

بررسی عددی و آزمایشگاهی توزیع رسوبات غیر چسبنده در درون بدنه سدهای پاره‌سنگی

اکبر محمدیها¹، مجید حیدری^{2*}، جلال صادقیان³ و علیرضا عمادی⁴

- 1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان
- 2- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان
- 3- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان
- 4- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

* mheydari@basu.ac.ir

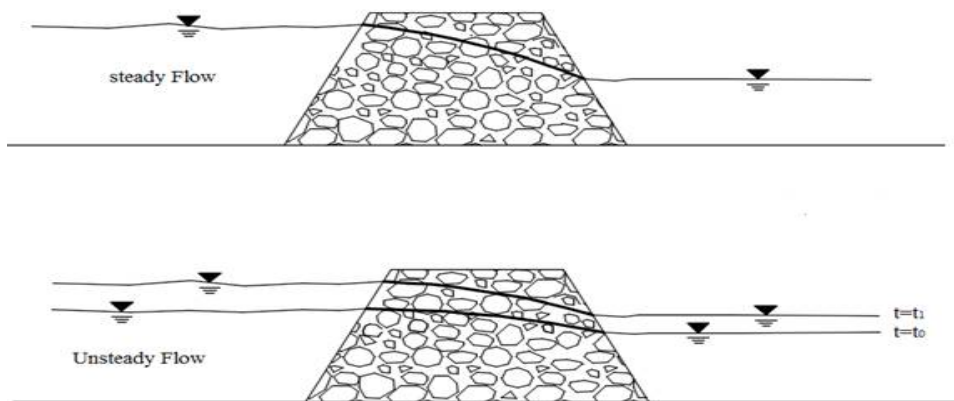
چکیده - یکی از روش‌های سازه‌ای ارزان قیمت کنترل سیلاب، استفاده از سدهای پاره‌سنگی فاقد هسته است. جریان‌های سیلابی معمولاً بار رسوبی بالایی دارند و با توجه به بزرگ بودن خلل و فرج بدنه این سدها، همراه با آب مقدار زیادی رسوب به داخل بدنه سد نفوذ می‌کند. بنابراین تعیین غلظت رسوب در نقاط مختلف بدنه به منظور تعیین نقاط بحرانی از نظر رسوب‌گذاری، میزان تله‌اندازی رسوب، میزان رسوب عبوری و ... از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در این تحقیق، ابتدا بر مبنای معادلات سنت و نانت و دوجمله‌ای فورشه‌ایمر و با استفاده از روش عددی حجم محدود، مدل ریاضی شبیه‌ساز جریان در محیط متلب تهیه و اجرا شد. سپس با استفاده از نتایج خروجی مدل و بر مبنای معادله انتقال رسوب و با استفاده از روش عددی حجم محدود، مدل ریاضی شبیه‌ساز توزیع غلظت رسوبات غیر چسبنده در بدنه سد پاره‌سنگی توسعه داده شد. مدل ارائه شده مقادیر غلظت رسوبات را در نقاط مختلف بدنه بر مبنای شبکه‌بندی در نظر گرفته شده از مرحله قبل تعیین می‌کند. برای ارزیابی نتایج خروجی این مدل‌ها از نتایج آزمایشگاهی استفاده شد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی حاکی از صحت مدل عددی تهیه شده در شبیه‌سازی توزیع غلظت رسوبات بود. بطوری‌که بر مبنای مقایسه انجام شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع رسوبات با مقادیر محاسباتی در سه مقطع از بدنه سد پاره‌سنگی، میانگین خطای نسبی 8/14 درصد بدست آمد.

کلید واژگان: بدنه سد پاره‌سنگی، معادله سنت و نانت، معادله فورشه‌ایمر، انتقال رسوب.

1- مقدمه

شمایی از نحوه عبور جریان در این سدها برای جریان‌های دائمی و غیردائمی در شکل 1 نشان داده شده است. مطابق با شکل 1 این سدها با ایجاد ذخیره موقت، نه تنها اوج سیل را کاهش می‌دهند، بلکه در بعد زمانی نیز تأخیر ایجاد می‌کنند (حیدری، 1386).

سدهای پاره‌سنگی (گابیون) سدهایی هستند که با پاره‌سنگ یا سنگدانه ساخته شده و انواع مختلفی دارند. در این تحقیق از نوعی سد پاره‌سنگی تأخیری فاقد هسته بحث می‌شود که به منظور کنترل سیلاب استفاده می‌شود.



شکل 1 نحوه عبور جریان از درون سد پاره‌سنگی در جریان‌های دائمی و غیردائمی (حیدری، 1386)

آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای انتقال ذرات رسوبی غیرچسبنده از محیط‌های متخلخل و در حالت متلاطم پیشنهاد نمودند. قادری و همکاران (1384) بر مبنای تحقیقات سامانی و عمادی (1382) و رابطه انتقال رسوب در محیط‌های متخلخل در حالت جریان دائم، رابطه‌ای برای انتقال رسوب در جریان‌های متلاطم از سدهای پاره‌سنگی ارائه نمودند. (Mousavi et al. (2011) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، معادله ارائه شده توسط Joy et al. (1991)، تحقیقات قادری و همکاران (1384) و آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی و میزان دبی رسوبات عبوری از بدنه سدهای پاره‌سنگی در جریان‌های متلاطم پیشنهاد نمودند. بر اساس آزمایشات آنها، میانگین خطای نسبی رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی و معادله دبی رسوبات عبوری به ترتیب 0/4 درصد و 9/4 درصد بدست آمد. (Nazemi (2011) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، آنالیز ابعادی و رگرسیون‌گیری رابطه‌ای برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی و میزان دبی رسوبات عبوری از بدنه سدهای پاره‌سنگی در جریان‌های متلاطم پیشنهاد نمودند. بر اساس آزمایش‌های ناظمی میانگین مربعات خطای رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی و معادله دبی رسوبات عبوری به ترتیب $4/46 \times 10^{-5}$ درصد و $6/7 \times 10^{-6}$ درصد بدست آمد.

