

Study of Particle Movement Pattern in Vortex Settling Basin Based on Particle Tracking Technique

Elnaz Mehrabani¹, Ali Naghi Ziaei^{2*}, Neda Sheikh Rezazadeh Nikou³, Mahmoodreza Golzarian⁴


1- M.Sc. student in Water Structures, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

3- Postdoctoral researcher, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

4- Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

* an-ziaei@um.ac.ir

Received: 2 October 2021, Accepted: 11 April 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The quality of water required for agriculture, industry, drinking, etc., has made it necessary for the solids particle in the water flow to enter its permissible level in irrigation and drainage or urban water networks. The Vortex Settling Basin (VSB) makes use of the vortex flow inside the chamber for the separation of sediment particles from the flow.

Elaborate studies have been made on investigation flow pattern at VSB that includes: (Paul, 1988 and 1991; Athar et al., 2003; Gheisi, et al, 2006; Ziaei et al., 2007; Chabokpour et al., 2011; Mulligan et al, 2016; Rehman et al., 2017; Huang et al., 2017; S. R. Nikou et al., 2021).

Elaborate studies in hydraulic sciences apply particle tracking and image processing method for analysis (Sun et al., 2015; Shin et al., 2016; Mulligan et al., 2016 and 2018; Rosberry et al., 2019; Witz et al., 2018; Duinmeijer et al., 2020).

The study of vortex flow is very sensitive to measuring instruments, for example, ADV, which is the most common instrument for measuring the velocity, increases disturbance of flow. Therefore, it is recommended to use the non-interference particle tracking method to measure velocity components.

Methodology: The experiments were performed in the hydraulic laboratory of the water science and engineering department at the Ferdowsi University of Mashhad, Iran on an acrylic laboratory setup. Spherical particles with a relative density of 1.41, at distances of 37 cm and 1.5 m from the chamber (sediment injection site in the study of Athar et al., (2003)) and in these two longitudinal distances, left at 9 points and each experiment is repeated 5 times (Figure 2).

In this research, two iPhone 7 Plus cameras have been used for taking photos. The camera of this phone has one of the most advanced cameras in terms of expertise and technology. In this study, due to the high volume of data at different points, image processing is presented in the highest probability of trapping (point 4), the position of this point is as follows: 5 cm from the floor, 2 cm from its right wall (sloping to the chamber), 18 cm from the sloping wall to the outlet channel and 6.5 cm to the water level. The input flow to the channel is 8 and 13.7 l/s.

Results and Discussion: The highest probability of trapping for a particle at two

longitudinal distances is at point 4 with a probability of 60%. The process of particle displacement and the time series of three velocity diagrams in the vortex settling basin of the present study are sinusoidal. In sections 150° - 210° and 330° - 30° , the particle is inclined toward the wall and in other sections, it is inclined toward the orifice, affected by the location of input and output channels (S. R. Nikou et al., 2021).

There is a meaningful correlation between the two components v_x and v_y , and in almost all places where the x velocity component is extreme, in the same position y component is zero, and vice versa. This result is quite justifiable given the motion of vortex flow. The extreme values of the velocity component in the x direction become closer as they approach the orifice, indicating an increase in velocity near the orifice and the chamber floor and a smaller curved path around the vortex core. Notably, the absolute value of the maximum velocity in the x direction is 1.61 m/s and in the z direction is 0.13 m/s, which indicates that the particle tends to enter the orifice more in a rotating passage than falling position, having said that, centrifugal force is dominated over the action of dewatering. The mean relative error of water surface profiles by image processing method compared to laboratory data is estimated to be 0.002 and 1.36%, respectively, which confirms well with the experimental measurements.

Conclusion: The results showed that the distribution of the velocity components of the particle in all three dimensions has a sinusoidal trend. The higher value of the maximum velocity in the x -direction than the z -direction indicated the dominance of the centrifugal force over the dewatering operation in the vortex flow.

According to the obtained results, particle tracking and image processing can be used as an accurate approach with a higher operational speed to study the flow patterns and determine the water surface profile in vortex settling basins.

Keywords: PTV, Particle tracking, Orifice at the center, Point gauge, Velocity distributions.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

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

بررسی الگوی حرکت ذره در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی مبتنی بر تکنیک ردیابی ذره

الناز مهربانی^۱، علی نقی ضیائی^۲، ندا شیخ‌رضازاده‌نیکو^۳، محمودرضا گلزاریان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- پژوهشگر پسادکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

* an-ziaei@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی، نوع کارآمدی از سازه‌های رسوب‌گیر پیوسته در تصفیه‌ی آب می‌باشند. مطالعه و اصلاح راندمان حذف رسوب در این نوع حوضچه به طور قطع به شناخت الگوی حرکت ذره و خصوصیات آن بستگی دارد. در پژوهش حاضر با تصویربرداری دو بعدی و پردازش تصویر به مطالعه حرکت ذره در میدان جریان گردابی در یک مدل آزمایشگاهی از حوضچه رسوب‌گیر پرداخته شد. درصد احتمال تله‌اندازی ذره تعیین و سرعت ذره در سه بعد با استفاده از تکنیک ردیابی ذره و به کمک نرم‌افزار MATLAB 2020، محاسبه شد. هم‌چنین مسیر حرکت ذره ترسیم و سرعت ذره با سرعت جریان مقایسه گردید. نتایج نشان داده است که توزیع سرعت در حوضچه‌ی گردابی به صورت تابع سینوسی می‌باشد و ذره با سرعتی تقریباً معادل سرعت جریان در مسیره‌های مارپیچی حوضچه‌ی گردابی حرکت می‌کند.

کلیدواژه‌گان: PTV، احتمال تله‌اندازی، شناسایی ذره، عمق سنج، توزیع سرعت.

۱- مقدمه

می‌شود، در کف حوضچه یک روزنه مرکزی قرار دارد، پس از ورود جریان و تشکیل گردابه‌ی ترکیبی^۲، گردابیان غلظت ذرات در عرض گردابه افزایش می‌یابد، اختلاف گردابیان غلظت و نیروی گریز از مرکز گردابه، باعث حرکت ذرات به سمت حاشیه‌ی حوضچه می‌شود. پس از آن، جریان‌های ثانویه ذرات را به مرکز حوضچه هدایت می‌کنند. جریان‌های ثانویه در این سامانه در نتیجه‌ی موارد زیر تشکیل می‌شوند: الف) نیروی گریز از مرکز گردابه و جریان ورودی، ب) اصطکاک بین سیال و کف حوضچه که باعث کم‌شدن سرعت مرزی سیال می‌شود و ج) جریان‌هایی که بر جریان گردابه عمود هستند (Keshavarzi et al., 2006). در مرکز روزنه، هسته‌ای از

هدف از آگیری بهینه و موثر، افزایش دبی ورودی همراه با کمترین غلظت رسوب است و نیز کیفیت آب مورد نیاز برای کشاورزی، صنعت، آشامیدن و... این امر را ضروری ساخته است که مواد جامد موجود در جریان آب هنگام ورود به تأسیسات و سازه‌های انتقال آب، آگیری‌ها به کمینه حد مجاز کاهش یابد. با این حال امکان جلوگیری کامل ورود ذرات رسوبی به تأسیسات آبی وجود نداشته و حتی ممکن است در پی جداسازی‌های اولیه نیاز به جداسازی پی در پی و ثانویه نیز باشد. حوضچه رسوب‌گیر گردابی (VSB^۱) با استفاده از جریان گردابی، رسوب‌ها را از آب جدا می‌کند. جریان آب به صورت مماسی وارد حوضچه

تلاطمی در ناحیه‌ی گردابه آزاد همخوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد، اما در ناحیه گردابه‌ی اجباری مدل LES – Smagorinsky نسبت به مدل‌های RANS، روند نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی دارد. (Nikou et al., 2022) به بررسی تاثیر فراسنج‌های هیدرولیکی و هندسی بر بازده جریان در حوضچه گردابی با استفاده از روش تاگوچی و روش سطح پاسخ پرداختند. آنان به منظور تعیین بازده کل، سه بازده جریان، بازده کانال ورودی و بازده تله اندازی را تعیین کردند.

