نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و هفتم /زمستان ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 27 / March 2021

مقایسه رفتار هیدرودینامیکی جریان عبوری از سرریزهای کلید پیانویی نوعA، B و C

بهزاد نوروزی*[۱]
جلال بازرگان[۲]

چکیده

سرریز کلید پیانویی نوع جدیدی از سازه هیدرولیکی هستند که در سال‌های اخیر موردتوجه طراحان این نوع سازه‌ها قرارگرفته‌اند. تاکنون درک محدودی از تأثیر پارامترهای مختلف هندسی سرریز کلید پیانویی بر روی رفتار هیدرولیکی آن‌ها به‌دست‌آمده است. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D جریان ماندگار به‌صورت سه‌بعدی بر روی انواع سرریزهای کلید پیانویی A، B و C تحلیل عددی شده است. پس از صحت‌سنجی با داده‌های آزمایشگاهی، الگوی سه‌بعدی جریان بر روی انواع سرریزهای کلید پیانویی A، B و C بررسی‌شده و ضمن ارزیابی هیدرودینامیکی جریان، علل تفاوت رفتار جریان به ازای هندسه‌های متفاوت تبیین گشته است. نتایج حاصله در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که محیط تر در سرریز کلید پیانویی نوع B نسبت به انواع A و C بیشتر بوده و لذا سرعت جریان نزدیک به سرریز در این نوع سرریز نسبت به دو نوع دیگر کمتر شده که همین امر منجر به توزیع یکنواخت‌تر جریان بر روی بخش‌های مختلف کلید خروجی گردیده و به‌تبع آن باعث کاهش استغراق موضعی و افزایش درصد خروجی از تاج کلید خروجی و درنهایت منتج به افزایش کل دبی خروجی و ضریب دبی سرریز نوع B نسبت به انواع A و C می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

سرریز کلید پیانویی، استغراق موضعی، ضریب دبی، خطوط جریان، پروفیل سطح آب.

۱. * دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان noroozibehzad@gmail.com

۲. دانشیار مهندسی عمران-سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان jbazargan@znu.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله:۹۹/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹ /۹/۲۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

مقدمه

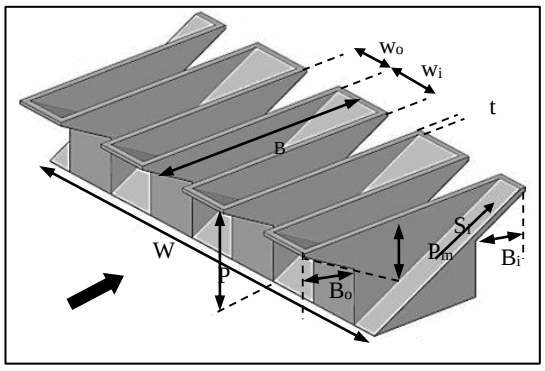
کارآیی هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد به ازای یک هد ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز[1] دارد. سرریزها با توجه به شکل پلان به دودسته کلی سرریزهای خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزهای غیرخطی نظیر سرریزهای انحنادار در پلان و یا سرریزهای کنگره‌ای[2] ضمن افزایش طول عبوری جریان، باعث افزایش ظرفیت آبگذری سازه می‌شوند. سرریزهای کنگره‌ای به‌صورت سری زیگزاکی از سرریزهای خطی می‌باشند که در یک عرض ثابت، طبق رابطه زیر باوجود داشتن ضریب دبی (C_d) کمتر، حاصل‌ضرب طول و ضریب دبی (C_dL_t) در آن‌ها بزرگ‌تر از سرریزهای خطی بوده و عملکرد هیدرولیکی در حد سه تا چهار برابر بیشتر نسبت به سرریزهای خطی دارند (تولیس[3] و همکاران ۲۰۰۷):

$$Q=\frac{2}{3}C_dL_t\sqrt{2g}\,H_t^{1.5} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق،Q دبی عبوری از سرریز بوده و C_d، L_t و H_t به ترتیب بیانگر ضریب دبی، طول تاج توسعه‌یافته و هد کل (مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی) بر روی سرریز می‌باشند. با توجه به افزایش دبی سیلاب و نگرانی در خصوص ایمنی سدهای موجود، جهت بهبود عملکرد هیدرولیکی تعداد زیادی از سرریز سدهای موجود در جهان نیاز به بازبینی و بازسازی دارند (لاوگیر[4] ۲۰۰۷، لاوگیر و همکاران ۲۰۰۹ و ریبریو[5] ۲۰۰۹). یکی از معایب سرریزهای متداول، ظرفیت تخلیه پایین آن‌ها به‌واسطه محدودیت عرض موجود برای اجرای این نوع سرریزها هست. یکی از راهکارهای حل این مشکل، استفاده از سرریز با تاج غیرخطی و افزایش طول عبوری جریان است. شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی سرریزهای کلیدپیانویی هستند که توسط موسسه هیدرورکوپ[6] فرانسه فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بریسکا[7] الجزایر ارائه شده است (اشلایز[8] ۲۰۰۷).

[1] Weir
[2] Labyrinth
[3] Tullis
[4] Laugier
[5] Riberio
[6] Hydrocoop
[7] Biskra
[8] Schleiss

هندسه استاندارد سرریز کلید پیانویی توسط پارلانگ[9] و همکاران (۲۰۱۱) تعریف شده است. در شکل (۱) نمای سه‌بعدی از این نوع سرریز به همراه پارامترهای معرف هندسی نشان داده شده است. در این شکل W_i و W_o به ترتیب بیانگر عرض کلیدهای ورودی و خروجی بوده و B_i و B_o به ترتیب طول کنسول‌های بالادست و پایین‌دست سرریز می‌باشند. B طول تاج کناری بوده و P ارتفاع کل سرریز است. B_i، B_o و T ارتفاع کلید، عرض فونداسیون و ضخامت دیواره می‌باشد. با توجه به شکل، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، کف دهانه‌های سیکل‌های ورودی و خروجی (کلیدها) شیب‌دار به سمت داخل و خارج می‌باشند. علاوه بر آن، در بالادست و پایین‌دست ضمن خالی نمودن زیر کلیدها، بخش‌هایی تحت عنوان کنسول[10] بالادست و پایین‌دست ایجادشده است (اندرسون و تولیس[11] ۲۰۱۲). اجرای این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره‌ای فضای کمتری نیاز داشته و لذا فونداسیون این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچکتری داشته باشد به نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی نیز استفاده نمود (اشلایز ۲۰۰۷).



شکل (۱): پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی

سرریزهای کنگره‌ای دارای دیواره‌های قائم بوده و به‌واسطه برخورد جریان (مخصوصاً جریان‌های تحتانی) به دیواره‌ها و شکل‌گیری نواحی چرخشی باعث افت انرژی و درنتیجه کاهش کارآیی هیدرولیکی سرریز می‌شوند (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲-۱) از دیدگاه اقتصادی نیاز به حجم بتن ریزی بالایی داشته و علاوه بر آن سطح فونداسیون بالایی

[9] Pralong
[10] Overhang
[11] Anderson and Tullis

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

نیاز دارند که در شرایط محدود بودن محل نصب (نظیر تاج سدهای بتنی و یا کانال کم‌عرض) استفاده از این نوع سرریزها با مشکل مواجه می‌شود (اندرسون و تولیس[1] ۲۰۱۲). لمپریره و اومانی[2] (۲۰۰۳) نخستین بار مطالعه بر روی سرریزهای نوع A و B را انجام و معیار طراحی آن را ارائه کردند. اومانی و لمپریره (۲۰۰۶) مطالعات سال ۲۰۰۳ خود را به ازای پارامترهای مختلف بی‌بعد گسترش دادند. نتایج حاصل از بررسی آن‌ها حاکی از ارتباط بین طول تاج توسعه‌یافته L و عرض W سرریز دارد. لمپریره و همکاران (۲۰۱۱) انواع مختلفی از سرریزهای کلید پیانویی که از سال ۱۹۹۸ توسط موسسه هیدروکروپ موردمطالعه قرار گرفته بود را بر اساس هندسه کنسول سرریزهای کلید پیانویی به ۴ نوع تقسیم کردند:

نوعA: کنسول‌ها به‌صورت متقارن هست.

نوع B: کنسول فقط به سمت بالادست هست.

نوع C: کنسول فقط به سمت بالادست هست.

نوع D: بدون کنسول.

