

بررسی تأثیر هد آب بر نحوه توزیع دبی بر روی تاج و رفتار خطوط جریان در سرریز کلیدپیانویی نامتقارن

اکبر صفرزاده^{1*}، سیامک خیاط رستمی² و بابک خیاط رستمی³

1- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

2- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

3- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل، اردبیل

*safarzadeh@uma.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/7/29؛ پذیرش مقاله: 97/10/24)

چکیده- در این تحقیق، نسبت‌های بهینه هندسی سرریز کلید پیانویی نامتقارن مد نظر قرار گرفته و با مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی به بررسی تأثیر افزایش هد آب بالادست بر نحوه توزیع جریان بر روی تاج سرریز کلید پیانویی پرداخته شد. تأثیر ارتفاع نسبی بر راندمان سرریز کلید پیانویی با رویکرد افزایش عرض کلید واحد و ثابت نگه داشتن ارتفاع، بر راندمان سرریز، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاکی از افزایش راندمان سرریز با کاهش ارتفاع نسبی است. از روابط تحلیلی موجود در مراجع، برای محاسبه دبی عبوری از سرریز بهینه هیدرولیکی به ازای هد آب بالادست و همچنین برای محاسبه ضریب دبی مدل آزمایشگاهی استفاده شد. اختلاف ضرایب دبی آزمایشگاهی و مقادیر محاسباتی با روش تحلیلی موجود بالا بوده و دقت پایین روابط موجود را نشان می‌دهد. در این تحقیق روابط جدیدی برای تعیین ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و سهم تاج کلید ورودی، تاج جانبی و تاج کلید خروجی از تخلیه جریان برحسب نسبت هد بالادست آب به ارتفاع سرریز کلید پیانویی نامتقارن، با طرح هندسی بهینه، ارائه شده و پس از مقایسه نتایج مدل جدید با نتایج آزمایشگاهی موجود، برتری آن نسبت به روابط تحلیل ارائه شده در مراجع نشان داده شد.

کلیدواژه‌گان: سرریز کلید پیانویی نامتقارن، شبیه‌سازی عددی، رابطه تحلیلی، خطوط جریان، ضریب دبی.

$$L=(2B+2T_s+W_i+W_o)\times N_u \quad (1)$$

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

بخشی از دبی نزدیک شونده به سرریز، مستقیماً از روی تاج کلید خروجی خارج می‌شود که در واحد عرض، با نام q_o نام‌گذاری می‌گردد. مابقی دبی کل، وارد کلید ورودی شده و از دو طریق، بخشی از تاج کلید ورودی خارج شده که در واحد عرض به آن q_i گفته شده و بخش دیگر دبی وارد شده به کلید ورودی از طریق تاج جانبی تخلیه می‌شود که این مقدار دبی در واحد عرض، q_s نام‌گذاری شده است.

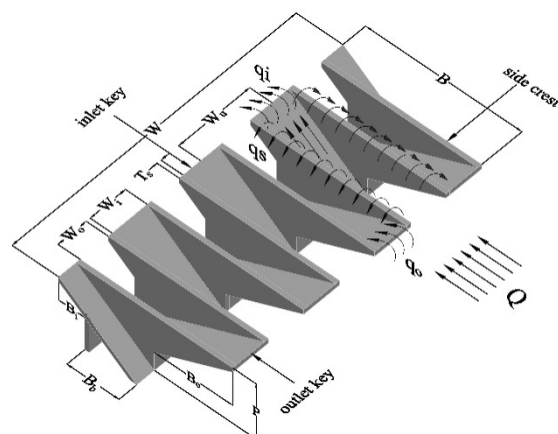
1- مقدمه

سرریزهای کلید پیانویی به‌عنوان هندسه جدید سرریزهای آزاد غیرخطی با ایده کاهش طول ساختگاه نسبت به سرریزهای متداول اوجی و همچنین افزایش طول مفید عبوری جریان (طبق رابطه 1) بعد از سرریزهای کنگره‌ای معرفی شده‌اند. تاکنون محققان مختلفی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر راندمان سرریز کلید پیانویی (شکل 1) را بررسی کرده‌اند. معیار ارزیابی راندمان سرریزهای غیرخطی، مشابه با معادله معمول سرریزهای آزاد، ضریب دبی می‌باشد که با استفاده از رابطه (2) تعریف می‌گردد (Henderson, 1966):

سرریز پرداخت و با فرض مدل پایه با پلان متقارن، $2/5$ کلید و نسبت طول طره‌های برابر، سرریز با نسبت P/W_u برابر $0/5$ را سرریز بهینه اقتصادی از نظر نسبت دبی عبوری به نسبت حجم مدل (شاخصی از حجم بتن‌ریزی و در نتیجه هزینه تمام‌شده کل سرریز) معرفی نمود. وی بدین نتیجه رسید که با افزایش ارتفاع و به تبع آن، افزایش نسبت P/W_u (با توجه به ثابت بودن W_u) تا مقدار $1/33$ ، راندمان سرریز افزایش پیدا می‌کند؛ ولی با افزایش دوباره ارتفاع، ظرفیت تخلیه سرریز افزایش قابل‌توجهی نمی‌یابد؛ از این رو سرریز با نسبت P/W_u برابر $1/33$ را به عنوان سرریز با ارتفاع بهینه هیدرولیکی معرفی نمود. در این تحقیق با تغییر نسبت‌های W_i/W_o سپس B_o/B_i در سرریز با ارتفاع بهینه هیدرولیکی، به بررسی پارامترهای مزبور پرداخته و نتیجه گرفت که در حالتی که L/W برابر 5 باشد، سرریز با نسبت‌های هندسی P/W_u برابر $1/33$ ، W_i/W_o برابر $1/25$ و B_o/B_i برابر 3 بالاترین راندمان تخلیه دبی را خواهد داشت.

(Machiels et al., 2014) راه‌حل تحلیلی برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریز کلید پیانویی به ازای هدهای مختلف بالادست را ارائه کردند که به‌صورت جداگانه دبی عبوری در عرض واحد از تاج‌های بالادست q_o (تاج کلید خروجی)، تاج‌های پایین‌دست q_i (تاج کلید ورودی) و تاج جانبی q_s را محاسبه و با لحاظ ضرایبی باهم جمع و در نتیجه دبی کل را محاسبه می‌کرد. نکته قابل‌تأمل، عدم ترکیب نسبت‌های بهینه و عدم بررسی خطوط جریان و توزیع دبی در مدل با نسبت‌های بهینه و در نتیجه غیرمقارن توسط Machiels et al. (2014) است. قابل‌ذکر است که نسبت B_b/B استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی این گروه که در آخر منجر به ارائه روابط تحلیلی گردید، برابر $0/33$ هست که این مقدار به گفته Machiels et al. (2014) کمتر از مقادیر این نسبت در اغلب پروتوتایپ‌ها می‌باشد (Javaheri et al., 2015)؛ در پروژه‌های اجراشده و در حال اجرا توسط کمپانی "EDF" فرانسه نسبت B_b/B عددی بین $0/27$ و $0/57$ است (Laugier et al., 2013).

ضخامت تاج جانبی، پارامتری است که پس از طراحی



شکل 1 پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی

1-1- بررسی پیشینه تحقیق

طول تاج (L) مؤثرترین پارامتر دخیل در ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی می‌باشد. در بیشتر منابع تأثیر این پارامتر در قالب تأثیر طول نسبی L/W بر راندمان سرریز مورد بررسی قرار گرفته است (Le Doucen et al., 2009؛ Ouamane and Leite Ribeiro et al., 2011؛ Lempérière, 2006). تحت بارهای آبی پایین، با افزایش نسبت L/W ظرفیت تخلیه سرریز افزایش می‌یابد. البته با افزایش هد بالادست، تأثیر نسبت L/W بر ظرفیت تخلیه سرریز، کم‌رنگ‌تر می‌گردد. باید خاطرنشان کرد که با افزایش این نسبت بر هزینه ساخت سرریز افزوده خواهد شد. (Lempérière et al., 2011) مقادیر بین 4 و 5 را از لحاظ اقتصادی و هیدرولیکی برای نسبت L/W مناسب دانستند.

(Machiels 2012) در تحقیقی جامع، اقدام به بررسی پارامترهای مؤثر بر ظرفیت سرریز کلید پیانویی مانند W_i/W_o و B_o/B_i نمود. او در تحقیق خود مقادیر عرض کل و طول تاج سرریز، در نتیجه نسبت L/W را برای مدل‌های مختلف یکسان در نظر گرفت. در گام بعدی Machiels (2012) تعداد کلید واحد و ضخامت تاج بین مدل‌های مختلف مورد آزمایش را مقدار ثابت قرار داد.

(Machiels 2012) با معرفی نسبت P/W_u به‌عنوان پارامتر دارای بیشترین تأثیر بر راندمان سرریز بعد از نسبت L/W ، به بررسی تأثیر این نسبت بر ظرفیت تخلیه سرریز پرداخت. از آنجایی که عرض کلید واحد (W_u) در کل پژوهش ثابت بود، عملاً او به بررسی تأثیر ارتفاع بر راندمان

تجربیات منابع ارائه شده ($H/P > 1$)، انتخاب گردید. 4 سرریز نامتقارن با ارتفاع‌های نسبی (P/W_u) متفاوت و برابر $1/3$ ، $1/04$ ، $0/78$ و $0/52$ ، برای بررسی تأثیر P/W_u با ایده ثابت نگه داشتن ارتفاع سرریز و افزایش عرض نسبی کلید به وسیله کاهش تعداد کلید (بر خلاف رویه (Machiels (2012) بر راندمان سرریز مورد بررسی قرار گرفته اند.

