

## مطالعه عددی بازدهی رسوب‌شویی در استخراج رسوب ته‌نشین شده در مخازن

سید حسین مهاجری\*<sup>۱</sup>اکبر صفرزاده<sup>۲</sup>

## چکیده

در مطالعه حاضر یک مدل عددی جهت کنترل بازدهی رسوب‌شویی در مخزن سدها ارائه می‌شود که در آن میدان جریان و بار معلق جامد شبیه‌سازی شده‌اند. این مدل، یک مدل سه‌بعدی است که در آن معادلات حرکت (معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس) همراه با معادله انتقال رسوب حل می‌گردند. در این مدل، از روش  $\kappa-\epsilon$  استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. مزیت اصلی مدل عددی حاضر استفاده از روش ریز شدن مش یا به اصطلاح AMR در شبکه‌بندی میدان جریان است. مدل ارائه‌شده برای مدل‌سازی دریاچه مخزن سد استرامنتیتزو در شمال کشور ایتالیا مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه سه سناریوی مختلف رسوب‌شویی بر اساس هیدروگراف ورودی ۵، ۲۰ و ۱۰۰ ساله، برای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد در سناریوی با هیدروگراف ۱۰۰ ساله، با وجود بسته بودن خروجی تحتانی در بیش از نیمی از زمان شبیه‌سازی، حجم رسوب استخراج‌شده از مخزن بسیار بیشتر از دو سناریوی دیگر است.

## واژه‌های کلیدی

رسوب‌شویی، مدل عددی، مدل  $\kappa-\epsilon$ ، روش المان محدود، معادلات ناویر-استوکس.

\*<sup>۱</sup> محقق در گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه ترنتو ایتالیا، hossein.mohajeri@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار در گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

## مقدمه

یکی از عوامل مهم که در مدیریت و نگهداری یک سد باید مورد توجه قرار گیرد، میزان ته‌نشینی رسوب در مخزن است. رسوب ته‌نشین شده در مخازن نه‌تنها موجب از دست رفتن ظرفیت مخزن سد می‌شود، بلکه اثرات منفی بر بالادست و پایین‌دست سد می‌گذارد (موریس و فان<sup>۱</sup> (۱۹۹۷) و ون‌مارن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۱)). بر اثر رسوب‌گذاری، کارایی انجام عملیات سد به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در پایین‌دست سد، فقدان رسوب موجب کاهش تراز کف<sup>۳</sup> کانال و تغییر شرایط زندگی گیاهان و جانوران آبی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش سطح آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت طبیعی رودخانه در کنترل سیلاب، بالا رفتن سطح آب در مخزن و انحراف یا عقب‌نشینی آب مجموعه‌ای از آثار منفی رسوب‌گذاری در بالادست سد است (تیگرک و آراس<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱). برای حل مشکل رسوب‌گذاری در مخازن، روش‌های گوناگونی در نقاط مختلف دنیا توسعه یافته است. احداث تونل انحراف رسوب، فعالیت‌های آبخیزداری، احداث سد ثانویه در بالادست سد اصلی، تخلیه به کمک جریان چگال<sup>۵</sup> و پاک‌سازی به روش مکش هیدرولیکی<sup>۶</sup> از جمله این روش‌ها هستند (مهاجری و نجیبی، ۱۹۹۳). در بین روش‌های مختلف، روش رسوب‌شویی که بیشتر از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، یک روش پاک‌سازی رسوب است که در آن رسوب ته‌نشین شده در مخازن با افزایش شدید سرعت آب ورودی به مخزن شسته شده و توسط خروجی‌های تحتانی سد منتقل می‌شود (مهاجری و نجیبی، ۱۹۹۳). به‌طور کلی، ملاحظات هیدرولیکی، حجم آب در دسترس، شرایط انتقال رسوب در مخزن و شرایط خاص محل سد مجموعه عواملی هستند که کارایی رسوب‌شویی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (مهاجری و نجیبی، ۱۹۹۳).

برای کنترل کارایی عملیات رسوب‌شویی، جریان آب در داخل مخزن به‌صورت عددی یا فیزیکی مطالعه و مدل می‌شود.

محققین بسیاری مدل‌سازی عددی جریان آب در مخزن سد را مورد بررسی قرار دادند. لیو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۴) با یک مدل یک‌بعدی به مطالعه تغییرات غلظت رسوب و توپوگرافی بستر حین انجام عملیات رسوب‌شویی پرداختند. شیمیزو و ایتاکورا<sup>۸</sup> (۱۹۸۹) یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان در مخزن سد و در شرایط دائمی توسعه دادند. از سوی دیگر، چلیک و رودی<sup>۹</sup> (۱۹۸۸) مدل دوبعدی‌ای توسعه داده‌اند که در شرایط غیردائمی نیز قابلیت کاربرد دارد. بعدها، فنگ و رودی<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۳) نشان دادند که جریان ثانویه به‌شدت فرآیند رسوب‌شویی را تحت تأثیر قرار داده و بنابراین استفاده از مدل‌های یک و دوبعدی برای مطالعه رسوب‌شویی مناسب نیستند. ایشان همچنین مدل سه-بعدی وو<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰) را برای مطالعه رسوب‌شویی مورد استفاده قرار دادند.

