نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هشتم/ شماره بیست و هشتم /بهار ۱۴۰۰

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
8th Year / No. 28 / June 2021

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تعداد کلید واحد بر نحوه آبگذری سرریزهای جانبی کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای

سیدتقی (امید) نائینی[۱]
مجتبی صانعی[۲]
ملیحه اسلام‌پناه*[۳]
احسان غنچه[۴]

چکیده

اخیراً سرریزهای کلیدپیانویی در سازه‌های هیدرولیکی به دلیل افزایش دبی عبوری اهمیت پیداکرده است. در این تحقیق تأثیر تعداد کلیدهای واحد بر نحوه آبگذری سرریز جانبی کلیدپیانویی به‌صورت آزمایشگاهی موردبررسی قرارگرفته است. ۴۵ آزمایش روی سرریزهای کلیدپیانویی تک، دو، چهار، شش سیکل و سرریز خطی در بارهای آبی نسبی مختلف (۱ و ۰/۸۵، ۰/۶۵، ۰/۵، ۰/۳ = H/P) انجام‌شد. مقدار دبی ورودی به کانال اصلی به‌گونه‌ای اعمال‌شد که جریان در کانال زیربحرانی باشد. شیب فلوم و طول آبگذری سرریزها ثابت در نظر گرفته‌شده‌اند و از سرریز تیپ A استفاده شده است. آزمایش‌ها در بارهای آبی نسبی مذکور برای تعیین نیمرخ سطح آب و ضریب آبگذری انجام‌شد. در ابتدای سرریز جانبی ارتفاع آب به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد کلید واحد میزان این کاهش بیشتر می‌شود به‌طوری‌که افت سطح آب در سرریز شش سیکل ۵ درصد بیشتر از تک سیکل است. ضریب آبگذری سرریز با افزایش تعداد کلید واحد و یکسان بودن طول مؤثر در تمام سرریزها، به میزان ۵ تا ۲۱ درصد کاهش‌می‌یابد. در بارهای آبی نسبی آزمایش‌شده نسبت ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی به سرریز خطی بین ۱/۱۵ تا ۱/۷۵ به‌دست‌آمد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میزان ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی معمول، بیشتر از ضریب دبی سرریز با جانمایی معکوس است ولی این تفاوت چشمگیر نیست.

واژه‌های کلیدی:

سرریز کلیدپیانویی، تعداد سیکل، ضریب آبگذری، پروفیل سطح آب

۱. دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران stnaeeni@t.ac.ir
۲. دانشیار مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری drsaneie@gmail.com
۳.* کارشناس ارشد عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران malihe.eslampanah@gmail.com
۴. کارشناس ارشد عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران ehsanqoncheh@gmail.com

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۰۲

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

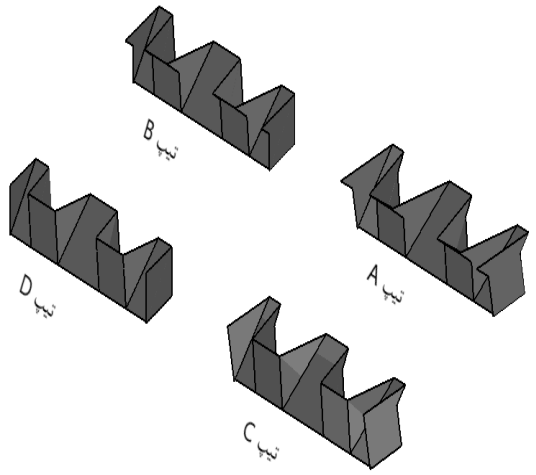
[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

مقدمه

سرریز سازه‌ای است که برای عبور آب اضافی و سیلاب به پایاب سدها استفاده می‌شود، با توجه به اینکه سرریز نقش حساسی در کنترل بحران ناشی از سیل را بر عهده دارد، سازه آن باید ایمن، مطمئن و با راندمان بالا باشد تا هرلحظه آماده بهره‌برداری باشد. سرریزها به دو صورت عمود بر مسیر جریان و یا موازی با جهت جریان طراحی و ساخته می‌شوند، به سرریزهایی که موازی با جهت جریان در کانال اصلی و در دیواره کانال قرار می‌گیرند سرریز جانبی گفته می‌شود (ایزدنیا[1] و حیدرپور[2]، ۲۰۱۶). این نوع سازه‌ها در یکی از جداره‌های کانال اصلی برای انحراف آب احداث می‌شوند و وظیفه تخلیه جریان اضافی از مسیر اصلی در سامانه‌های فاضلاب شهری، شبکه‌های آبیاری و زهکشی و کنترل سیلاب در رودخانه و تنظیم رقوم آب را بر عهده دارند. (زاجی[3] و بنکداری[4]، ۲۰۱۷، عامری[5] و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به مشکلاتی که در تعبیه سرریزهای جانبی معمول وجود دارد باید راهکاری مناسب برای حل آن ارائه داد. مشکلات سرریزهای جانبی معمولاً عبارت‌اند از عدم تخلیه دبی کافی توسط سرریز جانبی؛ که مهندسان هیدرولیک برای حل این مشکل معمولاً طول سرریز را افزایش می‌دهند. راهکار دیگری که مهندسان به‌تازگی از آن استفاده می‌کنند استفاده از سرریز کلیدپیانویی به‌جای سرریزهای معمول است که باعث می‌شوند میزان آبگذری در طول بازشدگی یکسان به‌صورت هنگفتی افزایش یابد. از مزایای سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریزهای خطی می‌توان به افزایش دبی عبوری در واحد عرض، در بار آبی و عرض سرریز یکسان اشاره کرد. این سرریزها برای اولین بار توسط اومان[6]، و لمپرییر[7] توسعه داده‌شده‌اند؛ سرریزهای کلیدپیانویی با اضافه کردن کلیدهای ورودی و خروجی به سرریزهای کنگره‌ای به وجود آمده‌اند (لمپییر و اومان، ۲۰۰۳).

سرریزهای کلید پیانویی دارای تیپ‌های A، B، C و D می‌باشند که هرکدام از آن‌ها هندسه خاص خود را دارند. تفاوت تیپ‌های مختلف این سرریز در وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست است. تیپ A هر دو شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست را دارا است. تیپ B شیروانی‌های پایین‌دست و تیپ C شیروانی‌های بالادست را ندارد و در تیپD هیچ‌کدام از شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست وجود ندارد (اورتل[8]، ۲۰۱۵). شکل (۱) تیپ‌های سرریزهای کلیدپیانویی را نشان می‌دهد.



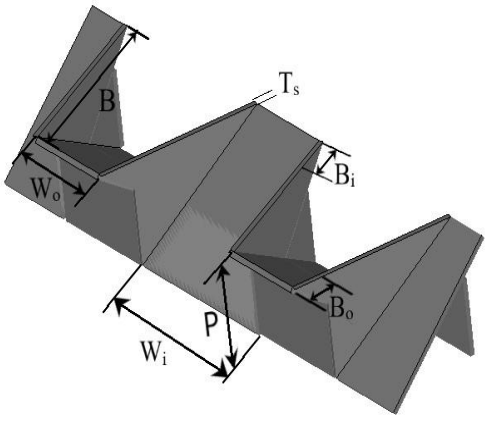
شکل (۱): انواع تیپ سرریز

سرریزهای کلیدپیانویی از تعدادی کلید واحد تشکیل‌شده‌اند. با بررسی تعداد کلید واحد برای عبور دهی مقدار معینی از آب، می‌توان مقدار بهینه این کمیت را پیدا کرد. با افزایش تعداد کلید واحد سرریزهای کلیدپیانویی در طول ثابت، پی موردنیاز برای قرارگیری سرریز بر روی آن به‌طور عمده‌ای کاهش می‌یابد ولی این کار ممکن است باعث کاهش در ضریب دبی و به‌وجود آمدن اغتشاشات زیادی در جریان عبوری از سرریز شود که مطلوب نیست؛ بنابراین یافتن هندسه مناسب و تعداد سیکل بهینه ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهای اصلی هندسی سرریز کلیدپیانویی عبارت‌اند از: ارتفاع سرریز P، طول شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست Bo و Bi، عرض بازشدگی ورودی و خروجی Wi و Wo و ضخامت دیواره ها Ts (شکل ۲). سرریز کلید پیانویی از چند کلید واحد (Nu) تشکیل‌شده است که این کلید واحد بدین صورت تعریف می‌شود که دارای یک ورودی و دو نیم خروجی و دو یال جانبی است (پرالانگ[9] و همکاران، ۲۰۱۱). عرض کل بازشدگی (W) و طول کل لبه سرریز (L) به ترتیب برابر است باNuWu و NuLu که Wu (عرض

[1] Izadnia
[2] Heidarpour
[3] Zaji
[4] Bonakdari
[5] Ameri
[6] Ouamane
[7] Lemperiere
[3] Oertel
[9] Pralong

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

بازشدگی یک کلید واحد) برابر با Wi+Wo+2Ts و Lu (طول یک واحد سرریز) برابر با Wu+2B است.



