

مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان درون حوضچه رسوب‌گیر گردابی با آب زلال و بررسی کارایی آن

ندا شیخ رضازاده نیکو^۱، علی نقی ضیائی^{۲*}، حسین انصاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴

چکیده

حوضچه رسوب‌گیر گردابی یک سازه رسوب‌گیر مداوم، کارآ برای حذف رسوبات بار بستر و بار معلق درشت دانه می‌باشند. در این مطالعه، آزمایشاتی در آزمایشگاه گروه مهندسی علوم آب دانشگاه فردوسی مشهد بر روی ستاپ حوضچه گردابی با جریان آب زلال انجام شد. شدت جریان در محدوده ۸-۲۲ لیتر در ثانیه بود. سرعت ۳ بعدی درون حوضچه با استفاده از ADV اندازه‌گیری شد. میدان جریان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس در حالت آرام (حل مستقیم با مش درشت) و با کاربرد مدل‌های تلاطمی $k-\omega$ $k-\varepsilon$ standard و Smagorinsky حل شد. راندمان جریان خروجی به کل جریان ورودی تعیین، خطوط هم تراز آب ترسیم و سرعت مماسی اندازه‌گیری شد. نسبت راندمان جریان خروجی به کل جریان ورودی برابر ۷۵ تا ۸۷/۵ درصد اندازه‌گیری شد. معادله پروفیل سطح آب و معادله سرعت مماسی با استفاده از آنالیز ابعادی و رگرسیون تعیین و رابطه سرعت با رابطه تجربی سایر پژوهشگران مقایسه شد. نتایج راندمان جریان خروجی و پروفیل سطح آب و سرعت مماسی محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و مدل Smagorinsky دارای هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی بود و خطای نسبی مدل کم‌تر از ۳٪ بود. شکل‌گیری نواحی گردابی آزاد و اجباری در مدل Smagorinsky مشابه نتایج آزمایشگاهی بود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، پروفیل سطح آب، راندمان جریان خروجی، سرعت، مدل‌های متلاطم

مقدمه

در اثر جریان‌های ثانویه تولید شده در حوضچه، رسوبات به سمت روزنه خروجی که در کف حوضچه قرار دارد هدایت می‌شوند (Utikar et al., 2010). بنابراین هندسه جریان باعث می‌گردد ذرات رسوبی مسیر سقوط مارپیچی که بسیار طولانی‌تر از قطر حوضچه می‌باشد طی کنند که همین باعث راندمان بالای حوضچه علی‌رغم ابعاد کوچک آن نسبت به رسوب‌گیرهای معمولی می‌گردد. این ویژگی بارز VSB منجر به افزایش کاربرد آن می‌گردد. با این حال، با توجه به ساختار پیچیده سه‌بعدی جریان در VSB، تا به حال، این ساختار و فرآیند جداسازی مورد بررسی قرار نگرفته است.

مشوری با مدل‌سازی عددی جریان، راندمان تله‌اندازی رسوب در حوضچه رسوب‌گیر گردابی را با استفاده از روش اختلاف محدود تعیین نمود (Mashuri., 1986). پل و همکاران (Paul et al., 1991) ضمن بررسی ابعاد طراحی حوضچه‌های گردابی، روابطی برای تعیین ضریب دبی روزنه مرکزی، بیشینه سرعت مماسی در حوضچه، عمق آب در حوضچه، راندمان تله‌اندازی، ارایه نمودند. اطهر و همکاران (Athar et al., 2003) مولفه‌های سرعت در دو نوع حوضچه را اندازه‌گیری کردند. نتایج ایشان حاکی از آن بود که

حوضچه ته‌نشینی گردابی^۴ سازه‌ای مشابه سیکلون‌ها بوده که با شکل‌گیری گردابه‌ها در حوضچه استوانه‌ای امکان افزایش راندمان ته‌نشینی میزان ذرات رسوبی در مقایسه با حوضچه مستطیلی معادل را فراهم می‌آورد (Curi et al., 1975). در ابتدا جریان از کانال ورودی، وارد حوضچه استوانه‌ای با کف مخروطی شکل می‌گردد و پس از چرخیدن در حوضچه، از کانال خروجی که در دیواره حوضچه وجود دارد خارج می‌گردد. گرداب تولید شده در حوضچه، ترکیبی از یک گرداب آزاد و یک گرداب اجباری می‌باشد که باعث راندمان رسوبات به حاشیه حوضچه شده (Cecen and Bayazit., 1975) و

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد

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

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، سازه‌های آبی دانشگاه

فردوسی مشهد

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

* نویسنده مسئول:

(2011).

از آنجاییکه هیچ مدل‌سازی عددی با کاربرد مدل‌های LES¹ بر روی VSB انجام نشده است، ولی سیکلون‌ها که دارای ساختار جریان و هندسه مشابه به VSB هستند، با این روش مورد مطالعه قرار گرفتند که شامل مطالعات درکسن و همکاران (Derksen et al., 2008)، طلبی و همکاران (Talbi et al., 2009)، آتیکار و همکاران (Mikulčić et al., 2010) و میکلسیس و همکاران (Utikar et al., 2010) می‌باشند. نتایج این پژوهشگران حاکی از آن بود که برای شبیه‌سازی صحیح جریان درون سیکلون‌ها و همچنین اندرکنش میان دوفاز، شبیه‌سازی به روش ادی‌های بزرگ (LES) نسبت به مدل‌های RANS به‌خصوص برای شکل‌گیری گردابه، برتری دارد. در پژوهش کنونی، به منظور شبیه‌سازی عددی جریان از هندسه ارائه شده در مطالعه اطهر و همکاران (Athar et al., 2002) استفاده شد (شکل ۱). مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان بر روی دبی‌های مختلف ورودی به حوضچه ارائه شده و نسبت کسر حجمی از مقادیر دبی خروجی از روزنه به دبی ورودی از نتایج آزمایشگاهی تعیین گردید. منحنی‌های هم‌عمق سطح آب ترسیم و معادله عمق آب تعیین برآورد شد. معادله سرعت مماسی تعیین و با داده‌های آزمایشگاهی و رابطه تجربی اطهر و همکاران (Athar et al., 2003) مورد مقایسه قرار گرفت. پروفیل سطح آب و سرعت مماسی محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی نیز با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده تا دقت هریک از مدل‌های تلاطمی ارزیابی گردد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه گروه علوم مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد بر روی ستاپ آزمایشگاهی متشکل از کانال ورودی (به طول ۴ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر)، حوضچه گردابی (به قطر ۱ متر، و ارتفاع ۰/۴ متر با شیب کف ۱:۱۰ به سمت روزنه مرکزی و قطر روزنه ۰/۱ متر) و کانال خروجی (به طول ۳ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر) می‌باشد. شدت جریان ورودی به کانال در محدوده ۸-۲۲ لیتر در ثانیه برای مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی در نظر گرفته شد. از عمق‌سنج دستی با دقت ± 0.1 میلی‌متر به منظور اندازه‌گیری پروفیل سطح آب استفاده شد. شدت جریان حجمی با استفاده از سرریز مستطیلی در انتها اندازه‌گیری شد. برای تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری درون حوضچه از سرعت‌سنج مغناطیسی سه‌بعدی Nortek 21 MHz Micro-ADV در شرایط آب زلال استفاده شد. سرعت‌ها در ۸ مقطع با زوایای مختلف (۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰، ۲۲۵، ۲۷۰ و ۳۱۵ درجه) به فواصل ۰/۲ از کف اندازه‌گیری شدند. در هر ارتفاع، سرعت در ۱۴۰ نقطه در راستای