میشلز[3] و همکاران (۲۰۱۱) ویژگی‌های جریان بر روی سرریز کلید پیانویی نوع A را تجزیه‌وتحلیل کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در طول کلید ورودی یک مقطع بحرانی ایجاد می‌شود که بر ظرفیت هیدرولیکی سرریز تأثیر منفی دارد. برای جلوگیری از ایجاد این مقطع کنترل و بهبود ظرفیت هیدرولیکی سرریز، آن‌ها بهینه کردن هندسه سرریز با استفاده از افزایش عرض ورودی، ارتفاع سرریز یا طول کنسول بالادست را پیشنهاد کردند. اندرسون و تولیس (۲۰۱۱) با مقایسه سرریز کلید پیانویی نوع A و D تأکید کردند که وجود کنسول به حالت فرورفته تأثیر مثبتی بر افزایش ظرفیت سرریز دارد. اولین سرریز کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ بر روی سد گلورس[4] در کشور فرانسه اجراشده است (لاوگیِر ۲۰۰۷). بعد از طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ برای بهبود عملکرد تخلیه سیلاب سدهای مختلفی نظیر سنت‌مارک[5]، اترویت[6]، گلوریتس[7] نیز از سرریزهای کلید پیانویی استفاده شد. صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۲-۱) بامطالعه هیدرودینامیک سه‌بعدی جریان عبوری از سرریزهای کلید پیانویی، کنگره‌ای و کنگره‌ای با کلیدهای شیب‌دار نشان دادند که در سرریزهای کلید پیانویی به‌واسطه حذف فشردگی جریان در کلیدهای ورودی و همچنین توزیع بهتر جریان بر روی بخش‌های مختلف سرریز، ضریب آبگذری بالاتر از دو نوع دیگر است. تأثیر دیواره جان‌پناه[8] و شکل پشت‌بند نیز توسط محققین مزبور مطالعه شده است (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۲-۲ و ۱۳۹۳-۱). صفرزاده و نوروزی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی، ساختار جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای را مطالعه نموده و به بهبود قابل‌ملاحظه در ضریب دبی این نوع سرریزها در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و کنگره‌ای اشاره نموده‌اند. در تحقیق مزبور به اهمیت تاج کناری بر عملکرد هیدرولیکی سرریز تأکید شده است. با توجه به اینکه پارامتر تأثیرگذار و متمایزکننده سرریز کلید پیانویی از سرریز کنگره‌ای حالت کنسولی و نیز کوچک‌تر بودن خط اثر فونداسیون سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای هست و به دلیل اینکه این پارامتر اصلی در سرریز کلید پیانویی نوع D وجود ندارد و در حقیقت می‌توان گفت سرریز نوع D یک نوع سرریز کنگره‌ای با دهانه‌های شیب‌دار هست لذا در حالت کلی می‌توان سرریز کلید پیانویی را بر اساس موقعیت قرارگیری کنسول‌های آن به سه نوع A، B و C تقسیم‌بندی کرد. با توجه به اینکه اکثر مطالعات گذشته بر روی سرریز نوع A انجام‌گرفته است بااین‌وجود دلایل هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جامعی در خصوص علت استفاده از این نوع از سرریز کلید پیانویی در دست نمی‌باشد. در این تحقیق، با مقایسه رفتار جریان عبوری از سرریزهای کلید پیانویی نوع A، B و C که با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی عددی شده، ضمن مطالعه الگوی جریان و هیدرودینامیک جریان عبوری، روند تغییرات ضریب دبی به ازای نسبت‌های مختلف هد به ارتفاع سرریز برای هرکدام از سرریزهای مذکور محاسبه می‌گردد.

[1] Anderson and Tullis
[2] Lempérière and Ouamane
[3] Machiels
[4] Golours
[5] St. Marc
[6] Etroit
[7] Gloriettes
[8] Parapet wall

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

تئوری شبیه‌سازی عددی

در این مقاله از نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. معادلات حاکم بر مسئله موردنظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می‌باشند. این معادلات در جریان‌های دوفازی در سیستم مختصات کارتزین (x_i) با مؤلفه‌های سرعت (u_i) و i=۱،۲،۳ به‌صورت زیر بیان می‌شوند.

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}(\rho u_i A_i) = 0 \qquad (۳)$$

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} + \frac{1}{V_F}\left\{u_j A_i \frac{\delta u_i}{\delta x_j}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\delta p}{\delta x_i} + G_i + f_i \qquad (۴)$$

در این معادلات، ρ چگالی آب، V_F جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR و A_i جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت i ام است. در معادلات بقای اندازه حرکت، P بیان‌گر فشار بوده و (G_i) و (f_i) به‌ترتیب بیان‌گر مؤلفه‌های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت برای راستای i ام می‌باشند. شتاب لزجت شامل اثر لزجت دینامیکی سیال (μ_l) و نیز آشفتگی جریان (μ_t) است. برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود. در این مقاله از مدل k-ε RNG برای بیان لزجت گردابه‌ای استفاده شده است.

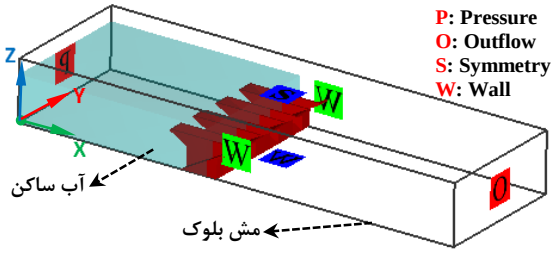
صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

برای صحت‌سنجی روند مدل‌سازی و نیز حصول اطمینان از شرایط مرزی مورداستفاده در جریان ماندگار، مدل عددی سه‌بعدی متناظر با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریز کلید پیانویی توسط اندرسون (۲۰۱۱) با ابعاد پارامترهای هندسی منطبق بر جدول (۱) مدل‌سازی شده است. در این جدول N تعداد سیکل سرریز است.

جدول (۱): ابعاد پارامترهای هندسی (ابعاد به سانتی‌متر)

پارامتر	شرح پارامتر	مقدار
P	ارتفاع سرریز	۱۹/۶۸
L=N(Wi+ Wo+2B)	طول تاج سرریز	۴۷۴/۵۴
W	عرض کانال	۹۳/۳۷
Wi	عرض کلید ورودی	۱۱/ ۵۶
Wo	عرض کلید خروجی	۹/۲۵
B	عرض سرریز	۴۸/۹۰
Bi	طول کنسول ورودی	۱۲/۱۴
Bo	طول کنسول خروجی	۱۲/۱۴
۱/۲۷	ضخامت دیواره سرریز	T
۴	تعداد سیکل‌ها	N

برای مدل‌سازی عددی از یک بلوک محاسباتی با شبکه بندی کارتزین غیریکنواخت استفاده شده است. شرایط مرزی مورداستفاده بر روی وجوه مختلف بلوک محاسباتی در شکل (۲) نمایش داده‌شده است. در وجه بالادست ضمن استفاده از شرط مرزی فشار (Pressure)، هد آب موردنظر به ورودی میدان اعمال‌شده و با اعمال شرط مرزی خروجی (Outflow) به انتهای پایین‌دست بلوک محاسباتی، دبی خروجی از میدان به ازای هد اعمالی در ورودی محاسبه می‌شود. مرز بالای میدان از نوع تقارن بوده (Symmetry) و برای مرزهای کناری و کف بلوک از شرط مرزی دیواره (Wall) استفاده‌شده است. به‌عنوان شرط اولیه، یک ستون آب ساکن با جزء حجم برابر با یک (VOF=۱) در داخل میدان در نظر گرفته شد. شایان‌ذکر است با توجه به اینکه مدل آزمایشگاهی سرریزها از پلکسی گلاس[1] ساخته شده و کف و جداره‌های کانال نیز کاملاً صاف بوده است. به همین علت، در مدل عددی نیز بدنه سرریز و جداره‌های کانال کاملاً صاف در نظر گرفته‌شده است. علاوه بر آن با توجه به اینکه طول کانال بالادست تا محل سرریز کوتاه است، افت اصطکاکی بسیار ناچیز خواهد بود.



