

هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی انحنا دار در پلان

اکبر صفرزاده گندشمین^{1*}، بهزاد نوروزی²

1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی
2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

* اردبیل، صندوق پستی 179
Safarzadeh@uma.ac.ir

چکیده- در این مقاله، جریان سه بعدی سطح آزاد بر روی سرریزهای کلیدپیانویی انحنا دار در پلان مدل سازی عددی شده و منحنی های عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریزها به ازای پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی تعیین شده است. الگوی سه بعدی جریان حول مدل های مختلف از این نوع سرریزها تعیین شده و ضمن تحلیل هیدرودینامیکی، علت تفاوت عملکرد آنها با سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و ذوزنقه ای بحث شده است. سرریزهای کلیدپیانویی انحنا دار در پلان، الزاماً دارای کلیدهای ذوزنقه ای شکل بوده و مزایای سرریزهای ذوزنقه ای را به دلیل افزایش سطح کلید ورودی و بهبود میزان تخلیه جریان دارا می باشند. علاوه بر آن، پلان انحنا دار با حالت تحذب به داخل مخزن منجر به حذف حالت کانالیزه جریان نزدیک شونده شده و از تمامی جهات، جریان بصورت عمود بر تاج سرریز تخلیه می شود. دو نکته ذکر شده منجر به افزایش قابل ملاحظه ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی انحنا دار می شود. با افزایش زاویه مرکزی سرریز، به علت کاهش استغراق موضعی، افزایش سطح کلیدهای ورودی و همچنین اصلاح الگوی جریان های عبوری از روی کلیدهای کناری، ظرفیت آگذری سیستم افزایش می یابد.

کلیدواژگان: سرریز کلید پیانویی، انحناء در پلان، استغراق موضعی، ضریب دبی، مدل عددی.

1- مقدمه

در این رابطه، L طول تاج، H هد روی سرریز و Q دبی است. یکی از معایب سرریزهای متداول، ظرفیت تخلیه پایین آنها به علت محدودیت عرض موجود برای اجرای این نوع سرریزها می باشد. در دهه سوم قرن گذشته، سرریزهای کنگره ای به عنوان یک راه حل مؤثر برای بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریزها توسعه داده شده است. سرریزهای کنگره ای غالباً با استفاده از

کارایی هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد برای یک هد ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز داشته و ضریب دبی (C_d) این نوع سرریزها با استفاده از رابطه (1) تعیین می شود (Henderson, 1966):

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

برای بهبود عملکرد تخلیه سیلاب سدهای مختلفی مانند سنت مارک⁵، اترویت⁶، گلوریتس⁷ نیز از سرریزهای کلیدپیانویی استفاده شد. مطالعات آزمایشگاهی اوانامه و لمپریه نشان داد که در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد: کلید ورودی جریانهای نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب دار جریان از روی تاج ورودی بصورت ریزشی به سمت پایین دست تخلیه می شود. الگوی دوم بر روی کلید های خروجی شکل می گیرد. در این بخش، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین دست بخش شیب دار کلید تخلیه می شود (Ouamane and Lempérière, 2006). با توجه به شکل 1، عوامل هندسی متعددی بر عملکرد این نوع سرریزها دخالت دارد که به تدریج و با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی تأثیر عوامل مزبور بر رفتار هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی در حال بررسی است. ریبیرو و همکاران دبی کل عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی را به یکسری عوامل هیدرولیکی و هندسی بصورت رابطه (2) مرتبط دانست (Riberio et al., 2007):

$$Q = f(\rho, g, \mu, H, L_t, P, W, W_i, W_o, B_i, B_o, L, S_{in}, S_{out}, t, R, \alpha) \quad (2)$$

که در آن، ρ و μ به ترتیب بیانگر جرم مخصوص و لزجت سیال بوده و g شتاب ثقل می باشد. H بیانگر هد کل جریان روی سرریز بوده و L_t طول کل تاج می باشد. در رابطه مزبور، $P, W, W_i, W_o, B_i, B_o, L$ به ترتیب بیانگر ارتفاع سرریز، عرض کل، عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی، طول کنسول پایین دست، طول کنسول بالادست و طول تاج کناری می باشد. S_o و S_i شیب کلیدهای ورودی و خروجی بوده و t ضخامت بدنه

دیوارهای قائم ساخته شده و کارایی آنها بسیار بهتر از سرریزهای خطی است. ساخت این نوع سرریزها بواسطه استفاده از دیواره های قائم ساده می باشد، لیکن جریان نزدیک شونده به این نوع سرریزها، به ویژه جریانهای تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم تاج های کناری، به شدت دچار فشردگی شده و به همین علت، تاج های بالادست و پایین دست نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. علاوه بر این نکات، عیب عمده این نوع سرریزها، سطح پی بزرگ مورد نیاز برای نصب آنها بر روی سدهای بتنی است. شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی، سرریزهای کلید پیانویی¹ هستند که توسط مؤسسه هیدروکووپ² فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه بیسکارا³ الجزایر ارائه شده است. در این نوع از سرریزها، برخلاف سرریزهای کنگره ای، دهانه ها یک در میان شیب دار به سمت داخل مخزن و بیرون می باشد. اجرای این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره ای، فضای کمتری نیاز داشته و لذا پی این نوع سرریزها می تواند ابعاد کوچکتری داشته باشد، به نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی استفاده کرد.

از دیگر مزیت های سرریزهای کلید پیانویی می توان به این موارد اشاره نمود: دبی مخصوص عبوری از سرریز را تا 100 مترمکعب بر ثانیه بر متر افزایش می دهند، دبی عبوری از این نوع سرریزها حداقل 4 برابر سرریزهای معمولی است، باعث افزایش ظرفیت مخزن می شوند و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند. اولین سرریز کلید پیانویی در سال 2006 بر روی سد گلورس⁴ در کشور فرانسه اجرا شده است (Laugier, 2007). طی سال های 2008 تا 2010

1. Piano Key Weir (PKW)
2. Hydrocoop
3. Biskra
4. Golours

5. St. Marc
6. Etroit
7. Gloriettes

می‌باشد. R شعاع انحناي تاج سرریز و α زاویه دیواره کناری نسبت به جریان نزدیک شونده (زاویه کلید) می‌باشد. Q کل دبی عبوری از روی سرریز می‌باشد. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی لمپریه و جان و همچنین هین و همکاران، مقدار بهینه برای نسبت W_i/W_o برابر $1/2$ می‌باشد (Lempérière and Jun, 2005; Hien et al., 2006).

لمپریه رابطه (3) را به عنوان رابطه اشل-دبی برای سرریزهای کلیدپیانویی ارائه داده است (Lempérière, 2009):

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

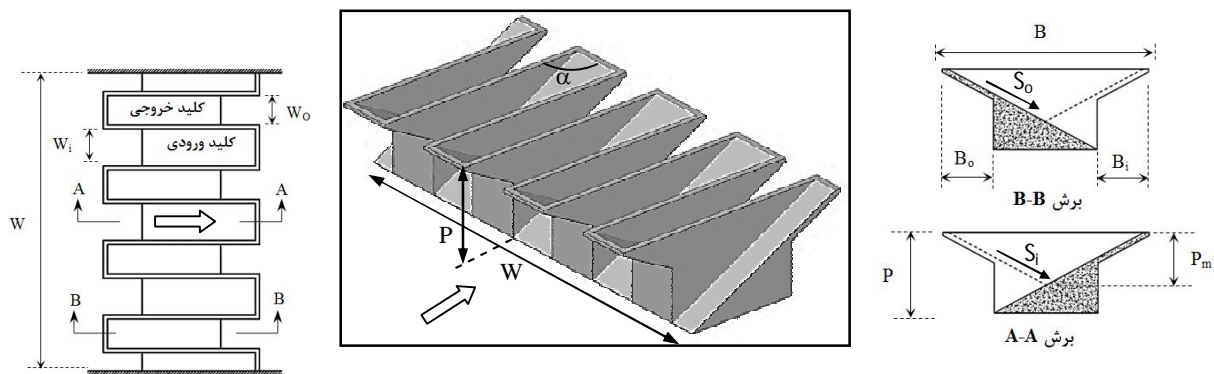
در رابطه فوق، q ($m^3/s/m$) دبی در واحد عرض سرریز بوده و P_m (m) در شکل 1 معرفی شده است. این پارامتر تحت عنوان ارتفاع مشخصه سرریز معروف است. لازم به ذکر است که رابطه فوق برای محدوده $0.4P_m < H < 2P_m$ معتبر است.

روند طراحی این نوع سرریزها اولین بار توسط ماچیلس و همکاران ارائه شده و ماچیلس و همکاران تأثیر ارتفاع سرریز بر ظرفیت تخلیه آن را مطالعه کردند (Machiels et al., 2011a و Machiels et al., 2011b). اشلایس تاریخچه مطالعات بر روی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی را مرور کرده است (Schleiss, 2011). ماچیلس و همکاران تأثیر دیواره جان پناه¹ را بر عملکرد هیدرولیک این نوع سرریز مطالعه کرده و به تأثیر مثبت آن به واسطه افزایش ارتفاع سرریز و نزدیک شدن به ارتفاع بهینه اشاره نموده‌اند (Machiels et al., 2012). ریبیرو و همکاران با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی موجود یک معادله عمومی برای رابطه اشل-دبی این نوع سرریزها ارائه کردند (Riberio et al., 2012). بر اساس نتایج این محققان، ظرفیت این نوع سرریزها عمدتاً به بلندای آب روی سرریز، طول کل، ارتفاع کلیدهای ورودی و عرض

جانبی آن بستگی دارد.

