

The effects of geometrical parameters of anti-vortex plates on flow field in vertical intakes

Elham Izadnia^{1*}, Zhaleh Ghochaghi²

1- Assistant Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

2- Graduated student in Civil Engineering Department, Water and Hydraulic Structures, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

* Izadnia@ashrafi.ac.ir

Received: 7 April 2020, Accepted: 17 May 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Shaft spillways are one of the major hydraulic structures in the dam engineering, influencing the flow field inside the dam reservoir, by inducing swirling flow and air-core vortices. Formation of the vortex at vertical shaft is one of the critical problems encountered in these kinds of shafts. Intake vortices are the result of angular momentum conservation at the flow constriction, where angular velocity increases with a decrease in the cross-sectional area. This phenomenon usually happens when a free-water surface enters a closed area such as a shaft pipeline or morning-glory spillway. Swirling flows at vertical shaft spillways have the potential to engender flow fluctuations, reduce efficiency, and cause structural damages. In order to make the vortex weakness or totally omitted, the strength of the vortex must be limited by some obstacles in its formation point and caused uniform flow toward the spillway. To this end, using the anti-vortex plates will increase both discharge coefficient and spillway efficiency, while decrease the water flow oscillation. Due to numerous design variables, the optimal hydraulic design of such structures is not deeply understood. In the present study, a comprehensive investigation by simulated model is conducted to examine the effects geometrical parameters of anti-vortex plates on reduction of swirling flow over the intake.

Methodology: The aim of this study is to make the model of anti-vortex plates at vertical shaft in Flow-3D software. Flow-3D software is Computational Fluid Dynamic (CFD) software with the ability of assimilation of fluid flow on free surface. The effects of different anti-vortex plate geometries, including numbers, dimensions, positioning angles and also the shape of anti-vortex plates on the weir flow discharge coefficient are taken into account. Three different configurations, ($D \times D$, $2D \times 2D$, $3D \times 3D$), of square and circular anti-vortex plates in four angles, 0° (single), 90° (pair), 120° (triad) and 180° (four anti-vortex plates), were studied. Previous experimental study suggested that optimal size for square anti-vortex plate is $2D \times D$ if $R=D/2$ (R is the horizontal distance between the shaft center and plate edge) and $Z=0$, i. e. the vertical distance between shaft edge and palate center (Kabiri-Samani and Borghei, 2013). In present study, the same position $R=D/2$ and $Z=0$ for anti-vortex plate is considered.

Results and Discussion: In order to model-validation of the no-plate model, one $D \times D$ anti-vortex plate (P1) and two $2D \times 2D$ anti-vortex plates (P2) were respectively considered in 10 cm, and 7.5 cm diameters of the shaft. In no-plate numerical simulation, six different discharges (0.00604 – 0.0019 m³/s) was considered for each diameter individually, and in P1 and P2

simulation the variation of discharge is 0.0125 to 0.0019 (m³/s). The results of verification showed that flow-3D software has good performance in numerical simulation with error less than 8%.

In the present study, square anti-vortex plates with $D \times D$, $2D \times 2D$, $3D \times 3D$ dimensions and circular with diameter D , were modeled at the angles 0° (single), 90° (pair), 120° (triad) and 180° (four anti-vortex plates) for square and 180° for circular. The results showed that in four square anti-vortex plates ($n=4$) and size $D \times D$ negative pressure on vertical intake and high pressure around the tank shells was not observed. Thus, the four square anti-vortex plates ($n=4$) with $D \times D$ dimensions is the best configuration in terms of negative pressure and air core.

Water free surface elevations have been examined for the best number of square anti-vortex plates ($n=4$) for $D \times D$, $2D \times 2D$ and $3D \times 3D$. The results show that the square anti-vortex plate with $D \times D$ dimension has a lower water level which indicate passing more water through the shaft. Circular anti-vortex plates in comparison with square type, in the same condition, shows the higher water level. That is proof weak performance of the circular model versus the square.

Study of velocity components over the intake indicate that the fluctuation of vertical component is more than the radial and tangential velocity components. The maximum velocity value is obtained for radial velocity component of square anti-vortex plates.

Conclusion: Vertical shaft is one of the most important and the most practical one among the spillways. In the present study, different configuration of anti-vortex plates has been considered to reduce or minimize swirling flow strength and air entrainment at the vertical shaft spillways. A parametric study was carried out on the main geometric variables of the anti-vortex plates based on model simulation.

Based on results obtained from numerical modeling, application of four $D \times D$ square anti-vortex plates is more effective compared to one, two, or three square plates and also four circular anti-vortex plates. Head-discharge diagrams indicate that four $D \times D$ square anti-vortex plates in similar discharges, has the minimal water height above the spillway. So, the four $D \times D$ square anti-vortex plates are introduced as the optimal case and circular anti-vortex plate can be applied as the second choice.

Keywords: Shaft Spillway, Anti-Vortex Plates, Vortex flow, Velocity component.



© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تأثیر فراسنجه‌های هندسی صفحه‌های ضدگرداب بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم

الهام ایزدی‌نیا^{۱*}، ژاله قچاقی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهید اشرفی اصفهانی.
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهید اشرفی اصفهانی.

* Izadinia@ashrafi.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از انواع مهم و کاربردی سرریزها، سرریز مدور قائم است. این سرریزها در دره‌های تنگ با شیب تند یا در سدهایی که امکان احداث سرریز جانبی وجود ندارد، ساخته می‌شوند. یکی از مشکلات اصلی سرریزهای مدور قائم ایجاد گرداب‌های قوی در دهانه آن‌هاست. این امر باعث ورود هوا و ایجاد جریان‌های چرخشی در درون مجرای انتقال می‌شود، که به دنبال آن مشکلات دیگری مانند کاهش ظرفیت آبیگری، افزایش احتمال رخداد جدارخوردگی، لرزش و سوراخ‌ها در بر خواهد داشت. یکی از روش‌های کاهش اثرگذاری گرداب‌های مخرب، استفاده از صفحه‌های ضدگرداب است که باعث به تأخیر انداختن جریان گردابی، جهت‌دهی و هدایت خطوط جریان به سمت مرکز شفت می‌شود. با توجه به بررسی صورت گرفته تحقیق‌های محدودی روی صفحه‌های ضدگرداب چهارگوشه انجام شده است، این در حالی است که ارزیابی دقیق فراسنجه‌های هندسی صفحه‌های ضد گرداب و تعیین شکل بهینه برای طراحی نیاز به بررسی و ارزیابی‌های بیشتر دارد. لذا تحقیق هیدرولیک جریان روی ۲۵ مدل سرریز مدور قائم به همراه گرداب‌شکن‌های چهارگوشه و دایره‌ای در نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. برای واسنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی موجود برای دو مدل مربع و مستطیلی با دو قطر شفت ۱۰ و ۷/۵ سانتی‌متر استفاده شد. نتایج نشان داد نرم افزار Flow-3D با خطای کمتر از ۸ درصد، قادر به مدل‌سازی جریان است. شبیه‌سازی‌ها برای صفحه‌های ضدگرداب مربعی و دایره‌ای در دبی‌های مختلف انجام گردید و تأثیر ابعاد، تعداد و زاویه قرارگیری آن‌ها نیز بررسی شد. برای هر کدام از مدل‌ها نیمرخ‌های سطح آب، فشار و سرعت (شعاعی، مماسی و قائم) به طور کامل تحلیل شدند. نتایج نشان داد که استفاده از صفحه‌های ضدگرداب مربعی در ابعاد $D \times D$ و تعداد چهار صفحه ($n=4$) بهترین نتیجه را از نظر کمترین ارتفاع آب روی شفت، نبود هسته هوا و فشار منفی به خود اختصاص داده است.

کلید واژگان: سرریز مدور قائم، صفحه ضد گرداب، جریان گردابی، مؤلفه‌های سرعت.

۱- مقدمه

(1995). از برتری‌های دیگر این سرریزها این است که با افزایش جزئی سطح آب بالادست، می‌توانند دبی طرح را به‌طور کامل از خود عبور دهند. برتری دیگر این نوع سرریزها در خودکار بودن و عملکرد خوب آن‌ها بدون نیاز به ابزار مکانیکی است. یکی از مشکلات اصلی که آبگیرهای قائم با آن رو به رو هستند تشکیل گرداب‌های قوی در دهانه آن‌ها است که در نتیجه بقای مومنتم زاویه‌ای در محل انقباض جریان بوجود می‌آید. تشکیل گرداب سبب افزایش سریع هد آب روی تاج سرریز و کاهش میزان آبگذری

یکی از پرکاربردترین سرریزهای مورد استفاده در مخزن‌های سدها، سرریز مدور قائم است. این سازه به‌طور معمول در شرایطی به کار می‌رود که ارتفاع سازه در مخزن کم و ورود جریان به درون آن بدون چرخش باشد. همچنین این سازه بیشتر در سدهای خاکی که سرریز جدا از بدنه سد طراحی شده، در درون مخزن سد استفاده می‌شود. این نوع طراحی موجب کاهش خطرآبشستگی و اشباع شدن پوسته پایین‌دست سد می‌شود (Afshar and Niksefat,)

کمر از فشار اتمسفر هسته هوا در دهانه آبگیر شکل می‌گیرد. بنابراین پدیده گرداب در نتیجه اندرکنش هندسه سازه خروجی، سرعت جریان، نیروی ثقل، حرکت وضعی زمین و ویژگی‌های سیال شکل می‌گیرد (Kabiri-Samani, 2000).

مدلی از گرداب که به گرداب مرکب رانکین معروف است توسط Rankin (1858) ارائه شد. در این مدل فرض بر این است که ذرات سیال در نزدیکی مرکز گرداب همانند یک جسم صلب با گرانشی بالا بوده و دارای حرکت چرخشی پیرامون محور خود می‌باشند (گرداب اجباری) و این ناحیه درون یک منطقه غیر لزج (گرداب آزاد) که در فاصله دورتری از مرکز گرداب قرار دارد جای گرفته است.

Posey and Su (1950) تأثیر تشکیل گرداب بر دبی آبگیر را بررسی کردند و نشان دادند که تشکیل گرداب می‌تواند باعث افت دبی آبگیر تا ۸۰٪ شود. Jain et al. (1978) با بررسی روی گروهی از پمپ‌ها به این نتیجه رسیدند که یک جریان گردابی با اختلاط هوای یک درصدی می‌تواند باعث کاهش بازدهی پمپ‌های سانتریفوژ تا ۱۵ درصد شود.

Trivellato (2010) وسیله‌ای به شکل قیف را برای حذف گرداب سطحی معرفی کرد و با آزمایش ۵ حالت با هندسه مختلف از مدل معرفی شده، کاهش نیروی جریان گردابی یا حذف کامل آن را در شرایط مختلف گزارش کرد. Nohani and Mousavi-Jahromi (2010) با بررسی آزمایشگاهی مدل‌های سرریز نیلوفری به این نتیجه رسیدند که ضریب تخلیه این سرریز با افزایش تعداد تیغه‌ها، ۲۰ درصد و با افزایش تعداد توأم با ضخامت تیغه‌ها، ۹ درصد افزایش پیدا کرده است.

Bagheri et al. (2012) تأثیر چند وجهی کردن تاج سرریز و تبدیل ورودی به شکل گلبرگ‌های سه، پنج و هفت وجهی را بررسی کردند. به‌طور کلی چند وجهی کردن تاج سرریز نسبت به حالت نیلوفری استاندارد، عملکرد سرریز مدور قائم را بهبود می‌بخشد. ولی سرریز سه وجهی نسبت به دیگر سرریزها عملکرد هیدرولیکی بهتری دارد.

