

# مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی میدان جریان در حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی

ندا شیخ رضازاده نیکو (دانشجوی دکتری)

علی نقی ضیائی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۵۱-۳۳-۲ شماره ۲، ص. ۴/۲)

حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی، نوع کارآمدی از سیستم‌های رسوب‌گیر مداوم در تصفیه‌ی آب و فاضلاب است. در پژوهش حاضر، راندمان جریان در حوضچه‌ی رسوب‌گیر تعیین و سرعت سه‌بعدی درون حوضچه با استفاده از ADV اندازه‌گیری شد؛ خطوط جریان در مقاطع مختلف حوضچه (در زوایای:  $315^\circ$ ،  $270^\circ$ ،  $225^\circ$ ،  $180^\circ$ ،  $135^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $0^\circ$ ) ترسیم و آثار شکل‌گیری گردابه در راندمان جریان با بررسی مؤلفه‌های سرعت شعاعی، محوری و مماسی اندازه‌گیری و اهمیت شکل‌گیری جریان‌های ثانویه در شست و شو و هدایت ذرات به سمت روزنه‌ی مرکزی بررسی شد. مدل‌سازی عددی با کاربرد روش RANS شامل مدل‌های:  $k - \epsilon$  standard و  $k - \omega$  و روش LES شامل مدل Smagorinsky انجام شد. الگوریتم SIMPLE برای جفت کردن سرعت - فشار و روش حجم سیال (VOF) برای مسیر حرکت سطح آزاد استفاده شد. تطابق مناسبی میان شبیه‌سازی‌های عددی و مقادیر مشاهداتی به دست آمد و نتایج مدل Smagorinsky نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر بود. همچنین خطای نسبی مدل کمتر از  $0.05\%$  بود.

واژگان کلیدی: مدل آزمایشگاهی، مدل‌های تلاطمی، سطح آزاد، کسر حجمی، جریان ثانویه.

## ۱. مقدمه

جداسازی ذرات رسوب همراه آب و فاضلاب همواره قسمتی از فرایند تصفیه در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب است. به دلیل این‌که رسوبات همراه آب، منجر به کاهش ظرفیت انتقال کانال‌ها، تجمع رسوب در شبکه و همچنین فرسایش لوله‌های انتقال آب یا پره‌های پمپ‌ها یا توربین‌ها می‌شود، لذا رسوب‌ها هر ساله باعث تحمیل هزینه‌هایی اعم از تعمیر یا تعویض قطعات فرسوده و تخلیه‌ی رسوب‌های به جا مانده در قسمت‌های مختلف شبکه‌ی آب‌رسانی می‌شوند. برای کاهش مشکلات مذکور استفاده از تأسیسات رسوب‌گیری همواره متداول بوده است. تأسیسات رسوب‌گیری به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند، که عبارت‌اند از: سیستم‌های رسوب‌گیر مداوم و متناوب<sup>۱</sup>. در سیستم‌های رسوب‌گیری مداوم، همیشه بخشی از جریان صرف تخلیه‌ی رسوب جدا شده از آب و انتقال آن می‌شود. در حالی که در رسوب‌گیری متناوب، رسوب‌ها در کف تأسیسات ذکر شده جمع می‌شوند و هر از چندگاهی، بهره‌برداری از رسوب‌گیرها قطع، رسوب‌ها تخلیه و دوباره بهره‌برداری آغاز می‌شود. لذا در سیستم‌های مذکور نیازی به قطع جریان نیست و آب‌گیری پیوسته میسر است. حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی<sup>۲</sup>، نوع بسیار کارآمدی از سیستم‌های رسوب‌گیر مداوم است، که با ابعاد کوچک‌تر از حوضچه‌های رسوب‌گیر مستطیلی، بازدهی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۱۸

DOI:10.24200/J30.2018.5511.2247

رسوب‌گیری بالایی دارد. هزینه‌ی ساخت یک حوضچه‌ی گردابی فقط بخش اندکی از هزینه‌ی ساخت یک حوضچه‌ی رسوب‌گیر مستطیلی (سیستم متناوب) با بازدهی رسوب‌گیری مشابه است.<sup>[۱]</sup> نمای شماتیک حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی در شکل ۱ الف مشاهده می‌شود. جریان داخل حوضچه با حرکت گردابی حول هسته‌ی مرکزی منجر به افزایش مسیر حرکت ذره می‌شود و زمان ماند ذره در حوضچه، افزایش می‌یابد و پس از مدتی ته‌نشین می‌شود. در حوضچه‌ی رسوب‌گیر، جریان به صورت مماسی وارد حوضچه‌ی استوانه‌ی بی‌شکلی با روزنه‌ی مرکزی در کف آن می‌شود. گردابه‌ی ترکیبی شکل گرفته با عنوان گردابه‌ی رانکین (ترکیبی از گردابه‌های آزاد و اجباری) در داخل حوضچه، منجر به حرکت ذرات رسوبی سنگین‌تر از آب به سمت پیرامون حوضچه می‌شود، که ناشی از اثر نیروی گریز از مرکز است. جریان‌های ثانویه، لایه‌های سیال نزدیک به کف حوضچه را به سمت روزنه‌ی مرکزی هدایت می‌کنند. از آن‌جایی که ذرات رسوبی همراه با جریان مسیر مارپیچی طی می‌کنند، طول ته‌نشینی طولانی‌تری نسبت به ابعاد حوضچه دارند. بنا بر نتایج انور (۱۹۶۹)،<sup>[۱]</sup> حرکت چرخشی منجر به گردابه‌ی رانکین، شامل: ۱) هسته‌ی گردابه‌ی اجباری در منطقه‌ی داخلی، در جایی است که در ناحیه‌ی مرکزی نسبتاً کوچکی (شعاعی معادل شعاع روزنه‌ی مرکزی) سیال به صورت جسم جامد می‌چرخد و ۲) گرداب آزاد در قسمت‌های بیرونی هسته، یعنی به صورت شعاعی به خارج از هسته‌ی گردابه‌ی اجباری گسترش می‌یابد.<sup>[۱]</sup> این

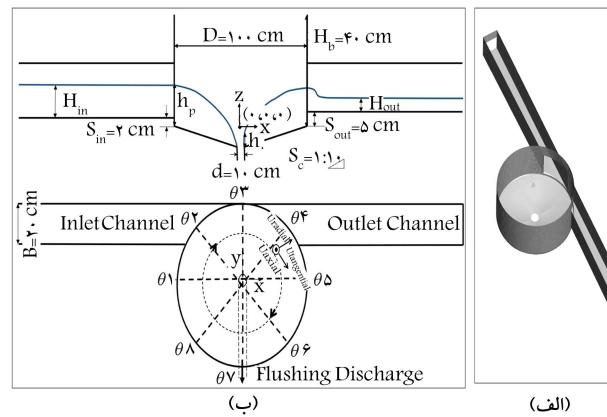
می‌آورد. این روش برای دو OB پیچیده در حوضچه‌ی ساده‌سازی شده برای دو حالت آرام و متلاطم تکمیل شده است.

جان و کانگ (۲۰۱۰)<sup>[۲۹]</sup> ضریب دبی خروجی از روزنه‌ی مرکزی واقع در کف حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی را با تغییر شعاع روزنه تعیین کردند. صناعی و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۱۷]</sup> نیز از تلفیق حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی با صفحات مستغرق به منظور یافتن موقعیت مناسب برای کارگذاری صفحات در کف حوضچه، آرایش‌های مختلفی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با کاهش فاصله‌ی شعاعی، قرارگیری صفحات از روزنه‌ی رسوبگذاری در کف افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله، صفحات با هدایت رسوب‌های کف به سمت روزنه‌ی تحتانی، باعث رسوب‌زدایی از کف می‌شوند. همچنین، نتایج حاکی از آن است که کارگذاری صفحات با ثابت نگه‌داشتن راندمان رسوب‌گیری کل و تلفات دبی توانسته است رسوب ته‌نشینی شده در کف را به سمت روزنه‌ی مرکزی هدایت و از حوضچه خارج کند.

