

بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر شکل‌های مختلف دماغه بر هیدرولیک و ساختار جریان سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی

اکبر صفرزاده^{۱*}، سیامک خیاط رستمی^۲، بابک خیاط رستمی^۳

- ۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی
- ۲- کارشناسی ارشد عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی
- ۳- کارشناسی ارشد عمران-سازه‌های هیدرولیکی، شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل

*Safarzadeh@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱/۱۹

چکیده

در این پژوهش هیدرولیک و ساختار جریان روی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با ارتفاع‌های مختلف، در دو حالت بدون دماغه و با وجود دماغه با شکل‌های مختلف با روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، مطالعه شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم به عرض یک متر انجام شده و مدل سرریزها با استفاده از صفحات PVC با سه ارتفاع مختلف به شکلی ساخته شده است که نسبت طول توسعه‌یافته تاج به عرض کانال در تمامی آن‌ها برابر پنج باشد. ابتدا منحنی ضریب آبگذری برای محدوده گسترده‌ای از نسبت هد به ارتفاع برای سه ارتفاع مختلف سرریز تعیین و سپس تأثیر سه هندسه از دماغه با شکل‌های مثلث، دایره و بیضی بر بهبود ضریب آبگذری سرریز با ارتفاع‌های مختلف بررسی شده است. در این پژوهش بازه انتخاب‌شده برای نسبت هد به ارتفاع همخوانی مناسبی با نسبت مذکور در طراحی سرریز کلید پیانویی سدهای موجود دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب آبگذری با افزایش ارتفاع سرریز تا مقدار خاصی افزایش‌یافته و دماغه‌های مثلثی بزرگ و بیضی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزها دارند. تأثیر اصلی دماغه در اصلاح توزیع خطوط جریان روی تاج جانبی سرریز در ناحیه پایین‌دست این تاج است.

واژگان کلیدی: سرریز کلید پیانویی، دماغه، مدل آزمایشگاهی، روش عددی، ضریب دبی، خط جریان

۱- مقدمه

مشابه با معادله معمول سرریزهای آزاد [1]، معیار مقایسه راندمان سرریزهای غیرخطی، ضریب دبی است که با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

$$(2B + 2T_s + W_i + W_o) \times N_u = L \quad (2)$$

در این روابط، به ترتیب $B, L, T_s, W_i, W_o, N_u, H, g, C_d$ و Q طول کل تاج سرریز، طول تاج جانبی، ضخامت تاج جانبی، عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی، تعداد کلید واحد سرریز، هد کل بالادست، شتاب گرانش، ضریب دبی و دبی عبوری از سرریز می‌باشند (شکل ۱).

راندمان سرریز کلید پیانویی از مجموع سه عامل (۱) حالات مختلف جریان روی تاج‌های بالادست، پایین‌دست و جانبی، (۲) طول مؤثر تاج (استغراق یا عدم استغراق قسمت‌های مختلف تاج) و (۳) شرایط ورودی جریان متناسب با هد بالادست تأثیر گرفته و در حالت کلی با افزایش هد بالادست، راندمان سرریزهای کلید پیانویی کاهش پیدا می‌کند [2].

شکل ۱. پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی

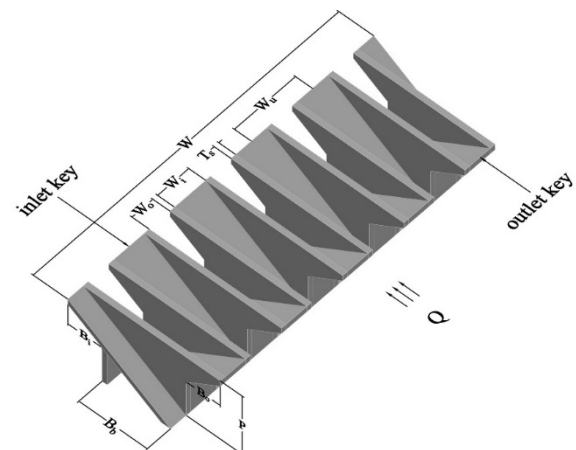


Fig. 1. Geometrical parameters of Piano Key weir

اوامان و لمپیرر [3] و لیت ریبرو و همکاران [4] نشان دادند که نسبت طول به عرض (L/W) مهم‌ترین عامل کنترلی ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی است. با در نظر گرفتن پیچیدگی و هزینه ساخت و راندمان سرریز می‌توان مقدار ۵ را برای نسبت طول تاج به عرض، به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت [5].

نسبت L/W برای سرریزهای احداث شده، عددی بین ۴ و ۸ است [5].

در اولویت‌های بعدی برای نسبت‌های هندسی تأثیر گذار بر راندمان سرریز، میشلز [2] ارتفاع سرریز (P)، نسبت عرض کلید ورودی به خروجی (W_i/W_o) و نسبت طول اورهنگ‌ها (B_o/B_i) را به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر راندمان سرریز ارائه و بررسی کرد. مطالعات آن‌ها از کلید ورودی به عنوان «موتور» سرریز و از کلید خروجی به عنوان «ترمز» سرریز کلید پیانویی یاد کرده است. طبق گزارش‌های میشلز، افزایش مساحت کلید ورودی باعث افزایش راندمان سرریز می‌شود. باید در نظر داشت که این عمل باعث کاهش ظرفیت کلید خروجی، استغراق زودهنگام و تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی و عدم تخلیه جریان وارد شده به این کلید خواهد شد. بدین لحاظ ایجاد تعادل بین حجم کلید ورودی و خروجی بسته به هد طراحی، الزامی به نظر می‌رسد [2].

میشلز [2] با بررسی ارتفاع در قالب پارامتر P/W_u به این نتیجه رسید که با افزایش ارتفاع بیش از یک حد معین، دیگر راندمان سرریز افزایش نمی‌یابد. با توجه به این مورد، وی مقدار P/W_u برابر $1/33$ را به عنوان ارتفاع نسبی بهینه هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی (قابل استفاده در پروژه‌های جدید سدسازی) معرفی نمود. در یک حالت دیگر، با بررسی سرریز کلید پیانویی در حالتی که این سرریز در پروژه‌های بهسازی سدهای موجود استفاده شود، ارتفاع نسبی P/W_u برابر $0/5$ را با ملاحظات هیدرولیکی و اقتصادی به عنوان مقدار بهینه معرفی نمود.

در ادامه پارامتر W_i/W_o و B_o/B_i را برای سرریز کلید پیانویی با دو ارتفاع نسبی P/W_u برابر با $1/33$ و $0/5$ را پیشنهاد کرد. طبق گزارش‌های وی، در حالت P/W_u برابر با $1/33$ ، افزایش مقدار W_i/W_o از مقدار ۱ باعث افزایش راندمان سرریز شده و W_i/W_o برابر با $1/5$ و $1/25$ راندمان بیشتری از خود نشان دادند. لیکن در مورد مدل P/W_u برابر با $0/5$ ، تغییر در نسبت W_i/W_o از مقدار ۱ باعث افت راندمان سرریز می‌شود. افزایش B_o/B_i در سرریز با ارتفاع بهینه هیدرولیکی از مقدار ۱ تا مقدار ۳ باعث افزایش راندمان و در سرریز با ارتفاع نسبی بهینه اقتصادی، افزایش این نسبت، باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در راندمان نشده

و حتی در هدهای بالا در پایین دست سرریز بر هوادهی جریان تأثیر منفی می گذارد [2].

پارامترهای T_s و B_b جزو پارامترهایی هستند که حداقل شدن آن ها باعث افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی خواهد شد. ولی باید در نظر داشت که مقدار کمینه این دو پارامتر در نهایت تابع ملاحظات اجرایی و سازه ای خواهد بود. در پروژه های اجرا شده و جاری توسط کمپانی "EDF" فرانسه نسبت T_s/W_u عددی بین 0.042 و 0.107 ، نسبت T_s/P عددی بین 0.055 و 0.167 است [7].

