

مدل سازی عددی میدان جریان در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیاپویی

سعیده نصیری¹، عبدالرضا کبیری سامانی^{2*}، کیوان اصغری²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

*akabiri@cc.iut.ac.ir

چکیده - به منظور کنترل جریان گردابه‌ای استفاده از سرریز کلید پیاپویی مدور، یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است. این سرریز به صورت سازه گرداب‌شکن عمل می‌کند و تأثیر چشم‌گیری بر کاهش قدرت جریان گردابی و افزایش ضریب دبی جریان دارد. در تحقیق حاضر به بررسی عددی هیدرولیک جریان در اطراف سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیاپویی پرداخته می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال در دستگاه مختصات استوانه‌ای حل می‌شوند. برای مدل‌سازی میدان جریان اطراف سازه و درون شفت قائم از شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده است. در این تحقیق تأثیر طول، ارتفاع و زاویه قطاع‌های کلید پیاپویی بر هیدرولیک جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سرریز کلید پیاپویی مدور به‌عنوان ورودی شفت‌های قائم یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشم‌گیری بر کاهش قدرت جریان گردابی دارد، ضمن این‌که ضریب دبی جریان را افزایش می‌دهد. سرریز کلید پیاپویی علاوه بر این‌که به صورت ورودی سرریز مدور قائم عمل می‌کند، نقش گرداب‌شکن نیز دارد، به طوری که با کاهش قدرت جریان گردابی و دور کردن گرداب از شفت قائم، باعث توزیع یکنواخت جریان در محدوده‌ی اطراف شفت قائم می‌شود. این امر در تخلیه‌ی یکنواخت جریان از شفت قائم مؤثر است. در انتها بهترین هندسه‌ی ورودی کلید پیاپویی برای دستیابی به بیشترین راندمان در سرریز مدور قائم پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌گان: جریان گردابی، روش حجم محدود، سرریز مدور قائم، مدل‌سازی عددی، ورودی کلید پیاپویی.

1- مقدمه

زاویه‌ای افزایش یافته و سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد. این پدیده عموماً وقتی که جریان با سطح آزاد وارد یک مجرای بسته نظیر لوله‌ی آبگیر و سرریز نیلوفری می‌شود، اتفاق می‌افتد. برای تضعیف یا حذف گرداب بایستی به طریقی قدرت گرداب را با ایجاد موانعی در منطقه‌ی شکل‌گیری آن، محدود کرده و یا جریانی یکنواخت به سمت سرریز به‌وجود آورد. در این راستا استفاده از تیغه‌های گرداب‌شکن باعث افزایش ضریب دبی و بهبود عمل‌کرد سرریز و نیز کاهش نوسانات جریان می‌شود. تحقیقات جامعی پیرامون استفاده از صفحات کاهش

ورودی سرریز مدور قائم غالباً مستعد ایجاد جریان‌های گردابی است. این نوع جریان آثار منفی زیادی بر سازه‌های هیدرولیکی پایین‌دست سرریز می‌گذارد. پدیده‌ی گرداب در مجاری بسته‌ی بزرگ باعث کاهش دبی جریان، ارتعاش، ایجاد موج و جدایی خطوط جریان و نهایتاً کاهش بازدهی توربین‌ها و سیستم‌های پمپاژ می‌شود و در بسیاری از موارد ایمنی سازه را به خطر می‌اندازد (Gulliver et al., 1986). تشکیل گرداب نتیجه‌ی چرخش جریان در محل انقباض آن است. در این شرایط سرعت

هیدرولیکی بهتری نسبت به سرریز نیلوفری معمولی از خود نشان می‌دهد. همچنین این نوع سرریز باعث افزایش ضریب دبی جریان، به‌ویژه در هدهای پایین می‌شود. با استفاده از ورودی کلید پیانویی بر روی سرریز مدور قائم، هد آب مورد نیاز روی سرریز کاهش یافته و به تبع آن ظرفیت ذخیره افزایش می‌یابد.



شکل 1 ورودی کلید پیانویی در سرریز مدور قائم (سد پاپایا در هند) (Barcouda et al., 2006)

در تحقیقات آزمایشگاهی پیرامون سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی توسط شمشی تأثیر برخی ابعاد و زوایای ورودی کلید پیانویی بر پدیده‌ی گرداب در سرریز مدور قائم مورد مطالعه قرار گرفته است (شمشی، 1391). بر طبق نتایج وی، راندمان ورودی کلید پیانویی در دبی‌های بالا بیشتر است. با افزایش دبی، قدرت جریان گردابی و چرخش جریان نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه نقش کلید پیانویی به‌عنوان گرداب‌شکن پررنگ‌تر می‌شود. بر اساس نتایج شمشی نصب ورودی کلید پیانویی بر روی سرریز مدور قائم باعث کاهش ارتفاع سطح آب تا حدود 80 درصد نسبت به سرریز مدور قائم بدون ورودی می‌شود (شمشی، 1391).

به دلیل مزیت‌های بارز این سرریز و همچنین عدم وجود مطالعات جامع در ارتباط با اجزای هندسی این سرریز و هیدرولیک جریان عبوری از آن، لزوم مطالعه و تحقیق روی این سرریز احساس می‌شود. بنابراین با توجه به ویژگی‌های سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی و عدم وجود مطالعات درخور در این زمینه و همچنین مشکلات و محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی

گرداب توسط محققان مختلف انجام شده است (الستی، 1385؛ کبیری سامانی، 1379؛ Khatsuria, 2005؛ Borghei and Kabiri-Samani, 2010؛ Borghei and Wang et al. 2010؛ Kabiri-Samani, 2013؛ Aghamajidi, 2013). خصوصیات هیدرودینامیکی جریان گرداب سطحی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان به بررسی سرعت‌های مماسی در جریان گردابی و مقایسه با روابط ارائه شده در این زمینه پرداختند و با توجه به روابط موجود رابطه‌ای جدید با دقت بالا برای تخمین ابعاد هسته‌ی هوای گردابی ارائه دادند.

یکی دیگر از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم، استفاده از ورودی از نوع سرریز کلید پیانویی است. این نوع ورودی علاوه بر تضعیف جریان گردابی، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز مدور شده و در عین حال هد آب بر روی سرریز مدور قائم را نیز کاهش می‌دهد. سرریز کلید پیانویی به‌عنوان یکی از سرریزهای تاج طولانی در سازه‌های هیدرولیکی باعث افزایش بازدهی و افزایش دبی عبوری می‌گردد. مطالعات اولیه بر روی این سرریز نشان داده است که این سرریز، دبی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، ساختاری به نسبت ساده دارد و سازه‌ای اقتصادی است (Lempérière and Ouamane, 2003).

اولین مدل از سرریز کلید پیانویی در سد گلورز فرانسه و مدل‌های بعدی در سدهای ست‌مارک و گلوریتز ساخته شدند (Laugier, 2007؛ Bieri et al., 2009). آزمایش‌های مدل اولیه سرریز کلید پیانویی مستقیم در سال 1999 در آزمایشگاه LNHE فرانسه و در سال 2002 در دانشگاه‌های Roorke هند و Biskra در الجزایر انجام شده است (Lewellen, 1962). کبیری سامانی و جواهری به مطالعات گسترده‌ی آزمایشگاهی جریان در دو حالت آزاد و مستغرق بر روی انواع سرریز کلید پیانویی در کانال‌ها پرداختند (Kabiri-Samani and Javaheri, 2011). استفاده از سرریز کلید پیانویی بر ورودی سرریز مدور قائم تحت عنوان سرریز پاپایا¹ برای اولین بار در آزمایشگاه هیدرولیک LNHE مورد بررسی قرار گرفت (شکل 1) (Barcouda et al., 2006). سرریز پاپایا برای قطرهای کمتر کارایی

