



شبیه سازی سه بعدی الگوی جریان در حوضچه‌های ترسیب با استفاده از مدل عددی SSIIM

علی رضا جبباری^۱، حسن احمدی^۲، عادل اثنی عشری^۳، مهدی کریمی^۴ محمدعلی سیدباقری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب دانشگاه آزاد اسلامی

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی

۳- دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی دانشگاه رازی کرمانشاه

۴- کارشناس ارشد عمران آب

چکیده

ته نشینی به وسیله نیروی ثقل از معمول ترین و پرکاربردترین روشهای جداسازی ذرات جامد معلق در آب و فاضلاب می باشد. حوضچه‌های رسوبگذار از اجزاء مهم و اصلی در هر فرآیند تصفیه آب به شمار می‌روند. شناخت و مدل سازی الگوی هیدرولیک جریان در حوضچه ترسیب اولیه به دلیل تأثیر فراوان در بهینه سازی طراحی حوضچه‌های ترسیب در تصفیه خانه‌ها که باعث افزایش راندمان این تأسیسات می‌شود. بسیار ضروری می‌نماید. بدیهی است که مدل سازی عددی بسیار مقرون به صرفه‌تر از ایجاد مدل‌های فیزیکی می‌باشد و با مدل سازی دقیق این فرآیندها در حوضچه‌های ترسیب می‌توان از صرف هزینه‌های بی‌مورد و گزاف ایجاد مدل‌های فیزیکی جلوگیری نمود. در این پژوهش الگوی جریان و رسوب گذاری توسط نرم‌افزار SSIIM2 در چند مورد همراه با نتایج اندازه گیری‌های آزمایشگاهی نشان از توان بالای مدل سازی توسط این نرم‌افزار دارد.

کلمات کلیدی: حوضچه های ته نشینی، هیدرولیک جریان، نواحی چرخش جریان، مدل عددی SSIIM2

۱. مقدمه

نیروی ثقل یکی از روشهای مرسوم در تصفیه آب و فاضلاب بوده که به کمک آن ذرات معلق و مواد زاید به وسیله ته نشینی از آب جدا می‌شود. کار برد حوضچه‌های ته نشینی در تصفیه خانه‌ها می‌باشد و در کانال‌های آبیاری جهت جلوگیری از رسوب در طول مسیر از این حوضچه‌ها استفاده می‌شود. لذا انجام تحقیقات در مورد شناخت عملکرد حوضچه‌ها، مدل سازی جریان آنها و سپس بهینه سازی عملکرد آنها لازم و مقرون به صرفه می‌باشد.

عملکرد حوضچه‌های ته نشینی به شدت متأثر از اثرات هیدرولیکی و فیزیکی مثل چگالی جریان، نیروی ثقل و لخته شدن رسوب دارد. در این راستا تنها جنبه شیمیایی رسوب موجود در حوضچه حائز اهمیت نیست، بلکه هیدرولیک جریان نقش مهمی را ایفا می‌کند. به منظور بهینه کردن عملکرد این حوضچه‌ها، باید جریان سیال وارد شونده به حوضچه آرام باشد و آشفتگی به مقدار حداقل رسانده شود. مناطق چرخشی همیشه در حوضچه‌ها وجود دارند. این مناطق با ایجاد اتصال کوتاه باعث توسعه نواحی مرده و دوری از ته نشینی بهینه می‌شوند. زیرا ایجاد نواحی مرده و مناطق با اتصال کوتاه به آرامش جریان لطمه وارد می‌کند و بر عملکرد حوضچه تأثیرات منفی می‌گذارد. اگر غلظت درون حوضچه زیاد باشد، امکان ایجاد پدیده اتصال کوتاه به وجود می‌آید که بدون اینکه توده غلیظ تغییری بنماید، جریان ورودی به سمت خروجی هدایت می‌گردد. نواحی مرده به قسمتی از حوضچه اطلاق می‌گردد که با توجه به گرادیان سرعت در ورودی حوضچه، چرخش جریان مانع از ایجاد شرایط

مناسب جهت ته‌نشینی می‌شود. لذا با کاهش نواحی مرده درون حوضچه، بستر مناسبی جهت ترسیب مواد ایجاد خواهد شد پس می‌توان گفت طراحی این حوضچه‌ها و زمان ماندن آب درون آن‌ها نیاز به بررسی بیشتری دارد.