شکل (۲): پارامترهای هندسی سرریز

تحقیقات متنوعی بر روی انواع سرریزهای جانبی انجام‌شده است. کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۸ بر روی مشخصات سرریزهای جانبی کلیدپیانویی، کنگره‌ای و خطی مطالعه کردند. آزمایش‌ها بر روی ۹ سرریز کلیدپیانویی، ۹ سرریز کنگره‌ای و ۳ سرریز خطی انجام‌شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرریزهای کلیدپیانویی و کنگره‌ای دارای ضریب تخلیه بسیار بالایی نسبت به سرریزهای خطی می‌باشند. همچنین سرریز کلیدپیانویی و کنگره‌ای تفاوت چندانی در ضریب آبگذری با یکدیگر ندارند.

مهبودی[1] و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه آزمایشگاهی روی پارامترهای هندسی سرریزهای ذوزنقه‌ای کلید پیانویی تحت شرایط جریان مختلف انجام دادند و تأثیر آن‌ها بر ضریب دبی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب تخلیه سرریز ذوزنقه‌ای کلید پیانویی ۲۲ درصد بیشتر از حالت مستطیلی است بنابراین در این پژوهش از شکل ذوزنقه‌ای سرریز کلیدپیانویی استفاده شده است.

ژارومیر[2] و زبینک[3] در سال ۲۰۱۵ بر روی سرریز جانبی لبه پهن ذوزنقه‌ای آزمایش انجام دادند و یافتند که کمینه عمق در مرکز سرریز رخ می‌دهد. کایا[4] و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی ضریب دبی سرریز نیمه بیضوی جانبی پرداختند و دریافتند که با افزایش نسبت طول دهانه ورودی کانال جانبی به عرض کانال اصلی، ضریب دبی افزایش پیدا می‌کند.

برای بررسی سرریزهای جانبی کنگره‌ای و کلیدپیانویی نیز تحقیقات مختلفی انجام‌شده است که برخی از مهم‌ترین تحقیقات به‌قرار زیر است.

صفرزاده و نوروزی در سال ۱۳۹۷ با اصلاح کلید ورودی و خروجی سرریز کلیدپیانویی دریافتند که تأثیر اصلاح کلید خروجی بر هیدرولیک جریان اندک بوده ولی تأثیر اصلاح کلید ورودی قابل‌توجه است.

صفرزاده و همکاران در سال ۱۳۹۴ بر روی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی نامتقارن با تعداد کلید واحد متغیر به تحقیق پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در بارهای آبی نسبی بالا، یک و نیم کلید در طراحی هندسه مدل، کافی است؛ ولی اگر بار آبی نسبی پایین (H/p<0.4) در طراحی مدل آزمایشگاهی مدنظر باشد، در این صورت باید از تعداد واقعی کلید واحد استفاده شود. این پژوهش نیز در کانال مستقیم انجام‌شده است و نتایج برآمده از آن با سرریز جانبی متفاوت است.

اریپکام[5] و همکاران در سال ۲۰۱۴ تأثیر سه پارامتر ارتفاع سرریز، عرض کلید و طول شیروانی‌ها را بررسی کردند و نتایج حاکی از این بود که عرض کلیدها و نسبت طول شیروانی‌ها تأثیر زیادی بر کارایی سرریز کلیدپیانویی دارند اما تأثیر ارتفاع سرریز بیشتر از دو پارامتر دیگر است.

خامنه[6] و همکاران در سال ۲۰۱۴ ضریب تخلیه سرریز کنگره‌ای را با تعداد سیکل‌های عبوری مختلف موردبررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که انرژی مخصوص در دو لبه سرریز تقریباً یکسان است و رابطه‌ای تجربی برای محاسبه ضریب تخلیه این سرریزها ارائه کردند.

پروانه[7] و همکاران در سال ۲۰۱۲ آزمایش‌هایی بر روی سرریزهای جانبی زیگزاگی[8] با زوایای رأس متفاوت انجام دادند و ضریب دبی در عدد فرودهای مختلف را برداشت کردند. آن‌ها دریافتند که ضریب دبی در سرریزهای جانبی نامتقارن ۱/۶ برابر ضریب دبی در حالت متقارن این سرریزها است.

امیر اوقلو[9] و همکاران در سال ۲۰۱۰ از سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با یک سیکل و دو سیکل ورودی برای سرریز

[1] Mehboudi
[2] Jaromir
[3] zbynek
[4] Kaya
[5] Eripcum
[6] Khameneh
[7] Parvaneh
[8] Labyrinth
[9] Emiroglu

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

جانبی در کانال مستقیم استفاده کردند و مقدار ضریب تخلیه این سرریزها را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند رابطه‌ای که برای سرریز با یک سیکل به‌دست‌آمده است برای سرریز با دو سیکل مناسب نیست.

عوامل مختلفی از قبیل ارتفاع سرریز، عرض کلیدها، تعداد کنگره‌ها (تعداد کلیدها در عرض سرریز)، شکل کلید، طول و محل شیروانی‌ها، زاویه و شکل قرارگیری یال‌ها نسبت به هم بر میزان دبی عبوری تأثیر دارند. در تحقیق آزمایشگاهی حاضر، به بررسی عملکرد سرریز جانبی تیپ A ذوزنقه‌ای پرداخته‌شده است. تعداد کلید واحدها متغیر در نظر گرفته‌شده است تا تأثیر تعداد کلید واحدها در میزان دبی عبوری به‌دست آید. بقیه پارامترهای تأثیرگذار ثابت فرض شده‌اند.

در این تحقیق اهداف ذیل موردنظر است:

- به دست آوردن دبی عبوری بیشینه در یک عرض ثابت و تعداد بهینه کلید واحد
- مقایسه عملکرد سرریزهای کلیدپیانویی با تعداد کلید واحدهای مختلف با یکدیگر و همچنین با سرریز خطی و انواع دیگر سرریزهای جانبی

همان‌طور که دیده می‌شود، در مطالعات پیشین در حوزه سرریزهای کلیدپیانویی، توجه کمتری نسبت به سرریزهای جانبی صورت گرفته است؛ همچنین جای خالی روند تغییرات ضریب دبی با افزایش و یا کاهش تعداد کلیدواحد های سرریز کلیدپیانویی جانبی دیده می‌شود بنابراین انجام تحقیق حاضر با توجه به موارد ذکرشده ضروری به‌نظر می‌رسد. با بررسی تعداد کلید واحدهای مختلف در عرض بازشدگی یکسان، تعداد بهینه کلید واحدها در طول ثابت سرریز به دست می‌آید. هرچه تعداد کلیدواحدهای سرریز کلیدپیانویی در طول مؤثر یکسان، کمتر باشد برای ساخت سرریز نیاز به پی بزرگ‌تر است اما از طرف دیگر پیچیدگی‌های ساخت سرریز کاهش می‌یابد. در این تحقیق به مقایسه سرریزهای کلیدپیانویی با طول مؤثر یکسان برای پیدا کردن تعداد بهینه کلید واحد پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

عوامل مؤثر بر ضریب دبی در سرریزهای کلیدپیانویی جانبی عبارت‌اند از:

$$C_d = f(b, H, W, g, S_0, \Psi, \mu, \sigma, \rho, P, n, L, W_i, W_o, B, S_{in}, S_{out}, Nu, V, H_2, H_1) \quad (۱)$$

