

بررسی آزمایشگاهی عملکرد سرریزهای کلیدپیانویی زاویه‌دار در پلان و متقارن در نما

شهاب حسن خانی^۱، سیامک خیاط رستمی^۲، اکبر صفرزاده^۳
 ۱،۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی
 ۳- دانشیار مهندسی عمران آب، دانشگاه محقق اردبیلی

sh.hasankhani.gh@gmail.com

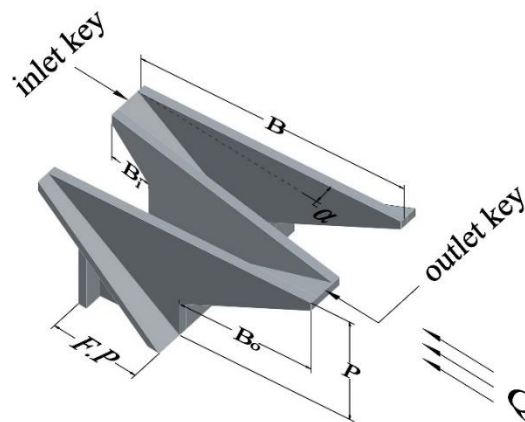
خلاصه

نسبت عرض تاج ورودی به خروجی از جمله نسبت های تاثیر گذار بر راندمان سرریز کلیدپیانویی می باشند. در سال ۲۰۱۴ میشلز و همکاران در تحقیقی جامع، مقادیری را به عنوان مقادیر بهینه هیدرولیکی برای نسبت های موثر بر عملکرد سرریز کلید پیانویی گزارش نمودند. طراحی صورت گرفته بر اساس این مقادیر انجام گردیده است. که افزایش زاویه تاج جانبی در سرریزهای کلید پیانویی و دوزنقه کردن پلان این نوع سرریز، راندمان این سازه آبی را افزایش می دهد. در سالهای اخیر تاثیر افزایش زاویه تاج جانبی بر ظرفیت تخلیه هندسه های مختلف سرریز کلید پیانویی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با ایده دوزنقه ای کردن پلان سرریز کلید پیانویی با شرط متقارن بودن در نما ($B_i=B_o$)، مطابق با هندسه سرریز کلید پیانویی بهینه هیدرولیکی انتخاب و با حفظ نسبت های اصلی موثر بر راندمان، سرریزهای کلید پیانویی با زاویه تاج جانبی ۰، ۳ و ۶ درجه و در حالت $P/Wu=1.04$ برای فهم بهتر تاثیر زاویه، مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که در سرریزهای کلید پیانویی در هدهای پایین با افزایش زاویه راندمان افزایش یافته و در هدهای میانه و بالای بالادست افزایش زاویه تاثیر کمی بر راندمان بهینه هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی می گذارد.

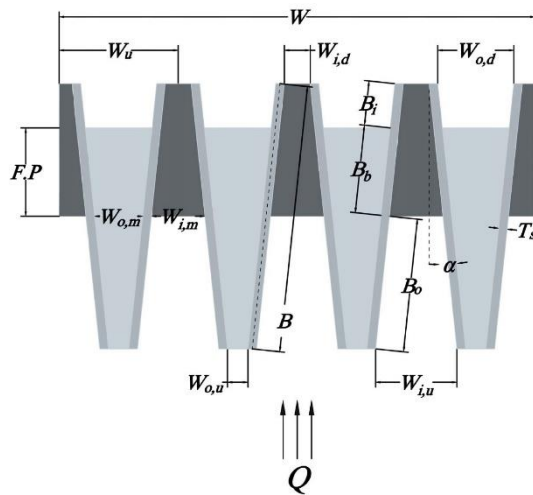
کلمات کلیدی: سرریز کلید پیانویی، زاویه تاج جانبی، ضریب دی، متقارن در نما

۱. مقدمه و پیشینه تحقیق

سرریزهای کلید پیانویی در سال ۲۰۰۰ به عنوان هندسه جدید سرریزهای آزاد غیر خطی با ایده کاهش طول ساختگاه به اندازه سرریزهای سنتی مانند اوجی و افزایش طول مفید عبوری جریان بعد از سرریزهای کنگره ای معرفی شده اند. تا کنون محققین مختلفی تاثیر پارامترهای مختلف هندسی بر راندمان سرریز کلید پیانویی و قبل تر سرریز کنگره ای (شکل ۱ و ۲) را بررسی کرده اند.



شکل ۱: نمای سرریز کلید پیانویی با ۱,۵ کلید واحد



شکل ۲: پلان سرریز کلید پيانویی با ۴ کلید واحد و پارامترهای هندسی مربوطه

مشابه با معادله معمول سرریزهای آزاد (هندرسن [۱]۱۹۶۶)، معیار مقایسه راندمان سرریزهای غیر خطی ضریب دبی می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{1/5}} \quad (1)$$

که در آن C_d ضریب دبی، Q دبی، L طول تاج، g شتاب گرانش و H هد کل جریان بالای تراز تاج سرریز می باشد

به نظر می رسد طول تاج موثرترین پارامتر بر ظرفیت تخلیه سرریز کلید پيانویی می باشد. در بیشتر منابع تاثیر این پارامتر در قالب تاثیر طولی نسبی L/W بر راندمان سرریز مورد بررسی قرار گرفته است (لدوشن و همکاران، [۲]۲۰۰۹؛ لیت لیبریو و همکاران [۳]، ۲۰۱۱؛ اومانی و لمپیر، [۴]۲۰۰۶). در بارهای آبی پایین، با افزایش نسبت L/W ظرفیت تخلیه سرریز افزایش می یابد، البته با افزایش هد بالادست، از تاثیر افزایش L/W بر افزایش ظرفیت تخلیه کاسته می شود. باید خاطر نشان کرد با افزایش این نسبت بر هزینه ساخت سرریز افزوده خواهد شد. لمپیر و وینی [۵] در سال ۲۰۱۱ مقادیر L/W بین ۴ و ۵ را مقادیر مناسب از لحاظ افزایش هزینه ساخت و افزایش ظرفیت تخلیه سرریز معرفی نمودند.

