

## بررسی استهلاك انرژی جریان گذرنده از روی سرریز کلید پیانویی با کلید خروجی مانع‌دار

سیدمحسن سجادی\*، جواد احدیان و محبوبه قنواتی\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. تلفن: ۰۶۱(۳۳۳۳۰۰۱۱)،

پيام‌نگار: sajjadi.mohsen@gmail.com

\*\* به‌ترتیب: استادیار؛ دانشیار؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۶

### چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جدیدترین نوع سرریزهای تاج‌طولانی هستند که نسبت به سرریزهای زیگزاگی طول تاج بیشتری را در همان عرض به‌دست می‌دهند و از این‌رو ظرفیت تخلیه را بالاتر می‌برند. استفاده از موانع در خروجی سرریزهای کلیدپیانویی با هدف افزایش میزان استهلاك انرژی در آنها روشی است که تاکنون کمتر به آن توجه شده است. سرریزهای کلیدپیانویی در تاج سدهای مخزنی و همچنین در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد دارند و این پژوهش به‌علت اهمیت موضوع استهلاك انرژی در این نوع سازه‌ها اجرا شده است. در این تحقیق برای بررسی اثر آرایش موانع بر میزان استهلاك انرژی سازه، پس از شناخت پارامترهای مؤثر، مدل‌های فیزیکی از موانع در دو آرایش مختلف (N) ساخته شد. موانع با دو آرایش  $N_1$  (ردیف‌های ۳ تایی و ۲ تایی که به‌صورت زیگزاگی قرار گرفته‌اند) و  $N_2$  (ردیف‌های ۲ تایی) در کلید خروجی سرریز قرار گرفتند. همچنین ۲۷ آزمایش در محدوده دبی ۱۳۵-۵ لیتر بر ثانیه اجرا شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دبی، میزان استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. همچنین میزان استهلاك انرژی در آرایش (۲-۳) به اندازه ۱/۱۶ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در آرایش (۲-۳) و به اندازه ۸/۶۱ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در مدل بدون موانع است. روند تغییرات ضریب تخلیه جریان نیز در این نوع سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. به این‌صورت که حداکثر ضریب دبی با استفاده از روش تئوری، برابر ۰/۶۳+ و با استفاده از روش انتگرالی، برابر ۲/۵۴ برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی است.

### واژه‌های کلیدی

استهلاك انرژی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب تخلیه جریان، کلید خروجی

### مقدمه

اندازه‌گیری دبی و کنترل جریان از این سازه‌ها استفاده می‌شوند. در مهندسی هیدرولیک، سازه‌هایی از قبیل حوضچه‌های آرامش<sup>۱</sup>، کف‌های مانع‌دار<sup>۲</sup> و شفت‌های گردابه‌ای<sup>۳</sup> تحت عنوان مستهلک‌کننده‌های انرژی<sup>۴</sup> بررسی می‌شوند. وظیفه اصلی این نوع سازه‌ها، مستهلک کردن انرژی جنبشی اضافی جریان است. یکی از مشخصه‌های

سرریزها از ساده‌ترین و در عین حال پرکاربردترین سازه‌های هیدرولیکی در سیستم‌های آبیاری و زهکشی هستند. به‌طور کلی، سرریزها در سدها به‌منظور عبور آب اضافی ناشی از سیلاب و کنترل سطح آب مخزن سد اما در کانال‌های آبیاری و زهکشی جهت تنظیم سطح آب،

1- Stilling Basins  
3- Vortex Shafts

2- Baffled Aprons  
4- Energy Dissipators

طرح هندسی پلان سرریز زیگزاگی نوع مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی پرداختند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که شکل قوسی دماغه سرریز همگام با واگرایی بیشتر کانال پایین دست سرریز منجر به افزایش کارایی هیدرولیکی سرریز می‌شود. اندرسون و تالیس (Anderson & Tullis, 2012) با بررسی هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیانویی و مقایسه آنها با هم به این نتایج دست یافتند: ضریب دبی سرریز با افزایش  $\frac{W_i}{W_0}$  افزایش می‌یابد؛ اثر شیروانی‌ها بر راندمان سرریز به مراتب بیشتر است تا اثر شیب کلیدها؛ اثر شیروانی‌های بالادست به مراتب بیشتر از اثر شیروانی‌های پایین دست است. بیری و همکاران (Bieri et al., 2009) راه‌حل‌های مختلف افزایش ظرفیت تخلیه سد گلوپیتز<sup>۱</sup> را با استفاده از مدلسازی فیزیکی مطالعه و تفاوت در ظرفیت تخلیه سرریزهای زیگزاگی و کلیدپیانویی را بررسی کردند. تحقیقات نشان داد که سرریز کلیدپیانویی در مقایسه با سرریز زیگزاگی ظرفیت تخلیه بیشتری دارد.

لمپرییر و اومان (Lempèrière & Ouamane, 2003) ساختار سرریز کلیدپیانویی، امکان افزایش استهلاک انرژی جریان در پنجه سد و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش پایین دست آن را مطالعه کردند. برای این کار از چندین مدل فیزیکی با کف زبر به شکل‌های مختلف برای وجه پایین دست سد مخزنی به این صورت استفاده شد: سطح شیب‌دار صاف، سطح شیب‌دار پلکانی (دوبعدی)، سطح شیب‌دار سه‌بعدی منظم، سطح شیب‌دار پلکانی با موانعی که به صورت منظم روی پله‌ها قرار داشتند (نامنظم سه‌بعدی). تحقیقات نشان داد که سرریز کلیدپیانویی همراه با سرریز پلکانی تنها برای استفاده در سدهای متوسط تا بلند و فقط برای بخش پایینی سد مفید خواهد بود. شکل‌های پیچیده‌تر (سه‌بعدی)، اتلاف انرژی جریان را چندان افزایش نمی‌دهند و حتی ممکن است مقداری خطا ایجاد کنند. ارپیکم و میشلز (Erpicum & Machiels, 2004) به

مهمی که در سرریزهای کلیدپیانویی تاکنون کمتر به آن پرداخته شده، استهلاک انرژی است. مطالعات اولیه نشان داده است که این سرریزها در بارهای هیدرولیکی کم، عملکرد بسیار مطلوبی دارند و با هوادهی کامل جریان، احتمال وقوع کاویتاسیون را کاهش می‌دهد و از فرسایش جلوگیری می‌کند. با این همه، با افزایش بار هیدرولیکی این مزیت از بین می‌رود و به دلیل تداخل تیغه‌های جریان عبوری، از عملکرد سرریز کاسته می‌شود و در نتیجه افت انرژی افزایش می‌یابد (Yarmohammadi, 2015). با توجه به این ویژگی، بررسی و تجزیه و تحلیل استهلاک انرژی جریان روی سرریز کلیدپیانویی هدف اصلی مطالعه حاضر است. در این راستا، با تعبیه مانع در کلید خروجی سرریز، با هدف تداخل تیغه‌های جریان و اختلاط هوا و آب در خروجی، می‌توان هدف افزایش استهلاک انرژی را دنبال کرد. ضمن اینکه با استفاده از سرریز کلیدپیانویی در تاج سدهای مخزنی، علاوه بر افزایش ظرفیت مخزن و همچنین افزایش ضریب گذردهی جریان، می‌توان به این صورت اتلاف انرژی را افزایش داد و با کاستن از ابعاد سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین دست سد، مانند حوضچه‌های آرامش، به اقتصاد طرح کمک کرد.