1. Papaya

z ، θ و r ، ρ جرم مخصوص سیال، ν لزجت سینماتیکی سیال و p فشار پیزومتریک است. نرم‌افزار فلوئنت به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است. این نرم‌افزار استفاده از حافظه‌ی دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات و کنترل انعطاف‌پذیر محاسبات را ممکن می‌سازد. مدل‌سازی بر پایه روش حجم محدود انجام شده است. ابتدا توسط نرم‌افزار گمبیت، هندسه مدل و میدان جریان طراحی و شبکه‌بندی انجام شد. برای ایجاد شبکه در گمبیت ابتدا اضلاع تقسیم‌بندی شده، سپس سطوح و در نهایت حجم‌های موجود در هندسه شبکه‌بندی شدند. مدل شامل مخزنی استوانه‌ای با قطر 2 و ارتفاع 1 متر است که درون آن یک شفت قائم به‌عنوان سرریز مدور و به‌منظور تخلیه جریان پیش‌بینی شده است. دیگر مشخصات هندسی مدل مطابق شکل 2 عبارتند از: P ارتفاع سرریز کلید پیانویی، L طول سرریز کلید پیانویی، α و β زاویای قطاع‌های ورودی و خروجی کلید پیانویی و D قطر شفت. در این شبیه‌سازی تأثیر ابعاد و زاویای ورودی کلید پیانویی بر پدیده‌ی گرداب در سرریز مدور قائم مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرها و مشخصات هندسی شفت و سرریز کلید پیانویی مورد بررسی در تحقیق حاضر در جدول 1 ارائه شده است. ورود جریان به صورت مماسی از دیواره مخزن از طریق یک مقطع عمودی انجام می‌شد. شکل‌های 3- الف و ب هندسه مدل با ورودی کلید پیانویی را نشان می‌دهد. پره‌های محدب و مقعر در واقع قسمت‌هایی از یک پوسته مخروطی ناقص هستند که در بین آنها صفحات قائم قرار گرفته و همگی به یک پوسته‌ی استوانه‌ای متصل می‌شوند. در هندسه‌ی مدل شبیه‌سازی شده تمامی صفحات و پره‌ها با ضخامت 1 میلی‌متر در نظر گرفته شدند (شکل 3- ب). المان‌های قسمت‌های نزدیک به شفت خروجی ریزتر و از المان‌های مثلی انتخاب شدند (شکل 4). به دلیل شکل نامنظم سرریز کلید پیانویی، در نواحی مربوط به پره‌ها و حجم-های اطراف آنها از المان‌بندی TGrid و در بقیه‌ی نواحی از المان‌بندی Hex استفاده شد. پارامتر مهمی که در کیفیت شبکه باید مورد ارزیابی قرار گیرد، تیزی¹ است که در تمام مدل‌ها کم‌تر از یک بوده است.

تأثیر ورودی کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم ضروری به‌نظر می‌رسد. بر این اساس تحقیق حاضر با هدف دست‌یابی به مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیانویی برای محدوده‌ی گسترده‌تری از پارامترهای بی‌بعد نسبت به نتایج آزمایشگاهی موجود، انجام شده است.

2- مدل‌سازی عددی و پارامترهای مورد بررسی

میدان جریان بر روی سرریز به کمک نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی و با محاسبه پروفیل‌های سطح آب و نمودارهای توزیع فشار و سرعت، تحلیل شده است. معادلات حاکم بر جریان آشفته سیال در شکل دیفرانسیلی در دستگاه مختصات استوانه‌ای عبارتند از (Wang et al., 2010):

$$\frac{\partial \bar{v}_r}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}_\theta^2}{r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} - \frac{\bar{v}_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{v}_r'^2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_r' \bar{v}_\theta'}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}_\theta'^2}{r} + \frac{\bar{v}_r'^2}{r} + \frac{\partial \bar{v}_r' \bar{v}_z'}{\partial z} \right) \quad (1)$$

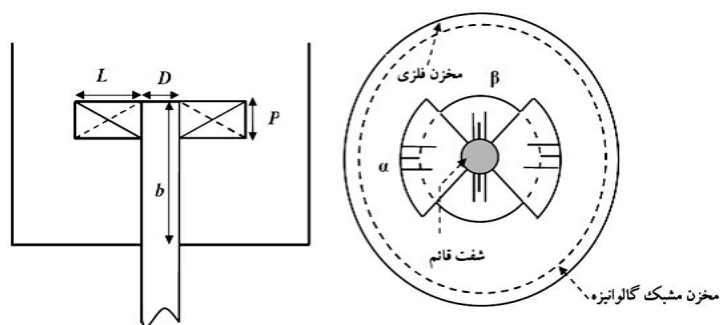
$$\frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}_\theta \bar{v}_r}{r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial r} - \frac{\bar{v}_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta'^2}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{v}_\theta' \bar{v}_r'}{\partial r} + \frac{2 \bar{v}_\theta' \bar{v}_r'}{r} + \frac{\partial \bar{v}_\theta' \bar{v}_z'}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \theta} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{v}_z'^2}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}_z' \bar{v}_r'}{\partial r} + \frac{\bar{v}_z' \bar{v}_r'}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_z' \bar{v}_\theta'}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

$$\frac{(\bar{v}_r + \bar{v}_r')}{r} + \frac{\partial (\bar{v}_r + \bar{v}_r')}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\bar{v}_\theta + \bar{v}_\theta')}{\partial \theta} + \frac{\partial (\bar{v}_z + \bar{v}_z')}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

در روابط (1) تا (4)، $\bar{v}_r, \bar{v}_\theta, \bar{v}_z$ به ترتیب مؤلفه‌های سرعت متوسط زمانی در جهات r, θ, z هستند. همچنین $\bar{v}_r', \bar{v}_\theta', \bar{v}_z'$ به ترتیب مؤلفه‌های نوسانی سرعت در جهات

1. Skewness

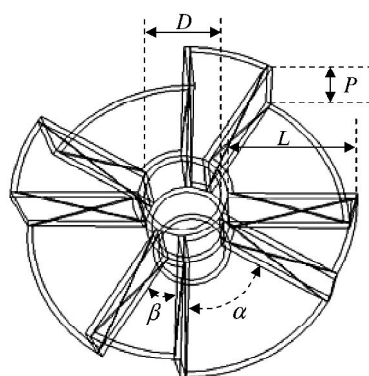


الف- پلان مخزن به همراه شفت و ورودی کلید پیانویی ب- برش قائم شفت با ورودی کلید پیانویی

شکل 2 مشخصات هندسی مدل

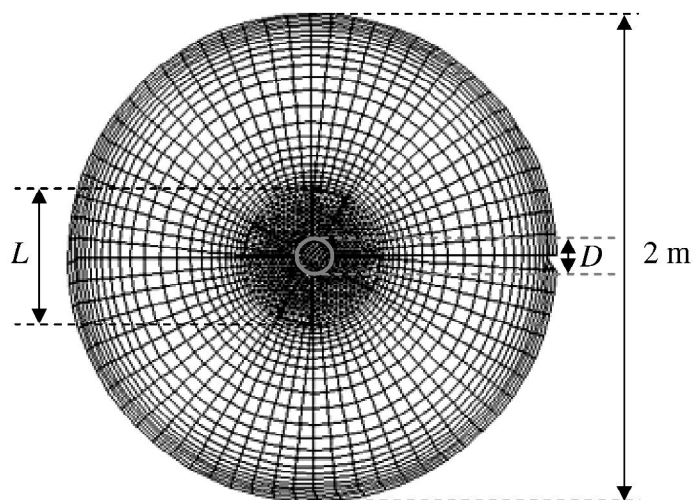
جدول 1 مشخصات هندسی شفت و سرریز کلید پیانویی

β (°)	α (°)	L (cm)	P (cm)	b (cm)	D (cm)
45 و 40, 30	60 و 55, 50	25 و 22, 20, 15	25 و 20, 15	30	12/5



الف- مدل آزمایشگاهی ورودی کلید پیانویی ب- هندسه مدل شبیه‌سازی شده سرریز کلید پیانویی

شکل 3 هندسه مدل با ورودی کلید پیانویی



شکل 4 شبکه‌بندی مدل با ورودی کلید پیانویی

قائم با ورودی کلید پیاپویی با $L/D=1/6$ و نتایج مربوط به شفت قائم ساده پرداخته شده است.