باید توجه داشت که مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن یک سد، در مدت‌زمانی که عملیات رسوب‌شویی انجام می‌شود با در نظر گرفتن آشفتگی و معادله انتقال رسوب بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. لذا در چنین شرایطی، مدل‌های معمولی رایج در عمل کارایی چندانی ندارند. در این تحقیق یک مدل عددی جدید جهت شبیه‌سازی و مطالعه کارایی رسوب‌شویی در مخزن یک سد معرفی شده است. مزیت اصلی مدل ارائه‌شده در مقایسه با مدل‌های پیشین، استفاده از فن ریز شدن مش<sup>۱۲</sup> در نواحی از میدان است که تغییرات جریان شدید است. در این مطالعه، این روش به اختصار ARM نامیده می‌شود. استفاده از این فن امکان استفاده از شبکه‌بندی درشت در کل میدان جریان و شبکه‌بندی ریزتر در نواحی از میدان که تغییرات خصوصیات جریان شدید است را فراهم می‌کند (زانوتی و دومبسر<sup>۱۳</sup>، ۲۰۱۵). به‌علاوه جهت کاهش حجم محاسبات، از روش کازولی و زانولی<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۲) جهت حل معادلات جریان استفاده شده است. در این رویکرد، در گام اول معادلات حرکت برای جریان‌های سطح آزاد،

<sup>9</sup> Celik & Rodi

<sup>10</sup> Fang & Rodi

<sup>11</sup> Wu

<sup>12</sup> Adaptive Refinement Mesh

<sup>13</sup> Zanotti & Dumbser

<sup>14</sup> Casulli & Zanolli

<sup>1</sup> Morris & Fan

<sup>2</sup> Van Maren

<sup>3</sup> Degredation

<sup>4</sup> Tigrek & Aras

<sup>5</sup> Density Current Venting

<sup>6</sup> Hydrosuction Removal System (HSRS)

<sup>7</sup> Liu

<sup>8</sup> Shimizu & Itakura

$$H = h(x, y) + q(x, y, z) = g\eta(x, y) + q(x, y, z) \quad (۴)$$

که در این رابطه  $h$  = ارتفاع آب از حل اولیه میدان،  $H$  = ارتفاع آب پس از تصحیح،  $q(x, y, z)$  = ضریب تصحیح فشار موضعی و  $g$  = شتاب جاذبه. پس از به دست آمدن مقدار تصحیح شده عمق آب (یا همان فشار موضعی)، سایر مشخصات میدان جریان نیز تصحیح می‌شوند. به‌منظور در نظر گرفتن آشفتگی در معادلات حرکت، از مدل آشفتگی  $\kappa-\varepsilon$  استاندارد استفاده شد. برای تعیین میزان رسوب انتقالی، بر اساس مدل وو و همکاران (۲۰۰۰)، از معادله انتقال رسوب، به صورت زیر استفاده شد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial [(w-w^s)C]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K^h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K^h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K^v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه  $C$  = غلظت رسوب،  $K^h, K^v$  = ضرایب پخش در راستای افقی و قائم و  $w^s$  = سرعت سقوط. شرایط مرزی معادله انتقال رسوب در سطح آب و بستر به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K^v \frac{\partial C}{\partial z} - (w - w^s)C = 0 \quad (۶)$$

$$-K^v \frac{\partial C}{\partial z} = \left[ \max \left( 0, \frac{\tau}{\tau_{cr}} - 1 \right) - w^s \right] C \quad (۷)$$

در این روابط نیز،  $\tau$  = تنش برشی و  $\tau_{cr}$  = تنش برشی بحرانی به‌دست‌آمده از دیاگرام شیلدز.

#### مشخصات مطالعه موردی و سناریوهای مدل‌سازی

دریاچه استرامنتیتزو<sup>۳</sup> یک دریاچه مصنوعی است که از احداث سد استرامنتیتزو بر روی رودخانه آویسو<sup>۴</sup> به وجود آمده است. این سد در سال ۱۹۵۶ به‌منظور تولید انرژی هیدروالکتریکی بین استان‌های ترنتو<sup>۵</sup> و بولتزانو<sup>۶</sup> در شمال کشور ایتالیا و در کوه‌های آلپ احداث شده است. موقعیت این دریاچه در شکل (۱) نمایش داده شده است. در شکل (۲-الف) نقشه توپوگرافی این دریاچه نمایش داده شده است. این دریاچه با حجم مخزن ۱۲۰ میلیون

با فرض فشار هیدرواستاتیک (نزو و ناکاگوا<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳)، حل می‌شوند. در گام دوم، با مقادیر به‌دست‌آمده برای مؤلفه‌های سرعت، فشار غیرهیدرواستاتیک محاسبه شده و مجدداً معادلات حرکت در این شرایط حل می‌شوند؛ بنابراین مقادیر نهایی محاسبه‌شده، ناشی از حل یک میدان سه‌بعدی و در شرایط فشار غیرهیدرواستاتیک هستند. در ادامه به معرفی مدل و توصیف روش شبکه‌بندی پرداخته می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

##### معرفی مدل عددی

معادلات حاکم در مسئله حاضر، از متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس در جریان‌های سطح آزاد به دست می‌آید. این معادلات به شکل زیر نوشته می‌شوند (نزو و ناکاگوا<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (۱)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_{-h}^{\eta} u \, dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_{-h}^{\eta} v \, dz \right] = 0 \quad (۳)$$

که در این روابط،  $x$  = راستای طولی کانال،  $y$  = راستای عرضی کانال و  $z$  = راستای عمق. همچنین  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب سرعت در راستای طولی، عرضی و عمق کانال هستند. همچنین،  $\eta$  = نوسانات سطح آب،  $h$  = عمق آب داخل کانال و  $\nu$  = لزجت سینماتیکی آب. باید توجه داشت که معادله سوم از انتگرال‌گیری معادله پیوستگی در راستای قائم حاصل می‌شود که شرط مرزی جنبشی<sup>۲</sup> در سطح آب به آن اعمال شده است (زانوتی و دومبسر، ۲۰۱۵).

معادلات (۱) تا (۳) بر اساس شرط فشار هیدرواستاتیک استخراج شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، برای تصحیح این معادلات برای شرایط غیرهیدرواستاتیک، فشار موضعی پس از محاسبه اولیه میدان جریان باید تصحیح شود. برای تصحیح فشار موضعی از رابطه (۴) استفاده شده است (زانوتی و دومبسر، ۲۰۱۵):

<sup>۴</sup> Avisio

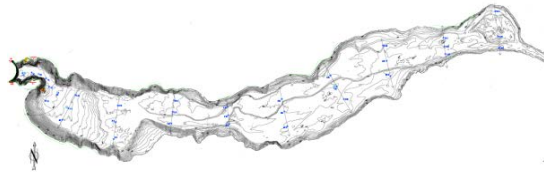
<sup>۵</sup> Trento

<sup>۶</sup> Bolzano

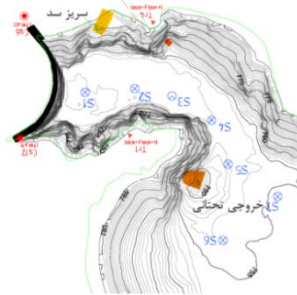
<sup>۱</sup> Nezu & Nakagawa

<sup>۲</sup> Kinetic Boundary Condition

<sup>۳</sup> Stramentizzo Lake



(الف)



(ب)

شکل (۲): الف- توپوگرافی مخزن سد استرامنتیتزو ب- توپوگرافی بستر در نزدیکی سد.