شکل (۲): هندسه سرریز کلید پیانویی و شرایط مرزی

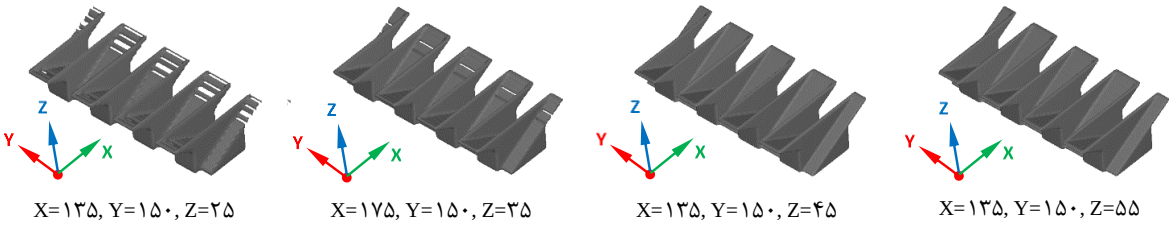
به‌منظور آنالیز حساسیت شبکه محاسباتی و انتخاب شبکه بندی بهینه، ابتدا مطابق شکل (۳) شبکه محاسباتی مناسب ازنظر شناخت کامل هندسه انتخاب و سپس مدل‌سازی عددی به ازای H/P=۰/۴ به ازای شبکه‌بندی های ریزتر از آن انجام شد که بر اساس نتایج حاصله مطابق جدول (۲) از یک مقدار به بعد با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی تغییری در نتایج دبی خروجی که به‌عنوان معیار انتخاب‌شده بود، مشاهده نگردید و بنابراین بلوک

[1] Plexiglass

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

محاسباتی با تعداد شبکه بهینه (۵۵×۱۵۰×۱۳۵) در سه امتداد (x,y,z) به‌عنوان شبکه‌بندی بهینه انتخاب گردید.

مدل‌سازی عددی برای سرریز کلید پیانویی به ازای ۹ مقدار نسبت H/P از ۰/۰۵ تا ۰/۸ صورت گرفته است که H بیانگر هد استاتیکی آب بر روی سرریز است.



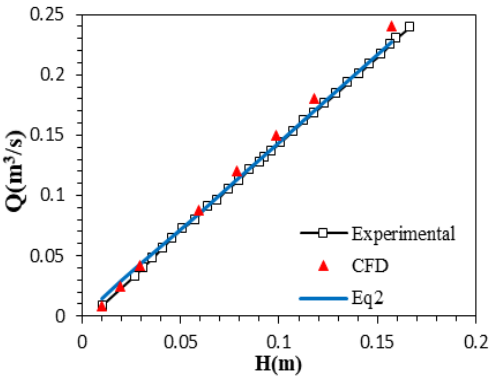
شکل (۳): عملکرد FAVOR به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف و کالیبراسیون شبکه‌بندی

به‌منظور اطمینان از همگرایی حل و همچنین تثبیت کامل شرایط اعمالی به مدل، دبی خروجی از میدان و همچنین تغییرات زمانی سطح آب در ورودی مدل، در طول حل کنترل شد. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، زمان ۱۵ ثانیه برای همگرایی مدل و همچنین شکل‌گیری جریان دائمی کفایت می‌کند.

جدول (۲): مقادیردبی عبوری برای شبکه‌بندی‌های مختلف به ازای H/P=۰/۴

تعداد شبکه بندی	۱۳۵×۱۵۰×۴۵	۱۳۵×۱۵۰×۵۵	۱۳۵×۱۵۰×۶۵
دبی عبوری (m^3/s)	۰/۱۱۳۳۷	۰/۱۱۳۵۱	۰/۱۱۳۵۲

در شکل (۵) مقادیر دبی پیش‌بینی‌شده با مقادیر آزمایشگاهی به ازای نسبت‌های مختلف H/P ارائه‌شده است. لازم به یادآوری است که H بیانگر هد کل جریان نزدیک شونده است.



شکل (۵): دبی آزمایشگاهی و عددی سرریز کلید پیانویی

به‌منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی از آماره‌های میانگین اریبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. مقادیر معیارهای فوق با استفاده از روابط (۵) الی (۸) محاسبه می شوند:

$$MBE=\frac{\sum_{i=1}^{N}(h_{mi}-h_{oi})}{N} \quad (۵)$$

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left|h_{mi}-h_{oi}\right|}{N} \quad (۶)$$

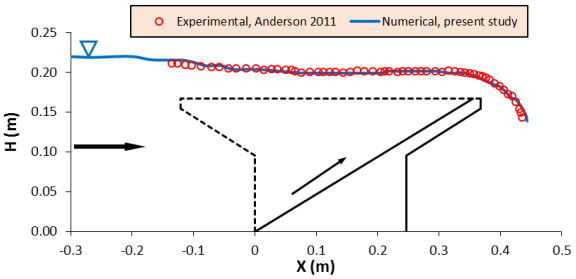
$$R=\frac{\mathrm{cov}(h_m,h_o)}{\sigma(h_m)\sigma(h_o)} \quad (۷)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(h_{mi}-h_{oi})^2}{N}} \quad (۸)$$

در روابط فوق h_0، h_m، N، cov و σ به ترتیب مقدار دبی آزمایشگاهی (مشاهداتی)، مقدار دبی مدل عددی، تعداد کل داده‌ها، کوواریانس و انحراف معیار هست. مقدار پارامترهای مزبور برای سرریز موردمطالعه به ازای مقادیر آزمایشگاهی اندرسون (۲۰۱۱) و شبیه‌سازی عددی به ترتیب، ۰/۰۰۶۲۷، ۰/۰۰۶۴۱، ۰/۸۶ و ۰/۰۰۷۴ است. مقادیر کم میانگین اریبی، میانگین خطای مطلق، ضریب و مجذور میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده اختلاف اندک دبی خروجی اندازه‌گیری شده از سرریز در مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی است. مقدار ۰/۸۶ ضریب همبستگی نمایانگر رابطه خطی مناسب بین مقدار دبی مدل عددی و آزمایشگاهی سرریز موردبررسی است. نتایج حاصله مؤید عملکرد مناسب نرم‌افزار FLOW-3D، با شرایط مرزی، مدل آشفتگی و شبکه‌بندی انتخاب‌شده، در شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای موردمطالعه است. در شکل (۶) پروفیل طولی سطح آب بر روی کلید ورودی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در حالت H/P=۰/۳

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، انطباق پروفیل‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده در بخش‌های مختلف سرریز مناسب بوده و نشانگر صحت مدل‌سازی عددی است.



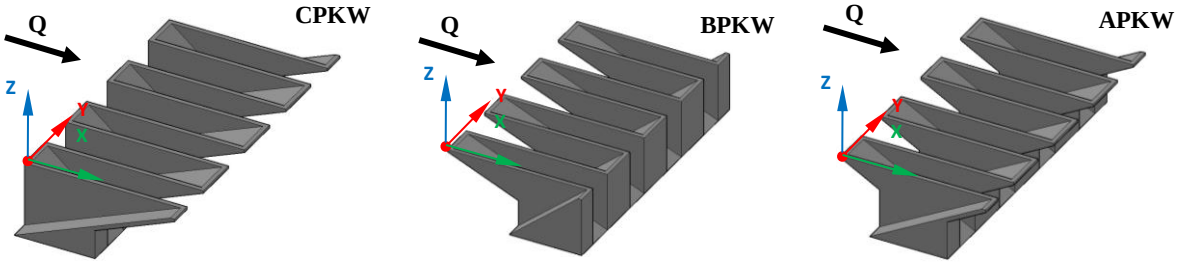
شکل (۶): مقایسه پروفیل سطح آب بر روی کلید ورودی بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی برای H/P=0.3

مقایسه سرریزهای کلید پیانویی نوع A، B و C

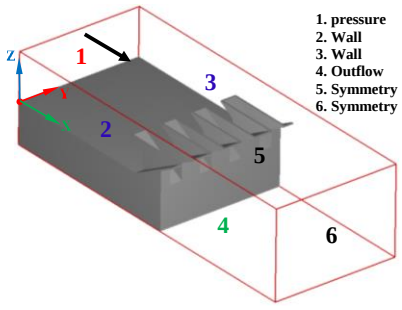
به‌منظور مقایسه عملکرد و بررسی هیدرودینامیک سرریزهای نوع A، B و C که به ترتیب APKW، BPKW و CPKW خوانده می‌شود، مطابق شکل (۷) مدل عددی با جزئیات هندسی متناظر با هندسه اندرسون ۲۰۱۱ ساخته‌شده است. ابعاد پارامترهای هندسی سرریزهای موردمطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. هندسه سه بعدی و شرایط مرزی مورداستفاده در مدل‌های عددی موردمطالعه در شکل (۸) نشان شده است. مطابق شکل تنها تفاوت شرایط مرزی نسبت به مدل صحت‌سنجی شده، استفاده از شرط مرزی خروجی (Outflow) در مرز کف کانال (Z_{min}) به‌منظور جلوگیری از تأثیر شرایط پایین‌دست بر عملکرد سرریزها هست. برای انفصال میدان بر اساس الگوریتم GCI، پس از آنالیز حساسیت شبکه‌بندی مطابق روش صحت‌سنجی تعداد (۷۵×۱۵۰×۱۳۵) سلول در سه امتداد (x,y,z) به‌عنوان شبکه‌بندی بهینه انتخاب و مدل‌سازی عددی سرریزها به ازای ۹ مقدار H_t/P مشابه مدل صحت‌سنجی انجام شده است. در شکل (۹) الگوی سه‌بعدی جریان شبیه‌سازی‌شده بر روی سرریز کلید پیانویی نوع A به ازای نسبت هد به ارتفاع سرریز ۰/۳ نشان داده‌شده است.