کبیری سامانی و جواهری ظرفیت آبگذری این نوع سرریزها را در حالت کاربرد در کانال‌ها بررسی نموده و با استفاده از آنالیز ابعادی و نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب آبگذری این نوع سرریزها در دو حالت آزاد و مستغرق ارائه نمودند (Kabiri-Samani and Javaheri, 2012).

اندرسون و تولیس عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی مستطیلی را مقایسه کردند. بر اساس نتایج محققان، سرریز کلیدپیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی، از عملکرد بهتری برخوردار است (Anderson and Tullis, 2012). صفرزاده و نوروزی (1-1392) هیدرودینامیک سرریزهای کلیدپیانویی، کنگره‌ای و کنگره‌ای با کلیدهای شیب‌دار را به صورت سه بعدی مطالعه کرده و نشان دادند در سرریزهای کلیدپیانویی به علت حذف فشردگی جریان در کلیدهای ورودی و همچنین توزیع بهتر جریان بر روی بخش‌های مختلف سرریز، ضریب آبگذری بالاتر از دو نوع دیگر می‌باشد. تأثیر دیواره جان پناه و شکل پشت بند² نیز به وسیله محققان مزبور مطالعه شده است (صفرزاده و نوروزی، 1392-2 و 3). مرور مطالعات قبلی نشان می‌دهد که تأثیر زاویه کلید (α) بر عملکرد آن مطالعه نشده و علاوه بر آن هیچ تحقیق آزمایشگاهی و یا عددی در مورد رفتار این نوع سرریزها در پلان انحنادار گزارش نشده است. در این تحقیق ضمن صحت‌سنجی مدل عددی سرریز کلیدپیانویی با داده‌های موجود آزمایشگاهی، با تغییر زاویه کلید و ایجاد سرریز دوزنقه‌ای ابتدا تأثیر آن بر تغییرات ضریب آبگذری مطالعه شده و در نهایت عملکرد ترکیبی سرریزهای دوزنقه‌ای و پلان انحنادار مورد ارزیابی هیدرودینامیکی قرار گرفته است.



شکل 1 پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیانویی

برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود. در این تحقیق از مدل $k-\epsilon$ RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. برای حل عددی از نرم‌افزار FLOW-3D 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 بکار رفته است. این الگوریتم موانع داخل میدان را در سلول‌های محاسباتی به صورت مقدار جزئی بین 0 و 1 در نظر می‌گیرد به نحوی که اگر کل سلول توسط مانع پر شده باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر 1 خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود.

ترم‌های سرعت و فشار بصورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت زمان‌های سابق در معادلات پیوستگی و مومنتم کوپل می‌شوند. در این نرم‌افزار، معادلات شبه ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از تکنیک‌های تخفیف حل می‌شوند که در این مقاله از تکنیک GMRES به عنوان حلگر ضمنی فشار استفاده شده است. در ادامه جزئیات بیشتر از انفصال مکانی میدان حل، شرایط مرزی و همچنین روند همگرایی ارائه شده است.

2- مبانی تئوریک

معادلات حاکم بر مسأله مورد نظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می‌باشد. این معادلات در جریان‌های دو فازی در سیستم مختصات کارتزین (x,y,z) با مؤلفه‌های سرعت (u,v,w) به صورت روابط (۵.۴) بیان می‌شوند (Flow Science, Inc., 2008):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (5)$$

در معادلات فوق، V_F جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR می‌باشد که در ادامه جزئیات آن ارائه شده است. A_x جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت x بوده و A_y و A_z جزء سطوح متناظر در راستای محورهای y و z می‌باشند. در معادلات بقای اندازه حرکت، P بیانگر فشار بوده و (G_x, G_y, G_z) و (f_x, f_y, f_z) به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت می‌باشند. مؤلفه شتاب ناشی از لزجت دربرگیرنده اثرات هر دو لزجت مولکولی و لزجت ناشی از آشفتگی است.

3- صحت‌سنجی مدل‌سازی سرریز کلید

پیانویی مستطیلی

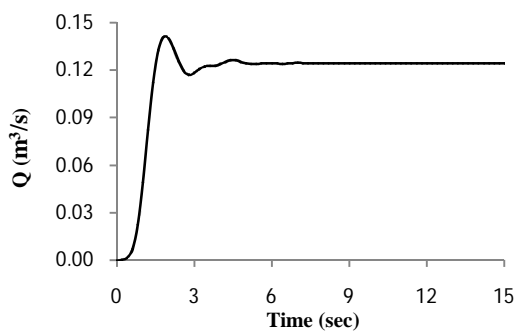
برای صحت‌سنجی روند مدل‌سازی و همچنین حصول اطمینان از شرایط مرزی مورد استفاده، مدل عددی سه بعدی متناظر با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته به وسیله اندرسون بر روی سرریز کلیدپیانویی واقع در یک کانال با جزئیات منطبق بر جدول 1 ساخته شده است (Anderson, 2011). در این جدول، مقادیر بر حسب متر می‌باشند. N تعداد سیکل سرریز بوده و n بیانگر نسبت طول تاج به عرض سرریز می‌باشد. مدل‌سازی عددی به ازای 9 مقدار نسبت H/P از 0/05 تا 0/8 صورت گرفته است که H بیانگر هد استاتیکی آب بر روی سرریز می‌باشد. مدل عددی دارای یک بلوک شبکه‌بندی غیر یکنواخت با تعداد شبکه بهینه $(125 \times 80 \times 60)$ در امتداد (x, y, z) می‌باشد. لازم به ذکر است که شبکه‌بندی بهینه با استفاده از الگوریتم GCI که توسط رواخه ارائه شده، تعیین شده است (Roache, 1980). در این الگوریتم، با توجه به داشتن مقدار دبی آزمایشگاهی، این پارامتر به عنوان هدف انتخاب شده و ضمن استفاده از شبکه

بندی‌های مختلف، شبکه بهینه بر اساس الگوریتم مزبور انتخاب شده است. در مرز ورودی بلوک از شرط مرزی فشار سکون استفاده شده و مقدار عمق مورد نظر اعمال شده است. در مرز پایین‌دست از شرط خروجی استفاده شده است. مرزهای کناری و بالای میدان بصورت مرز تقارن مدل شده و درکف مدل از شرط مرزی دیواره با بهره‌گیری از تابع دیوار در نقاط گرهی نزدیک به مرز، استفاده شده است. به منظور اطمینان از همگرایی حل و همچنین تثبیت کامل شرایط اعمالی به مدل، دبی خروجی از میدان و همچنین تغییرات زمانی سطح آب در ورودی مدل، در طول حل کنترل شد. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، زمان 15 ثانیه برای همگرایی مدل و همچنین شکل‌گیری جریان دائمی کفایت می‌کند (شکل 2).

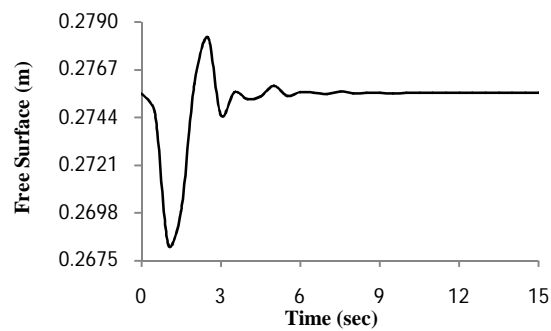
در شکل 3 الگوی عمومی جریان پیش‌بینی شده برای نسبت H/P برابر 0/15 نشان داده شده است. در این شکل خطوط جریان عبوری از تراز تحتانی میدان که توسط کلیدهای ورودی تخلیه می‌شوند، نیز ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی مورد استفاده برای صحت‌سنجی مدل عددی (ابعاد بر حسب متر).

پارامتر	P	P_m	L	W	W_i	W_o	S_i	S_o	B_i	B_o	T	N	n
مقدار	0/167	0/128	4/74	0/937	0/115	0/092	%56/56	%56/56	0/121	0/121	0/012	4	5



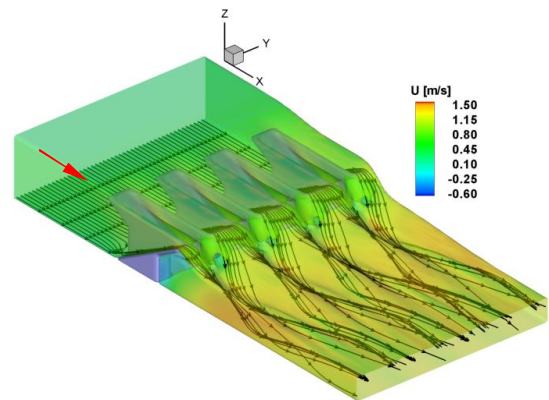
ب- تغییرات دبی خروجی از مرز خروجی



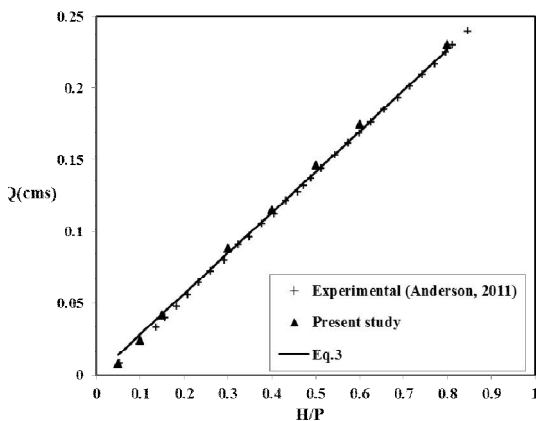
الف- تغییرات سطح آب در نزدیکی مرز ورودی

شکل 2 روند همگرایی و رسیدن حل به حالت دائمی بر اساس تغییرات زمانی سطح آب در ورودی و دبی در خروجی مدل

روی کلید ورودی بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در حالت $H/P=0.3$ مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، انطباق پروفیل های اندازه گیری شده و پیش بینی شده در بخش های مختلف سرریز مناسب بوده و نشانگر صحت مدل سازی عددی است. در بخش بعد مدل های عددی مختلفی برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای ساخته شده و ضمن تشریح هیدرودینامیک این نوع سرریز با هندسه جدید، مبانی لازم برای بررسی عملکرد سرریز کلیدپیانویی با پلان انحنادار استخراج شده است.