جدول 2 مشخصات هندسی کلیه مدل‌های شبیه‌سازی شده مربوط به تأثیر کلید پیاپویی (زوایا به درجه هستند)

متغیرها	ثابت‌ها
$L/D=1/2, 1/6, 1/8, 2$	$\beta=30, \alpha=60$ $P/D=1/2$
$P/D=1/2, 1/8, 2$	$\beta=30, \alpha=60$ $L/D=1/6$
$\beta=40, \alpha=50$ و $\beta=30, \alpha=60$ و $\beta=45, \alpha=55$	$L/D=1/6$ $P/D=1/2$
$\beta=40, \alpha=50$ و $\beta=30, \alpha=60$ و $\beta=45, \alpha=55$	$L/D=1/6$ $P/D=1/2$
$\beta=40, \alpha=50$ و $\beta=30, \alpha=60$ و $\beta=45, \alpha=55$	$L/D=1/6$ $P/D=1/2$

بر اساس اطلاعات ارائه شده در این شکل، تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به سرریز با ورودی کلید پیاپویی برقرار است. ضمناً در سرریز ساده بدون ورودی کلید پیاپویی، نرخ افزایش دبی با افزایش هد اندک است. حال آن‌که در سرریز مدور مجهز به ورودی کلید پیاپویی اندک تغییر در هد ورودی، سبب افزایش قابل ملاحظه دبی جریان می‌شود. این ویژگی مزیت مهم سرریزهای مدور با ورودی کلید پیاپویی است که منجر به افزایش ظرفیت آبگذری سیستم در هد مشخص می‌شود.

یکی از پدیده‌های نامطلوب در سیستم‌های هیدرولیکی بروز فشار منفی در برخی نواحی و به تبع آن شکل‌گیری پدیده خلأزایی یا کاویتاسیون است. در صورت وقوع کاویتاسیون، فشار در سیال به سطحی پایین‌تر از فشار اتمسفر کاهش می‌یابد و همین عامل باعث ایجاد حباب‌های هوا در سیال می‌شود. این پدیده مشکلات زیادی نظیر: ایجاد سر و صدا، وارد کردن صدمه به اجزای هیدرولیکی، ایجاد ارتعاش و افت کارایی سیستم هیدرولیکی را به همراه دارد. برای مقایسه و بررسی میزان تأثیر ورودی کلید پیاپویی بر مشخصات هیدرولیکی جریان در شفت قائم، در ابتدا مدلی سه بعدی از شفت ساده بدون ورودی کلید پیاپویی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 6 به مقایسه‌ی نتایج فشار درون شفت قائم در دو حالت شفت ساده بدون ورودی کلید پیاپویی و شفت قائم مجهز

شرایط مرزی ورودی جریان؛ سرعت در ورودی، فشار در خروجی جریان، مرز بالایی سطح آزاد با فشار صفر و کلیه-ی دیواره‌ها و سرریز کلید پیاپویی "دیوار" تعریف شدند.

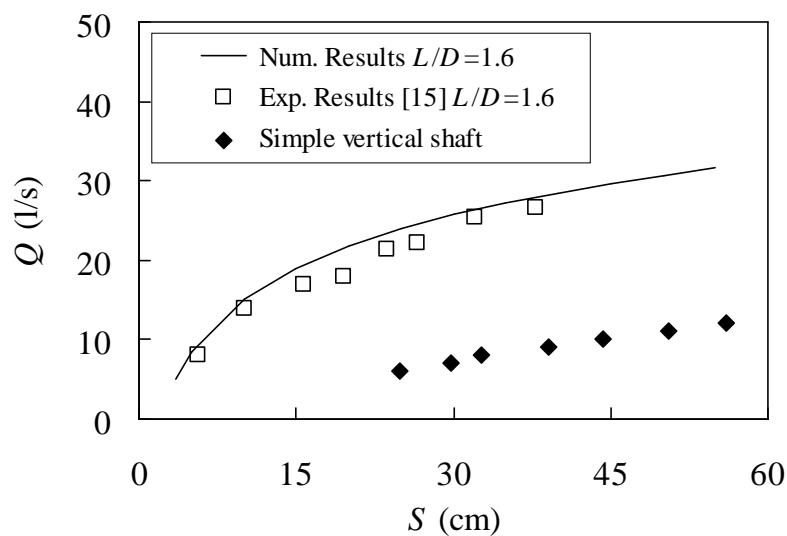
دو الگوریتم معمول و رایج در روش حل عددی حجم محدود، الگوریتم $PISO^1$ و $SIMPLE^2$ هستند که به منظور حل معادلات غیرخطی ناویراستوکس مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت الگوریتم $PISO$ در مقایسه با الگوریتم $SIMPLE$ سرعت همگرایی بالای آن است و می‌توان در آن از گام‌های زمانی بزرگ‌تری استفاده کرد و به همین دلیل حجم محاسبات کم‌تر می‌شود. الگوریتم به کار برده شده در این تحقیق، الگوریتم $PISO$ است. برای رسیدن به یک دقت معمول و پایداری عددی در هنگام اجرای برنامه به عدد کورانت کم‌تر از یک نیاز است. نرم‌افزار با توجه به تغییرات شبکه در سرتاسر روند حل مقدار گام زمانی Δt را متناسب با اندازه‌ی شبکه‌ها تغییر می‌دهد. در این تحقیق حدس اولیه $\Delta t = 0/001(s)$ در نظر گرفته شده است. برای بررسی همگرایی حل باید باقی‌مانده‌ها به یک اندازه مشخص کاهش یابند و با زمان افزایشی نباشند و حل با وجود تکرارهای بیش‌تر تغییر نکند. در این تحقیق باقی‌مانده‌های k و ϵ و سرعت ترسیم شده و با گذشت زمان طولانی، بین 500 تا 600 ثانیه، مقادیر آنها ثابت ماند. از دیگر مواردی که برای کنترل همگرایی مورد توجه قرار گرفت، ثابت ماندن دبی ورودی و خروجی بعد از گذشت زمان مشخصی بوده است. مدل‌های شبیه‌سازی شده، برای بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف سرریز کلید پیاپویی در جدول 2 آورده شده‌اند. در این بررسی، پارامترهای طول، ارتفاع و زاویه‌ی کلید پیاپویی، اثر شفت قائم و زانویی تخلیه‌کننده تحتانی و نیز تغییر شکل قطاع‌ها برای بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مد نظر قرار گرفته‌اند.

3- تجزیه و تحلیل نتایج

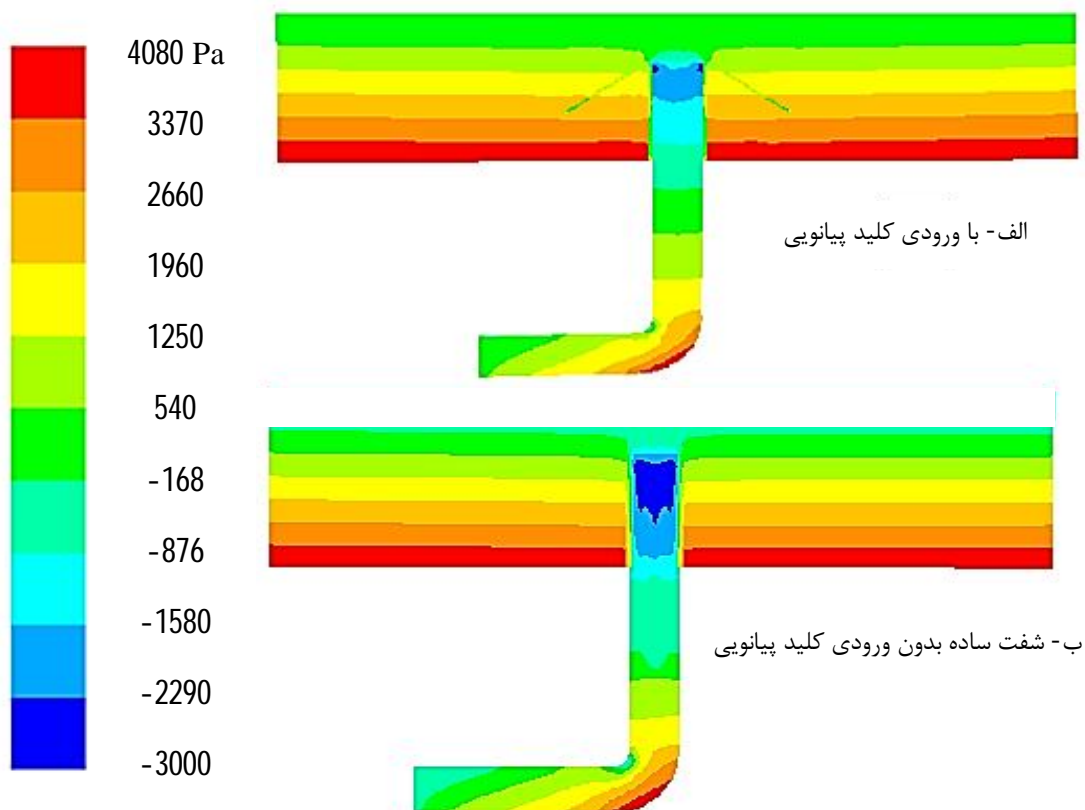
در شکل 5 به مقایسه منحنی‌های دبی-اشل ($Q-S$) مربوط به مدل عددی تحقیق حاضر به‌ازای $L/D=1/6$ با نتایج آزمایشگاهی شمشی (1391) مربوط به سرریز مدور