در تحقیق حاضر ابتدا یک سرریز با تعداد کلید 5 به صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی شده و ضرایب تجربی دبی به ازای هدهای مختلف جریان استخراج شد. سپس مدل‌سازی عددی یک سیکل از سرریز در نرم‌افزار Flow-3D صورت گرفت و صحت مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی کنترل شد. دبی عبوری از نواحی مختلف تاج به صورت جداگانه محاسبه و در نتیجه رفتار سرریز با افزایش هد مشخص شده و خطوط جریان مدل به ازای هدهای مختلف جریان ترسیم گشته تا فهم دقیق‌تری از جریان هنگام عبور از روی سرریز، با افزایش هد حاصل شود. در نهایت با ارزیابی روابط تحلیلی موجود در مراجع برای محاسبه ضریب دبی، رابطه جدیدی برای محاسبه این پارامتر ارائه گردید.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تجهیزات و مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای انجام تحقیق، از فلوم واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی به طول 10 متر، عرض 1 متر و ارتفاع $0/8$ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فولادی استفاده شد. مخزن اصلی ذخیره آب در زیر فلوم قرار داشت. آب به وسیله پمپ از مخزن اصلی توسط یک لوله پلی‌اتیلن از بالا به مخزن بالادست فلوم منتقل می‌شود. بعد از مخزن بالادست، سه توری مشبک برای آرام‌سازی جریان و دو صفحه یونولیتی (هر کدام به طول $0/75$ متر) مقید در راستای جریان و آزاد در ارتفاع برای کنترل نوسانات سطح آب قرار داده شد. سکویی به طول 90 سانتی‌متر و ارتفاع 20 سانتی‌متر برای نصب سرریز به فاصله 3 متری از انتهای فلوم برای جلوگیری از تأثیر جریان پایین‌دست بر جریان خروجی از سرریز، نصب شده و رمپ با شیب 11 درجه برای ورود

سازه‌ای و ملاحظات اجرایی قطعی می‌شود. در پروژه‌های تمام‌شده و در حال اجرای "EDF" فرانسه، نسبت T_s/W_u عددی بین $0/042$ و $0/107$ و نسبت T_s/P عددی بین $0/055$ و $0/167$ است (Laugier et al., 2013).

H/P طرح برای سرریزهای سد ساوا کودو¹ در هند و اولدجتملژ² در الجزیره به ترتیب $0/56$ و $0/66$ و در سرریز رودخانه‌ای وان فانگ³ ویتنام برابر با $1/04$ است (Leite et al., 2013). این موارد (ضخامت نسبی تاج و هد نسبی طراحی و ...) قیود طراحی، تجربیات سازه‌ای و اجرایی سرریز کلید پیانویی می‌باشند که بهتر است در طرح هندسه مدل‌های آزمایشگاهی و انتخاب بازه هدهای مورد بررسی، در نظر گرفته شوند تا نتایج به دست آمده در طراحی‌های عملی قابل استفاده باشد.

Safarzadeh and Noroozi (2017) ضریب دبی سرریز را به عنوان معیار مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف کلید پیانویی انتخاب کرده و تأثیر زاویه تاج بر روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با یک کلید واحد را به صورت عددی بررسی نمودند. در این تحقیق نشان داده شد که مدل‌سازی عددی اطلاعات مفیدی از الگوی خطوط جریان و توزیع دبی بر روی تاج سرریز را برای تفسیر بهتر این سازه آبی در اختیار می‌گذارد.

Crookston et al. (2017) با استفاده از مدل‌سازی عددی سرریز کلید پیانویی توسط نرم‌افزار Flow-3D نشان دادند مدل‌سازی تنها یک کلید واحد از سرریز و استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon RNG$ در صورتی که شرط مرزی عرضی میدان حل از نوع تقارنی در نظر گرفته شود، سبب استخراج نتایج بسیار نزدیک به نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی خواهد بود.

در این پژوهش به بررسی تأثیر افزایش هد آب بالادست سرریز کلید پیانویی بر راندمان سرریز نامتقارن بهینه هیدرولیکی، نحوه توزیع دبی جریان بر روی نواحی مختلف تاج سرریز و رفتار خطوط جریان با افزایش هد پرداخته شد. حد قابل قبولی از اعماق بالادست منطبق با

¹ Sawaa Kuddu

² Ouldjet Mellegue

³ Van Phong

ضخامت تاج جانبی، برابر با 9 میلی‌متر انتخاب شد تا نسبت T_s/W_u و T_s/P از لحاظ اجرایی در بازه ارائه شده در پیشینه تحقیق قرار گیرد (شکل 2). مشخصات کامل هندسی مدل‌ها در جدول 1 آورده شده است. مدل آزمایشگاهی 5-key از ورق PVC ساخته شده است. نمای سه بعدی مدل‌های مختلف در شکل 3 قابل رویت است.

3-2- مبانی تئوری مدل‌سازی عددی

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

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

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

جدول 1 مشخصات مدل‌های کلید پیانویی (مقادیر به متر می‌باشند)

مدل	N_u	L	W	P	W_i
5-key	5	2/5	0/5	0/13	0/046
4-key	4	2/5	0/5	0/13	0/059
3-key	3	2/5	0/5	0/13	0/083
2-key	2	2/5	0/5	0/13	0/129
مدل	W_o	W_u	B	B_i	B_o
5-key	0/036	0/1	0/2	0/033	0/1
4-key	0/048	0/125	0/25	0/042	0/125
3-key	0/066	0/167	0/33	0/056	0/167
2-key	0/103	0/25	0/5	0/083	0/25
مدل	T_s	W_i/W_o	B_i/B_o	B_b	B_b/B
5-key	0/009	1/25	0/33	0/067	0/33
4-key	0/009	1/25	0/33	0/083	0/33
3-key	0/009	1/25	0/33	0/111	0/33
2-key	0/009	1/25	0/33	0/167	0/33
مدل	P/W_u	T_s/P	T_s/W_u	S_i	S_o
5-key	1/3	0/069	0/09	1/3	0/78
4-key	1/04	0/069	0/072	1/04	0/62
3-key	0/78	0/069	0/054	0/78	0/47
2-key	0/52	0/069	0/036	0/52	0/31

S_o و S_i به ترتیب شیب کلید ورودی و خروجی می‌باشند.

آرام جریان به سرریز، قبل از سکو اجرا شد (شکل 2). به‌منظور بالا بردن عمق جریان جهت پوشش بازه اندازه‌گیری شده برای نسبت H/P مطابق با بازه ارائه شده در بخش قبلی ($H/P > 1$), با توجه به پایین بودن توان پمپ و ظرفیت مخزن بالادست فلوم، عرض فلوم به‌وسیله دیواره‌هایی از جنس PVC به 0/5 متر کاهش داده شد. این کاهش به‌وسیله دو تبدیل با زاویه 22 درجه و طول 67 سانتی‌متری اعمال شده است. دیواره‌های کاذب به طول 40 سانتی‌متر، پس از انتهای سکو ادامه پیدا کرده و پس از آن عرض فلوم به‌صورت آبی به یک متر افزایش می‌یابد (شکل 2).

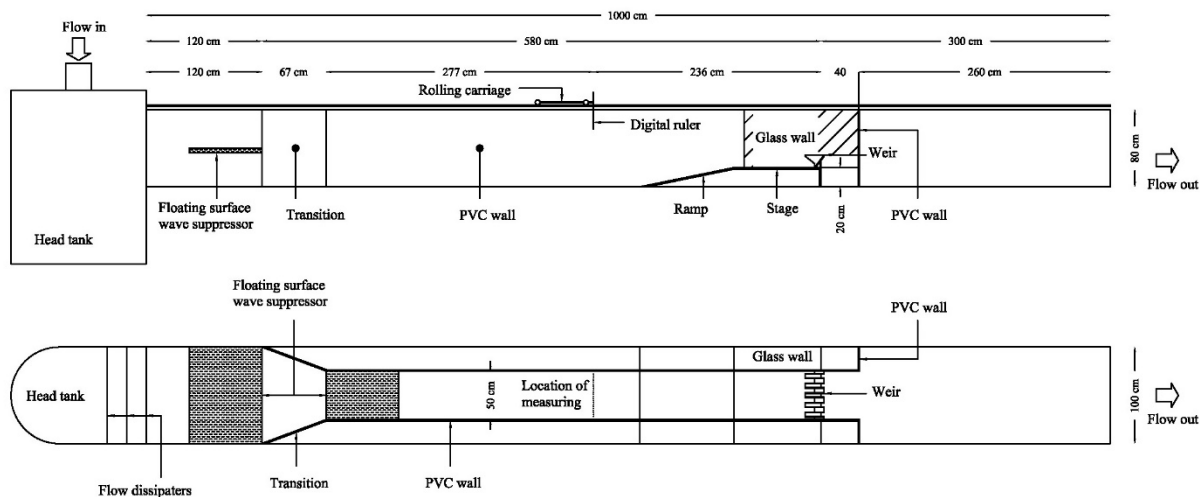
قرائت عمق و تراز آب توسط عمق‌سنج دیجیتال با دقت 0/01 میلی‌متر صورت گرفت. با برداشت طولی نیم‌رخ سطح آب در دبی‌های بالا، فاصله 2/38 متری از سرریز به‌عنوان محل اندازه‌گیری هد روی سرریز انتخاب شد. در این ناحیه نرخ تغییر سطح آب (اختلاف عمق به اختلاف فاصله دو مقطع اندازه‌گیری شده متوالی) کم بوده و نیم‌رخ سطح آب تقریباً افقی مشاهده می‌شود. شیب کف کانال در طول آزمایش در مقدار صفر تنظیم شد. دبی سنج از نوع الکترومغناطیسی و دقت آن ± 1 لیتر بر ثانیه بود. محدوده دبی جریان بین 18/3 تا 94 لیتر بر ثانیه و عمق جریان بالای تراز تاج سرریز بین 31/9 تا 155/9 میلی‌متر متناظر با H/P 0/25 تا 1/25 و تعداد دبی‌های ثبت شده برابر با 37 عدد بود.