الگوهای جریان در بخش‌های مختلف از محفظه گردابی متفاوت بوده و این ناشی از متأثر شدن جریان از کانال ورودی و کانال خروجی است. ایشان بخش‌های دارای توزیع سرعت مشابه را تعیین و رابطه تجربی برای سرعت‌های مماسی و شعاعی در دو هندسه مختلف ارائه نمودند. همچنین، رابطه واحدی برای مولفه سرعت عمودی تعیین کردند و فرض کردند که در نزدیکی کف صادق باشد. به‌عبارتی، فرض جریان دوبعدی را در اکثر بخش‌های حوضچه پذیرفتند و از اثرات جریان‌های ثانویه صرف‌نظر نمودند که نقش اساسی در حرکت ذرات رسوبی به سمت روزنه مرکزی دارد. رابطه سرعت مماسی بدون بعد (نرمال شده با سرعت ورودی) برای $0.20 \leq r/R \leq 1.0$ و $0.0 \leq \theta \leq 2\pi$ ، به صورت رابطه ۱ و ۲ می‌باشد.

$$\frac{u_t}{u_{in}} = \left[\{2.22 - 4.46(r/R) + 3.05(r/R)^2\} \times (0.83 + 0.224\theta - 0.059\theta^2) \right] \times \{8.18(Q_u / Q_{in})^{0.97}\} \quad (1)$$

برای $0.05 \leq r/R \leq 0.2$ و $\pi/2 \leq \theta \leq 5\pi/4$

$$\frac{u_t}{u_{in}} = \left[\{6.785.46\theta - 1.27\theta^2\} + (r/R)(67.56 - 26.48\theta) \right] \times \{5.58 + 2.25 \text{Log}(Q_u / Q_{in})\} \quad (2)$$

برای $0.05 \leq r/R \leq 0.2$ و $0 \leq \theta \leq \pi/4$ - به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

$$u_t = \left[\{0.83 + 7.68(r/R)\} \times \{0.22 \text{Exp}(12.7(Q_u / Q_{in}))\} \right] \times \{1.18 - 0.177\theta - 0.23\theta^2\} \quad (3)$$

که در آن، r شعاع روزنه مرکزی، R شعاع حوضچه، θ زاویه نسبت به خط ۰ درجه، u_t سرعت مماسی در حوضچه، Q_{out} دبی کانال خروجی، Q_{in} دبی ورودی می‌باشد (Athar et al., 2003).

کشاورزی و غیثی رفتار جریان درون نوعی از حوضچه رسوب‌گیر را با اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری با ADV تحلیل کرده و خطوط جریان را ترسیم کردند. ایشان دریافتند که در ناحیه ورودی حوضچه، بیش‌ترین جریان‌های ثانویه در مقطع ۹۰ درجه شکل می‌گیرد که تحت تاثیر کانال ورودی می‌باشد (Keshavarzi and Gheisi., 2006). ضیائی (Ziaei., 2007) با مدل‌سازی جریان حوضچه در حالت آرام، ساختار جریان را مورد بررسی قرار داد. چاپکپور و همکاران (Chapokpour et al., 2011) الگوی سه‌بعدی سرعت در VSB را به صورت آزمایشگاهی ارائه نموده‌اند. چاپکپور و همکاران جریان در VSB را به صورت عددی با نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار دادند. ایشان در شبیه‌سازی جریان در VSB، شکل‌گیری هسته هوا را در محل روزنه خروجی مشاهده نموده‌اند و سیال آب بدون هوا از روزنه تخلیه شده است. همچنین، در بازه‌های زمانی مختلف، گردابه‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد و در برخی نقاط روزنه مشاهده شده است که در طول گذر زمان پدیدار و سپس، ناپدید شده است (Chapokpouret al.,

که در آن، k انرژی کینماتیکی تلاطم، ω نرخ استهلاکی ویژه (نسبت نرخ استهلاکی در واحد انرژی کینماتیکی تلاطمی) می‌باشند. معادلات انتقال برای k (معادله ۸ الف) و ω (معادله ۸ ب) به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = (\mu + \sigma^* \mu_T) \Delta k + G - \beta^* \rho k \omega \quad (8\text{-الف})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \omega) = (\mu + \sigma \mu_T) \Delta \omega + \alpha \frac{\omega}{k} G - \beta \rho \omega^2 \quad (8\text{-ب})$$

که در آن، ضرایب معادله برابر

$$\alpha = 5/9, \beta = 3/40, \beta^* = 0.09, \sigma = 0.5, \text{ and } \sigma^* = 0.5.$$

مدل Smagorinsky

روش‌های پایه مدل‌سازی با LES، فیلترگیری از معادلات حرکت (معادلات ۴ الف و ب) یا فیلترگیری از حل این معادلات است. تجزیه متغیرهای وابسته در روش LES به صورت معادله $U(x, t) = \tilde{u}(x, t) + u^*(x, t)$ می‌باشد، که با جایگذاری در معادله مومنتم و فیلترگیری پایین‌گذر از معادله، معادله ۹ حاصل می‌شود:

$$(\tilde{U})_t + \nabla \cdot (\tilde{U}\tilde{U}) = -\nabla \cdot (\tilde{P}) + \nu \Delta(\tilde{U}) - \nabla \cdot \tau_{SGS} \quad (9)$$

در آن، \tilde{u} سرعت جریان با طول موج‌های کوتاه کوچک‌تر از طول موج قطع (با کاربرد فیلترگیری پایین‌گذر^۱ از U)، u^* سرعت جریان با طول موج‌های بلند (با کاربرد فیلترگیری بالاگذر^۲ از U)، که مجموعشان مخالف صفر ($\sum u^* \neq 0$) می‌باشد، τ_{SGS} تنش SGS در روش LES است. این معادله، برای تغییرات بزرگ-مقیاس LES قابل حل است. در این جا،

$$\tau_{SGS,ij} = -2\nu_{SGS} \tilde{S}_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad i \neq j \quad (10)$$

$$\nu_{SGS} = l^2 |\tilde{S}_{ij}| \quad (11)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{l}{2} (\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}) \quad (12)$$

$$l = C_s \Delta \quad (13)$$

که در آن، \tilde{S} تانسور نرخ کششی بزرگ مقیاس، ν_{SGS} لزوجت گردابه‌ای بدست آمده از فرمول طول اختلاط، l مقیاس طولی، Δ پهنای فیلترگیری (متناسب با فاصله شبکه محاسباتی) و C_s ثابت مدل Smagorinsky می‌باشند. به دلیل محدودیت مدل Smagorinsky در نزدیکی دیوار، تابع استهلاکی مانند $f(z^+)$ توسط پیوملی و همکاران (Piomelli et al., 1989) در طول اختلاط مدل

شعاعی اندازه‌گیری شد (شکل ۳). به دلیل محدودیت اندازه‌گیری‌ها در نزدیکی روزنه (شکل‌گیری هسته هوا)، دیواره (محل ADV) و سطح آب (نوبد میله اندازه‌گیری رو به پایین)، سرعت در منطقه نزدیک به روزنه و دیواره حوضچه اندازه‌گیری نشد.

