مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1393، دوره 14، شماره 10، ص‌ص 35-42

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر زاویه آبگیری بر عمق استغراق بحرانی و قدرت گرداب

محمدرضا خان‌آرمویی[1]، حسن رحیم‌زاده[2*]، حامد سرکرده[3]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار
* تهران، صندوق پستی 15875-4413، rahimzad@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 اردیبهشت 1393
پذیرش: 07 خرداد 1393
ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:
گرداب سطحی
آبگیر منفرد
زاویه آبگیری
عمق استغراق بحرانی
قدرت گرداب

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی آزمایشگاهی تشکیل گرداب‌های سطحی در دهانه آبگیرها برای شرایط مختلف هیدرولیکی پرداخته شده است. در بخش اول این مطالعه، قدرت گرداب‌های پایدار تشکیل شده در آبگیرهای منفرد برای سه زاویه آبگیری عمودی، 45° و افقی در شرایط مختلف هیدرولیکی اندازه‌گیری شده است. برای انجام آزمایش‌های این بخش، از دستگاه سرعت‌سنج دینامیکی برای اندازه‌گیری سرعت مماسی گرداب استفاده شده است. قدرت گرداب‌های تشکیل شده در آبگیرها به‌وسیله عدد بی‌بعد گردندگی، برای شش عدد فرود و چهار عمق استغراق نسبی مختلف ارائه شده است. نتایج نشان داد که با کاهش زاویه آبگیری نسبت به حالت عمود، قدرت گرداب‌های تشکیل شده کاهش پیدا می‌کند. قدرت گرداب در آبگیرهای افقی نسبت به آبگیر عمودی به‌طور میانگین در حدود 31% کاهش پیدا کرده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده رابطه‌ای برای تعیین عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر برای هر زاویه آبگیری استخراج شده است. در بخش دیگر این مطالعه، آزمایش‌ها برای تعیین عمق استغراق بحرانی آبگیرهای منفرد انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش زاویه آبگیری نسبت به حالت عمود، عمق استغراق بحرانی آبگیرها کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که کمترین عمق استغراق بحرانی برای زاویه آبگیری افقی رخ داده است. برای هر زاویه آبگیری معادله‌ای برای پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی برحسب عدد فرود آبگیر ارائه شده است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده با نتایج محققین دیگر مقایسه شده که از تطابق خوبی برخوردار است.

Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices

Mohammad Reza Khanarmuei[1], Hosein Rahimzadeh[2*], Hamed Sarkardeh[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3- Department of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, rahimzad@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 May 2014
Accepted 28 May 2014
Available Online 24 September 2014

Keywords:
Surface vortex
Single intake
Intake withdrawal direction
Critical submergence
Strength of vortices

ABSTRACT

Free surface vortex formation phenomenon at intakes is one of the most important problems in the water withdrawal process. In the present study, the free surface vortex formation was experimentally investigated. Experiments were performed on a single intake with three common intake withdrawal directions (vertical, horizontal and with angle of 45°). One of the main objectives of present study was determination of the strength of vortices. The tangential velocity component of vortices was measured by an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). The results indicated that, by varying the withdrawal angle from vertical to horizontal, the strength of vortices decreased by about 31%. Based on analyzing of experimental data, an empirical relationship between the circulation number and Froude number for various submergence depths was developed for each withdrawal direction. The critical submergence for an air entraining vortex at intakes was also investigated. The results indicated that the critical submergence was considerably affected by the changing of withdrawal direction. It could be concluded that the minimum of critical submergence was occurred at horizontal direction. Based on analysis of the experimental data for each withdrawal direction, an empirical equation was also obtained, which is used to calculate the critical submergence. The results also were compared and analyzed by other researcher's investigations and showed satisfactory agreement.

1- مقدمه

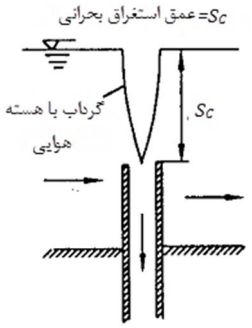
ورود هوا از راه گرداب آزاد سطحی با هسته هوا به درون آبگیر سبب صدمه‌های مکانیکی و مشکلات عملکردی متعددی می‌شود [1]. زمانی که عمق استغراق آبگیر به اندازه کافی نباشد، هوا به مجرای آبگیر وارد می‌شود و کاهش بازده آبگیر را درپی دارد. عمق استغراقی که در آن برای نخستین بار ورود هوا اتفاق می‌افتد عمق استغراق بحرانی، S_c، نامیده می‌شود (شکل 1). رایج‌ترین روش برای جلوگیری از ورود هوا ایجاد عمق استغراق کافی برای آبگیر است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M.R. Khanarmuei, H. Rahimzadeh, H. Sarkardeh, Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 10, pp. 35-42, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]



شکل 1 نمایش عمق استغراق بحرانی آبگیر

دسته‌بندی‌های مختلفی برای گرداب‌ها وجود دارد اما در حالت کلی گرداب-های تشکیل شده در آبگیرها به دو دسته گرداب‌های سطحی و زیرسطحی که به ترتیب از سطح آزاد آب و بستر مخزن تشکیل شده، تقسیم می‌شوند [2]. سرکرده و همکاران گرداب‌های سطحی را براساس مخاطره‌آمیز بودن به سه گروه تقسیم کردند [3]. گروه نخست گرداب‌هایی هستند که تنها می‌توانند چرخشی جزئی و یا فروافتادگی کوچکی در سطح آب ایجاد کنند، این نوع گرداب‌ها بی‌خطر هستند. گروه دوم گرداب‌هایی هستند که قدرت حمل ذرات شناور به داخل آبگیر را دارند. گروه سوم قوی‌ترین و خطرناک‌ترین نوع گرداب در این تقسیم‌بندی محسوب می‌شوند که باید از تشکیل آن جلوگیری شود. در این نوع گرداب، هسته هوایی پایدار در مرکز گرداب تشکیل شده و اجازه می‌دهد که هوا به درون آبگیر وارد شود. براساس مدل رانکین گرداب-های سطحی به دو نوع گرداب چرخشی (اجباری) و گرداب غیرچرخشی (آزاد) تقسیم می‌شوند [4]. در گرداب چرخشی سرعت مماسی به‌طور خطی با فاصله از مرکز گرداب افزایش می‌یابد، در صورتی‌که در گرداب غیرچرخشی سرعت مماسی متناسب با معکوس فاصله است [1]. گرداب‌های تشکیل شده در دهانه آبگیرها مدلی مرکب از گرداب چرخشی و غیرچرخشی است [5]. براساس این مدل که رانکین نام دارد، گرداب دارای هسته‌ای چرخشی و در فواصل دورتر از هسته، گرداب از نوع غیرچرخشی است. مرز ناحیه چرخشی و غیرچرخشی گرداب‌های سطحی در فاصله‌ی شعاعی برابر با شعاع دهانه آبگیر قرار دارد [1]. قدرت گرداب به‌وسیله مقدار گردندگی آن در ناحیه غیر-چرخشی محاسبه می‌شود. مقدار گردندگی گرداب سطحی در ناحیه غیر-چرخشی از راه رابطه (1) به‌دست می‌آید [6].

$$\Gamma=2\pi r V_\theta \qquad (1)$$

در رابطه بالا، Γ مقدار گردندگی گرداب، r فاصله شعاعی از مرکز گرداب و V_θ سرعت مماسی گرداب است.