همچنین انصار و اطهر (۲۰۱۳)<sup>[۳۰]</sup> با استفاده از روش شبکه‌ی عصبی و آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر، راندمان تله‌اندازی و راندمان تله‌اندازی رسوب در حوضچه‌ی گردابی را تعیین کردند. حاجی احمدی و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۳۱]</sup> نیز از صفحات مستغرق انحنادار در قطاع‌های ۴۵ درجه در کف حوضچه‌ی گردابی به منظور کنترل تجمع رسوب‌ها در کف حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی در هنگام رسوب‌گیری استفاده و اثر اندازه‌ی روزنه در کارایی صفحات مستغرق انحنادار را برای رسوب‌شویی کف حوضچه بررسی و نتیجه‌گیری کردند که عملکرد صفحات در رسوب‌زدایی از کف، ابتدا تحت تأثیر روزنه و سپس آرایش‌های قرارگیری صفحات است. همچنین مشخص شد که بهترین آرایش قرارگیری صفحات در کف باعث افزایش ۲۰٪ رسوب‌زدایی از کف می‌شود. چابک‌پور و همکاران<sup>[۳۲،۳۳]</sup> مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی نوعی از حوضچه‌ی رسوبگیر را که مشابه طراحی کشاورز و همکاران (۲۰۰۶)<sup>[۲۶]</sup> بود، انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی ایشان شامل خطوط جریان در مقاطع مختلف، کنتورهای سرعت و مسیر حرکت ذره بود. ایشان با استفاده از نرم‌افزار *FLOW 3D*<sup>[۳۳]</sup> و کاربرد مدل RNG، مؤلفه‌های سرعت، مؤلفه‌های تلاطمی و استهلاک را مطالعه کردند و مدل‌سازی عددی مذکور قادر به شبیه‌سازی درست مرکز هوا درون حوضچه نبود و جریان درون حوضچه مستغرق می‌شد، که به دلیل شبیه‌سازی نادرست گردابه‌ی درون حوضچه بود.

پیشگر و کشاورز (۲۰۱۷)<sup>[۱۸]</sup> نیز در بررسی اثر اتصال پیاپی دو حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی در راندمان جداسازی رسوبات نتیجه گرفتند که راندمان تله‌اندازی حوضچه‌ها با افزایش نسبت دبی افزایش و با افزایش دبی ورودی به سیستم کاهش می‌یابد. استفاده از حوضچه‌های پیاپی به جای تک حوضچه، میانگین راندمان را حدود ۱۵٪ افزایش می‌دهد و راندمان رسوب‌گیری حوضچه‌ها تا ۱۲ افزایش می‌یابد. از آنجایی که هیچ مدل‌سازی عددی با کاربرد مدل‌های LES<sup>۵</sup> (شبیه‌سازی‌ادی‌های بزرگ) بر روی VSB انجام نشده است، لذا سیکلون‌ها که دارای ساختار جریان و هندسه‌ی مشابه VSB هستند، مطالعه شدند، که شامل برخی مطالعات<sup>[۳۲-۳۴]</sup> هستند. نتایج پژوهش‌های اخیر حاکی از آن بود که برای شبیه‌سازی صحیح جریان درون سیکلون‌ها و همچنین اندرکنش میان دوفاز، شبیه‌سازی به روش LES نسبت به مدل‌های RANS به خصوص برای شکل‌گیری گردابه، برتری دارد.

در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان درون حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی پرداخته شده است. نسبت کسر حجمی (میزان جریان خروجی از حوضچه به کانال خروجی نسبت به کل جریان ورودی به آن) تعیین و با مطالعات پیشین ارزیابی شد. میدان جریان درون حوضچه با ADV اندازه‌گیری و سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری در ارتفاعات مختلف تعیین شد. خطوط جریان در ۸



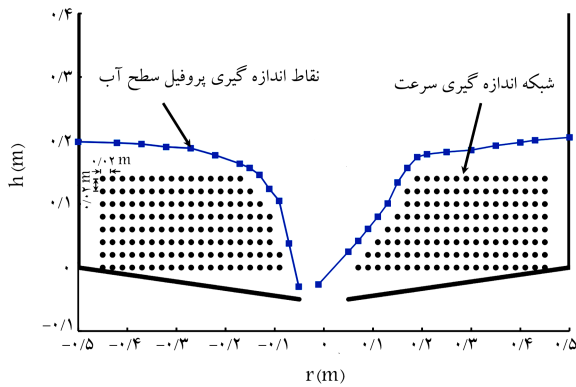
شکل ۱. الف) شمای پروفیل و حوضچه و ب) پلان بعدی حوضچه رسوبگیر.

ویژگی‌ها منجر به افزایش کارایی VSB نسبت به سایر مخازن ته‌نشینی معمول می‌شوند.

با بررسی مطالعات پیشین انجام شده بر روی حوضچه‌های رسوبگیر گردابی، مطالعات در ۳ بخش طبقه‌بندی شده‌اند. بخشی از مطالعات متمرکز بر بهبود راندمان جریان با تغییر در هندسه‌ی VSB بوده و استانداردهایی نیز در این زمینه ارائه شده است.<sup>[۱۸-۳۱]</sup> بخش دیگری از مطالعات نیز به بررسی تغییرات سرعت دوی بعدی و جریان‌های ثانویه درون حوضچه اختصاص داده شده است.<sup>[۲۳-۱۹، ۱۶، ۲۱]</sup> و راندمان تله‌اندازی رسوب نیز از موضوعات مورد بحث تعدادی از پژوهشگران بوده است.<sup>[۲۸-۲۳، ۱۵، ۸، ۶]</sup>

دانش ما از ساختار جریان درون حوضچه‌ی گردابی، مختص به راندمان جریان و تله‌اندازی رسوب بوده و تعداد اندکی نیز با مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی به بررسی هیدرودینامیک جریان درون حوضچه‌ی گردابی پرداخته‌اند. اطهر و همکاران<sup>[۱۵، ۲۷]</sup> راندمان برداشت رسوب ۳ هندسه‌ی مختلف از حوضچه‌ی رسوبگیر گردابی را تعیین و در مدل‌سازی عددی، از روش اختلاف محدود ضمنی نوع کرنک - نیکلسون برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر تغییر غلظت رسوب استفاده کردند. نتایج ایشان شامل تعیین معادلات تجربی سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری درون حوضچه با هدف مدل‌سازی رسوب بود، ولی هیچ‌گونه مطالعه‌ی هیدرودینامیکی، شامل: شکل گردابه، جهت خطوط جریان و تغییرات سرعت در ارتفاع انجام نشده است.