تاکنون بررسی‌های بسیاری در علم هیدرولیک با استفاده از روش و فن پردازش تصویر و ردیابی ذره انجام شده که نتایج بعضی از این پژوهش‌ها در زیر بیان شده است: Sun (2015) and Liu (2015) به منظور ارزیابی ویژگی‌های گردابه اعم از توزیع مؤلفه‌های سرعت، نیمرخ سطح آب، تغییرهای شعاع هسته‌ی گردابه و توزیع چرخش جریان، آزمایش‌هایی را در مخزنی استوانه‌ای به روش PIV⁴ انجام داده‌اند. مدل پیشنهادی ایشان با داده‌های آزمایشگاهی و دیگر مدل‌های گردابی از همخوانی قابل قبولی برخوردار است. Shin et al. (2016) سرعت جریان را با استفاده از نگاره‌های ویدیویی یک شناور کروی که به منظور اندازه‌گیری میزان دبی سیلاب به هنگام باران شدید طراحی شده بود، اندازه‌گیری کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که سرعت‌های محاسبه شده به روش سرعت‌سنجی تصویری شناور کروی⁵ SFIV با سرعت‌های واقعی در آبراهه‌ی باز تا حدودی همخوانی دارد، نتایج ایشان گویای آن است که این روش می‌تواند برای تعیین سرعت میانگین و دبی رودخانه‌ها استفاده شود. Mulligan et al. (2016) به منظور شناسایی فراسنجه‌های هیدرولیکی ساختار گرداب در دوازده مدل محفظه‌ی استوانه‌ای با روش ردیابی ذرات ویژگی‌های جریان را به صورت دو بعدی بررسی و ارزیابی کردند. از دستگاه PTV لیزر دو بعدی سرعت ردیابی ذرات برای تعیین میدان چرخش استفاده شده است. آنان نشان دادند که میدان چرخش و شمار چرخش‌ها به شدت وابسته به کارکرد هندسه جریان

هوا شکل می‌گیرد که منجر به کاهش دبی خروجی از روزنه و در پی آن افزایش بازده هیدرولیکی سامانه می‌شود و مسیری که ذره طی می‌کند چند برابر قطر حوضچه می‌شود. چنین ویژگی‌هایی این اجازه را می‌دهد که سرعت ورودی به حوضچه گردابی بسیار بیشتر از حوضچه‌های معمولی ته‌نشینی باشد. تاکنون بررسی‌های بسیاری بر روی حوضچه رسوبگیر گردابی پیرامون بررسی الگوی جریان که شامل سرعت‌های مماسی، شعاعی، محوری، جریان‌های ثانویه و گردابه‌ها انجام شده است که نتایج بعضی از این پژوهش‌ها در زیر ارائه شده است:

Chabokpour et al. (2011) با ابزار اندازه‌گیری سرعت ADV¹ به تعیین ساختار جریان در VSB پرداختند و به این نتیجه رسیدند که جریان‌های ثانویه در مقطع‌های شعاعی دارای الگوهای مختلف جریان در حوضچه می‌باشد که نقش مؤثری در بازده تله‌اندازی دارد، تحلیل دو بعدی بردارهای سرعت پژوهش ایشان نشان داده است که روند سرعت‌های پیرامون هسته هوا نسبت به پیرامون حوضچه بیشتر است. Rehman et al. (2017) به بررسی سازوکار حرکت گردابی در دو مدل حوضچه گردابی پرداختند از نظر ایشان نیمرخ سطح آب برای حرکت گردابه‌ی اجباری و آزاد به ترتیب به صورت سهمی² و هذلولی³ می‌باشد و توزیع سرعت از قانون‌های تغییر سرعت در گردابه‌ی آزاد و اجباری پیروی می‌کند. Huang et al. (2017) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به شبیه‌سازی جریان در VSB پرداختند. آنان مشاهده کردند که انحراف هسته‌ی هوا از مرکز روزنه به دلیل جریان ورودی مماسی می‌باشد، افزون بر آن سرعت مماسی به سرعت از دیواره به سمت مرکز افزایش می‌یابد و ناحیه نزدیک به روزنه سرعت محوری منفی دارد که نقش مثبتی در جداسازی رسوب از طریق روزنه ایفا می‌کند. بر مبنای نتایج Nikou et al. (2021a & b) کمینه سرعت شعاعی در نزدیکی کانال ورودی و بیشینه‌ی آن در نزدیکی آبراهه‌ی خروجی که تحت تاثیر ورود و خروج جریان می‌باشد، اتفاق می‌افتد. شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب حوضچه رسوبگیر گردابی با مدل‌های

1 Acoustic Doppler Velocity

2 Paraboloid

3 Hyperboloid

4 Particle Image Velocimetry

5 Spherical Float Image Velocimetry

شعاعی نزدیک هسته گردابه و جریان محوری در دامنه ۲ تا ۳ برابر شعاع هسته‌ی گرداب متمرکز شده است. همچنین مدل گردابه برگر برای برآورد سرعت مماسی مناسب می‌باشد.

بررسی جریان گردابی بسیار حساس به ابزار اندازه‌گیری می‌باشد، برای مثال سرعت‌سنج ADV که رایج‌ترین ابزار برای اندازه‌گیری میدان سرعت در جریان گردابی می‌باشد، در یک جریان گردابی موجب افزایش آشفتگی و تلاطم در جریان شده که بر آشفتگی ناحیه‌ی اندازه‌گیری سرعت و مهم‌تر از آن بر مولفه‌های سرعت تأثیرگذار است. همچنین قرارگیری این دستگاه نزدیک هسته گردابه باعث جابه‌جایی این ناحیه، تغییر قطر هسته و همچنین باعث اختلال و آشفتگی می‌شود بنابراین، از روش‌های غیر تداخلی ردیابی ذره برای برداشت مؤلفه‌های سرعت استفاده می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از روش و فن تصویر برداری و پردازش نگاره‌ها به بررسی درصد احتمال تله‌اندازی تک ذره بر مبنای محل رهاشدگی پرداخته شده است. همچنین، سرعت سه بعدی ذره و مسیر حرکت آن درون حوضچه، اندازه‌گیری و ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بستر آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک علوم و مهندسی آب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بر روی بستر آزمایشگاهی از جنس آکرلیک^۱ انجام شد. در جدول ۱ ویژگی‌های آبراهه و حوضچه گردابی ارائه شده است که در آن، L = طول آبراهه، B = عرض آبراهه، h = ارتفاع آبراهه، D = قطر حوضچه، H_b = ارتفاع حوضچه، S_c = شیب کف حوضچه، d = قطر روزنه‌ی مرکزی است.

۲-۲- روش انجام آزمایش

در این نوع از حوضچه گردابی، آبراهه ورودی و خروجی در امتداد یکدیگر قرار گرفته و حوضچه مماس بر آن‌ها می‌باشد. در آغاز، جریان از آبراهه‌ی ورودی وارد حوضچه

