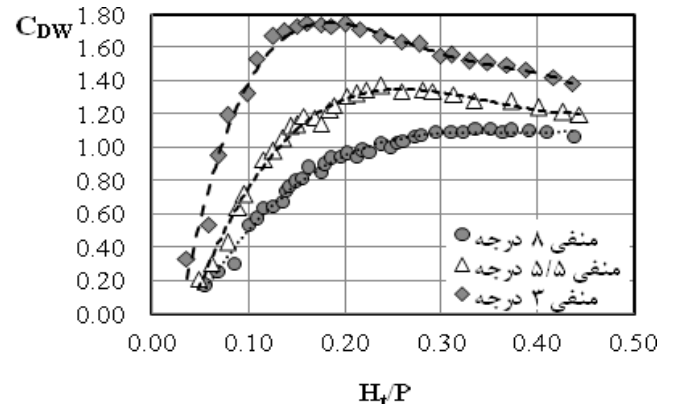
Fig. 9. CD vs H/R

۳-۴- ضریب دبی در مقابل H/L_{Wu}

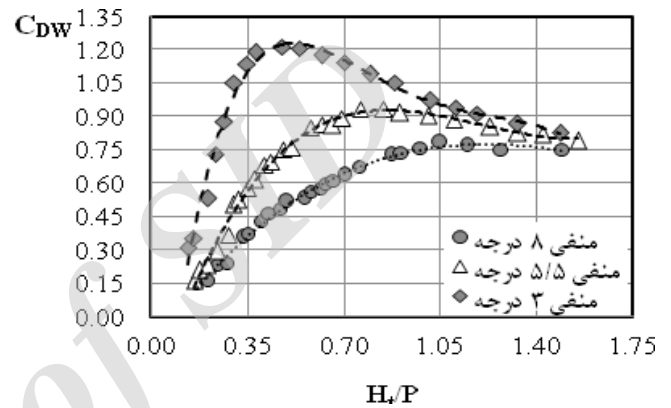
پارامتر H/L_{Wu} به این جهت در نظر گرفته شده است، که در واقع نشان دهنده‌ی نوع زاویه‌ی دیواره‌ی سپری (مثبت و یا منفی) می‌باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ضریب دبی را در مقابل نسبت H/L_{Wu} برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ و ۱۱ نیز نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود در تمام شیب‌ها، با افزایش نسبت H/L_{Wu} ضریب دبی ابتدا افزایش می‌یابد، به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و سپس برای شیب‌های ۳ درجه روندی تقریباً کاهشی دارد؛ در شیب‌های ۵/۵ درجه این روند کاهشی با شیبی کمتر مواجه است و در شیب‌های ۸ درجه روند کاهشی مشاهده نمی‌شود.



(الف)



