

Numerical Simulation of Sediment Distribution in Vortex Settling Basin

SAREM NOROUZI^{1*}, ALINAGHI ZIAEI²

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
(Received: Nov. 7, 2020- Revised: Nov. 22, 2020- Accepted: Dec. 14, 2020)

ABSTRACT

One of the main challenges associated with the development of irrigation systems and other water distribution systems is the sediment removal from the inlet channel. Vortex settling basin (VSB) is one of the types of sediment extractors with small size and high efficiency which removes the sediments using the vortices of the flow. Studies on the proper design of VSBs are generally based on experimental and physical models which are highly costly and time-consuming. In this study, SSIIM model was evaluated for the simulation of flow field and sediment distribution in a VSB and the results were compared with experimental measurements. After ensuring the relative agreement of the model results with experimental measurements, the effect of different design parameters such as inlet sediment size, bottom outlet discharge ratio, and bed level difference between inlet and outlet channels were investigated. The results showed that among the design parameters, trap efficiency of the VSB is more sensitive to the sediment size. By increasing the bottom discharge ratio, the efficiency increases, but this increase in the efficiency barely exceed 4 % for bottom discharge ratios higher than 10 %. In addition, increasing the bed elevation difference between the inlet and outlet channels can increase the efficiency up to 18 % for fine-grained sediments, while this increase is less than 10 % for coarse-grained sediments.

Keywords: Vortex Settling Basin (VSB), Trap Efficiency, SSIIM Numerical Model, Design Parameters.

شبیه‌سازی عددی توزیع رسوب در حوضچه رسوب‌گیر گردابی

صارم نوروزی^{۱*}، علی‌نقی ضیائی^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲۴)

چکیده

یکی از چالش‌های اساسی در توسعه سیستم‌های آبیاری و دیگر شبکه‌های انتقال آب، حذف رسوبات موجود در جریان ورودی به این سیستم‌ها می‌باشد. حوضچه رسوب‌گیر گردابی (VSB) یکی از انواع رسوب‌گیرهای با اندازه کوچک و راندمان بالاست که با استفاده از گردابه‌های جریان، رسوبات را حذف می‌کند. مطالعات در مورد طراحی بهینه حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی عموماً بر پایه مدل‌های آزمایشگاهی و فیزیکی صورت گرفته است که نیازمند صرف هزینه زیاد بوده و زمان‌بر می‌باشد. در این پژوهش مدل SSIIM به منظور شبیه‌سازی میدان جریان و توزیع رسوب در VSB مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. پس از اطمینان از انطباق نسبی نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، اثر پارامترهای طراحی مختلف همچون اندازه ذرات رسوب و ورودی، نسبت تخلیه از کف و اختلاف کف کانال‌های ورودی و خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای طراحی مورد مطالعه، راندمان VSB بیشترین حساسیت را به اندازه رسوبات ورودی نشان می‌دهد. با افزایش نسبت تخلیه از کف، راندمان افزایش می‌یابد اما این افزایش راندمان در نسبت‌های تخلیه بیشتر از ۱۰ درصد کمتر از ۴ درصد می‌باشد. همچنین افزایش اختلاف کف کانال ورودی و خروجی می‌تواند راندمان را تا حدود ۱۸ درصد برای رسوبات ریزدانه افزایش دهد، در حالی که این افزایش راندمان برای رسوبات با اندازه بزرگتر، کمتر از ده درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حوضچه رسوب‌گیر گردابی، راندمان تله‌اندازی، مدل عددی SSIIM، پارامترهای طراحی.

مقدمه

به جز رودخانه‌های کوهستانی و سدهای بزرگ آب‌های انحرافی حاوی مقادیر قابل توجهی رسوب می‌باشند که باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای در شبکه‌های آبرسانی می‌شوند. کاهش ظرفیت انتقال آب کانال‌ها، گرفتگی آبپاش‌ها و قطره چکان‌ها و فرسایش پوشش کانال‌ها و غیره، قسمتی از این مشکلات می‌باشد. در کنار این مشکلات، هزینه زیاد و نیاز به زمان، برای تصفیه این آب‌ها، از دیگر مشکلات است. بی‌توجهی به رسوبات وارده به آبگیرها موجب انتقال رسوبات به داخل تاسیسات آبی و ته نشین شدن آن‌ها در قسمت‌های مختلف شبکه‌ی انتقال می‌شود، که این امر مشکلات زیادی را بوجود می‌آورد.

حوضچه رسوب‌گیر گردابی^۱ (VSB) یکی از انواع رایج رسوب‌گیرهای نوع پیوسته می‌باشد که در مکانیسم آن، با استفاده از گردابه‌های تولید شده می‌توان بار رسوب معلق و بار رسوب کف را تصفیه نمود. برخلاف رسوب‌گیرهای کانال شکل که ته‌نشینی

رسوبات تنها از طریق نیروی ثقل و کاهش سرعت جریان صورت می‌گیرد، جریان گردابه‌ای عامل کلیدی در راندمان بالای حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی می‌باشد. وجود گردابه مرکزی و جریان‌های ثانویه درون VSB موجب گردیده است که در یک راندمان برابر، ابعاد این نوع رسوب‌گیر بسیار کوچک‌تر از دیگر رسوب‌گیرهای کلاسیک باشد و به‌طور گسترده‌ای در مجاری ورودی سیستم‌های آبرسانی و شبکه‌های انتقال آب بکار گرفته شود.

بر اساس نحوه اتصال کانال‌های ورودی و خروجی در VSB که به صورت مماس بر بدنه نصب می‌شوند، امکان ایجاد جریان ساعتگرد و پادساعتگرد درون حوضچه بوجود می‌آید. همین نحوه اتصال باعث می‌گردد که رسوبات در اثر ایجاد جریان‌های ثانویه به سمت دیواره رانده شده و ته‌نشین شوند و سپس با حرکت بر روی کف حوضچه که به صورت مخروطی شکل و با شیب ملایم ساخته می‌شود، از خروجی کف خارج گردند و جریان با رسوب

منطبق نبوده و دارای زاویه می‌باشد. بنابراین جریان حول محور قائم متقارن نخواهد بود. (Athar et al., 2003). Athar et al. (2002) را برای دو هندسه مورد آزمایش در پژوهش (Athar et al., 2002) مورد اندازه‌گیری قرار داده است. پس از انجام اندازه‌گیری‌ها معلوم گردید که توزیع سرعت در قسمت‌های مختلف VSB با هم یکسان نبوده و کانال‌های ورودی و خروجی باعث انحراف میدان جریان از توزیع سرعت رانکین می‌شوند.

مولفه‌های سرعت مماسی و شعاعی و قائم در نوع خاصی از هندسه رسوب‌گیر توسط (Keshavarzi and Gheisi, 2006) اندازه‌گیری شده و خطوط جریان ترسیم گردیده است. (Ziaei, 2007) جریان در حوضچه را در حالت آرام شبیه‌سازی نمود. Ziaei (2012) درون حوضچه را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی نمود. Ziaei (2012) درون حوضچه را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی نمود. Ziaei (2012) درون حوضچه را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی نمود. Ziaei (2012) درون حوضچه را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی نمود. Ziaei (2012) درون حوضچه را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی نمود.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در مورد میدان جریان و رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی نشان می‌دهد که عموم مطالعات تا به امروز به صورت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بوده و با استفاده از مدل‌های فیزیکی صورت گرفته است که نیازمند صرف هزینه زیاد و اندازه‌گیری‌های زمان‌بر است و در نهایت منجر به ارائه روابط تجربی و نیمه‌تجربی به منظور طراحی حوضچه‌ها می‌گردد. (Sheikh Rezazadeh Niku et al., 2018) نیز با شبیه‌سازی جریان درون حوضچه رسوب‌گیر گردابی به مقایسه عملکرد مدل‌های تلاطمی در شبیه‌سازی میدان جریان پرداخت.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در مورد میدان جریان و رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی نشان می‌دهد که عموم مطالعات تا به امروز به صورت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بوده و با استفاده از مدل‌های فیزیکی صورت گرفته است که نیازمند صرف هزینه زیاد و اندازه‌گیری‌های زمان‌بر است و در نهایت منجر به ارائه روابط تجربی و نیمه‌تجربی به منظور طراحی حوضچه‌ها می‌گردد. (Sheikh Rezazadeh Niku et al., 2018) نیز با شبیه‌سازی جریان درون حوضچه رسوب‌گیر گردابی به مقایسه عملکرد مدل‌های تلاطمی در شبیه‌سازی میدان جریان پرداخت.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در مورد میدان جریان و رسوب در حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی نشان می‌دهد که عموم مطالعات تا به امروز به صورت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بوده و با استفاده از مدل‌های فیزیکی صورت گرفته است که نیازمند صرف هزینه زیاد و اندازه‌گیری‌های زمان‌بر است و در نهایت منجر به ارائه روابط تجربی و نیمه‌تجربی به منظور طراحی حوضچه‌ها می‌گردد. (Sheikh Rezazadeh Niku et al., 2018) نیز با شبیه‌سازی جریان درون حوضچه رسوب‌گیر گردابی به مقایسه عملکرد مدل‌های تلاطمی در شبیه‌سازی میدان جریان پرداخت.

