



## Numerical Model of Flow and Suspended Sediment Transport in the Reservoir of Rock-fill Dams

A. Nejadi<sup>1</sup>, M. Heydari<sup>2\*</sup>, J. Sadeghian<sup>3</sup>  
and R. Daneshfaraz<sup>4</sup>

### Abstract

Building non-core rock-fill dams is amongst the most effective methods of controlling floods. In flood events the input-flow of such dams typically contains a considerable amount of sediments. This underscores the need to study the flow behavior and sediment concentrations so that one could identify the amount of passing and depositing sediments and decide on the management practices all of which have been taken into account in the present research. First, on the basis of numerical solution of Saint-Venant equations, the flow characteristics (e.g. depth and velocity) were calculated using finite volume method with a completely implicit method. Then the concentration of the sediments at different points of the reservoir was determined using discretization of the convection diffusion equation. The results of the experiments conducted on reservoirs of rock-fill dams in the hydraulic laboratory of Bu Ali Sina University, Hamedan, were then employed to assess the functioning and validation of the mathematical model of flow simulator and sediment concentration. Comparing measurement data of the sediment concentration and the calculations conducted in eight sections and three height layers of 5, 10 and 15 cm in the reservoir of rock-fill dam, the mean value of the relative error of sediment concentration was found to be 9.17 percent, indication a good enough correspondence between the output of the mathematical simulator and the value measured in the experimental model.

**Keywords:** Reservoir of Rock-Fill Dams, Unsteady Flow, Convection Diffusion Equation, Finite Volume Method.

Received: July 3, 2017

Accepted: November 1, 2017

## مدل عددی جریان و انتقال رسوبات معلق در مخزن سد پاره‌سنگی

آرش نجاتی<sup>۱</sup>، مجید حیدری<sup>۲\*</sup>، جلال صادقیان<sup>۳</sup>  
و رسول دانشفراز<sup>۴</sup>

### چکیده

احداث سدهای پاره سنگی فاقد هسته یکی از روش‌های سازه‌ای کنترل سیلاب است. جریان ورودی به مخازن این سدها در مواقع سیلابی حاوی مقدار قابل توجهی از رسوبات است. این موضوع اهمیت بررسی رفتار جریان و غلظت رسوبات را به منظور تعیین میزان رسوب عبوری، رسوبات ته‌نشین شده و مدیریت آن دوچندان می‌نماید که در این تحقیق مورد توجه واقع شده است. در این راستا ابتدا براساس حل عددی معادلات سنت و نانت به روش حجم محدود و با رویکرد کاملاً ضمنی مشخصات جریان (سرعت و عمق) محاسبه و سپس با استفاده از گسسته‌سازی معادله انتقال-پخش، میزان غلظت رسوبات در نقاط مختلف مخزن تعیین گردید. به منظور بررسی عملکرد و صحت‌سنجی مدل ریاضی شبیه‌ساز جریان و غلظت رسوبات که در محیط MATLAB تهیه گردید، از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان استفاده شد. بر مبنای مقایسه انجام شده بین داده‌های غلظت رسوب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در هشت مقطع و در سه لایه عمقی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در داخل مخزن سد پاره‌سنگی، مقدار میانگین خطای نسبی غلظت رسوب ۹/۱۷ درصد می‌باشد که حاکی از تطابق مناسب خروجی مدل شبیه‌ساز ریاضی با مقادیر اندازه‌گیری در مدل آزمایشگاهی است.

**کلمات کلیدی:** مخزن سد پاره‌سنگی، جریان غیردائمی، معادله انتقال-پخش، روش حجم محدود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۸/۱۰

۱- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

۲-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. Email: mheydari@basu.ac.ir

۳-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

۴- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

\* Corresponding author

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

\* نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های سازه‌ای که در سال‌های متمادی برای مدیریت حوضه و کنترل سیلاب مورد توجه قرار گرفته است سدهای پاره‌سنگی است، مزیت مهم این سازه‌ها علاوه بر بخش هیدرولیکی در سازگاری کامل آنها با طبیعت و محیط‌زیست است (Heydari, 2007; Nazemi, 2011; Sheybani and Bayat, 2004). در این تحقیق از نوعی سد پاره‌سنگی فاقد هسته بحث می‌شود که از دسته سدهای پاره‌سنگی تأخیری می‌باشد و به منظور کنترل سیلاب در شرایط گذر جریان‌های رسوبی استفاده می‌شود. کاربرد اصلی این سدها، در کاهش دبی پیک جریان و افزایش زمان عبور سیلاب با ایجاد ذخیره موقت می‌باشد (Qaderi et al., 2010; Shayannejad, 2000).

با توجه به اینکه جریان ورودی به مخازن سدها مخصوصاً در مواقع سیلابی حاوی مقدار قابل توجهی از رسوبات است، لذا برآورد مشخصات جریان و تعیین غلظت رسوبات در مقاطع مختلف در شرایط جریان غیردائم با توجه به تأثیرگذاری مستقیم آن در طراحی و اجرای این سدها و برآورد میزان حمل رسوب در مخازن سدها، از مهمترین وظایف محققان و مهندسين آب می‌باشد. در مواقع سیلابی که جریان آب در رودخانه متلاطم است و با زمان در حال تغییر است پدیده حمل رسوب پیچیده بوده و پیش‌بینی مشخصات جریان و حمل رسوب با استفاده از راه‌حل‌های تحلیلی و تجربی انجام می‌گیرد که این موضوع نتایج را با خطای بالایی همراه می‌سازد. در سال‌های اخیر همزمان با پیشرفت و توسعه رایانه‌ها، روش‌های حل عددی مورد توجه قرار گرفته است. در روش عددی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای<sup>۱</sup> (PDE) نوشته شده و با اعمال شرایط اولیه و مرزی بصورت کامل حل می‌گردند. از جمله روش‌های عددی می‌توان به روش تفاضل‌های محدود<sup>۲</sup>، روش عناصر محدود<sup>۳</sup> و روش احجام محدود<sup>۴</sup> اشاره نمود (Ghadimi, 2012).

(Samani and Heydari, 2007) در کنترل و مهار سیلاب استفاده از سدهای پاره‌سنگی متوالی را توصیه نموده است. بدین ترتیب که با در نظر گرفتن سدهای پاره‌سنگی متوالی، دبی اوج سیلاب به مقدار زیادی کاهش یافته و همچنین زمان رسیدن به آن نیز طولانی‌تر می‌گردد. Castillo and Alvarez (2014) برای شبیه‌سازی جریان از حل عددی معادله سنت و نانت به روش حجم محدود استفاده نمودند و در ادامه از روابط تجربی Meyer-Peter-Müller (1948) و Van Rijn (1987) جهت محاسبه میزان رسوبات در مقاطع مختلف رودخانه Paute استفاده نمودند. (Kempe and Vowinckel, 2014) برای شبیه‌سازی جریان از حل عدد معادلات ناویر استوکس به روش حجم محدود استفاده کردند و در ادامه بعد از محاسبه پارامترهای