(ب) مدل ۱ و شیب‌های منفی



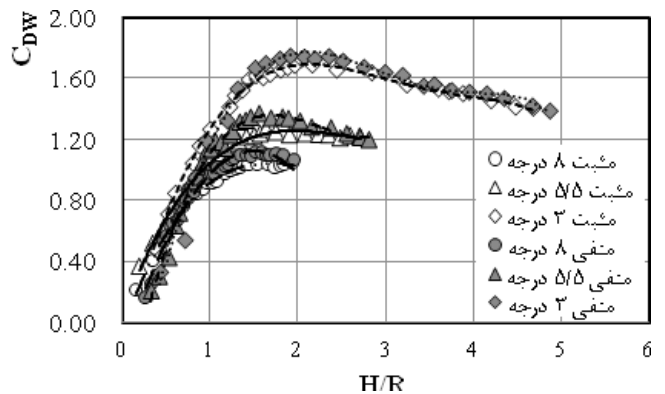
(د) مدل ۲ و شیب‌های منفی

شکل ۸: ضریب دبی در مقابل H/P

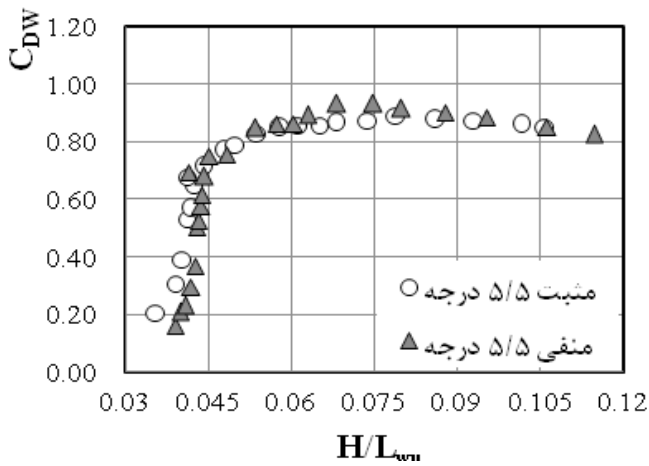
Fig. 8. CD vs H/P

۳-۳- ضریب دبی در مقابل H/R

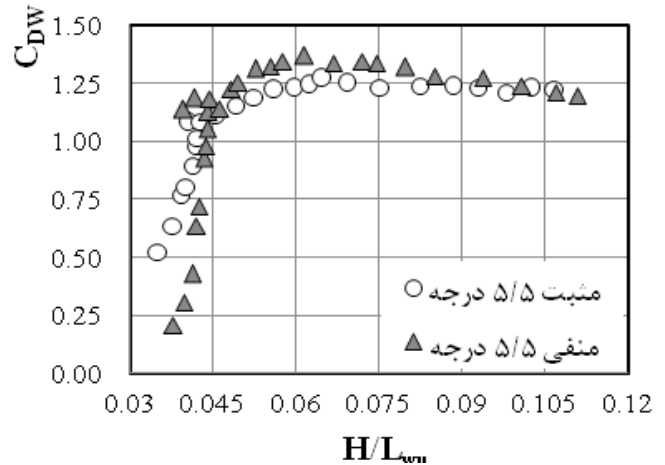
شکل ۹، ضریب دبی را در مقابل نسبت H/R نشان می‌دهد. براساس شکل ۹، با افزایش نسبت H/R ضریب دبی افزایش می‌یابد؛ به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و سپس به دلیل تداخل تیغه‌های جریان کاهش می‌یابد. این کاهش در شیب‌های ۸ درجه کمتر از سایر شیب‌های بررسی شده می‌باشد.



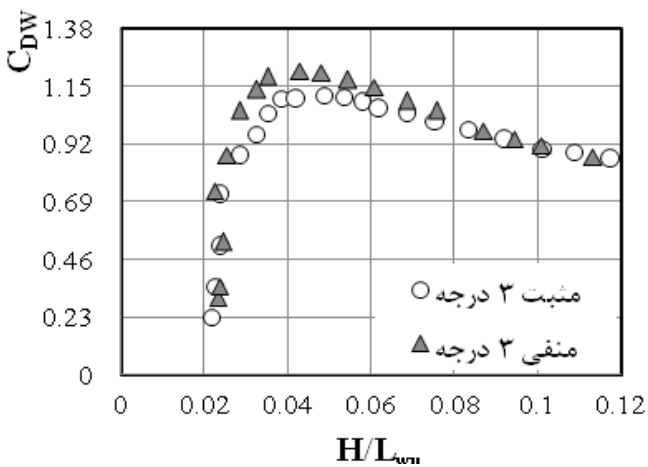
(الف) مدل ۱



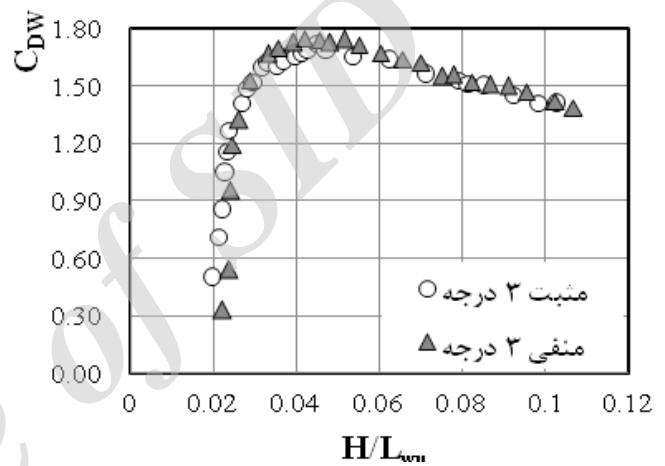
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۱: ضریب دبی در مقابل H/L_{wu} برای زوایای مثبت و منفی در مدل ۲

Fig. 11. CD vs H/L_{wu} for Model 2 (positive and negative angles)

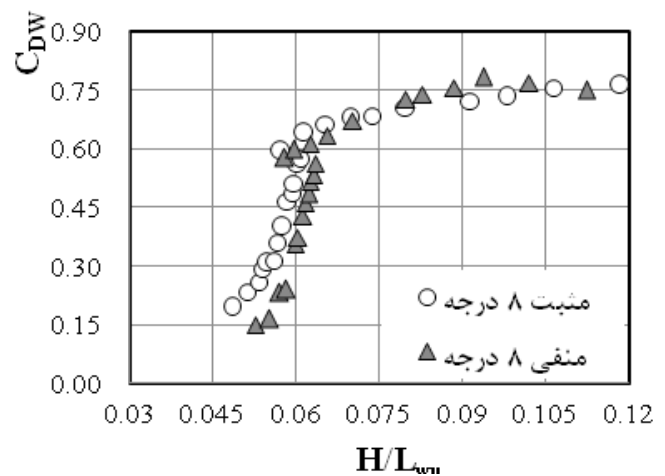
شکل ۱۰: ضریب دبی در مقابل H/L_{wu} برای زوایای مثبت و منفی در مدل ۱

Fig. 10. CD vs H/L_{wu} for Model 1 (positive and negative angles)