(Chapokpour and Amiri-Tokaldany (2013) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سامانی و عمادی (1382)، (Mousavi et al. (2011)، Nazemi (2011) و بر اساس معادله ارائه شده توسط Joy et al. (1991) رابطه جدیدی

جریان‌های سیلابی معمولاً بار رسوبی بالایی دارند و با توجه به بزرگ بودن خلل و فرج بدنه این سدها، همراه با آب مقدار زیادی رسوب به داخل بدنه سد نفوذ می‌کند. آگاهی از میزان رسوبات در درون بدنه سدهای پاره‌سنگی می‌تواند کمک شایانی در شبیه‌سازی هر چه بهتر جریان عبوری از بدنه، کنترل رسوبات، میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در بالادست یا پایین‌دست سد و بالا بردن عملکرد داشته باشد. محققین مختلف برای تعیین عبور رسوب از بدنه سدهای پاره‌سنگی، از روابط گرادیان هیدرولیکی و گرادیان هیدرولیکی بحرانی استفاده نموده‌اند. در صورتیکه گرادیان هیدرولیکی بیشتر از گرادیان هیدرولیکی بحرانی باشد، رسوبات ورودی به سد شسته شده و از بدنه خارج می‌شود و در صورتیکه گرادیان هیدرولیکی کمتر از گرادیان هیدرولیکی بحرانی باشد، رسوبات ورودی در درون بدنه باقی می‌مانند. (Sakthivadivel (1972) اولین محقق بود که حرکت رسوبات از درون محیط متخلخل در حالت جریان آرام را با در نظر گرفتن اثرات نیروی وزن ذره مورد بررسی قرار داد. وی با نوشتن رابطه تعادل نیروهای وارد بر یک ذره روی سطح شیب دار، رابطه‌ای را برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی ارائه داد.

سامانی و عمادی (1382) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی در محیط‌های متخلخل در جریان‌های آرام، رابطه‌ای برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بحرانی در جریان‌های متلاطم پیشنهاد نمودند. (Joy et al. (1991) با استفاده از اصول

2- مواد و روش‌ها

2-1- هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل

درشت‌دانه

در سدهای پاره‌سنگی بعلت بزرگ بودن خلل و فرج داخل آنها، جریان به صورت آشفته بوده و قانون دارسی و سایر معادلات متداول در این محیط‌ها صادق نمی‌باشد، بنابراین لازم است از روابطی استفاده گردد که ضمن تبیین خصوصیات فیزیکی این محیط‌ها بتواند هیدرولیک جریان آنها را نیز شبیه‌سازی کند. در این تحقیق از شکل دو جمله‌ای بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت استفاده شده، که به معادله فورشه‌ایمر نیز معروف است و با استفاده از معادلات ناویر استوکس بدست آمده است (Samani et al., 2003).

$$I = Au + Bu^2 \quad (1)$$

که در آن I گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)، u سرعت جریان، A ، B ضرایب ثابت که A به مشخصات فیزیکی مصالح، میزان گرانی و دانسیته سیال و B به مشخصات فیزیکی مصالح و شرایط هیدرولیکی در بدنه متخلخل بستگی دارد (Samani et al., 2003; Nazemi, 2011). در این تحقیق مقادیر A و B در معادله (1) با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، به ترتیب $2/1$ و $-2/46$ در نظر گرفته شده است.

2-2- معادله حاکم بر جریان

برای محاسبه مشخصات جریان در بدنه سد پاره‌سنگی در شرایط جریان غیر دائم از معادله سنت ونانت به شرح ذیل استفاده شده است، که شامل یک دسته معادلات تفاضلات جزئی هذلولی به صورت زیر است (Aldrighetti, 2007).

الف) معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ب) معادله مومنتم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (3)$$

در روابط فوق u ، مؤلفه سرعت جریان در جهت x جهت h عمق جریان، x راستای طولی جریان، S_0 شیب بستر، S_f شیب خط انرژی (گرادیان هیدرولیکی) و t زمان می‌باشد.

برای میزان رسوبات انتقال یافته از سدهای پاره‌سنگی ارائه نمودند که نسبت به روابط قبلی عمومی‌تر بود. بر اساس تحقیقات ایشان، رابطه ارائه شده از دقت مناسبی (با میانگین خطای نسبی 21 درصد) در تخمین میزان دبی رسوبات عبوری برخوردار است.

Kempe et al. (2014) برای شبیه‌سازی جریان از حل عددی معادلات ناویر استوکس به روش حجم محدود استفاده کردند و با به کارگیری مدل‌های تصادفی، میزان حمل رسوب در کانال‌های باز را تعیین کردند.

Faghihirad et al. (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 صحت مناسب مدل شبیه ساز بود.

در بیشتر تحقیق‌های انجام شده، محققان به شبیه‌سازی جریان و حمل رسوبات در کانال، رودخانه و یا داخل مخزن پرداخته‌اند و یا بر مبنای آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای تعیین میزان دبی رسوبات عبوری از کل بدنه سد پاره-سنگی پیشنهاد نموده‌اند که این معادلات به علت در نظر نگرفتن همه پارامترهای دخیل و محدود بودن آزمایشات انجام شده، حالت عمومی نداشته و برای شرایط خاصی صادق هستند؛ ضمن اینکه در این پژوهش‌ها کمتر به بررسی عددی میزان دبی رسوبات عبوری و توزیع رسوبات در درون بدنه در شرایط غیردائمی پرداخته شده است. لذا در این تحقیق سعی شده است که ابتدا با ترکیب معادلات غیردائمی، معادلات سنت ونانت و با استفاده از روش عددی حجم محدود، رفتار جریان غیردائمی در داخل بدنه سد بررسی و شبیه‌سازی گردد و سپس بر مبنای این نتایج توزیع رسوبات در درون بدنه مشخص گردد. همچنین با توجه به ماهیت تجربی بودن و عدم اطمینان از نتایج روش‌های تجربی، در این تحقیق از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محاسبه ضرایب فورشه‌ایمر، ضریب شرط مرزی رسوب در تراز بستر، ضرایب اختلاط رسوب و سرعت سقوط استفاده شده است.

(Aldrighetti, 2007).

در تحقیق حاضر برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان (معادله سنت ونانت-فورشهپایمر) و معادله رسوب از روش عددی حجم محدود با رویکرد ضمنی استفاده شده است. استفاده از این رویکرد، موجب پایداری بی‌قید و شرط حل مسئله خواهد شد.

2-3- معادله رسوب

در بدنه سد پاره‌سنگی معادله حاکم بر توزیع غلظت رسوبات معلق در شکل دو بعدی با فرض جریان جانبی برابر صفر به صورت رابطه (4) می‌باشد، که این معادله بر مبنای فرآیندهای پخش و جابجایی استوار است و به همین علت به معادله جابجایی-پخش¹ نیز معروف است (Wu, 2007؛ محمودیان شوشتری، 1389).