دابینز^۱ (۱۹۴۴) به بررسی نقش آشفتگی در عمل‌کرد حوضچه‌های ته‌نشینی پرداخت و با مدل آزمایشگاهی خود توانست نتایج اولیه مناسبی را بدست آورد. او در یک مطالعه تحلیلی و تجربی ته‌نشینی ذرات مستقل از هم با اندازه‌های یکنواخت را در یک جریانی که آشفتگی در آن کاملاً توسعه‌یافته بود ملاحظه کرد [۱]. امام (۱۹۸۳) به تحلیل معادلات حاکم بر حوضچه‌های ترسیب پرداخت. وی بر روی حوضچه‌های ته‌نشینی سارینا مطالعات آزمایشگاهی خود را انجام داد. مدل آزمایشگاهی وی در حوضچه ساده‌ای بدون مانع منحرف کننده جریان انجام شد. رودی^۲ و سلیک^۳ (۱۹۸۵) مدل ریاضی برای پیشگویی سرعت و میزان در تانک یا حوض ته‌نشینی ارائه شده بود، که در این مدل از روش حجم محدود^۴ استفاده شده است [۲].

مک کوروکدیل^۵ و همکاران (۱۹۸۸) در مدل آزمایشگاهی خود برای اندازه‌گیری سرعت جریان از لیزر داپلر^۶ استفاده کردند. آزمایشات تجربی آن‌ها به صورت منبعی برای محققین مورد توجه قرار گرفت [۳]. رودی و لین^۷ (۱۹۹۰) در مدلسازی حوضچه‌های ترسیب از مدل استاندارد توربولانس K-ε و روش احجام محدود، برای حل معادلات از روش کوک^۸ استفاده کردند [۴]. آرمینیو^۹ و لاروکا^{۱۰} (۱۹۹۶) برای مدل‌سازی حوضچه‌ها از دو مدل ریاضی RANS و SWE استفاده کردند [۷].

اشجاری و فیروزآبادی (۱۳۸۲) برای پیش‌بینی جریان در حوضچه‌ها از مدل آشفتگی غیرخطی K-ε و منحنی های FTC۱۱ استفاده کردند [۸]. تمایل و فیروز آبادی (۱۳۸۶) به مدلسازی عددی و بررسی اثرات تیغه ورودی و محل ورود سیال در بازده حوضچه‌های ترسیب اولیه با استفاده از مدل آشفتگی K-ε و منحنی FTC پرداختند [۹]. شاملو و بیات (۱۳۸۷) به بررسی مدل‌های مختلف آشفتگی با استفاده از مدل آشفتگی K-ε استاندارد، RNG و روش محسوس در تحلیل حوضچه‌های ترسیب اولیه به کمک نرم افزار Fluent پرداختند و نتایج حاصله را با دو مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند. بر اساس این نتایج روش K-ε و RNG نسبت به سایر روش‌ها در پیش‌بینی هیدرودینامیک‌های ترسیب مناسب- تر تشخیص داده شده است [۱۱].

