### Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation in Piano Key Weirs with Stepped and Baffled Barriers at Downstream Slop

### SEYED MEHDI NAGHIB ZADEH<sup>1,2</sup>, MOHAMMAD HEIDARNEJAD<sup>2\*</sup>, ALIREZA MASJEDI<sup>2</sup>, AMIN BORDBR<sup>2</sup>

1. Department of Water Science Engineering, Khouzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz,

Iran.

2. Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. (Received: Jan. 7, 2020- Revised: Oct. 20, 2020- Accepted: Aug. 9, 2020)

### ABSTRACT

Piano Key Weirs (PKWs) are amongst the newly developed long-crested weirs that offer a higher discharge capacity relying on their more extended crest compared to labyrinth weirs of the same width. However, the use of barriers at the outlet of PKWs to increase energy dissipation has received little attention so far. In the present work, stepped and baffled models (with a bench height of 30 mm and baffle dimensions of 30 \* 30 mm) were adopted to conduct experiments, and the Flow3D software was used for 3D simulation. Experiments were performed using discharge rate of 10 to 50 lit/s. The results revealed by increasing the discharge rate, the energy dissipation rate using the baffles was 8.75% higher than that of the stepped model, and 15.21% higher than that of the case with no barriers.

Keywords: Discharge Coefficient, Energy Loss, Flow 3D Software, Piano Key Weir.



## بررسی آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی با شیب پایین دست پلکانی و بافل

سید مهدی نقیبزاده <sup>۱</sup>۰<sup>۱</sup>، محمد حیدرنژاد<sup>۲</sup>۰، علیرضا مسجدی<sup>۲</sup>، امین بردبار<sup>۲</sup> ۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. ۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. (تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷– تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۲۹– تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۱۹)

## چکیدہ

سرریزهای کلیدپیانویی جدیدترین نوع سرریزهای غیرخطی هستند که نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی طول تاج بیشتری را در همان عرض بهدست می دهند و از اینرو ظرفیت تخلیه را بالاتر می برند. استفاده از موانع در کلید خروجی سرریزهای کلیدپیانویی با هدف افزایش میزان استهلاک انرژی در آنها روشی است که تاکنون کمتر به آن توجه شده است. در پژوهش حاضر برای انجام آزمایشها از دو مدل پلکانی و بافل (ارتفاع پلکانها ۳۰ میلی متر و ابعاد بافل ۳۰×۳۰ میلی متر) استفاده شد و شبیه سازی سه بعدی توسط نرمافزار Flow3D انجام گردید. همچنین آزمایشها در محدوده دبی ۵۰-۱۰ لیتر بر ثانیه اجرا شدند. طبق نتایج با افزایش دبی میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد. میزان استهلاک انرژی در موانع بافل به میزان 8/75 درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در موانع پلکانی و ۱۵/۲۱ درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در حالت بدون مانع است.

واژه های کلیدی: افت انرژی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب دبی، مدل عددی Flow3D.

### مقدمه

از سازههای مهم و اصلی سدها میتوان به سرریزها اشاره نمود. سرریز سازهای است که برای ذخیره آب بیشتر در مخزن و عبور آبهای اضافی خصوصاً در زمانهای سیلابی، از سراب به پایاب سدها و رودخانهها مورد استفاده قرار می گیرد (Beyrami, 1999). با توجه به حساسیت بالای کاری که سرریز انجام میدهد، ضرورت دارد که توانایی لازم برای بهرهبرداری و دفع سیلابها و محافظت از سد و تأسیسات وابسته را به طور لحظهای داشته باشد. عملکرد هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد برای یک بار آبی ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز داشته و ضریب دبی (Ch) این نوع سرریزها با استفاده از رابطه (۱) تعیین میشود (Ch) این نوع سرریزها

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_t^{3/2}$$
 (۱) (۱)

در این رابطه،  $C_d$  ضریب دبی، g شتاب ثقل،  $H_t$  مجموع بار آبی بالادست سرریز (ارتفاع پیزومتریک (H) تاج سرریز بعلاوه انرژی جنبشی $(\frac{V^2}{2g})$ ، L طول تاج است.

یکی از معایب متداول سرریزهای خطی، ظرفیت تخلیه پایین آنها به علت محدودیت عرض موجود برای اجرای این نوع سازه است (Blanc and Lempérière 2001). در دهه سوم قرن گذشته، سرریزهای زیگزاگی به عنوان یک راه حل مؤثر برای بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع از سرریزها توسعه داده شده

است. ساخت این نوع سازه ها به واسطه استفاده از دیواره های قائم، ساده می باشد. لیکن جریان نزدیک شونده به این نوع سازه ها، به ویژه جریان های تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم کلید خروجی، به شدت دچار فشردگی شده و به همین علت، کلیدهای ورودی و خروجی نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. اما در سرریزهای کلیدپیانویی، برخلاف سرریزهای زیگزاگی، دهانه ها یک در میان شیب دار به سمت داخل مخزن و بیرون می باشد. سرریز کلیدپیانویی یک نوع سرریز زیگزاگی اصلاح شده برای مکان هایی با عرض محدود می باشد. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، سرریز XI تیپ A دارای یک تاج مستطیلی زیگزاگی ساده با کف شیب دار در کلیدهای ورودی و خروجی می باشد (شکل ۱).