در پروژه های اجرا شده و در حال اجرا توسط کمپانی "EDF" فرانسه نسبت H/P طرح برای سرریزهای کلید پیانویی، عددی بین 0.17 و 0.36 است. این نسبت در 6 سرریز از 10 استفاده شده در پروژه های این کمپانی بیشتر از 0.3 است [7]. H/P طرح برای سرریزهای سد ساوا کودو در هند و اولدجت ملژ در الجزیره به ترتیب 0.56 و 0.66 است [8].

پژوهش های اومانی و لمپیر در سال 2006 [3] نشان داد که شکل دایره ای ورودی در زیر اورهنگ بالادست می تواند تا 7 درصد بر راندمان سرریز کلید پیانویی اثر بگذارد. در سال 2014 لفبرو و همکاران [9] با مدل سازی عددی سرریز کلید پیانویی به بررسی دماغه های نیم دایره، مثلثی، نیم مثلثی^۱ زیر کلید خروجی و ترکیبی از دماغه و نیم مثلثی زیر کلید خروجی^۲ پرداختند. این تغییرات در بهترین حالت (شکل مثلثی زیر کلید خروجی) باعث افزایش 5 درصدی راندمان سرریز شد. احدیان و افضلیان [10] با مطالعه آزمایشگاهی سه شکل مثلثی، نیم دایره و تخت برای دماغه در دو حالت سرریز با نسبت P/W_u برابر $1/3$ و 0.5 به بررسی تأثیر دماغه بر راندمان سرریز کلید پیانویی پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که تفاوتی بین عملکرد سرریز با دماغه تخت و بدون دماغه وجود ندارد. پایه استوانه ای نسبت به مدل بدون دماغه در حالت P/W_u برابر $1/3$ ، 15 درصد و حالت P/W_u برابر 0.5 ، 17 درصد دارای راندمان بیشتری است. شکل مثلثی دماغه در حالت P/W_u برابر $1/3$ ، 30 و حالت P/W_u برابر 0.5 ، 34 درصد نسبت به مدل های پایه بدون دماغه راندمان بیشتری از خود نشان داده اند. اعداد گزارش شده توسط احدیان و افضلیان

برای حالت P/W_u برابر $1/3$ در H/P های کوچک تر از 0.11 و در حالت P/W_u برابر 0.5 در H/P های کوچک تر از 0.25 و بزرگ تر از 0.17 رخ داده است.

در این پژوهش، سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با ارتفاع های متفاوت در دو حالت بدون دماغه و با وجود دماغه با شکل های مختلف به صورت آزمایشگاهی مدل سازی شده و ضرایب تجربی دبی به ازای هدهای مختلف جریان استخراج می شود. سپس مدل سازی عددی یک و نیم سیکل از سرریز همراه با یکی از شکل های مختلف دماغه در نرم افزار Flow-3D صورت گرفته و درستی مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی کنترل می شود. با استفاده از امکانات نرم افزار مزبور، دبی عبوری از نواحی مختلف تاج به صورت جداگانه محاسبه و در نتیجه رفتار سرریز دماغه دار مشخص می شود. در نهایت خطوط جریان با استفاده از نرم افزار تک پلات ترسیم شده تا فهم دقیقی از جریان هنگام عبور از روی سرریز، با افزودن دماغه به دست آید. نوآوری این پژوهش، بررسی و مقایسه عملکرد سرریز کلید پیانویی با دماغه بیضی شکل و مثلثی کوچک با اشکال مثلثی بزرگ و نیم دایره است که دارای حجم بتن ریزی کمتری نسبت به دماغه مورد بررسی در مطالعات قبلی هستند. ترسیم خطوط جریان و بررسی تأثیر دماغه بر چگونگی توزیع جریان در نواحی مختلف تاج سرریز کلید پیانویی دیگر تمایز دیگر این پژوهش و مطالعات قبلی است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تجهیزات و مدل سازی آزمایشگاهی مدل سازی

آزمایش ها در یک فلوم شیب پذیر به طول 10 متر، عرض 1 متر و ارتفاع 0.8 متر با دیواره های شیشه ای و کف فولادی انجام شده است. مخزن اصلی ذخیره آب با حجم 14 مترمکعب در زیر فلوم قرار دارد. آب به وسیله پمپ با ظرفیت 95 لیتر بر ثانیه و دور موتور 2960 دور بر دقیقه، از مخزن اصلی توسط یک لوله پلی اتیلن به قطر 20 سانتی متر به مخزن بالادست فلوم، برای آرام سازی جریان رسانده می شود. بعد از مخزن بالادست، سه توری مشبک برای آرام سازی جریان و

در میانه خط لوله واصل مخزن زیرین و مخزن ورودی کانال، یک دبی سنج مغناطیسی با دقت ± 1 لیتر بر ثانیه برای تعیین دبی ورودی نصب شده است. مقدار جریان ورودی به پمپ از مخزن اصلی توسط یک شیر پروانه‌ای قابل تنظیم است. با افزایش دبی و قبل از قرائت عمق به ازای دبی جدید، حداقل ۴ دقیقه زمان صرف تثبیت جریان می‌شود. آزمایش برای هر دبی، دو بار انجام شده و در صورت وجود مغایرت بین خروجی‌ها، برداشت داده‌ها برای بار سوم تکرار شده و از سه سری برداشت میانگین‌گیری صورت گرفته است. با استفاده از مقادیر هد و دبی ثبت‌شده در هر مدل، ضریب دبی با استفاده از رابطه (۱) تعیین شده است.

۲-۲- طرح مدل سرریز کلید پیانویی

برای بررسی تأثیر هندسه دماغه بر راندمان سرریز کلید پیانویی، سه سرریز با پلان مشابه و با ارتفاع‌های متفاوت و ۴ تیپ مختلف دماغه برای هر سرریز شامل مثلی بزرگ با ارتفاع برابر با نصف قاعده، مثلی کوچک با ارتفاع برابر با یک‌چهارم قاعده، نیم‌دایره و نیم بیضی با شعاع بزرگ دو برابر شعاع کوچک به عرض کلید ورودی به‌علاوه دو ضخامت $1/5$ سانتی‌متری تاج جانبی از ورق PVC ساخته شده‌اند. مشخصات مدل‌ها و دماغه‌های بررسی شده در جدول (۱) و شکل‌های (۳ تا ۵) آورده شده است. شکل (۳) چگونگی جایگذاری ۴ تیپ مختلف دماغه را نشان می‌دهد

یک صفحه یونولیتی (به طول $1/5$ متر) مقید در راستای جریان و آزاد در ارتفاع برای گرفتن نوسانات سطح آب قرار داده شده است. سکویی به طول 105 سانتی‌متر و ارتفاع 21 سانتی‌متر برای نصب سرریز به فاصله 4 متری از انتهای فلوم برای جلوگیری از تأثیر جریان خروجی از سرریز بر جریان نصب شده است. رمپ با شیب 22 درجه برای ورود آرام به سرریز قبل از سکو اجرا شده است (شکل ۲).

برای اندازه‌گیری هد روی سرریز و همچنین پروفیل طولی سطح آب، از یک خط کش دیجیتال با دقت 0.01 میلی‌متر استفاده شد. محل اندازه‌گیری هد روی سرریز در فاصله 90 سانتی‌متری از سرریز قرار دارد. در این مکان، پروفیل افقی جریان در بالاترین هد، برای سرریز با بیشترین ارتفاع برقرار است. در تفسیر و ارائه نتایج، بار آبی کل جریان (H) در قالب عمق (h) و بار سرعت ($V^2/2g$) استفاده می‌شود. سرعت جریان به صورت متوسط سرعت در مقطع (دبی تقسیم بر سطح مقطع) محاسبه خواهد شد. بدین خاطر یکنواخت بودن خطوط جریان (پروفیل افقی سطح آب) در مقطع محاسباتی اهمیت دارد.