معادلات حرکت و اجرای مدل عددی

با توجه این که عدد بی‌بعد رینولدر محدوده ۳۹۸۰۰-۱۱۰۰۰۰ می‌باشد جریان آشفته بوده بنابراین، به منظور شبیه‌سازی جریان در حوضچه، معادلات ناویر استوکس (معادله ۴) با کاربرد مدل‌های تلاطمی RANS شامل $k-\varepsilon$ standard (Wilcox., 1993) و $k-\omega$ Smagorinsky و مدل تلاطمی LES شامل Smagorinsky (Rodi., 2016) حل گردید.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\rho \mathbf{u}) = \nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (4\text{-الف})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4\text{-ب})$$

که در آن، \mathbf{u} بردار سرعت $(u, v, w)^T$ ، p فشار، ρ چگالی، μ ویسکوزیته سیال و \mathbf{F} نیروی جسمی، ∇ و Δ عملگرهای گرادیان و لاپلاس.

مدل $k-\varepsilon$ standard

در مدل $k-\varepsilon$ standard، ادی ویسکوزیته از رابطه ۵ تعیین می‌شود:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

که در آن، k انرژی کینماتیکی تلاطم، ε نرخ استهلاکی و C_μ ثابت مدل می‌باشد. معادلات انتقال برای k (معادله ۶ الف) و ε (معادله ۶ ب) به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \Delta k + G - \rho \varepsilon \quad (6\text{-الف})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \Delta \varepsilon + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6\text{-ب})$$

که در آن، $G = \mu_T (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) : \nabla \mathbf{u}$ ، توربلانسی و “.” بیانگر ضرب اسکالری تانسور است. ضرایب مدل بر طبق ویلکوکس (Wilcox., 1993) عبارتند از

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

مدل $k-\omega$

در مدل $k-\omega$ ادی ویسکوزیته از رابطه ۷ تعیین می‌شود.

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

1- low pass filtering

2- high pass filtering

RANS ارایه شده است.

$$l = C_s \Delta f(z^+) \quad (14)$$

$$f(z^+) = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{z^+}{A^+}}\right)^3} \quad (15)$$

که در آن، $z^+ = \frac{z u_*}{\nu}$ فاصله عمودی به z دیواره در واحدهای دیوار، و A^+ ثابت تجربی ($A^+ = 2.5$) است.

شرایط مرزی

شرط مرزی در ورودی کانال، دیوار و کانال خروجی، به‌ترتیب سرعت ورودی، شرط عدم لغزش برای مرزهای جامد و شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شد. با توجه به این که جریان مورد بررسی در کانال روباز می‌باشد که با سیال هوا در ارتباط است، کلیه شرایط مرزی وجوه بالای کانال شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شد. مدل‌سازی به صورت دو فاز (آب و هوا) انجام شده و از VOF برای شبیه‌سازی سطح آب استفاده گردید.

آنالیز ابعادی

با توجه به شکل ۱، پارامترهای موثر بر رفتار جریان درون حوضچه شامل دبی ورودی (Q_{in})، دبی کانال خروجی (Q_{out})، دبی عبوری از روزنه (Q_o)، دبی رسوب (Q_s)، سرعت مماسی (u_t)، سرعت شعاعی (u_r)، سرعت محوری (u_z)، عمق آب در کانال ورودی (H_{in})، عمق جریان در حوضچه (H)، عرض کانال ورودی و کانال خروجی (B)، شیب کف حوضچه (S_c)، شعاع روزنه (r_o) (قطر روزنه d_o)، شعاع حوضچه (R) (یا قطر حوضچه D)، فاصله از مرکز حوضچه به سمت دیواره (r) فاصله از کف حوضچه (z)، ارتفاع حوضچه (Z_b)، قطر ذره (D_s)، شتاب ثقل (g)، چگالی سیال (ρ)، چگالی ذره (ρ_s)، کشش سطحی (σ) و ویسکوزیته دینامیکی (μ)، آنالیز ابعادی براساس تئوری π -بکینگهام به‌صورت رابطه ۱۶ می‌باشد.

$$F_1 \left(\frac{r}{H_{in}}, \frac{R}{H_{in}}, \frac{r_o}{H_{in}}, \frac{H}{H_{in}}, \frac{z}{Z_b}, S_c, \frac{B}{H_{in}}, \frac{H_{out}}{H_{in}}, \frac{Q_o}{Q_{in}}, \frac{D_s}{H_{in}}, \frac{Q_{out}}{Q_{in}}, \frac{Q_s}{Q_{in}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\mu H_{in}}{\rho Q_{in}}, \frac{\sigma}{\rho Q_{in}^2}, \frac{g H_{in}^2}{Q_{in}}, \frac{u_t H_{in}^2}{Q_{in}}, \frac{u_r H_{in}^2}{Q_{in}}, \frac{u_z H_{in}^2}{Q_{in}} \right) = 0 \quad (16)$$

با توجه به این که در این پژوهش، جریان بدون رسوب بررسی می‌گردد، از پارامترهای بی‌بعد $\frac{D_s}{H_{in}}$ و $\frac{\rho_s}{\rho}$ صرف‌نظر می‌گردد. با توجه به این که اعداد رینولدز جریان بیش از $10^{3/5}$ می‌باشد و نیز عمق جریان در حوضچه بالا می‌باشد بنابراین از اثر دو پارامتر

ویسکوزیته ($\frac{\mu H_{in}}{\rho Q_{in}}$) و کشش سطحی ($\frac{\sigma}{\rho Q_{in}^2}$) صرف‌نظر می‌گردد

(Novak and Cabelk., 1981). برخی پارامترهای کم‌اهمیت مانند

$\frac{H_{out}}{H_{in}}$ ، پارامتر ثابت S_c ، $\frac{r_o}{R}$ و پارامترهای مشابه مانند $\frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ و

$(1 - \frac{Q_o}{Q_{in}})$ صرف‌نظر می‌گردد. همچنین، با توجه به این که نیروی

سانتریفوژی نیروی غالب درون حوضچه بوده و نیز برای ساده‌سازی پارامترهای موثر مشابه رابطه تجربی اطهر و همکاران (Athar et al.,

2003) از شتاب ثقل $\frac{g H_{in}^2}{Q_{in}}$ صرف‌نظر می‌گردد. علاوه بر این، با

توجه به این که نیروی محوری و شعاعی به‌جز در نزدیکی روزنه در قسمت‌های دیگر حوضچه نزدیک به صفر می‌باشند و نیز در مقایسه با

سرعت مماسی ناچیز می‌باشند از پارامترهای $\frac{u_r}{u_{in}}$ و $\frac{u_z}{u_{in}}$ صرف‌نظر

می‌گردد. در نهایت پارامترهای بی‌بعد عبارتند از (رابطه ۱۷):