نحوه شبکه‌بندی در این تحقیق به صورت نامنظم در صفحه افقی است؛ ولی به جای شبکه‌بندی مثلثی رایج از شبکه‌بندی مستطیلی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در شکل (۴) نحوه شبکه‌بندی مخزن سد استرامنتیتزو در صفحه افقی نشان داده شده است. فاصله دو گره متوالی از شبکه در راستای طول و عرض برابر با یک متر است. در راستای قائم نیز فاصله دو گره متوالی از شبکه برابر با یک متر است.

همچنین همان‌طور که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، شبکه‌بندی در نزدیکی خروجی تحتانی و سرریز فوقانی با استفاده از فن ریز شدن مش پرتراکم‌تر است. روش AMR که در این تحقیق از آن استفاده شده است، عبارت است از ریز شدن شبکه‌بندی اولیه میدان در نقاطی از جریان که تغییرات خصوصیات جریان شدید و اثر آشفتگی زیاد است (زانوتی و دومیسر، ۲۰۱۵). مهم‌ترین مزیت‌های این روش، کاهش حجم و زمان محاسبات (یا اصطلاحاً افزایش پس‌اندازهای محاسباتی<sup>۲</sup>) و کاهش حجم اطلاعات مهمی که باید ذخیره شوند است. بر اساس روش AMR در این تحقیق، در نزدیکی خروجی تحتانی و سرریز فوقانی فاصله دو گره متوالی از شبکه سه برابر کوچک‌تر از فاصله دو گره متوالی از شبکه‌بندی اصلی است.

مترمکعب دارای طول تقریبی ۲۵۰۰ متر و عرض ۷۰۰ متر است. سد استرامنتیتزو یک سد قوسی به ارتفاع ۶۳/۵ متر است. این سد دارای یک سرریز فوقانی است که در پشته سمت چپی سد ساخته شده است. همچنین برای انتقال رسوبات جمع شده در مخزن سد، خروجی تحتانی در سمت چپ سد احداث شده است. در شکل (۲-ب) پلان این سد نمایش داده شده است. طول بسیار بلند مخزن در قیاس با عرض آن و نیز اندازه کوچک مخزن نشان‌دهنده آن است که این مخزن مستعد انجام رسوب‌شویی است (مهاجری و نجیبی، ۱۹۹۳).



شکل (۱): موقعیت سد استرامنتیتزو در کشور ایتالیا

هدف اصلی در این تحقیق کنترل بازدهی عملیات رسوب‌شویی مخزن این سد است. برای مدل‌سازی عددی رسوب‌شویی سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شد. مشخصات هیدرولیکی این سه سناریو در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. در این شکل  $Q_{Totin} =$  دبی ورودی،  $Q_{Totout} =$  دبی خروجی،  $Q_{st} =$  دبی خروجی تحتانی و  $Q_{sup} =$  دبی سرریز فوقانی. همچنین در جدول (۱) شرایط مرزی در این سناریوها ارائه شده است.

<sup>2</sup> Computational Savings

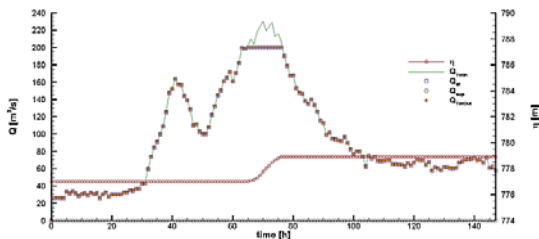
<sup>1</sup> Quadilateral

### صحت‌سنجی مدل

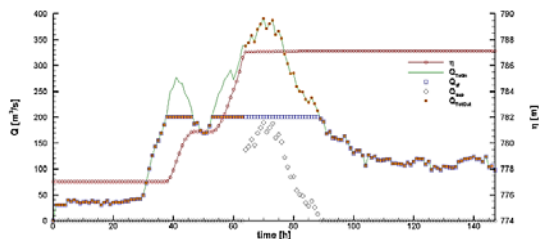
برای صحت‌سنجی مدل فوق، قبل از انجام شبیه‌سازی مدل اصلی، آشفتگی و انتقال رسوب در شرایط جریان یکنواخت شبیه‌سازی گردید. در این شرایط جریان سطح آزاد به عمق ثابت ۰/۱ متر و با شیب بستر ۵ درجه مورد تحلیل قرار گرفت. مدل‌سازی در شرایط غیردائمی انجام شد و تا رسیدن به شرایط دائمی ادامه یافت. سپس نتایج حاصل با روابط تحلیلی موجود مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول (۱): شرایط مرزی سناریوهای شبیه‌سازی

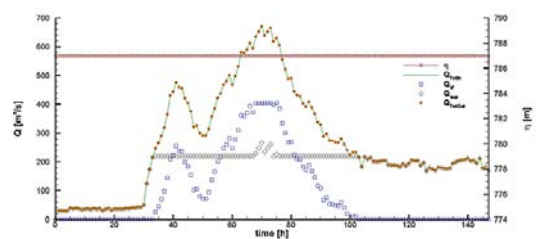
سناریو	ورودی	خروجی
مدل ۱	هیدروگراف ۵ ساله	دبی خروجی از خروجی تحتانی برابر با هیدروگراف ورودی و سرریز فوقانی بدون دبی
مدل ۲	هیدروگراف ۲۰ ساله	تا دبی ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه از خروجی تحتانی و دبی اضافی از سرریز فوقانی
مدل ۳	هیدروگراف ۱۰۰ ساله	استفاده از کل ظرفیت خروجی تحتانی و سرریز فوقانی