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، α زاویه دیواره جانبی سرریز با جهت اصلی جریان، W عرض کل سیکل سرریز، L طول تاج سرریز، Wi عرض کلید ورودی، Wo عرض کلید خروجی، Wu عرض یک سیکل ( Wi + Wo)، B طول بالادست تا پایین دست سرریز، Bi طول شیروانی پایین دست، Bo طول شیروانی بالادست، P ارتفاع سرریز، So شیب کلید خروجی و Si شیب کلید ورودی می باشد. همچنین پارامترهای مربوط به خصوصیات هندسی و هیدرولیکی در سرریزهای کلید پیانویی، روش (فیزیکی و عددی) به عمل آوردند. نتایج ایشان نشان داد که نرمافزار (Flow3D) میتواند رابطه دبی عبوری با بار هیدرولیکی سرریز زیگزاگی ذوزنقهای که از انجام آزمایشها بر روی مدل فیزیکی بدست آمده را به خوبی پیشبینی کند. بررسی و تجزیه و تحلیل استهلاک انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی هدف اصلی مطالعهی حاضر است. در این راستا، دو مدل فیزیکی (تعبیهٔ مانع در کلید خروجی سرریز، با هدف تداخل تیغههای جریان و اختلاط هوا و آب در خروجی) و عددی (نرمافزار Flow3D) با هدف افزایش استهلاک انرژی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایشها بیان میکند که علاوه بر افزایش ضریب گذردهی جریان، می توان اتلاف انرژی را افزایش داد و با کاستن از ابعاد سازههای مستهلک کنندهٔ انرژی در پایین دست سدها، مانند حوضچههای آرامش و غیره، به اقتصاد طرح کمک شایانی کرد. مطالعات Yarmohammadi, 2015 نشان داد سرریزهای کلیدپیانویی در بارهای هیدرولیکی کم، عملکرد بسیار مطلوبی دارند و با هوادهی كامل جريان، احتمال وقوع كاويتاسيون كاهش مييابد و از فرسایش جلوگیری میکنند. با این همه، با افزایش بار هیدرولیکی این مزیت از بین میرود و بهدلیل تداخل تیغههای جریان عبوری از کلید خروجی، از عملکرد سرریز کاسته می شود و در نتیجه افت انرژی افزایش می یابد (Yarmohammadi, 2015). Yarmohammadi, 2015 al., (2016) اثر ارتفاع موانع قرار گرفته در کلید خروجی سرریز کلید پیانویی مستطیلی را بر میزان تغییرات استهلاک انرژی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع موانع میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد. همچنین، با افزایش دبی میزانی استهلاک انرژی کاهش مییابد.

در تحقیقی )Bremer and Oertel (2017) با استفاده از مدل عددی به بررسی تاثیر ضخامت دیواره بر روی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که مدلهای سه بعدی مورد بررسی توسط Flow3D منجر به تجزیه و تحلیل کارآمد جریان آزاد در سرریزهای PKW میشود. طبق نتایج سرریز PKW رحداقل ضخامت دیواره ۵۰/۰ میباشد) در مقایسه با سرریز PKW با چهار برابر دیوارههای ضخیم تر، در در مقایسه با سرریز ۴۰ یا جهار برابر دیوارههای ضخیم تر، در (2015) یا استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب دبی سرریزهای قسمت دماغههای بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. نتایج ریگزاگی ذوزنقهای را به وسیله نصب سازههای هیدرودینامیکی در حاصل از این تحقیق نشان داد سازههای مورد استفاده، بهعنوان یک روش هیدرودینامیکی، بر روی ضریب دبی و نیز میزان دبی عبوری عبارتند از: α، نسبت طول به عرض کل سرریز (L/W)، نسبت عرض یک سیکل ورودی به ارتفاع تاج (Wi/P)، نسبت بار آبی به ارتفاع سرريز (H/P)، نسبت عرض داخلي دماغه به عرض سيكل (A/W<sub>i</sub>)، ارتفاع تاج سرریز (P) و ضخامت دیواره سرریز (T) می باشند. یکی از مشخصههای مهمی که در سرریزهای کلیدپیانویی تاکنون کمتر به آن پرداخته شده، استهلاک انرژی است. یکی از روشهای مستهلک کردن انرژی جریان استفاده از مانع یا زبری در ساختار سرریز است. در خصوص کاربرد مانع یا بلوک، آزمایشها و نتایج بررسی های سازمان احیای اراضی آمریکا (USBR) نشان داد که با به کاربردن بلوک با ابعاد زیاد که باعث جدایی جت جریان و ایجاد تلاطم می شود، می توان به طور موثر انرژی جریان را کاهش داد (Akbariyan, 2009). (Akbariyan, 2009) در ساختار سرریز کلید پیانویی (PKW) در تحقیق خود به بررسی زبری و پلکان بر استهلاک انرژی پرداختند. برای این هدف از چندین مدل فیزیکی با کف زبر به شکلهای مختلف برای وجه پاییندست سد مخزنی به چند روش استفاده شد: سطح شیبدار صاف، سطح شیبدار پلکانی (دوبعدی)، سطح شیبدار سه بعدی منظم، سطح شیبدار پلکانی با موانعی که بهصورت منظم روی یلهها قرار داشتند (نامنظم سه بعد). تحقیقات نشان داد که سرریزکلید پیانویی همراه با پلکان تنها برای استفاده در سدهای متوسط تا بلند و فقط برای بخش پایینی سد مفید خواهد بود. سرریزهایی که دارای شکل پیچیدهای (3D) می باشند تاثیر زیادی بر اتلاف انرژی جریان ندارند و حتی ممکن است مقداری خطا ايجاد كنند.(Erpicum and Machiels (2011 ميزان استهلاك انرژی را در دو هندسه کلید پیانویی و اوجی مورد بررسی قرار دادند. آنها هر یک از این 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 تقریبا یکسان بود با این تفاوت که ابعاد PKW<sub>2</sub> حدودا ۱/۶ برابر کوچکتر از ابعاد PKW1 بود. نتایج بررسیها نشان داد که میزان استهلاک انرژی در طول سازه برای هر سه نوع سرریز تقریبا برابر است. ولی بهازای دبیهای مخصوص یکسان، بسته به نوع سرریز، تفاوتهای معنی دار در جریان بالادست سرریز پلکانی مشاهده شد. از طرفی، در سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی، استهلاک انرژی بیشتری مشاهده شد. (2012) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی ذوزنقهای را برای نسبتهای بار هیدرولیکی بالا مورد بررسی قرار دادند. ایشان آزمایشهای مدل فیزیکی خود را بر روی یک فلوم مستطیلی و آزمایشهای مدل عددی را نیز با استفاده از نرمافزار (Flow3D) به انجام رساندند و من مقامیهای بین نتایج حاصل از انجام آزمایشها به وسیله هر دو