در سال ۲۰۱۲ میشلز [۶] در تحقیق جامع دست به بررسی پارامترهای موثر بر ظرفیت تحقیق سرریز کلید پيانویی مانند $W_{i,m}/W_{o,m}$ و B_o/B_i نمود. او در تحقیق خود مقادیر عرض کل و طول تاج سرریز در نتیجه نسبت L/W را برای مدل های مختلف یکسان در نظر گرفت. در گام بعدی او تعداد کلید واحد و ضخامت تاج بین مدل های مختلف مورد آزمایش را مقدار ثابت قرار داد. با معرفی نسبت P/W_u به عنوان پارامتر با بیشترین تاثیر بر راندمان سرریز بعد از نسبت L/W به بررسی تاثیر این پارامتر بر ظرفیت تخلیه سرریز زد. از آنجایی که W_u در کل پژوهش ثابت بود عملاً میشلز و همکاران [۷] به بررسی تاثیر ارتفاع بر راندمان سرریز پرداخته اند. با فرض مدل پایه با پلان متقارن، ۲٫۵ کلید و نسبت طول طره های برابر، این گروه سرریز با نسبت P/W_u برابر ۰٫۵ را سرریز بهینه اقتصادی از نظر نسبت دبی عبوری به نسبت حجم مدل (شاخصه ای از حجم بتن ریزی در نتیجه هزینه تمام شده کل سرریز) معرفی نمود. میشلز بدین نتیجه رسید با افزایش ارتفاع و بطبع افزایش نسبت P/W_u (با توجه به ثابت بودن W_u) تا مقدار ۱٫۳۳ راندمان سرریز افزایش می یابد؛ با افزایش دوباره ارتفاع ظرفیت تخلیه سرریز افزایش قابل ملاحظه ای نمی یابد؛ از این رو سرریز با نسبت P/W_u برابر ۱٫۳۳ را به عنوان سرریز بهینه هیدرولیکی معرفی نمود. با تغییر نسبت های $W_{i,m}/W_{o,m}$ و B_o/B_i در سرریز بهینه هیدرولیکی، به بررسی پارامترهای مذکور پرداخته و نتیجه گرفت در حالتی که L/W برابر ۵ باشد، سرریز با نسبت های P/W_u برابر ۱٫۳۳، $W_{i,m}/W_{o,m}$ برابر ۱٫۲۵ و B_o/B_i برابر ۳ دارای بالاترین راندمان تخلیه دبی می باشد. میشلز و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ روابط تحلیلی بر مبنای محاسبه جریان تخلیه شده از نواحی مختلف تاج به صورت جدا و جمع و ارائه مقادیر به عنوان دبی کلی تخلیه شده از تاج سرریز به ازای هد بالادست ارائه نمودند. قابل ذکر است نسبت B_o/B_i استفاده شده در مدل های آزمایشگاهی این گروه که در آخر منجر به ارائه روابط تحلیلی گردید، برابر ۰٫۳۳ می باشد. این مقدار به گفته میشلز و همکاران [۷] کمتر از مقادیر این نسبت در اغلب پروتوتایپ ها می باشد. (جواهری و همکاران [۸]) در پروژه های اجرا شده و در حال اجرا توسط کمپانی EDF فرانسه نسبت B_o/B_i عددی بین ۰٫۲۷ و ۰٫۳۷

۰,۵۷ می‌باشد [۹]. ضخامت تاج جانبی پارامتری است که پس از طراحی سازه‌ای و ملاحظات اجرای قطعی می‌شود. نسبت T_s/W_u عددی بین ۰,۰۴۲ و ۰,۱۰۷ و نسبت T_s/P عددی بین ۰,۰۵۵ و ۰,۱۶۷ برای پروژهای تمام شده و جاری EDF فرانسه می‌باشد. [۹]

در سال ۲۰۱۳ سیسرو و همکاران [۱۰] با در نظر گرفتن هندسه کاملان متقارن در پلان و نما، زاویه تاج جانبی را به اندازه ۵ درجه افزایش دادند. در اثر این افزایش نسبت $W_{i,m}/W_{o,m}$ از مقدار ۱ به مقدار ۲,۲۸ افزایش پیدا کرد. این گروه ثابت ماندن عرض کلید خروجی و ورودی در پایین دست و نسبت طول تاج به عرض سرریز را ملاک قرار داده بودند (جدول ۱). با بررسی ضرایب دبی متناظر تا $h/p=0.75$ به این نتیجه رسیدند در هدهای پایین افزایش زاویه باعث افزایش چشم گیر (۲۰٪) در راندمان تخلیه سرریز می‌شود. البته با افزایش هد از اختلاف عملکرد مدل مستطیلی و دوزنقه ای کاسته و در هدهای بالا این اختلاف عملکرد بسیار ناچیز می‌گردد.