و شرایط جریان ورودی می‌باشد. (Mulligan et al. (2018) با بررسی گرداب سطح آزاد آشفته، گردابه‌های شبیه تیلور ناپایدار را در جریان‌های ثانویه که همانند سیستم جریان تیلور-کوت^۱ می‌باشد را مشاهده کردند، این بررسی‌ها به وسیله سرعت سنج فراصوتی دو بعدی UDP و تزریق رنگ لیزر فلورسانس PLIF انجام شده است. (Rosberry et al. (2019) پژوهشی با بهره‌گیری از روش و فن تصویربرداری با سرعت بالا از ذرات درشت شن به قطر میانگین ۰/۰۵ سانتی‌متر به عنوان بار کف بالای یک بستر مسطح درون فلوم آزمایشگاهی با ابعاد $۸/۵ \times ۰/۳$ متر انجام دادند. ایشان از روش و فن پردازش تصویر با سرعت ۲۵۰ فریم در ثانیه استفاده کردند و دریافتند حجم جامد ذرات در حال حرکت در واحد سطح پخش شده در حال نوسان می‌باشد، که به دلیل واکنش ذرات در حال حرکت نسبت به تلاطم سیال نزدیک کف می‌باشد. (Witz et al. (2018) به بررسی تجربی با تمرکز بر ویژگی‌های آماری مسیر ذرات با جدا شدن از کف درون فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۸ و عرض ۱/۱۸ متر پرداختند. در این آزمایش کف ورودی فلوم از یک لایه گوی‌های شیشه‌ای با آرایشی شش ضلعی پوشیده شده بود. محدوده مکانی از حرکت ذره مبنی بر مفهوم پخشیدگی آن با آغاز برخورد با یک ذره در حال حرکت و یا از حرکت ذره ساکن پیشین، بررسی شد. نتایج ایشان با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات، به روشنی تفاوت بین انتشار یک ذره در حال حرکت و آغاز حرکت یک ذره از موقعیت ساکن را نشان داد. این تفاوت‌ها به تغییر در سازوکارهای فیزیکی در مرحله‌ی اولیه حرکت ذرات پس از جدا شدن از بستر، نسبت داده شده است. (Duinmeijer et al. (2020) به منظور تحلیل ویژگی‌های جریان گرداب سطح آزاد و اعتبارسنجی مدل گردابه‌ی برگر با استفاده از روش SPIV^۲ پژوهش خود را در مخزن گردابی با قطر ۶۰۰ میلی‌متر انجام دادند. در این روش، از دو دوربین برای تصویربرداری از صفحه افقی استفاده شده که یک دوربین از بالای صفحه و دوربین دیگر از صفحه زیر تصویربرداری می‌کند. بنا بر نتایج پژوهش ایشان جریان

1 Taylor-Coutte

2 Stereo Particle Image Velocity

داده‌ها در نقطه‌های مختلف، پردازش تصویر در بیشترین احتمال تله‌اندازی (نقطه‌ی ۴) در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه انجام شده است (باتوجه به امکانات آزمایشگاهی تأمین دو دبی ۸ و ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه میسر بود، احتمال تله‌اندازی در دبی ۸ نیز بررسی شد که برای ذره مورد نظر و متناسب با هندسه‌ی حوضچه، این میزان ناچیز می‌باشد و به این دلیل است که در دبی‌های پایین‌تر گردابه‌ی ضعیف‌تری در حوضچه شکل می‌گیرد پس قدرت کمتری برای کشاندن ذره به سمت خود و تله‌اندازی در حوضچه، دارد که با نتایج پژوهش (Nikou et al., 2022) مبنی بر اینکه بیشترین بازده برای این نوع حوضچه رسوب‌گیر گردابی مربوط به دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه می‌باشد، همخوانی دارد). موقعیت نقطه ۴ به شرح زیر می‌باشد: ۵ سانتی‌متر از کف، ۲ سانتی‌متر از دیواره سمت راست آن (متمایل به حوضچه)، ۱۸ سانتی‌متر از دیواره متمایل به آبراهه خروجی و ۶/۵ سانتی‌متر تا سطح آب.

جدول ۱ ویژگی‌های بستر آزمایشگاهی
Table 1 Laboratory setup specifications

Parameter(m)	Value (m)
L_{in}	4
B_{in}	0.2
h_{in}	0.3
L_{out}	3
B_{out}	0.2
h_{out}	0.3
D	1
H_b	0.4
S_c	1:10
d	0.1

در این پژوهش از دو دوربین آیفون *Plus 7* به منظور عکس‌برداری استفاده شده است، دوربین این گوشی از نظر تخصصی و فنی یکی از پیشرفته‌ترین دوربین‌ها را می‌باشد، شکل ۱ کیفیت تصویر گردابه را نشان می‌دهد. ماژول دوتایی این دوربین از یک لنز واید ۲۸ میلی‌متر با دیافراگم $f/2.8$ و یک لنز تله‌فتو ۵۶ میلی‌متر با دیافراگم $f/1.8$ ساخته شده است. اهمیت این دوربین از این جهت می‌باشد که قابلیت زوم اپتیکال دارد و لنز ۵۶ میلی‌متری امکان رسیدن به دو برابر بزرگ‌نمایی را فراهم می‌کند.

رسوب‌گیر می‌شود. بخش اندکی از جریان بدون چرخش درون حوضچه از آبراهه خروجی خارجی می‌شود. بیشتر جریان درون حوضچه بدلیل هندسه حوضچه گردابی چرخش یافته و سپس بخش قابل‌ملاحظه‌ای از جریان چرخش یافته از آبراهه خروجی خارج می‌شود و بخش ناچیزی (در حدود ۱۲-۲۵٪ نسبت به دبی ورودی به حوضچه) از روزنه خارج می‌شود. هدف از قرارگیری روزنه در مرکز حوضچه، شستشوی رسوب ته نشین شده در کف حوضچه می‌باشد (Nikou et al., 2021a).

در این پژوهش دبی ورودی به کانال ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه می‌باشد که توسط مخزنی متحرک در انتهای آبراهه، تأمین می‌شود. از روش حجمی برای اندازه‌گیری دبی استفاده شد. به منظور کاهش تلاطم سطح آب، صفحه‌ای شناور از جنس آکاسیف در ابتدای ورودی آبراهه روی سطح آب قرار داده شد و همچنین برای کاهش تلاطم جریان از توری‌هایی فلزی در آغاز آبراهه بهره گرفته شد (شکل ۱). در این بررسی، هدف از روش و فن ردیابی ذره، ارزیابی رفتار ذرات رسوبی در حوضچه گردابی می‌باشد.

در این پژوهش، به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی و مواد اولیه موجود در بازار، ذره‌ای با قابلیت حرکت در جریان آب بدون تاثیر در ویژگی‌های جریان و قابلیت تفکیک و شناسایی با روش و فن پردازش تصویر انتخاب شد. این ذره انتخابی با استفاده از دستگاه پرینت سه بعدی به صورت کروی و با چگالی نسبی ۱/۴۱ و قطر ۰/۸۵ سانتی‌متر تهیه شد که ماده‌ی اولیه‌ی آن پلی‌امید ۱۲ می‌باشد که می‌تواند با افزودنی‌های مختلف مانند فایبرگلاس، فیبر کربن و... ترکیب شود. این ذرات طی فرآیند بسپاری شدن به دست می‌آیند که دارای خلل و فرج ریز می‌باشند و به عنوان ذرات تعقیب کننده در جریان آب، پیشنهاد می‌شوند. ذره در فاصله‌های ۳۷ سانتی‌متری و ۱/۵ متری از حوضچه (محل تزریق رسوب در پژوهش (Athar et al., 2003)) و در این دو فاصله‌ی طولی، در ۹ نقطه رها شده است و هر آزمایش ۵ بار تکرار شده است. نقطه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تحت تاثیر تنش کف، زبری جداره‌ها و وجود سطح آزاد آب نباشند (شکل ۲). در این پژوهش به دلیل حجم بالای

زوم اپتیکال بهترین راه برای بزرگ‌نمایی همراه با حفظ کیفیت فریم تا حد ممکن می‌باشد. نحوه قرارگیری دوربین‌ها در دوناچه‌ی فیلم‌برداری به صورت نمای کلی در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۴ نمونه‌ای از تصویرهای تهیه شده از آزمایش و پردازش تصویر در محیط متلب را نشان می‌دهد.