جدول (۳): ابعاد پارامترهای هندسی سرریزهای موردمطالعه (ابعاد به سانتی‌متر)

پارامتر	APKW	BPKW	CPKW
P	۱۶/۷	۱۶/۷	۱۶/۷
L=N(W_i+ W_o+2B)	۴۷۴/۵۴	۴۷۴/۵۴	۴۷۴/۵۴
W	۹۳/۷۸	۹۳/۷۸	۹۳/۷۸
Wi	۱۱/ ۵۶	۱۱/ ۵۶	۱۱/ ۵۶
W_o	۹/۲۵	۹/۲۵	۹/۲۵
B	۴۸/۹۰	۴۸/۹۰	۴۸/۹۰
B_i	۱۲/۱	-	۲۴/۲
B_o	۱۲/۱	۲۴/۲	-
T	۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۲۷
N	۴	۴	۴



شکل (۷): شکل سه‌بعدی و جزئیات هندسی سرریزهای موردمطالعه

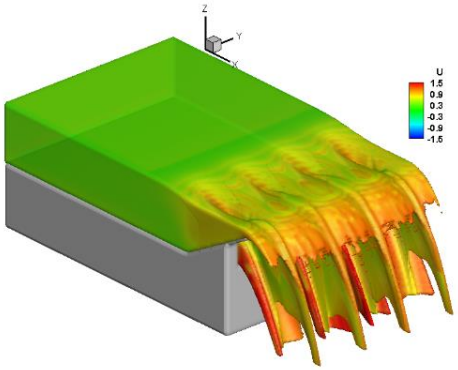


شکل (۸): هندسه سه‌بعدی و شرایط مرزی مدل عددی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، مقدار ضریب دبی با استفاده از رابطه (۱) به‌دست‌آمده و نمودار ضریب دبی در مقابل نسبت هد به ارتفاع سرریز مطابق شکل (۱۰) ترسیم‌شده است. با توجه به شکل، نمودار برای هر سه سرریز به ازای مقادیر H_t/P کمتر از ۰/۱ حالت صعودی داشته و از آن به بعد حالت نزولی با رفتار غیرخطی پیدا می‌کند.

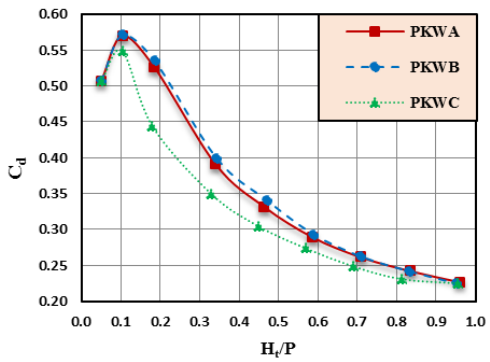
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]



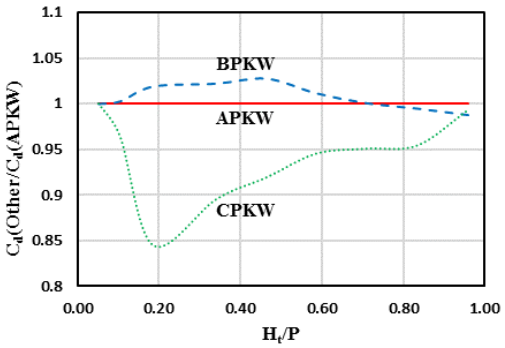
شکل (۹): الگوی عمومی جریان شبیه‌سازی‌شده بر روی سرریز کلید پیانویی نوع A به ازای H_t/P=۰/۳

بیشترین ضریب آبگذری برای هر سه حالت به ازای هد به ارتفاع ۰/۱ رخ می‌دهد. نمودار ضریب دبی نشان می‌دهد که به ازای H_t/P<۰/۱ عملکرد سرریزهای کلید پیانویی نوع A و B مشابه بوده و ضریب دبی یکسانی دارند ولی سرریز نوع C ضریب دبی کمتری نسبت به دو سرریز دیگر دارد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که اختلاف بین سرریز APKW و سرریز BPKW در مقایسه با سرریز CPKW کمتر هست. نتایج حاصله نشان می‌دهد که تأثیر جهت کنسول در سرریزها و نیز هندسه سرریزها به جهت تأثیر روی جریان نزدیک‌شونده به سرریز حائز اهمیت هست.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات ضریب دبی (C_d) در مقابل Ht /P

در شکل (۱۱) نسبت ضریب دبی سرریزها به ضریب دبی سرریز APKW نشان داده‌شده است. با توجه به شکل (۱۱)، ضریب دبی سرریز BPKW تا مقدار H_t/P=۰/۴۵ حالت صعودی دارد و با افزایش H_t/P حالت نزولی پیدا می‌کند به‌نحوی‌که از H_t/P>۰/۴۵ ضریب دبی آن کمتر از ضریب دبی سرریز APKW می‌گردد. بااین‌حال با توجه به نمودار ملاحظه می‌شود که ضریب دبی سرریز APKW و BPKW اختلاف چندانی باهم ندارند. ضریب دبی سرریز CPKW تا مقدار H_t/P=۰/۲ حالت نزولی داشته و از آن به بعد با افزایش هد آب به دلیل پر شدن کلید خروجی سرریزها و تأثیر استغراق موضعی، اختلاف ضریب دبی سرریزها کمتر می‌شود.



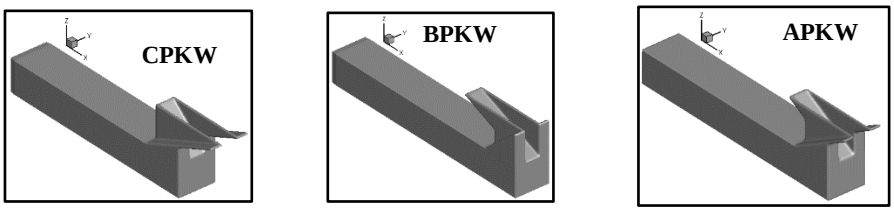
شکل (۱۱): نمودار ضریب دبی نرمال شده

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر منحنی ضریب دبی سرریزها و نیز مقایسه هیدرودینامیک سه‌بعدی جریان عبوری از سرریزها، مطابق شکل (۱۲) نمونه‌های دیگر از همان سرریزها به‌صورت تک کلید مدل‌سازی شد. به جهت تعیین روند توزیع دبی در قسمت‌های مختلف سرریز از گزینه بفل[1] نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. در این تحقیق تعداد ۹ عدد بفل بر روی تاج سرریز که از ابتدای نیم کلید ورودی شروع و تا نصف کلید خروجی ادامه می‌یابد، استفاده‌شده و مدل برای H_t/P=۰/۴ اجراشده است. نحوه قرارگیری بفل‌ها برو روی تاج یکی از سرریزهای تک کلید و نیز معرفی بخش‌های مختلف آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. شرایط مرزی و معادلات مورداستفاده در مدل‌سازی تک‌کلیدها همانند مدل‌های قبلی بوده با این تفاوت که به دلیل کاهش عرض سرریزها به‌صورت تک کلید، برای مرز کناری کانال از شرط مرزی تقارن (Symmetry) و در هر سرریز از ۶۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی استفاده شده است.

