نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده

مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین ۹۹۹۹، دوره ۹۹، شماره ۹، ص‌ص ۱-۱۱

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی آزمایشگاهی دینامیک گرداب‌های با هسته هوا و پیش‌بینی میزان هوای ورودی به یک آبگیر افقی

مرتضی منشی‌زاده[1]، احمد طاهرشمسی[*2]، حسن رحیم‌زاده[3]، حامد سرکرده[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
4- استادیار، مهندسی آب، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار
تهران، صندوق پستی 15875-3413، tshamsi@aut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 فروردین 1396
پذیرش: 04 تیر 1396
ارائه در سایت: ۹۹ اردیبهشت ۹۹۹۹

*کلید واژگان:*
گرداب
آبگیرهای نیروگاهی
مطالعه آزمایشگاهی
نرخ ورود هوا
ناپایداری هسته هوا

**چکیده**

در مطالعه حاضر، دینامیک گرداب‌های با سطح آزاد و میزان هوای ورودی به آبگیر در اثر گرداب‌های با هسته هوا در یک آبگیر افقی، به روش آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج ارائه‌شده عبارت‌اند از نحوه ارتباط بین مرتبه گرداب با پارامترهای هیدرولیکی آبگیر، الگوی کلی جابجایی هسته گرداب بر روی سطح آب و ارتباط آن با مرتبه گرداب، مدت‌زمان لازم برای تشکیل کامل هسته هوا و در نهایت برآورد نرخ هوای ورودی به آبگیر در شرایط تشکیل گرداب با هسته هوا می‌باشد. همچنین با تعریف شاخص عدد آبگیر، بین مرتبه گرداب و عدد آبگیر ارتباط کمی برقرار گردید و نشان داده شد که با افزایش عدد آبگیر، از ناپایداری مکانی گرداب‌های با سطح آزاد کاسته می‌شود، به‌گونه‌ای که برای اعداد آبگیر بزرگ‌تر از 1، جابجایی هسته گرداب بر روی سطح آب به ناحیه‌ای به شعاع حداکثر دو برابر قطر آبگیر محدود می‌گردد. در ادامه، بین مدت زمان لازم برای شکل‌گیری هسته کامل هوا و عدد آبگیر نیز ارتباط برقرار گردید و نشان داده شد که با افزایش این عدد، زمان لازم برای تشکیل هسته کامل هوا به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. در همین راستا رابطه‌ای برای تخمین سرعت رشد هسته هوا برحسب عدد آبگیر پیشنهاد گردید و به‌جهت صحت‌سنجی، با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شد. در بخش پایانی این تحقیق نیز به بررسی نحوه ارتباط بین نرخ هوای ورودی به آبگیر و عدد آبگیر پرداخته شد و سپس رابطه‌ای برای تخمین نرخ هوای ورودی بر حسب عدد فرود آبگیر پیشنهاد و با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه گردید.

# Experimental investigation of dynamics of the air-core vortices and estimating the air entrainment rate at a horizontal intake

**Morteza Monshizadeh[1], Ahmad Tahershamsi[*1], Hassan Rahimzadeh[2], Hamed Sarkardeh[3]**

1- Department of Water Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran
3- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
* P.O.B. 15875-3413, Tehran, Iran, tshamsi@aut.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 08 April 2017
Accepted 25 June 2017
Available Online 99 May 9999

*Keywords:*
Surface Vortex
Hydropower Intakes
Experimental Study
Air Entrainment Rate
Air Core Instability

**ABSTRACT**

In the present study, free surface vortex dynamic was experimentally investigated in a horizontal intake. Air entrainment rate into the intake due to the air-core vortices was also discussed. The results presented are the relationship between the vortex type and the intake hydraulic parameters, general pattern of surface displacement of the vortex core and its relation with the vortex type, the required time duration to full development of the vortex core, and finally evaluation of the vortex induced air entrainment rate. In this research by defining intake number as intake Froude number over the intake relative submergence, a relationship was established between the vortex type and the intake number. Moreover, it was shown that while the intake number increases, surface instability of the vortex core decreases, in which, for the intake numbers greater than one, surface movement of the vortex core is limited to an area twice that the intake diameter. Then, another relationship was also established between the time requirement of the vortex air-core formation and the intake number, and it was shown that there will be an exponential decrease in the mentioned time scale, while the intake number increases. In this context, a relationship was suggested and compared with one of previous works. In the last section, the dependency between air entrainment rate due to the air-core vortices and the intake number was considered, and another relationship was also suggested and compared with previous works.

## 1- مقدمه

گرداب‌های سطح آزاد پدیده‌ای متداول و در عین حال محدودکننده در انواع آبگیرهای صنعتی و تأسیسات هیدرومکانیکی وابسته به آن‌ها به‌شمار می‌روند. تشکیل گرداب‌های قوی در انواع آبگیرها، من‌جمله آبگیرهای نیروگاهی به‌عنوان یک پدیده نامطلوب تلقی می‌گردد. به‌ویژه در شرایطی که گرداب باعث ورود هوا و جریان‌های چرخشی قوی به‌داخل مجرای آبگیر شود، وقوع

**Please cite this article using:**

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

M. Monshizadeh, A. Tahershamsi, H. Rahimzadeh, H. Sarkardeh, Experimental investigation of dynamics of the air-core vortices and estimating the air entrainment rate at a horizontal intake, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 9999 (in Persian)

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



این پدیده ضمن ایجاد افت‌های شدید در راندمان آبگیری، آسیب‌های مکانیکی نظیر تشدید ارتعاشات، خوردگی و کاویتاسیون و همچنین مشکلات بهره‌برداری را به‌همراه خواهد داشت (سوریچ گالیک و همکاران [1]؛ مولر [2]). به دلیل اهمیت این موضوع، کلر و همکاران [3] و مولر و همکاران [4] طی مطالعات آزمایشگاهی دقیق در سال‌های اخیر میزان نفوذ هوا به داخل آبگیر در اثر گرداب‌های با هسته هوا را مورد بررسی قرار داده‌اند. در نیروگاه‌های برق‌آبی، محدودیت کاهش تراز مجاز بهره‌برداری مخزن به‌دلیل ایجاد زمینه تشکیل گرداب با هسته هوا، عملاً مانع رهاسازی آب در ترازهای پایین‌تر و تولید انرژی الکتریکی می‌گردد (امیری و همکاران [5]).

سابقه تحقیق بر روی گرداب به سال‌ها قبل باز می‌گردد. در این ارتباط، راهم [6] مجموعه نسبتاً کاملی از سوابق مطالعات نظری تا قبل از سال 1950 را طی گزارشی منتشر ساخت و در آن علاوه بر تشریح مکانیزم تشکیل گرداب‌های قوی، شواهدی از میزان افت بازده آبگیری ناشی از وقوع شرایط بحرانی در دهانه آبگیر و نحوه ورود هوا به مجرای آبگیر در شرایط وقوع گرداب‌های با هسته هوا را ارائه نمود. محققین بر این باوراند که تشکیل گرداب‌های قوی در دهانه آبگیرها اثرات نامطلوبی به سازه آبگیر و تأسیسات جانبی آن‌ها نیز تحمیل می‌کند (ناوس [7]).

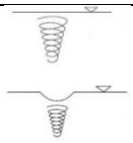
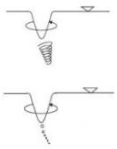
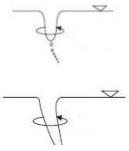
گرداب‌های تشکیل شده در سطح آب به‌لحاظ فیزیکی به شش‌نوع (مرتبه)، از 1 تا 6 تقسیم می‌شوند [7] که با افزایش مرتبه گرداب، قدرت آن نیز افزایش می‌یابد. از نظر میزان اهمیت و درجه ریسک، انواع شش‌گانه گرداب را می‌توان در سه کلاس A، B و C دسته‌بندی نمود [8]. ارتباط بین این دو نوع تقسیم‌بندی با ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی گرداب، در جدول 1 نشان داده شده است.