هیدوردینامیکی مورد مطالعه، طول تاج سازهای که برابر با ۱۸۰

میلیمتر بود، بیشترین راندمان هیدرولیکی را داشت.



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی

Gharibvand et al. در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی ذوزنقه-ای پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیهسازی سه بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی ذوزنقهای (دو سیکل) و کلید پیانویی (دو سیکل) به کمک نرمافزار Flow3D به انجام رسید و تاثیر هرکدام از مدلها بر میدان جریان روی سرریزها و ضریب دبی مورد بررسی و نتایج حاصل با اطلاعات آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت.

طبق نتایج، سرریزهای کلید پیانویی از ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای زیگزاگی برخوردار بودند. در سرریز PKW، با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز (p) از ۵ سانتیمتر به ۷٫۵ با سانتیمتر، ضریب دبی حدود ۲۶ درصد افزایش مییابد. همچنین در سرریزهای زیگزاگی نیز با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز از ۵ سانتیمتر به ۷٫۵ سانتیمتر، ضریب دبی حدود ۲۴ درصد افزایش مییابد.

(2020) Ghanbari and Heidarnejad, در تحقیقی به بررسی آزمایشگاهی و عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی سه گوش و مستطیلی پرداختند. در این تحقیق اثر دماغهی سه گوش بر روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و همینطور به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیهسازی سه بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی سه گوش و مستطیلی به کمک نرمافزار Flow3D کلید پیانویی سه گوش و مستطیلی به کمک نرمافزار روی به انجام رسید و تاثیر هرکدام از مدلها بر میدان جریان روی سرریزها و ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده های مدل عددی هماهنگی مناسبی با داده های مدل

آزمایشگاهی داشتند. طبق نتایج، سرریزهای کلید پیانویی سه گوش از ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی برخوردار بودند. همچنین مشاهده شد، با تغییر در دماغهی سرریز کلید پیانویی ضریب دبی حدود ۸۵ درصد افزایش مییابد.

## مواد و روشها

در این تحقیق برای بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریز کلید پیانویی در سه حالت (سطح شیبدار صاف، سطح شیبدار پلکانی و سطح شیبدار بافلدار)، از دو مدل عددی و فیزیکی استفاده گردید و نتایج این آزمایشها با هم مقایسه شد که در قسمت نتایج و بحث به آن میپردازیم.

### تحليل ابعادى

برای بر آورد انرژی در بالادست و پاییندست سرریز از روابط (۲ و ۳) استفاده شد.

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g}$$
 (7)

$$E_1 = y_1 + \frac{{V_1}^2}{2g} \tag{7}$$

(۱) با استفاده از ارتفاع آب در بالادست (۷۵) و پاییندست ( $(y_1)$  و سرعت جریان که از رابطه  $\frac{Q}{y \times b} = V(y | r t a a a a a b a)$  و سرعت جریان که از رابطه  $V = \frac{Q}{y \times b}$  میزان انرژی در ۶۰۰ میلیمتر) و Q دبی جریان) محاسبه گردید، میزان انرژی در هر مقطع بدست آمده و از رابطه استهلاک انرژی ( $\Delta E_r$ ) میزان افت انرژی نسبی یا استهلاک انرژی جریان محاسبه گردید (رابطه ).

 $\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_1} \tag{(find the set of the s$ 

برای بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر استهلاک انرژی ابتدا با مشخص کردن این اعداد با انجام آنالیز ابعادی اعداد بدون بعد

(رابطه ۵)  $F = f(W_i. W_0. W_u. W. B. B_i. B_o H_r. H_s. y_c. g. o. o. H.L_0. P.L. <math>\mu.Q.\frac{\Delta E}{E_0})$ در رابطه ۲، Wo (۱۰۰ mm) عرض کلید ورودی (Wo (۱۰۰ mm) عرض کلید  $\pm ceps$  (Wi (۲۰۰mm) عرض یک سیکل، W عرض کل سیکل، B طول بالادست تا پاییندست سرریز (۳mm) معق آب metadeb deb بالادست، B طول شیروانی پاییندست، Hr عمق آب mm) پای سرریز، Hs ارتفاع آب روی نوک سرریز، P ارتفاع سرریز (۳۰۰ mm)، ما طول کلید خروجی،  $\mu$  مقی بحرانی ) $E = (q^2/g)^{1/3}$  ارتفاع آب روی سرریز،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\rho$  جرم واحد حجم آب،  $\mu$  لزوجت دینامیکی، Q دبی جریان، g شتاب ثقل و $\frac{\Delta E}{E_0}$  پارامتر استهلاک انرژی می باشد.  $y_i$  با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام آنالیز ابعادی صورت گرفت و پارامترهای بدون بعد زیر بدست آمد (رابطه ۶):

