

هیدرولیک سرریزهای کلید پانویی تیپ A- با تاج جانبی زیگزاگی*

مقاله علمی - پژوهشی

سبحان مرادی^(۱) حامد شهسواری^(۲) عاطفه ارفع^(۳) کاظم اسماعیلی^(۴)

چکیده مطابق پیشینه پژوهش انجام شده، افزایش سرعت نزدیک‌شونده به‌عنوان مهم‌ترین عامل کاهش ظرفیت تخلیه در سرریزهای کلید پانویی گزارش شده است. در پژوهش حاضر؛ ابتدا با اعمال هد آبی متغیر به بررسی تغییرات ضریب دبی در سرریز کلید پانویی استاندارد (تیپ A) پرداخته شد، آنگاه با ارائه طرح نوینی از فرم زیگزاگی در پروفیل تاج جانبی، پارامترهای هیدرولیک جریان در بالادست سرریز به‌وسیله سرعت‌سنج ADV اندازه‌گیری و با انجام تحلیل ابعادی به روش باکینگهام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد، با زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریزهای کلید پانویی، بیشینه ضریب دبی در نسبت H/P کمتر اما با مقدار عددی بیشتری رخ می‌دهد، به‌طوری‌که متوسط مقدار ضریب دبی با افزایش ۱۰ درصدی همراه است. با افزایش ۲۲ و ۱۶ درصدی به ترتیب برای سرعت‌های عرضی و روبه بالا جریان در محدوده تراز ارتفاع تاج، سبب تقویت جریان‌های ثانویه در بالادست سرریز می‌شود. از این رو با مشارکت طول مؤثر بیشتری از تاج جانبی، موجب افزایش انحراف و مکش جریان به طرف کلیدهای خروجی نسبت به تاج استاندارد، می‌شود. لذا؛ با افزایش اتلاف انرژی (افزایش افت تراز آب در محدوده B)، کاهش ۱۱ درصدی در مقادیر مؤلفه سرعت نزدیک‌شونده در کلیدهای ورودی رخ داده است. همچنین، مقادیر شدت آشفتگی T_v با زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی، به‌طور متوسط ۱۵ درصد بیشتر از فرم استاندارد سرریز کلید پانویی به‌دست آمده است. در نهایت گفتنی است که فرم تاج پیشنهادی، سبب افزایش حد استغراق موضعی شده و راندمان انتقال دبی تخلیه در کلیدهای خروجی سرریزهای کلید پانویی تیپ A را بهبود بخشیده است.

واژه‌های کلیدی استغراق موضعی، ارتقاء عملکرد، تاج زیگزاگی، سرعت جریان.

Hydraulic Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Lateral Crest

S. Moradi H. Shahsavari A. Arfa K. Esmaili

Abstract According to the literature, increased velocity approaching has been reported as the most important factor in decreasing discharge capacity in piano key weirs. In the present study, first, by applying variable water head, changes in the discharge coefficient of standard piano key weir (type A) were investigated, then by presenting a new design of zigzag form in lateral crest profile, hydraulic flow parameters upstream of weir by ADV velocimeter. The measurements were performed and analyzed by Buckingham method. The results showed that by zigzagging the lateral crest profile of the piano key weirs, the maximum discharge coefficient occurs at a lower ratio but with a higher numerical value, as the average discharge coefficient increasing by 10%. Increases by 22 and 16 percent, respectively, for transverse and upward velocities of flow in the crest elevation range, reinforcing secondary upstream currents. Hence, by incorporating a more effective length of the lateral crest, it increases the deflection and suction current to the outlet keys than the standard crest. Therefore, with the increase in energy loss (increase in water level drop in range (B)), an 11% decrease in the values of the approaching component velocity occurred at the inlet keys. Also, the intensity values of turbulence with zigzagging of the lateral crest profile were, on average, 15% higher than the standard piano key weir form. Finally, the proposed crest form increases the local submergence limit and improves the discharge transfer efficiency of the A-type key piano weir outlet keys.

Key Words Local submergence, Performance enhancement, Zigzag crest, Flow rate.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۳/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۱/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

(۴) نویسنده مسئول، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: esmaili@um.ac.ir

مقدمه

سرریز، سازه‌ای است که در بدنه یا جناح سد برای تخلیه ایمن حجم مازاد بر ذخیره مخزن ساخته می‌شود و عامل اصلی ایمنی سدها در زمان سیلاب است. سرریز کلید پیانویی (Piano Key Weir (PKW)) حالت توسعه یافته سرریزهای غیرخطی است که با رویکرد افزایش ظرفیت تخلیه سرریزهای زیگزاگی، طراحی و بر روی سازه‌های آبی ساخته می‌شود. این سرریز از جمله سازه‌های کنترل جریان است که به ازای یک مقدار تراز آب معین روی تاج سرریز، دارای بیشترین ظرفیت تخلیه (حداقل ۴ برابر) نسبت به انواع سرریزها، است. به طوری که برای یک دبی ثابت، عمق آب روی این نوع سرریز نسبت به سرریزهای دیگر به مقدار قابل توجهی کمتر است [1]. مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای غیرخطی در شرایط استغراق کم نشان داد که سرریزهای کلید پیانویی تیپ A با کف شیب دار در کلیدهای ورودی و خروجی نسبت به سرریزهای زیگزاگی به دلیل کاهش افت انرژی جریان و به تبع آن، نیاز به انرژی کمتر در بالادست سرریز برای عبور یک دبی ثابت، از عملکرد بهتری برخوردارند [2].

بحث استغراق در سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزهای کلید پیانویی به دو دسته استغراق موضعی (محلی) و استغراق کلی تقسیم بندی می‌شود. شرایط جریان در استغراق محلی، طوری است که بخشی از سازه توسط جریان عبوری از روی آن پر شده و باعث کاهش آنگذری سرریز می‌شود؛ و همچنین در صورتی که تراز سطح آب پایاب فراتر از تراز تاج سرریز باشد، استغراق کلی رخ خواهد داد. تحقیقات انجام شده در طول دهه‌های گذشته حاکی از آن است که افزایش دبی ورودی و به تبع آن افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده عامل اصلی ایجاد استغراق موضعی جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی است [3]. تحقیقات قابل توجهی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی انجام شده است.

از این رو؛ محققان زیادی بیان کردند که برای هدهای کم آب روی تاج، افزایش تعداد کلیدهای سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود. در حالی که برای هدهای بالا، کاهش تعداد کلید سبب افزایش ضریب دبی می‌شود. به طوری که طراحی کلید ورودی با عرض دهانه بزرگ تر از کلید خروجی، سبب افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود [4,5]. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که نسبت W_i/W_o در محدوده $1/25$ تا $1/5$ بیشترین عملکرد سرریز را به همراه دارد، همچنین با بررسی فنی - اقتصادی، نسبت‌های $W_i/W_o=1.25$ ، $B_i/B_o=0.33$ ، $P/W_u=1.33$ را به عنوان بهینه هیدرولیکی و نسبت‌های $W_i/W_o=1.5$ ، $B_i/B_o=1$ ، $P/W_u=0.5$ را به عنوان بهینه اقتصادی پیشنهاد نمود [6]. در شرایط سرریز با ارتفاع ثابت، افزایش ارتفاع آب روی تاج، سبب کاهش ضریب دبی جریان می‌شود؛ اما به ازای ارتفاع ثابت آب روی تاج، افزایش ارتفاع سرریز، افزایش ضریب دبی جریان را به دنبال دارد؛ و نهایتاً افزایش هد آب روی تاج، عامل مؤثرتری بر روی ضریب تخلیه این نوع سرریزها گزارش شد [7]. بررسی‌های انجام شده بر روی تأثیر سه هندسه متفاوت از تاج سرریز کلید پیانویی نشان داد، ظرفیت انتقال این سرریز در حالت تاج گرد گوشه در بخش بالادست کارآمدتر است [8]. همچنین نشان دادند که با نصب دیوارهای سپری روی تاج سرریز در سد اترویت، راندمان هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی تا ۱۵٪ افزایش یافته است [9]. با بررسی مشخصه‌های هندسی دیواره‌های سپری روی تاج سرریزهای کلید پیانویی، عامل افزایش ارتفاع کلی سرریز به دلیل اضافه شدن ارتفاع این دیواره‌های سپری، بر ظرفیت تخلیه سرریز را مؤثرتر بیان نمود [3]. مطالعه بر روی انواع مختلف از هندسه سرریزهای کلید پیانویی، اثر مثبت: نصب دماغه در زیر شیروانی بالادست، بالا بردن ارتفاع تاج با استفاده از دیواره‌های سپری و همچنین فرم نیم‌دایره تاج کلیدهای خروجی بر بهبود عملکرد سرریزهای کلید پیانویی را تأیید نموده است [1].

