

## کاربرد مدل Mike3 در شبیه‌سازی جریان گل آلود در مخازن سدها (مطالعه موردی: مخزن سد سفیدرود)

نفسیه ترکمانزاد<sup>1</sup>، بایرامعلی محمدنژاد<sup>2</sup> و جواد بهمنش<sup>3\*</sup>

تاریخ دریافت: 1394/7/1 تاریخ پذیرش: 1394/11/7

### چکیده

یکی از عوامل رسوب‌گذاری مخازن سدها جریان‌های گل آلود است که با افزایش غلظت رسوبات معلق در رودخانه‌های ورودی، وارد مخازن سدها شده و ظرفیت آب مخازن و عمر مفید سدها را کاهش می‌دهند. گشودن دریچه‌های تحتانی سد روش متداول تخلیه این جریان‌ها می‌باشد. در انجام این عملیات اطلاع از نحوه حرکت و زمان رسیدن این جریان‌ها به بدنه سد در مدیریت بهینه زمان باز و بسته شدن دریچه‌ها نقش مهمی دارد. در این تحقیق، پیشروی جریان گل آلود در مخزن سد سفیدرود با مدل Mike3 در حالت مش‌بندی نامنظم شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که با شروع سیلاب، اولین زبانه‌های جریان گل آلود از طریق شاخه شاهرود سریع‌تر به سد رسیده و زمان باز شدن دریچه‌ها را تعیین می‌کند و معیار واسنجی مدل در نظر گرفته شد. بررسی پروفیل غلظت رسوبات معلق در مقاطع عرضی نشان داد که حداکثر غلظت در عمق اتفاق می‌افتد و با پیشروی به سمت سطح آب کاهش می‌یابد و غلظت رسوبات در جریان گل آلود ورودی از طریق رودخانه‌های قزل اوزن و شاهرود به ترتیب  $10/11 \text{ kg/m}^3$  و  $12/52 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد و با رسیدن به سد تا  $3/93 \text{ kg/m}^3$  کاهش می‌یابد. نتایج پروفیل غلظت رسوبات معلق حاصل از مدل عددی با داده‌های میدانی در سه مقطع عرضی مقایسه شد و اعتبارسنجی مدل انجام گرفت. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر کم‌تر شاخص‌های خطا، نشان از توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان گل آلود در مخزن سد سفیدرود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان‌های گل آلود، رسوبگذاری مخازن، سد سفیدرود، شبیه‌سازی عددی.

### مقدمه

ذرات درشت دانه تر رسوب کرده و یک دلتا را در ناحیه‌ی فراز آب مخزن به‌وجود می‌آورند. ذرات ریزدانه‌تر که معلق مانده‌اند از روی دلتا عبور می‌کنند و در صورتی که اختلاف چگالی بین آب مخزن و آب ورودی به اندازه کافی زیاد باشد، باعث غوطه‌ور شدن می‌شود. جریان با غلظت رسوبات معلق بالا به صورت جریان چگال زیرسطحی حرکت خود را در عمق مخزن و در طول خط القعر به شکل ثقلی ادامه می‌دهد. در شرایط مساعد و در صورت استمرار جریان ورودی با تفاوت چگالی ایجاد شده توسط رسوبات معلق ریزدانه و هم‌چنین شیب کف زیاد مخزن، جریان‌های گل آلود قادر به انتقال مقادیر زیادی از رسوبات در مسافت‌های طولانی هستند و می‌توانند گل ولای را چندین کیلومتر در طول خط القعر حمل کرده و به سمت عمیق‌ترین منطقه در نزدیکی سد حرکت کنند که مقداری از آن می‌تواند توسط دریچه‌های تخلیه تحتانی سد از مخزن خارج شده و بقیه درست قبل از ساختمان سد، دریاچه‌ای از آب گل‌آلود حاوی ذرات بسیار ریز تشکیل داده که ذرات آن به تدریج در طول زمان در کف مخزن ته‌نشین می‌شوند (De Cesare et al., 2009). شکل 1 پیشروی جریان گل آلود در مخزن سد را نشان می‌دهد.