با توجه به جدول 1، کلاس A شامل گرداب‌هایی است که باعث ورود هوا به داخل آبگیر می‌شوند، لذا از نظر اهمیت و درجه ریسک، در بالاترین سطح قرار دارند. در مقابل، گرداب‌های کلاس C عمدتاً ماهیت چرخابه[1] سطحی دارند و از کم‌ترین درجه ریسک برخوردارند. گرداب‌های کلاس B نیز از آن‌جا که باعث انتقال ذرات شناور به داخل آبگیر می‌شوند، اهمیت می‌یابند.

در شناخت پدیده گرداب و عوامل مؤثر بر تقویت و یا تضعیف آن، سهم مطالعات آزمایشگاهی و روش‌های تجربی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است.

**جدول 1** تقسیم‌بندی مشاهده‌ای مرتبه گرداب

**Table 1** Vortex type visual classification

| مرتبه | شکل ظاهری | توصیف | کلاس گرداب |
|---|---|---|---|
| 1 |  | چرخش سطحی ذرات آب | C |
| 2 | | چرخش سطحی ذرات همراه با فروافتادگی جزئی سطح آب | |
| 3 |  | افزایش فروافتادگی با شکل گیری هسته چرخشی آب | B |
| 4 | | حرکت اجسام شناور به‌سمت دهانه آبگیر | |
| 5 |  | نفوذ حباب‌های هوا به داخل آبگیر | A |
| 6 | | اتصال کامل ستون هوا به دهانه آبگیر | |

[1] eddy

به‌عنوان مثال، در بررسی مکانیزم و نحوه تشکیل گرداب، می‌توان به مطالعات تجربی گالیور و ریندلز [9] اشاره نمود. سرکرده و همکاران نیز با استفاده از روش تجربی، به بررسی تأثیر شرایط هندسی و هیدرولیکی آبگیر و مخزن بر قدرت گرداب‌های شکل‌گرفته در دهانه یک آبگیر افقی پرداختند [11,10]. آذرپیرا و همکاران نیز با استفاده از مدل آزمایشگاهی سد کارون سه، به بررسی شرایط جریان در مخزن در حضور گرداب پرداختند [12]. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری خان‌آرموئی و همکاران، تشکیل گرداب در آبگیرهای دوگانه و همچنین تأثیر عملکرد هم‌زمان آن‌ها بر قدرت گرداب‌های شکل گرفته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین در بخش دیگری از تحقیقات آزمایشگاهی خود، به بررسی تأثیر زاویه تخلیه جریان بر عمق استغراق بحرانی آبگیر پرداختند [13].

مهم‌ترین شاخص طراحی آبگیرها عمق استغراق بحرانی ($S_c$) است. عمق استغراق بحرانی ترازی است که در آن، هسته هوای تشکیل شده در آستانه ورود به آبگیر قرار می‌گیرد (شکل 1). مادامی‌که عمق استغراق آبگیر ($S_i$) از عمق استغراق بحرانی بیشتر باشد، هوایی وارد آبگیر نمی‌شود. بعکس، در شرایط که $S_i$ از $S_c$ کمتر باشد ($S_{ci}$ در شکل 1)، هسته‌ای دائمی و پیوسته از هوا تشکیل می‌شود.

با توجه به تنوع عوامل مؤثر بر شکل‌گیری جریان‌های گردابی، تعیین دقیق عمق استغراق بحرانی آبگیر با پیچیدگی‌هایی همراه است [7]، به‌گونه‌ای که عموم روابط ارائه شده در این زمینه جنبه تجربی دارند. لذا هم‌چنان ضروری است که پدیده گرداب و عوامل مؤثر بر عمق استغراق بحرانی آبگیر، مورد مطالعه و تحلیل بیشتر قرار گیرند.

در سال‌های اخیر با پیشرفت مدل‌های رایانه‌ای، از روش‌های عددی نیز در مطالعه پدیده گرداب استفاده شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعه بر روی جریان گردابی ایجاد شده در یک مخزن استوانه‌ای حاوی یک سیال لزج در حالت ماندگار[2] به‌روش شبیه‌سازی عددی مستقیم[3] اشاره نمود [14]. در این تحقیق مشاهده شد که بین پارامترهای چرخش جریان در داخل مخزن و در مجرای آبگیر ارتباط مستقیم برقرار است، به‌گونه‌ای که با افزایش چرخش سیال در مخزن، چرخش جریان داخل مجرای آبگیر نیز افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری شرایط مخزن در حضور گرداب با قدرت‌های مختلف با استفاده از مدل آشفتگی LES[4] و همچنین مدل سطح آزاد VOF[5] در کنار استفاده از

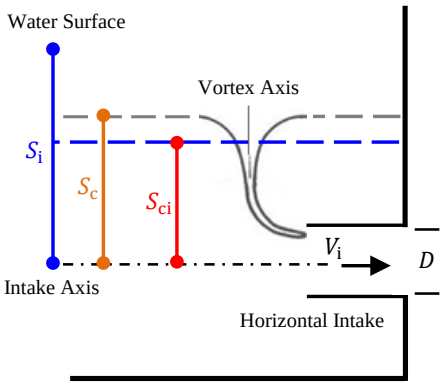



**Fig. 1** Critical submergence at a horizontal intake [7]

**شکل 1** تعریف عمق استغراق و شرایط بحرانی در یک آبگیر افقی [7]

[2] Steady state
[3] Direct Numerical Simulation (DNS)
[4] Large Eddy Simulation
[5] Volume Of Fluid

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



روش‌های درون‌یابی پیشرفته بررسی و تحلیل شد [15]. خادم رابع و همکاران نیز در یک مدل‌سازی کامل و با بهره‌گیری از تکنیک‌های عددی، موفق به مدل‌سازی پارامترهای مختلف گرداب و همچنین سازه ضدگرداب در دهانه آبگیر در شرایط مختلف شدند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین مقایسه، و تطابقی قابل قبولی را گزارش نمودند [17,16].

جریان‌های گردابی در رسته جریان‌های متغیر سریع[1] قرار می‌گیرند. در نتیجه، روش‌های آزمایشگاهی از اعتمادپذیری بیشتری در تحلیل ساختار چنین جریان‌هایی برخوردارند. با تکیه بر مجموعه تحقیقات انجام شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که هرچند محققین مختلف از زوایای گوناگونی به تشریح و مطالعه پدیده گرداب پرداخته‌اند (و در این زمینه نیز به یافته‌های ارزشمندی نایل آمده‌اند)، ولی با توجه به پیچیدگی های موضوع و اهمیت آن، تکمیل این یافته‌ها نیازمند ادامه پژوهش‌ها در این زمینه است. بر این اساس، در تحقیق حاضر با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، دینامیک گرداب‌های با سطح آزاد در یک آبگیر افقی با انجام بیش از یکصد آزمایش، مورد تحلیل قرار گرفته است. در این راستا، پارامترهایی همچون میزان هوای ورودی به آبگیر در اثر تشکیل گرداب‌های با هسته هوا، ارتباط بین مرتبه گرداب با پارامترهای هیدرولیکی آبگیر، الگوی کلی جابجایی هسته گرداب روی سطح آب و ارتباط آن با مرتبه گرداب، مدت‌زمان لازم برای تشکیل کامل هسته هوا و در نهایت برآورد نرخ هوای ورودی به آبگیر در شرایط تشکیل گرداب با هسته هوا مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین در این تحقیق با تعریف شاخص عدد آبگیر، بین مرتبه گرداب و عدد آبگیر ارتباط کمی برقرار گردید. بین مدت‌زمان لازم برای شکل‌گیری هسته کامل هوا و عدد آبگیر نیز ارتباط برقرار گردید. رابطه‌ای برای تخمین سرعت رشد هسته هوا برحسب عدد آبگیر نیز پیشنهاد گردید و با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شد. در بخش پایانی این تحقیق نیز به بررسی نحوه ارتباط بین نرخ هوای ورودی به آبگیر و عدد آبگیر پرداخته شد و سپس رابطه‌ای برای تخمین نرخ هوای ورودی بر حسب عدد فرود آبگیر پیشنهاد و با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه گردید.

## 2- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در مخزنی با دیواره‌های شفاف و مستطیلی شکل به طول 2.4 متر، عرض 1.8 متر و ارتفاع 1.2 متر انجام شد. لوله آبگیر به قطر 0.135 متر به‌صورت افقی و در امتدا محور طولی مخزن قرار گرفت (شکل 2).