شیب کف کانال در طول آزمایش در مقدار صفر ثابت شده است. صفر بودن شیب کف و ارا به در ابتدا، انتها و محل قرائت عمق بالادست جریان توسط شیب‌سنج دیجیتال کنترل می‌شود.

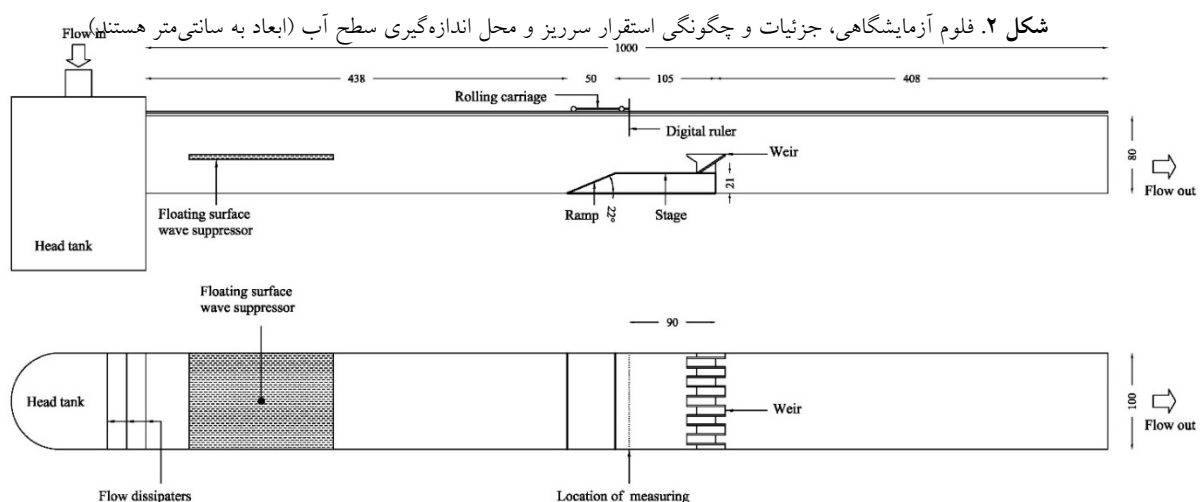


Fig. 2. Flume, details and position of the weir and location of the water surface measurement (Dimensions are in centimeter)

P-10-net	1	0.5	0.5
Model	T _s /P	T _s /W _u	Crest type
P-20-net	0.075	0.075	Flat-topped
P-15-net	0.1	0.075	Flat-topped
P-10-net	0.15	0.075	Flat-topped

Table 1. Geometrical details of experimental models

شکل ۴. ابعاد پلان (متر) دماغه‌های نیم بیضی (a)(oval)، نیم دایره (b)(H.R)، مثلثی کوچک (c)(S.T) و مثلثی بزرگ (d)(L.T)

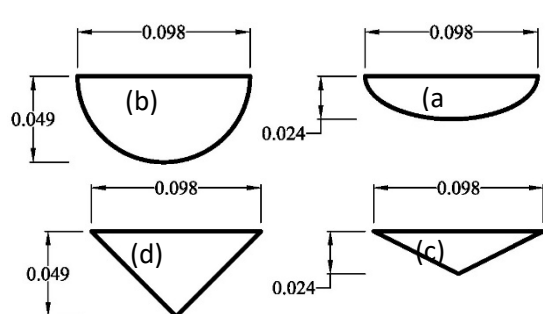


Fig. 4. Dimensions of plan (m) of (a) Half oval, (b) Half round, (c) Small triangle and (d) Big triangle fillets.

شکل ۵. مدل آزمایشگاهی P-20-oval



Fig. 5. Experimental model of P-20-oval

معادلات حاکم بر مسئله موردنظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت است. این معادلات در جریان‌های دوفازی در سیستم مختصات کارتزین (x_i) با مؤلفه‌های سرعت (u_i) و $i=1,2,3$ به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u_i A_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_i \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x_i} + G_i + f_i \quad (4)$$

شکل ۳. مدل‌های P-10(c)، P-15(b) و P-20(a) با دماغه‌های

مختلف مورد مطالعه

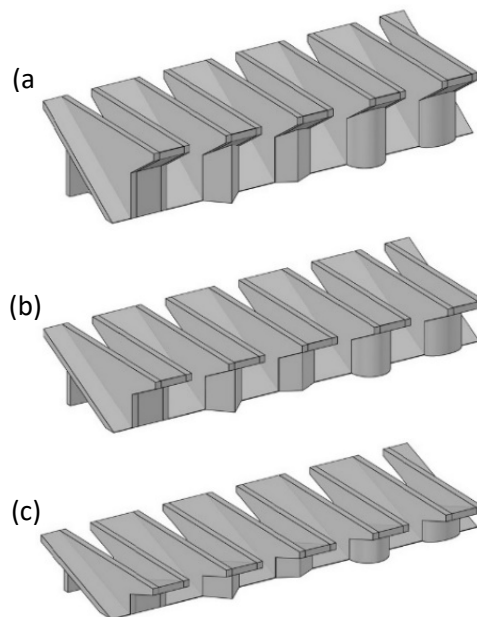


Fig. 3. (a) P-20, (b) P-15, (c) P-10 models with different fillet shapes

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل‌های فیزیکی.

Model	L (m)	W (m)	P (m)
P-20-net	2.5	1	0.2
P-15-net	2.5	1	0.15
P-10-net	2.5	1	0.1

Model	W _i (m)	W _o (m)	W _u (m)
P-20-net	0.1014	0.0676	0.2
P-15-net	0.1014	0.0676	0.2
P-10-net	0.1014	0.0676	0.2

Model	N _u	B (m)	B _o (m)
P-20-net	5	0.4	0.1
P-15-net	5	0.4	0.1
P-10-net	5	0.4	0.1

Model	B _i (m)	B _b (m)	T _s (m)
P-20-net	0.1	0.2	0.015
P-15-net	0.1	0.2	0.015
P-10-net	0.1	0.2	0.015

Model	L _u (m)	L _u /W _u	W _i /W _o
P-20-net	0.5	5	1.5
P-15-net	0.5	5	1.5
P-10-net	0.5	5	1.5

Model	B _o /B _i	B _b /B	P/W _u
P-20-net	1	0.5	1
P-15-net	1	0.5	0.75

به صورت سطوحی در میدان حل تعریف می‌شوند و بدون تأثیر بر توزیع جریان، با تخلخل ۱۰٪ جریان را به طور کامل از خود عبور می‌دهند. با استفاده از این سطوح می‌توان اطلاعات مفیدی از جمله مقدار نیروی وارد شده بر سطح اجسام و یا متوسط شار عبوری از یک مقطع را استخراج نمود. در این راستا ۲ بفل روی نیم تاج بالادست، ۸ بفل روی تاج جانبی و ۲ بفل روی نیم تاج جانبی قرار داده شده است (شکل ۷). به دلیل تفاوت بین طول سه تاج بالادست، پایین دست و جانبی مدل‌ها در نتیجه تفاوت طول بفل‌ها، دبی در واحد طول گزارش شده است. برای انجام مقایسه و تحلیل خطوط جریان سرریز P-15 بدون دماغه (net) و با دماغه بیضی (oval) به ازای $H/P=0.22$ به صورت عددی مدل شده‌اند.

۲-۳-۳- بررسی هم‌گرایی

همگرایی حل عددی از طریق بررسی تغییرات زمانی دبی در مرزهای ورودی و خروجی میدان انجام شده است. با توجه به شکل (۸)، شبیه‌سازی میدان به مدت ۱۲ ثانیه منجر به برقراری همگرایی و تساوی دبی‌های ورودی و خروجی در میدان حل شده است.