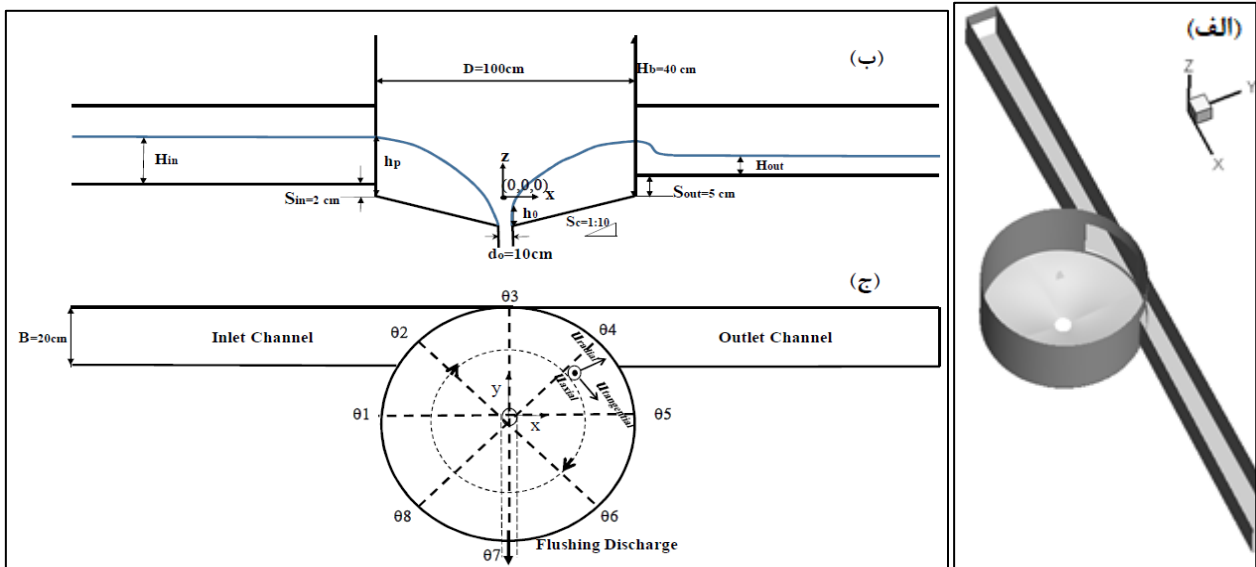
$$F_1 \left(\frac{r}{R}, \frac{H}{H_{in}}, \frac{y}{Y_b}, \frac{H_{out}}{H_{in}}, \frac{Q_o}{Q_{in}}, \frac{u_t H_{in}^2}{Q_{in}}, \frac{B}{H_{in}}, \frac{u_t}{u_{in}} \right) = 0 \quad (17)$$

از این پارامتر ابعادی، تعیین پروفیل سطح آب و رابطه سرعت مماسی درون حوضچه استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

راندمان جریان خروجی

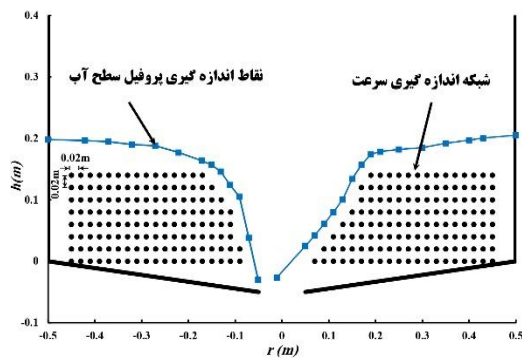
راندمان جریان خروجی به‌صورت نسبت دبی خروجی از کانال خروجی به دبی ورودی (Q_{out}/Q_{in}) بوده که برای پژوهش‌های مختلف در جدول ۱ ارایه شده است. نتایج نشان داد که برای $D/d \geq 17$ ، نسبت راندمان جریان خروجی از کانال بیش از ۷۸/۹۲٪ می‌باشد. به‌دلیل رابطه مستقیم میان D/d و Q_{out}/Q_{in} ، راندمان جریان خروجی برای نسبت $D/d=10.0$ ، در مطالعه کنونی برای دبی ۲۲ لیتر در ثانیه ۸۷/۴٪ و برای کمینه دبی ۸ لیتر در ثانیه در حدود ۷۵/۳٪ بوده است که اندکی کم‌تر از مقادیر اطهر و همکاران (Athar et al., 2002) می‌باشد و این به‌دلیل عدم تنظیم جریان خروجی از روزنه می‌باشد. نسبت راندمان جریان خروجی برای دبی‌های مختلف با کاربرد مدل‌های تلاطمی ($k-\omega$ ، $k-\epsilon$ standard) و Smagorinsky) بدون کاربرد مدل‌های تلاطمی در حالت laminar (coarse DNS) در جدول ۲ ارایه و با نتایج مقادیر آزمایشگاهی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل Smagorinsky بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد و خطای نسبی آن برای تمام دبی‌ها کم‌تر از ۳٪ است.



شکل ۱- هندسه حوضچه رسوب گیر گردابی (الف) شمالی سه بعدی، (ب) نمای جانبی و (ج) پلان



شکل ۲- نمایی از مدل آزمایشگاهی حوضچه رسوب گیر گردابی



شکل ۳- محل اندازه گیری سرعت و عمق جریان

پروفیل سطح آب

$$\frac{H}{H_{in}} = -0.92\alpha^3 + 2.65\alpha^2 - 1.2\alpha + 1.7\left(\frac{Q_o}{Q_{in}}\right)$$

$$\alpha = \frac{-0.134}{\frac{r}{R}} + 1.6\exp(0.075\theta) - 0.168\theta \quad (18)$$

خطای نسبی رابطه ۱۸ در شکل ۶ نمایش داده شده است که در حدود $\pm 15\%$ می‌باشد. این معادله امکان تعیین عمق جریان در نقاط مختلف از حوضچه را فراهم می‌آورد که در طراحی حوضچه و تعیین تغییرات سطح آب در حوضچه موثر است. هم‌چنین با محاسبه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای نسبی برآورد (MRE) به ترتیب 0.009 و $8/75\%$ برای داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

بررسی سرعت در داخل حوضچه

بردارهای سرعت در حوضچه، براساس هندسه شکل ۱ با مولفه‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری بیان می‌شود. در شکل ۷، خطوط هم‌سرعت محوری، شعاعی و مماسی ترسیم شده است. سرعت محوری اثر مهمی در ته‌نشینی ذرات رسوبی به سمت روزنه مرکزی دارد. همان‌طور که در شکل ۷ الف مشاهده می‌شود در اکثر نواحی سرعت محوری صفر و یا نزدیک به $0/1$ می‌باشد که منجر حرکت ذرات به سمت کف و روزنه می‌شود. در ارتفاعات $0/06$ ، $0/09$ و $0/12$ در نزدیکی خروجی سرعت برابر $0/15$ می‌باشد که به دلیل خروج ذرات از حوضچه به سمت کانال خروجی است.

خطوط هم‌عمق آب برای دبی‌های ۸، ۱۴ و ۲۲ لیتر در ثانیه در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، عمق آب برای دبی کمتر متقارن بوده و با افزایش دبی، خطوط هم‌تراز به سمت کانال خروجی متمایل می‌شوند. بنا بر نتایج چچن و بایازیت (Cecen and Bayazit., 1997)، وجود کانال ورودی و خروجی و تغییر دبی علت انحراف هسته هوا در محدوده روزنه است. هم‌چنین با بررسی پروفیل سطح آب برای مدل‌های تلاطمی مختلف برای دبی ۲۲ لیتر در ثانیه در شکل ۵، ملاحظه گردید کلیه مدل‌ها، سطح آب نواحی شکل‌گیری گردابه آزاد (در محدوده دور از روزنه مرکزی تا نزدیک به دیواره) را به درستی شبیه‌سازی می‌کنند و اختلاف سطح آب داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌ها در حدود کمتر از ۲ سانتی‌متر است. ولی در ناحیه گردابه اجباری، نتایج مدل Smagorinsky دارای روند نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. بنابراین، با توجه به نتایج، مدل Smagorinsky نسبت به مدل‌های تلاطمی RANS دارای انطباق بیش‌تری با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