محاسبات نرم را مفید می‌دانند. از این رو با شبیه‌سازی سه‌بعدی هیدرولیک جریان در سه مدل هندسه از سرریزهای کلید پیانویی، نشان داده شده که علاوه بر بهبود ضریب دبی در هندسه دوزنقه‌ای نسبت به مدل‌های مستطیلی و کنگره‌ای، تاج جانبی تأثیر بسزایی در عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریزها دارد [19,18,17,16].

عملکرد هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد برای یک هد ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز دارد که ضریب دبی C_d این نوع سرریزها مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید [20]:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH}^{1.5} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q دبی عبوری از سرریز، C_d ضریب دبی، L طول مؤثر تاج سرریز $(L = 2(W_i + W_o) + 4(T_s + B))$ ، g شتاب ثقل، H هد آب روی تاج بالادست سرریز (مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی) است.

همچنین؛ رابطه رهبوک (۱۹۲۹) برای محاسبه ضریب دبی سرریز لبه‌تیز استاندارد مطابق معادله (۲) ارائه شده است [21].

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{p} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، h عمق آب روی سرریز است. لمپریه (۲۰۰۹) معتقد است که نمودار دبی-اشل برای سرریزهای کلید پیانویی تابعی از هندسه سرریز است. از این رو معادله (۳) را به‌عنوان رابطه دبی-اشل برای سرریزهای کلید پیانویی تیپ A در محدوده $0.4P_m < H/P < 2P_m$ معتبر دانسته است [7]:

$$q = 4.3H\sqrt{P_m} \quad (3)$$

در رابطه فوق، q دبی در واحد عرض سرریز، P_m ارتفاع مشخصه سرریز است.

مطابق پیشینه پژوهش انجام شده، ابعاد هندسی سرریزهای کلید پیانویی تأثیر بسزایی بر رفتار هیدرولیکی و پدیده استغراق موضعی رو تاج این نوع

کبیری‌سامانی و جواهری در سال ۲۰۱۲ برای درک اثر پارامترهای هندسی بدون بعد با انجام چندین آنالیز همبستگی به محاسبه مقدار ضریب دبی در شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق روی تاج سرریز کلید پیانویی پرداختند [10]. در شرایط آزمایش با تخلیه بالا، نقش کلیدهای خروجی عامل تأثیرگذاری بر راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی است [11]. ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی با مدل دوزنقه‌ای $(W_i/W_o > 1)$ در مقایسه با مدل استاندارد مستطیلی، حدوداً ۵ تا ۲۵٪ بهبود یافته است [12]. با تجزیه و تحلیل پارامترهای مختلف هندسی و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای، نسبت L/W به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در بهبود ظرفیت تخلیه این نوع سرریزها معرفی شده است. علاوه بر این، راندمان‌های بالاتری در نسبت‌های H/P پایین‌تر با جریان‌های ریزشی و گذار ثبت شده است [13]. گوا و همکاران در سال ۲۰۱۸ با ارائه رابطه‌ای مبتنی بر داده‌های تجربی، نشان دادند که روابط پیشنهادی در شرایط هد نسبی $(H/P > 0.15)$ با خطای متوسط در دامنه ۵-۸٪ همخوانی خوبی با نتایج محققان پیشین داشته است. همچنین مدل عددی WOLF-1D با خطای کمتر از ۸٪ به‌عنوان مرجعی مناسب برای طراحی تیپ A این نوع سرریز مناسب گزارش شد [14]. با انجام مقایسه‌ای بین میزان اهمیت نسبت طول تاج به عرض (L/W) و ارتفاع سرریز (P) ، نشان داده شد که راندمان تخلیه سرریز کلید پیانویی مستطیلی استاندارد با دوزنقه‌ای شدن هندسه خود به مقدار ۲ تا ۱۵ درصد، بهبود یافته است. همچنین؛ تأثیر ارتفاع سرریز کلید پیانویی دوزنقه بر ضریب دبی، کمتر از مدل استاندارد مستطیلی گزارش شد [15].

بسیاری از محققان همچون عظمت‌الله و همکاران (۲۰۱۶) و مه‌ری و همکاران (۲۰۱۹) و کومار و همکاران (۲۰۲۰) به‌منظور پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی سرریزهای غیرخطی، استفاده از تکنیک‌های

ارتفاع ۰/۵ متر و شیب کف ۰/۰۰۱۲ در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد، انجام شده است (شکل ۲).

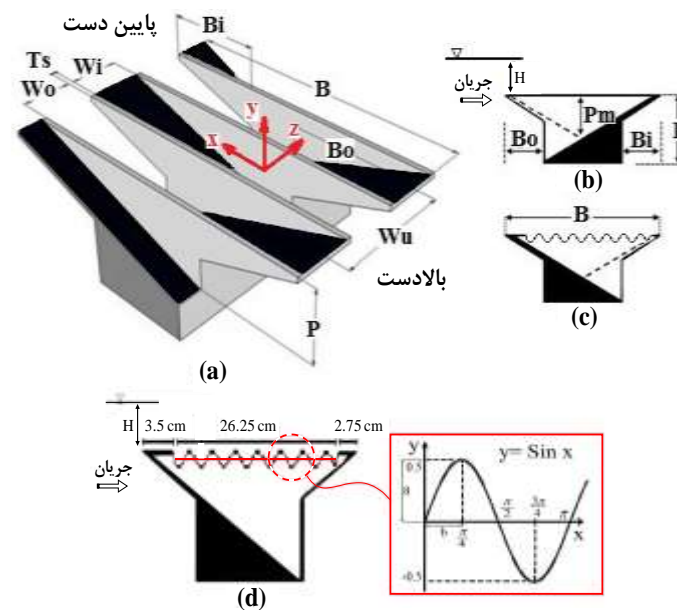
جهت آرام کردن هرچه بیشتر سطح آب در جریان ورودی کانال از یک صفحه یونولیت شناور در ابتدای کانال استفاده شد. برای حذف اثر کشش سطحی بر نتایج آزمایش، محدوده تغییرات دبی جریان ورودی در بازه $2.8 \leq Q \leq 41.98$ لیتر بر ثانیه تنظیم شد تا حداقل هد نسبی آب روی تاج سرریز نیز با مقادیری بزرگ‌تر از ۰/۱ به دست آید [22].

در (شکل ۱) پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی نشان داده شده است.

سرریز دارد. لذا؛ لزوم بررسی هندسه فیزیکی این سرریز از اهمیت خاصی برخوردار است. رویکرد پژوهش حاضر با هدف بهبود ظرفیت تخلیه و افزایش آستانه استغراق سرریزهای کلید پیانویی در هدهای آبی بالا است. از این رو؛ اثر زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی این سرریزها در جهت کاهش سرعت‌های نزدیک‌شونده و افزایش جریان‌های ثانویه (انحراف جریان) در تاج مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانالی با مقطع مستطیلی، اسکلت فلزی و دیواره شیشه‌ای، به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و



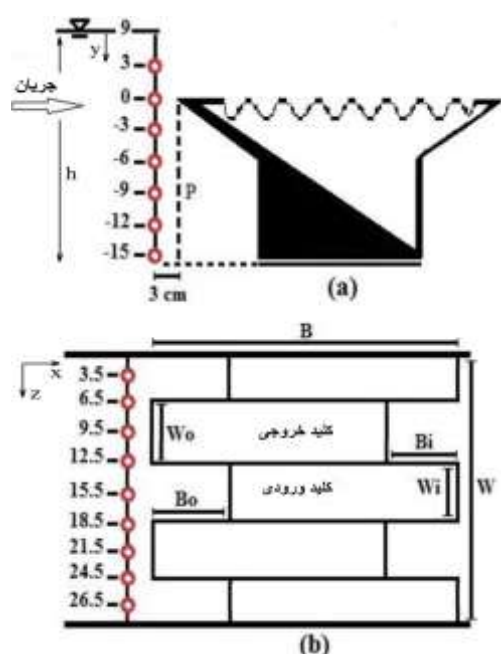
شکل «۱»: نمایی از (a) سرریز کلید پیانویی تیپ A. با ارائه سیستم مختصات برداشت اطلاعات از ADV [23]، (b) کلید ورودی- فرم تاج استاندارد. (c) کلید خروجی- فرم تاج زیگزاگی. (d) مشخصه‌های هندسی تاج زیگزاگی (سینوسی)