یکی از روش‌ها برای مستهلک کردن انرژی جریان، کاربرد مانع یا زبری در ساختار سرریز است. در خصوص کاربرد مانع و یا بلوک، آزمایش‌ها و نتایج بررسی‌های سازمان احیای اراضی آمریکا نشان داده است که با به کار بردن بلوک با ابعاد زیاد که باعث جداشدگی جت عبوری جریان و در نتیجه تلاطم می‌گردد، می‌توان به طور مؤثری انرژی جنبشی جریان را مستهلک کرد (Akbariyan, 2009). از طرفی، قراردادن زبری روی خروجی سرریز از نظر رفتار هیدرولیکی جریان شبیه به سرریزهای پلکانی در حالت جریان غیرریزشی است (Katourani, 2012). ذوالفقاری و همکاران (Zolfaghari et al., 2004) از طریق تغییر فرم دماغه سرریز به شکل قوسی از دایره، به اصلاح

### مواد و روش‌ها

این آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب تهران در فلومی به طول ۱۳ ارتفاع ۲ و عرض ۰/۹ متر و در نه دبی در محدوده ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه اجرا شد. فلوم در فاصله ۲/۵ تا ۳/۵ متر از ابتدا از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شد تا رفتار جریان مشاهده شود. این قسمت از فلوم دارای اسکلت فلزی و عموماً از نبشی و قوطی ساخته شده و بقیه قسمت‌ها سیمانی است. در بخش ورودی لوله تغذیه‌کننده فلوم، شیر فلکه کنترل دبی جریان وجود دارد و در انتهای فلوم مخزنی برای تخلیه جریان از فلوم تعبیه شده است. علاوه بر این، برای تخلیه سریع‌تر و کامل فلوم از چند شیر خروجی واقع در کف فلوم استفاده گردید. فلوم به‌نحوی طراحی شده است که یک سیستم بسته جریان آب دارد؛ آب پس از ورود به مخزن فلوم و طی کردن طول آن از انتهای آن وارد مخزن آزمایشگاه می‌شود.

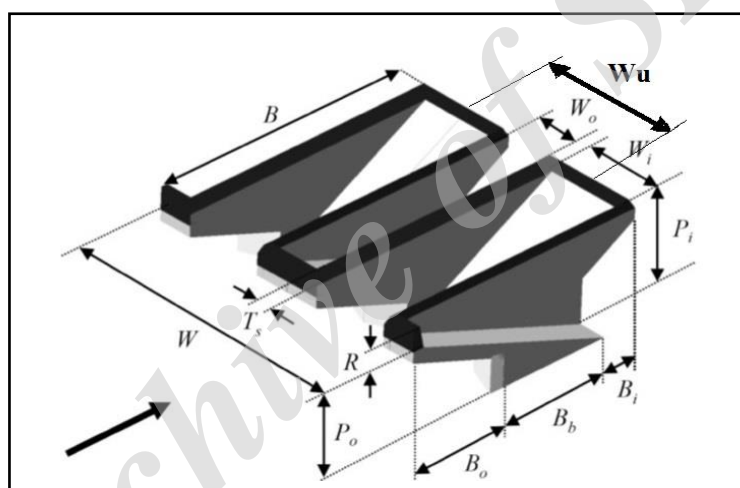
در این تحقیق دبی جریان با سرریز مستطیلی و لیمنومتر مستقر در انتهای فلوم اندازه‌گیری شد. برای آرام کردن جریان ورودی در ابتدای فلوم از مقداری پوشال استفاده شد. شیب مجرای فلوم آزمایشگاه نیز برابر صفر تنظیم. مدل سرریز کلیدپیانویی مورد نظر از جنس پلکسی گلاس به ضخامت یک سانتی‌متر ساخته شد. همچنین، با توجه به عرض کلید خروجی موانع به ضخامت ۴ سانتی‌متر از جنس چوب ساخته شدند که برای همه مدل‌ها این ضخامت یکسان در نظر گرفته شد. جدول ۱، ابعاد سرریز کلیدپیانویی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در این تحقیق مدل‌های فیزیکی در دو آرایش به‌صورت ضربدری ( $N_1=3-2$  و  $N_2=2-2$ ) ساخته شدند. در شکل ۲، چیدمان موانع به‌کار رفته نشان داده شده است. با اجرای ۲۷ آزمایش با دبی‌های ۵، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۶۵، ۸۰، ۹۵، ۱۲۰ و ۱۳۵ لیتر بر ثانیه، میزان استهلاک انرژی سازه در سرریز کلیدپیانویی با کلید

(2011) میزان استهلاک انرژی را در دو هندسه متفاوت از سرریز کلید پیانویی و یک سرریز اوجی مقایسه کردند و هر یک از سرریزها را از پایین‌دست، به یک سرریز پلکانی و از بالادست به یک مخزن آزمایشگاهی وصل کردند. در هر دو سرریز کلیدپیانویی نسبت ابعاد هندسی تقریباً یکسان بود با این تفاوت که ابعاد  $PKW_2$  حدوداً ۱/۶ برابر کوچک‌تر از ابعاد  $PKW_1$  بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که میزان استهلاک انرژی در طول سازه برای هر سه نوع سرریز تقریباً برابر است. ولی به‌ازای دبی‌های مخصوص یکسان، بسته به نوع سرریز، تفاوت‌های معنی‌داری در جریان بالادست سرریز پلکانی مشاهده شد. از طرفی، در سرریزهای کلیدپیانویی، نسبت به سرریز اوجی، استهلاک انرژی مؤثر سریع‌تری وجود دارد. منصوری و احدیان (Mansouri & Ahadiyan, 2015)، با استفاده از دو مدل سرریز کلیدپیانویی احتمال انسداد سرریزهای کلیدپیانویی را در حالت با و بدون دیواره سپری بررسی کردند. روی سرریز، دیواره سپری با سه ارتفاع متفاوت قرار گرفت. به این‌صورت که آزمایش‌ها یک بار در حالت وجود دیواره سپری و یک بار نیز در حالت نبود دیواره سپری انجام گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در هر دو آزمایش انفرادی و تجمعی در هر دو مدل، افزایش احتمال انسداد، باعث افزایش سطح ارتفاع آب بالادست سرریز و کاهش ضریب تخلیه در یک دبی ثابت می‌شود. وجود دیواره سپری تا حدی باعث افزایش احتمال انسداد می‌شود. اخیراً قنواتی و همکاران (Qanavati et al., 2016) اثر ارتفاع موانع قرار گرفته در کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی را بر میزان تغییرات استهلاک انرژی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع موانع میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دبی میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. در مطالعه حاضر، اثر آرایش متفاوت موانع بر میزان استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با کلید خروجی مانع‌دار بررسی شده است.