مربوط به رسوب نظیر عدد شیلدز وزن، غوطه‌وری، پارامتر حرکت ذره، سرعت ذره با بکارگیری مدل‌های تصادفی، میزان حمل رسوب در کانال‌های باز تعیین گردید. صحت‌سنجی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی دانشگاه آبردین حاکی از دقت بالای مدل نهایی بود. (Gilja and Kuspilić, 2015) تحقیقاتی جهت تعیین میزان رسوبات انباشته شده در مخزن سد Drava در زاگرب با استفاده از مدل شبیه‌سازی جریان و حمل رسوب و استفاده از روش تجربی توفالتی انجام دادند. (Esmaeili et al., 2015) در تحقیقی بعد از شبیه‌سازی جریان در مخزن سد Dashidaria بر اساس حل عددی به روش حجم محدود معادله سه بعدی جریان (معادله ناویراستوکس) با استفاده از روش‌های تجربی Van Rijn and Meyer-Peter-Müller میزان حمل رسوبات را محاسبه کردند که نتایج آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده در طول دوره بهره‌برداری دارای سازگاری منطقی بود. (Faghihirad and Lin, 2015) مشخصات سه بعدی جریان را در مخزن سد حمیدیه با استفاده از حل معادله هیدرودینامیک توسط روش تفاضل محدود تعیین نموده و در ادامه بر اساس حل عددی معادله پخش-جابجایی میزان حمل و غلظت رسوبات را محاسبه کردند و نهایتاً خروجی مدل را با داده‌های آزمایشگاهی مدل فیزیکی ساخته شده این مخزن مقایسه کردند که نتایج حاکی از دقت بالای مدل شبیه‌ساز بود. (Liu and Beljaidid, 2017) مدل عددی برای تعیین مشخصات جریان، حمل رسوب و تغییرات فرم بستر ارائه نمودند این مدل عددی براساس حل تلفیقی معادلات هیدرودینامیک جریان، معادله حمل رسوب و معادله پیوستگی رسوب و حل همزمان ماتریس‌های ترکیبی ارائه گردید. جهت حل معادلات از روش دیفرانسیل مرکزی و طرح بالاسویه استفاده گردید خطای مدل ۳/۱۵ درصد بود که با افزایش تعداد سلول‌ها میزان خطا کاهش می‌یافت.

با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص می‌گردد که محققین کمتر به بررسی جریان‌های غیردائمی حاوی رسوب در مخازن سدهای پاره‌سنگی پرداخته و بیشتر تحقیقات انجام شده در کانال، رودخانه یا مخازن سدهای نفوذناپذیر بوده است. لذا در این تحقیق جهت شبیه‌سازی جریان و بررسی غلظت رسوبات در مخزن سد پاره‌سنگی در شرایط جریان غیردائم از روش حجم محدود جهت حل عددی معادلات حاکم بر جریان (معادلات سنت و نانت) و حمل رسوب (معادله انتقال-پخش رسوب) در مخزن سد استفاده گردید. بدین منظور دو مدل عددی و آزمایشگاهی تهیه شده و نتایج مدل عددی براساس داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- معادله حاکم بر جریان

برای محاسبه مشخصات جریان در مخزن سد پاره‌سنگی در شرایط جریان غیر دائم معادله سنت ونانت در نظر گرفته شده است. این معادلات شامل یک دسته معادلات تفاضلات جزئی غیرخطی از نوع هذلولوی به شکل زیر می‌باشند (Abrishami and Hosseini, 2015; Akan, 2006):

الف) معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ب) معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

در روابط فوق  $u$ ، مولفه سرعت جریان،  $h$  عمق جریان،  $x$  راستای طولی جریان،  $t$  مولفه زمانی،  $S_0$  شیب بستر،  $S_f$  شیب خط انرژی (گردان هیدرولیکی) می‌باشد که از طریق فرمول مانینگ (رابطه ۳) محاسبه می‌شود:

$$S_f = n^2 \frac{Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (3)$$

در این رابطه،  $n$  ضریب مانینگ (قابل ذکر است مقدار ضریب مانینگ براساس آزمایشات انجام شده و جنس فلوم حدود  $0.13$  در نظر گرفته شده است)،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $A$  سطح مقطع جریان و  $Q$  دبی جریان می‌باشد (Aldrighetti, 2007).

### ۲-۲- مدل حمل رسوب

معادله حاکم بر توزیع غلظت رسوبات معلق در شکل دو بعدی با فرض جریان جانبی برابر صفر در مخزن سد پاره‌سنگی به شکل زیر خواهد بود که معادله پخش-جابجایی نیز خوانده می‌شود:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(u.S)}{\partial x} + \frac{\partial(-w_s.S)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴):  $S$  غلظت مکانی،  $w_s$  سرعت سقوط ذره،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_z$  به ترتیب ضریب اختلاط رسوب در راستای قائم ( $z$ ) و افقی ( $x$ ) می‌باشند. در رابطه با سرعت سقوط و ضرایب اختلاط، محققین مختلفی از جمله (Rubey (1933)، Van Rijn (1984)، Cheng (1997)، Wu (2007) و VanRijn (1987) روابط تجربی مختلفی پیشنهاد نموده‌اند و محققین مختلفی از جمله (Bukata and Bobba (2015)، Wang (2014)، Samani et al. (2010) و Chandler (2012) با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی این ضرایب

را محاسبه نمودند. در این تحقیق از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محاسبه ضرایب اختلاط رسوب و سرعت سقوط استفاده شده است. بر این مبنا مقادیر  $w_s$ ،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_z$  در معادله (۴) به ترتیب  $0.1$ ،  $150$  و  $0.04$  در نظر گرفته شده است.

### ۳- حل عددی معادلات حاکم بر جریان در مخزن سد پاره‌سنگی

#### ۱-۳- حل عددی معادله سنت ونانت

به منظور حل معادلات شبیه‌ساز جریان (معادله سنت ونانت) در مخزن سد پاره‌سنگی با استفاده از روش حجم محدود، میدان جریان (مخزن سد پاره‌سنگی) در جهت جریان مطابق شکل ۱ شبکه‌بندی می‌گردد و گسسته‌سازی معادلات برای کلیه گره‌های داخلی با انتگرال‌گیری از عبارات مشتق و با به کارگیری روش بالاسویه در جهت جریان و نهایتاً تقسیم تمام ترم‌ها به حجم کنترل سلول‌ها انجام می‌گیرد. تمامی مشتقات مکانی موجود در معادله مذکور در گام بعدی (در زمان  $N+1$ ) در نظر گرفته شده و این معادله بصورت کاملاً ضمنی حل شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007; Ghadimi, 2012).

بدین منظور دامنه محاسباتی به تعدادی حجم کنترل کوچک و مجزا مطابق با شکل ۲ تقسیم می‌گردد.