در ادامه پس از بررسی درستی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از دو بخش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به تفصیل ارائه شده و تأثیر شکل‌های مختلف دماغه بر هیدرودینامیک سرریزهای کلید پیانویی با سه ارتفاع مختلف بررسی شده است.

شکل ۶. مش‌بندی و شرایط مرزی میدان مدل P-15-net

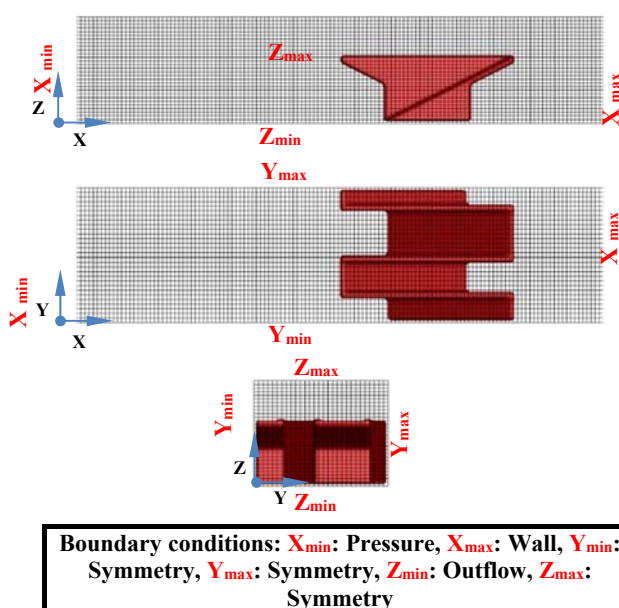


Fig 6. Geometry of mesh block and boundary conditions of one key model of P-15-net

در این معادلات، ρ چگالی آب، V_F جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR و A_i جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت i ام است. در معادلات بقای اندازه حرکت، P_i بیان‌گر فشار بوده و (G_i) و (f_i) به ترتیب بیان‌گر مؤلفه‌های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت برای راستای i ام است. شتاب لزجت شامل اثر لزجت دینامیکی سیال (μ_f) و نیز آشفتگی جریان (μ_t) است. برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، بیشتر از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود.

در این مقاله نرم‌افزار تجاری Flow-3D که از روش حجم محدود برای حل میدان با معادلات حاکم ناویر-استوکس میانگین‌گیری رینولدز که از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG بهره می‌جوید، استفاده شده است. نرم‌افزار Flow-3D از روش جز حجمی برای مشخص کردن هندسه سرریز و سطح آزاد سیال در میدان حل استفاده می‌کند. از روش‌های VOF و FAVOR برای شبیه‌سازی سطح آب و همچنین معرفی هندسه سرریز استفاده شده است. جزییات این روش‌ها در راهنمای نرم‌افزار ارائه شده است [12].

۲-۳-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی میدان حل

مدل‌های عددی سرریز P-15 بدون دماغه (net) به صورت یک و نیم کلید واحد (دو نیم کلید ورودی و خروجی و یک نیم کلید ورودی و خروجی) برای انجام درستی‌آزمایی به ازای ۵ هد مختلف بالادست مدل شده‌اند. مرز ورودی میدان (در راستای طولی-X) به صورت فشار-عمق آب، مرز خروجی میدان در راستای طولی از نوع دیوار، طرفین میدان (راستای عرضی-Y) به خاطر اطمینان از وجود تقارن در فیزیک مسئله از نوع تقارن و در راستای قائم (Z) سقف میدان از نوع تقارن و کف میدان از نوع خروجی در نظر گرفته شده است (شکل ۶). مش‌بندی میدان به صورت یکنواخت و بعد مش $4/7$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۶). به خاطر بسته بودن کف میدان در بالادست سرریز جریان فقط امکان خروج از پایین دست سرریز را دارد. این مورد با وجود اینکه مطابق با شرایط آزمایشگاهی نیست ولی عدم مدل‌سازی پرش هیدرولیکی پایین دست سرریز باعث کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در سرعت حل و همگرایی مدل‌های عددی می‌شود.

برای بررسی مقدار دبی عبوری از نواحی مختلف تاج مدل‌ها از گزینه بفل نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده است. بفل‌ها

به دست آمده از مدل سازی عددی با ضرایب دبی آزمایشگاهی (%diff) در هدهای بالادست یکسان (رابطه ۵) و همبستگی ضرایب دبی تجربی و عددی که به وسیله ضریب همبستگی پیرسن R (رابطه ۶) تعریف می شود، استفاده شده است.

$$\%diff = \frac{C_{d.Numerical} - C_{d.Experimental}}{C_{d.Experimental}} \times 100 \quad (5)$$

$$R = \frac{COV(C_{d.Numerical} - C_{d.Experimental})}{\sigma(C_{d.numerical}) \sigma(C_{d.Experimental})} \quad (6)$$

به خاطر تفاوت در هدهای اندازه گیری شده بین مدل آزمایشگاهی و عددی، مقادیر متناظر $C_{d.Numerical}$ برای H/P اندازه گیری شده در مدل آزمایشگاهی از بین ضرایب اندازی گیری شده برای مدل عددی درونیابی خطی شده و در مقایسه عملکرد دو مدل استفاده قرار شده است. با توجه به جدول (۲) می توان مشاهده کرد بیشینه خطای مدل های عددی نسبت آزمایشگاهی کمتر از ۱۰٪ است و روند تغییرات ضرایب دبی به افزایش هد بین مدل آزمایشگاهی و عددی همبستگی قابل قبولی دارد (R بیشتر از ۰.۹۷).

شکل ۹. مقایسه ضرایب دبی عددی و آزمایشگاهی مدل P-15-net

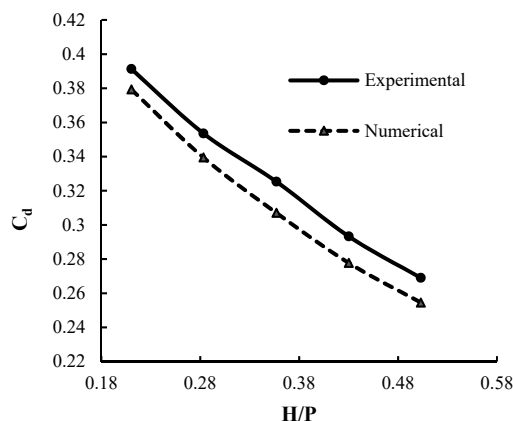


Fig 9. Comparison of discharge coefficient curves between numerical and experimental models of P-15-net

جدول ۲. درستی آزمای نتایج عددی با آزمایشگاهی

Max%diff	Corresponding H/P	Average %diff	R
5.6	0.369	4.7	0.97

Table 2. Validation of numerical simulation results with experimental results

شکل ۷. آرایش بافل ها روی نیم تاج واحد مدل P-15-net

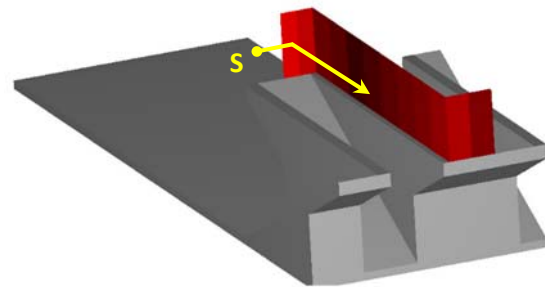


Fig 7. Placement of the baffles on half crest of unit crest in P-15-net model

شکل ۸. کنترل همگرایی و تثبیت دبی ورودی و خروجی از میدان در مدل کلید پیانویی P-15-net به ازای $h/P = 0.22$