1. Pressure implicit with splitting of operator
2. Semi-implicit method for pressure linked equations

به ورودی کلید پیانویی پرداخته شده است. همان طور که مشخص است، ورودی کلید پیانویی به میزان زیادی از توسعه‌ی فشار منفی در داخل شفت قائم جلوگیری می‌کند.



شکل 5 به مقایسه منحنی‌های دبی-اشل مربوط به مدل عددی تحقیق حاضر، نتایج آزمایشگاهی شمش (1391) و شفت قائم ساده

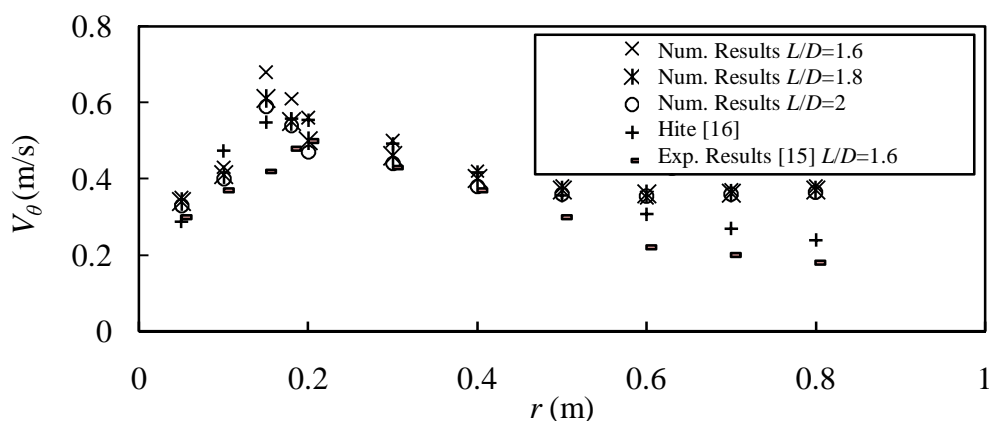


شکل 6 مقایسه‌ی منحنی‌های هم‌تراز فشار درون شفت قائم

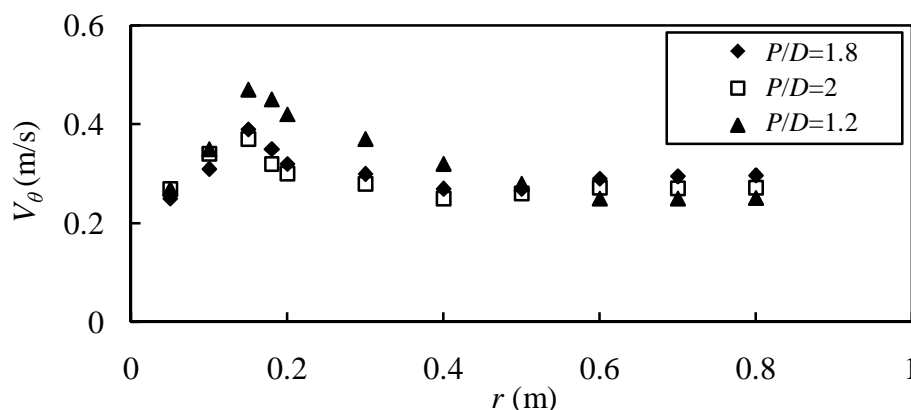
شکل 7 با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین سه دسته نتایج وجود دارد. شکل 7 همچنین پروفیل‌های سرعت مماسی را برای سه طول مختلف نشان می‌دهد. در مدل‌های بررسی شده نسبت P/D ثابت و برابر $1/2$ و زاویه‌ی کلید پیانویی $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر سرعت مماسی با افزایش نسبت L/D از $1/6$ به 2 کاهش می‌یابد و بیش‌ترین مقدار سرعت در محدوده‌ی $0/15$ تا $0/2$ متر از مرکز شفت اتفاق می‌افتد و با دور شدن از مرکز شفت به سمت دیواره‌ها مقدار سرعت مماسی کاهش می‌یابد.

با بررسی اثر ارتفاع کلید پیانویی بر پروفیل‌های سرعت مماسی مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع کلید پیانویی مقادیر سرعت مماسی به ویژه در اطراف سرریز کاهش می‌یابد (شکل 8).

میدان جریان گردابی شامل سه مؤلفه‌ی سرعت مماسی، شعاعی و قائم است. نمودار تغییرات سرعت مماسی از مرکز شفت تا دیواره حاصل از مدل‌سازی عددی مربوط به شفت مجهز به ورودی کلید پیانویی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی شمش (1391) در شکل 7 ارائه شده است. در جریانی با گرداب آزاد و اجباری، تغییرات سرعت تا منطقه‌ی گرداب اجباری افزایشی و در ناحیه‌ی گرداب آزاد کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در نتایج آزمایشگاهی شمش (1391) مربوط به سرریز مدور با ورودی کلید پیانویی، از بین مدل‌های بررسی شده، مدل کلید پیانویی با مشخصات $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ ، $P/D=1/2$ ، $L/D=1/6$ به عنوان حالت بهینه معرفی شده است، برای صحت‌سنجی، این مدل انتخاب گردید. مقادیر سرعت مماسی به دست آمده از نتایج حل عددی و آزمایشگاهی و همچنین مقادیر سرعت‌های مماسی به دست آمده از رابطه Hite (1991) در



شکل 7 مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت مماسی برای طول‌های مختلف سرریز کلید پیانویی

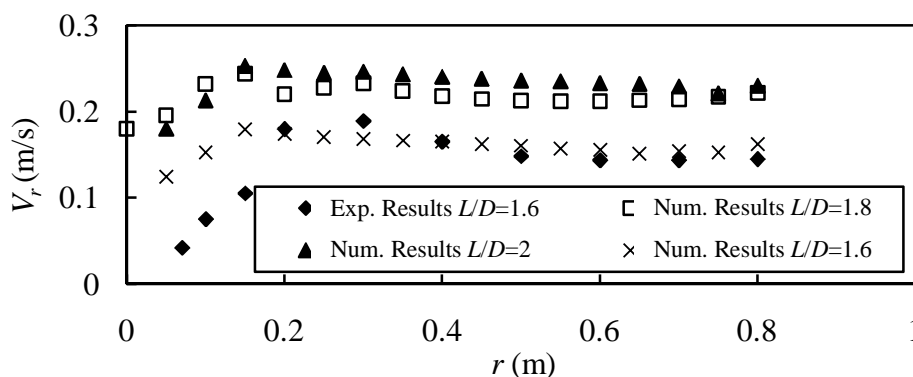


شکل 8 مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت مماسی برای ارتفاع‌های مختلف از سرریز کلید پیانویی

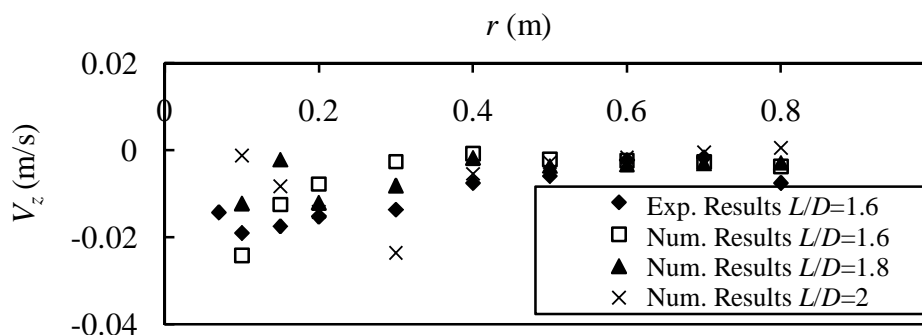
به دلیل وجود جریان گردابی این آشفتگی‌ها به ویژه در اطراف شفت افزایش یافته و موجب تغییرات سرعت در راستای قائم می‌گردند.