۲- توصیف نرم افزار عددی مورد استفاده و معادلات حاکم

نرم افزار SSIIM به منظور شبیه سازی رسوب در آبگیرها و حوضچه‌های ترسیب برای مهندسی رسوب، هیدرولیک، محیط زیست و رودخانه طراحی شده است. این نرم افزار بر مبنای رویکرد حجم محدود با شبکه سازمان یافته سه بعدی طراحی شده و در آن معادلات ناویر استوکس و معادلات انتقال و انتشار برای حمل رسوب با الگوریتم SIMPLE و با استفاده از روش حجم کنترل حل می شوند. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در این نرم افزار، مدل k-ε استاندارد، مدل k-ε با بسط RNG، مدل k-ε محلی مینی بر سرعت آب، مدل k-ω با قوانین دیواره Wilcox's و مدل k-ω با قوانین دیواره k-epsilon می باشند. تحلیل جریان در حالت ماندگار صورت گرفته و از الگوریتم SIMPLE برای کوپل سرعت و فشار استفاده شده است. روش گسسته‌سازی معادلات مومنوم، افت و انرژی جنبشی آشفتگی و تنش‌های رینولدز روش پیشرو مرتبه دو و روش گسسته-

^۱- Dobbins

^۲- Rodi

^۳- Celik

^۴- Finite-Volume

^۵- M.C. Corquodale

^۶- laser doppler

^۷- Lyn

^۸- Quick Method

^۹- Armenio

^{۱۰}- la Rocca

^{۱۱}- Flow Through curve

سازی معادله فشار، روش استاندارد می‌باشد. نسخه مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، نسخه 1.0.0.1 تحت ویندوز نرم افزار SSIIM2 می‌باشد [۱۰].

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که برای جریان آشفته تراکم ناپذیر در یک هندسه سه بعدی توسط معادلات ناویر استوکس به ترتیب روابط (۱) و (۲) جهت محاسبه متغیرهای جریان استفاده می‌شوند. در مدل‌های آشفته مختلف، انرژی جنبشی آشفته‌گی نیز مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۰].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{U}_j) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_{xi} + \frac{\partial}{\partial x_j} [v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - U'_i U'_j] \quad (۲)$$

$$K = \frac{1}{2} \overline{U_i U_i} \quad (۳)$$

در روابط فوق، $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$: تنش رینولدز، U : سرعت جریان، t : زمان، ν : ویسکوزیته مولکولی، P : فشار، k : انرژی جنبشی آشفته‌گی، ρ : چگالی سیال و δ_{ij} : دلتای کرونکر می‌باشند.

در مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ ، انرژی جنبشی آشفته‌گی (k) بصورت زیر مدل می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T \partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \varepsilon \quad (۴)$$

جاییکه P_k بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = v_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (۵)$$

$$v_T = c_\mu \frac{K}{\varepsilon} \quad (۶)$$

K بصورت ε علامت گذاری شده و به صورت زیر در می‌آید:

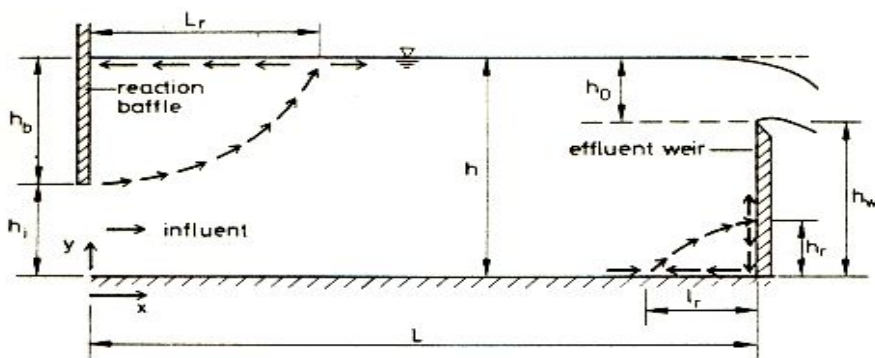
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T \partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، P_k ترم تولید آشفته‌گی و مقادیر ثابت‌های تجربی مورد استفاده به صورت زیر می‌باشند.

$$C_\mu = 0.09 \quad C_{1\varepsilon} = 1.43 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad \sigma_k = 1 \quad (۸)$$