2-2- طرح مدل سرریز کلید پیانویی

مطابق با مطالعات قبلی و پیشنهاد (Machiels 2012) نسبت‌های اصلی تأثیرگذار بر راندمان سرریز کلید پیانویی پایه و بهینه: W_i/W_o , P/W_u , L/W و B_o/B_i و B_b/B به ترتیب برابر 5، 1/3، 1/25، 3 و 0/33 در نظر گرفته شدند. با حفظ این نسبت‌ها 3 مدل دیگر با نسبت P/W_u برابر 1/04، 0/78 و 0/52 برای بررسی تأثیر ارتفاع نسبی بر راندمان سرریز طراحی شدند. Leite Ribeiro et al. (2012) اعلام کردند در صورت بیشتر بودن تعداد کلید واحد (N_u) از تعداد 1/5، مقدار این پارامتر بر نتایج آزمایشگاهی تأثیر نخواهد گذاشت. تعداد کلید واحد برای سرریز کلید پیانویی برابر با 2 تا 5 در نظر گرفته شد.

برای راستای i ام می‌باشند. شتاب لزجت شامل اثر لزجت دینامیکی سیال (μ_i) و نیز آشفتگی جریان (μ_i) است. برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود.

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_r بیان‌گر فشار بوده و (G_i) و (f_i) به ترتیب بیان‌گر مؤلفه‌های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت



(الف)

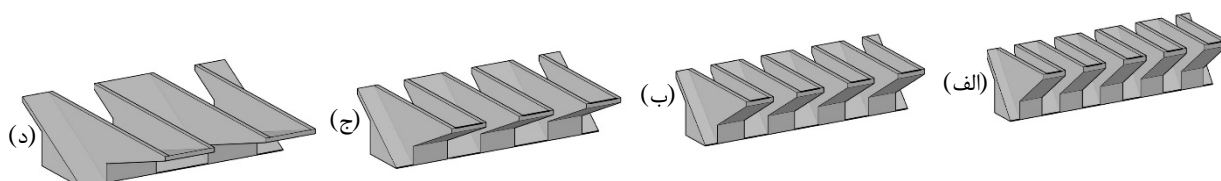


(ج)



(ب)

شکل 2 (الف) فلوم آزمایشگاهی و محل اندازه‌گیری سطح آب (ب) تبدیل و دیواره‌های کاهش عرض فلوم (ج) مدل آزمایشگاهی سرریز کلید پینوئی 5-key



شکل 3 نمایی از مدل‌های سرریزهای کلیدپینوئی مورد مطالعه (الف) 5-key، (ب) 4-key، (ج) 3-key، (د) 2-key

عددی، به منظور بررسی صحت استفاده از هندسه یک کلید واحد، ابتدا یک مدل به صورت کامل با 5 کلید مشابه با شرایط آزمایشگاهی و شروط مرزی سطوح جانبی از نوع دیوار (Wall) به ازای اعماق نسبی (H/P) بالادست برابر 0/3 تا 1/11 مدل شده است و دبی خروجی آن با دبی خروجی 3 مدل مختلف به ترتیب با: (الف) مدل با نیم کلید ورودی و خروجی، (ب) مدل با دونیم کلید خروجی و یک کلید ورودی و (ج) مدل با دونیم کلید ورودی و یک کلید خروجی، هر سه به ازای اعماق نسبی (H/P) ذکر شده و شرط مرزی جانبی تقارن، مقایسه شده است.

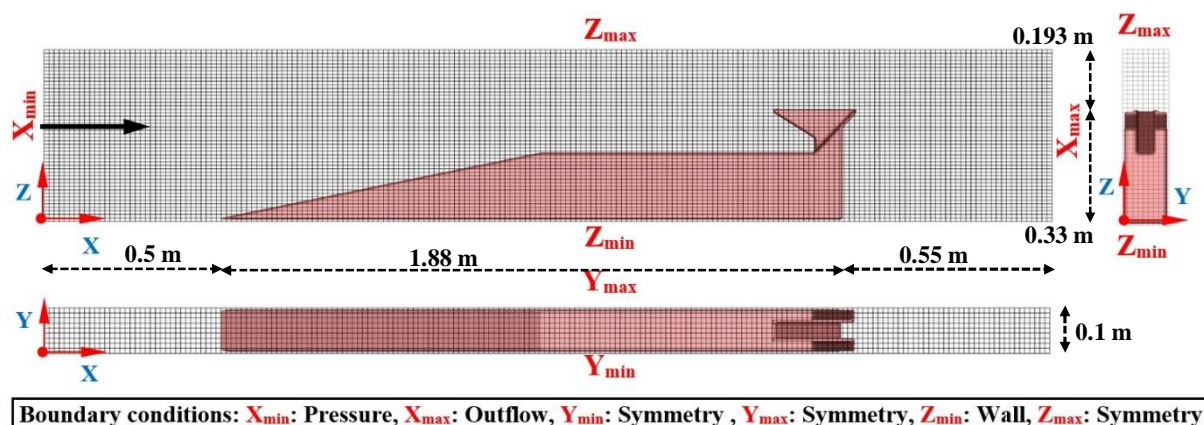
مدل‌های (الف) و (ب) به صورت حداکثری و در H/P برابر 0/5، اختلاف دبی بالای 2 و 1 درصدی در دبی خروجی از میدان با مدل 5 کلیده دارند که دلیل این امر را می‌توان عدم مدل‌سازی دقیق برخورد سفره‌های ریزشی از روی تاج جانبی باهم دانست. در مدل (ج) اختلاف دبی ورودی و خروجی میدان با مدل 5 کلیده، 0/53 درصد می‌باشد و برخورد سفره‌های جانبی نیز کامل مدل می‌شوند. بدین دلیل و با توجه به اختلاف ناچیز دبی و همچنین مشاهده وجود تقارن به صورت آزمایشگاهی، این ساده‌سازی در مدل‌سازی تک کلید واحد (دو نیم کلید ورودی و یک کلید خروجی) به جای 5 کلید کامل، صورت گرفته است. ساده‌سازی بعدی عدم مدل‌سازی کامل بالادست میدان یعنی خود مخزن بالادست فلوم آزمایشگاهی است. صحت دو ساده‌سازی مزبور و عدم تأثیر آنها بر نتایج در بخش صحت‌سنجی پژوهش نشان داده شده است.

در این مقاله نرم‌افزار تجاری Flow-3D که از روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز به همراه مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG، استفاده شده است. نرم‌افزار Flow-3D از روش جزء حجمی برای مشخص کردن هندسه سرریز و پیش‌بینی سطح آزاد سیال در میدان حل استفاده می‌کند. روش‌های VOF و FAVOR (مثال‌هایی از روش‌های جز حجمی (Volume-Fraction Methods) می‌باشند (Hirt and Nocolas, 2008).

4-2- مدل‌سازی عددی

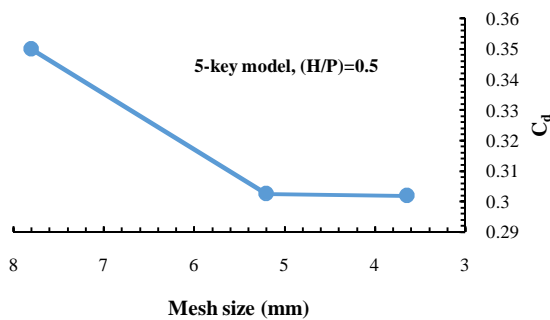
مدل‌های عددی به صورت تک کلید واحد (یک کلید خروجی به همراه دونیم کلید ورودی در طرفین) همراه با رمپ و سکو مدل شده‌اند. مرز ورودی میدان (در راستای طولی x) به صورت فشار-عمق آب (5 هد مختلف متناظر با اعماق نسبی بالادست 0/5، 0/71، 0/91، 1/11 و $H/P=0/3$)، مرز خروجی میدان در راستای طولی از نوع خروجی (Outflow)، طرفین میدان (راستای عرضی y) به خاطر اطمینان از وجود تقارن در فیزیک مسئله از نوع تقارن (Symmetry) و در راستای ارتفاع (z) بخش فوقانی میدان از نوع تقارن و کف میدان از نوع دیوار (Wall) در نظر گرفته شد (شکل 4).

(Safarzadeh and Noroozi 2016) و (Crookston et al. 2017) صحت مدل‌سازی عددی تنها یک کلید از سرریز و تعمیم نتایج به کل سرریز کلید پیانویی را نشان دادند. برای حصول اطمینان بیش‌تر، در ابتدای مدل‌سازی

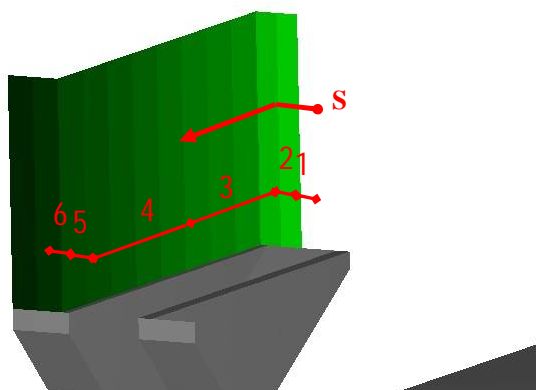


شکل 4 هندسه، بلوک محاسباتی و شرایط مرزی مدل عددی جریان بر روی تک کلید واحد سرریز کلید پیانویی 5-key

نتایج حاصله با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. مطابق با گزارش (Novak et al. (2010) اگر هد روی سرریز بیش از 3 سانتی‌متر باشد کشش سطحی (ویسکوزیته) تأثیری بر هیدرولیک مدل نخواهد داشت. به همین دلیل فقط مقادیر مربوط به هدهای بزرگ‌تر از 3 سانتی‌متر برای محاسبه ضریب دبی طبق رابطه (2) استفاده شده و نتایج حاصله در شکل 8 برای صحت سنجی مدل عددی ارائه شده است. مطابق با شکل 8، روند تغییرات ضریب دبی در مدل‌های عددی کلید پیاپویی با افزایش هد بالادست انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی این مدل دارد. از طرف دیگر، شکل 9 که نیمرخ سطح آب در خط میانی کلید ورودی مدل آزمایشگاهی و عددی سرریز کلید پیاپویی به ازای دبی 34/7 لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد، تأیید دیگری بر صحت شبیه‌سازی عددی می‌باشد.