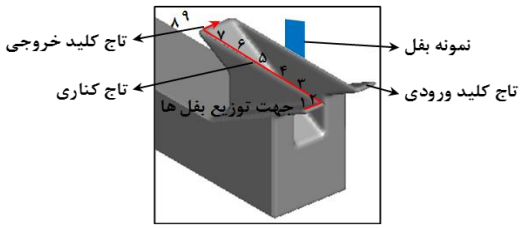
[1] Baffle

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

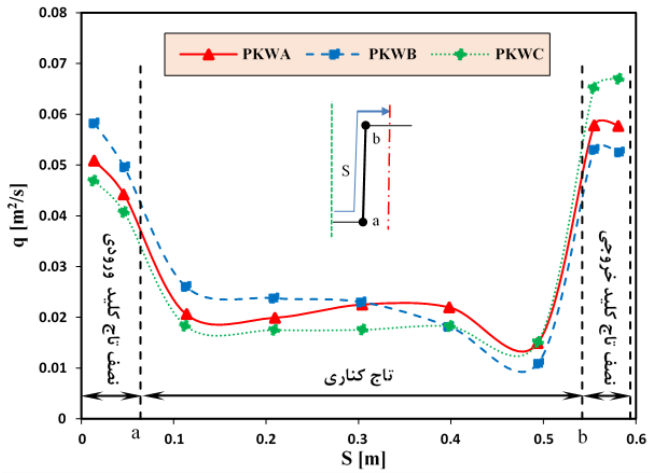


شکل (۱۲): هندسه سه‌بعدی سرریزهای تک کلید موردمطالعه



شکل (۱۳): موقعیت قرارگیری بفل‌ها در مدل عددی

با استفاده از نتایج مدل‌های تک کلید، نمودار روند توزیع دبی در واحد عرض بر روی نصف طول تاج سه نوع سرریز موردنظر مطابق شکل (۱۴) نشان داده‌شده ست. با توجه به شکل مزبور، در قسمت نصف تاج ورودی عملکرد سرریز BPKW نسبت به دو سرریز دیگر بهتر می‌باشد. بر روی تاج کناری تا نیمه تاج متصل شونده به تاج ورودی، سرریز BPKW نسبت به دو سرریز دیگر عملکرد بهتری داشته و در ادامه و در نیمه دوم تاج کناری متصل به تاج خروجی عملکرد سرریز APKW بهتر می‌شود. با نزدیک شدن به تاج خروجی مشاهده می‌شود که در نزدیکی تلاقی تاج کلید خروجی و تاج کناری عملکرد CPKW نسبت به دو سرریز دیگر بهبود می‌یابد. بررسی نمودار شکل (۱۴) نمایانگر این است که سرریزی که در محل تلاقی تاج کلید ورودی و تاج کناری عملکرد بهتری دارد و به‌بیان‌دیگر هر سرریزی که بتواند توزیع یکنواخت‌تری از جریان در این قسمت داشته باشد، عملکرد بهتری دارد.



شکل (۱۴): روند توزیع دبی در واحد عرض‌بر روی نصف تاج تک کلید از سرریزهای موردمطالعه به ازای H_t/P=۰/۴

با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی مقادیر درصد عبوری جریان از بخش‌های مختلف تاج سرریزهای تک کلید موردمطالعه مطابق جدول (۴) به دست آمد.

جدول (۴): مقادیر درصد عبوری جریان از بخش‌های مختلف تاج سرریزهای تک کلید به ازای H_t/P=۰/۴

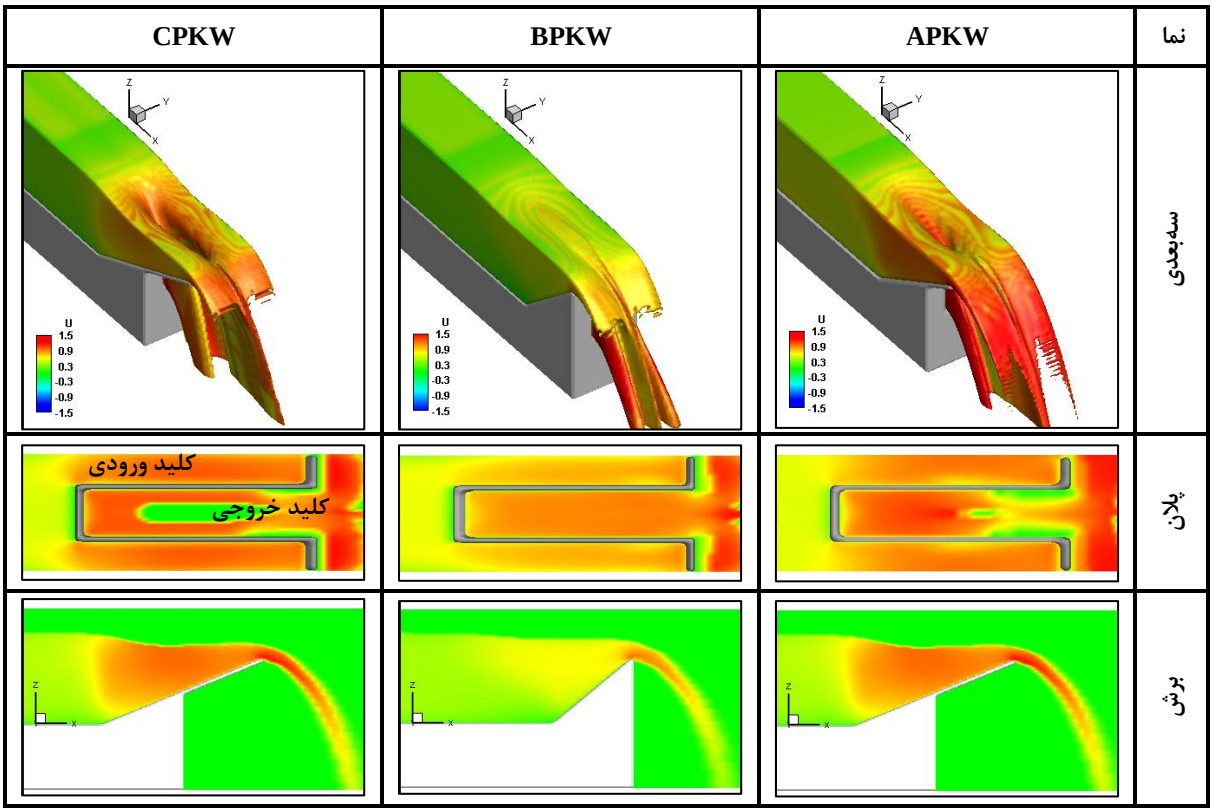
سرریز	تاج کلید ورودی	تاج کناری	تاج کلید خروجی
APKW	٪۱۹/۷۲	٪۶۱/۱۰	٪۱۹/۱۸
BPKW	٪۱۷/۶۰	٪۶۱/۲۶	٪۲۱/۱۴
CPKW	٪۲۴/۱۹	٪۵۶/۸۴	٪۱۸/۹۷

مطابق جدول، با بیشتر شدن درصد توزیع جریان عبوری از بخش تاج کناری و تاج قائم کلید ورودی، دبی کل عبوری و درنتیجه ضریب دبی آن سرریز افزایش می‌یابد. با مقایسه دو سرریز APKW و BPKW مشاهده می‌شود که تقریباً درصد عبوری جریان از تاج کناری هر دو سرریز یکسان بوده و تفاوت این دو سرریز به لحاظ درصد عبوری جریان در قسمت عبوری از تاج کلید ورودی و تاج کلید خروجی هست. می‌توان نتیجه گرفت در صورت برابری درصد

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

عبوری جریان از تاج کناری، هرچه درصد عبوری از تاج کلید خروجی بیشتر باشد درمجموع مقدار کل دبی عبوری از آن سرریز بیشتر خواهد بود.