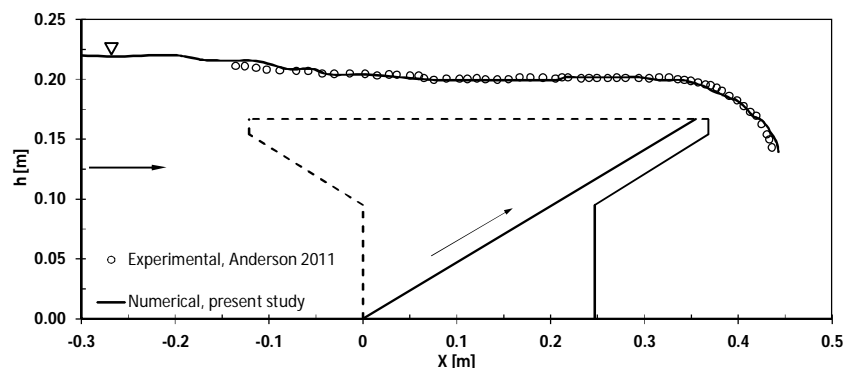


شکل 3 الگوی عمومی جریان شبیه سازی شده بر روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی



شکل 4 مقایسه دبی پیش بینی شده سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با داده های آزمایشگاهی و رابطه (3)

در شکل 4 مقادیر دبی پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی و همچنین مقادیر حاصل از رابطه (3) به ازای نسبت های مختلف H/P ارائه شده است. لازم به یادآوری است که H بیانگر هد کل جریان نزدیک شونده می باشد. به منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی از آماره های میانگین اریبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. مقدار پارامترهای مزبور به ترتیب، $0/86$ ، $0/00641$ ، $0/00627$ و $0/0074$ می باشد. با توجه به مقادیر حاصل، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج مدل و داده های آزمایشگاهی موجود برقرار می باشد. در شکل 5 پروفیل طولی سطح آب بر



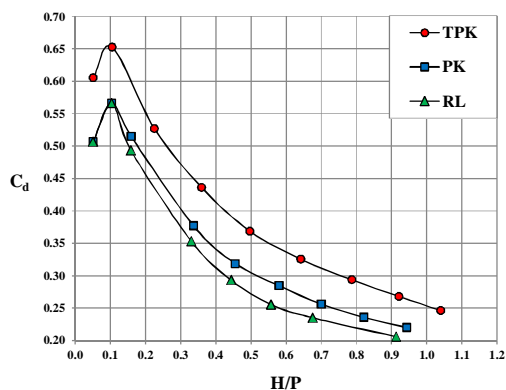
شکل 5 مقایسه پروفیل سطح آب بر روی کلید ورودی بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی برای $H/P=0.3$

4- بررسی عملکرد سرریز کلیدپیانویی

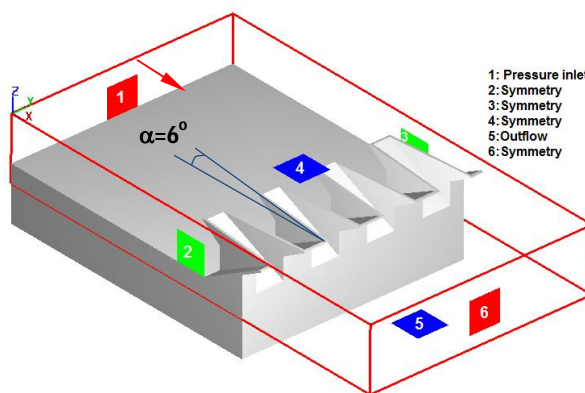
دوزنقه‌ای TPK

همان‌طور که در بخش مقدمه عنوان شد، تأثیر زاویه کلید در هیچ کدام از مطالعات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این بخش از مقاله از دو طریق، عملکرد هیدرولیکی و همچنین ساختار جریان بر روی این نوع از سرریز غیرخطی مطالعه شده و قابلیت عبوردهی جریان در سه مدل سرریزهای کنگره‌ای (RL)، کلیدپیانویی مستطیلی (PK) و کلیدپیانویی دوزنقه‌ای (TPK) مقایسه شده است. در بخش اول، مطابق شکل 6 مدل سه بعدی از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با هندسه منطبق بر جدول 1 و زاویه کلید 96 درجه ساخته شده است. لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از تأثیر شرایط پایین‌دست بر تخلیه جریان از روی سرریز، مدل‌های این بخش بر خلاف مدل مورد استفاده در صحت‌سنجی، بصورت سرریزهای مخزن در نظر گرفته شده است. سه نوع سرریز مورد نظر به نحوی انتخاب شدند که هر سه مورد دارای طول تاج یکسانی بوده و ابعاد بخش‌های مختلف آن مطابق جدول 1 باشد. با توجه به شکل 6 شرایط مرزی مورد استفاده، مشابه مدل صحت‌سنجی بوده و تفاوت اصلی آنها، مرز Z_{min} می‌باشد. به منظور ایجاد شرایط

قرارگیری سرریز در مخزن سد و حذف اثرات پایین‌دست، به ویژه بر روی جریان جت کلیدهای خروجی، مرز مزبور در فاصله قائم کافی از انتهای شیب کلیدهای خروجی قرار داده شده و با استفاده از شرط مرزی خروجی در این مرز، جریان عبوری از کل مجموعه بصورت آزاد و بدون ایجاد استغراق از کف میدان خارج خواهد شد. برای انفصال میدان بر اساس الگوریتم GCI، از $(125 \times 200 \times 65)$ سلول در سه امتداد (x, y, z) استفاده شده و الگوی جریان در هر سرریز به ازای 9 مقدار مختلف H/P مشابه مدل صحت‌سنجی شبیه‌سازی شده است. زمان حل برای هر مدل در یک کامپیوتر 8 هسته‌ای با 4 گیگابایت رم، 25 ساعت می‌باشد. در شکل 7 ضرایب دبی سه نوع سرریز مختلف باهم مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی مستطیلی، در هدهای پایین عملکرد یکسانی داشته و با افزایش هدها، ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی نسبت به کنگره‌ای افزایش می‌یابد. زاویه‌دار نمودن تاج‌های کناری کلیدها و به عبارت دیگر، استفاده از سرریز کلیدپیانویی با پلان دوزنقه‌ای باعث بهبود قابل توجهی در تمام محدوده هدها اعمالی به سرریز شده است. به طور میانگین ضریب دبی سرریز TPK به اندازه 23 و 18 درصد به ترتیب بالاتر از سرریزهای RL و PK می‌باشد.



شکل 7 مقایسه ضرایب دبی در سه نوع سرریز کنگره‌ای، کلیدپیانویی مستطیلی و کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

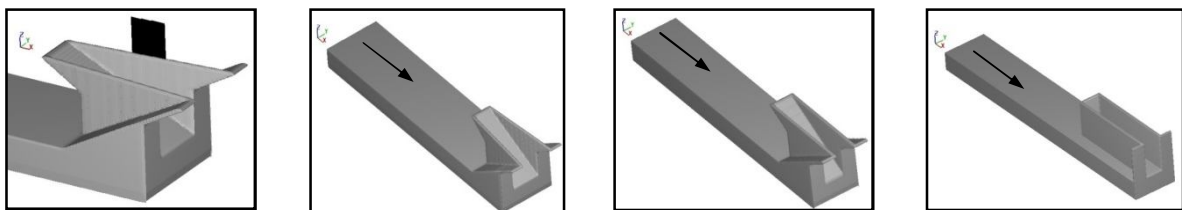


شکل 6 هندسه سه بعدی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی

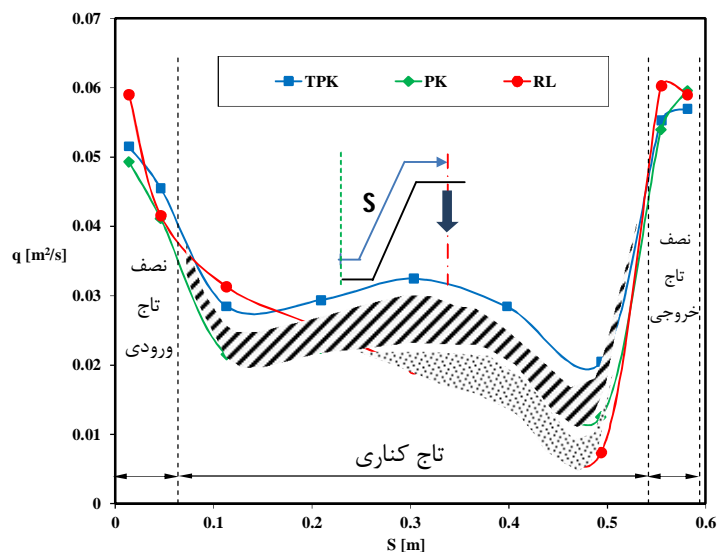
است. در کل از 9 بفل بر روی تاج هر سرریز استفاده شده و مدل به ازای نسبت $H/P=0.4$ اجرا شده است. شرایط مرزی مورد استفاده مشابه شکل 6 بوده و در هر سرریز از 600000 سلول محاسباتی استفاده شده است.