تا به امروز مطالعات بسیاری برای تعیین عمق استغراق بحرانی آبگیرها و همچنین گرداب‌های سطحی در شرایط مختلف هیدرولیکی به روش‌های تحلیلی و تجربی انجام شده است. اودگارد در مطالعه‌ای، ورود گرداب با هسته هوایی به آبگیر منفرد واقع در مخزن آب ساکن را از راه تقریب مدل رانکین مورد بررسی قرار داد [7]. انوار سلسله مطالعاتی را بر جریان‌های گردابی و روش‌های جلوگیری از آن انجام داد و اثر فاصله دیواره‌های مخزن بر گرداب را مورد بررسی قرار داد [9,8]. هایت و میه در مطالعه‌ای شکل و توزیع سرعت گرداب آزاد را بررسی کردند [10]. این دو محقق از راه تعقیب مسیر جریان به روش تزریق ذرات ردیاب پلاستیکی، نحوه تغییر مولفه‌های سرعت جریان گردابی را در امتداد شعاع چرخش به‌دست آوردند. جین و همکاران تأثیر گرانروی و گردندگی بر عمق استغراق بحرانی را به‌صورت تجربی مطالعه کردند و براساس آزمایش‌های خود، محدوده عدم تأثیر گرانروی و کشش سطحی بر عمق استغراق بحرانی را ارائه کردند [11]. ایلدیریم و همکاران عمق استغراق بحرانی آبگیرهای عمودی رو به پایین واقع در کانال را به-صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌ای برای پیش-بینی آن ارائه کرده‌اند [12]. هاشمی مرغزار و همکاران با استفاده از یک مدل ترکیبی عددی- آزمایشگاهی علاوه‌بر تلاش در تعمیق مفاهیم جریان‌های گردابی، اثر عواملی نظیر عدد فرود و نامتقارنی آبگیر نسبت به مخزن بر ساختارهای اصلی جریان‌های گردابی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [13, 14]. سرکرده و همکاران با انجام بیش از 100 آزمایش، عمق استغراق بحرانی آبگیر افقی را با شیب‌های مختلف دیواره بالادست آبگیر و وجود سازه آشغال-گیر محاسبه کردند [3]. امیری و همکاران با استفاده از دستگاه ADV[1]، قدرت گرداب‌های شکل گرفته در دهانه یک آبگیر افقی را مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای برای محاسبه مقدار گردندگی گرداب برای شرایط مختلف هیدرولیکی ارائه کرده‌اند [15]. سرکرده و همکاران همچنین با انجام آزمایشاتی در مجاورت یک آبگیر افقی، الگوی جریان در اطراف یک آبگیر افقی در شرایط تشکیل گرداب با هسته هوا را مورد بررسی قرار دادند و در انتها مکانیزمی برای تشکیل گرداب‌های سطحی ارائه کردند [16].

انتخاب زاویه آبگیری مناسب می‌تواند موجب بهبود الگوی جریان ورودی به آبگیر شود که در نتیجه سبب کاهش عمق استغراق بحرانی خواهد شد. با مروری بر تحقیقات صورت گرفته تا به امروز، مشاهده می‌شود که مطالعه جامعی برای بررسی تأثیر زاویه آبگیری بر عمق استغراق بحرانی صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر برای بررسی این موضوع سه زاویه آبگیری عمودی، مایل °45 و افقی در نظر گرفته شده است. در سال‌های اخیر بیشتر مطالعات در راستای بررسی عمق استغراق بحرانی آبگیرها در شرایط مختلف صورت گرفته است و مطالعات بسیار اندکی برای تعیین قدرت گرداب انجام شده است. قابل توجه است که از راه قدرت گرداب می‌توان گرداب را به‌صورت کمی مورد بررسی قرار داد، در صورتی‌که اکثر دسته‌بندی‌های گرداب به‌صورت کیفی هستند. در این مطالعه قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبگیر منفرد و تأثیر زاویه آبگیری بر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج این پژوهش با نتایج دیگر محققین نیز مقایسه و تحلیل شده است.

2- آنالیز ابعادی

رابطه پارامترهای مؤثر در جریان گردابی در آبگیرهای منفرد از راه تحلیل ابعادی به‌صورت رابطه (2) بیان می‌شود:

$$f(S,\Gamma,V_i,D_i,\varphi,g,\sigma,\rho,\nu)=0 \qquad (2)$$

که در رابطه بالا S عمق استغراق، Γ گردندگی گرداب، V_i سرعت جریان ورودی به آبگیر، D_i قطر درونی آبگیر، g شتاب گرانش زمین، ρ جرم حجمی آب، ν گرانروی سیال، σ کشش سطحی و φ زاویه آبگیری است.

