

بررسی خصوصیات هیدرولیکی گرداب با هسته هوا در شرایط استغراق بحرانی با روش سرعت‌سنجی ردیابی ذرات

ودود نادری*^۱، داود فرسادی‌زاده^۲، چنگ لین^۳ و سوزان گاسکین^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

۱- دانشجوی سابق دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی چونگ-هسینگ، تایپه، تایوان

۴- استاد گروه مهندسی عمران و مکانیک کاربردی، دانشگاه مک گیل، مونترئال، کانادا

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vadoudnaderi@gmail.com

چکیده

وقوع گرداب در سازه‌های هیدرولیکی مسئله‌ای طبیعی همراه با آثار منفی بر عملکرد این سازه‌ها به حساب می‌آید. برای شناخت بهتر این پدیده پیچیده علاوه بر مطالعات ماکروسکوپی بر روی عمق استغراق بحرانی و سازه‌های ضد گرداب، انجام پژوهش‌های میکروسکوپی جهت بررسی مشخصات هیدرولیکی گرداب نیز ضروری می‌نماید. در تحقیق حاضر یک جریان گردابی قوی با هسته هوا در حالت استغراق بحرانی بر روی آبگیر قائم در کانالی عریض ایجاد و مولفه‌های سه بعدی سرعت جریان با به کارگیری روش سرعت سنجی ردیابی ذرات اندازه‌گیری شد. با بررسی مولفه‌های سرعت گرداب با هسته هوا و پروفیل سطح آب، روند تغییرات خصوصیات هیدرولیکی گرداب در مسیر جریان گردابی مشخص شده و اطلاعات نوینی از ساختار سه بعدی گرداب با هسته هوا بدست آمد. بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که روش سرعت سنجی ردیابی ذرات (PTV) می‌تواند اطلاعات مفید و نوینی از نحوه توزیع مولفه‌های سرعت در ساختار جریان گردابی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: آبگیر قائم، استغراق بحرانی، سازه‌های هیدرولیکی، سرعت سنجی ردیابی ذرات، گرداب با هسته هوا

Investigating of Hydraulic Characteristics of an Air-Core Vortex under Critical Submergence Condition Using Particle Tracing Velocimetry

V Naderi^{1*}, D Farsadizadeh², Ch Lin³ and S Gaskin⁴

Received: January 29, 2018 Accepted: March 17, 2019

¹Former PhD Student, Dept. of Water Science and Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

²Prof., Dept. of Water Science and Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

³Prof., Dept. of Civil Eng., NCHU, Taichung, Taiwan

⁴Prof., Dept. of Civil Eng. and App. Mech., McGill Univ., Montreal, Canada

*Corresponding Author, Email: vadoudnaderi@gmail.com

Abstract

Occurrence of the vortex in hydraulic structures as a natural problem has negative effects on the performance of the intakes. In order to better understanding this complex phenomenon, in addition to macroscopic studies on critical submergence and anti-vortex devices, microscopic studies are also employed to investigate the hydraulic properties of a vortex. In the present study, a strong air-core vortex under critical submergence condition was created on a vertical bottom intake at a wide flume then the three-dimensional velocity components of the flow were measured by a particle tracking velocimetry method. By analyzing the velocity components and water surface profile, the changes of the hydraulic characteristics of the vortex in the flow path were identified and a new information from a 3D vortex structure with the air core was obtained. Based on the results, it was found that the Particle Tracking Velocimetry (PTV) method can provide useful and new information about distribution of the velocity components in the vortex structure.

Key words: Air-core vortex, Critical submergence, Hydraulic structures, Particle tracing velocimetry, Vertical intake

مقدمه

مطالعات پیشین در خصوص جریان‌های گردابی به دو دسته تقسیم می‌شوند، عده‌ای از محققین به مطالعه عمق استغراق بحرانی و روش‌های افزایش ضریب دبی آبگیر در شرایط گرداب بدون هسته هوا پرداخته و عده‌ای دیگر به صورت تحلیلی معادلاتی بدست آورده‌اند که خصوصیات کلی گرداب در طبقه‌بندی‌های مختلف را تعریف می‌کند. برای اینکه گردابی بر روی آبگیر تشکیل نشود، می‌بایست یک عمق حداقل بر روی دهانه آبگیر وجود داشته باشد. این عمق، عمق استغراق بحرانی نامیده می‌شود (شکل ۱). تعیین ارتفاع تراز دهانه ورودی و خروجی آبگیر و مجرای انتقال آب در ارتباط با تراز آب در مخزن است و به عوامل متعدد دیگری نیز بستگی دارد. به طور کلی هر سازه آبگیر در شرایط استغراق کم می‌تواند مستعد وقوع گرداب باشد. در

گرداب^۱ نوعی از جریان است که حول محوری^۲ منطبق بر خطی صاف یا خمیده دوران می‌کند. تشکیل گرداب‌های با هسته هوا در آبگیرهای مخازن اثرات نامطلوبی بر عملکرد سازه‌های مذکور دارد. شناخت صحیح الگوی توزیع مولفه‌های سرعت در جریان‌های گردابی با انجام تحقیقات پایه‌ای و در حالت کلی شناخت ساختار سه بعدی گرداب‌های با هسته هوا، می‌تواند با در نظر گرفتن اصلاحاتی در طراحی سازه‌های آبگیر اثرات مثبتی در افزایش راندمان آبگیری داشته باشد. این شناخت علاوه بر افزایش عملکرد سیستم آبگیری، در کاهش هزینه‌های ساخت مخازن و نیز سازه‌های آبگیر تاثیر مثبت و غیر قابل انکاری خواهد داشت.