شکل 5 تأثیر بعد مش بر ضریب دبی مدل 5-key، $H/P=0/5$



- 1- ناحیه مرکزی تاج بالادست، 2- ناحیه اتصالی تاج بالادست
- 3- ناحیه بالادست تاج جانبی، 4- ناحیه پایین‌دست تاج جانبی
- 5- ناحیه اتصالی تاج پایین‌دست، 6- ناحیه مرکزی تاج پایین‌دست

شکل 6 آرایش سطوح مجازی روی نیم تاج واحد مدل عددی

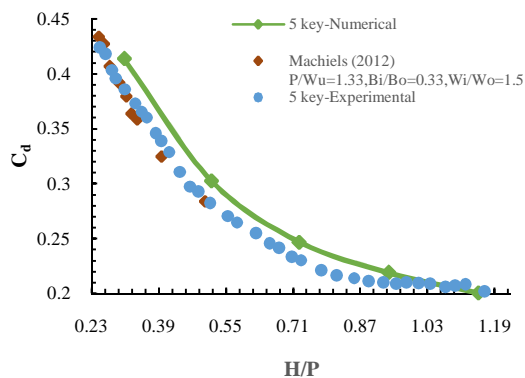
شبکه‌بندی میدان با استفاده از یک بلوک محاسباتی به صورت یکنواخت و بُعد هر سلول محاسباتی 5/2 میلی‌متر (تعداد مش 1393560 تا 2223600 بسته به عرض مدل) در نظر گرفته شده است (شکل 4). باید اشاره کرد استقلال از شبکه‌بندی با ریز کردن 30 درصدی بعد سلول‌ها بررسی شده است. با توجه به شکل 5، ابعاد مش کوچک‌تر از 5/2 میلی‌متر تأثیری کمتر از 0/2 درصد بر دبی خروجی داشته که از آن صرف نظر شده است. طول زمان حل در نرم‌افزار 15 ثانیه در نظر گرفته شده است که همگرایی در این زمان نیز در ادامه نشان داده خواهد شد. برای شبیه‌سازی از پردازشگر 8 هسته‌ای با سرعت 3 GHz و حافظه 8 Gb استفاده شد. زمان تقریبی محاسبات بین 24 تا 40 ساعت، بسته به مدل، می‌باشد.

برای بررسی مقدار دبی عبوری از نواحی مختلف تاج مدل از گزینه سطح مجازی¹ نرم‌افزار Flow-3D استفاده شد. سطوح مجازی به صورت سطوحی در میدان حل تعریف می‌شوند و بدون تأثیر بر میدان جریان، با تداخل 100% جریان را به طور کامل از خود عبور می‌دهند. با استفاده از این ابزار می‌توان اطلاعات مفیدی از جمله متوسط شار عبوری از یک سطح را استخراج نمود. در این راستا 2 سطح مجازی بر روی نیم تاج بالادست، 8 سطح مجازی بر روی تاج جانبی و 2 سطح مجازی بر روی نیم تاج پایین دست قرار داده شد (شکل 6). به دلیل تفاوت بین طول سه تاج بالادست، پایین‌دست و جانبی مدل‌ها و در نتیجه، تفاوت طول سطوح مجازی، دبی در واحد طول سطوح گزارش شده است.

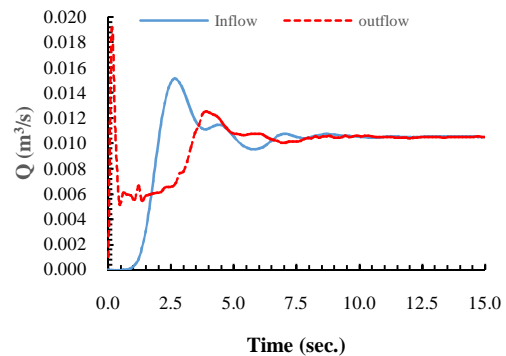
2-5- بررسی هم‌گرایی و صحت سنجی حل عددی

در شکل 7 دبی‌های ورودی و خروجی میدان به ازای نسبت $H/P=0/71$ در مدل سرریز با 5 کلید واحد نشان داده شده است. با توجه به شکل، پس از 10 ثانیه از شروع حل، میدان جریان به حالت دائمی رسیده و دبی‌های ورودی و خروجی به مقدار ثابت میل کرده‌اند. روند مشابه برای تمامی شبیه‌سازی‌ها تکرار شده و پس از اطمینان از همگرایی حل عددی، صحت‌سنجی شبیه‌سازی با مقایسه

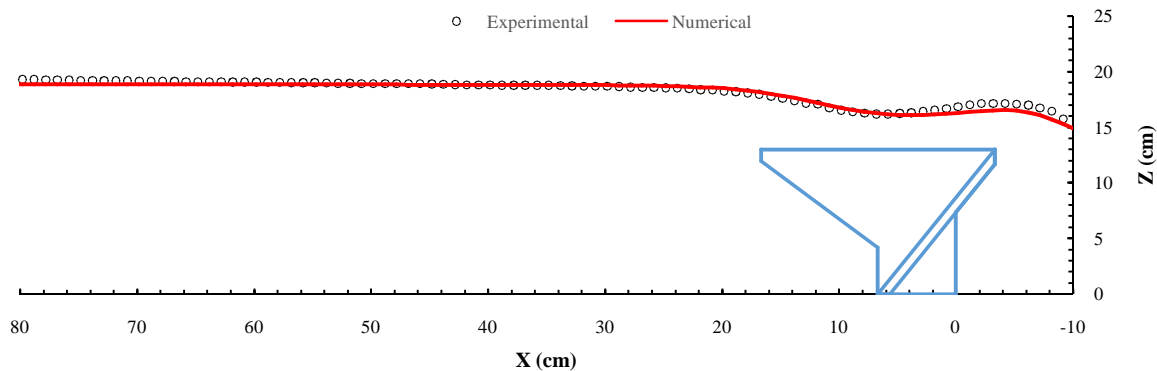
¹ Baffle



شکل 8 مقایسه ضرایب دبی عددی و آزمایشگاهی مدل 5-key



شکل 7 کنترل همگرایی مدل عددی سرریز کلید پیانویی 5 کلید واحد به ازای $H/P=0/71$



شکل 9 مقایسه نیمرخ سطح آب در میانه کلید ورودی مدل آزمایشگاهی و عددی کلید پیانویی به ازای دبی 34/7 لیتر بر ثانیه (5-key)

آن نزدیک به ابعاد مدل تحقیق حاضر می‌باشد نیز ارائه شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر با نتایج مدل مزبور نیز به نوعی بیانگر صحت روند آزمایش و همچنین شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

جدول 2 معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی

Max %diff	Corresponding H/P	Average %diff	R
7/6	0/515	4/8	0/99

3- نتایج

3-1- مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی

همان‌طوریکه قبلاً عنوان شد، Machiels et al. (2014) روابطی برای تعیین دبی عبوری از تاج‌های کناری، بالادست و پایین‌دست ارائه نموده‌اند. به عنوان نمونه، دبی q_s به صورت رابطه (7) می‌باشد:

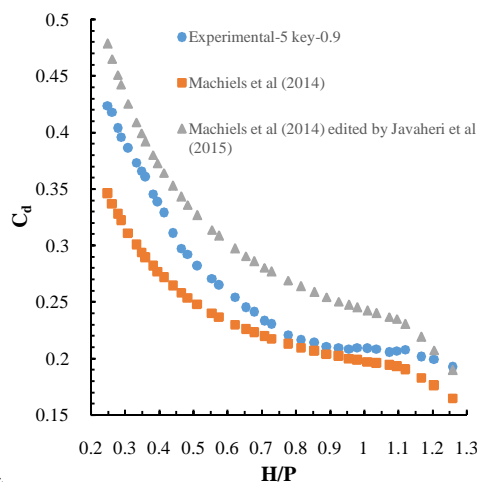
برای بررسی کمی دقت مدل‌سازی عددی، از دو معیار درصد اختلاف ($\%diff$) در هدهای بالادست یکسان (رابطه 5) و ضریب پیرسن R (رابطه 6) بین ضرایب دبی حاصل از مدل‌سازی عددی ($C_{d.Num}$) و نتایج آزمایشگاهی ($C_{d.Exp}$) استفاده شده است.

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

$$R = \frac{cov(C_{d.Num} - C_{d.Exp})}{\sigma(C_{d.Num})\sigma(C_{d.Exp})} \quad (6)$$

در این روابط cov و σ به ترتیب بیانگر کوواریانس و انحراف معیار می‌باشند. با توجه به جدول 2 می‌توان مشاهده کرد که حداکثر خطای مدل‌های عددی نسبت به آزمایشگاهی کمتر از 10% می‌باشد و روند تغییرات ضرایب دبی با افزایش هد، بین مدل آزمایشگاهی و عددی همبستگی قابل قبولی دارد (R بیشتر از 99%).

در شکل 8 داده‌های آزمایشگاهی یکی از مدل‌های آزمایشگاهی Machiels (2012) که نسبت ابعاد هندسی



شکل

10 مقایسه ضرایب مستخرج از نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی، مدل سرریز 5-key

3-2- رابطه ضریب دبی برای سرریز کلید پیانویی با ابعاد بهینه

شکل 11 ضرایب دبی حاصل از مدل‌سازی عددی سرریزهای کلیدپیانویی با ارتفاع و تعداد کلید متفاوت (نسبت‌های مختلف $\frac{P}{W_u}$) را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود، در صورتی که ارتفاع سرریز ثابت و عرض کلید واحد افزایش یابد (ارتفاع نسبی کاهش یابد)، راندمان سرریز افزایش پیدا می‌کند. حداکثر و میانگین اختلاف و افزایش عملکرد مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر (مدل 2 نسبت به مدل 1) در بازه هد مورد بررسی در جدول 3 آورده شده است. با استفاده از 70 درصد داده‌های شکل 11، رابطه زیر برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی بر اساس هد نسبی و ارتفاع نسبی استخراج شده است:

$$C_d = A \left(\frac{H}{P} \right)^B \quad (9)$$

$$A = 0.274 e^{-0.184 \left(\frac{P}{W_u} \right)} \quad (10)$$

توان B ثابت و برابر $-0/561$ می‌باشد. ضریب همبستگی رابطه حاصله با 70 درصد داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، $0/98$ بوده و میانگین خطای پیش بینی ضریب دبی برای 30 درصد دیگر داده‌ها، $1/5$ درصد می‌باشد.