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

که در آن، s غلظت مکانی رسوبات (در این تحقیق بصورت ppm و بدون بعد)، w_s سرعت سقوط ذره، ε_x و ε_z به ترتیب ضریب اختلاط رسوب در راستای قائم (z) و افقی (x) با بعد (L) می‌باشند. برای محاسبه w_s ، ε_x و ε_z روابط تجربی بسیاری ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به روابط ارائه شده توسط (Van Rijn، Rubey (1933)، Cheng (1997) و Wu and Wang (2006) (1984)، Van Rijn (1984) و Scheidegaer (1961) (1984) رابطه با سرعت سقوط و روابط ارائه شده توسط (Van Rijn (1984) رابطه با ضریب اختلاط اشاره نمود. با توجه به ماهیت این روش‌ها (تجربی بودن) و عدم اطمینان از نتایج این روش‌ها، 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 ، ε_x و ε_z در معادله 4 با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، به ترتیب 0/001، 200 و 0/002 در نظر گرفته شده است.

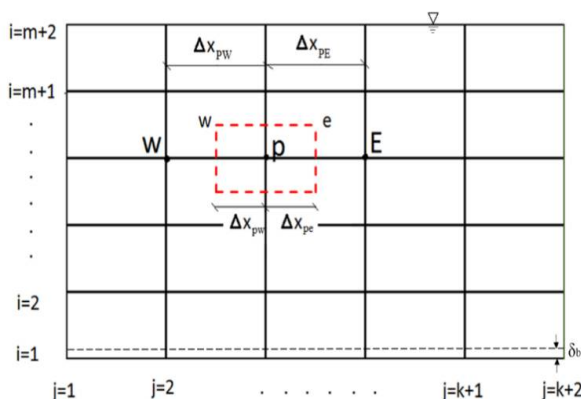
3- حل عددی معادلات حاکم بر جریان

حل مستقیم معادله سنت ونانت و حمل رسوب بعلا ماهیت غیرخطی این معادلات امکانپذیر نبوده و برای حل آنها بایستی از روش‌های ترسیمی و یا عددی استفاده شود.

3-1- گسسته‌سازی معادلات جریان

برای حل معادلات شبیه‌ساز جریان در درون بدنه سد پاره‌سنگی، ابتدا معادله غیردارسی فورشهپایمر با معادله مومنتم در معادله سنت ونانت ترکیب شده، سپس این معادلات با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شدند. بدین منظور ناحیه حل (بدنه سد پاره‌سنگی) در جهت جریان مطابق شکل 2 شبکه‌بندی می‌گردد و گسسته‌سازی معادلات برای کلیه گره‌های داخلی با انتگرال‌گیری از عبارات مشتق و با بکارگیری روش بالاسویه² در جهت جریان و نهایتاً تقسیم تمام ترماها 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 (قدیمی، 1392؛ Versteeg and Malalasekera, 2007).

بدین منظور دامنه محاسباتی به تعدادی حجم کنترل کوچک و مجزا مطابق با شکل 3 تقسیم می‌گردد.



شکل 2 شبکه بندی دامنه جریان

² Upwind

¹ Convection-diffusion equation

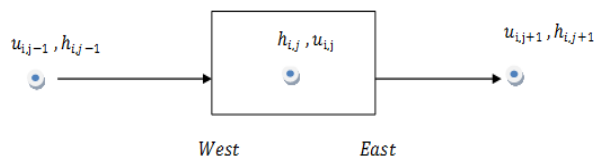
$$\frac{1}{2\Delta x} u_{i,j}^{n+1} \left(\frac{u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j-1}^{n+1}}{2} \right) + g \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x} \right) - g \left(S_0 - \left(Au_{i,j}^{n+1} + Bu_{i,j}^2 \right)^{n+1} \right) = 0 \quad (7)$$

حل همزمان معادلات (6) و (7) در گام زمانی بعدی (n+1) با توجه به غیرخطی بودن آنها، نیازمند یک شرط اولیه (سرعت و عمق جریان در زمان فعلی (n)) و دو شرط مرزی است. مقادیر اندازه گیری شده سرعت و عمق نظیر در زمان (n+1) در ورودی بدنه سد پاره‌سنگی بعنوان شرط مرز ورودی جریان خواهد بود و در مرز خروجی جریان گرادیان نرمال سرعت در زمان (n+1) برابر با صفر قرار داده می‌شود (قدیمی، 1392). در تحقیق حاضر شبکه بندی جریان در بدنه با فاصله 10 سانتی‌متری انجام گرفته و مقادیر سرعت در عمق‌های 5، 10 و 15 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 متلب تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر u و h در گام زمانی بعدی (n+1) می‌باشد.

3-2- گسسته‌سازی معادلات 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 4 تقسیم شده و گسسته‌سازی معادله رسوب در ناحیه حل (شکل 2)، با انتگرال‌گیری از عبارات مشتق و بکارگیری روش طرح مرکزی در جهت جریان و نهایتاً تقسیم تمام ترم‌ها به حجم کنترل سلول‌ها انجام می‌گیرد. 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 بصورت 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 برای



شکل 3 حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادله جریان

مطابق با شکل‌های 2 و 3، مقادیر u و h در سطوح غرب و شرق حجم کنترل با استفاده از روش‌های مختلفی از قبیل طرح تفاضل مرکزی¹، طرح تفاضل بالاسویه²، طرح تفاضل هیبرید³، طرح قانون توانی⁴، طرح تفاضل مراتب بالاتر⁵ و طرح کاهش تغییرات کل⁶ تعیین می‌گردند. 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 برای گسسته‌سازی مقادیر u و h روی سطوح حجم کنترل استفاده شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007).

در روش بالاسویه گسسته‌سازی طبق الگوی زیر می‌باشد:

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

در رابطه (5)، η می‌تواند سرعت یا عمق باشد.

لذا شکل نهایی معادلات پیوستگی و مومنتم برای گره‌های داخلی به شرح زیر خواهند بود:

الف) معادله پیوستگی

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

ب) معادله مومنتم در ترکیب با معادله دو جمله‌ای فورسهایمر

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{u_{i,j}^2 - u_{i,j-1}^2}{4} \right)^{n+1}$$

¹ The central differencing scheme

² The upwind differencing scheme

³ The hybrid differencing scheme

⁴ The power-law scheme

⁵ Higher-order differencing schemes

⁶ Total variation diminishing schemes

$$W_s \cdot S + D_z \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

شرط مرزی رسوب در تراز b (ضخامت لایه بار بستر) از بستر توسط محققان مختلف از جمله (Wu, 2007) به شکل زیر در نظر گرفته شده است (شرط مرزی پایین).