کشاورزی و غیثی (۲۰۰۶)<sup>[۲۶]</sup> رفتار جریان درون نوعی از حوضچه‌ی رسوبگیر را با اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری با ADV<sup>۳</sup> آنالیز و خطوط جریان را ترسیم کردند و دریافتند که در ناحیه‌ی ورودی حوضچه، بیشترین جریان‌های ثانویه در مقطع ۹۰ درجه شکل می‌گیرد، که تحت تأثیر کانال ورودی است. ضیائی و همکاران (۲۰۰۷)<sup>[۲۸]</sup> نیز جریان در یک حوضچه‌ی ساده‌سازی شده را مدل‌سازی عددی کردند و روش نوینی را برای اعمال شرایط مرزی در خروجی (OBs)<sup>۴</sup> حوضچه‌های مذکور ارائه دادند. مؤلفه‌ی قائم معادله‌ی مومنت در OBs حل و مؤلفه‌های مماسی گردابی فقط با حل معادله‌های انتقال گردابی در OBs تعیین و برای تعیین شرایط مرزی نیومن برای مؤلفه‌های سرعت مماسی استفاده شدند. روش ارائه شده، امکان حل سه بعدی معادلات NS غیرقابل تراکم در فرمول‌بندی متغیرهای اولیه را در نواحی با هندسه‌ی پیچیده بدون استفاده از هرگونه فرضیه‌ی غیرفیزیکی در خروجی‌ها میسر می‌سازد. OBs چندگانه، امکان شبیه‌سازی بدون نیاز الگوریتم مضاعف برای تفکیک شدت جریان ورودی در چند OB را فراهم



شکل ۳. محل اندازه‌گیری سرعت و عمق جریان.



شکل ۲. نمایی از مدل آزمایشگاهی حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla(\rho \mathbf{u}) = \nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}, \quad (\text{الف})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{ب}) \quad (1)$$

که در آن،  $u$  بردار سرعت  $(u, v, w)^T$ ، فشار،  $p$ ، چگالی سیال،  $\rho$  و ویسکوزیته سیال،  $F$  نیروی جسم و  $\nabla$  و  $\Delta$  عملگرهای گرادیان و لاپلاس هستند. در پژوهش حاضر، از کدهای ضیائی<sup>[۱]</sup> و ضیائی و همکاران<sup>[۲۸]</sup>، برای مدل‌سازی رفتار جریان در حوضچه‌ی گردابی با مدل‌های تلاطمی RANS استفاده شده است. همچنین کد مدل LES-Smagorinsky نیز به کد ضیائی<sup>[۱]</sup> اضافه و هر دو روش RANS و LES برای شبیه‌سازی رفتار جریان استفاده شده‌اند. هندسه‌ی حوضچه در Gambit تهیه و سپس در کد (زبان برنامه‌نویسی فورترن) فراخوانی شده است.

### ۱.۳. مدل $k - \varepsilon$ standard

در مدل  $k - \varepsilon$  standard، لزجت گردابی از رابطه‌ی ۲ تعیین می‌شود:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

که در آن،  $k$  انرژی کینماتیکی تلاطم،  $\varepsilon$  نرخ استهلاکی انرژی و  $C_\mu$  ثابت مدل است. معادلات انتقال برای  $k$  و  $\varepsilon$  به ترتیب از روابط ۳ (الف و ب) به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \Delta k + G - \rho \varepsilon \quad (\text{الف})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \Delta \varepsilon + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{ب}) \quad (3)$$

که در آن،  $\nabla \mathbf{u} : \nabla \mathbf{u} = (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) : \nabla \mathbf{u}$  تولید انرژی سینماتیکی تلاطمی و «:» بیانگر ضرب اسکالری تانسور هستند. ضرایب مدل بر طبق ویلکوکس<sup>[۲۳]</sup> عبارت‌اند از:

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

### ۲.۳. مدل $k - \omega$

در مدل  $k - \omega$ ، لزجت گردابی از رابطه‌ی ۴ تعیین می‌شود:

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4)$$

مقطع مختلف ترسیم و مسیر عبور جریان در داخل حوضچه نمایش داده شده است. همچنین، میدان جریان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس و کاربرد مدل‌های RANS (شامل:  $k - \varepsilon$  standard و  $k - \omega$ ) و مدل LES (شامل: Smagorinsky) مدل‌سازی و نتایج عددی آنها با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و دقت شبیه‌سازی‌های بررسی شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مهندسی آب دانشگاه فردوسی بر روی مدل آزمایشگاهی متشکل از کانال ورودی (به طول ۴ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر)، حوضچه‌ی گردابی (به قطر ۱ متر و ارتفاع ۰/۴ متر با شیب کف ۱:۱۰ به سمت روزنه‌ی مرکزی و قطر روزنه‌ی ۰/۱ متر) و کانال خروجی (به طول ۳ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر) است (شکل ۱ ب و شکل ۲). شدت جریان ورودی به کانال در محدوده‌ی ۸-۲۲ لیتر در ثانیه برای مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی در نظر گرفته شد. ابعاد حوضچه بر مبنای مدل آزمایشگاهی اطهر و همکاران (۲۰۰۲)<sup>[۱۵]</sup> است، که در مطالعات پل و همکاران (۱۹۹۱)<sup>[۱۳]</sup> نیز ارائه شده است. دقت عمق‌سنج دستی با دقت به منظور اندازه‌گیری پروفیل سطح آب  $\pm 0.1$  میلی‌متر بود. شدت جریان حجمی با استفاده از سرریز مستطیلی در انتها اندازه‌گیری شد. برای تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری درون حوضچه از سرعت‌سنج مغناطیسی سه بعدی Nortek  $21 \text{ MHz Micro-ADV}$  در شرایط آب زلال استفاده شد. سرعت‌ها در ۸ مقطع با زوایای مختلف ( $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 90^\circ$ ، به  $\theta_4 = 135^\circ, \theta_5 = 180^\circ, \theta_6 = 225^\circ, \theta_7 = 270^\circ, \theta_8 = 315^\circ$ ) در فواصل ۰/۲ متر از کف اندازه‌گیری شدند. در هر ارتفاع، سرعت در ۱۴۰ نقطه در راستای شعاعی اندازه‌گیری شد (شکل ۱ ب و شکل ۳). به دلیل محدودیت اندازه‌گیری‌ها در نزدیکی روزنه (شکل‌گیری هسته‌ی هوا) دیواره (محل ADV) و سطح آب (نبود میله‌ی اندازه‌گیری رو به پایین)، سرعت در منطقه‌ی نزدیک به روزنه و دیواره‌ی حوضچه اندازه‌گیری نشده است.

## ۳. معادلات حرکت و اجرای مدل عددی

به منظور شبیه‌سازی جریان در حوضچه، معادلات ناویر-استوکس (رابطه‌ی ۱: الف و ب) با کاربرد مدل‌های تلاطمی RANS شامل  $k - \varepsilon$  standard<sup>[۲۳]</sup> و  $k - \omega$ <sup>[۲۳]</sup> و مدل تلاطمی LES شامل Smagorinsky<sup>[۲۴]</sup> حل شدند.