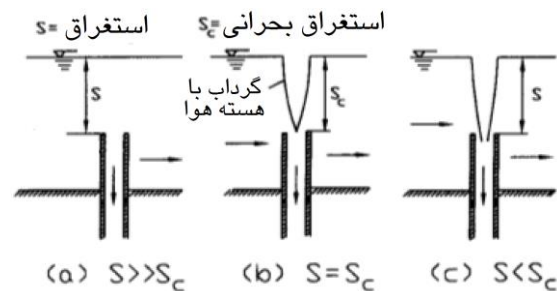
¹ Vortex

² Vortex Axis

روی ضریب دبی آبگیر قائم در شرایط جریان گرداب با هسته هوا پرداختند؛ آنها علاوه بر ضریب دبی آبگیر قائم تاثیر این ابزار ضد گرداب بر عمق استغراق بحرانی را نیز مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که استفاده از صفحات ضد گرداب مربوطه می‌تواند عمق استغراق بحرانی را کاهش و ضریب دبی آبگیر را افزایش دهد. نادری و همکاران (b ۲۰۱۴)، تاثیر ابعاد صفحات مشبک قائم بر عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای قائم با دهانه زنگی-شکل را در یک مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. طبق گزارش آنها، استفاده از صفحات مشبک ضد گرداب می‌تواند عمق استغراق بحرانی را تا ۳۵٪ کاهش دهد. ناصحی اسکویی و همکاران (۲۰۱۶) تاثیر ابعاد و نوع صفحات ضد گرداب در کاهش عمق استغراق بحرانی در آبگیر قائم را در یک مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. طبق گزارش آنها، با کاهش قطر روزنه صفحات مربوطه عمق استغراق بحرانی کاهش می‌یابد. علاوه بر پژوهش‌های مربوط به عمق استغراق بحرانی، تحقیقات متعددی برای بررسی ساختار گرداب انجام شده است. طبق گزارش کناوس (۱۹۸۷) گرداب‌هایی که در طبیعت نیز به وفور دیده می‌شوند، مطابق با مدل گرداب رانکین هستند؛ در این گرداب‌ها هسته به صورت دوران جسم صلب حرکت می‌کند و در فواصل دورتر از هسته، جریان غیر چرخشی و آزاد است؛ به طوری که بین این دو حالت لزوجت تقریباً به شکل خطی کاهش می‌یابد. لوگت (۱۹۸۳) جریان گردابی را با تئوری پتانسیل دو بعدی خویش بیان نموده و پارامتر سرعت مماسی را برای اولین بار مطرح نمود. همچنین، معادلاتی توسط هایت و میخ (۱۹۹۴) جهت تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری و پروفیل سطح آب برای گرداب‌های دارای هسته هوا در آبگیرها استنتاج شد. وانگ و همکاران (۲۰۱۱) مشخصات هیدرودینامیکی گرداب با سطح آزاد روی آبگیرها را بررسی نمودند. آنها، بر اساس معادلات ناویر استوکس و برخی فرضیات تجربی، معادلاتی برای تخمین توزیع

شکل ۱ حالت (a) بیانگر استغراق آبگیر در حالت بیش از استغراق بحرانی، حالت (b) بیانگر استغراق آبگیر در حالت استغراق بحرانی و حالت (c) بیانگر استغراق آبگیر در شرایط کمتر از استغراق بحرانی آبگیر است.

بررسی‌های متعددی برای تعیین استغراق بحرانی و جلوگیری از ایجاد جریان گردابی انجام شده است. نتیجه برخی از این تحقیقات در قالب معادلات تجربی بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی، برخی بر اساس حل تحلیلی معادلات ساده شده جریان گردابی در شرایط ایده آل و برخی دیگر بر اساس حل عددی معادلات پیوستگی و مومنتوم با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است (بیلدیریم و کوچاباش ۱۹۹۸، کناوس ۱۹۸۷، داگت و کولگان ۱۹۷۴، انوار و همکاران ۱۹۷۸، ریندلز و گالیور ۱۹۸۳، برقی و کبیری سامانی ۲۰۱۰).



شکل ۱- عمق استغراق بحرانی در آبگیر قائم رو به پایین (بیلدیریم و همکاران ۲۰۰۰).

نادری و همکاران (۲۰۱۳) با مطالعه آزمایشگاهی گرداب با هسته هوا بر روی یک آبگیر قائم با ϵ نوع مختلف پروفیل دهانه ورودی، به بررسی این تغییرات بر روی ضریب دبی آبگیر پرداختند. آنها پروفیل‌های دهانه آبگیر را به صورت قطاعی از دایره در نظر گرفتند. طبق گزارش آنها، با افزایش شعاع خمیدگی دهانه آبگیر، ضریب دبی آبگیر کاهش می‌یابد. نادری و همکاران (a ۲۰۱۴) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر صفحات مشبک ضد گرداب عمودی بر

خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد. مدل‌های اندکی برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب و مولفه عمودی سرعت گرداب ارائه شده است که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

سرعت در ساختار گرداب و پروفیل سطح آزاد آب ارائه داده و با نتایج بدست آمده از مدل آزمایشگاهی خود که با تکنیک رهگیری ذرات معلق در جریان بدست آورده بودند، مقایسه کردند. بر اساس گزارش آنها، همخوانی

جدول ۱- مدل‌های ارائه شده برای محاسبه پروفیل سطح آب و مولفه قائم سرعت گرداب.

پروفیل سطح آب	
$H_r = H_0 + \frac{1}{g} \left(\frac{\Gamma}{2\pi r_m} \right)^2 \frac{2R^2}{1 + 2R^2}$	هایت و میچ (۱۹۹۴)
$H_r = (H_\infty - H_0) \begin{cases} 0.6R^2 & R < 1 \\ -0.5(R^{-0.5} - 0.4) + 0.15 \ln(R) + 0.75 & R \geq 1 \end{cases}$	وانگ و همکاران (۲۰۱۱) - رابطه (الف)
$H_r = (H_\infty - H_0) \frac{R^2 + 0.35R}{R^2 + 0.35R + 1}$	وانگ و همکاران (۲۰۱۱) - رابطه (ب)
مولفه قائم سرعت گرداب	
$V_z = -sz$	برگر (۱۹۴۸)
$V_z = \frac{-16vr_m^2 z}{(r_m^2 + 2r^2)^2}$	هایت و میچ (۱۹۹۴)

مولیگان و همکاران (۲۰۱۶)، آزمایشات گسترده‌ای برای مطالعه ساختار گرداب در ۱۲ مدل مختلف استوانه‌ای انجام دادند. آنها با استفاده از روش ردیابی مسیر ذرات معلق در جریان، خصوصیات جریان را بصورت دو بعدی مطالعه نمودند. در مدل آنها جریان ورودی قابل تغییر بوده است بگونه‌ای که دوران و عدد گرداب را شدیداً وابسته به شرایط جریان ورودی بیان نموده‌اند، مطالعه آنها تنها بر روی آبگیر افقی انجام یافته که طبق گزارش خودشان نتایج حاصله قابل تعمیم به آبگیرهای قائم نخواهد بود.