برای ارزیابی دقت رابطه ارائه شده، ضرایب دبی آزمایشگاهی تحقیق حاضر، نتایج تحلیلی Machiels et al. (2014) (رابطه 7) و نتایج حاصل از رابطه 9 برای مدل 5-key استخراج و در شکل 12 ارائه شده است.

$$q_s = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H+1.6} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833H+P_e} \right)^2 \right] \times \left[\frac{P_e^\alpha + \beta}{0.833H+P_e^\alpha + \beta} \right] K_{W_i} K_{W_o} \sqrt{2gH^3} \quad (7)$$

پارامترهای α و β پارامترهای مربوط به شیب کلید ورودی، P_e پارامتر مربوط به ارتفاع میانگین سرریز و پارامترهای K_{W_o} و K_{W_i} به ترتیب مربوط به عرض کلید ورودی و عرض کلید خروجی هستند که در مرجع مورد اشاره معرفی شده‌اند.

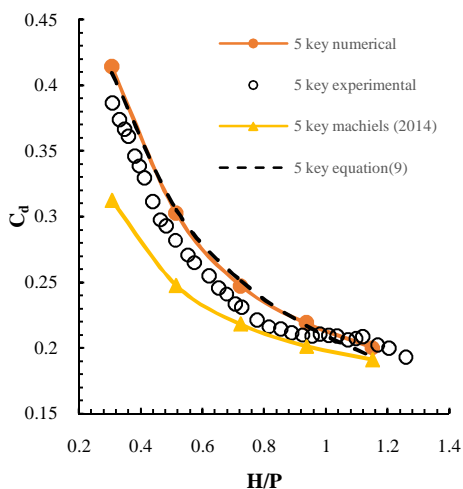
(Machiels et al. (2014) در مقاله Machiels et al. (2015) Javaheri et al. (2015) ضمن بحث بر

$$q_s = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H+1.6} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833H+P_e} \right)^2 \right] \times \left[\frac{P_e^\alpha + \beta}{0.833H+P_e^\alpha + \beta} \right] K_{W_i} K_{W_o} \sqrt{2gH^3} \quad (8)$$

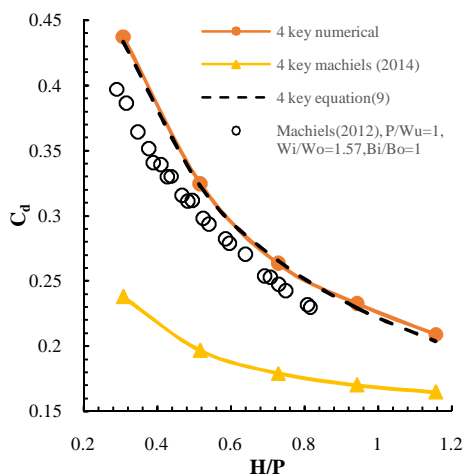
برای دبی عبوری از دو تاج دیگر نیز روابط مشابهی در این مرجع ارائه شده است.

در شکل 10 مقادیر ضریب دبی به دست آمده برای مدل 5-key به صورت آزمایشگاهی برای هدهای بالادست بزرگ‌تر از 3 سانتی‌متر با مقادیر محاسباتی توسط روابط Machiels et al. (2014) (لحاظ رابطه 7) و رابطه اصلاحی Javaheri et al. (2015) (لحاظ رابطه 8) مقایسه شده است.

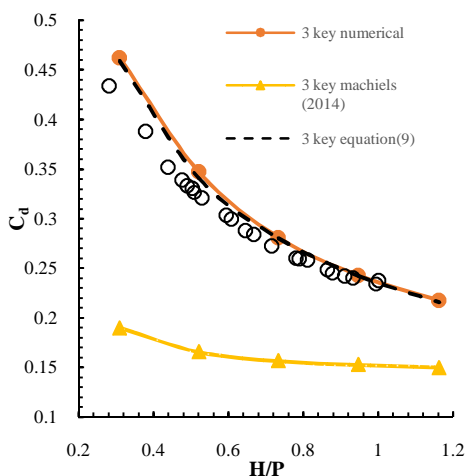
با توجه شکل 10 رابطه Machiels et al. (2014) ضریب دبی را به صورت میانگین 10 درصد کمتر از نتایج مدل آزمایشگاهی محاسبه می‌کند. حداکثر این اختلاف در H/P برابر $0/36$ رخ داده و 20 درصد می‌باشد. از سوی دیگر، رابطه اصلاحی (8) به طور میانگین ضریب دبی را 14 درصد بیشتر از مدل آزمایشگاهی محاسبه نموده و حداکثر این اختلاف در H/P برابر $0/81$ ، برابر 22 درصد می‌باشد. در هر دو مورد اختلاف به دست آمده قابل ملاحظه بوده و روابط ارائه شده چندان دقیق نمی‌باشند. علت این اختلاف این است که Machiels et al. (2014) معادلات دبی را برای داده‌های سرریز با نسبت‌های مختلف هندسی ارائه نموده و برای طرح هندسی بهینه این روابط ارائه نشده است. لذا در تحقیق حاضر، مدل با ابعاد هندسی بهینه طراحی و ضمن استخراج ضریب دبی این مدل‌ها، رابطه جدیدی برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی بهینه هیدرولیکی ارائه شده است.



شکل 12 ضرایب دبی مستخرج از مدل سازی آزمایشگاهی، عددی، رابطه (9) و روابط Machiels et al. (2014). مدل 5-key



شکل 13 ضرایب دبی مستخرج از مدل سازی عددی، رابطه (9) و روابط Machiels et al. (2014). مدل 4-key

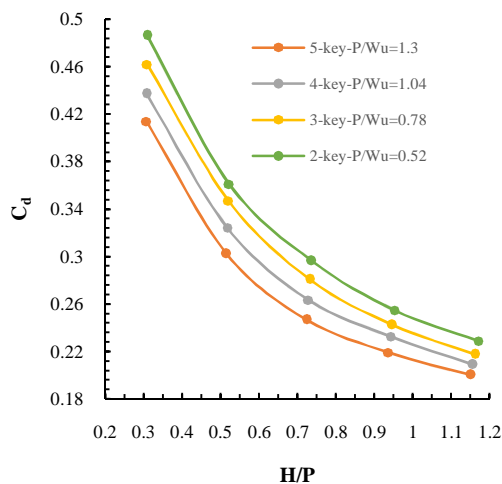


شکل 14 ضرایب دبی مستخرج از مدل سازی عددی، رابطه (9) و روابط Machiels et al. (2014). مدل 3-key

جدول 3 اختلاف عملکرد مدل های عددی کلید پیاپی با ارتفاع

نسبی متفاوت				
مدل 2	مدل 1	حداکثر اختلاف	H/P متناظر	میانگین اختلاف
4-key	5-key	7/2	0/3	6/2
3-key	5-key	14/7	0/3	12/1
2-key	5-key	20/1	0/3	17/8
3-key	4-key	7	0/5	5
2-key	3-key	5/6	0/7	5/5

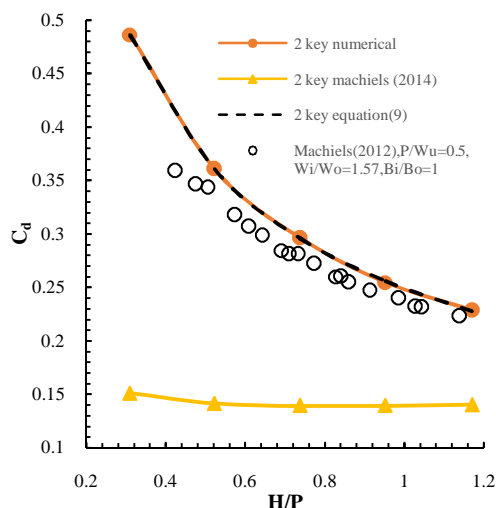
همچنین شکل های 13 تا 15 ضرایب دبی حاصل از رابطه (7) و رابطه (9) برای مدل های 4، 3 و 2 کلیده به همراه ضرایب دبی مربوط به مدل های آزمایشگاهی Machiels (2012) که دارای ارتفاع نسبی یکسان با مدل های 2، 3 و 4 کلیده هستند را نشان می دهند. با توجه به شکل های مزبور، با کاهش ارتفاع نسبی مدل ها، خطای روابط تحلیلی Machiels et al. (2014) با مدل های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از رابطه (9) افزایش پیدا می کند. میانگین و حداکثر اختلاف روابط با ضرایب دبی حاصل از مدل سازی عددی در جدول 4 آورده شده است. در مجموع، رابطه ارائه شده در تحقیق حاضر (رابطه 9) در عین سادگی، همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر و تحقیق Machiels (2012) داشته و نکته مهم، عدم همخوانی نتایج رابطه Machiels et al. (2014) با داده های آزمایشگاهی این محققان (Machiels (2012) می باشد.



شکل 11 تغییرات ضرایب دبی حاصله از مدل سازی عددی برای سرریز کلید پیاپی با ارتفاع های نسبی مختلف

است. با توجه به شکل 16 می‌توان مشاهده نمود که با افزایش هد، میزان دبی عبوری از تاج کناری تا حد معینی افزایش پیدا نموده (تا $H/P=0/91$) و پس از آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، نرخ افزایش دبی تاج کناری، با افزایش هد بالادست، بسیار کم می‌باشد. در مقابل، در هر دو تاج بالادست و پایین‌دست، با افزایش هد، بر شدت جریان خروجی افزوده شده و نرخ افزایش دبی نسبت به تاج کناری بسیار بالاتر می‌باشد. سهم ناحیه میانی تاج بالادست و محل اتصال تاج پایین دست با تاج کناری، بیشتر از سایر نواحی می‌باشد.