در سال ۲۰۱۵ خساف و بغدادی [۱۱] ملاک خود در زاویه دار کردن تاج جانبی را علاوه بر حفظ نسبت طول تاج به عرض سرریز، ثابت نگه داشتن $W_{i,m}/W_{o,m}$ را قرار دادند. این مقدار برابر ۱,۲۵ در سه سرریز بررسی شده توسط این گروه ثابت می‌باشد. علاوه بر این گروه نسبت B/P را برای سه سرریز ثابت در نظر گرفت. با افزایش زاویه تاج جانبی، طول این تاج افزایش یافت؛ این افزایش باعث افزایش ارتفاع مدل های دوزنقه ای نسبت به مدل مستطیلی شده است (جدول ۱). ارتفاع جزو مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر راندمان سرریز کلید پیاپی است ایزوله کردن تاثیر این پارامتر بر نتایج ضروری به نظر می‌رسد. نتایج این گروه حاکی از آن است افزایش زاویه تاج جانبی باعث بهبود ناچیزی در راندمان می‌شود. افزایش زاویه تاج جانبی تا مقدار حداکثری خود یعنی زمانی که کلید خروجی به صورت مثلثی در آید باعث کاهش راندمان مدل دوزنقه ای به مستطیلی به خاطر افزایش استغراق ناحیه بالادست تاج می‌شود.

در سال ۲۰۱۶ مهبودی و همکاران [۱۲] مقدار $W_{i,d}$ و $W_{o,u}$ را در مدل های زاویه دار برابر در نظر گرفتند. این عمل باعث ثابت ماندن نسبت $W_{i,m}/W_{o,m}$ بین تمام مدل های مورد آزمایش برابر ۱ شد. سرریزهای مورد آزمایش توسط گروه متقارن در پلان و نما می‌باشد. نکته قابل تامل عدم ثابت در نظر گرفتن نسبت L/W و ارتفاع به طور همزمان بین مدل های مورد مقایسه دوزنقه ای است. سرریزهای کلید پیاپی دارای نسبت بسیار پایین طول اورهنگ به طول تاج جانبی برابر ۰,۱ می‌باشند و عملاً ارائه دهنده سرریز کنگره ای با کلید شیب دار می‌باشند. این گروه مستقیماً به زاویه تاج جانبی مدل ها مورد آزمایش خود اشاره نکرده اند (جدول ۱). نتایج این گروه حاکی از آن است مدل با پلان دوزنقه ای سرریز کلید پیاپی ۲۰ درصد دارای راندمان بهتری از مدل با پلان مستطیلی می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات هندسی مدل های کلید پیاپی دوزنقه ای مورد استفاده در تحقیقات قبلی

Referenc e	α	L	W	P	$W_{i,u}$	$W_{i,d}$	$W_{i,m}$	$W_{o,u}$	$W_{o,d}$	$W_{o,m}$
Cicero et al	0-5	9.17-9.07	1.989	0.222	0.133-0.237	0.133	0.133-0.185	0.029-0.133	0.133	0.081-0.133
Khassaf & Al-Baghdadi	0-10.25	1.5	0.3	0.126-0.151	0.081-0.146	0.081-0.016	0.081	0-0.064	0.064-0.13	0.065
Mehboudi et al	0-11	1.41-3.21	0.49	0.3	0.135-0.189	0.041-0.101	0.118	0.047-0.101	0.135-0.189	0.118
Reference	B	B_i	B_o	B_b	N_u	W_u	T_i	T_o	T_s	L/W
Cicero et al	0.573-0.617	0.154-0.175	0.154-0.175	0.265-0.267	6.5	0.306	0.0206	0.0206	0.02	4.56-4.61
Khassaf & Al-Baghdadi	0.304-0.364	0.076-0.091	0.076-0.091	0.152-0.182	2	0.15	0	0	0.025	5
Mehboudi et al	0.3-0.7	0.03-0.07	0.03-0.07	0.24-0.56	2	0.245	0	0	0.004	2.88-2.54
Reference	P/W_u	B_b/B	B_o/B_i	$W_{i,u}/W_{o,u}$	$W_{i,d}/W_{o,d}$	$W_{i,d}/W_{o,u}$	$W_{i,m}/W_{o,m}$	T_s/W_u	T_s/P	Crest shape
Cicero et al	0.73	0.43-0.46	1	1-8.17	1-4.59	1	1-2.28	0.07	0.09	Flat-top
Khassaf & Al-Baghdadi	0.84-1.01	0.5	1	1.25-∞	0.12-1.25	1.25-∞	1.25	0.017	0.017-0.02	Flat-top
Mehboudi et al	1.22	0.8	1	1.34-4.02	0.25-0.75	1	1	0.02	0.01	Flat-top