با توجه به کم و کاستی‌های موجود در مطالعات انجام یافته در خصوص گرداب‌ها، انجام مطالعه‌ای عمیق و دقیق روی این پدیده سه بعدی پیچیده ضروری می‌نماید. اغلب مطالعات انجام شده در خصوص گرداب‌ها به عمق استغراق بحرانی و سازه‌های ضد گرداب محدود بوده و اکثراً از طریق تحقیقات

در جدول فوق H_0 ، H_r و H_∞ به ترتیب برابر با عمق جریان در شعاع r ، در مرکز گرداب و در فاصله دور از گرداب، Γ ، g ، r_m و R به ترتیب برابر با دوران گرداب، شتاب ثقل زمین، شعاع گرداب در موقعیت بیشترین سرعت مماسی و شعاع بدون بعد برابر با $R = \frac{r}{r_m}$ ، s و V_z نیز به ترتیب برابر با مولفه عمودی سرعت، گرادیان تغییرات سرعت شعاعی و فاصله عمودی از سطح آب می‌باشند. سورپچ-گولیک و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل‌هایی در مقیاس آزمایشگاه، احتمال وقوع گرداب را بررسی کردند ولی در گزارش پایانی خود، عدم قطعیت در انتقال خصوصیات کلی گرداب با تغییر مقیاس به ابعاد یک آبگیر بزرگ در مخزن سد واقعی را گزارش دادند. آنها همچنین، مدلی نیمه تجربی که خصوصیات کلی گرداب از قبیل شعاع و دوران گرداب را به خوبی تخمین می‌زند توسعه دادند. این مدل با استفاده از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با دستگاه ADV بدست آمده‌است.

گرداب قوی با هسته هوا و بدون هواگیری تشکیل یابد، شایان ذکر است که گرداب در این حالت، به گرداب با استغراق بحرانی معروف است که در شرایط مذکور طول گرداب برابر با عمق آب می‌باشد. طبق این شرایط دبی آگیری $4/61$ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز آگیری $10^4 \times 5/8$ می‌باشد. سه عدد دوربین پرسرعت دیجیتال (در سمت چپ، راست و بالای فلوم) برای ثبت اطلاعات سه بعدی از پدیده گرداب درون فلوم مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). رزولوشن بیشینه این دوربینها (Phantom Miro eX4 و M310، Phantom V5.1) به ترتیب برابر با 1024×1024 و 1280×800 ، 800×600 پیکسل بوده که حداکثر نرخ فریمینگ^۳ آنها بترتیب برابر با 1200 ، 3260 و 1200 هرتز می‌باشد. برای ثبت با کیفیت بالای تصاویر از FOV^4 (میدان دید) دوربینهای فوق، سه عدد لنز 105 mm Nikon بر روی دوربینهای مذکور نصب شد. دو دوربین در دوطرف فلوم دقیقاً در جایی که میدان دید آنها در محل وقوع گرداب باشد قرار گرفت تا جریان دوبعدی بر روی صفحه $X-Z$ و نیز تصاویر مربوط به ذرات معلق در جریان را برای انجام محاسبات سرعت سنجی ردیابی ذرات برداشت کند. دوربین سوم بر روی آگیر بصورتی که محور نوری آن عمود بر محور اصلی فلوم باشد نصب شد تا جریان گردابی همراه با ذرات معلق را بر روی صفحه $X-Y$ ثبت کند.

ذراتی از جنس پلی استر با قطر 3 میلی‌متر و چگالی $1/02$ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای ردیابی در جریان گردابی، اندکی بالاتر از محل تشکیل گرداب به جریان اضافه شد تا در میدان دید دوربینها به ثبت برسند. شایان ذکر است که هر سه دوربین بصورت همزمان و با نرخ فریمینگ یکسان با اتصال به سیستم مرکزی تمامی جریانها را به ثبت رساندند بگونه ای که از هر لحظه از جریان گردابی سه تصویر از زاویه‌های

آزمایشگاهی و با هدف کاهش عمق استغرق بحرانی و افزایش راندمان آگیری انجام یافته است. در تحقیق حاضر با استفاده از روش سرعت سنجی ردیابی ذرات به شناخت بهتری از این پدیده با تمرکز بر توزیع مولفه‌های سرعت در میدان جریان گردابی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

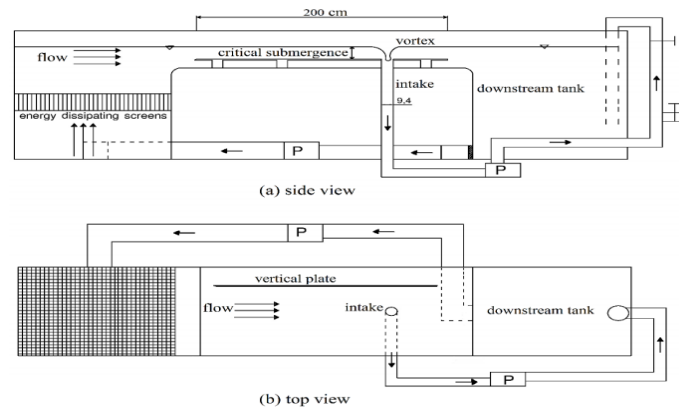
در تحقیق حاضر ساختار سه بعدی گرداب با هسته هوا در کانال عریض توسط مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها بر روی فلومی فلزی-شیشه‌ای با مقطع مستطیلی به طول 495 سانتی‌متر، عمق 50 سانتی‌متر و عرض 100 سانتی‌متر انجام شد. در هر دو طرف فلوم مخازن آب با عمق 155 سانتی متر و هم مقطع با فلوم وجود داشته و مخزن بالادست برای آرام کنندگی جریان ورودی و مخزن پایین دست برای تنظیم سطح آب داخل فلوم به کار گرفته شد. یک پمپ دیجیتال سانتریفیوژ برای به گردش در آوردن آب از بالادست به پایین دست فلوم در نظر گرفته شد. پمپ دیگری نیز برای ایجاد مکش در آگیر برای ثابت نگه داشتن شرایط هیدرولیکی جریان و جلوگیری از نوسان گرداب مورد استفاده قرار گرفت. آگیر قائم به قطر $9/4$ سانتی‌متر واقع در فاصله 125 سانتی‌متری از شروع کانال تعبیه شد (شکل ۲). برای ایجاد شرایط جریان گرداب با هسته هوا صفحه‌ای از جنس فایبرگلاس به صورت عمودی در فاصله $20/8$ سانتی‌متر از دیواره کانال و $22/2$ سانتی‌متر از انتها علیه لوله آگیر نصب شد، این کار برای توزیع نامساوی جریان در دوطرف آگیر و ایجاد گرداب با هسته هوا بسیار موثر بود. عمق آب روی آگیر کفی $11/75$ سانتی‌متر یعنی $1/25$ برابر قطر داخلی آگیر در نظر گرفته شد. سرعت متوسط جریان ورودی نزدیک شونده $6/7$ سانتی‌متر بر ثانیه و سرعت آگیری از کانال نیز برابر با $66/5$ سانتی‌متر بر ثانیه توسط دو پمپ تعبیه شده در کانال برقرار شد که