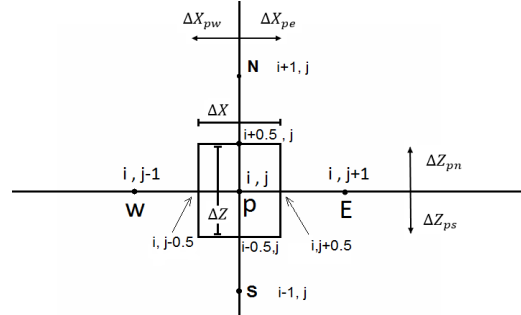
$$S_b = S_2 + S_{b*} \left[1 - e^{\left(\frac{\omega_s \sigma_c}{v_t} \right) (Z_2 - T)} \right] \quad (11)$$

که در معادله فوق S_b غلظت رسوبات معلق در تراز بستر، S_2 غلظت رسوبات در مرکز حجم کنترل لایه 2 در بالای گره مورد بررسی، S_{b*} غلظت تعادلی رسوبات معلق در تراز بستر، W_s سرعت سقوط ذره، v_t لزجت گردابی¹، σ_c عدد اشمیت آشفته²، Z_2 فاصله مرکز حجم کنترل لایه 2 در بالای گره مربوطه از بستر و T عرض کانال می‌باشد. به علت متفاوت بودن روابط محققان مختلف، پیچیده بودن آنها و مشکل بودن اندازه‌گیری برخی از پارامترهای روابط ارائه شده، در این تحقیق رابطه (12) به عنوان شرط مرزی رسوب در بستر پیشنهاد شده است که مبتنی بر رابطه ارایه شده توسط Wu در سال (2007) می‌باشد.

$$S_b = S_2 + k(S_2 - S_3) \quad (12)$$

در این رابطه S_b غلظت رسوبات در تراز بستر، S_2 و S_3 به ترتیب غلظت رسوبات در مرکز حجم کنترل لایه 2 و لایه 3 در بالای گره مورد بررسی و k ضریبی است که از طریق بهینه‌سازی بدست می‌آید. در این تحقیق مقدار k با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، 4 در نظر گرفته شده است. نتیجه بسط معادله (9) بر اساس مقادیر u و h بدست آمده از بخش قبل و شروط مرزی، سیستمی از معادلات جبری غیرخطی با توجه به تعداد گره‌ها خواهد بود. بدین منظور برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی متلب تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر غلظت رسوبات در زمان $(n+1)$ می‌باشد. در شکل 5 فلوجارت روش انجام تحقیق ارائه شده است.

گسسته‌سازی مقادیر غلظت روی سطوح حجم کنترل استفاده شده است.



شکل 4 حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادله رسوب

در این روش مقادیر غلظت رسوبات در روی مرزهای حجم کنترل مطابق با شکل 4 برابر با میانگین غلظت رسوبات نقاط مجاور در نظر گرفته می‌شود.

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

شکل نهایی معادله رسوب (رابطه 4) برای گره‌های داخلی پس از انتگرال‌گیری، جایگذاری و ساده‌سازی به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{1}{2\Delta x} u_{i,j}^{n+1} - \frac{1}{2\Delta x} u_{i,j-1}^{n+1} + \frac{2Dx}{\Delta x^2} + \frac{2Dz}{\Delta z^2} \right) S_{i,j}^{n+1} \\ & = \frac{S_{i,j}^n}{\Delta t} + \left(\frac{Dx}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j}^{n+1}}{2\Delta x} \right) S_{i,j+1}^{n+1} + \left(\frac{u_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{Dx}{\Delta x^2} \right) S_{i,j-1}^{n+1} \\ & + \left(\frac{Ws}{2\Delta z} + \frac{Dz}{\Delta z^2} \right) S_{i+1,j}^{n+1} + \left(\frac{-Ws}{2\Delta z} + \frac{Dz}{\Delta z^2} \right) S_{i-1,j}^{n+1} \end{aligned} \quad (9)$$

حل معادله (9) 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 بدنه سد پاره‌سنگی بعنوان شرط مرز ورودی جریان خواهد بود و در مرز خروجی جریان، گرادیان نرمال غلظت در زمان $(n+1)$ برابر با صفر قرار داده می‌شود (قدیمی، 1392؛ Van Rijn, 1987). در سطح آب (شرط مرزی بالا)، سیلان رسوبات قائم مطابق با رابطه (10) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (Wu, 2007؛ Van Rijn, 1987).

¹ Eddy viscosity coefficient

² Turbulent Schmidt number

4- تابع هدف

در این تحقیق برای بررسی میزان خطا از معیار درصد خطای نسبی ($RE\%$) استفاده گردید (Addiscott and Whitmor, 1987).

$$\% RE = 100 \cdot \frac{(c - o)}{o} \quad (13)$$

در این رابطه C و O به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده (غلظت رسوبات) است. مقدار شاخص RE در واقع میزان انحراف نسبی مقادیر محاسبه شده از مقادیر واقعی است. این شاخص می‌تواند مقادیر مساوی، بزرگتر و یا کوچکتر از صفر داشته باشد. مقدار ایده‌آل برای این شاخص صفر است.