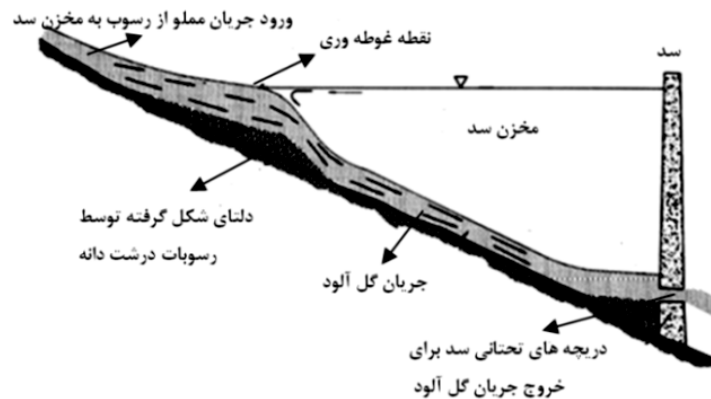
رسوب‌گذاری در مخازن سدها و در پی آن کاهش عمر مفید آن‌ها یکی از مهم‌ترین نگرانی‌هایی است که توجه دانشمندان را جلب کرده است. انباشت رسوبات، با کاهش حجم ذخیره مخزن در بلند مدت از راندمان عملکرد مخزن کاسته و بازده اقتصادی آن به شدت پایین می‌آید و سرانجام ظرفیت برای تنظیم جریان، تولید انرژی و کنترل سیلاب کاهش می‌یابد (Fan and Morris., 1992). در بیش تر مخازن، انتقال و ته‌نشینی رسوبات ریزدانه با جریان‌های گل آلود در ارتباط هستند. این جریان‌ها هنگامی بوجود می‌آیند که در زمان وقوع سیلاب، جریان مملو از رسوب وارد آب مخزن پشت سد می‌شود و در زیر آب ساکن و زلال مخزن غوطه‌ور می‌گردد. در این حالت ابتدا

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

\* - نویسنده مسئول: (Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)



شکل 1- شکل شماتیک پیشروی جریان گل آلود در داخل مخزن سد (De Cesare et al., 2009)

تحقیقات خود یک مدل عددی برای جریان دو فاز جهت شبیه‌سازی جریان‌های گل آلود ارائه داده و از مشاهدات میدانی مخزن سد لوزان در آلپ سویس برای کنترل دقت آن استفاده کردند. مشاهدات میدانی نشان داده است که جریان غلیظ وارد شده از نقطه پلانچ به مخزن با سرعت بالغ بر 0/8 متر بر ثانیه خود را به دیواره سد می‌رساند. این مدل عددی توانایی پیش‌بینی دقیق رفتارهای جریان گل آلود را دارا می‌باشد و خصوصیات جریان گل آلود شبیه‌سازی شده توسط مدل مطابقت خوبی با وضعیت‌های مشاهده شده دارد (De Cesare et al., 2001). مدل عددی سه بعدی توسط لاولی و همکاران با استفاده از کد CFX-4 به منظور شبیه‌سازی جریان‌های گل آلود در دریاچه لوگانو (Lugano) توسعه یافت (Lavelli et al., 2002).

همیسوند و همکاران یک مدل سه بعدی دینامیکی جریان برای انتقال رسوب، فرسایش و ته‌نشینی توسط جریان‌های گل آلود با استفاده از نرم افزار Flow3D ایجاد کردند (Heimsund et al., 2002). هوانگ و همکاران یک مدل عددی جریان‌های گل آلود را که ساختار قائم سرعت جریان و غلظت را با تغییر در سطح بستر به دلیل فرسایش و ته‌نشینی رسوب معلق پیش‌بینی می‌کند، توسعه دادند (Huang et al., 2005). اوهی و اشلایس به بررسی کنترل جریان گل آلود توسط موانع نفوذپذیر و نفوذناپذیر در مخازن سدها به وسیله شبیه‌سازی عددی و مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که طراحی مناسب موانع می‌تواند جریان گل آلود را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار دهد (Ohey and Schleiss., 2007). سکوییرس و همکاران به بررسی مدیریت رسوب و تعیین امکان‌سنجی فرسایش-پذیری رسوبات ریزدانه بستر به وسیله جت و انتقال آن توسط جریان گل آلود در مخزن سدی در شیکاگو پرداختند و یک مدل عددی واسنجی شده برای مطالعه ظرفیت انتقال جریان در شرایط صحرائی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد مقادیر زیادی از رسوب در نزدیکی ناحیه تخلیه جت می‌تواند فرسایش یافته و قسمتی از رسوب فرسایش