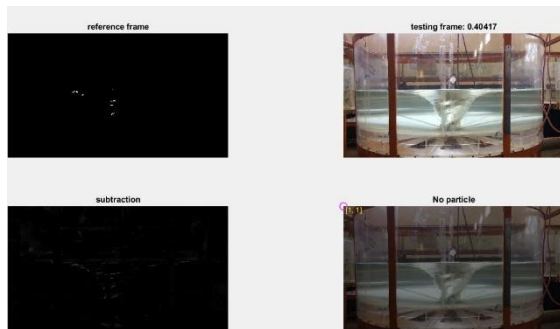


Fig. 1 Views of the laboratory setup

شکل ۱ نمایشی از مجموعه آزمایشگاهی پژوهش و گرداب مورد بررسی

(۱)

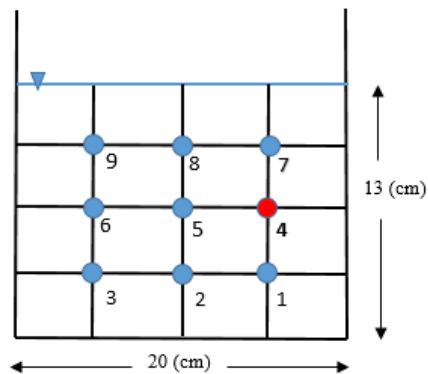


Fig. 2 Network of particle release points

شکل ۲ نمای کلی شبکه‌بندی ناحیه نقطه‌های رهاسدن ذره

(۲)

Fig.4 (1) The particle is not present in the frame, (2) the particle has entered the frame and been traced.

شکل ۴- (۱) ذره در تصویر موجود نمی‌باشد، (۲) ذره وارد تصویر و ردیابی شده‌است.

۳- نتایج و بحث

این بخش شامل احتمال تله‌اندازی، مسیر جریان، توزیع سرعت و نیمرخ سطح آب می‌باشد که نتایج مسیر جریان و توزیع سرعت مربوط به حالتی می‌باشد که ذره از نقطه‌ی ۴ با بیشترین درصد احتمال تله‌اندازی، در فاصله طولی ۱/۵ متر تا حوضچه، رها شده است (در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه).

۳-۱- احتمال تله‌اندازی

بیشترین درصد احتمال تله‌اندازی برای ذره در دو فاصله‌ی طولی، مربوط به نقطه‌ی ۴ با احتمال ۶۰ درصد می‌باشد

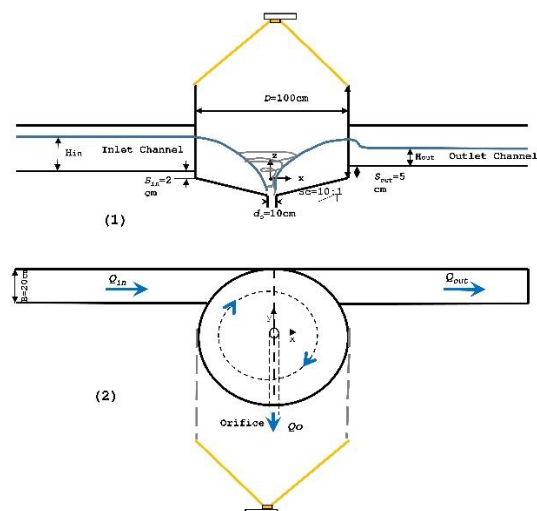


Fig. 3 Schematic of how the cameras are placed: (1) up view. (2) side view

شکل ۳ نمای کلی چگونگی قرارگیری دوربین‌ها: (۱) نمای بالای حوضچه. (۲) نمای کنار حوضچه.

باشد (که سرعت ذره تحت تأثیر سرعت بیشینه جریان، افزایش یابد) احتمال ورود به حوضچه نسبت به خروج از آبراهه خروجی افزایش می‌یابد. همچنین، تأثیر فاصله طولی رهایی ذره بر درصد احتمال تله‌اندازی در نقاط ۲ و ۷ مشهود می‌باشد بدین‌گونه که با کمتر شدن فاصله طولی احتمال تله‌اندازی بیشتر شده است.

۳-۲- مسیر حرکت ذره

با بررسی تصویرهای برداشت شده در MATLAB جهت و مسیر حرکت ذره در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه تعیین شد. ذره معلق در مسیر جریان گردابی از نقطه آغاز حرکت تا لحظه خروج از روزنه مرکزی واقع در کف حوضچه، مسیر منحنی شکل را طی می‌کند. ضمن اینکه گردابه در این حوضچه در جهت ساعتگرد تشکیل می‌شود، برای محور x ، جهت‌های بالادست جریان به سمت پایین دست جریان، برای محور y ، جهت دوربین $side$ به سمت پایه دوربین up (به عبارتی بعد عمود بر تصویر $side$) و برای محور z ، کف حوضچه از ناحیه روزنه مرکزی تا سطح آب به عنوان جهت‌های مثبت جریان فرض می‌شود. در آغاز ذره در عمق ۵ سانتی‌متری فلوم آزمایشگاهی رها شده و طول ۱/۵ متر را طی کرده سپس در حوضچه تله‌اندازی شده است. شکل ۵ مسیر منحنی شکل ذره در حوضچه گردابی را نشان می‌دهد، در شکل a6 ذره در ورودی حوضچه با مختصات (۰،۰/۳۳، ۰،۰/۲۴) ردیابی شده است و سپس، در جهت ساعتگرد به سمت روزنه حرکت می‌کند و پس از ۱۴ دور متوالی و زمان ماند تقریبی ۱۸/۴ ثانیه وارد روزنه می‌شود. در شکل b5 مسیر دایره‌ای و منحنی شکل ذره را از زاویه ۴۵ (ورودی حوضچه) تا ۳۶۰ درجه از نمای up نشان می‌دهد.

شکل ۷ مسیرهای حرکت ذره از نمای کنار از نقطه‌های مختلف رهایی را نشان می‌دهد. در ضمن نقاط ۲ و ۷ به دلیل این‌که ذره از آبراهه خروجی خارج شده، در بین نقطه‌ها ارائه نشده است. در بیشتر ویدیوهای برداشت شده توسط دوربین جانبی، رفتاری منحصر به فرد از ذره مشاهده می‌شود بدین‌گونه که ذره نخستین چرخش خود به دور گردابه را به عنوان بزرگترین دور خود ثبت می‌کند که این مدار تاحدودی در نزدیکی کف حوضچه و بامیانگین

(شکل ۵). با توجه به موقعیت این نقطه، ذره در ۲ سانتی‌متری دیواره متمایل به حوضچه رها می‌شود پس نسبت به نقطه‌های ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۹ مسیر ذره به سمت حوضچه نزدیک‌تر و متمایل‌تر می‌باشد و احتمال ورود به حوضچه و تله‌اندازی بیشتر می‌شود. افزایش بازده نسبت به نقطه ۱ احتمال دارد به این دلیل باشد که سرعت بیشینه در هر مقطع قائم در فاصله‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ عمق جریان از سطح آب رخ دهد که در دبی ۱۳/۷ با عمق ۱۳ سانتی‌متر در آبراهه ورودی، سرعت بیشینه‌ی جریان مربوط به فاصله‌ی ۰/۶۵ تا ۳/۲۵ سانتی‌متر از سطح آب می‌باشد که نزدیک به نقطه ۴ است و این سرعت بیشینه جریان، ذره را با انرژی و سرعت بیشتری به سمت حوضچه هدایت می‌کند. همچنین، نقطه‌ی ۴ نسبت به نقطه‌های ۱ و ۷ که فاصله‌ی یکسانی تا دیواره‌ی متمایل به حوضچه دارند، کمتر تحت تأثیر تنش کف و سطح آب می‌باشد. در همه ۵ تکرار آزمایش از نقطه ۷، ذره به سمت آبراهه خروجی حرکت کرد و احتمال تله‌اندازی برای ذره از این محل رهاسازی صفر است. این نتیجه بر مبنای پژوهش Nikou et al. (2021b) برای این هندسه از حوضچه گردابی قابل انتظار است. با توجه به توضیح‌های بالا، در این مدل حوضچه رسوبگیر گردابی، هرچه ذره به دیواره متمایل به حوضچه نزدیک‌تر باشد (تا جایی که تحت تنش جداره قرار نگیرد) و با توجه به الگوی توزیع سرعت در آبراهه‌های مستطیلی هرچه به ناحیه سرعت بیشینه‌ی جریان نزدیک‌تر

