

شبیه‌سازی عددی رسوب‌زدایی مخزن سد سفید رود با اجرای عملیات شاس تحت فشار

علی خسرونژاد

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

رشت، صندوق پستی ۴۱۶۳۵-۱۳۱۴

khosronejad@guilan.ac.ir

چکیده - استفاده از فعالیتهای حفاظت آب و خاک به منظور کنترل رسوب‌زایی حوضه‌های آبریز رودخانه‌های قزل اوزن و شاه‌رود تقریباً ناممکن بوده و لذا باید به نحو دیگری نسبت به حل معضل رسوبگذاری مخزن سد سفید رود اقدام کرد. در این راستا به نظر می‌رسد که استفاده از عملیات شاس برای رسوب‌زدایی رسوبهای ته‌نشین شده در مخزن سد سفید رود به‌عنوان تنها راه حل اثربخش و موفقیت‌آمیز مطرح باشد. در همین راستا، در این مطالعه نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی در حین عملیات شاس تحت فشار سد سفید رود ارائه و بررسی شده است. با توجه به این که شبیه‌سازی عددی فرایند رسوب‌زدایی مخزن سد می‌تواند به ایجاد راه‌کارهای مناسب برای بهینه‌سازی نحوه عملکرد و مانور دریچه‌های تخلیه عمقی، هیدروگراف خروجی و دامنه تغییرات تراز آب منجر شود، در این مقاله به نحوه استفاده از یک مدل عددی برای شبیه‌سازی عملیات شاس تحت فشار در مخزن سد سفید رود اشاره می‌شود. در خاتمه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به راه‌کارهای اجرایی مناسب برای عملیات‌های رسوب‌زدایی بعدی اشاره شده است.

کلید واژگان: رسوب‌زدایی، مدل عددی، راندمان رسوب‌زدایی، جریان غیر دائمی، عملیات شاس.

۱- مقدمه

۴۸۳۵ میلیون متر مکعب و ۴۸ میلیون تن در سال است. مقدار رسوب خروجی مخزن در شرایط عادی بهره‌برداری (بدون انجام عملیات تخلیه رسوب از دریچه‌های عمقی) ۱۴ میلیون تن در سال بوده و با توجه به میزان رسوب ورودی، بدون انجام عملیات تخلیه رسوب، هر ساله ۲/۳ درصد از ظرفیت ذخیره مخزن سد سفید رود بر اثر رسوبگذاری از دست خواهد رفت که حجم قابل ملاحظه‌ای است (Tolouei et al., 1993). در این تحقیق عملیات شاس تحت فشار در مخزن سد سفید رود مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از مدل عددی یک‌بعدی

سد سفید رود در شمال ایران و در نزدیکی شهرستان منجیل واقع شده است. این سد از نوع وزنی پشت بنددار با مساحت حوضه آبریز ۱۱۰۵۷۰ کیلومتر مربع، ارتفاع ۱۰۶ متر، طول تاج ۴۲۵ متر، ظرفیت ذخیره اولیه در تراز عادی مخزن ۱/۷۶ میلیارد متر مکعب، نسبت ظرفیت مخزن به حجم آب ورودی سالیانه مخزن برابر ۰/۳۶ و توان تولید انرژی الکتریکی ۸۷/۵ مگاوات بوده و در سال ۱۳۴۲ به بهره‌برداری رسیده است. متوسط بلند مدت حجم آب و جرم رسوب ورودی مخزن به ترتیب برابر با

۲- شستشو با جریان سیلاب: تجربه نشان داده که حجم قابل توجهی از رسوبهای مخزن سد سفید رود همراه با جریانهای سیلابی به مخزن وارد می‌شود. لذا چنانچه به آب آورده شده با سیلاب برای پر کردن مخزن نیازی نبوده و بتوان آن را از طریق تخلیه کننده‌های عمقی به پایین دست هدایت کرد، بطور مطلوبی می‌توان بخشی از رسوبهای آورده شده به مخزن را بدون آنکه به آنها اجازه ترسیب داده شود از مخزن تخلیه کرد (Fan et al., 1980, Tolouei, 1989).