که b عرض کانال، Hعمق آب روی سرریز در مرکز کانال، B طول یال، g شتاب گرانش، S_0 شیب کانال، Ψ زاویه انحراف آب از جریان اصلی به سمت سرریز جانبی، μ ویسکوزیته سیال، σ کشش سطحی سیال، H_1 عمق آب در پایین‌دست سرریز، H_2 عمق آب در بالادست سرریز، ρ چگالی سیال، P ارتفاع سرریز، n ضریب مانینگ[1] سرریز، L طول مؤثر سرریز (در سرریزهای کلیدپیانویی همان طول کل لبه سرریز است)، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W عرض سرریز، S_{in} شیب کلید ورودی سرریز، S_{out} شیب کلید خروجی سرریز، Nu تعداد کنگره‌های سرریز و V سرعت جریان بالادست سرریز در کانال اصلی می‌باشند. با توجه به اظهارات و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای مواردی که عمق جریان روی سرریز بیشتر از ۳ سانتی‌متر است، تأثیر پارامتر کشش سطحی (σ) ناچیز بوده و از تأثیر این پارامتر در این تحقیق می‌توان صرف‌نظر کرد.. همچنین در مطالعه‌ای از فیستر[2] و همکاران در سال ۲۰۱۳ دیده می‌شود که هر دو پارامتر کشش سطحی و ویسکوزیته در سرریزهای کلیدپیانویی در جریان‌های با بار آبی کمتر از ۳ تا ۵ سانتی‌متر موردتوجه قرار می‌گیرند که در این پژوهش برای عدم تأثیرگذاری این دو پارامتر مقدار ارتفاع آب روی سرریز بیشتر از ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شده است؛ درنتیجه هیچ‌کدام از پارامترهای ویسکوزیته و کشش سطحی در نتایج آزمایش‌ها تأثیر نمی‌گذارند. ازآنجایی‌که در پارامترهای طراحی سرریزهای مورد آزمایش نسبت شیب‌ها (S_{out}/S_{in}) برابر یک است و نسبت طول مؤثر سرریز به عرض شکاف (L/B) نیز ثابت است لذا این پارامترها جزو پارامترهای مشخصه محسوب نمی‌شوند. با توجه به هندسه کانال جانبی و عدم ایجاد استغراق اضافی از سوی پایین‌دست، متغیر H_1 نیز در این تحقیق بی‌تأثیر می‌شود بنابراین پارامترهای مشخصه موردبررسی تأثیرگذار بر ضریب دبی جریان سرریزهای جانبی در تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

[1] Manning

[2] Fister

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

$$C_d = f(b, H, L, g, \rho, P, W, Nu, W_i, W_o, B, S_0, \nu, n, \Psi, H_2, V) \quad (۲)$$

با توجه به ثابت بودن زاویه بین یال‌ها، طول سرریز و عرض بازشدگی در آزمایش‌های انجام‌شده، نتیجه می‌شود که پارامترهایNu ، W_i، B،W_o برای ثابت ماندن طول کل با تغییر تعداد کلید واحد، متغیر بوده و تمامی این پارامترها وابسته به تغییر Nu می‌باشند.

همچنین در طول تحقیق نیز پارامترهای شیب کانال، ویسکوزیته سیال و ضریب مانینگ نیز ثابت بوده است بنابراین با ساده‌سازی دوباره خواهیم داشت:

$$C_d = f(b, H, L, g, \rho, P, W, Nu, V, H_2, \Psi) \quad (۳)$$

لازم به ذکر است که شیب کانال به مقداری بود که در تمامی دبی‌های آزمایش‌شده جریان در کانال اصلی به‌صورت تحت بحرانی قرار داشت در غیر این صورت رفتار آب در ناحیه بازشدگی متفاوت می‌گردید. حال متغیرهای بدون بعد توسط قضیه پی باکینگهام به‌دست آورده می‌شود:

$$\pi_1 = \frac{V}{g^{1/2} {H_2}^{1/2}},\ \pi_2 = \frac{L}{P}, \pi_3 = \frac{H}{P}$$
$$\pi_4 = \frac{b}{P},\ \pi_5 = \frac{W}{P} \quad (۴)$$

با توجه به پارامترهای بدون بعد به‌دست‌آمده دیده می‌شود که تمامی پارامترهای تشکیل‌دهندهπ_2، π_4 و π_5 در این پژوهش ثابت در نظر گرفته‌شده‌اند پس‌ازاین پارامترها صرف-نظر می‌شود. با توجه به مطالب بالا پارامترهای تأثیرگذار متغیر در ضریب دبی، تنها تعداد کنگره‌ها (Nu)، ارتفاع آب روی سرریز (H/P)، عدد فرود بالادست سرریز (Fr) و زاویه انحراف آب (Ψ)می‌باشند. از این میان تنها پارامترهای فیزیکی تعیین‌کننده در این پژوهش مقدار بار آبی نسبی و تعداد کنگره‌ها هستند و زاویه انحراف آب متأثر از هندسه سرریز است.

چیدمان آزمایشگاهی

آزمایش‌های مذکور در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام‌شده است. کانال مورد آزمایش موجود در این پژوهشکده دارای عرض ۰/۶ متر، طول ۱۴ متر، ارتفاع ۰/۵متر بوده و ابعاد حوضچه آرامش ۱/۴×۳ متر است. ۶ متر از فلوم[1] با جداره‌های از جنس plexiglass ساخته‌شده است. برای تأمین دبی، یک پمپ با ظرفیت ۵۰ لیتر بر ثانیه برای دبی‌های پایین تعبیه شده است و برای دبی‌های بالاتر پمپ کف کش با ظرفیت ۲۰ لیتر بر ثانیه علاوه بر پمپ مذکور مورداستفاده قرار گرفته است. یک کانال جانبی به عرض ۰/۹۵ متر و طول ۷ متر و عمق ۰/۵۴متر نیز برای انتقال آب عبوری از سرریز کلیدپیانویی ساخته شد. شکل (۴) طرح کلی کانال مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری دبی ورودی به کانال اصلی از سرریز لبه تیز مثلثی در بالادست کانال استفاده‌شده است. با قرائت تراز آب با استفاده از پوینت گیج در نقطه‌ای به فاصله سه تا پنج برابر بار آبی روی سرریز (3-5 H) از لبه آن، مقدار دبی عبوری به کمک نمودار دبی اشل این سرریز به دست می‌آید. جریان آب پس از گذر از سرریز توسط صفحات مشبک، آرام شده و صفحات یونولیت موجود، نوسانات سطحی آب را مستهلک می‌کنند. برای اندازه‌گیری دبی خروجی کانال جانبی از سرریز لبه تیز مستطیلی استفاده شده است. این سرریز در خروجی کانال جانبی نصب گردیده و پس از کالیبره شدن، با قرائت ارتفاع سطح آب با استفاده از پوینت گیج میزان دبی خروجی به‌دست‌آمده آورده شده است.