ته‌نشین شدن رسوبات ریزدانه توسط جریان‌های گل آلود علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیره آب مخزن، عملکرد دریچه‌های تحتانی و دهانه‌های آبگیر برای تولید برق را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به انسداد آن‌ها می‌گردد و بر اکولوژی مخزن تأثیر می‌گذارد. هم‌چنین جریان‌های گل آلود به واسطه دریچه‌های تخلیه تحتانی سد، فرآیند کنترل‌کننده در رسوب‌گذاری مخزن بوده به طوری که در مواقع سیلابی با مانور مناسب دریچه‌های تخلیه تحتانی سد، می‌توان نوعی تخلیه هیدرولیکی رسوب از مخازن را انجام داد (Jacobsen., 1999). برای خروج جریان گل آلود از طریق دریچه‌های تحتانی باید نحوه حرکت، گسترش طولی، عرضی و عمقی و زمان رسیدن این جریان‌ها به بدنه سد تعیین گردد تا در مدیریت مخزن و زمان باز و بسته شدن دریچه‌های تحتانی مؤثر واقع شده و رسوب‌گذاری اتفاق نیفتد. با توجه به اهمیت جریان‌های گل آلود در رسوب‌گذاری و تخلیه مواد رسوبی از مخازن سد، مطالعات گسترده‌ای در زمینه جریان‌های گل آلود صورت گرفته است. قدیمی‌ترین مشاهدات روی جریان‌های گل آلود دریاچه‌ای توسط فورل در دریاچه جنوا در سوئیس انجام شد. مطالعات وی نشان داد که رودخانه رون مملو از رسوب به داخل دریاچه جریان می‌یابد و یک جریان گل آلود ایجاد می‌کند (Forel., 1892). بل مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را در زمینه بررسی جریان‌های گل آلود در فلوم‌های متعددی انجام داد و به اهمیت این جریان‌ها در مسئله رسوب-گذاری مخازن پی برد (Bell., 1942). فارل و استفان یک مدل ریاضی دو بعدی را برای جریان ورودی به مخزن در یک هندسه ساده پیشنهاد کردند (Farrell and Stefan., 1988). چوی یک مدل متوسط لایه‌ای دو بعدی برای جریان‌های گل آلود با حل عددی اجزای محدود توسعه داد (Choi., 1999). از جمله تحقیقات انجام شده دیگر می‌توان به مطالعات (Middleton., 1966)، (Graf., 1971)، (Ford and Johnson., 1981)، (Altınakar et al., 1993) و (Lee and Yu., 1997) اشاره داشت. دی سزار و همکاران در

یافته می‌تواند توسط جریان غلیظ به پایین دست انتقال یابد و ظرفیت انتقال جریان کاملاً وابسته به شرایط اولیه جت تخلیه شده دارد (Sequeiros et al., 2009). وانگ و هو به بررسی راهکارهایی برای مدیریت رسوب مخازن در کشور چین پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فلاشینگ آزاد باعث تنش‌های اکولوژیکی بالایی به اکوسیستم پایین دست مخزن سد می‌شود. آن‌ها ذخیره آب صاف و رهاسازی جریان گل آلود را به عنوان بهترین راهکار برای کنترل رسوب در مخازن پیشنهاد کردند. این روش دارای مزیت استفاده از انرژی برقی بوده و ثبات اکولوژیکی را مورد توجه قرار می‌دهد (Wang and Hu., 2009).

حیدرنژاد و همکاران از فضای در دسترس و عملیات ساختمانی کم برای توسعه یک استراتژی برای دبی جریان گل‌آلود و آنالیز هیدرولیکی مخزن سد در استفاده کردند که حداقل ریسک را به دنبال دارد و نیازمند کم‌ترین میزان مطالعه و هزینه‌های ساخت و زمان اجرا می‌باشد. در این راستا ایشان از نرم افزار هیدرولیکی Flow3D برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی دبی جریان گل‌آلود در مخزن استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش تراز مخزن از 300 به 320، دبی جریان گل‌آلود عبوری از دریچه‌ی خروجی به  $32/4$  درصد افزایش یافته و فشار اعمال شده بر قسمت فوقانی مجرای ورودی از  $407/9 \text{ kpa}$  به  $651/5 \text{ kpa}$  افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش تراز مخزن از 300 به 352، دبی جریان گل‌آلود عبوری از دریچه‌های خروجی به  $78/2$  درصد افزایش یافته و فشار اعمال شده بر قسمت فوقانی مجرای ورودی از  $407/9 \text{ kpa}$  به  $915/4 \text{ kpa}$  افزایش می‌یابد (Heidarnejad et al., 2011). شفییعی و خانجانی با استفاده از مدل هیدرولیکی رودخانه و دریاچه پشت سد، خروج جریان‌های غلیظ را با باز نمودن دریچه‌های تخلیه رسوب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با طراحی و اجرای مناسب خروجی‌های تخلیه رسوب و استفاده به موقع از آن‌ها برای تخلیه رسوبات ریزدانه در هنگام بروز جریان‌های غلیظ، می‌توان در بعضی حالات نیمی از بار رسوب ورودی به مخزن را از طریق خروجی‌ها تخلیه کرد بدون آنکه سطح آب دریاچه مخزن تغییر کند (شفییعی و خانجانی، 1376). صمدی بروجنی و محمد ولی سامانی تأثیر رسوب‌شویی سد در کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول را با مدل Mike11 مورد ارزیابی قرار داده‌اند که نتایج آن‌ها نشان داد که نحوه بهره‌برداری از سد تنظیمی اثرات قابل توجهی در میزان ته‌اندازی رسوبات دارد (صمدی بروجنی و محمد ولی سامانی، 1381). محمدنژاد و شمسانی یک مدل عددی دو بعدی حجم محدود برای جریان‌های گل‌آلود غیردائمی در مخازن سدها توسعه داده و نقش این جریان‌ها در رسوب‌گذاری دریاچه پشت سدها را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که عمق جریان گل‌آلود پس از ورود به مخزن افزایش یافته و سرعت آن کم می‌گردد و کاهش سرعت باعث ته‌نشینی رسوبات در طول مسیر جریان گل‌آلود در داخل مخزن می‌شود (محمد نژاد و شمسانی، 1382). هم‌چنین محمدنژاد و