به دلیل اینکه جهت جریان در تعیین مقادیر  $u$  و  $h$  روی سطوح حجم کنترل مؤثر است و طرح تفاضل بالاسویه یکی از روش‌هایی بوده که مبتنی بر جهت جریان است، لذا در این تحقیق از روش مذکور جهت گسسته‌سازی مقادیر  $u$  و  $h$  روی سطوح حجم کنترل استفاده شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007) در روش بالاسویه گسسته‌سازی طبق الگوی زیر می‌باشد:

$$\text{If } \eta = h \text{ or } u \text{ then } \eta = \begin{cases} \eta_{\text{East}} = \begin{cases} \eta_{i,j} & \text{if } Q_{i,j+1/2} \geq 0 \\ \eta_{i,j+1} & \text{if } Q_{i,j+1/2} < 0 \end{cases} \\ \eta_{\text{West}} = \begin{cases} \eta_{i,j-1} & \text{if } Q_{i,j+1/2} \geq 0 \\ \eta_{i,j} & \text{if } Q_{i,j+1/2} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\eta$  می‌تواند سرعت یا عمق باشد. فرم نهایی معادلات پیوستگی و مومنتوم برای گره‌های داخلی به شکل زیر خواهند بود:

$$\frac{h_{i,j}^{(N+1)} - h_{i,j}^{(N)}}{\Delta t} + \frac{u_{i,j}^{(N+1)} h_{i,j}^{(N+1)} - u_{i,j-1}^{(N+1)} h_{i,j-1}^{(N+1)}}{\Delta x} = 0 \quad (6)$$

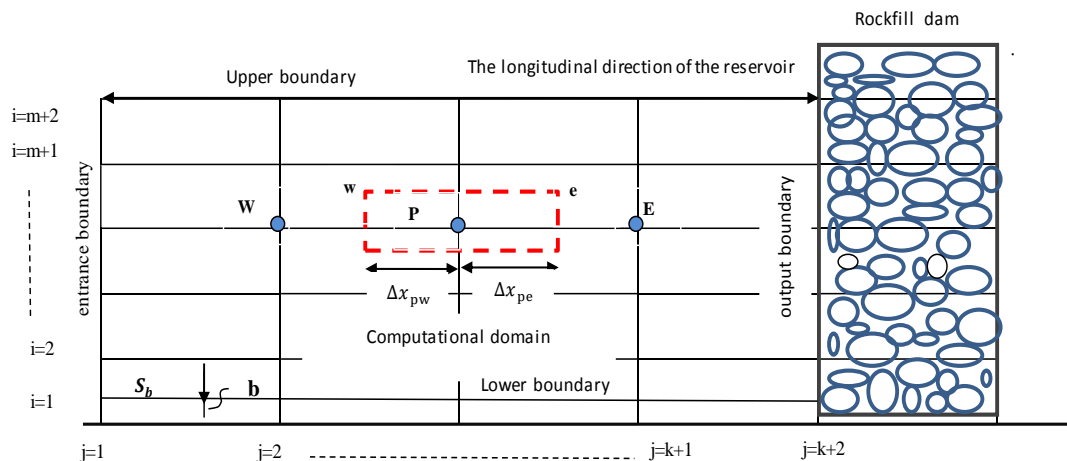


Fig. 1- Gridding of flow domain  
شکل ۱- شبکه‌بندی دامنه جریان

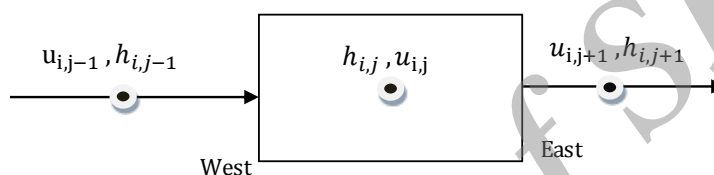


Fig. 2- View of the volume control considered in the computational domain  
شکل ۲- نمایشی از حجم کنترل در نظر گرفته شده در دامنه محاسباتی

مرز ورودی خواهند بود و در مرز خروجی جریان، گرادینان نرمال سرعت در زمان  $(N+1)$  برابر با صفر قرار داده می‌شود (Ghadimi, 2012). در تحقیق حاضر شبکه‌بندی جریان در مخزن با فاصله ۲۰ سانتی‌متری انجام گرفته و مقادیر سرعت در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شده است. نتیجه بسط معادلات در هر سطر از شبکه‌بندی، سیستمی از معادلات جبری غیرخطی با توجه به تعداد گره‌ها خواهد بود. بدین منظور برنامه‌ای در محیط برنامه نویسی MATLAB تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر  $u$  و  $h$  در زمان  $(N+1)$  می‌باشند.

### ۳-۲- حل عددی معادله رسوب

پس از تعیین مقادیر  $u$  و  $h$ ، بایستی مقادیر غلظت رسوبات را در گره‌های مربوطه تعیین نمود. بدین منظور ابتدا دامنه محاسباتی به تعدادی حجم کنترل کوچک و مجزا مطابق با مرحله قبل و شکل ۳ تقسیم شده و گسسته‌سازی معادله رسوب در ناحیه حل (شکل ۱)، با انتگرال‌گیری از عبارات مشتق و بکارگیری روش طرح مرکزی در جهت جریان و نهایتاً تقسیم تمام ترم‌ها به حجم کنترل سلول‌ها انجام می‌گیرد.

(ب) معادله مومنتوم:

$$\begin{aligned} & u_{i,j}^{(N+1)} - u_{i,j}^{(N)} \\ & + \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{u_{i,j}^{2(N+1)} - u_{i,j-1}^{2(N+1)}}{4} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} u_{i,j}^{(N+1)} \left( \frac{u_{i,j+1}^{(N+1)} - u_{i,j-1}^{(N+1)}}{2} \right) \right) \\ & + g \left( \frac{h_{i,j}^{(N+1)} - h_{i,j-1}^{(N+1)}}{\Delta x} \right) \\ & - g \left( S_0 - \frac{u_{i,j}^{2(N+1)} n^2}{\left( \frac{bh_{i,j}^{(N+1)}}{(b + 2h_{i,j}^{(N+1)})} \right)^{\frac{4}{3}}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن،  $N$  بالانویس  $(N)$  گام زمانی معلوم و  $(N+1)$  گام زمانی مجهول و  $(j)$  و  $(i)$  بترتیب مشخص‌کننده گام مکانی در راستای افق و قائم می‌باشند. برای حل همزمان معادلات ۶ و ۷ در زمان  $(N+1)$  با توجه به غیرخطی بودن آنها، نیازمند یک شرط اولیه (سرعت و عمق جریان در زمان  $N$ ) و دو شرط مرزی است که مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و عمق نظیر در زمان  $(N+1)$  در ورودی مخزن سد پاره‌سنگی بعنوان

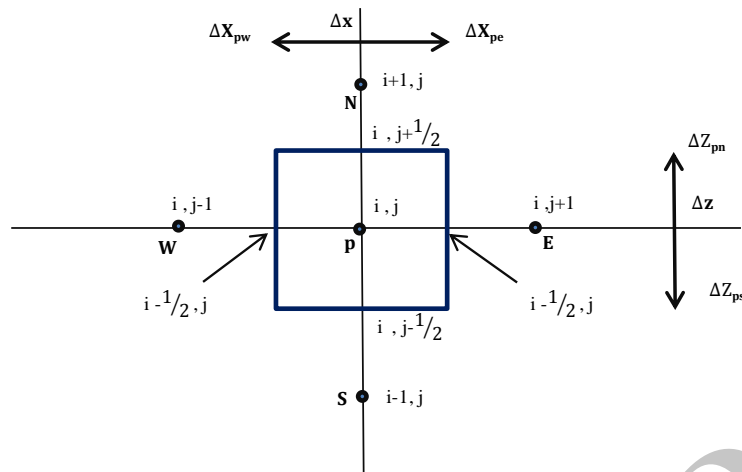


Fig. 3- The volume control considered to solve the sediment equation  
 شکل ۳- حجم کنترل در نظر گرفته شده برای حل معادله رسوب

بود و در مرز خروجی جریان گرادیان نرمال غلظت در زمان (N+1) برابر با صفر قرار داده می‌شود (Van Rijn, 1987; Ghadimi, 2012). در سطح آب (شرط مرزی بالا)، سیلان رسوبات قائم مطابق با رابطه (۱۰) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (Van Rijn, 1987; Wu et al., 2007):

$$W_s \cdot S + \varepsilon_z \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