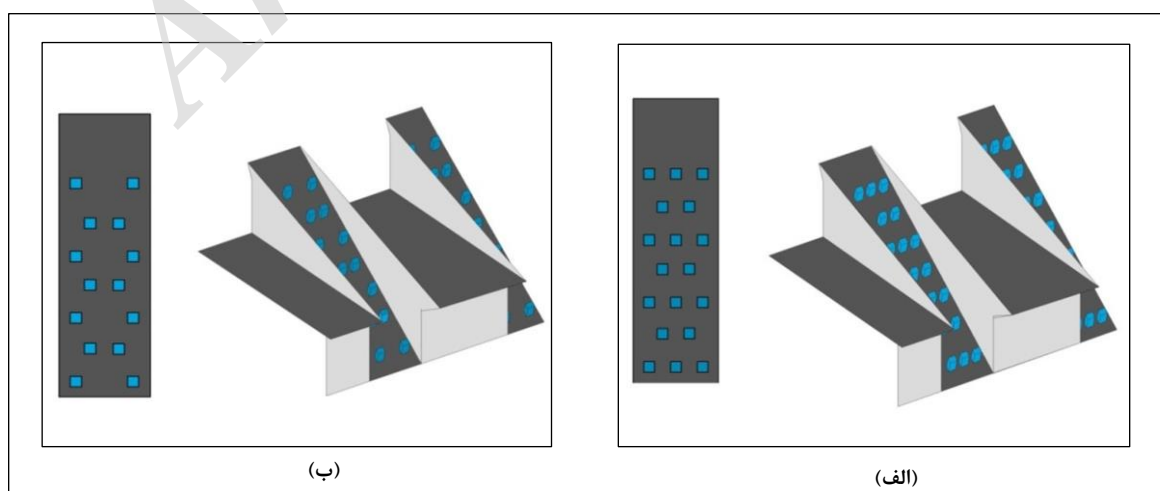
خروجی مانع‌دار و همچنین ضریب دبی سرریز، بررسی شد. پس از ساخته شدن مدل اصلی و نصب آن در فلوم آزمایشگاهی، ابتدا آزمایش‌ها در محدوده دبی تعریف شده در حالت بدون موانع (آزمایش‌های شاهد)، اجرا شد؛ در شرایط جریان ماندگار، پارامترهای مختلف جریان از جمله عمق جریان بالادست و پای سرریز اندازه‌گیری و سپس آزمایش‌های مربوط به پایه‌ها (در دو آرایش متفاوت) اجرا گردید. در شکل زیر پارامترهای سرریز کلیدی پیاپی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

جدول ۱- ابعاد سرریز مورد استفاده در این تحقیق (سانتی‌متر)

P	$B_i=B_o$	$B_b$	B	$T_s$	$W_u$	$W_o$	$W_i$	W
(ارتفاع سرریز)	(طول شیروانی بالادست و پایین دست سرریز)	(طول پی سرریز)	(طول بالادست تا پایین دست سرریز)	(ضخامت صفحه پلگسی گلاس)	(عرض یک سیکل)	(عرض کلید خروجی)	(عرض کلید ورودی)	(عرض فلوم آزمایشگاهی)
۷۴	۱۹/۵	۴۴/۳	۸۳/۳	۱/۰۰	۵۵/۲	۲۱/۴	۳۱/۸	۹۰



شکل ۱- نمای سه‌بعدی سرریز کلیدی پیاپی و پارامترهای اصلی هندسه آن (Ribeiro et al., 2012)



شکل ۲- نمایش قرارگیری موانع در کلید خروجی سرریز کلیدی پیاپی (الف) آرایش (۲ و ۳) و (ب) آرایش (۲ و ۲)

بررسی استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز...

$$F(W_i, W_o, W_u, W, B, B_i, B_o, Q, H_r, H_s, y_c, H, \sigma, \rho, \mu, P, L, L_o, g, \frac{\Delta E}{E_o}) = 0 \quad (5)$$

که در آن،

$W_i$  = عرض کلید ورودی؛  $W_o$  = عرض کلید خروجی؛  
 $W_u$  = عرض یک سیکل؛  $W$  = عرض فلوم آزمایشگاهی؛  
 $B$  = طول بالادست تا پایین دست سرریز؛  $B_i$  = طول  
 شیروانی پایین دست؛  $B_o$  = طول شیروانی بالادست؛  
 $Q$  = دبی جریان؛  $H_r$  = عمق آب پای سرریز؛  $H_s$  = ارتفاع  
 تیغه آب روی نوک سرریز؛  $y_c$  = عمق بحرانی جریان؛  
 $H$  = ارتفاع تیغه آب روی سرریز؛  $\sigma$  = کشش سطحی آب؛  
 $\rho$  = جرم واحد حجم آب؛  $\mu$  = لزجت دینامیکی آب؛  
 $P$  = ارتفاع سرریز؛  $L$  = طول تاج سرریز؛  $L_o$  = طول کلید  
 خروجی سرریز؛  $g$  = شتاب ثقل و  $\frac{\Delta E}{E_o}$  = پارامتر استهلاک  
 انرژی جریان. با استفاده از تئوری  $\Pi$  باکینگهام، رابطه ۵  
 می تواند به صورت اعداد بدون بعد زیر توضیح  
 داده شود (رابطه ۶):

$$f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{y_c}{H}, \frac{\Delta E}{E_o}, We, Re\right) = 0 \quad (6)$$

با توجه به ثابت بودن ابعاد هندسی سرریز، پارامترهای  
 $W_i, W_o, W_u, W, B, B_o, B_i$  حذف می شوند. همچنین،  
 پارامتر  $Re = \rho v l / \mu$  عدد رینالدز پایین دست است و در  
 محدوده اجرای آزمایش های این تحقیق بیشتر از ۲۰۰۰  
 است و بنابراین جریان در محدوده آشفته خواهد بود و  
 می توان از عدد رینالدز صرف نظر کرد (Chow, 1959). پس  
 از تحلیل ابعادی و استفاده از تئوری  $\Pi$  باکینگهام و با  
 توجه به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مذکور، افت  
 انرژی نسبی و ضریب تخلیه جریان به صورت تابعی از  
 پارامترهای بی بعد، مطابق رابطه های ۷ و ۸ خواهد بود  
 (Afzalian, 2014):

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_o} = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{y_c}{H}, We\right) = 0 \quad (7)$$

در این تحقیق، میزان انرژی جریان در بالادست سرریز  
 از رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$E_o = y_o + \frac{V_o^2}{2g} \quad (1)$$

که در آن،

$E_o$  = انرژی کل جریان در بالادست سرریز،  $y_o$  = عمق  
 بالادست سرریز "که با نوار مدرج در فاصله ای مناسب  
 (حدود سه تا چهار برابر ارتفاع تیغه آب روی سرریز) از  
 بالادست سرریز برداشت شده است"؛  $v_o$  = سرعت متوسط  
 در این مقطع که با استفاده از رابطه پیوستگی محاسبه  
 می شود. فاکتور اصلاحی انرژی جنبشی ( $\alpha$ ) نیز برابر واحد  
 فرض شده است. پس از تعیین مقدار  $y_1$ ، انرژی پای سرریز  
 از رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2)$$

که در آن،

$E_1$  = انرژی جریان در پای سرریز؛  $y_1$  = عمق جریان در  
 پای سرریز؛ و  $v_1$  = سرعت متوسط در این مقطع. مقدار  
 افت انرژی و افت نسبی انرژی به صورت روابط ۳ و ۴  
 محاسبه می شوند (Rahmanshahi-Zahabi, 2012):

$$\Delta E = E_o - E_1 \quad (3)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_o} = \frac{E_o - E_1}{E_o} \quad (4)$$

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا  
 پارامترهای مؤثر در استهلاک انرژی سرریز استخراج شدند  
 و پس از آن با تجزیه و تحلیل ابعادی روابط کلی شامل  
 پارامترهای بدون بعد استخراج گردیدند. پارامترهای مؤثر  
 در این آزمایش ها به شرح زیرند (رابطه ۵):

به دلیل افقی بودن پروفیل سطح آب روی سرریز و نیز تداخل نداشتن تیغه‌های عبوری، دبی به دست آمده از معادلات فوق محافظه کارانه است و از این رو باید در ضریب اصلاحی، که در واقع همان ضریب تخلیه جریان در معادلات عمومی سرریزهاست، ضرب شود تا مقدار دبی واقعی جریان<sup>۱</sup> ( $Q_a$ ) به دست آید ( $Q_a = Q_{tr} \cdot C_{DS}$ ) (Afzalian, 2014).