شمسانی حرکت جریان‌های زیرسطحی در مخازن سدها را با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی کرده و یک مدل عددی دو بعدی قائم با روش حل احجام محدود را برای بررسی ساختارهای قائم آن توسعه داده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بیش‌تر بودن چگالی جریان گل‌آلود نسبت به آب صاف‌تر مخزن، باعث می‌شود که آشفتگی جریان در راستای قائم، در مرز مشترک بین جریان گل‌آلود و آب صاف مخزن کاهش یابد که علت این امر به دلیل اثر نیروی شناوری بر میزان آشفتگی جریان می‌باشد (محمدنژاد و شمسانی، 1387). رضانی و قمشی میزان تأثیر جریان‌های غلیظ بر روند رسوب‌گذاری مخزن سد سفیدرود را با استفاده از مدل رایانه‌ای TCM و در یک دوره 30 ساله مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. در این تحقیق مقایسه بین حالتی که جریان‌های غلیظ، خود را به بدنه سد رسانده و از سد خارج شوند و حالتی که تأثیر این جریان‌ها نادیده گرفته شود و تقریباً کلیه رسوبات ورودی به مخزن درون آن ته‌نشین شوند، انجام شد. نتایج نشان داد که در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، بازده تله اندازی شاخه قزل اوزن حدود 30 درصد و شاخه شاهرود حدود 20 درصد نسبت به حالت دیگر کاهش می‌یابد. مقایسه بین این دو حالت نشان می‌دهد در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، متوسط کاهش حجم سالیانه مخزن در شاخه قزل اوزن از  $1/07$  به  $0/73$  درصد و در شاخه شاهرود از  $0/55$  به  $0/43$  درصد کاهش می‌یابد (رضانی و قمشی، 1390). مطالعات فرسایش و رسوب انجام شده در مورد حوضه آبریز سد سفیدرود بیانگر ظرفیت بالای رسوبزایی این حوضه می‌باشد که در هنگام بارندگی شدید، رسوبات زیادی همراه با سیلاب از سر شاخه‌های اصلی قزل اوزن و شاهرود وارد مخزن سد سفیدرود می‌شوند. در این راستا استفاده از روش تخلیه جریان‌های گل‌آلود برای رسوب‌زدایی رسوبات معلق ورودی بهترین راه حل اثر بخش برای رفع رسوب‌گذاری در این سد خواهد بود. هدف از این تحقیق، بررسی قابلیت مدل عددی Mike3 در شبیه‌سازی چگونگی حرکت جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود و تحلیل غلظت رسوبات در مقاطع عرضی انتخابی و مقایسه با داده‌های میدانی می‌باشد

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌های میدانی

سد مخزنی سفیدرود که عظیم‌ترین سازه آبی استان گیلان و یکی از مشکل‌سازترین سدهای کشور در زمینه رسوب‌گذاری می‌باشد، با مختصات جغرافیایی  $23^{\circ}$  شرقی و  $46^{\circ}$  شمالی در 200 کیلومتری شمال غربی تهران و 100 کیلومتری دریای خزر کمی پائین‌تر از شهر منجیل، بر روی رودخانه سفیدرود و در پایین دست محل تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود قرار گرفته است (شکل 2). سد سفیدرود از نوع سدهای بتنی پایه‌دار با گنجایش  $1/8$  میلیارد متر مکعب است که ماکزیمم دبی کل ورودی به آن در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد. سد دارای 5 دریچه تحتانی، دو

براساس  $UTM^2$  منطقه نشان می‌دهند (گروه مطالعات موسسه تحقیقات آب، 1386).