جدول «۱»: مشخصه‌های هندسی سرریز کلید پیانویی تیپ A با دو فرم استاندارد و زیگزاگی (سینوسی)

L	B	A	P	B _o	B _i	B	T _s	W _u	W _o	W _i	W	پارامتر مقدار (cm)
۱۵۸	۰/۷۵	۰/۵	۱۵	۱۰	۷/۵	۳۲/۵	۰/۱	۱۵/۲	۷/۵	۷/۵	۳۰	

آزمایش‌ها برای دستیابی به دقت بیشتر در زمان ۲ دقیقه و در فرکانس ۲۰۰ هرتز انجام گردید. بردار مختصات موجود در سرعت‌سنج فوق ذکر بر اساس جهت قراردادی اشاره شده در شکل (۱) است.

به دلیل ابعاد هندسی شاخک‌های ADV و لزوم رعایت حداقل فواصل پروب‌ها تا بدنه بالادست سرریز، داده‌برداری در صفحه‌ای مشبک با ابعاد ۳*۳ سانتی‌متر مربع و به فاصله ۳ سانتی‌متر از پشت تاج کلید خروجی سرریز و ۳/۵ سانتی‌متر از دیواره‌های کانال شیشه‌ای انجام شد (شکل ۲).



شکل «۲»: پلان مختصات نقاط برداشت داده با ADV. صفحه ۳*۳ سانتی‌متر مربع. (a) در جهت عمق جریان. (b) در جهت عرض کانال. (واحد اعداد به سانتی‌متر است).

تحلیل ابعادی

ضریب دبی عبوری از روی سرریزهای کلید پیمانویی وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی زیادی مطابق رابطه (۴) است. بررسی تأثیر مجزا هر پارامتر بر نتایج آزمایش‌ها کاری بس دشوار است. لذا، برای سهولت در تحلیل نتایج، در این مقاله با انجام تحلیل

مطابق (جدول ۱) علائم استاندارد در مشخصات هندسی سرریز کلید پیمانویی شامل؛ ارتفاع سرریز، P_m ارتفاع مشخصه سرریز، B طول جانبی کلید، a و b مشخصه‌های هندسی تاج زیگزگی، T_s ضخامت دیوار، W عرض سرریز، علاوه بر این؛ زیرنویس i برای کلید ورودی و زیرنویس o برای کلید خروجی مشخص شده است.

مدل‌سازی فیزیکی سرریزها با دو فرم از پروفیل تاج سرریز کلید پیمانویی استاندارد (تیپ A) و تاج زیگزگی (سینوسی) با نسبت‌های $P/W_u=1.33$ و $W_i/W_o=1.2$ طراحی شد و در کنار مدل سرریز لبه‌تیز استاندارد با ارتفاع ثابت و برابر، برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. سرریزها با ورق فلزی، از جنس گالوانیزه با ضخامت یک میلی‌متر ساخته شده‌اند. همچنین؛ مدل‌های سرریز کلید پیمانویی با تعداد ۲/۵ سیکل مدل‌سازی شد (شکل ۱-ا).

در معرفی مشخصه‌های هندسی یک سرریز کلید پیمانویی تیپ A، عرض یک سیکل (W_u) به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$W_u = W_i + W_o + 2T_s \quad (7)$$

در مدل دوم فرم تاج زیگزگی سرریز کلید پیمانویی، به صورت سینوسی و با ارتفاع ۵ میلی‌متر طراحی شد. به طوری که در طول تاج جانبی، حداکثر ۹ زیگزگ سینوسی کامل مدل‌سازی شد (شکل ۱-د).

به جهت کاهش خطا در اندازه‌گیری مقادیر دبی جریان ورودی از دبی‌سنج الکترومغناطیسی (MID) با دقت $\pm 0/05$ لیتر بر ثانیه و برای عمق جریان و پروفیل سطح آب روی تاج سرریز از عمق‌سنج مکانیکی با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین؛ در راستای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی جریان و سهولت در تحلیل نتایج، از سرعت‌سنج (ADV)، استفاده شد. شایان‌ذکر است؛ داده‌برداری در تمام

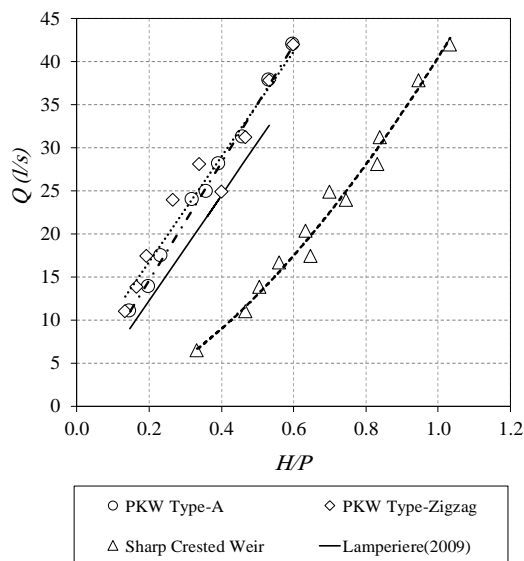
جدول «۲»: مشخصات آزمایش‌ها

پارامتر	سرریز لبه تیز خطی استاندارد	سرریز کلید پیانویی استاندارد تیپ A و فرم تاج زیگزاگی
Q(l/s)	۲/۸ - ۴۱/۹۷	۲۰/۳۶ - ۴۱/۹۷
H(cm)	۳ - ۱۵/۲	۳ - ۹
Fr	۰/۰۲ - ۰/۱۶	۰/۰۷ - ۰/۲
Re	۳۶۱۱ - ۵۳۵۴۲	۴۹۵۰ - ۳۷۰۳۲

نتایج و بحث

هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی

(شکل ۳) روند تغییرات دبی برای سه مدل به ترتیب؛ سرریزهای لبه تیز استاندارد و کلید پیانویی با دو فرم هندسی متفاوت از پروفیل تاج جانبی (استاندارد و زیگزاگی) را در مقابل هد نسبی آب روی تاج سرریز نشان می‌دهد.



شکل «۳»: تغییرات دبی در مقابل هد نسبی آب روی تاج سرریز

آنچه در شکل (۳) مشهود است؛ با افزایش هد آب روی تاج سرریز، دبی سرریزهای کلید پیانویی و سرریزهای لبه تیز به ترتیب به صورت خطی و غیرخطی افزایش می‌یابد. به طوری که در شرایط H/P برابر (هد آب برابر روی تاج)، دبی سرریزهای کلید پیانویی

ابعادی بر روی متغیرهای تأثیرگذار و به دست آوردن نسبت‌های بدون بعد، تأثیر هم‌زمان چند پارامتر بر نتایج آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از روش پای-باکینگهام برای انجام تحلیل ابعادی استفاده شد.

$$f\left(\frac{W, W_p, W_o, T_s, L, H, B, B_1, B_o, \rho, \sigma, \mu, \nu, S, \sigma_a, h}{V}\right) = 0 \quad (4)$$

$$f\left|\frac{Q}{\sqrt{2g}LH^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho V_{mean}^2 H}\right| = 0 \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)؛ Q دبی کل عبوری از روی سرریز، V_{mean} سرعت متوسط جریان، g شتاب گرانش، ρ و μ به ترتیب چگالی و لزجت دینامیکی آب، S_{in}, S_{out} به ترتیب شیب کلیدهای ورودی و خروجی و σ کشش سطحی آب می‌باشند.