که در آن،  $k$  انرژی سینماتیکی تلاطم،  $\omega$  نرخ استهلاك انرژی ویژه (نسبت نرخ استهلاكی در واحد انرژی سینماتیکی تلاطمی) هستند. معادلات انتقال برای  $k$  و  $\omega$  به ترتیب از روابط ۵ (الف و ب) به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}k) = (\mu + \sigma\mu_T)\Delta k + G - \beta\rho k\omega \quad (\text{الف})$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{u}\omega) = (\mu + \sigma\mu_T)\Delta\omega + \alpha\frac{\omega}{k}G - \beta\rho\omega^2 \quad (\text{ب})$$

که در آن، ضرایب معادله برابرند با:

$$\alpha = 5/9, \beta = 3/40, \beta^* = 0/09, \sigma = 0/5, \sigma^* = 0/5$$

### ۳.۳. مدل تلاطمی Smagorinsky

با فیلترگیری از معادله‌ی مومنتم (۱ - الف)، رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$(\tilde{U})_t + \nabla(\tilde{U}\tilde{U}) = \nabla(\tilde{P}) + \nu\Delta(\tilde{U})\nabla \cdot \tau_{SGS} \quad (6)$$

که در آن،  $\tau_{SGS}$  تنش SGS در روش LES است و از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود. معادله‌ی ۶، برای مقیاس بزرگ - مقیاس (قابل حل) LES است.

$$\tau_{SGS,ij} = -2\nu_{SGS}\tilde{S}_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad i \neq j \quad (7)$$

که در آن،  $\nu_{SGS}$  و  $\tilde{S}_{ij}$  از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آیند:

$$\nu_{SGS} = l^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}) \quad (9)$$

مقدار پارامتر  $l$  در رابطه‌ی ۸ از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$l = C_s\Delta \quad (10)$$

در روابط اخیر،  $\tilde{S}$  تانسور نرخ کششی بزرگ مقیاس،  $\nu_{SGS}$  ادی ویسکوزیته‌ی به دست آمده از فرمول طول اختلاط،  $l$  مقیاس طولی،  $\Delta$  پهنای فیلترگیری (متناسب با فاصله‌ی شبکه‌ی محاسباتی) و  $C_s$  ثابت مدل Smagorinsky هستند. به دلیل محدودیت مدل Smagorinsky در نزدیکی دیوار، تابع استهلاكی مانند  $f(z^+)$  توسط پیوملی و همکاران در کتاب رودی و همکاران، [۲۳] در طول اختلاط مدل RANS ارائه شده است (رابطه‌ی ۱۱):

$$l = C_s\Delta \cdot f(z^+) \quad (11)$$

که در آن  $f(z^+)$  از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید.

$$f(z^+) = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{z^+}{A^+}}\right)^3} \quad (12)$$

که در آن،  $z^+ = \frac{z u_{\tau}}{\nu}$  فاصله‌ی عمودی بدون بعد از دیوار،  $z$  فاصله از دیوار و  $A^+$  ثابت تجربی ( $A^+ = 2/5$ ) هستند.

### ۴.۳. شرایط مرزی

شرط مرزی در ورودی کانال، دیوارها و خروجی‌ها (کانال خروجی و روزنه‌ی مرکزی)، به ترتیب سرعت ورودی، شرط عدم لغزش برای مرزهای جامد و شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که جریان مورد بررسی در کانال روباز است و با سیال هوا در ارتباط است، کلیه‌ی شرایط مرزی و جبهه بالای کانال، شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی به صورت دو فازی (آب و هوا) انجام و از VOF برای شبیه‌سازی سطح آب استفاده شد.

### ۵.۳. گسسته‌سازی معادلات و روش حل

گسسته‌سازی میدان جریان، در مختصات انحنادار انجام شده است، که بر طبق گسسته‌سازی هی<sup>۷</sup> و همکاران، [۲۵] است و در رساله‌ی ضیائی (۲۰۰۷)، [۲۸] ارائه شده است. الگوریتم SIMPLE برای جفت کردن سرعت - فشار همراه با طرح Power-law برای گسسته‌سازی معادله‌ی مومنتم استفاده شده است. همچنین، روش حجم سیال (VOF) برای مسیر حرکت سطح آزاد در نظر گرفته شده است.

### ۴. نتایج

در بخش حاضر، نتایج شبیه‌سازی دبی‌های مختلف (۸-۲۲ لیتر در ثانیه) ارائه و مقادیر کسر حجمی تعیین و با مطالعات پیشین مقایسه شده است. سپس، تغییر سرعت در ارتفاعات مختلف از کف حوضچه تا نزدیکی سطح آب و همچنین خطوط جریان ترسیم و جریان‌های ثانویه بررسی شده‌اند. در بخش دوم، نیز به مدل‌سازی نتایج عددی مدل‌های  $k-\omega$ ،  $k-\varepsilon$  و Smagorinsky پرداخته و ضمن ارزیابی نتایج آزمایشگاهی، بهترین مدل برای شبیه‌سازی جریان در حوضچه تعیین شده است.

### ۱.۴. نتایج آزمایشگاهی

#### ۱.۱.۴. نسبت کسر حجمی

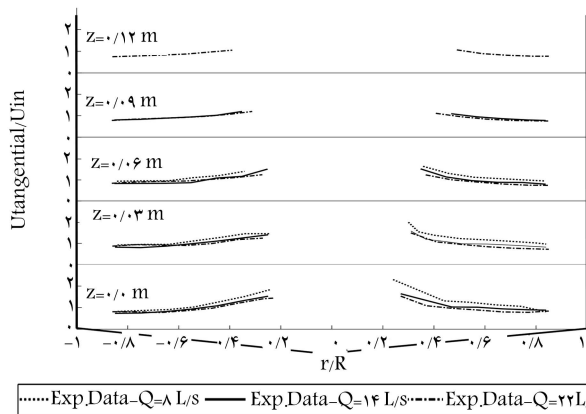
نسبت کسر حجمی به صورت نسبت دبی خروجی از روزنه به دبی ورودی ( $Q_o/Q_{in}$ ) است، که برای دبی‌های مختلف در جدول ۱ تعیین شده است. نتایج نشان داده است که برای  $D/d \geq 17$ ، نسبت کسر حجمی در محدوده‌ی ۲۲-۳ درصد است. به دلیل رابطه‌ی معکوس میان  $D/d$  و  $Q_o/Q_{in}$ ، کسر حجمی  $10\%$   $D/d =$  در مطالعه‌ی کنونی تا  $25\%$  بوده است، که اندکی بیش از مقادیر اطهر و همکاران (۲۰۰۲)، [۱۵] است. با این حال، کسر حجمی به دبی ورودی به حوضچه، وابسته و برای دبی ۲۲ لیتر در ثانیه در حدود  $12.68\%$  بوده است.

### ۲.۴. مؤلفه‌های سرعت

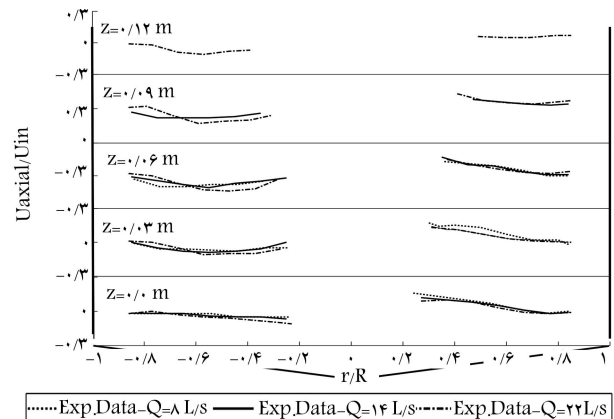
بردارهای سرعت در حوضچه، بر اساس هندسه‌ی شکل ۱ با مؤلفه‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری بیان شده‌اند. سرعت محوری اثر مهمی در ته‌نشینی ذرات رسوبی به سمت روزنه‌ی مرکزی دارد. سرعت مماسی منجر به چرخش جریان حول محور حوضچه می‌شود و مسیر حرکت جریان را افزایش می‌دهد و نقش مهمی در تسهیل ته‌نشینی ذره دارد. [۲۰] سرعت شعاعی نیز باعث شکل‌گیری جریان‌های ثانویه و هدایت ذرات رسوبی به کف حوضچه و سپس به سمت روزنه‌ی خروجی می‌شود.

جدول ۱. نسبت کسر حجمی مطالعات پیشین به مطالعه کنونی.

