

مقاله علمی- پژوهشی

بررسی الگوی جریان در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی مبتنی بر الگوریتم خودکار ردیابی ذره

الناز مهربانی^۱، علی‌نقی ضیایی^{۲*}، ندا شیخ رضازاده نیکو^۳، محمودرضا گلزاریان^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷

چکیده

حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی که شامل محفظه‌ی استوانه‌ای و یک روزنه‌ی مرکزی در کف آن، کانال ورودی و خروجی جریان هست باهدف جداسازی ذرات از جریان آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهش حاضر با کمک فن پردازش تصویر به مطالعه حرکت ذره در میدان جریان گردابی در یک مدل آزمایشگاهی از حوضچه‌ی رسوب‌گیر پرداخته شد. توزیع سرعت ذره، زمان ماند ذره، طول ته‌نشینی با استفاده از فن ردیابی ذره، از طریق برنامه‌ی خودکار محاسبه شد. هم‌چنین کسر حجمی، مسیر جریان ذره و پروفیل سطح آب، اندازه‌گیری، شناسایی و ترسیم شد و نیز برای تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری جریان درون حوضچه از سرعت‌سنج مغناطیسی سه‌بعدی Nortek 21 MHz Micro-ADV استفاده شد. نتایج نشان داد که مشابه توزیع سرعت به‌دست‌آمده برنامه‌ی نیمه‌خودکار، توزیع سرعت برنامه‌ی خودکار نیز در حوضچه‌ی گردابی به‌صورت تابع سینوسی هست و تطابق خوبی بین پروفیل سطح آب به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری مستقیم و پروفیل به‌دست‌آمده از پردازش تصویر وجود دارد به‌طوری‌که میانگین خطای نسبی آن ۱/۳۶ درصد است. مقادیر مؤلفه‌ی سرعت ذره و جریان (داده‌های دستگاه ADV) به هم نزدیک هست که فرضیه برابری سرعت ذره و سرعت جریان را اثبات می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توزیع سرعت، ذرات تعقیب‌کننده، طول طی شده، گردابه، PTV

مقدمه

اجباری) در داخل حوضچه، (گردابه آزاد پیرامون حاشیه‌ی حوضچه و دیواره‌ها و گردابه اجباری اطراف روزنه) منجر به حرکت ذرات سنگین‌تر از آب به سمت پیرامون حوضچه می‌گردد که ناشی از اثر نیروی گریز از مرکز است. جریان‌های ثانویه، لایه‌های سیال نزدیک به کف حوضچه را به سمت روزنه مرکزی هدایت می‌نمایند. از آنجایی که ذرات همراه با جریان، مسیر مارپیچی را طی می‌کنند، دارای طول ته‌نشینی طولانی تری نسبت به ابعاد حوضچه می‌باشند. این ویژگی بارز، منجر به افزایش راندمان این نوع از حوضچه‌ها می‌گردد، ذرات از روزنه‌ی مرکزی به‌طور پیوسته تخلیه و هم‌چنین جریان آب نسبتاً خالی از ذرات، از کانال خروجی که در ارتفاع بالاتری از حوضچه قرار دارد، خارج می‌شود (Athar et al., 2003).

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی حوضچه رسوب‌گیر گردابی پیرامون راندمان تله‌اندازی رسوب و بررسی الگوی جریان که شامل سرعت‌های مماسی، شعاعی، محوری، جریان‌ات ثانویه و گردابه‌ها انجام شده است که نتایج بعضی از این پژوهش‌ها در زیر ارائه شده - است:

کشاورزی و غیشی رفتار جریان درون نوعی از حوضچه‌ی رسوب‌گیر را با اندازه‌گیری سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری تحلیل کرده و خطوط جریان را ترسیم کردند. ایشان دریافتند که در ناحیه ورودی حوضچه بیشترین جریان‌ات ثانویه در مقطع ۹۰ درجه

حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی^۵ یکی از حوضچه‌های رسوب‌گیر پیوسته هست که خاصیت خود پالایی^۶ دارد و اجزای رسوب را توسط چرخش جریان گردابی جدا و به خارج از سیستم تخلیه می‌کند. در این حوضچه‌ی استوانه‌ای که یک روزنه‌ی مرکزی در کف خود دارد، جریان به‌صورت مماسی وارد می‌شود. سرعت مماسی منجر به تشکیل گردابه‌ی آزاد سطحی و جریان‌ات ثانویه درون حوضچه می‌شود که یک میدان چرخش به‌صورت پیوسته را به‌وجود می‌آورد که می‌تواند به‌صورت یک هسته‌ی هوای قوی و یا ضعیف که ناشی از ناپایداری بودن سطح آزاد در استغراق بحرانی هست، ظهور کند (Mulligan et al., 2018). گردابه ترکیبی شکل‌گرفته (ترکیبی از گردابه‌های آزاد و

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

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

۳- پژوهشگر پسادکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشیار گروه مهندسی بیوسستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*- نویسنده مسئول: (Email: an-ziaei@um.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.4.4

5. Vortex Settling Basin

6. Self-flushing

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 هست و ذره با سرعتی تقریباً معادل سرعت جریان در مسیرهای مارپیچی حوضچه‌ی گردابی حرکت می‌کند. تاکنون مطالعات بسیاری در علم هیدرولیک با استفاده از فن پردازش تصویر و ردیابی ذره انجام شده که نتایج برخی از این پژوهش‌ها در ادامه بیان شده است.