در تحقیقات آزمایشگاهی پیرامون سرریز مدور قائم توسط Kabiri-Samani and Borghei (2013) تأثیر صفحه‌های ضد گرداب چهارگوش بررسی و ارزیابی شد. صفحه

می‌شود. پدیده گرداب در مجاری بسته باعث کاهش دبی جریان، ارتعاش، ایجاد موج و جدایی خطوط جریان و در نهایت کاهش بازدهی توربین‌ها و سامانه‌های پمپاژ می‌شود و در بسیاری از موارد ایمنی سازه را به خطر می‌اندازد. به‌طور کلی ویژگی‌های جریان در یک شفت قائم با تغییرات ارتفاع آب روی لبه تاج تغییر می‌کند و کنترل جریان بر حسب دبی ورودی به دهانه سرریز سپس از کنترل در تاج به کنترل روزه‌های و تونلی تبدیل می‌شود. در بارهای کم، جریان آب توسط تاج سرریز مهار می‌شود و در این شرایط تبدیل قائم واقع در پایین تاج سرریز، نیمه‌پر خواهد بود و جریان به دیواره‌های لوله قائم می‌چسبد. با افزایش ارتفاع آب روی تاج، تبدیل به صورت پر کامل در می‌آید و سازه همچون یک روزه عمل می‌کند. در بارهای زیاد، سرریز به کلی مستغرق شده و تنها یک فرورفتگی و گرداب کوچک در سطح آب باقی می‌ماند. در این شرایط، جریان در کل مجرا تحت فشار خواهد بود (جریان لوله‌ای).

رژیم محتمل جریان افزون بر دبی ورودی به ابعاد و اجزای تشکیل‌دهنده سرریز نیز بستگی دارد. به عنوان مثال برای سرریزهایی با شعاع تاج بزرگتر، سازه قادر است، در بارهای کمتر، مقادیر دبی بیشتری را تخلیه کند.

همان گونه که بیان شد از رایج‌ترین مشکلات سرریزهای سیفونی گرداب‌های تشکیل شده در دهانه سرریز و کاهش آبگذری جریان است. برای تضعیف یا حذف گرداب باید به گونه‌ای نیروی گرداب را با ایجاد بازدارنده‌هایی در منطقه شکل‌گیری آن محدود کرده و جریانی یکنواختی را به سمت سرریز به وجود آورد. در این راستا استفاده از تیغه‌های گرداب‌شکن باعث افزایش ضریب دبی و بهبود عملکرد سرریز و نیز کاهش نوسان‌های جریان می‌شود.

در بررسی جریان گردابی دو ناحیه قابل مشاهده است. در ناحیه اول، جریان به‌طور مستقیم وارد مجرای خروجی می‌شود و در ناحیه دوم سیال ساکن و بدون حرکت است. اختلاف توزیع سرعت بین دو ناحیه از سیال باعث شکل‌گیری جریان گردابی و تشکیل هسته هوا در محور جریان چرخشی می‌شود. در نتیجه این امر فشار پیرامون محور دوران کاهش یافته و سطح آب پایین می‌افتد و هسته هوا در عمق آب پایین‌تر می‌رود. به محض کاهش فشار به

های در ابعاد و موقعیت‌های متفاوت به صورت مجزا و دوتایی در دو قطر از لوله قرار گرفتند و استغراق بحرانی در یک مدخل عمودی بررسی شد. نتایج گویای آن بود که کاربرد صفحه‌های ضد گرداب باعث کاهش عمق آب همراه با کاهش مدت زمان شکل‌گیری جریان گردابی و به تعویق انداختن آن می‌شود؛ همچنین استفاده از این صفحه‌ها نیروی جریان گردابی را نیز کاهش می‌داد.

نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی (Kashkoli et al. (2013) روی سرریزهای نیلوفری نشان داد برای اطمینان از جریان شعاعی روی تاج، سرریز نیلوفری باید تا حد ممکن دور از مرزهای مخزن باشد، زیرا احتمال ایجاد جریان گردابی در نزدیک جدار مخزن بیشتر است و به طور قابل توجهی ظرفیت سرریز را کاهش می‌دهد. (Sarkardeh et al. (2013) با انجام آزمایش‌هایی الگوی جریان در پیرامون یک آبگیر افقی در شرایط تشکیل گرداب با هسته هوا را بررسی و ساز و کاری را برای تشکیل گرداب‌های سطحی ارائه کردند.

و کاری را برای تشکیل گرداب‌های سطحی ارائه کردند. (Nohani (2014) با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای نیلوفری با تاج لبه تیز و لبه پهن به این نتیجه رسید که با قرارگیری تیغه‌های ضد گرداب تا ۲۰ درصد ضریب دبی افزایش می‌یابد و ضریب دبی در سرریزهای نیلوفری با لبه تیز بیشتر از لبه پهن است. (Nohani et al. (2015) نیز در تحقیقی میزان ضریب دبی را در سرریزهای لاله‌ای با ۳، ۶ و ۲۱ تیغه گرداب‌شکن در نرم‌افزار Flow-3D بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شمار گرداب‌شکن دبی عبوری بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع آب روی سرریز نیز ضریب دبی افزایش می‌یابد. (Kashkaki et al. (2016) پژوهش‌های خود را روی سه مدل سرریز (سرریز نیلوفری، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و سرریز مدور قائم بدون اصلاح ورودی) انجام دادند. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از سازه‌های گرداب‌شکن به‌طور قابل توجهی باعث افزایش دبی عبوری و ضریب دبی سرریز می‌شود. مقایسه سه مدل سرریز نشان داد که در بار ثابت، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و پس از آن سرریز نیلوفری دبی بالاتری را نسبت به سرریز مدور قائم بدون

اصلاح ورودی از خود عبور می‌دهد. همچنین Nasiri et al. (2016) در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در پیرامون سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی پرداختند و با بررسی تأثیر طول، ارتفاع و زاویه قطاع‌های کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان و رسم نیمرخ‌های فشار و سرعت نشان دادند استفاده از سرریز کلید پیانویی مدور به‌عنوان ورودی شفت‌های قائم یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشمگیری بر کاهش نیروی جریان گردابی دارد.

Shemshi and Kabiri-Samani (2017) در یک بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی و در محدوده جریان روزنه‌ای، با استفاده از سرریز کلید پیانویی به عنوان تاج سرریزهای سیفونی نشان دادند این روش باعث بهبود عملکرد سرریز و افزایش ضریب آبگذری آن می‌شود. بررسی تاریخیچه موضوع حاکی از آنست که اکثر تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه کاهش نیروی گردابه‌ها در سرریز مدور قائم بصورت آزمایشگاهی بوده است. این در حالی است که استفاده از روش‌های عددی محدودیت‌های بررسی و ارزیابی‌های آزمایشگاهی را نداشته و این امکان را فراهم می‌آورد تا با صرف هزینه کمتر دامنه فراسنجه‌های مؤثر را در بازه گسترده تری ارزیابی کرد. در این بررسی با شبیه‌سازی سرریز مدور قائم، پس از واسنجی مدل با اطلاعات آزمایشگاهی موجود به بررسی تأثیر بعدها، تعداد و زاویه قرارگیری صفحه‌های ضد گرداب مربعی پرداخته شد. افزون بر آن، برای نخستین بار از صفحه‌های ضدگرداب دایره‌ای برای کاهش نیروی گردابه‌ها در ورودی سرریز استفاده و بازده آن بادیگر صفحه‌های ضدگرداب ارزیابی شد.

سرریز (سرریز نیلوفری، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و سرریز مدور قائم بدون اصلاح ورودی) انجام دادند. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از سازه‌های گرداب‌شکن به‌طور قابل توجهی باعث افزایش دبی عبوری و ضریب دبی سرریز می‌شود. مقایسه سه مدل سرریز نشان داد که در بار ثابت، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و پس از آن سرریز نیلوفری دبی بالاتری را نسبت به سرریز مدور قائم بدون

سرریز (سرریز نیلوفری، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و سرریز مدور قائم بدون اصلاح ورودی) انجام دادند. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از سازه‌های گرداب‌شکن به‌طور قابل توجهی باعث افزایش دبی عبوری و ضریب دبی سرریز می‌شود. مقایسه سه مدل سرریز نشان داد که در بار ثابت، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و پس از آن سرریز نیلوفری دبی بالاتری را نسبت به سرریز مدور قائم بدون

سرریز (سرریز نیلوفری، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و سرریز مدور قائم بدون اصلاح ورودی) انجام دادند. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از سازه‌های گرداب‌شکن به‌طور قابل توجهی باعث افزایش دبی عبوری و ضریب دبی سرریز می‌شود. مقایسه سه مدل سرریز نشان داد که در بار ثابت، سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن و پس از آن سرریز نیلوفری دبی بالاتری را نسبت به سرریز مدور قائم بدون

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم‌افزار Flow-3D

هدف از این تحقیق مدل کردن سه‌بعدی صفحه‌های ضد گرداب دایره‌ای و مربعی اطراف شفت قائم است. از آنجا که نرم‌افزار Flow-3D یک نرم‌افزار در زمینه تحلیل محاسباتی سیال (CFD^۱) بوده که قابلیت شبیه‌سازی جریان را روی سطح‌های آزاد داراست، از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی

^۱ Computational Fluid Dynamics

برای هر مدل گرداب‌شکن با توجه به ابعاد آن، اندازه مش پلان‌ها متفاوت است. برای بلوک ۱، در جهت x ، y و z به ترتیب ۶، ۱۰ و ۷ مش پلان تعبیه شده که اندازه سلول‌ها در مش پلان‌های اطراف سرریز، ۵ میلی‌متر و در دیگر نقطه‌ها ۱۵، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سایز سلول‌ها برای بلوک ۲ نیز مانند حالت بدون گرداب‌شکن در نظر گرفته شده است. برای حالت سرریز با گرداب‌شکن، مدل در ۵۸۰،۷۲۵ تعداد سلول در بلوک ۱ و ۸۲،۱۶۰ در بلوک ۲، به بهترین پاسخ ممکن با کمترین خطا برای مرحله صحت‌سنجی رسید.

لازم به یادآوری است مبنای انتخاب تعداد مش پلان‌ها و سایز سلول‌های آن‌ها در دو حالت الف وب بر مبنای سعی و خطا، در بازه منطقی بر اساس منبع‌ها پیشین صورت گرفت. برای این منظور ابعاد مش از اندازه ۹ تا ۳ میلی‌متر با فاصله ۱ میلی‌متر ارزیابی شد. معیار انتخاب بهترین ابعاد، بیشترین سازگاری بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های عددی با کمترین درصد خطا و کمترین زمان شبیه‌سازی است. بر این مبنا اندازه سلول ۵ میلی‌متر با خطای کمتر از ۸ درصد و زمان همگرایی ۵ تا ۹ روز انتخاب شد.

با توجه به تعداد زیاد سلول‌ها در مدل و حجم بالای مدل‌سازی، شبیه‌سازی با رایانه‌های معمولی امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل در آغاز برای مرحله صحت‌سنجی از ابررایانه‌های موجود در درون کشور و برای مدل‌سازی نهایی تحقیق که حجم کار بالاتر بود از ابررایانه‌های متصل به سامانه‌های اروپا با تعداد هسته و فرکانس بسامد بالاتر استفاده شد. به‌طور متوسط برای همگرا شدن هر یک از مدل‌ها ۷ روز زمان نیاز بود. برای اطمینان کامل از روند صحیح مدل‌سازی اختلاف دبی‌های ورودی به نرم‌افزار با دبی‌های خروجی از آن بررسی شد. در همه مدل‌ها این اختلاف برابر 10^{-4} یا کمتر بوده که دلیل بر همگرا شدن پاسخ و پایان شبیه‌سازی است.

از جمله معادله‌های حاکم بر جریان آشفته سیال در شکل دیفرانسیلی در دستگاه مختصات استوانه‌ای می‌توان به

استفاده شد. شبکه حل در این نرم‌افزار متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی است و به دلیل به کارگیری دو ابزار مفید VOF^1 و $FAVOR^2$ در نرم‌افزار، امکان مش‌بندی ساده‌تر و کاهش زمان شبیه‌سازی فراهم شده است.