در شکل 9 نحوه توزیع دبی در واحد عرض در نصف طول تاج سه نوع سرریز مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به شکل مزبور، نحوه توزیع دبی بر روی تاج‌های ورودی تقریباً یکسان بوده، ولی تفاوت عمده‌ای بر روی تاج کناری مشاهده می‌شود. در سرریز RL با حرکت در طول تاج کناری، مقدار دبی در واحد عرض به تدریج کاهش یافته و در محل تلاقی تاج‌های کناری و تاج خروجی به حداقل خود می‌رسد، در حالی که در سرریزهای کلیدپیانویی، دبی در طول تاج کناری دارای یک مقدار حداکثر در بخش میانی می‌باشد.

با توجه به شکل، در هر سه نوع سرریز، بیشترین ضریب آبگذری در نسبت $H/P=0.1$ رخ داده است. به منظور بررسی علل بهبود قابلیت آبگذری سرریزهای ذوزنقه‌ای نسبت به دو نوع دیگر، سری دیگر مدل‌های عددی بصورت تک سیکل مطابق شکل 8 ساخته شد. هر سرریز دارای دو نیم کلید ورودی در طرفین به همراه یک کلید خروجی کامل میانی می‌باشد، به نحوی که یک سیکل کامل در نظر گرفته شده است. طول تاج در هر سه نوع سرریز یکسان می‌باشد. به منظور بررسی دقیق علت تفاوت در عملکرد سرریزهای مورد نظر، از گزینه بفل برای تعیین توزیع دبی در بخش‌های مختلف هر نوع سرریز استفاده شده است. بفل صفحه‌ای می‌باشد که با اختصاص مقدار مناسب نفوذپذیری، می‌توان شار حجمی عبوری از آنرا تعیین نمود. نحوه قرارگیری یکی از بفل‌ها بر روی تاج سرریز TPK در شکل 8 نشان داده شده



شکل 8 هندسه تک کلید سه نوع سرریز مختلف به همراه نحوه قرارگیری یکی از بفل‌ها بر روی تاج سرریز TPK



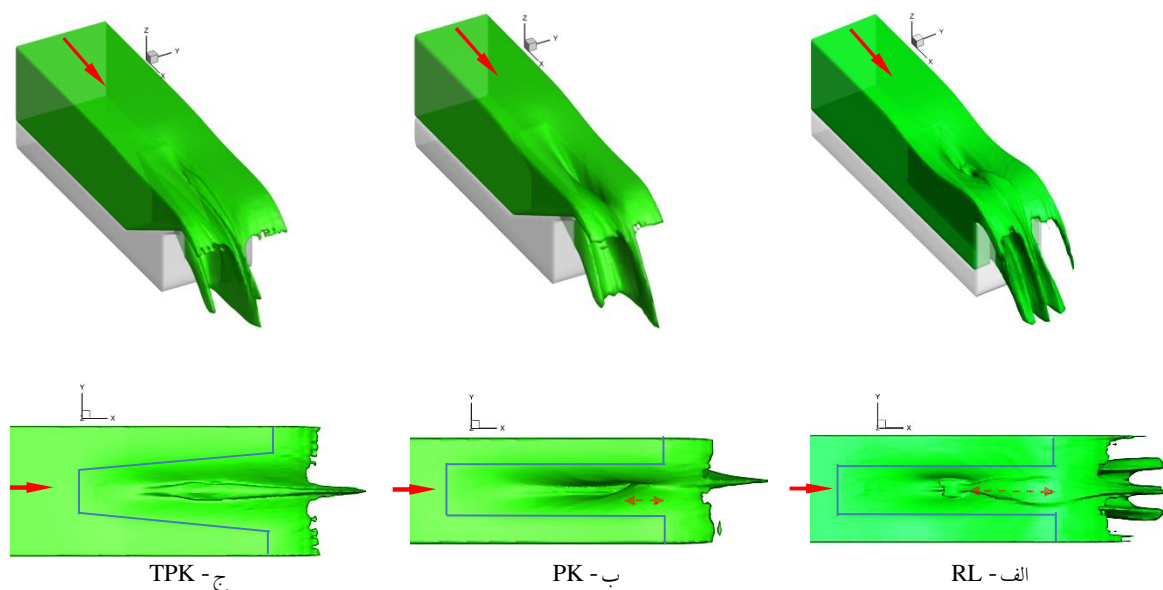
شکل 9 روند توزیع دبی بر روی نصف تاج یک سیکل از سه نوع سرریز مورد مطالعه

با توجه به شکل 10، جریان عبوری از روی سرریز RL دارای پایین افتادگی شدید در بین دو دیواره کناری بوده و در انتهای سرریز بالادگی شدید سطح آب رخ داده است. این پدیده نشان از ایجاد استغراق موضعی شدید و اغتشاش در جریان به هنگام عبور از روی سرریز کنگره‌ای دارد.

در پلان ارائه شده از سطح آب، طول ناحیه استغراق موضعی نیز با فلش دو سویه مشخص شده است. با تبدیل سرریز به کلیدپیانویی (PK)، رژیم جریان بر روی سرریز کاملاً تغییر یافته و علاوه بر کاهش قابل ملاحظه در پایین افتادگی سطح آب، ناحیه استغراق موضعی بسیار محدودتر شده و اغتشاش شدید در سطح آب مشاهده نمی‌شود. در این حالت تیغه جریان تشکیل شده بر روی تاج‌های کناری، تنها در بخش کوچکی واقع در انتهای سرریز به هم برخورد می‌کنند. مقایسه ساختار سطح آب بین سرریزهای RL و PK نشان می‌دهد که طول ناحیه استغراق موضعی در سرریز کلید پیانویی به مراتب کمتر از سرریز کنگره‌ای می‌باشد.

مشاهده شکل 9 نشان می‌دهد که تبدیل سرریز کنگره‌ای به کلیدپیانویی منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در میزان عبور جریان از روی تاج کناری و بویژه محدوده سمت تاج خروجی سرریز شده است. میزان افزایش دبی عبوری از روی تاج کناری سرریز PK نسبت به سرریز RL بصورت ناحیه نقطه چین نشان داده شده است.

با تبدیل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی به ذوزنقه‌ای، دبی در واحد عرض در کل طول تاج کناری افزایش یافته و به طور مشخص در میانه تاج کناری حداکثر عبور جریان رخ می‌دهد. میزان افزایش دبی سرریز TPK در طول تاج کناری نسبت به سرریز PK بصورت ناحیه هاشور خورده نشان داده شده است. موارد فوق‌الذکر نشان می‌دهد که عمده تفاوت عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مورد مطالعه، بر روی تاج کناری رخ داده و محدوده اتصال تاج کناری به تاج خروجی، نقش تعیین کننده‌ای در عبور جریان از روی سرریز دارد. برای بررسی علت تغییر در رفتار هیدرولیکی سرریزهای مورد مطالعه، الگوی سه بعدی جریان آنها در شکل‌های 10 و 11 ارائه شده است.



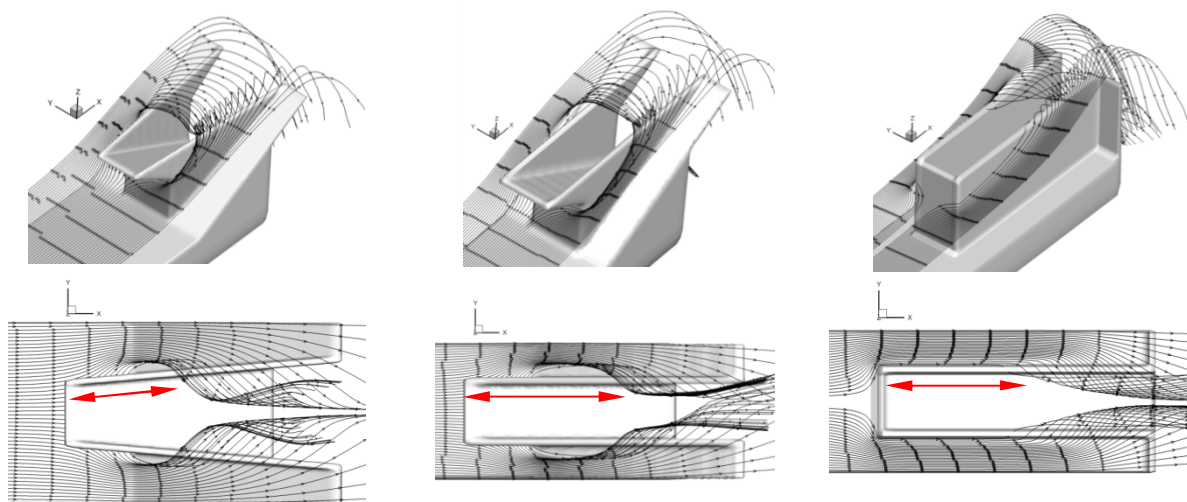
شکل 10 شکل سه بعدی جریان عبوری بر روی سرریزهای تک کلید TPK، PK و RL به ازای H/P برابر 0/4

جریان رها شده از ورودی، یکسان بوده است. با توجه به تصاویر، در لایه میانی تفاوت قابل ملاحظه‌ای در الگوی حرکتی ذرات آب حول سرریزهای مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

در سرریز RL بخش عمده‌ای از خطوطی که به سرریز نزدیک شده‌اند، به سمت تاج‌های ورودی و گوشه تاج سرریز (محل تلاقی تاج‌های کناری و تاج‌های ورودی) هدایت شده و در این ناحیه فشردگی زیادی در خطوط جریان ایجاد شده است. بواسطه تمرکز خطوط در نواحی مزبور و نبود ظرفیت کافی برای عبور جریان از این بخش، بالازدگی سطح آب رخ داده است. این پدیده در شکل 11 نیز نشان داده شده است. در سرریز PK از تمرکز جریان در گوشه تاج سرریز کاسته شده و بخش عمده‌ای از جریان از روی تاج‌های جانبی خارج می‌شوند. در سرریز TPK توزیع خطوط جریان لایه میانی بر روی بخش‌های مختلف تاج سرریز بسیار یکنواخت‌تر از دو نوع سرریز قبلی شده و بخش عمده‌ای از جریان از روی تاج کناری عبور می‌کند. مقایسه طول‌هایی از تاج کناری سرریزهای مورد نظر که بدون خطوط جریان هستند، مؤید بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز دوزنقه‌ای می‌باشد.