به‌منظور امکان مشاهده گرداب‌های قوی‌تر و کاهش اثرات مقیاسی، برای دیواره‌های جانبی مخزن از مرکز آبگیر طبق توصیه انوار [18] حداقل $4D$ (که

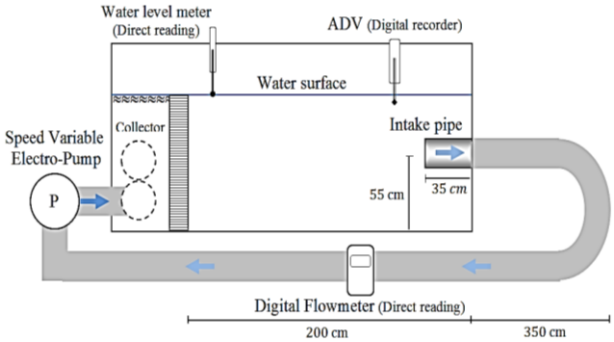



**Fig. 2** Sketch of the experimental set-up

**شکل 2** نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

[1] Rapidly Varied Flow (RVF)

در آن $D$ قطر لوله آبگیر است) فاصله در نظر گرفته شد. با هدف آرام‌سازی جریان ورودی به مخزن، علاوه بر استفاده از دو عدد کلکتور طولی و یک ردیف صفحه مشبک سراسری، دیواره‌ای به‌ضخامت 0.15 متر و ارتفاع 0.9 متر، متشکل از لوله‌های نازک پلاستیکی به‌قطر 5 میلی‌متر با تراکم بالا در سراسر مسیر جریان آب برگشتی به مخزن قرار داده شد. این آرام‌کننده علاوه بر حذف نوسانات آب، یکنواختی مناسبی را در مسیر جریان ورودی به مخزن ایجاد می‌نمود و اجازه استفاده از حداکثر فضای مخزن را فراهم می‌ساخت. با انتخاب مدار گردش آب از نوع بسته[2] و استفاده از الکتروپمپ با دور متغیر و قدرت مناسب، امکان تولید گرداب‌های قوی و آبگذری‌های مختلف در آبگیر فراهم گردید. برای اندازه‌گیری جریان حجمی آب از یک دستگاه جریان‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ±0.28 لیتر بر ثانیه استفاده شد. همچنین برای قرائت عمق استغراق آبگیر، یک ترازسنج با دقت ±1 میلی‌متر بر روی دیواره مخزن نصب گردید. در "شکل 3" تصویری از مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است.

براساس مدل تحلیلی رانکین[3]، گرداب‌های تشکیل شده در دهانه آبگیر، ترکیبی از دو ناحیه چرخشی و غیرچرخشی هستند [19]. در ناحیه چرخشی سرعت مماسی ($v_\theta$) به‌صورت خطی با فاصله از مرکز چرخش افزایش می‌یابد، حال آن‌که در ناحیه غیرچرخشی، مقدار سرعت مماسی متناسب با عکس فاصله نقطه اندازه‌گیری از مرکز دوران است. مرز ناحیه چرخشی نسبت به محور دوران گرداب ($R$) حدوداً در فاصله‌ای به اندازه شعاع آبگیر قرار دارد ($R = D/2$) (شکل 4).

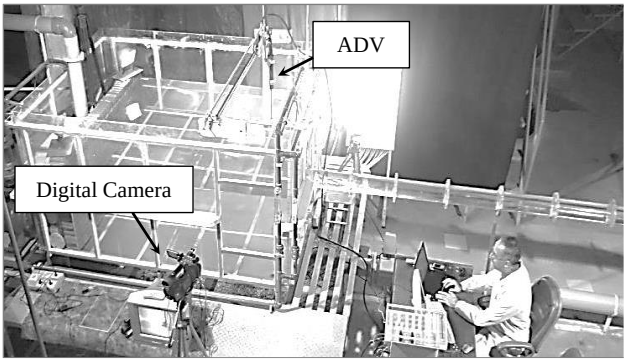



**Fig. 3** The experimental set-up

**شکل 3** مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

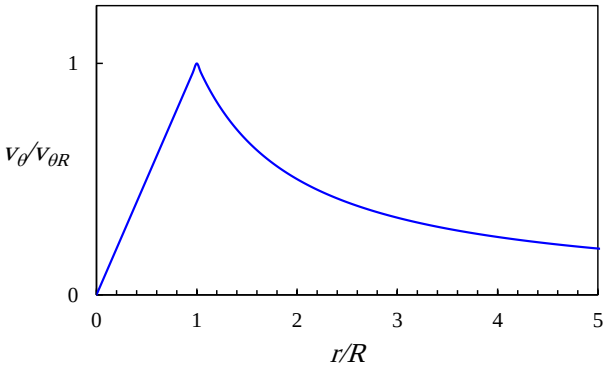



**Fig. 4** Tangential velocity profile based on Rankin vortex model

**شکل 4** پروفیل توزیع سطحی سرعت مماسی گرداب بر اساس مدل رانکین

[2] Closed loop
[3] Rankine's model

طبق تعریف، کمیت چرخش[1] یک جریان گردابی خالص با سرعت مماسی $v_\theta$ حول مداری به شعاع $r$ از محور گرداب، با رابطه (1) محاسبه می‌گردد. با فرض ثابت بودن سرعت مماسی، مقدار چرخش برحسب موقعیت شعاعی $r$، از طریق یکی از دو رابطه (2) یا (3) به‌دست می‌آید.

$$\Gamma \triangleq \int_0^{2\pi} v_\theta \, r d\theta \tag{1}$$

$$\Gamma = (2\pi R^2)\frac{v_\theta}{r} : r < R \tag{2}$$

$$\Gamma = 2\pi r v_\theta : r > R \tag{3}$$

در روابط (1) تا (3)، $\Gamma$ چرخش و $r$ شعاعی است که در آن $v_\theta$ اندازه‌گیری شده‌است. طبق روابط فوق، هر عاملی که موجب تغییر در مقدار سرعت مماسی جریان گردد، مستقیماً منجر به تقویت یا تضعیف گرداب می‌شود [7].

جریان‌های گردابی در زمره جریان‌های سطح آزاد دسته‌بندی می‌شوند [7]. در این جریان‌ها متغیرهای هندسی و خواص فیزیکی سیال در چگونگی شکل‌گیری و گسترش جریان مؤثراند. براساس نظریه تحلیل ابعادی[2]، در مطالعه عمق استغراق بحرانی آبگیر چهار عدد بدون بعد مهم عبارت‌اند از [20]:

$$\left(\frac{S_i}{D}\right)_c = f\left(\frac{4Q}{\pi(gD^5)^{0.5}}, \frac{Q}{\nu S_i}, \frac{(Q/rS_i)^2}{\sigma/(\rho r)}, \frac{\Gamma D}{Q}\right) \tag{4}$$

در رابطه (4)، $Q$ دبی حجمی آبگیر، $D$ قطر لوله آبگیر، $r$ شعاع لوله آبگیر، $\rho$ چگالی آب، $\nu$ لزجت سینماتیکی آب، کشش سطحی بین آب و هوا، $g$ شتاب ثقل، $f$ یک تابع که وابسته به هندسه آبگیر است و $(S_i/D)_c$ عمق استغراق نسبی بحرانی آبگیر است. با توجه به تعریف اعداد بدون بعد فرود[3]، رینولدز[4]، وبر[5] و چرخش[6]، رابطه (4) به شکل زیر خواهد شد:

$$\left(\frac{S_i}{D}\right)_c = f(\mathrm{Fr}, \mathrm{Re}, \mathrm{We}, \Gamma_N) \tag{5}$$

افزایش $\Gamma_N$ به‌طور مستقیم موجب افزایش $(S_i/D)_c$ می‌گردد [7]. همچنین در ابعاد واقعی، از بین سه عدد بدون‌بعد فرود، رینولدز و وبر، عدد فرود بیشترین تأثیر را بر عمق استغراق بحرانی آبگیر دارد [20, 7]. برای کم‌کردن اثرات مقیاسی لزجت و کشش سطحی در مطالعات آزمایشگاهی گرداب، اعداد رینولدز و وبر باید بالاتر از آستانه‌های بحرانی این اعداد باشند [2]. در جدول 2 مقادیر اعداد رینولدز و وبر در تحقیق حاضر و فاصله آن‌ها نسبت به آستانه‌های بحرانی هر یک نشان داده شده است.