با توجه به اینکه تنها مقدار و کمیت جریان عبوری از بخش‌های مختلف نشانگر عملکرد بهتر سرریز نبوده و به‌منظور تحلیل بهتر نمودار شکل (۱۴) و نیز تعیین علت وجود اختلاف در عملکرد آن‌ها در میزان تخلیه جریان، نتایج مدل عددی حالت $H_t/P=۰/۴$ از نرم‌افزار FLOW-3D به نرم‌افزار Tecplot انتقال داده‌شده و خطوط جریان و پروفیل سطح آب تشکیل‌شده روی هر سه نوع سرریز به‌صورت اشکال (۱۵) تا (۱۹) ارائه‌شده است. شکل (۱۵) نشانگر شکل عمومی جریان عبوری از روی سرریزها به ازای $H_t/P=۰/۴$ در حالت سه‌بعدی، پلان و نمای جانبی در بخش میانی کلید ورودی است. در این شکل سطح سیال با استفاده از مقادیر مؤلفه طولی سرعت رنگ‌شده

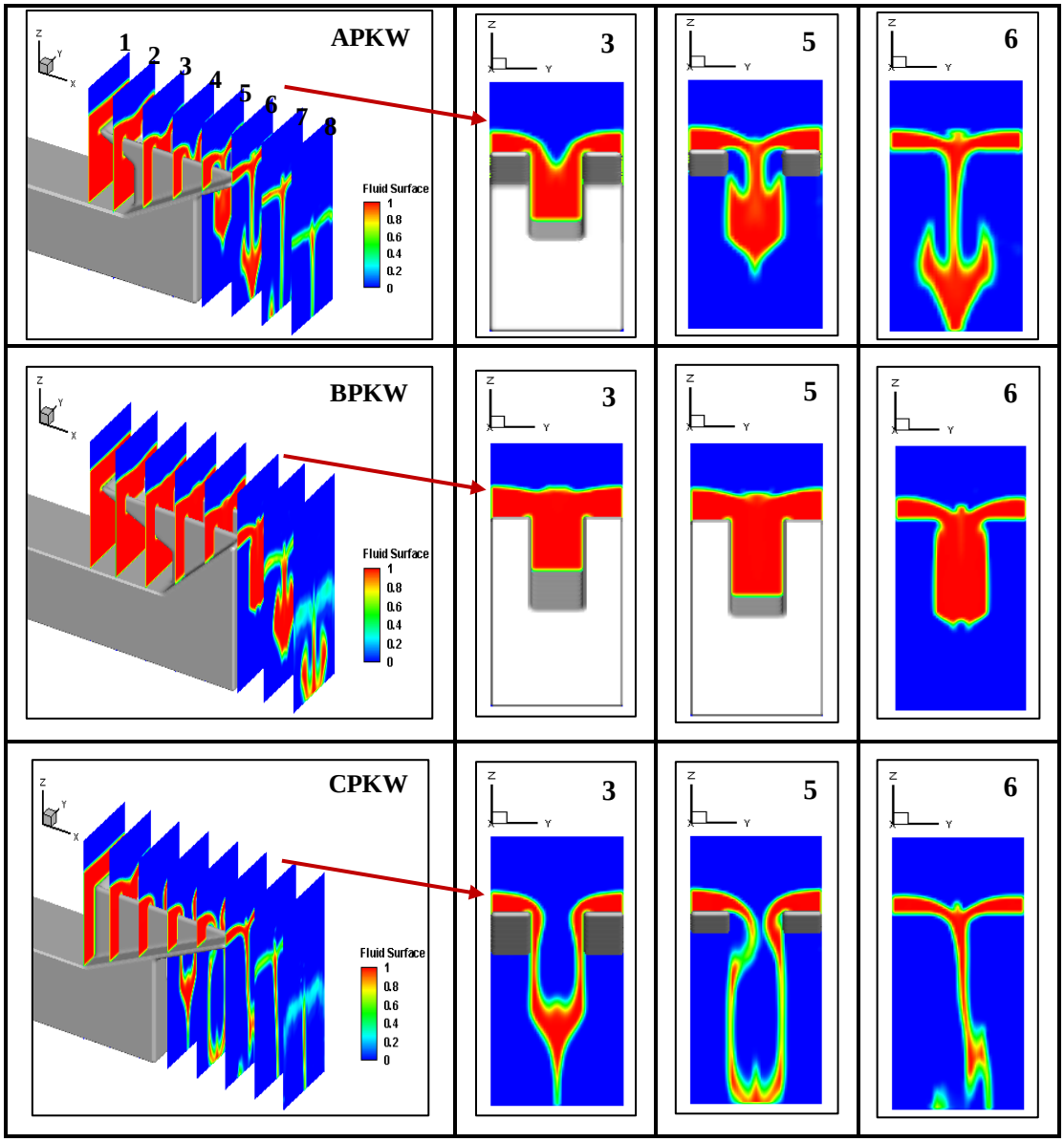


شکل (۱۵): جریان سه‌بعدی تشکیل‌شده بر روی هر سرریز به ازای $H_t/P=۰/۴$

است. با توجه به شکل مزبور، جریان نزدیک‌شونده به سرریز تحت تأثیر هندسه سرریز قرار دارد، به این صورت که با توجه به هندسه سرریز سرعت جریان نزدیک شونده و به‌تبع آن نحوه توزیع جریان در قسمت‌های مختلف سرریز متفاوت هست. مطابق شکل، سرعت جریان نزدیک شونده به کلید ورودی سرریز BPKW، کمتر از دو سرریز دیگر هست که همین مسئله باعث آرام شدن جریان و توزیع بهتر آن بر روی قسمت‌های مختلف تاج سرریز و عبور دبی بیشتر جریان از کلید خروجی نسبت به دو سرریز دیگر می‌شود. هندسه سرریز BPKW به نحوی است که محیط تر این سرریز نسبت به دو سرریز دیگر بیشتر بوده و همین مسئله منجر به آرام شدن جریان نزدیک شونده به سرریز شده و درنتیجه باعث توزیع یکنواخت‌تر جریان بر روی قسمت‌های مختلف سرریز و بهبود عملکرد سرریز می‌شود.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]



شکل (۱۶): پروفیل سطح آب در کلید خروجی بر روی هر سه نوع سرریز به ازای H_t/P=۰/۴

در شکل (۱۶)، پروفیل سطح آب جریان نزدیک شونده در سه نوع سرریز موردمطالعه در مقاطع مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۶)، پروفیل جریان تشکیل‌شده بر روی سرریزها نشانگر این است که سرریز BPKW نسبت به دو سرریز دیگر از ظرفیت بیشتر حجم کلید خروجی خود برای تخلیه جریان استفاده می‌کند که همین مسئله منجر به تخلیه بهتر و بیشتر جریان شده و کار آیی سرریز را بهبود می‌دهد.

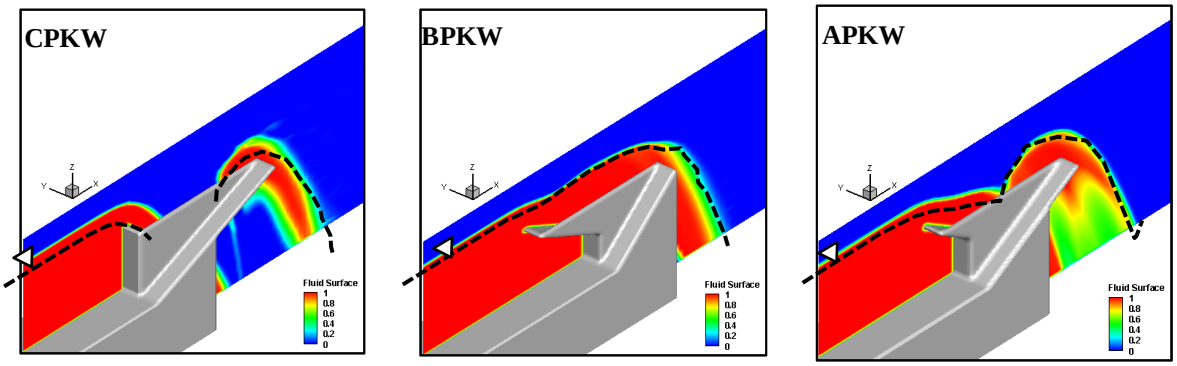
بررسی روند توزیع دبی در نمودار شکل ۱۴ نمایانگر تخلیه بیشتر جریان سرریز نوع CPKW از تاج کلید خروجی و بخش کمی از تاج کناری متصل به آن دارد که این مسئله در شکل (۱۶) به‌خوبی قابل‌مشاهده هست. مطابق شکل با دور شدن از تاج کلید خروجی، تخلیه جریان از قسمت‌های انتهایی تاج کناری و تاج کلید ورودی در سرریز BPKW نسبت به APKW و سرریز APKW نسبت به سرریز CPKW افزایش می‌یابد که به همان نسبت منجر به افزایش ضریب دبی سرریزها نسبت به همدیگر می‌شود.