با دوزنقه‌ای کردن سرریز کلیدپیانویی (TPK) پایین افتادگی سطح آب بسیار محدودتر شده و جریان‌های عبوری از روی تاج های کناری، بدون ایجاد استغراق موضعی و بدون برخورد به هم بر روی بخش شیب‌دار کلید خروجی تخلیه شده و پس از ترکیب با جریان سرریزی از کلید خروجی، باعث ایجاد یک برآمدگی طولی در سطح آب می‌شوند که به صورت گرده‌ماهی می‌باشد.

در بخش ابتدایی کلیدهای خروجی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین جریان‌های خروجی از روی سرریز کنگره‌ای و کلیدپیانویی مشاهده می‌شود. در سرریز RL جریان عبوری از روی تاج خروجی، بواسطه پرس شدن محدوده بین دو تاج کناری به راحتی تخلیه نشده و یک حالت انسداد در این محل رخ می‌دهد، در حالی که در سرریزهای کلیدپیانویی، شیب‌دار نمودن کف کلید باعث تخلیه مناسب‌تر جریان شده است. در شکل 11 خطوط جریان در لایه میانی حول سه نوع سرریز مورد نظر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خطوط مزبور، از ورودی میدان در تراز میانی شروع شده و در تمامی مدل‌ها به منظور قیاس بین مدل‌های مختلف، تعداد خط



ج - RL

ب - PK

الف - TPK

شکل 11 خطوط جریان عبوری بر روی سرریزهای تک کلید TPK، PK و RL به ازای H/P برابر 0/4

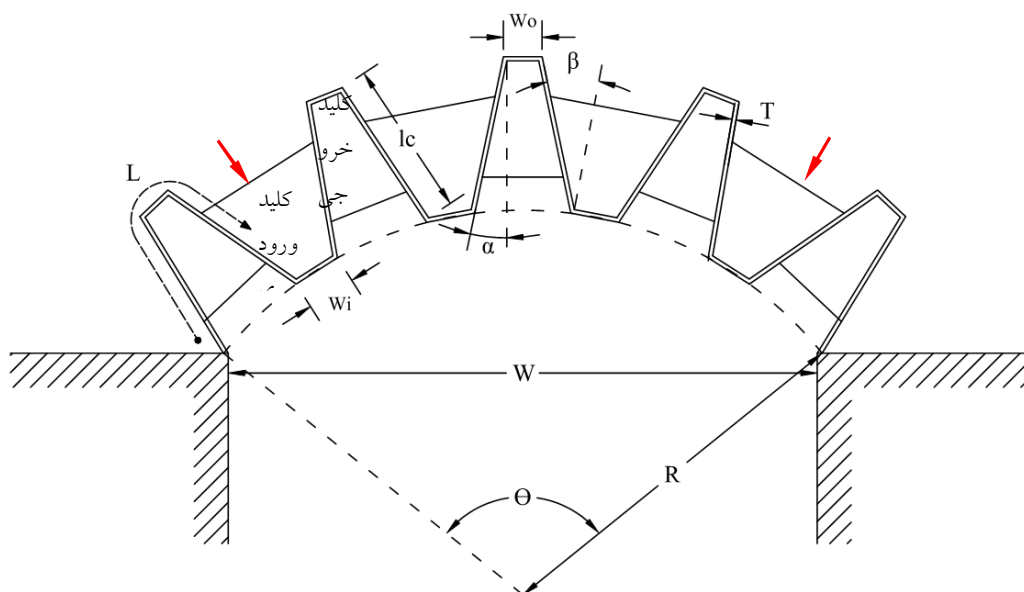
سرریزهای کلیدپیانویی، 4 طرح مختلف مطابق شکل 13 در نظر گرفته شد. جزئیات هندسی مدل‌های مورد نظر در جدول 2 ارائه شده است. در تمامی مدل‌ها ارتفاع سرریز مشابه مدل‌های قبلی سرریزهای کلید پیانویی، برابر 0/167 متر بوده است. مدل پایه بصورت یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در مسیر مستقیم با 5 سیکل بوده و سه نوع سرریز با زوایای مرکزی 50، 100 و 150 درجه به نحوی ساخته شدند که طول تاج سرریز در تمامی مدل‌ها برابر طول تاج سرریز دوزنقه‌ای باشد. مدل‌های مورد نظر بصورت سرریزهای مخزن بوده و به منظور حذف اثرات کانالیزه شدن جریان نزدیک شونده، سرریزها به صورت محدب به سمت مخزنی به ابعاد 6×4 متر قرار گرفتند.

همان‌طور که در شکل 13 نشان داده شده است، کف مدل در سمت مقعر سرریزها (محل خروجی جریان) خالی و بدون مانع در نظر گرفته شده است، تا شرایط تخلیه جریان بدون ایجاد استغراق فراهم شود. برای مدل‌سازی عددی از دو بلوک شبکه‌بندی استفاده شده است. بلوک‌های مزبور به همراه شرایط مرزی اعمالی در شکل 13 نشان داده شده است.

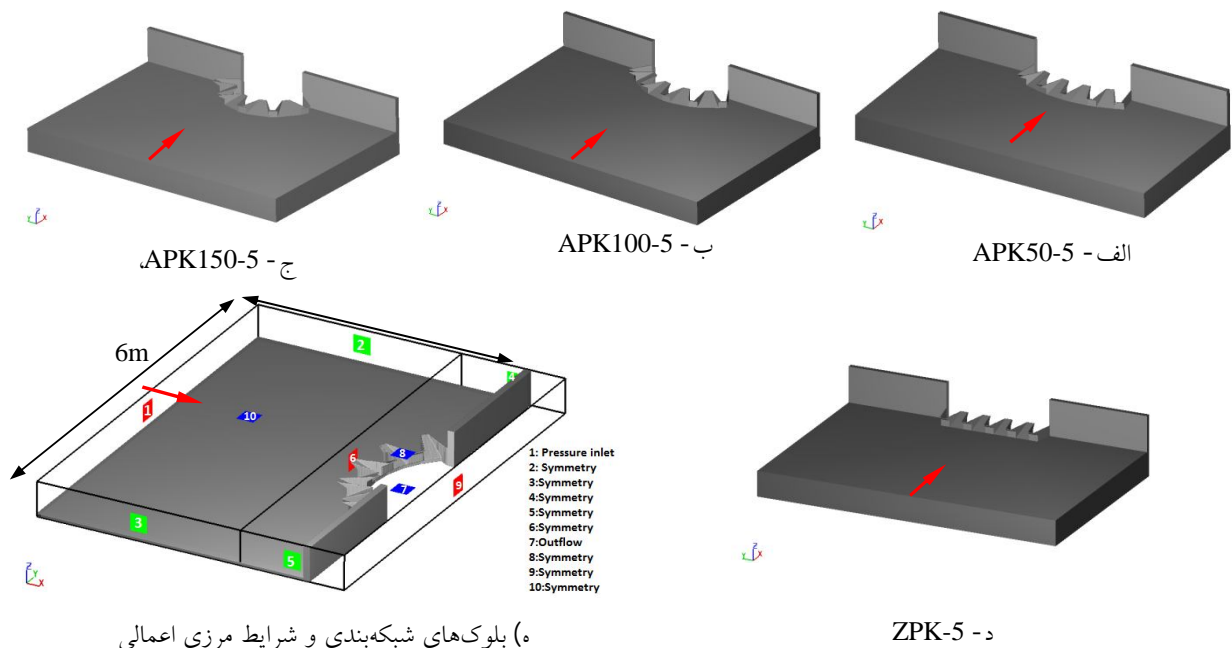
با توجه به نکات اشاره شده، طرح دوزنقه‌ای برای سرریز کلیدپیانویی به دو علت باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز شده است: 1- تلاقی جریان‌های ریزشی از تاج‌های کناری در تراز پایین اتفاق افتاده و به همین علت استغراق موضعی رخ نمی‌دهد. 2- به علت زاویه‌دار بودن تاج‌های کناری و همچنین افزایش مقطع کلیدهای ورودی، سرعت جریان در این ناحیه کاهش یافته و توزیع جریان بر روی تاج کناری یکنواخت تر خواهد بود. با توجه به نکات فوق و با استفاده از مزایای سرریزهای دوزنقه‌ای، هیدرودینامیک سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار در پلان تشریح شده است.

