

## Research Article

# Three-Dimensional Modeling of Flow Pattern and the Effect of Flow Guiding Blades on Sedimentation in Pre-Sedimentation Basins Using SSIIM and Fluent

J Khodadadian Miri\*<sup>1</sup>, B Aminnejad<sup>2</sup>, A Zahiri<sup>3</sup>

Received: October 17, 2021

Accepted: April 16, 2021

Received in Revised: March 20, 2022

Published online: September 23, 2023

1-PhD Student of Civil Engineering, Water Management and Resources, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2-Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen,

3-Associ. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

\*Corresponding Author, Email: J.khodadadian2014@gmail.com

## Abstract

### Background and Objectives

Pre-sedimentation basins are considered as the major and important components in water treatment process through conventional method. Because of the high cost of constructing these basins, which is approximately 30% of the total costs of water treatment plants, modeling and optimum performance of pre-sedimentation basins are very important. In pre-sedimentation basins, because of the existence of velocity gradients, secondary and rotational flows occur. In order to increase the performance of a pre-sedimentation basin (clarifier), it is essential to have a uniform and calm flow field. The use of suitable baffle configurations may help forming favorable flow field and increase the efficiency of the pre-sedimentation basins. In order to find the proper position of a baffle in a rectangular sedimentation basin, computational investigations are performed. The first step to optimize pre-sedimentation basin is accurate calculation of the velocity field and the volume of rotation zones. Flow guiding blades can also be used to depreciate the inlet jet and reduce turbulent kinetic energy. Because of the flow complexity and also the effects of scale, physical models can not solely provide a clear understanding of the physics governing the flow field and it is necessary to study this phenomenon numerically along with field and experimental studies. The numerical results were calibrated with experimental results of Shahrokhi et al. (2011) and Imam et al. (1984). Flow simulation was performed in 3D and flow velocity profiles were compared with the experimental results in different sections of a pre-sedimentation basin. Then, in order to sedimentation investigation in the pre-sedimentation basin, advection and dispersion equation of sediment concentration was solved simultaneously with the governing equations of flow.

### Methodology

The first step to optimize pre-sedimentation basins is accurate simulation of the velocity field and the volume of rotation zones. In the present study, numerical simulation of flow was investigated in a pre-sedimentation basin using SSIIM and Fluent models. Continuity and momentum equations were solved using finite volume method. Flow analysis was done steady by the SIMPLE algorithm for velocity and pressure coupling. Discrete method of continuity equations, momentum, turbulent kinetic energy, Reynolds stress drop and discretion of pressure equation are standard.

## **Findings**

The results of the vertical distribution of sediment concentration profiles in different sections of the basin were compared with the experimental and numerical results of other researchers. Finally, the effect of flow guiding blades on the flow pattern and the efficiency of sedimentation in the pre-sedimentation ponds were investigated. The comparison showed that there is a good agreement between numerical and experimental study with an average error of 6%.

## **Conclusion**

Flow rate is one of the effective parameters on creating a rotational zone inside the basins. With increasing the inlet flow rate from 0.002 to 0.01 cubic meters per second, the length of the rotational zone has increased 25% and the width of the rotating zone has increased 45%. The secondary and rotational currents formed at the entrance of the basin are two small rotational zones and approaching the middle of the basin and formation of flow separation zones, the number of rotating areas and their dimensions have increased. From the beginning to the middle of the basin, the shear stress is increased. In the sections  $x = 0.46$  m and  $x = 0.82$  m, the amount of shear stress is maximum. Amount of energy in the middle of the depth has decreased by 40% compared to the water level and about 60% compared to the floor of the sedimentation basin. It showed that there is a good agreement between the numerical and experimental results. It also indicated high ability of SSIIM in predicting distribution of sediment concentration profiles in pre-sedimentation basins. With increasing flow depth, the sediment concentration decreases. In the section  $x = 1.58$  m, the sediment concentration near the free surface is  $44 \text{ mg L}^{-1}$ , which decreased by 57.48% compared to the concentration of sediment in the basin bed. In the case without the guide blade, near the free surface of the stream, the sediment concentration was decreased. Also, in the middle of the basin, due to the turbulence of the flow and the rotational areas, the secondary current strength was maximal and decreased as it approached the end of the basin.

**Keywords:** Flow pattern, Flow guiding blades, Numerical model, Pre-sedimentation basins, Sediment concentration distribution, Turbulence models.

مقاله پژوهشی

## مدل‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان و تأثیر قرارگیری تیغه‌های هدایت جریان بر میزان

### رسوبگذاری درون حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی با استفاده از SSIIM و Fluent

جلال خدادادیان میری<sup>\*</sup>، بابک امین نژاد<sup>آ</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

تاریخ دریافت ویرایش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۷/۱

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش مهندسی مدیریت و منابع آب، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

\*نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: J.khodadadian2014@gmail.com

#### چکیده

حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی از اجزاء مهم و اصلی در فرآیند تصفیه آب به منظور شرب به شیوه متعارف به شمار می‌روند. تیغه‌های هدایت‌کننده جریان می‌توانند برای مستهلک کردن جت ورودی و کاهش انرژی جنبشی آشفته نیز به کار روند. اولین گام برای بهینه‌سازی حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی، محاسبه صحیح میدان سرعت و نیز موقعیت و وسعت نواحی چرخشی می‌باشد. در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی جریان در حوضچه پیش‌ته‌نشینی با استفاده از SSIIM و FLUENT مورد بررسی قرار گرفته و معادلات پیوستگی و مومنتوم با استفاده از روش احجام محدود حل شده‌اند. شبیه‌سازی جریان در حالت سه‌بعدی انجام شده و نتایج پروفیل‌های سرعت جریان در مقاطع مختلف حوضچه پیش‌ته‌نشینی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در انتهای این تحقیق، با قراردادن تیغه‌های هدایت‌کننده جریان، تأثیر این تیغه‌ها بر الگوی جریان و نرخ رسوبگذاری درون حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی مورد بررسی قرار گرفت. این مقایسه، مطابقت خوب با دقت خطای میانگین حدود ۶ درصد نتایج محاسباتی و مشاهداتی را نشان داد. سپس، معادله پخش و انتقال غلظت رسوب با معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان حل شده و نتایج توزیع قائم پروفیل‌های غلظت رسوب در مقاطع مختلف حوضچه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. این مقایسه نیز بیانگر انطباق مناسب با دقت خطای میانگین ۱۱ درصد نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی بوده و توانایی بالای مدل عددی SSIIM در پیش‌بینی توزیع پروفیل‌های غلظت رسوب در حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی نشان داد. در حالت بدون تیغه هدایت‌کننده در نزدیکی سطح آزاد جریان، غلظت رسوب کاهش شدیدی را نشان داد. همچنین در میانه حوضچه به دلیل آشفتگی جریان و نواحی چرخشی ایجاد شده، قدرت جریان ثانویه ماکزیمم بوده و با نزدیک شدن به انتهای حوضچه مجدداً این قدرت چرخش کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، توزیع غلظت رسوب، تیغه هدایت‌کننده جریان، حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی، مدل‌های آشفتگی، مدل عددی