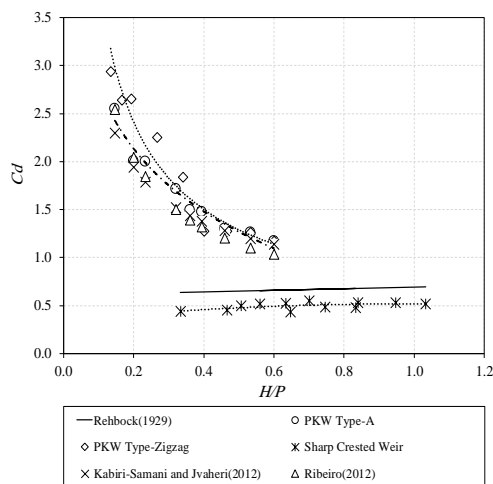
همچنین نسبت‌های $\frac{\rho V_{mean} H}{\mu}$ ، $\frac{V_{mean}}{\sqrt{\sigma H}}$ به ترتیب به عدد فرود (Fr)، عدد رینولدز (Re)، عدد وبر (W_e) و ضریب تخلیه (C_d) اشاره دارند؛ که در مقطع بالادست تاج سرریز اندازه‌گیری شده‌اند. گفتنی است که؛ به دلیل ثابت بودن برخی پارامترهای جریان و هندسه سرریز در کل آزمایش‌ها، رابطه (۵) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$C_d = f\left(\frac{H}{P}, \frac{\rho V_{mean} H}{\mu}, \frac{\sigma}{\rho V_{mean}^2 H}, \frac{V_{mean}}{\sqrt{\sigma H}}\right) \quad (6)$$

همچنین؛ به علت وجود شرایط جریان روباز و محدوده اعداد رینولدز بالاتر از ۳۷۰۰ در تمامی آزمایش‌ها، از اثر لزجت صرف نظر می‌شود [20]. عدد فرود جریان نیز در همه آزمایش‌ها کمتر از یک بوده و بدین گونه شرایط لازم برای زیر بحرانی بودن جریان در بالادست سرریز را ارضا می‌کند.

در پژوهش حاضر مجموعاً ۲۱ آزمایش بر روی سرریز کلید پیانویی تیپ A با دو مدل پروفیل تاج استاندارد و زیگزاگی انجام شد (جدول ۲).

می‌دهد که به ازای هدهای آبی بیشتر (شرایط جریان مستغرق)، به دلیل برخورد جت‌های جریان عبوری از روی تاج جانبی با یکدیگر، تأثیر طول تاج روی دبی عبوری کم شده و ضریب تخلیه این سرریزها با روند نزولی مواجه می‌شود. تا جایی که می‌توان گفت در شرایط جریان مستغرق، مقدار ضریب دبی مستقل از طول سرریز خواهد بود؛ و به ضریب دبی سرریز لبه‌تیز خطی نزدیک می‌شود که با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققان همخوانی خوبی داشته است. (شکل ۵)

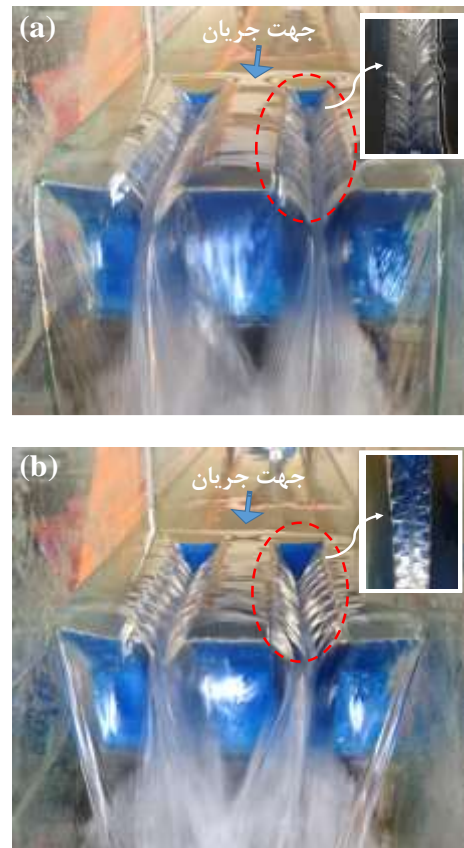


شکل «۵»: تغییرات ضریب دبی در مقابل هد نسبی آب روی تاج سرریز

با توجه به (شکل ۵) افزایش ۱۰ درصدی در متوسط مقدار ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با فرم هندسی زیگزاگی نسبت به استاندارد، مشاهده می‌شود. واضح است که با زیگزاگی شدن پروفیل تاج، بیشینه ضریب دبی در نسبت هد به ارتفاع کمتری رخ می‌دهد.

برای تجزیه و تحلیل راندمان یک سرریز کلید پیانویی، پارامتر نسبت افزایش ظرفیت انتقال (F)، بین دبی تخلیه در سرریز کلید پیانویی (Q_{PKW}) و سرریز لبه‌تیز خطی استاندارد (Q_w) به صورت رابطه زیر تعریف شده است [8]:

به‌طور میانگین ۳/۵ برابر دبی سرریزهای لبه‌تیز با ارتفاع برابر است و با نظر اندرسون و تولیس در سال ۲۰۱۲ انطباق خوبی دارد [1].



شکل «۶»: جریان عبوری از تاج جانبی سرریز کلید پیانویی. (a) جریان ریزی در تاج جانبی استاندارد. (b) جت‌های جریان ایجادشده در تاج جانبی زیگزاگی

برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با دو فرم تاج استاندارد و زیگزاگی و سرریز لبه‌تیز استاندارد، آزمایش‌ها تحت شرایط جریان مستغرق ($H/P > 0.5$) و جریان آزاد ($H/P < 0.5$) انجام شد [10].

نتایج آزمایشگاهی ارائه شده مطابق رابطه (۱) و (۲) به‌وضوح نشان می‌دهد که در هدهای آبی کم (شرایط جریان آزاد)، مقدار دبی سرریز کلید پیانویی به‌واسطه افزایش طول مؤثر تاج نسبت به سرریز لبه‌تیز استاندارد، افزایش می‌یابد؛ اما برای هر دو مدل سرریز کلید پیانویی، مشاهدات عینی مطابق شکل (۶) نشان

توزیع الگوی سرعت در مختصات دکارتی

در این بخش از مقاله، با تحلیل و مقایسه اختلافات الگوی توزیع سرعت سه بعدی جریان در مجاورت سرریز لبه تیز خطی و همچنین سرریز کلید پیانویی با دو پروفیل تاج استاندارد و زیگزاگی، به اثبات علمی و مستند از دلایل کارایی بهتر پروفیل تاج زیگزاگی در سرریز کلید پیانویی، پرداخته شد.

شکل (۷)، (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) پروفیل‌های سرعت در جهت محور x ، y و z را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. به دلیل تشابه نمودارها در دبی‌های مورد آزمایش، بحرانی‌ترین حالت با دبی $41/98$ لیتر بر ثانیه، به صورت نمونه آورده شده است. پارامترهای z/w و y/h به ترتیب معرف عرض نسبی کانال و عمق نسبی جریان می‌باشند. (Z فواصل داده‌برداری در w عرض کانال و y فواصل داده‌برداری در h عمق جریان است).

سرریز لبه تیز خطی استاندارد

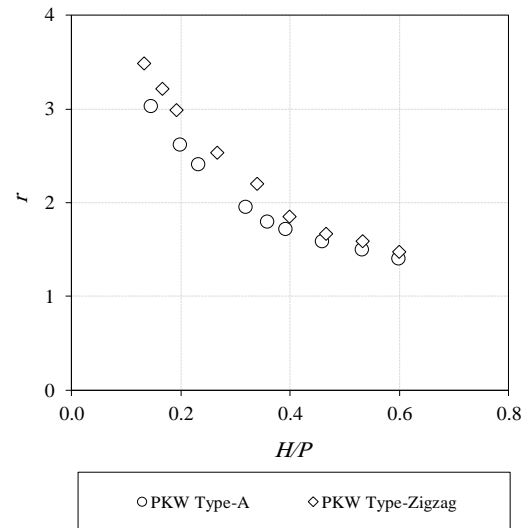
مطابق (شکل ۷-a) حداکثر مقادیر سرعت نزدیک شونده (V_x) برای همه اعماق، در محور مرکزی سرریز لبه تیز خطی رخ داده است. همچنین در نزدیکی تاج ($\frac{y}{h} = 0.24$) به حداکثر مقدار خود می‌رسد که مطابق با نتایج ارائه شده توسط رجارتنام و مورالیدار در سال ۱۹۷۱ است [24].