5- بررسی عملکرد سرریز کلیدپیانویی انحنادار در پلان (APKW)

در شکل 12 هندسه عمومی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار به همراه پارامترهای هندسی معرف نشان داده شده است. با توجه به شکل، سرریز مورد نظر تلفیق سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و یک پلان غیر مستقیم می‌باشد. به منظور بررسی هیدرودینامیک این نوع از



شکل 12 پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی انحنادار در پلان APK



شکل 13 شکل سه بعدی از سه مدل سرریز APK و سرریز TPK با تعداد 5 سیکل و طول تاج یکسان

مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، تبدیل سرریز TPK به سرریز APK50 منجر به بهبود قابل ملاحظه در مقادیر ضریب دبی در هدهای پایین شده، ولی برای هدهای بالا، تفاوت چندانی بین رفتار دو سرریز مشاهده نمی‌شود. افزایش زاویه سرریز باعث افزایش ضریب دبی در هدهای یکسان شده و در هدهای بالاتر نیز منحنی اشل-دبی سرریزهای انحنادار از منحنی سرریز دوزنقه‌ای بالاتر می‌باشد. در نسبت $H/P=0.2$ مقدار ضریب دبی سرریز دوزنقه‌ای $0/63$ می‌باشد، در حالی که با طول یکسان، در سرریز APK150-5 مقدار ضریب دبی به $0/84$ افزایش پیدا کرده است. به طور متوسط، ضریب دبی سرریزهای APK50-5، APK100-5 و APK150-5 به ترتیب به میزان $9/14$ ، $20/34$ و $29/14$ درصد نسبت به سرریز TPK-5 افزایش یافته است.

به منظور بررسی علل افزایش ضریب دبی سرریزهای انحنادار نسبت به سرریزهای دوزنقه‌ای و همچنین اثرات ناشی از زاویه سرریز، الگوی جریان بر روی آنها بررسی شده است.

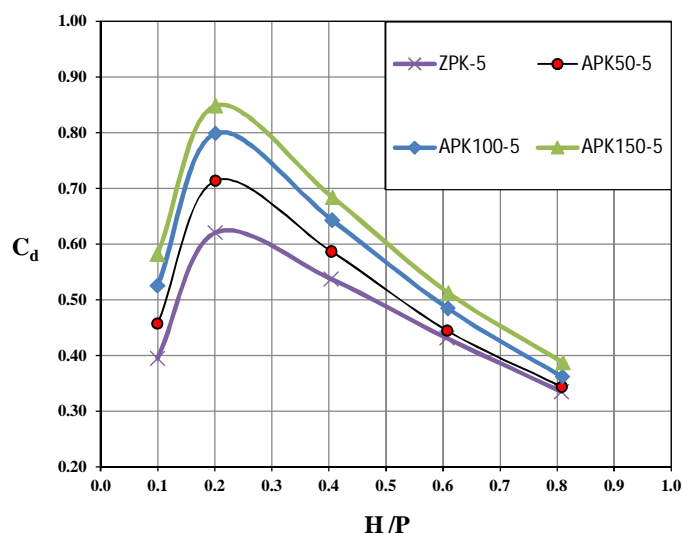
در فصل مشترک دو بلوک از شرط مرزی تقارن استفاده شده و صفحه Z_{min} بلوک پایین دست به اندازه کافی پایین تر از انتهای شیب کلیدهای خروجی در نظر گرفته شده و ضمن اعمال شرط مرزی خروجی، شرایط بهره‌برداری از سرریز بصورت سرریز سد، بدون استغراق در پایاب و ریزشی آزاد را فراهم نموده است. ستون انتهای جدول 2 تعداد سلول محاسباتی در هر مدل را نشان می‌دهد. این مدل‌ها برای H/P از $0/1$ تا $0/8$ اجرا شده است. با توجه به پیچیدگی هندسی مدل و همچنین تعداد زیاد سلول محاسباتی، شبیه‌سازی‌ها بصورت موازی بر روی یک کامپیوتر 16 هسته‌ای با 24 گیگابایت رم انجام شده است. بررسی تغییرات زمانی دبی خروجی از مدل نشان داد که زمان 20 ثانیه برای ایجاد شرایط جریان دائم کفایت می‌کند. زمان شبیه‌سازی برای هر مدل حدود 600 ساعت بوده و در مجموع، 20 مدل عددی ساخته شده است.

1-5- ارائه نتایج

در شکل 14 منحنی تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار با سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

جدول 2 مشخصات هندسی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار در پلان به همراه تعداد سلول محاسباتی در هر مدل

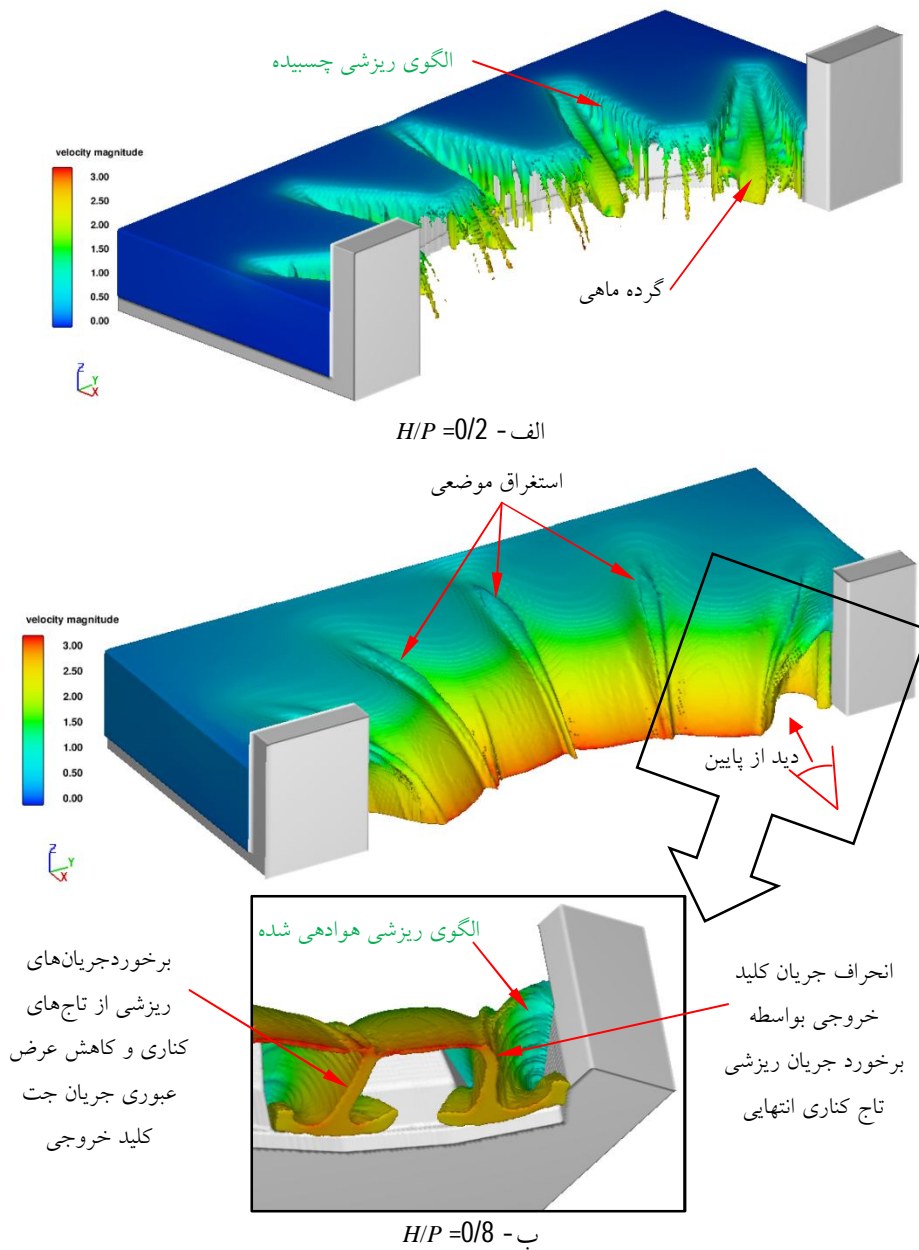
تعداد سلول محاسباتی	نسبت طول تاج به عرض سرریز	ضخامت دیواره سرریز (cm)	طول کنسول خروجی (m)	طول کنسول ورودی (m)	زاویه کلید ورودی (degree)	زاویه کلید خروجی (degree)	شیب کف کلید خروجی	شیب کف کلید ورودی	عرض کلید خروجی (m)	عرض کلید ورودی (m)	طول تاج کناری (m)	عرض سرریز (m)	طول تاج (m)	تعداد سیکل ها	زاویه سرریز (degree)	کد مدل
-	n	T	B_o	B_i	β	α	S_o	S_i	W_o	W_i	l_c	W	L	N	θ	
4060372	1/97	1/27	0/1214	0/1214	17	12	55/56 %	55/56 %	0/925	0/1156	0/489	3	5/9	5	50	APK50-5
3520612	3/27	1/27	0/1214	0/1214	23	12	55/56 %	55/56 %	0/925	0/1156	0/489	1/8	5/9	5	100	APK100-5
4060372	3/96	1/27	0/1214	0/1214	28	12	55/56 %	55/56 %	0/925	0/1156	0/489	1/49	5/9	5	150	APK150-5
3188292	2/85	1/27	0/1214	0/1214	12	12	55/56 %	55/56 %	0/925	0/1156	0/489	2/07	5/9	5	---	TPK-5



شکل 14 مقایسه تغییرات ضریب دبی سرریزهای APK با زاویه سرریز مختلف با ضریب دبی سرریز TPK با 5 سیکل

کرده و در ترکیب با جریان سرریز شده از تاج خروجی، باعث شکل‌گیری گرده‌ماهی می‌شوند، به نحوی که بالآمدگی سطح آب در داخل کلیدهای خروجی، عمدتاً در انتهای بخش شیب‌دار رخ داده و استغراق موضعی رخ نمی‌دهد. با افزایش هد آب بر روی سرریز مورد نظر، کلیدهای خروجی حالت مستغرق پیدا کرده و به علت افزایش حجم آب عبوری از روی کلیدهای کناری، سرعت جریان نیز بالطبع افزایش یافته و جت‌های ریزشی در ترازهای بالاتر به هم برخورد می‌کنند.