## مقدمه

با توجه به اهمیت کیفیت آب شرب و تصفیه آن با کارایی بالا و بازدهی مناسب در فرآیند تصفیه خانه-های آب، عملکرد حوضچه پیش‌ته‌نشینی، مورد توجه قرار گرفته است. حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی نقش جداکننده ذرات معلق قابل ته‌نشینی از سیال را بر عهده دارند، به‌صورتی که در تصفیه‌خانه‌های آب در واحدهای قبل از حوضچه پیش‌ته‌نشینی با اضافه کردن منعقدکننده‌ها و اختلاط آن در حوضچه اختلاط سریع، اندازه ذرات افزایش یافته و زمان ته‌نشین شدن ذرات را کاهش می‌دهند. محققین بسیاری در زمینه کارهای آزمایشگاهی و مدلسازی‌های عددی حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی فعالیت نموده‌اند. دابینز (۱۹۴۴) در یک مطالعه تحلیلی و تجربی ته‌نشینی ذرات مستقل از هم با اندازه‌های یکنواخت را در یک جریانی که آشفتگی در آن کاملاً توسعه یافته بود بررسی کرد. او آشفتگی کاملاً توسعه یافته را به عنوان شرایطی که در آن، اگرچه سرعت در هر نقطه‌ای پیوسته بود، ولی مشخصات آماری کلیدی ثابت مانده بود، بیان کرد. شیبا و همکاران (۱۹۷۵) با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی، یک رویکرد برای تخمین پارامترهای مدل دینامیکی، در توضیح عملکرد حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی ارائه کردند. لارسن (۱۹۷۷) تحقیقات اولیه آزمایشگاهی خود را شروع کرد و با نتایج ثبت شده از مدل آزمایشگاهی خود، بر روی ارائه مدل ریاضی مناسب برای هیدرولیک حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی کوشید. امام و همکاران (۱۹۸۳) بر روی حوضچه ته‌نشینی ویندسور مطالعات آزمایشگاهی خود را انجام دادند. مدل آزمایشگاهی امام در حوضچه ساده‌ای بدون مانع منحرف‌کننده جریان انجام شد. رودی (۱۹۸۴) مدل کاملتری برای محاسبه جریان ارائه داد و در آن از معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن که ضرایب ثابت آن توسط خود رودی با انجام آزمایشات تجربی بدست آمده بود

استفاده گردید. مطالعات کروکودیل و همکاران (۱۹۸۸) بوسیله لیزر داپلر انجام شد. آزمایشات تجربی آنها به صورت منبعی برای بیشتر محققین مورد توجه قرار گرفت. با توجه به اینکه این مدل اهمیت فراوانی در مورد هیدرودینامیک مخازن و نیز حرکت رسوبات در ته‌نشینی و مدت زمان لازم برای رسوب‌گذاری بهینه دارد، محققان برای طراحی انواع مختلف سازه‌های هیدرولیکی توجه فراوانی به آن مبذول نمودند. لین و رودی (۱۹۹۰) بررسی آزمایشگاهی بر روی حوضچه ته‌نشینی اولیه کالسروهه با تمرکز بر قسمت ورودی حوضچه انجام دادند. نتایج شامل اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت افقی، قائم و پروفیل‌های آشفتگی بوده است. این مطالعه با قرارگیری تیغه هدایت‌کننده جریان در مقابل ورودی انجام شده است. اوبر و هاگر (۱۹۹۷) اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت و غلظت را بر روی حوضچه ته‌نشینی انتهایی لیماتال در سوئد انجام دادند. چهار حوضچه به صورت هم‌زمان برای اندازه‌گیری استفاده شدند که یکی از آنها به عنوان مرجع در نظر گرفته شد و در سه حوضچه دیگر در مراحل مختلف تغییراتی انجام شد و نتایج با حوضچه اول مقایسه شدند. اندازه‌گیری پروفیل‌ها برای اشکال و موقعیت‌های گوناگون ورودی و خروجی، با سرعت‌ها و غلظت‌های ورودی مختلف انجام شده است. توسط جایانته و همکاران (۲۰۰۴) شبیه‌سازی‌هایی برای بررسی هیدرودینامیک ذرات ته‌نشین شده در حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی انجام شده است. با مقایسه بین داده‌های تجربی نشان داده شده است که میدان جریان می‌تواند با استفاده از CFD محاسبه شود. تمایل و فیروزآبادی (۲۰۰۴) به شبیه‌سازی دوبعدی حوضچه اولیه در نرم‌افزار Fluent پرداختند و نتایج مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد و RNG را مقایسه نمودند. ناصر و همکاران (۲۰۰۵) یک مدل عددی دو بعدی یکنواخت برای مطالعه هیدرودینامیک حوضچه‌های ترسیب مستطیلی، تحت شرایط آشفتگی ایجاد کردند. برای فرمول بندی کردن

یک حوضچه پیش ته نشینی مستطیلی شکل با شیب صفر درجه می باشد که در آن معادلات ناویر استوکس به روش احجام محدود حل می گردند. مدلسازی بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی شاهرخی و همکاران (۲۰۱۱) صورت گرفته و توزیع پروفیل سرعت و توزیع قائم غلظت رسوب در مقاطع مختلف حوضچه پیش ته نشینی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد در حالت سه بعدی محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین مقایسه شده است. یاسین و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر قرارگیری بافل های در طول حوضچه های رسوب گیر پرداختند. آن ها همچنین توزیع غلظت رسوب در اعماق مختلف حوضچه های رسوب گیر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که موقعیت قرارگیری بافل در ارتفاع  $0.2$  از عمق حوضچه بهترین عملکرد را به لحاظ راندمان رسوبگذاری در حوضچه ته نشینی دارد. صانعی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی عملکرد صفحات مستغرق در رسوب زدایی از کف حوضچه رسوب گیر گردابی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که کارگذاری صفحات با ثابت نگه داشتن راندمان رسوب گذاری و تلفات دبی، توانسته است تغییر در سهم رسوبات کف حوضچه ایجاد کند.

میزان رسوبگذاری در حوضچه های پیش ته نشینی با دو مدل عددی بصورت سه بعدی که در مطالعات قبلی به آنها پرداخته نشده نیز مورد بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

استوار است. تحلیل جریان نیز در حالت ماندگار صورت گرفته و از الگوریتم *SIMPLE* برای کوپل سرعت و فشار استفاده شده است. روش گسسته سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، افت و انرژی جنبشی آشفتگی و تنش های رینولدز روش پیش رو مرتبه دو<sup>۲</sup> و روش گسسته سازی معادله فشار، روش استاندارد می باشد.