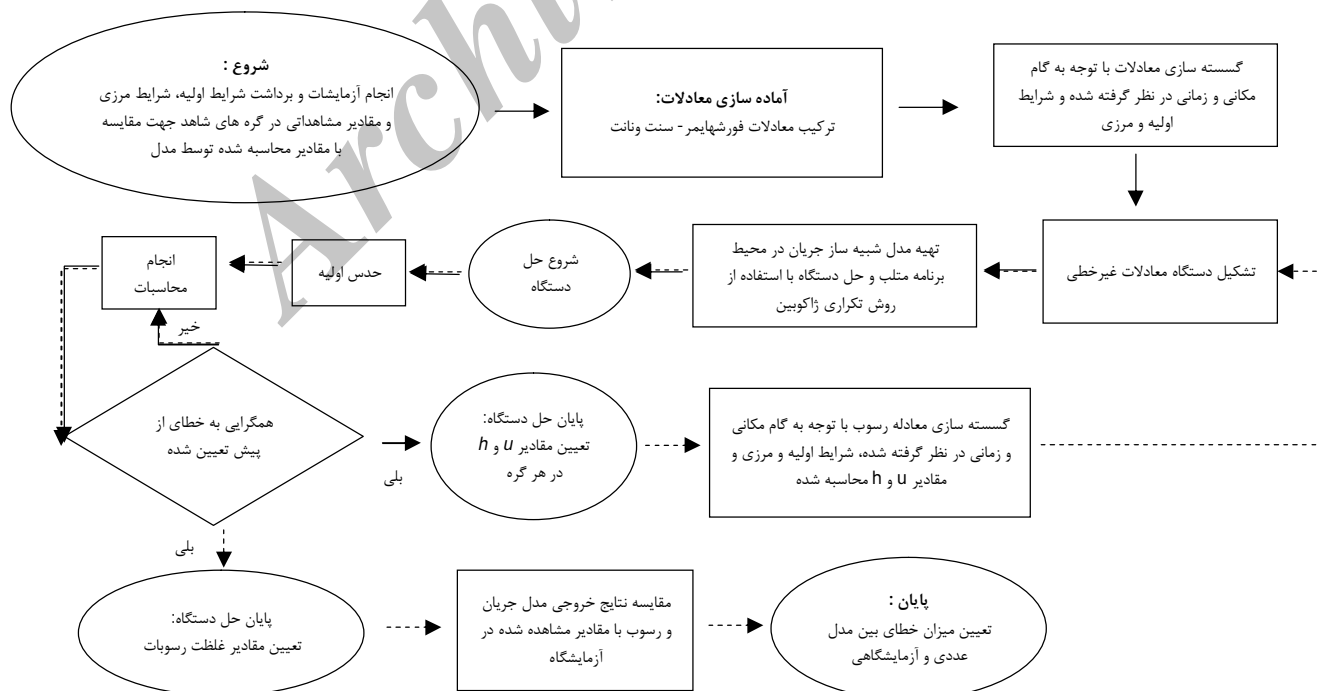
5- روش آزمایش

در راستای صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده، از نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا روی فلوم شیشه‌ای به طول 11 متر، عرض داخلی 0/5 متر، ارتفاع 0/5 متر، شیب طولی 0/0041 استفاده شد. بدین منظور درون فلوم با استفاده از توری فلزی و سنگدانه‌هایی به ابعاد متوسط 3 سانتی‌متر، سد پاره‌سنگی به طول 50 سانتی متر مطابق با

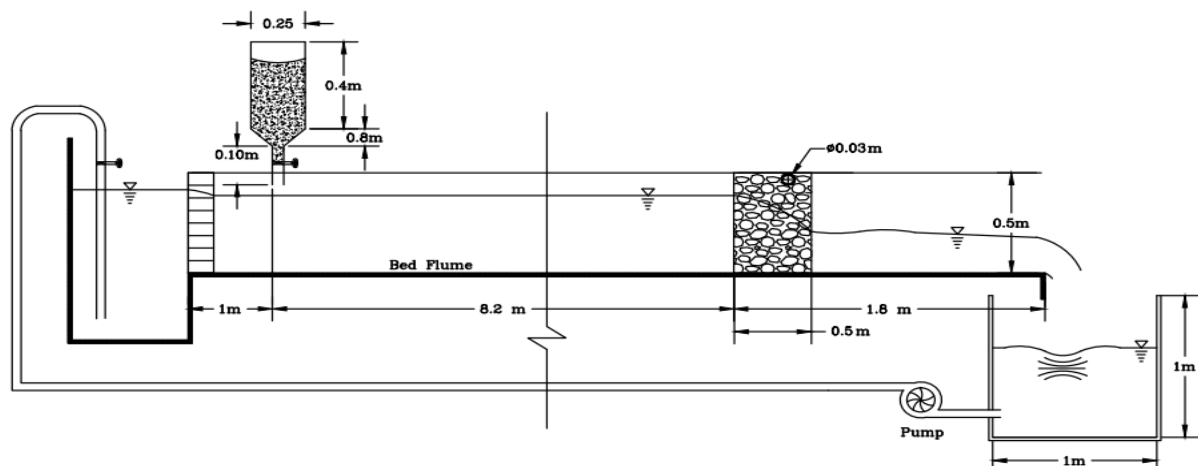
شکل 6 ساخته شد. کانال بالادست این سد به عنوان مخزن سد در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری سرعت در داخل بدنه سد توسط لوله‌های پیتو انجام گرفت و مقدار آن با استفاده از رابطه (14) تعیین گردید.

$$u = C \sqrt{2g \Delta h} \quad (14)$$

در این رابطه، u سرعت جریان، C ضریب تصحیح (در این تحقیق با استفاده از نتایج دستگاه ADV مقدار آن 0/97 تعیین شد)، g شتاب گرانش و Δh بلندای فشار دینامیک (اختلاف بین سطح آب در لوله‌های پیتو و پیزومتر) می‌باشد (Streeter et al., 1998). تراز سطح آب توسط شبکه‌ای از لوله‌های پیزومتر تعبیه شده در کف فلوم به فواصل 10 سانتی‌متر از یکدیگر و با میزان خطای $\pm 0/5$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در آزمایش‌های انجام یافته از رسوبات ماسه‌ای غیرچسبیده به ترتیب با مشخصات d_{50} ، d_{90} و G_s برابر با $150 \mu m$ ، $350 \mu m$ و $2/63$ استفاده شد. مطابق با شکل 6 این رسوبات درون مخزن استوانه‌ای شکل با کف مخروطی، مجهز به شیر کنترل کننده میزان تزریق رسوبات، ریخته شده و این مخزن در ورودی کانال روی فلوم مستقر شد و رسوبات با نرخ ثابت 6/06 گرم در ثانیه تزریق شد. شکل 6 نمایی از فلوم و سایر ادوات استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل 5 فلوجارت روش انجام تحقیق



شکل 6 نمایی از فلوم آزمایشگاهی

شود. بدین منظور مجدداً پس از برقراری دبی 7/5 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 9 لیتر بر ثانیه افزایش داده شده و پس از 60 ثانیه مجدداً غلظت رسوبات در همان نقاط قبلی برداشت می‌گردد. اطلاعات اندازه‌گیری شده در دبی 9 لیتر بر ثانیه شامل مرز ورودی و مقادیر مشاهداتی برای مقایسه با مقادیر محاسباتی است.

6- نتایج و بحث

طبق روش شرح داده شده در قسمت روش آزمایش، در این تحقیق توسط مدل ریاضی تهیه شده (مدل جریان) ابتدا مشخصات جریان (شامل عمق و سرعت) در دبی 9 لیتر بر ثانیه بر مبنای شرایط اولیه جریان در دبی 7/5 لیتر بر ثانیه و شرایط مرزی جریان در دبی 9 لیتر بر ثانیه (شامل سرعت و عمق در مرز ورودی) محاسبه می‌گردد. در شکل 7 مقادیر عمق، سرعت و غلظت رسوبات مشاهده شده به ازای دبی پایه (دبی 7/5 لیتر بر ثانیه) نشان داده شده است.

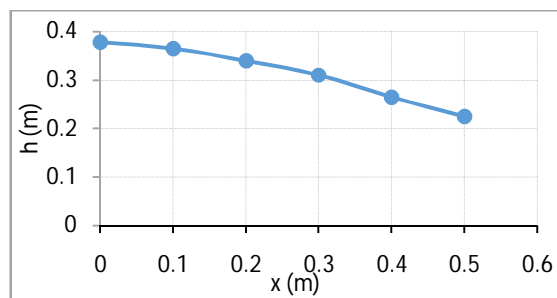
همان‌طور که از شکل 7- الف مشخص است در داخل سد پاره‌سنگی و در جهت جریان از انرژی فشاری جریان کاسته شده و بر انرژی جنبشی جریان افزوده می‌شود که این مسئله با کاهش عمق و افزایش سرعت نمود پیدا می‌کند.