۳- تخلیه جریانهای غلیظ: بخش بزرگی از رسوبهای ورودی مخزن سد سفید رود و بسیاری از سدهای کشور، از طریق جریان سیلاب به مخزن وارد می‌شوند. در شرایط خاص هیدرولیکی، ذرات رسوب درون جریان سیلاب (با غلظت رسوب بالا) که به سمت بدنه سد در حرکت است، ته‌نشین شده و در لایه‌های پایینی جریان قرار گرفته به سمت بدنه سد و تخلیه کننده‌های عمقی حرکت می‌کند. به این جریان توده جامد رسوبها به شکل معلق و به سمت بدنه سد، جریان چگال یا جریان غلیظ اطلاق می‌شود. جریان غلیظ عموماً به موازات بستر مخزن بوده و در آن راستا با سرعتی که تابعی از سرعت جریان سیلاب است، به سمت بدنه سد حرکت می‌کند (Fan et al, 1980).

در اینجا قابل توجه است که تجزیه و تحلیل شرایط عملیات‌های فوق و بررسی کارایی هر یک با استفاده از مدل‌های عددی، می‌تواند راهکار بسیار مناسبی در افزایش راندمان رسوب‌زدایی مخزن باشد. با وجود این استفاده از مدل‌های عددی محدودیتهایی دارد که در زیر به آنها اشاره می‌شود (Khosrownejad et al., 2008).

الف) در استفاده از مدل‌های عددی، به کالیبراسیون ضرایب آن مدلها برای شرایط خاص هیدرولیکی نیاز است.

ب) هر چه پدیده مورد نظر پیچیده تر باشد، ساده سازی‌های بیشتری در معادلات حاکم لازم است.

نسبت به شبه‌سازی آن اقدام شده است. با توجه به ماهیت شاس تحت فشار و جریان مربوط، از داده‌های شاس تحت فشار مخزن سد سفید رود در سالهای ۱۳۵۹ و ۱۳۶۰ برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است.

۲- روشهای مورد استفاده رسوب‌زدایی

با توجه به مسائل و مشکلاتی که تجمع رسوب در مخازن به همراه دارد، تحقیقات بسیاری در سطح بین‌المللی برای حل این مشکل انجام شده است و تجربه‌های به‌دست آمده در کنار مطالعات و تحقیقات انجام شده در این راستا مشخص ساخته که استفاده از یکی از روشهای زیر یا ترکیبی از آنها برای حل مساله می‌تواند به نتایج موفقیت آمیزی منجر گردد (Fan et al, 1992).

۱- رسوب‌زدایی مخزن در زمان غیر آبیاری با عملیات شاس: روش رسوب‌زدایی شاس، در مخزن سد سفید رود به دو شکل شاس با جریان آزاد (یا شاس با تخلیه کامل مخزن) و شاس تحت فشار انجام شده است. در سالهای بعد از ۱۳۶۰ از روش شاس جریان آزاد برای تخلیه رسوبات ورودی به مخزن سد سفید رود استفاده شده است که در مقایسه با شاس تحت فشار دارای راندمان مناسب‌تری بوده است؛ در حالی که در روش شاس تحت فشار، تخلیه کامل مخزن صورت نگرفته و فقط رسوب نواحی نزدیک به تخلیه کننده‌ها به پایین دست تخلیه می‌شود. در حالت تحت فشار، در مقابل تخلیه کننده‌ها گوه ای شکل گرفته که با گذشت زمان دارای شکلی پایدار شده و تخلیه رسوب خاتمه می‌یابد و در صورت ادامه شاس، جریان خروجی از تخلیه کننده‌ها فاقد رسوب خواهد بود (Fan et al, 1980). روش شاس تحت فشار دو مرتبه، در اولین سالهای انجام شاس یعنی سالهای ۱۳۵۹ و ۱۳۶۰، در سد مخزنی سفید رود در زمانهای بعد از فصل آبیاری اراضی استان گیلان اجرا شده و نتایج نسبتاً خوبی نیز به همراه داشته است.

آزاد، \hat{x} ، \hat{y} مختصات محلی در معادله جت، U_{Max} حداکثر سرعت در مقطع قائم جت، D قطر تخلیه کننده عمقی، x_D فاصله طولی از بدنه سد، H ارتفاع ستون سیال از محور مرکزی تخلیه کننده، c_v ضریب ثابت برابر ۰/۸۱ و C_C ضریب سرعت مربوط به تخلیه کننده برابر ۰/۷ تا ۰/۹ است. ضرایب مانینگ و C_C در مطالعات میدان جریان که به طور جداگانه انجام شده، کالیبره شده است (مهذب قدس، ۱۳۷۶).