معادله جریان از روش انتگرال نواری برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر پیوستگی، مومنتوم و پخش و انتقال غلظت و انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاک آن استفاده کردند. گولا و همکاران (۲۰۰۷) شبیه سازی یک حوضچه با یک حوضچه استاندارد و یک حوضچه با وجود یک تیغه هدایت کننده جریان را بررسی کردند. در این شبیه سازی از نرم افزار *Fluent* برای انجام شبیه سازی ها استفاده شده است. این نرم افزار، جریان سیال را با حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی، که قانون بقای جرم و مومنتوم را توصیف می کنند، پیش بینی می کند. استامو (۲۰۰۸) به شبیه سازی حوضچه آتن پرداخت. او با استفاده از تعدادی دیواره منحرف کننده جریان، سعی در اصلاح هندسه حوضچه و بالا بردن راندمان آن داشته و نتایج نشان دهنده کاهش مسیرهای کوتاه و نواحی چرخشی موجود در حوضچه بوده است. لیو و همکاران (۲۰۰۸) به منظور بررسی جریان آشفتگی در حوضچه های پیش ته نشینی با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  اصلاح شده بر پایه فرضیات بوسینسک برای مدلسازی تنش های رینولدز و حل معادلات حاکم با استفاده از روش *HFAM* به شبیه سازی دو بعدی حوضچه های پیش ته نشینی پرداختند. مطالعه حاضر شامل شبیه سازی عددی هیدرولیک و رسوب جریان در با توجه به جمع بندی مطالعات پیشین، مطالعات انجام گرفته قبلی بیشتر در زمینه هیدرولیک جریان در حوضچه های پیش ته نشینی بوده ولی در این مطالعه تاثیر قرارگیری تیغه های هدایت کننده جریان و همچنین

## مواد و روش ها

### معادلات حاکم بر جریان

در این مطالعه، معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس با استفاده از روش احجام محدود سه بعدی<sup>۱</sup> حل می شوند. روش احجام محدود بر اساس گسسته سازی مستقیم شکل انتگرالی قوانین بقا در فضای فیزیکی

<sup>2</sup> Second order upwind

<sup>1</sup> Finite-Volume Method

مدل عددی، رسوب به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم می شود. برای محاسبه بار معلق از معادله انتقال - پخش (اولسن ۲۰۰۹) به شرح ذیل استفاده می گردد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial X_i} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial X_j} \left( \Gamma \frac{\partial c}{\partial X_j} \right) \quad [8]$$

در رابطه ۸،  $c$ : غلظت رسوب،  $\omega$ : سرعت سقوط،  $U$ : سرعت جریان،  $X$ : بعد فاصله و  $\Gamma$ : ضریب انتشار می باشد.

برای بار بستر، ون راین در سال ۱۹۸۷، رابطه ای را برای غلظت تعادلی رسوب در مجاورت بستر توسعه داد (ون راین ۱۹۸۷).

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad [9]$$

در رابطه ۹،  $d$  قطر ذرات رسوب،  $a$  تراز مبنا برای ارتفاع زبری،  $\tau$  تنش برشی بستر،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی،  $\rho_s$  و  $\rho_w$  چگالی آب و رسوب و  $v$  ویسکوزیته آب می باشد. از رابطه ون راین برای محاسبه بار بستر (qb) استفاده می شود:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho - \rho)g}{\rho}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{t - t_c}{t_c} \right]^{1.5}}{D_{50}^{0.3} \left[ \frac{(\rho - \rho)g}{\rho v^2} \right]^{0.1}} \quad [10]$$

ضخامت فرم بستر نیز توسط رابطه ای از ون راین محاسبه می شود:

$$\frac{\Delta}{d} = 0.11 \left( \frac{D_{50}}{d} \right)^{0.3} \left( 1 - e^{-\frac{t-t_c}{2t_c}} \right) \left( 25 - \left[ \frac{t-t_c}{t_c} \right] \right) \quad [11]$$

زبری موثر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$k_s = 3D_{90} + 1.1\Delta \left( 1 - e^{-\frac{25\Delta}{\lambda}} \right) \quad [12]$$

که در روابط ۱۱ و ۱۲،  $d$  عمق آب،  $\Delta$  ضخامت فرم بستر،  $K_s$  زبری موثر و  $\lambda$  طول فرم بستر می باشند (اولسن ۲۰۰۹).

در این مطالعه جهت بررسی هیدرولیک جریان در حوضچه های پیش ته نشینی، پروفیل های سرعت بی بعد

با توجه به شکل دیفرانسیلی قانون بقا  $\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{F} = Q$  قدم مهم در روش احجام محدود،

$$\int_{\Omega_J} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega_J} \bar{\nabla} \cdot \bar{F} d\Omega = \int_{\Omega_J} Q d\Omega \quad [1]$$

با استفاده از قضیه دیورژانس گوس،

$$\int_{\Omega_J} \bar{\nabla} \cdot \bar{F} d\Omega = \int_S \bar{F} \cdot d\bar{S} \quad [2]$$

شکل انتگرالی قانون بقا برای هر حجم کنترل  $\Omega_J$  مربوط به نقطه  $J$  به صورت زیر در می آید.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_J} U d\Omega + \int_S \bar{F} \cdot d\bar{S} = \int_{\Omega_J} Q d\Omega \quad [3]$$

معادله ی فوق با شکل گسسته ی آن جایگزین می شود که در آن انتگرال حجم به شکل مقادیر میانگیری شده روی سلول و انتگرال سطح به شکل مجموع کل بسته ی حجم مورد نظر بیان می شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_J \Omega_J) + \sum_{faces} \bar{F} \cdot \Delta \bar{S} = Q_J \Omega_J \quad [4]$$

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتوم که برای جریان آشفته در سیال تراکم ناپذیر در یک هندسه سه بعدی به ترتیب روابط ۵ و ۶ می باشند. در مدل های آشفتگی مختلف، انرژی جنبشی آشفتگی نیز مطابق رابطه ۷ تعریف می شود (اولسن ۲۰۰۹).

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad [5]$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + (\bar{U}_j) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_{xi} + \frac{\partial}{\partial x_j} [v \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{U}_i' \bar{U}_j'] \quad [6]$$

$$K = \frac{1}{2} \overline{U_i' U_i'} \quad [7]$$

که در این روابط،  $\rho \bar{U}_i \bar{U}_i'$  تنش رینولدز،  $U_i$  و  $U_j$  به ترتیب سرعت جریان در جهت  $x$  و  $y$ ،  $t$  زمان،  $\lambda$  ویسکوزیته مولکولی،  $p$  فشار،  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $\rho$  چگالی سیال و  $g_{xi}$  شتاب گرانشی در جهت  $x_i$  می باشند. در این

توسط مدل‌های عددی SSIIM2 و Fluent مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شده در اعماق مختلف برای مقاطع مختلف حوضچه پیش‌ته‌نشینی با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف

جدول ۱ - مشخصات شبکه‌بندی در حالات مختلف.

Model	تعداد مش در حوضچه			مجموع
	x	y	z	
A	۱۵۶	۸۵	۱۸	۲۳۹۸۶۰
B	۲۰۶	۱۰۴	۲۰	۴۲۸۳۰۰
C	۲۶۷	۱۱۵	۲۲	۶۷۵۰۰۰
D	۲۸۴	۱۲۰	۲۶	۸۸۷۵۰۰

۶۷۵۰۰۰ سلول برای ادامه کار انتخاب گردید. شکل ۱، پلان و نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی میدان محاسباتی در حوضچه مستطیلی شاه‌رخی و همکاران (۲۰۱۱) را نشان می‌دهد که تعداد کل سلول‌های شبکه‌بندی میدان محاسباتی پس از انجام تست حساسیت نتایج به شبکه‌بندی، تعداد ۶۷۵۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد.