با توجه به جدول 2، $\mathrm{Re} > \mathrm{Re_c}$ و $\mathrm{We} > \mathrm{We_c}$، در نتیجه، رابطه (5) را می‌توان به یکی از دو صورت زیر ساده نمود:

$$\left(\frac{S_i}{D}\right)_c = f_1(\mathrm{Fr}, \Gamma_N) \tag{6}$$

$$\Gamma_N = f_2\left[\mathrm{Fr}, \left(\frac{S_i}{D}\right)_c\right] \tag{7}$$

**جدول 2** مقادیر Re و We در تحقیق حاضر و مقایسه آن با آستانه‌های بحرانی

**Table 2** Re and We in the present study and the critical thresholds

| مأخذ | [23] | [22] | [21] | آزمایش‌های حاضر |
|---|---|---|---|---|
| $\mathrm{Re_c}$ | 110000 | 77000 | 32000 | 153000 |
| $\mathrm{We_c}$ | 720 | 600 | 120 | 3056 |

[1] Circulation
[2] Dimensional analysis theory
[3] Froude Number
[4] Reynolds Number
[5] Weber Number
[6] Circulation Number

در نمودارهای "شکل 5" دامنه تغییرات متغیرهای هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

## 3- ارائه و تحلیل نتایج

### 3-1- ارتباط مرتبه گرداب با پارامترهای آبگیر

"شکل 6"، تصویری از یک گرداب مرتبه 6 (با هسته هوا)، تشکیل‌شده در آزمایشگاه در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در این شکل پدیده دوفازه شدن شدید جریان در مجرای آبگیر ناشی از اختلاط آب و هوا کاملاً مشخص است. در "شکل 7" نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر در ارتباط با مشاهدات مرتبه گرداب به ازای مقادیر مختلف Fr و $S_i/D$ نشان داده شده است.

با توجه به "شکل 7"، کاهش $S_i/D_i$ و افزایش $\mathrm{Fr_i}$، هر دو به افزایش مرتبه گرداب منجر می‌گردند. مقادیر پارامترهای مربوط به "شکل 7" در جدول 3 نیز ارائه گردیده است (در گرداب مرتبه 6 وضعیت $S_{ci}$ برقرار است).

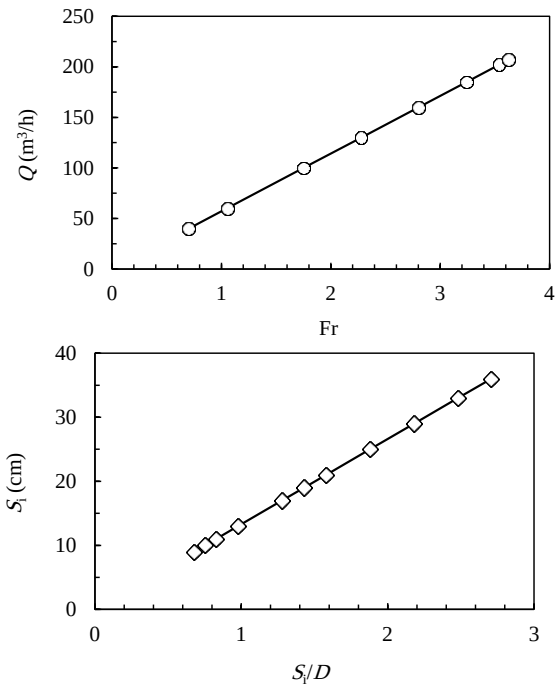



**Fig. 5** Range of Fr and $S_i/D$ variation in this study

**شکل 5** دامنه تغییرات Fr و $S_i/D$ در این مطالعه

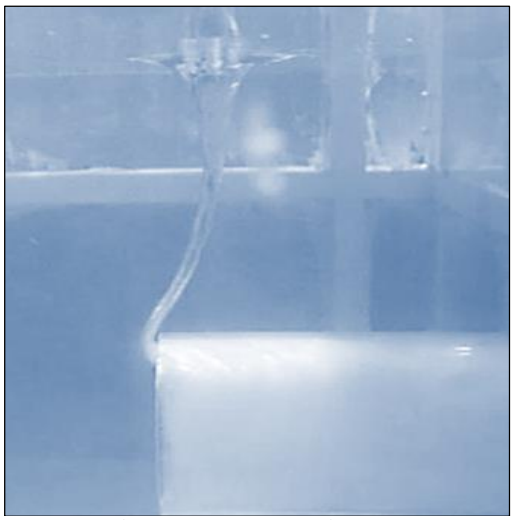


**Fig. 6** Photograph of a type 6 vortex and its formed air-core

**شکل 6** تصویری از گرداب مرتبه 6 و هسته هوای تشکیل‌شده ناشی از آن.

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



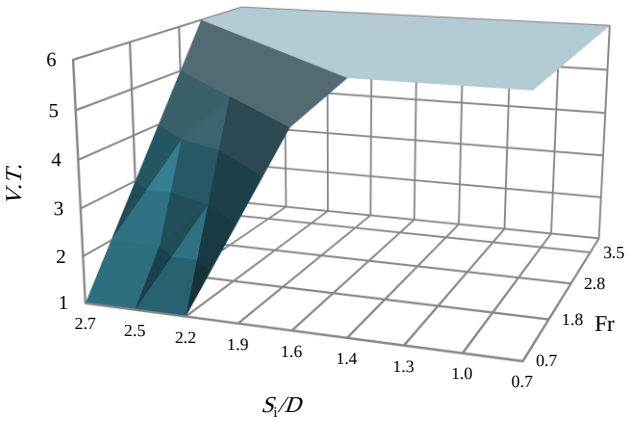



**Fig. 7** Relation between vortex type and hydraulic parameters of intake

**شکل 7** ارتباط بین مرتبه گرداب (*V.T.*) و متغیرهای هیدرولیکی آبگیر

**جدول 3** ارتباط آزمایشگاهی بین مقادیر مرتبه گرداب، Fr و $S_i/D$

**Table 3** Experimental relation between *V.T.*, Fr and $S_i/D$

| $S_i/D$ | | | | | | | | | Fr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.7 | 1.0 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.9 | 2.2 | 2.5 | 2.7 | |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.7 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 3 | 2 | 2 | 1.1 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 1.8 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 2.3 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 2.8 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3.2 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3.5 |
| 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3.6 |

با توجه به تأثیرپذیری هم‌زمان مرتبه گرداب از دو متغیر Fr و $S_i/D$، لذا با استفاده از ترکیب این دو متغیر، شاخص $P_N$ به‌عنوان عدد آبگیر، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_N = \mathrm{Fr}(S_i/D)^{-1} \tag{8}$$

براساس این تعریف، یک تحلیل کمی از تأثیر عدد $P_N$ بر مرتبه گرداب، در "شکل 8" ارائه شده است.

با توجه به این شکل، در حالتی که $P_N \geq 1$، آبگیر در معرض تشکیل گرداب مرتبه 6 پایدار با هسته هوای کامل قرار دارد. این در حالی است که در محدوده $0.5 \leq P_N < 1$ حالت دائمی هسته هوا برطرف می‌شود و از قطعیت حالت بحرانی تا حد زیادی کاسته می‌گردد، ولی به‌دلیل رفتار تناوبی گرداب،

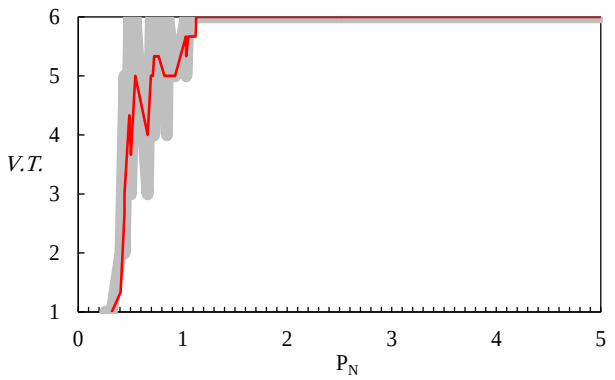



**Fig. 8** Variation of *V.T.* vs. $P_N$

**شکل 8** تغییرات مرتبه گرداب (*V.T.*) نسبت به $P_N$

زمینه بازگشت به شرایط بحرانی هم‌چنان باقی است (به‌گونه‌ای که امکان تشکیل ستون هوا بصورت لحظه‌ای وجود دارد). تنها چنانچه عدد آبگیر در وضعیت $P_N < 0.5$ قرار داشته باشد، زمینه ایجاد شرایط بحرانی در کوتاه‌مدت و میان‌مدت مرتفع می‌شود. این نتیجه‌گیری در عین سادگی، از اهمیت کاربردی بالایی در پیش‌بینی وضعیت بحرانی آبگیر برخوردار است. نکته حائز اهمیت دیگر آن‌که در محدوده $1 < P_N \leq 5.5$، هر چند مرتبه گرداب بر روی عدد 6 ثابت باقی می‌ماند، ولی افزایش $P_N$ متناظر با افزایش قدرت گرداب‌های مرتبه 6 نسبت به یکدیگر است.