پژوهش آدرین حاکی از توسعه‌ی روش سرعت سنجی تصویری ذرات با توصیف برخی از نقاط عطف که امکان سنجش‌های جدید و یا بهتر به دست آمده را در پی دارد، هست. به عبارتی تاریخچه‌ای از این روش همراه با سیر تکاملی آن بیان می‌شود و برخی از اهداف برای پیشرفت‌های آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد (Adrian, 2005). وانگ و همکاران آزمایشاتی پیرامون جداسازی ذرات و حرکات آن‌ها در جریان گردابی به وجود آمده توسط یک همزن مغناطیسی به قطر ۷ سانتی‌متر در داخل مجرای استوانه‌ای شکل انجام دادند. در پژوهش خود از رنگ سبز فلورسنت^۲ به عنوان ردیاب برای آشکارسازی ساختار گردابه استفاده کرده‌اند و با بهره‌گیری از صفحه‌ی نور لیزری و دوربین فیلم برداری دیجیتال، ایشان دریافتند که ذرات می‌توانند به دور از خطوط جریان در ناحیه‌های جریان آشفتنه و بی‌نظم حرکت کنند و متعاقباً به سمت گردابه کشانده شوند، نیروی سانتریفیوژی و حرکت ناشی از برش مربوط به چرخش استوانه داخلی نقش مهمی را در حرکت ذرات بزرگتر بیشتر به سمت دیواره گردابه دارد و همچنین نتیجه گرفتند که ذرات بزرگتر در حال حرکت به سمت پایین دست و ذرات کوچکتر در حال حرکت به سمت بالادست مجرای استوانه‌ای هستند، بدین صورت می‌توان ذرات کوچک و بزرگ را به صورت جداگانه از بالای خروجی و پایین خروجی به ترتیب جدا کرد (Wang et al., 2017). تاوورو و همکاران در مطالعه خود بر روی ویدیوهایی از رودخانه برنتا^۳ ایتالیا یک روش PTV ساده پیشنهاد کرده‌اند که به طور خاص هدف آن تخمین سرعت سطحی آب از اجسام طبیعی درون آن هست، این روش که PTV-Stream نام دارد در واقع یک روش ردیابی ذره هست که مسیرهایی از اجسام شناور که در حال عبور از میدان دید هستند، را شناسایی می‌کند. از مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های دیگر PTV، این است که این ردیاب‌ها با هر شکلی که باشند مبتنی بر درخشندگی آن‌ها و باتوجه به زمینه^۴ شناسایی می‌شوند زیرا بیشتر این روش‌ها وابسته به ردیاب‌هایی می‌باشند که شکل آن شناخته شده باشد چنین ویژگی به طور قابل توجهی اجرای PTV را در مطالعات تجربی محدود می‌کند.

شکل می‌گیرد که تحت تأثیر کانال ورودی می‌باشد (Keshavarzi and Gheisi, 2006). اطهر و همکاران با دبی ۸ لیتر بر ثانیه الگوی جریان را در داخل حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی بررسی کردند. نتایج ایشان حاکی از آن است که توزیع سرعت‌های مماسی و شعاعی در جهت عمودی به صورت لگاریتمی هست. این سرعت‌ها در داخل حوضچه یکنواخت نیستند و در قسمت‌های مختلف الگوی جریان متفاوتی دارند و نیز قسمت‌هایی از گردابه‌ی به وجود آمده در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی الگوی جریان مشابهی با گردابه‌ی ترکیبی دارد و سرعت‌های مماسی و شعاعی در بعضی قسمت‌ها به نظر می‌رسد که قوانین گردابه‌ی ترکیبی را دنبال می‌کنند (Athar et al., 2018). لی و همکاران پژوهشی با هدف کاهش نشست رسوب روی دفلکتور، در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی انجام دادند. بدین منظور از دو نوع دفلکتورهای حرفه‌دار و مشبک^۱، بهره گرفته و ته نشینی رسوب، راندمان تله‌اندازی و نرخ کسر حجمی را در VSB اندازه‌گیری کرده و با حوضچه‌هایی که دفلکتور ساده دارند، مقایسه کردند. نتیجه‌ی ایشان حاکی از آن است که حوضچه‌ای با دفلکتور نسبتاً مشبک، راندمان تله‌اندازی رسوب و نرخ کسر حجمی‌اش مشابه با حوضچه‌ی با دفلکتور ساده است، ولی حوضچه‌ای که دفلکتور کاملاً مشبک دارد، راندمان تله‌اندازی رسوب کمتر و ته‌نشینی رسوب بیشتری بر روی دفلکتور، نسبت به حوضچه با دفلکتور ساده دارد (Li et al., 2020). نیکو و همکاران به منظور ارزیابی عملکرد حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی از مدل‌های آشفتگی ناویر-استوکس شامل $k-\epsilon$ استاندارد، مدل‌های $SST k-\omega$ ، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل اسمگایرونوسکی بهره گرفتند و میدان سرعت سه‌بعدی جریان را با استفاده از سرعت‌سنج مغناطیسی ADV اندازه‌گیری کردند. اثرات تولید گردابه نیز بر عملکرد حوضچه و خصوصیات جریان در VSB مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی پژوهش ایشان، برتری مدل اسمگایرونوسکی را در خصوص پروفیل سطح آب و الگوی جریان‌های ثانویه نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده نشان داد (Nikou et al., 2021a). نیکو و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر راندمان جریان در حوضچه گردابی با استفاده از روش تاگوچی و روش سطح پاسخ پرداختند. آنها به منظور تعیین راندمان کل، سه راندمان جریان، راندمان کانال ورودی و راندمان تله‌اندازی را تعیین کردند (Nikou et al., 2021b). مهربانی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهششان با تصویربرداری دوبعدی و پردازش تصویر به مطالعه حرکت ذره در میدان جریان گردابی در یک مدل آزمایشگاهی از حوضچه رسوب‌گیر پرداختند. درصد احتمال تله‌اندازی ذره تعیین و سرعت ذره در سه بعد با استفاده از فن ردیابی ذره و به کمک نرم‌افزار MATLAB 2020، محاسبه شد. همچنین مسیر