پژوهشگران	$Q_{in} (L/s)$	$Q_o (L/s)$	$D/d$	$Q_o/Q_{in}\%$
Curi et al. (۱۹۷۵)	۴,۴۶-۱۲,۱۳	۰,۲۲-۱,۱	۱۷-۷۰	۳,۲-۲۱,۰۸
Mashauri (۱۹۸۶)	۶,۸-۱۷	۰,۱۵-۱,۰۹	۲۵-۳۳,۳۳	۵,۵۹-۱۶
Mashauri (۱۹۸۶)	۲,۴۲-۳,۵	۰,۱۵-۰,۱۸	۲۵,۵۰	۳,۹-۶,۶
Mashauri (۱۹۸۶)	۲,۴۲-۳,۶	۰,۱۵-۰,۱۸	۱۸-۶۰	۳,۳-۱۶,۹
Paul et al. (۱۹۸۸)	۶۲,۵-۱۶۰	۱۱,۸۷-۲۰	۲۸,۳	۸-۱۹
Athar et al. (۲۰۰۲)	۸-۲۲	۰,۵۸۹-۲,۹	۱۰	۷,۲-۱۷,۳
Present study	۸-۲۲	۲,۱-۴,۰۷	۱۰	۱۲,۶۸-۲۴,۶۸



شکل ۳. تغییرات سرعت مماسی بی بعد برای ارتفاعات مختلف ۰, ۳, ۰۶, ۰۹ و ۱۲ متر در مقاطع ۰ و ۱۸۰ درجه.



شکل ۴. تغییر سرعت محوری بی بعد در ارتفاعات مختلف ۰, ۳, ۰۶, ۰۹ و ۱۲ متر در مقاطع ۰ و ۱۸۰ درجه.

شده است. به علاوه، سرعت مماسی بی بعد با افزایش ارتفاع از کف حوضچه نیز کاهش یافته است. در ارتفاعات پایین تر، در نزدیکی روزنه (دور از هسته ی هوا) سرعت مماسی بیش از ۲ برابر سرعت ورودی و در ارتفاعات بالاتر، تقریباً مساوی سرعت ورودی بوده است. سرعت مماسی بیشینه در مقاطع ۰, ۳, ۰۶ و ۰۹ و ۱۲ متر به کف است، که دور از کانال ورودی و خروجی است. همچنین، در کلیه ارتفاعات، سرعت مماسی نزدیک به هسته ی هوا بیشینه است و محل شکل گیری گردابه اجباری است.

#### ۳.۲.۴. سرعت شعاعی

سرعت شعاعی بی بعد (نسبت سرعت شعاعی در حوضچه به سرعت در کانال ورودی) در مقطع ۰ و ۱۸۰ درجه برای کلیه دبی های مورد آزمایش بررسی شده در شکل ۶ است (روند تغییرات در سایر مقاطع تقریباً مشابه مقاطع ۰ و ۱۸۰ بوده است). برای دبی های ورودی بالاتر، سرعت شعاعی نیز بیشتر بوده است، در حالی که بیشتر نمودارهای بی بعد سرعت شعاعی بر هم منطبق بودند. بیشینه سرعت شعاعی در مقاطع ۰, ۱, ۳, ۵, ۷ و ۹ در نزدیکی روزنه ملاحظه شدند، که دور از قوس ها بودند. با افزایش ارتفاع از کف، سرعت شعاعی کاهش یافته و نشان داده شده است که بیشترین اثر سرعت شعاعی در ارتفاعات پایین تر است، که منجر به هدایت ذرات به سمت روزنه شده است.

#### ۳.۳. جریان های ثانویه

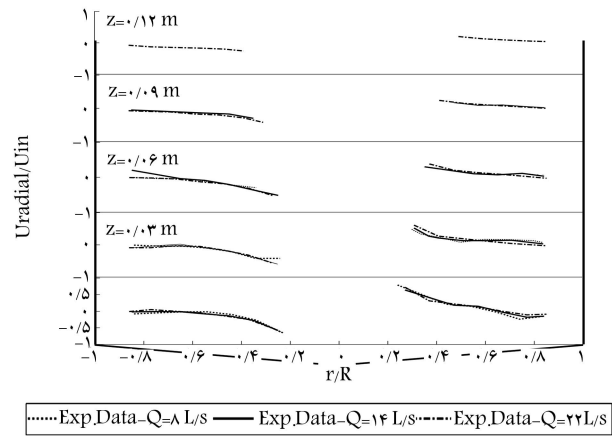
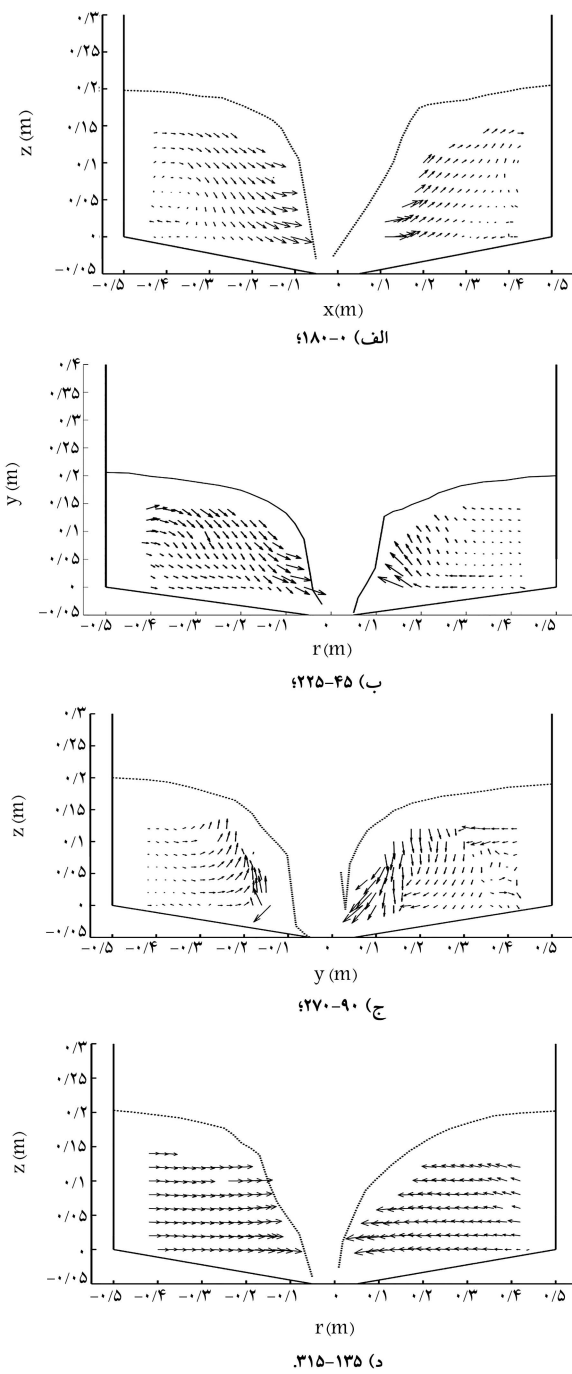
جریان ثانویه در حوضچه در نتیجه ی (۱) کاهش شتاب در لایه های مختلف سیال به دلیل اصطکاک کف حوضچه و (۲) جریان عرضی ناشی از سرعت شعاعی

سرعت محوری بی بعد (نسبت سرعت محوری در حوضچه به سرعت در کانال ورودی) تقریباً برای هر ۳ شدت جریان مشابه بوده و نسبت به سرعت مماسی و شعاعی ناچیز است و بیشینه ی تغییرات، در نزدیکی روزنه اتفاق افتاده است (شکل ۴). رفتار جریان در مقاطع نزدیک به کانال های ورودی و خروجی تحت تأثیر کانال هاست و در مقطع صفر درجه (سمت چپ) با توجه به ورود جریان به حوضچه، جهت بردارها رو به پایین است و بنابراین مقدار سرعت محوری منفی است؛ در حالی که در مقطع ۱۸۰ درجه (سمت راست) نزدیک به کانال خروجی است و جریان به بیرون از کانال هدایت می شود و بنابراین مقادیر سرعت محوری مثبت است. بیشینه ی تغییرات سرعت محوری در مقطع ۱۳۵-۱۸۰ درجه (نزدیک به کانال خروجی) و مقطع ۲۲۵-۳۱۵ درجه رخ داده است. بیشینه ی قدرمطلق سرعت محوری در نزدیکی روزنه است، جایی که خطوط جریان به سمت حوضچه هدایت شده و همچنین مقطع ۹۰ بوده است، که مانع از ورود ذرات به کانال خروجی می شود.