پروفیل‌های فشار نیز نشان می‌دهند که به دلیل تغییرات سطح آب، مقادیر فشار از سمت دیواره به طرف مرکز شفت روند کاهشی دارند. از طرفی مقدار فشار در مرکز مخزن در این ارتفاع به دلیل وجود هسته‌ی هوا صفر است. در این بررسی $\alpha=50$ ، $\beta=40$ درجه و نسبت‌های $L/D=1/6$ ، $P/D=1/2$ در نظر گرفته شده است. همچنین جریان در حالت روزنه‌ای بوده و هسته‌ی هوا در مرکز تشکیل شده است. فشار منفی در داخل شفت باعث ایجاد مکش و در نتیجه افزایش دبی عبوری می‌شود. در جریان روزنه‌ای با کاهش فشار در اطراف محور دوران، سطح آب پایین می‌افتد و هسته‌ی هوا در عمق پایین‌تری شکل می‌گیرد. بر اساس نتایج به دست آمده، گستردگی فشار منفی در ورودی و داخل شفت در سرریز ساده نسبت به سرریز کلید پیانویی توسعه‌ی بیشتری دارد.

بیش‌ترین مقدار سرعت مماسی در فاصله‌ی 0/15 متر از مرکز شفت اتفاق می‌افتد. برای سه ارتفاع بررسی شده، زاویه‌ی کلید پیانویی ثابت و برابر $\beta=30^\circ$ ، $\alpha=60^\circ$ بوده است. پروفیل‌های سرعت شعاعی برای سه سرریز در شکل 9 نمایش داده شده است. برای سه مدل بررسی شده مقدار P/D ثابت و برابر 1/2 و مقدار زاویه‌ی کلید پیانویی نیز ثابت و برابر $\beta=30^\circ$ و $\alpha=60^\circ$ بوده است. از نمودارها مشخص است که با افزایش فاصله از شفت ($r \geq 30\text{cm}$) مقدار سرعت شعاعی کاهش می‌یابد. با دور شدن از محور شفت، شدت جریان ریزشی مستقیم به داخل شفت کمتر شده و جریان به سمت حرکت دورانی متمایل می‌شود. همچنین مقادیر سرعت شعاعی با افزایش نسبت L/D افزایش یافته است. در شکل 10 پروفیل‌های سرعت قائم به تصویر کشیده شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل نوسانات سطح آب، مقادیر سرعت قائم دائماً تغییر علامت می‌دهند، به طوری که سطح آب به خصوص در محدوده‌ی نزدیک به شفت به صورت متناوب در حال بالا و پایین رفتن بوده و دارای سطح کاملاً یکنواخت نیست. همچنین



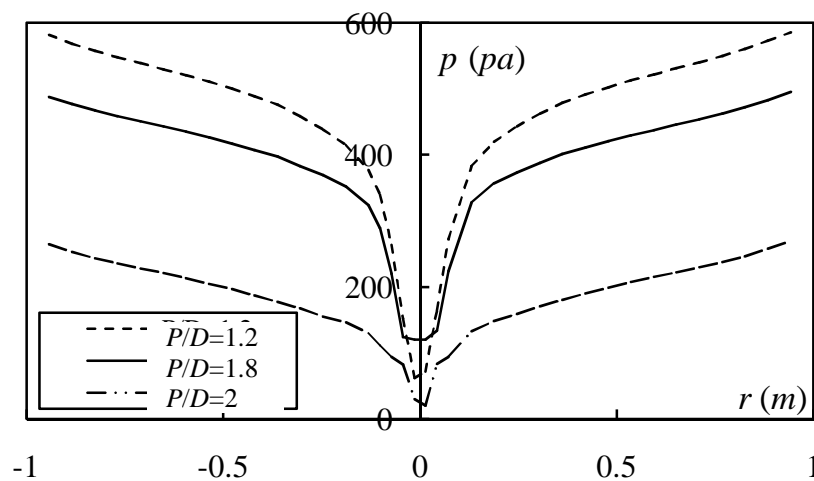
شکل 9 مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت شعاعی برای طول‌های مختلف از سرریز کلید پیانویی



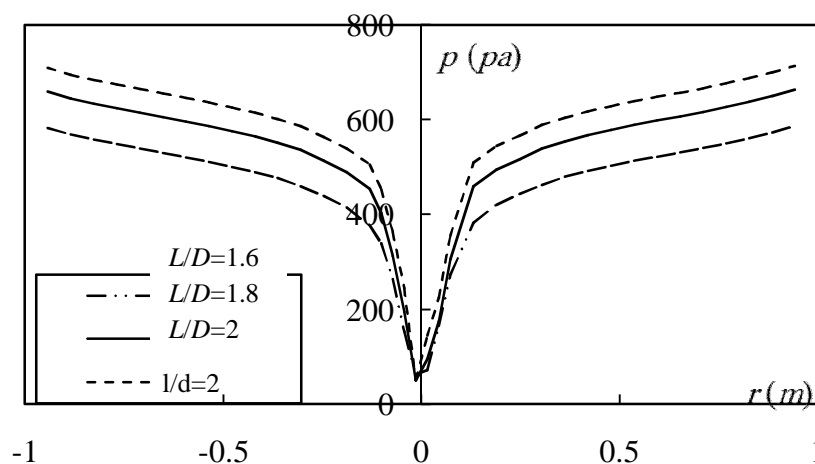
شکل 10 مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت قائم برای طول‌های مختلف از سرریز کلید پیانویی

12 ارائه شده است. برای هر سه مدل نسبت P/D ثابت و برابر $1/2$ و زوایای قطاع‌های کلید پیانویی $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ بوده است. از مقایسه‌ی پروفیل‌های فشار در مجاورت ورودی کلید پیانویی مشخص است که سرریز با نسبت $L/D=1/8$ کم‌ترین مقدار فشار را داراست. به طور کلی از مقایسه‌ی مقدار فشار برای سه طول مختلف کلید پیانویی مشاهده می‌شود که مقدار فشار برای نسبت $L/D=1/6$ نسبت به دو مدل دیگر کم‌تر است. برای هر سه مدل در نزدیکی مرکز مخزن که هسته‌ی هوا شکل گرفته است، مقادیر فشار کم‌ترین مقدار و در نزدیکی دیواره‌ی مخزن بیش‌ترین مقدار را دارند که این به دلیل اختلاف ارتفاع آب ناشی از ایجاد جریان روزنه‌ای در مرکز مخزن است.