در شکل (۱۷) پروفیل سطح آب در بخش میانی کلید ورودی برای هر سه نوع سرریز نشان داده‌شده است. با توجه به شکل مزبور، پروفیل سطح آب در سرریز BPKW به حالت افقی نزدیک‌تر است که همین نشانگر افت کمتر انرژی جریان در این نوع سرریز و عملکرد بهتر آن است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، پروفیل سطح آب در سرریز CPKW به‌صورت دو پروفیل جداگانه در بخش

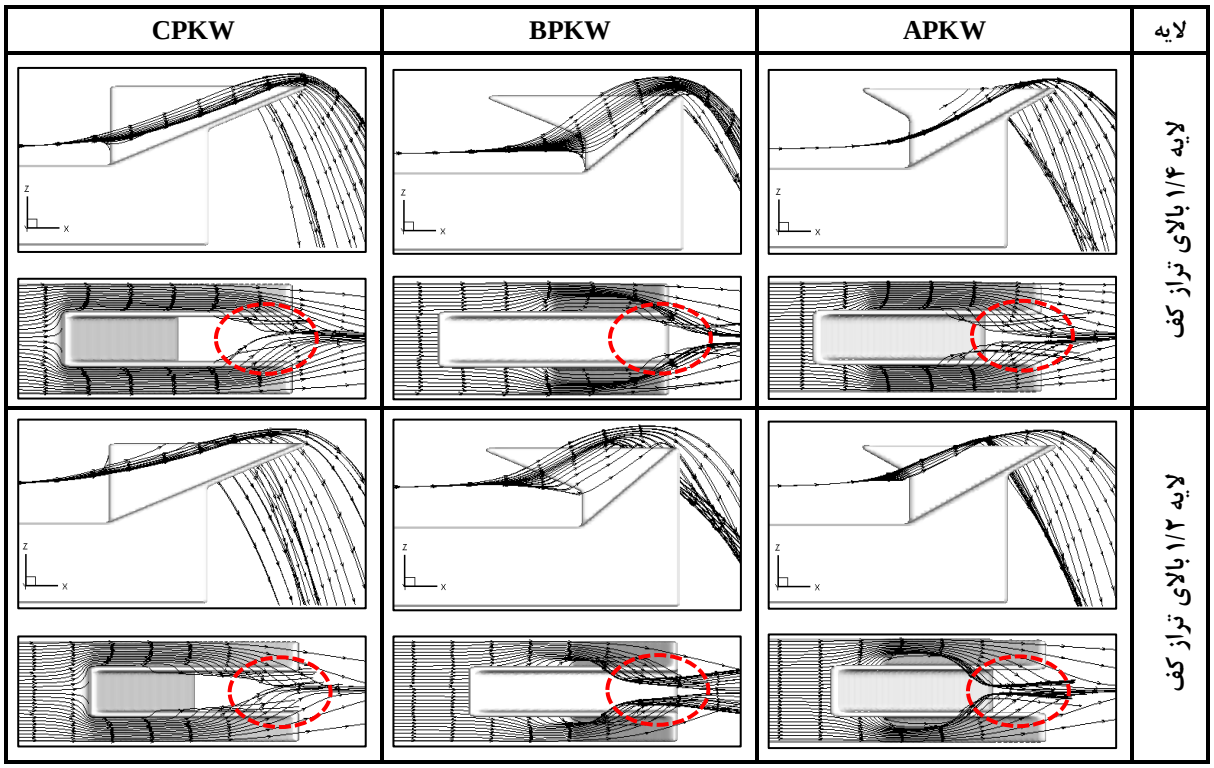
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

ابتدایی و انتهایی کلید خروجی تشکیل‌شده است و قسمت میانی کلید خروجی که در مجاورت بخش میانی تاج کناری هست و تأثیر به سزایی در تخلیه جریان از کلید خروجی دارد، سهم بسیار اندکی در تخلیه جریان دارد. همین مسئله باعث تجمع و تداخل جریان خروجی و تداخل جریان‌های ریزشی در بخش ابتدایی و انتهایی تاج کناری شده و منجر به ایجاد استغراق موضعی در بخش انتهایی کلید خروجی می‌گردد. استغراق موضعی به جهت جلوگیری از تخلیه راحت‌تر جریان باعث افت عملکرد و کاهش ضریب دبی سرریز می‌گردد.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، خطوط جریان عبوری از صفحات افقی به‌صورت نمای پلان و برش، در ترازهای مختلف تهیه و مطابق شکل (۱۸) ارائه‌شده است. با توجه به شکل، توزیع جریان و به‌تبع آن توزیع خطوط جریان با تغییر تراز در سرریز BPKW نسبت به دو سرریز دیگر بهتر هست. همان‌گونه که در هر دو نمای پلان و برش سرریزها مشاهده می‌شود با تغییر تراز در سرریز BPKW خطوط جریان در بخش‌ها مختلف تاج کلید ورودی، تاج کناری و تاج کلید خروجی به‌تناسب و با یکنواختی بهتری پخش‌شده و حداکثر ظرفیت سرریز جهت تخلیه جریان استفاده می‌شود. به دلیل هندسه سرریز BPKW دبی تخلیه‌شده از آن نسبت به دو سرریز دیگر بیشتر هست با این وجود به دلیل عملکرد بهتر در توزیع یکنواخت‌تر جریان، خطوط جریان در این نوع سرریز تداخل کمتری با یکدیگر داشته و استغراق موضعی کمتر مشاهده می‌شود.

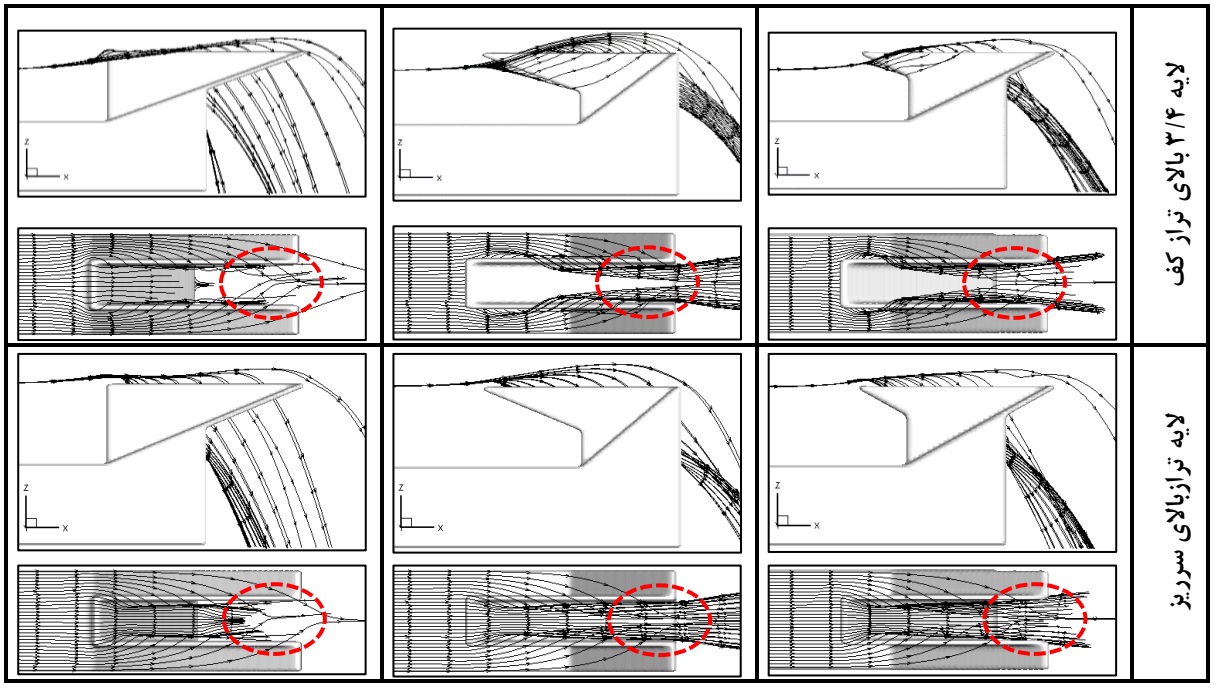


شکل (۱۷): پروفیل سطح آب در بخش میانی کلید ورودی بر روی هر سرریز به ازای H_t/P=۰/۴