کمتر از کانال خروجی خارج شود (Paul et al., 1991).

در مطالعات صورت گرفته در مورد میدان جریان و راندمان تله‌اندازی رسوبات در حوضچه‌های رسوب‌گیر، عموماً سعی بر افزایش راندمان VSB از طریق تغییر در پارامترهای هندسی در مدل‌های آزمایشگاهی و ارائه روابطی جهت طراحی بوده است. در بین کارهای صورت گرفته می‌توان به مطالعات (Ansari and Athar, 2013; Chapokpour et al., 2011; Ziaei, 2000; Zhou et al., 1989; Mashauri, 1986; Sanmuganthan, 1985; Ogihara and Sakaguchi, 1984; Svarovsky, 1981; Curi et al., 1979; Cecen and Bayazit, 1975; Salakhov, 1975; Sullivan et al., 1972; Velioglu, 1972; Vokes and Jenkins, 1943) اشاره نمود.

Paul et al., (1991) پارامترهای هندسی VSB را بررسی نموده و در انتها هندسه جدیدی که دارای راندمان تصفیه بالاتری بود را ارائه دادند. در یکی از هندسه‌های ارائه شده، برخلاف طراحی‌های گذشته، تنها یک سوم پایینی جریان در کانال ورودی، که حامل بیشترین رسوب است به درون VSB وارد می‌شود. در این تحقیق نشان داده شده است که وجود یک منحرف کننده (صفحه‌ای C شکل که نصف ارتفاع VSB را پوشش دهد) برای افزایش راندمان تصفیه (مخصوصاً ذرات ریز دانه) الزامی است.

Athar et al., (2002) نتایج مطالعات بر روی راندمان تصفیه دو نوع VSB را ارائه نمود. ایشان نشان داد که توزیع سرعت درون VSB در قسمت‌هایی از میدان جریان که در فاصله بیشتری از کانال‌های ورودی و خروجی قرار دارد از الگوی گردابه رانکین پیروی می‌کند و همچنین با اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت، معادلاتی رگرسیونی را برای تقریب مولفه‌های میدان جریان ارائه نمود.

در پژوهش‌هایی توزیع سرعت در یک گردابه ترکیبی رانکین^۱ مورد مطالعه قرار گرفته است (Vastistas 1989; Julien, 1985; Anwar, 1967). در این مطالعات سرعت‌های شعاعی و مماسی مورد توجه بوده است و نشان داده شد که الگوی گردابه، انطباق زیادی با سیستم گردابه رانکین دارد و الگوی جریان متأثر از کانال‌های ورودی و خروجی می‌باشد. (Rea, 1984) جریان‌های ثانویه را درون یک مخزن گردابی گزارش نمود. تغییرات مؤلفه‌های سرعت در یک VSB نیز در تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است (Paul et al., 1991; Zhou et al., 1989; Mashauri, 1986; Curi et al., 1979). مطالعات آزمایشگاهی (Ziaei, 2000) نیز نشان داد که در جریان پادساعت‌گرد، گردابه مرکزی پیچیده‌تر خواهد بود. بدین معنی که محور مخروط هوا^۳ بر محور قائم VSB

که در آن $i=1,2,3$ و U_j میانگین سرعت، ρ چگالی آب، x مقیاس هندسی مکان، P فشار آب و δ_{ij} کورنکر دلتا^۲ می‌باشد. اولین عبارت در سمت چپ رابطه (۱) عبارت غیرماندگار و عبارت بعدی مربوط به همرفت جریان^۳ است. عبارت اول در سمت راست معادله مربوط به فشار بوده و عبارت دوم بیانگر تنش رینولدز^۴ است.

معادلات به روش حجم کنترل^۵ گسسته‌سازی می‌شوند و در گسسته‌سازی عبارت همرفت از طرح Power-law استفاده شده است (Patankar, 1980). طرح Power-law عبارت شار پخشیدگی^۶ را بر اساس عدد پکلت^۷ کاهش می‌دهد. در این مدل از روش حجم محدود^۸ و طرح‌های Power-law و Upwind مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات (Patankar (1980) و از الگوریتم سیمپل^۹ برای مرتبط نمودن فشار و پیوستگی استفاده می‌شود. در مدل تلاطمی $k-\omega$ که در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی میدان جریان مورد استفاده قرار گرفته است، معادله اصلی برای لزجت تلاطمی به صورت ذیل می‌باشد (Wilcox, 2000):

$$v_T = \frac{k}{\omega} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که ω نرخ ویژه اتلاف تلاطم جنبشی (k) می‌باشد و k به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma v_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* k \omega$$

که P_k تولید تلاطمی^{۱۰} می‌باشد.

به جای استفاده از اتلاف k به عنوان متغیر دوم، در این مدل از ω استفاده می‌شود که آن را نرخ اتلاف ویژه^{۱۱} می‌نامند. معادله‌ای که برای مدل‌سازی ω بکار می‌رود به صورت ذیل است:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma v_T \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2$$

که در آن، ضرایب معادله برابر با $\sigma = 0.5$ ، $\alpha = 0.09$ ، $\beta^* = 0.09$ ، $\beta = 0.075$ ، $\alpha = 0.09$ ، $\beta = 0.075$ می‌باشد. معمولاً مدل $k-\omega$ نسبت به مدل $k-\epsilon$ پخشیدگی تلاطمی را کمتر برآورد می‌کند. بدین معنی که این مدل ممکن است طول ناحیه چرخش^{۱۲} را بیشتر برآورد کند، در حالی که مدل $k-\epsilon$ طول این ناحیه را کمتر برآورد خواهد نمود.

جریان و رسوب در مطالعات گوناگون در مورد سازه‌های رسوب گیر کلاسیک بکار گرفته شده است (Almeland et al., 2019). از مزایای عمده مدل SSIIM می‌توان به شبیه‌سازی توانمند جریان و رسوب در یک شبکه سازگار شونده با امکان در نظر گرفتن تغییرات بستر، امکان شبیه‌سازی جریان در هندسه‌های پیچیده به علت استفاده از شبکه غیرمتعامد و همچنین رابط گرافیکی قوی در مقایسه با دیگر مدل‌های موجود اشاره نمود (Sheikh (Rezazadeh Niku et al., 2018; Olsen, 2007).

در این پژوهش با توجه به هندسه سه‌بعدی جریان درون VSB و وجود جریان با سطح آزاد، شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان و رسوب در VSB با استفاده از مدل SSIIM مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر پارامترهای طراحی مختلف همچون اندازه رسوبات ورودی، درصد تخلیه از کف حوضچه و اختلاف ارتفاع کف کانال‌های ورودی و خروجی و تاثیر آن‌ها بر راندمان تله اندازی حوضچه با استفاده از مدل SSIIM مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مدل عددی

SSIIM یک برنامه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که به منظور شبیه‌سازی میدان جریان و توزیع رسوب در رودخانه‌ها و کانال‌های آبیاری و رسوب‌گیرها در یک شبکه محاسباتی غیر متعامد و در هندسه‌های منحنی‌الخط استفاده می‌شود که امکان شبیه‌سازی میدان جریان در هندسه‌های پیچیده و مدور همچون VSB را فراهم می‌نماید. از مزایای عمده این مدل استفاده از شبکه محاسباتی سازگار شونده^۱ است که در هر گام زمانی بر اساس تغییرات کف و سطح آب، تغییر می‌کند (Olsen, 2007).

در مدل SSIIM به منظور حل میدان جریان در حالت متلاطم، معادلات ناویر استوکس در یک فضای سه‌بعدی حل می‌گردند. معادلات ناویر استوکس برای یک جریان غیر قابل تراکم (چگالی ثابت) به صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۱)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \right)$$

8 Finite volume
9 SIMPLE
10 Production of turbulence
11 Specific dissipation rate
12 Recirculation zones

1 Adaptive grid
2 Kronecker delta
3 Convective
4 Reynolds stress
5 Control volume
6 Diffusive flux
7 Peclet number

برای غلظت رسوب در لایه نزدیک کف ارائه نمود که آن را C_{bed} نامیده و از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w V^2} \right]^{0.1}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

d قطر ذره در حال سقوط و a طول مشخصه است، که برابر با ارتفاع زبری‌ها در نظر گرفته می‌شود. τ تنش برشی کف، τ_c تنش برشی بحرانی (آستانه حرکت ذره براساس منحنی شیلدز)، ρ_s و ρ_w چگالی آب و رسوب، ν لزجت آب و g شتاب جاذبه می‌باشد.