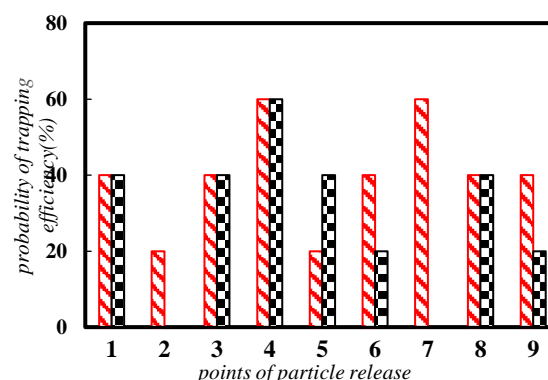


Fig. 5 Probability of trapping efficiency at different points of particle release: 37 cm (red color), 1/5 m (black color)

شکل ۵ درصد احتمال تله‌اندازی نقطه‌های مختلف رها شدن ذره: در فاصله‌ی ۳۷ سانتی‌متری تا حوضچه (رنگ قرمز) و در فاصله ۱/۵ متری تا حوضچه (رنگ مشکی)

ذره تا زمانی که با جریانی که از پایین، بالا می‌آید تماس داشته باشد به سمت پایین فشار داده می‌شود و آنگاه چرخش دوم در لایه بالا، آن را به سمت بالا و داخل گرداب می‌کشد. به نظر می‌رسد یک ناحیه‌ی مرده در وسط وجود دارد که ذره به صورت افقی به سمت گرداب حرکت می‌کند و بین دو چرخش گیر کرده است، این امر با افزایش عمق حوضچه، متمایزتر است. با این حال، با کاهش عمق جریان در حوضچه، ذره بیشتر ناچار می‌شود به قسمت زیرین عمق جریان برود و در آنجا بچرخد و وارد ناحیه گرداب شود (Paul., 1988).

توجیه همانندی برای این پدیده همانند پژوهش (Duinmeijer et al. (2020) است که توانایی انتقال ذره در دو جهت شعاعی و محوری بستگی به میدان جریان غیرچرخشی گرداب (میدان بیرونی) و میدان چرخشی (هسته‌ی گرداب) دارد به بیان دیگر ذره می‌تواند به بیرون از هسته‌ی گرداب رانده شود (نخستین چرخش مشاهده شده‌ی ذره در این پژوهش) که به نبود تعادل بین نیروهای فشار هیدرواستاتیک و نیروی سانتریفیوژ ذره مربوط است، حال اگر ذره در هسته‌ی گرداب گرفتار شود به نبود تعادل بین نیروی کششی پایین دست تولید شده توسط سرعت محوری هسته گرداب و نیروی شناوری بالادست ذره مربوط است. شکل ۷ مسیرهای مختلف ذره را نشان می‌دهد که به ازای رها شدن از نقطه‌های مختلف پیموده است.

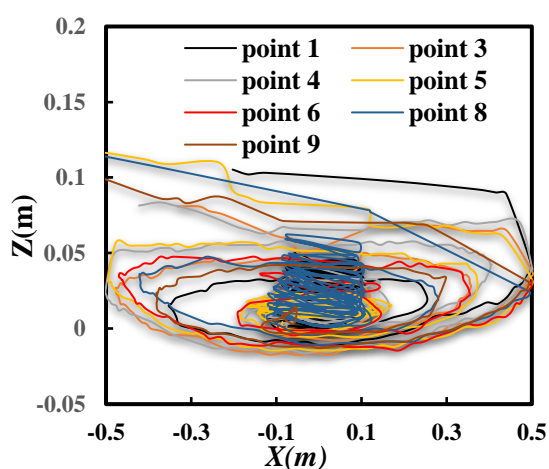


Fig. 7 Flow paths on the X-Z plane
شکل ۷ مسیرهای حرکت ذره در صفحه‌ی X-Z

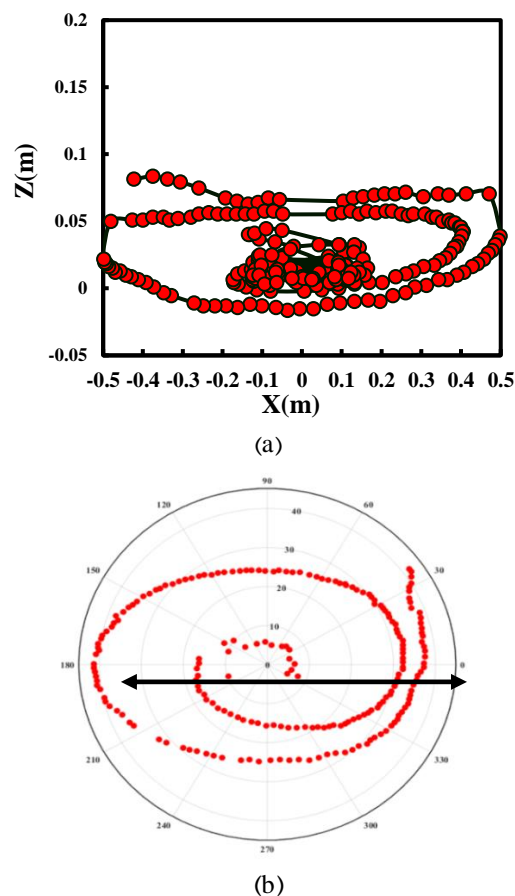


Fig. 6 (a) path particle in x-z plane, (b) path particle in x-y plane

شکل ۶ (a) مسیر حرکت ذره در صفحه‌ی x-z (side view)، (b) مسیر حرکت ذره در صفحه‌ی x-y (up view)

میانگین فاصله ۰/۳۷ متر از روزنه قرار دارد (قطر بزرگ این مدار بیضی شکل با علامت پیکان مشکی رنگ در شکل ۶b مشخص شده است)، پس از آن گردابه ذره را به سمت خود کشیده دوره‌های کوچک‌تری را مشاهده می‌کنیم که ذره ابتدا در نزدیکی کف (عمق پایین‌تر) و سپس در عمق‌های بالاتر به اندازه یک دو دور متوالی و پس از آن دوباره در عمق‌های پایین‌تر در شمار دوره‌های بیشتر می‌چرخد که هرچه زمان ماند ذره در حوضچه بیشتر باشد این الگوی رفتاری بیشتر تکرار می‌شود دلیل آن احتمال دارد به این خاطر باشد که جریان در نیمه‌ی پایینی حوضچه به دلیل وجود مرز پایینی، که قسمت اعظم جریان به سمت روزنه می‌باشد، ناچار می‌شود ذره را با خود به درون گرداب بکشد پس به دور گرداب بلند می‌شود، در نیمه بالایی عمق حوضچه، برعکس این عمل رخ می‌دهد.

روزنه) در حال دوران می‌باشد، مؤلفه‌های سرعت در موقعیت‌های مختلف مثبت و منفی قرار می‌گیرند و این امر پی‌درپی تکرار می‌شود. سرعت در جهت x ، غالب بوده که جهت حرکت غالب نیز در همین راستا می‌باشد. همچنین، در لحظه‌هایی که سرعت V_x ذره در موقعیتی صفر بوده است به این معنی است که در راستای x در آن لحظه جابه‌جایی وجود نداشته است. حال آنکه در آن لحظه، ذره حرکت ریزشی (تغییر سرعت V_z) و یا چرخشی (تغییر سرعت V_y) داشته است که بر مبنای شکل ۸ و نمودارهای سرعت قابل‌ملاحظه است. در لحظه‌هایی که سرعت در سه جهت در یک لحظه یکسان صفر است. مفهوم آن این‌گونه است که در جهتی که سرعت در آن لحظه صفر می‌باشد ذره تمایل به حرکت در جهت‌های دیگر را داشته است.