[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

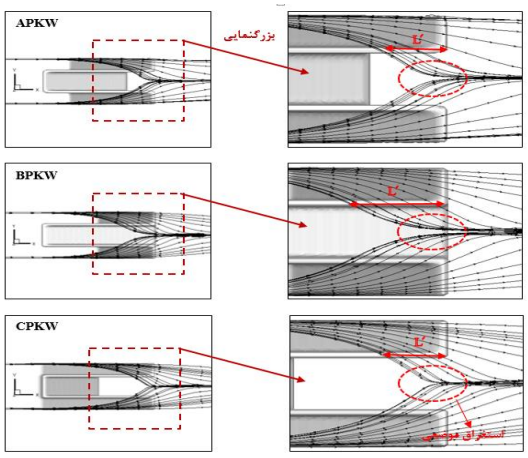
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]



شکل (۱۸): خطوط جریان نزدیک شونده به سرریز در مقاطع مختلف ارتفاع سرریز به ازای H_t/P=۰/۴

تفاوت آشکار در عملکرد سه نوع سرریز موردمطالعه در نحوه خروج جریان از آن‌ها است. جریان عبوری از بخش میانی کلیدهای ورودی به‌صورت شکل (۱۹) نشان داده‌شده است. با توجه به شکل، در سرریز BPKW جریان رهاشده از قسمت میانی کلید ورودی از صفحه قائم میانی، به سمت دیواره کناری منحرف‌شده و درواقع از تمرکز جریان خروجی کاسته می‌شود. عملکرد سرریز BPKW در پخش جریان بر روی لبه‌های مقابل و کناری کلید ورودی بسیار بهتر از دو سرریز دیگر است. با توجه به شکل، علاوه بر کاهش تمرکز جریان در لبه مقابل، بخش نسبتاً زیادی از جریان رهاشده از بخش میانی کلید ورودی از لبه کناری کلید نیز عبور می‌کند. پدیده‌های مزبور ضمن کاهش تمرکز جریان با افزایش طول عبوری جریان باعث کاهش استغراق و افزایش ضریب دبی سرریز BPKW نسبت به دو نوع سرریز دیگر شده است. مطابق شکل (۱۹)، مقایسه طول تاج کناری مؤثر (L') در تخلیه جریان در سه نوع سرریز، نمایانگر مشارکت طول بیشتری از تاج کناری سرریز BPKW در تخلیه جریان هست که همین مسئله باعث کاهش استغراق و درنتیجه بهبود عملکرد این نوع سرریز نسبت به دو سرریز دیگر شده است.

شکل (۱۹): خطوط جریان عبوری از بخش میانی کلید ورودی



نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی سه‌بعدی جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی نوع A، B و C واقع در کانال مدل‌سازی عددی شد. سرریزها بر اساس نوع سرریز و به ازای H_t/P های مختلف مدل‌سازی شده و ضریب دبی آن‌ها محاسبه گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سرریز نوع B در مقایسه با دو نوع سرریز دیگر کارآیی بهتری دارد. علت این امر، افزایش محیط‌تر سرریز نوع B نسبت به دو سرریز دیگر بوده که همین مسئله منجر به آرام شدن جریان نزدیک شونده به سرریز شده و درنتیجه باعث توزیع

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

یکنواخت‌تر جریان بر روی بخش‌های مختلف تاج سرریز و کاهش استغراق موضعی و کمتر شدن تداخل جریان‌های ریزشی و به‌تبع آن استفاده حداکثری از حجم کلید خروجی شده، هست. با مقایسه نمودار ضریب دبی سرریزهای موردمطالعه مشخص گردید که با بالا رفتن H_t/P به دلیل افزایش حجم خروجی جریان و درنتیجه پر شدن حجم خروجی کلید خروجی و افزایش استغراق موضعی اختلاف ضریب دبی سرریزها کاهش می‌یابد. بااینکه سرریز نوع B نسبت به سرریز نوع A کارآیی بهتری دارد بااین‌حال به دلیل متقارن بودن و اجرای راحت‌تر سرریز کلید پیانویی نوع A مخصوصاً در حالت پیش‌ساخته، سرریز نوع A به‌عنوان سرریز کلید پیانویی شناخته‌شده و بیشتر موردبررسی و استفاده قرار می‌گیرد.

مراجع

۱- صفرزاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۲-۱). "مقایسه هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی و کنگره‌ای مستطیلی." کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز.

۲- صفرزاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۲-۲). "بررسی عددی تأثیر دیوار جان‌پناه بر عملکرد هیدرولیکی سرریزکلیدپیانویی." پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۳- صفرزاده، ا. نوروزی، ب. (۱۳۹۳-۱). "بررسی عددی تأثیر شکل هندسی پشت‌بند بر هیدرودینامیک سرریز کلید پیانویی." هشتمین کنگره ملّی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.

۴- صفرزاده، ا.، نوروزی، ب. (۱۳۹۳-۲). "هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان." مجله علمی پژوهشی هیدرولیک، ۹(۳)، ۷۹-۶۱.

6- Anderson, R.M., Tullis, B. (2011). “Influence of Piano Key Weir geometry on discharge.” Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 75–80, CRC Press, Boca Raton, FL.

7- Anderson, R.M., Tullis, B.P. (2012). “Comparison of Piano Key and rectangular labyrinth weir hydraulics.” Journal of Hydraulic Engineering, 138(4), 358-361.

8- Laugier, F. (2007). “Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam.” Hydropower & Dams, 14(5), 94-101.

9- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L. (2009). “Design and construction of a labyrinth PKW spillway at St-Marc Dam, France.” Intl. J. Hydropower Dams 15(5), 100–107.

10- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Delorme, F., Laugier, F. (2009). “Hydraulic capacity improvement of existing spillways – design of piano key weirs.” 23rd ICOLD Congress, Brasilia (Q90, R43), 25–29.

11- Lempérière, F., and Ouamane, A. (2003). “The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways.” The Int. J. of Hydropower and Dams, 5(2003), 144–149.

12- Lempérière, F. (2009). “New Labyrinth weirs triple the spillways discharge.” <http://www.hydrocoop.org > (Feb. 8, 2010).

13- Lempérière, F., Vigny, J.P., Ouamane, A. (2011). “General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present.” Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 17–24, CRC Press, Boca Raton, FL.

14- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Pirotton, M. (2011). “Influence of Piano Key weir height on its discharge capacity, Proc.” Intl. Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 59-66.

15- Ouamane, A., Lempérière, F. (2006). “Design of a new economic shape of weir.” Proc. Intl. Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain, 463-470.

16- 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.

17- Riberio, 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.

18- Roache, P.J. (1994). Perspective: “A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies.” ASME Journal of Fluids Engineering, 116, September 1994.

19- Safarzadeh, A., Noroozi, B. (2015). “3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways.” International Journal of Civil Engineering, 13(6), 345-358.

20- Schleiss, A.J. (2007). “From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review.” Hydropower & Dams, 14 (5): 94-101.

21- Tullis, B.P., Young, J.C., Chandler, M.A. (2007). “Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs.” Journal of Hydraulic Engineering, 133(3), 248–254.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]

Comparing the Behavior Hydrodynamics Flow Over of Type A, B, and C Piano Key Weirs

Behzad Noroozi[1]
Jalal Bazargan[2]

Abstract

The piano key weir (PKW) is a new type of hydraulic structure that has been of great interest to designers in recent years. So far, there has been limited understanding of the effects of different geometrical parameters of these weirs on their hydraulic behavior. In the present study, steady flow on the types A, B, and C PKWs was studied numerically using the FLOW-3D numerical model. Upon software validation using the experimental data, the 3D flow pattern on the types A, B, and C PKWs was studied, and along with the evaluation of the flow hydrodynamics, the differences in the flow behavior for different geometries were explained. The results showed that the wetted perimeter of the type B PKW was more than that in the types A and C PKWs. Therefore, the velocity of the approaching flow to the type A PKW was less than that in the other two types, which led to a more uniform flow distribution over different parts of the output key and hence, decreased the local submergence and increased the outflow percent from the output key crest. This finally led to an increase in the total output discharge and the discharge coefficient of the type B PKW compared to types A and C PKWs.

Keywords

Piano key weir, Local Submergence, Discharge coefficient, streamlines, water surface profile.

1. PhD Student of Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Zanjan University, noroozibehzad@gmail.com
2.Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: jbazargan@znu.ac.ir

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.27.6.0]