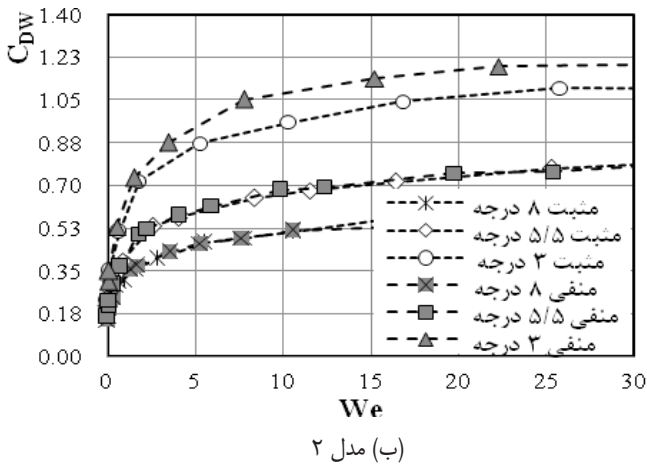
همچنین می‌توان به این نکته اشاره داشت که با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای شیب‌های ۵/۵ و ۸ درجه، ضریب دبی زوایای مثبت تا مقدار مشخصی از H/L_{wu} بیشتر از زوایای منفی است؛ این در حالیست که با افزایش نسبت H/L_{wu} ضریب دبی در زوایای منفی بیشتر از حالت مشابه مثبت می‌باشد.

۳-۵- ضریب دبی در مقابل عدد وبر (We)

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های گذشته، تأثیر کشش سطحی بر جریان عبوری از سرریز با دیواره‌ی سپری شیب‌دار قبل از استغراق کامل سرریز قابل صرف‌نظر نیست؛ از طرفی در بارهای آبی کم پس از استغراق کامل سرریز، جریان عبوری از کلیدخروجی در شیب منفی و کلید ورودی در شیب مثبت به گونه‌ای است که نمی‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر نمود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رابطه‌ی بار آبی و ضریب دبی را با عدد وبر نشان می‌دهد.



(الف)

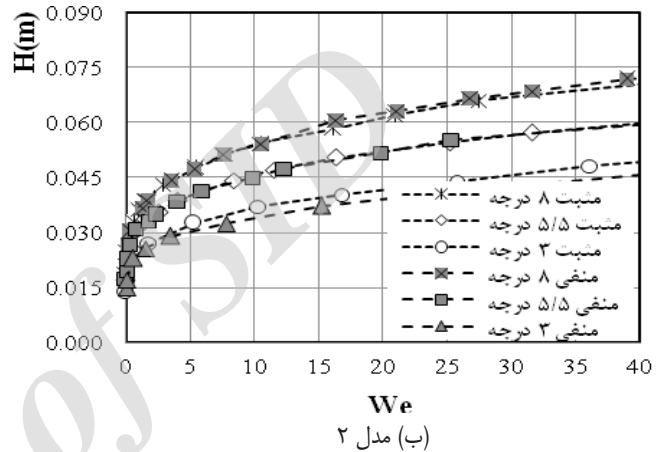
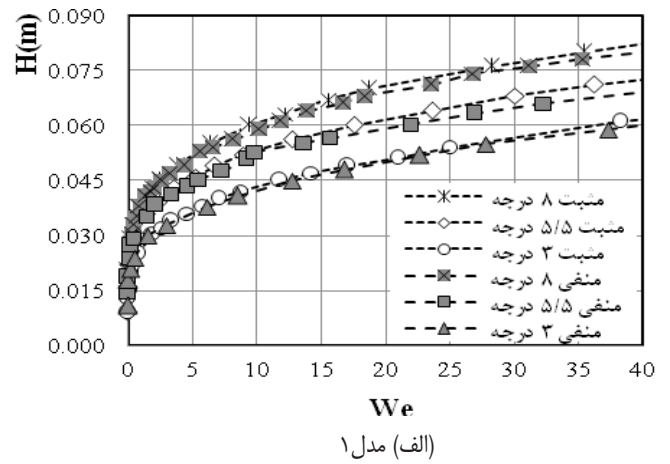


شکل ۱۳: ضریب دبی و عدد وبر (We)
Fig. 13. CD vs Weber Number

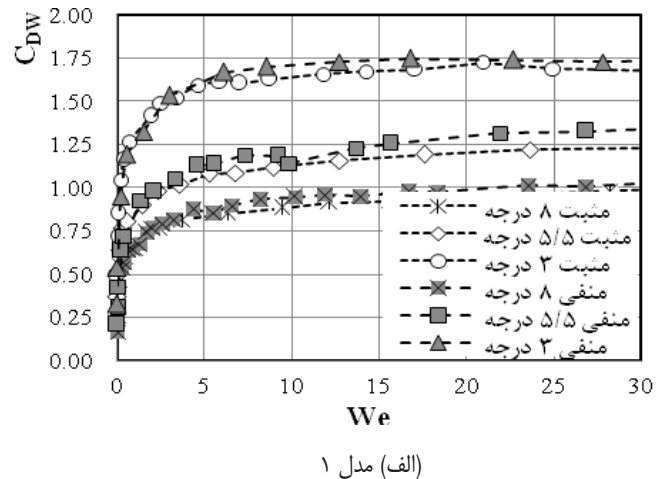
براساس شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان به این نکته اشاره نمود که برای زاویه‌های ۸ درجه، تا هد آبی در حدود ۷ سانتی‌متر، کشش سطحی بر جریان عبوری از سرریز تأثیرگذار است. این عدد برای زاویه‌های ۵/۵ درجه و ۳ درجه به ترتیب در حدود ۵ و ۴ سانتی‌متر ملاحظه می‌شود. براساس ملاحظات فوق در اکثر منحنی‌های بررسی شده، نوعی شکستگی مشاهده می‌شود. به همین دلیل برای تحلیل بهتر این موضوع، داده‌های آزمایشگاهی به دو قسمت تفکیک شد (قبل و بعد از استغراق کامل و یا تأثیر و عدم تأثیر کشش سطحی)، و پس از تجزیه و تحلیل آنها، در نهایت برای هر کدام از دسته داده‌ها رابطه‌ای جداگانه برآورد گردید. در این راستا جهت تعیین بهترین رابطه برای ضریب دبی علاوه بر شاخص آماری R^2 ، از توابع خطای $NRMSE^2$ و WQD^2 استفاده شد. این دو پارامتر نشان دهنده‌ی نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده با رابطه‌ی ارائه شده دارند. به این صورت که هرچه مقادیر آن‌ها کوچکتر باشد، رابطه از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