### معرفی مدل ریاضی Mike3

نرم افزار Mike3 مجموعه مدل ریاضی سه‌بعدی است که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک تهیه شده است. نرم افزار فوق یک سیستم مدل‌سازی هیدرودینامیکی سه‌بعدی برای مخازن سدها، دریاچه‌ها، خلیج‌ها، مناطق ساحلی و دریاها بوده و برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد، پارامترهای کیفی آب، جابه‌جایی رسوب و روند رسوب‌گذاری و فرسایش برای رسوبات چسبنده و غیرچسبنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل براساس مش‌بندی منظم و نامنظم تهیه شده که سیستم حل معادلات در این دو حالت به ترتیب از روش تفاضلات محدود و احجام محدود استفاده می‌کند. در مدل Mike3 امکان ایجاد شبکه‌ی ساختار یافته برای جداسازی در جهت قائم وجود دارد و یک مش لایه‌دار به ناحیه حل اضافه می‌شود که در این صورت المان‌ها 6 وجهی خواهند بود. مدل عددی Mike3 با استفاده از مدول هیدرودینامیک<sup>3</sup> و مدول پخش<sup>4</sup> در حالت مش‌بندی نامنظم، جریان غلیظ را شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق از مدل Mike3 و مدول‌های هیدرودینامیک و پخش در حالت مش‌بندی نامنظم برای شبیه‌سازی جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود استفاده گردید (Mike3 Manual., 2011).

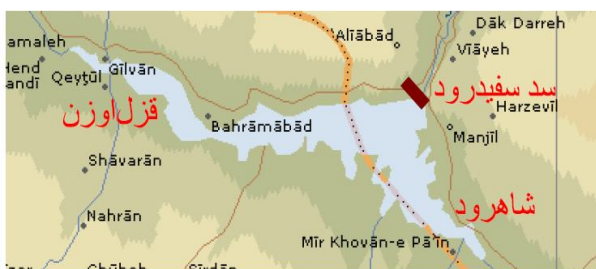
جدول 1- مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب در زمان سیلاب

محل نمونه برداری آب	نام ایستگاه	طول (متر)	عرض (متر)
پشت سد سفیدرود	PS1	355930	4069070
رودخانه قزل اوزن	PS2	352378	4067488
"	PS3	348260	4068000
"	PS4	346090	4066769
"	PS5	344480	4068030
"	PS6	341497	4067331
رودخانه شاهرود	PS7	355233	4067229
"	PS8	355236	4066010
"	PS9	355559	4063995
"	PS10	356363	4062400
"	PS11	358861	4060656

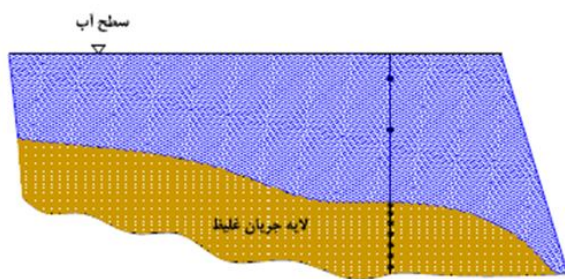
دریچه میانی و دو سرریز سطحی به ترتیب با ظرفیت تخلیه 890، 2000 و 3000 متر مکعب در ثانیه می‌باشد. یکی از فعالیت‌هایی که در ردیابی جریان گل‌آلود به انجام می‌رسد نمونه‌برداری آب جهت تعیین بار معلق رسوب در زمان سیلاب می‌باشد. روند انجام عملیات نمونه‌برداری بدین صورت می‌باشد که پس از اعلام هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری گیولان (در شاخه قزل اوزن و 25 کیلومتری از سد) و لوشان (در شاخه شاهرود و 13 کیلومتری از سد) مبنی بر وقوع سیلاب تیم نمونه‌بردار با استفاده از دستگاه GPS به محل ایستگاه‌ها رفته و پس از تعیین عمق ایستگاه، توسط نمونه‌بردار استوانه‌ای (شکل 3) از 2 متری بالای بستر اولین نمونه آب و رسوبات معلق گرفته می‌شود و در صورت مشاهده غلظت بالا در نمونه آب و رسوب گرفته شده، نمونه‌برداری آب در فواصل 2 متری به سمت سطح آب ادامه پیدا می‌کند تا جایی که غلظت آب به طور محسوسی کاهش پیدا کند. سپس از آخرین مقطع نمونه برداری 1 متر پایین تر آمده و آخرین نمونه آب و رسوب که به طور تقریبی بیانگر مرز دو لایه جریان گل‌آلود و لایه شفاف آب می‌باشد گرفته می‌شود. در نهایت نمونه‌های گرفته شده جهت تعیین کل رسوبات معلق<sup>1</sup> به آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب ارسال و آزمایشات مربوطه انجام می‌شود. شکل 4 تصویر شماتیکی از نحوه نمونه‌برداری آب جهت اندازه‌گیری جریان گل‌آلود و مشخص نمودن ضخامت لایه غلیظ را نشان می‌دهد. در طی سه جریان غلیظ حادث شده در زمان وقوع سیلاب در سد سفیدرود، اندازه‌گیری‌های میدانی در 3 مرحله اردیبهشت و خرداد 1385 (مرحله اول)، آبان و آذر 1385 (مرحله دوم) و فروردین و اردیبهشت 1386 (مرحله سوم) انجام شده است. با توجه به اینکه داده‌های کاملی از دو مرحله اول در اختیار نبود، از داده‌های مرحله سوم استفاده گردید. در سد سفیدرود در جریان سیلابی که از روز 86/1/23 شروع شده بود، مدت زمان رسیدن جریان گل‌آلود به بدنه سد به صورت میدانی به مقدار 22 ساعت اندازه‌گیری شد و با مدت زمان به‌دست آمده از مدل عددی مقایسه شد و معیار واسنجی مدل قرار گرفت. هم‌چنین نمونه‌برداری آب جهت تعیین TSS، در جریان غلیظ حادث شده در زمان وقوع سیلاب در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر انجام شد و نتایج به‌دست آمده از مدل عددی در زمان فوق با داده‌های میدانی مذکور مورد مقایسه قرار گرفت و اعتبار سنجی مدل انجام گردید. در مرحله فوق به طور روزانه از دو ایستگاه انتهایی در دو شاخه قزل اوزن و شاهرود، از نزدیک بستر نمونه‌برداری آب انجام می‌شد و چنانچه غلظت از حدی بالاتر بود بنا بر وقوع جریان گل‌آلود گذاشته شده و نمونه‌برداری از کلیه ایستگاه‌ها انجام می‌گرفته است. شکل 5 و جدول 1 موقعیت و مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری را