شرط مرزی رسوب در تراز b (ضخامت لایه بار بستر) از بستر توسط محققین مختلف از جمله (Wu et al., 2007) به شکل زیر در نظر گرفته شده است (شرط مرزی پایین). قابل ذکر است میزان ضخامت لایه بار بستر (تراز b) در صورت عدم تشکیل فرم بستر حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ برابر عمق جریان در نظر گرفته می‌شود (Van Rijn, 1984; Lin and Falconer, 2010) که در این تحقیق حدود ۰/۰۲ برابر عمق جریان در نظر گرفته شد.

$$S_b = S_2 + S_{b*} [1 - e^{\frac{(\omega_s \sigma_c)}{v_t} (Z_2 - B)}] \quad (12)$$

که در معادله فوق  $S_b$ ، غلظت رسوبات معلق در تراز بستر،  $S_2$ ، غلظت رسوبات در مرکز حجم کنترل لایه ۲ در بالای گره مورد بررسی،  $S_{b*}$ ، غلظت تعادلی رسوبات معلق در تراز بستر،  $\omega_s$ ، سرعت سقوط ذره،  $v_t$ ، ضریب ویسکوزیته گردابی،  $\sigma_c$ ، عدد اشویت آشفته،  $Z_2$ ، فاصله مرکز حجم کنترل لایه ۲ در بالای گره مربوطه از بستر و B، عرض کانال می‌باشند. به علت متفاوت بودن روابط محققین مختلف، پیچیده بودن آنها و مشکل بودن اندازه‌گیری برخی از پارامترهای روابط ارائه شده، در این تحقیق رابطه (۱۳) به منظور محاسبه شرط مرزی رسوب در بستر پیشنهاد شده است که مبتنی بر رابطه ارائه شده توسط Wu et al. (2007) می‌باشد:

$$S_b = S_2 + k(S_2 - S_3) \quad (13)$$

در این بخش نیز، تمامی مشتقات مکانی موجود در معادله مذکور در گام بعدی (در زمان N+1) در نظر گرفته شده و این معادله به صورت کاملاً ضمنی حل شده است.

به دلیل عدم شناخت کافی اولیه از تغییرات غلظت رسوب در جهت جریان و همچنین تأثیر جریان بر غلظت رسوبات، در این بخش از طرح تفاضل مرکزی جهت گسسته‌سازی مقادیر غلظت روی سطوح حجم کنترل استفاده شده است. در این روش مقادیر غلظت رسوبات در روی مرزهای حجم کنترل مطابق با شکل ۳ برابر با میانگین غلظت رسوبات نقاط مجاور در نظر گرفته می‌شود:

$$S_e = \frac{S_p + S_E}{2}, S_w = \frac{S_w + S_p}{2}, S_n = \frac{S_n + S_p}{2}, S_s = \frac{S_p + S_s}{2} \quad (8)$$

فرم نهایی معادله رسوب (رابطه ۴) برای گره‌های داخلی پس از انتگرال‌گیری، جایگذاری و ساده‌سازی به شکل زیر خواهد بود:

$$a_p \cdot S_{i,j}^{N+1} = a_w \cdot S_{i,j-1} + a_E \cdot S_{i,j+1} + a_N \cdot S_{i+1,j} + a_s \cdot S_{i-1,j} \quad (9)$$

در این رابطه ضرایب  $a_p$ ،  $a_w$ ،  $a_E$ ،  $a_N$  و  $a_s$  به ترتیب مربوط به گره‌های مرکزی، غربی، شرقی، شمالی، جنوبی و براساس روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$a_p = \frac{1}{dt} + \frac{1}{2\Delta x} (u_{i,j-1}) - \frac{1}{2\Delta x} \cdot u_{i,j-1} + \frac{2\varepsilon_x}{\Delta x^2} + \frac{2\varepsilon_z}{\Delta z^2}, a_w = \frac{u_{i,j-1}}{2\Delta x} + \frac{\varepsilon_x}{\Delta x^2}, a_E = \frac{\varepsilon_x}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j}}{2\Delta x} \quad (10)$$

$$a_N = \frac{W_s}{2\Delta x} + \frac{\varepsilon_z}{\Delta z^2}, a_s = \frac{-W_s}{2\Delta z} + \frac{\varepsilon_z}{\Delta z^2}$$

برای حل معادله (۹) در زمان (N+1) با توجه به غیرخطی بودن آن، نیازمند یک شرط اولیه (غلظت رسوبات در زمان N) و چهار شرط مرزی است، مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوبات در زمان (N+1) در ورودی مخزن سد پاره‌سنگی بعنوان شرط مرز ورودی جریان خواهد

یا کوچکتر از صفر داشته باشد. مقدار ایده آل برای این شاخص صفر است.

#### ۵- روش انجام آزمایش

در راستای ارزیابی دقیق نتایج مدل شبیه سازی معادله سنت و نانت در داخل مخزن سد پاره سنگی آزمایش های مدل هیدرولیکی مربوط به این تحقیق، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا انجام گرفت. بدین منظور در فلوم شیشه ای به طول ۱۱ متر، عرض داخلی ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر، شیب کانال ۰/۰۴۱، سد پاره سنگی با طول و ابعاد متوسط سنگدانه به ترتیب برابر ۵۰ و ۳ سانتی متر ساخته شد. این فلوم توسط موتور پمپ با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه تغذیه شده و میزان دبی توسط یک شیر برقی مجهز به اینورتور تنظیم می گردد. در آزمایش های انجام یافته، رسوبات ماسه ای غیرچسبنده با مشخصات  $d_{50}$  برابر  $150 \mu m$ ،  $d_{90}$   $350 \mu m$  و  $G_S$   $2/63$ ، از بالای سطح آب در بخش ورودی مخزن به جریان تزریق می شدند. اندازه گیری دبی با دبی سنج التراسونیک، اندازه گیری تراز سطح آب در داخل مخزن سد پاره سنگی، توسط شبکه ای از لوله های پیزومتر تعبیه شده در فواصل ۲۰ سانتی متر از یکدیگر، غلظت رسوبات توسط پیپت، کاغذ صافی واتمن ۴۲ و ترازوی دیجیتال و به منظور اندازه گیری سرعت از دستگاه ADV استفاده گردید. شکل ۵ نمایی از فلوم استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد.

در رابطه (۱۳)،  $S_B$ ، غلظت رسوبات در تراز بستر،  $S_2$  و  $S_3$  به ترتیب غلظت رسوبات در مرکز حجم کنترل لایه ۲ و لایه ۳ در بالای گره مورد بررسی و  $k$ ، ضریبی است که از طریق بهینه سازی به دست می آید و در این تحقیق مقدار  $k$  با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک،  $1/15$  در نظر گرفته شده است. نتیجه بسط معادله (۹) بر اساس مقادیر  $u$  و  $h$  به دست آمده از بخش قبل و شروط مرزی، سیستمی از معادلات جبری غیرخطی با توجه به تعداد گره ها خواهد بود. بدین منظور برنامه ای در محیط برنامه نویسی MATLAB تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر غلظت رسوبات در زمان  $(N+1)$  می باشد. در شکل ۴ فلوجارت روش انجام تحقیق ارائه شده است.