در شکل 17، نسبت دبی عبوری از نیم تاج کلید ورودی، نیم تاج کلید خروجی و همچنین تاج جانبی سرریز به مجموع دبی عبوری از این 3 ناحیه، به ازای اعماق مختلف بالادست نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، در هدهای پایین ($H/P=0/3$)، تقریباً 66 درصد تخلیه جریان از تاج جانبی صورت می‌گیرد و در این حالت سهم تخلیه جریان از تاج کلید ورودی 16 درصد است که دارای عرض بیشتری نسبت به تاج کلید خروجی می‌باشد.



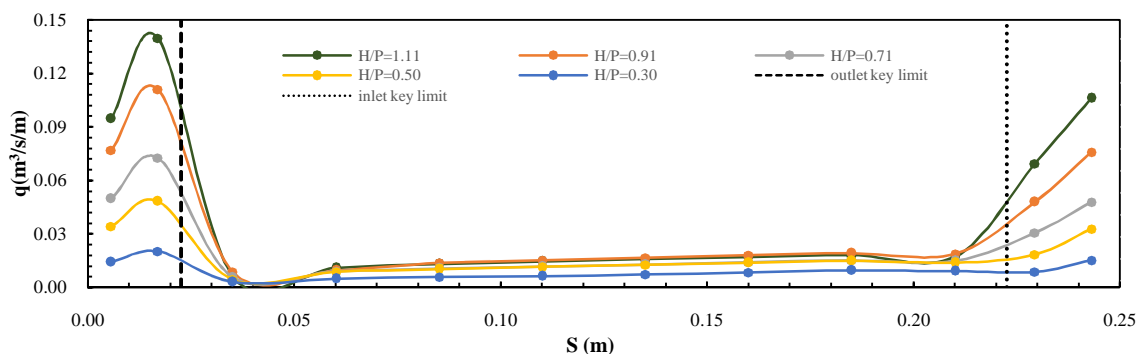
شکل 15 ضرایب دبی مستخرج از مدل‌سازی عددی، رابطه (9) و روابط Machiels et al. (2014). مدل 2-key

3-3- مقایسه نحوه توزیع دبی بر روی تاج سرریزهای کلید پیانویی

برای بررسی تغییرات دبی عبوری از هر سطح مجازی با افزایش هد آب بالادست سرریز کلید پیانویی 5 کلیده، به دلیل متفاوت بودن طول سطوح مجازی در طول تاج سرریز، از دبی در واحد عرض (q) سطوح استفاده شده

جدول 4 درصد اختلاف ضرایب دبی مستخرج از مدل‌سازی عددی با رابطه (9) و روابط Machiels et al (2014)

مدل عددی	میانگین درصد اختلاف با رابطه (9)	حداکثر درصد اختلاف با رابطه (9)	میانگین درصد اختلاف با رابطه Machiels et al (2014)	حداکثر درصد اختلاف با رابطه Machiels et al (2014)
5-key	-0/6	-3/7	-13	-24
4-key	-0/9	-2/4	-33	-45
3-key	-0/7	-1/8	-44	-58
2-key	-0/04	-0/5	-53	-69



شکل 16 توزیع دبی در واحد عرض بر روی نصف تاج مدل کلید پیانویی به ازای اعماق مختلف نسبی آب بالادست مدل 5-key

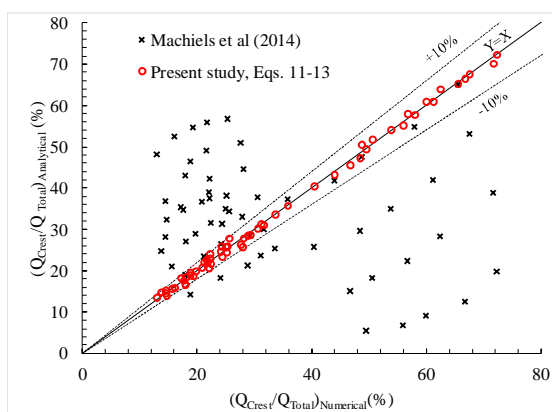
$$F = 11.7 \left(\frac{P}{W_u} \right) + 17.1$$

$$G = -3.9 \left(\frac{P}{W_u} \right)^2 + 9.1 \left(\frac{P}{W_u} \right) + 6.9$$

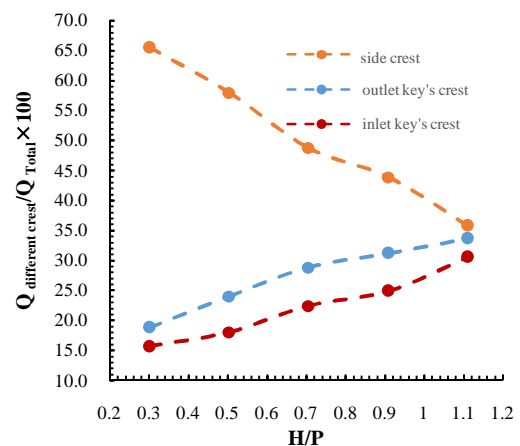
$$J = 0.61 \left(\frac{P}{W_u} \right)^2 - 1.04 \left(\frac{P}{W_u} \right) + 1.14 \quad (14)$$

به منظور بررسی دقت روابط ارائه شده برای سهم بخش‌های مختلف تاج سرریز کلید پیانویی از دبی عبوری، مقادیر نسبت دبی حاصل از روابط فوق و همچنین روابط ارائه شده توسط Machiels et al. (2014) با مقادیر حاصل از مدل عددی مقایسه شده و نتایج در شکل 18 ارائه شده است. با توجه به شکل، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج مدل عددی کالیبره شده و نتایج روابط (11) تا (13) حاصل از تحقیق حاضر وجود دارد. در حالیکه، نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط Machiels et al. (2014) اختلاف زیادی با نتایج حاصل از مدل عددی سه بعدی دارد. این نکته قبلاً در استخراج روابط ضریب دبی نیز نشان داده شد. علت این اختلاف، عدم استفاده از سرریز با ابعاد بهینه هیدرولیکی در استخراج روابط در کار Machiels et al. (2014) می‌باشد.

برای مقایسه الگوی توزیع دبی بر روی تاج مدل‌های مختلف در هد یکسان بالادست، به دلیل متفاوت بودن طول تاج مدل‌های مختلف، مطابق شکل‌های 19 و 20، توزیع دبی بر روی طول نسبی تاج (L_r) نشان داده شده است، بطوری‌که طول نسبی در هر مدل برابر با 1 در نظر گرفته شده است.



شکل 18 مقایسه نسبت دبی بخش‌های مختلف تاج سرریز کلید پیانویی به دبی کل حاصل از روابط ارائه شده در تحقیق حاضر با روابط محققان قبلی



شکل 17 منحنی تغییرات سهم تاج‌های مختلف سرریز با افزایش هد آب بالادست مدل 5-key

با افزایش عمق آب همان‌طور که در نمودار شکل 16 نیز اشاره شد، به‌صورت مستمر سهم تاج جانبی از تخلیه جریان کاهش و سهم دو تاج دیگر افزایش می‌یابد تا حدی که در بالاترین هد جریان ($H/P=1/11$) تنها 36 درصد تخلیه جریان از تاج جانبی انجام می‌گیرد که با مفهوم افزایش طول تاج در سرریز غیرخطی برای افزایش ظرفیت تخلیه جریان همخوانی ندارد و عملاً سرریز کلید پیانویی، عملکرد مشابه سرریز لبه پهن خواهد داشت. علت این پدیده‌ها، در ادامه و پس از ارائه الگوی جریان بحث خواهد شد.

مشابه نمودار 17، با برازش منحنی برای 3 سرریز دیگر روابط زیر برای استخراج درصد سهم سه تاج جانبی ($\frac{Q_s}{Q_t}$)، تاج کلید ورودی ($\frac{Q_i}{Q_t}$)، و تاج کلید خروجی ($\frac{Q_o}{Q_t}$)، از تخلیه دبی کل بدست آمده است. ضرایب این معادلات با همبستگی R^2 بالای 0/92، حداکثر خطای 8 درصد و میانگین خطای 0/18 درصد تعیین شده‌اند:

$$\frac{Q_s}{Q_t} = C \left(\frac{H}{P} \right) + D \quad (11)$$

$$\frac{Q_o}{Q_t} = E \ln \left(\frac{H}{P} \right) + F \quad (12)$$

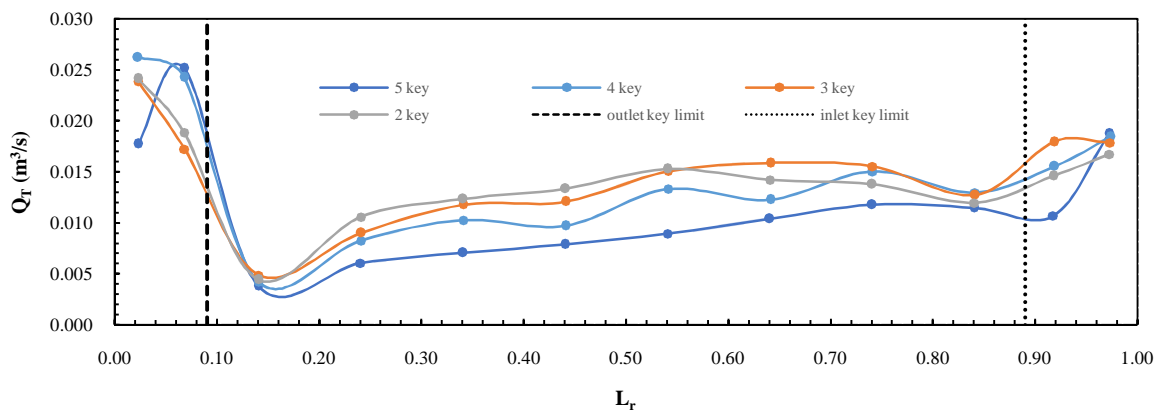
$$\frac{Q_i}{Q_t} = G e^{P^J} \quad (13)$$

پارامترهای روابط فوق از روابط (14) تعیین می‌شوند:

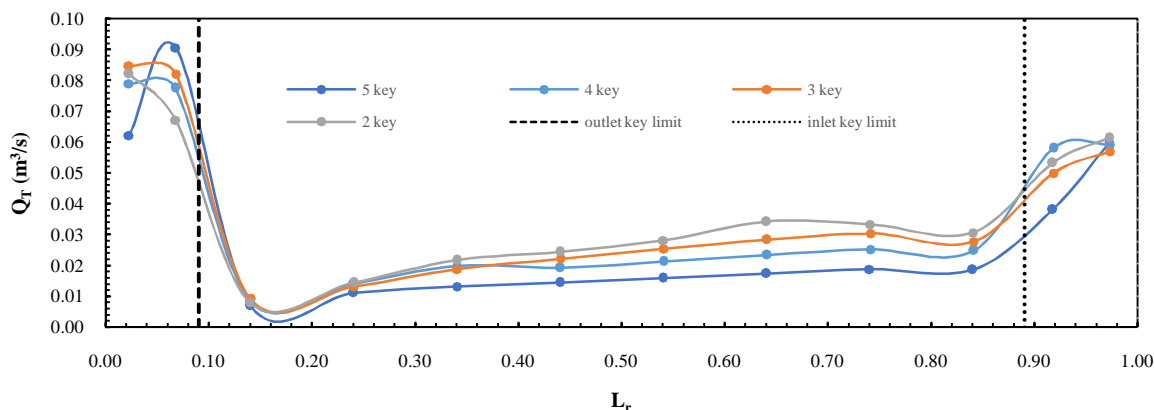
$$C = 7.5 \left(\frac{P}{W_u} \right)^2 + 1.1 \left(\frac{P}{W_u} \right) - 24.9$$

$$D = -5.5 \left(\frac{P}{W_u} \right) + 83.2$$

$$E = -5.5 \left(\frac{P}{W_u} \right)^2 + 14.5 \left(\frac{P}{W_u} \right) + 1.9$$



شکل 19 الگوی توزیع دبی در واحد عرض نسبی بر روی تاج سرریزهای کلیدپیانویی در $H/P=0/3$



شکل 20 الگوی توزیع دبی در واحد عرض نسبی بر روی تاج سرریزهای کلیدپیانویی در $H/P=0/71$

تاج پایین دست (تاج کلید خروجی) برابر می‌باشد، در حالی‌که، در سرریز 5 کلیده، محل اتصال تاج پایین دست و تاج جانبی، بیشترین میزان تخلیه دبی را دارد.

4-3- بررسی الگوی جریان

به منظور بررسی علل اختلاف در رفتار سرریزهای مختلف آزمایش شده، در این بخش الگوی جریان در سرریزهای مختلف بررسی شده است. بدین منظور، در شکل‌های 21 و 22 خطوط جریان در دو تراز برای مدل کلید پیانویی 5 کلیده به ازای H/P برابر 0/3 و 1/11 نشان داده شده است.

می‌توان مشاهده کرد که جریان کلید ورودی در هد پایین، فرصت تخلیه از تاج جانبی را داشته (شکل 21) ولی با افزایش هد بالادست، جریان مستقیماً از روی تاج پایین‌دست خارج شده و تراکم شدیدی در این ناحیه دارد (شکل 22).

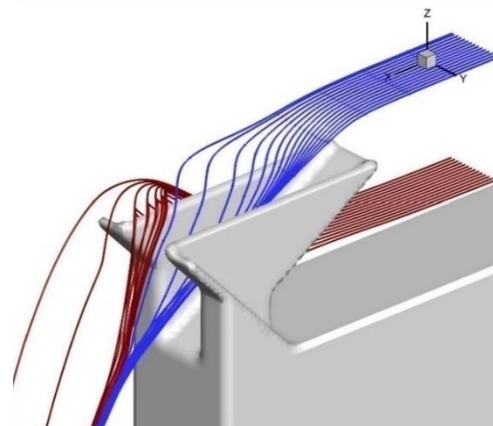
با توجه به استفاده از طول نسبی و همچنین به دلیل متفاوت بودن طول خود سطوح مجازی (بفل‌ها) جایگذاری شده بر روی سه بخش از تاج هر سرریز، دبی کلی عبوری در مرکز هر سطح مجازی گزارش شده است. دبی کلی مدل برابر است با دبی عبوری از هر سطح مجازی ضرب در تعداد کلید واحد مدل تقسیم بر طول نسبی سطح مجازی. طول نسبی سطح مجازی نیز برابر است با طول سطح مجازی تقسیم بر مجموع طول سطوح.

با توجه به شکل‌های مزبور، به ازای تمامی هدهای بالادست، در حالت کلی کاهش ارتفاع نسبی (P/W_{ii}) باعث افزایش دبی تخلیه شده از تاج جانبی می‌شود. در هدهای پایین، این افزایش بیشتر خود را در ناحیه بالادست تاج جانبی نشان می‌دهد. کاهش ارتفاع نسبی (کاهش تعداد کلید واحد) سبب کاهش دبی تخلیه شده از تاج بالادست کلید خروجی می‌گردد و به غیر از مدل با ارتفاع نسبی 1/3 (سرریز 5 کلیده)، همواره سهم ناحیه میانی و اتصالی

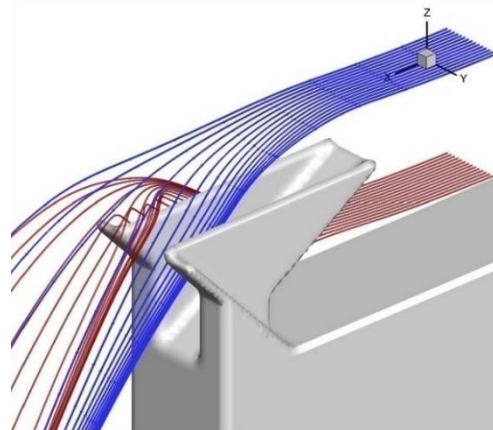
سرریزهای تست شده می‌باشد (شکل‌های 19 و 20). به نحوی که در سرریزهای کلید پیانویی با تعداد کلید کمتر، خطوط جریان در این نواحی از فشردگی کمتری برخوردار بوده و ضمن تسهیل در عبور جریان از این نواحی، بواسطه کاهش مقاومت در برابر جریان، هد ایجاد شده بر روی سرریز نیز کاهش یافته و طبق رابطه (2)، ضریب دبی افزایش خواهد یافت.

در شکل 23 توزیع سرعت در داخل کلیدهای ورودی سرریز با نسبت ارتفاع‌های نسبی مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش ارتفاع نسبی و به تبع آن بواسطه افزایش تعداد کلید واحد، سرعت جریان در کلیدهای ورودی افزایش می‌یابد. به نحوی که در سرریز با ارتفاع نسبی 0/52 جریان در بخش عمده ای از کلید ورودی زیر بحرانی بوده و نقطه وقوع عمق بحرانی به پایین دست کلید منتقل خواهد شد. در این حالت جریان فرصت بیشتری برای تخلیه از تاج‌های جانبی به سمت کلیدهای خروجی داشته و در نتیجه، تمرکز جریان در انتهای کلید ورودی و پایین دست تاج‌های جانبی کاهش خواهد یافت. علاوه بر این پدیده، بواسطه توزیع مناسب جریان در طول تاج کناری و همچنین افزایش عرض کلید خروجی، برخورد سفره‌های ریزشی در انتهای کلیدهای خروجی نیز کاهش یافته و از میزان استغراق موضعی کاسته می‌شود.

با افزایش ارتفاع نسبی، شیب کلیدهای ورودی نیز افزایش یافته و بواسطه تشدید سرعت در طول کلیدهای ورودی، جریان فرصت کمتری برای عبور یکنواخت از روی تاج‌های کناری خواهد داشت. در این شرایط، تمرکز جریان در نیمه پایین دست سرریز افزایش یافته و ضمن تشدید استغراق موضعی در پایین دست کلیدهای خروجی، بر مقاومت کل سازه در برابر عبوردهی جریان افزوده خواهد شد. کلیدهای ورودی به عنوان موتور و کلیدهای خروجی به عنوان ترمز سرریزهای کلید پیانویی معروف هستند ((Machiels, 2012)). در ارتفاع نسبی پایین، بواسطه بهبود شرایط پخش یکنواخت جریان بر روی تاج‌های کناری در داخل کلید ورودی از یک سو و کاهش استغراق نسبی در پایین دست کلیدهای خروجی از سوی دیگر، هد ایجاد شده در جریان نزدیک شونده کاهش یافته و طبق رابطه



شکل 21 خطوط جریان در تراز 0/24 (فرمزنگ) و 0/36 (آبی‌رنگ) متری از کف، $H/P = 0/3$ ، مدل 5-key



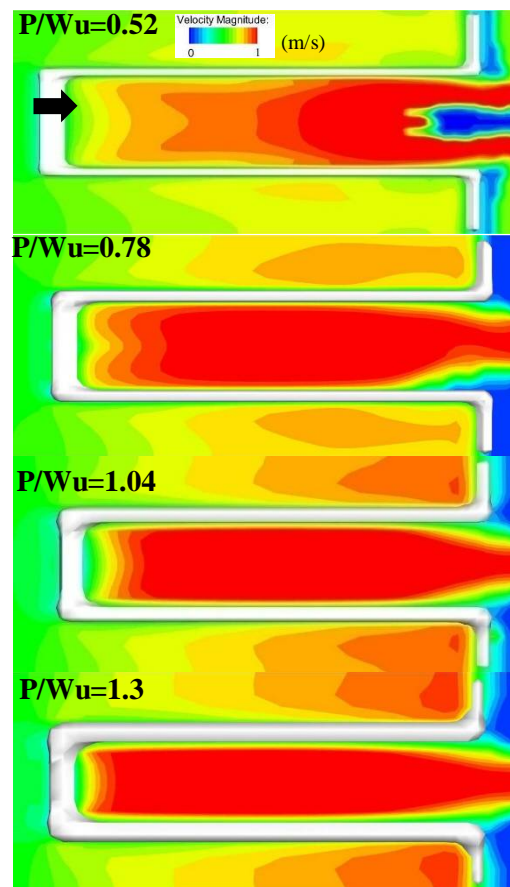
شکل 22 خطوط جریان در تراز 0/24 (فرمزنگ) و 0/36 (آبی‌رنگ) متری از کف، $H/P = 1/11$ ، مدل 5-key

عدم تخلیه مناسب جریان از طریق تاج جانبی (در اثر استغراق موضعی کلید خروجی) و طولانی شدن مسیر حرکت خطوط جریان دلیل اصلی افت راندمان سرریز کلید پیانویی می‌باشد. نکته دیگر اینکه، در هد پایین خطوط جریان از طریق تاج جانبی تخلیه می‌شوند ولی با افزایش هد بالادست و متعاقباً افزایش سرعت جریان، خطوط جریان فرصت و اجازه تخلیه از طریق تاج جانبی را نداشته و مستقیماً از روی تاج سرریز عبور می‌کنند. فشردگی شدید خطوط جریان در روی تاج پایین دست و همچنین در محل تلاقی تاج‌های کناری و پایین دست باعث کاهش راندمان سرریز خواهد شد.

