



## تأثیر زاویه آبگیری بر عمق استغراق بحرانی و قدرت گرداب

محمدرضا خان آرمویی<sup>1</sup>، حسن رحیمزاده<sup>2\*</sup>، حامد سرکرده<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، 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،  $45^\circ$  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 به وسیله عدد بی بعد 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<sup>1</sup>, Hosein Rahimzadeh<sup>2\*</sup>, Hamed Sarkardeh<sup>3</sup>

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  $45^\circ$ ). 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

کاهش بازده آبگیر را در پی دارد. عمق استغراقی که در آن برای نخستین بار 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 آبگیر است.

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 آبگیر است.

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

سطحی بر عمق استغراق بحرانی را ارائه کردند [11]. ایلدیریم و همکاران عمق استغراق بحرانی آبیگرهای عمودی رو به پایین واقع در کانال را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌ای برای پیش‌بینی آن ارائه کرده‌اند [12]. هاشمی مرغزار و همکاران با استفاده از یک مدل ترکیبی عددی-آزمایشگاهی علاوه بر تلاش در تعمیق مفاهیم جریان‌های گردابی، اثر عواملی نظیر عدد فرود و نامتقارنی آبیگر نسبت به مخزن بر ساختارهای اصلی جریان‌های گردابی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [13]. سرکرده و همکاران با انجام بیش از 100 آزمایش، عمق استغراق بحرانی آبیگر افقی را با شیب‌های مختلف دیواره بالادست آبیگر و وجود سازه آشغال‌گیر محاسبه کردند [3]. امیری و همکاران با استفاده از دستگاه ADV<sup>1</sup>، قدرت گرداب‌های شکل گرفته در دهانه یک آبیگر 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 آبیگر افقی، الگوی جریان در اطراف یک آبیگر 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 آبیگری مناسب می‌تواند موجب بهبود الگوی جریان ورودی به آبیگر 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 آبیگری بر عمق استغراق بحرانی صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر برای بررسی این موضوع سه زاویه آبیگری عمودی، مایل 45° و افقی در نظر گرفته شده است. در سال‌های اخیر بیشتر مطالعات در راستای بررسی عمق استغراق بحرانی آبیگرها 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 به صورت کمی مورد بررسی قرار داد، در صورتی که اکثر دسته‌بندی‌های گرداب به صورت کیفی هستند. در این مطالعه قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبیگر منفرد و تأثیر زاویه آبیگری 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 آبیگرهای منفرد از راه تحلیل ابعادی به صورت رابطه (2) بیان می‌شود:

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

که در رابطه بالا  $S$  عمق استغراق،  $\Gamma$  گردندگی گرداب،  $V_i$  سرعت جریان ورودی به آبیگر،  $D_i$  قطر درونی آبیگر،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $\rho$  جرم حجمی آب،  $\nu$  گرانشی سیال،  $\sigma$  کشش سطحی و  $\varphi$  زاویه آبیگری است.

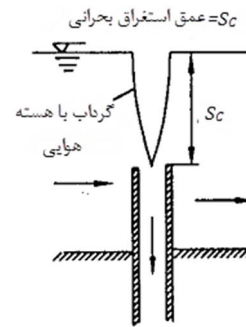
رابطه (2) را برای تعیین عمق استغراق بحرانی و مقدار گردندگی گرداب‌های سطحی می‌توان بصورت رابطه‌های (3) و (4) نوشت.

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

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

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

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



شکل 1 نمایش عمق استغراق بحرانی آبیگر

دسته‌بندی‌های مختلفی برای گرداب‌ها وجود دارد اما در حالت کلی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگرها 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 آبیگر 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 آبیگر وارد شود. براساس مدل رانکین گرداب‌های 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 صورتی که در گرداب غیرچرخشی سرعت مماسی متناسب با معکوس فاصله است [1]. گرداب‌های تشکیل شده در دهانه آبیگرها 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 آبیگر 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].

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

در رابطه بالا،  $\Gamma$  مقدار گردندگی گرداب،  $r$  فاصله شعاعی از مرکز گرداب و  $V_\theta$  سرعت مماسی گرداب است.