رابطه پروفیل سطح آب در حوضچه

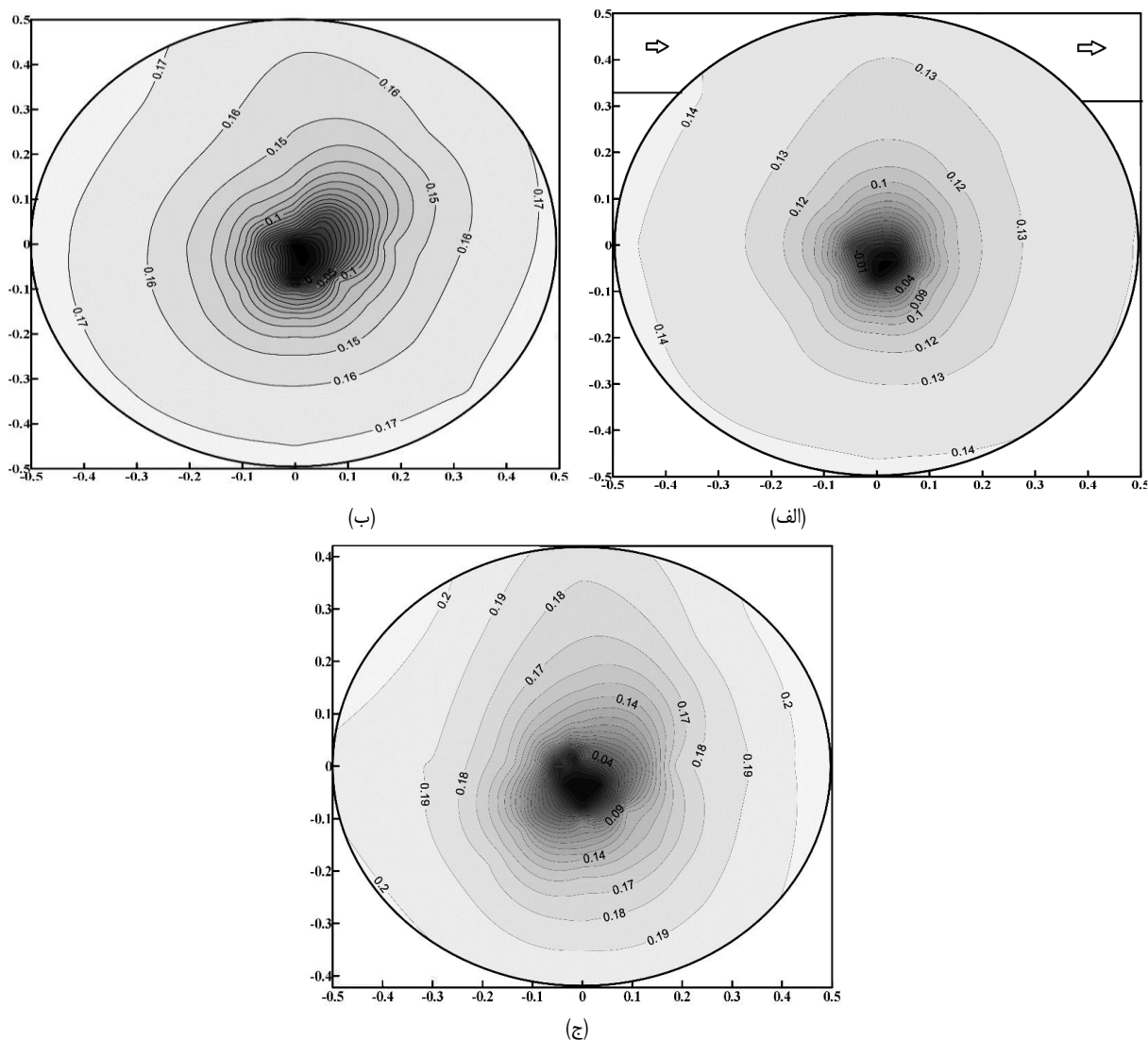
رابطه عمق جریان درون حوضچه با توجه به موقعیت جریان در حوضچه و نسبت کسر حجمی (Q_o/Q_{in}) با کاربرد آنالیز ابعادی و رگرسیون‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت رابطه ۱۸ تعیین می‌شود.

جدول ۱- مقایسه راندمان جریان خروجی بدست آمده از سایر پژوهشگران با مقادیر پژوهش کنونی

مطالعات	D/d	$Q_o(L/s)$	$Q_{in}(L/s)$	$Q_{out}/Q_{in} \%$
کوری و همکاران (Curi et aql., 1975)	۷۰-۱۷	۱/۱-۰/۲۲	۱۲/۱۳-۴/۴۶	۷۸/۹۲-۹۶/۸
مشوری (Mashuri., 1986)	۳۳/۳۳-۲۵	۱/۰۹-۰/۱۵	۱۷-۶/۸	۸۴-۹۴/۴۱
مشوری (Mashuri., 1986)	۵۰-۲۵	۰/۱۸-۰/۱۵	۳/۵-۲/۴۲	۹۳/۴-۹۶/۱
مشوری (Mashuri., 1986)	۶۰-۱۸	۰/۱۸-۰/۱۵	۳/۶-۲/۴۲	۸۳/۱-۹۶/۷
پل و همکاران (Paul et al., 1988)	۲۸/۳	۲۰-۱۱/۸۷	۱۶۰-۶۲/۵	۸۱-۹۲
اطهر و همکاران (Athar et al., 2002)	۱۰	۲/۹-۰/۵۹	۲۲-۸	۸۲/۷-۹۲/۸
پژوهش کنونی	۱۰	۴/۰۷-۲/۱۰	۲۲-۸	۷۵/۳-۸۷/۱

جدول ۲- راندمان جریان خروجی با استفاده از شبیه‌سازی جریان متلاطم با مدل‌های تلاطمی مختلف

مدل‌های تلاطمی							مدل آزمایشگاهی			
laminar		Standard $k-\epsilon$		$k-\omega$		Smagorinsky		Q_{in}	Q_{out}/Q_{in}	
Q_{in} (l/s)	Q_{out}/Q_{in} (%)	RE%	Q_{out}/Q_{in} (%)	RE%	Q_{out}/Q_{in} (%)	RE%	Q_{out}/Q_{in} (%)	RE%	Q_{in} (l/s)	Q_{out}/Q_{in} (%)
۸/۱	۷۱/۴	-۵/۱	۶۵/۶	۱۲/۸	۶۶/۸	۱۱/۲	۷۳/۰	۳/۰	۸	۷۵/۳
۱۵	۷۶/۴	۱۰/۲	۶۸/۹	۱۹/۰	۷۳/۳	۱۳/۸	۸۳/۶	۱/۷	۱۴/۹	۸۵/۱
۲۱/۸	۷۹/۹	۸/۵	۷۲/۱	۱۷/۵	۷۴/۲	۱۵/۱	۸۷/۹	-۰/۵	۲۱/۸	۸۷/۴



شکل ۴- خطوط هم‌تراز آب برای دبی الف) ۸، ب) ۱۴ و ج) ۲۲ لیتر در ثانیه

یکی از عوامل شکل‌گیری چرخش جریان درون حوضچه، با توجه به هندسه حوضچه است. تقریباً در اکثر نواحی سرعت بیش از ۰/۷ است. با توجه به این که سرعت مماسی نسبت به دو مولفه سرعت دیگر، سرعت غالب داخل حوضچه می‌باشد، سایر بررسی‌ها با توجه به سرعت مماسی انجام می‌شود. سرعت مماسی محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی مختلف شامل $k-\varepsilon$ ، $k-\omega$ و Smagorinsky با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مقایسه شدند (شکل ۸). سرعت مماسی محاسبه شده با مدل‌های تلاطمی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ دارای روند مشابهی بوده و در نزدیکی روزنه که محل شکل‌گیری گردابه اجباری می‌باشد از دقت کم‌تری برخوردارند. در حالی که مدل Smagorinsky دارای نتایج مشابه به داده‌های آزمایشگاهی است به‌خصوص در ناحیه گردابی اجباری که شیب افزایش سرعت مماسی به سمت روزنه مرکزی بالاست. همان‌طور که داده‌های آزمایشگاهی، شامل سرعت