این نکته عامل اصلی وجود اختلاف در توزیع دبی بر روی بخش پایین دست تاج کناری و همچنین تاج پایین دست

عمومی سرریزها، ضریب دبی افزایش می‌یابد.

صورتی که در $H/P=1/11$ تنها 36 درصد کل جریان از تاج جانبی خارج می‌شود. علت بیشتر بودن ظرفیت سرریز کلید پیانویی برای عبور جریان نسبت به سرریزهای خطی با عرض یکسان، بیشتر بودن طولی از تاج است که در مقابل عبور جریان قرار داده می‌شود و امکان این را می‌دهد تا جریان‌های تراز بالاتر به پایین آمده و در نتیجه جریان با دبی یکسان نسبت به سرریز خطی با هد بالادست کمتری از روی تاج عبور کند. با افزایش هد بالادست به سرعت جریان در کلید ورودی افزوده شده و جریان دیگر تمایل به تخلیه از تاج جانبی را ندارد. از طرف دیگر حجم کلید خروجی با جریان‌های تراز پایین پر شده و جریان‌های تراز بالاتر دیگر امکان تخلیه از روی تاج جانبی به داخل کلید خروجی را ندارند، لذا مجبور به افزایش تراز و عبور به صورت مستقیم (مشابه سرریز لبه پهن) از روی سرریز می‌شوند. این دو عامل در کنار پدیده استغراق موضعی در کلید خروجی باعث افت راندمان سرریزهای کلید پیانویی با افزایش هد بالادست می‌شود.



شکل 23 توزیع سرعت در تراز نزدیک به تاج سرریزهای کلید پیانویی با ارتفاع نسبی مختلف به ازای $H/P=0/51$

5- فهرست علائم

<i>A</i>	جز سطح باز
<i>B</i>	طول تاج جانبی
<i>B_b</i>	طول ساختگاه سرریز در راستای تاج جانبی
<i>B_i</i>	طول طره پایین دست
<i>B_o</i>	طول طره بالادست
<i>C_d</i>	ضریب دبی
<i>c</i>	کوواریانس
<i>f</i>	شتاب ناشی از لزجت
%diff	درصد اختلاف نسبی عملکرد
<i>G</i>	شتاب کالبدی
<i>g</i>	شتاب گرانش
<i>H</i>	هد کل جریان بالای تراز تاج سرریز
<i>L</i>	طول کل تاج سرریز
<i>L_r</i>	طول واحد تاج سرریز برابر 1
<i>N_u</i>	تعداد کلید واحد
<i>n</i>	اختلاف تراز خطوط جریان
<i>P</i>	ارتفاع سرریز
<i>P/W_u</i>	ارتفاع نسبی
<i>P_r</i>	فشار
<i>R</i>	ضریب همبستگی پیرسن

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر ارتفاع نسبی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی مطالعه شد. کاهش ارتفاع نسبی (P/W_u) از $1/3$ تا $0/52$ با رویکرد ثابت نگه داشتن ارتفاع و افزایش عرض کلید واحد، تا 20 درصد باعث افزایش راندمان سرریز کلید پیانویی نسبت به هندسه بهینه هیدرولیکی ارائه شده توسط Machiels et al. (2014) گردید. روابط جدیدی برای تعیین ضریب دبی و نسبت دبی بخش‌های مختلف تاج سرریز کلید پیانویی بر اساس هد نسبی و ارتفاع نسبی ارائه شده و برتری روابط استخراج شده، نسبت به روابط موجود در مراجع نشان داده شد. در هدهای پایین جریان ($H/P=0/3$) تقریباً 66 درصد جریان از روی تاج جانبی تخلیه می‌شود. با افزایش هد بالادست مستمراً از این درصد کاسته می‌شود، به

"Overview of Piano Key Weirs experience developed at EDF during the past few years." Labyrinth and Piano Key weirs II. CRC press, London, United Kingdom.

Le Doucen, O.; Leite Ribeiro M.; Boillat, J.L.; Schleiss, A. and Laugier, F. (2009). "Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs". Proceedings of Modèles physiques hydrauliques - outils indispensables du XXI^e siècle. SHF, Lyon, France.

Leite Ribeiro, M.; Boillat, J.L. and Schleiss, A.J. (2011). Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs. Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011. CRC press, London, United Kingdom.

Leite Ribeiro, M.; Pfister, M. and Schleiss, A. J. (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. Labyrinth and Piano Key Weirs II. CRC press, London, United Kingdom.

Leite Ribeiro, M.; Pfister, M.; Boillat, J. L.; Schleiss, A. and Laugier, F. (2012). "Piano Key Weirs as efficient spillway structure". In Proceedings (on CD) of the 24th Congress of CIGB-ICOLD (No. EPFL-CONF-178314, pp. 176-186).

Lempérière, F.; Vigny, J.P. and Ouamane, A. (2011). General comments on Labyrinths and Piano Key Weirs: The past and present. Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011. CRC press, London, United Kingdom.

Machiels, O. (2012). "Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs", Ph.D thesis, University of Liège, Liège.

Machiels, O.; Piroton, M.; Pierre, A., Dewals, B. and Erpicum, S. (2014). "Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs". Journal of Hydraulic Research. 52:3, pp. 326-335.

Novak, P.; Guinot, V.; Jeffrey, A. and Reeve, D. E. (2010). "Hydraulic modelling: An introduction: Principles, methods and applications". CRC Press, London, United Kingdom.

Ouamane, A.; Lempérière, F. (2006). "Design of a new economic shape of weir". In proceedings of International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century. Barcelona, Spain.

Safarzadeh, A.; Noroozi, B. (2017). "3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways". International Journal of Civil Engineering. 15(1), pp. 89-101.

Technical Committee 3. (2014). "Piano Key Weirs Spillways". Chapter 6, Hydraulics for Dams. ICOLD, Accessed 8 Septamber; <http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/13/Science/150717/Chapter6PKWSpillways.pdf>

R^2	ضریب تبیین
S	فاصله در امتداد تاج سرریز
S_i	شیب کلید ورودی
S_o	شیب کلید خروجی
T_s	ضخامت تاج جانبی
Q	دبی
q	دبی در واحد عرض
q_i	دبی در واحد عرض تاج کلید ورودی
q_o	دبی در واحد عرض تاج کلید خروجی
q_s	دبی در واحد عرض تاج جانبی
u	مؤلفه سرعت
V_F	جز حجم باز
W	عرض کل سرریز
W_i	عرض کلید ورودی
W_o	عرض کلید خروجی
W_u	عرض کلید واحد برابر با W/N_u
μ_l	لزجت دینامیکی
μ_t	لزجت آشفتگی
ρ	چگالی آب
σ	انحراف معیار
exp.	اندیس آزمایشگاهی
inlet	کلید ورودی
max.	اندیس حداکثر
num.	اندیس عددی
outlet	کلید خروجی
side crest	تاج جانبی

6- منابع

Crookston, B. M.; Anderson, R. M. and Tullis, B. P. (2018). "Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries". Journal of Hydro-environment Research. 19, pp. 160-167.

Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow, Channel controls*. MacMillan. United State of America.

Hirt, C. W. and Nichols, B. (2008). *Flow-3D User's Manual*. Flow Science Inc.

Javaheri, A.; Parvaneh, A. and Kabiri-Samani, A., (2015). "Experimental parametric study and design of Piano key weirs by O. Machiels, M. Piroton, A. Pierre, B. Dewals And S. Erpicum, J. Hydraulic Res. 52 (3), 2014, 326-335". Journal. Hydraulic Research. 53(4), pp. 543-545.

Laugier, F.; Vermeulen, F. and Lefebvre, V. (2013)

Study of water head effects on discharge distribution and streamlines pattern over the asymmetric rectangular piano key weirs

Akbar Safarzadeh^{1*}, Siamak Khyat Rostami² and Babak Khayat Rostami³

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- MSc., Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- MSc., Ardabil Regional Water Company, Ardabil, Iran

* safarzadeh@uma.ac.ir

Abstract

In the present research, the flow over asymmetric rectangular Pianokey weirs with optimum geometrical ratio is modelled using experimental and numerical modeling. Effects of the water head on discharge distribution pattern over the weir crest is also studied. Effect of the relative height (P/W_u) is investigated on the efficiency of the Pianokey weir by changing the width of the unit key and keeping constant the weir height. The results showed that the weir efficiency increases by decreasing the relative weir height. Available analytical equations in the literature have been applied to compute the discharge passing over the hydraulically optimum weir and also the discharge coefficient for a given approach water head. Differences between the experimental and computed discharge coefficient values are considerable and thus the accuracy of the available equations is not sufficient. In this study, new equations have been developed to compute the discharge coefficient and discharge portions of the inlet key crest, outlet key crest and also the side crest of the asymmetric geometrically optimum Pianokey weirs against approach flow head. The consistency of the results of the new equations with experimental results is considerably higher than the results of available analytical equations in the literature.

Keywords: Asymmetric Pianokey weir, Numerical simulation, Analytical equation, Streamlines. Discharge coefficient.