$$C_{DPKW} = f_2 \left( \frac{H_t}{P}, We \right) \quad (8)$$

همچنین ضریب دبی در تحقیق حاضر به دو روش زیر محاسبه می‌شود:

- روش معادله عمومی سرریزها (رابطه ۹)

$$Q = \frac{2}{3} C_{DS} L \sqrt{2gH_t^3} \quad (9)$$

که در آن،

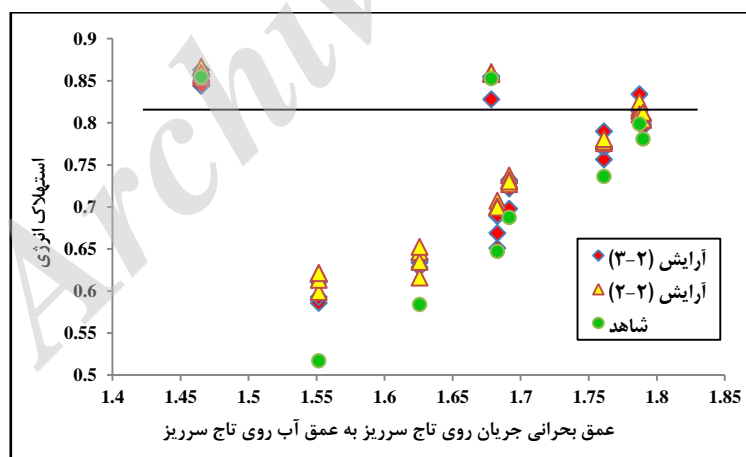
$Q$  = دبی جریان؛  $L$  = طول تاج سرریز؛  
 $H_t$  = ارتفاع آب روی سرریز به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی؛  $g$  = شتاب ثقل زمین؛  
 $C_{DS}$  = ضریب دبی تعریف شده برای اثر موانع؛ و  $n$  = تعداد سیکل (Afzalian, 2014).

- روش انتگرالی (رابطه ۱۰)

$$Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (n W_i) H_t^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (n W_o) H_t^{1.5} + \frac{4}{15} \sqrt{2g} (2n) (B H_t^{2.5}) \quad (10)$$

### نتایج و بحث

در شکل ۳، تغییرات استهلاك انرژی در برابر پارامتر بی بعد  $y/H$  برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد رسم شده است. کلیه بخش‌های این شکل مربوط به آزمایش‌های مورد نظر برای ۹ دبی ۵، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۶۵، ۸۰، ۹۵، ۱۲۰ و ۱۳۵ لیتر بر ثانیه برای مدل‌های ساخته شده است. یادآوری می‌شود که پارامتر  $H$ ، ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز است.



شکل ۳- تغییرات استهلاك نسبی انرژی -  $y/H$ . اختلاف استهلاك انرژی برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

دبی‌های پایین در محدوده ۵۰-۵ لیتر بر ثانیه، موانع مورد نظر تأثیر چندانی بر میزان استهلاك نسبی انرژی ندارند. ولی پس از آن برای دبی بزرگ‌تر از ۵۰ لیتر بر ثانیه، مقدار استهلاك انرژی در حالت وجود موانع نسبت به مدل شاهد افزایش می‌یابد. در واقع در دبی‌های پایین، به دلیل تأثیر

همان‌گونه که از شکل ۳ برمی‌آید، میزان استهلاك انرژی در مدل‌های با موانع بیشتر از میزان استهلاك انرژی در مدل شاهد است. به عبارتی دیگر در دبی یکسان، وجود موانع در کلید خروجی می‌تواند بر شدت استهلاك انرژی در سرریز کلیدپیانویی بیفزاید. با توجه به این شکل، در

۱- این دبی در واقع همان دبی آزمایشگاهی است.

نتیجه کاهش استهلاک نسبی انرژی جریان می‌شود. در حالی که در آرایش (۲-۲)، منطقه جدایی روی ردیف‌های اول موانع کوچکترند و این امر خود باعث درگیری بیشتر موانع پایین دست با جریان و افزایش نیروی درگ فشاری می‌شود که نتیجه این امر افزایش مقدار استهلاک نسبی انرژی جریان است. همچنین مشاهده می‌گردد که به ازای مقادیر پایین  $y_c/H$  در محدوده  $1/46-1/78$  (در این حالت محدوده دبی جریان  $50-5$  لیتر بر ثانیه است)، با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود. با افزایش نسبت  $y_c/H$ ،  $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ ، که در واقع همان افزایش دبی است، در یک مدل خاص و به دنبال آن افزایش سرعت جریان، نقطه جدایی روی سطح مانع دیرتر اتفاق می‌افتد. به عبارتی دیگر، با افزایش سرعت جریان و به تبع آن افزایش عدد فرود، شتاب جریان افزایش می‌یابد و نقطه جدایی جریان مسیر بیشتری طی می‌کند. در نتیجه، نقطه جدایی روی سطح مانع دیرتر اتفاق می‌افتد و منطقه جداشدگی تشکیل شده کوچک‌تر است. بنابراین، منطقه جداشدگی تشکیل شده کوچک‌تر می‌شود و نیروی درگ فشاری و یا نیروی درگ کل (عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی) کاهش می‌یابد و استهلاک انرژی کمتر می‌شود. پیشتر گفته شد که در این محدوده دبی، مقدار استهلاک انرژی به دلیل تأثیر کشش سطحی و تداخل تیغه‌های جریان، واقعی نیست. در این حالت به دلیل کم بودن انرژی جریان، امکان تشکیل پرش هیدرولیکی وجود ندارد، جریان را ناپایدار می‌کند، و استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. بنابراین، در این حالت با دور شدن جریان از حالت بحرانی، مقدار عمق جریان  $H$  از مقدار عمق بحرانی  $Y_c$  فاصله می‌گیرد و میزان استهلاک انرژی برای مدل شاهد، مدل با آرایش (۲-۲)، و مدل با آرایش (۲-۲) به ترتیب  $8/23$ ،  $8/14$ ، و  $6/97$  درصد کاهش می‌یابد. پس از آن به ازای دبی در محدوده  $135-50$  لیتر بر ثانیه، با نزدیک شدن جریان به حالت بحرانی، مقدار عمق جریان  $H$

کشش سطحی، جریان کاملاً با موانع در تماس است و موانع نمی‌توانند تأثیر چندانی بر شرایط جریان در پای سرریز داشته باشند یا به عبارتی دیگر، عمق و یا سرعت جریان پای سرریز را نمی‌توانند تغییر دهند. ولی در دبی‌های بالا، اثر اصطکاک مرزها بر جریان کمتر می‌شود و استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. یادآوری می‌شود که با توجه به نوع سرریز مورد استفاده در تحقیق حاضر (کلیدپیانویی)، طول تاج آن نسبت به سرریزهای خطی بسیار بیشتر از عرض فلوم است و به تبع آن عمق آب ایجاد شده روی سرریز کاهش می‌یابد. در حالی که  $y_c$  در اینجا با فرض سرریز خطی در عرض مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین عمق آب خطی را به ما نشان می‌دهد ولی مقدار  $H$  مربوط به سرریز غیر خطی است. در واقع مقادیر بالای نسبت  $y_c/H$  به همین دلیل است. همچنین، میزان استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۲-۲) بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۳-۲) است. بنابراین در دبی یکسان، تفاوت در آرایش موانع باعث ایجاد تفاوت در میزان استهلاک انرژی می‌شود. می‌توان گفت که در آرایش (۲-۳)، به دلیل فاصله کمتر موانع، تداخل تیغه‌های جریان بیشتر شده و در نتیجه ورود هوا نیز بیشتر است.