همچنین معادلات حاکم بر انتقال رسوب در فرایند مورد بحث عبارتند از معادله پخش و انتقال غلظت رسوب (با در نظر گرفتن اثر پخش ناشی از آشفتگی) به شکل زیر (Yalin, 1977):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(VC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (v_t \frac{\partial C}{\partial x}) + S_c \quad (6)$$

که در آن C غلظت رسوب و v_t ضریب پخش در برگرفته ضرایب پخش ملکولی و پخش ناشی از آشفتگی است و از رابطه زیر بدست می آید (Chatterjee et al., 1980, Kerssens et al, 1979):

$$v_t = 7.25h \left(\frac{V}{\sqrt{gRJ_e}} \right)^{0.25} \sqrt{gRJ_e} \quad (7)$$

که h و J به ترتیب عمق جریان و شیب خط انرژی است. در رابطه (۶) S_c عبارت چشمه که تأثیر برداشت گذاشت رسوبها را به معادلات وارد می کند و از قسمتهای مهم مدلسازی عددی انتقال رسوب است که با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_c = \Psi_{1,2} \frac{\partial C_T}{\partial t} \quad (8)$$

در این رابطه C_T ظرفیت حمل جریان بوده و تابعی از سرعت جریان است (Kerssens et al., 1979). $\Psi_{1,2}$ نیز ضریب ثابت عبارت چشمه و چاه بوده و مقدار آن به علامت $\frac{\partial C_T}{\partial t} > 0$ بستگی دارد. در شرایطی که $\frac{\partial C_T}{\partial t} > 0$ باشد یا ظرفیت حمل جریان در حال افزایش باشد (با افزایش سرعت جریان) اگر مقدار غلظت رسوب معلق در جریان از مقدار غلظت ظرفیت حمل کمتر باشد، جریان قدرت کنش رسوبها از بستر را دارا بوده (برداشت رسوبهای بستر و حمل

۳- معادلات حاکم بر مدل عددی مورد استفاده

برای شبیه سازی هیدرودینامیک جریان (غیر دائمی) و انتقال رسوب داخل مخزن در فاصله دور از بدنه سد، از معادلات حاکم یک بعدی زیر استفاده شده است. در این مدلسازی اثر پخش ناشی از آشفتگی^۱ و همچنین اندرکنش میدان جریان با دیوار مخزن دیده شده است که در ادامه بدان اشاره می شود (Graf, 1971).

معادله حرکت جریان:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + \frac{g}{\gamma} \frac{\partial Z}{\partial x} A + \frac{g}{\gamma} \frac{V^2 n^2}{R^{4/3}} A = 0 \quad (1)$$

معادله پیوستگی جریان:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

برای نواحی دور از محل دریچه های تخلیه کننده عمقی، از معادله حرکت به شکل رابطه (۱) استفاده شده است. اما به دلیل آنکه حرکت جریان در نزدیکی دریچه های تخلیه کننده شباهت زیادی به جریان جت آزاد دارد، در فواصل نزدیک به دریچه های تخلیه از قاعده تشابه پروفیل سرعت در نواحی جریان های برشی (از نوع جت های آزاد) برای تقریب توزیع سرعت به شکل زیر استفاده شده است (Chatterjee et al., 1980):

$$U(\hat{x}, \hat{y}) = U_{Max} \cdot e^{(0.5(\hat{y}/c_v \hat{x})^2)} \quad (3)$$

$$U_{Max} = 6.2 C_C \frac{D}{x_D} (2gH)^{0.5} \quad (4)$$

بنابراین برای محاسبه متوسط سرعت در مقطع جریانی به فاصله x_D از بدنه سد از رابطه زیر استفاده می شود:

$$V = \frac{1}{A} \int_A U(\hat{x}, \hat{y}) dA \quad (5)$$

در روابط (۱) تا (۵) که در این مدل عددی معادلات حاکم بر میدان جریان را تشکیل داده اند، Q دبی جریان، V سرعت جریان در مقطع، t زمان، x مختصات طولی، g شتاب جاذبه، Z تراز سطح آب، n ضریب زبری مانینگ، γ وزن مخصوص سیال، A مساحت سطح مقطع جریان، R شعاع هیدرولیکی، B عرض جریان در سطح

1. Turbulent Diffusion

به‌دست آمده و از این طریق شکل مقطع جریان در مخزن سد (برای گام جدید زمانی) مشخص می‌شود. نحوه محاسبه سطح مقطع جریان به این شکل است که با استفاده از مدل یک بعدی حاضر، تغییرات تراز بستر مخزن محاسبه و در نتیجه عمق جدید جریان به‌دست می‌آید. با استفاده از عمق جریان و با فرض عرض ثابت برای جریان در ناحیه مورد مطالعه، سطح مقطع جدید جریان (برای گام زمانی جدید) محاسبه می‌شود.