### مشخصات کانال‌های آزمایشگاهی کانال

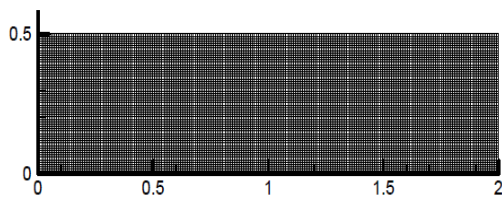
#### شاه‌رخی و همکاران (۲۰۱۱)

در مطالعه آزمایشگاهی شاه‌رخی و همکاران (۲۰۱۱)، طول حوضچه مستطیلی (L) ۲ متر، عرض آن (W) ۰/۵ متر و نسبت عمق آب به طول حوضچه (H/L) ۰/۱۵۵ می‌باشد. عمق جریان ورودی به حوضچه (H<sub>in</sub>) ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع سرریز خروجی (H<sub>w</sub>) ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. دبی جریان ورودی به حوضچه (Q) ۰/۰۰۲ متر مکعب بر ثانیه، عمق جریان (H) ۰/۳۱ متر، عدد رینولدز ورودی (Re) ۳۹۷۲، قطر نیمی از ذرات رسوب (d) در محدوده ۱۰۶-۷۵ میکرومتر و نیمی دیگر در محدوده ۱۵۰-۱۰۶ میکرومتر، مدت زمان آزمایش (t) ۱۵ دقیقه، غلظت رسوب ورودی (C<sub>0</sub>) ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و عدد فرود جریان ورودی (Fr) ۰/۰۴ می‌باشد. نمای شماتیک حوضچه مستطیلی در شکل ۲ نشان داده شده است (شاه‌رخی و همکاران، ۲۰۱۱).

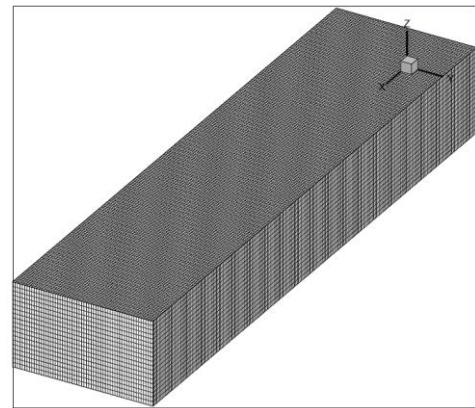
### شبکه‌بندی و شرایط مرزی حاکم بر مساله

در این مطالعه، ورودی حوضچه از شرط مرزی سرعت معین با مقدار سرعت میانگین ۰/۰۴ متر بر ثانیه و مرزهای خروجی میدان (خروجی حوضچه ترسیب)، از شرط مرزی جریان خروجی بهره می‌گیرد. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، شرط مرزی تقارن به سطح آب اعمال شده است. شرط مرزی دیواره برای مرزهای صلب اعمال شده و دیواره‌ها مطابق مدل آزمایشگاهی از لحاظ هیدرولیکی صاف در نظر گرفته شده‌اند. همچنین یکی از پارامترهای مهم در سرعت اجرای مدل، شبکه‌بندی مناسب منطقه‌ای می‌باشد که جریان در آن برقرار است. جهت انتخاب مناسب‌ترین شبکه‌بندی با در نظر گرفتن دو مقدار دقت و سرعت همگرایی، چهار مدل با شبکه‌بندی متفاوت برای حالت حوضچه شبیه‌سازی شد که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

پس از مدلسازی هر چهار شبکه و اجرای نرم‌افزار، با مقایسه توزیع سرعت شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه درصد خطای بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی نتایج نشان داد که ریزتر کردن شبکه از حالت مش C به بعد اثر چندانی در کاهش خطاها نداشته بگونه‌ای که با افزایش حدود ۳۲ درصدی تعداد سلول‌ها، خطا در حدود ۲/۴۰ درصد بهبود می‌یابد که با توجه به زمان زیادی که برای مدل کردن حالات مختلف آن لازم بود، شبکه‌بندی نوع C

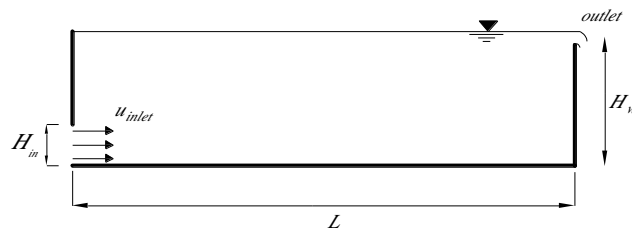


(الف)



(ب)

شکل ۱- شبکه بندی دامنه حل در حوضچه پیش ته نشینی در حالت الف) پلان و ب) نمای سه بعدی.



شکل ۲- مشخصات هندسی فلوم آزمایشگاهی (شاهرخی و همکاران، ۲۰۱۱).

ورودی  $(Fr) = 0.04$  توسط مدل های عددی SSIM و Fluent نشان داده شده است.  $Z, X$  به ترتیب فاصله در جهت محور  $X$  و  $Z$  حوضچه می باشند.  $U_0$  سرعت ورودی جریان بوده که مقدار آن برابر  $0.04$  متر بر ثانیه می باشد. مدل آشفتگی مورد استفاده در نرم افزار فلونت، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد می باشد.

با توجه به شکل ۳، پروفیل سرعت در کلیه مدل های آشفتگی در ابتدای حوضچه روند منظم خود را طی کرده و با نزدیک شدن به انتهای حوضچه از مقطع  $x/L=0.05$  تا  $x/L=0.75$  سرعت ماکزیمم به کف حوضچه جابجا می شود. توزیع غیریکنواخت سرعت جریان در مناطق ابتدایی حوضچه به دلیل ایجاد نواحی چرخشی، آشفتگی بودن جریان و جریان های ثانویه در ابتدای حوضچه می باشد. با توجه به اینکه جریان های ثانویه، حتی در کانال های مستقیم نیز وجود دارند، سرعت محوری، در نقطه ای پایین تر از سطح آزاد، حدوداً در فاصله ۲۵ درصد برابر عمق، به مقدار

### کانال آزمایشگاهی امام و همکاران (۱۹۸۳)

در ادامه جهت مقایسه بیشتر نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، از مدل آزمایشگاهی امام و همکاران در سال ۱۹۸۳ استفاده شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، ارتفاع ورودی حوضچه ترسیب که در تراز کف تعبیه شده برابر است با  $H=5$  cm، عمق جریان  $h=12$  cm، طول حوضچه  $L=73$  cm، عرض حوضچه  $W=20$  cm و دبی در واحد عرض  $q=109.4$  cm<sup>3</sup>/scm می باشد.