ورود هوا در لایه مرزی باعث کاهش تنش برشی بین لایه‌های جریان می‌شود و نیروی برشی حاصل کاهش می‌یابد که نتیجه این امر کاهش مقدار استهلاک نسبی جریان است. همچنین، قرارگیری موانع در آرایش (۲-۳) به گونه‌ای است که برخورد جریان با ردیف‌های اول موانع منطقه جدایی بسیار بزرگی تشکیل می‌دهد و این امر باعث می‌شود که جدایی جریان روی موانع پایین دست دیرتر اتفاق بیفتد یا اصلاً اتفاق نیفتد (یعنی موانع پایین دست درگیری کمتری با جریان داشته باشند). نتیجه این امر کاهش ابعاد منطقه جدایی روی موانع پایین دست کلید خروجی است و بنابراین باعث کاهش مقدار نیروی درگ فشاری (عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی) و در

است و نشان‌دهنده این است که در عمق بحرانی و عمق آب یکسان روی تاج سرریز، موانع نصب شده، میزان استهلاک انرژی را نسبت به مدل بدون موانع افزایش داده‌است؛ از طرفی، با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، میزان استهلاک انرژی در آرایش (۲-۲) بیشتر از میزان استهلاک انرژی در آرایش (۳-۲) است. در جدول ۲ مقادیر استهلاک انرژی در برابر پارامتر بی‌بعد  $y_e/H$  برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد نمایش داده شده است.

به مقدار عمق بحرانی  $y_e$  می‌رسد و شرایط برای تشکیل پرش هیدرولیکی فراهم می‌گردد. به‌همین دلیل مقدار  $y_e/H$  کاهش می‌یابد و از  $1/78$  به  $1/55$  می‌رسد. با کاهش این نسبت، مقدار استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد. در این حالت نیز میزان استهلاک انرژی برای مدل شاهد،  $34/61$  درصد، برای مدل با آرایش (۳-۲)،  $26/58$  درصد و برای مدل با آرایش (۲-۲)،  $26/25$  درصد کاهش می‌یابد. با مشاهده نمودار و این مقادیر، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۲-۲) کمتر

جدول ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر نسبت  $y_e/H$  برای آرایش متفاوت موانع

مدل	Q (lit/s)	$y_e/H$	$\Delta E/E_0$	درصد کاهش استهلاک انرژی
شاهد	۵ - ۵۰	$1/46 - 1/78$	$0/85 - 0/78$	۴۰
	۵۰ - ۱۳۵	$1/78 - 1/55$	$0/78 - 0/51$	
آرایش (۳-۲)	۵ - ۵۰	$1/46 - 1/78$	$0/86 - 0/79$	۳۲/۵۵
	۵۰ - ۱۳۵	$1/78 - 1/55$	$0/79 - 0/58$	
آرایش (۲-۲)	۵ - ۵۰	$1/46 - 1/78$	$0/86 - 0/80$	۳۱/۳۹
	۵۰ - ۱۳۵	$1/78 - 1/55$	$0/80 - 0/59$	

عدد وبر از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$We = \frac{\rho V^2 H_s}{\sigma} \quad (11)$$

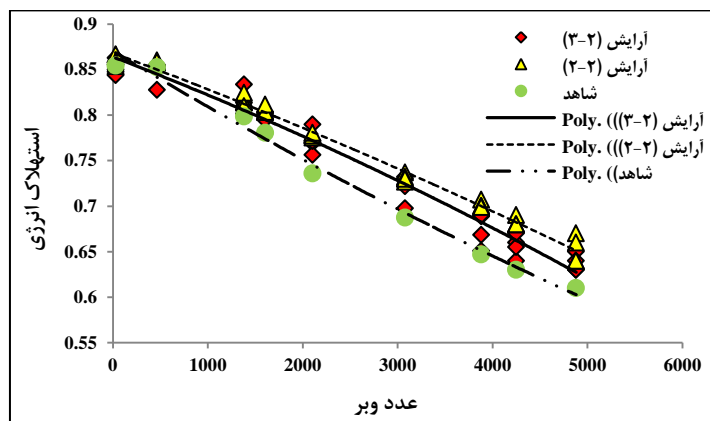
که در آن،

$\rho$  = چگالی آب؛  $\sigma$  = کشش سطحی؛  $H_s$  = ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز؛ و  $V$  = سرعت جریان روی تاج سرریز. دمای متوسط آب ۲۰ درجه سلسیوس و کشش سطحی در حدود  $0/074$  نیوتن بر متر اعمال شد. گفتنی است که اگر عمق آب روی سرریز بیشتر از ۵ سانتی‌متر باشد، می‌توان از تاثیرات عدد وبر صرف‌نظر کرد. در این بخش به بررسی محدوده مؤثر عدد وبر بر میزان استهلاک انرژی در آزمایش‌های تحقیق حاضر پرداخته می‌شود. در شکل ۴، تغییرات استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد رسم شده است.

با توجه به این جدول، میزان استهلاک انرژی به‌ازای دبی ۵-۱۳۵ لیتر بر ثانیه، در آرایش (۳-۲)،  $32/55$  درصد و در آرایش (۲-۲)،  $31/39$  درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، میزان استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۲-۲) به مقدار  $1/16$  درصد بیشتر از مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر و به مقدار  $8/61$  درصد بیشتر از مدل شاهد است.

از آنجا که جت عبوری از روی سرریز در تماس مستقیم با تاج سرریز (تاج جانبی و تاج کلید ورودی و خروجی سرریز) و کلید خروجی باقی می‌ماند، کشش سطحی بر جریان تأثیرگذار خواهد بود؛ به‌همین دلیل از عدد وبر که به‌نحوی بیانگر کشش سطحی در مهندسی هیدرولیک است، استفاده شد. در این قسمت، تأثیر عدد وبر بر استهلاک انرژی جریان نشان داده می‌شود که چه میزان از عدد وبر بر شرایط جریان تأثیرگذار خواهد بود.





شکل ۴- تغییرات استهلاک نسبی انرژی- عدد وبر. اختلاف استهلاک انرژی برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

در این حالت محدوده دبی جریان ۵۰-۵ لیتر بر ثانیه است)، میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۸۵ به حدود ۰/۷۸ کاهش می‌یابد. در این محدوده ارتفاع تیغه آب روی سرریز ۳/۸-۱ سانتی‌متر و جایی است که کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر بر شرایط جریان تأثیر بیشتری دارند. به همین دلیل شیب نمودار در این محدوده بیشتر است. همچنین، به‌ازای عدد وبر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۴۸۸۰ (در این حالت محدوده دبی جریان ۱۳۵-۵۰ لیتر بر ثانیه است)، میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد، از حدود ۰/۷۸ به حدود ۰/۶۴ کاهش می‌یابد. در این محدوده، ارتفاع تیغه آب روی سرریز ۳/۸-۱/۵ سانتی‌متر و جایی است که کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر بر شرایط جریان تأثیر کمی دارند. به همین دلیل شیب نمودار در این محدوده کمتر است. در جدول ۳، مقادیر استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای آرایش متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد نمایش داده شده است.