شکل ۱۰ توزیع سرعت ذره در جهت محور x - y - z را نشان می‌دهد که هرچه مسیر طی شده توسط ذره افزایش می‌یابد و به ناحیه روزنه‌ی مرکزی نزدیک می‌شود حرکت ذره به سمت کف حوضچه بوده و سرعت ذره به دلیل قرارگیری در ناحیه گردابه اجباری بیشتر می‌شود. در شکل (a) ۱۰ تغییرپذیری‌های توأم دو مؤلفه سرعت در راستای x و y نشان داده شده است. ارتباط معناداری میان دو مؤلفه V_x و V_y وجود دارد و تا حدودی در بیشتر نقطه‌هایی که مؤلفه سرعت x اکسترمم می‌باشد در موقعیت همانند مؤلفه y مقدار صفر را دارد و برعکس. این نتیجه با توجه به حرکت جریان گردابی به‌خوبی قابل توجیه است. در شکل (b) ۱۰ تغییرپذیری‌های توأم دو مؤلفه سرعت در راستای x و z نشان داده شده است.

شکل ۸ دامنه تغییر سه مؤلفه مختصات را نسبت به هم در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روند جابه‌جایی ذره در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی این پژوهش، سینوسی شکل است که به دلیل چگونگی حرکت ذره درون حوضچه می‌باشد. در مقطع‌ها ۱۵۰-۲۱۰ و ۳۰-۳۳۰ ذره متمایل به دیواره و در سایر مقطع‌ها متمایل به روزنه می‌باشد که در شکل ۵ به‌خوبی مشهود است که می‌تواند تحت تاثیر آبراهه‌های ورودی و خروجی نیز باشد که بر مسیر حرکت جریان تاثیرگذار هستند (Nikou et al., 2021a). همچنین، عمده جابه‌جایی ذره در راستای x می‌باشد تا از روزنه خارج شود و در راستای z (در جهت عمق) کم‌ترین جابه‌جایی را داشته است. به همین دلیل تغییر پذیری‌های سرعت در راستای z نسبت به دو مؤلفه سرعت دیگر کمتر می‌باشد.

۳-۳- توزیع سرعت

بررسی و شناخت روند توزیع مؤلفه‌های سرعت سه بعدی در جریان گردابی توسط پژوهش آزمایشگاهی منجر به شناخت بهتر و عمیق‌تر ساختار گردابه و هسته هوا می‌شود و می‌تواند نقش مؤثری در طراحی سازه‌های آبگیر و به ویژه افزایش بازده و کارکرد سازه و کاهش هزینه‌های ساخت داشته باشد. مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در این پژوهش، بر مبنای تصویرهای برداشت شده از حرکت ذره در حوضچه گردابی و پردازش تصویرها بر مبنای کد تهیه شده در MATLAB می‌باشد. در شکل ۹ دوره زمانی نمودارهای سه مؤلفه‌ی سرعت، روند سینوسی شکل دارد که با توجه به جریان گردابی درون حوضچه می‌باشد. از آن جایی که جریان گردابی، حول محور مرکزی خود (پیرامون

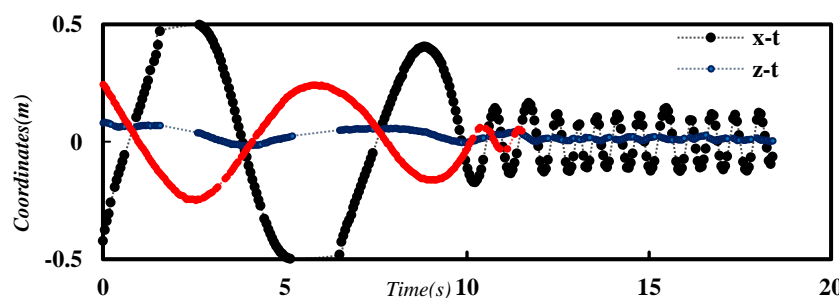


Fig. 8 Variation range x-y-z

شکل ۸ دامنه تغییرپذیری‌های x - y - z

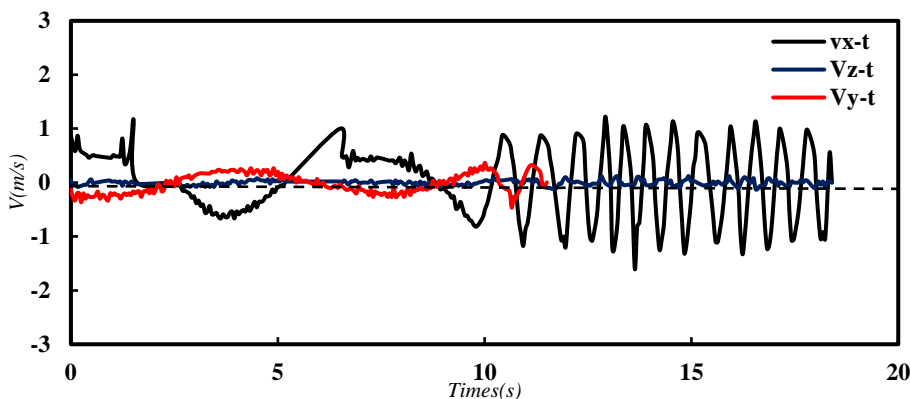


Fig. 9 Times series of velocities
 شکل ۹ دوره زمانی نمودارهای سرعت ذره

سرعت در این جهت در تمامی ارتفاع‌های نزدیک به هسته هوا بیشینه می‌باشد که مکان شکل‌گیری گردابه اجباری است (Nikou et al., 2021). تغییرپذیری‌های کم مؤلفه سرعت در راستای z به این دلیل می‌باشد که جابه‌جایی در این راستا نسبت به دو مؤلفه دیگر ناچیز است و بیشینه آن در نزدیکی روزنه اتفاق رخ می‌دهد. این نکته دارای

میزان‌های اکستریم مؤلفه سرعت در راستای x با نزدیک شدن به روزنه به هم نزدیک‌تر می‌شوند که نشان دهنده افزایش سرعت نزدیک روزنه و کف حوضچه و کوچک‌تر شدن مسیرهای منحنی شکل پیرامون هسته گرداب می‌باشد، به عبارتی در دوره‌های پایانی، ذره با سرعت بیشتری به دور هسته گرداب می‌چرخد. به طور کلی

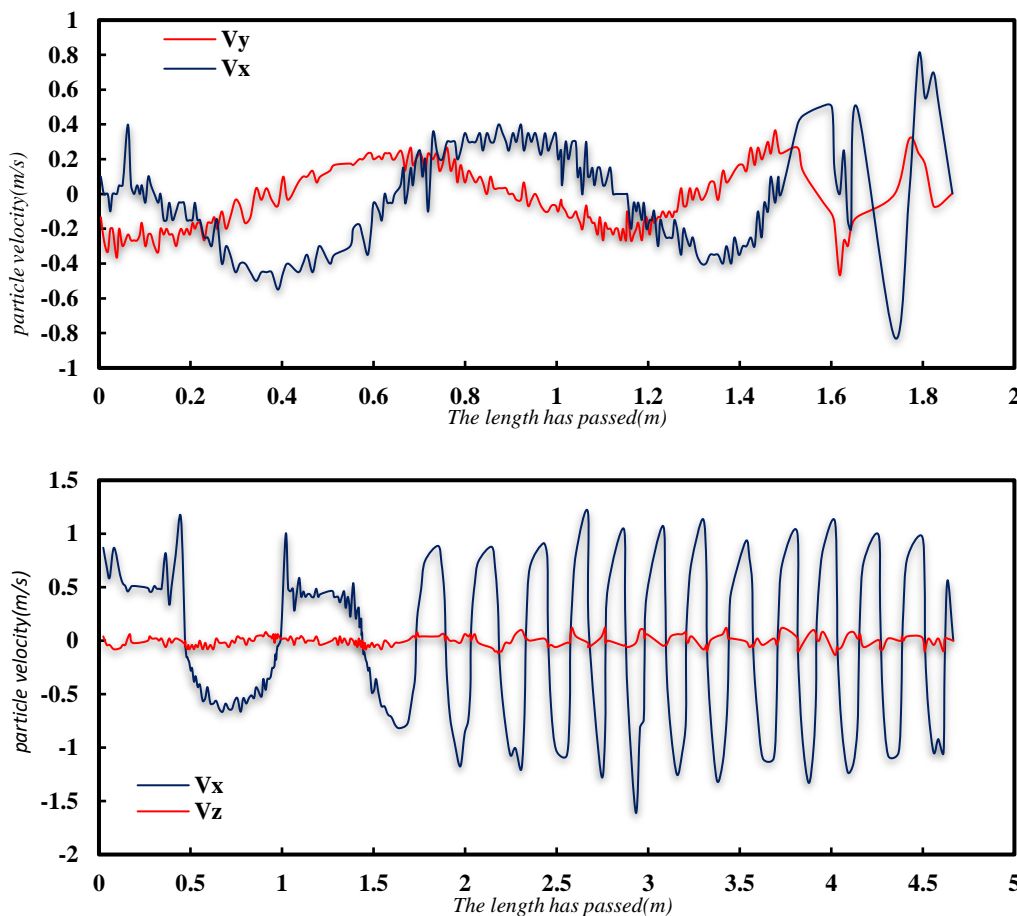


Fig. 10 (a) velocities distribution obtained from Up camera data, (b) velocities distribution obtained from Side camera data
 شکل ۱۰ (a) توزیع سرعت به دست آمده توسط داده‌های دوربین Up، (b) توزیع سرعت به دست آمده توسط داده‌های دوربین side