³ Framing rate

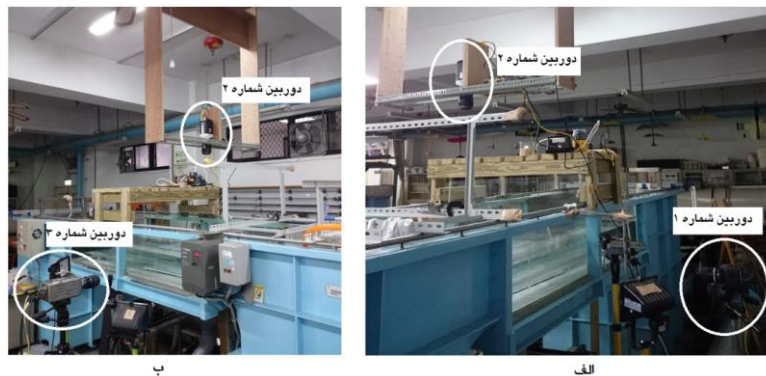
⁴ Field of View

روی ۲۰۰ تصویر در ثانیه تنظیم شد. نمونه ای از گرداب مورد مطالعه بر روی آبگیر کفی در شکل ۴ قابل مشاهده است.

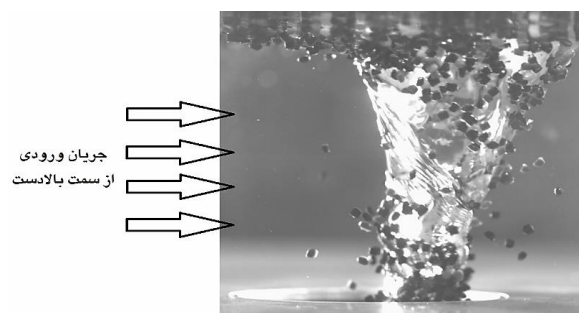
دید مختلف ثبت شد. نرخ فریمینگ برابر با تعداد تصویر در ثانیه می‌باشد که برای هر سه دوربین که بصورت همزمان برای ثبت تصاویر بکار گرفته شدند، این نرخ بر



شکل ۲- شماتیکی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده.



شکل ۳- نحوه قرارگیری دوربین‌ها؛ موقعیت عکس (الف): سمت راست، پایین دست کانال، (ب): سمت چپ، پایین دست کانال.



شکل ۴- گرداب مورد مطالعه همراه با ذرات معلق در میدان جریان گردابی.

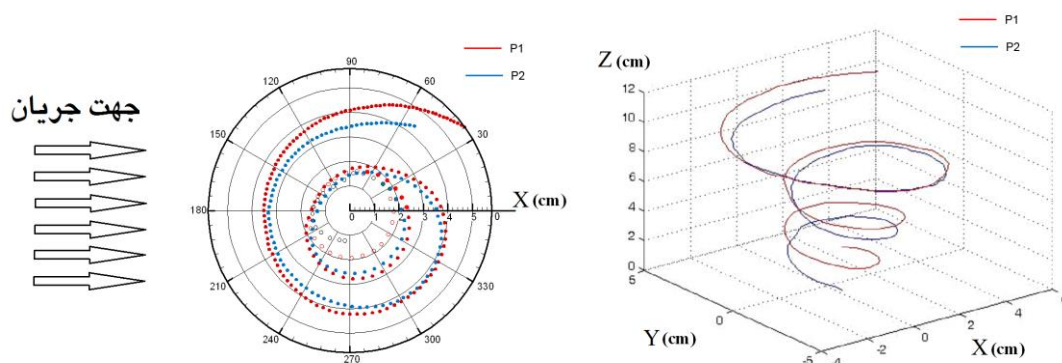
گذرنده از راس مقطع دایروی آبگیر در کف فلوم، محور Y در جهت عرض فلوم، عمود بر محور X و گذرنده از راس مقطع دایروی آبگیر در کف فلوم و محور Z عمود

سیستم مختصات بکار رفته در ثبت تصاویر و تحلیل نتایج، سیستم مختصات کارتزین در سه بعد X, Y و Z می‌باشد که محور X منطبق بر محور مرکزی فلوم و

نتایج و بحث

پس از برداشت داده‌های هر ذره معلق در جریان گردابی که در حرکت از سطح آب تا دهانه آبگیر قائم مسیری منحنی شکل را می‌پیماید، مولفه‌های سرعت در سه بعد اصلی مختصات کارتیزین محاسبه گردید. برای معرفی بهتر این مسیر منحنی شکل، مسیر حرکت دو ذره P1 و P2 در شکل ۵ نمایش داده شده است. در شکل ۵ مسیر حرکت ذره روی مسیری منحنی شکل در میدان جریان گردابی ارائه شده است، با توجه به شکل ۵-الف)، ذره ابتدا در سطح آب بوده و ارتفاعی معادل ۱۱/۷۵ سانتی‌متر دارد، و با حرکتی در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت به سمت راس مقطع دایروی آبگیر یعنی ارتفاع صفر سانتی‌متری حرکت می‌کند، در شکل ۵-ب) نیز ذره معلق در جهت قراردادی مثبت فوق در مسیر دایروی و منحنی شکل در مسیری از صفر تا ۳۶۰ درجه حرکت می‌کند. شکل ۵ نشان دهنده این است که با استفاده از تکنیک سرعت سنجی ردیابی ذرات، علاوه بر مولفه‌های سرعت ذره، اطلاعات کاملی از هندسه و ساختار گرداب و مسیر حرکت ذرات نیز بدست می‌آید. در شکل ۶، میدان برداری سرعت ذرات که با استفاده از تکنیک ردیابی ذرات بدست آمده، نمایش داده شده است.