### 3-2- ناحیه تشکیل گرداب‌های پایدار

از نظر پایداری، گرداب‌های ایجاد شده در آبگیرها را می‌توان به دو دسته کلی پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی نمود. در وضعیت ناپایدار، وجود گرداب بستگی زیادی به عوامل تحریک‌کننده‌ای نظیر وجود چرخندگی[1] در میدان جریان دارد، به‌گونه‌ای که با حذف این عامل، گرداب ایجاد شده ساختار خود را از دست می‌دهد. با ورود گرداب به وضعیت پایدار، از میزان این وابستگی کاسته می‌شود.

یکی از ویژگی‌های مهم رفتاری گرداب‌های سطح آزاد، ناپایداری زمانی و مکانی آن‌ها از لحظه شکل‌گیری تا زمان رسیدن به مرحله رشد کامل است. تحقیقات کاری‌ویو و همکاران [24] نشان می‌دهد که این گرداب‌ها پس از شکل‌گیری، از نظر ساختار فیزیکی به مرحله‌ای می‌رسند که تغییرات عوامل هیدرولیکی محیطی تأثیری بر پایداری آن‌ها ندارد (گرداب‌های موسوم به PSSV[2]). در مقابل این دسته، گرداب‌هایی قرار دارند که نسبت به تغییر عوامل هیدرولیکی محیطی حساسیت بیشتری از خود نشان داده و با تغییر عوامل محیطی و حذف عامل محرکه از محیط، دوام خود را از دست می‌دهند (گرداب‌های موسوم به NPSSV[3]). می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که گرداب‌های کلاس A در دسته PSSV و گرداب‌های کلاس B و C در دسته NPSSV جای می‌گیرند.

در این بخش از تحقیق حاضر رفتار گرداب‌های سطح آزاد از نظر ناپایداری مکانی (تغییرات جابجایی سطحی) و مدت‌زمان لازم برای رسیدن گرداب به حالت پایداری کامل (PSSV)، و ارتباط این دو پارامتر با متغیر $P_N$ در محدوده داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در "شکل‌های 9 و 10" نشان داده شده است. نقاط مشخص‌شده بر روی "شکل 9" حاصل عکس‌برداری و برداشت‌های دقیق مشاهده‌ای هستند. در "شکل 9" گرداب‌های کلاس B و C در شرایط $P_N < 1$، و گرداب‌های کلاس A در شرایط $P_N \geq 1$ قرار دارند.

همچنین نمونه‌ای از فرآیند رشد هسته هوا در گرداب‌های سطح آزاد در آزمایشگاه (که معیاری از افزایش پایداری این گرداب‌ها است)، در تصاویر چهارگانه "شکل 11" نشان داده شده است (این تصاویر مربوط به حالت‌هایی است که گرداب سطح آزاد تشکیل شده، در یکی از دو وضعیت کلاس B یا کلاس A قرار دارد).

در نمودارهای "شکل 12" نتایج این بخش از تحقیق، با نتایج ارائه شده در مرجع [24] مقایسه گردیده است. در تحقیق مذکور از متغیر بدون‌بعد $S = (S_i/D)\,\mathrm{Re}^{-1}$ برای تعریف گرداب‌های پایدار استفاده شده است.

نمودارهای "شکل 12" نشان می‌دهند که روند تغییرات پارامتر زمان رشد هسته گرداب در هر دو تحقیق آزمایشگاهی از الگوی مشابهی پیروی می‌کند،

[1] Vorticity
[2] Purely Stretching-Sustained Vortices (PSSV)
[3] Non-Purely Stretching-Sustained Vortices (NPSSV)

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



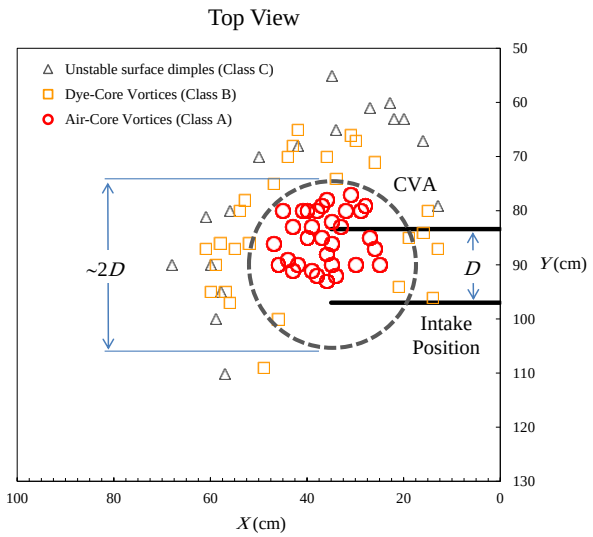



**Fig. 9** Pattern of surface displacement of the vortex core

**شکل 9** الگوی جابجایی هسته گرداب بر روی سطح آب

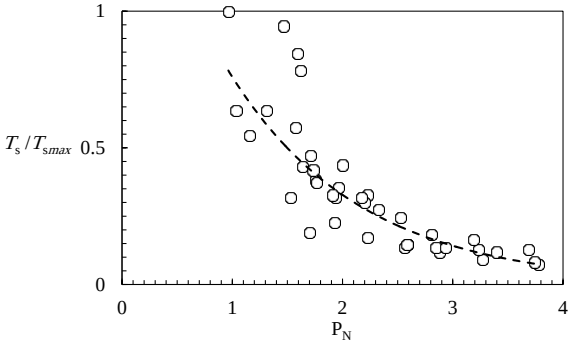



**Fig. 10** Stability of type 6 vortex versus $P_N$

**شکل 10** مدت‌زمان موردنیاز تشکیل گرداب نوع 6 به‌ازای شاخص $P_N$

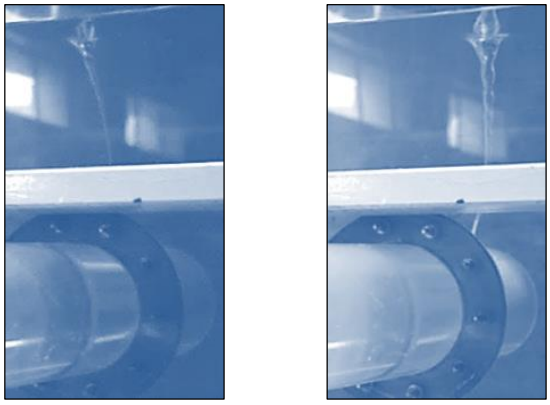
بگونه‌ای که و با کاهش عمق استغراق و افزایش جریان حجمی آبگیر، هسته چرخشی گرداب سریع‌تر رشد می‌کند و در نتیجه هسته هوا با سرعت بیشتری خود را از سطح آب به دهانه آبگیر می‌رساند. سرعت پیشروی عمقی هسته هوا را می‌توان با پارامتر $v_s = S_i/T_s$ تقریب زد.