(الف)



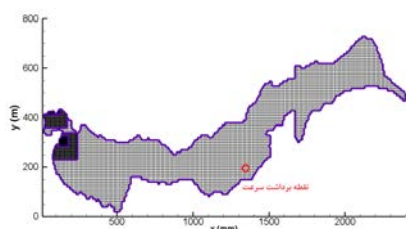
(ب)



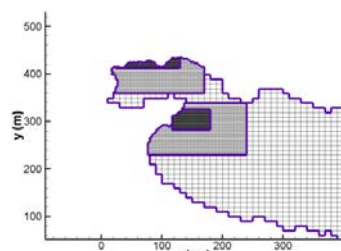
(ج)

شکل (۳): سناریوهای مدل‌سازی عددی (الف) مدل ۱ (ب) مدل ۲ و

(ج) مدل ۳



(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) شبکه‌بندی مخزن سد و (ب) شبکه‌بندی ARM در

نزدیکی خروجی تحتانی و سرریز سد

در شکل (۵-الف) پروفیل سرعت طولی به‌دست‌آمده از مدل عددی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که این پروفیل، رفتاری مشابه با جریان دائمی در کانال مستقیم از خود نشان می‌دهد و از بستر به سمت بالا به‌صورت لگاریتمی تغییر می‌کند. همچنین در شکل (۵-ب) پروفیل تنش برشی در عمق به‌دست‌آمده از مدل (مربع‌های توخالی) با معادله تئوری تغییرات خطی تنش برشی در عمق (خط ممتد سیاه‌رنگ)، مقایسه شده است. این معادله به‌صورت زیر است:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = (1 - z/H) \quad (۸)$$

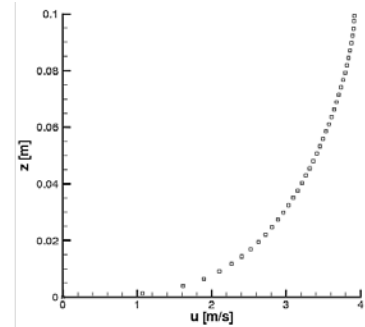
مشاهده می‌شود که نتایج محاسبه عددی با معادله تئوری کاملاً انطباق دارد.

این شرایط نیز افزایش ارتفاع آب مخزن ناشی از عدم افزایش دبی خروجی تحتانی از ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه است؛ اما در مدل ۳ هیچ‌گونه اختلاف ارتفاعی مشاهده نشد و سطح آب داخل مخزن ثابت مانده است. این موضوع به علت برابری دبی خروجی و دبی ورودی در کل زمان شبیه‌سازی است. بیش‌ترین ارتفاع سطح آب در مخزن پس از پایان شبیه‌سازی عملیات رسوب-شویی در مدل ۲ و ۳ مشاهده شد؛ و بنابراین از نظر تولید انرژی هیدروالکتریکی مدل ۲ و ۳ نسبت به مدل ۱ بازدهی بیشتری دارند.

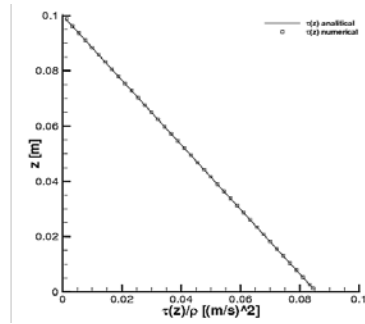
در شکل (۶) منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی همراه با خطوط جریان در زمان ۲۰ ساعت پس از شروع هیدروگراف برای هر سه سناریوی شبیه‌سازی شده، نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت جریان در هر سه سناریو در ورودی کانال بالاتر سایر نقاط است. با ورود جریان به داخل مخزن سرعت طولی در هر ۳ سناریو کاهش می‌یابد و در نزدیکی سد این سرعت به حداقل مقدار خود می‌رسد. بر همین اساس است که در مخازن سدها رسوبات ریزتر در داخل مخزن و در نزدیکی سد ته‌نشین می‌شوند. این در حالی است که جریان با سرعت کم در داخل مخزن توانایی حمل رسوبات درشت‌تر را ندارد، بنابراین رسوبات در ورودی مخزن ته‌نشین می‌شوند (تیگرک و آراس، ۲۰۱۱).

مقایسه سه سناریوی مدل‌سازی شده نشان می‌دهد که سرعت در ورودی مخزن در مدل ۱ و ۲ بیشتر از مدل ۳ است. از طرفی، در ورودی رودخانه به مخزن مدل ۱ و ۲ ( $X=2100$  m) یک ناحیه خشک جزیره‌ای شکل دیده می‌شود، اما در مدل ۳ این ناحیه خشک دیده نمی‌شود. این موضوع به این دلیل است که در زمان نمایش داده شده، ارتفاع سطح آب در مخزن در مدل ۳ از مدل ۱ و ۲ (شکل (۳)) بیشتر است. با وجودی که خروجی آب از مخزن در مدل ۳ بیشتر از مدل ۱ و ۲ است، ولی دبی ورودی بسیار بالای آب در مدل ۳ در مقایسه با مدل ۱ و ۲ (جدول (۱))، ارتفاع سطح آب در مخزن را بالاتر از مدل ۱ و ۲ نگه می‌دارد.