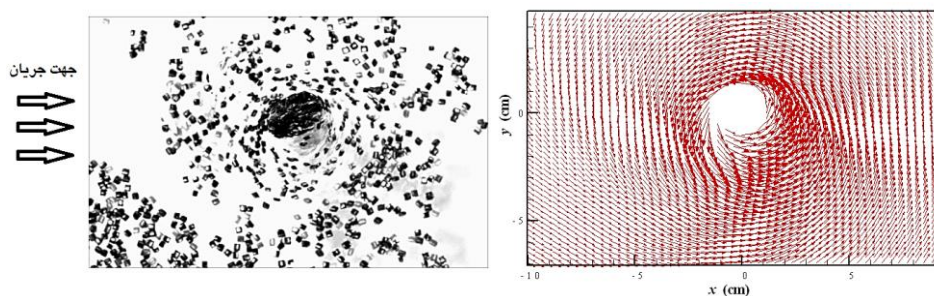
بر دو محور قبلی و هم راستا با عمق جریان می‌باشد که این محور نیز گذرنده از راس مقطع دایروی آبگیر در کف فلوم آبگیر و هم راستا با محور مرکزی آبگیر می‌باشد. طبق آنچه که ذکر شد راس مقطع دایروی آبگیر در کف فلوم بعنوان مبدا مختصات در نظر گرفته شد. با توجه به تشکیل گرداب در جهت پاد ساعتگرد، جهت‌های بالادست به پایین دست برای محور X ، دوربین شماره ۳ به سمت دوربین شماره ۱ برای راستای Y و کف فلوم تا سطح آب برای محور Z بعنوان جهت‌های مثبت در نظر گرفته شدند. طبق آنچه که گفته شد گرداب با هسته هوا در کل عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت که برای اینکار ۲۰ تکرار در شرایط هیدرولیکی یکسان انجام شد، با توجه به وجود سه جهت مختلف اندازه‌گیری و تعداد زیاد استخراج داده‌های هیدرولیکی در اعماق مختلف در کل حدود ۱۵۰۰ داده برای هر تکرار ثبت شد که امکان انجام تحلیل‌های دقیق و تکمیلی را فراهم نمود.



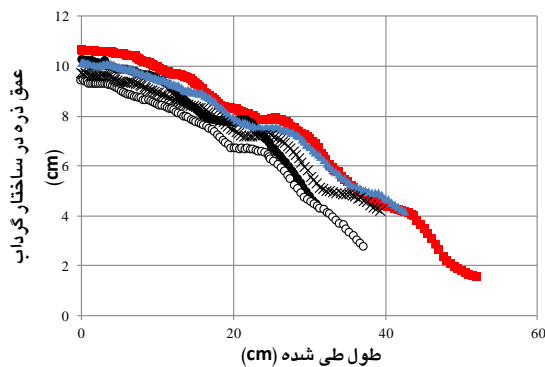
شکل ۵- مسیر حرکت ذرات در میدان جریان گردابی (الف): مسیر حرکت ذرات در میدان سه بعدی جریان گردابی (بر اساس اطلاعات بدست آمده از کلیه دوربین‌ها)، (ب): مسیر حرکت ذرات روی صفحه $X-Y$ ثبت شده توسط دوربین شماره ۲.

اشکال ۷ تا ۱۱ آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که در محاسبه سرعت ذرات از طریق سرعت سنجی ردیابی ذرات (PTV) که دوربینهای پرسرعت در آن به کار گرفته می‌شوند، ذره های میدان جریان بصورت جداگانه ردیابی شده و طبق مسیر حرکت آنها، سرعت حرکت هر ذره بدست می‌آید.

این میدان برداری که حاصل محاسبه سرعت ذرات بر اساس ۴۴۰۰ عکس گرفته شده توسط دوربین شماره ۲ می‌باشد، اطلاعات کافی از مولفه‌های سرعت U و V ذرات جریان را در اختیار ما می‌گذارد. با استفاده از میدان برداری سرعت ذرات، پروفیل‌های سرعت در ترکیب با اطلاعات بدست آمده از دوربین‌های شماره ۱ و ۳ استخراج شده و همراه با تغییرات عمق ذرات در



شکل ۶- میدان سرعت برداری ذرات جریان در سطح آب (روی صفحه X-Y).

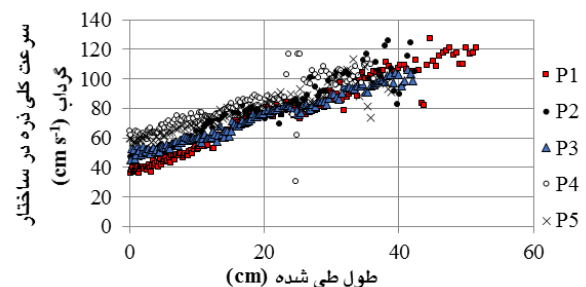


شکل ۸- عمق ذره ردیابی شده نسبت به طول طی شده ذره در مسیر حرکت بسمت دهانه آبگیر.

مولفه‌های افقی سرعت

در اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ مولفه‌های سرعت ذرات نسبت به طول طی شده آنها نشان داده شده است.

در شکل ۷ سرعت کلی ذرات نسبت به طول طی شده آنها نشان داده شده است؛ با توجه این شکل با افزایش طول طی شده ذرات روی سطح آب سرعت آنها بیشتر می‌شود، به عبارت دیگر طبق اشکال ۷ و ۸ با نزدیک شدن ذره به دهانه آبگیر و کاهش عمق آن، سرعت ذره بیشتر می‌شود.

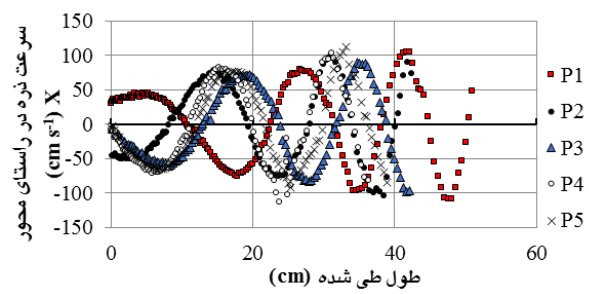


شکل ۷- سرعت ذرات ردیابی شده در مسیر حرکت بسمت دهانه آبگیر نسبت به طول طی شده آنها از لحظه آغاز ردیابی.