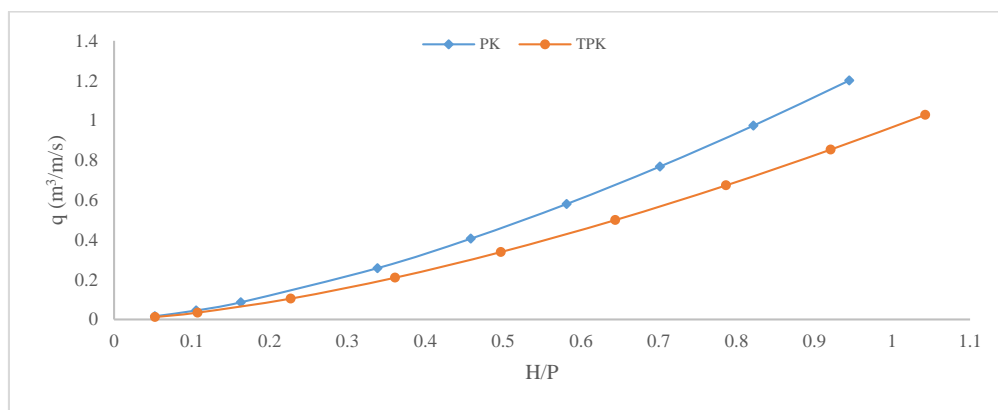
در سال ۲۰۱۱ اندرسن و تولیس [۱۳] به بررسی سرریزهای هم ارتفاع کلیدپیانویی، کنگره ای و کنگره ای با کلیدهای شیدار هم با پلان مستطیلی و یکسان پرداخت. نتایج وی حاکی از این بود که سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره ای دارای راندمان بیشتری به صورت محسوس می باشد و شیب دار کردن کلیدها تاثیر قابل ملاحظه ای بر راندمان سرریز کنگره ای نگذاشته و وجود اورهنگ و نه لزوما شیب کلیدها در سرریز کلید پیانویی وجه تمایز اصلی اختلاف عملکرد بین دو سرریز ماریچ می باشد.

در سال ۲۰۱۶ صفرزاده و نوروژی [۱۴] به بررسی و مقایسه عددی راندمان، توزیع خطوط جریان و هیدرودینامیک سرریز کنگره ای و کلید پیانویی مستطیلی یکسان در پلان پرداخته و کاهش استغراق موضعی و یکنواخت نمودن توزیع دبی بر روی تاج سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره ای، به دلیل هندسه خاص سرریز کلید پیانویی، را دلیل اصلی بالا بودن راندمان سرریز کلید پیانویی به کنگره ای معرفی نمودند. در ادامه این گروه با ثابت نگه داشتن اکثر نسبت های هندسی و ابعاد سرریز از جمله طول تاج (بالادست، پایین دست و جانبی)، زاویه تاج جانبی را افزایش داده جدول ۲ و به مقایسه راندمان و توزیع خطوط جریان سرریز کلید پیانویی مستطیلی و ذوزنقه ای در پلان زدند. نتایج آن ها حاکی از افزایش ضریب دبی مدل ذوزنقه ای نسبت به مدل مستطیلی بوده است. نکته قابل تامل افزایش عرض سرریز زاویه دار نسبت به مدل مستطیلی (کاهش L/W) می باشد که در این حالت برای مقایسه بهتر باید دبی در واحد سرریز به عنوان معیار مقایسه مد نظر قرار گیرد.

جدول ۲ مشخصات هندسی مدل های کلید پیانویی ذوزنقه ای مورد استفاده توسط صفرزاده و نوروژی [۱۴]

model	α	L	W	P	$W_{i,u}$	$W_{i,d}$	$W_{i,m}$	$W_{o,u}$	$W_{o,d}$	$W_{o,m}$
PK	0	4.75	0.938	0.197	0.116	0.116	0.116	0.092	0.092	0.092
TPK	5	4.75	1.27	0.197	0.208	0.116	0.158	0.092	0.178	0.135
model	B	B_i	B_o	B_b	N_u	W_u	T_i	T_o	T_s	L/W
PK	0.489	0.121	0.121	0.274	4	0.234	0.013	0.013	0.013	5
TPK	0.489	0.121	0.121	0.274	4	0.318	0.013	0.013	0.013	3.74
model	P/ W_u	B_b/B	B_o/B_i	$W_{i,u}/W_{o,u}$	$W_{i,d}/W_{o,d}$	$W_{i,d}/W_{o,u}$	$W_{i,m}/W_{o,m}$	T_s/W_u	T_s/P	Crest shape
PK	0.84	0.5	1	1.25	1.25	1.25	1.25	0.051	0.061	Flat-top
TPK	0.62	0.5	1	2.26	0.65	1.25	1.17	0.051	0.061	Flat-top

همان گونه که از نمودار شکل ۳ مشخص است افزایش زاویه تاج جانبی با کاهش نسبت L/W باعث کاهش ظرفیت سرریز می شود.



شکل ۳: تاثیر منفی افزایش زاویه تاج جانبی همراه با افزایش عرض سرریز بر دبی در واحد عرض سرریز کلید پیانویی، صفرزاده-نوروژی [۱۴]

در سال ۲۰۱۷ خیاط رستمی بر اساس آزمایشات مربوطه بر روی سرریز کلید پیانویی به این نتیجه رسیدند که ابعاد و نسبت های هندسی ارائه شده توسط میشلز (۲۰۱۲) [۶] و میشلز و همکاران (۲۰۱۴) [۷] به عنوان ابعاد و نسبت های هندسی سرریز کلید پیانویی بهینه هیدرولیکی (نه از لحاظ اقتصادی)، دارای راندمان کمتری از یکی از مدل های آزمایشگاهی این پژوهش بوده و می توان ادعا نمود آلتیرناتیو دیگری به عنوان هندسه بهینه هیدرولیکی کلید پیانویی موجود می باشد. کاهش ارتفاع نسبی (P/W_u) با ثابت نگه داشتن عرض کل و کاهش تعداد کلید واحد می تواند باعث افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی شود [۱۵].