برای حل معادلات حاکم (۱) تا (۱۱) از روش تفاضل محدود وزنی به شکل صریح^۱ استفاده شده است. با توجه به حساسیت روش مستقیم به اندازه گام‌های زمانی و امکان ناپایدار شدن نتایج (در اثر بزرگ در نظر گرفتن گام‌های زمانی)، برای تضمین پایداری روش عددی فوق از شرط پایداری بدست آمده با روش استاندارد استفاده شده است. در این روش برای رسیدن به شرط پایداری برای یک طرح عددی از سریهای فوریه و بررسی جمله n ام استفاده می‌شود (Chen, 1971).

۴- کالیبره کردن مدل عددی

در فرایند کالیبره کردن مدل عددی حاضر پارامترهای اصلی مدل که نیازمند تنظیم و کالیبره کردن هستند، عبارتند از ضرایب مربوط به عبارتهای چشمه و چاه (Ψ_1, Ψ_2) در معادله پنخس - انتقال رسوب (معادله (۶)). برای این منظور از نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی برای عملیات شاس در سال ۱۳۶۰ استفاده شده است. داده‌های مشاهده شده مذکور شامل: تراز آب مخزن و دبی جریان، غلظت رسوبهای تخلیه شده بلافاصله در پایین دست سد (اندازه‌گیری شده در ایستگاه رودبار)، و دبی جریان و غلظت رسوب در ۸۲ مقطع مختلف در داخل مخزن است (مهاب قدس، ۱۳۷۶).

شاخص اصلی تشابه در فرایند کالیبره کردن مدل عددی، غلظت رسوبها در جریان خروجی است که در پایین دست

آنها رخ می‌دهد) و ترم چشمه معادله (۶) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_c = \Psi_1 \frac{\partial C_T}{\partial t} \quad (9)$$

همان‌طور که از رابطه (۹) پیداست، در صورتی که $\frac{\partial C_T}{\partial t}$ مثبت باشد، مقدار $\Psi_{1,2}$ برابر Ψ_1 ملحوظ می‌شود که در ادامه مطالعه، مقدار عددی آن نیز مطالعه می‌شود.

همچنین در شرایطی که $\frac{\partial C_T}{\partial t} < 0$ باشد یا ظرفیت حمل جریان در حال کاهش باشد (با کاهش سرعت جریان) اگر مقدار غلظت رسوب معلق در جریان بیشتر از غلظت ظرفیت حمل جریان باشد، جریان قدرت حمل رسوبها را دارا نبوده و انباشت رسوبهای داخل جریان بر روی بستر رخ می‌دهد. در این حالت عبارت چشمه معادله (۶) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_c = \Psi_2 \frac{\partial C_T}{\partial t} \quad (10)$$

در اینجا نیز، همان‌طور که در رابطه (۱۰) مشخص شده، در صورتی که $\frac{\partial C_T}{\partial t}$ منفی باشد، مقدار $\Psi_{1,2}$ برابر Ψ_2 ملحوظ می‌شود که در ادامه مطالعه به مقدار عددی آن که از طریق کالیبره کردن به‌دست می‌آید، اشاره خواهد شد.

روند حل معادلات به این ترتیب است که ابتدا معادلات میدان جریان (معادلات (۱) تا (۵)) حل شده و مقادیر سرعتها در مخزن و در نزدیکی سد در گام زمانی معین محاسبه می‌شوند. پس از محاسبه میدان جریان، با حل معادله پنخس - انتقال غلظت رسوب (معادله (۶)) غلظت رسوب در کل میدان حل که شامل مخزن سد است محاسبه می‌شود.

با استفاده از این مقادیر محاسبه شده، معادله پیوستگی رسوب که به شکل زیر است حل می‌شود (Emamgholizadeh et al., 2006).