۴- روابط بدست آمده برای ضریب دبی ۴-۱- قبل از استغراق

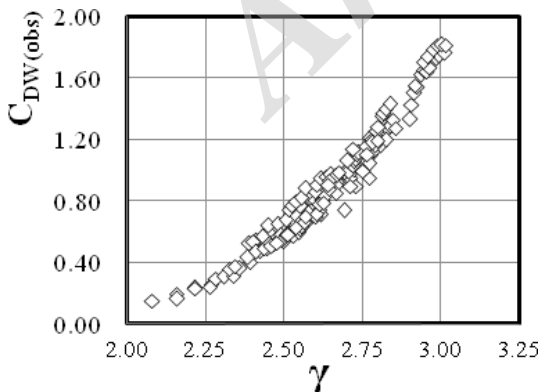
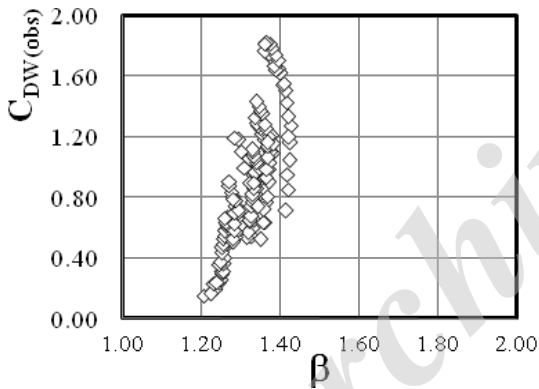
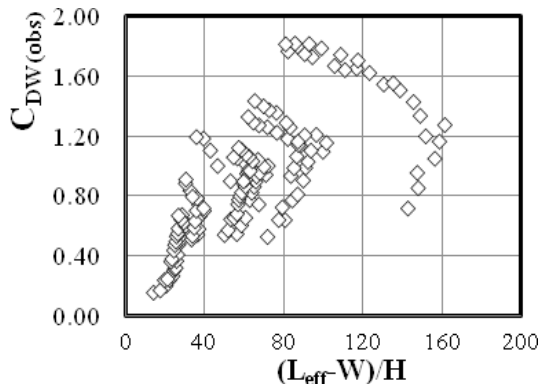
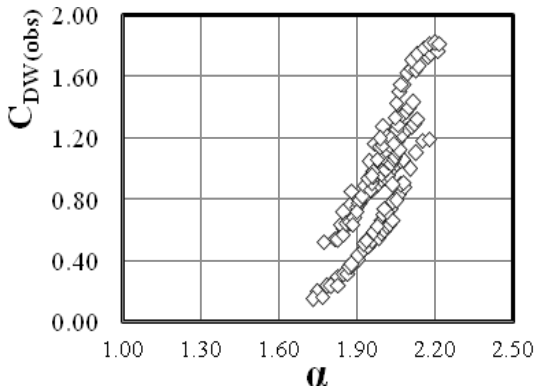
بررسی نتایج حاصل از روش لیت‌ریپرو و همکاران (۲۰۱۲) در برآورد دبی عبوری از سرریزهای کلید پیمانویی و همچنین داده‌های آزمایشگاهی میشلز و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که نسبت دبی عبوری از سرریزهای کلیدپیمانویی به دبی عبوری از سرریزهای لبه‌تیز، با پارامتر $(L-W)/H$ مرتبط می‌باشد [۱۸]؛ در این پژوهش از آنجا که تا قبل از استغراق کامل سرریز، طول موثر سرریز با افزایش هد آب تغییر می‌کند، لذا می‌توان از این پارامتر استفاده نمود. از آنجا که در مدل‌های شیب‌دار با افزایش هد آب، طول



شکل ۱۲: هد آب و عدد وبر (We)
Fig. 12. Head water vs Weber Number



1 R-Square
2 Normalized Root Mean Square Error
3 Weighted Quadratic Deviation



شکل ۱۵: نحوه‌ی تغییرات CDW با ضرایب α , B , γ
 Fig. 15. Variation of CDW with coefficient γ , B , α

موثر سرریز، تغییر می‌نماید، لذا می‌توان بجای استفاده از L_{eff} استفاده نمود. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که به جهت کاربری ساده‌تر در بدست آوردن L_{eff} ، می‌توان با فرض افقی بودن پروفیل سطح آب البته تا قبل از استغراق سرریز (شکل ۱۴)، از روابط ۶ و ۷، استفاده نمود:

$$L_{eff} = n(L_{Wu}) \quad (6)$$

$$L_{Wu} = H \cdot \csc(\alpha) \quad (7)$$

شکل ۱۴ افقی بودن پروفیل سطح آب را تا قبل از استغراق کامل سرریز نشان می‌دهد.