۳. بررسی عددی هیدرولیک جریان سه بعدی حوضچه سارینا

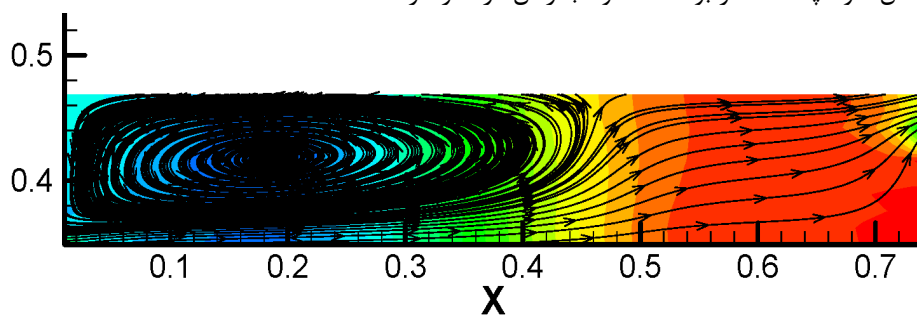
داده‌های آزمایشگاهی این مدل توسط امام و همکاران (۱۹۸۳) در آزمایشگاه ویندسور گردآوری شده است. هندسه مدل مورد مطالعه در یک مقطع طولی در مدل آزمایشگاهی است که در شکل (۱) نمایش داده شده است. جریان از قسمت ورودی که در روی کف حوضچه واقع شده است، وارد حوضچه شده و به طور کلی دو ناحیه چرخشی در طول حوضچه ایجاد می‌کند. یک ناحیه چرخشی بزرگ (Ir) در قسمت ورودی حوضچه نزدیک به سطح آزاد آب و یک ناحیه چرخشی با ابعاد کوچک‌تر (Lr) قسمت انتهایی حوضچه و در نزدیکی کف. هدف از این مدل‌سازی بررسی ابعاد این نواحی چرخشی و هیدرولیک جریان در حوضچه‌های ته نشینی می‌باشد.



شکل ۱: مشخصات هندسی فلوم آزمایشگاهی حوضچه سارینا [۶]

ارتفاع ورودی که در تراز کف تعبیه شده است برابر است با $H=5\text{ cm}$ ، ارتفاع آب $h=12\text{ cm}$ طول حوضچه $L=73\text{ cm}$ ، عرض حوضچه $W=20\text{ cm}$ و دبی در واحد عرض $q=109.4\text{ cm}^3/\text{scm}$ می‌باشد [۶]. در این مدلسازی، پس از امتحان مقادیر مختلف و تست حساسیت نسبت به ابعاد شبکه مورد نظر، ابعاد سلول‌های حوضچه $35 \times 15 \times 10$ به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید.

میدان جریان دائمی، غیر شناور و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده است. از مدل آشفتگی $K-\epsilon$ استاندارد در محاسبات استفاده شده است. برای کاهش خطای عددی ناشی از مجزا سازی معادلات از روش بالا دست مرتبه دو (SOU) و از الگوریتم Simple برای حل هم‌زمان فشار و سرعت استفاده شده است. جریان به صورت تک فازی در نظر گرفته شده است و چون غلظت ذرات موجود کمتر از 200 میلی گرم در لیتر است از اثر رسوبات و ذرات جامد معلق صرف نظر شده است و فقط میدان جریان داخل حوضچه مد نظر بوده است و آب زلال در نظر گرفته شده است.