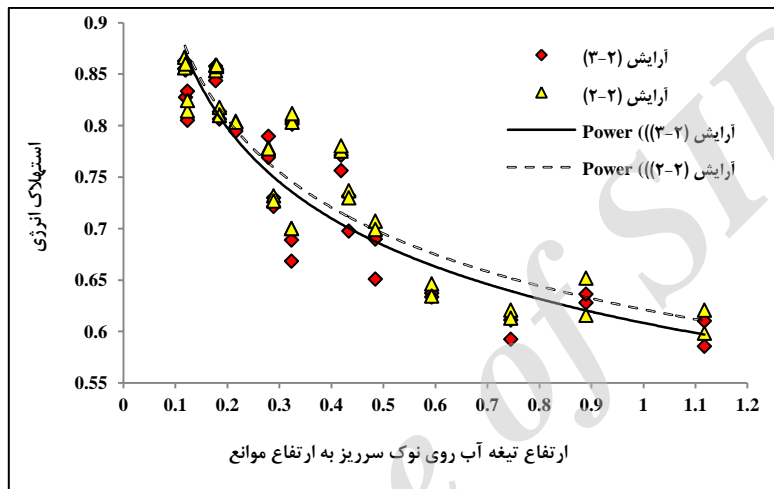
در این شکل مشاهده می‌شود که در مجموع با افزایش عدد وبر، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد در حالی که میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۸۵ به حدود ۰/۶۴، در مدل با آرایش (۳-۲) از حدود ۰/۸۶ به حدود ۰/۶۵، و در مدل با آرایش (۲-۲) از حدود ۰/۸۶ به حدود ۰/۶۶ کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش عدد وبر از میزان بسیار کم (۲۹/۳۹) تا میزان بسیار زیاد (۳۸۸۰/۹)، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل شاهد، ۲۴/۷ درصد، در مدل با آرایش (۳-۲)، ۲۴/۴۲ درصد و در مدل با آرایش (۲-۲)، ۲۳/۲۵ درصد است. به‌ازای عدد وبر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۲۹/۳۹، تغییرات معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی مشاهده نمی‌شود. ولی به‌ازای مقادیر عدد وبر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۳۸۸۰/۹، تفاوت‌های معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی وجود دارد. در ابتدا با توجه به شیب کمتر نمودار، شدت کاهش کمتر است و به‌ازای مقادیر پایین عدد وبر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۲۹/۳۹

جدول ۳- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای آرایش متفاوت موانع

مدل	Q (lit/s)	We	$\Delta E/E_0$	درصد کاهش استهلاک انرژی
شاهد	۵ - ۵۰	۲۹/۴ - ۱۶۰۴/۹	۰/۸۵ - ۰/۷۸	۸/۲۳
	۵۰ - ۱۳۵	۱۶۰۴/۹ - ۳۸۸۰/۹	۰/۷۸ - ۰/۶۴	۱۷/۹۵
آرایش (۳-۲)	۵ - ۵۰	۲۹/۴ - ۱۶۰۴/۹	۰/۸۶ - ۰/۷۹	۸/۱۴
	۵۰ - ۱۳۵	۱۶۰۴/۹ - ۳۸۸۰/۹	۰/۷۹ - ۰/۶۴	۱۸/۹۸
آرایش (۲-۲)	۵ - ۵۰	۲۹/۴ - ۱۶۰۴/۹	۰/۸۶ - ۰/۸۰	۶/۹۷
	۵۰ - ۱۳۵	۱۶۰۴/۹ - ۴۸۸۰	۰/۸۰ - ۰/۶۵	۱۸/۷۵

در این جدول می‌بینیم که به‌ازای مقادیر پایین عدد و بر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۲۹/۴، میزان استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۳-۲)، ۸/۱۴ درصد و در مدل با آرایش (۲-۲)، ۶/۹۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، به‌ازای مقادیر بالای عدد و بر در محدوده ۱۶۰۴/۹-۳۸۸۰/۶، میزان استهلاک انرژی در مدل با آرایش (۳-۲)، ۱۸/۹۸ درصد و در مدل با آرایش (۲-۲)، ۱۸/۷۵ درصد کاهش می‌یابد.

در شکل ۵، تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بی‌بعد  $H_s/H_b$  برای آرایش متفاوت موانع رسم شده است. همچنین پارامتر  $H_s$ ، ارتفاع تیغه آب روی نوک سرریز و  $H_b$ ، ارتفاع موانع است.



شکل ۵- نمودار تغییرات استهلاک نسبی انرژی  $H_s/H_b$  برای آرایش های مختلف موانع

در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت  $H_s/H_b$ ، که ناشی از افزایش دبی است، میزان استهلاک انرژی جریان در دو آرایش مورد نظر، به‌دلیلی که پیشتر توضیح داده شد، کاهش می‌یابد.

بر اساس این شکل، در دبی ثابت و موانع بار ارتفاع یکسان، مقدار استهلاک نسبی انرژی در آرایش (۲-۲) بیشتر از مقدار استهلاک نسبی انرژی در آرایش (۳-۲) است. در جدول ۴، مقادیر استهلاک انرژی در برابر پارامتر بی‌بعد  $H_s/H_b$  برای آرایش متفاوت موانع، نسبت به مدل شاهد، نمایش داده شده است.

جدول ۴- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر نسبت بدون بعد  $H_s/H_b$  با توجه به متغیرهای آرایش و فاصله موانع

درصد کاهش استهلاک انرژی	$\Delta E/E_0$	$H_s/H_b$	دبی (لیتر بر ثانیه)	مدل
۲۴/۴۲	۰/۸۶ - ۰/۶۵	۰/۱۱ - ۰/۴۸	۵ - ۹۵	آرایش (۳-۲)
۱۰/۷۶	۰/۶۵ - ۰/۵۸	۰/۴۸ - ۱/۱۱	۹۵ - ۱۳۵	
۱۹/۷۶	۰/۸۶ - ۰/۶۹	۰/۱۱ - ۰/۴۸	۵ - ۹۵	آرایش (۲-۲)
۱۴/۵	۰/۶۹ - ۰/۵۹	۰/۴۸ - ۱/۱۱	۹۵ - ۱۳۵	

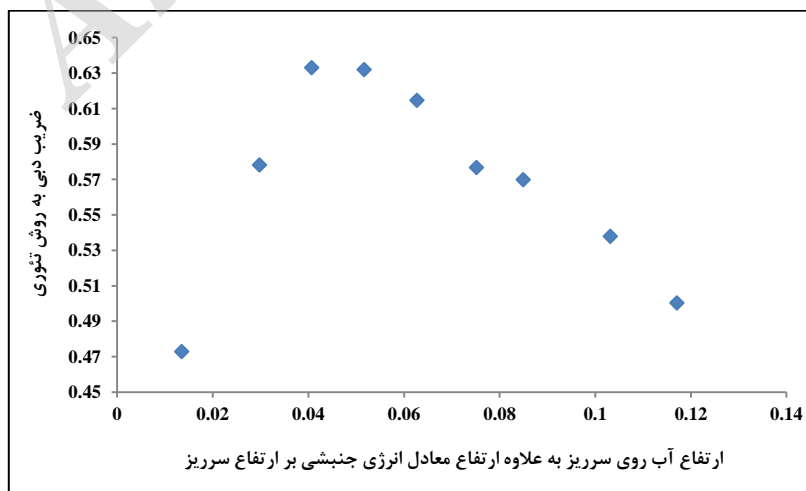
بررسی استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز...