۲. اهداف و روند تحقیق

در این پژوهش آزمایشگاهی با در نظر گرفتن تحقیقات پیشین از جمله میشلز و همکاران و اعمال مشخصات هندسی پیشنهادی این محقق، تاثیر پارامتر زاویه تاج کناری سرریز را با ثابت در نظر سایر پارامترهای هندسی بر ضریب دبی و آنگذری سرریز کلید بیانوی و مقاسه این نوع سرریز از نوع دوزنقه ای با نوع مستطیلی مقارن در نما ($B_0=B_1$) می پردازیم.

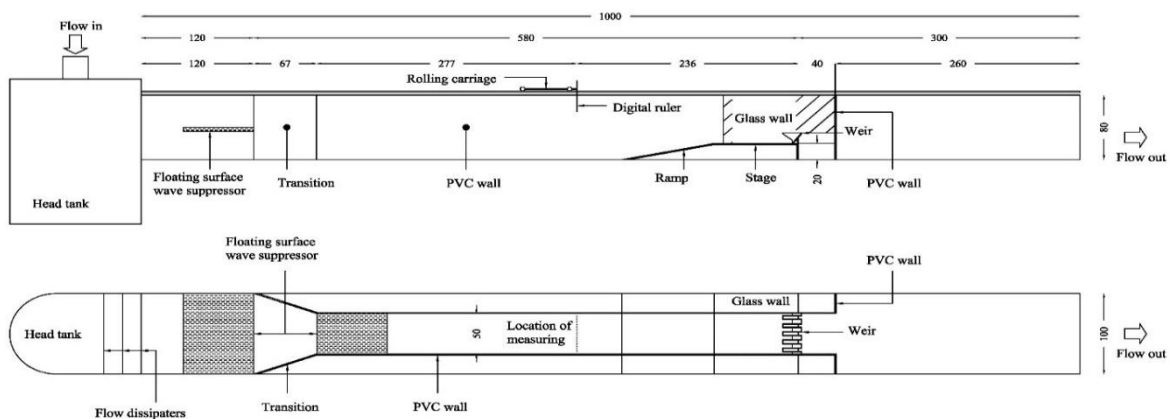
در این مطالعه آزمایشگاهی سعی شده است بازه قابل قبولی از لحاظ کمی برای نسبت عمق بر ارتفاع پوشش داده شود (۰,۵-۲,۱) و تعداد خروجی ها به نحوی باشد که برای محاسبه ضریب دبی در هر هد خاص، خطای کمی حاصل از درون یابی از سایر نقاط رخ دهد.

۳. ابزار و روش ها

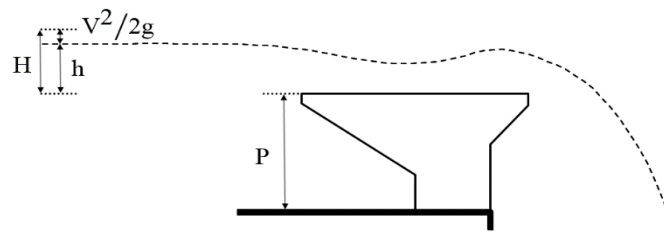
۳-۱- امکانات آزمایشگاهی

برای انجام تحقیق، از یک فلوم افقی شیب پذیر (توسط دو جک هیدرولیکی) به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با دیواره های شیشه ای و کف فولادی استفاده شده است. مخزن اصلی ذخیره آب در پایین فلوم قرار دارد. آب به وسیله پمپ با دبی پمپاژ حداکثر ۹۵ لیتر بر ثانیه و دور موتور ۲۹۶۰ دور بر دقیقه، از مخزن اصلی توسط یک لوله پلی اتیلن به قطر ۲۰ سانتیمتر از بالا به مخزن بالادست فلوم (Head tank)، جهت آرام سازی جریان رسانده می شود. مقدار جریان ورودی به پمپ از مخزن اصلی توسط یک شیر پروانه ای قابل تنظیم می باشد. بعد از مخزن بالادست، سه توری مشبک برای آرام سازی جریان و دو صفحه یونولیتی (هر کدام به طول ۰/۷۵ متر) مقید در راستای جریان و آزاد در ارتفاع برای گرفتن نوسانات سطح آب قرار داده شده است. سکویی به طول ۹۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر برای نصب سرریز به فاصله ۳ متری از انتهای فلوم برای جلوگیری از تاثیر جریان خروجی از سرریز بر جریان نصب گردیده است. رمپ با شیب ۱۱ درجه برای ورود آرام به سرریز قبل از سکو اجرا گردیده است.

به خاطر اهمیت بالای پارامتر h (تراز عمق جریان بر روی تاج سرریز) در استخراج نتایج، نیاز است تا مقادیر بالای h (بیشتر از ارتفاع خود سرریز) قرائت شود. بدین منظور و با توجه به پایین بودن توان پمپ و ظرفیت مخزن بالادست فلوم، عرض فلوم بوسیله دیواره هایی از جنس PVC به ۰/۵ متر کاهش داده شد. این کاهش (به منظور بالا بردن عمق جریان) به وسیله دو تبدیل با زاویه ۲۲ درجه و طول ۶۷ سانتیمتری اعمال شده است. فاصله شروع تبدیل از آخرین توری فلزی جریان ۱/۲ متر می باشد. جنس دیوارها در محل نصب سرریز بر روی سکو از ورق PVC به شیشه برای مشاهده پروفیل جریان تغییر می کند. دیوارهای کاذب به طول ۴۰ سانتیمتر بعد انتهای سکو ادامه پیدا می کنند و بعد از آن عرض فلوم به صورت آبی به یک متر افزایش می یابد (شکل ۴). قرائت عمق و تراز آب توسط خط کش دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلیمتر صورت یافت. با برداشت طولی پروفیل سطح آب در دبی های بالا، فاصله ۲/۳۶ متری از انتهای سکو به عنوان محل اندازه گیری عمق بالادست، انتخاب شد. در این ناحیه نرخ تغییر سطح آب (اختلاف عمق به اختلاف فاصله دو مقطع اندازه گیری شده) کم بوده و شاهد پروفیل سطح افقی، در نتیجه جریان یکنواخت بالادست هستیم. در تفسیر و ارائه نتایج، بار آبی کل جریان در قالب عمق (h) و بار سرعت ($V^2/2g$) مورد استفاده قرار خواهد گرفت؛ سرعت جریان به صورت متوسط سرعت در مقطع (دبی تقسیم بر سطح مقطع) محاسبه خواهد گردید (شکل ۵)؛ بدین خاطر یکنواخت بودن خطوط جریان در مقطع محاسباتی اهمیت دارد.