همان‌طور که در (شکل ۷-b) نشان داده شده است؛ مقدار V_z از محور مرکزی سرریز به سمت دیواره‌های کانال، افزایش می‌یابد؛ و بر خلاف دو مؤلفه سرعت دیگر V_x و V_y در دو جناح دیوار به مقدار حداکثری خود رسیده است. حرکت عرضی جریان به وضوح متأثر از دیواره‌های جانبی کانال است.

سرعت عمودی (V_y) نیز در محور مرکزی سرریز و در مجاورت تاج به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به طوری که جریان قبل از رسیدن به تاج به سمت بالا حرکت می‌کند. بالاتر از تراز تاج سرریز، V_y به تدریج کاهش می‌یابد و در اعماق نزدیک سطح آب، معکوس می‌شود و با مقدار منفی به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۷-c).

$$\Gamma = \frac{Q_{PKW}}{C_d} = \frac{C_{PKW} L H^{1.5} \sqrt{2g}}{C_d W H^{1.5} \sqrt{7\pi}} \quad (8)$$

در رابطه (۸) ضریب دبی (C_d) سرریز لبه تیز خطی با در نظر گرفتن شکل (۵)، به طور میانگین، $0/46$ فرض شده است [11]. ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی نیز در آزمایشگاه، به واسطه رابطه (۱) اندازه‌گیری و محاسبه شد. نسبت افزایش ظرفیت انتقال (Γ) با توجه به ثابت فرض کردن C_d ، تابعی از مقادیر پارامتر بی بعد C_{PKW} است.



شکل «۶»: تغییرات نسبی ظرفیت انتقال در مقابل هد نسبی آب روی تاج سرریز

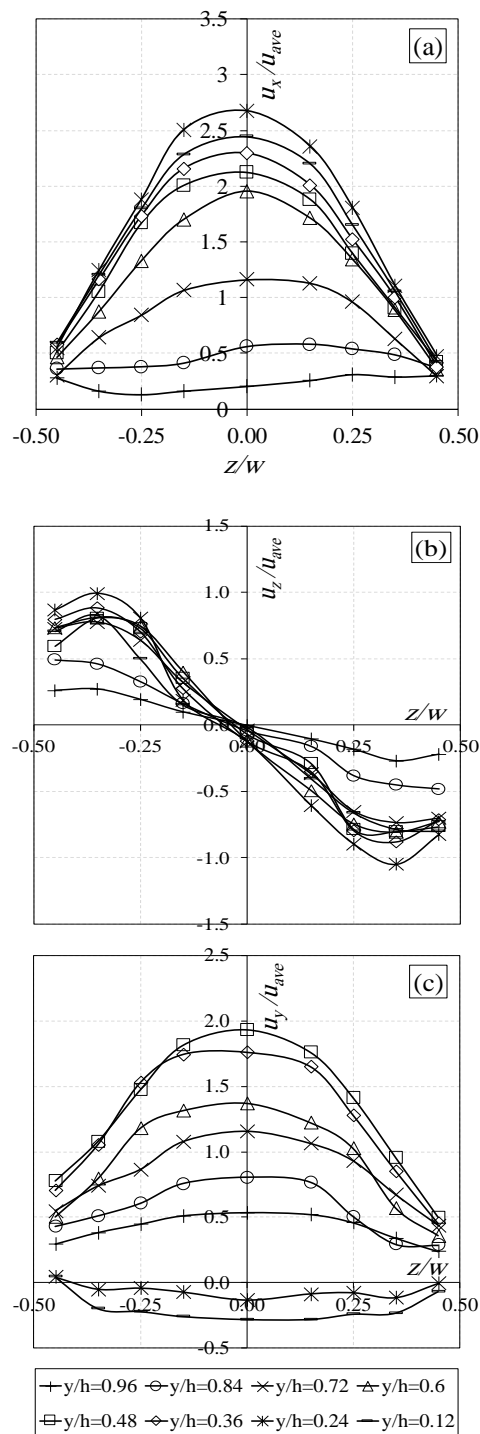
نتایج نشان می‌دهد، به دلیل اینکه مقدار دبی عبوری سرریزهای کلید پیانویی بیشتر از سرریز لبه تیز خطی است، مقادیر پارامتر Γ همواره بیشتر از یک است. به طور کلی؛ افزایش H منجر به کاهش کارایی سرریز برای هر دو مدل می‌شود؛ و با زیگزاگی شدن تاج جانبی سرریز کلید پیانویی، کاهش کارایی سرریز در هد نسبی آب بالاتری رخ داده است (شکل ۶). به نظر می‌رسد که افزایش دامنه و ارتفاع حالت سینوسی می‌تواند بر افزایش پارامتر Γ مؤثرتر باشد. لذا در مطالعات بعدی بررسی شود.

سرریز کلید پیانویی تیپ A

مشاهدات عینی در (شکل ۸-ا) نشان می‌دهد که در عبور جریان از روی سرریزهای کلید پیانویی، کلیدهای ورودی همواره رفتاری مشابه سرریزهای لبه‌پهن دارند. به طوری که با توجه به زیرجرانی بودن جریان نزدیک شونده و همچنین افزایش تراز بستر به واسطه ارتفاع سرریز، مطابق اصول روابط برنولی، با کاهش ارتفاع معادل فشار ($\frac{P}{\rho}$) مقدار ارتفاع معادل سرعت ($V^2/2g$) بر روی کلیدهای ورودی، افزایش می‌یابد و نهایتاً کاهش تدریجی در پروفیل سطح آب رخ می‌دهد. سپس جریان به صورت جت‌های ریزشی از لبه تاج کلید ورودی در پایین دست، تخلیه می‌شود.

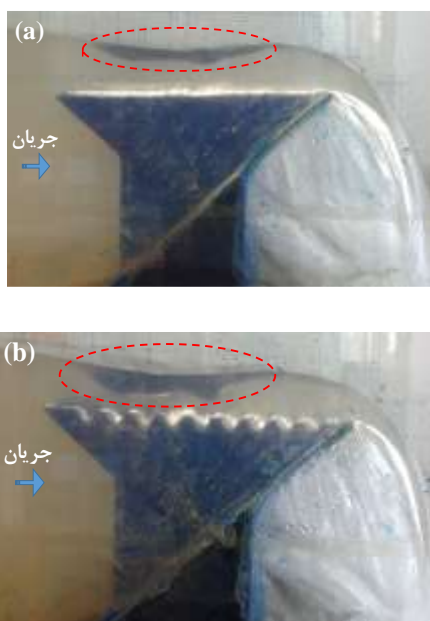
اما الگوی جریان عبوری از روی کلیدهای خروجی کمی متفاوت از آنچه برای کلیدهای ورودی رخ می‌دهد، است. بدیهی است که در سرریزهای کلید پیانویی به واسطه تلاقی جت‌های ریزشی از طول دو تاج جانبی مقابل هم در کلیدهای خروجی و همچنین عدم تمایل به ورود جریان از تاج کلید خروجی در بالادست، انسداد در عبور جریان از روی شیب کف کلیدهای خروجی رخ می‌دهد و مطابق شکل (۸-ب) بالازدگی جریان (الگوی گرده‌ماهی) شکل می‌گیرد. وقوع این پدیده سبب عدم کارآمدی مناسب بخش زیادی از طول مؤثر سرریز می‌شود. گفتنی است؛ انسداد شکل گرفته در دبی‌های ورودی بالاتر، باعث برخورد جریان‌هایی به مراتب قوی‌تر شده و با پر شدن کلیدهای خروجی، سبب ایجاد استغراق موضعی و نهایتاً کاهش ظرفیت کل آبگذری سرریزهای کلید پیانویی می‌شود.

تفاوت سرعت‌های همگرایی و واگرایی در مرکز کلیدهای ورودی و خروجی، گویای اغتشاش و جهت‌گیری متفاوت مؤلفه‌های سرعت جریان در پشت سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریز لبه‌تیز استاندارد است. از این رو برای بهبود تحلیل ارائه شده به واکاوی همه اعماق نسبی پرداخته شد.