بنابراین سرریز کلید پیانویی از توسعه‌ی فشار منفی در داخل شفت قائم جلوگیری می‌کند. شکل‌های 11 و 12 تغییرات فشار برای سه مدل مختلف در ارتفاع 35 سانتی‌متری از کف مخزن را نشان می‌دهند. برای هر سه مدل نسبت L/D ثابت و برابر $1/6$ و زاویه‌ی کلید پیانویی $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ است. در این نمودارها فشار از مرکز شفت به سمت دیواره‌ی مخزن کاهش می‌یابد. این امر ناشی از تشکیل هسته‌ی هوا و ایجاد جریان روزنه‌ای است که سبب کاهش سطح آب در نواحی مرکزی مخزن می‌شود. کم‌ترین مقدار فشار مربوط به نسبت $P/D=2$ است که در این مدل سطح آب در مقایسه با دو مدل دیگر پایین‌تر است. نمودار مربوط به مقایسه‌ی پروفیل‌های فشار برای سه مدل مختلف در ارتفاع 35 سانتی‌متری از کف مخزن در شکل



شکل 11 مقایسه‌ی پروفیل‌های فشار برای سه مدل مختلف (P/D) در ارتفاع 35 متری از کف مخزن



شکل 12 مقایسه‌ی پروفیل‌های فشار برای سه مدل مختلف (L/D) در ارتفاع 35 سانتی‌متری از کف مخزن

افزایش نسبت P/D از $0/8$ تا $1/2$ باعث افزایش ضریب دبی جریان می‌شود. این مسأله در مدل‌سازی عددی حاضر نیز مورد تأیید قرار گرفت. اما برای بررسی بیشتر ارتباط افزایش ارتفاع ورودی کلید پیانویی و افزایش ضریب دبی جریان نسبت‌های بزرگتر از $1/2$ نیز در مدل‌سازی عددی منظور گردیدند. در این بررسی مقادیر متغیر $1/2$ ، $1/8$ و $P/D=2$ با نسبت ثابت $L/D=1/6$ در نظر گرفته شد و خصوصیات جریان از جمله دبی و ضریب دبی برای این مدل‌ها با هم مقایسه شدند. شکل 13- ج اثر افزایش ارتفاع کلید پیانویی را بر دبی عبوری از سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع، برای P/D بزرگتر از $1/2$ ضریب دبی جریان با آهنگ سریعی کاهش می‌یابد. بنابراین در مجموع می‌توان چنین اظهارنظر کرد که $P/D=1/2$ یک حد بهینه برای افزایش ارتفاع ورودی کلید پیانویی مدور است و افزایش بیشتر ارتفاع ضمن ایجاد جریانی کاملاً غیریکنواخت باعث افزایش افت انرژی جریان و کاهش ضریب دبی سرریز می‌شود. متذکر می‌شود که افزایش ارتفاع ورودی کلید پیانویی در افزایش ضریب دبی در شرایط آستانه‌ای استغراق روزنه‌ای اثر چشم‌گیری ندارد. در واقع افزایش ارتفاع کلید پیانویی سبب می‌شود، آستانه‌ی روزنه‌ای شدن جریان سریع‌تر اتفاق بیفتد. در آستانه‌ی تشکیل جریان روزنه‌ای، در ابتدا فرورفتگی در سطح آب شکل می‌گیرد. سپس جریان چرخشی همراه با هسته‌ی هوا در مرکز ایجاد می‌شود و این هسته‌ی هوا در ارتفاع توسعه یافته و قدرت مکش جریان افزایش می‌یابد. در ادامه ارتباط بین عدد بی‌بعد چرخش $N\Gamma$ با نسبت r/r_m بررسی شده است. r فاصله از مرکز شفت و r_m شعاع مربوط به بیش‌ترین مقدار سرعت مماسی هستند. با توجه به رابطه‌ی $N\Gamma=DF/Q$ ، عدد چرخش، به مقدار دبی و قطر شفت و چرخش جریان وابسته است. Γ قدرت چرخش می‌باشد.

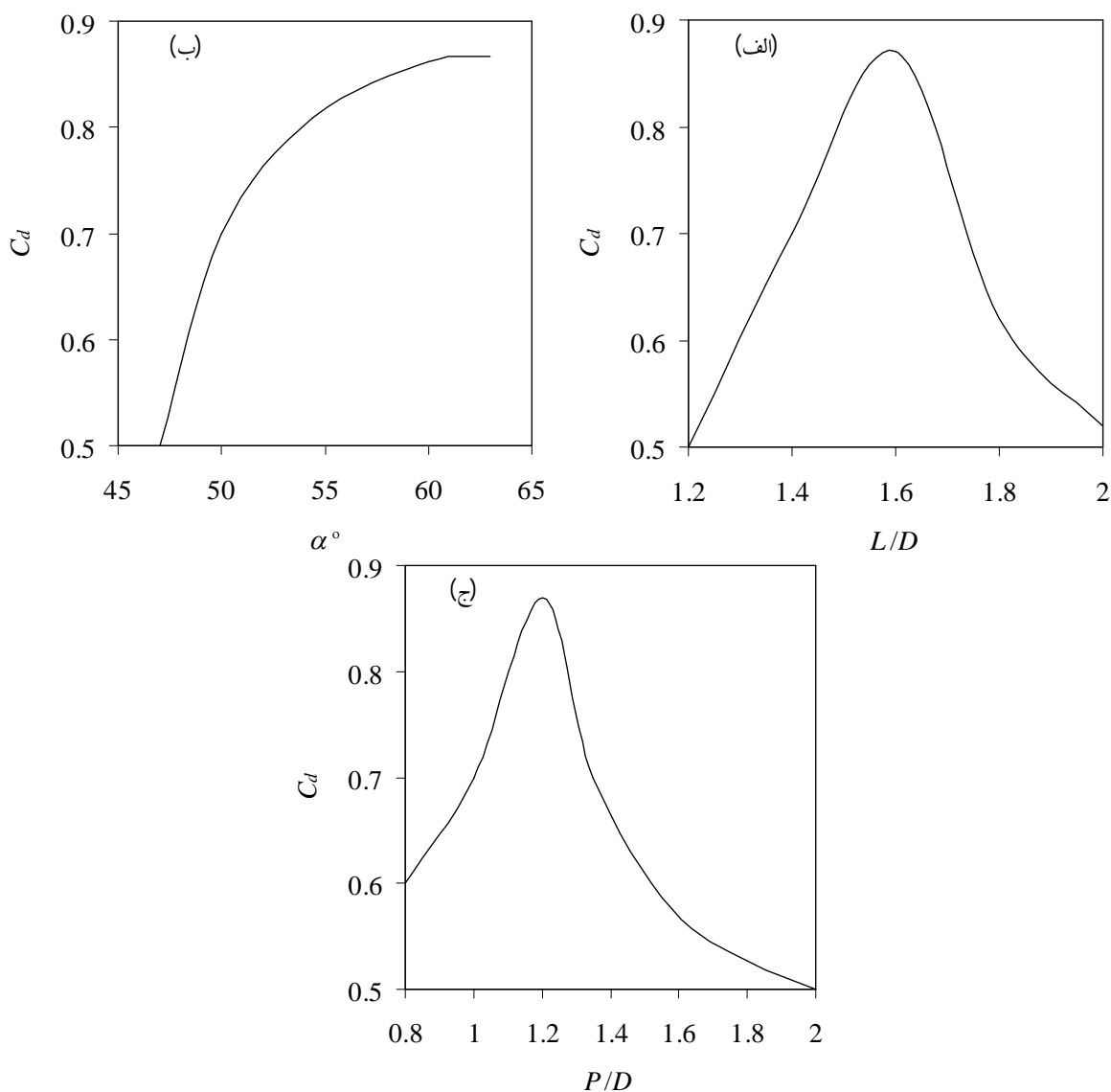
در شکل 14- الف عدد چرخش برای زوایای مختلف کلید پیانویی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار عدد چرخش مربوط به زاویه‌ی 60° درجه است. مقدار عدد چرخش با دبی نسبت عکس دارد و بر اساس رابطه $\Gamma=2\pi rV_\theta$ با مقدار V_θ رابطه مستقیم دارد. از آنجا که در محاسبه‌ی عدد چرخش، حاصل ضرب سرعت

اختلاف در توزیع سرعت بین دو ناحیه‌ی گرداب آزاد و اجباری باعث ایجاد تنش‌های برشی در مرز بین دو ناحیه می‌شود. این امر باعث اعمال نیروی گریز از مرکز بر ذرات سطح سیال شده و منجر به دور شدن ذرات از محور دوران و نهایتاً تشکیل هسته‌ی هوا در محور جریان چرخشی می‌گردد. با کاهش فشار در اطراف محور دوران سطح آب پایین می‌افتد و هسته‌ی هوا عمیق‌تر می‌شود.