 $f = \left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{Y_c}{H}, \frac{\Delta E}{E_0}, We, Re, F_r\right) = 0 \qquad (\pounds H_r)$ 

با توجه به ثابت بودن اعداد هندسی سرریز، پارامترهای با توجه به ثابت بودن اعداد هندسی سرریز، پارامترهای  $W_i. W_0. W_u. W. B. B_i. B_o$  همچنین عدد رینولدز (Re) در پاییندست است و به علت آشفته همچنین عدد رینولدز (Re) در پاییندست است و به علت آشفته بودن (Re>2000)، از این عدد هم می توان صرفنظر کرد ( (Row, می توان صرفنظ کرد ( (Row, می توان صرف کرد ( (Row, می توان کرد (

$$\begin{split} \Delta E_r &= \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{Y_c}{H}, We, F_r\right) = 0 \text{ (Y (رابطه X)}\\ C_d &= f\left(\frac{H_t}{P}\right) \end{split}$$

برای محاسبه ضریب دبی از رابطه ۱ استفاده می شود.

مدلهای آزمایشگاهی و عددی

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام یافته است. فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی مورد استفاده از نظر مشخصات هندسی دارای طول ۷ متر و عرض ۶/۶ متر می باشد ضمن آنکه در ابتدا و انتهای فلوم، مخازنی به ترتیب برای هدایت جریان به داخل و خارج از آن تعبیه شده است. دیوارههای فلوم، شفاف و از جنس شیشه ۱۰ میلیمتر بوده که از نظر مشاهده پروفیل سطح آب و پدیدههای هیدرولیکی بسیار مناسب است، از طرفی کف آن نیز از جنس فلز صیقلدادهشده میباشد. پس از استقرار مدلهای آزمایشی، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ به فلوم آزمایشگاهی منتقل شده و اندازه گیری ها شامل قرائت ارتفاع سطح آب و دبی انجام پذیرفت. ارتفاع سطح آب بالادست سرريز، قبل از افت سطح آب، به وسيله عمقسنج ۱±میلیمتر و دبی جریان توسط سرریز مثلثی کالیبره و با استفاده از مانومتر اندازه گیری شد (شکل ۲). به منظور آرام نمودن جریان بالادست سرریز و کاهش نوسانات سطح آب، در ورودی فلوم از یک صفحه از جنس ورق PVC استفاده گردید. در مجموع در این تحقیق، تعداد ۳۰ دبی (۴۵–۵ لیتر بر ثانیه)، در حالت جریان آزاد در فلوم برقرار گردید. یادآور می شود که با توجه به در نظر گرفتن سیستم تخلیه فلوم، انجام تمام آزمایشها، بدون كنترل پاييندست صورت گرفت.

به منظور انجام آزمایشها از ۳ مدل سرریز (کلید پیانویی پلکانی، بافل دار و یک عدد کلیدپیانویی بدون مانع) استفاده گردید که در جدول (۱) مشخصات سرریزها نشان داده شده است. شکل (۳) نمایی از ابعاد سرریزهای کلیدپیانویی ساخته شده را نشان می دهد.



شکل ۲- نمای کلی از تجهیزات و فلوم آزمایشگاهی مورداستفاده در آزمایشگاه

این تحقیق	مورداستفاده در	دل سرریزهای	جدول ۱- مشخصات م
-----------	----------------	-------------	------------------

نام سرريز	تعداد سيكل	L(m)	W(m)	P(m)	W/P
Piano Key – Base Model	۵	۰/٣	•/•٣	۰/۲	٣
Piano Key Traingular - Buffle	۵	۰/٣	•/•٣	٠/٢	٣
Piano Key Rectangular - Stepped	۵	۰/٣	•/•٣	۰/۲	٣



۔ شکل ۳- مدل های سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، الف) شاهد. ب) حالت پلکانی. ج) حالت بافل

> سرریزهای ساخته شده از جنس پلکسی گلاس (بدلیل امکان ماشین کاری دقیق و آراسته) با ضخامت ۵ میلی متر ساخته شدند. هنگام نصب سرریزها، تراز بودن تاج آنها با استفاده از تراز بنایی کنترل می گردید. ضمناً عمود بودن دیواره سرریز بر روی کف فلوم، هم در مرحله نصب و هم بعد از قرار گرفتن آب در پشت سرریز، با استفاده از گونیا کنترل گردید. برای شبیه سازی پله ها و بافل ها (H ارتفاع پلکان ها و بافل ها) از قطعات جداگانه استفاده شد. پس از نصب سرریز و آببند نمودن سرریز با چسب آکواریوم، شد. پس از نصب سرریز و آب در فاصله ی تنظیم نموده، پس از آن با استفاده از ارتفاع سنج، ارتفاع آب در فاصله ی ۲/۴ متری (ناحیه آرام که باعث افزایش دقت قرائت می شود) بالادست سرریز و در پایین دست سرریز اندازه گیری شد.