جریان گردابی می‌باشد. در شکل ۱۱ جهت‌های بردارهای سرعت برای نقطه‌ی ۴ آشکارا حالت ساعتگرد بودن جریان و گردابه را نشان می‌دهد. سرعت در جهت x ، غالب بوده که جهت حرکت غالب نیز در همین راستا می‌باشد.

اهمیت است که میزان قدرمطلق بیشینه سرعت در راستای x ، $1/61$ و در راستای z ، $0/13$ متر بر ثانیه است که نشان می‌دهد ذره تمایل دارد بیشتر به صورت چرخشی تا حالت ریزشی وارد روزنه شود و یا به عبارتی گویای چیرگی نیروی گریز از مرکز بر عمل آنگیری در

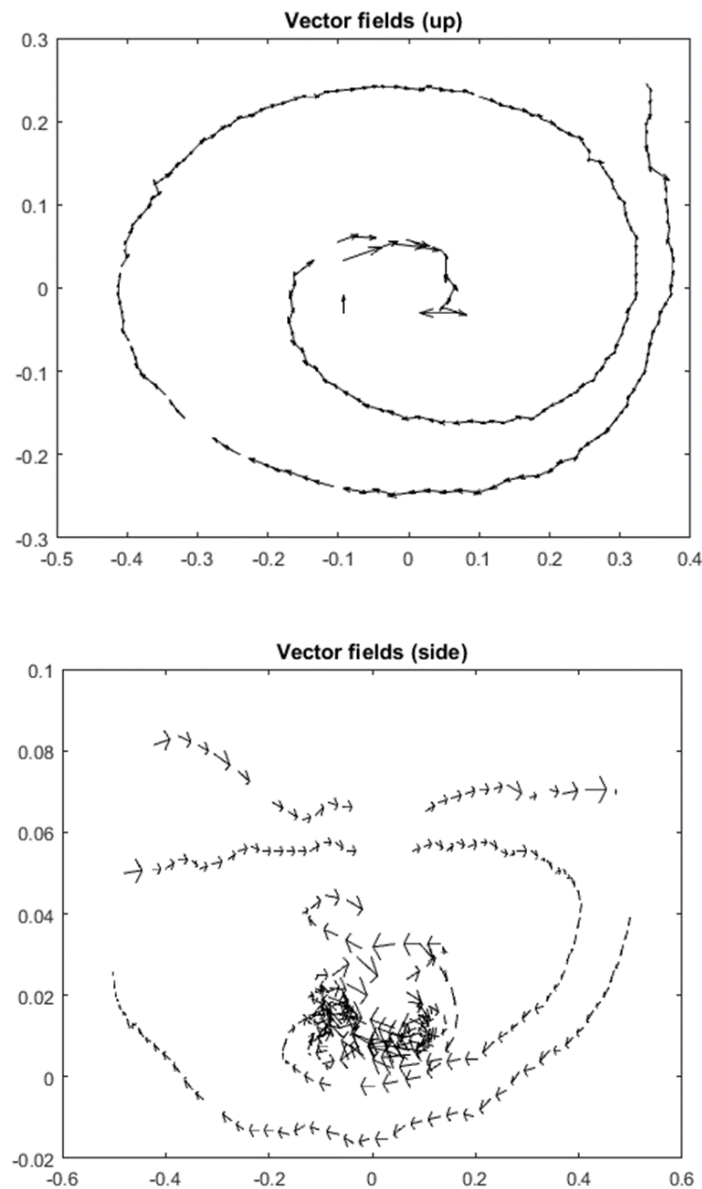


Fig. 11 The velocity vector fields for point 4 on the plane $x-y$ and $x-z$, respectively.

شکل ۱۱ میدان بردارهای سرعت برای نقطه ۴ به ترتیب در صفحه $x-y$ و $x-z$

در صفحه‌ها افقی مختلف ($0/03$ ، $0/03$ ، $0/06$ ، $0/09$ متر از کف حوضچه) با استفاده از سرعت‌سنج مغناطیسی Nortek 21 MHz Micro-ADV در دو دبی ۸ و ۱۴ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است (S. R. Nikou et al., 2021)

۳-۴- مقایسه‌ی سرعت ذره با سرعت سیال (داده‌های دستگاه ADV)

اندازه‌گیری سرعت جریان در هشت مقطع (هشت زاویه)

گرداب داشته‌است، پی برد. برای مثال ذره ۳۲ بار (نقطه ۱) به دور روزنه دوران داشته‌است به عبارتی از هنگام ورودش به حوضچه ۳۲ بار از زاویه ۴۵ درجه عبور کرده‌است و این نکته دارای اهمیت است که ذره در منحنی‌های غیر بسته این دوره‌ها را طی می‌کند و افزون بر حرکت دورانی‌اش، در جهت قائم و رو به پایین نیز حرکت می‌کند که این مطلب با فرض مدل گرداب (Rankine, 1858) که ذره در منحنی‌های بسته حرکت می‌کند همخوانی ندارد. بیشترین زمان ماند ذره در حوضچه مربوط به نقطه‌ی رهایی (۸) در فاصله‌ی ۱/۵ متری و در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه، ۱۹/۷ ثانیه است، زمان ماند ذره برای هر نقطه رهایی، مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. میانگین زمان ماند برای این نقاط در حوضچه و برای دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه، ۱۴/۵ ثانیه می‌باشد.

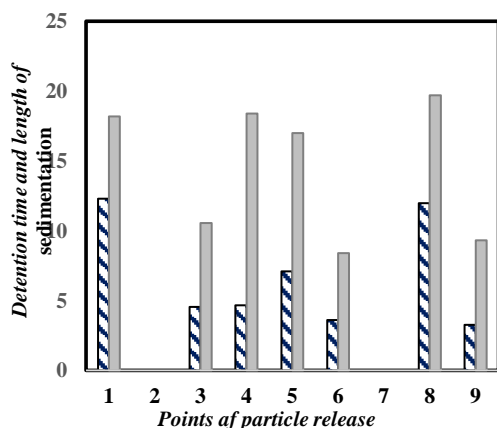


Fig. 13 Detention time (gray color) and length of sedimentation (wide downward diagonal) in the chamber from different parts of the particle release

شکل ۱۳ زمان ماند (رنگ خاکستری) و طول ته‌نشینی (مورب) در حوضچه از نقطه‌های مختلف رهایی ذره

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی الگوی حرکت ذره در حوضچه رسوبگیر گردابی با تکنیک ردیابی ذرات و پردازش تصویر به کمک کد نویسی در محیط MATLAB 2020 اقدام شد و مسیر حرکت ذره از نقطه‌های مختلف رهایی و همچنین میدان بردارهای سرعت ترسیم شد، الگوی توزیع سرعت ذره تعیین شد و سرعت ذره با سرعت جریان شد. نتایج نشان داد که در این مدل حوضچه رسوبگیر گردابی،

که شکل ۱۲ خطوط هم‌سرعت ۳ بعدی این داده‌های ADV را برای دبی ۱۴ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد، که مربوط به سرعت سیال (آب) می‌باشد که داده‌های سرعت ذره نیز به صورت نقطه در این شکل ترسیم شده است. در ضمن نوسان‌های سرعت برای خطوط هم‌تراز جریان ترسیم شده است. این شکل گویای نزدیک بودن سرعت ذره به سرعت جریان می‌باشد و فرض اینکه ذره سرعت تاحدودی معادل سرعت جریان را دارا است را اثبات می‌کند. جدول ۲ نیز نزدیک بودن میزان‌های دو مؤلفه‌ی سرعت ذره و جریان را با وجود اختلاف دبی ۰/۳ لیتر بر ثانیه، نشان می‌دهد.