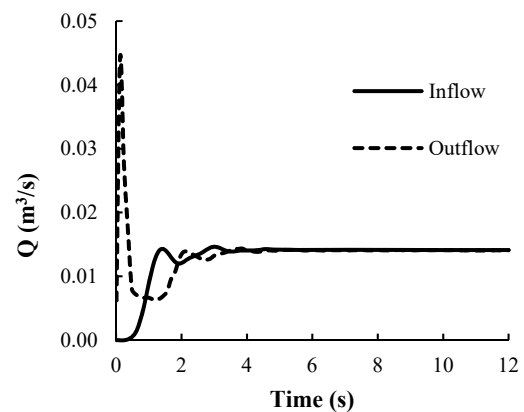


Fig 8. Stability control and convergence of inflow and outflow in P-15-net model for $h/P=0.22$ condition

۲-۳-۴-درستی آزمایی

در شکل (۹) تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت هد به ارتفاع سرریز با ارتفاع ۱۵ سانتی متر، بدون وجود دماغه در دو حالت آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. مطابق با گزارش لیت ریبرو و همکاران [13] اگر ضخامت تیغه آب از تراز تاج سرریز بیش از ۳ سانتی متر باشد کشش سطحی تأثیری بر نتایج خروجی نخواهد داشت، به همین دلیل فقط مقادیر مربوط به اعماق اندازه گیری شده بزرگتر از ۳ سانتی متر در شکل (۹) برای درستی آزمایی مدل عددی آورده شده است. بررسی عددی سرریز کلید پیانویی نیز برای هدهای بالاتر از ۳ سانتی متر صورت گرفته است. با توجه به شکل، روند تغییرات و مقادیر ضریب دبی حاصل از مدل عددی هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. برای ارزیابی کمی میزان انطباق نتایج مدل عددی با داده های آزمایشگاهی از اختلاف ضریب دبی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

مشابه با رابطه (۵) درصد اختلاف عملکرد مدل‌های دماغه‌دار (nose type) به مدل بدون دماغه (net) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\%diff. = \frac{C_{d \text{ nose type}} - C_{d \text{ net model}}}{C_{d \text{ net model}}} \times 100 \quad (V)$$

در این حالت نیز به خاطر تفاوت در هدهای اندازه‌گیری شده بین مدل بدون دماغه و دماغه‌دار، مقادیر متناظر $C_{d \text{ nose type}}$ برای H/P اندازه‌گیری شده در مدل بدون دماغه از بین ضرایب اندازه‌گیری شده برای مدل دماغه دار درونیابی خطی شده و در مقایسه عملکرد دو مدل استفاده شده است.

با توجه به شکل (۱۰) می‌توان دید افزایش ارتفاع از ۱۰ سانتی‌متر به ۱۵ سانتی‌متر باعث افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی شده است. باید خاطرنشان کرد افزایش ارتفاع از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر راندمان سرریز کلید پیانویی نداشته است.

با توجه به شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) در مورد سرریزها با ارتفاع ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر اضافه کردن دماغه مثلثی کوچک تأثیری بر راندمان سرریز نگذاشته است. با بررسی تمامی هدهای مورد آزمایش در مدل‌های با ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر دماغه با هندسه بیضی و در سرریز با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر دماغه با هندسه نیم‌دایره باعث بیش‌ترین افزایش در راندمان سرریز کلید پیانویی شده است. جداول (۳ تا ۵) نشان‌دهنده اختلاف حداکثری و اختلاف

راندمان در هدهای به خصوص جریان هستند. با توجه به این جدول و در نظر گرفتن هدهای بزرگ‌تر از ۳ سانتی‌متر، در سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر دماغه‌های نیم‌دایره و نیم بیضی، در مدل با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری دماغه‌های مثلثی بزرگ و نیم بیضی تقریباً به یک اندازه و در مدل با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری دماغه‌های مثلثی بزرگ و نیم‌دایره تقریباً به یک اندازه راندمان سرریز را افزایش داده‌اند.

می‌توان دلیل افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی با دماغه را هدایت بهتر جریان و افت کمتر هد جریان در دهانه کلید ورودی دانست. با توجه به مطالب ذکرشده دماغه بیضی‌شکل

شکل ۱۰. تأثیر ارتفاع بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی مستطیلی

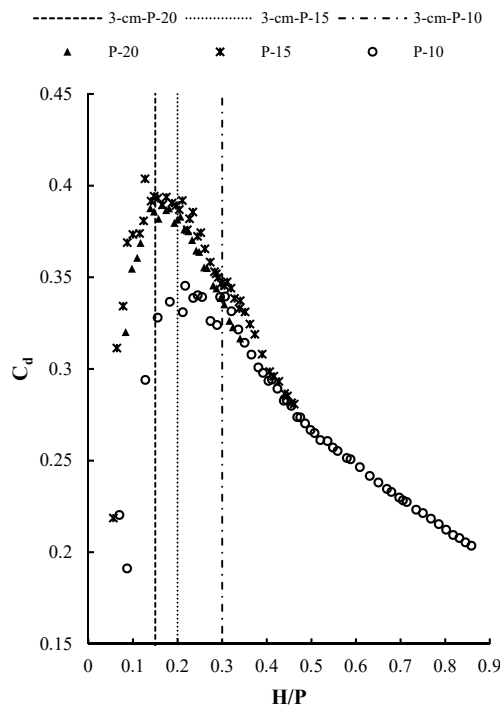


Fig 10. Height effect on discharge coefficient of rectangular piano key weir

شکل ۱۱. تأثیر شکل دماغه بر ضریب دبی سرریز P-20-net

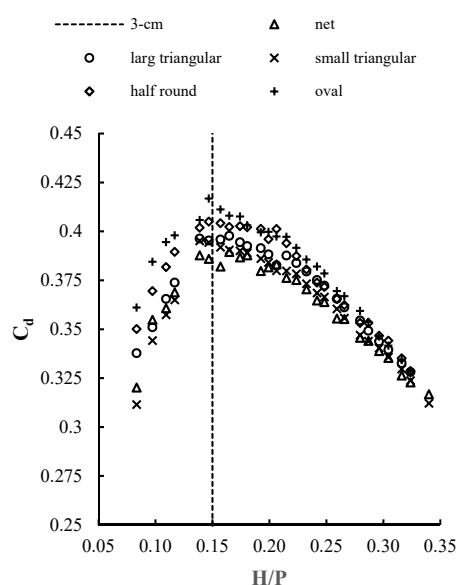


Fig 11. Effect of fillet shape on discharge coefficient of P-20-net

می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود افزودن دماغه بیضی باعث افزایش دبی عبوری از ناحیه پایین دست تاج جانبی سرریز شده است که نشانه‌ای از توزیع مناسب تر جریان در این ناحیه است.

جدول (۶) توزیع خطوط جریان رهاشده در عرض و ترازهای یکسان دو مدل P-15 با دماغه بیضی و بدون دماغه را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد افزودن دماغه باعث کاهش طول مسیر طی شده خطوط جریان نزدیک بستر ($Z=4$) هنگام مواجه با ناحیه زیر کلید خروجی شده است که باعث کاهش افت انرژی جریان می‌شود. با در نظر گرفتن خطوط جریان در تراز متوسط ($Z=7$) کاهش تراکم خطوط و توزیع بهتر این خطوط در ورودی و میانه کلید ورودی قابل رؤیت است. این پدیده باعث کاهش جدایی سرعت جریان در کلید ورودی می‌شود که عامل اصلی فرصت دهی به جریان برای تخلیه به طرفین و درگیر کردن طول بیشتر تاج جانبی و در نتیجه بالا رفتن راندمان تاج مزبور خواهد شد. با بررسی خطوط جریان عرضی ($Y=7/5$) رهاشده در تراز زیر تاج سرریز می‌توان به اثر دماغه بیضی در هدایت بهتر جریان خروجی از ناحیه پایین دست تاج جانبی سرریز و توزیع مناسب تر آن‌ها پی برد.