برای به‌دست آوردن ضریب تخلیه سرریزهای جانبی باید تراز سطح آب برداشت شود که این امر توسط دستگاه پروفایلر انجام‌شده است. این دستگاه به یک ولت‌متر دیجیتالی برای افزایش دقت متصل شده است که دقت اندازه‌گیری را به ۰/۱ میلی‌متر می‌رساند. نحوه عملکرد این دستگاه بدین گونه است که به ازای هر طولی از میله اندازه‌گیری ولتاژ خاصی را نمایش می‌دهد. در ابتدا ولت‌متر کالیبره می‌شود و سپس پروفیل سطح آب برداشت می‌شود



شکل (۳) : سرریز جانبی چهار سیکل معکوس در شرایط آزمایشگاهی

[1] flume

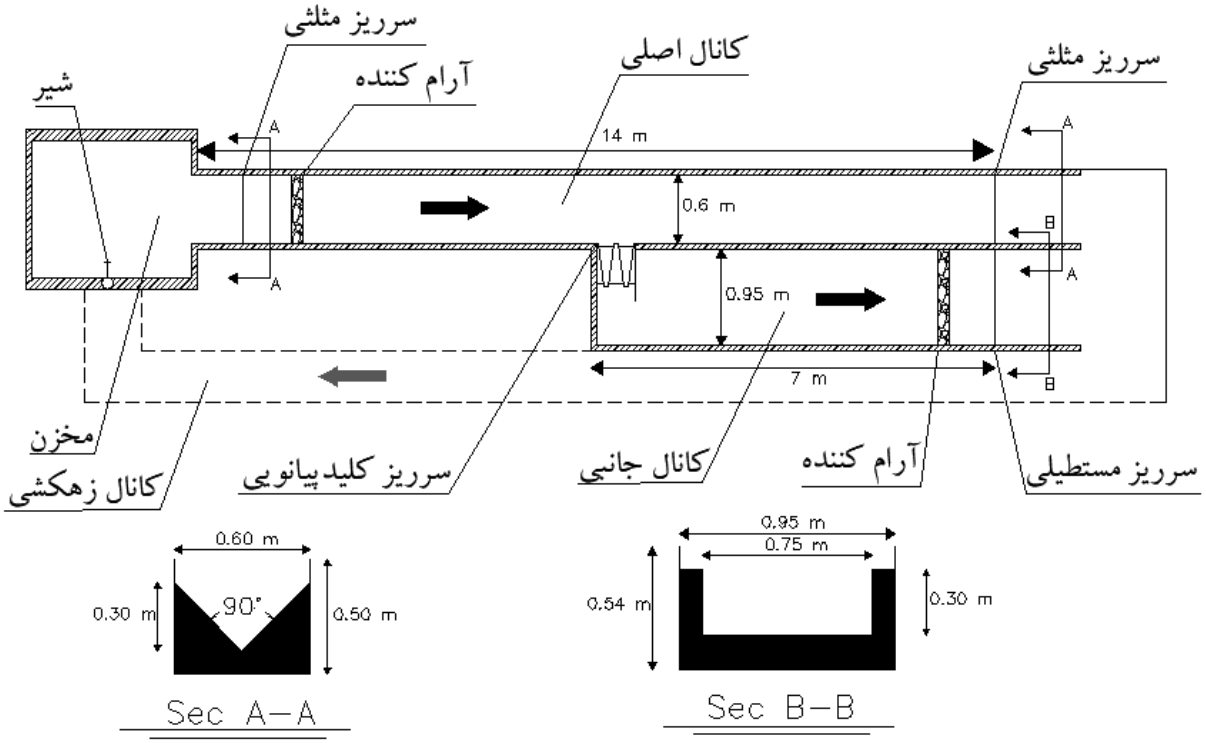
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

همانند پوینت گیج، این دستگاه نیز بر سر میله اندازه‌گیری میزان عمق آب دارای سوزنی است که با تنظیم دقیق این سوزن و با مماس قرار دادن آن نسبت به جریان آب میزان عمق آب برداشت می‌شود.

در شکل (۳) نمای نزدیک سرریز کلیدپیانویی دیده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد دو کانال موازی باهم یکی اصلی و دیگری فرعی برای گذردهی آب ساخته‌شده‌اند که در این تحقیق میزان آب ورودی به کانال فرعی توسط سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای موردبررسی قرار گرفته است.

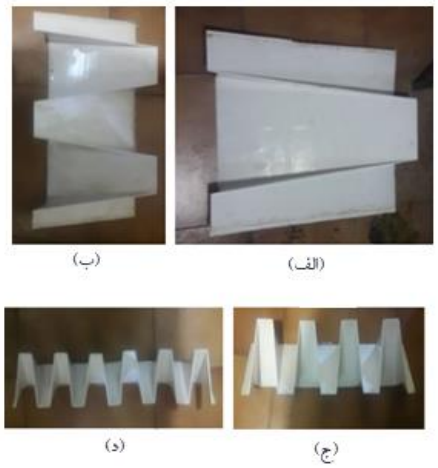


شکل (۴): مشخصات کانال

در شکل (۴) پلان کانال آزمایشی و مقاطع سرریزهای خطی مثلثی و مستطیلی واقع در آن نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است آب تخلیه‌شده از کانال اصلی و جانبی توسط یک پمپ و با عبور از کانال زهکشی دوباره به مخزن بازمی‌گردد.

برای اندازه‌گیری سطح آب در بالادست سرریز کلیدپیانویی یک پروفیل سنج در کانال اصلی قرار داده‌شده است تا بتوان رقوم سطح آب را به‌صورت دقیق بر روی سرریز به‌دست آورد. برای به دست آوردن شکل نیمرخ سطح آب، این ناحیه را شبکه‌بندی کرده و در تمام نقاط مذکور ارتفاع سطح آب قرائت شده است. این شبکه‌بندی در سرریزهای مختلف متفاوت بوده است. برای بهبود کیفیت نیمرخ سطح آب برداشت‌شده، علاوه بر نقاط برداشت‌شده در طول سرریز تا ده سانتی‌متر از طرفین لبه بازشدگی نیز رقوم‌برداری نیمرخ سطح آب صورت پذیرفت.

سرریزها از جنس plexiglass سفید باضخامت ۳ میلی‌متر در چهار حالت تک سیکل، دو سیکل، چهار سیکل و شش سیکل ساخته‌شده‌اند. شکل (۵) سرریزهای ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

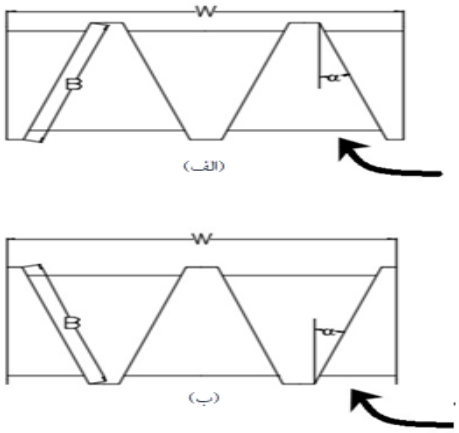


شکل (۵): سرریزهای مورداستفاده (الف): تک سیکل، (ب): دو سیکل، (ج): چهار سیکل و (د): شش سیکل

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

هرکدام از سرریزها به دو صورت اصلی (جانمایی معمول) و حالت معکوس آزمایش شده‌اند. بنابر تعریف کلید واحد (Nu)، سرریز اصلی با نیم خروجی و سرریز معکوس با نیم ورودی آغاز می‌شوند. درواقع سرریز معکوس با چرخش ۱۸۰ درجه‌ای سرریز اصلی به‌دست می‌آید. شکل (۶) دو حالت اصلی و معکوس سرریز کلیدپیانویی دو سیکل را نشان می‌دهد.

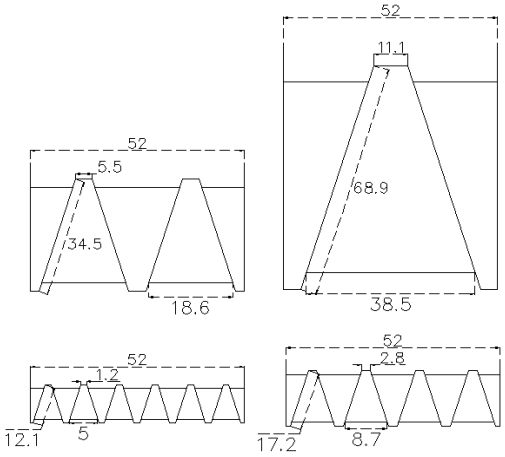


شکل (۶): (الف): حالت اصلی و (ب): معکوس سرریز

ارتفاع پایه سرریزها (P) ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای ساخت سرریزها در عرض موجود ۵۲ سانتی‌متر، طول کل آبگذری ۱۶۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. به دلیل اینکه طول آبگذری سرریزها در این پژوهش ثابت درنظر گرفته‌شده است اندازه این پارامتر باید به‌گونه‌ای انتخاب می‌شد که در سرریز تک سیکل طول یال‌های آن از عرض کانال جانبی بزرگ‌تر نباشد تا سرریز بتواند در بازشدگی موردنظر جای گیرد. همچنین در سرریز شش سیکل نیز اندازه یال‌ها می‌بایست قابل‌توجه باشد به همین دلیل طول کل آبگذری (L) ۱۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا دو شرط بالا به‌خوبی برقرار شود. زاویه یال‌ها با راستای قائم (α) ۱۲ درجه در نظر گرفته شد تا شکل ذوزنقه‌ای سرریز به‌خوبی به‌دست آید، سایر پارامترهای هندسی سرریزها در شکل (۷) آورده شده است. لازم به ذکر است که تمامی اندازه‌ها در شکل زیر به سانتی‌متر است.