برای تعیین غلظت رسوبات از پیپت، کاغذ صافی واتمن¹ 42 و ترازوی دیجیتال استفاده شد. بدین منظور از باکس استوانه‌ای شکل به قطر 6 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر با دیواره ساخته شده از توری فلزی، برای استقرار دستگاه پیپت در سه مقطع مختلف (ورودی، فاصله 30 سانتی‌متر و خروجی) و در سه لایه 5، 10 و 15 سانتی‌متری استفاده شد. نحوه انجام آزمایش‌ها بدین‌گونه بوده است که ابتدا دبی 7/5 لیتر بر ثانیه توسط شیر برقی مجهز به اینورتور (کالیبره شده با دبی سنج التراسونیک UF5000 و با میزان خطای 1 تا 3 درصد) در کانال برقرار شده و بر مبنای شبکه‌بندی در نظر گرفته شده در داخل بدنه سد پاره‌سنگی، مشخصات جریان شامل عمق و سرعت، اندازه‌گیری شده (شرایط اولیه جریان)، سپس دبی جریان توسط شیر برقی مجهز به اینورتور به 9 لیتر بر ثانیه افزایش یافته و مجدداً مشخصات جریان شامل سرعت و عمق با گام زمانی 60 ثانیه در همان نقاط اندازه‌گیری شد. استفاده از شیر برقی مجهز به اینورتور قابل برنامه‌ریزی موجب خواهد شد که بتوان بارها دبی را به صورت دقیق از دبی 7/5 لیتر بر ثانیه به میزان 9 لیتر بر ثانیه افزایش داده و با انتقال دستگاه ADV به نقاط مختلف فلوم، سرعت را در نقاط مشخص و با گام زمانی 60 ثانیه اندازه‌گیری نمود. پس از اندازه‌گیری مقادیر سرعت و عمق، بایستی مقدار غلظت رسوبات اندازه‌گیری

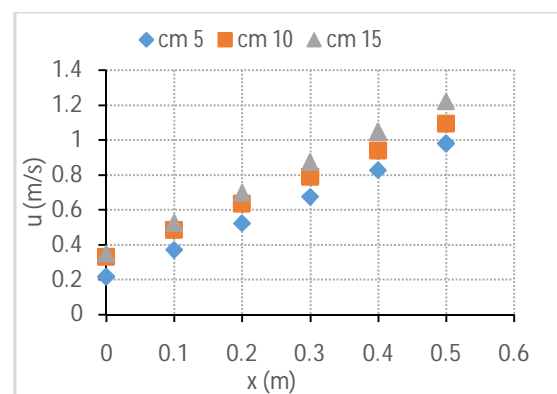
¹ Whatman

اساس شکل 7- ج میزان غلظت رسوبات در جهت جریان کاهش می‌یابد که این مسئله حاکی از ته‌نشینی و نگهداشت رسوبات در بدنه سد پاره سنگی است. بر اساس این شکل میزان غلظت رسوبات مطابق با توزیع عمودی غلظت در کانال‌ها در این راستا کاهش می‌یابد و بیشینه غلظت رسوبات در ورودی بدنه و در عمق 5 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 9 لیتر در ثانیه محاسبه می‌گردد. در شکل 8 مقادیر محاسباتی عمق و سرعت در دبی 9 لیتر در ثانیه ارائه شده است.

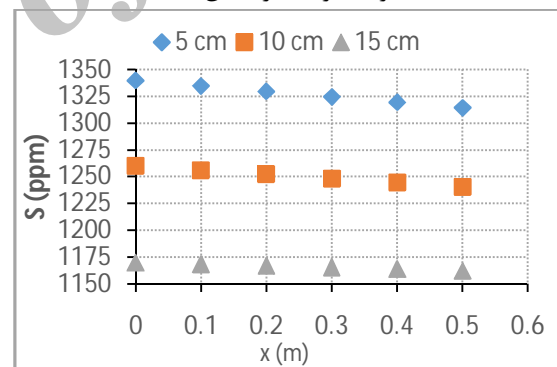
در مرحله بعد بر مبنای مقادیر محاسبه شده عمق و سرعت در دبی 9 لیتر بر ثانیه، شرایط اولیه رسوبات در دبی 7/5 لیتر بر ثانیه و شرایط مرزی رسوبات در دبی 9 لیتر بر ثانیه (شامل غلظت در مرز ورودی)، مقادیر غلظت در دبی 9 لیتر بر ثانیه محاسبه می‌گردد و نهایتاً این مقادیر با مقادیر مشاهده شده مقایسه می‌گردد. نتایج خروجی این مرحله در شکل 9 نشان داده شده است.