خطوط جریان نمایش داده شده در شکل (۶) نیز بیانگر جهت جریان در مخزن سد هستند. به‌طور کلی جریان در مخزن سد از سمت رودخانه به سمت سد است؛ اما در نزدیکی مخزن و پس از بازشدگی میانی مخزن در  $X=500$  m، در سمت چپ مخزن یک ناحیه گردابه‌ای نسبتاً بزرگ تشکیل شده است. این گردابه



(الف)



(ب)

شکل (۵): نتایج صحت‌سنجی مدل الف) پروفیل سرعت طولی در عمق ب) تغییرات تنش برشی در عمق

## نتایج

### خصوصیات جریان در مخزن سد

در گام نخست به بررسی شرایط جریان در مخزن سد پرداخته می‌شود. تغییرات سطح آب در مخزن سد و در طی زمان شبیه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. علت نمایش تغییرات سطح آب در شکل (۳) این است که امکان مقایسه این تغییرات با دبی ورودی و خروجی امکان‌پذیر باشد. اهمیت تغییرات سطح ارتفاع آب در مخزن به این دلیل است که پر شدن مخزن و افزایش محسوس ارتفاع آب داخل مخزن نیاز به زمان زیادی دارد (تیگرک و آراس، ۲۰۱۱). مشاهده می‌شود که در مدل ۱، سطح آب مخزن سد پس از حدوداً ۷۰ ساعت از شروع شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. به علت عدم افزایش دبی خروجی تحتانی از ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه در حالی که هیدروگراف ورودی در حال افزایش است، ارتفاع آب در این زمان افزایش یافته است. در این سناریو اختلاف ارتفاع آب در ابتدا و انتهای مدل‌سازی مثبت ۲ متر است. در مدل ۲ در دو بازه زمانی ۴۰ و ۶۰ ساعت پس از شروع شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب افزایش می‌یابد و اختلاف ارتفاع شروع و پایان شبیه‌سازی مثبت ۱۱ متر است. در

مقایسه سه سناریوی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که با وجود ارتفاع رسوب شسته شده بیشتر در ورودی کانال در مدل ۱ و ۲، ارتفاع رسوب شسته شده در داخل مخزن در مدل ۳ بیشتر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بازدهی رسوب‌شویی در شرایط مدل ۳، بیشتر از دو سناریوی دیگر است. این در شرایطی است که معمولاً بازدهی رسوب‌شویی در شرایطی که ارتفاع سطح آب داخل مخزن پایین است، بیشتر است (موریس و فان، ۱۹۹۷). هرچند که باید توجه داشت بازدهی بالای عملیات رسوب‌شویی بسته به شرایط مخزن می‌تواند در شرایط مختلفی اتفاق بیفتد (تیگرک و آراس، ۲۰۱۱). در این تحقیق نیز دبی ورودی به دوره بازگشت بیشتر از ۱۰۰ سال شرایطی را به وجود آورده است که با وجود ارتفاع بالای آب داخل مخزن، بازدهی رسوب‌شویی بالا است.

#### سرریز فوقانی و خروجی تحتانی

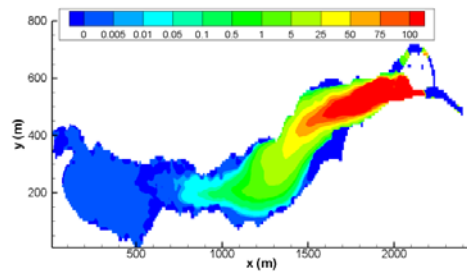
همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، برتری مدل حاضر استفاده از روش ریز شدن مش (AMR) در نقاطی از میدان جریان است که آشفتگی اهمیت دارد. این نقاط در این تحقیق در نزدیکی سرریز فوقانی و خروجی تحتانی است. در این بخش به بررسی میدان جریان در نزدیکی این دو سازه با شبکه‌بندی AMR، پرداخته می‌شود.

در شکل (۸) منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی همراه با خطوط جریان در زمان ۲۰ ساعت پس از شروع هیدروگراف برای هر سه سناریو، نزدیکی سرریز فوقانی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که سرعت طولی در مدل ۱ و ۲ نزدیک به صفر است، اما در مدل ۳ سرعت طولی مقادیر قابل توجهی دارد. علت این امر این است که در مدل ۱ و ۲ سرریز فوقانی بسته است و دبی خروجی نزدیک به صفر است، اما در مدل ۳ اکثر دبی از خروجی تحتانی تخلیه می‌شود. بررسی و مقایسه خطوط جریان در نزدیکی سرریز فوقانی برای مدل ۱ و ۲ نشان می‌دهد که در مدل ۱، با وجود مقدار بسیار کم سرعت طولی، مقدار کمی از جریان از سرریز منتقل می‌شود. این در حالی است که در مدل ۲ یک گردابه در نزدیکی سطح آب تشکیل شده است و هیچ جریانی از سرریز فوقانی عبور نمی‌کند.

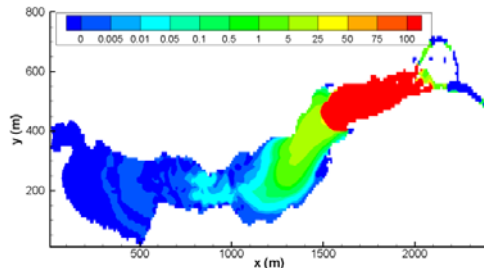
در مدل ۱ کوچک، در مدل ۲ بزرگ و در مدل ۳ بسیار بزرگ است. اختلاف ابعاد این گردابه نیز از اختلاف ارتفاع آب در مخزن سد و باز یا بسته بودن خروجی تحتانی ناشی می‌شود. در زمان شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب در مخزن در مدل ۳ بیش‌تر از مدل ۲ و در مدل ۲ بیش‌تر از مدل ۱ است (شکل (۳))؛ و لذا گردابه تشکیل شده در عمق بزرگ‌تر است. مقایسه خطوط جریان در ورودی کانال نیز تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. در مدل ۱ و ۲ دو گردابه بزرگ که در خلاف جهت یکدیگر هستند در ورودی کانال تشکیل شده است، اما در مدل ۳ تنها یک گردابه ساعت‌گرد تشکیل شده است. بر این اساس می‌توان پیش‌بینی نمود که در مدل ۱ و ۲، در ورودی کانال رسوبات درشت‌تر در هر دو سمت ته‌نشین می‌شود، این در حالی است که در مدل ۳ امکان ته‌نشینی رسوبات در سمت چپ بسیار بیشتر است. به‌منظور بررسی این موضوع حجم رسوب انتقال‌یافته بر اساس معادله پیوستگی رسوب به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = E - D \quad (9)$$