2- Universal Transverse Mercator  
3- Hydrodynamic Module  
4- Advection-Diffusion Module

1- Total Suspended Sediments

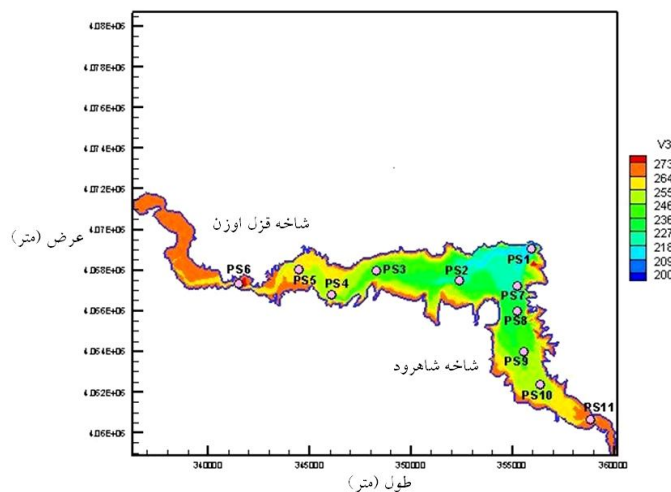


شکل 2- موقعیت جغرافیایی سد سفیدرود و رودخانه های ورودی به سد



شکل 4- شماتیکی از نحوه نمونه برداری آب در عمق

شکل 3- نمونه بردار استوانه‌ای



شکل 5- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب در زمان سیلاب

فرضیه بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. معادلات به کار رفته در مدل عبارتند از:

معادلات حاکم بر جریان در مدل هیدرودینامیک  
 مدل هیدرودینامیک براساس حل عددی معادلات ناویر- استوکس  
 متوسط‌گیری شده رینولزی تراکم‌ناپذیر سه‌بعدی با استناد به دو  
 1- معادله پیوستگی جریان،

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = s \quad (1)$$

2- معادلات مومنتم در راستای افقی برای مؤلفه های x و y،

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + \frac{\partial vw}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (3)$$

3- معادله انتقال

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] c + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) - k_p c + c_s s \quad (4)$$

و پایداری مدل، مش‌بندی بهینه انتخاب گردید. برای پایداری مدل باید عدد کورانت کم‌تر از یک باشد و در تأمین پایداری مدل، گام زمانی انتخاب شده نقش اصلی را ایفا می‌کند. تعداد کل مش‌ها قبل از واسنجی مدل 7763 و بعد از واسنجی 18175 به‌دست آمد. عمق-سنجی مخزن نشان می‌دهد که قسمت‌های بالا دست مخزن از عمق کم‌تری برخوردار است و هر چه از بالادست به سمت دیواره سد حرکت می‌کنیم، عمق مخزن بیش‌تر می‌گردد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود برای دقت بیش‌تر و نمایش بهتر جریان گل‌آلود، ضخامت لایه‌ها در کف کم‌تر در نظر گرفته شد. حداقل و حداکثر ضخامت لایه‌ها در جهت قائم نسبت به ابعاد کلی به ترتیب 0/036 و 0/181 تعیین شد.