براساس نتایج آزمایشگاهی، نحوه تغییرات $v_s$ نسبت به شاخص $P_N$ مطابق "شکل 13" می‌باشد. با توجه ضریب همبستگی $R^2 = 0.98$، رابطه قابل پیشنهاد بین این دو پارامتر به‌صورت رابطه (8) خواهد بود.

$$v_s = 0.004 P_N^{1.30} \quad (9)$$

رابطه بالا برای یک آبگیر افقی در محدوده آزمایشی $1 < P_N \leq 2.5$ صادق است.

1 (Class B) 2 (Class B)



3 (Class A) 4 (Class A)

**Fig. 11** Photographs of the vortex core development steps

**شکل 11** تصاویر مراحل رشد هسته گرداب

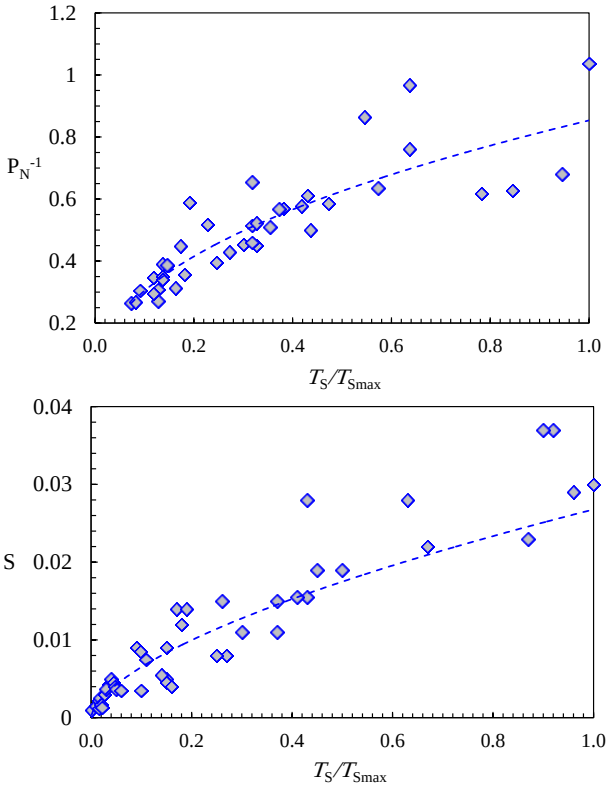



**Fig. 12** Results of vortex formation time based on $P_N$ and S

**شکل 12** نتایج پارامتر زمان شکل‌گیری گرداب به‌ازای شاخص‌های $P_N$ و S

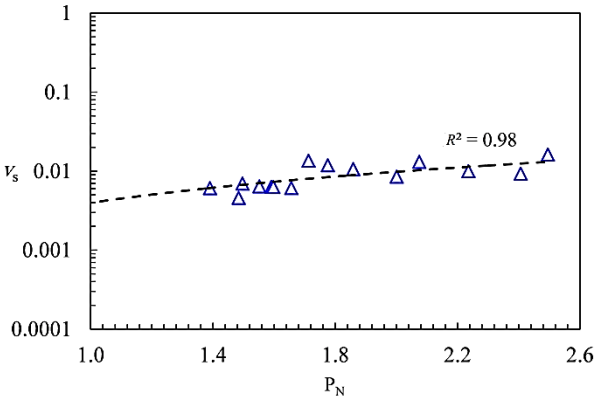



**Fig. 13** Velocity of increasing of the air core depth versus $P_N$

**شکل 13** نمودار سرعت افزایش عمق هسته هوا نسبت به شاخص $P_N$

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



با رجوع به "شکل 10" و استناد به شواهد و مشاهدات آزمایشگاهی نکته مهم دیگری نیز به‌دست می‌آید و آن این‌که، در تخمین عمق استغراق بحرانی آبگیر باید مقیاس زمان نیز دخالت داده شود. به بیان دیگر، چنان‌چه مقیاس زمانی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود، در وضعیت $P_N < 0.5$ نیز (مشروط به سپری شدن زمان موردنیاز)، آبگیر در معرض وضعیت بحرانی قرار خواهد گرفت. البته هسته هوای تشکیل شده در این شرایط به لحاظ ابعاد فیزیکی بسیار نازک و حجم هوای مخلوط شده با جریان نیز ناچیز است، ولی رفتار آن دائمی است.

### 3-3- مطالعه نرخ ورود هوا به داخل آبگیر

با ورود آبگیر به شرایط فوق بحرانی ($S_{ci}$) که منجر به تشکیل گرداب‌های با هسته هوا می‌گردد، مخروط هوا به داخل آبگیر وارد می‌شود و جریان در قسمتی از دهانه آبگیر و یا سرتاسر مقطع ورودی، دوفازه (مخلوطی از آب و هوا) می‌شود. بسته به درصد هوای ورودی، از راندمان آبگیر کاسته می‌گردد. درصد هوای ورودی با شاخص $\beta = Q_a/Q_w$ بیان می‌شود که در آن $Q_a$ جریان حجمی هوا و $Q_w$ نرخ آبگذری آبگیر است [2]. یکی از وجوه تمایز گرداب‌های با هسته هوا (مرتبه 6) با یکدیگر، تفاوت در مقدار شاخص $\beta$ است که ارتباط مستقیمی با قدرت گرداب مرتبه 6 دارد.

ورود هوا به داخل مجاری هیدرولیکی تحت فشار می‌تواند به تبعات نامطلوبی از لحاظ کارایی و ایمنی تأسیسات منجر شود، به‌گونه‌ای که حتی ورود مقدار کمی هوا ممکن است تا 1% از راندمان ماشین‌های هیدرولیکی بکاهد [2] و اگر $\beta$ به 1.5% برسد، راندمان تا حدود 16% کاهش یابد [25] و زمانی که $\beta$ به 4% برسد، راندمان به‌صورت نمایی افت خواهد کرد [2]. بسته به نوع ماشین هیدرولیکی، قرارگیری $\beta$ بین 7% تا 20%، افت شدید راندمان و یا مسدود شدن کامل جریان را موجب خواهد شد (پمپ‌های محوری نسبت به پمپ‌های گریز از مرکز از این نظر آسیب‌پذیرتر هستند) [26]. در کنار این تبعات، محبوس‌شدن هوا در داخل تونل‌ها می‌تواند باعث ایجاد امواج فشاری شود و به لوله‌ها و مجاری حامل جریان آسیب جدی وارد سازد [27].

در تحقیق حاضر، مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که متوسط قطر هسته هوا در گرداب‌های مرتبه 6 (با هسته هوا)، متناسب با افزایش شاخص $P_N$ افزایش می‌یابد. نتیجه آن‌که، حجم هوای نفوذ یافته به داخل آبگیر نیز افزایش خواهد یافت.

در "شکل 14" تصاویر برداشت شده از دو گرداب مرتبه 6 مختلف در آزمایشگاه نشان داده شده است. در این شکل، گرداب سمت راست قوی‌تر از گرداب سمت چپ است (بدون نیاز به اندازه‌گیری مقدار $v_\theta$ و سپس بسته به موقعیت $r$، استفاده از یکی از دو رابطه (2) یا (3) برای محاسبه شاخص قدرت گرداب ($\Gamma$)، تفاوت ابعاد فیزیکی هسته هوای گرداب در تصاویر سمت راست و چپ مؤید این نکته است که گرداب مرتبه 6 نشان داده شده در تصویر سمت راست، از گرداب مرتبه 6 در تصویر چپ سمت چپ قوی‌تر است). وجود حباب‌های ریز و متراکم هوا که باعث تغییر رنگ محسوس جریان در طول قابل توجهی از لوله آبگیر در تصویر سمت راست شده است نیز این موضوع را تأیید می‌کند، حال آن‌که در تصویر سمت چپ این تغییر رنگ موضعی و محدود است.