2. Fluorescent
3. Brenta
5. Background

1. Perforating

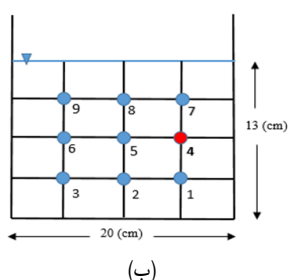
و با چگالی نسبی $1/41$ و قطر $0/85$ سانتی‌متر تهیه شد که ماده‌ی اولیه‌ی آن پلی آمید ۱۲ هست که می‌تواند با افزودنی‌های مختلف مانند فایبرگلاس، فیبر کربن و... ترکیب شود. این ذرات طی فرآیند پلیمری شدن به دست می‌آیند که دارای خلل و فرج ریز می‌باشند و به‌عنوان ذرات تعقیب‌کننده در جریان آب، پیشنهاد می‌شوند. ذره در فواصل 37 سانتی‌متری و $1/5$ متری از حوضچه (محل تزریق رسوب در پژوهش اطهر و همکاران (Athar et al., 2003) و در این دو فاصله‌ی طولی، در ۹ نقطه ره‌اشده است و هر آزمایش ۵ بار تکرار شده است. نقاط به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تحت تأثیر تنش کف، زبری جدارها و وجود سطح آزاد آب نباشند شکل ۱ ب. برای ردیابی ذره‌ی موردنظر در حوضچه‌ی گردابی ۲ برنامه در محیط نرم‌افزار MATLAB R2020a نوشته شد. کد اول به‌صورت نیمه‌خودکار هست به‌صورتی که هنگام وارد شدن ذره در فریم، مکان ذره به‌صورت دستی انتخاب می‌شود درحالی‌که در کد دوم مشخصات ذره تعریف شده و به‌صورت خودکار در فریم شناسایی می‌شود. از آنجایی که تعداد 180 فیلم با نرخ 240 فریم بر ثانیه، فیلم‌برداری شده است، حجم داده‌ها و زمان بر بودن داده‌برداری اهمیت می‌یابد. که برنامه‌ی دوم به دلیل خودکار بودن و سرعت بالا این نیاز را برطرف می‌کند به‌گونه‌ای که برای مثال در ویدیو مربوط به نقطه‌ی ۸، در مدت‌زمان ۲۰ ثانیه تعداد 2336 سرعت لحظه‌ای برداشت شده است، درحالی‌که توسط برنامه نیمه‌خودکار تعداد 252 سرعت لحظه‌ای ثبت شده است، زیرا این برنامه به دلیل انتخاب موقعیت ذره به‌صورت دستی این امکان را ندارد. این نکته حائز اهمیت است که ردیابی ذره خصوصاً در نمای بالا به دلیل اینکه فضای فیلم‌برداری از جریان آب همراه با امواج گردابه‌ی تلاطمی صورت گرفته شکل ۲، بسیار مشکل هست که توسط برنامه‌ی خودکار بخش‌هایی از مسیر جریان ردیابی نمی‌شود زیرا ذره در فریم مدنظر بین امواج گردابه قرار می‌گیرد و به‌صورت کامل تشخیص داده نمی‌شود حال آنکه توسط برنامه‌ی نیمه‌خودکار موقعیت آن را می‌توان به‌صورت دستی انتخاب کرد به‌این‌ترتیب مسیرهای جریان پیوسته‌ای توسط برنامه‌ی نیمه‌خودکار ولو با تعداد نقاط کمتر ردیابی می‌شود. به‌منظور مقایسه‌ی سرعت ذره با سرعت جریان از داده‌های سرعت پژوهش نیکو و همکاران استفاده شد، که برای تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری جریان درون حوضچه از سرعت‌سنج مغناطیسی سه‌بعدی Nortek 21 MHz Micro-ADV در شرایط آب زلال استفاده کردند. متوسط سرعت U_x ، U_y و U_z در 30 هرتز با یک دقیقه متوسط اندازه‌گیری توسط ایشان تعیین گردید. سرعت‌ها در هشت مقطع با زوایای مختلف (45 ، 270 ، 225 ، 180 ، 135 ، 90 و 315 درجه) به فواصل $0/2$ از کف اندازه‌گیری شد. در هر ارتفاع، سرعت در 140 نقطه در راستای شعاعی تعیین گردید (Nikou et al., 2021a).

نتیجه‌ی پژوهش ایشان رضایت خوبی با اندازه‌گیری‌های بنج‌مارک^۱ و PTV های مبتنی بر همستگی داشته است (Tauro et al., 2019). جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد که مطالعه جریان گردابی بسیار حساس به ابزار اندازه‌گیری هست، برای مثال سرعت‌سنج ADV که رایج‌ترین ابزار برای اندازه‌گیری میدان سرعت در جریان گردابی هست، در یک جریان گردابی موجب افزایش آشفتگی و تلاطم در جریان شده که بر آشفتگی ناحیه‌ی اندازه‌گیری سرعت و مهم‌تر از آن بر مؤلفه‌های سرعت تأثیرگذار است. همچنین قرارگیری این دستگاه نزدیک هسته گردابه باعث جابجایی 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، هدف بررسی آزمایشگاهی الگو و رفتار جریان در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی با استفاده از روش پردازش تصویر^۲ هست. از آنجایی‌که در علم هیدرولیک استفاده از فن‌های پردازش تصویر، خروجی‌های مطلوب و نتایج بسیار خوبی داشته است، در پژوهش حاضر، از این فن به‌منظور ردیابی ذره و آنالیز مسیر حرکتش در حوضچه‌ی گردابی مبتنی بر کد خودکار، استفاده می‌شود.

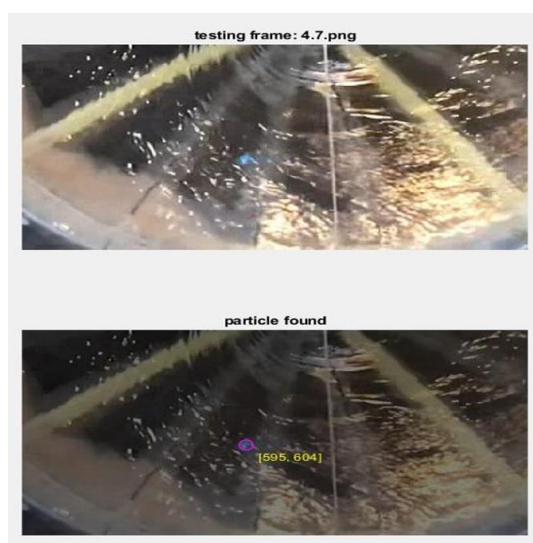
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آموزشی علوم و مهندسی آب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بر روی بستر آزمایشگاهی از جنس آکرلیک^۳ انجام شد. شکل ۱ الف نمایی از مجموعه آزمایشگاهی پژوهش حاضر هست. مشخصات کانال و حوضچه گردابی بدین صورت است که: L = طول کانال، B = عرض کانال، h = ارتفاع کانال، D = قطر حوضچه، H_b = ارتفاع حوضچه، S_c = شیب کف حوضچه، d = قطر روزه‌ی مرکزی است. در این پژوهش دبی ورودی به کانال $13/7$ لیتر بر ثانیه هست که توسط مخزنی متحرک در انتهای کانال، تأمین می‌شود. از روش حجمی برای اندازه‌گیری دبی استفاده شد. به‌منظور کاهش تلاطم سطح آب، صفحه‌ای شناور از جنس آکاسیف در ابتدای ورودی کانال روی سطح آب قرار داده شد و همچنین برای کاهش تلاطم جریان از توری‌هایی فلزی در ابتدای کانال بهره گرفته شد. در این مطالعه، هدف از کاربرد فن ردیابی ذره، بررسی رفتار ذرات رسوبی در حوضچه گردابی هست. به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی و مواد اولیه موجود در بازار، ذره‌ای با قابلیت حرکت در جریان آب بدون تأثیر در خصوصیات جریان و قابلیت تفکیک و شناسایی با فن پردازش تصویر انتخاب شد. این ذره انتخابی با استفاده از دستگاه چاپگر سه‌بعدی به‌صورت کروی

3. Benchmark
4. Image processing
5. Acrylic



شکل ۱- الف) نمایی از مجموعه‌ی آزمایشگاهی پژوهش حاضر، ب) شماتیک شبکه‌بندی ناحیه نقاط رهاشدن ذره



شکل ۲- بخشی از فریم گرفته‌شده از نمای بالا که سختی تشخیص ذره در بین گردابه را نشان می‌دهد.