جدول ۳. میزان افزایش عملکرد سرریز P-10-net به ازای اشکال مختلف دماغه

Fillet shape	Large triangl e	Small triangl e	Half round	Half Ova l
Max %diff. (total)	9.5	37.2	19.4	24.6
Correspondin g H/P (total)	0.29	0.09	0.09	0.09
Max %diff. (heads greater than 3 cm)	3.7	1.2	5	3.1
Correspondin g H/P (higher 3)	0.34	0.52	0.38	0.38
%diff. H/P=0.3	3.6	-0.7	3.7	3.1
%diff. H/P=0.4	3	0.9	4.8	3
%diff. H/P=0.5	3.1	0.9	2.9	2.4

Table 3. Increase of performance of P-10-net weir for different fillet shapes

شکل ۱۲. تأثیر شکل دماغه بر ضریب دبی سرریز P-15-net

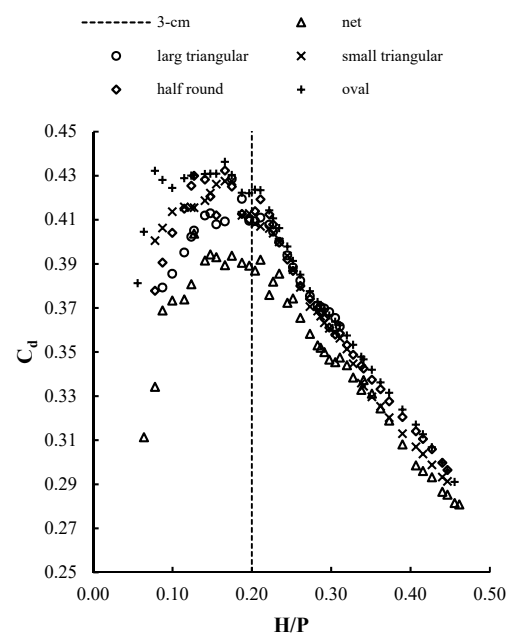


Fig 12. Effect of fillet shape on discharge coefficient of P-15-net

شکل ۱۳. تأثیر شکل دماغه بر ضریب دبی سرریز P-10-net

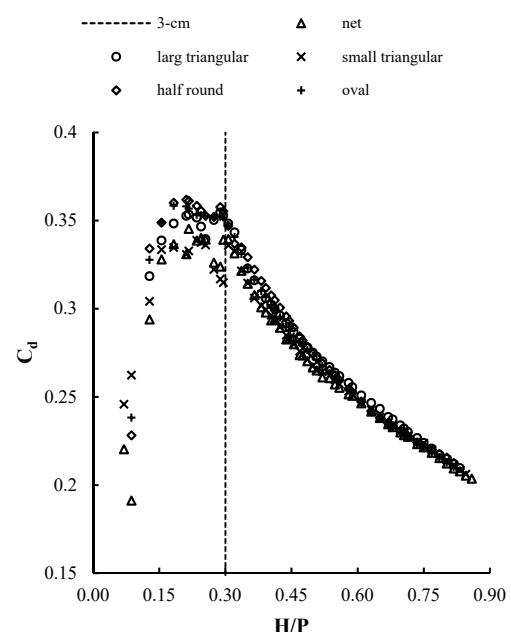


Fig 13. Effect of fillet shape on discharge coefficient of P-10-net

۲-۳- نتایج عددی

شکل (۱۴) توزیع دبی در واحد عرض روی نیم تاج سرریز P-15 در حالت بدون دماغه (net) و با دماغه بیضی (oval) را نشان

جدول ۵. میزان افزایش عملکرد سرریز P-20-net به ازای اشکال مختلف دماغه

Fillet shape	Large triangle	Small triangle	Half round	Half Oval
Max %diff. (total)	5.5	2.6	9.3	12.8
Corresponding H/P (total)	0.08	0.16	0.08	0.08
Max %diff. (heads greater than 3 cm)	3.6	2.6	5.8	7.6
Corresponding H/P (higher 3)	0.16	0.16	0.16	0.16
%diff. H/P=0.3	1.4	0.3	2.4	2.1

Table 5. Increase of performance of P-20-net weir for different fillet shapes

جدول ۴. میزان افزایش عملکرد سرریز P-15-net به ازای اشکال مختلف دماغه

Fillet shape	Large triangle	Small triangle	Half round	Half Oval
Max %diff. (total)	8.8	19.8	13	74.4
Corresponding H/P (total)	0.17	0.08	0.08	0.06
Max %diff. (heads greater than 3 cm)	8.5	8	9.7	10.2
Corresponding H/P (higher 3)	0.22	0.22	0.22	0.22
%diff. H/P=0.3	6.2	4	3.8	5.5
%diff. H/P=0.4	5.4	2.3	4.7	5.9

Table 4. Increase of performance of P-15-net weir for different fillet shapes

شکل ۱۴. مقایسه توزیع دبی در واحد طول در مدل P-15-net و P-15-oval بر روی نیم تاج سرریز

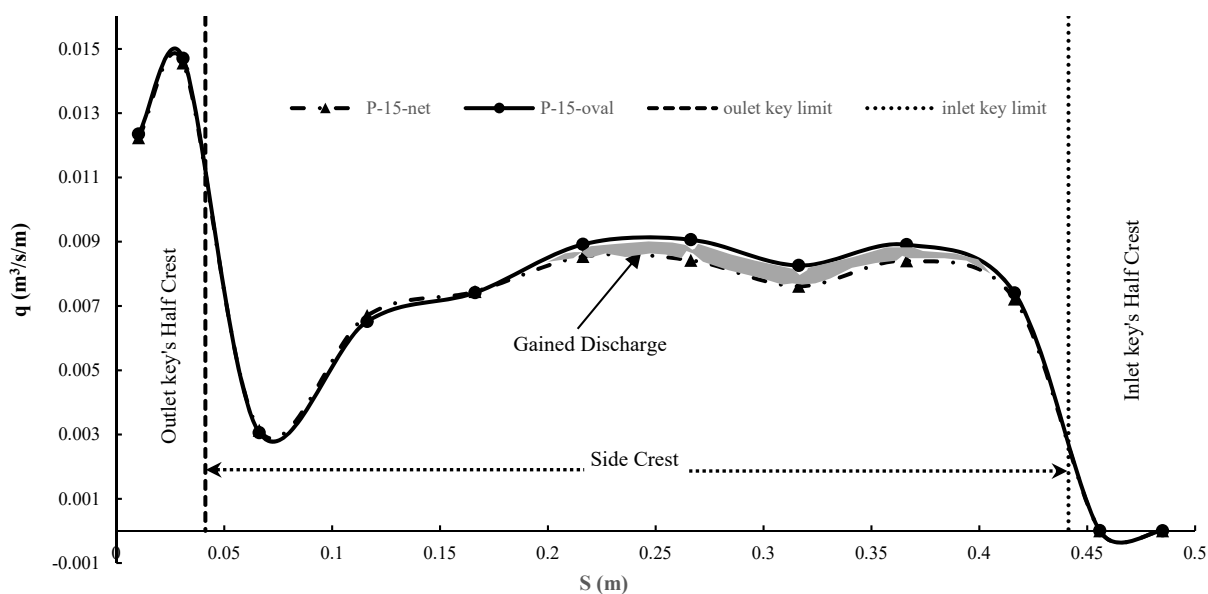


Fig. 14. Distribution of discharge per unit length on half crest of P-15-net and P-15-oval

جدول ۶. توزیع خطوط جریان رهائده در عرض و ترازهای یکسان دو مدل P-15 با دماغه بیضی و بدون دماغه