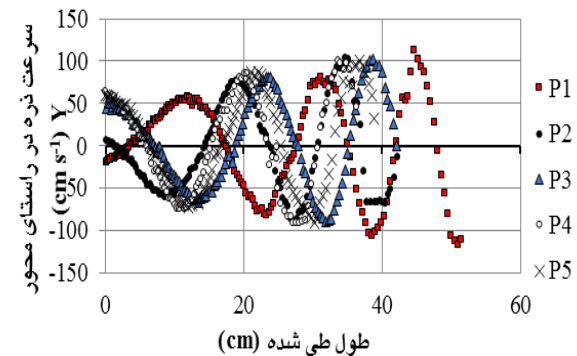
طبق اشکال فوق، تغییرات مولفه‌های افقی سرعت شبیه تابع سینوسی می‌باشد، علت این توزیع سینوسی را با در نظر گرفتن هندسه گرداب می‌توان بررسی نمود. در این تحقیق، محور مرکزی گرداب به عنوان مرکز مختصات کارتیزین در روی تمامی صفحات $X-Y$ که موازی با کف فلوم می‌باشند در نظر گرفته شد. طبق این تعریف جهت حرکت ذره در مسیر جریان نزدیک شونده بالادست بعنوان جهت مثبت مولفه سرعت U و خلاف این جهت به عنوان جهت منفی آن می‌باشد. با توجه به دوران گرداب در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت، مولفه‌های سرعت V در این جهت مثبت و در خلاف آن منفی در نظر گرفته شد. طبق این تعریف، با توجه به اینکه جریان گردابی در حال دوران حول محور مرکزی خود است، مولفه‌های افقی سرعت ذرات مرتبا در موقعیت‌های مختلف مثبت، منفی یا صفر قرار می‌گیرند. با بررسی دقیق توزیع مولفه‌های افقی سرعت ذرات در مسیر حرکت بسمت دهانه گرداب، نکات زیر قابل ذکر است:

مولفه‌های سرعت U و V ذرات در توزیعی مشابه با تابع سینوسی نسبت به طول طی شده ذرات تغییر می‌کنند و نقاط اکسترم این مولفه‌ها با نزدیک شدن به دهانه آگیر به هم نزدیکتر شده و مقدار آنها افزایش می‌یابد. افزایش مقدار اکسترم مولفه‌های سرعت U و V نشان دهنده افزایش سرعت ذرات در روی صفحات $X-Y$ نزدیک به کف فلوم می‌باشد. همچنین نزدیک شدن این نقاط اکسترم بهم، نشان دهنده کوچکتر شدن طول مسیر شبه دایروی شکل ذرات روی هسته هوای گرداب می‌باشد. به عبارت دیگر اینکه سرعت‌های اکسترم ذرات بهم نزدیکتر می‌شوند یعنی ذرات در زمان کمتری نسبت به دوره‌های قبل در موقعیت‌های مثبت و منفی سرعت‌های افقی قرار گرفته و یا سریعتر می‌چرخند.

مولفه‌های افقی سرعت در ارتباط معنی‌داری نسبت بهم تغییر می‌کنند بنحوی که در هر موقعیتی که مولفه U

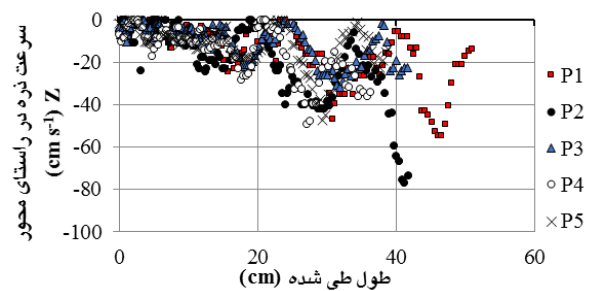


شکل ۹- مولفه U سرعت ذرات نسبت به طول طی شده.



شکل ۱۰- مولفه V سرعت ذرات نسبت به طول طی شده.

مولفه‌های U و V سرعت ذرات روی صفحات موازی با صفحه $X-Y$ بوده و مولفه‌های افقی سرعت نامیده می‌شوند. شکل ۱۱ نیز نشان دهنده مولفه W سرعت نسبت به طول طی شده ذرات است، علت منفی بودن این مولفه سرعت در کل ذرات این است که ذرات در مسیری بسمت پایین جایی که دهانه آگیر قرار دارد حرکت می‌کنند.



شکل ۱۱- مولفه W سرعت ذرات نسبت به طول طی شده.

مقدار سرعت ماکزیم W حدود ۷۷ سانتی‌متر بر ثانیه و سرعت ماکزیم افقی ۱۱۶ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشند و این نشان دهنده این است که در دهانه آبگیر، ذرات جریان در حالت چرخشی بیشتر از حالت ریزشی وارد آبگیر می‌شوند.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آن‌ها با اصول مدل گرداب رانکین (۱۸۵۸) ذکر این نکته ضروری است که تنش‌های برشی مذکور، ابتدا در سطح سیال باعث اعمال نیروی گریز از مرکز بر ذرات مرزی شده و باعث فاصله گرفتن ذرات از محور دوران می‌شوند. سپس با انتقال مومنوم زاویه ای به سایر ذرات و افزایش سرعت دوران، رفته رفته سطح آب پایین می‌افتد. اگر سرعت دوران به اندازه‌ای زیاد نشود که فشار ساختار اصلی گرداب به زیر فشار اتمسفر برسد، هسته هوا تشکیل نخواهد شد. در صورتی که سرعت تا حد امکان افزایش یابد هسته هوا تشکیل خواهد شد و گرداب در مرحله رشد خود از حد استغراق بحرانی گذر کرده و هسته هوا در کل عمق جریان توسعه می‌یابد.

پروفیل سطح آب

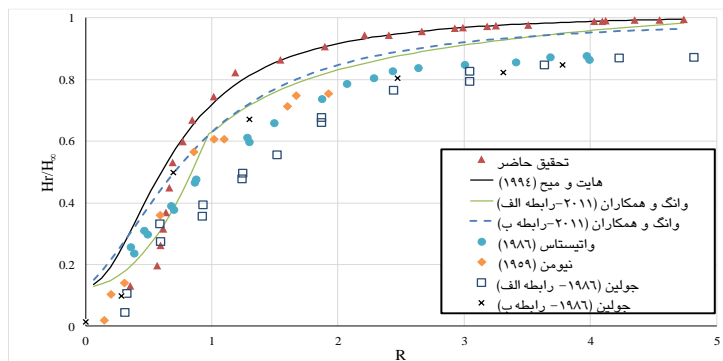
با توجه به وجود حالت موجی در ساختار گرداب با هسته هوا و سختی داده برداری در شرایط مذکور، مطالعات بسیار اندکی در این زمینه انجام شده است. بر اساس تحلیل ابعادی پارامترهای موثر در پروفیل سطح آب توسط هایت و میخ (۱۹۹۴)، در صورت ثابت ماندن دبی آگیری و استغراق آبگیر، تنها پارامتر موثر بر روی عمق جریان R می‌باشد. در تحقیق حاضر، برداشت پروفیل سطح آب از طریق اتصال سه دوربین پرسرعت به سیستم پردازنده اصلی و داده‌برداری با دقت بسیار بالا انجام شد. نتایج مذکور با مدل‌های پیش‌بینی پروفیل سطح آب و نیز داده‌های آزمایشگاهی هایت و میخ (۱۹۹۴)، وانگ و همکاران (۲۰۱۱)، واتیستاس (۱۹۸۶)، نیومن (۱۹۵۹) و جولین (۱۹۸۶) در شکل ۱۲ مقایسه