تا به امروز مطالعات بسیاری برای تعیین عمق استغراق بحرانی آبیگرها 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 آبیگر 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 گرانشی و گردندگی بر عمق استغراق بحرانی را به‌صورت تجربی مطالعه کردند و براساس آزمایش‌های خود، محدوده عدم تأثیر گرانشی و کشش

1- Acoustic Doppler Velocimeter

حاضر کمترین مقدار اعداد بی بعد رینولدز و وبر از مقادیر ارائه شده توسط محققین بیشتر است، بنابراین اثر گرانی و کشش سطحی قابل صرف نظر است. در نهایت رابطه‌های عمق استغراق بحرانی و عدد گردندگی گرداب با پارامترهای مؤثر بر آن‌ها در آبیگرهای منفرد، بصورت روابط (7) و (8) تغییر می‌کنند.

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

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

### 3- مدل آزمایشگاهی

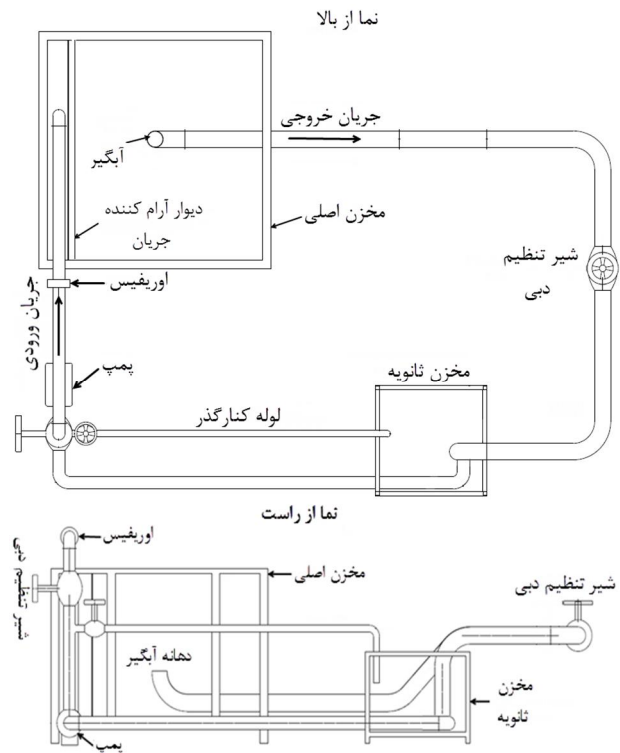
مدل فیزیکی حاضر شامل آبیگر واقع در یک مخزن با سطح مقطع مربعی به ضلع 200 سانتی‌متر و ارتفاع 120 سانتی‌متر است (شکل 2). مدل‌سازی گرداب به وسیله تشابه عدد فرود انجام می‌گیرد زیرا با توجه به فیزیک جریان سطح آزاد نیروهای گرانش و اینرسی نیروهای حاکم است [10,8]. برای مشاهده جریان، آبیگر و دیواره‌های کناری مخزن از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده‌اند. قطر درونی لوله آبیگر 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 به وجود 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 آبیگر بیش از چهار برابر قطر آبیگر باشد [8]. در مدل مورد مطالعه نیز فاصله دیواره‌های کناری مخزن تا مرکز آبیگر در حدود 75 سانتی‌متر است که بیش از 5 برابر قطر آبیگر است، در نتیجه 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 آبیگری عمودی، 45° و افقی صورت گرفته است (شکل 3).