عبارتی کاهش Q_0 هست و نسبت کسر حجمی کاهش می‌یابد.

نتایج و بحث

جدول ۱- کسر حجمی هندسه‌های مختلف مطالعات پیشین و پژوهش حاضر

Q_0/Q_{in}	D/d	پژوهش‌گران
۴/۶-۱۸/۵۸	۱۷-۷۰	کوری و همکاران (۱۹۷۵)
۱/۸۶-۱۵/۲۷	۱۱-۹۶	بال و همکاران (۱۹۸۳)
۹/۲۶-۲۰	۲۱/۲۵-۴۲/۵	بال و همکاران (۱۹۸۸)
۷/۳۷-۱۳/۱۸	۱۰	اطهر و همکاران (۲۰۰۲)
۶/۷۴-۱۴/۲۱	۲۰	چاپوکوپور و همکاران (۲۰۱۱)
۱۸/۵-۲۶/۲۵	۱۰	نیکو و همکاران (۲۰۲۱a)
۱۵/۰۵-۲۲/۲۵	۱۰	پژوهش حاضر

توزیع سرعت

الف) سرعت ذره (کد خودکار)

شکل ۳ مسیر جریان ماریچی ذره از نمای بالا، برای نقطه ۷ در فاصله‌ی ۳۷ سانتی‌متری حوضچه هست که به خوبی تطابق مسیر جریان دو کد نسبت به هم را نشان می‌دهد. شکل ۴ توزیع سرعت ذره

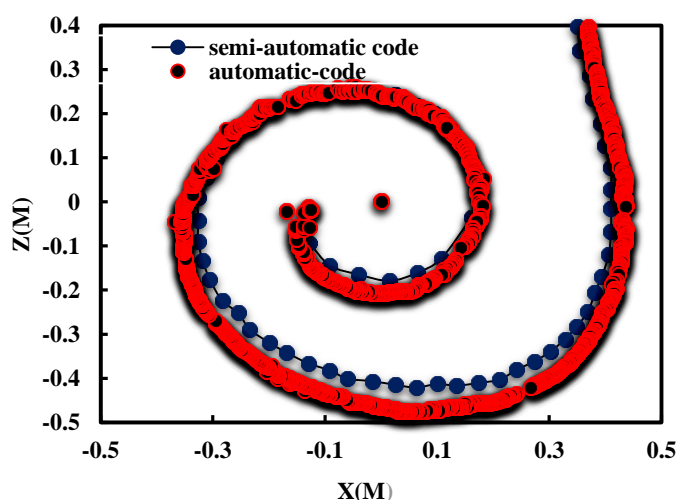
این بخش شامل نتایج کسر حجمی، توزیع سرعت، طول ته‌نشینی و پروفیل سطح آب هست (در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه).

کسر حجمی

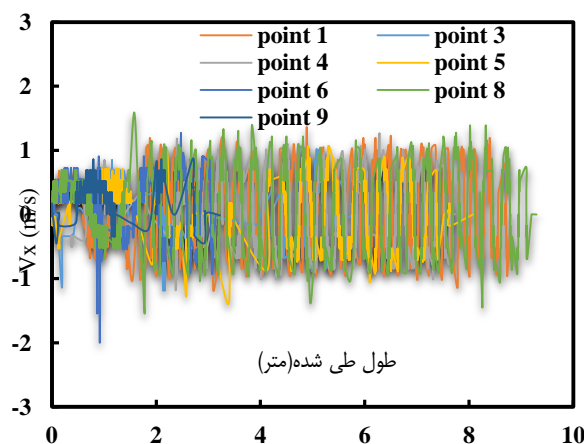
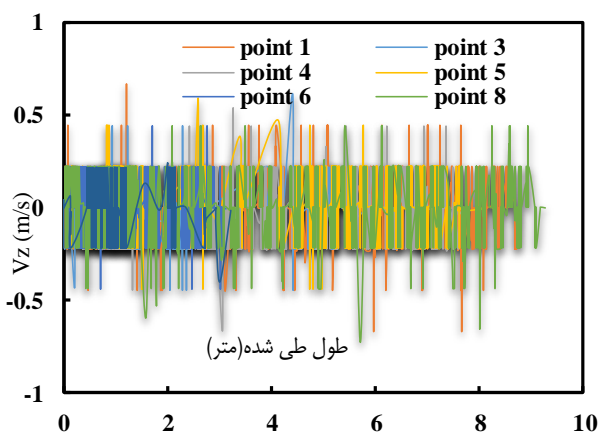
کسر حجمی عبارت است از نسبت جریانی که از روزنه‌ی مرکزی خارج می‌شود (Q_0) به جریان ورودی به کانال (Q_{in}) که در جدول ۱ برای دبی‌ها و هندسه‌های متفاوت حوضچه رسوب‌گیر گردابی ارائه شده است. در پژوهش حاضر، کسر حجمی نسبت به پژوهش (Athar et al., 2003) با هندسه‌ی مشابه، تا ۲۲ درصد افزایش یافته است این اختلاف به این دلیل است که در پژوهش ایشان جریان خروجی از روزنه توسط دریچه کنترل می‌شود. علاوه بر آن با توجه به جدول ۱ برای هر مدل با D/d مخصوص به خودش (D قطر حوضچه و d قطر روزنه‌ی مرکزی)، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دبی ورودی تا اندازه معینی به حوضچه، گردابه‌ی قوی‌تری با حجم هوای وسیع‌تری شکل گرفته که نتیجه‌ی آن خروج کمتر آب از روزنه‌ی مرکزی و به

راستای Z نیز، اتفاق می‌افتد. توزیع سرعت V_z مرتباً بین مقادیر متوسط حدودی $0/4$ و $-0/4$ تکرار می‌شود. از مقایسه‌ی توزیع (الف) و (ب) واضح است که ذره بیشتر در راستای افق نسبت به عمق جابه‌جایی داشته، به همین دلیل سرعتش در راستای افق بر سرعت عمودی‌اش غلبه می‌کند که با نتایج (Athar et al., 2003) مبنی بر این‌که مؤلفه‌ی عمودی سرعت فقط در نزدیکی روزنه‌ی مرکزی قابل توجه است همخوانی دارد و سرعت در راستای X به‌عنوان سرعت غالب در حوضچه معرفی می‌شود.