دنبال می‌کند، تأثیر موانع تعبیه شده در کلید خروجی بر ضریب دبی، یعنی  $C_{Ds}$  (ضریب دبی محاسبه شده به روش معادله عمومی سرریزها) و  $C_{Da}$  (ضریب دبی محاسبه شده به روش انتگرالی)، نیز بررسی می‌شود. بر این اساس، شکل ۶ تغییرات ضریب دبی را در برابر  $\frac{H_t}{P}$  نشان می‌دهد. به‌طور کلی و مطابق این شکل، ضریب دبی جریان در ابتدا با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$ ، به دلیل تأثیرات کشش سطحی (تماس دائم تیغه جانبی با تاج جانبی سرریز)، روندی صعودی دارد و پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود، با افزایش بیشتر نسبت  $\frac{H_t}{P}$ ، به دلیل تداخل تیغه‌های جریان در کلید خروجی سرریز (بالادست تاج جانبی) شروع به کاهش می‌کند. این شکل در واقع به نحوی بیانگر راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی در تراز کم آب نیز هست. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش  $\frac{H_t}{P} = 0.04$ ، ضریب دبی  $C_{Ds}$  به حداکثر مقدار خود، یعنی  $0.63$ ، افزایش می‌یابد و در این میان میزان افزایش ضریب دبی  $25/4$  درصد است. با افزایش  $\frac{H_t}{P}$  به بیش از  $0.04$ ، ضریب دبی تا مقدار  $0.5$  کاهش می‌یابد که به مفهوم کاهش ضریب دبی به مقدار  $20/6$  درصد خواهد بود. این مسئله، همان‌طور که پیشتر به آن اشاره شد، نشان‌دهنده بازدهی سرریز کلیدپیانویی در دبی‌های کم است.

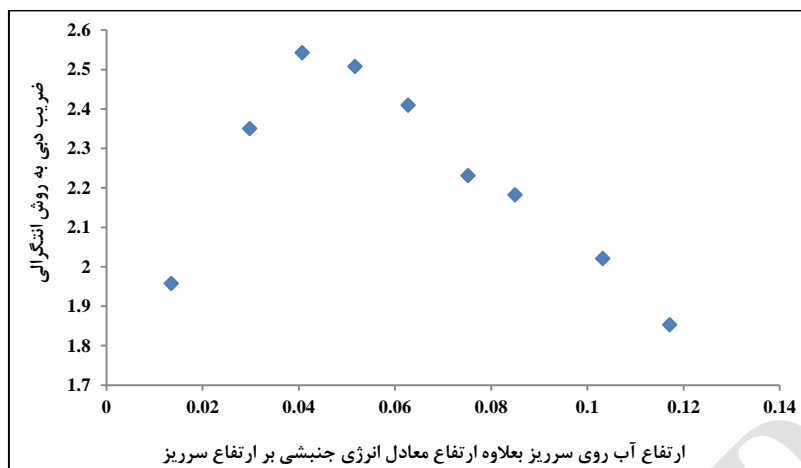
این جدول نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $H_s/H_b$  در محدوده  $0.11-0.48$ ، در بخش اول نمودار با شیب زیاد، مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با آرایش (۲-۳)،  $24/42$  درصد و برای مدل با آرایش (۲-۲)،  $19/76$  درصد کاهش می‌یابد. همچنین، در محدوده  $0.48-1/11$ ، شیب نمودار کمتر است و مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با آرایش (۲-۳)،  $10/76$  درصد و برای مدل با آرایش (۲-۲)،  $14/5$  درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودارهای ارائه شده تاکنون، در تحقیق حاضر در تمامی آرایش‌های متفاوت موانع، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی دیگر در دبی کم، اختلاف مقادیر استهلاک انرژی در مدل‌های مورد آزمایش کم است ولی در دبی‌های زیاد، مقدار این تفاوت بیشتر می‌شود. در دبی کم، بر اساس تئوری جریان ریزشی، جریان کاملاً با موانع در تماس است؛ در حالی که با افزایش دبی بر اساس تئوری جریان ریزشی (غیر لغزشی)، جریان‌های گردابه‌ای ایجاد شده در منطقه جدایی مانع از تماس جریان با موانع می‌شود، از تأثیرات موانع بر مقاومت جریان کاسته خواهد شد، و میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه تحقیق حاضر اهداف جداگانه‌ای را



شکل ۶- نمودار تغییرات  $C_{Ds}$  در برابر  $\frac{H_t}{P}$  برای مدل شاهد



شکل ۷- تغییرات  $C_{Da}$  در برابر  $H_t/P$  (روش انتگرالی) برای مدل شاهد

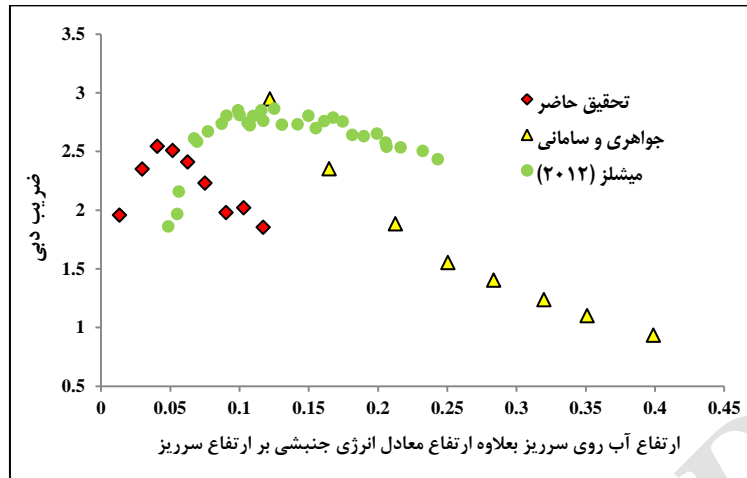
### مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی

پیشتر اشاره شد که تاکنون بررسی جامعی درباره این نوع سرریز کلیدپیانویی با شرایط موجود در این تحقیق انجام نشده است. شکل ۸ مقایسه برخی نتایج تحقیق حاضر را با نتایج تحقیقات میشلز (Machiels, 2012) و جواهری و کبیری‌سامانی (Javaheri & Kabiri-Samani, 2011) نشان می‌دهد. در این شکل، نتایج محاسبه ضریب دبی به روش انتگرالی با نتایج تحقیقات یکی از مدل‌های میشلز و سامانی روی سرریز کلیدپیانویی مقایسه شده است.

مطابق با شکل ۷، ضریب دبی تعریف شده ( $C_{Da}$ )، با افزایش  $H_t/P$ ، ابتدا روندی افزایشی دارد و پس از آن با استغراق کامل سرریز کاهش می‌یابد. در واقع این شکل به نحوی بیانگر راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی در تراز کم آب نیز هست. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش  $H_t/P = 0.04$ ، ضریب دبی  $C_{Da}$  به حداکثر مقدار خود که برابر با ۲/۵۴ است، افزایش می‌یابد و در این میان میزان افزایش ضریب دبی به مقدار ۲۳/۲ درصد است. این در حالی است که با افزایش  $H_t/P$  به مقدار بیش از ۰/۰۴، ضریب دبی تا مقدار ۱/۸۵ کاهش می‌یابد که به مفهوم کاهش ضریب دبی به مقدار ۲۷/۲ درصد است.

جدول ۵- محدوده متغیرهای تحقیق حاضر و تحقیقات میشلز (Machiels, 2012) و سامانی

n	$C_{Da}$	$H_t/P$	$P/W_u$	Q	منابع
۱/۵	۱/۹۵	۰/۰۱۳	۱/۳۳	۵ - ۱۳۵	تحقیق حاضر
	۲/۴	۰/۰۶۲			
	۱/۸۵	۰/۱۱			
۱/۵	۱/۸۵	۰/۰۴۸	۱/۳۱	< ۳۰۰	میشلز (Machiels, 2012)
	۲/۷۹	۰/۱۱			
	۲/۴۳	۰/۲۴			
۱/۵	۲/۹۴	۰/۱۲	۱/۳۳	۱۰ - ۷۰	جواهری و کبیری‌سامانی
	۱/۵۵	۰/۲۵			
	۰/۹۳	۰/۳۹			



شکل ۸- مقایسه افت انرژی نسبی تحقیق حاضر و تحقیقات میشلز و سامانی

مقدار  $1/46$  تا مقدار  $1/78$  افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت، میزان استهلاك انرژی کاسته می‌شود. در این محدوده، به دلیل تأثیر کشش سطحی و تداخل تیغه‌های جریان، مقدار استهلاك انرژی واقعی نیست. پس از آن، نسبت  $y/H$  کاهش خواهد یافت و با کاهش این نسبت، میزان استهلاك انرژی جریان نیز کاهش می‌یابد.