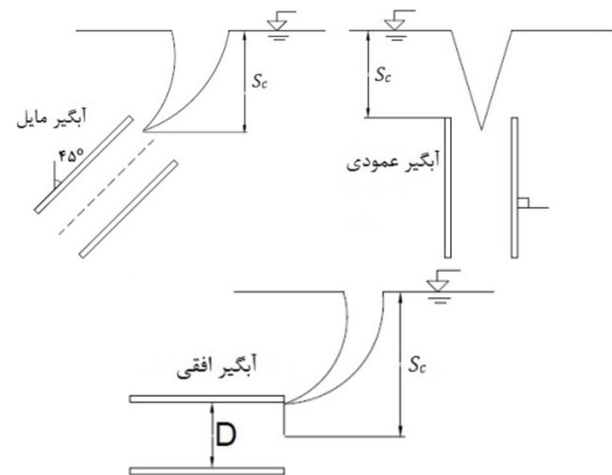
### 4- روش انجام آزمایش‌ها

#### 4-1- اندازه‌گیری قدرت گرداب سطحی

مقدار سرعت مماسی در ناحیه غیر چرخشی گرداب‌های سطحی تشکیل شده در آبیگر 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 آبیگر در بازه 1 تا 1/46 و چهار عمق استغراق نسبی مختلف (1/2، 1/5، 1/75 و 2) انجام شده است.



شکل 2 طرح شماتیک مدل فیزیکی: نمای بالا و جانی



شکل 3 زوایای آبیگری 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،  $\left(\frac{S}{D}\right)_c$  عمق استغراق نسبی،  $Fr$  عدد فرود آبیگر  $(v/\sqrt{gD})$ ،  $Re$  عدد رینولدز  $(VD/v)$ ،  $We$  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  $Re > 1.1 \times 10^5$ ، اودگارد و  $We > 720$  و  $Re > 1.4 \times 10^5$ ، پادمانابهان و هکر  $We > 600$  و  $Re > 7.7 \times 10^5$  که در صورت رعایت محدوده‌های بیان شده تأثیر گرانی و کشش سطحی قابل صرف نظر خواهد بود [7, 11, 17, 18]. در پژوهش

آبیگری 15 و 22 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد. در جدول‌های 1 و 2،  $V_{\theta,5}$ ،  $V_{\theta,7}$  و  $V_{\theta,9}$  به ترتیب سرعت مماسی گرداب در ارتفاع 5، 7 و 9 سانتی‌متر پایین‌تر از سطح آب است.

#### 2-4- 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 آبیگری) شکل گیرد. در این مرحله آبیگری 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 آبیگری توسعه یابد. به هنگام رسیدن گرداب با هسته هوا به دهانه آبیگری میزان ارتفاع آب نسب به تراز سطح دهانه آبیگری به‌عنوان عمق استغراق بحرانی ثبت می‌شود. برای هر آزمایش، زمانی در حدود 1 الی 2 ساعت صرف شده است. آزمایش‌ها برای 8 دبی مختلف آبیگری و یا به عبارتی 8 عدد فرود مختلف آبیگری در بازه 0/76 تا 1/46 در هر سه زاویه آبیگری انجام شده است. باید توجه شود که عدد فرود آبیگری 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 آبیگری‌های 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 آبیگری 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 آبیگری در بازه 1 تا 1/46 انجام شده است.

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

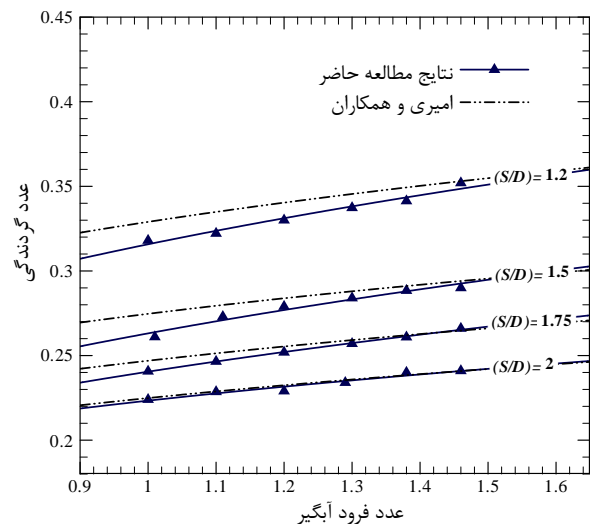
$$N_{\Gamma} = 0.421(\theta + 0.01)^{0.032} \left(\frac{S}{D}\right)^{-0.69} Fr^{0.184} \quad (9)$$

در رابطه بالا  $\theta$  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 آبیگری 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.