### شرایط مرزی و اولیه

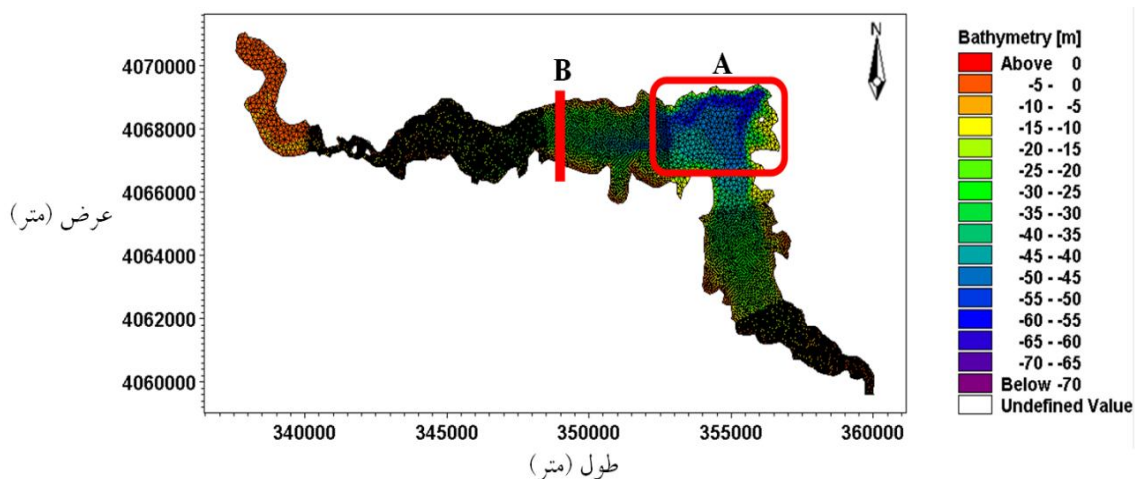
شرایط مرزی ورودی برای دبی‌های جریان به صورت هیدروگراف دبی‌های روزانه و غلظت رسوبات معلق جریان به صورت نمودارهای غلظت‌های روزانه در مرزهای ورودی جریان در شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود از روز 23 فروردین 1386 تا 24 اردیبهشت 1386 تعیین شد. علت انتخاب این توالی زمانی وجود دبی سیلابی به همراه ورود جریان گل‌آلود با غلظت بالا از شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود می‌باشد. در شروع اجرای برنامه رقوم سطح آب مخزن 261/65 بود که در قسمت شرایط مرزی در محل سد به مقدار 10- متر در مدل اعمال شد. مقدار منفی عمق به این دلیل است که در تهیه نقشه عمق-سنجی، تراز نرمال آب در مخزن سد سفیدرود (271/65) به عنوان مبنا در نظر گرفته شد و در ترازهای کم‌تر از تراز نرمال، مقادیر عمق جریان منفی در نظر گرفته می‌شوند.

در معادلات پیوستگی و مومنتم، z,y,x مختصات کارتزین در جهت های طولی، عرضی، قائم، w,v,u مؤلفه‌های سرعت در جهت-های z,y,x، η تراز سطح آب، d عمق آب ساکن، h عمق کل آب (h= n+d)، g شتاب گرانش، S دبی ناشی از چشمه و چاه، u\_s و v\_s سرعت‌هایی که آب به داخل آب ساکن جریان می‌یابد، f=2ΩsinØ؛ پارامتر کریولیس (Ω: سرعت زاویه ای چرخشی، Ø: عرض جغرافیایی)، ρ چگالی آب، ρ\_0 چگالی مرجع آب، p\_a فشار اتمسفر، v\_t و A به ترتیب لزجت گردابه‌ای قائم و افقی و t زمان می‌باشند. در معادله انتقال نیز، c غلظت کمیت عددی، k\_p میزان کاهش خطی کمیت عددی، c\_s غلظت کمیت عددی در چشمه، D\_v ضریب پخش در جهت قائم و D\_h ضریب افقی پخش است ( Mike3 Manual., 2011).