سرعت شعاعی باعث شکل‌گیری جریان‌های ثانویه شده و منجر به هدایت ذرات رسوبی به کف حوضچه و سپس به سمت روزنه خروجی می‌شود. در شکل ۷ ب، کمینه و بیشینه سرعت شعاعی به ترتیب در نزدیکی کانال ورودی و کانال خروجی است که ناشی از ورود جریان و خروج جریان در حوضچه است. در سایر نواحی سرعت شعاعی نسبتاً ثابت بوده و بین ۰-۱/۱ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. همچنین، در نزدیکی کف و در بازه $\theta=300-45^\circ$ سرعت شعاعی منفی می‌باشد که ناحیه محتمل حرکت ذرات به سمت روزنه مرکزی است.

سرعت مماسی منجر به چرخش جریان حول محور حوضچه شده و مسیر حرکت جریان را افزایش داده و نقش مهمی در تسهیل ته‌نشینی ذره دارد (Vatistas et al., 1986). بیشینه سرعت مماسی در ناحیه $\theta=90-135^\circ$ می‌باشد که تحت تاثیر جریان ورودی می‌باشد و

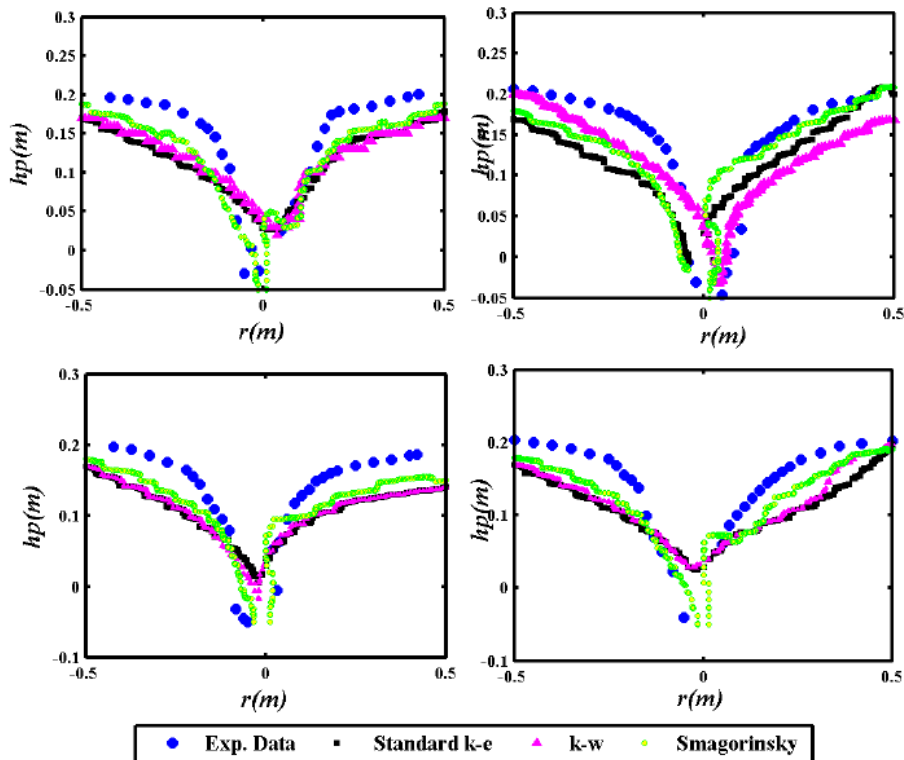
رابطه سرعت مماسی

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و آنالیز ابعادی (رابطه ۱۷)، معادله تجربی معادله سرعت مماسی بی‌بعد درون حوضچه به صورت رابطه ۱۹ تعیین شد:

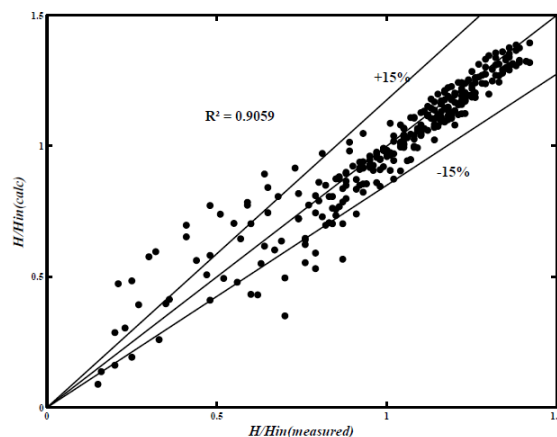
$$\frac{u_t}{u_{in}} = \left(0.945 \frac{Q_o}{Q_{in}} + 0.504\right) \left(\frac{r}{R}\right)^{(0.92 \frac{Q_o}{Q_{in}} - 0.44)} \quad (19)$$

$$\left(1 - \frac{z}{Z}\right)^{-0.1}$$

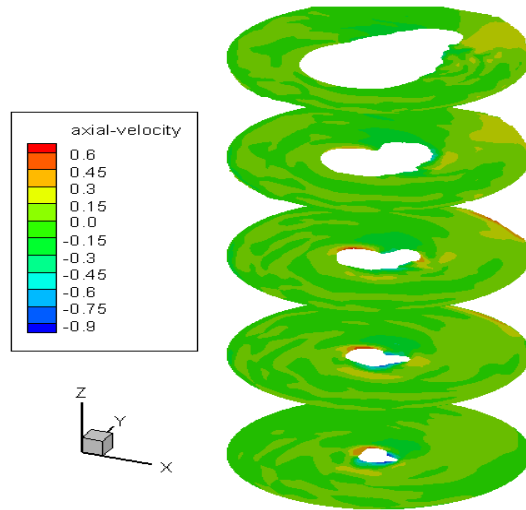
مماسی متوسط‌گیری شده می‌باشند اندکی تفاوت میان نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از ماهیت ناپایدار جریان درون حوضچه باشد. برای دبی ۲۲ لیتر در ثانیه، گردابه آزاد و اجباری در نزدیکی انحنا دار سطح آب و تشکیل هسته هوا، اثر گردابه اجباری از بین می‌رود. گردابه اجباری تقریباً در محدوده $-0.2 < r/R < 0.2$ بوده و گردابه آزاد از $-1 < r/R < -0.2$ و $0.2 < r/R < 1$ شکل می‌گیرد. به دلیل اختلاط آب و هوا و محدودیت ADV در اندازه‌گیری، ناحیه شکل-گیری گردابه اجباری اندازه‌گیری نشده است.