- با افزایش عدد  $We$ ، میزان استهلاك نسبی جریان کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دبی، ابتدا عدد  $We$  از  $29/39$  تا  $1604/9$  افزایش می‌یابد. در این محدوده ارتفاع تیغه آب روی سرریز،  $3/8$  -  $1$  سانتی‌متر و جایی است که کشش سطحی و در نتیجه عدد و بر بر شرایط جریان تأثیر بیشتری دارند. به همین دلیل شیب نمودار در این محدوده بیشتر است. پس از آن عدد  $We$  از  $1604/9$  تا  $4880$  افزایش می‌یابد. در این محدوده، ارتفاع تیغه آب روی سرریز  $3/8$  -  $8/5$  سانتی‌متر و جایی است که کشش سطحی و در نتیجه عدد و بر بر شرایط جریان تأثیر کمی دارند و شیب نمودار در این محدوده کمتر است.

- حداکثر ضریب دبی با استفاده از روش تئوری، برابر  $0/63$  و با استفاده از روش انتگرالی، برابر  $2/54$  برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی است؛ این ضرایب در  $H_t/P = 0/04$  اتفاق می‌افتد.

مطابق جدول ۵، با اینکه آزمایش‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه مختلف پارامترها انجام شده‌اند، مقادیر بیشینه و کمینه ضریب دبی در تحقیقات سامانی و میشلز (Machiels, 2012) با تحقیق حاضر متفاوت است. دلیل این موضوع این است که در تحقیق حاضر از سرریز کلیدپیانویی با ابعاد بهینه هیدرولیکی اما در آزمایش‌های سامانی و میشلز از سرریز کلیدپیانویی با ابعاد بهینه اقتصادی استفاده شده است. طول تاج سرریز مورد استفاده در تحقیق حاضر نیز نسبت به سرریز میشلز و سامانی کمتر و به همین دلیل مقدار بیشینه ضریب دبی در این تحقیق کمتر است.

### نتیجه‌گیری

- در آرایش‌های متفاوت موانع، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاك انرژی افزایش می‌یابد.

- میزان استهلاك انرژی در مدل با آرایش (۲-۲) بیشتر از میزان استهلاك انرژی در آرایش (۳-۲) است به نحوی که میزان کاهش استهلاك انرژی در آرایش (۲-۲)،  $31/39$  و در آرایش (۳-۲)،  $32/55$  است.

- با افزایش نسبت  $y/H$ ، میزان استهلاك نسبی جریان کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دبی ابتدا نسبت  $y/H$  از

## مراجع

- Afzalian, A. R. 2014. Experimental investigation of PKW hydraulic's properties under variation geometric of piers and side crests. M. Sc. Thesis Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahwaz. Ahwaz, Iran. (in Persian)
- Akbariyan, A. 2009. Design of Hydraulic Structures Canals. Amidi Pub. (in Persian)
- Anderson, R. M. and Tullis, B. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. J. Hydraul. Eng-ASCE. 138(4): 358-361.
- Bieri, M., Federspiel, M., Boillat, J., Houdant, B. and Delorme, F. 2009. Spillway capacity upgrade of Gloriettes dam: environmental integration and energy dissipation. Proceedings of HYDRO 2009. Lyon, France.
- Chow, V. T. 1959. Open Channel Hydraulics. Mc Graw Hill: New York.
- Epicum, S. and Machiels, O. 2011. Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano key weirs – experimental study. International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs Taylor & Francis Group, London.
- Javaheri, A. and Kabiri-Samani, A. R. 2011. Flow hydraulic on piano key weirs. M. Sc. Thesis. Faculty of Civil Engineering. Esfahan University of Technology. (in Persian)
- Katourani, S. 2012. Effect of the geometric characteristics of baffled on hydraulic flow conditions in baffled apron drop. M. Sc. Thesis. Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahwaz. Ahwaz, Iran. (in Persian)
- Lempèrière, F. and Ouamane, A. 2003. The piano key weir: a new cost-effective solution for spillways. Int. J. Hydropower Dam. 10(5): 144-149.
- Mansouri, K. and Ahadiyan, J. 2015. Obstruction of piano key weirs in Debris flow in individual experiments system. Irrig. Sci. Eng. 5(3): 163-172. (in Persian)
- Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs. Ph. D. Thesis. Faculty of Applied Science. University of Liège.
- Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A. J. L. and Boillat, J. L. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. J. Hydraul. Res. 50, 400-408.
- Qanavati, M., Sajjadi, S. M. and Ahadiyan, J. 2016. The effect of block height on flow hydraulic behavior in rectangular piano key weir with baffled outlet key. The 3<sup>rd</sup> International Conference on Geographical Science. Nov. 3. Shiraz University. Shiraz, Iran. (in Persian)
- Rahmanshahi-Zahabi, M. 2012. Effect of roughned bed height of the chute on the energy dissipation. M. Sc. Thesis. Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahwaz. Ahwaz, Iran. (in Persian)
- Yarmohammadi, B. 2015. Effect of parapet wall on the inlet submergence in piano key weirs. M. Sc. Thesis. Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahwaz. Ahwaz, Iran. (in Persian)

بررسی استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز...

Zolfaghari, S., Alinezhad, Sh., Movasaghi, A., Mohamadi, M. and Yasi, M. 2004. Labyrinth weirs with planform. The second National Congress on Water and Soil Resources. Faculty of Agriculture. Shiraz University. Shiraz, Iran. (in Persian)

Archive of SID

## **Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy**

**S. M. Sajadi\* , J. Ahadian and M. Qanavati**

\* Corresponding Author: Assistant professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran. Email: sajjadi.mohsen@gmail.com  
Received: 22 November 2016, Accepted: 27 May 2017

The piano key weirs are used at storage dam's crest and irrigation and drainage systems. Piano key weirs are the newest type of long-crested weirs that have most crest length in comparison to Labyrinth weirs with the same width, because they increase the discharge capacity. Using baffles at outlet of piano key weirs with the purpose of increasing energy dissipation, is a method that has been less investigated. In this investigation the subject of dissipation of energy in such structures is taken into consideration, by considering the effective parameters. The physical models based on two different design (N) were fabricated in order to investigate the effect of design of baffles. The baffles were fixed on weir outlet key consisting of two formation namely:  $N_1$  (rows of 2 & 3 baffles that have just crossed) and  $N_2$  (2 rows of baffles). Total number of 27 tests were carried out in the range of 5 to 135 lit/s discharge. The test results showed that the energy dissipation decreases with increasing discharge. The energy dissipation in model with formation (2-2) was about 1.16 percent more than model with formation (3-2) and about 8.6 percent more than model with no baffle. Also the trend of discharge coefficient in this type of weir was evaluated. This means that the maximum amount of theoretical discharge Coefficient method was 0.63 and using integral method was 2.54 in all experimental models.

**Key Words:** Discharge Coefficient , Energy dissipation, , Outlet key, Piano Key Weir