برای ارائه مدلهای مذکور بهصورت عددی از نرم افزار FLOW3D استفاده گردید. این نرمافزار یک مدل مناسب با بازه کاربرد وسیع برای تحلیل مسائل پیچیدهٔ سیالات از جمله حربانهای سه بعدی غیرماندگار میباشد که دارای سطح آزاد و WWW.SID.ir

هندسه پیچیده هستند (Maroosi and Roshan, 2015). در این تحقیق از مدل RNG برای بستن معادلات متوسط گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. برای حل عددی از نرمافزار FLOW3D استفاده شده و معادلات غیر دائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی شدهاند. در این نرمافزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود بكار رفته است. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می شود. ترمهای سرعت و فشار بصورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت زمان-های سابق در معادلات پیوستگی و مومنتم کوپل میشوند. به همین منظور و با استفاده از از نرمافزار AutoCad ابتدا یک مدل سه بعدی منطبق بر مشخصات مدلهای آزمایشگاهی تولید شد و سپس نتایج حاصل به نرمافزار FLOW3D برای تولید شبکه با بکارگیری دو ابزار مناسب VOF و FAVOR و تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی شد. پس از ورود دادههای هندسی به محیط نرمافزار و تعیین مرزهای کانال اصلی و فرعی، محدودهٔ

# Archive of SID نقیبزاده و همکاران: بررسی آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی ...

مورد نظر با استفاده از روشهای VOF و FAVOR شبکهبندی شد. ابعاد بهینهٔ شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکه میدان به گونهای تنظیم شد که خطوط شبکه متعامد باشند. در این تحقیق برای انجام محاسبات، در مجموع به طور متوسط ۲۰۶۵۰۱۲ سلول برای سه مش بلاک هر کدام به ابعاد ۲/۵×۲/۵×۲/۵ (برحسب میلی متر) برای شبکهبندی مدل ها انتخاب شد. پس از تولید شبکهٔ محاسباتی، شرط مرزی و شرایط اولیه، شبیهسازی جریان آب انجام شد (شکل ۴).

## انجام آزمایشها

برای مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی، یک

برنامه تحقیق از پیش تعیین شد. از بین تمام مدلهای آزمایش شده، بهترین مدلهای سرریز که بیشترین افت انرژی را نشان دادند انتخاب و مورد شبیهسازی قرار گرفتند. تعداد شبیهسازیهای سه بعدی صورتگرفته برای این تحقیق ۶۰ آزمایش بود. بعد از ساخت هندسه سرریزها و انتقال به نرمافزار FLOW3D اقدام به مشبندی و تعیین شرایط مرزی و همین طور شرایط ورودی شد. برای این منظور تعداد ۳۰ آزمایش در شرایط مدل فیزیکی و ۳۰ شبیه سازی در شرایط مدل عددی انجام شد که در مجموع ۶۰ آزمایش صورت گرفت که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- ارمایس مای صورت در قنه سده						
مشخصات	نوع آزمايش	Q(lit/s)	رديف			
-	شاهد فیزیکی	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	١			
ارتفاع پله ۰/۳ متر	پلکانی فیزیکی	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	٢			
ارتفاع بافل ۲/۳ متر	بافل فيزيكى	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	٣			
-	شاهد عددی	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	۴			
ارتفاع پله ۰/۳ متر	پلکان عددی	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	۵			
ارتفاع بافل ۳/۰ متر	بافل عددی	۵۰–۱۰ (۱۰دبی)	۶			

صورتگرفتهشده	آزمایشهای	جدول ۲-
--------------	-----------	---------



شکل ۴- شرایط مرزی ایجادشده برای سرریزهای کلید پیانویی مورداستفاده در این تحقیق: الف) سرریز کلید پیانویی بافل، ب) سرریز کلیدپیانویی پلکان، پ) سرریز کلید پیانویی شاهد

### نتایج و بحث

برای بررسی تاثیر پلکانها و بافل بر روی افت انرژی در سرریز P.K.W چند آزمایش طراحی شد؛ در یک مدل ارتفاع یلکان ۳۰ میلیمتر، در یک مدل بافل مکعبی (۳۰ میلیمتر ابعاد هر ضلع) و ۱۵ درصد ارتفاع سرریز بود و در یک مدل سرریز کلید پیانویی (P.K.W) بدون مانع (نمونه شاهد) مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایشها در ۱۰ دبی جریان از ۱۰ الی ۵۰ لیتر بر ثانیه و در مجموع ۳۰ آزمایش انجام شد. برای اندازه گیری افت انژی نسبی yc/H استفاده می شود و تاثیر دو عدد بدون بعد  $\frac{\Delta E}{E}$ ) از رابطه ب ر علی ویر (We) (در بازه ۴۰ الی ۱۶۰۰) بر میزان افت انرژی ir

نسبی مورد بررسی قرار گرفت. عدد y<sub>o</sub>/H نشاندهندهی میزان دبی جریان و تاثیر ارتفاع آب بر روی سرریز است و عدد وبر نیز نشاندهندهی کشش سطحی (به علت تماس مستقیم سرریز با جریان عبوری، کشش سطحی بر میزان افت انرژی تاثیر گذار است) در هیدرولیک می باشد.