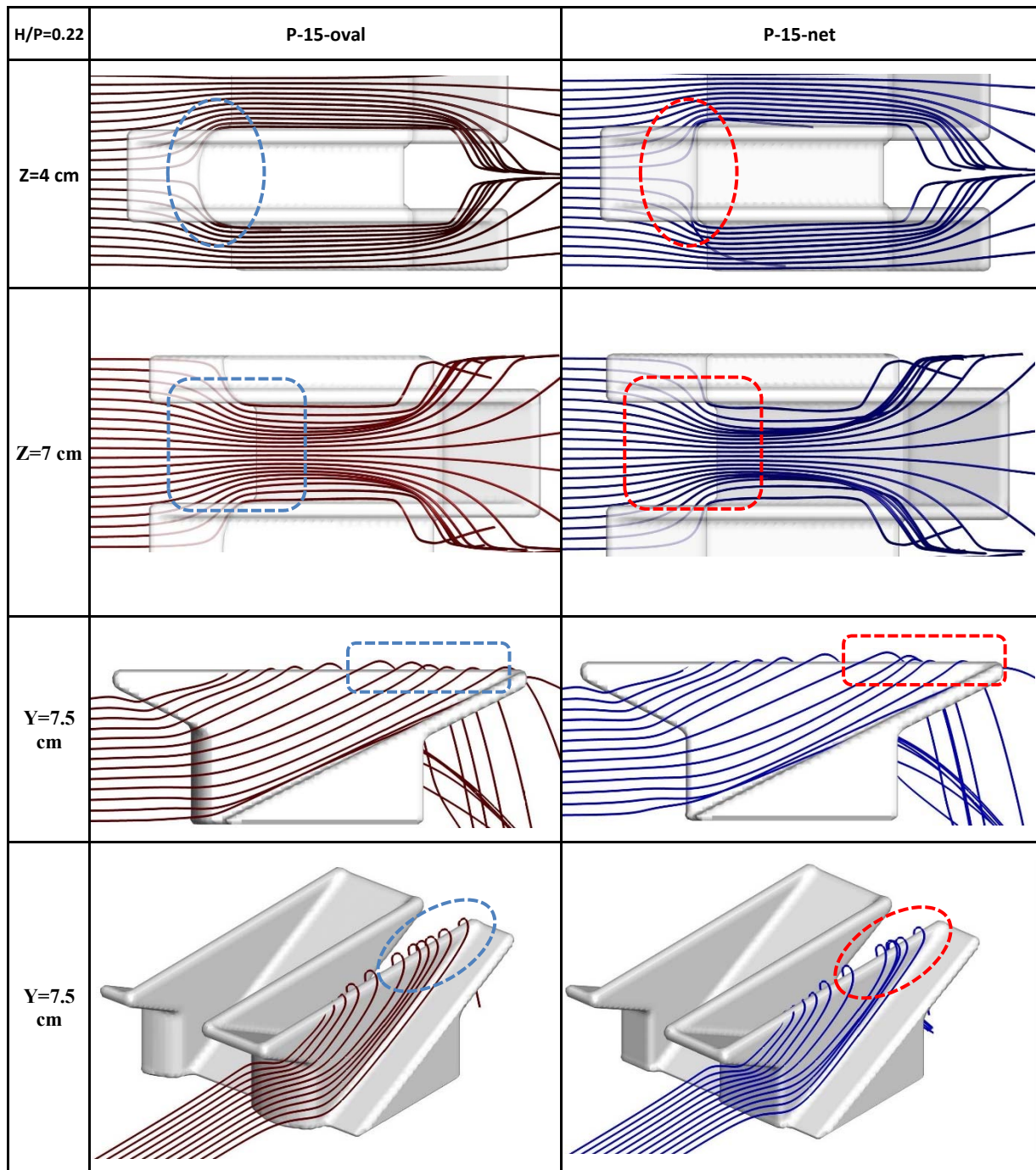


Table 6. Streamlines one P-15 model with and without oval fillets

فشاردهی جریان در بخش میانی کلید نیز شده است. با نصب دماغه نیم بیضی به عنوان هدایت کننده جریان به سمت کلیدهای ورودی طرفین، نواحی جدایی حذف شده و جریان هدایت شده به داخل کلیدهای ورودی از یکنواختی بیشتری برخوردار است. این نکته با مقایسه توزیع سرعت در بخش میانی صفحات افقی در دو سرریز به خوبی نمایان است. در سرریز بدون دماغه، وجود هسته پرسرعت

برای بررسی دقیق تر این موضوع، توزیع سرعت و بردارهای جریان در صفحات افقی در تراز عمق میانی کلیدهای ورودی دو سرریز بدون دماغه و با دماغه نیم بیضی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل های مزبور، در صورت عدم استفاده از دماغه، نواحی جدایی با سرعت کم (آبی رنگ)، در دو طرف کلید ورودی ایجاد شده و علاوه بر کاهش عرض مفید عبوری جریان، باعث

شکل ۱۶. پروفیل سطح آب در مدل (a) P-15-net و (b) P-15-oval

$$H/P=0.22$$

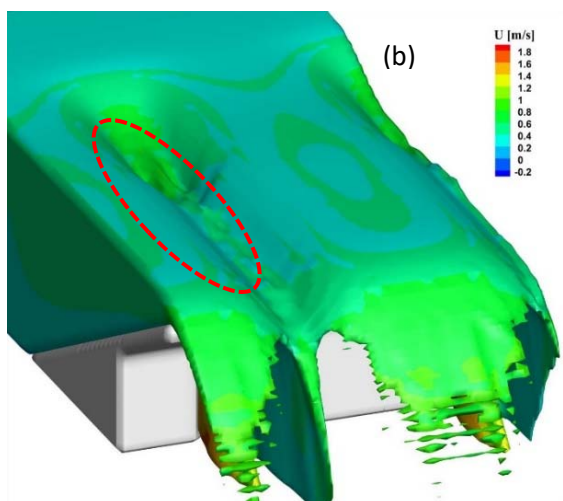
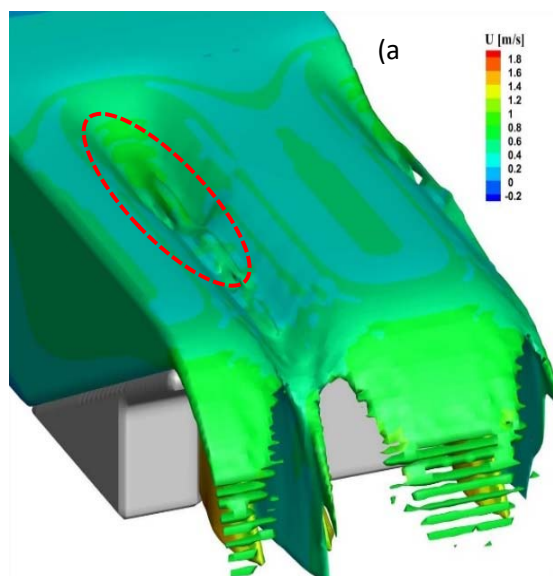


Fig 16. Water surface profile in (a) P-15-net and (b) P-15-oval for $H/P=0.22$

۴- نتیجه گیری

در مطالعات قبلی افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی با اضافه کردن دماغه‌های مثلثی و دایره‌ای شکل نشان داده شده است. در این پژوهش نشان داده شد که شکل بیضی دماغه بسته به ارتفاع و هد آب طراحی سرریز کلید پیانویی در مواردی، بسته به هد آب بالادست حتی بیشتر از دماغه‌های مثلثی شکل می‌تواند راندمان سرریز کلید پیانویی را افزایش دهد (تا ۱۰ درصد نسبت به مدل بدون دماغه). لازم به ذکر است که حجم بتن‌ریزی دماغه

در بخش میانی در اثر شکل‌گیری نواحی جدایی در طرفین کلید، باعث شتاب گرفتن جریان در امتداد کلید و کاهش فرصت تخلیه جریان از تاج‌های کناری خواهد شد.