#### ۴- توابع هدف و متغیرهای تصمیم

در این تحقیق جهت بررسی میزان خطا از معیار درصد خطای نسبی ( $R_e$  %) استفاده گردید (Addiscott and Whitmor, 1987):

$$\%RE = \frac{100}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(o_i - s_i)}{s_i} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $O$  و  $S$  به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده (سرعت یا غلظت) و  $m$  تعداد داده ها است. مقدار شاخص  $RE$  در واقع میزان انحراف نسبی مقادیر محاسبه شده از مقادیر مشاهداتی (اندازه گیری شده) است. این شاخص می تواند مقادیر مساوی، بزرگتر و

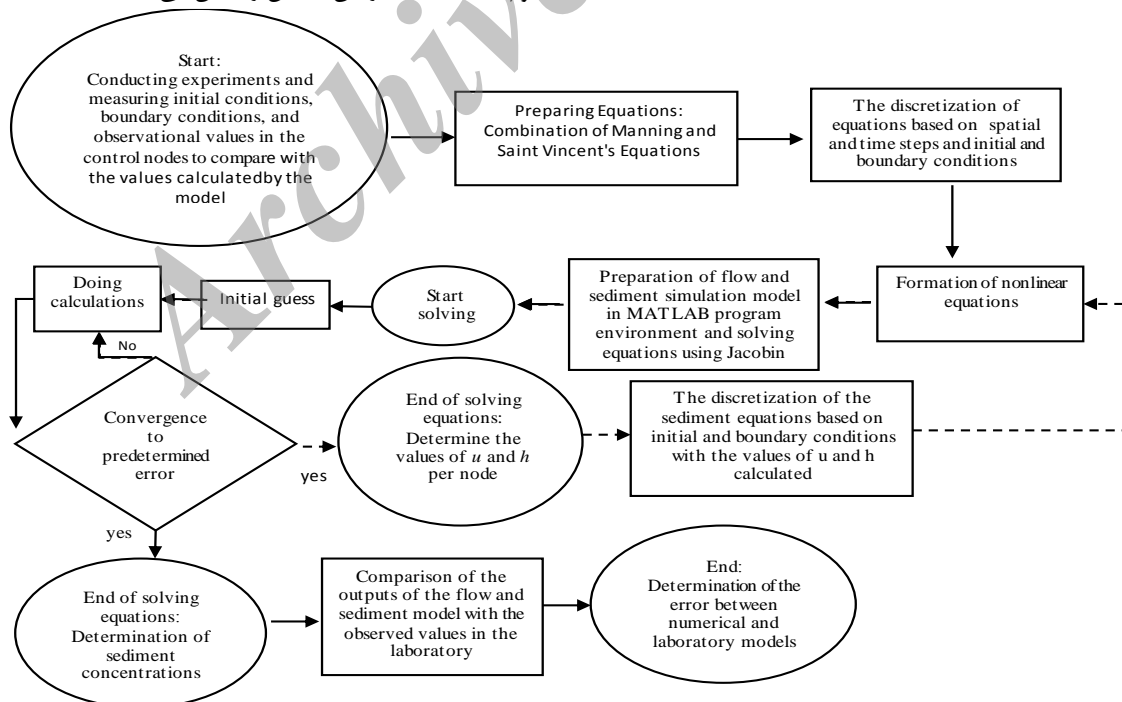


Fig. 4- The flowchart of research method

شکل ۴- فلوجارت روش انجام تحقیق

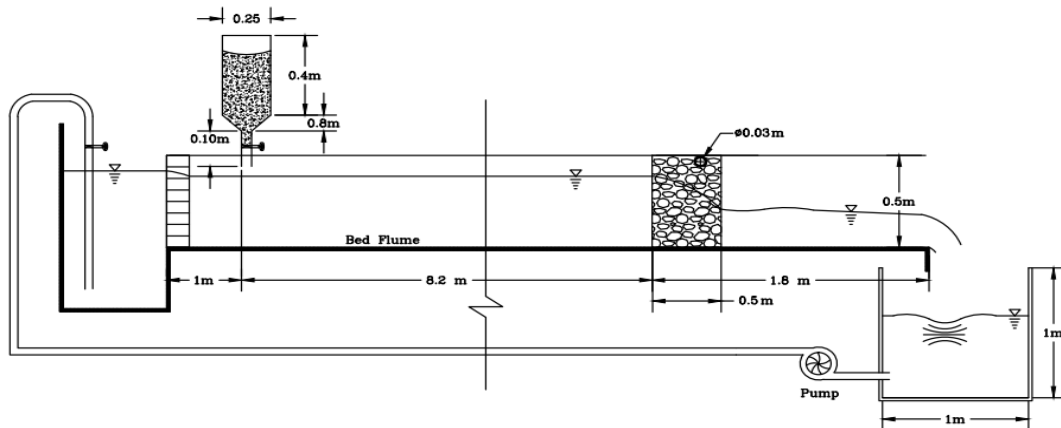


Fig. 5- View of the experimental flume  
شکل ۵- نمایی از فلوم آزمایشگاهی

توسط مدل ریاضی تهیه شده (مدل جریان) ابتدا مشخصات جریان (شامل عمق و سرعت) در دبی ۹ لیتر بر ثانیه بر مبنای شرایط اولیه جریان در دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه و شرایط مرزی جریان در دبی ۹ لیتر بر ثانیه (شامل سرعت و عمق در مرز ورودی) محاسبه می‌گردد. در شکل ۶ مقادیر عمق، سرعت و غلظت رسوبات مشاهده شده به ازای دبی پایه (دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه) نشان داده شده است.