(الف) مثبت ۸ درجه، $H=3/10$ cm



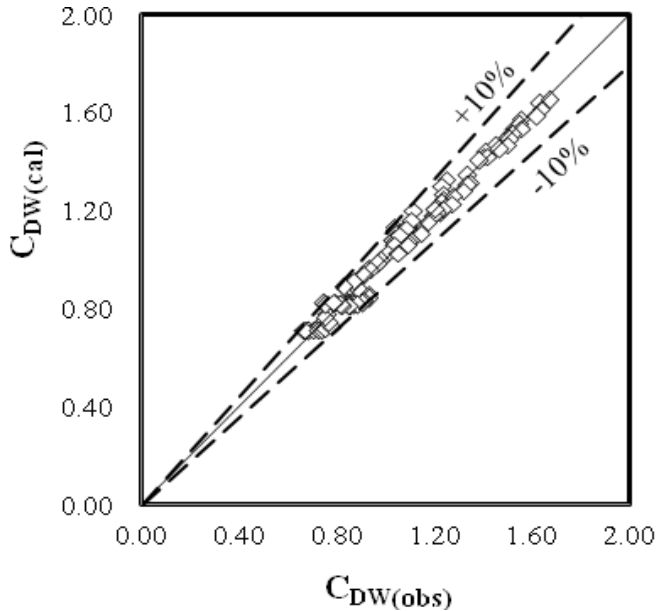
(ب) منفی ۸ درجه، $H=6/60$ cm

شکل ۱۴: پروفیل‌های سطح آب قبل از استغراق سرریز برای مدل ۲

Fig. 14. Water surface profiles before submerging Weir for the model 1

قرار دادن ضریب دبی در مقابل نسبت $(L_{eff}-W)/H$ نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها برای مدل‌های شیب‌دار زیاد است. اما تجزیه و تحلیل‌های داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که اگر ضریب دبی در مقابل نسبت β و α (روابط ۸ و ۹)، ترسیم شود از پراکندگی داده‌ها کم می‌شود؛ و در نهایت با استفاده از SPSS، ضریب دبی در مقابل حاصل ضرب این دو نسبت که با پارامتر γ معرفی می‌شود ($\gamma = \alpha \cdot \beta$)، به صورت معادله‌ای درجه ۲ و با ضرایب نشان داده شده در معادله‌ی ۱۰ بدست می‌آید. شکل ۱۵، این روند را نشان می‌دهد.

شکل ۱۷، ضریب دبی بدست آمده از معادله ی ۱۱، $C_{DW(cal)}$ ، را در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی، $C_{DW(obs)}$ ، نشان می‌دهد. براساس این شکل حدود خطا برای معادله ی ۱۱، $\pm 10\%$ می‌باشد.



شکل ۱۷: مقایسه‌ی مقادیر آزمایشگاهی، $C_{DW(obs)}$ ، و محاسباتی، $C_{DW(cal)}$ ، از رابطه ی ۱۱

Fig. 17. Comparison of laboratory values, (CDW_{obs}) And computational, (CDW_{cal}) from relationship 10

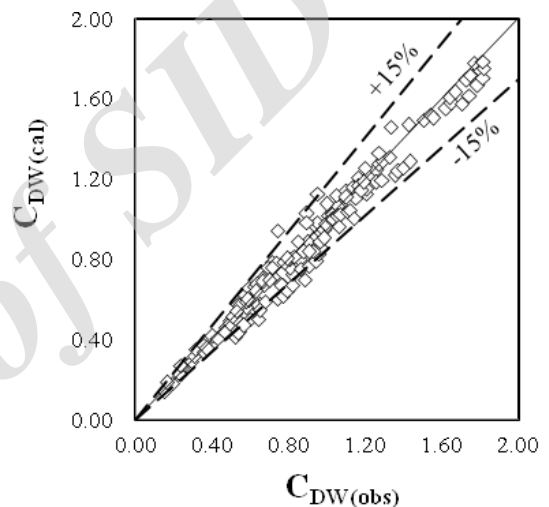
همچنین شاخص‌های آماری R^2 ، NRMSE و WQD برای معادله ی ۱۱ به ترتیب $0/983$ ، $0/033$ و $0/003$ بدست آمدند. از طرفی میزان ضریب دبی بدست آمده از تحقیق حاضر با تحقیق ماسیلز و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه گردیده که مطابق با جدول ۳ می‌باشد:

$$\alpha = 1 + \left(\frac{H}{R} \right)^{0.25} \quad (8)$$

$$\beta = \left(\frac{(L_{eff} - W)P_{av}}{HW_u} \right)^{0.07} \quad (9)$$

$$C_{DW} = 1.4\gamma^2 - 5.37\gamma + 5.25 \quad (10)$$

شکل ۱۶، ضریب دبی بدست آمده از معادله ی ۱۰، $C_{DW(cal)}$ ، را در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی، $C_{DW(obs)}$ ، نشان می‌دهد. براساس این شکل حدود خطا برای معادله ی ۱۰، $\pm 15\%$ می‌باشد.