شکل ۱۵. توزیع سرعت و بردارها در صفحه افقی تراز میانی کلید ورودی

در مدل (a) P-15-net و (b) P-15-oval در $H/P=0.22$

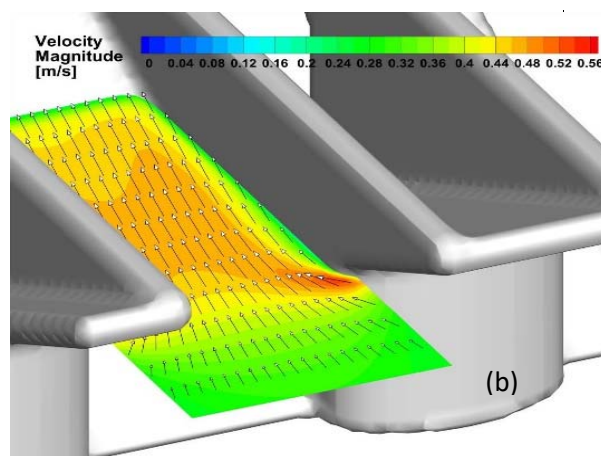
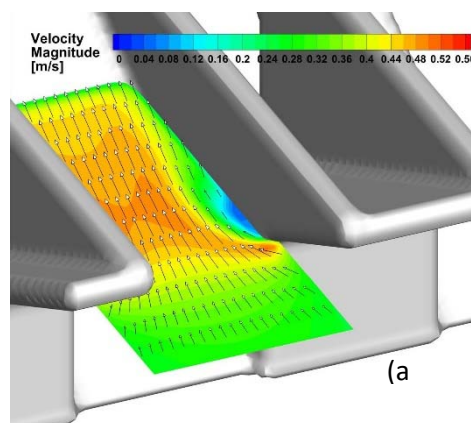


Fig 15. Velocity distribution and vectors in a horizontal plane at mid depth of the inlet key in (a) P-15-net and (b) P-15-oval for $H/P=0.22$

این گونه از توزیع جریان همخوانی کامل با نتایج ارائه شده در نمودار شکل (۱۴) را دارد و اصلی‌ترین دلیل افزایش راندمان سرریزهای کلی پیانویی مجهز به دماغه است. توزیع نامناسب خطوط جریان روی تاج جانبی خود را به صورت افزایش استغراق موضع کلید خروجی در اثر برخورد جریان‌های جانبی تخلیه‌شده از تاج جانبی نمایان می‌کند که در شکل (۱۶) به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

- [5] Lempérière, F., Vigny, J.P. and Ouamane, A., 2011, May. General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present. In *Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B* (pp. 17-24).
- [7] Laugier, F., J. Vermeulen, and V. Lefebvre. "Overview of Piano Key Weirs experience developed at EDF during the past few years." *Labyrinth and Piano Key weirs II* (2013): 213.
- [8] Ribeiro, M.L., Pfister, M. and Schleiss, A.J., 2013. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, 273.
- [9] Lefebvre, V., J. Vermeulen, and B. Blancher. "Influence of geometrical parameters on PK-Weirs discharge with 3D numerical analysis." *Labyrinth and Piano Key Weirs II* (2013): 49.
- [10] Ahadiyan, J, Afzalian, A. R. 2016. Effect of piers geometric on the hydraulic properties of Piano Key weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*. **23**(2), 267-277. (Persian)
- [11] Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J.L., 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), pp.400-408.
- [12] Hirt, C.W. and Nichols, B., 2008. Flow-3D User's Manual. *Flow Science Inc*, 107.
- [13] Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Singhal, F., Sharma, N. 2012b. Piano Key Weirs as efficient spillway structure. *J. Hydraulic Eng.* 138, 199-203

بیضی شکل، کمتر از اشکال مثلثی و نیم دایره است. دلیل افزایش راندمان سرریز مجهز به دماغه بیضی شکل را می توان موارد زیر دانست:

- (۱) کاهش افت انرژی خطوط جریان نزدیک بستر نزدیک شونده به زیر کلید خروجی در اثر کاهش مسیر طی کرده، (۲) کاهش تراکم خطوط جریان ترازهای میانی در ورودی و میانه کلید ورودی و اصلاح توزیع خطوط جریان بر روی ناحیه پایین دست تاج جانبی و در نهایت (۳) کاهش استغراق موضعی سرریز در کلید خروجی و افزایش راندمان کلی.

References

۵- مراجع

- [1] Henderson, F.M., 1966. *Open channel flow* (No. 532 H4).
- [2] Machiels, O., 2012. *Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs* (Doctoral dissertation, Université de Liège, Belgium).
- [3] Ouamane, A. and Lempérière, F., 2006, June. Design of a new economic shape of weir. In *Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century* (Vol. 18, pp. 463-470).
- [4] Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J.L., 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), pp.400-408.

Experimental and Numerical Investigation on Effects of Different Fillet Shapes on Hydraulics and Flow Structure over Rectangular Piano Key weirs

A. Safarzadeh ^{1*}, S. Khayyatrostami², B. Khaiatrostami³

1- Associate Prof. of Civil-Hydraulic Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

2- M.Sc. of Civil-Hydraulic Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

3- M.Sc. of Civil-Hydraulic Engineering, Research Department, Ardabil Regional Water Company, Iran

* Safarzadeh@uma.ac.ir

Abstract:

In this paper hydraulics and flow structure over the rectangular piano key weirs with different heights have been studied experimentally and numerically and effects of different fillet shapes on hydraulic performance are investigated. Experiments are conducted in a one meter width flume. Models of the tested weirs are made from PVC Plates in 3 different heights and with the same L/W ratios equal to 5. Discharge coefficient curve for wide range of heads over height ratio for 3 different weir heights are determined and effect of triangular, half round and oval fillets on increasing of discharge coefficient are investigated. In this research, the chosen range for ratio of head over height is in good agreement with ratio which has been used to design of prototype weirs. Large triangular and oval shaped fillets have significant effects on improvement of performance of the piano key weirs. Main effect of fillets is more uniformly distribution of the flow streamlines over the downstream part of the side crest. In second part of this paper, one and half-key piano key weirs with oval noses and without any nose (net) have been numerically modeled using Flow-3D model. Discharge coefficients of one of the numerically simulated rectangular models is compared with derived discharge coefficient curve from physical model. Convergence of inflow and outflow of numerical model has been controlled. Satisfactory correspondence presents between the experimental and numerical studies. Discharge distribution over the crest of the normal PKW and the weir equipped with oval fillet are compared. Result showed that due to uniformly distribution of the streamlines, the fillet notably increases flow rate at the downstream part of the side crest. Results of numerical simulations are exported to Tecplot software, in order to visualize the flow streamlines at different parts of the studied weirs. The weir with oval fillet affects the flow streamlines in three positions: the near bead streamlines of the weir with oval fillet, have less lateral diversion when they reach beneath the overhang of the outlet keys. In other word, streamlines pass this region more smoothly rather than normal PKW. As a result, the fillet decreases the local head loss, when the flow enters the inlet keys. Streamlines of the mid depth level show less contraction at the entrance and middle of the inlet keys. Consequently, lower velocity of the flow along the inlet keys, helps to more evacuation of the flow from side crests. Finally, streamlines release more uniformly from downstream part of the side crest. These phenomena results low submergence level at the middle of the outlet keys. The outlet keys are the brake of nonlinear weirs. By decreasing the submergence level of the outlet keys, flow from the side crests discharge more freely from inlet to the outlet keys.

Keywords: Piano key weir, Experimental model, Numerical method, Fillet, Discharge coefficient.