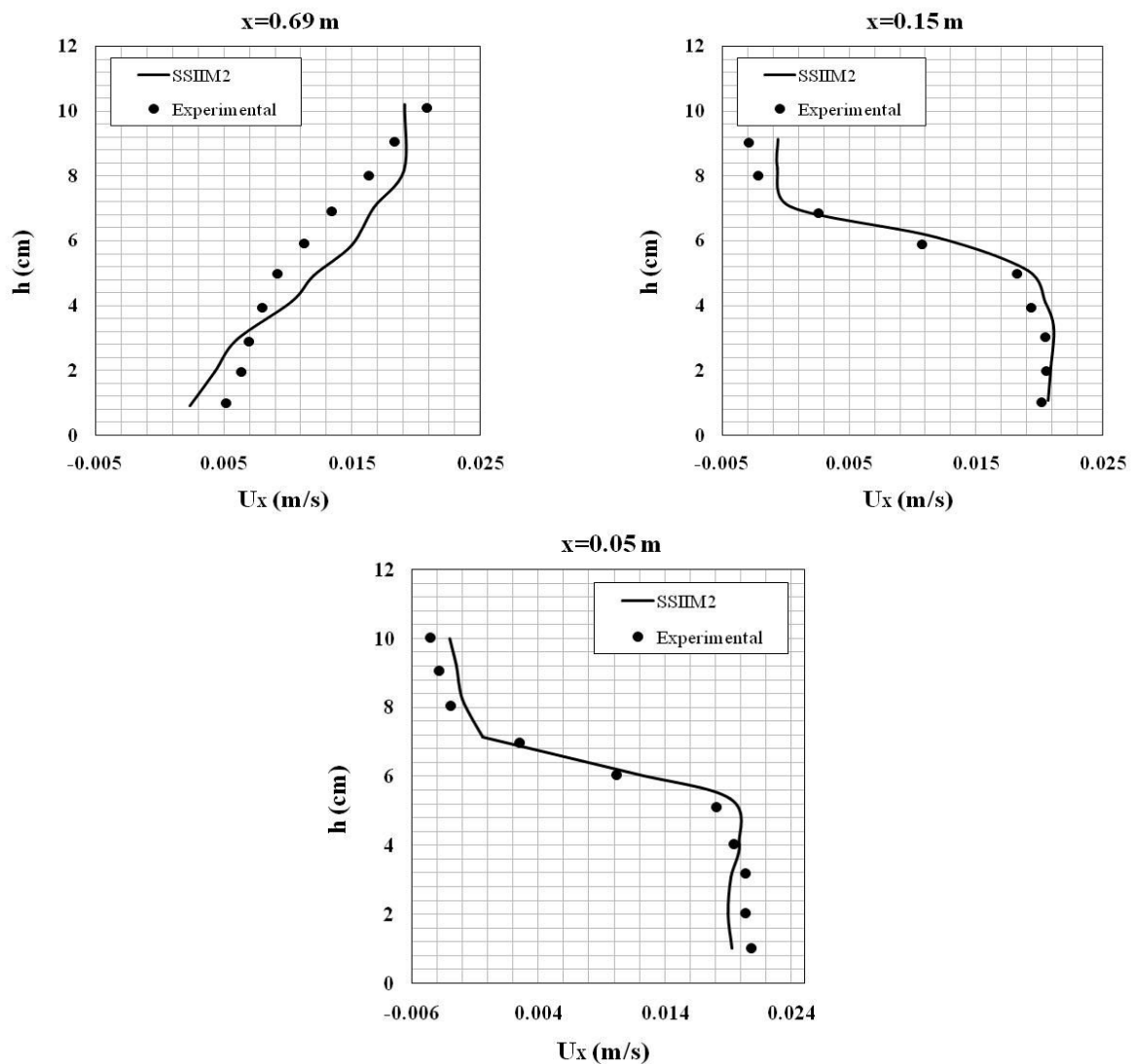


شکل ۲: ناحیه چرخشی ایجاد شده در عمق حوضچه

در این مدل، توزیع سرعت در ورودی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. در خروجی یک جریان کاملاً توسعه یافته ایجاد شده و فشار به صورت یکنواخت فرض می‌شود. مقادیر سرعت در خروجی با استفاده از درون‌یابی از داخل میدان به دست آمده و شرط عدم لغزش روی کلیه دیواره‌ها اعمال شده است. در سطح آزاد آب، فرض سطح صلب بدون اصطکاک در نظر گرفته شده که می‌تواند به صورت یک صفحه قرینه عمل کند. در نتیجه سرعت نرمال برابر با صفر بوده و گرادیان دیگر متغیرها هم برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