شکل ۴: امکانات و فلوم آزمایشگاهی



شکل ۵: عمق و هد آب بالای تراز تاج سرریز

شیب کف کانال در طول آزمایش در مقدار صفر ثابت شده است. صفر بودن شیب کف و ارايه در ابتدا، انتها و محل قرايت عمق بالادست جریان توسط شیب سنج دیجیتال کنترل می شود. تراز آب از تراز تاج سرریز (به عنوان مبدا) و دبي متناظر با آن به عنوان خروجی سیستم قرايت شده است. دبي سنج از نوع الکترومغناطیسی بوده و دقت آن $1 \pm$ لیتر بر ثانیه است. با افزایش دبي و قبل از قرائت عمق، حداقل ۴ دقیقه زمان صرف تثبیت جریان می شود. برداشت ها در دو بار انجام گردیده و در صورت وجود مغایرت بین خروجی ها، برداشت داده ها برای بار سوم تکرار شده و از سه سری برداشت میانگین گیری صورت گرفت. مدل های آزمایشگاهی از ورق PVC به ضخامت ۰٫۹ سانتیمتر ساخته شده اند.

۳-۲- طرح مدل های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی

مطابق با مطالعات قبلی و پیشنهاد میشلز (۲۰۱۲، [۶]) نسبت های اصلی تاثیر گذار بر راندمان سرریز کلید $W_{i,d}/W_{o,u}$ ، L/W و B_b/B به ترتیب برابر ۵، ۱٫۲۵ و ۰٫۳۳ در نظر گرفته شده، تنها پارامترهای B_o/B_i برابر ۱ در نظر گرفته شده تا تاثیر زاویه تاج جانبی جدا از تاثیر نسبت طول طره های مورد مطالعه قرار گیرد و پارامتر P/W_u با توجه به مطالعات خیاط رستمی [۱۵] در صورت انتخاب ۴ کلید برای تعداد کلید ها، مقدار ۱٫۰۴ در نظر گرفته شده است که بهتر از مقدار پیشنهادی میشلز (۲۰۱۲، [۶]) عمل کرده است. لیت ریرو و همکاران (۲۰۱۲) اعلام کردند در صورت بیشتر بودن تعداد کلید واحد از تعداد ۱/۵، مقدار این پارامتر بر نتایج آزمایشگاهی تاثیر نخواهد گذاشت [۱۵]. تعداد کلید واحد (N_u) برای سرریزهای کلید پیانویی برابر با ۴ در نظر گرفته شد. ضخامت تاج جانبی همانطور که اشاره گردید، برابر با ۰٫۹ سانتیمتر انتخاب شده است. برای محاسبه طول تاج سرریزهای غیر خطی از رابطه ۲ استفاده شده است:

$$(2B + 2T_s / \cos \alpha + W_{i,d} + W_{o,u}) \times N_u = L \quad (2)$$

که در آن B طول تاج جانبی، T_s ضخامت تاج جانبی، α زاویه تاج جانبی، $W_{i,d}$ عرض کلید ورودی در پایین دست، $W_{o,u}$ عرض کلید خروجی در بالادست، N_u تعداد کلید واحد و L طول تاج سرریز می باشد

در مدل های زاویه دار سعی شده است افزایش زاویه خود را در قالب افزایش نسبت $W_{i,d}/W_{o,d}$ نشان داده شود. افزایش این نسبت باعث کاهش برخورد تیغه های جانبی جریان در ناحیه پایین دست کلید خروجی می شود. در این راستا نسبت $W_{i,d}/W_{o,u}$ با افزایش زاویه تاج جانبی، ثابت، ۱٫۲۵ در نظر گرفته شده است به همین دلیل با افزایش زاویه نسبت $W_{i,m}/W_{o,m}$ بر خلاف روند پژوهش خساف (۲۰۱۵) [۱۱] و مهبودی (۲۰۱۶) [۱۲] کاهش پیدا می کند. مشخصات مدل های آزمایشگاهی در جدول ۳ آمده است. تعدادی از مدل های آزمایشگاهی در اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات هندسی مدل های آزمایشگاهی سرریزهای غیر خطی مورد استفاده در تحقیق فعلی