رابطه (2) را برای تعیین عمق استغراق بحرانی و مقدار گردندگی گرداب‌های سطحی می‌توان بصورت رابطه‌های (3) و (4) نوشت.

$$S_c = f\left(\Gamma,V_i,D_i,g,\rho,\nu,\sigma,\varphi\right) \qquad (3)$$

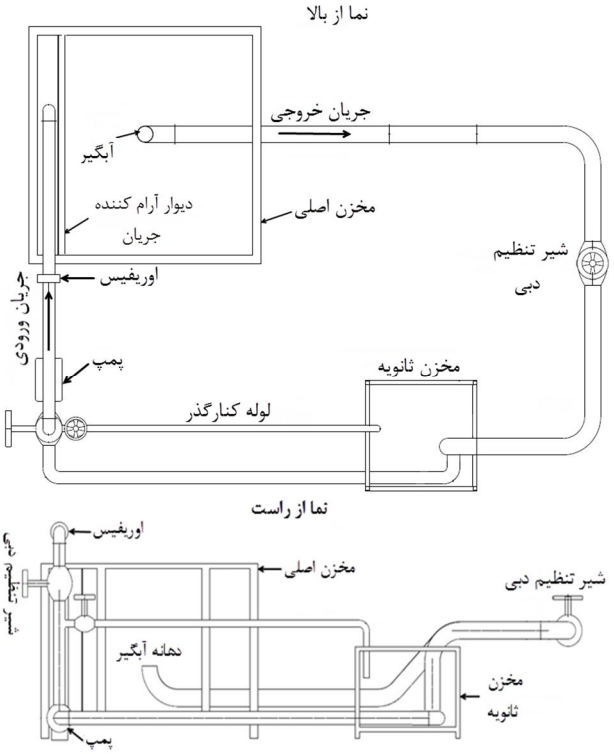
$$\Gamma = f\left(S,D_i,V_i,\rho,\nu,g,\sigma,\varphi\right) \qquad (4)$$

همچنین متغیرهای رابطه (3) و (4) را می‌توان به‌صورت دو رابطه بی‌بعد (5) و (6) ارائه کرد.

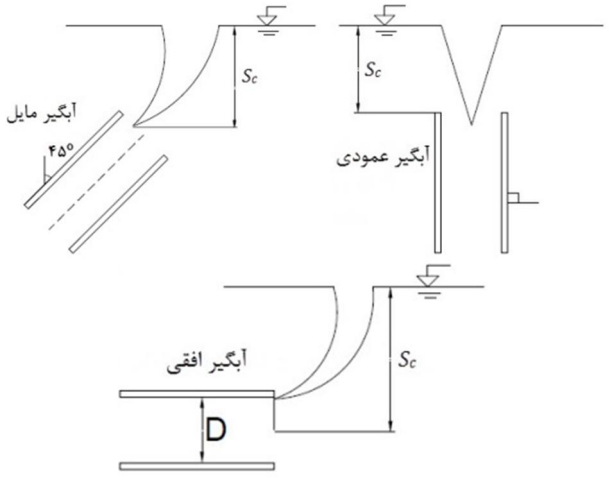
$$\left(\frac{S}{D}\right)_c = f\left(Fr,Re,We,N_\Gamma,\varphi\right) \qquad (5)$$

1- Acoustic Doppler Velocimeter

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]



شکل 2 طرح شماتیک مدل فیزیکی: نمای بالا و جانبی



شکل 3 زوایای آبگیری مورد مطالعه

$$N_r = f\left(Fr, Re, We, \frac{S}{D}, \varphi\right) \quad (6)$$

در این رابطه $\left(\frac{S}{D}\right)_c$ عمق استغراق بحرانی بی‌بعد، $\left(\frac{S}{D}\right)$ عمق استغراق نسبی، Fr عدد فرود آبگیر($V/\sqrt{gD}$)، Re عدد رینولدز (VD/ν)، We عدد وبر ($\rho V^2 D/\sigma$) و N_r عدد گردندگی ($\Gamma D/Q_i$) است. محققین معیارهای مختلفی برای جلوگیری از اثرات مقیاسی و به کمینه رساندن تأثیر اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر در مدل فیزیکی مورد مطالعه، ارائه کرده‌اند. برخی از معیارهای ارائه شده توسط محققین عبارتند از: جین و همکاران $We>120$ ، انوار و همکاران $Re>1.1\times10^5$ ، اودگارد $We>720$ و $Re>1.4\times10^5$ ، پادمانابهان و هکر $We>600$ و $Re>7.7\times10^5$ که در صورت رعایت محدوده‌های بیان شده تأثیر گرانروی و کشش سطحی قابل صرف نظر خواهد بود [17,11,8,7]. در پژوهش حاضر کمترین مقدار اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر از مقادیر ارائه‌شده توسط محققین بیشتر است، بنابراین اثر گرانروی و کشش سطحی قابل صرف نظر است. در نهایت رابطه‌های عمق استغراق بحرانی و عدد گردندگی گرداب با پارامترهای مؤثر بر آن‌ها در آبگیرهای منفرد، بصورت روابط (7) و (8) تغییر می‌کنند.

$$\left(\frac{S}{D}\right)_c = f\left(Fr, \varphi\right) \quad (7)$$

$$N_r = f\left(\frac{S}{D}, Fr, \varphi\right) \quad (8)$$

3- مدل آزمایشگاهی

مدل فیزیکی حاضر شامل آبگیر واقع در یک مخزن با سطح مقطع مربعی به ضلع 200 سانتی‌متر و ارتفاع 120 سانتی‌متر است (شکل 2). مدل‌سازی گرداب به‌وسیله تشابه عدد فرود انجام می‌گیرد زیرا با توجه به فیزیک جریان سطح آزاد نیروهای گرانش و اینرسی نیروهای حاکم است [10،8]. برای مشاهده جریان، آبگیر و دیواره‌های کناری مخزن از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده‌اند. قطر درونی لوله آبگیر برابر با 13 سانتی‌متر است. برای کنترل دبی جریان، شیرهایی در مسیر ورودی و خروجی لوله‌ها تعبیه شده است. برای تخلیه آب از مخزن اصلی از لوله کنارگذر متصل به پمپ استفاده می‌شود که از راه این لوله مقدار آب تخلیه شده به مخزن ثانویه منتقل می‌شود. پمپ مورد استفاده در مدل حاضر از نوع گریز از مرکز 50-160، با قطر پروانه 169 میلی‌متر و الکتروموتوری با توان 7/5 کیلووات و دور موتور متغیر بیشینه تا 2900 دور بر دقیقه بوده است. به دلیل سرعت بالای آب ورودی به مخزن اغتشاشات زیادی در سطح آب به‌وجود می‌آید. برای جلوگیری از این اغتشاشات شبکه ورودی آب با تعداد زیادی مجاری طراحی شده است و پس از آن یک دیوار آرام‌کننده جریان نیز در مسیر ورودی آب به مخزن قرار داده شده است. در این مدل برای اندازه‌گیری دبی جریان از اوریفیس استفاده شده است. با توجه به مطالعات متعدد انجام شده توسط انوار و همکاران، برای جلوگیری از تأثیر دیواره‌های مخزن بر گرداب باید فاصله مرزهای جامد تا مرکز آبگیر بیش از چهار برابر قطر آبگیر باشد [8]. در مدل مورد مطالعه نیز فاصله دیواره‌های کناری مخزن تا مرکز آبگیر در حدود 75 سانتی‌متر است که بیش از 5 برابر قطر آبگیر است، درنتیجه تأثیر مرزهای جامد بر گرداب قابل صرف نظر است. یکی از دیواره‌ها مخزن برای اندازه‌گیری سطح تراز آب با دقت 1 میلی‌متر مدرج شده است.