علاوه بر بار معلق، بار کف q_b را نیز می‌توان محاسبه نمود. رابطه Van Rijn (1987) برای بار کف به صورت ذیل می‌باشد. (رابطه ۱۰)

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left[\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w V^2} \right]^{0.1}}$$

که q_b نرخ انتقال رسوبات در کف بر واحد عرض می‌باشد. میزان تغییرات کف نیز در مدل SSIIM بر اساس غلظت رسوبات در سلول‌های نزدیک کف و استفاده از معادله پیوستگی محاسبه می‌گردد.

مدل آزمایشگاهی برای مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی

به منظور سنجش کارایی مدل SSIIM و صحت نتایج بدست آمده از آن نتایج آزمایشگاهی (Athar et al. (2002, 2003) استفاده گردیده است. Athar et al. (2003) میزان راندمان رسوب برای رسوبی از نوع سیلت درشت و همچنین میانگین مولفه‌های سرعت‌های شعاعی و مماسی در عمق را برای یک VSB با دو کانال ورودی و خروجی به صورت شکل (۱) اندازه‌گیری نمود.

همان‌طور که در شکل‌های (۱-الف و ۱-ب) مشاهده می‌شود در رسوب‌گیر مورد مطالعه Athar et al. (2002) کانال‌های ورودی و خروجی به صورت مماس بر بدنه VSB متصل شده‌اند. جریان آب از درون کانالی به عرض ۰/۲ متر وارد VSB می‌شود. قطر حوضچه رسوب‌گیر ۱ متر و قطر سوراخ کف ۰/۱ متر می‌باشد. کف کانال ورودی ۲ سانتی‌متر پایین‌تر از کف کانال خروجی قرار دارد. کف حوضچه رسوب‌گیر نیز دارای شیب ۱۰ درصد بوده

(Olsen, 2009).

تابع دیواره^۱

معمولاً گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره بسیار زیاد می‌باشد. اگر بخواهیم این گرادیان درون شبکه محاسبه شود، نیاز به شبکه‌ای بسیار ریز است. در غیر این صورت باید از توابع دیواره استفاده شود. در حالت اخیر فرض می‌شود که توزیع سرعت کاملاً از یک معادله تجربی پیروی می‌کند که آن را تابع دیواره می‌نامیم. معادلات ناویر استوکس و معادلات تلاطمی پس از گسسته‌سازی دارای عبارات ثابت^۲ مشخصی می‌باشند. برای نقاط نزدیک مرز، عبارات ثابت براساس تابع دیواره محاسبه می‌گردند.

در مدل SSIIM از رابطه (Schlichting 1979) که برای دیواره‌های زبر استخراج گردیده، استفاده می‌شود:

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

u_x سرعت اصطکاکی^۳ و κ ضریب ثابت معادل ۰/۴ می‌باشد. فاصله تا دیواره y و ضخامت زبری k_s برابر با قطر ذرات روی دیواره در نظر گرفته می‌شود.

برای دیواره‌های صاف نیز از توابع ذیل استفاده می‌شود: (رابطه ۶)

$$\begin{cases} \frac{U}{u_x} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Eyu_x}{\nu} \right) & \text{for } \frac{yu_x}{\nu} > 11 \\ \frac{U}{u_x} = \frac{Eyu_x}{\nu} & \text{for } \frac{yu_x}{\nu} < 11 \end{cases}$$

در این معادله E ضریب ثابت معادل ۰/۹ می‌باشد.

انتقال رسوب در تعریف کلاسیک به دو قسمت بار کف^۴ و بار معلق^۵ تقسیم می‌شود. در مدل SSIIM غلظت بار معلق (c) (بر حسب نسبت حجمی) با استفاده از معادله پخشیدگی-جابجایی^۶ محاسبه می‌گردد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه بالا w سرعت سقوط ذره رسوب و Γ ضریب پخشیدگی می‌باشد که از مدل تلاطمی به دست می‌آید:

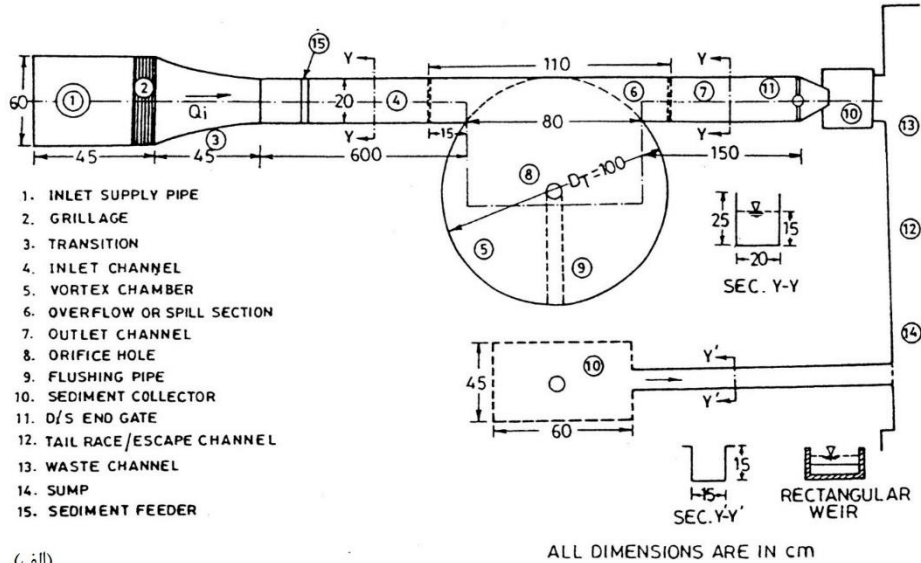
$$\Gamma = \frac{V_T}{S_c} \quad (\text{رابطه ۸})$$

S_c عدد اشمیت^۷ است که برابر با ۱/۰ بوده و ν لزجت (ویسکوزیته) تلاطمی می‌باشد. Van Rijn (1987) رابطه‌ای را

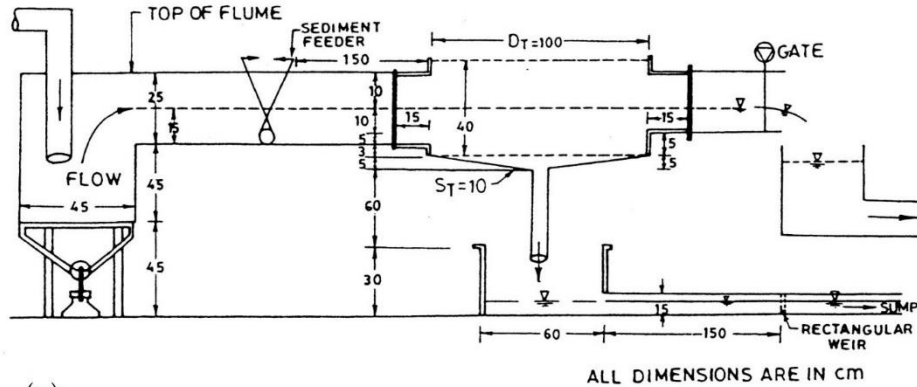
5 Suspended load
6 Convection- diffusion
7 Schmiet number

1 Wall laws
2 Source terms
3 Shear velocity
4 Bed load

جدول ۱) و دبی خروجی از کف در حین آزمایش ثابت بوده و توسط یک شیر تنظیم گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) نمای بالا از هندسه مورد مطالعه (Athar et al., 2002)، ب) مقطع طولی از هندسه مورد مطالعه (Athar et al., 2002).

جدول ۱- مشخصات هندسی VSB مورد مطالعه توسط (Athar et al., 2002, 2003) و شبیه‌سازی شده در این پژوهش

پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
قطر ذرات رسوب	d	mm	۰/۰۵۵
دبی ورودی	Q_i	m^3/s	۰/۰۱
دبی خروجی از کف	Q_u	m^3/s	۰/۰۰۱
نسبت تخلیه	Q_u/Q_i	درصد	۱۰
قطر حوضچه رسوب‌گیر	D_T	m	۱
عمق جریان ورودی	h_i	m	۰/۱۵
ارتفاع جریان روی محیط VSB	h_p	m	۰/۲۳
اختلاف ارتفاع کف کانال ورودی و خروجی	z_h	m	۰/۰۲

تنها در اطراف روزنه‌ی کف موثر است. مؤلفه‌های سرعت شعاعی و مماسی نیز در عمق ثابت فرض گردیده‌اند.