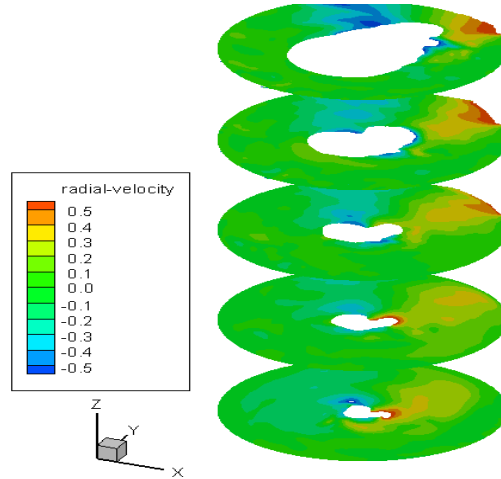
شکل ۵- مقایسه پروفیل سطح آب محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی با داده‌های سطح آب اندازه‌گیری شده در مقطع ++۱۸۰°



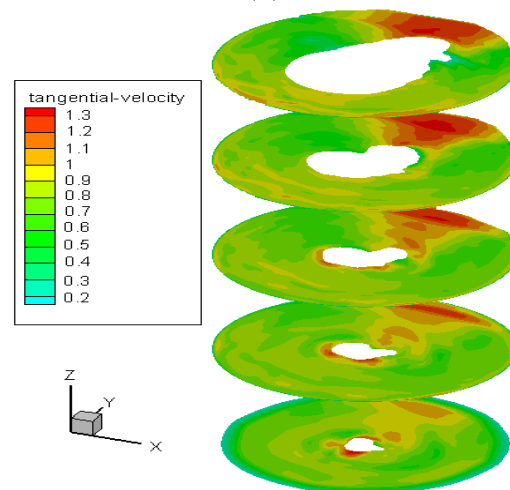
شکل ۶- مقایسه معادله تجربی ۱۸ با داده‌های آزمایشگاهی



(الف)

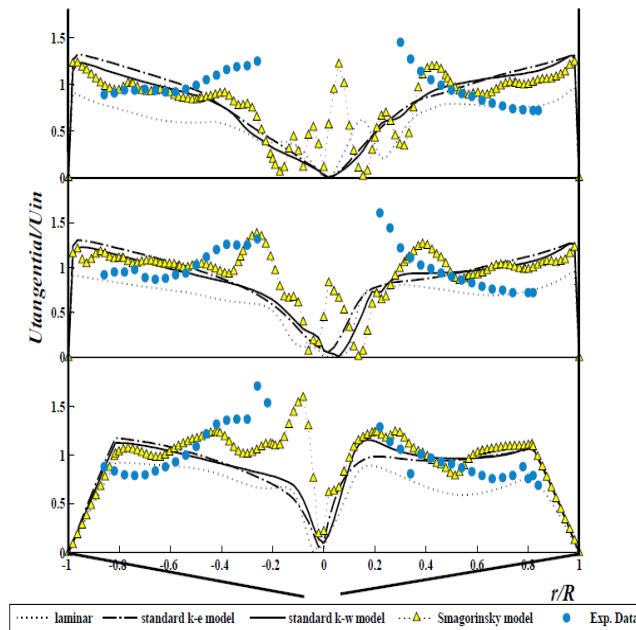


(ب)



(ج)

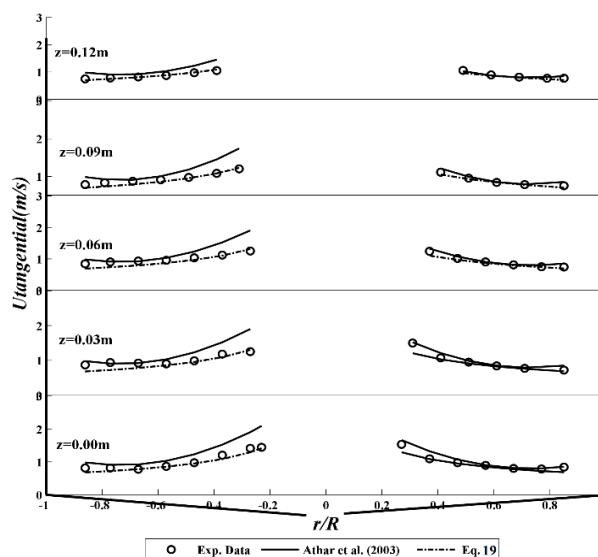
شکل ۷- خطوط هم‌سرعت الف) محوری، ب) شعاعی و ج) مماسی در ارتفاعات مختلف ۰، ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۰۹، ۰/۱۲ و ۰/۱۲



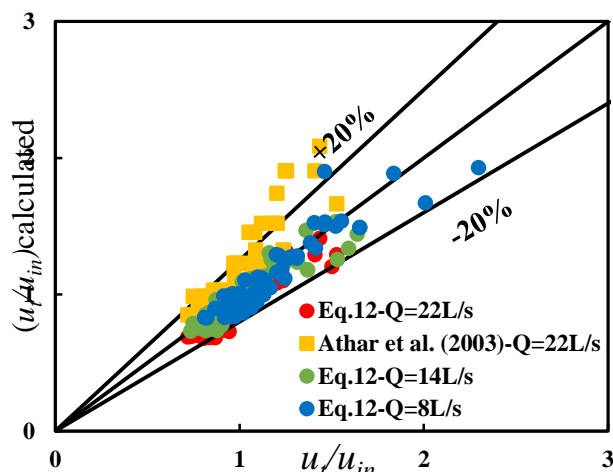
شکل ۸- مقایسه سرعت مماسی محاسبه شده از مدل‌های تلاطمی مختلف با داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقطع ۰-۱۸۰ درجه در ارتفاعات ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱

و همکاران در مقطع ۰-۱۸۰ درجه برای دبی ۲۲ لیتر در ثانیه مقایسه شد (شکل ۹). نتایج تطابق مناسب میان معادله ۱۸ و رابطه تجربی اطهر و همکاران (Athar et al., 2003) را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در حالی که برای دبی‌های کمتر از ۲۲ لیتر در ثانیه معادله اطهر و همکاران از دقت کم‌تری برخوردار است.

خطای نسبی رابطه ۱۹ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است که در محدوده $\pm 20\%$ می‌باشد. با محاسبه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی برآورد به ترتیب $0/17$ و $11/43\%$ برای داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. این معادله متوسط سرعت مماسی درون حوضچه را برای محدوده دبی ۸-۲۰ لیتر در ثانیه را ارایه می‌دهد. همچنین، معادله ۱۸ با نتایج آزمایشگاهی و معادله تجربی اطهر



شکل ۹- مقایسه معادله سرعت مماسی (معادله ۱۹) با معادله تجربی اطهر و همکاران (۲۰۰۳) برای ارتفاعات مختلف



شکل ۱۰ - مقایسه مقادیر محاسبه شده سرعت مماسی با مقادیر اندازه گیری شده

نتیجه گیری

در پژوهش کنونی، به بررسی رفتار جریان درون حوضچه رسوب-گیر گردابی پرداخته شد. راندمان جریان آب خروجی حوضچه بررسی و رفتار جریان درون حوضچه (سرعت مماسی، محوری و شعاعی) مطالعه شد. نتایج نشان داد که مشابه مطالعات پیشین، سرعت مماسی سرعت غالب درون حوضچه بوده و منجر به چرخش جریان درون حوضچه می گردد و مسیر حرکت ذرات رسوبی درون حوضچه افزایش می یابد در نتیجه زمان ماند جریان در حوضچه افزایش یافته و امکان ته نشینی و سستشوی ذره به سمت روزنه مرکزی افزایش می یابد. مدل سازی عددی با استفاده از مدل های تلاطمی RANS شامل مدل های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ standard و روش LES شامل مدل Smagorinsky برای مدل سازی جریان پیچیده درون حوضچه ته نشینی استفاده شدند. نتایج شبیه سازی عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و برتری روش LES مدل Smagorinsky نسبت به مدل های تلاطمی RANS شامل مدل های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ standard ملاحظه شد. نتایج سرعت مماسی محاسبه شده و پروفیل سطح آب از مدل Smagorinsky به داده های اندازه گیری آزمایشگاهی نزدیک بود و به علاوه، ناحیه شکل گیری گردابه آزاد، در مدل به درستی شبیه سازی شده بود. با توجه به این که گردابه شکل گرفته درون حوضچه ماهیت ناپایداری دارد اندکی اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی قابل انتظار است. همچنین، روابط سرعت مماسی و پروفیل سطح آب با استفاده از داده های آزمایشگاهی و آنالیز ابعادی استخراج شد. دقت رابطه سرعت مماسی در حدود $\pm 20\%$ و دقت رابطه پروفیل سطح آب در حدود $\pm 15\%$ بود.