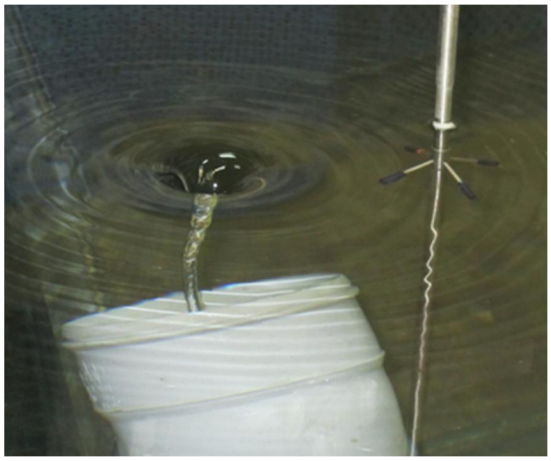
در این مطالعه آزمایش‌ها بر سه زاویه آبگیری عمودی، 45° و افقی صورت گرفته است (شکل 3).

4- روش انجام آزمایش‌ها

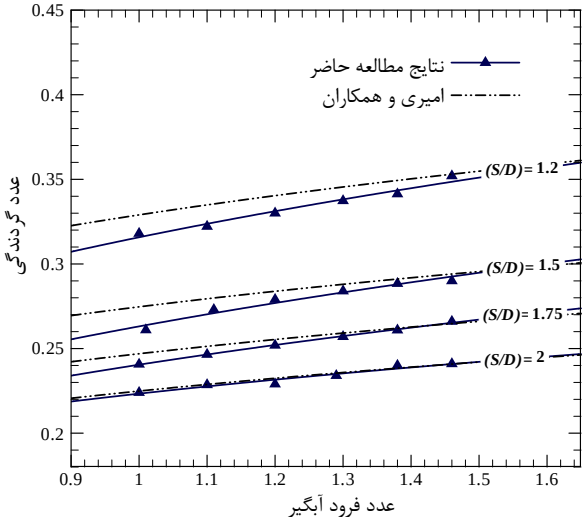
4-1- اندازه‌گیری قدرت گرداب سطحی

مقدار سرعت مماسی در ناحیه غیر چرخشی گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبگیر بوسیله دستگاه سرعت‌سنج دینامیکی ADV اندازه‌گیری شده و از رابطه (1) مقدار گردندگی گرداب که بیانگر قدرت آن است محاسبه شده است (شکل 4). دستگاه سرعت‌سنج مورد استفاده با نرخ 200 هرتز داده‌برداری می‌کند و دقت آن 1± میلی‌متر بر ثانیه است. اندازه‌گیری سرعت مماسی گرداب‌ها برای 6 عدد فرود آبگیر در بازه 1 تا 1/46 و چهار عمق استغراق نسبی مختلف (1/2، 1/5، 1/75 و 2) انجام شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]



شکل 4 اندازه‌گیری سرعت مماسی گرداب به‌وسیله دستگاه سرعت‌سنج ADV



شکل 5 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر افقی برحسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی

جدول 1 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های سطحی در دبی آبگیری 15 لیتر بر ثانیه

نوع آبگیر	$V_{\theta,5}$ (cm/s)	$V_{\theta,7}$ (cm/s)	$V_{\theta,9}$ (cm/s)
عمودی	8/17	8/12	8/28
45°	6/69	6/83	6/8
افقی	5/93	5/85	5/82

جدول 2 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های سطحی در دبی آبگیری 22 لیتر بر ثانیه

نوع آبگیر	$V_{\theta,5}$ (cm/s)	$V_{\theta,7}$ (cm/s)	$V_{\theta,9}$ (cm/s)
عمودی	13/44	13/36	13/27
45°	10/3	10/5	10/55
افقی	9/48	9/34	9/45

دگت و کولگان نشان دادند که سرعت مماسی گرداب برای آبگیر عمودی رو به پایین در راستای عمق آب ثابت باقی می‌ماند [18]. برای بررسی صحت آزمایش‌ها، میزان سرعت مماسی هر سه آبگیر در سه نقطه در راستای عمق آب اندازه‌گیری شد و نتایج حاکی از آن بود که سرعت مماسی برای تمام آبگیرهای مورد آزمایش در راستای عمق آب تقریباً ثابت می‌ماند. جدول‌های 1 و 2 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های تشکیل شده در آبگیرهای عمودی، مایل و افقی که به‌وسیله دستگاه سرعت‌سنج در سه ارتفاع مختلف پایین‌تر از سطح تراز آب (5، 7 و 9 سانتی‌متر) و عمق استغراق نسبی 1/2 برای دو دبی آبگیری 15 و 22 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد.

در جدول‌های 1 و 2، $V_{\theta,5}$، $V_{\theta,7}$ و $V_{\theta,9}$ به‌ترتیب سرعت مماسی گرداب در ارتفاع 5، 7 و 9 سانتی‌متر پایین‌تر از سطح آب است.

4-2- تعیین عمق استغراق بحرانی

برای اندازه‌گیری عمق استغراق بحرانی ابتدا مخزن تا ارتفاع زیادی از آب پر شده است که این ارتفاع را می‌توان از راه تخلیه آب به مخزن ثانویه به‌وسیله لوله کنارگذر کاهش داد. سپس دبی پمپ را در بالاترین دبی محدوده تحت آزمایش قرار داده می‌شود. در هر ارتفاع آب، زمانی برای رسیدن سیستم به حالت پایدار صرف می‌شود و پس از آن در صورتی که گردابی تشکیل نشود تراز سطح آب کاهش داده می‌شود تا زمانی که گرداب گروه دوم در دسته-بندی سرکرده (تشکیل مخروط گرداب و کشیدن ذرات شناور روی آب به داخل آبگیر) شکل گیرد. در این مرحله آبگیر به حالت بحرانی خود نزدیک شده است، در نتیجه تراز سطح آب با دقت بیشتری کاهش داده می‌شود. این عمل تا زمانی ادامه می‌یابد که گرداب با هسته هوا تا دهانه آبگیر توسعه یابد. به هنگام رسیدن گرداب با هسته هوا به دهانه آبگیر میزان ارتفاع آب نسب به تراز سطح دهانه آبگیر به‌عنوان عمق استغراق بحرانی ثبت می‌شود. برای هر آزمایش، زمانی در حدود 1 الی 2 ساعت صرف شده است. آزمایش‌ها برای 8 دبی مختلف آبگیر و یا به عبارتی 8 عدد فرود مختلف آبگیر در بازه 0/76 تا 1/46 در هر سه زاویه آبگیری انجام شده است. باید توجه شود که عدد فرود آبگیر بیشتر نیروگاه‌های برق آبی کشور در بازه انتخاب شده قرار دارد.