#### ۲.۲.۴. سرعت مماسی

سرعت مماسی بی بعد (نسبت سرعت مماسی در حوضچه به سرعت در ورودی کانال) در شکل ۵ ترسیم شده است. با افزایش دبی ورودی، سرعت مماسی درون حوضچه افزایش یافته است، که در نتیجه ی افزایش نیروی سانتریفوژی داخل حوضچه بوده و منجر به تسهیل ته نشینی ذره شده است. [۳۹، ۴۶]

در حالی که سرعت مماسی بی بعد با افزایش دبی ورودی کاهش یافته است (شکل ۵)، بخش زیادی از جریان بدون چرخش، به سمت کانال خروجی هدایت



شکل ۶. تغییرات سرعت شعاعی بی بعد برای ارتفاعات مختلف ۰، ۰۰۳، ۰۰۳، ۰ و ۰۰۹ متر در مقاطع ۰ و ۱۸۰ درجه.

است. [۵] در شکل ۷، خطوط جریان در مقاطع مختلف با توجه به سرعت‌های اندازه‌گیری شده ترسیم شده است. جهت خطوط جریان در مقاطع  $01 \leq \theta \leq 03$  و  $07 < \theta \leq 09$  به سمت روزنه‌ی مرکزی و در مقاطع  $03 < \theta \leq 05$  و  $07 < \theta \leq 09$  به سمت دیواره بوده است. جریان‌های ثانویه قوی در مقاطع عرضی شکل می‌گیرد، جایی‌که جهت جریان تغییر می‌کند ( $01 - 05$ ) و  $03 - 07$ ). این نتیجه نشان می‌دهد که جریان‌های ثانویه، نقش مهمی در ته‌نشینی ذرات رسوبی در مقاطع  $03 < \theta \leq 05$  و  $07 < \theta \leq 09$  دارند و در مقاطع  $01 \leq \theta \leq 03$  و  $05 < \theta \leq 07$  ذرات به سمت روزنه‌ی مرکزی هدایت می‌شوند. جهت خطوط جریان و شکل‌گیری گردابه تا حدی مشابه با نتایج کشاورزی و غیثی (۲۰۰۶) است، و علت اندک اختلاف مذکور، تفاوت اندک در هندسه‌ی حوضچه است.

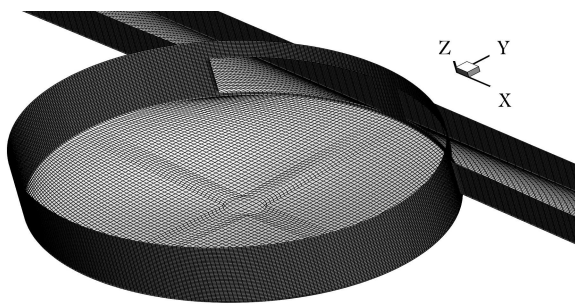
#### ۴.۴. نتایج مدل‌سازی عددی

##### ۴.۴.۱. واسنجی مدل و اعتبارسنجی مدل

میدان جریان حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی به صورت شبکه‌ی منظم یکنواخت، گسسته‌سازی شده است (شکل ۸). به منظور بررسی پایداری مدل، ۳ شبکه‌ی محاسباتی درشت (۴۶۳۳۶۰)، متوسط (۵۹۰۷۴۱) و ریز (۶۷۶۰۰۰) در نظر گرفته شدند. همچنین نمودار سرعت مماسی در ارتفاعات مختلف ۰، ۰۰۵ و ۰۰۱ متر از حوضچه و برای مقطع  $180^\circ - 0^\circ$  ترسیم شده است (شکل ۹). نتایج نشان داده است که جواب عددی به یک جواب واحد، هم‌گرا می‌شود. در نتیجه روش حل، پایدار است و به جواب مستقل از شبکه میل می‌کند. با این استدلال، کلیه‌ی شبیه‌سازی‌های با شبکه‌ی محاسباتی ریز انجام شده است.

برای بررسی صحت مدل‌سازی عددی، سرعت مماسی به دست آمده از مدل‌های تلاطمی مختلف، شامل  $k - \omega$ ،  $k - \epsilon$  و Smagorinsky با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی مقایسه شدند (شکل ۱۰). سرعت مماسی محاسبه شده با مدل‌های تلاطمی  $k - \omega$  و  $k - \epsilon$  روند مشابهی داشتند و از الگوی داده‌های آزمایشگاهی تبعیت نمی‌کردند. در حالی که مدل Smagorinsky، نتایج مشابه داده‌های آزمایشگاهی داشت، به خصوص در ناحیه‌ی گردابی اجباری، که شیب افزایش سرعت مماسی به سمت روزنه‌ی مرکزی بالا بود. همان‌طور که داده‌های آزمایشگاهی، شامل سرعت مماسی متوسط‌گیری شده هستند، اندکی تفاوت میان نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از ماهیت ناپایدار جریان درون حوضچه باشد.

شکل ۷. ترسیم خطوط جریان با داده‌های آزمایشگاهی برای مقاطع.



شکل ۸. نمایی از شبکه‌ی محاسباتی درون حوضچه.

حوضچه (سرعت مماسی، محوری و شعاعی) در ارتفاعات و فواصل شعاعی مشخص و اندازه‌گیری شدند، که در پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است. نتایج نشان داد که مشابه مطالعات پیشین، سرعت مماسی سرعت غالب درون حوضچه است و منجر به چرخش جریان درون حوضچه می‌شود و مسیر حرکت ذرات رسوبی درون حوضچه افزایش می‌یابد؛ در نتیجه زمان ماند جریان در حوضچه و نیز امکان ته‌نشینی و شست‌وشوی ذره به سمت روزنه‌ی مرکزی افزایش یافته است. همچنین سرعت مماسی منجر به شکل‌گیری جریان‌های ثانویه شده است، که ذرات را به سمت دیواره‌ها رانده و سپس به سمت روزنه هدایت کرده است. مقدار سرعت محوری نیز در بیشتر نقاط به جز در نزدیکی روزنه و مقاطع نزدیک به کانال‌های ورودی و خروجی حوضچه، نزدیک به صفر بوده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی ورودی، سرعت مماسی بی‌بعد کاهش می‌یابد، که به دلیل افزایش هدایت مستقیم جریان به سمت کانال خروجی بدون چرخش در حوضچه است. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی سرعت، خطوط جریان در مقاطع مختلف نیز ترسیم شده است. با توجه به این‌که جریان رسوب متأثر از سرعت درون حوضچه است، از این رو، نحوه‌ی شکل‌گیری گردابه در نواحی مختلف حوضچه و جهت حرکت جریان در مقاطع مختلف حوضچه، مکانیزم‌های مختلف تله‌اندازی رسوب، ته‌نشینی ذره و شست‌وشوی ذره را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