برای مدل‌سازی میدان جریان اطراف سازه و درون شفت قائم، بنا بر نتایج و بررسی‌هایی پیشین مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و RNG^3 مد نظر قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با دو مدل یاد شده نشان داد مدل RNG افزون بر دارا بودن دقت بالاتر زمان شبیه‌سازی را نیز کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده خطای مدل RNG و $K-\epsilon$ به ترتیب کمتر از ۸ و ۱۳ درصد است. لذا در هر دو مرحله صحت‌سنجی و مدل‌سازی عددی از مدل آشفتگی RNG استفاده شد.

در این بررسی برای تعریف شبکه حل از دو بلوک^۵ مکعب مستطیلی مجزا استفاده شد که در هر بلوک متناسب با نیاز، مش پلان‌هایی ساخته شد تا قسمت‌های مختلف مدل از جمله مخزن، آبراهه ورودی، سرریز و گرداب‌شکن‌ها را در برگیرد. برای مدل‌سازی در آغاز هندسه سرریز در نرم‌افزار اتوکد به‌صورت سه بعدی ساخته و با فرمت "stl" ذخیره و در نرم‌افزار Flow-3D فراخوانی شد. قرارگیری دقیق تعداد مش پلان‌ها و ابعاد سلول‌های آنها در مش بلوک هر مدل به شرح زیر است:

الف) در حالت سرریز بدون صفحه‌های ضد گرداب برای بلوک ۱ (درب‌گیرنده مخزن و سرریز)، در جهت x ، y و z به ترتیب ۴، ۸ و ۵ مش پلان تعبیه شده که اندازه سلول‌ها در مش پلان‌های اطراف سرریز، ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای بلوک ۲ (آبراهه ورودی آب به مخزن)، در جهت x ، y و z به ترتیب ۲، ۲ و ۳ مش پلان قرار داده شده که سایز سلول‌های آن ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای حالت سرریز بدون گرداب‌شکن، مدل در ۹۴۰، ۶۶۲ تعداد سلول در بلوک ۱ و ۸۲،۱۶۰ در بلوک ۲، به بهترین پاسخ ممکن با کمترین خطا برای مرحله صحت‌سنجی رسید.

ب) در حالت سرریز با صفحه‌های ضد گرداب (در هر دو مرحله صحت‌سنجی و مدل‌سازی)

⁴ Two-Equation (k- ϵ) Model

⁵ Mesh Block

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

³ Renormalized Group (RNG) Model

و k به ترتیب اعداد فرود، رینولدز، وبر و کلف هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_r = \frac{Q}{D^2 \sqrt{gh}} \quad \text{عدد فرود}$$

$$Re = \frac{Q}{\nu h} \quad \text{عدد رینولدز}$$

$$We = \frac{V^2 \rho D}{\sigma} \quad \text{عدد وبر}$$

$$K = \frac{\Gamma D}{Q} \quad \text{عدد کلف}$$

در رابطه های بالا g شتاب ثقل، ν لزوجت سینماتیکی، σ کشش سطحی، ρ جرم حجمی سیال و Γ چرخش است. با توجه به نتایج و بررسی های پیشین هنگامی که ارتفاع آب روی شفت بیش از ۳ سانتی متر باشد ($h > 0.3$ m) تأثیر کشش سطحی قابل نظر است (Novak and Daggett and Cabelka, 1981). محققین دیگر از جمله Jain et al. (1978) و Keulegan (1974) هنگامی که $We > 120$ ، کشش سطحی قابل نظر می‌باشد. Henderson (1966) بیان کرد که در یک جریان آشفته تأثیر لزوجت قابل چشم پوشی است. برخی از محققان بیان داشتند هنگامی که $Re > 20000$ باشد اثر لزوجت قابل نظر است (Anwar et al., 1978). در این بررسی عدد وبر برابر ۳۱۵۴ و عدد رینولدز برابر ۳۱۷۲۳ به دست آمد، بنابراین از رابطه (۵) حذف می‌گردند. با توجه به انتخاب یک قطر لوله برای شفت در مرحله شبیه‌سازی، فراسنجه l/D نیز ثابت بوده در نتیجه رابطه ۵ به صورت زیر در می‌آید:

$$Q/Q_0 = f_2(h/D, \frac{a \times b}{D^2}, F_r, K, n) \quad (6)$$

۲-۲-صحت‌سنجی و متغیرهای مدل مورد بررسی

گام نخست برای انجام هر شبیه‌سازی عددی، صحت‌سنجی مدل بر مبنای اطلاعات آزمایشگاهی و واقعی است. در این پژوهش برای صحت‌سنجی از اطلاعات آزمایشگاهی موجود در بررسی‌های Kabiri-Samani and Borghiei (2013) استفاده شده است. همان‌گونه که در بخش پیشینه تحقیق بیان شد آنان به بررسی تأثیر صفحه‌های ضد گرداب مربع و مستطیلی پرداختند. بر همین مبنای صحت‌سنجی، صفحه‌های ضد گرداب مربع و مستطیلی با بعدهای $D \times D$ و $2D \times D$ (قطر شفت) برابر با داده‌های آزمایشگاهی

معادلات ناویر استوکس و پیوستگی اشاره کرد (Wang et al., 2010):

$$\frac{\partial \bar{v}_r}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \theta} - \frac{\partial \bar{v}_\theta^2}{r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} - \frac{\bar{v}_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{v}_r}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{v}_r^2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_r \bar{v}_\theta}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}_\theta^2}{r} + \frac{\bar{v}_r^2}{r} + \frac{\partial \bar{v}_r \bar{v}_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial \theta} - \frac{\bar{v}_r \bar{v}_r}{r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial r} - \frac{\bar{v}_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{v}_\theta}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta^2}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{v}_\theta \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{2 \bar{v}_\theta \bar{v}_r}{r} + \frac{\partial \bar{v}_\theta \bar{v}_z}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{\bar{v}_\theta}{r} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \theta} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{v}_z^2}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}_z \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{\bar{v}_z \bar{v}_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_z \bar{v}_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

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

در رابطه‌های (۱) تا (۴)، \bar{v}_r ، \bar{v}_θ ، \bar{v}_z به ترتیب مؤلفه‌های سرعت میانگین زمانی در جهات r, θ, z هستند. همچنین \bar{v}'_r ، \bar{v}'_θ ، \bar{v}'_z به ترتیب مؤلفه‌های نوسانی سرعت در جهات z ، θ و r ، جرم مخصوص سیال، ν لزوجت سینماتیکی سیال و p فشار پیزومتریک است.

آنالیز ابعادی یکی از روش‌های شناخت متغیرهای اثرگذار بر پدیده‌های فیزیکی است. تعیین شمار متغیرهای اثرگذار با توجه به پیچیدگی رفتار جریان گردابی به راحتی امکان پذیر نیست. تجزیه و تحلیل ابعادی روشی است که در آن با استفاده از مفهوم همگنی ابعاد متغیرهای اثرگذار بر جریان به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود.

$$Q/Q_0 = f_1(l/D, h/D, \frac{a \times b}{D^2}, F_r, Re, We, k, n) \quad (5)$$

در رابطه بالا Q دبی عبوری، Q_0 دبی مرجع، l محیط دایره شفت که برابر $2\pi R$ و R شعاع شفت، h ارتفاع آب روی شفت، D قطر شفت، n تعداد صفحه‌های ضد گرداب، a و b به ترتیب طول و عرض صفحه‌ها می‌باشند. We ، Re ، F_r

شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب شبکه حل اعمال می‌شود. شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده در مدل را نشان می‌دهد که با توجه به آن، جداره مخزن و آبراهه ورودی آب "Wall (W)"، ورودی آبراهه "Volume Flow Rate (Q)"، کف مخزن که محل خروج آب از شفت است "Out Flow (O)" و سطح آزاد مخزن (در تماس با هوا) و محل اتصال آبراهه ورودی به مخزن "Symmetry (S)" تعریف شدند.

شرایط مرزی Symmetry به این صورت عمل می‌کند که از کف مخزن تا جایی که سیال روی شفت جریان دارد، آب و غیر از آن را اتمسفر در نظر می‌گیرد. استفاده از این نوع شرط مرزی امکان مدل‌سازی هسته هوا در درون شفت را فراهم می‌سازد. وجهی از شبکه که شرط مرزی Wall به آن اختصاص داده شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد و از ورود جریان جلوگیری می‌کند. برای جداره‌ها از این شرط مرزی استفاده شد.

شرط Out Flow با هدف تأثیرناپذیری جریان در شبکه حل از شرایط مرز خروجی ایجاد شده است. جریانی که به این مرز می‌رسد، شرایط در مرز خود را طوری سازگاری می‌دهد که جریان بدون هیچ تأثیری از مرز عبور کند. برای کف

موجود شبیه‌سازی گردید. صفحه‌های به صورت جفت با زاویه ۱۸۰ درجه و در فاصله $R=D/2$ و $z=0$ برای صفحه‌های مستطیل و $R=3D/2$ و $z=-3D/2$ برای صفحه‌های مربع مدل شدند. R فاصله افقی مرکز شفت تا لبه صفحه و z فاصله عمودی تاج شفت تا مرکز صفحه ضدگرداب است (Kabiri-Samani and Borghei, 2013).

برای مرحله مدل‌سازی این تحقیق، صفحه‌های مربعی و دایره‌ای با تعداد، ابعاد، زوایای مختلف و در دبی‌های متفاوت برابر جدول ۱ مدل‌سازی شد. در این تحقیق مشابه با مرحله صحت‌سنجی $R=D/2$, $z=0$ در نظر گرفته شد. صفحه‌های گرداب‌شکن دایره‌ای و مربعی در آغاز هر دو به صورت تکی و پس از آن به صورت دوتایی با زاویه ۱۸۰، سه‌تایی با زاویه ۱۲۰ و چهارتایی با زاویه ۹۰ درجه مدل گردیدند.

شکل ۱ نمای کلی سرریز مدور قائم و صفحه‌های ضدگرداب و جدول ۱ مشخصات آن‌ها را برای صحت‌سنجی میان داده‌های آزمایشگاهی و عددی و در نهایت شبیه‌سازی نهایی نشان می‌دهد.