را در راستای X و Z توسط کد خودکار برای نقاط مختلف نشان می‌دهد. مشابه توزیع سرعت به‌دست‌آمده کد نیمه‌خودکار، توزیع سرعت این کد نیز مانند تابع متناوب سینوسی هست ولو با تعداد نقطه‌های بیشتر که حالت سینوسی بودن را بهتر نشان می‌دهد. در دوره‌های اولیه ذره با سرعت کم‌تری و در فاصله‌ی دورتری نسبت به گرداب در حال دوران هست با نزدیک شدن به گردابه سرعت ذره افزایش می‌یابد به‌بیان‌دیگر مقادیر اکسترمم سرعت در راستای X با نزدیک شدن به روزنه‌ی مرکزی به هم نزدیک می‌شود و این عمل در توزیع سرعت



شکل ۳. مسیر جریان از نمای بالا توسط دو برنامه‌ی خودکار و نیمه‌خودکار



شکل ۴- توزیع سرعت ذره برنامه‌ی خودکار: (الف) V_x (ب) V_z

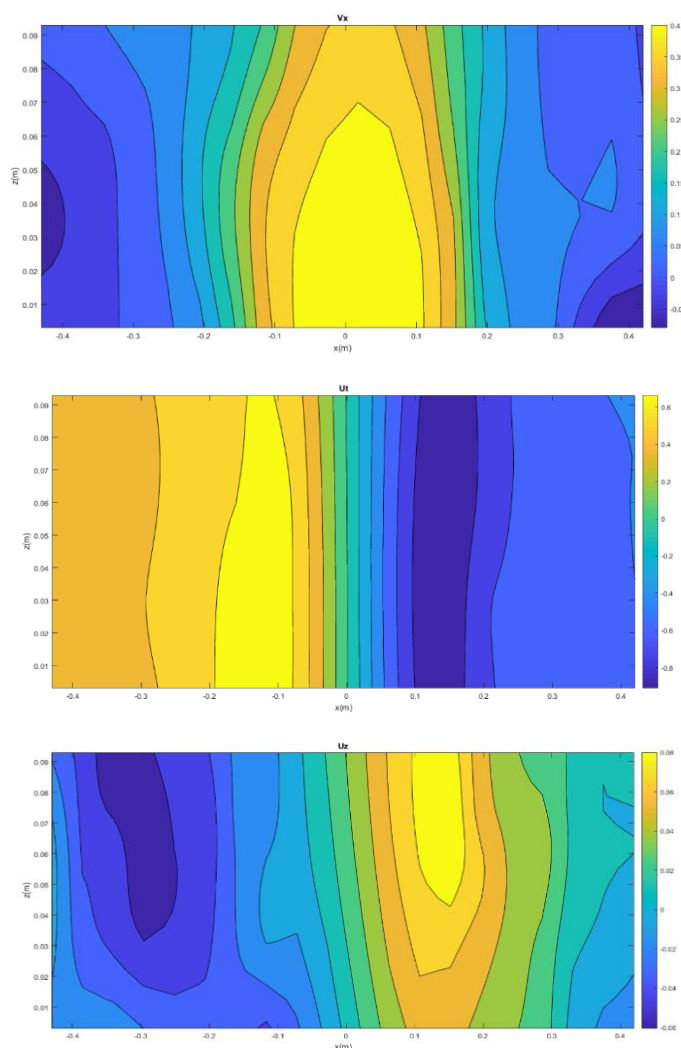
کارتزین نشان می‌دهد. در مقاطع 180° - (یعنی از زاویه 0 درجه تا زاویه‌ی 180 درجه)، $V_y=U_t$ و در 90° - 270° ، $V_x=U_t$ و $V_y=U_r$ هست. خطوط هم‌سرعت V_x نشان می‌دهد که از سمت دیواره به سمت روزنه‌ی مرکزی، قدر مطلق سرعت افزایش می‌یابد و قدر مطلق

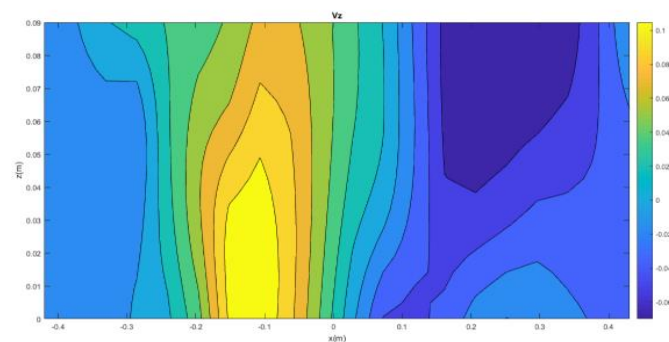
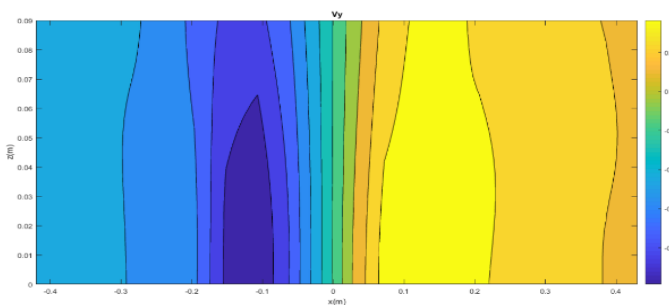
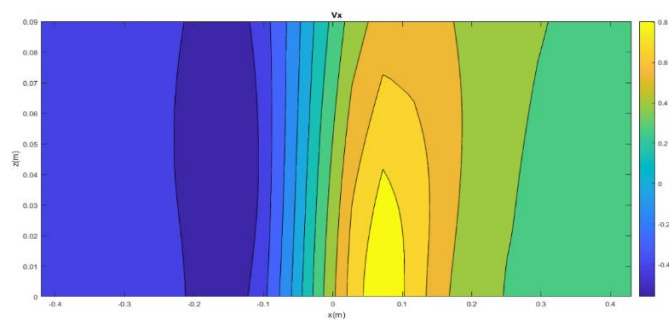
(ب) سرعت جریان (دستگاه ADV)

شکل ۵ خطوط هم‌سرعت سه مؤلفه‌ی سرعت جریان را برای دبی 14 لیتر بر ثانیه در تمامی مقاطع در صفحات افقی با ارتفاع مختلف ($0/03$ ، $0/03$ ، $0/06$ ، $0/09$ متر از کف حوضچه) در مختصات