شکل 4 اندازه‌گیری سرعت مماسی گرداب به‌وسیله دستگاه سرعت‌سنج ADV



شکل 5 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگری افقی بر حسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی

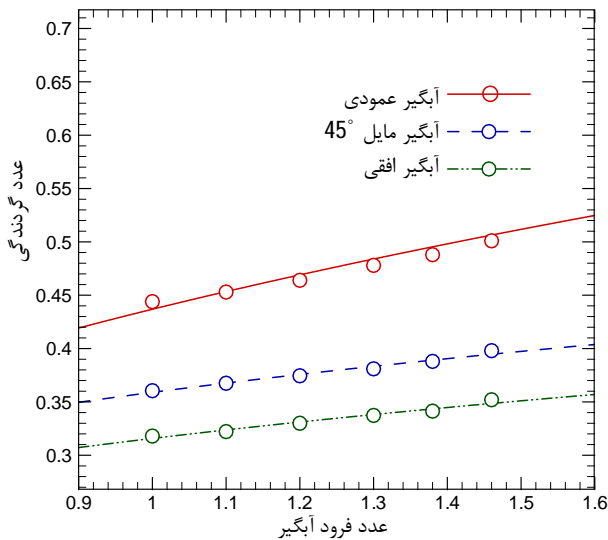
جدول 1 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های سطحی در دبی آبیگری 15 لیتر بر ثانیه

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

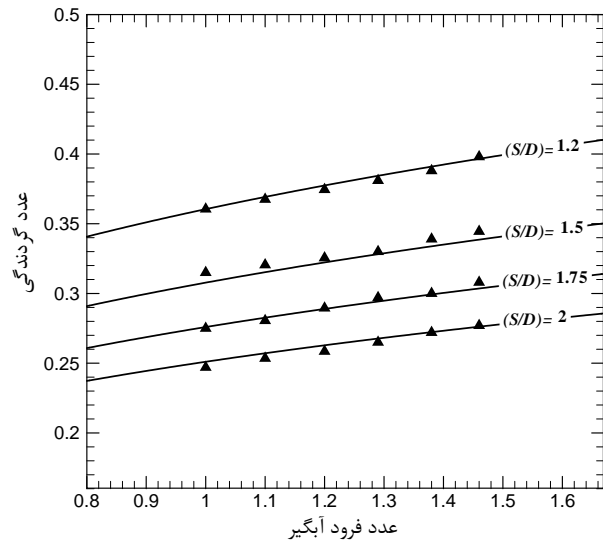
جدول 2 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های سطحی در دبی آبیگری 22 لیتر بر ثانیه

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

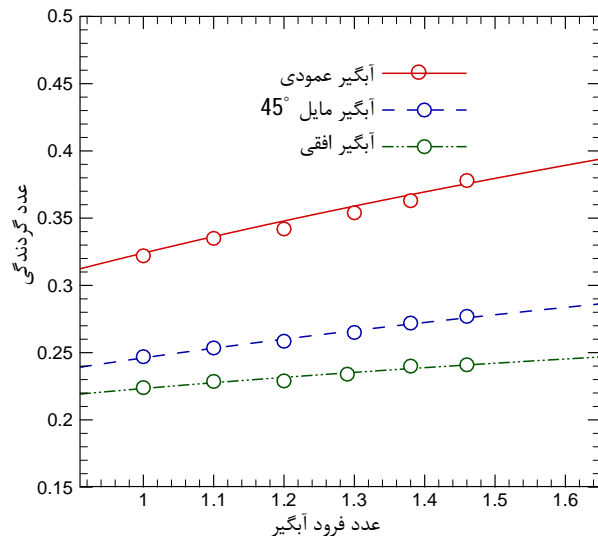
دگت و کولگان نشان دادند که سرعت مماسی گرداب برای آبیگری عمودی رو به پایین در راستای عمق آب ثابت باقی می‌ماند [18]. برای بررسی صحت آزمایش‌ها، میزان سرعت مماسی هر سه آبیگری در سه نقطه در راستای عمق آب اندازه‌گیری شد و نتایج حاکی از آن بود که سرعت مماسی برای تمام آبیگری‌های مورد آزمایش در راستای عمق آب تقریباً ثابت می‌ماند. جدول‌های 1 و 2 مقادیر سرعت مماسی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگری‌های 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