۳-۲- تعریف شرایط مرزی

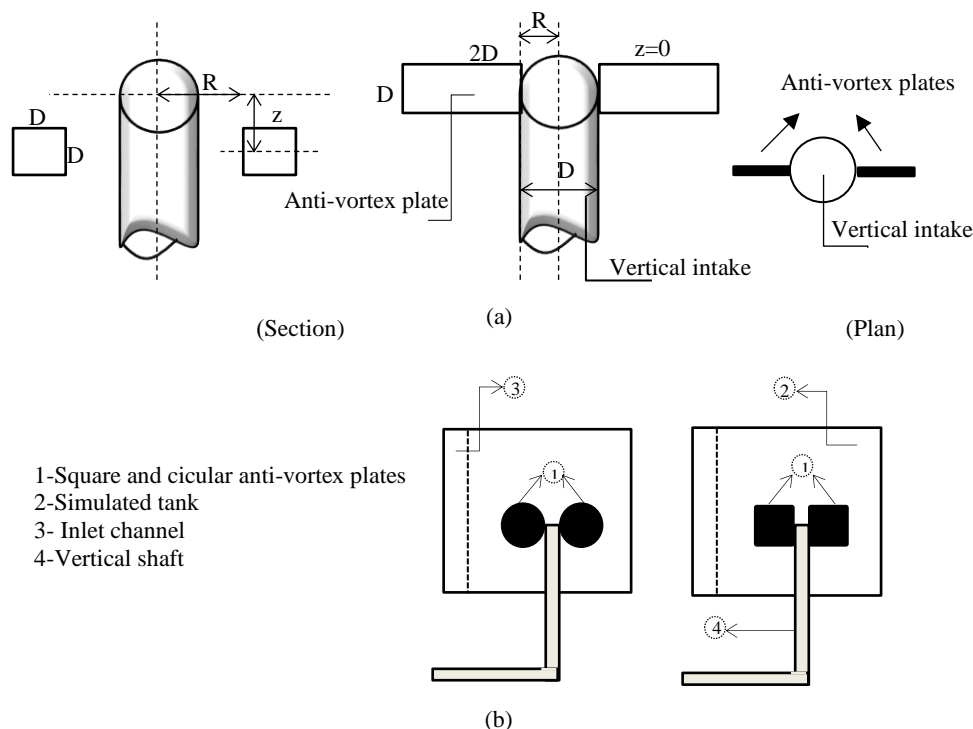

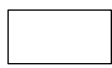




Fig. 1 (a) Plates and pipe intake geometry and position, (b) Simulated in Flow-3D
 شکل ۱ (a) صفحه‌های ضدگرداب، هندسه و موقعیت مدخل ورودی، (b) مدل شده در نرم‌افزار

جدول ۱ متغیرهای مدل در مرحله صحت‌سنجی و شبیه‌سازی عددی

Table 1 Model variables in the validation and numerical simulation

Intake diameter D (cm)	Number of anti-vortex plates (n)	Plates angles (°)	Plates dimensions – diameter (cm)	Plates shapes	Stage of work
10, 7.5	2	180	D×D	 R= 3D/2, z=-3D/2	Validation
	2	180	2D×D	 R= D/2, z=0	
10	1	0	D×D	 R= D/2, z=0	Numerical simulation
	1	0	2D×2D		
	1	0	3D×3D		
	2	180	D×D		
	2	180	2D×2D		
	2	180	3D×3D		
	3	120	D×D		
	3	120	2D×2D		
	3	120	3D×3D		
	4	90	D×D		
	4	90	2D×2D		
	4	90	3D×3D		
	4	90	D	 R= D/2, z=0	

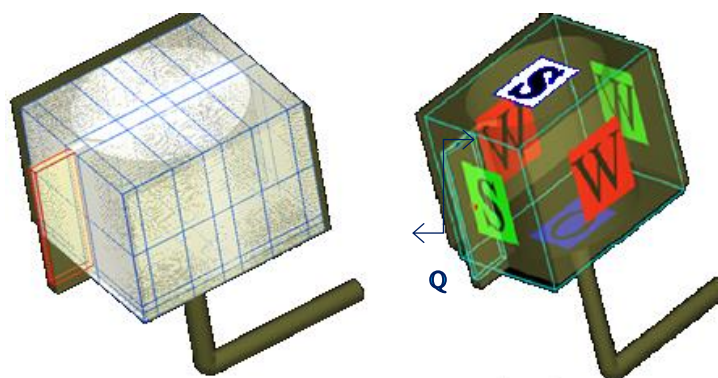


Fig. 2 Boundary condition on the model

شکل ۲ شرایط مرزی تعریف شده روی مدل

مرجع است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Kabiri- Samani and Borghei, 2013):

$$Q_0 = C_D (\pi D^2 / 4) (2gD)^{0.5} \quad (7)$$

در رابطه بالا C_D ضریب دبی که برابر با ۰/۶ است (Novak and Cabelka, 1981)، D قطر شفت قائم (m) و g شتاب گرانش برابر با ۹/۸۱ (m/s^2) است. به‌منظور محاسبه درصد خطای مدل Flow-3D نسبت به مدل آزمایشگاهی برای ارتفاع‌های بدست آمده روی سرریز از رابطه (۸) استفاده شد:

$$\% \text{ Error} = ((h_{\text{exp}} - h_{\text{num}}) / h_{\text{exp}}) * 100 \quad (8)$$

با توجه به شکل ۳ نرم‌افزار با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی شرایط جریان روی شفت قائم بدون صفحه ضد گرداب و یا دارای صفحه گرداب شکن است. میزان بیشترین خطای به دست آمده مربوط به مدل بدون گرداب شکن (no plate) و برابر با ۷/۲۸ درصد و کمترین میزان خطا برابر ۰/۴۰۱ درصد، مربوط به صفحه گرداب شکن مستطیلی با ابعاد $2D \times D$ (P_2) است. با توجه به دقت مناسب نرم‌افزار و اطمینان از شبیه‌سازی صفحه‌های ضدگرداب در ادامه به بررسی تأثیر شکل، ابعاد، تعداد و یا زاویه قرارگیری صفحه‌های گرداب شکن در یک قطر شفت ثابت پرداخته خواهد شد.

مخزن که محل خروج آب از شفت است این شرط مرزی لحاظ شده است. شرط Volume Flow Rate برای تعریف دبی ورودی از یک مرز استفاده می‌شود و در این تحقیق برای ورودی آبراهه در نظر گرفته شد.

لازم به یادآوری است شرایط مرزی برای مرحله صحت‌سنجی و مرحله مدل‌سازی تحقیق به یک صورت می‌باشد. زیرا ابعاد مخزن و شفت، همچنین محل قرارگیری مخزن و آبراهه ورودی ثابت است.

۳- نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی سه مدل مربوط به حالت بدون گرداب شکن (no plate)، یک صفحه گرداب شکن با ابعاد $D \times D$ (P_1) و دو صفحه گرداب شکن با ابعاد $2D \times D$ (P_2) در دو قطر متفاوت شفت ۱۰ و ۷/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی عددی در حالت بدون گرداب شکن برای هر قطر به صورت مجزا ۶ دبی در بازه ۰/۰۰۱۹-۰/۰۰۶۰۴ مترمکعب بر ثانیه) و در حالت‌های P_1 و P_2 ، نیز برای هر قطر ۶ دبی در بازه ۰/۰۱۲۵-۰/۰۰۱۹ مترمکعب بر ثانیه) در نظر گرفته شد. شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی را در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. در این شکل Q دبی خروجی از نرم‌افزار (m^3/s)، h عمق آب روی شفت (m)، D قطر شفت (m) و Q_0 دبی

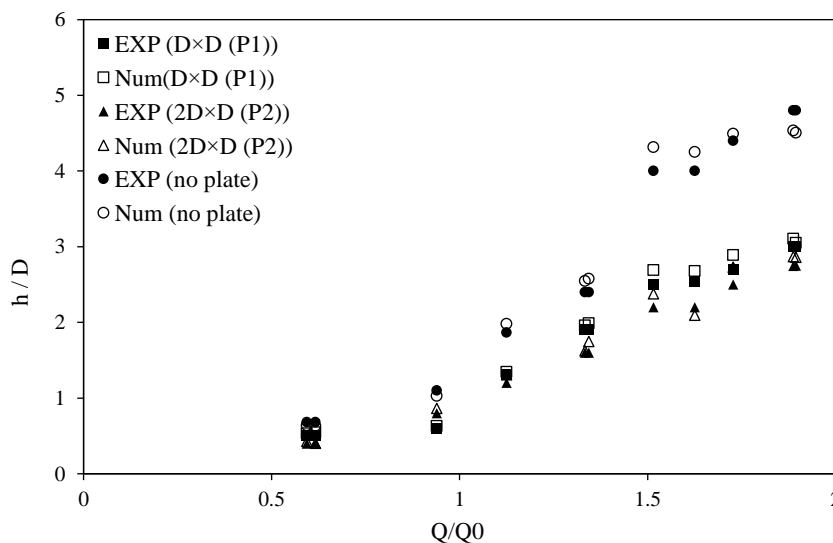


Fig. 3 Dimensionless head-discharge diagram for no plate, one plate (p_1) and couple plates (p_2) in 10 and 7.5 Cm diameter
 شکل ۳ صحت‌سنجی نمودار دبی-اشاره بی‌بعد در حالت بدون گرداب شکن، یک گرداب شکن (P_1) و یک جفت گرداب شکن (P_2) در دو قطر ۱۰ و ۷/۵ سانتی‌متر

آب روی سرریز (h/D) نیز افزایش می‌یابد. برای یک دبی یکسان، در صورت وجود یک صفحه گرداب‌شکن ($n=1$)، صفحه با اندازه $2D \times 2D$ و در حالت‌های $n=2$ ، $n=3$ و $n=4$ ، در صفحه با اندازه $D \times D$ کمترین میزان ارتفاع آب روی سرریز مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴ برای یک صفحه ضد گرداب به ازای دبی‌های کم، ($Q/Q_0 < 1$) صفحه‌های ضد گرداب $D \times D$ و $2D \times 2D$ دارای عملکرد یکسان هستند ولی با افزایش میزان دبی جریان، صفحه ضد گرداب با ابعاد بزرگتر ($2D \times 2D$) عملکرد بهتری در استهلاک انرژی خواهد داشت و سبب گذردهی بهتر جریان از روی سازه می‌شود. در صورت کاربرد بیش از یک صفحه ضد گرداب صفحه‌های با اندازه کوچکتر $D \times D$ عملکرد بهتری داشته و با افزایش تعداد صفحه‌های ($n=4$) این اختلاف عملکرد افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به گذردهی بهتر جریان (میزان بار آب کمتر به ازای یک دبی ثابت) چهار صفحه ضد گرداب با اندازه $D \times D$ به عنوان گزینه بهینه پیشنهاد می‌شود. این بدین معنی است که با افزایش تعداد صفحه‌های، گرداب‌شکن با بعد‌های کوچک‌تر کارآمدتر خواهد بود. به‌طور کلی هر چه میزان هد آب کمتری برای عبور میزان مشخص آب نیاز باشد؛ نشان دهنده بازده و گذردهی بهتر جریان توسط شفت خواهد بود. در نتیجه ارتفاع لازم برای سازه سد و در پی آن حجم مخزن کاهش یافته، که این امر منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود.

نمودار (۴-۵) نشان می‌دهد در شرایط برابر و دبی‌های یکسان، بار مورد نیاز در صفحه‌های ضد گرداب مربعی حدود ۲۰-۷۰ درصد کمتر از صفحه‌های دایره‌ای است. بنابراین صفحه‌های مربعی دارای کارایی بیشتر در کاهش گرداب‌های مخرب ورودی شفت و افزایش ظرفیت آبگذری هستند. در شکل ۵ ($a-b$) به ترتیب دیاگرام بی‌بعد عدد فرود و کلف برای تعداد چهار صفحه گرداب‌شکن مربعی با ابعاد $D \times D$ و دایره‌ای آورده شده است. لازم به یادآوری است در دیگر مدل‌ها نیز روند مشابه نمودارهای مورد بحث است. شکل ۵- a بیانگر آن است که با افزایش عدد کلف (چرخش) میزان دبی کاهش می‌یابد. از مقایسه دو مدل گرداب‌شکن مربع و دایره‌ای مشخص است چهار صفحه مربع با ابعاد $D \times D$ نسبت به چهار صفحه دایره با قطر D عدد کلف

۳-۱- مدل‌سازی شفت با گرداب‌شکن‌های مربع و دایره‌ای

برای مدل‌سازی صفحه‌های گرداب‌شکن مربعی و دایره‌ای، فاصله تاج شفت تا مرکز صفحه گرداب‌شکن (Z) و فاصله مرکز شفت تا لبه صفحه گرداب‌شکن (R) ثابت و برابر با بهترین حالت صفحه‌های گرداب‌شکن در بررسی‌های آزمایشگاهی (Kabiri-Samani and Borghei, 2013)، و برابر با میزان $R=D/2$ و $Z=0$ نظر گرفته شد. برابر جدول ۱ قطر ورودی یا تاج شفت برابر ۱۰ سانتی‌متر است. مدل‌سازی برای گرداب‌شکن‌های مربعی صورت گرفت و تعداد یک، دو و سه صفحه گرداب‌شکن با زاویه‌ها و بعدهای مشخص در جدول ۱ مدل‌سازی شد. با توجه به زمان‌بر بودن شبیه‌سازی‌ها، برای مدل‌سازی صفحه‌های ضد گرداب دایره‌ای بهترین تعداد صفحه گرداب‌شکن مربعی مینا قرار گرفت. لازم به یادآوری است بهترین حالت گرداب‌شکن‌های مربعی تعداد چهار صفحه با ابعاد $D \times D$ به دست آمد، لذا برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی صفحه‌های گرداب‌شکن دایره‌ای نیز برای چهار صفحه با قطر D مدل‌سازی شد.