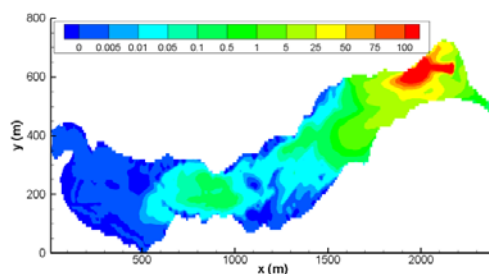
که در این رابطه  $t =$  زمان،  $E =$  رسوب شسته شده و  $D =$  رسوب ته‌نشین شده که از روابط (۴)، (۵) و (۶) در طی حل میدان به دست می‌آیند. این رابطه بیان‌گر این حقیقت است که تغییرات ارتفاع بستر برابر با حاصل تفریق رسوب شسته شده و ته‌نشین شده است. منحنی‌های هم‌تراز ارتفاع رسوب شسته‌شده در انتهای شبیه‌سازی در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که بیشترین میزان رسوب شسته شده مربوط به ورودی مخزن سد است؛ به عبارت دیگر، ارتفاع رسوب شسته شده در ورودی مخزن سد بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر است. این در حالی است که رسوب شسته‌شده در داخل مخزن بسیار کمتر (کوچک‌تر از ۰/۰۱ سانتی‌متر) است. البته باید به یاد داشت که در این مدل نمی‌توان رسوبات غیرهمگن (رسوب در اندازه‌های متفاوت و در مکان‌های مختلف مخزن) را در نظر گرفت. از آنجاکه در شرایط واقعی رسوبات ته‌نشین شده در ورودی مخزن بسیار بزرگ‌تر از رسوبات ته‌نشین شده در نزدیکی سد است، بنابراین ارتفاع رسوب شسته واقعی در ورودی مخزن بسیار کوچک‌تر است.



(الف)

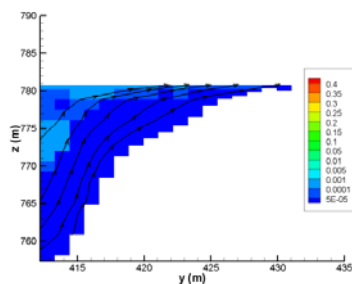


(ب)

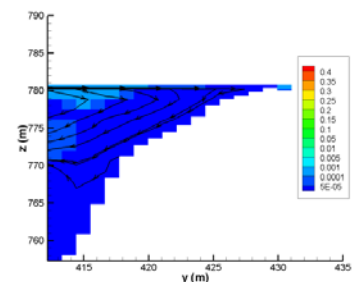


(ج)

شکل (۷): ارتفاع رسوب شسته شده، به دست آمده از شبیه سازی عددی در انتهای شبیه سازی (برحسب سانتی متر) (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲ و (ج) مدل ۳

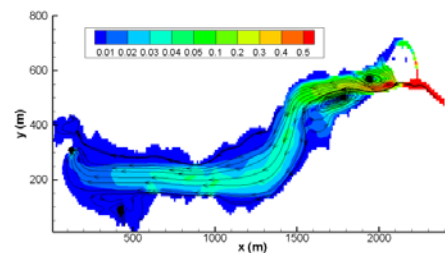


(الف)

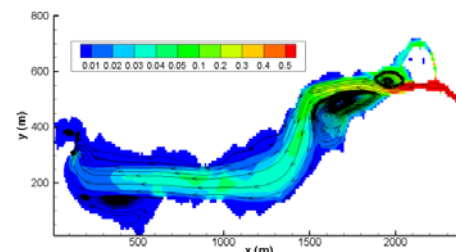


(ب)

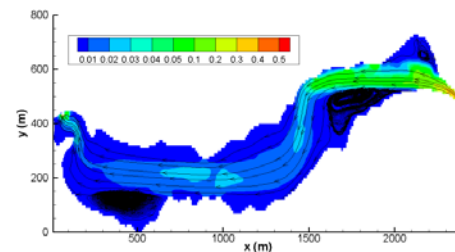
برای بررسی اثر الگوی جریان بر انتقال رسوب، در شکل (۹)، منحنی‌های هم‌تراز غلظت رسوب در نزدیکی خروجی تحتانی و ۲۰ ساعت پس از شروع مدل‌سازی نمایش داده شده است. غلظت رسوب در مدل ۳ (شکل ۹-ج)) بسیار کم و کوچک‌تر از  $10^{-10}$  کیلوگرم بر مترمکعب است؛ اما در مدل ۱ و ۲، میزان غلظت رسوب در نزدیکی خروجی تحتانی بیشتر از  $10^{-5}$  کیلوگرم بر مترمکعب است. این موضوع کاملاً منطبق با الگوی جریان مشاهده شده در نزدیکی خروجی تحتانی است. به بیان دقیق‌تر زمانی که جریان از خروجی تحتانی عبور می‌کند، غلظت رسوب در نزدیکی خروجی تحتانی زیاد است، اما زمانی که خروجی تحتانی بسته است، غلظت در نزدیکی آن بسیار کم است.



(الف)



(ب)



(ج)

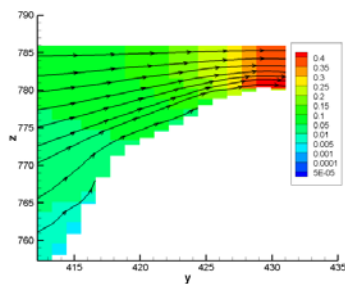
شکل (۹): منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی (برحسب متر بر ثانیه) همراه با خطوط جریان در  $t=20$  ساعت (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲ و (ج) مدل ۳



منحنی‌های هم‌تراز مدل ۱ و ۲ نیز نشان‌دهنده اختلاف در الگوی تغییرات غلظت در نزدیکی خروجی تحتانی است. در مدل ۱ غلظت رسوب در مجاور بستر بیشترین مقدار را دارد، اما در مدل ۲ حداکثر غلظت در نزدیکی خروجی تحتانی و با فاصله از بستر روی داده است. علت این تفاوت در الگوی جریان به تفاوت دبی خروجی تحتانی مربوط است. خروجی تحتانی در شرایط مدل ۲ از مدل ۱ بازتر است و بنابراین دبی خروجی جریان در مدل ۲ از مدل ۱ نیز بیشتر است و به همین ترتیب سرعت در نزدیکی خروجی تحتانی نیز بیشتر است. این موضوع موجب اختلاف در نحوه انتقال رسوب و منحنی‌های هم‌تراز غلظت رسوب در نزدیکی خروجی تحتانی می‌شود.