جریان آب زمانی که از سرریز جانبی در کانال مستطیلی استفاده می‌شود به‌صورت متغیر مکانی با کاهش دبی است که معادله آن به‌صورت زیر است (فرنچ،[1] ۱۹۸۵):

$$\frac{dy}{ds}=\frac{S_0-S_f-\left(\frac{Q}{gA^2}\right)\left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1-\left(\frac{Q^2b}{gA^3}\right)} \qquad (۵)$$



شکل (۷): ابعاد هندسی متغیر سرریزها

که در آن S محور عرضی شکاف سرریز جانبی، S_0 شیب کانال اصلی، S_f شیب‌خط انرژی، b عرض کانال، A سطح مقطع کانال، Q دبی کانال اصلی، $\frac{dQ}{ds}=q$ دبی عبوری از واحد عرض سرریز جانبی و y غییرات تراز جریان است.

برای سرریزهای جانبی، دبی در واحد عرض به شکل معادله (۶) درمی‌آید (فرنچ، ۱۹۸۵).

$$q=\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,C_d(H-p)^{\frac{3}{2}} \qquad (۶)$$

که در آن C_d ضریب دبی، g شتاب گرانش، H ارتفاع آب روی سرریز و p ارتفاع سرریز موردنظر است.

با ناچیز در نظر گرفتن افت انرژی مخصوص در سرریزهای جانبی، ضریب دبی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (فرنچ، ۱۹۸۵):

$$s=\frac{3}{2}\frac{b}{C_d}\phi(E,y,p)+const \qquad (۷)$$

که در این رابطه ϕ تابعی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود (فرنچ، ۱۹۸۵):

$$\phi(E,y,p)=\frac{2E-3p}{E-p}\sqrt{\frac{E-y}{y-p}}-3\sin^{-1}\sqrt{\frac{E-y}{y-p}} \qquad (۸)$$

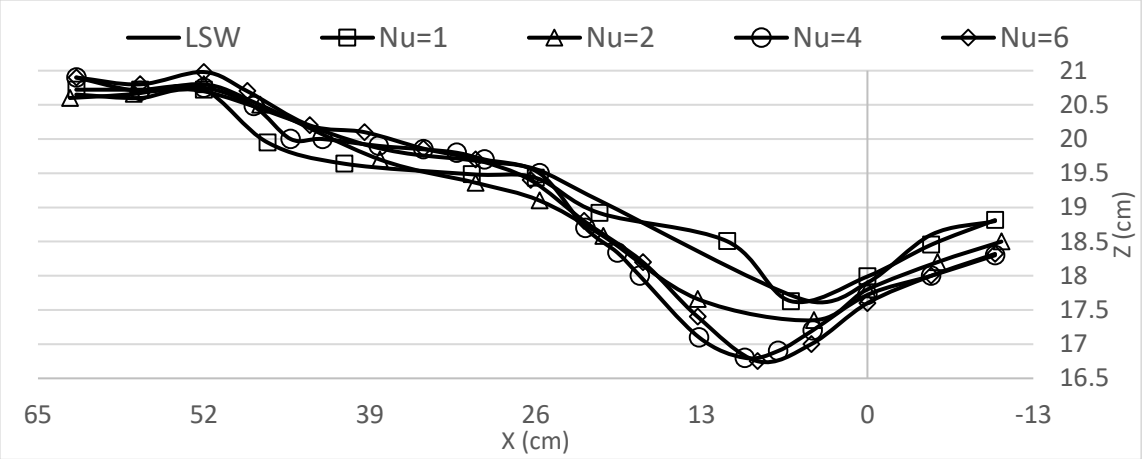
[1] French

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

حال با محاسبه این تابع در دو نقطه ابتدایی و انتهایی سرریز و با دانستن عرض بازشدگی و عرض کانال اصلی، مقدار ضریب دبی پیدا می‌شود (فرنچ، ۱۹۸۵).

$$C_d = \frac{3b}{2W}(\phi_2 - \phi_1) \qquad (۹)$$



شکل (۸): نیمرخ سطح آب در سرریزهای مختلف در لبه سرریز در بار آبی نسبی ۱

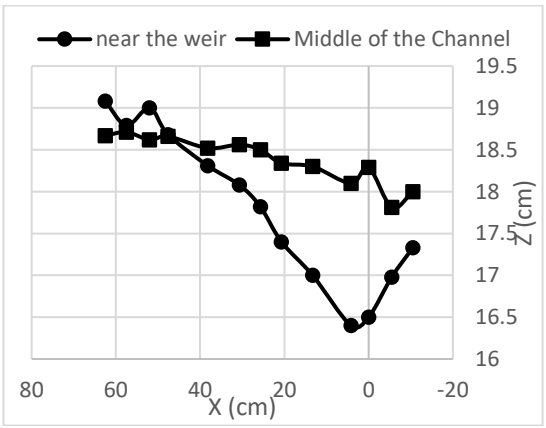
نتایج و بحث

نیمرخ سطح آب

با توجه به شکل (۸) دیده می‌شود از ابتدای سرریز جانبی تا انتهای آن سطح آب به‌تدریج در حال افزایش است که این امر با توجه به قوانین هیدرولیکی حاکم بر جریان متغیر تدریجی از نوع کاهش دبی قابل توجیه است. در نقطه آغازین سرریز جانبی ارتفاع آب به‌طور عمده‌ای نسبت به نقاط اطراف خود کاهش‌یافته است این پدیده به دلیل اینرسی جریان آب در حال حرکت ایجاد می‌شود و انتظار می‌رود که با انحنا دادن لبه ابتدایی بازشدگی این موضوع تا حد زیادی حل شود. لازم به ذکر است که در شکل (۸) در تمام حالت‌ها، ابتدای سرریز جانبی در $x = 0$ و انتهای آن در $x = 52$ است. با افزایش تعداد کلید واحد دیده می‌شود که کمینه ارتفاع نیز کاهش می‌یابد که کوچک شدن عرض کلیدها در سرریزهای با تعداد کلیدهای بیشتر باعث این موضوع می‌شود. مشخص است که هرچه ارتفاع آب بر روی سرریز جانبی در دبی بالادست یکسان بیشتر باشد، بدین معناست که سرریز عملکرد بهتری دارد بنابراین در این مورد می‌توان گفت که سرریز تک سیکل کارایی بهتری نسبت به سایر سرریزها دارد.

نیمرخ سطح آب در نزدیکی سرریز خطی مستطیلی نیز همانند سرریزهای کلیدپیانویی است. مینیمم ارتفاع آب در سرریز شاهد نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی بیشتر است ولی این مقدار تفاوت چندانی با سرریز کلیدپیانویی تک سیکل ندارد بنابراین برای عملکرد بهتر سرریز پیشنهاد می شود که مینیمم عرضی برای کلید ابتدایی در نظر گرفته شود.

با دقت در شکل (۸) دیده می‌شود که نیمرخ‌های سطح آب تنها در محدوده ابتدایی با یکدیگر متفاوت‌اند و در ادامه به‌مرور بر هم منطبق می‌شوند. همچنین با توجه به زیربحرانی بودن جریان در کانال اصلی روند افزایشی سطح آب در مجاورت سرریز جانبی منطقی به‌نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که تمامی ترازهای ارتفاعی نسبت به کف کانال اصلی اندازه‌گیری شده‌اند.