## تاثیر yc/H بر میزان افت انرژی نسبی

در این قسمت تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بدون بعد yc/H برای حالتهای مختلف موانع نسبت به مدل شاهد بررسی شده است. بدین منظور تاثیر پلکانها و بافلها بر میزان افت انرژی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. یادآوری میشود پارامتر H،

ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز است که در شکل (۲) مکان قرارگیری Point Gauge (محل اندازه گیری H) میباشد که چهار برابر بار آبی روی سرریز در بیشترین دبی مورد آزمایش است، به این صورت که بعد از نصب هر سرریز یک دبی حداکثر (۵۰ لیتری) اجرا گردید و مقدار ارتفاع آب روی سرریز اندازه گیری شد

و بعد از اندازه گیری چهار برابر این ارتفاع به عنوان نقطهای برای اندازه گیری ارتفاع آب در بالادست سرریز انتخاب گردید و با بدست آوردن ارتفاع آب در بالادست، این مقدار را از ارتفاع سرریز (P) کم کرده و به این روش مقدار بار آبی در هر آزمایش بدست آمد.



همان طور که از شکل (۵) مدل فیزیکی برمی آید، میزان استهلاک انرژی در مدلهای مانعدار بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد است. بهعبارت دیگر، وجود موانع در کلید خروجی باعث افزایش استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی میشود. با توجه به این شکل، در دبیهای پایین در حدود ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه، مانع مورد نظر تاثیر چندانی بر میزان استهلاک نسبی انرژی ندارد. اما پس از آن برای دبی بزرگتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه مقدار استهلاک انرژی در حالت مانعدار نسبت به مدل شاهد تاثیر کشش سطحی (عدد وبر)، جریان به طور کامل با موانع در تماس است و موانع تأثیری بر شرایط جریان (سرعت و عمق تماس است و موانع تأثیری بر شرایط جریان (سرعت و عمق بریان) در سرریز نخواهند داشت. اما در دبیهای بالا، اثر کشش سطحی بر جریان کمتر است و استهلاک انرژی افزایش مییابد.

حاضر (کلیدپیانویی)، طول موثر سرریز بسیار بیشتر از عرض فلوم است و به این ترتیب بار آبی ایجاد شده بر روی سرریز کاهش مییابد، در حالی که Yc در اینجا با فرض خطی بودن در عرض مورد استفاده است، بنابراین نشان میدهد که عمق آب خطی است، اما مقدار H مربوط به سرریز غیر خطی است. در واقع مقادیر بالای yc/H میین دلیل است. همچنین استهلاک انرژی در مدل پلکانی بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل بافل و شاهد است. بنابراین در دبی یکسان، تفاوت در مانع باعث ایجاد تفاوت در میزان استهلاک انرژی میشود و میتوان گفت در مدل پلکانی، تداخل تیغههای جریان بیشتر شده و در نتیجه ورود هوا نیز بیشتر شده است. اما در مدل عددی بیشترین تاثیرگذاری در حالت بافل مشاهده شد که باعث افت بیشتری در سرریز می شود. بافل تا ۱۴ درصد، میزان افت انرژی را نسبت به حالت شاهد افزایش میدهد.

جدول ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطهٔ عطف استهلاک انرژی در برابر y<sub>c</sub>/H برای موانع متفاوت (مدل عددی)

درصد کاهش استهلاک انرژی	$\Delta E/E_0$	Yc/H	Q(lit/s)	مدل
44/•0	۱/۱۱–۱/۹۸	۲/۱۷-۱/۶۵	۱-۵۰	شاهد
۵٩/۲۶	۱/۱۲-۲/۱۸	۱/۵۸-۱/۶۵	۱-۵۰	بافل
$\Delta \cdot / \Delta$	1/18-8/1	۱/۴۷-۱/۵۶	۱-۵۰	پلكانى

www.SID.ir



شکل ۶- الگوی عمومی جریان شبیهسازی شده بر روی سرریزهای کلید پیانویی پلکانی و بافلدار

تاثیر عدد وبر بر میزان افت انرژی نسبی

(رابطه ۸)

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؛ به همین دلیل از عدد وبر که نشاندهنده کشش سطحی در مهندسی هیدرولیک است، استفاده میشود. برای محاسبه عدد وبر از رابطه ۸ استفاده میشود.

که در آن، p چگالی آب، σ کشش سطحی، Hs ارتفاع آب



شکل ۷-تغییرات استهلاک نسبی انرژی- عدد وبر

استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۱۸ به حدود ۰/۱۳، در مدل بافل از ۰/۱۸۶ به حدود ۰/۱۱۷ و در مدل پلکانی از حدود همانطور که در این شکل مشاهده میشود با افزایش عدد ریز مدار استهلاک انرژی کاهش مییابد، در حالی که میزان

$$We = \frac{\rho V^2 H_s}{\sigma}$$

میلیمتر و جایی است که کشش سطحی بر شرایط جریان بیشتر تاثیر میگذارد. به همین دلیل است که شیب نمودار در این محدوده بیشتر است.

در جدول (۳) مشاهده می شود که به ازای مقادیر عدد وبر، میزان استهلاک انرژی در مدل پلکانی ۵۰/۵، در مدل بافل ۵۹/۲۶ و در مدل شاهد ۴۴/۰۵ درصد کاهش مییابد.