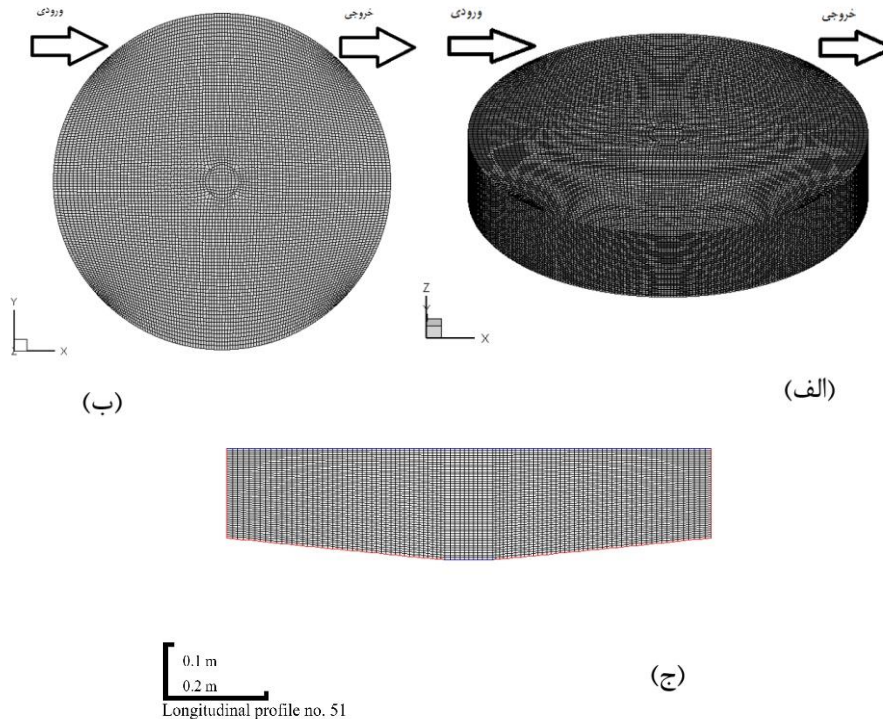
شبکه محاسباتی

در مدل SSIIM دو فایل ورودی به نام های control و koordina قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها باید آماده گردد که فایل control حاوی

در پژوهش ایشان قسمت‌هایی از میدان که دارای توزیع سرعت مشابه می‌باشند، مشخص شده و در هر قسمت معادله‌ای برای توزیع سرعت ارائه گردید (مراجعه شود به جدول ۱) از (Athar et al., 2003). در مورد مؤلفه سرعت قائم، معادله‌ای ساده استفاده شده است و فرض گردیده است که مؤلفه سرعت قائم

پیش‌فرض در SSIIM به شکل کانال می‌باشد ابتدا کانالی به ابعاد (یک متر در یک متر) در مدل وارد گردید و سپس شبکه مستطیل شکل به هندسه VSB تغییر یافت. شکل (۲) جزئیات شبکه‌بندی را نمایش می‌دهد.

شرایط مرزی و تنظیمات مربوط به ضرایب پیش‌فرض مدل بوده و فایل koordina حاوی مختصات شبکه محاسباتی می‌باشد. به منظور تولید شبکه محاسباتی منطبق بر هندسه مورد مطالعه توسط Athar et al. (2003) در شکل (۱) از آن‌جا که هندسه



شکل ۲- الف) شبکه سه بعدی، ب) نمای شبکه از بالا، ج) مقطع عرضی شبکه

پایین‌دست آن به صورت خروجی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به عرض کانال ورودی که ۰/۲ متر می‌باشد، قسمتی از دیواره‌های چپ و راست نیز به ورودی و خروجی اضافی گردیده‌اند. مقدار دبی جریان برابر با ۱۰ lit/s و نسبت تخلیه از کف ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. بدین معنی که ۱۰ درصد جریان ورودی از کف تخلیه می‌گردد و سطح آب اولیه بر اساس معادلات طراحی در ارتفاع ۰/۲۳ متر قرار داده شده است (جدول ۱). شرایط مرزی برای حل میدان جریان در ورودی به صورت سرعت ثابت و در جهت محور x (موازی با راستای کانال ورودی) با توزیع یکنواخت در کل مقطع تعریف گردید. سرعت‌های خروجی نیز به صورت شار صفر^۱ تعریف شده‌اند.

سطح آزاد آب در مدل SSIIM با استفاده از توزیع فشار درون حوضچه و معادله برنولی محاسبه می‌گردد. بدین صورت که گرادیان تمام متغیرها در سطح آزاد آب برابر با صفر فرض گردیده و بر اساس یک نقطه مبنا درون میدان که سطح آزاد در آن نقطه دارای ارتفاع معلومی می‌باشد، تغییرات سطح در طی زمان بر اساس تغییرات میدان فشار شبیه‌سازی می‌گردد. با توجه به معلوم بودن مقدار ارتفاع جریان در کانال ورودی، از این نقطه به عنوان

به‌منظور انجام مقایسه‌ای با دقت بالا در این مدل‌سازی از شبکه‌ای به ابعاد ۴۸*۱۰۱*۱۰۱ (تعداد سلول‌ها در جهات x و y و z) استفاده گردیده است. لازم به ذکر است به منظور اطمینان از استقلال جواب‌ها از ابعاد شبکه، آزمون همگرایی شبکه در چهار شبکه به ابعاد مختلف صورت گرفت که با اطمینان از همگرایی جواب‌ها، ابعاد شبکه بهینه مورد اشاره در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور حفظ تعادل بین زمان انجام محاسبات و همچنین افزایش دقت شبیه‌سازی، شبکه محاسباتی به‌گونه‌ای طراحی گردید که در نواحی نزدیک دیواره‌ها که نیروهای برشی غالب بوده و همچنین در ناحیه اطراف روزنه کف، شبکه ریزنمایی شد و ابعاد این قسمت از سلول‌های شبکه در مقایسه با دیگر قسمت‌های حوضچه، ریزتر می‌باشد. عرض کانال ورودی و خروجی و ارتفاع کف ورودی و خروجی منطبق با هندسه‌های (Athar et al. (2002, 2003)، شکل‌های (۱-الف و ۱-ب) می‌باشد.

شرایط مرزی

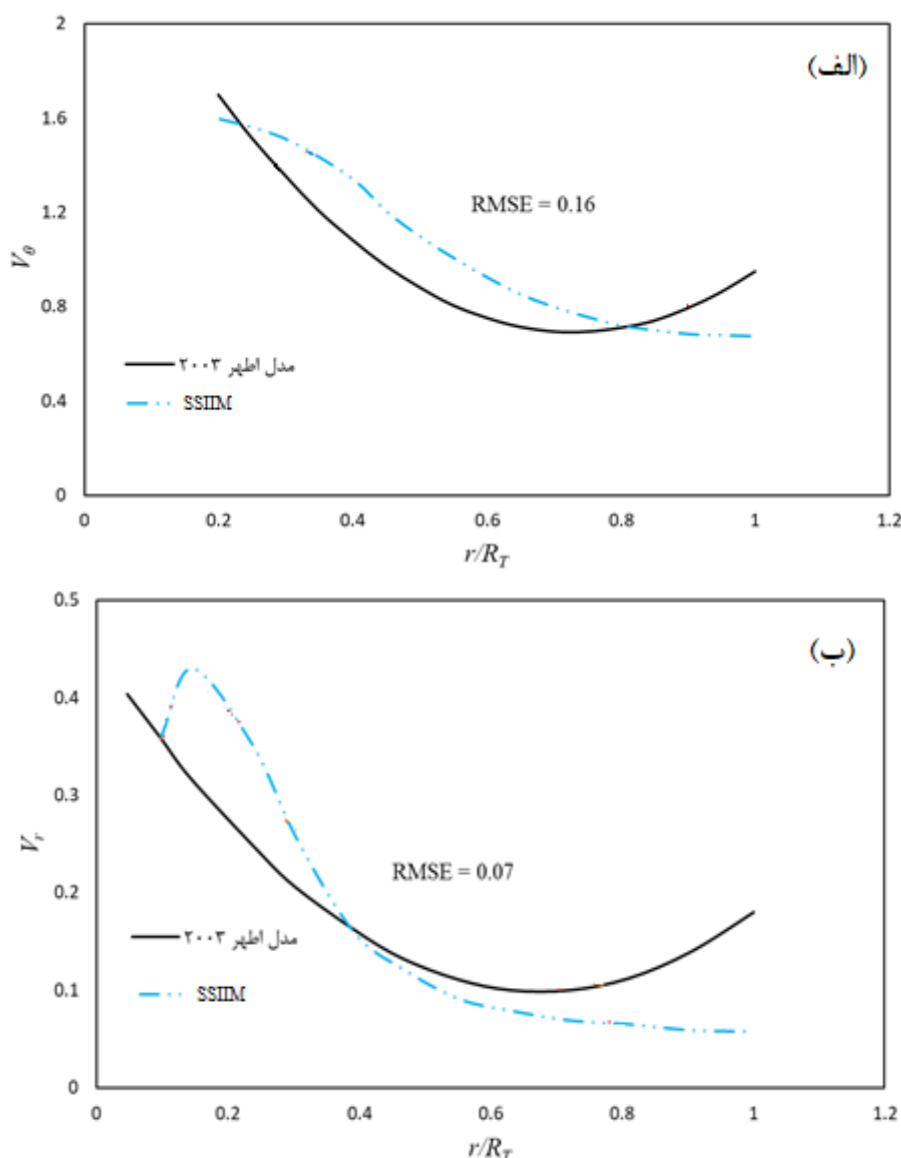
در مدل SSIIM به صورت پیش‌فرض، بالادست جریان، ورودی و