در شکل 15 جریان سه بعدی بر روی سرریز APK100-5 به ازای نسبت هدهای 0/2 و 0/8 نشان داده شده است. در هدهای پایین، بخش عمده‌ای از جریان از کلیدهای خروجی تخلیه شده و بر روی سرریز و همچنین در جریان نزدیک شونده به آن، سطح آب حالت افقی داشته و وقتی در سطح آب مشاهده نمی‌شود. جریان عبوری از روی کلیدهای کناری بصورت چسبیده به دیواره خارج شده و در داخل کلیدهای خروجی، جریان عبوری از دیواره‌های جانبی طرفین، بر روی کف شیب‌دار کلید به هم برخورد



شکل 15 تغییرات جریان بر روی سرریز APK100-5 به ازای دو نسبت H/P

محل تلاقی جریانهای ریزشی در داخل کلید عبور می‌کنند.

با افزایش هد آب بر روی سرریز، جریان عبوری از روی تاج کناری کلیدهای واقع در دو انتهای سرریز، از حالت چسبیده¹ به حالت هوادهی² شده تغییر یافته و بواسطه

نتیجه برخورد جت‌های ریزشی طرفین، بالازدگی سطح آب در لایه‌های فوقانی داخل کلیدهای خروجی و شکل‌گیری استغراق موضعی شدید در این نواحی می‌باشد. همان‌طور که در شکل مربوط به نسبت هد $0/8$ نشان داده شده است، شکل‌گیری استغراق موضعی باعث کاهش عرض عبوری جریان در کلید خروجی شده و جریان‌های عبوری از روی تاج خروجی، فقط از طرفین

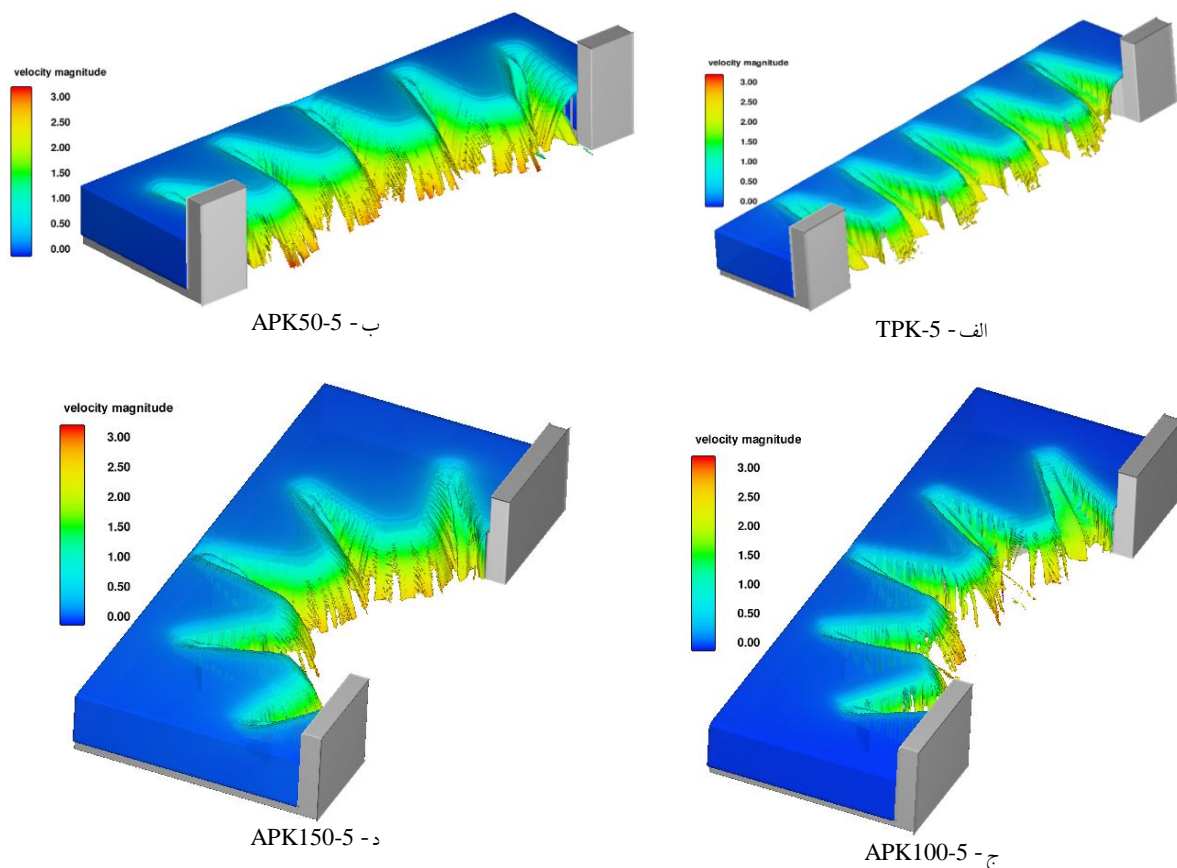
1. Clinging
2. Aerated

در مقابل، بواسطه کم شدن عرض کلیدهای خروجی، میزان استغراق موضعی افزایش پیدا می‌کند و کلید خروجی فضای مناسب برای تخلیه جریان ندارد. با توجه به اینکه کلیدهای ورودی، جریان‌های نزدیک شونده را از تمامی ترازهای مخزن دریافت می‌کنند (صفرزاده و نوروزی، 1392-1)، می‌توان انتظار داشت که تأثیر مثبت بهبود آبگذری این کلیدها بر کل مجموعه بسیار بیشتر از تأثیر منفی استغراق موضعی کلیدهای خروجی در کاهش عملکرد آنها باشد.

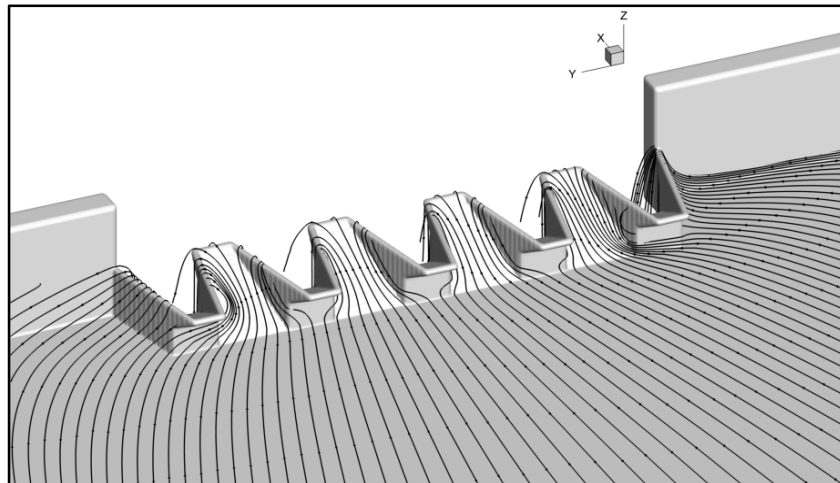
در شکل 17 الگوی خطوط جریان عبوری از روی سرریز TPK-5 با دو سرریز APK100-5 و APK150-5 مقایسه شده است. خطوط مزبور از تراز میانی در ورودی مخزن شروع شده و در هر سه سرریز، تعداد خطوط یکسان بوده است.

سرعت زیاد، جریان عبوری از روی کلید کناری به سمت جریان عبوری از دیگر تاج کناری کلید برخورد کرده و باعث ایجاد انسداد در تخلیه جریان از کلیدهای انتهایی در طرفین سرریز می‌شود. علاوه بر آن با افزایش هد جریان، تغییرات شدید سطح آب بر روی سرریز مشاهده می‌شود. افزایش هد آب منجر به بالازدگی سطح آب در طرفین سرریز شده است. این پدیده‌ها عوامل اصلی کاهش ضریب آبگذری با افزایش هد آب بر روی سرریزهای کلیدپانویی مورد مطالعه می‌باشد.

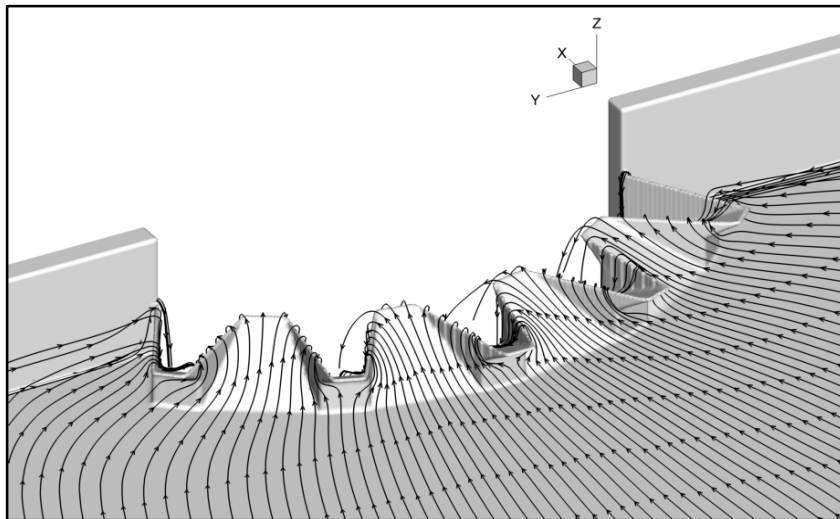
در شکل 16 جریان شکل گرفته بر روی تمامی سرریزهای مورد مطالعه برای $H/P=0.2$ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مزبور، با افزایش زاویه سرریز، سطح جریان عبوری از کلیدهای ورودی افزایش پیدا کرده و حجم آب بیشتری به سمت پایین دست تخلیه می‌شود.