شکل (۹): مقایسه نیمرخ سطح آب در مجاورت سرریز و مرکز کانال اصلی در بار آبی نسبی ۰/۸۵

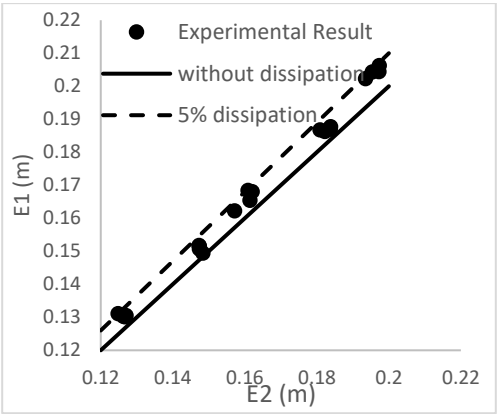
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

با توجه به شکل (۹) دیده می‌شود که در مقطع عرضی کانال اصلی، هرچه از لبه سرریز به سمت دیواره کانال حرکت می‌شود عمق آب افزایش می‌یابد که این امر به دلیل تخلیه آب از سرریز جانبی است. همچنین در وسط کانال اصلی نیز افت سطح آب دیده نمی‌شود.

ضریب آبگذری سرریز

با توجه به اینکه انحنا در نیمرخ سطح آب در نزدیکی بازشدگی زیاد است لازم است که به‌منظور استفاده از معادله (۵) میزان افت انرژی ناچیز باشد. با توجه به شکل(۱۰) دیده می‌شود که حداکثر افت انرژی کمتر از ۵ درصد است که بنابر گفته الخشاب[1] و اسمیت[2] در سال ۱۹۷۶ برای جریان زیربحرانی، میانگین افت انرژی ۵ درصد برای استفاده از این معادله مطلوب است.



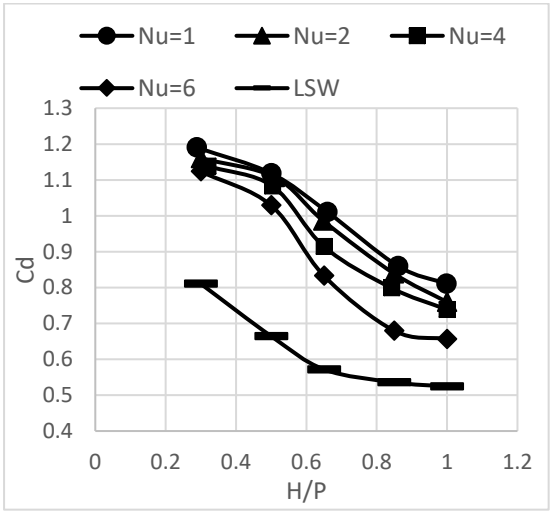
شکل (۱۰): نمودار انرژی مخصوص در دو لبه انتهایی سرریزهای جانبی حاضر

در شکل (۱۱) دیده می‌شود که سرریز تک سیکل در کل عملکرد بهتری نسبت به بقیه سرریزها دارد و همچنین با افزایش کلید واحدهای سرریز و کوچک شدن عرض کلیدها، جریان آب بر روی سرریز دچار فشردگی می‌شود که این امر باعث کاهش در مقدار ضریب دبی می‌شود. در بارهای آبی پایین، سرریزها رفتار تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهند و با بالا رفتن بار آبی بر روی سرریز تأثیر تعداد کلید واحدها نمایان می‌شود.

مطابق با انتظار ضریب آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی بسیار بیشتر از سرریز مستطیلی شاهد به‌دست‌آمده است. نسبت ضریب دبی در سرریزهای کلیدپیانویی به سرریز مستطیلی در بارهای آبی و تعداد کلید واحدهای مختلف، بین ۱/۱۵ تا ۱/۷۵ به دست آمد؛ این مسئله بدین معناست که سرریز کلیدپیانویی با هر تعداد کلید واحد دارای ضریب دبی بالاتری است.

علاوه بر موارد فوق نمودار شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش بار آبی در سرریز کلیدپیانویی تا ۰/۶۵، روند کاهش ضریب آبگذری کم بوده و پس‌ازآن سرعت می‌گیرد ولی در سرریز خطی عکس این مسئله برقرار است و این مسئله نیز نشان‌دهنده این است که سرریزهای کلیدپیانویی بااینکه در کل دارای ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریز خطی مستطیلی هستند ولی در بارهای آبی پایین عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند.

سرریز شش سیکل در بارهای آبی نسبی بالا رفتاری متفاوت از خود نشان داده است که این امر به دلیل استغراق به وجود آمده از بالادست جریان بر روی سرریز است. جریان بر روی سرریز کلیدپیانویی را می‌توان به ۳ دسته ریزشی، انتقالی و مستغرق تقسیم‌بندی کرد (مهبودی و همکاران، ۲۰۱۶) که در حالت مستغرق ضریب دبی به میزان قابل‌توجهی کمتر از دو حالت پیشین است.



شکل (۱۱): نمودار ضریب آبگذری سرریزها در بارهای آبی مختلف

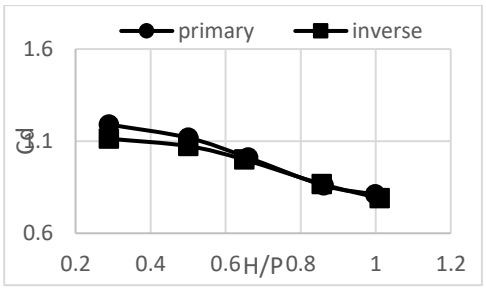
در شکل (۱۲) دیده می‌شود ضریب آبگذری در حالت‌های اصلی و معکوس با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند. مشاهدات نشان می‌دهند که حالت اصلی سرریز کمی نسبت به حالت معکوس آن عملکرد بهتری دارد ولی روند کلی تغییرات ضریب دبی در هر دو حالت یکسان است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که از سرریز در همان حالت اصلی استفاده شود.

[1] El- khashab

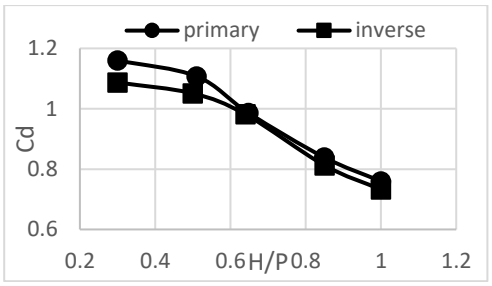
[2] Smith

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

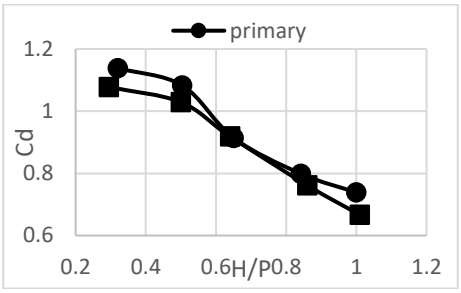
[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]



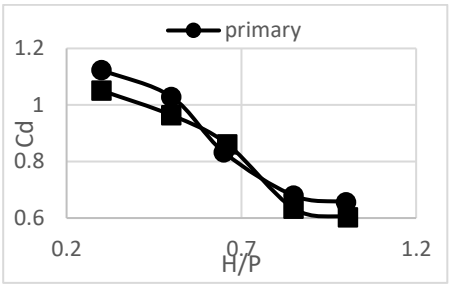
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۲): مقایسه حالت اصلی و معکوس سرریزهای (الف): تک سیکل، (ب): دو سیکل، (ج): چهار سیکل و (د): شش سیکل

جدول (۱): مقایسه ضریب دبی در سرریزهای با تعداد کلید واحد مختلف

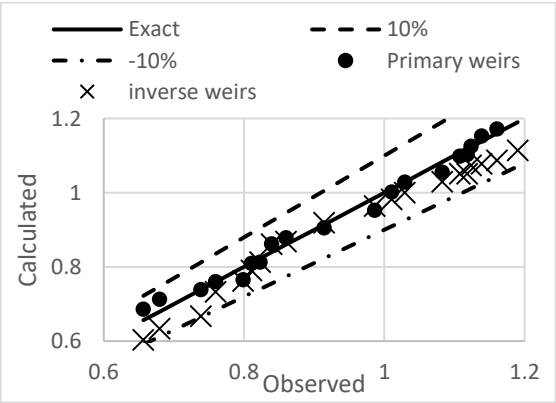
Nu / H/P	۱	۲	۴	۶	ماکزیمم درصد تغییر ضریب دبی
۰/۳	۱/۱۹	۱/۱۶	۱/۱۴	۱/۱۲	۵/۶
۰/۵	۱/۱۲	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۰۳	۸
۰/۶۵	۱/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۸۳	۱۷/۶
۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۶۸	۲۱
۱	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۶۶	۱۹