بررسی ضریب دبی جریان C_d در حالت جریان روزنه‌ای بر اساس رابطه‌ی $Q=C_d\pi R^2(2gS)^{0.5}$ ، (که Q دبی جریان، C_d ضریب دبی جریان، R شعاع شفت قائم و S هد آب روی ورودی است) از دیگر مسائلی است که در تحقیق حاضر مدنظر قرار گرفت. افزایش طول ورودی کلید پیانویی تأثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب دبی جریان در حالت رژیم روزنه‌ای دارد. به این صورت که با افزایش نسبت L/D تا $1/6$ ، ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر نسبت L/D تغییرات ضریب دبی جریان روند نزولی به خود می‌گیرد. در این شرایط ضریب دبی از حداقل مقدار $0/5$ تا حداکثر مقدار حدود $0/9$ تغییر می‌کند و بیشینه مقدار ضریب دبی مربوط به $L/D=1/6$ است (شکل 13- الف). نتایج آزمایشگاهی نیز تأیید می‌کنند که در بین مدل‌های موجود $L/D=1/6$ منجر به بهینه‌شدن ضریب دبی در جریان روزنه‌ای می‌شود. با توجه به محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی نسبت‌های بالاتر از $1/6$ برای L/D توسط شمسی (1391) مورد بررسی قرار نگرفته است که این موضوع در مدل‌سازی عددی حاضر مدنظر قرار گرفت. دلیل کاهش مقدار ضریب دبی با افزایش نسبت L/D به مقادیری فراتر از $1/6$ آن است که افزایش طول بیش از این مقدار، یکنواختی جریان اطراف سرریز را بر هم می‌زند و افت انرژی را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب دبی و ضریب دبی جریان کاهش می‌یابند. زوایای بررسی شده در مدل‌سازی عددی حاضر $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ و $\alpha=50^\circ$ ، $\beta=40^\circ$ و $\alpha=55^\circ$ ، $\beta=35^\circ$ بوده است. با تغییر مقادیر زوایا، نسبت‌های ثابت $L/D=1/6$ و $P/D=1/2$ مدنظر قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ورودی کلید پیانویی با زوایای 60° و 30° درجه جریان یکنواخت‌تری را نسبت به دو ورودی دیگر در پی دارد و سبب افزایش دبی و ضریب دبی جریان می‌شود (شکل 13- ب). بر طبق نتایج آزمایشگاهی

افزایش شعاع، عدد چرخش افزایش می‌یابد. در شکل 14- ج تغییرات عدد چرخش برای سه ارتفاع مختلف از سرریز کلید پیانویی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تا مقدار $r/r_m=3$ مقدار عدد چرخش برای سه ارتفاع مورد بررسی اختلاف چندانی ندارد و تنها در $P/D=1/2$ اندکی نسبت به دو مدل دیگر بیشتر است. برای شعاع‌های بیشتر عدد چرخش مربوط به نسبت $P/D=1/2$ از دو مدل دیگر کمتر است که این مربوط به تغییرات سرعت مماسی از مرکز شفت تا دیواره مخزن برای سه مدل و همین‌طور مقدار دبی عبوری است.

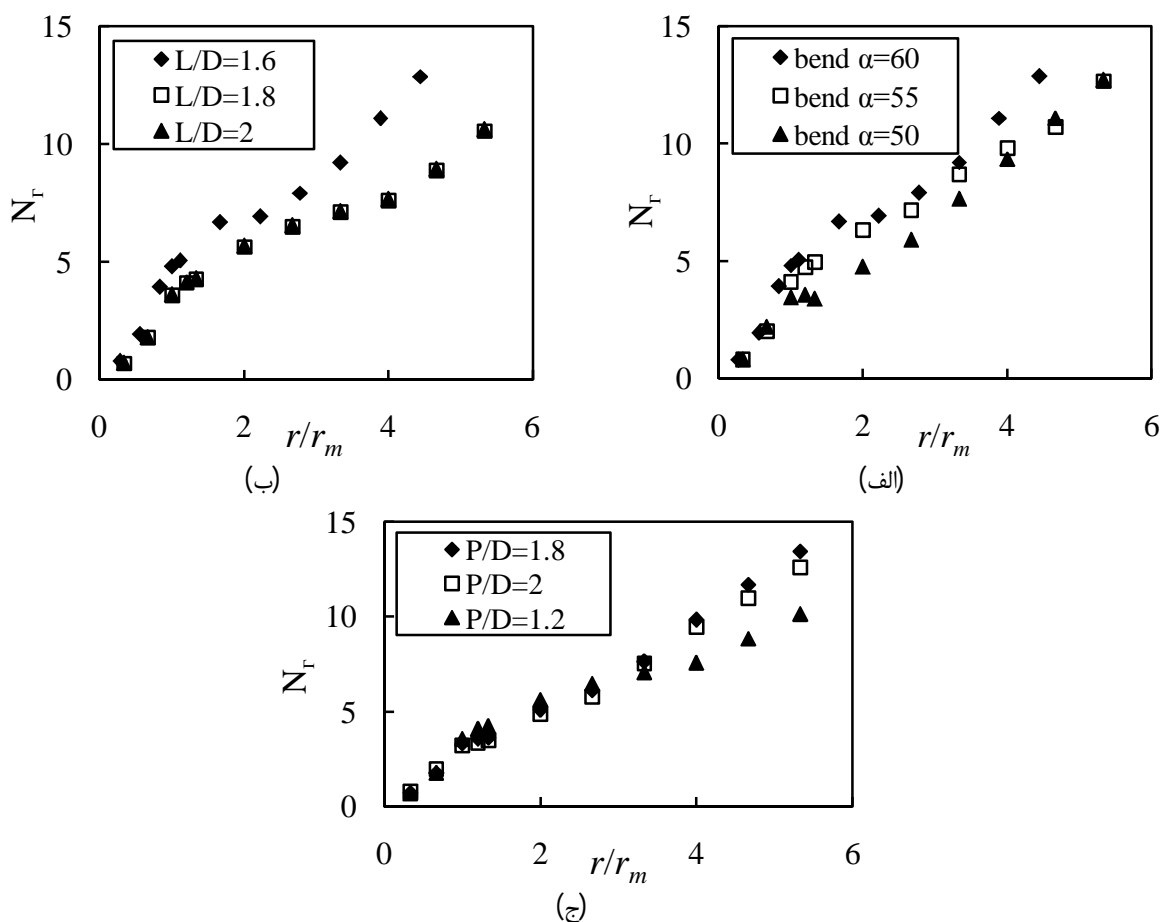
مماسی در شعاع اهمیت دارد، اثر افزایش شعاع بر افزایش مقدار این حاصل‌ضرب و در نتیجه مقدار چرخش غالب است. با توجه به این‌که دبی ثابت است، با افزایش شعاع، عدد چرخش (Nr) افزایش می‌یابد و سیر صعودی دارد. در شکل 14- ب تغییرات عدد چرخش برای سه طول مختلف از کلید پیانویی مقایسه شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، برای نسبت $L/D=1/6$ مقادیر سرعت مماسی نسبت به دو طول دیگر بیشتر است. افزایش سرعت مماسی سبب افزایش عدد چرخش نسبت به دو طول دیگر می‌شود. ضمن این‌که برای هر سه طول با



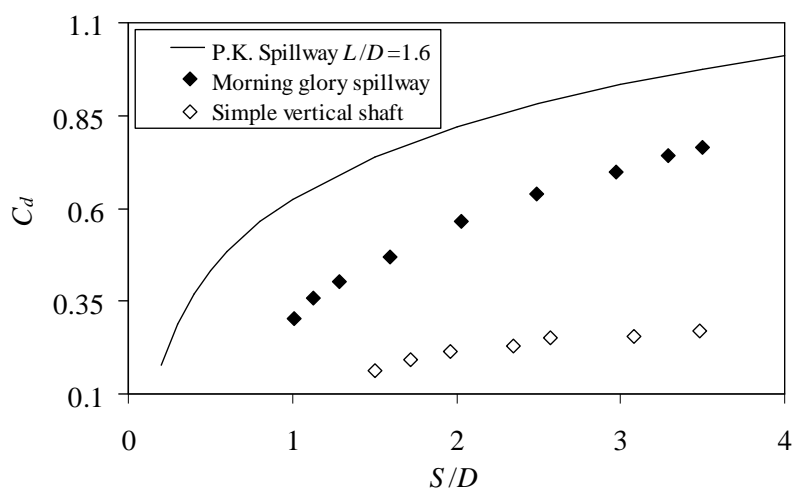
شکل 13- الف تأثیر طول کلید پیانویی، ب- تأثیر زاویه کلید پیانویی و ج- تأثیر ارتفاع کلید پیانویی بر ضریب دبی جریان عبوری از سرریز

در شکل (15) به مقایسه ضریب دبی جریان در شفت قائم مجهز به ورودی کلید پیانویی، شفت ساده بدون ورودی کلید پیانویی (شمشی، 1391) و سرریز نیلوفری در شکل (15) به مقایسه ضریب دبی جریان در شفت قائم

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از ورودی کلید پیانویی سبب افزایش ضریب دبی جریان شده است.