model	α	L	W	P	$W_{i,u}$	$W_{i,d}$	$W_{i,m}$	$W_{o,u}$	$W_{o,d}$	$W_{o,m}$
0°	0	2.5	0.5	0.13	0.059	0.059	0.059	0.048	0.048	0.048
3°	3	2.5	0.5	0.13	0.072	0.044	0.058	0.035	0.063	0.049
6°	6	2.5	0.5	0.13	0.085	0.027	0.056	0.022	0.080	0.051
model	B	B_i	B_o	B_b	N_u	W_u	T_i	T_o	T_s	L/W
0°	0.250	0.106	0.106	0.083	4	0.125	0	0	0.009	5
3°	0.264	0.110	0.110	0.088	4	0.125	0	0	0.009	5

model	P/W_u	B_b/B	B_o/B_i	$W_{i,u}/W_{o,u}$	$W_{i,d}/W_{o,d}$	$W_{i,d}/W_{o,u}$	$W_{i,m}/W_{o,m}$	T_s/W_u	T_s/P	Crest shape
6°	0.279	0.114	0.114	0.093	4	0.125	0	0	0.009	5
0°	1.04	0.33	1	1.25	1.25	1.25	1.25	0.072	0.069	Flat-top
3°	1.04	0.33	1	2.03	0.70	1.25	1.18	0.072	0.069	Flat-top
6°	1.04	0.33	1	3.95	0.34	1.25	1.11	0.072	0.069	Flat-top

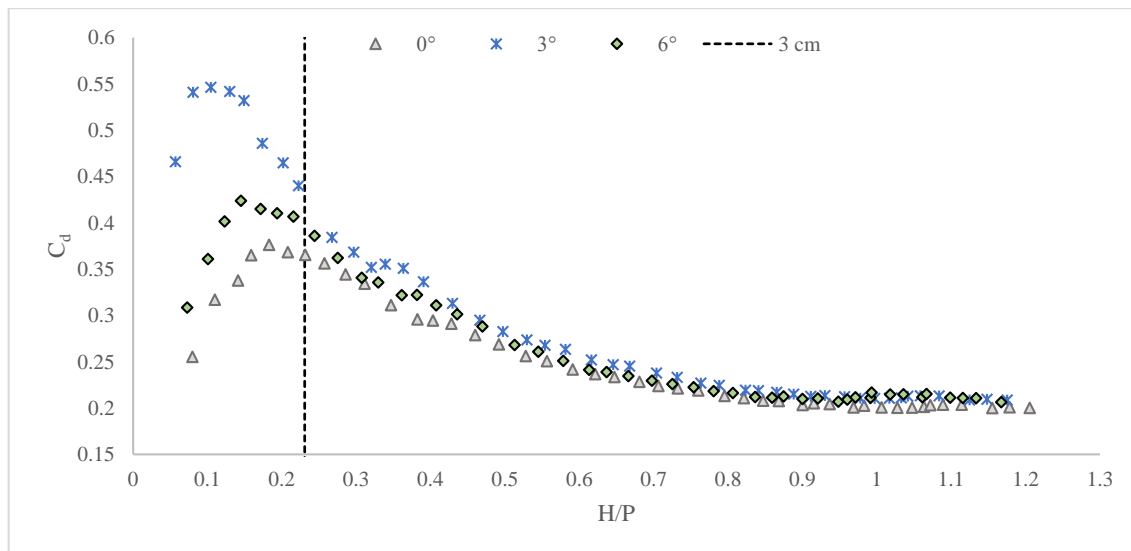


شکل ۷: مدل 6°

شکل ۶: مدل 0°

۴. نتایج

نتایج حاکی از آن است در سرریزهای کلیدپیانویی افزایش زاویه تاج جانبی در هدهای پایین باعث افزایش راندمان سرریز شده، با افزایش هد آب از این افزایش راندمان کاسته می‌شود (شکل ۸) که این پدیده ناشی از برخورد جریان خروجی از تاج جانبی سرریز ناشی می‌گردد و عملاً سرریز کلید پیانویی همانند سرریز لبه پهن عمل می‌کند. در کل مدل با زاویه تاج جانبی ۳ درجه بهتر از مدل‌های ۰ و ۶ درجه و مدل ۶ درجه بهتر از مدل ۰ درجه عمل کرده است.



شکل ۸: مقایسه راندمان مدل های کلید پیانویی

افزایش راندمان با افزایش زاویه در هدهای پایین جریان در سرریزهای کلید پیانویی را می توان به عنوان نتیجه ای مناسب قلم داد کرد ولی نکته قابل تامل عدم طراحی این نوع سازه آبی برای هدهای به این اندازه پایین می باشد [۱۶]. در پروژه های اجرا شده و در حال اجرا توسط کمپانی EDF فرانسه نسبت H/P طرح برای سرریزهای کلید پیانویی، عددی بین ۰,۱۷ و ۰,۳۶ می باشد. این نسبت در ۶ سرریز از ۱۰ مورد استفاده در پروژه های این کمپانی بیشتر از ۰,۳ است [۹]. H/P طرح برای سرریزهای سد ساوا کودو در هند و اولدجت ملز در الجزیره [۱۷] به ترتیب ۰,۵۶ و ۰,۶۶ می باشد. مطابق با گزارش لیت ریبریو و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۸] اگر عمق آب بالای تراز تاج سرریز بیش از ۳ سانتیمتر باشد کشش سطحی تاثیری بر نتایج خروجی نخواهد داشت. در نمودارهای ارائه شده خط ۳ سانتیمتر به عنوان مرز قابل اطمینان ارائه گشته است. درصد اختلاف عملکرد مدل ۲ به مدل ۱ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\%diff = \frac{C_{d2} - C_{d1}}{C_{d1}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن %diff درصد اختلاف نسبی عملکرد می باشد.