در این قسمت به بررسی توزیع سرعت مماسی و شعاعی پرداخته و نتایج بدست آمده از مدل SSIIM با معادلات میدان جریان ارائه شده توسط Athar et al. (2003) مقایسه می‌گردد. در شکل (۳) توزیع سرعت مماسی و شعاعی حاصل از مدل‌سازی در کنار نتایج در شکل (۳) Athar et al. (2003) رسم گردیده‌اند. نمودارهای ارائه شده در شکل (۳) در جهت عمود بر محور x و گذرنده از مرکز VSB، رسم شده است. در معادلات Athar et al. (2003)، سرعت مماسی و شعاعی در عمق ثابت فرض شده است.

نقطه مبنا در پژوهش حاضر استفاده گردیده است. همچنین شرایط مرزی برای رسوب، در ورودی به صورت فلاکس ثابت و برابر با 400 ppm (مطابق با مقدار آزمایشگاهی Athar et al. (2002, 2003) انتخاب گردیده است. گرادیان رسوب در دیواره‌های حوضچه و همچنین در خروجی کف و کانال خروجی برابر با صفر لحاظ گردیده است.

نتایج و بحث

مقایسه مؤلفه‌های سرعت شعاعی و مماسی با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۳- مقایسه توزیع سرعت مماسی (الف) و سرعت شعاعی (ب) حاصل از SSIIM و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی Athar et al. (2003)

در شکل (۳) در ارتفاع 0.05 متری از کف رسوب‌گیر و در جهت محور y (عمود بر کانال‌های ورودی و خروجی) رسم گردیده‌اند که دورتر از کانال‌های ورودی و خروجی می‌باشند. نواحی دورتر

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود الگوی توزیع سرعت مماسی و شعاعی انطباق مناسبی با مقادیر گزارش شده توسط Athar et al. (2003) دارد. توزیع سرعت‌های رسم شده

Athar *et al.* مقایسه گردیده است. حل معادلات رسوب برای هندسه مورد مطالعه به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و نسبت تخلیه ۱۳ درصد نشان داده شده است و اندازه رسوب ورودی ۰/۰۵۵ میلی‌متر و غلظت جریان ورودی 400 ppm، مطابق با مقادیر ورودی آزمایش فیزیکی (Athar *et al.*, 2003) می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۲- مقایسه نتایج راندمان تصفیه

مقدار آزمایشگاهی (Athar et al., 2003)	شبیه‌سازی (Athar et al., 2003)	مدل SSIIM
۳۳/۰	۱۹/۳۰	۱۹/۹
راندمان تصفیه (درصد)		

با توجه به مقادیر جدول (۲) می‌توان گفت، مقادیر راندمان محاسبه شده و مقادیر آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند. نتایج راندمان نشان می‌دهد که راندمان حوضچه رسوب‌گیر گردابی برای اندازه رسوب مورد مطالعه (سیلت درشت) بالا نخواهد بود. عامل اصلی در راندمان پایین حوضچه سرعت سقوط ذرات می‌باشد. کاهش سرعت سقوط در اندازه‌های رسوب ریزتر، باعث ورود مستقیم رسوبات معلق از کانال ورودی به کانال خروجی می‌باشد و مسافت طی شده بین کانال ورودی و خروجی در هندسه شکل (۱) زمان ماند کافی برای ته‌نشینی رسوبات را فراهم نمی‌کند.

شکل (۴) الگوی توزیع رسوب در ارتفاع‌های مختلف از کف حوضچه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع غلظت رسوب در مقاطع نزدیک به کف حوضچه بیشتر متمایل به سمت خروجی کف حوضچه می‌باشد، در حالی که با افزایش ارتفاع از کف حوضچه، الگوی توزیع غلظت بیشتر متأثر از کانال‌های ورودی و خروجی می‌باشد. در شکل (۴-ب) که در ارتفاع پایین‌تری بوده و نزدیک‌تر به کف کانال خروجی می‌باشد، تجمع رسوب در خروجی بیش‌تر است نسبت به توزیع رسوب در ارتفاع بالاتر (شکل ۴-ج). دلیل این امر آنست که رسوب ورودی در فاصله رسیدن به کانال خروجی به علت نیروی ثقل ته‌نشین گردیده و تا رسیدن به کانال خروجی، درصد بالاتری از رسوبات در ارتفاع پایین‌تری قرار می‌گیرند. این در حالی است که در مقطع شکل (۴-ج) که در ارتفاع بالاتری قرار دارد، غلظت رسوب کاهش یافته و جریان با غلظت پایین از کانال خروجی خارج می‌گردد.

در شکل (۵) توزیع غلظت در پروفیل طولی حوضچه رسوب‌گیر نشان داده شده است. صفحه رسم شده در جهت محور x و در مرکز VSB رسم شده است (صفحه گذرنده از مرکز و موازی با کانال‌های ورودی و خروجی).

از کانال‌های ورودی و خروجی انطباق بیشتری با نتایج (2003) Athar *et al.* دارد در حالی که با افزایش ارتفاع این تطابق کاهش می‌یابد که دلیل عمده آن عدم امکان شبیه‌سازی کانال‌های ورودی و خروجی در مدل SSIIM می‌باشد که یکی از نقاط ضعف این مدل به حساب می‌آید (Olsen, 2009). در تفسیر نتایج شکل (۳) لازم به ذکر است که توزیع‌های سرعت گزارش شده توسط Athar *et al.* (2003) حاصل از برازش رگرسیونی بر اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بوده است که میانگین حاصل از توزیع سرعت در عمق را تنها برای نواحی خاصی از VSB گزارش نموده است که خود یکی از عوامل اختلاف اندک توزیع‌های ترسیم شده در شکل (۴) با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