شکل 14 ارتباط بین عدد چرخش و نسبت شعاعی برای الف- زوایای مختلف ب- طول‌های مختلف و ج- ارتفاع‌های مختلف سرریز کلید پیانویی



شکل 15 نمودار تغییرات ضریب دبی در مقابل S/D برای $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ و $P=1/2$

بر اساس جمع‌بندی نتایج حاصل در این بخش از تحلیل، ورودی کلید پیانویی به‌طور متوسط ضریب دبی جریان را از 2 تا 4 برابر نسبت به دو نوع دیگر افزایش داده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از ورودی کلید پیانویی سبب افزایش ضریب دبی جریان شده است. بر اساس جمع‌بندی نتایج حاصل در این بخش از تحلیل، ورودی کلید پیانویی به‌طور متوسط ضریب دبی جریان را از 2 تا 4 برابر نسبت به دو نوع دیگر افزایش داده است.

4- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری

یکی از انواع بسیار مهم و کاربردی سرریزها، سرریز مدور قائم است. از خصوصیات هیدرولیکی این سرریز می‌توان به تشکیل جریان گردابی در ورودی آن اشاره نمود. یکی از روش‌های کنترل جریان گردابه‌ای اصلاح شکل ورودی است. استفاده از سرریز کلید پیانویی مدور به‌عنوان ورودی شفت‌های قائم یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشم‌گیری بر کاهش قدرت جریان گردابی دارد. ضمن این‌که ضریب دبی جریان را افزایش می‌دهد.

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که افزایش نسبت L/D تا مقدار $1/6$ سبب افزایش دبی و ضریب دبی می‌شود. با توجه به نتایج مربوط به مدل‌سازی عددی انجام شده، افزایش این نسبت برای مقادیر بزرگ‌تر از $1/6$ باعث کاهش دبی و ضریب دبی جریان روزنه‌ای می‌شود. بررسی سه زاویه $\alpha=60^\circ$ ، $\beta=30^\circ$ و $\alpha=50^\circ$ ، $\beta=40^\circ$ و $\alpha=55^\circ$ ، $\beta=35^\circ$ سرریز کلید پیانویی نشان می‌دهد که ورودی کلید پیانویی با زاویه 60° درجه رفتار یکنواخت‌تری نسبت به دو ورودی دیگر دارد و دبی بیش‌تری از خود عبور می‌دهد. بنابراین زاویه 60° درجه به‌عنوان زاویه بهینه معرفی می‌شود. بر طبق نتایج آزمایشگاهی افزایش نسبت P/D از مقدار $0/8$ تا $1/2$ ، سبب افزایش ضریب دبی می‌شود. برای نسبت $1/2$ و بالاتر، ورودی کلید پیانویی سبب کاهش دبی عبوری می‌شود. با بررسی پروفیل‌های فشار در مجاورت سرریز کلید پیانویی، مشاهده شد که اختلاف فشار بین مرکز شفت و نواحی نزدیک به آن با نواحی نزدیک به دیواره‌ی مخزن بیش‌تر است. با توجه به بیش‌تر بودن

مقدار سرعت در نواحی نزدیک به شفت، افزایش فشار منفی به دلیل کاهش سطح آب در این نواحی ناشی از ایجاد جریان گردابی است. از بین مدل‌های بررسی شده در این تحقیق، استفاده از ورودی کلید پیانویی با مشخصات $P/D=1/2$ ، $L/D=1/6$ و $\beta=30^\circ$ و $\alpha=60^\circ$ ، که دیواره قطاع‌های مقعر آن برش داده شده است به‌عنوان حالت بهینه در بین ورودی‌های مختلف کلید پیانویی معرفی می‌شود.

5- فهرست علائم

C_d	ضریب دبی جریان
D	قطر شفت
L	طول سرریز کلید پیانویی
Nr	عدد بی‌بعد چرخش
P	ارتفاع سرریز کلید پیانویی
p	فشار پیژومتریک
Q	دبی جریان
R	شعاع شفت قائم
r	فاصله از مرکز شفت
r_m	شعاع مربوط به بیش‌ترین مقدار سرعت مماسی
S	هد آب روی ورودی
V و V_θ, V_z	مؤلفه‌های سرعت در جهات قائم، مماسی و شعاعی (r و θ و z)
$\overline{v_r}, \overline{v_\theta}, \overline{v_z}$	مؤلفه‌های سرعت متوسط زمانی در جهات قائم، مماسی و شعاعی (r و θ و z)
$\overline{v'_r}, \overline{v'_\theta}, \overline{v'_z}$	مؤلفه‌های نوسانی سرعت در جهات r ، θ و z
β و α	زاوای قطاع‌های ورودی و خروجی کلید پیانویی
Δt	گام زمانی
v	لزجت سینماتیکی سیال
ρ	جرم مخصوص سیال

6- منابع

الستی، ک. (1385). "تأثیر تیغه‌های گرداب شکن بر جریان سرریزهای نیلوفری"، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

- free vortex”, *Sientia Iranica*, Vol. 20, No. 2, pp. 251-258, 2013
- Gulliver, J., Rindels, A.J. and Lindblom, K.C. (1986). “Desingn intakes to avoid free surface”, *Water Power and Dam Constraction*, Vol. 38, No. 9, pp. 224–232, 1986.
- Hite, E.J.Jr. (1991). *Vortex formation and flow separation at hydraulic intakes*, Washington State Unviersity.
- Kabiri-samani, A.K. and Javaheri, A. (2011). “Discharge coefficient for free submerged flow over piano key”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1, pp.114-120.
- Khaturia, R.M. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*, *Civil and Enviromental Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp .649-651.
- Laugier, F. (2007). “Design and construction of the first Piano Key weir spillway at Goulours dam”, *International Journal of Hydropower and Dams*, Vol. 14, No. 5, pp. 94-100.
- Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). “The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways”, *International Journal of Hydropower and Dams*, Vol. 10, No. 5, pp. 144-149.
- Lewellen, W.S. (1962). “A solution for three-dimensional vortex flow with strong circulation”, *Aerospace Corporation Rep. TD R-930*, (2210-14) TN-1.
- Wang, Y. K., Jiang, C. B., and Liang, D. F. (2010). “Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes”, *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Vol. 22, No. 5, pp. 696-701, Doi:10.1016/S1001-6058(10)60017-0.
- شمشی، ر. (1391). بررسی تأثیر ورودی کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- کبیری سامانی، ع.ر. (1379). تعیین توپولوژی بهینه در طرح صفحات کاهش گرداب آبگیرها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- Aghamajidi, R. (2013). “Computerized simulation of hydraulic behavior of shaft spillway vortex breaker on crest and semi long stepped chamber throat”, *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 23, No. 3, pp. 3325-3332.
- Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P. and Jones, B.A. (2006). “Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or p.k”, *Comission Internationale Des Grands Barrage*, Barcelona.
- Bieri, M., Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A., Lauger, F., Delorme, F., and villard, J.F. (2009). “Rehabilitation de la capacite d’evacuation des crues Integration de PK-Weirs sur des barrages existants”, *Colloque CFBR-SHF*, Paris, [In French].
- Borghei, S.M. and Kabiri-Samani, A.R. (2010). “Effect of anti-vortex plates on critical submergence at a vertical intake”, *Sientia Iranica*, *Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 89-95.
- Borghei, S.M. and Kabiri-Samani, A.R. (2013). “Effects of anti-vortex plates on air entrainment by