۳-۲- نمودار دبی- اشل بی‌بعد

با توجه به شکل ۳ صفحه‌های ضد گرداب باعث افزایش عملکرد سرریز سیفونی و کاهش ارتفاع آب روی تاج می‌شود. افزون بر آن مشخص است در دبی‌های بالا (محدوده $0.2 < Q/Q_0 < 0.5$) که عملکرد سرریز کاهش می‌یابد تأثیر صفحه‌های ضد گرداب بیشتر مشخص گشته و باعث بهبود عملکرد سرریز سیفونی می‌شود. در ادامه به بررسی تأثیر تعداد و شکل صفحه‌های گرداب‌شکن پرداخته شده است.

شکل ۴ رابطه بین دبی و عمق آب روی شفت را برای صفحه‌های ضد گرداب مربعی به تعداد یک، دو، سه و چهار صفحه (۴، ۳، ۲، ۱) در ۵ دبی متفاوت (۰/۰۰۴۰۷، ۰/۰۰۶۲، ۰/۰۰۸۸، ۰/۰۱، ۰/۰۱۲ مترمکعب بر ثانیه) و همچنین برای صفحه گرداب‌شکن دایره‌ای با $n=4$ در دبی مشابه، به صورت بی‌بعد نشان می‌دهد.

همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، با افزایش دبی عمق

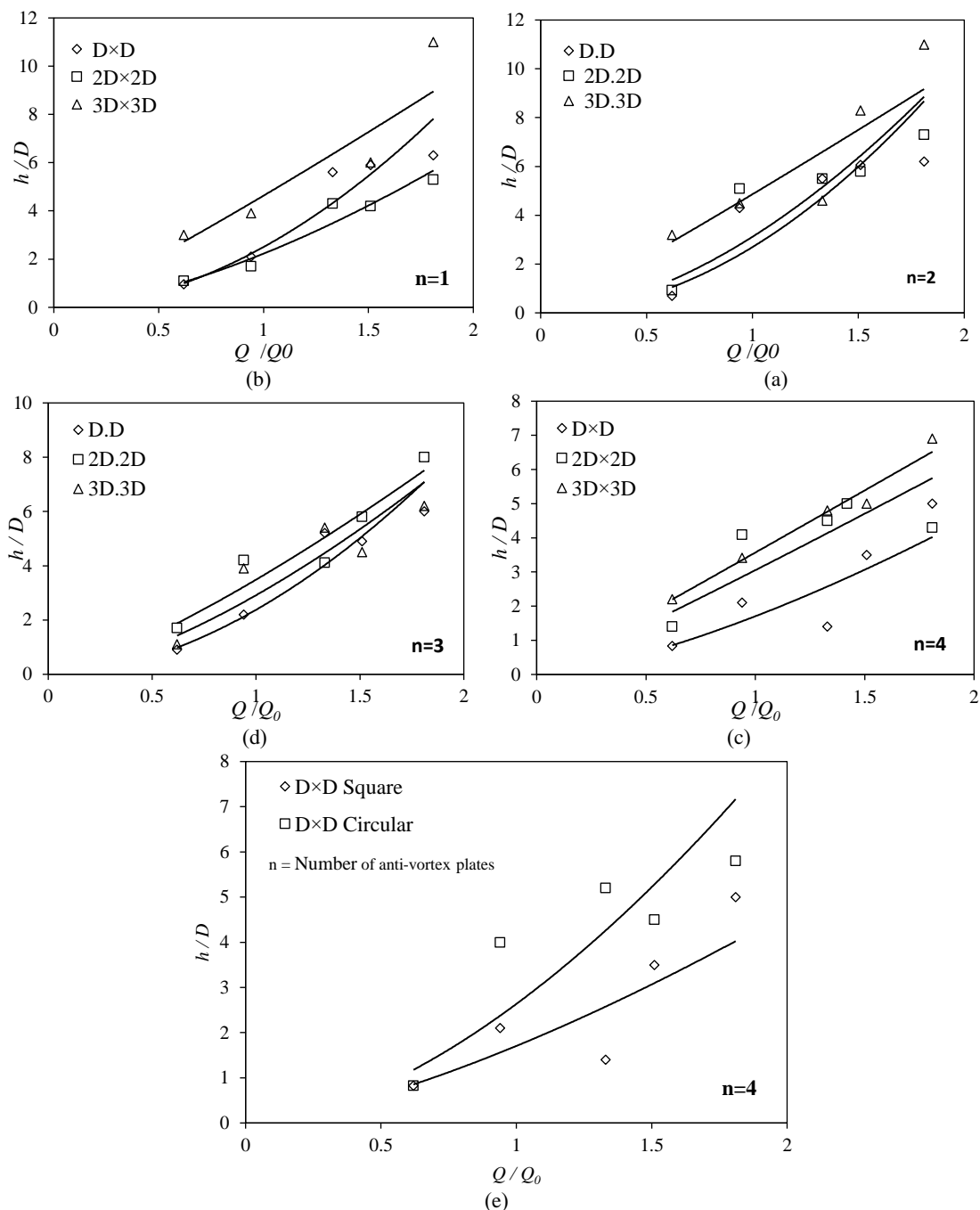


Fig. 4 Dimensionless head-discharge diagram for (a) One plate (0°), (b) Couple plates (180°), (c) Three plates (120°), (d) Four plates (90°) for square plates and (e) Four plates (90°) for circular plates

شکل ۴ نمودار دبی-اسل بی‌بعد برای حالات (a) یک گرداب‌شکن (زاویه 0°), (b) دو گرداب‌شکن (زاویه 180°), (c) سه گرداب‌شکن (زاویه 120°), (d) چهار گرداب‌شکن (زاویه 90°) برای صفحه‌های دایره (زاویه 90°)، (e) چهار گرداب‌شکن (زاویه 90°) برای صفحه‌های مربع و

مربعی اعداد فرود کوچکتری را در یک مقدار ثابت دبی عبوری، نسبت به صفحه‌های دایره‌ای دارد. به عبارت دیگر شرایط جریان فوق بحرانی در حالت استفاده از صفحه‌های مربعی به تعویق خواهد افتاد و این امر باعث می‌شود میزان گذردهی آب در صفحه‌های مربعی بیشتر باشد. به بیان دیگر موفقیت صفحه‌های مربعی در استهلاک انرژی و کاهش

کمتر و در نتیجه میزان گذردهی بهتر آب را خواهد داشت. شکل (b-5) تغییر پذیری‌های عدد فرود در برابر دبی عبوری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش عدد فرود و در شرایط جریان زیر بحرانی میزان گذردهی آب افزایش داشته، اما پس از تغییر شرایط جریان به حالت فوق بحرانی میزان دبی جریان کاهش می‌یابد. به طور کلی صفحه‌های

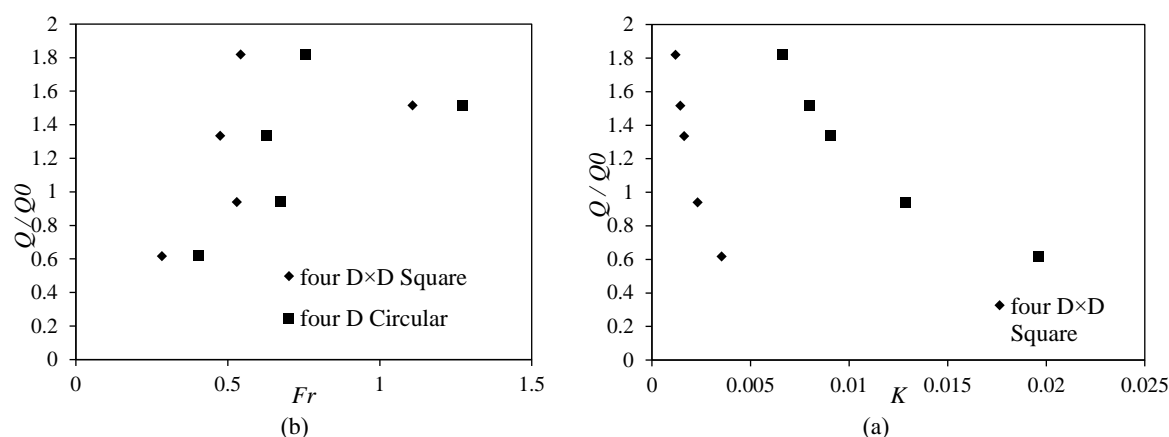


Fig. 5 discharge versus (a) Froude number, (b) Kolf number

شکل ۵ نمودارهای عدد فرود (a)، عدد کلف (b)، عدد کلف (K)

و کاهش گردابه‌ها نسبت به صفحه‌های دایره‌ای بیشتر است.

۳-۳- نیمرخ‌های فشار

به‌طور کلی همانگونه که در بخش مقدمه بیان شد سه کنترل در سرریز مدور قائم وجود دارد: کنترل در تاج که در دبی‌های پایین رخ می‌دهد و در این حالت جریان ریزشی به دیواره مجرای قائم می‌چسبد و مجرا به‌صورت نیمه‌پر در می‌آید. در این شرایط در مرکز مجرا هوا وجود دارد و جریان با سطح آزاد برقرار خواهد بود. با افزایش دبی و یا ارتفاع آب روی ورودی، آب سرریز شده از روی تاج ضخیم‌تر شده و به صورت یک جت قائم در می‌آید و با سفره ریزشی آب تلاقی می‌کند. پس از تشکیل جت در قسمت بالایی تیغه ریزش یک منطقه برآمده تشکیل گشته و در این حالت نقطه کنترل از تاج سرریز به گلوگاهی در تراز پایینی شفت انتقال می‌یابد. هواگیری در این رژیم از طریق دهانه ورودی قطع می‌شود ولی در تونل افقی جریان بصورت آزاد برقرار است؛ به این جریان، جریان روزنه‌ای (کنترل در گلوگاه) می‌گویند. پس از تشکیل جریان روزنه‌ای با افزایش تراز آب مکان تشکیل گلوگاه به قسمت پایینی شفت و در نهایت به تونل افقی منتقل می‌شود. در این رژیم از جریان که به جریان لوله‌ای یا تحت فشار معروف است منطقه برآمدگی روی تاج مستغرق گشته و یک فرورفتگی و گرداب کوچک در سطح آب باقی می‌ماند. در این حالت سطح مقطع جریان در سرریز و محور خروجی به طور کامل پر بوده و از این به بعد سرریز به حالت مستغرق عمل می‌کند. برای بررسی نوع جریان در

ادامه نیمرخ‌های فشار و سطح آب ارزیابی می‌شود. با توجه به عملکرد بهتر چهار صفحه گرداب‌شکن نسبت به دیگر تعداد صفحه‌های در شکل ۶ نیمرخ‌های فشار پیزومتریک درون شفت قائم برای تعداد چهار صفحه ضدگرداب و به ازای همه ابعاد صفحه‌های گرداب‌شکن یعنی اندازه‌های $D \times D$ ، $2D \times 2D$ و $3D \times 3D$ برای سه دبی کمینه ($4/7$)، میانگین ($8/8$) و بیشینه (12) لیتر بر ثانیه برای صفحه‌های مربعی آورده شده است. برای مقایسه تأثیر شکل صفحه‌های گرداب‌شکن، نیمرخ‌های فشار با چهار صفحه گرداب‌شکن دایره‌ای نیز برای اندازه $D \times D$ برداشت شد. محور قائم فشار بر حسب پاسکال و محور افقی فاصله شعاعی از جداره درونی مخزن بر حسب متر را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است ضخامت مخزن ۸ سانتی‌متر بوده و مرکز شفت در فاصله $r = 8/3$ $D = 0.833$ m قرار گرفته است. تغییرپذیری‌های فشار از مرکز شفت تا جایی که سطح آب یکنواخت گشته بررسی شد.