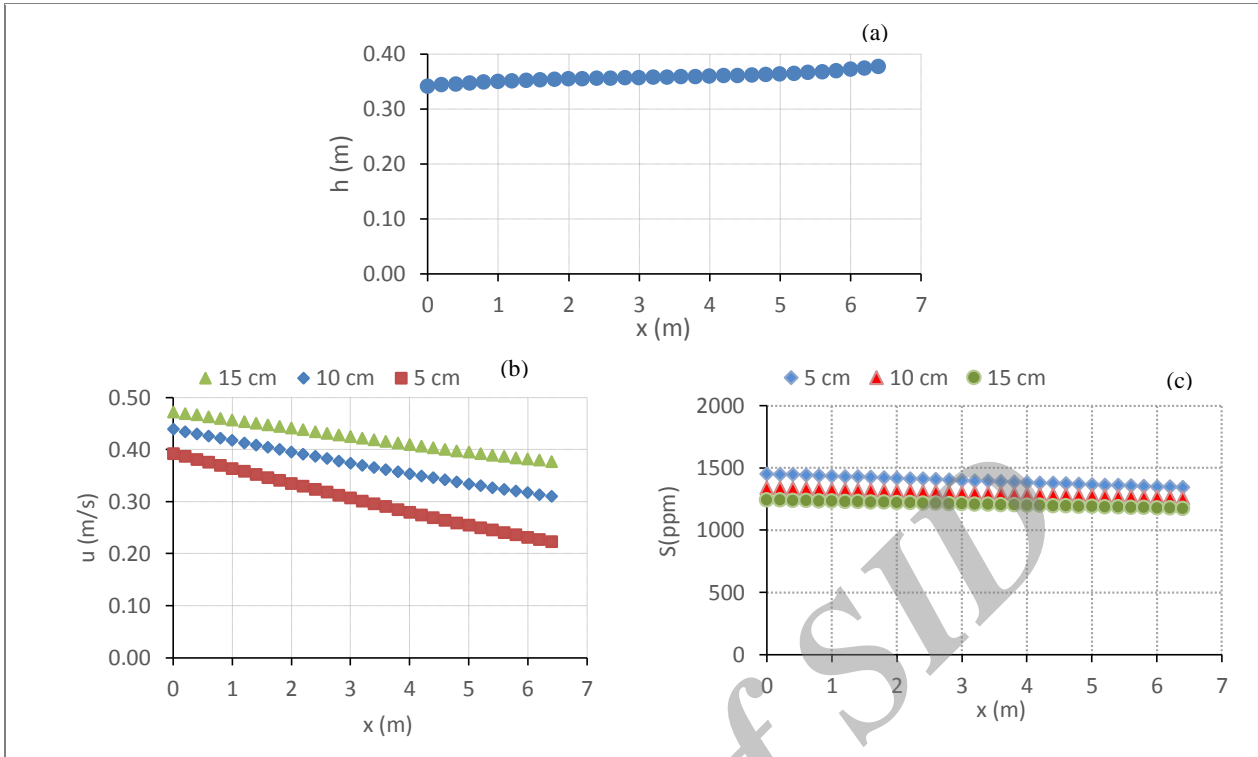
همانطور که از شکل ۶-ا مشخص است در داخل سد پاره‌سنگی و در جهت جریان از انرژی جنبشی جریان کاسته شده و بر انرژی فشاری جریان افزوده می‌شود که این مسأله با کاهش سرعت و افزایش عمق نمود پیدا می‌کند. مطابق با شکل ۶-ب با حرکت در جهت جریان در داخل مخزن سد پاره‌سنگی مقدار سرعت جریان در راستای افقی کاهش می‌یابد. کمینه سرعت در مقطع خروجی و در عمق ۵ سانتی‌متری (مطابق با توزیع عمودی سرعت در کانال) مشاهده می‌شود. در این مقطع عمق آب نسبت به دیگر مقاطع بیشتر بوده و کاهش سرعت با افزایش عمق قابل انتظار می‌باشد. بر اساس شکل ۶-ج میزان غلظت رسوبات در جهت جریان کاهش می‌یابد که این مسأله حاکی از ته‌نشینی و نگهداشت رسوبات در مخزن سد پاره‌سنگی است. بر اساس این شکل میزان غلظت رسوبات مطابق با توزیع عمودی غلظت در کانال‌ها در این راستا کاهش می‌یابد و ماکزیمم غلظت رسوبات در ورودی مخزن و در عمق ۵ سانتی‌متری مشاهده می‌شود.

سپس با استفاده از مدل تهیه شده و بر مبنای مشخصات اولیه جریان و شرایط مرزی مقدار عمق و سرعت در دبی ۹ لیتر بر ثانیه محاسبه می‌گردد. در شکل ۷ مقادیر محاسباتی عمق و سرعت در دبی ۹ لیتر بر ثانیه ارائه شده است.

جهت اجرای مدل شبیه‌ساز و انجام آزمایش، شبکه‌بندی مخزن سد پاره‌سنگی با ۳۲ مقطع به فواصل طولی ۲۰ سانتی‌متر صورت گرفت. بعد از رهاسازی دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه به درون فلوم و برقراری آن، بر مبنای شبکه‌بندی در نظر گرفته شده مقادیر مشخصات جریان (شامل عمق و سرعت جریان به فاصله طولی ۲۰ سانتی‌متر) مخزن سد پاره‌سنگی و در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (شرایط اولیه). سپس دبی جریان توسط شیر برقی مجهز به اینورتور به ۹ لیتر بر ثانیه افزایش یافته و مجدداً این مشخصات جریان شامل سرعت، ارتفاع و همچنین غلظت رسوبات با گام زمانی ۶۰ ثانیه در ۹ مقطع جریان به فواصل طولی ۸۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (مرز ورودی و مقادیر مشاهداتی جهت صحت‌سنجی مدل). استفاده از شیر برقی مجهز به اینورتور قابل برنامه‌ریزی موجب خواهد شد که بتوان بارها دبی را به صورت دقیق از دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه به میزان ۹ لیتر بر ثانیه افزایش داده و با انتقال دستگاه ADV به نقاط مختلف فلوم، سرعت و غلظت را در نقاط مشخص و در زمان معین اندازه‌گیری نمود. پس از اندازه‌گیری مقادیر سرعت و عمق بایستی مقدار غلظت رسوبات اندازه‌گیری شود. بدین منظور مجدداً پس از برقراری دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه در کانال، تزریق رسوبات شروع شده و پس از پایداری جریان رسوبی، در نقاطی که سرعت اندازه‌گیری شده غلظت رسوبات توسط پیپت برداشت می‌گردد؛ سپس جریان به ۹ لیتر بر ثانیه افزایش داده شده و پس از ۶۰ ثانیه مجدداً غلظت رسوبات در همان نقاط قبلی برداشت می‌گردد. اطلاعات اندازه‌گیری شده در دبی ۹ لیتر بر ثانیه شامل مرز ورودی و مقادیر مشاهداتی جهت مقایسه با مقادیر محاسباتی است.

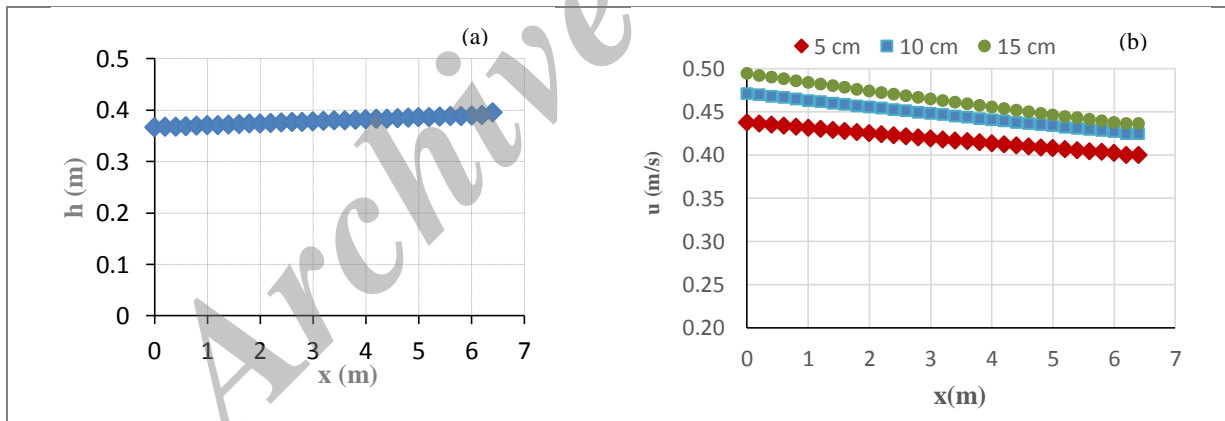
## ۶- بحث و نتایج

طبق روش شرح داده شده در قسمت روش آزمایش، در این تحقیق



**Fig. 6- Initial flow conditions in 7.5 lit/s flux (a: measured depth values, b: measured velocity values, c: measured sediment concentration values at different depths)**

شکل ۶- شرایط اولیه جریان در دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه (a: مقادیر عمق اندازه‌گیری، b: مقادیر سرعت اندازه‌گیری، c: مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری در عمق‌های مختلف)



**Fig. 7- Calculated velocity and head for 9 lit/s flux**

(a: Depth changes, b: Velocity changes at different depths from the flume bed)

شکل ۷- مقادیر محاسباتی سرعت و عمق جریان به ازای دبی ۹ لیتر بر ثانیه (a: تغییرات عمق، b: تغییرات سرعت در عمق‌های مختلف از کف)

سد پاره‌سنگی با عنایت به شکل ۸ و جدول ۱ در حال افزایش می‌باشد که متأثر از روند تغییرات سرعت بوده و در مناطق نزدیک بدنه سد با توجه به افزایش نوسانات جریان و همچنین در عمق‌های پایین به دلیل تأثیرات بستر، میزان خطای نسبی غلظت همانند سرعت در مقایسه با مناطق دیگر بیشتر است.