همچنین قابل‌مشاهده است که اغلب تفاوت در ضریب دبی دو حالت مذکور در بارهای آبی نسبی کوچک وجود دارد و با افزایش بار آبی رفتار دو نوع سرریز به هم نزدیک می‌شود. البته در سرریزهای با تعداد کلید واحد بالا به‌موجب اغتشاشات بیشتر به‌وجود آمده به دلیل کوتاه بودن عرض کلیدها، رفتار دو نوع سرریز در بارهای آبی بالا نیز با یکدیگر متفاوت شده است و این مطلب نشان‌دهنده این است که در سرریزهای حالت اصلی اغتشاشات به وجود آمده کمتر است. برای درک بهتر تأثیر تعداد کلید واحد در ضریب دبی جدول (۱) آورده شده است. دیده می‌شود که با افزایش بار آبی تأثیر تعداد کلید بیشتر می‌شود.

درنهایت با توجه به داده‌های آزمایشگاهی که برای بار آبی نسبی بین ۰/۳ و ۱ و همچنین تعداد کلید واحد ۱ تا ۶ و فرود زیر ۱، می‌توان فرمول پیشنهادی زیر را ارائه داد:

$$Cd = 1.174(Nu)^{-0.062} - 1.023(H/P)^{1.954} + 8.643(Fr)^{2.439} \quad (۱۰)$$

شکل (۱۳) مقایسه ضریب دبی برداشت‌شده از آزمایش‌ها و ضریب دبی محاسبه‌شده از فرمول بالا را به تصویر می‌کشد. مقدار ضریب تعیین (R square) این رابطه برازش شده ۰/۹۷۳ است. این عدد بدین معناست که این رابطه در محدوده داده‌های مورد آزمایش‌شده دارای دقت قابل قبولی در به‌دست آوردن ضریب دبی است. لازم به ذکر است که تمامی نتایج بحث شده در دامنه جریان زیربحرانی بوده و برای جریان‌های فوق بحرانی نتایج قابل‌تعمیم نمی‌باشند. با مقایسه تحقیق حاضر با مطالعات انجام‌شده توسط پروانه و همکاران در سال ۲۰۱۲ نمودار زیر به دست می‌آید.

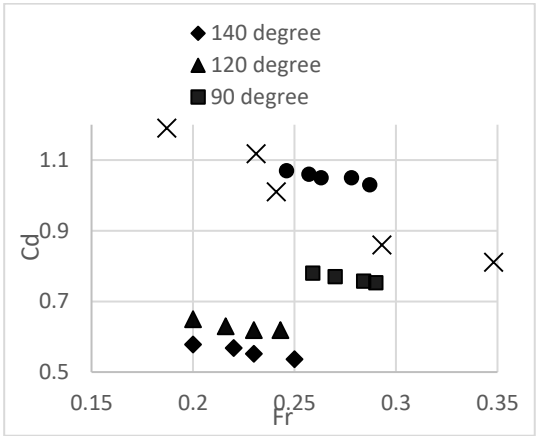


شکل (۱۳): مقایسه ضریب دبی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده توسط فرمول (۷)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

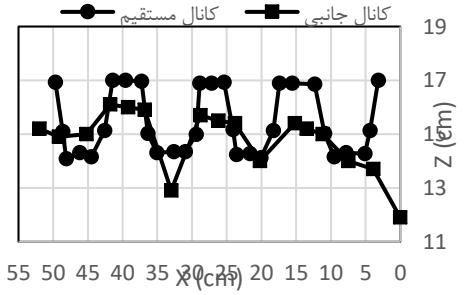
[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

با دقت در شکل (۱۴) دیده می‌شود که سرریز زیگزاگی با زاویه رأس ۶۰ درجه بهترین عملکرد در گذردهی آب از روی خود را دارد ولی درعین‌حال تفاوت چشمگیری بین ضریب دبی سرریز کلیدپیانویی تک سیکل و این سرریز وجود ندارد. همچنین دیده می‌شود که در محدوده اعداد فرود مطالعه شده روند کاهش ضریب دبی با افزایش عدد فرود در سرریز کلیدپیانویی حدود ۳ برابر بیشتر از سرریزهای زیگزاگی است.



شکل (۱۴): مقایسه ضریب دبی در تحقیق حاضر و مطالعات پروانه و همکاران (۲۰۱۲)

میرزایی در سال ۱۳۹۷ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تعداد کلید واحد در سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای در کانال مستقیم پرداخت. با مقایسه نیمرخ سطح آب در سرریز مستقیم و جانبی در دبی بالادست برابر دیده می‌شود که بار آبی بیشتری بر روی سرریز مستقیم قرارگرفته است. با توجه به این مطلب که تمام دبی بالادست از سرریز مستقیم عبور می‌کند این موضوع منطقی به نظر می‌رسد. همچنین در شکل (۱۵) قابل‌مشاهده است که سطح آب در هر دو حالت در کلیدهای ورودی کمتر از کلیدهای خروجی است و سطح آب در سرریز مستقیم کاملاً متقارن بوده است. لازم به ذکر است که شکل زیر برای سرریز چهار سیکل رسم شده است.



شکل (۱۵): مقایسه نیمرخ سطح آب در تحقیق حاضر و مطالعات میرزایی (۲۰۱۸) در دبی بالادست ۲۵ lit/s

نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی نیمرخ سطح آب و ضریب آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی با تعداد کلید واحدهای تک سیکل، دو سیکل، چهار سیکل و شش سیکل؛ در کانال جانبی موردبررسی قرار گرفت سپس نتایج آن با سرریز خطی مستطیلی و زیگزاگی مقایسه شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش ضریب آبگذری سرریزهای کلید پیانویی بین ۱/۱۵ تا ۱/۷۵ برابر ضریب آبگذری سرریز خطی مستطیلی است و مقدار این ضریب در سرریز با تعداد کلید واحد کمتر بزرگ‌تر است؛ بنابراین اگر محدودیت‌های توپوگرافی وجود نداشته باشد و هزینه‌های خاک‌برداری و ساخت اجازه دهند، برای طول یکسان، سرریز با کلید واحد کمتر مناسب‌تر است ولی به دلیل افزایش طول یال‌ها و دست‌خوردگی بیشتر در محیط طبیعی، لازم است مقدار بهینه‌ای بین تعداد کلید واحد و عرض بازشدگی در نظر گرفته شود.

با مقایسه سرریز کلیدپیانویی تک سیکل و سرریزهای زیگزاگی با زوایای رأس مختلف دیده شد که در عدد فرود یکسان ضریب دبی سرریز زیگزاگی با زاویه رأس ۶۰ درجه به میزان حدودی ۵ درصد، بیشتر از سرریز کلیدپیانویی تک سیکل است ولی سرریزهای زیگزاگی با زوایای رأس بزرگ‌تر ضریب دبی پایین‌تری دارند.

نیمرخ سطح آب در نزدیکی سرریز نیز به‌گونه‌ای است که در ابتدای سرریز جانبی ارتفاع آب افت چشمگیری دارد که این امر به دلیل اینرسی جریان است و همچنین میزان این افت با افزایش تعداد سیکل بیشتر می‌شود به‌گونه‌ای که در سرریز شش سیکل ۵ درصد افت بیشتری از سرریز تک سیکل دیده می‌شود.