5- بررسی نتایج

5-1- قدرت گرداب‌های سطحی

سرعت مماسی گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبگیرهای مورد آزمایش برای شرایط مختلف هیدرولیکی به‌وسیله دستگاه سرعت‌سنج ADV اندازه‌گیری شد. با توجه به این‌که مرز ناحیه چرخشی و غیرچرخشی در فاصله شعاعی برابر با شعاع آبگیر است، فاصله 10 سانتی‌متر به‌عنوان فاصله قرارگیری حسگر سرعت‌سنج نسبت به مرکز گرداب در نظر گرفته شد. قدرت گرداب از رابطه (1) محاسبه شده است. در این بخش آزمایش‌ها برای چهار عمق استغراق بحرانی (1/2، 1/5، 1/75 و 2) و شش عدد فرود آبگیر در بازه 1 تا 1/46 انجام شده است.

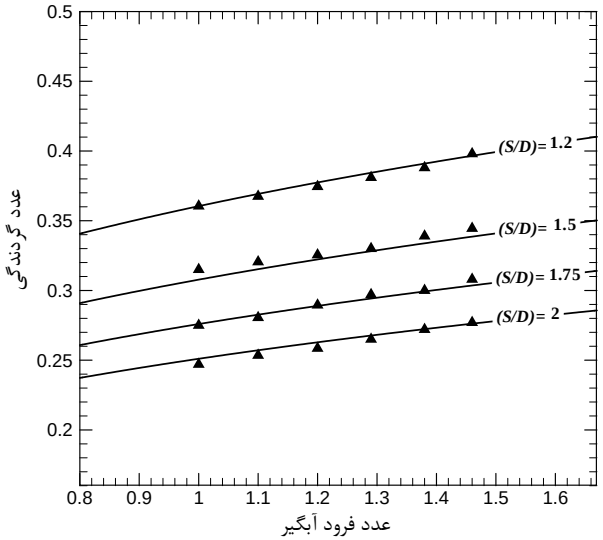
میزان قدرت گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر منفرد افقی بر حسب عدد بی‌بعد گردندگی در شکل 5 ارائه شده است. علاوه‌بر آن در این شکل نتایج مربوط به رابطه ارائه شده توسط امیری و همکاران برای محاسبه عدد گردندگی گرداب در آبگیر افقی نشان داده شده است. رابطه ارائه شده توسط امیری و همکاران به‌صورت رابطه (9) است [15].

$$N_\Gamma = 0.421(\theta+0.01)^{0.032}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.69} Fr^{0.184} \qquad (9)$$

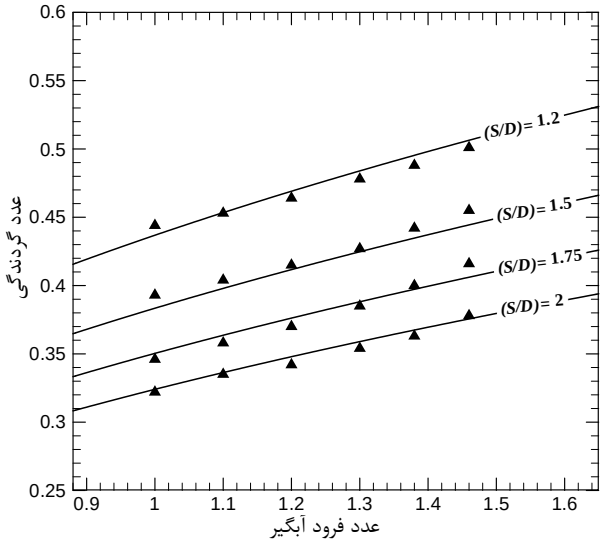
در رابطه بالا θ زاویه پره‌هایی برای ایجاد چرخش اضافی به جریان است که از نتایج پره با زاویه صفر درجه (بدون چرخش خارجی) در شکل 5 استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل 5 قابل ملاحظه است، قدرت گرداب‌های تشکیل شده در سطح مخزن با افزایش عدد فرود آبگیر و کاهش عمق استغراق نسبی، افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر در تطابق خوبی با نتایج حاصل از رابطه ارائه شده توسط امیری و همکاران است، به‌طوری‌که بیشترین اختلاف نتایج مطالعه حاضر با نتایج آن‌ها در حدود 5/2% است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]



شکل 6 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل‌شده در آبگیر مایل 45° برحسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی



شکل 7 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل‌شده در آبگیر عمودی برحسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی

آزمایش‌ها در همان اعداد فرود آبگیر و عمق استغراق نسبی برای آبگیرهای مایل با زاویه 45° و عمودی تکرار شده و نتایج آن در شکل‌های 6 و 7 ارائه شده است.

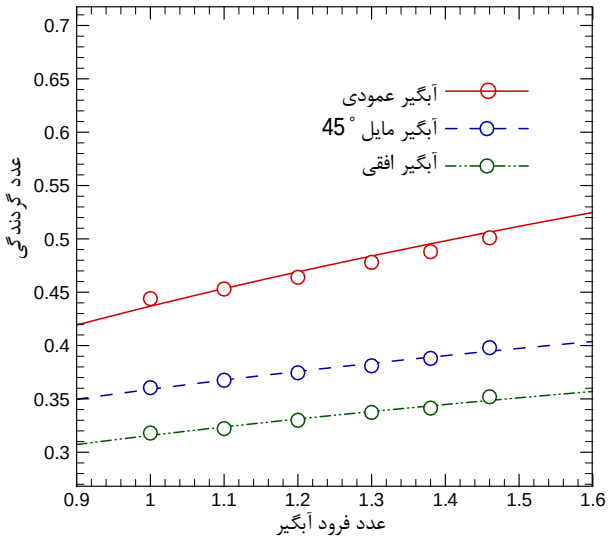
همان‌طور که در شکل‌های 6 و 7 مشاهده می‌شود، در این دو نوع آبگیر هم به مانند آبگیر افقی، با افزایش عدد فرود آبگیر و کاهش عمق استغراق نسبی عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده افزایش یافته است.