### نتایج و بحث

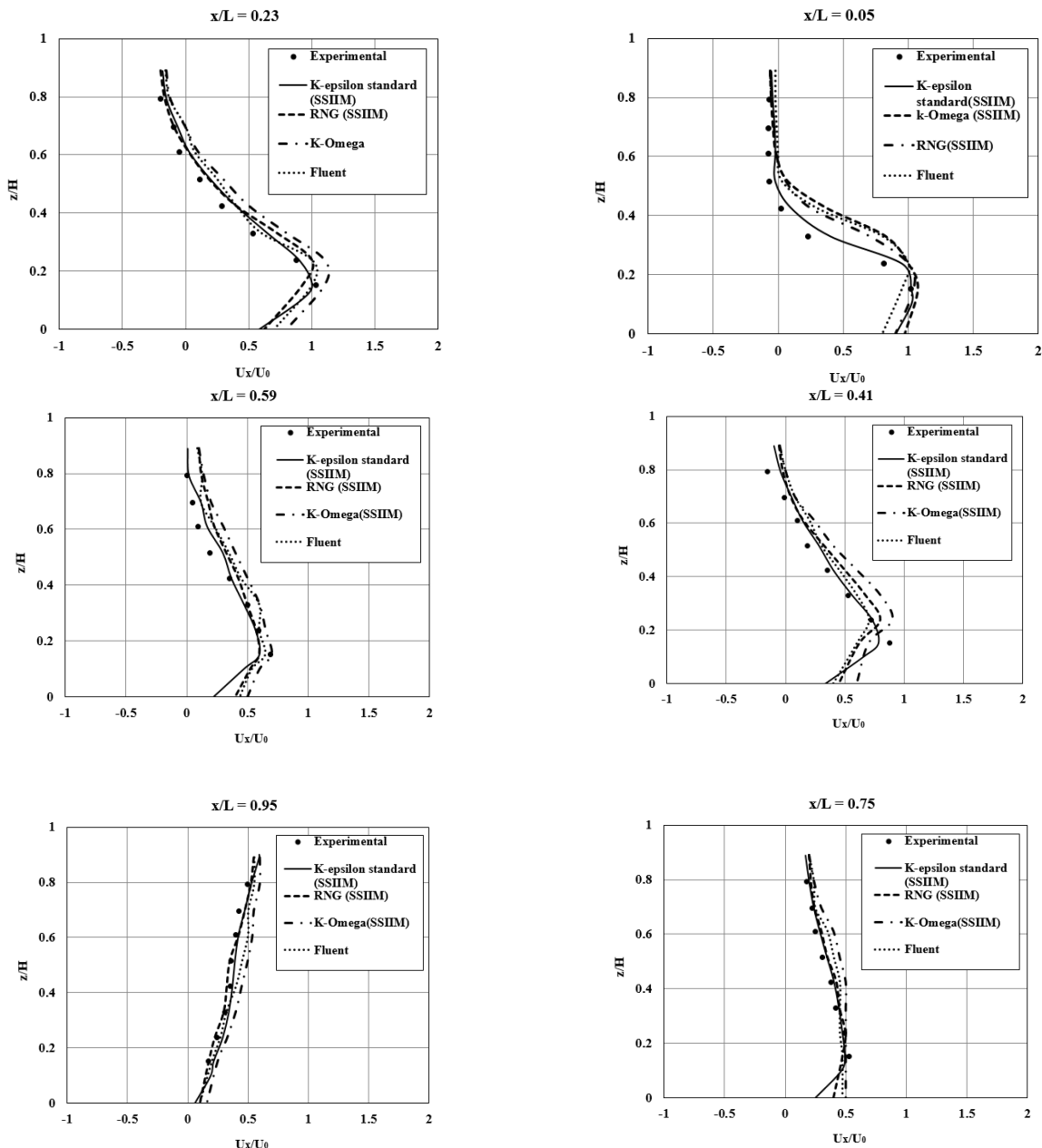
#### مدلسازی الگوی جریان

در شکل ۳، مطابق مطالعه آزمایشگاهی شاهرخی و همکاران، پروفیل های سرعت شبیه سازی شده  $(U_x/U_0)$  در اعماق مختلف بی بعد شده حوضچه  $(z/H)$ ، برای مقاطع مختلف  $(x/L)$   $0.05, 0.23, 0.41, 0.59, 0.75$  و  $0.95$  و مدل های آشفتگی مختلف به ازای دبی ثابت ورودی  $0.02$  مترمکعب بر ثانیه و عدد فرود جریان



حاصل از مقایسه مقادير عددي حاصله از مطالعه حاضر و مقادير آزمایشگاهی را در مقاطع مختلف حوضچه ترسيب نشان می دهد.

ماکزيم می رسد. با توجه به شکل ۳، نتایج عددي بدست آمده از شبیه سازی با مدل آشفتگی k-ε استاندارد نسبت به مدل های دیگر، تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. جدول ۲، میانگین درصد خطای



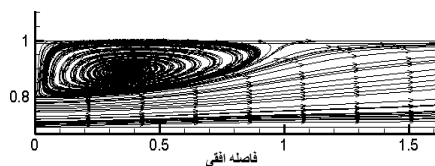
شکل ۳- مقایسه مقادير شبیه سازی عددي سرعت در مقاطع مختلف حوضچه پيش ته نشيني با نتایج آزمایشگاهی.

نتایج آزمایشگاهی نشان داده که این مطلب بیانگر برتری این مدل نسبت به مدل های دیگر می باشد. شکل ۴، خطوط جریان ترسيم شده در حوضچه را به ازای

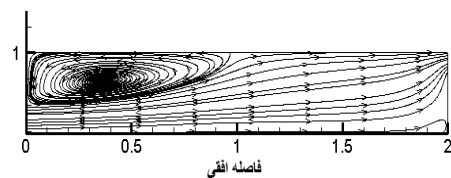
جدول ۲، نشانگر انطباق نسبتاً خوب نتایج عددي با نتایج آزمایشگاهی با دقت خطای میانگین حدود ۶ درصد می باشد. همچنین مدل آشفتگی K-ε standard نسبت به مدل های دیگر آشفتگی مطابقت بیشتری را با

دبی‌های مختلف ورودی ۰/۰۰۲، ۰/۰۱، ۰/۱ و ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. جدول ۲- میانگین درصد خطای حاصل از مقایسه پروفیل سرعت در مقاطع مختلف حوضچه با مقادیر آزمایشگاهی.

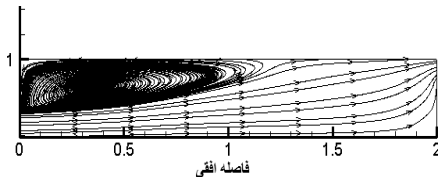
مقطع	x/L					
	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۷۵	۰/۹۵
SSIIM(K-ε standard)	۷/۵۸	۷/۱۲	۶/۱۸	۶/۰۳	۲/۹۲	۱/۲۵
SSIIM(K-ε RNG)	۸/۴۲	۸/۰۵	۷/۵۵	۷/۲۰	۳/۸۵	۲/۰۵
SSIIM(K-ω)	۱۰/۵۰	۱۰/۰۰	۱۱/۶۰	۱۱/۲۰	۶/۵۰	۵/۲۰
Fluent(K-ε standard)	۸/۹۰	۹/۱۰	۸/۵۰	۸/۰۰	۴/۲۰	۳/۹۰
Fluent(K-ε RNG)	۸/۸۰	۸/۵۰	۸/۲۵	۸	۴/۴۵	۲/۲۰
Fluent(K- ω)	۱۲/۱۰	۱۱/۵۰	۱۲/۲۰	۱۲	۸/۶۰	۶/۵۰



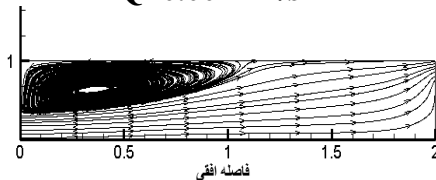
$Q=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q=0.002 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q=0.2 \text{ m}^3/\text{s}$

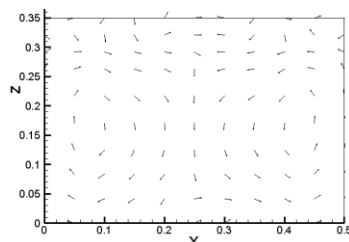


$Q=0.1 \text{ m}^3/\text{s}$

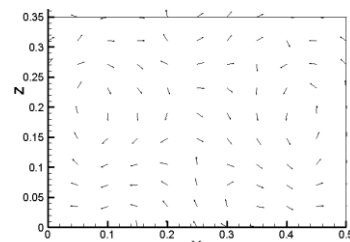
شکل ۴- ناحیه چرخشی ایجاد شده در حوضچه به ازای دبی‌های مختلف ورودی.