با مقایسه ضریب آبگذری در حالت اصلی و معکوس آن، این نتیجه به‌دست می‌آید که این دو حالت تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما حالت اصلی دارای ضریب آبگذری بالاتری است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل از طرح پژوهشی موردحمایت دانشگاه تهران و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

علائم اختصاری

سطح مقطع کانال	$A\ (m^2)$
طول یال	$B\ (m)$
شیروانی بالادست	$B_i\ (m)$
شیروانی پایین‌دست	$B_o\ (m)$
ضریب بده	Cd
انرژی مخصوص	$E\ (m)$
انرژی مخصوص ابتدای بازشدگی	$E_1\ (m)$
انرژی مخصوص انتهای بازشدگی	$E_2\ (m)$
عدد فرود بالادست سرریز	Fr
عمق آب روی سرریز در مرکز کانال	$H\ (m)$
عمق آب پایین‌دست سرریز	$H_1\ (m)$
عمق آب بالادست سرریز	$H_2\ (m)$
طول کل آبگذری	$L\ (m)$
طول سرریز در هر کلید واحد	$Lu\ (m)$
تعداد کلید واحد	Nu
ارتفاع سرریز	$P\ (m)$
دبی کانال اصلی	$Q\ (m^3/s)$
محور عرضی شکاف سرریز جانبی	S
شیب کانال	S_0
شیب‌خط انرژی	S_f
ضخامت دیواره سرریز	$Ts\ (m)$
سرعت جریان بالادست سرریز	$V\ (m/s)$
عرض بازشدگی کل سرریز	$W\ (m)$
عرض بازشدگی ورودی	$W_i\ (m)$
عرض بازشدگی خروجی	$W_o\ (m)$
عرض بازشدگی در هر کلید واحد	$Wu\ (m)$
عرض کانال اصلی	$b\ (m)$
شتاب گرانش	$g\ (m/s^2)$
ضریب مانینگ	n
محور عرضی شکاف	$s\ (m)$
شیب کلید ورودی	s_{in}
شیب کلید خروجی	s_{out}
عمق جریان در کانال اصلی	$y\ (m)$
زاویه یال با راستا قائم	α
چگالی سیال	$\rho\ (Kg/m^3)$
کشش سطحی	$\sigma\ (N/m)$
زاویه انحراف آب	ψ
ویسکوزیته سیال	$\upsilon\ (m^2/s)$

مراجع

۱- صفر زاده، ا. خیاط رستمی، س. مدنی و. (۱۳۹۴). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر تعداد کلید واحد بر هیدرولیک سرریز کلیدپیانویی با هندسه نامتقارن." چهاردهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، زاهدان.

۲- صفر زاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۷). " مطالعه آزمایشگاهی و عددی هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی با کلیدهای اصلاح‌شده." *مجله علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی*، ۵(۱۶)، ۳۶-۴۷.

۳- ع. میرزایی، "بررسی آزمایشگاهی اثر تعداد کنگره‌های سرریز کلید پیانویی بر عملکرد هیدرولیکی آن" کارشناسی ارشد، آزمایشگاهی، موسسه آموزش عالی صدرالمتالهین (صدرا)، دانشکده تحصیلات تکمیلی، ۱۳۹۷.

4- Ameri, M. Dehghani, A. Ahmadi, A. (2016). "Elementary discharge coefficient of a triangular–rectangular sharp-crested side weir in subcritical flow." *International Journal of River Basin Management, 14*(1), 95-102.

5- El-Khashab, A. Smith, K. V. (1976). "Experimental investigation of flow over side weirs." *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), 1255-1268.

6- Emin Emiroglu, M. Cihan Aydin, M. Kaya, N. (2014). "Discharge Characteristics of a Trapezoidal Labyrinth Side Weir with One and Two Cycles in Subcritical Flow." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), 04014007.

7- Erpicum, S. Archambeau, P. Pirotton, M. Dewals, B. J. (2014). "Geometric parameters influence on piano key weir hydraulic performances." Paper presented at the ISHS 2014 - Hydraulic Structures and Society - Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures.

8- Erpicum, S. Tullis, B. P. Lodomez, M. Archambeau, P. Dewals, B. J. Pirotton, M. (2016). "Scale effects in physical piano key weirs models." *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.

9- French, R. H. (1985). *Open-channel hydraulics.* McGraw Hill Book Co. United States.

10- Izadinia, E. Heidarpour, M. (2016). "Discharge Coefficient of a Circular-Crested Side Weir in Rectangular Channels." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(6), 06016005.

11- Karimi, M. Attari, J. Saneie, M. Jalili Ghazizadeh Mohammad, R. (2018). "Side Weir Flow Characteristics: Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types." *Journal of Hydraulic Engineering, 144*(12), 04018075.

12- Jaromír, Ř. Zbyněk, Z. "Flow characteristics at trapezoidal broad-crested side weir," (in English), *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 63, no. 2, pp. 164-171, 2015.

13- Kaya, N. Emiroglu, M. E. Agaccioglu, H. "Discharge coefficient of a semi-elliptical side weir in subcritical

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

flow," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 22, no. 1, pp. 25-32, 2011/03/01/ 2011.

14- Lemperiere. F. Ouamane, A. (2003). "The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways." *International Journal on Hydropower & Dams*, 10(5), 144-149.

15- 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.

16- Oertel, M. (2015). "Discharge Coefficients of Piano Keys Weirs from Experimental and Numerical Models." E Proceeding of the 36th IAHR World Congress, Delft, Netherland.

17- Parvaneh, A. Borghei, S. Jalili Ghazizadeh, D. "Hydraulic performance of asymmetric labyrinth side weirs located on a straight channel," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 138, no. 8 , pp. 766-772, 2012.

18- Pfister, M. Battisacco, E. De Cesare, G. & Schleiss, A. J. (2013). "Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs." Labyrinth and piano key weirs II, Lausanne, Switzerland.

19- Pralong, J. Vermeulen, J. Blancher, B. Laugier, F. Erpicum, S. Machiels, O. Pirotton, M. Boillat, J.L. Leite Ribeiro, M. Schleiss, A.J. (2011). "A naming convention for the piano key weirs geometrical parameters." Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 271–278, CRC Press, Boca Raton, FL.

20- Zahedi Khameneh, H. Khodashenas, S. R. Esmaili, K. (2014). "The effect of increasing the number of cycles on the performance of labyrinth side weir." *Flow Measurement and Instrumentation*, 39, 35-45.

21- Zaji, A. H. Bonakdari, H. (2017). "Optimum Support Vector Regression for Discharge Coefficient of Modified Side Weirs Prediction." *INAE Letters*, 2(1), 25-33.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]

Laboratory study of the effect of the number of units on the flow behavior of lateral trapezoidal piano key weirs

Seyyed taghi (omid) Naeeni[1]
Mojtaba Saneie[2]
Malihe Eslampanah*[3]
Ehsan Qonche[4]

Abstract

Recently, piano key weirs in hydraulic structures have become particularly important. In this research, the effect of the number of units on the flow behavior of the lateral piano key weirs has been investigated. 45 experiments were performed on single, double, four, six cycle piano key and linear weirs at different relative water heads (H / P = 0.3, 0.5, 0.65, 0.85 and 1). The inlet discharge flow rate to the main channel is applied in such a way that the flow regime in the main channel became subcritical. The slope of the flume and the effective length of the piano key weirs are considered to be constant and a type A piano key weir is used in this study. Experiments were performed at the mentioned relative water heads to determine the water profile and discharge coefficient. At the beginning of the lateral weir, the water height decreases significantly and with increasing the number of units, the amount of this decrease increases so that the drop in water level in the six cycles piano key is 5% more than the single cycle. The discharge coefficient decreases by 5 to 21% with increasing the number of key units. In the relative water heads tested, the discharge coefficient of piano key weirs to linear weir was obtained between 1.15 and 1.75. Experimental results showed that the discharge coefficient of conventional piano key weirs was higher than the mirror set of piano key weir, but this difference was not significant.

Keywords

Piano key weir, number of cycles, discharge coefficient, water surface profile

1. Associate professor, University of Tehran. stnaeeni@ut.ac.ir
2. Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. drsaneie@gmail.com
3.* Master of civil engineering, University of Tehran. malihe.eslampanah@gmail.com
4. Master of civil engineering, University of Tehran. ehsanqoncheh@gmail.com

Received:05/09/2019 Accepted:23/09/2020

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1400.8.28.2.5]