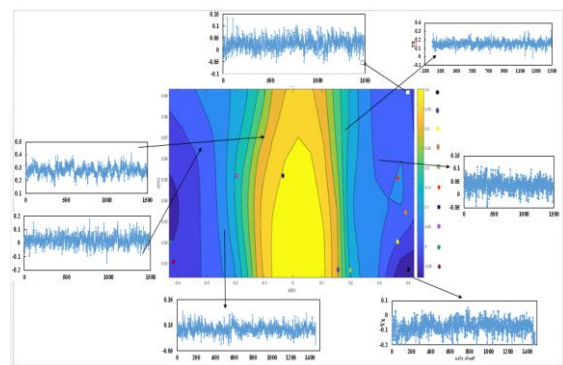


Fig. 12 3D velocity contour of ADV data for a flow rate of 14 liters per second

شکل ۱۲ خطوط هم‌تراز سرعت ۳ بعدی داده‌های ADV برای دبی ۱۴ لیتر بر ثانیه

جدول ۲ مقایسه سرعت میانگین ذره با سرعت جریان

Table 2 Comparison of average particle velocity with flow velocity

	V_x (m/s)	V_z (m/s)
Average particle velocity	۰/۵۰۵	۰/۰۴۳
Average flow velocity	۰/۷۳۱	۰/۰۴۵

۳-۵- زمان ماند

توزیع مؤلفه‌های سرعت در صفحه‌ی x-y نه تنها اطلاعات سرعت ذره را در اختیار ما قرار می‌دهد بلکه شمار دوره‌های طی شده توسط ذره و مهم‌تر از آن زمان ماند ذره در حوضچه را مشخص می‌کند. بدین صورت که با دانستن مختصات اکسترمم مثبت مؤلفه‌ی سرعت در جهت X می‌توان به شمار دوره‌هایی که ذره پیرامون هسته‌ی هوای

۶- منابع‌ها

Athar, M., Kothyari, U.C. and Garde, R.J. (2003). Distribution of sediment concentration in the vortex Chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Research*, 41, 427-438.

Cecen, K., Bayazit, M. (1975). Some laboratory studies of sediment controlling structures. *Proc. 9th Cong. ICID, Moscow, Soviet Union*, 107-111.

Chabokpour, J. and Farhoudi, J. (2011). Sediment Extraction and flow structure of Vortex Settling Basin. 6th National Congress on Civil Engineering, 14(5), 782-793.

Duinmeijer, A. Oldenzien, G. and Clemens, F. (2020). Experimental study on the 3D-flow field of a freesurface vortex using stereo PIV. *Journal of Hydraulic research*, 58(1), 105-119.

Huang, T.-H., Jan, C.-D. and Hsu, Y.-C. (2017). Numerical simulations of water surface profiles and vortex structure in a vortex settling basin by using Flow-3D. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(5), 531-542.

Keshavarzi, A.R. and Gheisi, A.R. (2006). Trap efficiency of vortex settling basin for exclusion of fine suspended particles in irrigation canals. *J. Irrig. Drain. Engng.* 55(4), 419-434.

Mulligan, S., Casserly, J. and Sherlock, R. (2016). Effects of Geometry on Strong Free-Surface Vortices in Subcritical Approach Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001194).

Mulligan, S., Casserly, J. Giovanni, D. and Sherlock, R. (2018). Understanding Turbulent Free Surface Vortex Flows using a Taylor-Couette flow analogy. *Sci Rep* 8, 824(2018).

Nikou, N.S.R., Ziaei, A.N., Ansary, H. and McDonough, J.M. (2021a). Flow field Investigation in a Vortex Settling Basin using Acoustic Doppler Velocimetry and Large Eddy Simulation. *Water and Environment Journal*, 35, 865-883.

Nikou, N.S.R., Ziaei, A.N. and McDonough, J.M. (2021b). Numerical Modeling of Flow Field in Three Types of Vortex Settling Basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001628](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001628).

Nikou, N.S.R., Ziaei, A.N. and Dalir, M. (2022). Study of Effective Parameters on Performance of Vortex Settling Basins Using Taguchi Method, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage*

هرچه ذره به دیواره متمایل به حوضچه نزدیک‌تر باشد (تا جایی که تحت تنش جداره قرار نگیرد) و هرچه به ناحیه سرعت بیشینه‌ی جریان نزدیک‌تر باشد، احتمال ورود ذره به حوضچه نسبت به دیگر ناحیه‌ها افزایش می‌یابد. توزیع مؤلفه‌های سرعت ذره در جهت محور x-y-z توزیع سینوسی می‌باشد که هرچه مسیر طی شده توسط ذره افزایش می‌یابد و به ناحیه روزنه مرکزی نزدیک می‌شود، سرعت ذره بیشتر می‌شود و میزان قدرمطلق بیشینه سرعت ذره در راستای x، $1/61$ و در راستای z، $0/13$ متر بر ثانیه است که بیشتر بودن سرعت در جهت x نسبت به z گویای چیرگی نیروی گریز از مرکز بر عمل آبیگری در جریان گردابی می‌باشد. همانند با پژوهش‌های پیشین وجود آبراهه ورودی و خروجی باعث انحراف هسته هوا از محور عمودی می‌شود و نیز نزدیک بودن میزان‌های دو مؤلفه‌ی سرعت ذره و جریان فرض اینکه ذره سرعتی تا حدودی معادل سرعت جریان را دارا است را اثبات می‌کند. در ضمن میانگین زمان ماند در حوضچه و برای دبی $13/7$ لیتر بر ثانیه، $14/5$ ثانیه می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان از روش ردیابی ذره و پردازش تصویر به عنوان روشی با سرعت عمل بالا و دقت نزدیک به داده‌های اندازه‌گیری مستقیم، برای بررسی الگوی حرکت ذره در حوضچه‌های گردابی بهره گرفت.

۵- فهرست نشانه‌ها

L_{in}	طول آبراهه ورودی (m)
B_{in}	عرض آبراهه ورودی (m)
h_{in}	ارتفاع آبراهه ورودی (m)
L_{out}	طول آبراهه خروجی (m)
B_{out}	عرض آبراهه خروجی (m)
h_{out}	ارتفاع آبراهه خروجی (m)
D	قطر حوضچه
H_b	ارتفاع حوضچه
S_c	شیب کف حوضچه
d	قطر روزنه‌ی مرکزی

Engineering. Vol. 148(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001648](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001648)

Paul, T.C. (1988). Designing circulation Chamber Sediment Extractor. Report No. OD 91 Hydraulics Research Limited, Wallingford, UK.

Rankine, W.J.M. (1858). A Manual of Applied Mechanics, Charles Griffin, London.

Roseberry, J.C, Schmeekle, M.W and Furbish, D. J. (2012). A probabilistic description of the bed load Sediment flux: 2. Particle activity and motions. Journal of Geophysical Research, 117(F3). <https://doi.org/10.1029/2012JF002353>.

Shin, S.S. Park, S.D and Lee, S.K. (2016). Measurement of Flow Velocity Using Video Image of Spherical Float. Procedia Engineering, 154, 885 – 889.

Sun, H. and Liu, Y. (2015). Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes. Journal of Hydraulic Research, 53(6), 787–796.

Witz, M.J., Cameron, S. and Nikora, V. (2018). Bed Particle Dynamics at Entrainment. Journal of Hydraulic Research, 57(4), 464-474.