الگوی توزیع رسوب درون حوضچه و مقایسه راندمان اندازه-گیری شده با نتایج SSIIM

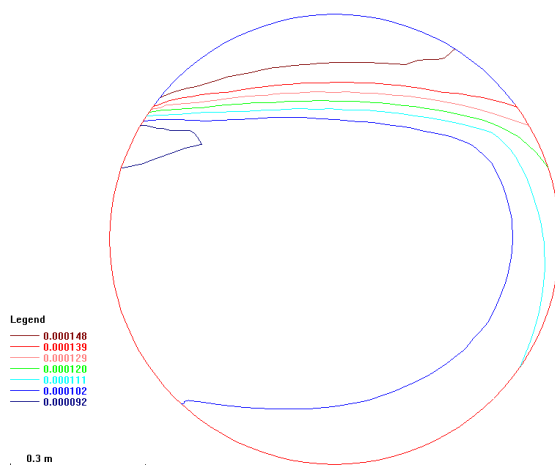
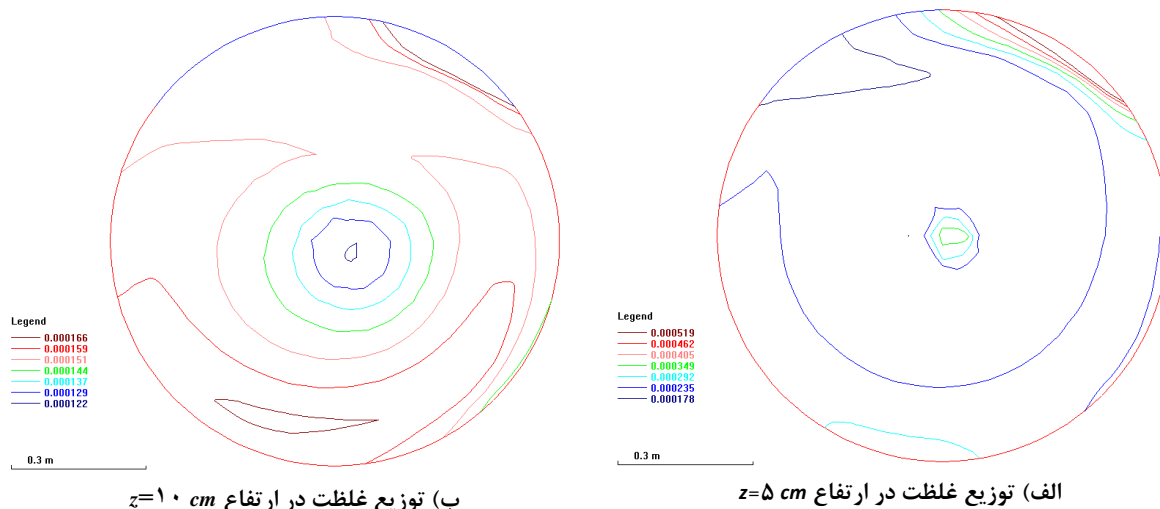
(Athar *et al.*, 2003) با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل از میدان جریان و رسوب، مقدار راندمان تله‌اندازی حوضچه رسوب-گیر را برای هندسه شکل (۱) گزارش نمودند. ایشان همچنین با برازش معادلات رگرسیونی بر اندازه‌گیری‌های میدان جریان، راندمان حاصل از حوضچه را نیز در یک سیستم مختصات استوانه‌ای و بدون در نظر گرفتن شیب کف حوضچه و با استفاده روش تفاضل محدود مدل‌سازی نمودند. لازم به ذکر است که به-علت ساده‌سازی‌های بسیار زیادی که در شبیه‌سازی ایشان صورت گرفته است و مدل ایشان قادر به شبیه‌سازی بار کف نبوده و تنها بار معلق را شبیه‌سازی می‌نماید، اندازه رسوب ورودی تا حد امکان ریز انتخاب گردیده است تا اثر در نظر نگرفتن بار کف تا حدودی مرتفع گردد. با این حال از آنجا که مدل SSIIM هر دو بخش بار کف و بار معلق و همچنین تغییرات کف را در نظر می‌گیرد، ابتدا میزان راندمان حوضچه برای اندازه رسوب مورد مطالعه (2003) Athar *et al.* با مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده توسط ایشان مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲) و سپس راندمان حوضچه برای اندازه ذرات رسوب بزرگتر نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

راندمان تصفیه در یک رسوب‌گیر با استفاده از رابطه (۱۱)

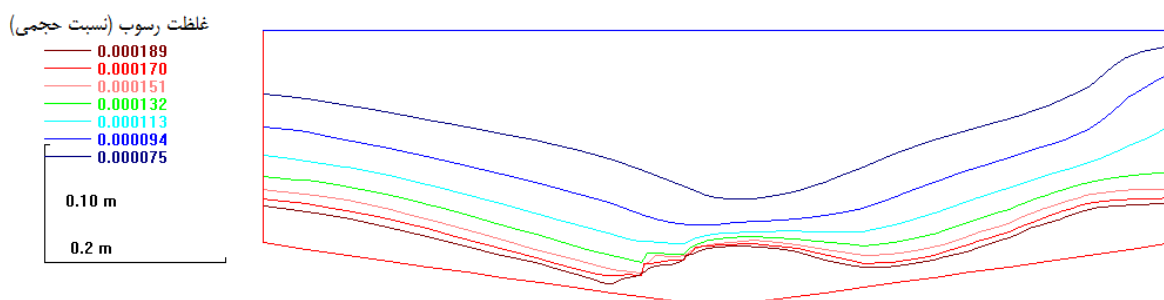
محاسبه می‌گردد:

$$\eta_o = \frac{W_{so} + W_{vs}}{W_{to}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

که در آن W_{so} وزن رسوب خارج شده از کف، W_{vs} وزن رسوب معلق و ته‌نشین شده در کف و W_{to} وزن کل رسوب وارد شده به رسوب‌گیر می‌باشد. در جدول (۲) مقادیر راندمان رسوب حاصل از مدل‌سازی SSIIM با مقادیر گزارش شده توسط (2003)



شکل ۴- توزیع غلظت در ارتفاع‌های مختلف (غلظت‌ها به صورت حجمی می‌باشند)



علل بالا بودن راندمان تصفیه حوضچه‌های رسوب‌گیر گردابی می‌باشد. عامل اصلی در شکل‌گیری توزیع غلظت بالا در اطراف خروجی کف، گرادیان فشار منفی به سمت مرکز حوضچه و گردابه‌های ثانویه و همچنین شیب نسبی کف حوضچه می‌باشد

همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود توزیع غلظت در اطراف خروجی کف دارای بیشترین مقدار بوده و با افزایش ارتفاع از مقدار آن کاسته می‌شود. نقاط نزدیک به سطح کانال خروجی دارای غلظت کمتری می‌باشند و همین امر باعث وارد شدن رسوب با غلظت پایین به کانال خروجی می‌شود که یکی از

(2004) استفاده شده است:

$$\omega = \frac{gRd^2}{18\nu + (0.75CgRd^3)^{1/2}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

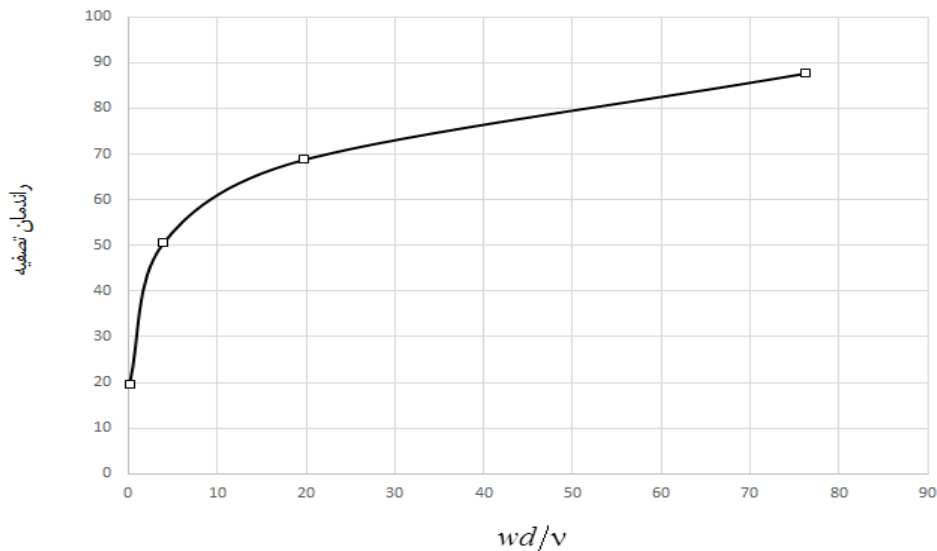
که در آن R وزن مخصوص ویژه ذرات رسوب، C ضریب ثابت برابر با ۱، g شتاب جاذبه، d قطر ذره و ν لزجت سینماتیک سیال می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر مربوط به اندازه‌های مختلف رسوب

بافت	سیلت درشت	شن ریز	شن متوسط	شن درشت
قطر رسوب (mm)	۰/۰۵۵	۰/۱۸۷	۰/۳۷۵	۰/۷۵۰
سرعت سقوط (m/s)	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱	۰/۰۵۳	۰/۱۰۲
wd/ν	۰/۱۴	۳/۹۳	۱۹/۷۱	۷۶/۳۴
راندمان تصفیه	۱۹/۶	۵۰/۵	۶۸/۸	۸۷/۷

(Keshavarzi and Gheisi, 2006). با توجه به شکل (۵) می‌توان انتظار داشت که افزایش ارتفاع کف کانال خروجی نسبت به کانال ورودی، راندمان رسوب‌گیر افزایش یابد که اثر این پارامتر در بخش بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی راندمان تصفیه VSB برای اندازه‌های مختلف رسوب
 رسوب به‌کار گرفته شده توسط Athar et al. (2003) در محدوده سیلت درشت قرار می‌گیرد (جدول ۱) و به همین دلیل مقدار راندمان رسوب بدست آمده کم می‌باشد. به منظور سنجش عملکرد حوضچه رسوب‌گیر گردایی برای اندازه‌های درشت‌تر رسوب، سه سایز رسوب با اندازه‌های درشت‌تر در محدوده شن ریز، شن متوسط و شن درشت مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۳) مقادیر ورودی نشان داده شده است. به‌منظور محاسبه سرعت سقوط ذرات از معادله ارائه شده توسط Ferguson and Church