از برازش نتایج به‌دست آمده برای آبگیرهای افقی، مایل و عمودی سه رابطه (10) تا (12) برای محاسبه عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده، استخراج شده است.

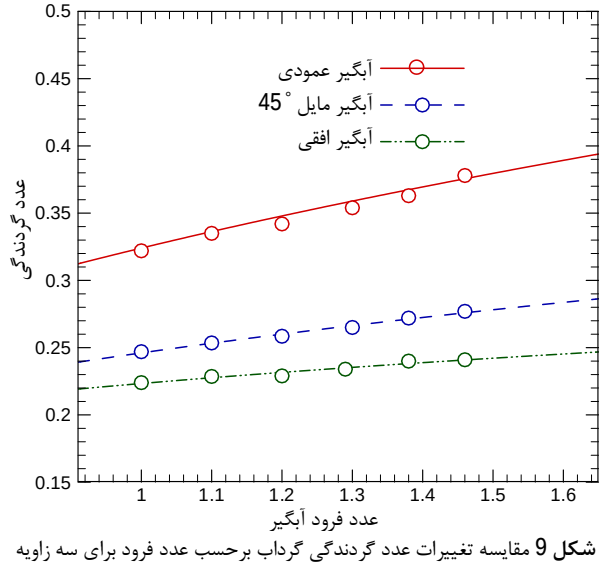
$$N_r = 0.358\,Fr^{0.250}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.71} \quad (10)$$

$$N_r = 0.41\,Fr^{0.252}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.708} \quad (11)$$

$$N_r = 0.486\,Fr^{0.39}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.584} \quad (12)$$



شکل 8 مقایسه تغییرات عدد گردندگی گرداب برحسب عدد فرود برای سه زاویه آبگیری در عمق استغراق نسبی 1/2



شکل 9 مقایسه تغییرات عدد گردندگی گرداب برحسب عدد فرود برای سه زاویه آبگیری در عمق استغراق نسبی 2

رابطه‌های (10)، (11) و (14) به ترتیب مربوط به آبگیر افقی با ضریب همبستگی[1] 0/95، مایل با ضریب همبستگی 0/96 و عمودی با ضریب همبستگی 0/94 است.

برای بررسی تأثیر زاویه آبگیری روی قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده در مخزن، نتایج به‌دست آمده از سه زاویه آبگیری مورد آزمایش در شکل‌های 8 و 9 برای دو عمق استغراق نسبی 1/2 و 2 نمایش داده شده است.

همان‌طور که از شکل‌های 8 و 9 قابل مشاهده است، با تغییر زاویه آبگیری از حالت عمود به 45° و افقی قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش را می‌توان وجود خم در پیکره گرداب‌ها که با کاهش زاویه آبگیری نسبت به حالت عمود به‌وجود می‌آید، دانست؛ زیرا وجود این خم در مسیر گرداب سب افزایش طول مسیر و افت انرژی شده در نتیجه گرداب با قدرت کمتری تشکیل می‌شود. از سوی دیگر میدان جریان ورودی به آبگیرها را می‌توان به دو ساختار عمودی و افقی

1- Correlation factor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]

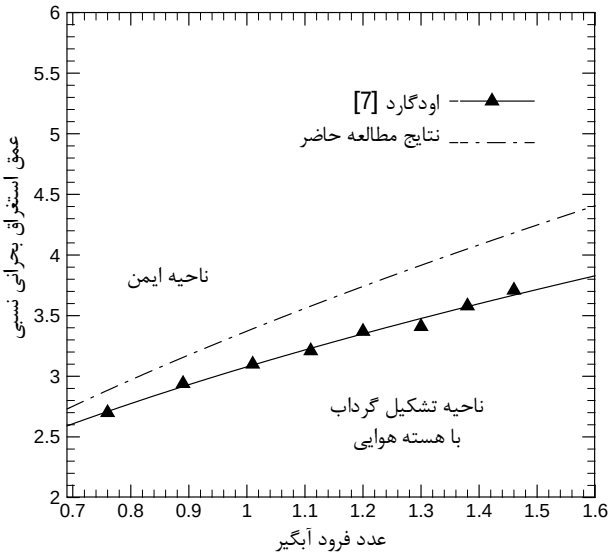
تقسیم‌بندی کرد. پدیده‌های سطحی از جمله جذب اجسام شناور و نفوذ هوا به مجرای آبگیر متأثر از رفتار عمودی جریان در بخش بالایی دهانه آبگیر است [1]. به عبارتی دیگر می‌توان بیان کرد که در انتقال گرداب‌های سطحی به درون آبگیر و ایجاد شرایط بحرانی، مؤلفه عمودی میدان جریان نقش مهم‌تری ایفا می‌کند [14]. در آبگیر افقی تمام مولفه عمودی میدان جریان در انتقال مومنتوم با سطح آزاد آب شرکت نمی‌کند بلکه قسمتی از آن در تقابل با کف مخزن است [14]. در نتیجه هرچه از حالت آبگیری عمودی خارج شویم سهم مولفه عمودی جریان در انتقال مومنتوم از سطح آزاد کاهش پیدا می‌کند و گرداب‌های سطحی با قدرت کمتری تشکیل می‌شوند. با توجه به شکل‌های 8 و 9 عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر افقی به‌طور متوسط در حدود 31% نسبت به گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر عمودی، کاهش پیدا کرده است.

5-2- عمق استغراق بحرانی

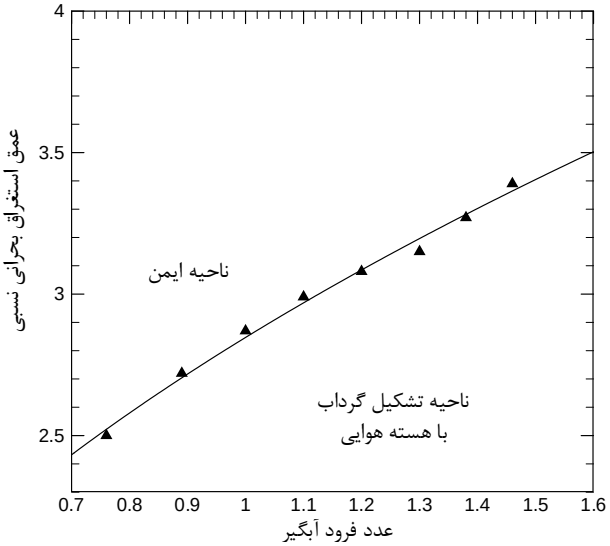
نتایج آزمایش‌ها به‌صورت عمق استغراق بحرانی نسبی در برابر عدد فرود نمایش داده شده است. نخست عمق استغراق بحرانی آبگیر در حالت عمودی اندازه‌گیری شده است. در شکل 10 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی برحسب عدد فرود آبگیر در حالت عمودی نمایش داده شده است. در این شکل نتایج مطالعه اودگارد نیز قابل مشاهده است.