سرعت در ناحیه نزدیک به ورودی در مجاورت سطح آب و تا طول 45 سانتی متری خطوط جریان با مش بندی به ابعاد $35 \times 15 \times 10$ دارای مقادیر منفی می‌باشد که نشان دهنده وجود جریان برگشتی در این ناحیه می‌باشد. نتایج بدست آمده از مدل

عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و شکل (۳)، نتایج مقایسه پروفیل‌های سرعت را در مقاطع مختلف طولی ۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۶۹ متر در طول حوضچه و در صفحه X-Z نشان می‌دهد. محور افقی نمایانگر سرعت در جهت X و محور قائم ارتفاع حوضچه می‌باشد.



شکل ۳: توزیع پروفیل سرعت در مقاطع مختلف حوضچه

نتایج بدست آمده از نرم افزار SSIIM با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و در اکثریت مقاطع دارای انطباق نسبتاً خوبی می‌باشد. سرعت در ناحیه ورودی در مجاورت سطح آب و تا فاصله ۴۴ سانتیمتری دارای مقادیر منفی می‌باشد که نشان دهنده وجود یک جریان برگشتی در این ناحیه است. در جدول (۲) مقایسه نتایج عددی حاصله از مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.

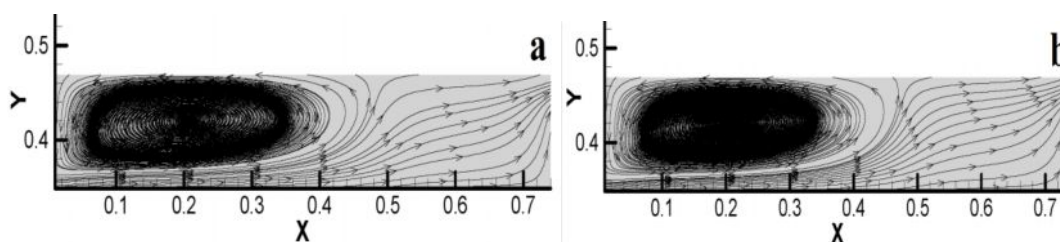
جدول ۲: درصد خطای سرعت حاصل از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

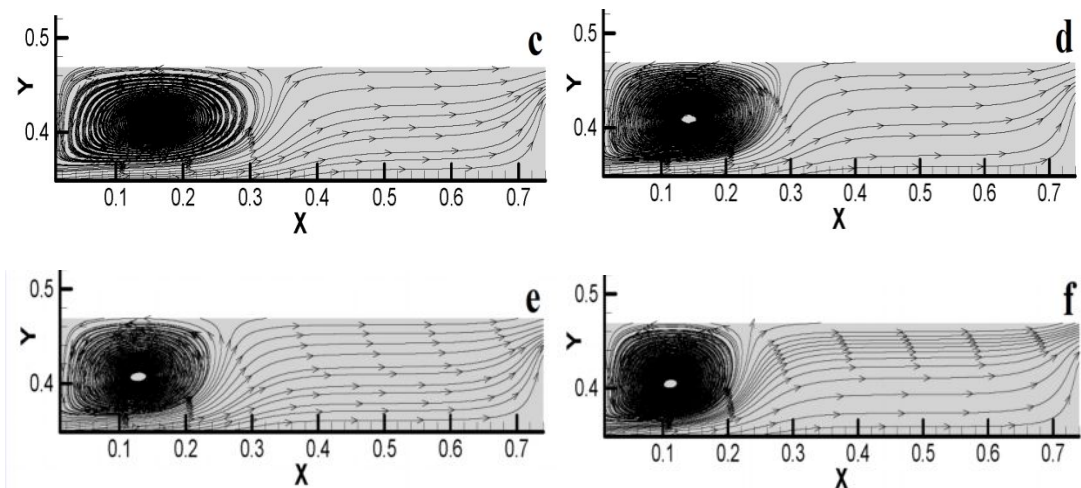
مقاطع مختلف طولی در جهت جریان	X=0.05	X=0.15	X=0.69
حداکثر خطا (%)	۲۶/۱۵	۳۱/۲۲	۳۰/۶۸
حداقل خطا (%)	۱/۲۶	۴/۰۲	۸/۰۰
میانگین خطا (%)	۱۳/۵۶	۲۲/۲۲	۱۷/۵۵