شکل ۱۶: مقایسه‌ی مقادیر آزمایشگاهی، $C_{DW(obs)}$ ، و محاسباتی، $C_{DW(cal)}$ ، از رابطه ی ۱۰

Fig. 16. Comparison of laboratory values, (CDW_{obs}) And computational, (CDW_{cal}) from relationship 10

شایان ذکر است که شاخص‌های آماری R^2 ، NRMSE و WQD برای رابطه ی ۱۰ به ترتیب $0/976$ ، $0/087$ و $0/006$ بدست آمدند.

۴-۲- پس از استخراج

پس از برازش روابط، رابطه ی ۱۱، برای برآورد ضریب دبی در حالت استخراج کامل سرریز پیشنهاد می‌گردد؛ زیرا علاوه بر R^2 نزدیک ۱، کمترین میزان خطا را در میان روابط برازش داده شده داراست.

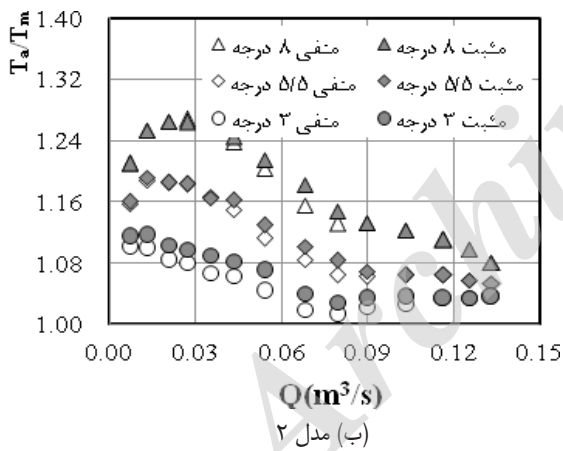
$$C_{DW} = 3.51 \left(\exp\left(\frac{H}{P}\right)^{\frac{R}{B}} \right) - 3.49 \left(\exp\left(\frac{R}{P}\right)^{\frac{R}{B}} \right) + \left(\frac{R}{B} \cdot \frac{H}{L_{wu}} \right)^{-0.18} - \left(\frac{P_{av}}{W_u} \right)^{-0.57} - 0.4 \quad (11)$$

جدول ۳: مقایسه‌ی ضریب دبی دیواره‌های سپری

Table 3. Comparison of discharge coefficient of piano key weir with sloped parapet wall

مرجع	نسبت (P/Wu)	نوع دیواره‌ی سپری	نسبت H_f/P	حداکثر ضریب دبی (C_{DW})
مرجع [۱۸]	۱/۳۳	بدون شیب پیوسته	۰/۰۸	۱/۵۴
		زاویه ۳ درجه	۰/۱۸	۱/۷
	۱/۳۳ مثبت	زاویه ۵/۵ درجه	۰/۲۳	۱/۲۳
		زاویه ۸ درجه	۰/۳	۱/۰۲
		زاویه ۳ درجه	۰/۱۶	۱/۷۸
	۱/۳۳ منفی	زاویه ۵/۵ درجه	۰/۲۳	۱/۳۳
		زاویه ۸ درجه	۰/۳	۱/۱
		زاویه ۳ درجه	۰/۴	۱/۱۲
	۰/۵ مثبت	زاویه ۵/۵ درجه	۰/۸	۰/۹
		زاویه ۸ درجه	۱/۰۵	۰/۷۵
		زاویه ۳ درجه	۰/۴۶	۱/۲
	۰/۵ منفی	زاویه ۵/۵ درجه	۰/۸۵	۰/۹۳
		زاویه ۸ درجه	۱/۰۶	۰/۷۶

تحقیق حاضر



شکل ۱۸: تغییرات تراز آبی سرریز کلیدیپانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار

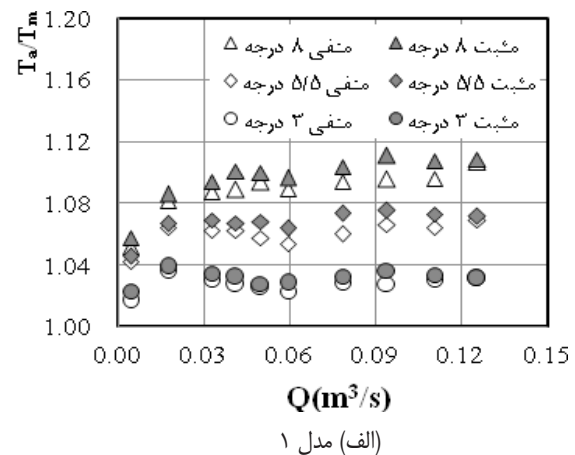
Fig. 18. Changing head water piano key weir with sloped parapet wall