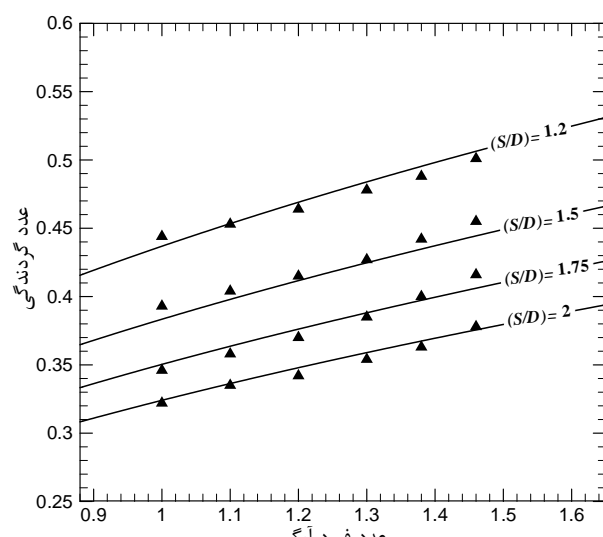
شکل 8 مقایسه تغییرات عدد گردندگی گرداب برحسب عدد فرود برای سه زاویه آبیگری در عمق استغراق نسبی 1/2



شکل 6 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگر مایل 45° برحسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی



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



شکل 7 تغییرات عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگر عمودی برحسب عدد فرود و عمق استغراق نسبی

رابطه‌های (10)، (11) و (14) به ترتیب مربوط به آبیگر افقی با ضریب همبستگی<sup>1</sup> 0/95، مایل با ضریب همبستگی 0/96 و عمودی با ضریب همبستگی 0/94 است.

برای بررسی تأثیر زاویه آبیگری روی قدرت گرداب‌های سطحی تشکیل شده در مخزن، نتایج به‌دست آمده از سه زاویه آبیگری 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 آبیگری 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 آبیگری 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 آبیگرها را می‌توان به دو ساختار عمودی و افقی

آزمایش‌ها در همان اعداد فرود آبیگر و عمق استغراق نسبی برای آبیگرهای 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 آبیگر هم به مانند آبیگر افقی، با افزایش عدد فرود آبیگر و کاهش عمق استغراق نسبی عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده افزایش یافته است.

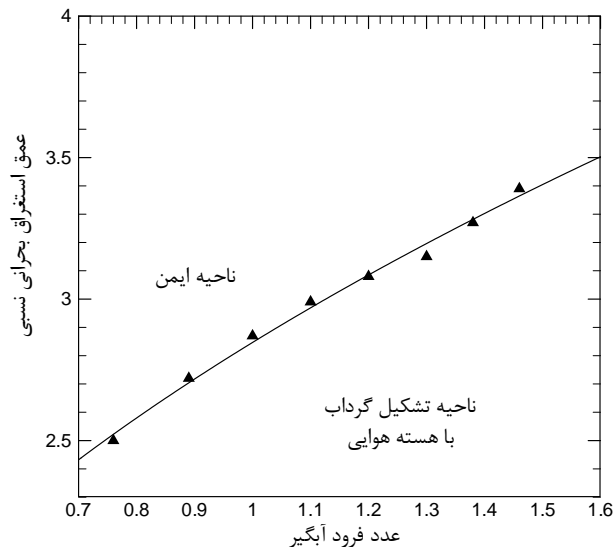
از برازش نتایج به‌دست آمده برای آبیگرهای افقی، مایل و عمودی سه رابطه (10) تا (12) برای محاسبه عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده، استخراج شده است.