بخشی از آزمایش‌های پایانی این تحقیق به بررسی میزان ورود هوا به داخل آبگیر و ارتباط آن با عدد آبگیر اختصاص یافت. چنانچه سرعت ورود هوا به‌داخل آبگیر مساوی سرعت متوسط جریان آبگیر در این مقطع در نظر

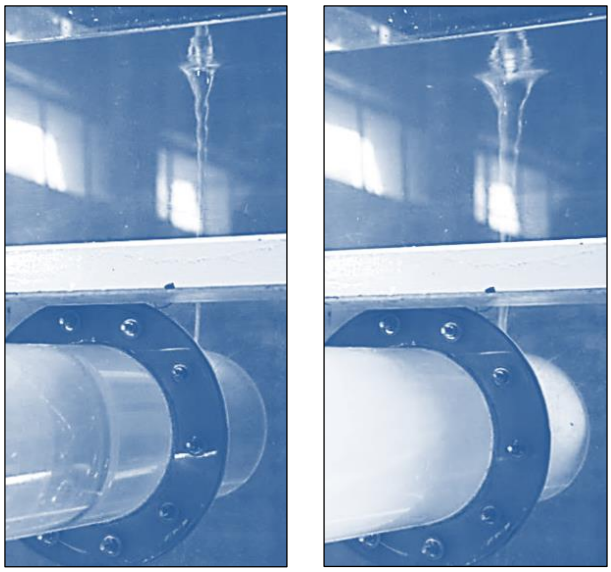


**Fig. 14** Two different type 6 vortices in the present study

**شکل 14** تصاویری از دو گرداب مرتبه 6 مختلف در این آزمایش‌ها

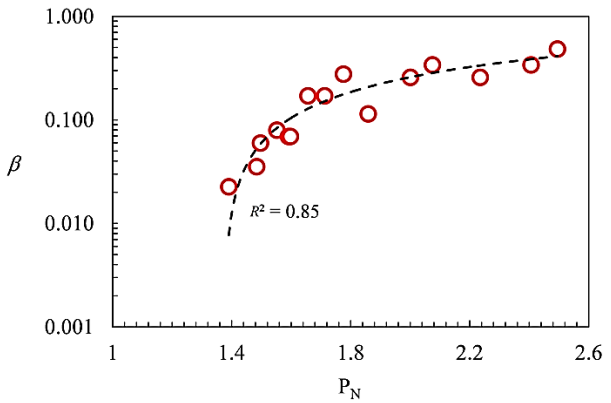



**Fig. 15** Vortex-induced air entraining rate at intake versus $P_N$

**شکل 15** نسبت حجمی هوای ورودی به آبگیر به ازای شاخص $P_N$

گرفته شود، با ضرب سطح مقطع ستون هوا در لحظه ورود به آبگیر، در سرعت جریان آبگیر، می‌توان حجم هوای مخلوط شده با جریان آبگیر را تخمین زد. در این آزمایش‌ها دامنه تغییرات Fr بین 3.3 تا 3.7 و دامنه تغییرات $S_i/D$ بین 1.5 تا 2.4 در نظر گرفته شد. نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده در این آزمایش‌ها در "شکل 15" نمایش داده شده است. در این شکل تغییرات مقدار $\beta$ در برابر $P_N$ رسم شده است.

با توجه به شکل 15 و ضریب همبستگی مناسب داده‌ها ($R^2 = 0.85$) رابطه زیر را می‌توان بین دو پارامتر $P_N$ و $\beta$ برقرار دانست:

$$\beta = 0.69 \ln P_N - 0.22 \qquad (10)$$

همچنین در "شکل 16" نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با نتایج قبلی ارائه‌شده در تحقیقات پادمانابان [22] و همچنین نتایج تحقیقات مولر و همکاران [4] مقایسه گردیده است. شایان ذکر است که در نمودار "شکل 16" $Fr^* = V_i/\sqrt{gS_i}$ تعریف عدد فرود آبگیر برمبنای عمق استغراق است. دامنه تغییرات $Fr^*$ در تحقیقات مولر و همکاران [4] بین 0.4 تا 0.8، و در تحقیقات حاضر بین 2 تا 3 می‌باشد.

در "شکل 16" خط‌چین قرمز رنگ، مجانبی است که حداکثر مقدار مشاهده شده $\beta$ در آزمایش‌های پادمانابان [22] را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



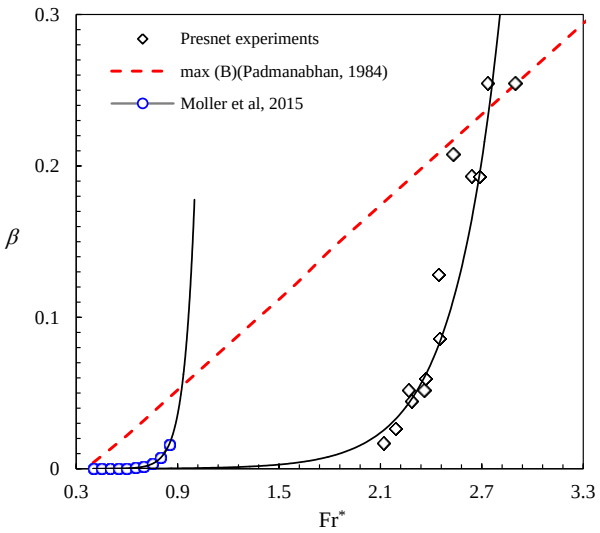



**Fig. 16** Comparison between $\beta$ in present and previous researches

**شکل 16** مقایسه $\beta$ در تحقیق حاضر با نتایج ارائه شده توسط محققین پیشین

که کلیه مقادیر آزمایشگاهی به‌دست آمده توسط وی در حالت‌های مختلف، به‌صورت پراکنده در ناحیه زیر این خط‌چین جای دارند [7].

مولر و همکاران [4] براساس نتایج آزمایشگاهی خود، رابطه تجربی زیر را برای پیش‌بینی مقدار $\beta$ پیشنهاد نمودند:

$$\beta = 2 \times 10^{-8} \exp(16\mathrm{Fr}^*) \qquad (11)$$

نمودار "شکل 16" نشان می‌دهد که در محدوده $\mathrm{Fr}^* \geq 0.9$ مقادیر حاصل از رابطه (10) از محدوده مجانب ترسیم شده توسط پادمانابان در مرجع [22] فراتر می‌رود. این در حالی است که با استفاده از نتایج تحقیق حاضر، رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\beta = 2 \times 10^{-6} \exp(4.3\mathrm{Fr}^*) \qquad (12)$$

با توجه به "شکل 16" نتایج حاصل از رابطه (11) تا محدوده $\mathrm{Fr}^* \cong 3$ همچنان در محدوده مرز مجانب قرار دارد. با توجه به نحوه تعریف $\mathrm{Fr}^*$ می‌توان چنین استدلال نمود که تفاوت عمده در آزمایش‌های مرجع [4] با تحقیقات حاضر، مربوط به اختلاف در دامنه مقادیر اعداد آبگیر می‌باشد.

## 4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

گرداب‌های با سطح آزاد پدیده‌های محدودکننده‌ای در انواع آبگیرهای صنعتی و تأسیسات هیدرومکانیکی وابسته به آن به‌شمار می‌روند. علی‌رغم این‌که مطالعات زیادی تاکنون در رابطه با شناخت رفتار و ویژگی‌های این دسته از گرداب‌ها انجام شده است، ولی این موضوع همچنان یکی از موضوعات تحقیقاتی فعال از منظر دینامیک سیالات کاربردی است که تحقیقات کاربردی در حوزه‌های مختلف آن ادامه دارد. بر همین اساس، در این تحقیق نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه دینامیک گرداب‌های با هسته هوا و همچنین میزان هوای داخل شده به یک آبگیر افقی ارائه گردید. دستاوردهای این تحقیق را می‌توان به‌ترتیب زیر خلاصه نمود:

1. با تعریف متغیر عدد آبگیر ($\mathrm{P_N}$) به‌صورت $\mathrm{P_N} = \mathrm{Fr_i}(S_i/D)^{-1}$، از این شاخص برای تحلیل و پیش‌بینی شرایط بحرانی در آبگیر مورد مطالعه استفاده شد. بر این اساس، در حالت $\mathrm{P_N} \geq 1$، آبگیر کاملاً مستعد تشکیل گرداب با هسته هوا (گرداب‌های کلاس A) است و در وضعیت فوق‌بحرانی (ورود پیوسته هسته هوا به آبگیر) قرار دارد. در ناحیه $0.5 \leq \mathrm{P_N} < 1$ از احتمال وضعیت فوق‌بحرانی تا حد زیادی کاسته می‌شود، ولی زمینه این رخداد هم‌چنان باقی است (آبگیر در وضعیت بحرانی و آستانه ورود دائمی هسته هوا به آبگیر قرار دارد). در وضعیت $\mathrm{P_N} < 0.5$ آبگیر در میان مدت نسبت به وقوع گرداب‌های کلاس A ایمن است.