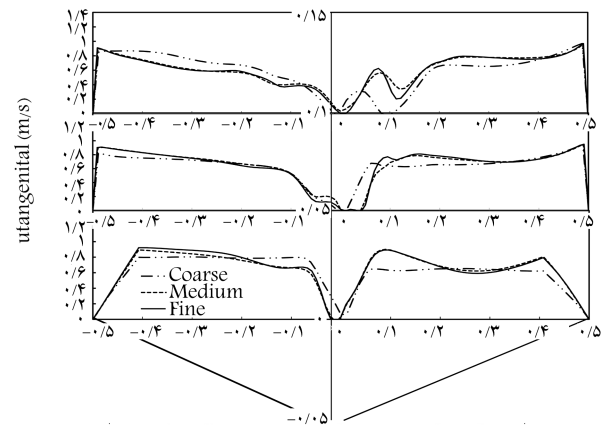
مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های تلاطمی RANS شامل مدل‌های  $k-\varepsilon$  standard و روش LES شامل مدل Smagorinsky برای مدل‌سازی جریان پیچیده درون حوضچه‌ی ته‌نشینی استفاده شدند. روش LES برای اولین بار جهت شبیه‌سازی رفتار جریان درون حوضچه‌ی رسوب‌گیر استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و برتری روش LES مدل Smagorinsky نسبت به مدل‌های تلاطمی RANS شامل مدل‌های  $k-\varepsilon$  standard و  $k-\omega$  ملاحظه شد. خطای نسبی مدل Smagorinsky برای نسبت کسر حجمی کمتر از ۰٫۵٪ بود. نتایج سرعت مماسی محاسبه شده و پروفیل سطح آب از مدل Smagorinsky به داده‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی نزدیک بود و به علاوه، ناحیه‌ی شکل‌گیری گردابه‌ی اجباری، در مدل به درستی شبیه‌سازی شده بود و روند آن، نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بود. نویسندگان نوشتار حاضر پیشنهاد می‌کنند که در پژوهش‌های آتی، از سایر مدل‌های تلاطمی LES جهت شبیه‌سازی جریان در حوضچه‌ی رسوب‌گیر استفاده شود.

## تشکر و قدردانی

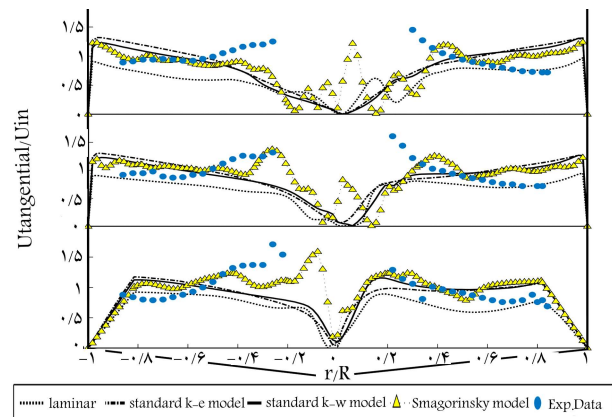
نویسندگان نوشتار حاضر کمال تشکر و قدردانی را از مرکز محاسبات سریع دانشگاه فردوسی مشهد، به ویژه کارشناس محترم مرکز خانم مهندس زینال پور، جهت همکاری و پشتیبانی در ارائه‌ی سیستم‌های محاسبات جهت شبیه‌سازی دارند.

## فهرست علائم

- $Q_{in}$ : دبی ورودی؛
- $Q_{out}$ : دبی کانال خروجی؛
- $Q_o$ : دبی عبوری از روزنه؛
- $U_t$ : سرعت مماسی؛



شکل ۹. مقایسه‌ی سرعت مماسی برای ۳ شبکه‌ی محاسباتی درشت، متوسط و ریز در مقطع ۰-۱۸۰ درجه در ارتفاعات ۰، ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ متر.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی سرعت مماسی محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی با داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقطع ۰-۱۸۰ درجه در ارتفاعات ۰، ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ متر.

جدول ۲. نسبت کسر حجمی مدل‌های تلاطمی مختلف.

RE%	$(Q_o/Q_{in})\%$	$Q_o$	$Q_{in}$	
-	۱۲٫۶۸	۲٫۷۵	۲۱٫۸	داده‌های آزمایشگاهی
۸٫۵	۲۰٫۰۹	۴٫۳۸	۲۱٫۸	laminar
۱۷٫۵	۲۷٫۷۹	۶٫۰۶	۲۱٫۸	$k-\varepsilon$ standard
۱۵٫۱	۲۵٫۷۸	۵٫۶۲	۲۱٫۸	$k-\omega$
-۰٫۵	۱۲٫۱۱	۲٫۶۴	۲۱٫۸	Smagorinsky

## ۲.۴.۴. نسبت کسر حجمی

نسبت کسر حجمی برای مدل‌های مختلف تلاطمی در جدول ۲ ارائه و با نتایج مقادیر آزمایشگاهی ارزیابی شده است. نتایج مدل Smagorinsky بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و نسبت به سایر مدل‌ها برتری داشته است و خطای نسبی آن برای تمام دبی‌ها کمتر از ۰٫۵٪ بوده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار جریان بدون رسوب درون حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی پرداخته شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک انجام و رفتار جریان درون حوضچه‌ی رسوب‌گیر گردابی بررسی شده‌اند. مقادیر سه‌بعدی سرعت درون



- $u_r$ : سرعت شعاعی؛  
 $u_z$ : سرعت محوری؛  
 $H_{in}$ : عمق آب در کانال ورودی؛  
 $H$ : عمق آب در حوضچه؛  
 $B$ : عرض کانال ورودی و کانال خروجی؛  
 $S_c$ : شیب کف حوضچه؛  
 $r_o$ : شعاع روزنه؛  
 $R$ : شعاع حوضچه؛  
 $y$ : فاصله از کف حوضچه؛  
 $Y_b$ : ارتفاع حوضچه.

## پانوشتها

1. intermittent
2. vortex settling basin (VSB)
3. acoustic doppler velocimetry
4. open boundaries
5. large eddy simulation
6. curvilinear coordinate system
7. He