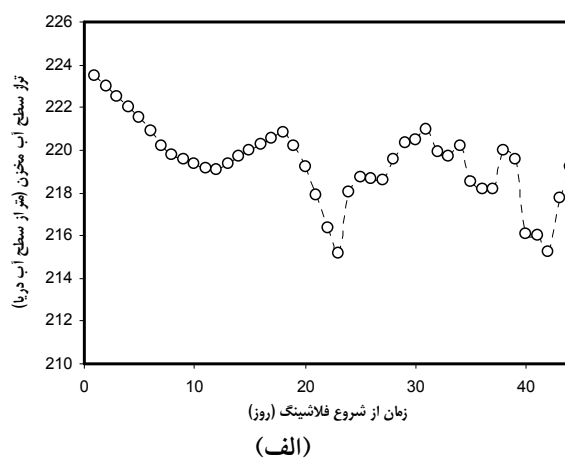
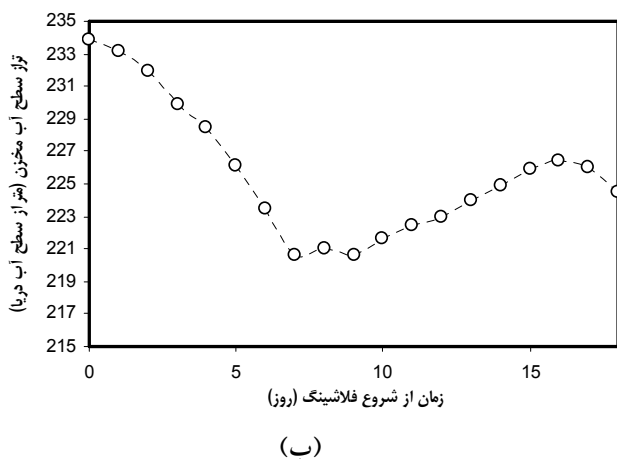
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

با فرض عرض ثابت برای جریان در مخزن، با حل معادله فوق تغییرات سطح مقطع جریان در گام زمانی جدید

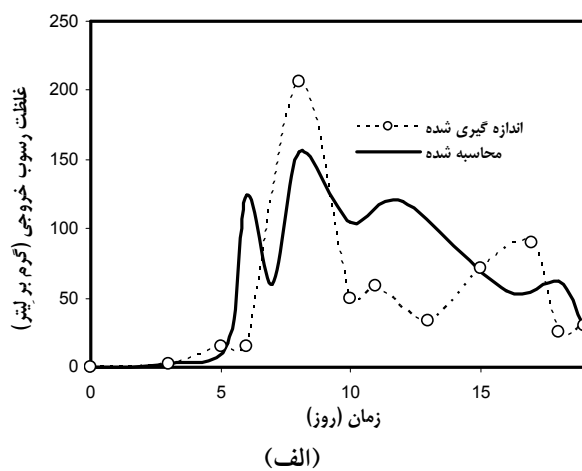
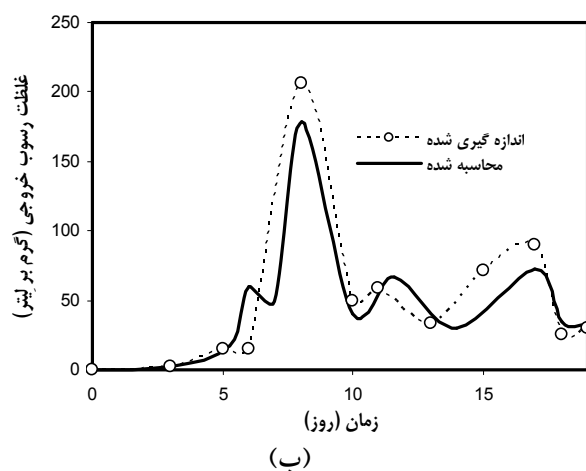
۵- نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

بعد از انجام اولین مرحله کالیبره کردن، در گام بعد شاس بعد از انجام اولین مرحله کالیبره کردن، در گام بعد شاس سال ۱۳۵۹ با مدل عددی کالیبره شده، شبیه سازی و نتایج مناسبی حاصل شده است. به خاطر فرایند اجتناب ناپذیر تحکیم مصالح رسوبی، پارامترهای کالیبره شده در یک سال ممکن است در سال یا سالهای بعدی متفاوت باشد، اما این اختلاف تقریباً قابل چشم‌پوشی است و انتظار می‌رود نتایج به دست آمده قابل قبول باشند. شکل ۲ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های مدل عددی را در حین کالیبره کردن با داده‌های اندازه‌گیری شده شاس ۱۳۶۰ نشان می‌دهد.