جریان با افزایش دبی از ۰/۱ به ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه دچار تغییرات زیادی نشده است. به دلیل اهمیت گردابه‌های حلزونی در انتقال رسوبات بستر، شکل ۵ جریان‌های ثانویه شکل گرفته در مقاطع مختلف حوضچه را نمایش می‌دهد.

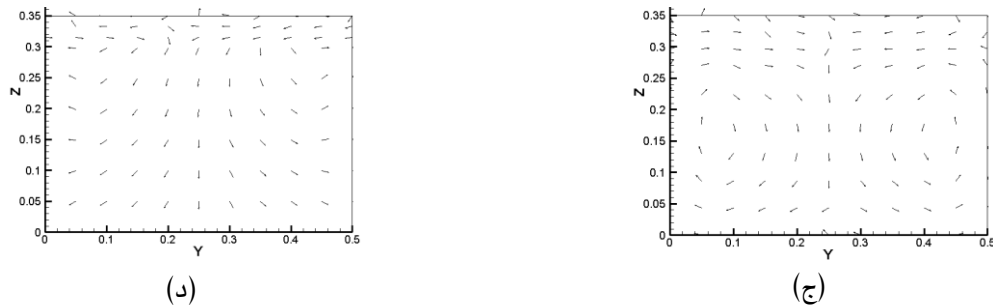
با توجه به شکل ۴ دبی جریان یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر ایجاد ناحیه چرخشی داخل حوضچه می‌باشد. بطوریکه با افزایش دبی جریان ورودی از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه، طول ناحیه چرخشی جریان حدود ۲۵ درصد افزایش و عرض ناحیه چرخشی حدود ۴۵ درصد افزایش یافته است. طول ناحیه چرخشی



(ب)



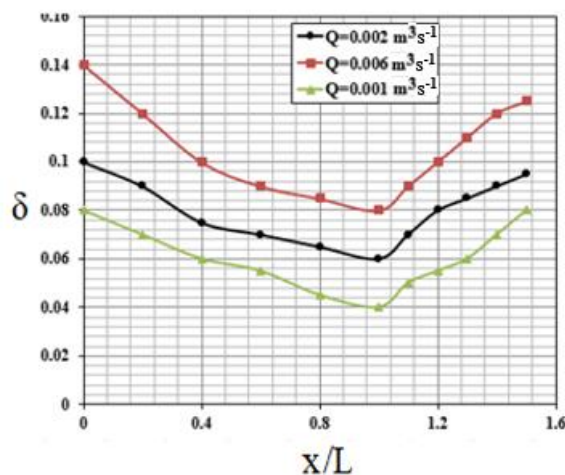
(الف)



شکل ۵- جریانهای ثانویه شکل گرفته در مقاطع مختلف الف) ۰.۲۰، ب) ۰.۵۰، ج) ۱ و د) ۱.۵۰ متری از ورودی.

نواحی چرخشی و ابعاد آنها بزرگتر شده و دوباره با نزدیک شدن به انتهای حوضچه، جریانهای چرخشی کوچک و تعداد آنها کم شده است. شکل ۶ تغییرات قدرت جریان ثانویه ( $\delta$ ) در امتداد حوضچه رسوبگیر را با استفاده از نرم افزار SSIM2 نشان می دهد.

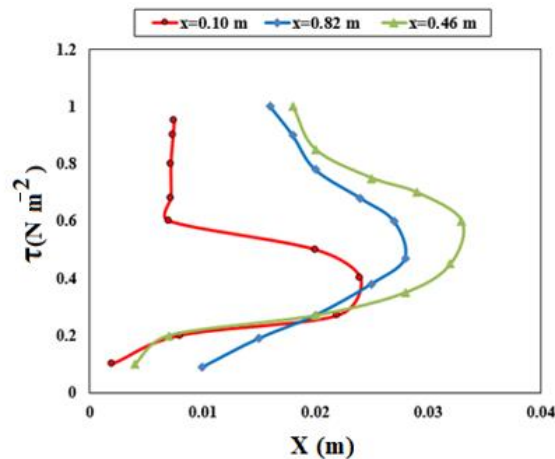
با توجه به شکل ۵، جریانهای ثانویه و چرخشی شکل گرفته در ورودی حوضچه دو ناحیه چرخشی کوچک بوده و با نزدیک شدن به اواسط حوضچه، به دلیل شکلگیری نواحی جدایی جریان و به دلیل عدم تعادل بین گرادیان فشار جانبی، نیروی گریز از مرکز و نیروی برشی ناشی از انحنای خطوط جریان تعداد



شکل ۶- تغییرات قدرت جریان ثانویه در امتداد حوضچه پیش ته نشینی.

۰/۰۴ نشان می دهد. هر چه از ابتدای حوضچه فاصله گرفته و به وسط حوضچه نزدیکتر می شویم، مقدار حداکثر تنش برشی از کف فاصله می گیرد.

جهت بررسی تنش برشی در مقاطع مختلف حوضچه، شکل ۷ توزیع پروفیل تنش برشی در مقاطع مختلف سازه حوضچه رسوبگیر را به ازای دبی ثابت ورودی ۰/۰۰۲ مترمکعب بر ثانیه و عدد فرود جریان ورودی

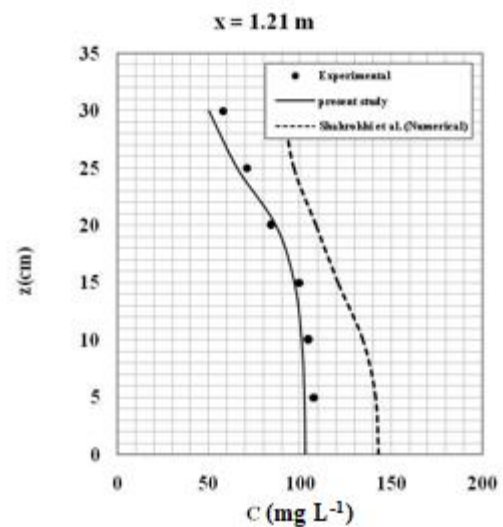
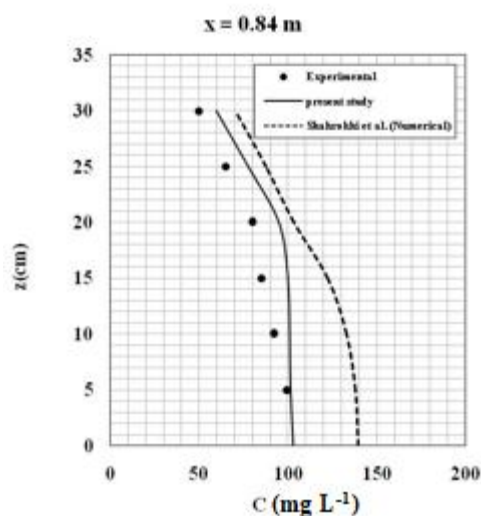