## منابع (References)

1. Ziaei, AN. "Generalized three-dimensional curvilinear numerical modeling of laminar and turbulent free-surface flows in a vortex settling basin", PhD Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran (2007).
2. Anwar, H.O. "Turbulent flow in a vortex", *J. Hydraul. Res.*, **7**, pp. 1-29(1969).
3. Sullivan, R.H. "The swirl concentrator as a combined sewer over-flow regulatory facility", Report No: EPA-R2-72-008, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. (1972).
4. Smisson, B.S. "Design, construction and performance of vortex overflows. Proc Symposium on Storm Sewage Overflows", *Institution of Civil Engineers, London, England*, pp. 99 (1967).
5. Salakho, F.S. "Rational designs and methods of hydraulic calculations of load-controlling water intake structures for mountain rivers", in *Proc. 9th Congr. ICID, Moscow, Soviet Union*, pp. 151-161 (1975).
6. Curi, K.V. E sen II and Velioglu SG. "Vortex type solid liquid separator", *Progress Water Technol*, **7**, pp. 183-190 (1979).
7. Paul, T.C. "Circulation chamber sediment extractor", Report OD 58, *Hydraulics* (1983).
8. cecen, K. and Bayazit, M. "Some laboratory studies of sediment controlling structures", *Proc. 9th Cong. ICID, Moscow, Soviet Union*, pp. 107-111 (1975).
9. Chrysostomou, V. "Vortex-type settling basin", Thesis Presented To The University of Southampton, At Southampton, England, In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Master Of Science (1983).
10. Ogihara, H. and Sakaguchi, S. "New system to separate the sediments from the water flow by using the rotating flow", in *Proc. Of the Asian and Pacific Division, IAHR, Chiang Mai, Thailand*, pp. 753-766 (1984).
11. Paul, T.C. "Designing circulation chamber sediment extractor", in Report No. OD 91, *Hydraulic Research Limited*, Wallingford, UK (1988).
12. Paul, T.C. and Dhillon, G.S.X. "Analytical models for free-surface flow air-core vortex", *In press with Indian Journal of Power and River Valley Development* (1983).
13. Paul, T.C., Sayal, S.K., Sakhanja, V.S. and et al. "Vortex settling chamber design considerations", *In Journal of Hydraulic Engineering*, **117**(2), pp. 172-189 (1991).
14. Ziaei, A.N. "Study on the efficiency of vortex settling basin (VSB) by modeling", *In MSc dissertation, Shiraz University, Shiraz, Iran* (2000).
15. Athar, M., Kothiyari, U.C. and Garde, R.J. "Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor", *J. Hydraul. Eng*, **128**, pp. 1051-1059 (2002).
16. Nguyen, Q.T. "Effect of deflectors on removal efficiency of a deep-depth vortex chamber sediment extractor", *12th conference on science & technology, Hochi Minh, Vietnamese* (2011).
17. Saneie, M., Asefi, M. and Smaeeli, K. "Experimental studies on increasing sedimentation efficiency of vortex settling basin by using submerged vanes", *Journal of Watershed Engineering and Management*, **5**(3), pp.224-232 (2013).
18. Pishgar, R. and Keshavarzi, A.R. "Investigation of the effect of two series connected vortex settling basins (VSBs) on the efficiency of sediment xtraction", *Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering*, **11**(37), pp.65-69 (2017).
19. Julien, P.Y. "Motion of a sediment particle in Rankine-combined vortex", Report CED-84PYJ6, *Colorado State University, Fort Collins* (1985).
20. 20. Vatistas, GH. "Analysis of fine particle concentration in a combined vortex?", *J. Hydraul. Res. Proc.*, **27**, pp. 417-426 (1989).
21. Rea, Q. "Secondary currents within the circulation chamber sediment extractor", MS Thesis, University of Southampton, Southampton, UK (1984).
22. Zhou, Z., Wang, C. and Hou, J. "Model study on flushing cone with strong spiral flow", *Proc. 4th Int. Symposium on River Sedimentation, Beijing*, pp. 1213-1219 (1989).



23. Chapokpour, J., Farhoudi, J. and Amiri Tokaldani, E. "Majedi-Asl M. flow visualization in vortex chamber", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, **2**(1), pp. 26-34 (2011).
24. Lewis, N.S. "The use of an inverted small diameter hydrocyclone to classify particles of sand and gravel", Group Ordinary, Department of Geology, *University of Bristol*, Bristol, England (1981).
25. Luyckx, G. and Berlamont, J. "Removal efficiency of swirl/vortex separators", *Urban Water Journal*, **1**(3), pp. 251-260 (2004).
26. Keshavarzi, A.R. and Gheisi, A.R. "Trap efficiency of vortex settling basin for exclusion of fine suspended particles in irrigation canals", *J. Irrig. Drain. Engng.*, **55**(4), pp. 419-434 (2006).
27. Athar, M., Kothyari, U.C. and Garde, R.J. "Distribution of sediment concentration in the vortex chamber type sediment extractor", *J. Hydraul. Res.*, **41**, pp. 427-438 (2003).
28. Ziaei, A.N., Mc Donough, J.M., Emdadand, H. and et al. "Using vorticity to define conditions at multiple open boundaries for simulating ow in a simplified vortex settling basin", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **54**, pp. 1-28 (2007).
29. Chan, D.J. and Quang, T.N. "Discharge coefficient for a warwe flow through a bottom orifice conical Hopper", *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, **8**(136), pp. 572-567 (Aug., 2010).
30. Ansar, M.A. and Athar, M. "Artificial neural networks approach for estimation of sediment removal efficiency of vortex", *Journal of Hydraulic Engineering*, **19**(1), pp. 38-48 (2013).
31. Haji Ahmadi, A., Saneie, M. and Azhdari moghdam, M. "Laboratory investigation of the effect of the diameter size of orifice on the performance of curvature submerged vanes with 45o radial section in efficiency of vortex settling basins", *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, **103**, pp. 74-82 (2014) (In persian).
32. Chapokpour, J., Ghasemzadeh, F. and Farhoudi, J. "The Numerical Investigation on Vortex Flow Behavior Using FLOW-3D", *J. WASJ*, **3**(1), pp. 105-113 (2012).
33. <http://www.flow3d.com/resources/flow3d-technical-papers-1.html>.
34. Slack, MD. And Boysan, F. "Advances in cyclone modeling using unstructured grids", *Scandinavian FLUENT UGM Gothenburg* (1988).
35. Statie, E., Salcudean, M., Gartshore, I. and et al. "The influence of hydrocyclone geometry on separation and fibre classification", *Filtration and Separation*, **38**(6), pp. 36-41 (2001).
36. Derksen, J.J., Sundaresan, S. and Van den Akker, H.E.A. "Simulation of mass-loading effects in gas-solid cyclone separators", *J. of Powder Technology*, **163**, pp. 59 (2006).
37. Derksen, J.J., Sundaresan, S. and Van den Akker, H.E.A. "Two-way coupled large-eddy simulations of the gas-solid flow in cyclone separators", *AIChE Journal*, **54**, pp. 872 (2008).
38. Talbi, K., Nemouchi, Z., Donnot, A. and et al. "An experimental study and a numerical simulation of the turbulent flow under the vortex finder of a cyclone separator", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **4**(1), pp. 69-75 (2009).
39. Utikar, R., Darmawan, N., TadeL, M. and et al. "Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators", *In Computational Fluid Dynamics*, Intec open publisher, pp. 241-266 (2010).
40. José de Souza, F, de Vasconcelos Salvo, and Alves de Moro Martins, D. "Large eddy simulation of the gas-particle flow in cyclone separators", *J. of Separation and Purification Technology*, **94**, pp. 61-70 (2012).
41. Saidi, M., Maddahian, R., Farhanieh, B. and et al. "Modeling of flow field and separation efficiency of a deoiling hydrocyclone using large eddy simulation", *International Journal of Mineral Processing*, **112-113**, pp. 84-93 (2012).
42. Mikulcic, H., Vujanovi, M., Sami Ashhab, M. and et al. "Large eddy simulation of a two-phase reacting swirl flow inside a cement cyclone", *J. of Energy*, **75**, pp. 89-96 (2014).
43. Wilcox, D.C. "Turbulence Modeling for CFD", *DCW Industries Inc., La Canada, CA* (1993).
44. Rodi, W., Constantinescu, G. and Stoesser, T. "Large-Eddy Simulation in Hydraulics?", CRC Press/Balkema, P.O. Box 11320,2301 EH Leiden, The Netherlands (2013).
45. He, P., Salcudean, M., Gartshore, I.S. and et al. "Multigrid calculation of fluid flows in complex 3D geometries using curvilinear grids", *Journal of Computers And Fluids*, **25**(4), pp. 395-419 (1996).
46. Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M. and et al. "Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder", *Journal of Chemical Engineering and Processing*, **47**(1), pp. 128-137 (2008).