سد اندازه‌گیری شده و با نتایج مدل عددی مقایسه می‌شود. پس از کالیبره کردن پارامترها، دامنه تغییر Ψ_1 از ۰/۲ تا ۰/۳۵ و برای Ψ_2 از ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ بود. نتایج اندازه‌گیری تراز آب مخزن در طول عملیات شاس در سالهای ۱۳۵۹ و ۱۳۶۰ در شکل ۱ ارائه شده است. باید توجه کرد که دهانه ورودی تخلیه کننده عمقی سد سفید رود در تراز ۱۹۳/۸ متر قرار داشته و با توجه به تراز آب مخزن در طول مدت دو عملیات شاس مذکور (که همواره بیش از ۲۱۴ متر بوده)، مشخص است که این شاس‌ها به صورت تحت فشار انجام شده است (مهاب قدس، ۱۳۷۶).



شکل ۱ تراز آب مخزن در طول عملیات شاس الف- سال ۱۳۵۹، ب- سال ۱۳۶۰ (مهاب قدس، ۱۳۷۶)



شکل ۲ نتایج عددی و میدانی عملیات شاس سال ۱۳۶۰، الف- قبل از کالیبراسیون مدل، ب- بعد از کالیبراسیون مدل (مهاب قدس، ۱۳۷۶)

با مقایسه نتایج مدل و نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی در شکل ۲-ب، مشخص است که نتایج مدل عددی در خاتمه کالیبره کردن دقت مناسبی داشته و این در حالی است که نتایج مدل در ابتدای روند کالیبره کردن (شکل ۲-الف) دقت مناسبی ندارند.

همچنین شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری میدانی عملیات شاس سال ۱۳۵۹ را نشان می‌دهد. با توجه به دقت مناسب نتایج شبیه‌سازیهای مدل عددی، از این پس می‌توان از آن برای شبیه‌سازی عملیات شاس تحت فشار در سالهای بعد به‌خوبی استفاده کرد.

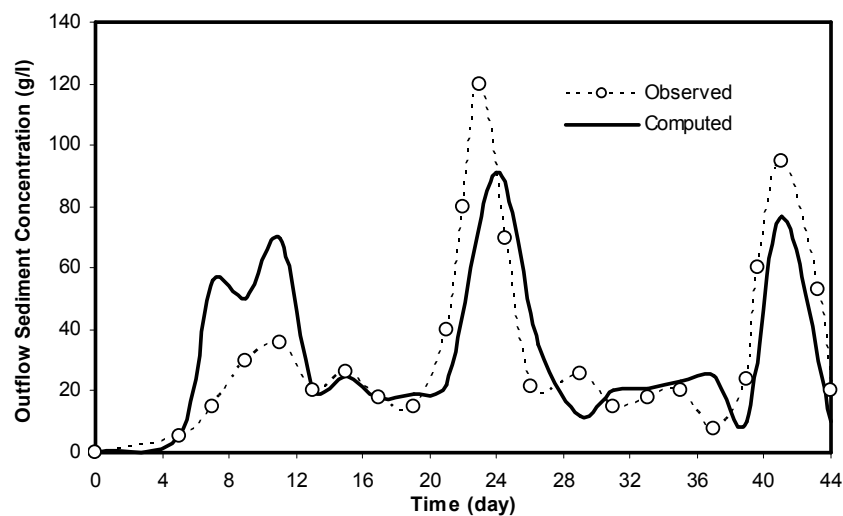
۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از یک مدل عددی برای شبیه‌سازی رسوب‌زدایی مخزن سد سفید رود با روش شاس تحت فشار استفاده شد. به‌منظور کالیبره کردن مدل مذکور از داده‌های اندازه‌گیری شده عملیات شاس سال ۱۳۶۰- که بطور تحت فشار انجام شده- استفاده شده است. برای بررسی دقت نتایج مدل عددی پس از کالیبره کردن از آن برای شبیه‌سازی عملیات شاس تحت فشار سال ۱۳۵۹ استفاده شد و نتایج مناسبی توسط به‌دست آمد.