شکل ۶- تغییرات راندمان تصفیه برای اندازه‌های مختلف رسوب

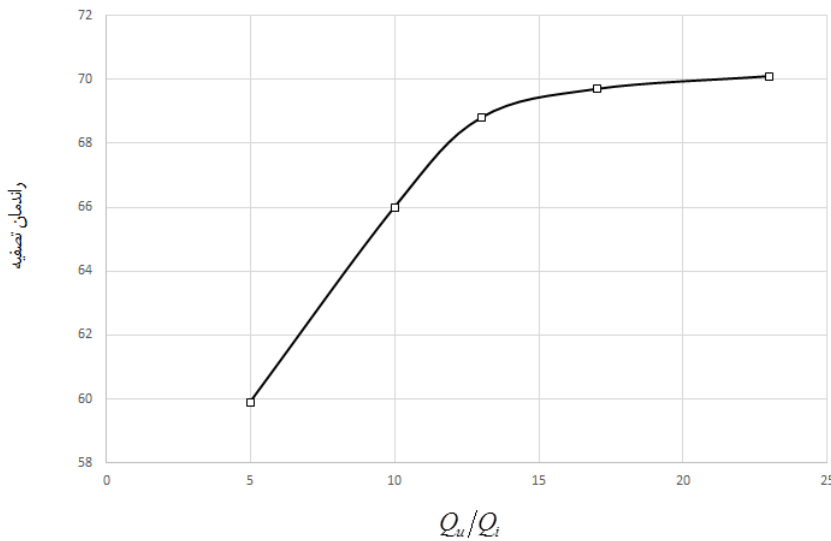
بار رسوب فرصت ته‌نشینی کافی قبل از رسیدن به کانال خروجی را پیدا نمی‌کنند. انتظار می‌رود که در حالات دیگر نحوه اتصال کانال ورودی و خروجی به علت افزایش مسافت طی شده ذره رسوب درون میدان و زمان ماند بیشتر برای ته‌نشینی، میزان راندمان افزایش یابد.

بررسی راندمان تصفیه VSB برای نسبت‌های تخلیه مختلف
 یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار راندمان VSB نسبت تخلیه از کف به میزان جریان ورودی (Q_{ii}/Q_i) می‌باشد. در حالت مطلوب سعی بر آن است که در یک راندمان تصفیه ثابت، جریان خروجی از کف حوضچه که حاوی غلظت رسوب بالاست، کمینه گردد. در شکل (۷) مقدار راندمان تصفیه به ازای پنج مقدار تخلیه

در شکل (۶) مقادیر راندمان تصفیه حاصل از مدلسازی در برابر wd/ν رسم گردیده است. Mashauri (1986) نیز با افزایش اندازه رسوبات، افزایش راندمان را گزارش نمود. در نتایج ایشان مقدار افزایش راندمان به‌صورت مجانبی در می‌آید که با نتایج این پژوهش انطباق کاملی دارد. نتایج شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات از سیلت درشت به شن متوسط، راندمان حوضچه افزایش چشمگیری می‌یابد در حالی که میزان افزایش راندمان بعد از سیلت درشت با شیب کمتری صورت می‌گیرد. به بیان دیگر، حساسیت راندمان حوضچه رسوب‌گیر نسبت به wd/ν تنها در مقادیر کم این پارامتر، بیشینه است و با افزایش بیشتر قطر رسوبات ورودی به کانال همچنان قسمتی از

ورودی ۱۰ لیتر بر ثانیه و رسوب ورودی از نوع شن متوسط می- باشد.

از کف ۵، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۲۳ درصد نشان داده شده است. دبی



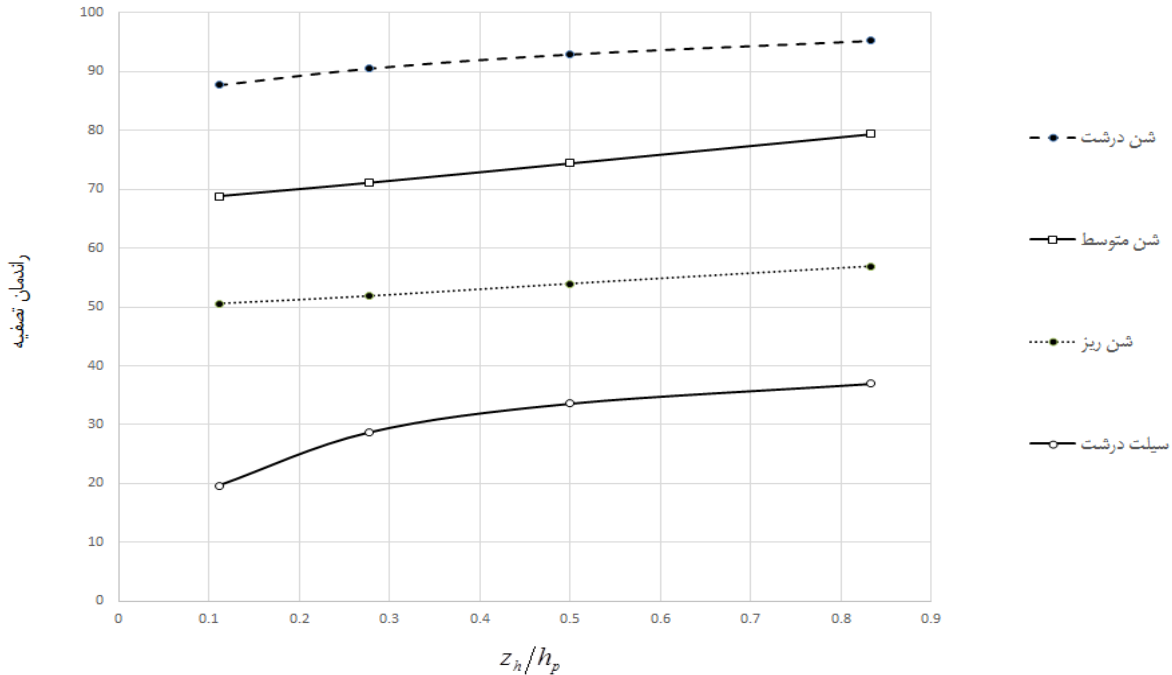
شکل ۷- راندمان تصفیه به ازای مقادیر مختلف نسبت تخلیه

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقدار راندمان تصفیه با افزایش z_h/h_p افزایش می‌یابد. با افزایش کف کانال خروجی درصد بالاتری از رسوبات پس از طی فاصله بین کانال ورودی و خروجی، به ناحیه پایین‌تر از کف کانال خروجی ته‌نشین شده و در اثر گرادیان فشار منفی به سمت کف حوضچه حرکت می‌نمایند.

نکته قابل توجه افزایش ناگهانی راندمان تصفیه برای سیلت درشت می‌باشد که افزایش راندمان بین حالت بیشینه و کمینه در حدود ۱۸ درصد می‌باشد در حالی که این اختلاف مقدار بیشینه و کمینه در دیگر اندازه رسوبات در حدود ده درصد و کمتر می- باشد. رسوبات ریزدانه به علت سرعت سقوط پایین، تمایل به ماندن در حالت معلق دارند به همین دلیل با کاهش مقدار z_h/h_p رسوب ورودی به سرعت وارد کانال خروجی می‌شود. به همین دلیل افزایش مقدار z_h/h_p در افزایش راندمان این نوع رسوبات تأثیر بیشتری خواهد داشت ولی افزایش آن برای اندازه رسوبات درشت‌تر، تغییر چندانی در افزایش راندمان ایجاد نخواهد کرد.

با توجه به شکل (۷) مقدار راندمان تصفیه با افزایش نسبت تخلیه به صورت مجانبی در می‌آید. مقدار بهینه برای نسبت تخلیه برابر با ۱۰ درصد می‌باشد. افزایش نسبت تخلیه تا ۲۳ درصد، تنها ۴ درصد راندمان تصفیه را افزایش خواهد داد. با توجه به اینکه یکی از مزایای رسوب‌گیرها، نسبت تخلیه پایین آنها می‌باشد، استفاده از نسبت تخلیه‌های بیشتر از ۱۰ درصد توصیه نمی‌گردد. با افزایش بیشتر نسبت تخلیه گردابه هوا شکل گرفته و راندمان دچار کاهش می‌شود (Athar et al., 2002). معمولاً گردابه هوا به ازای نسبت تخلیه‌های بزرگتر از ۰/۱۵ شکل می‌گیرد. مقدار افزایش راندمان برای نسبت تخلیه‌های بزرگتر از ۰/۱ ناچیز خواهد بود.