سرعت دارای مقدار صفر است، مولفه V سرعت در موقعیت متناظر آن دارای مقدار اکسترمم می‌باشد، و بالعکس. با توجه به شکل ۶، که مربوط به میدان برداری مولفه‌های افقی سرعت است، این موضوع قابل اثبات است، در موقعیتی که بردارهای سرعت کاملاً موازی با راستای جریان نزدیک شونده می‌باشند، مولفه U سرعت در حالت اکسترمم است و تمامی بردارهای عمود بر این بردار دارای مولفه V سرعت با مقدار اکسترمم هستند. طبق این شکل در راستای $X=5\text{cm}$ تا $X=10\text{cm}$ و در موقعیت متقارن آن، بردارهایی که طول بیشتر و مولفه سرعت U مساوی با صفر دارند به آسانی قابل تشخیص هستند، در این نقاط مولفه سرعت V دارای مقدار اکسترمم است.

توزیع مولفه‌های افقی سرعت در اشکال ۵ تا ۱۰ نه‌تنها اطلاعات مفیدی از سرعت ذرات فراهم می‌کند، بلکه در بطن خود اطلاعاتی از هندسه گرداب و تعداد دوران‌های طی شده توسط ذره را دارد. به عنوان مثال با توجه به شکل ۵-ب ذره P1 در صفحه افقی $X-Y$ سه بار دوران کامل داشته است یعنی نقطه شروع دوران آن در زاویه ۳۴ درجه بوده و در مسیر منحنی شکل غیر بسته خود، سه بار از زاویه ۳۴ درجه عبور کرده که هر بار یک دوران کامل در نظر گرفته می‌شود. در اشکال ۹ و ۱۰، با دانستن موقعیت اکسترمم مثبت هرکدام از مولفه‌های سرعت افقی به راحتی می‌توان به تعداد دوران‌های هر ذره و متعاقباً به هندسه هسته هوای گرداب پی برد. ذکر این نکته ضروری است که، این دوران‌ها، دوران واقعی در مسیر بسته حرکت ذره در میدان جریان گردابی نیست بلکه تصویر مسیری که ذره در مسیر منحنی شکل خود پیموده است بر روی صفحه افقی می‌باشد. با توجه به اینکه این مسیر بسته نیست و ذره علاوه بر حرکت دورانی در میدان جریان گردابی، حرکت در راستای قائم در مسیر رو به پایین نیز دارد و این مطلب با فرض مدل گرداب رانکین (۱۸۵۸) که ذرات در منحنی‌های بسته حرکت میکنند در عدم تطابق است.

فوق مدل هایت و میخ (۱۹۹۴) نسبت به مدل‌های دیگر همخوانی بهتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر دارد. مدل هایت و میخ (۱۹۹۴) در محدوده $R \leq 0.75$ مقادیری بیش از داده‌های آزمایشگاهی و همچنین در $R=4.7$ مقدار $H_r > H_{\infty}$ را بدست می‌دهد که این نتیجه خارج از واقعیت است.

شده است. طبق شکل ۱۲ عمق آب با افزایش فاصله از محور گرداب اندازه بیشتری به خود می‌گیرد. در بررسی این تغییر شعاع $R=1$ از اهمیت خاصی برخوردار است بگونه‌ای که قبل از این شعاع، تغییرات پروفیل سطح آب شیب تندی دارد و بعد از این حد، شیب تغییرات مذکور کاهش می‌یابد. با توجه به شکل



شکل ۱۲- تغییرات پروفیل بی بعد سطح آب نسبت به شعاع بی بعد گرداب.

محیط نرم افزار Wolfram Mathematica انجام شد که رابطه جدیدی برای محاسبه پروفیل سطح آب به صورت رابطه ۱ ارائه می‌گردد:

$$\frac{H_r}{H_{\infty}} = \frac{4.7R - 344.4R^{7.9}}{31.31 - 57.4R - 411.34R - 7.76} \quad [1]$$

در رابطه فوق محدوده مورد استفاده R از صفر تا ۵ می‌باشد. شاخص‌های آماری مربوط به مقایسه رابطه فوق با مدل‌های فوق‌الذکر به صورت جدول ۲ است.

مدل‌های وانگ و همکاران (۲۰۱۱) که از تعمیم مدل هایت و میخ به یک کار آزمایشگاهی با شرایط متفاوت مرزی بدست آمده است، همخوانی دقیقی با داده‌های تحقیق حاضر ندارد. همچنین داده‌های آزمایشگاهی واتیستاس (۱۹۸۶)، نیومن (۱۹۵۹) و جولین (۱۹۸۶) بعلافت تفاوت شعاع دهانه و دبی آنگیر با نتایج تحقیق حاضر متفاوت می‌باشند. با توجه به اینکه در مدل‌های ارائه شده قبلی، پروفیل سطح آب به عنوان تابعی از شعاع بی‌بعد گرداب در نظر گرفته شده است، با استفاده از داده‌های تحقیق حاضر، تحلیلی برای یافتن بهترین تابع همخوان با داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق در

جدول ۲- ضریب همبستگی و خطای RMSE برای مدل‌های محاسبه پروفیل سطح آب.

شاخص	رابطه (۱)	هایت و میخ (۱۹۹۴)	وانگ و همکاران (۲۰۱۱-الف)	وانگ و همکاران (۲۰۱۱-ب)
R^2	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۷۹
RMSE	۰/۰۲۲	۰/۰۹	۱/۲	۱/۳۸

تنها پژوهشی است که برای این منظور از روش پیشرفته PTV استفاده شده است. طبق شکل ۱۳ مدل برگر (۱۹۴۸) که مدلی ریاضی-تحلیلی می‌باشد نسبت به مدل هایت و میخ (۱۹۹۴) که از تطبیق داده‌های برداشته شده از طریق ADV با مدل‌های ریاضی قبل بدست آمده است دقت بیشتری در پیش بینی مولفه سرعت قائم دارد.