2. با افزایش $\mathrm{P_N}$ از میزان ناپایداری مکانی گرداب‌های سطح آزاد کاسته می‌شود، به‌گونه‌ای که در حالت $\mathrm{P_N} \geq 1$ این ناپایدرای بر روی سطح آب به دایره‌ای در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به مرکز آبگیر و به قطر حداکثر دو برابر قطر لوله آبگیر محدوده می‌شود. یکی از وجوه اهمیت این یافته در آن است که نشان می‌دهد طراحی سیستم‌ها و ادوات ضدگرداب بایستی عمدتاً بر روی این ناحیه متمرکز باشد.

3. با افزایش $\mathrm{P_N}$، مدت‌زمان لازم برای تشکیل کامل هسته هوا به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد (سرعت ایجاد شرایط فوق بحرانی بیشتر می‌شود). براساس نتایج این بخش از آزمایش‌ها، رابطه‌ای به‌صورت $v_s = f(\mathrm{P}_N)$ برای تخمین سرعت رشد هسته هوا برحسب عدد آبگیر پیشنهاد گردید. نتایج این بخش نشان داد که باید در پیش‌بینی و محاسبه پارامتر عمق استغراق بحرانی پارامتر زمان در نیز مدنظر قرار داده و در محاسبات طراحی وارد نمود.

4. با افزایش $\mathrm{P_N}$، مقدار نسبت حجمی هوای ورودی به آبگیر ($\beta$) افزایش می‌یابد. براساس نتایج آزمایش‌های این بخش، بین مقادیر $\mathrm{P_N}$ و $\beta$ یک رابطه لگاریتمی برقرار گردید. همچنین برای تخمین میزان هوای ورودی به آبگیر برای محدوده $2 \leq \mathrm{Fr}^* \leq 3$ رابطه مستقلی پیشنهاد شد و با نتایج محققین پیشین مقایسه گردید.

## 5- تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از همکاری آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و همچنین آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران) به‌واسطه همکاری‌های آزمایشگاهی ارزنده، تقدیر و تشکر نمایند.

## 6- فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $D$ | قطر لوله آبگیر |
| $f, f_1, f_2$ | توابعی از هندسه آبگیر |
| Fr | عدد فرود آبگیر |
| $\mathrm{Fr}^*$ | عدد فرود آبگیر برحسب عمق استغراق |
| $g$ | شتاب ثقل |
| $\mathrm{P_N}$ | متغیر ترکیبی آبگیر |
| $Q_a$ | دبی حجمی هوا |
| $Q$ | دبی حجمی آبگیر |
| $Q_w$ | دبی حجمی آب |
| $r$ | فاصله از مرکز گرداب |
| $R$ | شعاع در مرز ناحیه غیرچرخشی گرداب |
| Re | عدد رینولدز آبگیر |
| S | نسبت عمق استغراق نسبی به عدد رینولدز آبگیر |
| $S_c$ | عمق استغراق بحرانی آبگیر |
| $S_{ci}$ | عمق استغراق در شرایط فوق بحرانی |
| $S_i$ | عمق استغراق آبگیر |
| $(S_i/D)_c$ | عمق استغراق بحرانی نسبی |
| $T_s$ | پارامتر زمانی رشد گرداب |
| $V_i$ | سرعت جریان آبگیر |

نسخه پیش از انتشار برای تایید نویسنده



$v_\theta$ سرعت مماسی

$v_s$ سرعت رشد ستون هوا

We عدد وبر آبگیر

**علایم یونانی**

$\beta$ نسبت حجمی ورود هوا به آبگیر

$\Gamma$ گردندگی گرداب

$\Gamma_N$ عدد گردندگی

$\nu$ لزجت سینماتیکی

$\rho$ چگالی (دانسیته) آب

$\sigma$ کشش سطحی بین آب و هوا

## 7- مراجع


[1] F. Suerich-Gulick, S. J. Gaskin, M. Villeneuve, É. Parkinson, Characteristics of Free Surface Vortices at Low-Head Hydropower Intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140, No. 2, pp. 291-299, 2014.

[2] G. Möller, M. Detert, R. M. Boes, Air entrainment due to vortices: State-of-the-art, *2nd International Association of Hydraulic Engineering Europe Congress*, Munich, Germany, IAHR Press, pp. B16, 2012.

[3] J. Keller, G. Möller, R. M. Boes, PIV measurements of air-core intake vortices, *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 40, No. 4, pp. 74–81, 2014.

[4] G. Möller, M. Detert, R. M. Boes, Vortex-Induced Air Entrainment Rates at Intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 11, pp. 1-8, 2015.

[5] 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.

[6] L. Rahm, *Flow Problems with Respect to Intakes and Tunnels of Swedish Hydro-Electric Power Plants*, Bulletin, No. 36, Institution of hydraulic at the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1953.

[7] J. Knauss, Prediction of critical submergence, swirling flow problems at intakes, *IAHR Hydraulic Structures Design Manual*, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 57–76, 1978.

[8] 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.

[9] J. S. Guilliver, A. J. Rindels, Weak vortices at vertical intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 9, pp. 1101-1116, 1987.

[10] H. Sarkardeh, A. R. Zarrati, E. Jabbari, R. Roshan, Discussion of prediction of intake vortex risk by nearest neighbors modeling, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 6, pp. 701–705, 2012.

[11] 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 (ICE)*, Vol. 164, No. 4, pp. 193–200, 2013.

[12] M. Azarpira, H. Sarkardeh, S. Tavakkol, R. Roshan, H. Bakhshi. Vortices in dam reservoir: A case study of Karun III dam, *Journal of Sādhanā*, Vol. 39, No. 5, pp. 1201-1209, 2014.

[13] 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 فارسی)

[14] G. S. Constantinescu, V. C. Patel, A numerical model for simulation of pump intake flow and vortices, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 123-134, 1998.

[15] H. Sarkardeh, A. R. Zarrati, E. Jabbari, M. Marosi, Numerical simulation and analysis of flow in a reservoir in the presence of vortex, *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 598–608, 2014.

[16] B. Khadem-Rabe, S. H. Ghoreishi-Najafi, H. Sarkardeh, Numerical simulation of anti-vortex devices at water intakes, *Journal of Water Management (ICE)*, Vol. 170, No. 3, pp. 1-12, 2016.

[17] B. Khadem-Rabe, S. H. Ghoreishi-Najafi, H. Sarkardeh, Numerical Simulation of Air-Core Vortex at Intake, *Journal of Current Science*, Vol. 112, No. 11, pp. 435-448, 2017.

[18] H. O. Anwar, J. A. Weller, M. B. Amphlett, Similarity of free vortex at horizontal intakes, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 95–105, 1978.

[19] W. J. M. Rankine, *A Manual of Applied Mechanics*, pp. 630-670, London, R. Griffen., 1861.

[20] S. M. Borghei, A. R. Kabiri-Samani, Effect of anti-vortex plates on critical submergence at a vertical intake, *Journal of Scientia Iranica*, Vol. 17, No. 2, pp. 89-95, 2010.

[21] L. R. Daggett, G. H. Keulegan, Similitude in free surface vortex formations, *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 100, No. 11, pp. 561-81, 1974.

[22] M. Padmanabhan, G. E. Hecker, Scale effect in pump sump models, *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 110, No. 10, pp. 1540-1556, 1984.

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

[24] R. Carriveau, G. Kopp, R. Baddour, Stretching-sustained intake vortices, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 4, pp. 486-491, 2009.

[25] B. Papillon, J. Kirejczyk, M. Sabourin, Atmospheric air admission in hydroturbines, *HydroVision International*, Charlotte, North California, USA, 2000.

[26] A. Poullikkas, Effects of entrained air on the performance of nuclear reactor cooling pumps, *Proceedings of Information Technology and Electro-technology for the Mediterranean Countries Conference (MEIeCon)*, pp. 1028-1031, 2000.

[27] L. Zhou, D. Liu, B. Karney, Investigation on hydraulic transients of two entrapped air pockets in a water pipeline, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 9, pp. 949-959, 2013.