با توجه به جدول ۲، همانطور که مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی عددی SSIM2 مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند که نشانگر توانایی خوب این مدل عددی در مدل‌سازی توزیع سرعت در مقاطع مختلف حوضچه می‌باشد. شکل (۴) خطوط جریان ایجاد شده در مدل عددی حوضچه ویندسور را نشان می‌دهد. برای این منظور ناحیه چرخشی با دبی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۳).

جدول ۳: جزییات محاسبات مقادیر مختلف دبی برای حوضچه ویندسور

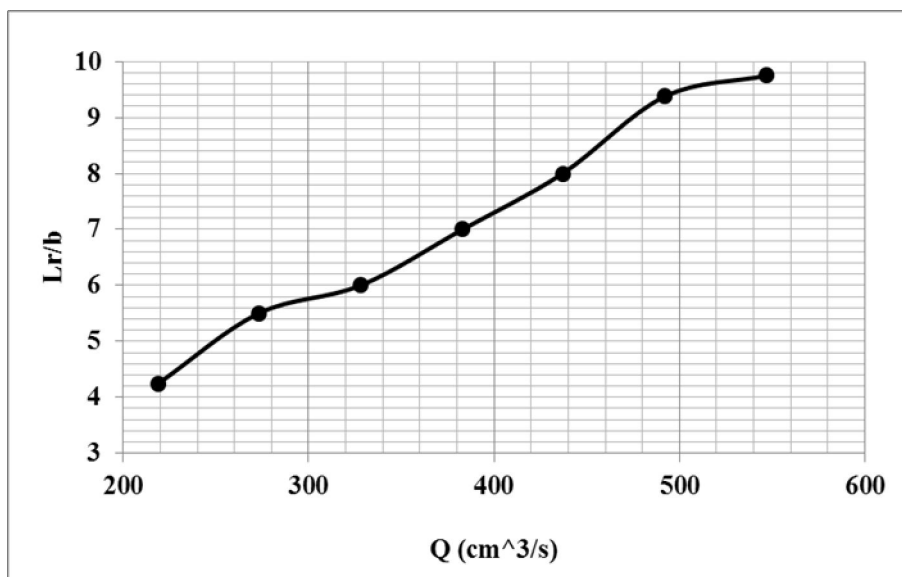
	سرعت متوسط (Cm/S)	طول ناحیه چرخشی (Cm)	دبی (Cm ³ /S)
a	۱/۷۹	۳۹	۵۴۷
b	۱/۵۹	۳۷/۵۰	۴۹۲
c	۱/۴۷	۳۲	۴۳۷
d	۱/۲۶	۲۸	۳۸۳
e	۱/۰۸	۲۴	۳۲۸
f	۱/۰۷	۲۲	۲۷۳





شکل ۴: خطوط جریان ترسیم شده به ازای دبی‌های مختلف

با توجه به اندازه‌گیری مقادیر شکل ۳ و شکل ۴ تغییرات دبی در برابر طول بی بعد شده ناحیه چرخشی جریان را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش دبی، طول بی بعد شده ناحیه چرخشی افزایش می‌یابد. همچنین قابل ذکر است که ارتفاع ناحیه چرخشی تغییری نداشته است (شکل ۵).