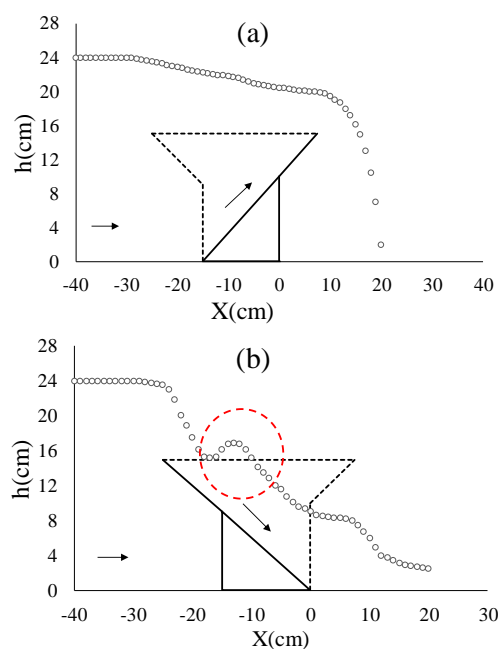
شکل ۸: توزیع نسبی مؤلفه‌های سرعت در عمق نسبی جریان y/h و عرض نسبی کانال z/w برای سرریز لبه‌تیز خطی استاندارد. (a) سرعت افقی (نزدیک‌شونده) V_x (b) سرعت جانبی (عرضی) V_z . (c) سرعت عمودی V_y

سرعت نزدیک شونده (V_x) به سمت مرکز کلیدهای ورودی سرریز کشیده شده است؛ و در پشت دماغه شیب دار کلیدهای خروجی دارای مقادیر نزدیک به سرعت متوسط جریان در کانال است. این نتایج می-تواند نشانگر وجود جریانهای چرخشی حبس شده در پشت دماغه شیب دار کلیدهای خروجی باشد. در (شکل ۱۰) مشاهده می شود که؛ تأثیر زیگزاگی شدن پروفیل تاج سرریز بر مقادیر سرعت نزدیک شونده از محدوده عمق نسبی $\frac{y}{h} = 0.48, 0.60$ آغاز می شود. به طوری که با روندی مشابه حالت پروفیل استاندارد، اما با افزایش ۹/۵ درصدی در مقادیر مؤلفه سرعت V_x در عرض کانال همراه بوده است. به نظر می رسد این افزایش سرعت به دلیل مکش جریان از سوی لبه تاج بالادست کلیدهای خروجی رخ داده است. در (شکل ۹) مقدار حجم هوادهی که به دلیل مکش جریان به طرف کلیدهای خروجی ایجاد شده، به وضوح قابل تشخیص است.



شکل «۹»: حفره هوادهی (مکش هوا) به جریان در کلید خروجی سرریز کلید پیانویی. (a) تاج جانبی استاندارد. (b) تاج جانبی زیگزاگی. $Q=41.98 \text{ lit/s}$

این در حالی است که نتایج نشان می دهد؛ مقادیر بیشینه سرعت در جهت محور X برای اعماق نسبی



شکل «۸»: تغییرات پروفیل سطح آب در سرریز کلید پیانویی با دبی $Q=41.97 \text{ lit/s}$. (a) کلید ورودی. (b) کلید خروجی

با توجه به (شکل ۱۰)، به وضوح مشخص است که برای اعماق نسبی $\frac{y}{h} = 0.72, 0.84, 0.96$ با افزایش مقدار عمق نسبی به کف کانال نزدیک تر شده و مقادیر متوسط سرعت نزدیک شونده در جهت محور X تحت تأثیر زبری کف (تنش برشی)، کاهش می یابد. از آنجاکه مقدار V_x برای این سه عمق نسبی، در عرض کانال تقریباً یکنواخت است. لذا می توان بیان کرد که در این اعماق حضور سرریز حس نشده و اختلاف اندک موجود بین مقادیر سرعت V_x مربوط به روند قابل انتظار الگوی سرعت سهمی شکل در راستای عمق جریان است.

روند افزایشی سرعت در راستای عمق جریان برای اعماق نسبی $\frac{y}{h} = 0.48, 0.60$ نیز همچنان ادامه دارد؛ اما به نظر می رسد که در این بازه از عمق، حرکت رو به جلوی جریان، حضور کلیدهای ورودی و خروجی سرریز را حس کرده و الگوی سرعت عمقی جریان، دیگر روند افزایشی سهمی شکل خود را حفظ نمی کند. به طوری که مشاهده می شود، حداکثر مقدار

کلیدهای خروجی می‌افزاید (جریان واگرا). در اعماق نسبی پایین‌تر از تاج سرریز، جریان‌های عرضی برخلاف جریان روبه جلو حضور کلیدهای سرریز را حس کرده و با تناوبی مشابه الگوی جریان عرضی همگرا در سرریز لبه‌تیز استاندارد (شکل ۷-۵)، به سمت کلیدهای ورودی منحرف می‌شوند. به طوری که سرعت‌های انحرافی جریان (V_z) در دو جناح کلیدهای خروجی با $\pm 0.15, 0.35$ به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین، حداکثر مقدار مؤلفه سرعت عرضی در مقطع ± 0.15 که معرف دو جناح کلید ورودی میانی است، دارای مقادیر بیشتری نسبت به کلیدهای ورودی دو طرف سرریز است؛ که احتمالاً به دلیل شرایط انحراف کلی جریان از طرف دیواره‌های شیشه‌ای به سمت محور مرکزی کانال است (شکل ۱۱). گفتنی است که این روند تناوبی در الگوی جریان، برای همه اعماق نسبی در عرض کانال مشابه است.

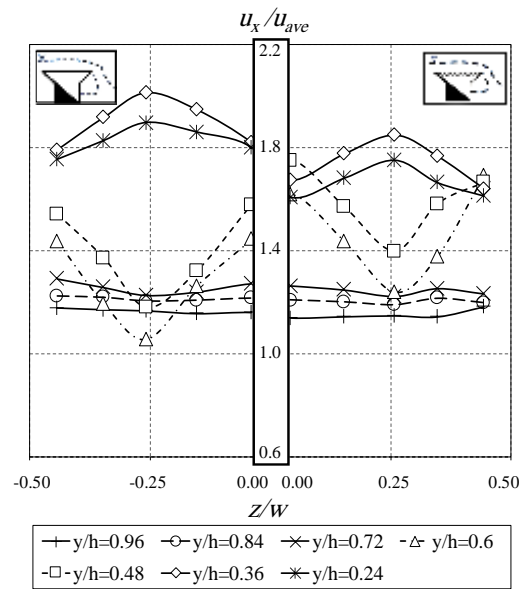


شکل «۱۱»: همگرایی جریان به سمت محور مرکزی کانال متأثر از دیواره کانال و کلیدهای خروجی سرریز کلید پیانویی با فرم هندسی تاج زیگزاگی. $Q=41.98 \text{ lit/s}$

مطابق مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده در (شکل ۴-ب)، زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریزهای کلید پیانویی، سبب برخورد جت‌های نامتقارن و به مراتب ضعیف‌تر بر روی شیب کلیدهای خروجی می‌شود. از این رو با افزایش ۲۲ درصدی سرعت‌های عرضی جریان در تراز ارتفاعی تاج

برخلاف روند موجود در بازه $\frac{y}{h} = 0.24, 0.36$ بوده و این مقادیر حداکثری در محور مرکزی کلیدهای خروجی اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است با زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی، به‌طور متوسط ۱۱ درصد از مقادیر مؤلفه V_x در اعماق نسبی $\frac{y}{h} = 0.24, 0.36$ کاسته شده است.

با مقایسه‌ای بین پروفیل‌های سرعت V_x در بازه اعماق نسبی بالاتر از تاج می‌توان نتیجه گرفت؛ با توجه به اینکه فرم هندسی تاج بالادست کلیدهای خروجی (W_0) برای دو مدل تغییری نکرده، تغییرات مقادیر سرعت V_x در کلیدهای ورودی و خروجی، تنها می‌تواند متأثر از زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریز کلید پیانویی (B) باشد.