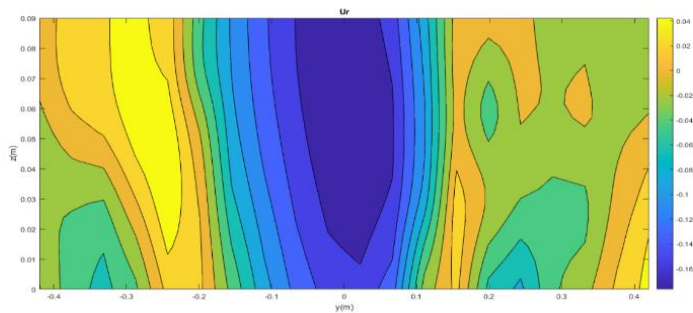
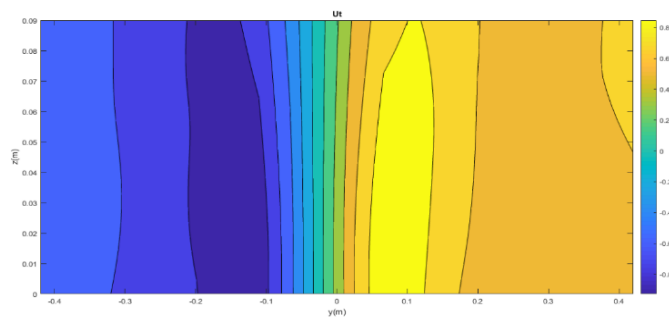
فاصله‌ی ۰/۱-۰/۱۸ از روزنه‌ی مرکزی اتفاق می‌افتد به بیان دیگر این مقدار اکسترمم مدام بین قسمت منفی و مثبت محور x و نزدیک به روزنه قرار می‌گیرد و باعث چرخش جریان داخل حوضچه می‌شود. بیشینه‌ی قدر مطلق سرعت محوری متعلق به زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه هست که ناحیه‌ای هست که ذره به سمت روزنه هدایت می‌شود (Nikou et al., 2021b). بیشینه‌ی سرعت محوری نیز به ترتیب در مقاطع ۳۱۵، ۱۸۰، ۹۰، ۴۵ درجه هست (بیشترین آن در ۴۵ درجه) که این مقاطع نزدیک به کانال خروجی هست.

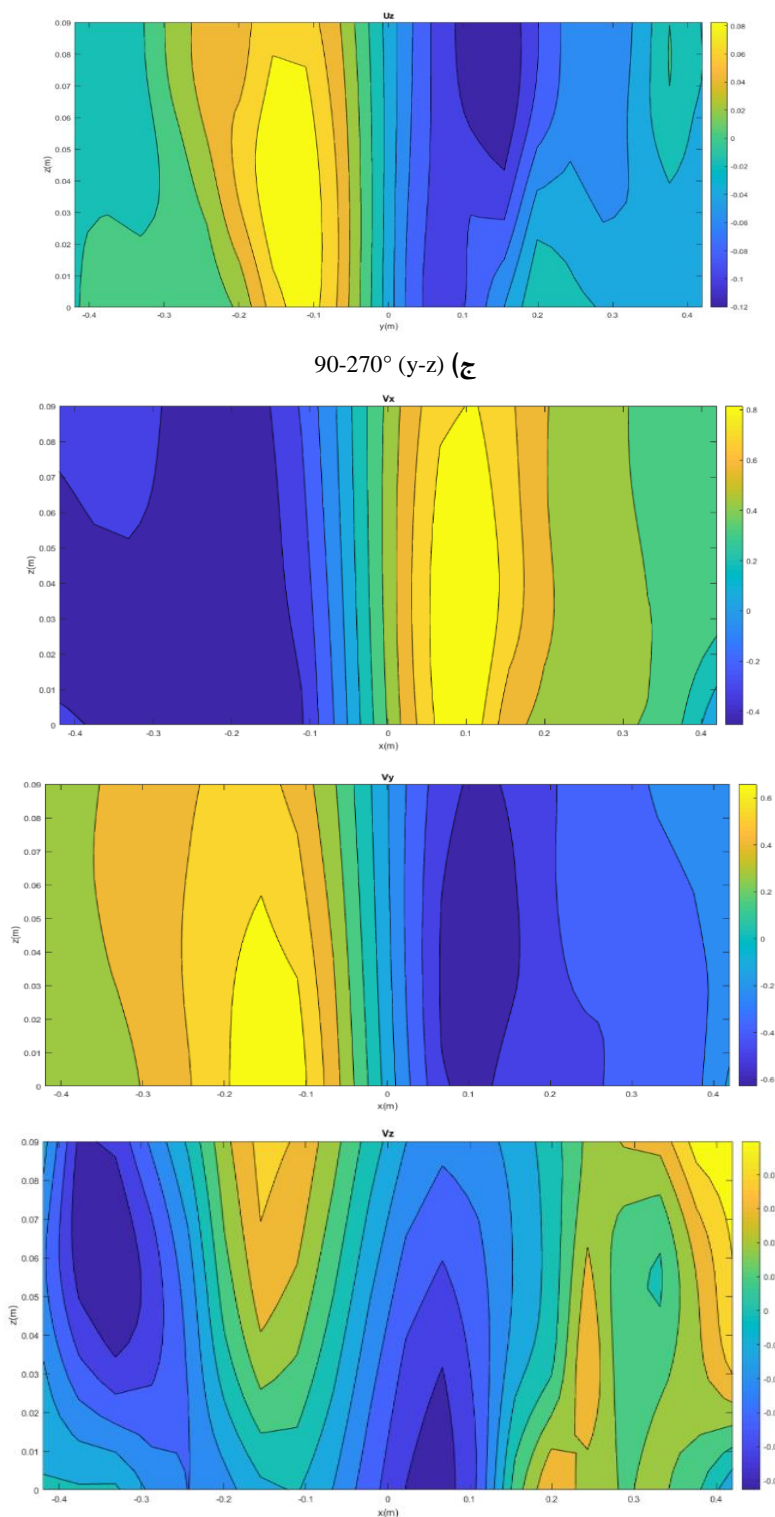
ماکزیم آن به ترتیب مقاطع افزایش می‌یابد برای مثال ماکزیم V_x مقطع $0-180^\circ$ درجه از بقیه مقاطع کم‌تر و ماکزیم V_x مقطع $315-135^\circ$ درجه از بقیه مقاطع بیشتر است. این مقدار در مقطع $0-180^\circ$ درجه در فاصله‌ی حدودی ۰/۱۲ تا ۰/۰۸ قرار دارد که به ترتیب مقاطع به سمت راست خطوط هم‌سرعت انتقال می‌یابد. بیشینه‌ی قدر مطلق V_y در زاویه‌ی ۴۵ درجه و بیشینه‌ی آن در زاویه-۱۳۵ درجه اتفاق می‌افتد که محل قرارگیری کانال ورودی و خروجی هست. با مقایسه‌ی U_t مقاطع $0-180^\circ$ و $90-270^\circ$ این نکته حائز اهمیت است که مقدار قدر مطلق بیشینه سرعت مماسی در مقطع $90-270^\circ$ در فاصله‌ی ۰/۱ تا ۰/۲ و در مقطع $0-180^\circ$ در

الف) $0-180^\circ (x-z)$



ب) $(x-z)$ $45-225^\circ$





(د) $135-315^\circ$ (x-z)

شکل ۵. خطوط هم‌سرعت سه مؤلفه‌ی سرعت جریان در مقاطع: الف) $0-180^\circ$ ، ب) $45-225^\circ$ ، ج) $90-270^\circ$ ، د) $135-315^\circ$

نزدیک بودن سرعت ذره به سرعت جریان (داده‌های دستگاه ADV) هست و فرض اینکه ذره سرعتی تقریباً معادل سرعت جریان را دارا

جدول ۲ نزدیک بودن مقادیر دو مؤلفه‌ی سرعت ذره و جریان را با وجود اختلاف دبی $0/3$ لیتر بر ثانیه، نشان می‌دهد که حاکی از

است را اثبات می‌کند.