الف) تراز سطح آب

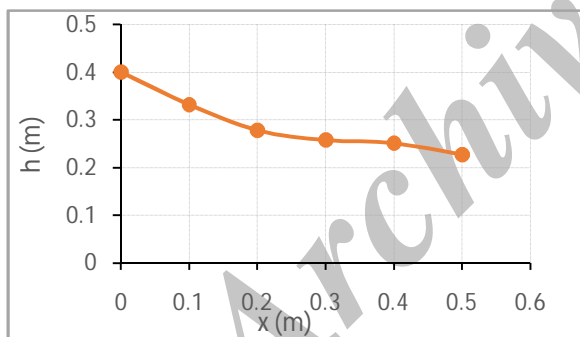


ب) تغییرات سرعت در اعماق مختلف

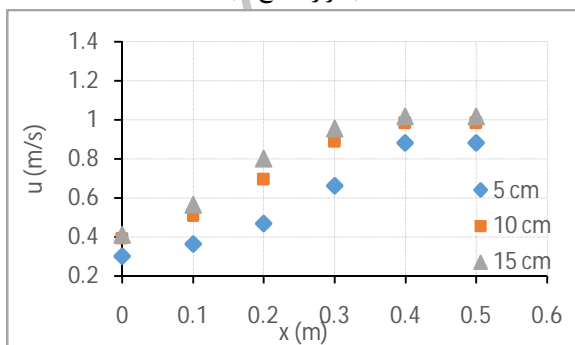


ج) تغییرات غلظت رسوبات در اعماق مختلف

شکل 7 شرایط اولیه جریان در دبی 7/5 لیتر بر ثانیه



الف) تراز سطح آب



ب) تغییرات سرعت در اعماق مختلف

شکل 8 مقادیر محاسباتی سرعت و عمق جریان به ازای دبی 9 لیتر بر ثانیه

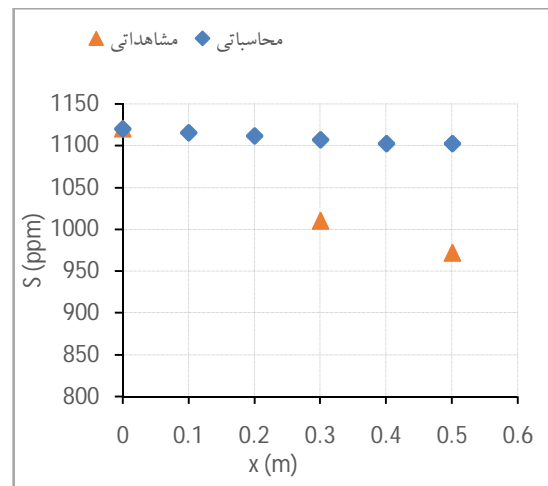
مطابق با شکل 7- ب با حرکت در جهت جریان در داخل بدنه سد پاره‌سنگی مقدار سرعت جریان نه تنها در راستای افقی، بلکه در راستای قائم نیز افزایش می‌یابد، که نحوه این افزایش سرعت برای اعماق بین 10 و 15 سانتی‌متری به وضوح در شکل 7- ب دیده می‌شود. بیشینه سرعت در مقطع خروجی و در عمق 15 سانتی متری (مطابق با توزیع عمودی سرعت در کانال) مشاهده می‌شود، در این مقطع عمق آب نسبت به دیگر مقاطع کوچکتر بوده و افزایش سرعت با کاهش عمق قابل انتظار می‌باشد. بر

درون بدنه سدپاره‌سنگی داراست و بر اساس جدول 1 در مجموع با میانگین خطای نسبی 8/14 درصد غلظت رسوبات را تخمین می‌زند. بر اساس جدول 1 و شکل 9، 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 یک بعدی در نظر گرفتن جریان، خطای تطابق بین گام زمانی اندازه‌گیری شده و محاسباتی، نوسانات اندک جریان و مناسب نبودن معادله دوجمله‌ای فورشه‌ایمر در شکل حاضر اشاره کرد، هرچند در انجام آزمایشات و اجرای مدل تلاش شد که این خطاها کمترین دخالت ممکن را داشته باشند. بررسی میزان تأثیر این موارد نیازمند انجام تحقیقات بیشتر است. به دلیل شرط مرزی در نظر گرفته شده (صفر گرفتن گرادیان نرمال سرعت و غلظت رسوبات خروجی)، غلظت و سرعت محاسباتی در دو مقطع آخر برای هر عمق ثابت می‌گردد که این مسئله موجب افزایش میزان خطای نسبی در مقطع خروجی (مقطع 0/5 در جدول 1) می‌شود. لازم به ذکر است روند تغییرات اندک غلظت رسوبات محاسباتی (شکل 9) در اعماق مختلف ناشی از روند تغییرات اندک رسوبات اولیه (شکل 7-ج) و شرط مرز خروجی در نظر گرفته شده می‌باشد.

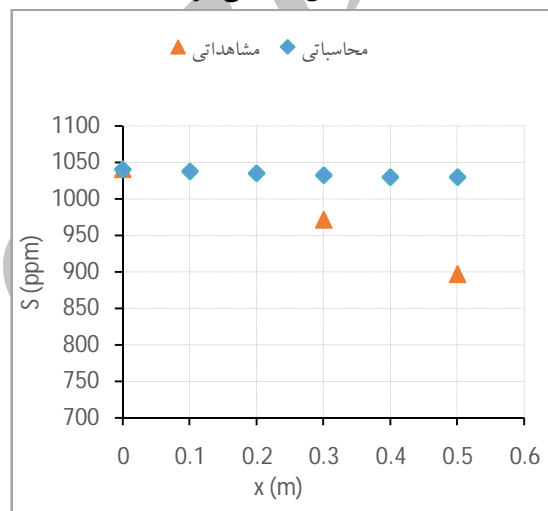
بر اساس جدول 1 مقدار خطای نسبی مدل در پیش‌بینی غلظت خروجی از سد پاره‌سنگی 18/17 درصد می‌باشد که این مسئله حاکی از صحت مناسب این مدل ریاضی در تخمین غلظت جریان خروجی است.

جدول 1 مقادیر درصد خطای نسبی غلظت رسوبات در بدنه

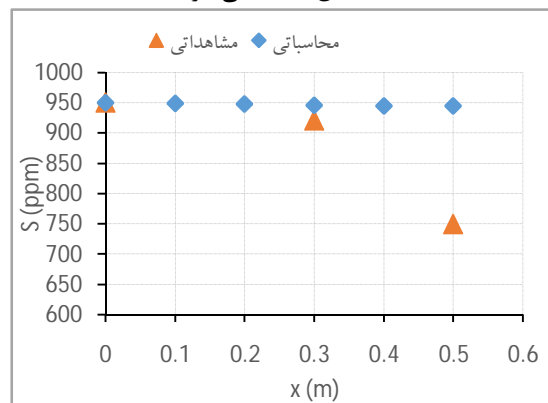
عمق (cm)	سد پاره‌سنگی			میانگین خطای نسبی (%)
	خطای نسبی (%)			
	x (m)	0/3	0/5	
5	0	9/62	13/53	7/72
10	0	6/25	14/80	7/02
15	0	2/84	26/18	9/67
میانگین خطای نسبی (%)	0	6/24	18/17	8/14



الف) عمق 5 سانتی متری



ب) عمق 10 سانتی متری



ج) عمق 15 سانتی متری

شکل 9 تغییرات غلظت رسوبات مشاهداتی و محاسباتی به ازای دبی 9 لیتر در ثانیه

همان‌طور که از شکل 9 مشخص است این مدل به نحو قابل قبولی توانایی شبیه‌سازی جریان و غلظت آن را در

ژنتیک تعیین شده و به خوبی قادر است میزان غلظت رسوبات را در تراز بستر تخمین بزند. بنابراین می‌توان در تحقیقات بعدی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف، 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.