در شکل (۱۸-الف)، مربوط به مدل ۱ ($P/Wu=1/33$)، در تمام شیب‌ها (مثبت و منفی) مشاهده می‌شود که نسبت تراز آبی در مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار نسبت به مدل شاهد (بدون دیواره‌ی سپری)، ابتدا روندی صعودی، سپس نزولی و مجدداً صعودی و در انتها تقریباً ثابت می‌شود. دلیل این روند و سیر نزولی-صعودی منحنی را می‌توان به این صورت بیان نمود

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، به طور کلی تحقیق حاضر با استفاده از دیواره‌های سپری شیب‌دار باعث افزایش ضریب دبی گردیده است. از طرفی به وضوح می‌توان دید که در مجموع حداکثر ضریب دبی در حالت شیب‌دار در نسبت‌های استغراق خیلی بیشتری رخ می‌دهد. از طرفی زاویه ۳ درجه مثبت و منفی در دیواره‌ی سپری باعث افزایش ضریب تخلیه حداکثر شده است.

۵- پتانسیل انحراف و تخلیه‌ی جریان

شکل ۱۸، نسبت تراز سطح آب در مدل‌هایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار، T_a نسبت به تراز آب در مدل‌های شاهد، T_m نشان می‌دهد.



می‌شود؛ در انتها نیز با تداخل بیشتر تیغه‌ها این روند متوقف و ثابت می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در دبی‌های کم این شیب‌ها توانایی ایجاد تراز آبی بالاتری را نسبت به مدل شاهد از خود نشان می‌دهند، البته با افزایش دبی جریان راندمان تخلیه‌ی آن‌ها نسبت به مدل‌های بدون دیواره‌ی سپری کمتر می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی مدل ۱ و ۲ (شکل ۱۸)، می‌توان به این نکته اشاره داشت که در مدل ۲، افزایش تراز آبی در دبی‌های کم بسیار بیشتر از شیب‌های مشابه در مدل ۱ می‌باشد. از طرفی در دبی‌های بالا کاهش نسبی تراز آبی، هدف پژوهش حاضر را بیش از پیش نمایان می‌کند. برای نمونه در شکل (۱۸-الف)، برای شیب مثبت ۸ درجه، در دبی‌های کم، افزایش تراز آبی حدود ۱۰٪ بیشتر از مدل شاهد، اما همین شیب برای مدل ۲ (شکل ۱۸-ب) در دبی‌های کم، بیش از ۲۶٪ افزایش تراز آبی را به دنبال دارد. جدول ۴، درصد افزایش تراز آبی مدل‌های شیب‌دار را نسبت به مدل شاهد نشان می‌دهد.

که در دبی‌های پایین از آنجا که طول تاج جانبی موثر در تخلیه‌ی جریان، کاهش یافته و در یک دبی یکسان نسبت به مدل شاهد افزایش تراز آبی مشاهده می‌شود؛ اما در ادامه و با افزایش دبی جریان، به دلیل افزایش طول تاج سرریز (به‌ویژه تاج جانبی شیب‌دار) که در تخلیه جریان شرکت می‌کند، تراز آبی مدل‌های شیب‌دار (T_a)، نسبت به مدل شاهد (T_m)، روندی نزولی پیدا می‌کند. به بیانی دیگر مدل‌های شیب‌دار راندمان نزدیک‌تری به مدل شاهد از خود نشان می‌دهند. در ادامه انتظار می‌رود که این روند نزولی و پیامد آن نزدیکی راندمان مدل‌های شیب‌دار به مدل شاهد در دبی‌های بیشتر نیز ادامه داشته باشد؛ اما، به دلیل اینکه در دبی‌های زیاد تداخل تیغه‌ها همزمان با افزایش طول مؤثر سرریز اتفاق می‌افتد، روند نزولی متوقف و راندمان سرریزهایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار نسبت به مدل شاهد (بدون دیواره‌ی سپری) کاهش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش نسبت تراز آبی مذکور

جدول ۴: درصد افزایش سطح آب، ($\Delta T, T_m$)، در سرریزهای کلبدیپانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار

Table 4. Percentage of increasing water level, ($\Delta T/T_m$), on the piano key weir with sloped parapet wall

H/P	($\Delta T, T_m$) (درصد)	زاویه دیواره‌ی سپری	مدل آزمایشگاهی
۰/۲۲	۹/۵	منفی ۸ درجه	۱ ($\frac{P}{W_u} = 1/33$)
۰/۲۲	۶/۶	منفی ۵/۵ درجه	
۰/۰۶	۳/۸	منفی ۳ درجه	
۰/۲۲	۱۱	مثبت ۸ درجه	
۰/۲۲	۷/۵	مثبت ۵/۵ درجه	
۰/۰۶	۳/۶	مثبت ۳ درجه	
۰/۲۸	۲۷	منفی ۸ درجه	۲ ($\frac{P}{W_u} = 0/50$)
۰/۱۶	۱۸	منفی ۵/۵ درجه	
۰/۱۶	۱۱/۵	منفی ۳ درجه	
۰/۲۸	۲۷	مثبت ۸ درجه	
۰/۱۶	۱۶	مثبت ۵/۵ درجه	
۰/۱۶	۱۱/۵	مثبت ۳ درجه	