در مرحله بعد بر مبنای مقادیر محاسبه‌شده عمق و سرعت در دبی ۹ لیتر بر ثانیه، شرایط اولیه رسوبات در دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه و شرایط مرزی رسوبات مقادیر غلظت در دبی ۹ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید که نتایج خروجی این مرحله در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه نتایج رسوبات اندازه‌گیری شده و محاسباتی نشان می‌دهد که روند تغییرات درصد خطای نسبی غلظت رسوب در راستای طولی مخزن



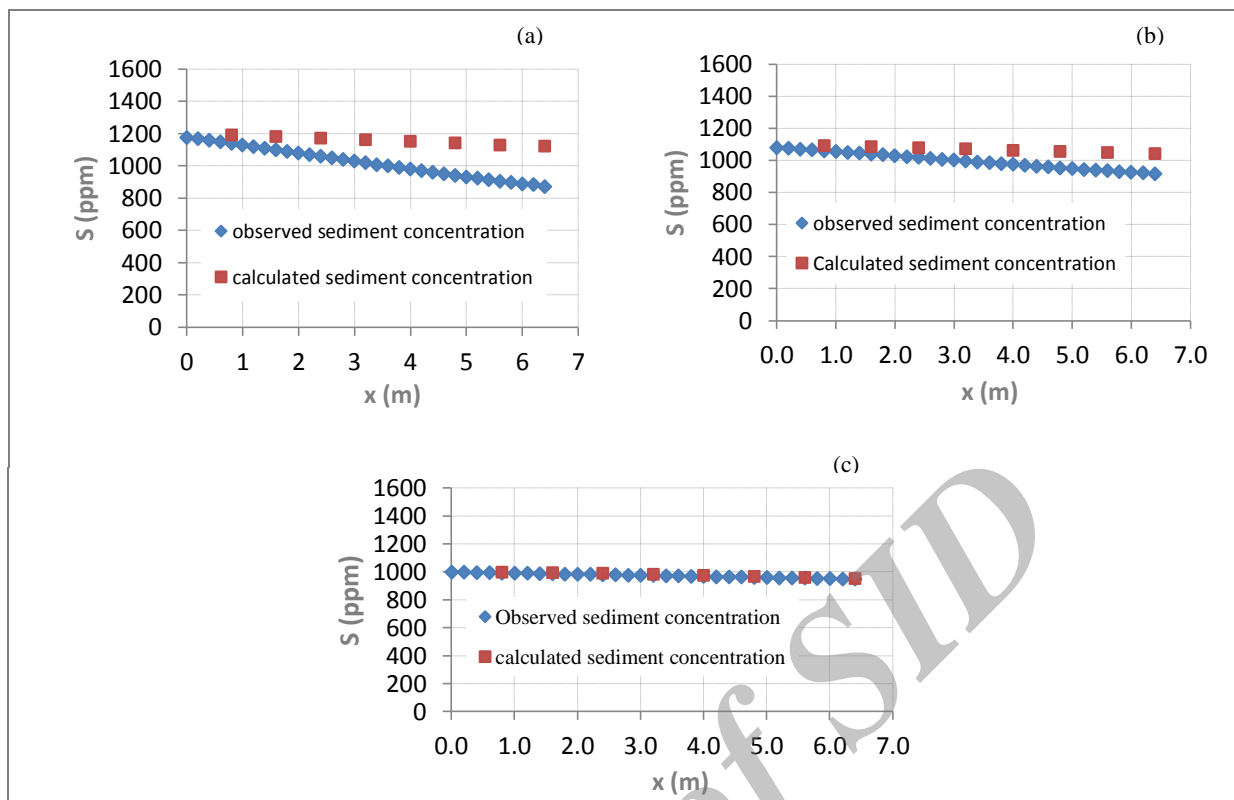


Fig. 8- Changes of calculated sediment concentration for 9 lit/s flux (a: depth of 5 cm; b: depth of 10 cm; c: depth of 15 cm of the flume bed)

شکل ۸- تغییرات غلظت رسوبات مشاهداتی و محاسباتی به ازای دبی ۹ لیتر بر ثانیه (a: عمق ۵، b: عمق ۱۰ و c: عمق ۱۵ سانتی متری از بستر)

ممکن را داشته باشند. به دلیل شرط مرزی در نظر گرفته شده (صفر گرفتن گرادیان نرمال سرعت خروجی)، غلظت و سرعت محاسباتی در دو مقطع آخر برای هر عمق ثابت می‌گردد که این مسأله موجب افزایش میزان خطای نسبی در انتهای مخزن (مقطع ۶/۴ در جدول ۱) می‌شود. به منظور کاهش این خطا می‌توان مقادیر گام مکانی ( $\Delta x$ ) را کوچک در نظر گرفت و تطابق بین مقادیر غلظت محاسباتی و مشاهداتی را افزایش داد. بر اساس جدول ۱ مقدار خطای نسبی مدل در پیش‌بینی غلظت در انتهای مخزن سد پاره‌سنگی ۱۵/۶۶ درصد می‌باشد که این مسأله حاکی از دقت بسیار مناسب این مدل ریاضی در تخمین غلظت جریان است.

مطابق با جدول ۱ میانگین خطای نسبی کل مدل در برآورد غلظت حدود ۹/۱۷ درصد است که حاکی از دقت خوب مدل در پیش‌بینی غلظت جریان می‌باشد. نکته دیگری که از جدول ۱ و شکل ۸ برداشت می‌شود این است که روند تغییرات درصد خطای نسبی در جهت جریان به صورت افزایشی است که این موضوع ناشی از روش بالاسویه و ماهیت این روش می‌باشد. از دلایل دیگر ایجاد این اختلاف می‌توان به آشفتگی جریان، خطای روش عددی، خطای اندازه‌گیری، خطای تطابق بین گام زمانی اندازه‌گیری شده و محاسباتی، نوسانات اندک جریان و تأثیر ضرایب معادله رسوب و غیره اشاره کرد. هرچند در انجام آزمایش‌ها و اجرای مدل تلاش شد که این خطاها کمترین دخالت

Table 1-The relative error value of sediment concentration in reservoir of rock-fill dam

جدول ۱- مقادیر خطای نسبی غلظت در مخزن سد پاره‌سنگی

x (m)	0.8	1.6	2.4	3.6	4	4.8	5.6	6.4	The mean of relative error
The distance from the bed (cm)									
5	4.56	7.45	10.6	14.03	17.59	21.23	24.86	28.66	16.13
10	3.14	4.48	5.98	7.55	9.15	10.72	12.21	13.90	8.39
15	1.98	2.15	2.43	2.76	3.09	3.39	3.64	4.42	2.98
The mean of relative error	3.23	4.69	6.35	8.11	9.94	11.78	13.57	15.66	9.17