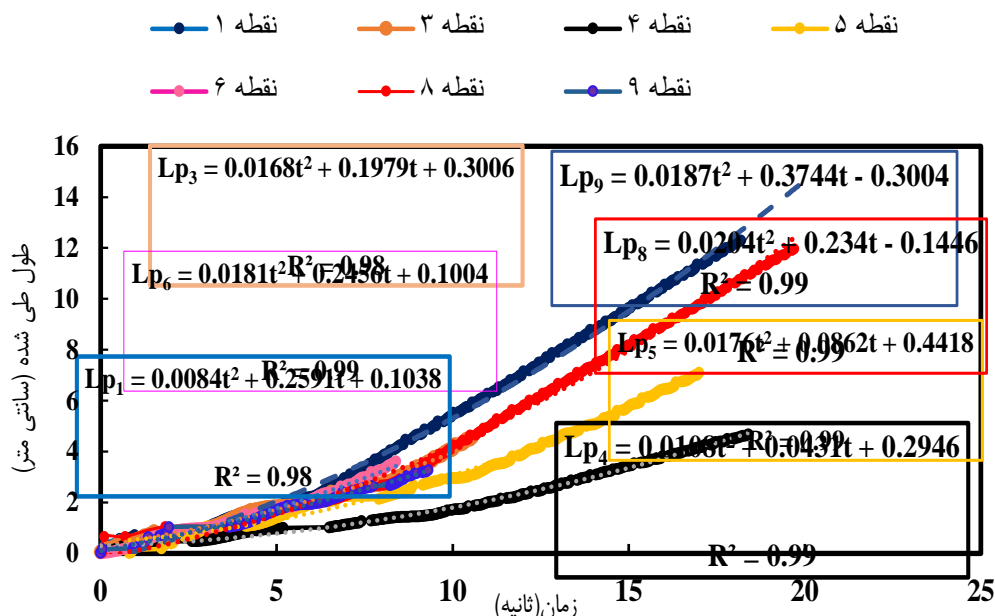
جدول ۲. مقایسه‌ی سرعت متوسط ذره با سرعت جریان

$V_x(m/s)$	$V_z(m/s)$	
۰/۵۰۵	۰/۰۴۳	متوسط سرعت ذره
۰/۷۳۱	۰/۰۴۵	متوسط سرعت جریان

طول ته‌نشینی

مهم‌ترین مزیت حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی که آن را از دیگر سازه‌های رسوب‌گیر متمایز می‌کند، حضور گردابه و مسیرهای مارپیچی هست که به واسطه‌ی آن ذرات مسیر و طول ته‌نشینی بیشتری از ابعاد حوضچه را طی می‌کنند. به عبارتی ذره می‌تواند

مسیرهای سقوط مارپیچی طولانی‌تری از قطر حوضچه را طی کند که این امر موجب افزایش راندمان بالای حوضچه برخلاف ابعاد کوچک‌تر آن نسبت به حوضچه‌های مستطیلی، می‌گردد. شکل ۶ طول طی شده ذره از نقاط مختلف رهاشدگی (برای حالت فاصله‌ی ۱/۵ متری تا حوضچه) تا روزنه‌ی مرکزی، نشان می‌دهد. نقاط ۲ و ۷ به دلیل این‌که ذره از کانال خروجی، خارج شده در بین نقاط ارائه نشده است. متوسط طول ته‌نشینی در بین مسیرهای ته‌نشینی شکل ۶، ۶/۷۷ و بیش‌ترین ۱۲/۲۹ سانتی‌متر هست. صعودی بودن نمودارهای این شکل حاکی از ارتباط مستقیم بین زمان ماند ذره و طول ته‌نشینی هست، که مقدار R^2 آن برای هر نمودار تعیین شده است.



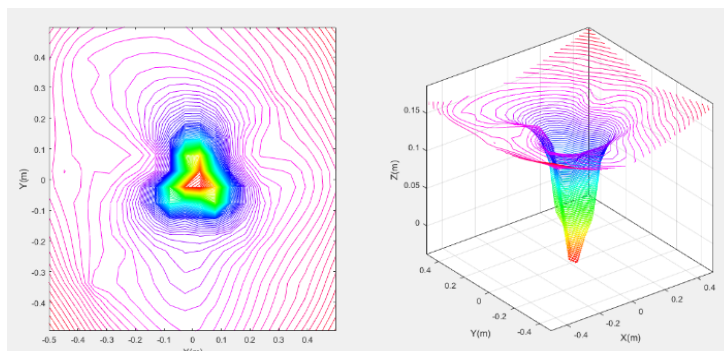
شکل ۶- طول طی شده ذره از نقطه‌های رهایی مختلف تا روزنه‌ی مرکزی

شاخص ریشه میانگین مربعات خط^۱ طبق جدول ۴ و هم‌چنین مقدار میانگین خطای نسبی^۲ پروفیل سطح آب به روش پردازش تصویر نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب مقدار ۰/۰۰۲ و ۱/۳۶٪ برآورد شده‌است و حاکی از آن است که داده‌های به‌دست‌آمده با تقریب خوبی نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

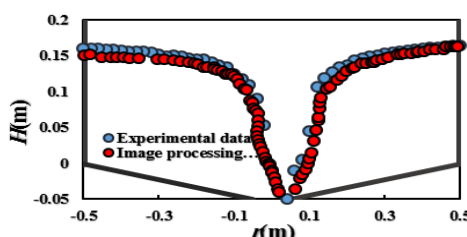
پروفیل سطح آب

شکل ۷ خطوط هم‌تراز آب دوبعدی و سه‌بعدی سطح آب پردازش تصویر را در چهار مقطع برای دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در همه‌ی مقاطع کانال ورودی و خروجی باعث منحرف شدن هسته-ی هوا از محور عمودی می‌شوند که مطابق با نتایج (Cecen and Bayazit, 2021; Nikou et al., 1975) هست. شکل ۸ پروفیل سطح آب داده‌های پردازش تصویر با داده‌های آزمایشگاهی در مقطع ۲۲۵°-۴۵ در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد و نیز مقدار