۱- نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهد که غلظت رسوبهای تخلیه شده از مخزن، زمانی به حداکثر می‌رسد که تراز آب مخزن در کمترین حد آن باشد (کمتر از ۲۱۰ متر برای موارد بررسی شده).

۲- برای تخلیه هر چه بیشتر رسوبها، در ابتدای عملیات باید تخلیه آب با شدت بیشتری انجام شود (حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر مکعب در ثانیه) و برای صرفه‌جویی در مصرف آب مخزن، تخلیه‌کننده‌ها به‌طور متناوب باز و بسته کرد کرد (Tolouei, 1993), شرکت مه‌اب قدس, ۱۳۷۶ (Tolouei, et al., 1993),

۳- جریان آب رودخانه تأثیر بسیار ناچیزی بر راندمان عملیات شاس تحت فشار دارد (مه‌اب قدس, ۱۳۷۶ (Emamgholizadeh et al., 2006),



شکل ۳ نتایج مدل عددی و اندازه‌گیری‌های میدانی برای عملیات شاس سال ۱۳۵۹ مخزن سد سفید رود

Cheng-Lung Chen, 1971, "Sediment dispersion in flow with moving boundaries", Journal of Hydraulic Division, Vol. 97, No. 8, pp. 1181-1201.

Emamgholizadeh S., Bina M., Fathi-Moghadam M., and Ghomeyshi M., 2006, "Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 1, No. 4, pp. 7-16.

Fan J. and Jiang R. 1980, "On methods for the desiltation of reservoirs", International Seminar of. Experts on Reservoir Desiltation, Tunis.

Fan, J. and Morris, G. L., 1992, "Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 6, pp. 354-383.

Kerssens P M J, Prins A D, van Rijn L C. 1979, "Model for suspended sediment transport", Journal of the Hydraulics Division, 105(HY5), pp. 461-476.

Khosronejad, A., Rennie, C. D., A. Salehi Neyshabouri, 2008, "3D numerical simulation of reservoir flushing", IAHR, Journal of Hydraulic Research, Vol. 46, No.2, pp. 209-223.

Morris G. L. and Fan J., 1997, "Reservoir sedimentation handbook: Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use", McGraw-Hill, New York.

Tolouei E., 1989, "Reservoir sedimentation and desiltation", M.Sc. Thesis, University of Birmingham, U.K.

Tolouei E., 1993, "Reservoir sedimentation and desiltation", Ph.D. Thesis, University of Birmingham, U.K.

Tolouei E., West J. R. and Billam J., 1993, "Sedimentation and desiltation in the Sefid-Rud reservoir, Iran", Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs, J. McManus and R. W. Duck, John Wiley and Sons, pp. 125-138.

Walter H. Graf, 1971, "Hydraulics of Sediment Transport", McGraw-Hill, New York.

Yalin, M.S., 1977, "Mechanics of Sediment Transport", Second edition, Pergamon Press, Oxford.

۷- فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع جریان
B	عرض جریان در سطح آزاد
C	غلظت رسوب
c_v	ضریب ثابت
C_C	ضریب سرعت تخلیه کننده
C_T	ظرفیت حمل جریان
D	قطر تخلیه کننده عمقی
g	شتاب ثقل
H	ارتفاع ستون سیال از محور مرکزی تخلیه کننده
h	عمق جریان
J	شیب خط انرژی
n	ضریب زبری مانینگ
Q	دبی جریان
R	شعاع هیدرلیکی
S_c	ترم چشمه در معادله پخش و انتقال غلظت رسوب
t	زمان
U_{Max}	حداکثر سرعت در مقطع قائم جت
V	سرعت متوسط جریان
x_D	فاصله از بدنه سد
x_D	فاصله طولی از بدنه سد
x	مختصات طولی
\hat{x}, \hat{y}	مختصات محلی در معادله جت
Z	تراز سطح آب
Ψ_1, Ψ_2	ضرایب مربوط به ترم‌های چشمه و چاه در معادله پخش و انتقال غلظت رسوب
U_t	ضریب پخش جریان
γ	وزن مخصوص سیال

۸- منابع

- بررسی عملیات شاس در مخزن سد سفید رود، ۱۳۷۶، سند شماره ۲۵۵۳-۱۳۲-۱۱۲، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.
- Chatterjee, S.S., and Ghosh, S.H. 1980, "Submerged horizontal jet over erodible bed", ASCE Journal of the Hydraulics Division, 106(11), pp. 1765-1782.