به خاطر تفاوت در هدهای اندازه گیری شده بین مدل ۱ و ۲، مقادیر متناظر C_{d2} برای H/P اندازه گیری شده در مدل ۱ از بین ضرایب اندازه گیری شده برای مدل ۲، درون بایی خطی شده و در مقایسه عملکرد دو مدل مورد استفاده قرار می گیرند. در جدول ۴ درصد اختلاف عملکرد یکبار با در نظر گرفتن تمامی هدهای اندازه گیری شده و بار دیگر فقط برای هدهای بزرگتر از ۳ سانتیمتر محاسبه شده است و میانگین تفاوت عملکرد نسبی دو مدل مقایسه ای با لحاظ هدهای بزرگتر از ۳ سانتیمتر ارائه شده است. مطابق با جدول ۴ می توان مشاهده کرد افزایش زاویه در سرریز کلید پیانویی متقارن در نما تا ۱۷,۴ درصد برای مدل ۳ درجه نسبت به مدل ۰ درجه شده است. همچنین در بازه $(0.3 < H/P < 0.6)$ ، به صورت میانگین ۶,۷ درصد راندمان مدل زاویه دار ۳ درجه بهتر از مدل مستطیلی می باشد. دلیل این افزایش را می توان کاهش استغراق موضعی در پایین دست کلید خروجی سرریز دانست. همانطور که از جدول ۴ مشخص است افزایش مجدد زاویه از ۳ به ۶ در کل باعث افت راندمان سرریز شده است، دلیل این امر افزایش استغراق کلید خروجی در ناحیه بالادست خود، به دلیل حجم کوچک شده این ناحیه در اثر زاویه می باشد.

جدول ۴ نتایج مقایسه راندمان مدل ها نختلف غیر خطی

Model-2	Model-1	Max %diff (H greater than 3 cm)	Corresponding H/P (H greater than 3 cm)	Average % diff H greater than 3 cm)	Max %diff (0.3<H/P<0.6)	Corresponding H/P (0.3<H/P<0.6)	Average % diff (0.3<H/P<0.6)
3°	0°	17.4	0.232	6.7	11.6	0.403	6.7
6°	0°	8.8	0.232	1	6.2	0.403	2.9

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

بر اساس آزمایشات انجام شده که نتایج آن به صورت نمودار در شکل شماره ۸ و همچنین مقایسه راندمان در جدول شماره ۴ ارائه گردید، افزایش زاویه تاج جانبی تا ۳ درجه در سرریز کلید پیانویی متقارن در نما نسبت به مدل مستطیلی این نوع سرریز باعث افزایش قابل قبولی در بازه طراحی هد آب بالادست برابر $(0.3 < H/P < 0.6)$ می گردد. افزایش دوباره زاویه تاج از ۳ به ۶ باعث افت راندمان سرریز شده و توجه هیدرولیکی ندارد.

۶. مراجع

1. Henderson, F. M. (1966). "Open channel flow." Channel controls, MacMillan, New York, 174–176.
2. Le Doucen O., Leite Ribeiro M., Boillat J.L., Schleiss A. and Laugier F. (2009). Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs, in proceedings of Modèles physiques hydrauliques - outils indispensables du XXIe siècle, SHF,Lyon
3. Leite Ribeiro M., Boillat J.L. and Schleiss A.J. (2011). Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs. *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC press, London, 183-190.
4. Ouamane A., Lempérière F. (2006). Design of a new economic shape of weir, in *proceedings of International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century*, Barcelona, Spain, 463-470.
5. Lempérière F., Vigny J.P. and Ouamane A. (2011). General comments on Labyrinths and Piano Key Weirs: The past and present. *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC press, London, 17-24.
6. Machiels. O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs, Ph.D thesis, Faculty of Applied Science, University of Liège
7. Machiels. O., Piroton, M., Pierre, A., Dewals, B., Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs, *Journal of Hydraulic Research*, 52:3,326-335
8. Javaheri, A., Parvaneh, A. and Kabiri-Samani, A., (2015). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs By O. MACHIELS, M. PIROTON, A. PIERRE, B. DEWALS and S. ERPICUM, J. Hydraulic Res. 52 (3), 2014, 326–335. *Journal of Hydraulic Research*, 53(4), pp.543-545.
9. Laugier, F., J. Vermeulen, and V. Lefebvre. (2013). "Overview of Piano Key Weirs experience developed at EDF during the past few years." *Labyrinth and Piano Key weirs II (2013)*: 213.
10. G.M. Cicero, J.R. Delisle, V. Lefebvre, J. Vermeulen, (2013). Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key weir, in: Proceeding of labyrinth and piano key weirs (PKW 2013), London, UK, 2013, pp. 265–272.
11. Khassaf. S, Al-Baghdadi, M. (2015). Experimental study of non-rectangular piano key weir discharge coefficient, *Int. J. Energy Environ.* 6 (2) 425–436.
12. Mehboudi, A., Attari, J., & Hosseini, S. A. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 65-72.
13. Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2011). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 358-361.
14. Safarzadeh, A., & Noroozi, B. (2016). 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 1-13
۱۵. خیاط رستمی، س. (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای و کلید پیانویی ذوزنقه ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
16. Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Singhal, F., Sharma, N. (2012b). Piano Key Weirs as efficient spillway structure. *J. Hydraulic Eng.* 138, 199-203,
17. Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, 273.
18. Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. & Boillat, J.L. (2012). Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4): 400–408.