## ۷- نتیجه گیری

## ۸- مراجع

- Abrishami J, Hosseini SM (2015) Hydraulics open channels. Imam Reza Publication Co. (AS), 496p (In Persian)
- Addiscott TM, Whitmore AP (1987) Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn. *Journal of Agricultural Science* 109:141-157
- Akan O (2006) Open Channel Hydraulics. First edition, Butterworth-Heinemann, 377p
- Aldrighetti E (2007) Computational hydraulic techniques for the Saint Venant Equations in arbitrarily shaped geometry. PhD thesis, Università degli Studi di Trento, 125p
- Bukata RP, Bobba AG (2015) Determination of diffusion coefficients associated with the transport of  $^{210}\text{Pb}$  radionuclides in lake bed sediments. *Environment Geology* 5(3):133-141
- Castillo L, Álvarez MA (2014) Numerical modeling of sedimentation and flushing at the Paute-Cardenillo reservoir. ASCE-EWRI, International Perspective on Water Resources and Environment Quito, January 8-10
- Chandler ID (2012) Vertical variation in diffusion coefficient within sediments. PhD thesis, University of Warwick, 188p
- Cheng NS (1997) Simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 123(2):149-152
- Esmaili T, Sumi T, Kantoush, S, Kubota Y, Haun S (2015) Three-dimensional numerical modeling of sediment flushing: case study of Dashidaria reservoir, Japan. IAHR World Congress 28 June-3 July, The Netherlands
- Faghihirad Sh, Lin B, Falconer RA (2015) Application of a 3D Layer Integrated Numerical Model of Flow and Sediment Transport Processes to a Reservoir. *Water* 7(10):5239-5257
- Ghadimi P (2012) Applied computational fluid dynamics based on finite difference, finite element and finite volume methods. volume 2, Amirkabir University of technology Tehran polytechnic press, 1124p (In persian)
- Gilja G, Kuspilić N. (2015) Modeling of long-term sedimentation in the Osijek port basin. 14th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, 8-10 September, 590-600, Brno, Czech
- Heydari M (2007) Two dimensional model of flow through and over rockfill dams and its application in

رژیم جریان‌های رودخانه‌ای در شرایط طبیعی اکثراً غیردائمی بوده و همراه با جریان، رسوبات نیز انتقال می‌یابند. یکی از روش‌های کنترل سیلاب و رسوب احداث سد‌های پاره‌سنگی است. بر خلاف مخازن سد‌های با بدنه نفوذناپذیر که شرایط جریان در آنها به صورت سه بعدی بوده، می‌توان جریان‌های عبوری از سد‌های پاره‌سنگی را تقریباً به صورت یک بعدی در نظر گرفت. در این تحقیق مدل شبیه‌سازی جریان غیردائمی و حمل رسوب در درون مخزن سد پاره‌سنگی براساس حل عددی همزمان معادلات سنت و نانت و معادله انتقال-پخش رسوب براساس روش حجم محدود بالاسویه و در شرایط ضمنی کامل ارائه گردیده است. میانگین خطای نسبی غلظت برابر با ۹/۱۷ درصد است که نشان می‌دهد روش عددی حجم محدودی به خوبی توانایی حل معادلات حاکم بر جریان و حمل رسوب در مخزن سد پاره‌سنگی را داراست. علاوه بر روندیابی دینامیکی سیلاب و تعیین غلظت رسوبات در مخزن سد پاره‌سنگی، با استفاده از این مدل می‌توان به ازای دبی‌های مختلف در هنگام عبور سیلاب، میزان رسوبات عبوری و به تله افتاده شده در مخزن را محاسبه نمود که بر این اساس می‌توان عملکرد سد‌های پاره‌سنگی در گزینه‌های مختلف (به ازای ابعاد بدنه و مخزن، قطر سنگدانه‌های مختلف در اجرا بدنه) را در جریان‌های سیلابی (حاوی رسوبات) مورد ارزیابی قرار داد و بهینه‌ترین ابعاد بدنه و سنگدانه‌های مورد استفاده در آن و نیز همچنین موقعیت قرارگیری سد پاره‌سنگی را با توجه به اهداف مورد انتظار (ایجاد ذخیره موقت، کاهش پیک سیلاب، افزایش زمان عبور و میزان کنترل رسوب) قبل از احداث تعیین نمود. که این موضوع به لحاظ اقتصادی و فنی در شرایط عملی بسیار مفید می‌باشد. در این تحقیق برای شرط مرزی رسوب در تراز بستر بر مبنای رابطه تجربی پیشنهادی توسط محققین مختلف، رابطه (۱۳) ارائه شده است که ضریب آن بر اساس روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تعیین شده، این روش به خوبی قادر است میزان غلظت رسوبات را در تراز بستر تخمین بزند. بنابراین می‌توان در تحقیقات بعدی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف، و بهره گرفتن از این معادله پیشنهادی (به جای معادلات تجربی موجود که به پارامترهای بسیاری وابسته است) در تعیین شرط مرزی رسوب در تراز بستر استفاده نمود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Partial Differential Equations
- 2- Finite Difference Method
- 3- Finite Element Method
- 4- Finite Volume Method
- 5- Navier Stokes Equations

- cohesive sediment transport in open channel flow. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12:61-67
- Shayannejad M (2000) The evaluation and modeling of flow through rockfill dams and its application in flood control. Irrigation science and engineering doctoral dissertation, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University Press, 238p (In persian)
- Sheybani HR, Bayat H (2004) Hydraulic analysis of over gabion dam wit fully sedimented reservoir. *Journal of Pajouhesh Va Sazandgi* 63:85-94 (In persian)
- Van Rijn LC (1984) Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 110(11):1613-1641
- Van Rijn LC (1987) Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Doctoral Thesis Delft Hydraulics Communication No. 382
- Versteeg H, Malalasekera W (2007) An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd edition, Pearson Education Ltd, Harlow, England, 518p
- Wang L, Tang X, Kong L, Jiang L (2014) A variance-based information diffusion coefficient optimization algorithm and its application in missile effectiveness. Communications Security Conference, 22-24 May, Beijing China
- Wu W (2007) Computational river dynamics. Taylor & Francis Group, London, UK, 509p
- flood control. PhD thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 188p (In persian)
- Kempe T, Vowinckel B (2014) On the relevance of collision modeling for interface-resolving simulations of sediment transport. *International Journal of Multiphase Flow* 58:214-235
- Lin B, Falconer R (2010) Numerical modelling of three-dimensional suspended sediment for estuarine and coastal waters. *Journal of Hydraulic Research* 34(04):435-456
- Liu X, Beljadid A (2017) A coupled numerical model for water flow, sediment transport and bed erosion. *Computers and Fluids* 154:273-284
- Nazemi A (2011) Flow hydraulics and sediment transport in pervious rockfill detention dams. PhD thesis, University of Putra, Malaysia, 187p
- Qaderi K, Samani JM, Rezai N (2010) Mathematical and physical models and flood routing through rockfill dams. The tenth seminar on irrigation and reduce evaporation, 8-10 February, Kerman University Press (In Persian)
- Rubey W (1933) Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *American Journal of Science* 225:325-338
- Samani JMV, Heydari M (2007) Reservoir routing through successive rockfill detention dams. *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)* 9:317-326
- Samani JM, Samani HM, Halaghi MM, Kouchakzadeh M (2010) One-dimensional numerical model of