شکل ۵: بررسی تغییرات طول بی بعد شده ناحیه چرخشی بر حسب دبی ورودی

۴. نتیجه گیری

- نواحی چرخشی در چند قسمت در مدل سه بعدی به وجود آمده اند. بزرگترین ناحیه چرخشی در نزدیکی کف حوضچه در قسمت پائین ورودی ایجاد شده، همچنین ناحیه چرخشی کوچکی در قسمت بالای ورودی و در نزدیکی سطح آزاد آب ایجاد

شده و در نهایت چرخشی در گوشه های انتهایی حوضچه، در قسمت پائین ورودی ایجاد شده است. در مدل سه بعدی طول نواحی چرخشی در نزدیکی جداره ها، مقدار بیشتری را نسبت به محور مرکزی نشان می دهند .

- سرعت در ناحیه نزدیک به ورودی در مجاورت سطح آب و تا طول ۴۵ سانتی متری خطوط جریان با مش بندی به ابعاد ۳۵×۱۵۰ دارای مقادیر منفی می باشد که نشان دهنده وجود جریان برگشتی در این ناحیه می باشد.

- دبی ورودی یکی از پارامترهای مهم در ناحیه چرخشی در حوضچه می باشد بطوریکه با افزایش دبی، طول بی بعد شده ناحیه چرخشی افزایش می یابد. همچنین قابل ذکر است که ارتفاع ناحیه چرخشی تغییری نداشته است.

مراجع

- [1] Dobbins.W.E."Effects of turbulence on sedimentation",Transactions of ASCE ,109(2218).pp 629-656 (1944)
- [2] Celik, I., Rodi, W. and Stamou, A."Prediction of hydrodynamic characteristics of rectangular settling tanks".Proc. of the Int. Symp. Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Iowa City, Iowa, 641-651. 1985.
- [3]zhou j.A.McCorquodale, and A.M.Godo 1994 short circuiting and density interface in primary clarifiers Journal of Hydraul Eng. Vol .120,No.9
- [4] D.A.Lyn, W.Rodi, "Turbulence Measurement In Model Settling Tank",J.of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No.1,1990.
- [5] A.I.Stamou, E.W. Adams,. And W.Rodi, "Numerical Modeling Of Flow And Settling In Primary Rectangular Clarifiers", J. of Hydraulic Research, 27:665-682,1989.
- [6] I.Celik, W. Rodi, and A.I.Stamou,"Prediction Of Hydrodynamic Characteristics Of Rectangular Settling Tanks". Int. symposium of Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Iowa USA. ,1985.
- [7] Armenio, V. and M. LaRocca (1996). On the analysis of sloshing of water in rectangular containers: Numerical study and experimental validation. Ocean Engineering 23(8), 705-739.
- [8] Ashjari, M.A. and B. Firoozabadi (2003). Using the nonlinear $k-\epsilon$ in calculation of performance of settling tanks. ISME, 11th Int. Conf. Mech.Engineering, Mashhad, Iran.
- [9] Tamayol, A., B. Firoozabadi, and G. Ahmadi (2007)."Effects of inlet position and baffle configuration on the hydraulic performance of primary settling tanks." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE (accepted for publication).
- [10] Olsen, N.B.R. (2006). A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option. Department of hydraulic and environmental engineering, the Norwegian university of science and technology.

۱۱- ح شاملو ، ع. بیات "بررسی مدل های مختلف آشفتگی در تحلیل هیدرولیکی حوضچه های رسوبگذار اولیه با کمک نرم افزار Fluent. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران ، دانشگاه تهران ، ۱۳۸۵.

۱۲- ح. شاملو ، م. سیواکومار ، س.ل. لو ، اثرات آشفتگی جریان در حوضچه های ترسیب ، کنفرانس آسیایی در مدیریت آب و فاضلاب، ایران، تهران، ۱۹۹۸