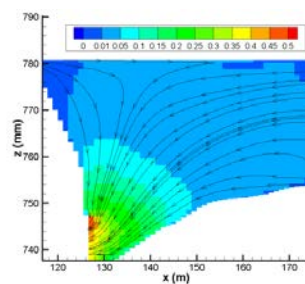
علاوه بر سرریز فوقانی در شکل (۱۰)، منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی همراه با خطوط جریان در زمان ۲۰ ساعت پس از شروع هیدروگراف برای هر سه سناریو و در نزدیکی خروجی تحتانی نشان داده شده است. سرعت طولی در نزدیکی خروجی تحتانی نشان‌دهنده سرعت‌های بالا در مدل ۱ و سرعت‌های نزدیک به صفر در مدل ۳ است. همچنین خطوط جریان نمایش داده شده نیز نشان‌دهنده خروج آب قابل توجه از خروجی تحتانی در مدل ۱ و ۲ است، اما در مدل ۳ خطوط جریان حاکی از تشکیل یک گردابه و برگشت آب به داخل مخزن در نزدیکی خروجی تحتانی است. مقایسه سرعت طولی مدل ۳ در نزدیکی سرریز (شکل ۸-ج) و سرعت طولی مدل ۱ و ۲ در نزدیکی خروجی تحتانی (شکل ۹-الف و ب) نشان‌دهنده مقدار سرعت تقریباً مشابه سیال در هنگام خروج از مخزن است.

برای مقایسه بهتر بازدهی رسوب‌شویی نحوه تغییرات دبی رسوب منتقل شده از طریق خروجی تحتانی در هر سه سناریوی شبیه‌سازی در شکل (۱۱) ارائه شده است. مقایسه دبی رسوب خروجی تحتانی با هیدروگراف خروجی تحتانی (شکل ۳) نشان‌دهنده این واقعیت است که تغییرات دبی رسوب از تغییر دبی آب ناشی می‌شود. بر اساس منحنی‌های نمایش داده شده در شکل (۱۱)، بیشترین مقدار حجم رسوب در مدل ۳ از مخزن خارج می‌شود؛ اما باید توجه داشت که در مدل ۳، در پیچه خروجی تحتانی در ۳۰ ساعت اول شبیه‌سازی و ۴۰ ساعت آخر شبیه‌سازی، بسته است؛ اما در مدل ۱ و ۲ در پیچه‌ها در کل زمان شبیه‌سازی باز هستند. به‌منظور مقایسه حجم رسوب خارج شده

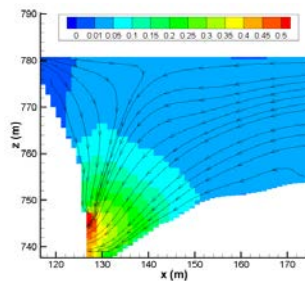


(ج)

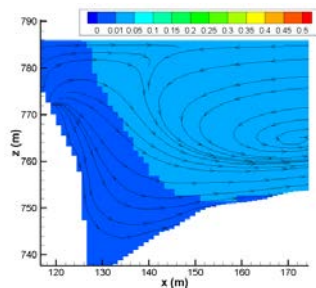
شکل (۸): منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی (برحسب متر بر ثانیه) همراه با خطوط جریان در  $t=20$  ساعت (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲، (ج) مدل ۳



(الف)



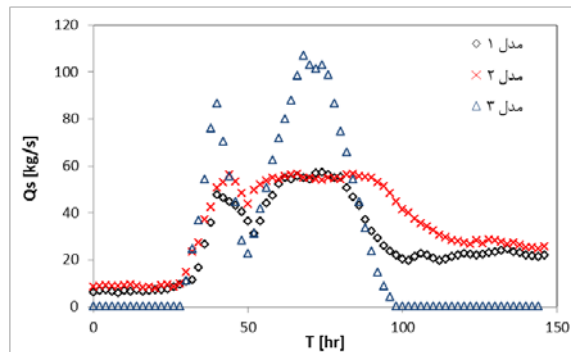
(ب)



(ج)

شکل (۹): منحنی‌های هم‌تراز سرعت طولی (برحسب متر بر ثانیه) همراه با خطوط جریان در  $t=20$  ساعت. (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲ و (ج) مدل ۳

سطح آب بالاتر در پایان عملیات رسوب‌شویی، دارای بازدهی بیشتری هستند. از طرف دیگر، منحنی‌های هم‌تراز رسوب جابه‌جاشده (شکل (۸))، نشان داد که رسوب منتقل شده در مدل ۳ اغلب از داخل مخزن سد شسته شده‌اند. بنابراین به‌طور کلی در بین سه سناریوی رسوب‌شویی شبیه‌سازی شده، بازدهی مدل ۳ از دو مدل دیگر بیشتر است.



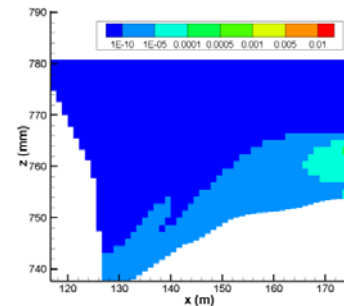
شکل (۱۱): هیدروگراف تغییرات دبی رسوب در خروجی تحتانی (برحسب لیتر بر ثانیه) الف) مدل ۱ ب) مدل ۲ ج) مدل ۳

### نتیجه‌گیری

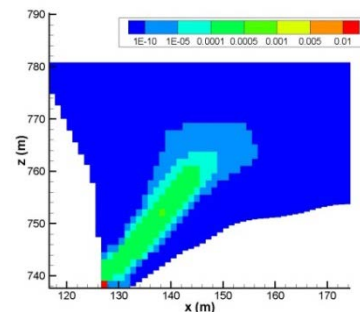
در مطالعه حاضر یک مدل عددی جدید جهت مطالعه و شبیه‌سازی عملیات رسوب‌شویی در مخزن سد ارائه شده است. مدل ارائه شده یک مدل سه‌بعدی است که در آن معادله ناویر-استوکس همراه با معادله انتقال رسوب حل می‌شود. در این تحقیق، آشفتنگی بر اساس روش  $k - \epsilon$  استاندارد مدل شد. به جهت کاهش حجم محاسبات از روش مش‌بندی AMR در این مدل استفاده شد.