بررسی راندمان تصفیه VSB برای نسبت‌های مختلف z_h/h_p از آنجا که رسوبات ورودی به درون حوضچه پس از طی مسافتی درون حوضچه به علت نیروی ثقل به سمت کف حوضچه حرکت می‌کنند، معمولاً ارتفاع کف حوضچه خروجی بالاتر از کف کانال ورودی طراحی می‌گردد (شکل ۱). در شکل (۸) مقدار راندمان تصفیه در برابر z_h/h_p برای اندازه‌های مختلف رسوب رسم شده است. z_h اختلاف ارتفاع کف کانال ورودی و کف کانال خروجی و h_p ارتفاع سطح آب در محیط VSB می‌باشد.



شکل ۸- مقادیر راندمان تصفیه در برابر z_h/h_p

دانه دارد که موجب افزایش راندمان تا حدود ۲۰ درصد می‌گردد و برای اندازه رسوبات درشت‌تر این افزایش راندمان در حدود ده درصد است.

با توجه به موفقیت نسبی مدل SSIM در مدلسازی میدان جریان و رسوب در حوضچه رسوب‌گیر گردابی، می‌توان این مدل را به عنوان ابزاری جهت بررسی دیگر عوامل موثر بر طراحی حوضچه پیشنهاد نمود. مطالعات آینده می‌تواند به دیگر جنبه‌های طراحی حوضچه همچون استفاده از صفحه دیافراگم و اثر آن بر راندمان نهایی حوضچه، نحوه اتصال کانال‌های ورودی و خروجی و نوع جریان ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد معطوف گردد. عمده‌ترین محدودیت مدل SSIM عدم امکان شبیه‌سازی اثر جریان در کانال‌های ورودی و خروجی می‌باشد که علت اصلی آن استفاده از شبکه‌بندی نوع ساخت‌یافته^۱ در این مدل است و در پژوهش حاضر فرض بر آن بوده است که جریان در کانال ورودی به حالت توسعه‌یافته رسیده و شرایط مرزی به کار گرفته شده در ورودی قابل قبول می‌باشد. با این حال بررسی و شبیه‌سازی دقیق‌تر اثر کانال‌های ورودی و خروجی بر میدان جریان، انتظار می‌رود که دقت شبیه‌سازی الگوی توزیع رسوب را نیز افزایش دهد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه‌گیری

عموم پژوهش‌های صورت گرفته تا به امروز در مورد حوضچه رسوب‌گیر گردابی برمبنای مدل‌های فیزیکی و آزمایشگاهی بوده است که نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد می‌باشد. در این پژوهش نشان داده شد که مدل SSIM نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی میدان جریان و راندمان حوضچه رسوب‌گیر، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدست می‌دهد. پس از مقایسه نتایج میدان جریان و راندمان اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و انطباق نسبی نتایج، اثر پارامترهای طراحی مختلف همچون اندازه ذرات رسوب ورودی، نسبت تخلیه از کف و همچنین اختلاف ارتفاع کف کانال‌های ورودی و خروجی، بر راندمان تله اندازه‌گیری رسوبات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که راندمان حوضچه رسوب‌گیر با کاهش اندازه ذرات، کاهش می‌یابد که علت عمده آن پایین‌تر بودن سرعت سقوط ذرات ریزدانه می‌باشد. مدلسازی راندمان رسوب به ازای نسبت‌های تخلیه از کف مختلف، نشان می‌دهد که مقادیر نسبت‌های تخلیه بیشتر از ۱۰ درصد تاثیر چندانی در افزایش راندمان نداشته و تنها سهم جریان خروجی را افزایش می‌دهد که مطلوب طراحی حوضچه نیست. همچنین افزایش ارتفاع کف کانال خروجی بیشترین تاثیر را تنها در رسوبات ریز

REFERENCES

Almeland, S. K., Olsen, N. R., Bråveit, K., & Aryal, P. R. (2019). Multiple solutions of the Navier-Stokes

equations computing water flow in sand traps. *Engineering Applications of Computational*

- Fluid Mechanics*, 13(1), 199-219.
- Ansari, M. A., & Athar, M. (2013). Artificial neural networks approach for estimation of sediment removal efficiency of vortex settling basins. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 19(1), 38-48.
- Anwar, H. O. (1967). Vortices at low-head intakes. *Water Power*, 19(11), 455-457.
- Athar, M., Kothyari, U. C., & Garde, R. J. (2002). Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor. *Journal of hydraulic engineering*, 128(12), 1051-1059.
- Athar, M., Kothyari, U. C., & Garde, R. J. (2003). Distribution of sediment concentration in the vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 427-438.
- Cecen, K., & Bayazit, M. (1975). Some laboratory studies of sediment controlling structures. In *9th Congress of ICID, Moscow* (pp. 107-111).
- Chapokpour, J., Farhoudi, J., & Tokaldani, E. A. (2011). Turbulent flow measurement in vortex settling basin. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2(4), 382-389.
- Chapokpour, J., Farhoudi, J., Tokaldany, E. A., & Majedi-Asl, M. (2012). Flow Visualization in Vortex Chamber. *J. Civil Eng. Urb*, 2, 26-34.
- Curi, K. V., Esen, I. I., & Velioglu, S. G. (1979). Vortex type solid liquid separator. *Progress in Water Technology*, 7(2), 183-190.
- Ferguson, R. I., & Church, M. (2004). A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of sedimentary Research*, 74(6), 933-937.
- Ghobadian, R., Basiri, M., & Tabar, Z. S. (2018). Interaction between channel junction and bridge pier on flow characteristics. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 2787-2795.
- Julien, P. Y. (1985). Motion of sediment particles in a Rankine combined vortex. *CER*, 84/85-6.
- Keshavarzi, A. R., & Gheisi, A. R. (2006). Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 55(4), 419-434.
- Mashauri, D. A. (1986). Modelling of a vortex settling basin for primary clarification of water.
- Ogihara, H., & Sakaguchi, S. (1984). New system to separate the sediments from the water flow by using the rotating flow. In *Proceedings of 4th Congress of the Asian and Pacific Division, IAHR, Chiang Mai, Thailand* (pp. 753-766).
- Olsen, N. R. B. (2007). A three dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, User's manual. *Norwegian Univ. of Science and Technology, Trondheim, Norway*.
- Olsen, N. R. B. (2009). 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*.
- Olsen, N. R. B., & Hillebrand, G. (2018). Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *Journal of Soils and Sediments*, 18(9), 3031-3040.
- Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow (Book). *Washington, DC, Hemisphere Publishing Corp.*, 1980. 210 p.
- Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhuja, V. S., & Dhillon, G. S. (1991). Vortex-settling basin design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2), 172-189.
- Rea, Q. (1984). Secondary currents within the circulation chamber sediment extractor. M. Sc. Engineering dissertation, presented to Faculty of Engineering and Applied Science, Department of Civil Engineering, Institute of Irrigation Studies, University of Southampton, England.
- Salakhov, F. S. (1975). Rotatio is necessary nal design and methods of hydraulic calculation of load-controlling water intake structures for mountain rivers. In *Proceedings of Ninth Congress of the ICID, Moscow Soviet Union* (pp. 151-161).
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, Inc.
- Sheikh Rezazadeh Nikou, N., Ziai, A., Ansari, H. (2018). Study of Vortex Settling Basin Performance for Different Discharges by Experimental and Numerical Modeling. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(4), 798-810 (In Farsi)
- Sullivan, R. H., Cohn, M. M., Coomes, J. P., & Smission, B. S. (1972). The swirl concentrator as a combined sewer overflow regulator facility. *Report No: EPA-R2-72-008, US Environmental Protection Agency, Washington, DC*.
- Svarovsky, L. 1981. *Solid-Liquid separation*. Butterworth and Co. Ltd., Essex, UK: 162-188
- Van Rijn, L. C. (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport.
- Velioglu, S. G. (1972). Vortex type sedimentation tank. *MSc Engineering thesis, Bogasiqi Univ., Turkey*.
- Vokes, F. C., & Jenkins, S. H. (1943). Experiments with a Circular Sedimentation Tank. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 19(3), 193.
- Wilcox, D.C. (2000) "Turbulence modelling for CFD", DCW industries, ISBN: 0-9636051-5-1
- Zhou, Z., Wang, C., and Hou, J. (1989). Model study on flushing cone with strong spiral flow. In *Proceedings, 4th International Symposium on River Sedimentation, Beijing*, pp. 1213-1219.
- Ziaei, A. N. (2000). *Study on the efficiency of vortex settling basin (VSB) by physical modeling* (Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran).
- 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.