همان‌طور که از شکل ۶-ا مشخص است محدوده فشار برای صفحه‌های گرداب‌شکن با اندازه $D \times D$ و در دبی بیشینه از صفر تا ۱۶۰۰ پاسکال تغییر می‌کند. با توجه به شکل در کمترین دبی ($4/7$ لیتر بر ثانیه) با اندازه‌های یاد شده برای صفحه گرداب‌شکن، به دلیل کم بودن هد آب روی تاج میزان فشار تا مقدار صفر در مرکز شفت کاهش می‌یابد اما هیچ فشار منفی در شفت ایجاد نمی‌شود، این در حالی است که در سایر ابعاد صفحه گرداب‌شکن فشار منفی حتی در دبی حداکثر نیز مشاهده شده است. بنابراین می‌توان بیان کرد

یا منفی شده است. لازم به یادآوری است در شرایطی که فشار در دهانه شفت از فشار اتمسفر کمتر شود، فشار منفی ایجاد شده و باعث ایجاد مکش و سرو صدا و لرزش در مدل‌های واقعی می‌شود.

شکل (۶-d) نشان‌دهنده نیمرخ فشار در حالت استفاده از صفحه‌های دایره‌ای است. از مقایسه صفحه‌های گرداب‌شکن مربعی با دایره‌ای مشخص است که گرداب‌شکن دایره‌ای نسبت به گرداب‌شکن چهارگوشه با بعدهای $2D \times 2D$ و $3D \times 3D$ دارای فشار کمتری بوده و با افزایش دبی تأثیر آن مشهودتر است. با توجه به آنکه صفحه‌های ضد گرداب مربعی

چهار صفحه گرداب‌شکن با ابعاد $D \times D$ به خوبی قادر به کاهش گردابه‌های سطحی خواهد بود. همچنین کارایی این صفحه‌های در دبی‌های بالا مشهودتر است.

به‌طور کلی با افزایش میزان دبی میزان فشار نیز افزایش یافته است. با توجه به شکل صفحه‌های ضدگرداب با ابعاد $2D \times 2D$ و $3D \times 3D$ به ازای مقدار دبی یکسان از نظر میزان فشار تا حدودی یکسان عمل می‌کند.

به‌طور کلی به دلیل وجود تیغه ریزشی جریان، میزان‌های فشار از سمت دیواره‌های مخزن به طرف مرکز شفت روند کاهشی داشته و در بعضی از حالت‌ها فشار به صفر رسیده

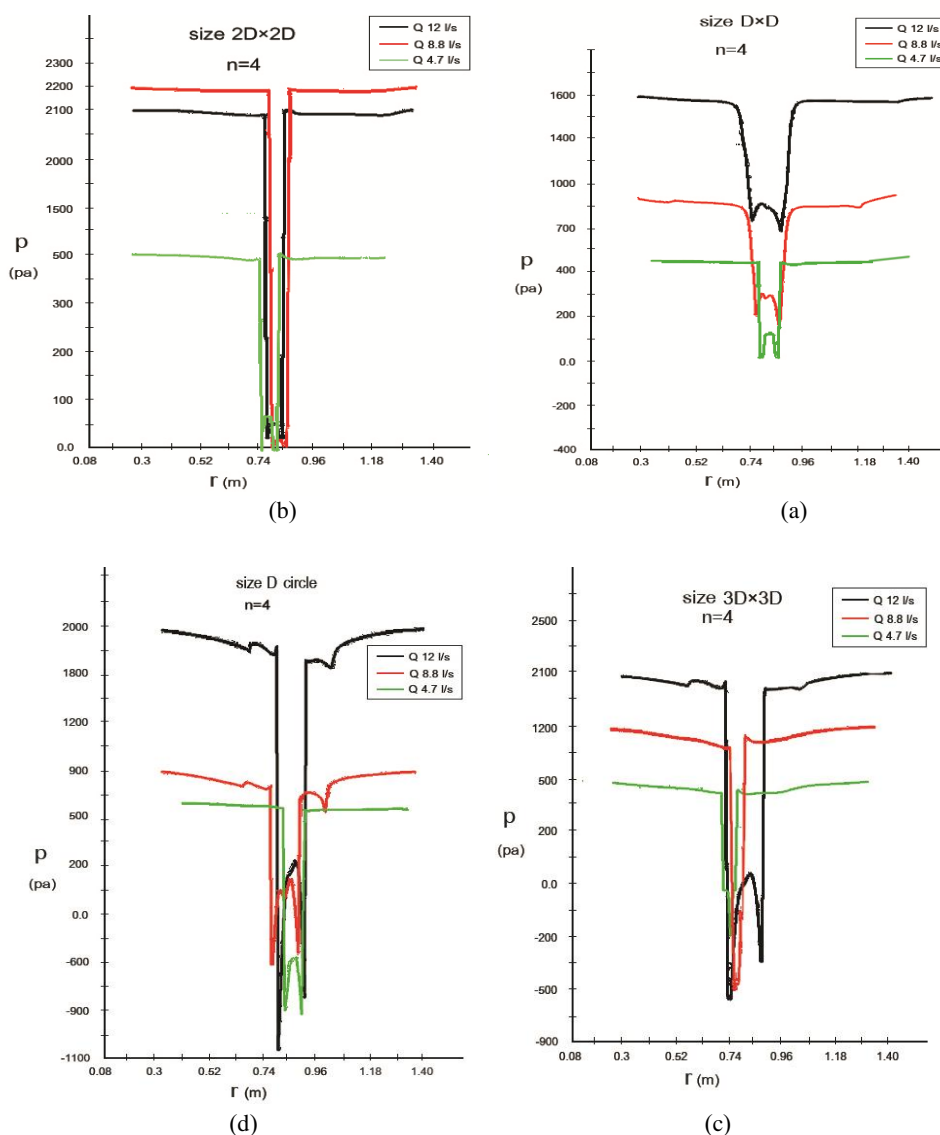


Fig. 6 Pressure profiles for four anti-vortex plates, (a) $D \times D$, (b) $2D \times 2D$, (c) $3D \times 3D$ for square plates and (d) $D \times D$ for circular plates

شکل ۶ نیمرخ‌های فشار برای چهار گرداب‌شکن برای حالت‌های (a) $D \times D$ ، (b) $2D \times 2D$ ، (c) $3D \times 3D$ برای صفحه‌های مربع و (d) $D \times D$ برای صفحه‌های دایره

گرداب‌شکن با چهار صفحه در هیچ یک از دبی‌های مورد بررسی فشار منفی رخ نداده است. بنابراین بهترین گزینه از نظر تعداد، ۴ صفحه گرداب‌شکن با بعدهای $D \times D$ است.

۳-۴- نیمرخ‌های سطح آب

ارتفاع سد و هد آب موجود در مخزن سد تابع رفتار هیدرولیکی سرریز است. نیمرخ سطح آزاد آب در تعیین میزان ارتفاع آزاد سد، از عوامل کلیدی به شمار می‌رود. لذا در این بخش نیمرخ‌های سطح آب برای بهترین تعداد صفحه‌های ضدگرداب یعنی $n=4$ و در همه حالت‌های آن

نسبت به دایره‌ای در شرایط برابر از توسعه فشار منفی درون شفت قائم جلوگیری کرده و گرداب‌شکن مربعی با اندازه $D \times D$ دارای فشار کمتری نسبت به گرداب‌شکن دایره‌ای است می‌توان بیان داشت گرداب‌شکن مربعی دارای عملکرد بهتری است.

شکل ۷ نیمرخ‌های فشار را برای تعداد یک، دو، سه و چهار صفحه گرداب‌شکن در سایز $D \times D$ نشان می‌دهد. نمودارها در شکل ۷-a بیانگر آن هستند که به ازای $n=1, 2, 3$ فشار منفی در مرکز شفت تشکیل شده که باعث جدا شدن جریان و بروز جدارخوردگی خواهد شد. با توجه به شکل برای

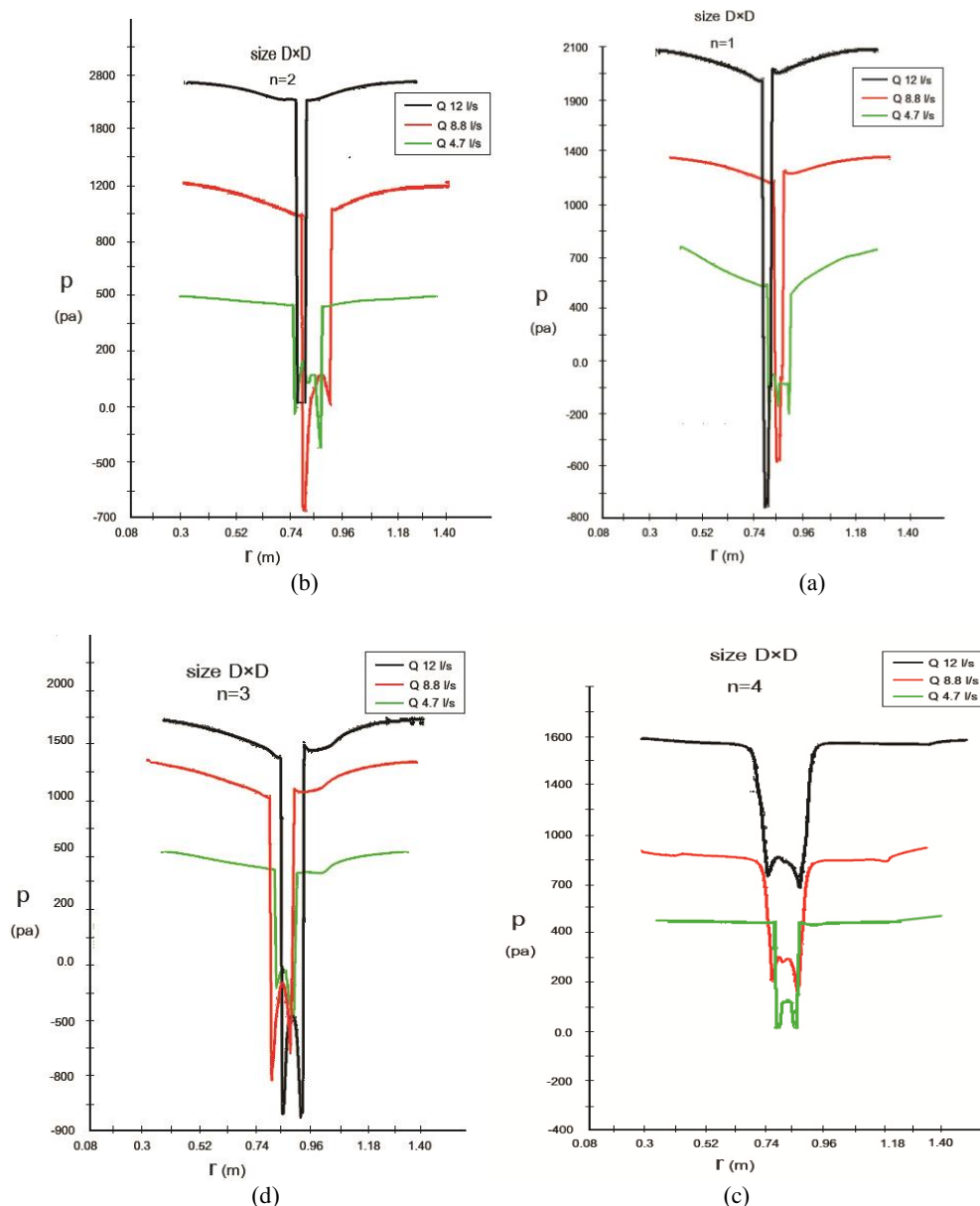


Fig. 7 Pressure profiles in $D \times D$ anti-vortex plate for a) $n=1$ b) $n=2$ c) $n=3$ d) $n=4$ Anti-vortex plates
 شکل ۷ نیمرخ‌های فشار برای صفحه ضدگرداب با اندازه $D \times D$ در حالت‌های (a) $n=1$ ، (b) $n=2$ ، (c) $n=3$ و (d) $n=4$ گرداب‌شکن

با دیگر مدل‌ها این مدل دارای نیمرخ سطح آب پایین‌تری است، که نشان دهنده گذردهی بیشتر آب توسط شفت می‌باشد. به عبارت دیگر این مدل از صفحه‌های ضدگرداب به خوبی توانسته گردابه‌های سطحی را کاهش دهد و ظرفیت عبوردهی آب توسط سرریز را افزایش دهد.