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

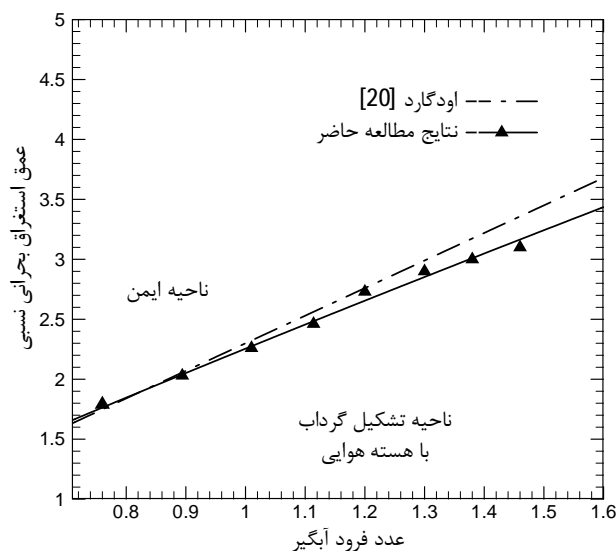
$$N_f = 0.41 Fr^{0.252} \left( \frac{S}{D} \right)^{-0.708} \quad (11)$$

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

1- Correlation factor



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



شکل 12 عمق استغراق بحرانی نسبی بر حسب عدد فرود آبنگیز برای آبنگیز منفرد افقی

تاکنون برای زاویه آبنگیزی  $45^\circ$  مطالعه‌ای در زمینه پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی صورت نگرفته است و در این مطالعه با هدف بررسی رفتار گرداب در برابر تغییر زاویه آبنگیزی، این زاویه انتخاب شده است. همان‌طور که از شکل 11 مشاهده می‌شود در این زاویه آبنگیزی نیز با افزایش عدد فرود، عمق استغراق بحرانی افزایش یافته است.

شکل 12 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی آبنگیز افقی در برابر عدد فرود آبنگیز 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 آبنگیز نیز به این صورت است که با افزایش عدد فرود آبنگیز 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 آبنگیز منفرد در سه زاویه آبنگیزی مورد مطالعه، از تحلیل نتایج آزمایش‌ها سه رابطه زیر استخراج شده است. رابطه‌های (13-15) به ترتیب مربوط به آبنگیزهای عمودی،  $45^\circ$  و افقی است.

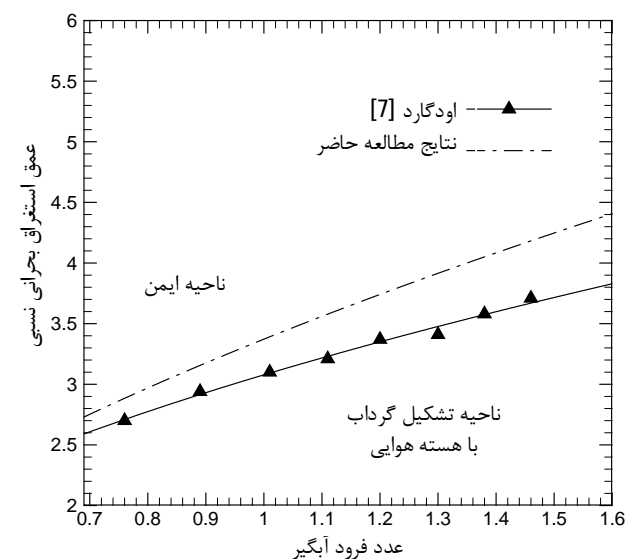
تقسیم‌بندی کرد. پدیده‌های سطحی از جمله جذب اجسام شناور و نفوذ هوا به مجرای آبنگیز متأثر از رفتار عمودی جریان در بخش بالایی دهانه آبنگیز است [1]. به عبارتی دیگر می‌توان بیان کرد که در انتقال گرداب‌های سطحی به درون آبنگیز و ایجاد شرایط بحرانی، مؤلفه عمودی میدان جریان نقش مهم‌تری ایفا می‌کند [14]. در آبنگیز افقی تمام مؤلفه عمودی میدان جریان در انتقال مومنوم با سطح آزاد آب شرکت نمی‌کند بلکه قسمتی از آن در تقابل با کف مخزن است [14]. در نتیجه هرچه از حالت آبنگیزی عمودی خارج شویم سهم مؤلفه عمودی جریان در انتقال مومنوم 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 آبنگیز افقی به‌طور متوسط در حدود 31% نسبت به گرداب‌های تشکیل شده در آبنگیز 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 آبنگیز در حالت عمودی اندازه‌گیری شده است. در شکل 10 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی بر حسب عدد فرود آبنگیز 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 آبنگیز افزایش یافته است. با افزایش عدد فرود آبنگیز که به منزله افزایش سرعت جریان آب ورودی به آبنگیز است، ورتیسیته‌های سطحی با سرعت بیشتری به درون آبنگیز وارد می‌شوند، براساس نظریه دی‌سروی در آن محل تقویت شده و گرداب تشکیل می‌شود، در نتیجه گرداب در ارتفاع بالاتری نسبت به دهانه آبنگیز 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 آبنگیز مایل  $45^\circ$  تکرار شده است و نتایج حاصل در شکل 11 ارائه شده است.