7- فهرست علائم

A, B	ضرایب ثابت رابطه فورشه‌ایمر
b	ضخامت لایه بار بستر
C, O	مقادیر محاسباتی و مشاهداتی غلظت رسوبات
d_{50}, d_{90}	قطر ذره رسوباتی که به ترتیب 50 و 90 درصد ذرات نسبت به آن ریزترند.
G_S	چگالی رسوبات
h	عمق جریان
I	گرادیان هیدرولیکی
k	ضریب ثابت رابطه پیشنهادی تراز بستر
$n, n+1$	گام زمانی معلوم و مجهول
RE	خطای نسبی
S	غلظت مکانی رسوبات (ppm)
S_{b*}	غلظت تعادلی رسوب معلق در تراز بستر (ppm)
S_0, S_f	شیب بستر و شیب خط انرژی
t	زمان
T	عرض کانال
u	سرعت جریان
x	راستای طولی بدنه
w_s	سرعت سقوط
Z_2	فاصله مرکز حجم کنترل لایه 2 از بستر
$\varepsilon_x, \varepsilon_z$	ضریب اختلاط رسوب در جهت‌های افقی و قائم
η	سرعت یا عمق
v_t	لزجت گردابی
σ_c	عدد اشمیت آشفته

8- منابع

حیدری، م. (1386). "مدل دوبعدی جریان عبوری از داخل و روی سدهای پاره‌سنگی و کاربرد آن در کنترل سیلاب"، رساله

مطابق با جدول 1 میانگین خطای نسبی در عمق 10 سانتی‌متری نسبت به دیگر اعماق کمتر بوده که احتمالاً ناشی از تأثیر کمتر جریان‌های عمقی و سطحی است که این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتری است.

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار جریان غیردائمی حاوی رسوب در درون بدنه سد پاره‌سنگی با استفاده از حل عددی معادلات ترکیبی سنت و نانت-غیرداریسی (معادله دو جمله‌ای فورشه‌ایمر) و سپس حل معادله جابجایی-پخش به روش حجم محدود و در شرایط کاملاً ضمنی بررسی گردید. بدین منظور مدل شبیه ساز جریان و رسوب با استفاده از معادلات مذکور در محیط برنامه متلب تهیه شد و خروجی این مدل با مقادیر مشاهده شده غلظت رسوبات در آزمایشگاه مقایسه گردید. میانگین خطای نسبی غلظت رسوبات برای این آزمایش برابر با 8/14 درصد بود که حاکی از این مسئله است که روش عددی حجم محدود به خوبی توانایی حل معادلات حاکم بر بدنه سد پاره‌سنگی و شبیه‌سازی میزان غلظت رسوبات را داراست. بنابراین علاوه بر روندیابی دینامیکی سیلاب و تعیین غلظت رسوبات، با استفاده از این مدل می‌توان بازایابی‌های مختلف در هنگام عبور سیلاب، میزان رسوبات عبوری و به تله افتاده شده در بدنه را محاسبه نمود. از طرفی با استفاده از این مدل می‌توان عملکرد سدهای پاره‌سنگی در گزینه‌های متنوع (به ازای ابعاد مختلف بدنه و مخزن، قطر سنگدانه‌های مختلف در اجرای بدنه) را در جریان‌های سیلابی (حاوی رسوبات) مورد ارزیابی قرار داد و بهینه‌ترین ابعاد بدنه، ذرات تشکیل دهنده گابیون و همچنین موقعیت قرارگیری گابیون را توجه به اهداف مورد انتظار (ایجاد ذخیره موقت، کاهش اوج 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 (12) ارائه شده است که ضریب آن بر اساس روش بهینه‌سازی الگوریتم

interface-resolving simulations of sediment transport in open channel flow", *International Journal of Multiphase Flow*, 58:214-235.

Mousavi, S.A., Amiri-Tokaldany, E. and Davoudi, M. H. (2011). "A relationship to determine the critical hydraulic gradient and noncohesive sediment transport discharge in rockfill dams", *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(5):399-413.

Nazemi, A. (2011). "Flow hydraulics and sediment transport in pervious rockfill detention dams", PhD thesis. University of Putra. Malaysia.

Rubey, W. (1933). "Settling velocities of gravel, sand and silt particles", *American Journal of Science*, 225:325-338.

Sakthivadivel, R. (1972), "Sediment transport through a porous column". In Shen, H W, Ed, *Sedimentation*.

Samani, H. M. V., Samani, J. M. V. and Shayannejad, M. (2003). "Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams", *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6):448-454.

Scheidegaer, A. E. (1961). "General theory of dispersion in porous media", *Journal of Geophysical Research*, 66(10): 3273-3278.

Streeter, V. L., Wylie E. B. and Bedford, K. W. (1998). "*Fluid Mechanics*", 9th ed., McGraw Hill Book Company, New York, pp.740.

Van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, part II: suspended load transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(11):1613-1641.

Van Rijn, L. C. (1987). "*Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport*", Delft Hydraulics Communication, No. 382, The Netherlands.

Versteeg, H. and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, 2nd Edition. Pearson Education Ltd, Harlow, England.

Wu, W. (2007). *Computational river dynamics*. Taylor & Francis Group, London, UK.

Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2006). "Formulas for sediment porosity and settling velocity", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 132(8):858-862.

دکتری تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

سامانی، ج. م. و. و عمادی، ع. (1382). "تعیین رابطه گرادیان هیدرولیکی بحرانی انتقال رسوبات غیر چسبنده در سدهای تأخیری پار هسنگی"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز.

قادری، ک.، سامانی، ج. م. و. و عمادی، ع. (1384). "بررسی روابط مختلف تراوش غیرداری و مدل ریاضی محاسبه جریان در محیط‌های متخلخل مستغرق"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان.

قدیمی، پ. (1392). *دینامیک سیالات محاسباتی کاربردی، مبتنی بر روش‌های تفاضل محدود، اجزاء محدود و حجم محدود (جلد دوم)*. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

محمودیان شوشتری، م. (1389). *هیدرولیک آبهای زیرزمینی*، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.

Addiscott, T.M. and Whitmore, A.P. (1987). "Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop Nitrogen during autumn, winter and spring", *Journal of Agricultural Science*, 109:141-157.

Aldrighetti, E. (2007). "Computational hydraulic techniques for the Saint Venant equations in arbitrarily shaped geometry", PhD thesis, Università degli Studi di Trento. Trento, Italy.

Chapokpour, J. and Amiri-Tokaldany, E. (2013). "Introducing a relationship for estimation of the sediment transport rate through rockfill structures", *Journal of Water Sciences Research*, 5(2):35-42.

Cheng, N.S. (1997). "Simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering*", ASCE, 123(2):149-152.

Faghihrad, Sh., Lin, B. and Falconer, R. A. (2015). "Application of a 3D layer integrated numerical model of flow and sediment transport processes to a reservoir", *Water*, 7(10):5239-5257.

Joy, D. M., Lennox, W. C. and Kouwen, N. (1991). "Particulate transport in porous media under non-linear flow condition", *Journal of Hydraulic Research*, 29(3):373-385.

Kempe, T., Vowinkel, B., and Fröhlich, j. (2014). "On the relevance of collision modeling for