در شکل‌های $a-8$ و $b-8$ عمق آب روی سرریز نسبت به شکل $a-8$ بیشتر است. در حالت چهار گرداب‌شکن با اندازه $2D \times 2D$ میزان گذردهی جریان در دبی $8/8$ و 12 لیتر بر ثانیه کاهش و نیمرخ سطح آب نزدیک به ثابت گشته است،

یعنی اندازه‌های $D \times D$ ، $2D \times 2D$ و $3D \times 3D$ بررسی شده است.

شکل 8 ، نیمرخ سطح آب را برای صفحه‌های ضد گرداب مربعی و دایره‌ای نشان می‌دهد. در این شکل نیز مرکز شفت در فاصله $r = \frac{1}{3}D = 0.33D$ قرار گرفته است. شکل $8-a$ الف مربوط به مدل با 4 صفحه ضد گرداب با اندازه‌های $D \times D$ است. با توجه به شکل در هیچ یک از دبی‌های مورد بررسی پس‌زدگی جریان برای این مدل رخ نداده است که گویای رخداد جریان آزاد و روزنه‌ای روی سرریز است. در مقایسه

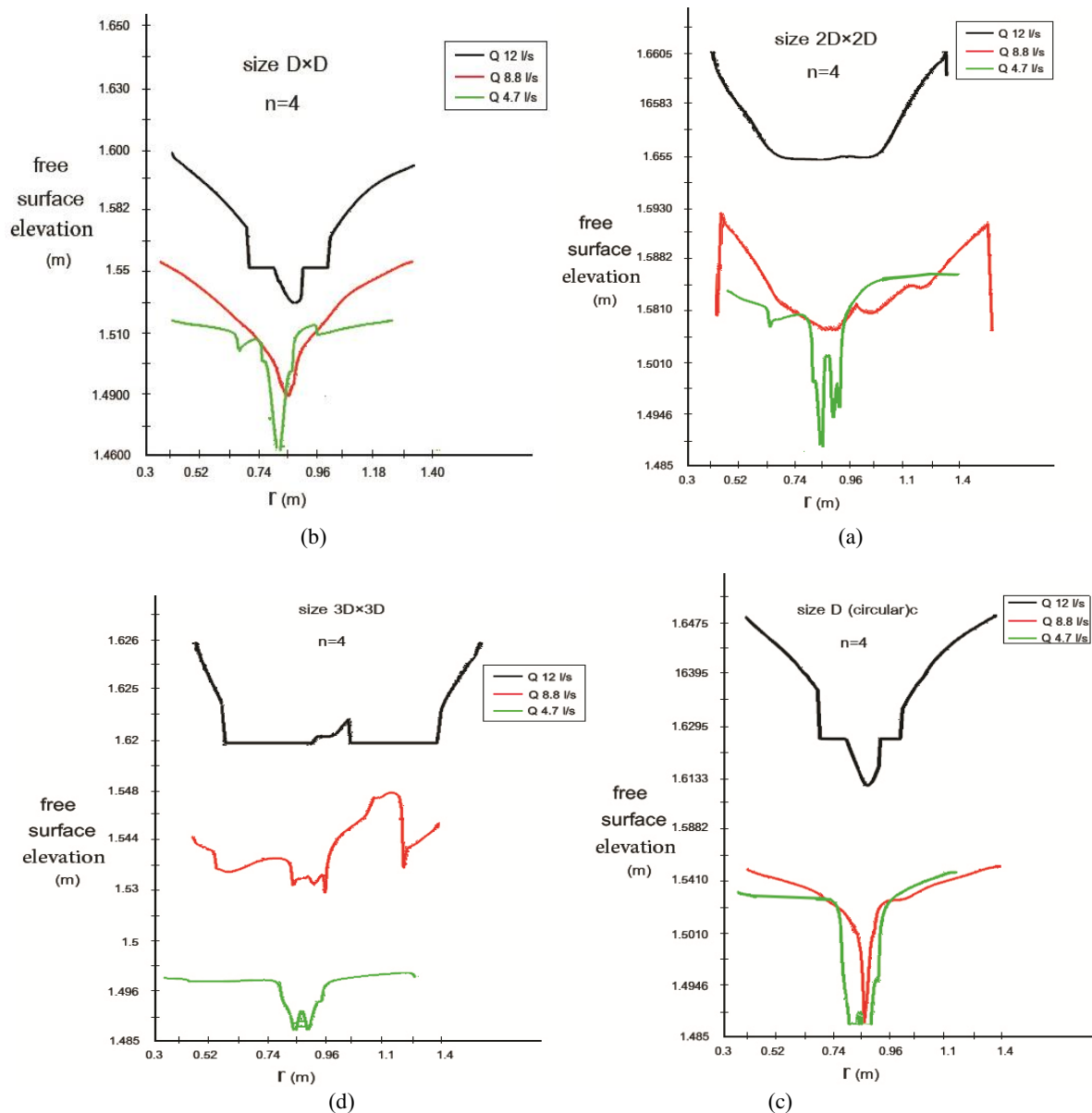


Fig. 8 Free surface profiles for four square anti-vortex plates in (a) $D \times D$, (b) $2D \times 2D$, (c) $3D \times 3D$, (d) $D \times D$ circular plates شکل 8 نیمرخ های سطح آب برای چهار گرداب‌شکن مربعی در بعدهای $a-8$ ، $2D \times 2D$ (b)، $D \times D$ (a) و $3D \times 3D$ (c) و چهار گرداب‌شکن دایره‌ای با بعدهای $D \times D$ (d)

جریان گردابی و توسعه آن به تأخیر می‌افتد. به طور کلی هرچه سازه گرداب‌شکن کارآمدتر باشد، به علت قابلیت بیشتر استهلاک جریان گردابی، مؤلفه مماسی میدان سرعت کاهش یافته و افزایش مؤلفه شعاعی سرعت را به دنبال دارد. با توجه به شکل بیشترین سرعت های شعاعی برابر با $0.9/0$ و $0.1/0$ متر بر ثانیه به ترتیب مربوط به گرداب‌شکن مربعی روی سرریز و روی سطح آب به دست آمد. افزون بر آن در صفحه های دایره‌ای احتمال رخداد سرعت منفی و در نتیجه جدایش جریان روی تاج بیشتر دیده می‌شود که این امر نشان‌دهنده عملکرد بالاتر گرداب‌شکن مربعی با بعد های $D \times D$ نسبت به دایره‌ای است.

با دور شدن از محور شفت (محدوده $10D < r < 13D$)، شدت جریان ریزشی مستقیم به درون شفت کمتر شده و جریان به سمت حرکت دورانی متمایل گشته و مولفه مماسی سرعت افزایش و در نتیجه میزان سرعت شعاعی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی در هر دو مدل صفحه‌های ضدگرداب (دایره و مربع) در محدوده مرکز شفت بیشترین مقدار سرعت شعاعی رخ داده است. مولفه شعاعی سرعت مربوط به صفحه های ضد گرداب مربعی بیشتر از صفحه های ضدگرداب دایره‌ای است و تا فاصله دورتری از شفت جریان شعاعی وجود دارد که نشان‌دهنده قابلیت بهتر صفحه های مربعی در استهلاک انرژی است.

شکل ۹-۹ نمودار تغییرپذیری سرعت مماسی از مرکز شفت تا دیواره مخزن مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. نمودارها گویای آن هستند که در محدوده $8.8D < r < 9.18D$ سرعت مماسی کمترین است، که دقیقاً در محدوده بیشترین میزان سرعت شعاعی و محل رخداد جریان ریزشی مستقیم به درون شفت است

در شکل ۹-۹-۱ نیمرخ‌های سرعت قائم آورده شده است. بطور کلی به دلیل نوسان های سطح آب، مقادیر سرعت قائم روند یکنواختی ندارند تا جایی که سرعت آن قدر کاهش می‌یابد که منفی شده و برگشت جریان و آغاز تشکیل هسته هوا را به دنبال خواهد داشت. نمودارها گویای آن هستند که در مرکز شفت که مرکز هسته هوا است، سرعت قائم در کمترین میزان خود قرار دارد و در محدوده نزدیک به شفت (پیرامون صفحه های ضدگرداب) سرعت

این در حالی است که در گرداب‌شکن با بعد های $3D \times 3D$ در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه، ضخامت سفره آب روی تاج سرریز آن قدر زیاد شده که سرریز به کلی غرق شد و آب در شفت به یک جت قائم تبدیل شده است. با توجه به شکل ۸-۸-۱ نه تنها روی سطح آب گودی یا هسته هوا تشکیل نشده، بلکه به علت مستغرق بودن سرریز در محل مرکز شفت قائم، یک برآمدگی کوچک نیز در سطح آب ایجاد شده است (جوشش آب در نتیجه استغراق کامل سرریز). شکل ۸-۸-۲ نیز نشان می‌دهد اگرچه در گرداب‌شکن دایره‌ای در هیچ یک از دبی‌های مورد بررسی پس‌زدگی جریان رخ نداده و عملکرد بهتری نسبت به صفحه های ضدگرداب مربعی با بعد های $2D \times 2D$ و $3D \times 3D$ دارد اما نسبت به صفحه ضد گرداب مربعی با بعد های $D \times D$ عمق آب بیشتری روی سرریز وجود داشته که دلیل بر عملکرد ضعیف این مدل نسبت به مدل مربعی با ابعاد $D \times D$ می‌باشد.

۳-۵- نیمرخ‌های سرعت

میدان جریان گردابی شامل سه مؤلفه سرعت شعاعی، مماسی و قائم است. برداشت نیمرخ‌های سرعت برای بهترین حالت صفحه های ضدگرداب یعنی تعداد چهار گرداب‌شکن مربعی با ابعاد $D \times D$ و برای دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه و مقایسه آن با صفحه‌های دایره‌ای در شرایط برابر انجام شده است. برای نمایش بهتر نیمرخ های سرعت، برداشت داده‌ها در دو مقطع، یکی روی تاج سرریز و دیگری روی سطح آزاد آب در فاصله بین مرکز شفت تا دیواره مخزن (محدوده $8.8D < r < 13D$)، مرکز شفت در $r = 8/3D = 0.83$ (m) قرار دارد) انجام شده است. از شکل ۹ مشخص است، بیشترین میزان سرعت مربوط به مولفه شعاعی سرعت است. با توجه به شکل ۹-۹-۲ در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه در محدوده $r \approx 8.8D$ که به تقریب متناظر با آغاز مقطع ریزش آب به درون شفت بوده، سرعت شعاعی در بیشینه مقدار خود قرار دارد. در جریانی با گرداب آزاد و اجباری، تغییرات سرعت تا منطقه‌ی گرداب اجباری افزایشی و در ناحیه‌ی گرداب آزاد کاهش می‌یابد. با توجه به شکل تا فاصله تقریبی $r = 0.97m$ گرداب اجباری و پس از آن شرایط گرداب آزاد حاکم است. هرچه شیب نیمرخ سرعت در راستای شعاعی کمتر شود، تشکیل

را بهینه دانست که سرریز افزون بر دارا بودن بیشترین دبی عبوری در کمترین ارتفاع آب روی تاج، آشفتگی جریان روی سرریز نیز کمترین باشد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان ادعان داشت گرداب‌شکن‌های مربعی با ابعاد و تعداد مناسب دارای کارایی بالاتر نسبت به دایره‌ای است.