شکل «۱۰»: توزیع نسبی سرعت طولی $\frac{V_x}{V_{mean}}$ در عمق نسبی جریان y/h و عرض نسبی کانال z/w

با تحلیل روند الگوی جریان عرضی در همه اعماق نسبی (شکل ۱۲) می‌توان بیان کرد که در سرریز-های کلید پیانویی، انحراف جریان به سمت تاج جانبی، مقدار V_z در مرکز کلیدهای ورودی را به صفر نزدیک می‌کند (جریان همگرا) و بر مقادیر متناظر در دو جناح

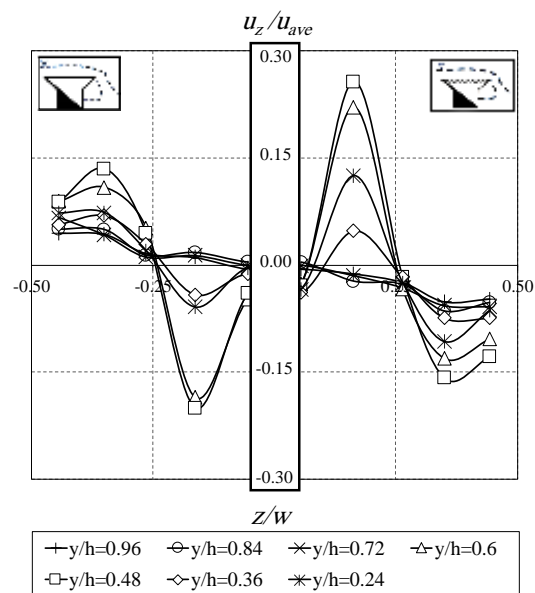
سرعت V_y کاسته می‌شود.

در عمق نسبی $\frac{y}{h} = 0.6$ به نظر می‌رسد، دلیل کاهش ناگهانی سرعت‌های عمودی جریان در عرض-های نسبی $\frac{z}{w} = \pm 0.25$ وجود دماغه در شیروانی کلیدهای خروجی بالادست است که جریان حداکثری رو به بالا را در این عمق نسبی ضعیف کرده و به سمت کلیدهای ورودی سوق داده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق نسبی جریان در $\frac{y}{h} = 0.36, 0.48$ مقادیر مؤلفه سرعت قائم در $\frac{z}{w} = \pm 0.25$ افزایش چشمگیری داشته است. به‌طوری‌که؛ جریان برای عبور از روی تاج بالادست کلیدهای خروجی، مطابق عبور جریان از روی سرریزهای لبه تیز خطی (شکل ۷-c)، رو به بالا حرکت می‌کند. با نزدیک شدن به سطح آب، به دلیل غلبه سرعت‌های طولی و عرضی جریان، از مقادیر سرعت قائم به تدریج کاسته می‌شود؛ و نهایتاً برای مقادیر حداکلی اعماق نسبی (کمتر از $\frac{y}{h} = 0.24$)، مؤلفه سرعت V_y با مقداری منفی، جریان را معکوس کرده و مطابق (شکل ۹) پروفیل سطح آب به سمت پایین حرکت می‌کند. زیگزاگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریزهای کلید پیانویی به‌طور متوسط سبب افزایش ۱۶ درصدی سرعت‌های روبه بالا جریان در محدوده تراز زیر تاج $\frac{y}{h} = 0.36, 0.48$ در محور مرکزی کلیدهای خروجی خواهد شد.

به‌طورکلی، سرعت‌های V_y و V_z جریان‌های ثانویه‌ای را نشان می‌دهند که عمود بر جهت جریان اصلی V_x هستند. این جریان‌های ثانویه با عوامل متعددی مانند: ۱- عدم همخوانی تنش برشی مرزی، ۲- آشفتگی و تلاطم غیریکنواخت، ۳- جریان‌های منحنی‌الشکل و نیروهای گریز از مرکز، تولید و تقویت می‌شوند [25].

($\frac{y}{h} = 0.24, 0.36$)، سبب افزایش همگرایی در کلیدهای ورودی می‌شود. در نتیجه به دلیل مشارکت طول مؤثر بیشتری از تاج جانبی، مطابق (شکل ۹-b و ۱۱) با افزایش اتلاف انرژی در کلیدهای ورودی (افزایش افت تراز آب در محدوده (B))، مقادیر دبی تخلیه در کلیدهای خروجی بیشتر شده و نهایتاً کاهش حد استغراق محلی را در پی دارد.



شکل ۱۲: توزیع نسبی سرعت عرضی $\frac{V_z}{V_{mean}}$ در عمق نسبی جریان y/h و عرض نسبی کانال z/w

در (شکل ۱۳) مشهود است که روند تغییرات مؤلفه عمودی سرعت (V_y) برای اعماق نسبی متناظر در هر دو مدل تاج استاندارد و زیگزاگی، حدوداً یکسان است. برخلاف مقادیر ارائه شده برای مؤلفه‌های سرعت V_z و V_x ، مؤلفه سرعت عمودی در اعماق نسبی $\frac{y}{h} = 0.72, 0.84, 0.96$ به دلیل حرکت روبه بالا و اجباری خطوط جریان متأثر از شیب کلیدهای ورودی سرریز، مقادیر بالایی را از خود نشان می‌دهد؛ اما با کاهش عمق نسبی جریان به علت نیروی روبه جلوی سرعت‌های نزدیک‌شونده، از مقدار مؤلفه عمودی

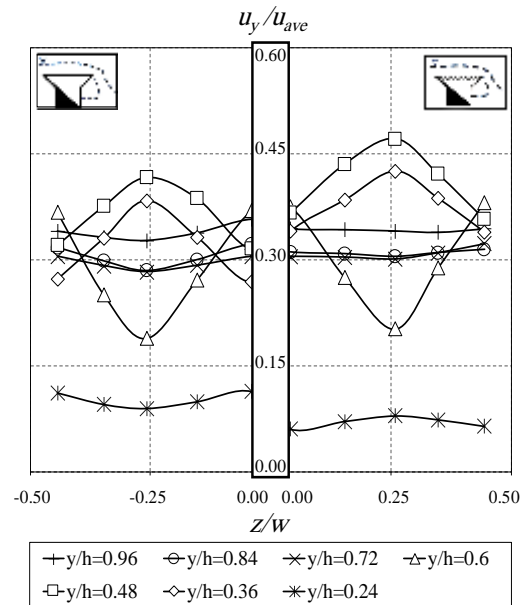
خروجی مشاهده شد. با این حال، آشفتگی جریان برای سرریزهای کلید پیانویی با فرم تاج جانبی زیگزگی، تقریباً ۱۵٪ بالاتر از فرم استاندارد است.

لازم به ذکر است؛ غیریکنواختی و فشردگی خطوط جریان در کلیدهای ورودی و خروجی نشان داده شده در (شکل ۱۰ و ۱۱) باعث ایجاد استغراق موضعی جریان و در نهایت ایجاد تأثیر منفی بر آگذری سرریز می‌شود. از این رو مطابق نتایج ارائه شده؛ زیگزگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریز کلید پیانویی، تپ A، ضمن کاهش تمرکز جریان در مسیر مستقیم، سبب افزایش جریان‌های ثانویه و شدت آشفتگی در بالادست شده و در نهایت ضریب دبی سرریز کلید پیانویی نسبت به مدل تاج استاندارد افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور افزایش ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی تپ A از تغییر فرم هندسی تاج جانبی به شکل زیگزگ سینیوسی استفاده شده است. بررسی مشخصه‌های هیدرولیک جریان، نشانگر مؤثر بودن فرم زیگزگی بر مقدار ضریب دبی جریان عبوری است. به طور خلاصه می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- ۱- با افزایش هد آب روی تاج سرریز، ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی به دلیل استغراق موضعی ایجاد شده، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.
- ۲- با زیگزگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریز کلید پیانویی، بیشینه ضریب دبی در نسبت H/P کمتر اما مقدار عددی بیشتری رخ می‌دهد، به طوری که متوسط مقدار ضریب دبی با افزایش ۱۰ درصدی همراه است.
- ۳- زیگزگی شدن پروفیل تاج جانبی سرریزهای کلید پیانویی، سبب برخورد جت‌های نامتقارن و به مراتب ضعیف‌تر در کلیدهای خروجی می‌شود. از این رو با افزایش ۲۲ درصدی سرعت‌های عرضی جریان V_z



شکل «۱۳»: توزیع نسبی سرعت عمقی $\frac{v_y}{v_{mean}}$ در عمق نسبی جریان y/h و عرض نسبی کانال z/w .