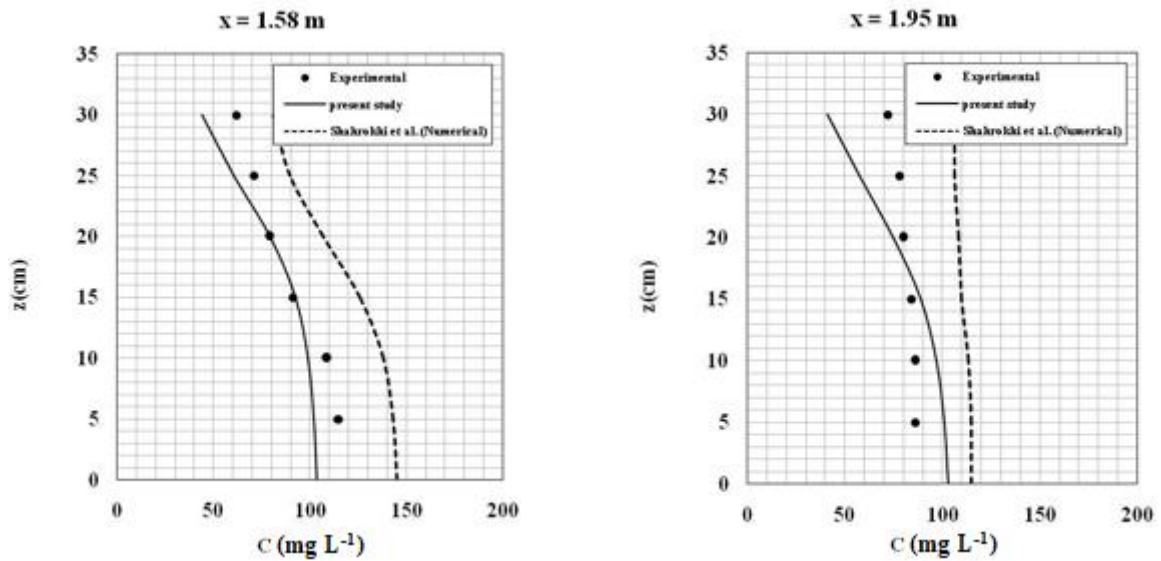
شکل ۷- توزیع پروفیل تنش برشی در مقاطع مختلف حوضچه.

ورودی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج عددی حاصله، برگرفته از مطالعه عددی شاهرخی و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد که در آن جهت بررسی توزیع پروفیل‌های غلظت رسوب جریان از مدل عددی *Flow 3D* استفاده شده است.

### مدل‌سازی غلظت رسوب

پروفیل‌های غلظت رسوب (C) در اعماق مختلف حوضچه (Z)، برای مقاطع مختلف (X) ۸۴، ۱۲۱، ۱۵۸ و ۱۹۵ سانتیمتر از ابتدای حوضچه به ازای دبی ثابت ورودی ۰/۰۰۲ مترمکعب بر ثانیه و غلظت رسوب

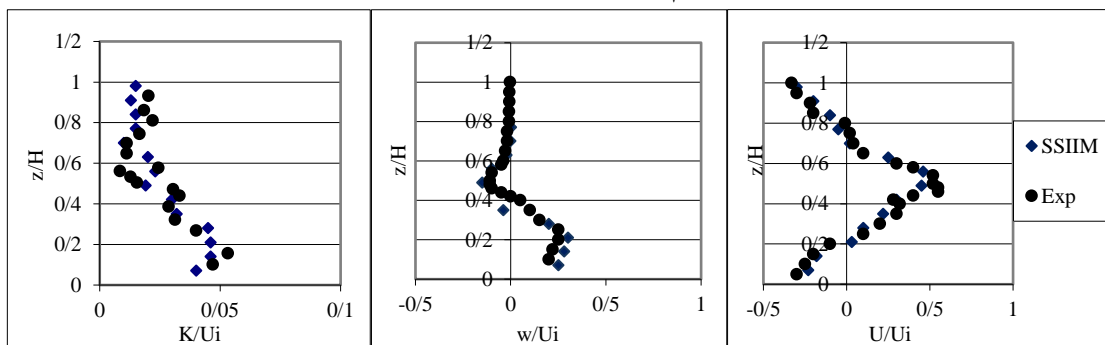




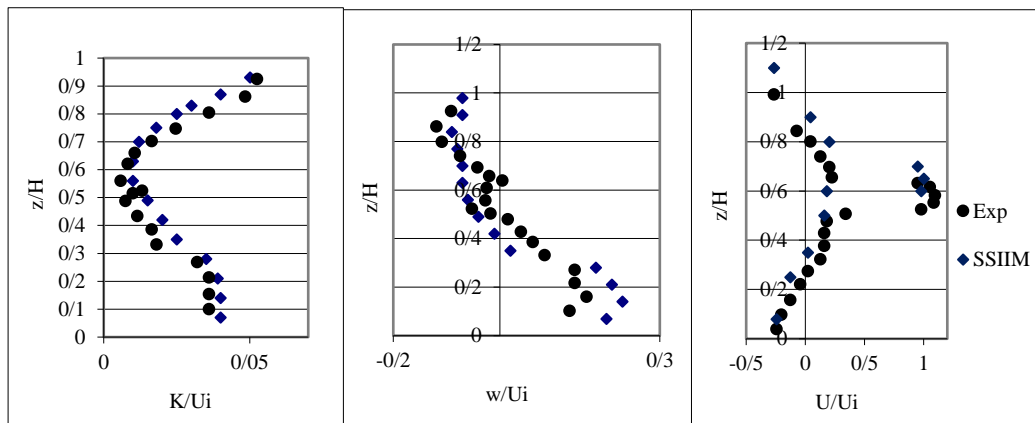
شکل ۸- بررسی توزیع غلظت رسوب در مقاطع مختلف در حوضچه پیش ته نشینی.

است. در این مطالعه آزمایشگاهی طول حوضچه  $L = 250\text{ cm}$  ، عرض آن  $w = 90\text{ cm}$  و ارتفاع آن  $H = 17.3\text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. شکل های ۹ و ۱۰ مقایسه پروفیل های سرعت در جهت  $x$  ، سرعت در جهت  $y$  ، و آشفتگی را در نزدیکی ورودی حوضچه در فاصله  $X/L = 0.016$  در هر دو بافل یک طرفه و دوطرفه نشان می دهد. همچنین کانتورهای سرعت افقی و خطوط جریان ترسیم شده در حالت های بافل یک طرفه و دوطرفه به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.