1. Root mean square error (RMSE)
2. Mean relative error (MRE)



شکل ۷- خطوط هم تراز آب سه بعدی و دوبعدی هسته‌ی هوا در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه



شکل ۸- مقایسه پروفیل سطح آب داده‌های پردازش تصویر با داده‌های آزمایشگاهی در مقطع ۲۲۵-۴۵ در دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه

جدول ۳- شاخص‌های نیکویی برازش

مقدار	پارامتر آماری
۰/۰۰۲۴	RMSE
۰/۰۰۱۷	MAD
۱/۳۶۸	MRE (%)

میانگین سرعت ذره با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و دقت این روش با شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در این مدل حوضچه رسوب‌گیر گردابی، روش ردیابی ذره به‌عنوان روشی با سرعت عمل بالا (خصوصاً در برنامه‌ی خودکار) و دقت نزدیک به داده‌های اندازه‌گیری مستقیم، برای مطالعه الگوی جریان و تعیین پروفیل سطح آب مفید هست.

منابع

مهربانی، الناز، ضیایی، علی‌نقی، شیخ رضازاده نیکو، ندا و گلزاریان، محمودرضا. ۱۴۰۱. بررسی الگوی حرکت ذره در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی مبتنی بر فن ردیابی ذره. نشریه‌ی علمی و پژوهشی هیدرولیک. دوره ۱۷، شماره ۴، ۱۵-۱.

Adrian, R. J. 2005. Twenty Years of particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 39(2), 159-169.

Athar, M., Kothiyari, U.C. and Garde, R.J. 2003. Distribution of sediment concentration in the vortex Chamber type sediment extractor.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الگوی حرکت ذره در حوضچه رسوب‌گیر گردابی با فن ردیابی ذرات به کمک برنامه‌نویسی در محیط MATLAB 2020 تحت عنوان برنامه‌ی خودکار بررسی شد. نتایج نشان داد که مشابه توزیع سرعت به‌دست‌آمده برنامه‌ی نیمه‌خودکار، توزیع سرعت این برنامه نیز مانند تابع متناوب سینوسی هست ولو با تعداد سرعت‌های بیشتر که حالت سینوسی بودن را بهتر نشان می‌دهد. در دوره‌های اولیه ذره با سرعت کم‌تری و در فاصله‌ی دورتری نسبت به گرداب در حال دوران هست با نزدیک شدن به گردابه سرعت ذره افزایش می‌یابد به‌بیان دیگر مقادیر اکسترمم سرعت در راستای x با نزدیک شدن به روزه‌ی مرکزی به هم نزدیک می‌شود و این عمل در توزیع سرعت راستای z نیز، اتفاق می‌افتد. این نکته حائز اهمیت است که ذره در منحنی‌های غیر بسته این دورها را طی می‌کند و علاوه بر حرکت دورانی‌اش، در جهت قائم و رو به پایین نیز حرکت می‌کند. متوسط طول ته‌نشینی در بین مسیرهای ته‌نشینی، ۶/۷۷ و بیش‌ترین ۱۲/۲۹ سانتی‌متر هست. پروفیل سطح آب و

- of Vortex Settling Basins Using Taguchi Method, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 148(2). 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001648.
- Li, L., Wang, P., Ma, Y. and Wu, Y. 2020. Reducing Sediment Deposition on Deflector in Vortex Settling Basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 146(10): 06020009.
- Mulligan, S., Casserly, J. Giovanni, D., and Sherlock, R. 2018. Understanding Turbulent Free Surface Vortex Flows using a Taylor-Couette flow analogy. *Scientific Reports*. 8: 824.
- Tauro, F., Piscopia, R. and Grimaldi, S. 2019. PTV-Stream: A simplified particle tracking velocimetry framework for stream surface flow monitoring. *Journal of Elsevier*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.009>.
- Wang, S. and Ohmura, N. 2017. Dynamical Particle Motions in Vortex Flows, in *Vortex Dynamics and Optical Vortices*, H. Perez-De-Tejada eds. 133–150, INTECH, Rijeka, Croatia .
- Journal of Hydraulic Research*. 41: 427-438. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221680309499987>.
- Athar, M. Athar, H. and Singh Saluja, I. 2018. Experimental study of flow field in geometric Type I vortex chamber at low water abstraction ratio. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. DOI: 10.1080/09715010.2018.1473813.
- Cecen, K. and Bayazit, M. 1975. Some laboratory studies of sediment controlling structures. *Proc. 9th Cong. ICID, Moscow, Soviet Union*, pp. 107-111.
- Keshavarzi, A.R. and Gheisi, A.R. 2006. Trap efficiency of vortex settling basin for exclusion of fine suspended particles in irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 55(4): 419-434.
- Nikou, S.R., Ziaei, A. N. and McDonough, J.M. 2021a. Numerical Modeling of Flow Field in Three Types of Vortex Settling Basins. DOI: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0001628.
- Nikou, S. R., Ziaei, A. N. and Dalir, M. 2021b. Study of Effective Parameters on Performance

Investigating Flow Pattern in Vortex Settling Basin based on the Automatic Particle Tracking algorithm

E. mehrabani¹, A. ziaei², N. sheikh reza zadeh nikou³, M.R. golzarian⁴

Received: Jan.19, 2023

Accepted: Apr.27, 2023

Abstract

The vortex settling basin, which includes a cylindrical chamber and a central orifice in its bottom, the inlet and outlet channel, is used with the purpose of separating particles from water flow, the present research is done by image processing technique. The study of particle movement in the field of vortex flow in a laboratory model of settling basin was done. The particle velocity distribution, particle detention time, and settling length were calculated using the particle tracking technique by an automatic code. Also, the abstraction ratio, particle flow path and water surface profile were measured, identified and drawn, and also to determine the tangential, radial and axial velocities flow inside basin by Nortek 21 MHz Micro-ADV three-dimensional magnetic speedometer. The results showed that similar to the velocity distribution obtained by the semi-automatic code, the velocity distribution of the automatic code in the vortex basin is in the form of a sinusoidal function and there is a good match between the water surface profile obtained from direct measurement and the profile obtained from image processing, so that the average relative error is 1.36%. The values of particle and flow velocity (ADV device data) are close to each other, which proves the hypothesis of equality of particle velocity and flow velocity.

Keywords: Particle Tracer, PTV, Settling length, Velocity Distribution, Vortex

1- Ph.D student in Water Structures, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

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

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

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

(* - Corresponding Author Email: an-ziaei@um.ac.ir)