تاثیر عدد بدون بعد Hs/Hb بر میزان افت انرژی نسبی در شکل (۸)، تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بیبعد Hs/Hb برای آرایش متفاوت موانع رسم شده است. پارامتر Hs/hb ارتفاع تیغهٔ آب روی نوک سرریز و Hb، ارتفاع موانع است. ۱۸۸۴ به حدود ۱/۱۳ کاهش مییابد. در واقع، با افزایش عدد وبر از حد بسیار کم (۳۵) تا مقدار زیاد (۱۵۰۰)، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل شاهد، ۴۴/۰۵ درصد، در مدل پلکانی ۵۰/۵ درصد و در مدل بافل ۹۲/۴۶ درصد است. به ازای عدد وبر در محدوده ۳۵–۱۰۰، تغییرات معنیداری در میزان استهلاک انرژی دیده نمیشود. ولی برای مقادیر عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰–۱۵۰۰ تفاوتهای معنیداری در میزان استهلاک انرژی وجود دارد. در ابتدا با توجه به شیب کمتر نمودار، شدت کاهش کمتر است و به ازای مقادیر پایین عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰– ۱۵۳ (در این حالت دبی جریان ۵۰–۵ لیتر بر ثانیه است)، میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۱۸۸۵ به ۱۵/۱۰ کاهش مییابد. در این محدوده ارتفاع تیغه آب روی سرریز ۱۵–۶/

جدول ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطهٔ عطف استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای موانع متفاوت (مدل عددی)

درصد کاهش استهلاک انرژی	$\Delta E/E_0$	Yc/H	We	Q(lit/s)	مدل
44/•0	۱/۱۱–۱/۹۸	۲/۱۷-۱/۶۵	۳۵-۱۵۰۰	۱-۵۰	شاهد
۵٩/۲۶	۱/۱۲-۲/۱۸	۱/۵۸-۱/۶۵	۳۵-۱۵۰۰	۱-۵۰	بافل
۵ • /۵	1/17-7/1	1/47-1/58	۳۵-۱۵۰۰	۱-۵۰	پلكانى



در شکل (۸) با افزایش نسبت Hs/Hb که ناشی از افزایش دبی است، مقدار استهلاک انرژی جریان در دو آرایش مورد نظر، به دلیلی که قبلاً توضیح داده شد، کاهش مییابد. بر اساس این شکل، در مدل عددی در دبی ثابت و موانع بار ارتفاع یکسان، مقدار استهلاک انرژی در مدل بافل بیشتر از میزان استهلاک

انرژی در مدل پلکان است، اما در مدل فیزیکی حالت پلکان بهتر از بافل میباشد. در جدول (۴) مقادیر استهلاک انرژی نسبت به پارامتر بی بعد Hs/Hb برای تنظیم آرایش متفاوت مانع، نسبت به مدل شاهد، نمایش داده شده است.

جدول ۴- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطهٔ عطف استهلاک انرژی در برابر نسبت بدون بعد Hs/Hb برای موانع متفاوت (مدل عددی)

درصد کاهش استهلاک انرژی	$\Delta E/E_0$	Yc/H	Hs/Hb	Q(lit/s)	مدل
۵٩/۲۶	١/١٢-٢/١٨	۱/۵۸-۱/۶۵	٣/١ -٠/٣	•/789-1/7•	بافل
۵ • /۵	1/18-8/1	۱/۴۷-۱/۵۶	٣/١ -٠/٣	۰/۳۰V-۱/۷۹	پلکانی

www.SID.ir

## Archive of SID نقیبزاده و همکاران: بررسی آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی ...

با توجه به نمودارهای ارائه شده در این تحقیق، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش مییابد؛ به عبارت دیگر در دبی کم، اختلاف مقادیر استهلاک انرژی در مدل-های مورد آزمایش کم است اما در مقدار زیاد این تفاوت بیشتر است. در دبی کم براساس تئوری جریان ریزشی (غیر لغزشی)، جریان کاملا با موانع در تماس است؛ با افزایش دبی بر اساس این تئوری، جریانهای گردابهای ایجاد شده در منطقهٔ جدایی، مانع تماس جریان با مانع میشود و در نتیجه از تأثیرات مانع بر مقاومت جریان کاسته خواهد شد و مقدار استهلاک انرژی کاهش مییابد.

### بررسی تاثیر موانع بر ضریب تخلیه (Cd)

در این قسمت به بررسی تاثیر موانع بر میزان ضریب تخلیه (Cd) که نشاندهنده راندمان سرریز می باشد پرداخته می شود. بر این اساس، شکل (۹) تغییرات ضریب دبی در مقابل پارامتر بدون بعد

Ht/P را نشان می دهد. به طور کلی و مطابق این شکل، ضریب دبی جریان در ابتدا با افزایش نسبت Ht/P، به علت 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 Ht/P به دلیل تداخل جریان در کلید خروجی سرریز (بالادست تاج جانبی) شروع به کاهش می کند. این شکل در واقع به نحوی بیانگر راندمان بالای سرریزهای کلید پیانویی در تراز کم آب نیز هست. همچنین، مشاهده می شود که با افزایش ۵۰/۰ اب نیز هست. همچنین، مشاهده می شود که با افزایش می Ht/P= +ht/P، ضریب دبی به حداکثر مقدار خود یعنی ۱۷۳۳ افزایش می ایاد با افزایش Pt/P به بیش از ۱۵/۰۵، ضریب دبی تا مقدار ۱۹/۰ کاهش می یابد. این مسئله، همان طور که پیش تر اشاره شد، نشانگر بازدهی سرریز کلید پیانویی در دبیهای کم است. همچنین میزان اختلاف خطای مدل عددی و فیزیکی کمتر از ۲/۰ درصد می باشد.