با توجه به شکل 10 عمق استغراق بحرانی با افزایش عدد فرود آبگیر افزایش یافته است. با افزایش عدد فرود آبگیر که به منزله افزایش سرعت جریان آب ورودی به آبگیر است، ورتیسیتی‌های سطحی با سرعت بیشتری به درون آبگیر وارد می‌شوند، براساس نظریه دی‌سروی در آن محل تقویت شده و گرداب تشکیل می‌شود، در نتیجه گرداب در ارتفاع بالاتری نسبت به دهانه آبگیر قدرت مکش هوا را پیدا می‌کند [19]. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج اودگارد مقایسه شده و همان‌طور که قابل مشاهده است گرداب رفتار منطقی دارد و دلیل اختلاف بوجود آمده در تفاوت فیزیک مدل‌ها می‌تواند باشد. در شکل 10 ناحیه ایمن و ناحیه بحرانی که گرداب با هسته هوا در آن ناحیه تشکیل می‌شود، مشخص شده است.

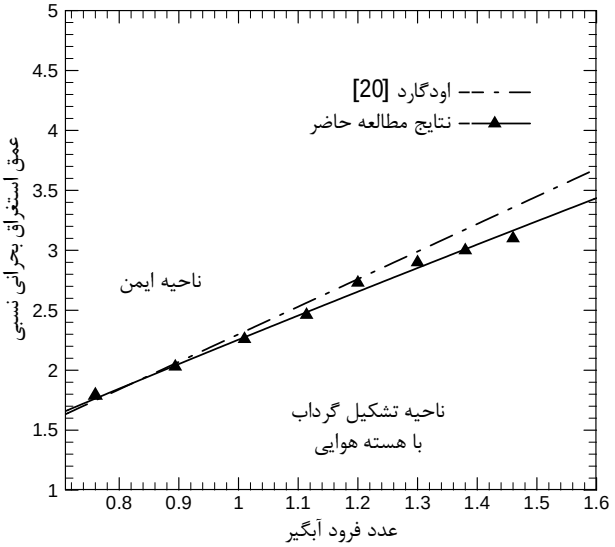
آزمایش‌ها برای آبگیر مایل °45 تکرار شده است و نتایج حاصل در شکل 11 ارائه شده است.



شکل 10 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی برحسب عدد فرود برای آبگیر منفرد عمودی



شکل 11 نتایج بدست آمده برای عمق استغراق بحرانی نسبی در برابر عدد فرود آبگیر برای آبگیر مایل



شکل 12 عمق استغراق بحرانی نسبی برحسب عدد فرود آبگیر برای آبگیر منفرد افقی

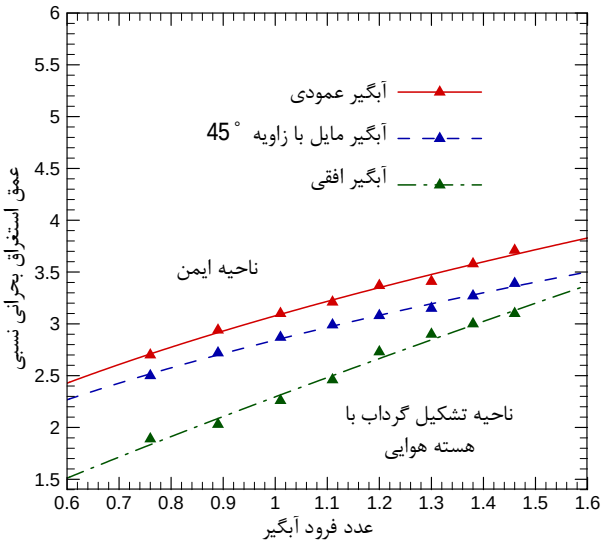
تاکنون برای زاویه آبگیری °45 مطالعه‌ای در زمینه پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی صورت نگرفته است و در این مطالعه با هدف بررسی رفتار گرداب در برابر تغییر زاویه آبگیری، این زاویه انتخاب شده است. همان‌طورکه از شکل 11 مشاهده می‌شود در این زاویه آبگیری نیز با افزایش عدد فرود، عمق استغراق بحرانی افزایش یافته است.

شکل 12 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی آبگیر افقی در برابر عدد فرود آبگیر را نشان می‌دهد. در این شکل نتایج گوردن برای صحت‌سنجی نیز ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل 12 قابل مشاهده است رفتار گرداب در این آبگیر نیز به این صورت است که با افزایش عدد فرود آبگیر عمق استغراق بحرانی نیز افزایش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تطبیق خوبی با رابطه ارائه‌شده توسط گوردن ($(S/D)_c = 2.29Fr$) است.

برای پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی آبگیر منفرد در سه زاویه آبگیری مورد مطالعه، از تحلیل نتایج آزمایش‌ها سه رابطه زیر استخراج شده است. رابطه‌های (13- 15) به‌ترتیب مربوط به آبگیرهای عمودی، °45 و افقی است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]



شکل 13 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی برحسب عدد فرود و زاویه آبگیری

$$\left(\frac{S}{D}\right)_c = 3.079\,Fr^{0.464} \quad (13)$$

$$\left(\frac{S}{D}\right)_c = 2.848\,Fr^{0.441} \quad (14)$$

$$\left(\frac{S}{D}\right)_c = 2.24\,Fr^{0.876} \quad (15)$$

ضریب همبستگی رابطه (13) و (14) در حدود 0/96 و ضریب همبستگی رابطه (15) 0/95 است.