زیر جمع‌آوری نمود:

۱- جهت استفاده از سرریزهایی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار به‌صورت سرریز ثابت و یا جهت استفاده به‌عنوان سد انحرافی به‌نظر می‌رسد نسبت $0/50 \leq \frac{P}{W_u} \leq 1/33$ ، مناسب می‌باشد. زیرا از سویی هم در دبی‌های کم پتانسیل افزایش سطح آب بیشتری را نسبت به مدل‌های بدون دیواره سپری

براساس جدول ۴ بیشترین میزان افزایش سطح آب مربوط به زاویه‌ی ۸ درجه می‌باشد. این عدد برای زوایای منفی و مثبت یکسان بدست آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان نتایج کمی و کیفی پژوهش حاصل را در بندهای

- [9] M. Barcouda, O. Cazaillet, P. Cochet, B. Jones, S. Lacroix, F. Laugier, C. Odeyer, J. Vigny, Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK Weirs, in: Transactions of the International Congress on Large Dams, 2006, pp. 1289.
- [10] J. Pralong, J. Vermeulen, B. Blancher, F. Laugier, S. Erpicum, O. Machiels, M. Pirotton, J.-L. Boillat, M. Leite Ribeiro, A. Schleiss, A naming convention for the piano key weirs geometrical parameters, Labyrinth and piano key weirs, (2011) 271-278.
- [11] M.L. Ribeiro, M. Pfister, A.J. Schleiss, J.-L. Boillat, Hydraulic design of A-type piano key weirs, Journal of Hydraulic Research, 50(4) (2012) 400-408.
- [12] M. Leite Ribeiro, M. Pfister, J.-L. Boillat, A. Schleiss, F. Laugier, Piano Key Weirs as efficient spillway structure, in: Proceedings (on CD) of the 24th Congress of CIGB-ICOLD, 2012, pp. 176-186.
- [13] O. Machiels, Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs, Université de Liège, Belgium, 2012.
- [14] G. Cicero, J. Menon, M. Luck, T. Pinchard, Experimental study of side and scale effects on hydraulic performances of a Piano Key Weir, in: Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 2011, pp. 167-172.
- [15] A. Javaheri, Hydraulic flow of piano key weirs, Industry University of Isfahan, 2012 (in Persian).
- [16] V. Te Chow, Open channel hydraulics, McGraw-Hill Book Company, Inc; New York, 1959.
- [17] N.S.L. Rao, Theory of weirs, in: Advances in hydrosience, Elsevier, 1975, pp. 309-406.
- [18] O. Machiels, S. Erpicum, P. Archambeau, B. Dewals, M. Pirotton, Parapet wall effect on piano key weir efficiency, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(6) (2012) 506-511.

دارد و هم با افزایش دبی راندمان تخلیه‌ی نسبتاً مطلوبی دارند. و تراز آبی را در دبی‌های بالا تقریباً در محدوده‌ی سرریزهای بدون دیواره‌ی سپری قرار می‌دهد.

۲- تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که پارامتر $\frac{H}{R}$ ، نسبت بسیار مهمی بر ضریب تخلیه‌ی جریان، البته تا زمانی که کشش سطحی بر جریان تأثیرگذار است (عدم استغراق کامل، و نیز در هدهای کم پس از استغراق سرریز)، می‌باشد.

۳- روابط ۱۰ و ۱۱ برای برآورد ضریب دبی سرریزهای کلیدیپیانویی با دیواره‌ی سپری شیب‌دار قبل و بعد از استغراق کامل سرریز پیشنهاد می‌شوند.

مراجع

- [1] M.H. Vali-Samani, Design of Hydraulic structures, Dezab, Ahwaz, 2008 (in Persian).
- [2] F. Laugier, A. Lochu, C. Gille, M. Leite Ribeiro, J.-L. Boillat, Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France, Hydropower & Dams, 16(LCH-ARTICLE-2009-023) (2009) 100-107.
- [3] T.C. Hien, H. Son, M. Khanh, Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam, in: Proc. 22nd ICOLD Congress, Barcelona Q, 2006, pp. 581-596.
- [4] R. Anderson, B. Tullis, Influence of Piano Key Weir geometry on discharge, in: Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 2011, pp. 75-80.
- [5] R. Anderson, B. Tullis, Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, 138(4) (2011) 358-361.
- [6] A. Kabiri-Samani, A. Javaheri, Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs, Journal of Hydraulic Research, 50(1) (2012) 114-120.
- [7] F. Lempérière, A. Ouamane, The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways, International Journal on Hydropower & Dams, 10(5) (2003) 144-149.
- [8] F. Lempérière, J. Vigny, A. Ouamane, General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present, in: Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, 2011, pp. 17-24.

Please cite this article using:

J. Ahadian, A.R. Afzalian, "Applied Analysis of PKW Structures as a Diversion Dam", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 463-476.

DOI: 10.22060/ceej.2016.694

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