(مدل عددی و فیزیکی) شکل ۹– تغییرات  $C_d$  در برابر Ht/P برای آزمایشها (مدل عددی و فیزیکی)

## نتيجهگيرى

در این تحقیق استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی با شیب پاییندست پلکانی و بافل بررسی شد. در این راستا تأثیر سه پارامتر بیبعد نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع تاج سرریز (H<sub>t</sub>/P)، استهلاک انرژی، پارامتر بدون بعد (Hs/Hb) و عدد وبر و همچنین عمق بحرانی جریان روی تاج سرریز به عمق آب روی تاج سرریز مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقایسه بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی صورت پذیرفت. در ادامه نتایج حاصل از تحقیق ارائه شده است:

در مدلهای مختلف سرریزهای مانع دار، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش مییابد. www.SID.ir

میزان استهلاک انرژی در موانع بافل به میزان 8/75 درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در موانع پلکانی و 15/21 درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در حالت بدون مانع است.

با افزایش نسبت yc/H، میزان استهلاک نسبی جریان کاهش مییابد. در واقع با افزایش دبی ابتدا نسبت yc/H از ۱/۴ تا مقدار ۱/۶۵ افزایش مییابد و با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته میشود. در این محدوده، به دلیل تأثیر کشش سطحی و تداخل تیغههای جریان، مقدار استهلاک انرژی واقعی نیست.

با افزایش عدد وبر، مقدار استهلاک انرژی کاهش مییابد، در حالی که میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۱۸

دو حالت بافل و پلکان بیشتر از حالت شاهد افت انرژی ایجاد میکند اما در مدل عددی حالت بافل بیشتر از پلکان تاثیرگذار است اما در مدل عددی پلکان بیشتر از بافل تاثیرگذار میباشد.

## سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایاننامه میباشد. نویسندگان مقاله برخود لازم میدانند از سازمان آب و برق خوزستان برای در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی نمایند. همچنین مقاله مزبور برگرفته از رساله دکتری سید مهدی نقیبزاده دانشجوی دوره دکتری سازههای آبی واحد علوم و تحقیقات خوزستان و واحد اهواز دانشگاه آزاد اسلامی میباشد.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Akbariyan, A. (2009). *Design of Hydraulic Structures Canals*. Amidi Publication, Iran. (in Farsi).
- Beyrami, M.K. (1999). *Water Transfer Structure*. Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. (in Farsi).
- Blanc, P. and Lempérière, F. (2001). Labyrinth spillways have a promising future. *International Journal of Hydropower and Dams*, 8,129-131.
- Bremer, F.L. and Oertel, M. (2017). Numerical investigation of wall thickness influence on Piano Key Weir discharge coefficients: A preliminary study. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW* 2017. (pp: 101 -108).
- Crookston, B.M., Paxson, G.S. and Savage, B.M. (2012). Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs for High Headwater Ratios. In: Proceedings of *4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 9-11 Feb, Porto, Portugal, pp.1-7.
- Delgado, F.G.A., Paulina, M.A. and Camino S.F.G. (2015). Discharge Coefficients Spillways Labyrinth Implementing Hydrodynamic Devices in the upstream side. In: Proceedings of 36th IAHR World Congress. 28 Jun- 3 July, Hague, Netherlands. pp. 1-7.
- Erpicum, S. and Machiels, O. (2011). Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano key weirs – experimental study. In: Proceedings of *International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs*, Taylor & Francis Group, London.

Ghanbari R and Heidarnejad, M. (2020). Experimental and numerical analysis of flow hydraulics in triangular

به ۱/۱۳ در مدل بافل از ۱۸۶/ ۰به ۱۱۷۷ و در مدل پلکانی از حدود ۱۸۴۶ به ۱۲۳ کاهش می یابد. در واقع، با افزایش عدد وبر از حد بسیار کم (۳۵) تا مقدار زیاد (۱۵۰۰)، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل شاهد، ۴۴/۰۵ درصد، در مدل پلکانی ۵۰/۵ درصد و در مدل بافل ۹۶/۲۶ درصد است. به ازای عدد وبر در محدوده ۱۰۰–۳۵، تغییرات معنی داری در میزان استهلاک انرژی دیده نمی شود. ولی بین مقادیر عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰-دادر مناوتهای معنی داری در میزان استهلاک انرژی وجود دارد. حداکثر ضریب دبی جریان برابر ۱۷۲۶ و برای حالت بدون استفاده از مانع (حالت شاهد) است.

مقایسه بین نتایج حاصل از انجام آزمایشها به وسیله هر دو روش (آزمایشگاهی و عددی) نشان داد که نرمافزار Flow3D با نتایج کار آزمایشگاهی مقداری متفاوت است به گونهای که در

and rectangular piano key weirs. *Water Science*. (pp:1110-4929)

- Gharibvand, R. Heidarnejad, M Kashkouli, . H. A. Hasoonizadeh, H. and A. A. Kamanbedast. (2020). Numerical Analysis of Flow Hydraulic in Trapezoidal Labyrinths and Piano Key Weirs. Journal of Water and Soil Science Vol. 24, No. 1, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (in Farsi).
- Henderson, F. M. (1966). Channel controls. *Open Channel Flow*, Gene Nordby, Macmillan, NY, (pp. 174–175).
- Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams*, (5),144–149.
- Maroosi, M. and Roshan, R. (2015). *Analysis and design with FLOW-3D software*. Isatis, Fadak, Iran. (in Farsi).
- 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. In: Proceedings of 3rd International Conference on Geographical Science. 3 Nov. Shiraz University. Shiraz, Iran. (in Farsi).
- 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. Ahvaz, Iran. (in Farsi).