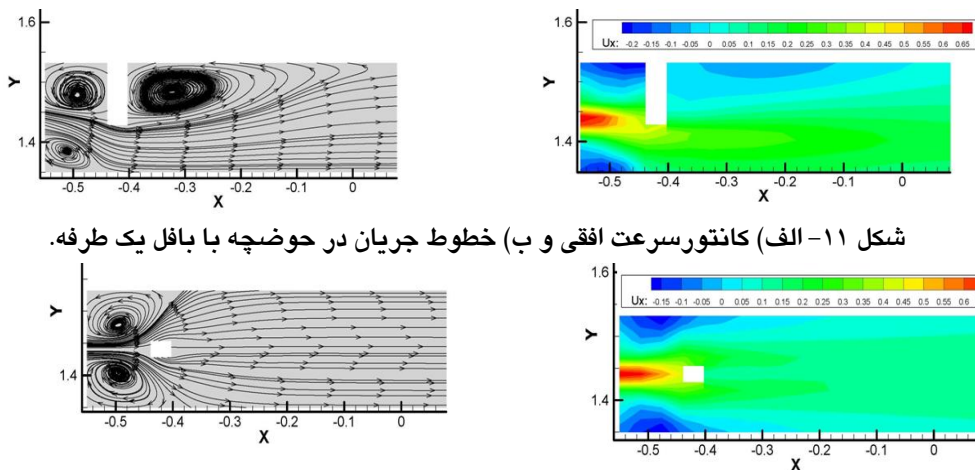
با توجه به شکل ۸ همانطور که مشاهده می شود، با افزایش عمق، غلظت رسوب کاهش می یابد و در نزدیکی سطح آزاد کاهش شدیدی را نشان می دهد بطوریکه در مقطع  $x = 1.58\text{ m}$  از ورودی حوضچه، غلظت رسوب در نزدیکی سطح آزاد به مقدار  $44$  میلی گرم بر لیتر رسیده که نسبت به غلظت رسوب در کف به مقدار  $57\%/48$  کاهش یافته است. در این مطالعه دو حالت مختلف بافل قرار گرفته در مسیر ورودی بررسی شده و نتایج آن با حالت بدون بافل مقایسه شد. دو حالت در نظر گرفته شده برای ورودی با توجه به مطالعه آزمایشگاهی لین و رودی در سال ۱۹۹۰ انجام شده



شکل ۹- مقایسه پروفیل های سرعت بی بعد شده  $U, W, K$  در  $X/L = 0.016$  ، بافل یک طرفه .



شکل ۱۰- مقایسه پروفیل‌های سرعت بی بعد شده  $U, W, K$  در  $x/L=0.016$ ، با فل دو طرفه.



شکل ۱۱- الف) کانتور سرعت افقی و ب) خطوط جریان در حوضچه با بافل یک طرفه.

شکل ۱۲- الف) کانتور سرعت افقی و ب) خطوط جریان در حوضچه با بافل دو طرفه.

## نتیجه‌گیری کلی

آزمایشگاهی، خط‌هایی در نزدیک بستر به خصوص در مناطق نزدیک ناحیه ورودی حوضچه مشاهده شده که این تفاوت می‌تواند به دلیل اختلاف الگوی جریان در مقطع ورودی باشد. سرعت‌های جریان شبیه‌سازی شده با مدل عددی SSIIM تطابق بهتری را نسبت به مدل عددی Fluent با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. به منظور بررسی الگوی جریان و نحوه پخش و انتقال رسوب در حوضچه پیش‌ته‌نشینی، با توجه به نتایج توزیع غلظت رسوب بدست آمده از مدل‌سازی عددی، پروفیل‌های توزیع غلظت رسوب در اعماق مختلف حوضچه، برای مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی و عددی سایر محققین مقایسه شدند. در نزدیکی سطح آزاد جریان، غلظت رسوب

ابتدا جهت بررسی هیدرولیک جریان در حوضچه‌های پیش‌ته‌نشینی، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده در اعماق مختلف برای مقاطع مختلف حوضچه پیش‌ته‌نشینی با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی بدست آمده از شبیه‌سازی با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد نسبت به مدل‌های دیگر، تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی شاهرخی و همکاران (۲۰۱۱) داشت. پروفیل سرعت در ابتدای حوضچه روند منظم خود را طی کرده و با نزدیک شدن به انتهای حوضچه از مقطع  $x/L=0.05$  تا  $x/L=0.75$  سرعت حداکثر به کف حوضچه انتقال می‌یابد. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج

دو حالت بافل قرار داده شده روند یکسان و مقادیر نسبتاً یکسانی را نشان داد. نتایج در دو حالت حوضچه با بافل و حالت ساده بدون بافل نشان داد که بافل دوطرفه میدان جریان نزدیکتر به حالت ایده آل را داراست.

کاهش شدیدی را نشان می دهد بطوریکه در مقطع  $x=1.58\text{ m}$  از ورودی حوضچه، غلظت رسوب در نزدیکی سطح آزاد به مقدار  $44$  میلی گرم بر لیتر رسیده که نسبت به غلظت رسوب در کف به مقدار  $57/48\%$  کاهش می یابد. همچنین نتایج سرعت در جهت  $x$  در هر

### منابع مورد استفاده

- Brooks HN, 1963. Discussion of boundary shear stresses in curved trapezoidal channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 89(3): 205-212.
- Dobbins WE, 1944. Effect of turbulence on sedimentation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 109(1): 629-656.
- Goula AM, Thodoris MK, Karapantsios D and Zouboulis AI, 2007. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment, case study: the influence of a feed flow control baffle. *Chemical Engineering Journal* 140(3): 110-121.
- Imam E, and Mc Corquodale JA, 1983. Numerical modeling of sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(12): 235-248.
- Jayanti S and Narayanan S, 2004. Computational study of particle-eddy interaction in sedimentation tanks. *Journal of Environmental Engineering* 130(10): 101-116.
- Larsen P, 1977. On the Hydraulics of Rectangular Settling Basins. Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund, Sweden.
- Liu B, Huang S, Chen D, and Chen W, 2008. Two-dimensional numerical simulation of primary settling tanks by hybrid finite analytic method. *Journal of Environmental Engineering* 134(4): 200-214.
- Liu B, Luo L, Bai Y, Wang S and Zhang J, 2010. Two-dimensional LDV measurement, modeling and optimal design of rectangular primary settling tanks. *Journal of Environmental Engineering* 136(5): 501-507.
- Lyn DA and Rodi W, 1990. Turbulence measurement in model settling tank. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(1):380-395.
- McCorquodale JA, Moursi AM and El-Sebakhy IS, 1988. Experimental study of flow in settling tanks. *Journal of Environmental Engineering* 114(5): 460-482.
- Naser GH, Karney BW and Salehi AA, 2005. Two-dimensional simulation model of sediment removal and flow in rectangular sedimentation basin. *Journal of Environmental Engineering* 131(12): 320-332.
- Olsen NBR, 2009. A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Moltiblock Option. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, the Norwegian University of Science and Technology.
- Rodi W, 1984. *Turbulence Model and Their Application in Hydraulics, A State-of-the-Art Review*. Second edition. University of Karlsruhe. West Germany.
- Shahrokhi M, Rostami F, Azlin MD and Syafalni MAM, 2011. Numerical modeling of the effect of the baffle location on the flow field, sediment concentration and efficiency of the rectangular primary sedimentation tanks. *World Applied Sciences Journal* 15(9):1296-1309.
- Shahrokhi M, Rostami F and Said Syafalni MAM, 2011. The computational modeling of baffle configuration in the primary sedimentation tanks. Pp. 392-396. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. 2-6 October, Singapore.
- Shiba S, ASCE AM and Inoue Y, 1975. Dynamic response of settling basin. *Journal of the Environmental Engineering Division* 101(5):101-122.

- Stamou AI, 2008. Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. *Chemical Engineering and Processing* 47(8): 1179-1189.
- Tamayol A, Nazari M, Firoozabadi B and Nabovati A, 2004. Effects of turbulent models and baffle position on hydrodynamics of settling tanks. *International Journal of Science & Technology*. 13(3): 255-260.
- Ueberl J and Hager WH, 1997. Improved design of final settling tanks. *Journal of Environmental Engineering* 123(3): 842-861.
- Van Rijn LC, 1987. Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, Netherlands. Ph.D Thesis, Delft University of Technology.