در شکل 13 نتایج مربوط به تعیین عمق استغراق بحرانی هر سه زاویه آبگیری مورد مطالعه، به منظور بررسی تأثیر زاویه آبگیری روی عمق استغراق بحرانی ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل 13 قابل ملاحظه است با انحراف زاویه آبگیری از حالت عمودی به حالت افقی عمق استغراق بحرانی کاهش پیدا می‌کند، زیرا مسیر تشکیل گرداب با تغییر زاویه آبگیری از حالت عمودی به مایل و افقی با افت انرژی بیشتری همراه است در نتیجه در ارتفاع پایین‌تری از آب، گرداب با هسته هوایی می‌تواند به دهانه آبگیر وارد شود. با توجه به شکل 13 با استفاده از آبگیر افقی میزان آب قابل برداشت از مخزن بی‌آن‌که گرداب با هسته هوایی به آبگیر وارد شود به مراتب بیشتر از آبگیر عمودی و مایل است. در آزمایش‌های مربوط به این پژوهش عمق استغراق بحرانی آبگیر افقی نسبت به آبگیر عمودی در حدود 16 الی 30% کاهش پیدا کرده است.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر زاویه آبگیری روی عمق استغراق بحرانی و قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبگیر منفرد واقع در مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. قدرت گرداب به‌عنوان یک پارامتر کمی، از راه اندازه‌گیری سرعت مماسی گرداب‌های سطحی در ناحیه غیرچرخشی به‌وسیله دستگاه سرعت‌سنج ADV محاسبه شده است. نتایج نشان دادند که با کاهش عمق استغراق نسبی و یا افزایش عدد فرود آبگیر، قدرت گرداب تشکیل‌شده در هر سه نوع آبگیر افزایش پیدا می‌کند. با تغییر زاویه آبگیری از حالت عمودی به مایل و افقی قدرت گرداب‌های سطحی کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که قدرت گرداب‌های تشکیل شده در آبگیر افقی به‌طور میانگین 31% کمتر از حالت آبگیر عمودی برای شرایط مختلف هیدرولیکی بوده است.

براساس نتایج به‌دست آمده، سه رابطه برای محاسبه عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبگیرهای مورد مطالعه برحسب عدد فرود آبگیر و عمق استغراق نسبی استخراج شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده با تغییر زاویه آبگیری از حالت عمودی به افقی عمق استغراق بحرانی به دلیل افزایش اتلاف انرژی در مسیر تشکیل گرداب، کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. عمق استغراق بحرانی آبگیر افقی در مقایسه با آبگیر عمودی برای محدوده اعداد فرود مورد مطالعه در بیشترین حالت 30% کاهش پیدا کرد. با تحلیل نتایج به‌دست آمده، سه رابطه برای پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی آبگیرهای عمودی، 45° و افقی برحسب عدد فرود آبگیر ارائه شده است.

7- فهرست علائم

D_i	قطر داخلی آبگیر
Fr	عدد فرود
g	شتاب گرانشی زمین
N_r	عدد گردندگی
Q_i	دبی آبگیری
r	فاصله شعاعی تا مرکز گرداب
Re	عدد رینولدز
S	عمق استغراق
S_c	عمق استغراق بحرانی
$\frac{S}{D}$	عمق استغراق نسبی
$\left(\frac{S}{D}\right)_{cr}$	عمق استغراق بحرانی نسبی
V_i	سرعت ورودی جریان به آبگیر
V_θ	سرعت مماسی
We	عدد وبر

علایم یونانی

Γ	گردندگی گرداب
ν	گرانروی سینماتیکی سیال
σ	کشش سطحی سیال
ρ	چگالی سیال
φ	زاویه آبگیری

8- مراجع

[1] J. Knauss, Swirling Flow Problems at Intakes, in: Hydraulic Structures Design, Manual 1 A. A. IAHR, Balkema, Eds. Rotterdam, The Netherlands, 1987.

[2] P. Kundu, *Fluid Mechanics*: Academic Press, 1990.

[3] H. Sarkardeh, A. R. Zarrati, R. Roshan, Effect of Intake Head Wall and Trash rack on Vortices, *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 48, No. 1, pp. 108-112, 2010.

[4] W. J. M. Rankine, *Manual of Applied Mechanics,* C. Griffen Co. London, England, 1858.

[5] M. Ansar, T. Nakato, Experimental Study of 3D Pump-Intake Flows with and Without Cross Flow, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 127, No. 10, pp. 825-834, 2001.

[6] F. M. White, *Fluid Mechanics,* 5th ed.: McGraw-Hill, New York, 2003.

[7] J. A. Odgaard, Free- surface air core vortex, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 112, No. 7, pp. 610–620, 1986.

[8] H. O. Anwar, J. A. Weller, M. B. Amphlett, "Similarity of Free Vortex at Horizontal Intake", *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 16, No. 2, pp. 95-105, 1978.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]

[9] H. O. Anwar, M. B. Amphlett, "Vortices at Vertically Inverted Intakes", *Journal of Hydraulic Research,* Vol. 18, No. 2, pp. 123-136, 1980.

[10] J. E. Hite, W. Mih, Velocity of Air- Core Vortices at Hydraulic Intakes, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 120, No. 3, pp. 284-297, 1994.

[11] A. K. Jain, K. G. R. Raju, R. J. Garde, Vortex Formation at Vertical Pipe Intake, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 100, No. 10, pp. 1427-1445, 1978.

[12] N. Yildirim, F. Kocabas, Critical Submergence for Intake in Open Channel Flow, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 121, No. 12, pp. 900-905, 1995.

[13] S. Hashemi Marghzar, H. Rahimzadeh, N. Montazerin, A Jonit Experimental and Numerical Investigation on Flow Structure and Critical Condition at A Vertical Downward Intake, *Journal of Amirkabir,* Vol. 13, No. 52, pp. 116-125, 2002.

[14] S. Hashemi Marghzar, N. Montazerin, H. Rahimzadeh, Flow Field, Turbulence and Critical Condition at A Horizontal Intake, *Journal of Power and Energy,* Vol. 217, No. 1, pp. 53-62, 2003.

[15] S. M. Amiri, A. R. Zarrati, R. Roshan, H. Sarkardeh, Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates, *Journal of Water Management* (ICE), Vol. 164, No. 4, pp. 193–200, 2011.

[16] H. Sarkardeh, E. Jabbari, A. R. Zarrati, S. Tavakkol, Velocity field in a reservoir in the presence of an air-core vortex, *Journal of Water Management,* Vol. 164, No. 4, pp. 193-200, 2013

[17] M. Padmanabhan, G. E. Hecker, Scale effects in pump sump models, *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 110, No. 11, pp. 1540-1556, 1984.

[18] L. L. Daggett, G. H. Keulegan, Similitude in free-surface vortex formation, *ASCE. Journal of the Hydraulic Division,* Vol. 100, No. 1, pp. 1565–1580, 1974

[19] F. De Siervi, H. C. Viguier, E. M. Greitzer, C. S. Tan, Mechanisms Of Inlet-Vortex Formation, *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 124, pp. 173-207, 1982.

[20] J. L. Gordon, Vortices at Intake Structures, *Journal of Water Power,* Vol. 22, No. 4, pp. 137-138, 1970.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.23.0]