مدل توسعه‌یافته در این مقاله جهت مطالعه بازدهی مخزن سد استرامنتیتزو، ایتالیا مورد استفاده قرار گرفت. سه سناریوی مختلف جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. در این سه سناریو دبی جریان ورودی، دبی خروجی از مخزن سد و سطح اولیه آب در مخزن تغییر داده شدند. به‌منظور بررسی بازدهی رسوب‌شویی سطح آب مخزن پس از پایان عملیات رسوب‌شویی و حجم رسوب تخلیه‌شده از مخزن توسط خروجی تحتانی به‌عنوان دو معیار مهم در بازدهی مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. مشاهده شد که در مدل ۳، باوجود بسته بودن خروجی تحتانی در بیش از نیمی از زمان شبیه‌سازی، به علت حجم بالای دبی خروجی در زمان باز شدن خروجی تحتانی، بازدهی رسوب‌شویی از سایر سناریوها بالاتر است.

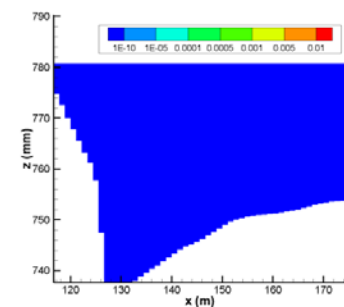
از مخزن باید سطح زیر منحنی تغییرات حجم رسوب در زمان را برای هر یک سناریوهای شبیه‌سازی محاسبه نمود. محاسبه سطح زیر نمودار به روش ذوزنقه‌ای نشان داد که حجم رسوب خارج‌شده از مخزن در مدل ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۵۲۵، ۴۶۳ و ۱۲۴۰ تن است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): منحنی‌های هم‌تراز غلظت رسوب (برحسب کیلوگرم بر مترمکعب)  $t=20$  ساعت، در نزدیکی خروجی تحتانی الف) مدل ۱، ب) مدل ۲ و ج) مدل ۳

مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که حجم رسوب شسته شده در مخزن در مدل ۳ از دو سناریوی دیگر بیشتر است؛ بنابراین از نظر استخراج رسوب ته‌نشین شده در مخزن، سناریوی رسوب‌شویی در مدل ۳ دارای بازدهی بیشتری است. از سوی دیگر، در بخش قبل (خصوصیات جریان در مخزن سد) مشاهده شد که از نقطه نظر تولید انرژی برق آبی مدل‌های ۳ و ۲ از نظر رسیدن به

8- Shimizu, Y. and Itakura, T. (1989). "Calculation of bed variation in alluvial channels." *Journal of Hydraulic Engineering*. 115(3), 367–384.

9- Tigrek, S. and Aras, T. (2011). Reservoir Sediment Management. *Taylor & Francis*.

10- Van Maren, D. S., Yang, M. and Wang, Z. B. (2011). "Predicting the Morphodynamic Response of Silt-Laden Rivers to Water and Sediment Release from Reservoirs: Lower Yellow River, China." *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(1), 90-99.

11- Wu, W., Rodi, W. and Wenka, T. (2000). "3D calculations of flow and sediment transport in rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*. 126 (1), 4–15.

12- Zanotti, O. and Dumbser, M. (2015). "A high order special relativistic hydrodynamic and magnetohydrodynamic code with space–time adaptive mesh refinement." *Journal of Computer Physics Communications*. 188(March 2015), 110–127.

در نهایت منحنی‌های هم‌تراز رسوب شسته‌شده از مخزن نشان داد که بیشترین حجم رسوب خارج‌شده، ناشی از فرسایش در ورودی مخزن است. در مدل واقعی چنین فرسایشی چندان محتمل نیست. علت این موضوع این است که در این مدل امکان در نظر گرفتن رسوبات ناهمگن وجود ندارد و خصوصیات رسوب در سرتاسر مخزن باید یکسان در نظر گرفته شود؛ بنابراین نخستین گام در توسعه این ایجاد امکان شبیه‌سازی رسوبات ناهمگن در مخزن سد است.

## مراجع

۱- مهاجری، س. ح. و نجیبی، س. ا. (۱۳۹۴). "مروری بر کاربرد روش رسوب‌شویی در مخازن سدها: مطالعه موردی سد سفیدرود." سومین سیمپوزیم بین‌المللی مهندسی محیط زیست و آب. تهران، ایران.

2- Casulli, V. and Zanolli, P. (2002). "Semi-Implicit Numerical Modeling of Nonhydrostatic Free-Surface Flows for Environmental Problems." *Mathematical and Computer Modelling*. 36(9-10), 1131-1149.

3- Celik, I., and Rodi, W. (1988). "Modeling suspended sediment transport in non-equilibrium situations." *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(10), 1157–1191.

4- Fang, H. and Rodi, W. (2003). "Three-dimensional calculation of flow and suspended sediment transport in the neighborhoods of the dam for the Three Gorges Project (TGP) reservoir in the Yangtze River." *Journal of Hydraulic Research*. 41(4), 379–394.

5- Liu, J., Minami, S., Otsuki, H., Liu, B. and Ashida, K. (2004). "Environmental impacts of coordinate sediment flushing." *Journal of Hydraulic Research*. 42(5), 461–472.

6- Morris, G. and Fan, J. (1997). Reservoir sedimentation handbook. McGraw-Hill Professional, New York.

7- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in Open-Channel Flows." *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(10), 1235–1237.