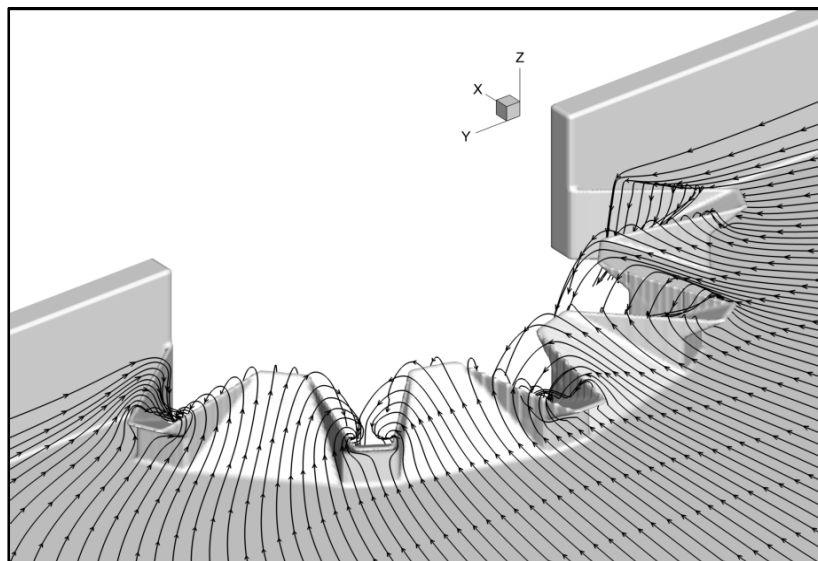
شکل 16 الگوی سه بعدی جریان بر روی سرریزهای APK با زوایای مختلف به ازای نسبت H/P برابر 0/2



الف - TPK-5



ب - APK100-5



ج - APK150-5

شکل 17 مقایسه خطوط جریان تراز میانی بر روی سرریزهای TPK و APK با زوایای 100 و 150 درجه و H/P برابر 0/2

کلیدپیانویی مستطیلی با طول تاج یکسان می‌باشد. سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار تلفیقی از سرریزهای دوزنقه‌ای و سرریزهای انحنادار در پلان بوده و بر اساس مدل‌سازی های صورت گرفته، استفاده از این الگو منجر به بهبود قابل ملاحظه در رفتار هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی می‌شود. برای سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار با زوایای 50، 100 و 150 درجه، ضریب دبی به طور میانگین به میزان 9/14، 20/34 و 29/14 درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با تعداد کلید و همچنین طول تاج یکسان، افزایش یافته است. علت عملکرد مناسب این نوع سرریزها را می‌توان به موارد ذیل نسبت داد:

- 1- حذف حالت کانالیزه جریان در حالت پلان مستقیم و ورود جریان به سرریز انحنادار بصورت عمودی از تمام جهات
 - 2- افزایش سطح کلیدهای ورودی و کاهش سرعت در کلیدها و هدایت جریان به تمامی بخش‌های تاج
 - 3- توزیع یکنواخت‌تر جریان بر روی بخش‌های مختلف سرریز و حذف فشردگی خطوط جریان بر روی تاج کلیدهای ورودی
- علل فوق تأثیر مستقیم بر افزایش ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار در پلان داشته به نحوی که با افزایش زاویه سرریز، بهبود قابل توجهی در میزان آبگذری آن رخ می‌دهد.

7- فهرست علائم

APK	سرریز کلیدپیانویی انحنادار در پلان
A_x	جزء سطح باز در جهت x
B_o	طول کنسول بالادست
B_i	طول کنسول پایین‌دست
C_d	ضریب دبی سرریزهای جریان آزاد
G_x	مؤلفه شتاب کالبدی در جهت x

در سرریز TPK بخش عمده‌ای از جریان‌های نزدیک شونده لایه میانی از روی تاج ورودی تخلیه شده، تنها تعداد محدودی از خطوط جریان به سمت تاج‌های کناری منحرف شده است. این در حالیست که در سرریز APK جریان کاملاً بصورت یکنواخت بر روی تاج ورودی و تاج‌های کناری توزیع شده و بواسطه کاهش فشردگی خطوط جریان می‌توان عملکرد بهتر سرریزهای انحنادار نسبت به سرریزهای دوزنقه‌ای را انتظار داشت. مقایسه سرریزهای 100 و 150 درجه نشان می‌دهد که با افزایش زاویه سرریز، بهبود توزیع جریان بر روی کلیدها و استفاده از ظرفیت تاج‌های کناری در تخلیه جریان‌های عبوری از سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار در پلان شدیدتر می‌شود. این نکته به علت افزایش سطح کلید ورودی و کاهش سرعت جریان در این بخش از سرریز می‌باشد؛ به نحوی که به واسطه کاهش سرعت، جریان فرصت بیشتری دارد تا از تاج‌های کناری تخلیه شود. با توجه به شکل‌های مزبور، خطوط جریان نزدیک شونده به سرریزهای انحنادار در تمام جهات عمود بر سرریز بوده و این نکته نیز می‌تواند دلیلی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای انحنادار باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی سه بعدی جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و انحنادار در پلان مدل‌سازی عددی شد. بر اساس نتایج حاصل، استفاده از کلیدهای دوزنقه‌ای شکل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی دارد. علت این امر، کاهش استغراق موضعی در کلیدهای خروجی، توزیع یکنواخت‌تر جریان بر روی تاج‌های کناری و همچنین بهبود وضعیت سطح آب بر روی سرریز می‌باشد. به طور میانگین ضریب دبی سرریز دوزنقه‌ای به اندازه 23 و 18 درصد بالاتر از سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و

شکل هندسی پشت‌بند بر هیدرودینامیک سرریز کلیدپیانویی، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.

Anderson, R. M., (2011). Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis, Faculty of Hydraulic Structures. Utah State University.

Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2012). "Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics". J. Hydraulic Eng. 138, pp. 358-361.

Hien, T.C., Son, H.T. and Khanh, M.H.T. (2006). "Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam", Proc. of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain.

Kabiri-Samani, A.R. and Javaheri, A., (2012). "Discharge coefficient for free and submerged flow over the piano key weirs", J. Hydraulic Res. 50(1), pp. 114-120.

Laugier, F., (2007). "Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam". Hydropower & Dams, 14 (5), pp. 94-101.

Lempérière, F., and Ouamane, A. (2003). "The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways". Hydropower & Dams, 7 (5), pp. 144-149.

Lempérière, F. and Jun, G., (2005). "Low cost increase of dams storage and flood mitigation: the piano keys weir". Proc. of 19th Congress of ICID, Beijing, China.

Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J., Singhal, G. and Sharma, N. (2012a). "Discharge capacity of Piano Key Weirs". J. Hydraulic Eng. 138, pp. 199-203.

Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J-L. (2012b). "Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs". J. Hydraulic Res. 50(4), pp. 400-408.

Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. (2012). "Parapet wall effect on Piano Key Weirs efficiency". J. Irrig. Drain. Eng. 139(6), pp. 506-511.

Ouamane, A., and Lempérière, F., (2006). "Design of a new economic shape of weir". Proc. Int. Symp. Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain.

Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.-L., Leite Ribeiro, M. and Schleiss, A. (2011). "A

f_x شتاب ناشی از لزجت در جهت x

H هد کل جریان روی سرریز

L طول کل تاج

l_c طول تاج کناری

n نسبت طول تاج به عرض سرریز

PK سرریز کلیدپیانویی مستطیلی

P ارتفاع سرریز

Q کل دبی عبوری از روی سرریز

q دبی در واحد عرض سرریز

R شعاع انحنا تاج سرریز

RL سرریز کنگره‌ای

S_o شیب کلیدهای خروجی

S_i شیب کلیدهای ورودی

T ضخامت بدنه سرریز

TPK سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

V_F جزء حجم باز

W عرض کل

W_o عرض کلید خروجی

W_i عرض کلید ورودی

α زاویه کلید خروجی

β زاویه کلید ورودی

θ زاویه سرریز

μ لزجت سیال

ρ جرم مخصوص سیال

8- منابع

صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (1-1392). "مقایسه هیدرودینامیک سه‌بعدی سرریزهای کلیدپیانویی و کنگره‌ای مستطیلی"، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز.

صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (2-1392). "بررسی عددی تأثیر دیوار جان‌پناه بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب، تهران.

صفرزاده، ا. و نوروزی، ب. (3-1392). "بررسی عددی تأثیر

Roache, P.J. (1994). "Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies". ASME Journal of Fluids Engineering. 116, pp. 405-413.

Schleiss, A. (2011). *Labyrinth and piano key weirs-PKW*. CRC Press, Leiden, pp. 17-24.

naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters", Labyrinth and Piano Key Weirs - PKW 2011, CRC Press/ Balkema.

Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C. (2007). "Rehabilitation of st-marc dam-experimental optimization of a piano key weir". Proc. of 32nd Congress of IAHR., Vince, Italy.