قائم افزایش یافته است. با دور شدن از اطراف شفت و گرداب‌شکن‌ها و به سمت دیواره مخزن، سرعت قائم کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل وجود جریان گردابی این آشفتگی‌ها به ویژه در پیرامون شفت افزایش یافته و موجب تغییر پذیری سرعت در راستای قائم می‌گردند. به طور کلی در صورتی می‌توان مدلی از صفحه‌های ضدگرداب

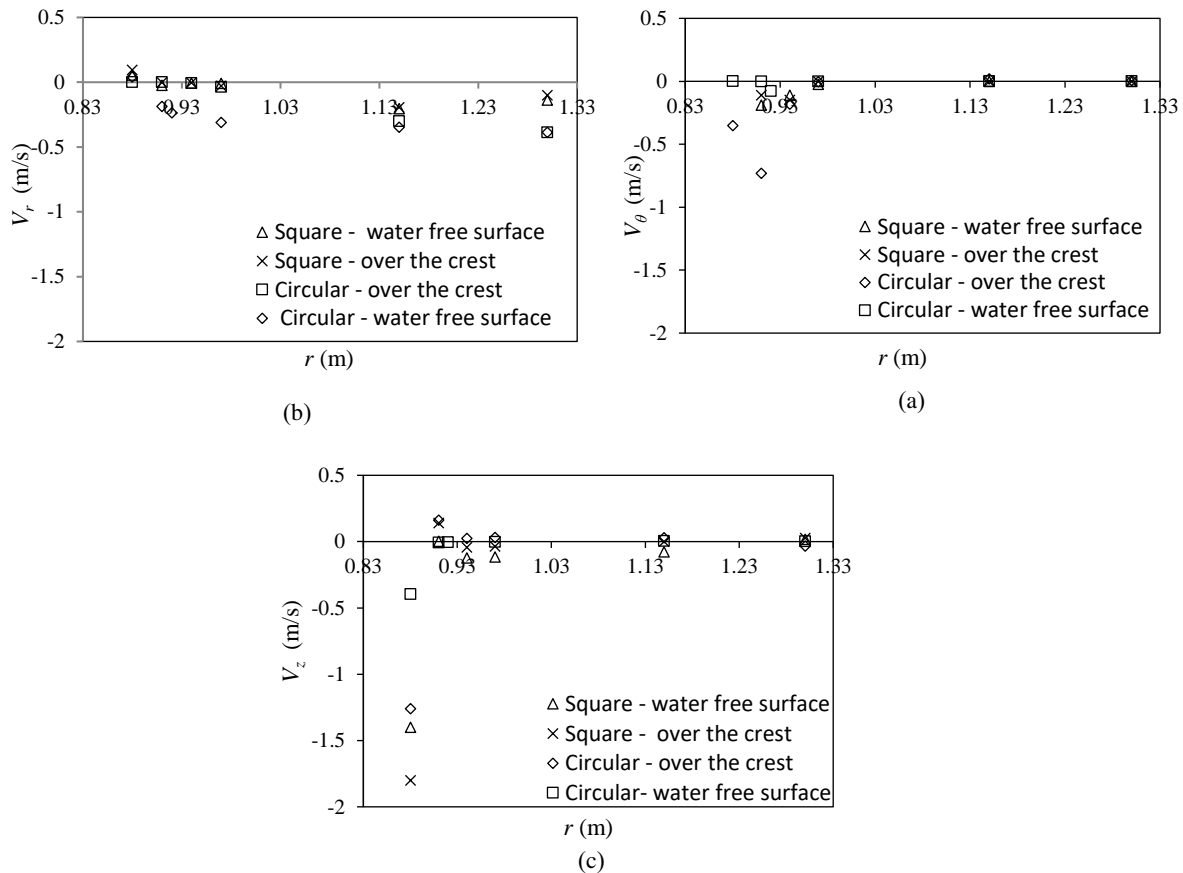


Fig. 9 Velocity profiles a) Radial b) Tangential c) Vertical for four square and circular Anti-vortex plates in $D \times D$ size and 12 l/s discharge

شکل ۹ نیمرخ‌های سرعت (a) شعاعی، (b) مماسی و (c) قائم برای چهار گرداب‌شکن مربع و دایره‌ای در بعدهای $D \times D$ و در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه

دایره‌ای با ابعاد و تعداد متغیر برای کاهش نیروی گردابه‌ها استفاده گردید.

با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی، چهار گرداب‌شکن با بعد های $D \times D$ ، نتیجه بهتری از نظر نیمرخ‌های فشار، نسبت به تعداد یک، دو و سه گرداب‌شکن را به خود اختصاص داده است. علت آن تشکیل نشدن فشار منفی و پدیده جدار خوردگی در این مدل از صفحه‌های گرداب‌شکن است. همچنین نمودارهای دبی-اشل بیانگر آن بودند که تعداد

۴- نتیجه‌گیری

یکی از انواع بسیار مهم و کاربردی سرریزها، سرریز مدور قائم است. از ویژگی‌های هیدرولیکی این سرریز می‌توان به تشکیل جریان گردابی در ورودی آن اشاره کرد که باعث کاهش راندمان این سازه کلیدی شده می‌شود. یکی از روش‌های مهار گردابه‌ها به کارگیری صفحه‌های ضدگرداب است که تأثیر چشمگیری بر کاهش نیروی جریان گردابی دارد. در این بررسی از صفحه‌های گرداب‌شکن مربعی و

z	فاصله عمودی تا مرکز گرداب‌شکن (m)
σ	کشش سطحی
ν	لزوجت سینماتیکی سیال
Γ	عدد چرخش
ρ	جرم مخصوص سیال
Δt	گام زمانی

۶- منبع‌ها

Anwar, H.O., Weller, J.A. and Amphlett, M.B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *J. Hydraulic Research*, 16(2), 95-105.

Afshar, A. and Niksefat, Gh.R. (1995). Design of hydraulic structures of small dams. Iran University of Science and Technology. Iran, 320P. (In Persian)

Bagheri, A., Yousefvand, F. and Tavana, M.H. (2012). The effect of polyhedral spillway crests on the discharge coefficient of the morning glory spillway at the crest control. National Conference of Structures, Roads and Architecture., IAU Chalooos Branch. (In Persian)

Daggett, L.L. and Keulegan, G.H. (1974). Similitude Conditions in Free-Surface Vortex Formations. *J. Hydraulic Division. ASCE*, 100(11), 1565-1580.

Henderson, F.M. (1966). Open channel flow. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Jain, A.K., Ranga Raju, K.G. and Garde, R.J. (1978). Vortex formation at vertical pipe intakes. *J. Hydraulic Eng.*, 104(10), 1429-1445.

Kabiri-Samani, A.R. (2001). Optimum design of Anti-Vortex plates at Vertical intakes, MSc Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)

Kashkoli, H.A., Sedghi, H., Jahromi, H.M. and Aghamajidi, R. (2013). Simultaneous study effect of guide pier and stepped chamber on hydraulic behavior of morning glory spillway. *World Applied Sciences Journal*, 21, 548-557.

Kabiri-Samani, A.R. and Borghei, S.M. (2013). Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex. *Scientia Iranica*, 20(20), 251-258.

Kashkaki, Z., Banzhad, H. and Heidari, M. (2016). Influence of Vortex Breakers on Hydraulic Flow in Vertical Shaft Spillways. 14nd Iranian Hydraulics Conference, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran. (In Persian)

Novak, P. and Cabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering. Physical principles and design applications. Pitman, London.

چهار صفحه ضد گرداب مربعی در بعدهای $D \times D$ در دبی‌های یکسان، کمترین میزان ارتفاع آب روی سرریز را دارند. از بررسی صورت گرفته نیمرخ‌های سرعت مشخص شد، مؤلفه شعاعی سرعت در حالت استفاده از ۴ صفحه گرداب‌شکن مربعی با بعدهای $D \times D$ بیشترین میزان را داشته که نشان‌دهنده قابلیت این سازه در استهلاک جریان گردابی و کاهش مؤلفه مماسی میدان سرعت است.

با توجه به یافته‌های این بررسی و کارایی قابل توجه چهار صفحه گرداب‌شکن مربعی با ابعاد $D \times D$ ، داشتن ساختار ساده و با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، این سازه می‌تواند گزینه مناسبی برای ورودی سرریزهای مدور قائم به شمار آید. به عنوان یک ضرورت در بررسی‌های آتی می‌توان به بررسی ساختار جریان و توزیع تنش‌ها روی سرریز سیفونی با گرداب‌شکن‌ها پرداخت و تأثیر صفحه‌های ضد گرداب بر الگوی جریان را دقیق‌تر بررسی کرد.

۵- فهرست نشانه‌ها

D	قطر شفت قائم (m)
F_r	عدد فرود
h	عمق آب روی شفت (m)
K	عدد کلف
l	محیط دایره شفت ($2\pi R$)
n	تعداد گرداب‌شکن
P	فشار پیزومتریک (pa)
Q	دبی جریان (m^3/s)
Q_0	دبی مرجع (m^3/s)
r	فاصله افقی محدوده قرارگیری شفت در مخزن
R	فاصله افقی تا لبه شفت (m)
R_e	عدد رینولدز
V_r, V_θ, V_z	مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های قائم، مماسی و شعاعی (r, θ, z)
$\overline{V_r}, \overline{V_\theta}, \overline{V_z}$	مؤلفه‌های سرعت متوسط زمانی در جهت‌های قائم، مماسی و شعاعی (r, θ, z)
$\overline{V'_r}, \overline{V'_\theta}, \overline{V'_z}$	مؤلفه‌های نوسانی سرعت در جهت‌های r, θ, z
W_e	عدد وبر

- Posey, C.J. and Hsu, H.C. (1950). How the vortex affects orifice discharge. *Engineering news-record*.
- Rankine, W.J.M. (1858). *Manual of applied mechanics*. London: Griffin.
- Sarkardeh, H., Jabbari, E., Zarrati, A.R. and Tavakkol, S. (2013). Velocity field in a reservoir in the presence of an air-core vortex. *J. Water Management*, 164(4), 193-200.
- Shemshi, R. and Kabiri-Samani, A. (2017). Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets. *J. Hydraulic Research*, 55(2), 248-258.
- Trivellato, F. (2010). Anti-vortex devices: Laser measurements of the flow and functioning. *Optic and lasers engineering*, 48(24), 589-599.
- Wang, Y.K., Jiang, C.B. and Liang, D.F. (2010). Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes. *J. Hydrodynamics*, 22(5), 696-701.
- Nohani, E. and Mousavi-Jahromi, S.H. (2010). The Effect of Number and Thickness of Anti-Vortex Plates on the Morning glory Spillway Discharge Coefficient. National Conference of Water, Soil, Plant Science and Agricultural Machinery., IAU Dezful Branch. (In Persian)
- Nohani, E. (2014). An experimental study on the effect of vortex breakers on discharge coefficient for the shaft spillways with sharp edge and wide edge. *J. Civil Engineering and Urbanism*, 4(5), 546-549.
- Nohani, E., Partovi-Zia, V. and Akbari, H. (2015). Numerical Study of the Impact of Anti-Vortex Plates on Flow Pattern in Morning Glory Spillways. 2nd International Conference on New Research Achievemets in Civil Engineering, Architecture and Urban Management., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Nasiri, s., Kabiri-Samani, A.R. and Asghari, K. (2016). Numerical modeling of flow field around vertical intake by entering the piano key. *J of Hydraulics*, 11(1), 53-66. (In Persian)