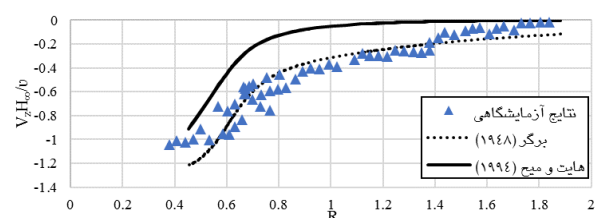
نتیجه‌گیری کلی

با توجه به مطالب فوق می‌توان بیان نمود که اساس تشکیل گرداب‌ها در دهانه آبگیرها، پایداری تکانه زاویه‌ای در محل کاهش سطح مقطع جریان می‌باشد. در این حالت مولفه‌های افقی سرعت با کاهش سطح مقطع جریان در نواحی نزدیک مجرای آبگیر افزایش می‌یابند. طبق مدل گرداب رانکین (۱۸۵۸) وجود دو ناحیه گرداب اجباری و آزاد در ساختار گرداب و اختلاف در توزیع سرعت در مرز این دو نوع گرداب باعث ایجاد تنش برشی در این ناحیه مرزی می‌شود. مطالعه ساختار گرداب در حالت استغراق بحرانی، اطلاعات جدیدی از خصوصیات این جریان پیچیده را فراهم می‌کند. در تحقیق حاضر بیشتر بودن مقدار ماکزیم مولفه‌های افقی سرعت نسبت به مولفه‌های سرعت متناظر قائم، نشان از غلبه نیروی گریز از مرکز بر عمل آبگیری در حالت جریان گردابی دارد. در تحقیق حاضر تغییرات پروفیل سطح آب در حالت استغراق بحرانی بررسی شد و رابطه جدیدی برای برآورد تغییرات آن در جریان گردابی ارائه شد. استفاده از تکنیک PTV برای مطالعه سه بعدی پدیده گرداب، اطلاعات جامعی از تغییرات مولفه‌های سرعت جریان و پروفیل سطح آب ارائه داد.

طبق جدول ۲ مدل ارائه شده در تحقیق حاضر همخوانی بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

مولفه قائم سرعت

با توجه به اینکه اندازه‌گیری مولفه قائم سرعت گرداب نیز همانند پروفیل سطح آب دقت بالایی می‌طلبد، بررسی‌های آزمایشگاهی این مولفه بسیار محدود بوده که به تبع آن مدل‌های اندکی جهت محاسبه این مولفه سرعت ارائه شده است. مدل برگر (۱۹۴۸) و هایت و میخ (۱۹۹۴) همراه با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر در شکل ۱۳ آورده شده‌اند. محورهای افقی و قائم شکل ۱۳ برای مقایسه با مدل‌های فوق الذکر به صورت بی بعد درآمده‌اند، محور قائم توسط عمق آب در فاصله دور از محور گرداب و لزوجت سینماتیک سیال بی بعد شده است. شکل مذکور تغییرات مولفه قائم سرعت گرداب در فواصل مختلف از محور گرداب را نشان می‌دهد، طبق این شکل با افزایش فاصله از محور گرداب مولفه قائم سرعت کاهش می‌یابد که شیب این کاهش در محدوده $0.4 \leq R \leq 0.8$ تندتر از نقاط دیگر می‌باشد.



شکل ۱۳- توزیع مولفه بی بعد قائم سرعت نسبت به شعاع بی بعد گرداب.

تحقیق حاضر از معدود کارهایی است که در آن مولفه قائم سرعت ذرات با دقت بالایی ثبت شده است و

منابع مورد استفاده

- Anwar HO, Weller JA and Amphlett MB, 1978. Similarity of free-vortex at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research 16(2): 95-105.
- Borghei SM and Kabiri Samani AR, 2010. Effect of anti-vortex plates on critical submergence at a vertical intake. Scientia Iranica 17(2): 89-95.
- Burger JM, 1948. A Mathematical Model Illustrating the Theory of Turbulence. Advances in Applied Mechanics. Academic Press, New York.

- Daggett LL and Keulegan GH, 1974. Similitude conditions in free-surface vortex formation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 100(11): 1565-1580.
- Hite JE and Mih WC, 1994. Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 120(3): 284-297.
- Julien PY, 1986. Concentration of very fine silts in a steady vortex. *Journal of Hydraulic Research* 24(4): 255-264.
- Knauss J, 1987. *Swirling Flow Problems at Intakes*. Hydraulic Structures Design Manual. 1. A.A. Balkema Pub., Netherlands.
- Lugt HJ, 1983. *Vortex Flow in Nature and Technology*, John Wiley & Sons, London.
- Mulligan S, Casserly J and Herlock R, 2016. Experimental and Numerical Modelling of Free-Surface Turbulent Flows in Full Air-Core Water Vortices. Pp. 549-569 In: Gourbesville P, Cunge J, Caignaert G, *Advances in Hydroinformatics*. Springer Water. Springer, Singapore.
- Naderi V, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Arvanaghi H, 2013. Experimental study of bell-mouth intakes on discharge coefficient. *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 3(6): 368-371.
- Naderi V, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Arvanaghi H, 2014a. Effect of using vertical plates on vertical intake on discharge coefficient. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39(12): 8627-8633.
- Naderi V, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Arvanaghi H, 2014b. Effect of dimensions of vertical meshed plates on critical submergence in bell-mouth vertical intakes. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 25(1): 13-24. [In Persian]
- Nasehi-Oskuei N, Farsadizadeh D and Hosseinzadeh-Dalir A, 2016. Effect of dimensions and mesh type of anti-vortex horizontal plates on critical submergence reduction of vertical intakes. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 26(1): 167-178.
- Newman BG, 1959. Flow in a viscous trailing vortex. *Aeronautical Quarterly*, X (2): 149-162.
- Rankine WJM, 1858. *A Manual of Applied Mechanics*. ed. 1. Charles Griffin, London.
- Rindels AJ and Gulliver JS, 1983. An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes. Saint Anthony Fall Hydraulic Laboratory. Project Report No. 224.
- Suerich-Gulick F, Gaskin S, Villeneuve M and Parkinson E, 2014. Free surface intake vortices: theoretical model and measurements. *Journal of Hydraulic Research* 52(4): 502-512.
- Vatistas GH, 1986. Theoretical and experimental studies on vortex chamber flow. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 24(4): 635-642.
- Wang YK, Jiang CB and Liang DF, 2011. Comparison between empirical formulae of intake vortices. *Journal of Hydraulic Research* 49(1): 113-116.
- Yildirim N and Kocabas F, 1998. Critical submergence for intakes in still-water reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 124(1): 103-104.
- Yildirim N, Kocabas F and Gulcan SC, 2000. Flow-boundary effects on critical submergence of intake pipe. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 126(4): 288-297.