شدت آشفتگی

پارامتر شدت آشفتگی Tv (Turbulent Intensity) به روش ویلکوکس محاسبه شد [26]:

$$T_V = \frac{\sqrt{(V_x + V_y + V_z)^3}}{v} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، Tv شدت آشفتگی و V_x ، V_y ، V_z به ترتیب، نوسانات سرعت نسبت به مؤلفه‌های سرعت متوسط جریان در جهت محور x ، y و z است. جریانات سه‌بعدی، مغشوش و متلاطم که بر اثر برخورد و عبور آب از روی سرریز، سبب جابجایی و نامنظم شدن خطوط جریان نزدیک شونده می‌شود. این نوسانات به صورت جریان گذرا با ساختار چرخشی در بالادست سرریز تشکیل می‌شود. نتایج حاصل از رابطه (۹) نشان داد که آشفتگی جریان در بالادست سرریز کلید پیانویی داری طیف گسترده‌ای از گردابه‌ها با اندازه‌های متفاوت است که به صورت هم‌زمان در این جریان آشفتگی وجود دارد. بالاترین شدت آشفتگی برای هر دو مدل در نزدیکی دیواره‌ها و تکیه‌گاه کلیدهای

عرض کلید ورودی، m	Wi	در تراز ارتفاعی تاج و افزایش ۱۶ درصدی سرعت-
عرض کلید خروجی، m	Wo	های روبه بالا جریان V_y در محدوده تراز زیر تاج در
ارتفاع سرریز، m	P	محور مرکزی کلیدهای خروجی، سبب تقویت
ارتفاع مشخصه سرریز، m	Pm	جریان‌های ثانویه در محدوده تراز تاج سرریز خواهد
هد آب روی تاج سرریز، m	H	شد.
طول مؤثر تاج، m	L	۴- فرم تاج جانبی زیگزاگی با مکش و انحراف بیشتر
ضخامت تاج سرریز، m	T _s	جریان به طرف کلیدهای خروجی نسبت به تاج
سرعت متوسط جریان، m/s	V _{mean}	استاندارد، موجب مشارکت طول مؤثر بیشتری از تاج
سرعت در مختصات دکارتی در جهت	V _{x,y,z}	جانبی شده و با افزایش اتلاف انرژی در کلیدهای
محور مختصات x و y و z، m/s		ورودی (افزایش افت تراز آب در محدوده (B))،
شیب کف کلید ورودی	S _{in}	سبب کاهش ۱۱ درصدی در مقادیر مؤلفه سرعت
شیب کف کلید خروجی	S _{out}	نزدیک‌شونده V_x در کلیدهای ورودی خواهد شد. در
دبی سرریز کلید پیانویی و سرریز لبه	Q _{pkw, w}	نهایت مقادیر دبی تخلیه در کلیدهای خروجی بیشتر
تیز، $kg/m \cdot s^2$		شده و افزایش حد استغراق موضعی در سرریزهای
شتاب ثقل گرانش، m/s^2	g	کلید پیانویی رخ خواهد داد. به طوری که تخلیه از تاج
ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و	C _d	جانبی سرریزهای کلید پیانویی به طور مستقیم تابعی
سرریز لبه تیز		از سرعت‌های نزدیک‌شونده V_x است.
شدت آشفتگی جریان	T _v	۵- شدت آشفتگی جریان بالادست سرریزهای کلید
عدد فرود	Fr	پیانویی در محدوده دیواره کانال و دو جناح
عدد رینولدز	Re	کلیدهای خروجی دارای مقادیر حداکثری خود
عدد ویر	We	است. مقادیر T_v در فرم زیگزاگی پروفیل تاج
		جانبی، به طور متوسط ۱۵٪ بیشتر از فرم استاندارد
		سرریز کلید پیانویی تیپ A به دست آمده است.
علائم یونانی		
چگالی، kg/m^3	ρ	
لزجت دینامیکی، kg/ms	μ	فهرست علائم
کشش سطحی، kg/ms^2	σ	
زیر نویس		
به ترتیب مشخصه کلیدهای ورودی و	i, o	B طول هر کلید، m
خروجی		Bi طول کلید ورودی، m
		Bo طول کلید خروجی، m
		W عرض کانال، m
		Wu عرض یک سیکل، m

مراجع

- Anderson, R. M., and B. P. Tullis., "Piano key weir hydraulics and labyrinth weir

- comparison", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.139, No. 3: 246-253, (2012).Vol. , No , pp. (Year).
2. Dabling, M. R., and B. P. Tullis., "Piano key weir submergence in channel applications", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 7: 661-666, (2012).
 3. Machiels, Olivier, Sebastien Erpicum, Pierre Archambeau, Benjamin Dewals, and Michel Pirotton., "Parapet wall effect on piano key weir efficiency", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.139, No. 6: 506-511, (2012).
 4. Hien, T. Chi, H. Thanh Son, and M. Ho Ta Khanh., "Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam", In Processing of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain, (2006).
 5. Laugier, F., J. Pralong, and B. Blancher., "Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity", In Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW, pp. 159-165, (2011).
 6. Machiels, Olivier., "Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs", PhD diss., Université de Liège, Belgium, (2012).
 7. Lempérière, F., "New Labyrinth weirs triple the spillways discharge–Data for an easy design of PK Weir", Available online on www. hydrocoop. Org, (2009).
 8. Leite Ribeiro, M., J-L. Boillat, Anton Schleiss, F. Laugier, and C. Albalat., "Rehabilitation of St-Marc Dam Experimental Optimization of a Piano Key Weir", In Proceedings of the 32nd Congress of IAHR, No. CONF, (2007).
 9. Leite Ribeiro, Marcelo, M. Bieri, J-L. Boillat, A. J. Schleiss, G. Singhal, and N. Sharma., "Discharge capacity of piano key weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.138, No. 2: 199-203, (2011).
 10. Kabiri-Samani, Abdorreza, and Amir Javaheri., "Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1: 114-120, (2012).
 11. Ribeiro, Marcelo Leite, Michael Pfister, Anton J. Schleiss, and Jean-Louis Boillat., "Hydraulic design of A-type piano key weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.50, No. 4: 400-408, (2012).
 12. Cicero, G. M., J. R. Delisle, V. Lefebvre, and J. Vermeulen., "Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key weir", *Labyrinth and Piano Key Weirs II*: 265-272, (2013).
 13. Mehboudi, A., J. Attari, and A. Hosseini., "Flow regimes over trapezoidal piano key weirs", In *Labyrinth and Piano Key Weirs III: Proceedings of the 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW)*, Qui Nhon, Vietnam, p. 65. CRC Press, (2017).
 14. Guo, Xinlei, Zhiping Liu, Tao Wang, Hui Fu, Jiazhen Li, Qingfu Xia, and Yongxin Guo., "Discharge capacity evaluation and hydraulic design of a piano key weir", *Water Supply*, Vol. 19, No. 3: 871-878, (2019).

15. Kumar, Munish, Parveen Sihag, N. K. Tiwari, and Subodh Ranjan., "Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs", *Applied Water Science*, Vol. 10, No. 1: 1-9, (2020).
16. Azamathulla, Hazi Mohammad, Amir Hamzeh Haghiabi, and Abbas Parsaie., "Prediction of side weir discharge coefficient by support vector machine technique", *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol.16, No. 4: 1002-1016, (2016).
17. Mehri, Yaser, Jaber Soltani, and Morteza Khashehchi., "Predicting the coefficient of discharge for piano key side weirs using GMDH and DGMDH techniques", *Flow Measurement and Instrumentation* 65: 1-6, (2019).
18. Kumar, Binit, Subhojit Kadia, and Zulfeqar Ahmad., "Evaluation of discharge equations of the Piano Key Weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, 101577, (2019).
19. Safarzadeh, Akbar, and Behzad Noroozi., "3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways", *International Journal of Civil Engineering*, Vol.15, No. 1: 89-101, (2017).
20. Henderson, F. M., "Open Channel Flow", Macmillan, New York, (1966).
21. Swamee, Prabhata K., "Generalized rectangular weir equations", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114.NO.8, 945-949, (1988).
22. Novák, Pavel, and Jaroslav Cabelka., "Models in hydraulic engineering; physical principles and design applications", Pitman Advanced Publishing Program, (1981).
23. Machiels, Olivier, Michel Piroton, Archambeau Pierre, Benjamin Dewals, and Sébastien Erpicum., "Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 52, No. 3: 326-335, (2014).
24. Rajaratnam, N., and D. Muralidhar., "Pressure and velocity distribution for sharp-crested weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 9, No. 2: 241-248, (1971).
25. Chanson, Hubert., "Hydraulics of open channel flow", Elsevier, (2004).
26. Wilcox, David C., "Turbulence modeling for CFD", Vol. 2. La Canada, CA: DCW industries, (1998).