نویسندگان مقاله پیشنهاد می کنند که در پژوهش های آتی، از سایر مدل های تلاطمی LES جهت شبیه سازی جریان در حوضچه رسوب گیر استفاده شود. همچنین، با توجه به این که مدل

Smagorinsky دارای نتایج بسیار نزدیک به داده های آزمایشگاهی می باشد می توان سایر مدل های حوضچه گردابی بدون صرف هزینه های هنگفت ساخت و زمان برای انجام آزمایشات، مدل سازی عددی نمود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله 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 ارایه سیستم های محاسبات سنگین جهت شبیه سازی دارند.

فهرست علائم

- دبی ورودی (Q_{in})
- دبی کانال خروجی (Q_{out})
- دبی عبوری از روزنه (Q_o)
- سرعت مماسی (u_t)
- سرعت شعاعی (u_r)
- سرعت محوری (u_z)
- عمق آب در کانال ورودی (H_{in})
- عمق جریان در حوضچه (H)
- عرض کانال ورودی و کانال خروجی (B)
- شیب کف حوضچه (S_c)
- شعاع روزنه (r)
- قطر روزنه (d)
- شعاع حوضچه (R)
- قطر حوضچه (D)

Finland.

فاصله از کف حوضچه (y)

ارتفاع حوضچه (Y_b)

منابع

- Mikulcic, H., Vujanovi, M., Sami Ashhab, M and Dui, N. 2014. Large eddy simulation of a two-phase reacting swirl flow inside a cement cyclone. *Journal of Energy*. 75: 89-96.
- Novak, P and Cabelk, J. 1981. *Models in Hydraulic Engineering*. 460pp.
- Paul, T.C. 1988. "Designing circulation chamber sediment extractor," in Report No. OD 91, Hydraulic Research Limited, Wallingford, UK.
- Paul, T.C., Sayal, S.K., Sakhanja, V.S and Dhillon, G.S. 1991. Vortex settling chamber design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117.2: 172-189.
- Piomelli, U., Ferziger, J., Moin, P. Kim, J. 1989. New approximate boundary-conditions for large eddy simulations of wall-bounded flows. *Physics of Fluids A-Fluid Dynamics*. 1:1061-1068.
- Rodi, W., Constantinescu, G and Stoesser, T. 2013. *Large-Eddy Simulation in Hydraulics*. CRC Press/Balkema, P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands, 1th edition, p. 25-27.
- Talbi, K., Nemouchi, Z., Donnot, A and Belghar, N. 2009. An Experimental Study and a Numerical Simulation of the Turbulent Flow under the Vortex Finder of a Cyclone Separator. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 4(1), pp. 69-75.
- Utikar, R., Darmawan, N., Tade, L.M., Li, Q., Evans, G., Glenn, M and Pareek, V. 2010. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. *Journal of Computational Fluid Dynamics*. Pp. 241-266.
- Vatistas, G.H. 1989. Analysis of fine particle concentration in a combined vortex. *Journal of Hydraulic Research*. 27.3: 417-427.
- Wilcox, D.C. 1993. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., La Canada, CA.
- Ziaei, A.N. 2007. Generalized three-dimensional curvilinear numerical modeling of laminar and turbulent free-surface flows in a vortex settling basin. PhD Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Anwar, H.O. 1969. Turbulent flow in a vortex. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 7, pp. 1-29.
- Athar, M., Kothiyari, U.C., Garde, R.J. 2002. Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, pp. 1051-1059.
- Athar, M., Kothiyari, U.C., Garde, R.J. 2003. Distribution of sediment concentration in the vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 41, pp. 427-438.
- Cecen, K., Bayazit, M. 1975. Some laboratory studies of sediment controlling structures. *Processing 9th Congress ICID, Moscow, Soviet Union*. 107-111.
- Chapokpour, J., Farhoudi, J., Amiri Tokaldani, E., Majedi-Asl, M. 2011. Flow Visualization in Vortex Chamber. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 2.1: 26-34.
- Chapokpour, J., Ghasemzadeh, F., Farhoudi, J. 2012. The Numerical Investigation on Vortex Flow Behavior Using FLOW-3D. *Iranian journal of Energy and Environment*. 1: 105-113.
- Curi, K.V., Esen, H., Velioglu, S.G. 1979. Vortex type solid liquid separator. *Journal of Progress Water Technology*. 7: 183-190.
- Derksen, J.J., Sundaresan, S and Akker, H.E.A. 2008. Two-way coupled large-eddy simulations of the gas-solid flow in cyclone separators. *AIChE Journal*. 54.4: 872-885
- <http://www.flow3d.com/resources/flow3d-technical>
- Keshavarzi, A.R and Gheisi, A.R. 2006. Trap efficiency of vortex settling basin for exclusion of fine suspended particles in irrigation canals. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage engineering*. 55.4: 419-434.
- Mashuri, D.A. 1986. Modeling of a vortex settling basin for primary clarification of water. PhD Thesis Tampere University of Technology, Tampere,

Study of Vortex Settling Basin Performance for Different Discharges by Experimental and Numerical Modeling

N. Sheikh Rezazadeh Nikou¹, A. N. Ziaei^{*2}, H. Ansari³

Received: Nov.21, 2017

Accepted: Mar.05, 2018

Abstract

A vortex settling basin (VSB) is an efficient continuous flushing structure to remove bed loads and coarse suspended loads. In present study, experiments were conducted in Hydraulics lab of Water Science and Engineering Department at Ferdowsi University of Mashhad on a vortex settling basin model with clear water. The flow rate varied in the range of 8-22 L/s. Velocity was measured in three dimensions within the chamber using ADV. The flow field is calculated using 3D Reynolds-averaged N-S equations, laminar case (coarse DNS) and turbulent models including standard $k-\varepsilon$, $k-\omega$ and Smagorinsky models. The abstraction ratio was determined, water surface contours were depicted and tangential velocity was calculated. The abstraction ratio was in range of 75-87.5%. Flow depth and tangential velocity formula were determined based on dimensional analysis and linear regression. The obtained empirical equations were compared with other extant empirical equations. Results of turbulent models including abstraction ratio, water surface profile and tangential velocity were compared to the experimental data. Smagorinsky model showed better agreement with the experimental data and the relative error of the model was less than 3%. The free and forced vortex regions in Smagorinsky model was more similar to those in experimental data.

Keywords: Dimensional analysis, Water surface profile, Abstraction ratio, Velocity, Turbulent models

1-PhD Candidate of Water Science and Engineering, Hydraulic Structural Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

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

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

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