شکل 10 تغییرات عمق استغراق بحرانی نسبی بر حسب عدد فرود برای آبنگیز منفرد عمودی

بر اساس نتایج به دست آمده، سه رابطه برای محاسبه عدد گردندگی گرداب‌های تشکیل شده در آبیگرهای مورد مطالعه برحسب عدد فرود آبیگر و عمق استغراق نسبی استخراج شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده با تغییر زاویه آبیگری 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 آبیگر افقی در مقایسه با آبیگر عمودی برای محدوده اعداد فرود مورد مطالعه در بیشترین حالت 30% کاهش پیدا کرد. با تحلیل نتایج به دست آمده، سه رابطه برای پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی آبیگرهای عمودی، 45° و افقی برحسب عدد فرود آبیگر ارائه شده است.

### 7- فهرست علائم

$D_i$	قطر داخلی آبیگر
Fr	عدد فرود
g	شتاب گرانشی زمین
$N_f$	عدد گردندگی
$Q_i$	دبی آبیگری
r	فاصله شعاعی تا مرکز گرداب
Re	عدد رینولدز
S	عمق استغراق
$S_c$	عمق استغراق بحرانی
$\frac{S}{D}$	عمق استغراق نسبی

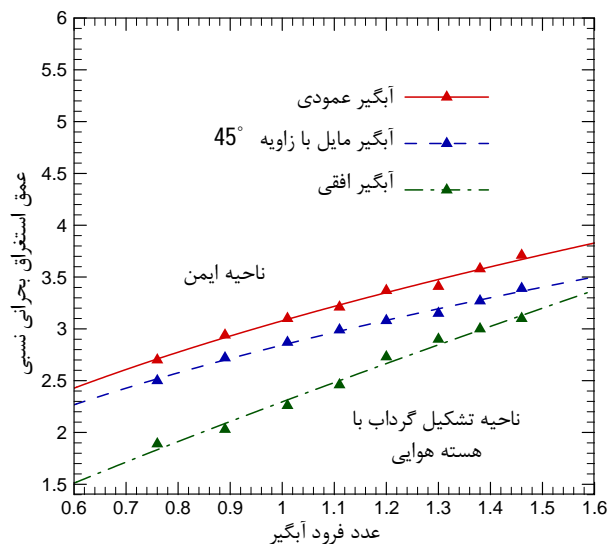
$\left(\frac{S}{D}\right)_c$	عمق استغراق بحرانی نسبی
$V_i$	سرعت ورودی جریان به آبیگر
$V_\theta$	سرعت مماسی
We	عدد وبر

### علائم یونانی

$\Gamma$	گردندگی گرداب
$\nu$	گرانروی سینماتیکی سیال
$\sigma$	کشش سطحی سیال
$\rho$	چگالی سیال
$\varphi$	زاویه آبیگری

### 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.



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

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

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

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

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 آبیگری مورد مطالعه، به منظور بررسی تأثیر زاویه آبیگری روی عمق استغراق بحرانی ارائه شده است.

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

### 6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

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

- [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.
- [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.