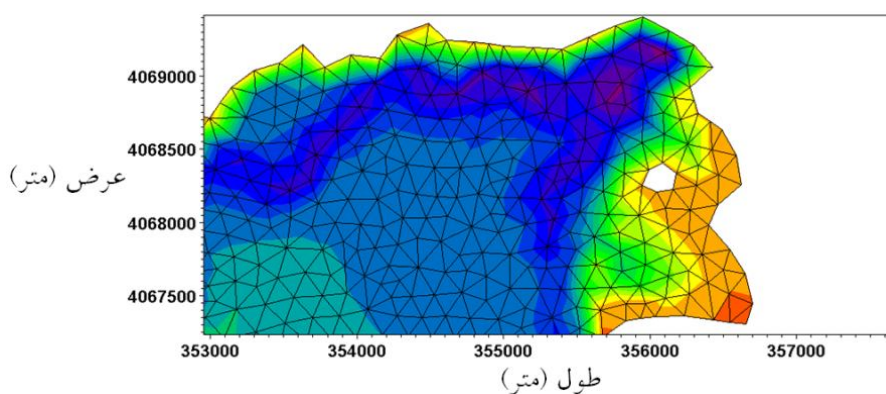
### اطلاعات ورودی به مدل

#### مش‌بندی و عمق‌سنجی<sup>1</sup> مخزن

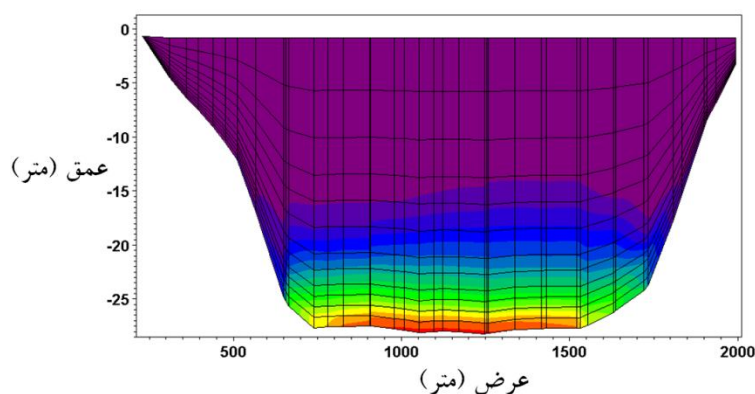
برای تعریف هندسه منطقه از نقشه توپوگرافی مخزن سد سفیدرود استفاده شد. جهت ساخت مش نامنظم مدل Mike3 از المان‌های مثلثی استفاده می‌کند که کل محیط محاسباتی را پوشش می‌دهند. بعد از معرفی UTM منطقه و وارد کردن اطلاعات توپوگرافی در فضای محاسباتی، مش‌بندی انجام شد و از طریق درون‌یابی عمق سنجی مخزن تولید شد. در ضمن 12 لایه عمقی به-کار گرفته شده در مدل براساس ضخامت لایه‌ها به طور غیر یکنواخت توزیع شده‌اند. در شکل 6 مش‌بندی افقی و نمونه‌ای از لایه‌بندی در جهت قائم نشان داده شده است. بر اساس محدودیت-های زمانی و مدت زمان به‌دست آمده برای رسیدن جریان گل‌آلود به بدنه سد در تاریخ مورد نظر از طریق اندازه‌گیری میدانی و تأمین دقت



شکل 6 (الف) - مش بندی افقی منطقه



شکل 6 (ب) - نمونه ای از مش بندی افقی منطقه در قسمت A



شکل 6 (ج) - نمونه ای از لایه بندی در جهت قائم در قسمت B

جریان ورودی و غلظت رسوبات معلق برای هر دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود در شکل 7 و 8 ارائه شده است. با توجه به رابطه دبی آب-دبی رسوب معلق در رودخانه قزل اوزن (ایستگاه گیلوان)  $Q_s = 2.7688Q_w^{1.9058}$  و رودخانه شاهرود (ایستگاه لوشان)

شرایط اولیه در مدل با توجه به اندازه‌گیری میدانی، به صورت آب کاملاً صاف و تمیز در مخزن در نظر گرفته شد و غلظت رسوبات معلق مخزن در قسمت شرایط اولیه به مقدار صفر اعمال شد که در زمان وقوع جریان سیلابی، با ورود رسوبات معلق از طریق رودخانه‌ها به مخزن، جریان غلیظ در مخزن اتفاق می‌افتد. هیدروگراف‌های

حاصل شد که تقریباً با مقدار اندازه‌گیری میدانی یکسان بود و معیار واسنجی مدل قرار گرفت.

هم‌چنین سه مقطع عرضی در رودخانه‌های ورودی به مخزن و در داخل دریاچه سد در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر برای بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی چگالی جریان و پروفیل‌های غلظت رسوبات معلق و اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. مقاطع 1 و 3 به ترتیب بر روی رودخانه قزل اوزن و شاهرود و مقطع 2 در پشت سد انتخاب گردید که در شکل 9 موقعیت این مقاطع نشان داده شده است. برای اعتبار سنجی مدل، مقادیر پروفیل غلظت رسوبات معلق حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی در مقاطع PS3، PS1 و PS10 با نتایج به-دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر مورد مقایسه قرار گرفت. علت انتخاب مقاطع فوق در اختیار داشتن داده‌های کاملی از اندازه‌گیری غلظت رسوبات می‌باشد.

برای بیان کمی همپوشانی داده‌های میدانی با نتایج عددی از شاخص‌های آماری همچون ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق (MAE) که به صورت رابطه 5 بیان می‌شوند، استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i)^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (7)$$

که در این روابط:  $Y_i$ : مقدار واقعی متغیر،  $\hat{Y}_i$ : مقدار شبیه‌سازی شده متغیر،  $n$ : تعداد متغیر مربوطه،  $\bar{Y}_i$ : مقدار میانگین مقادیر واقعی متغیر و  $\bar{\hat{Y}}_i$ : مقدار میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر می‌باشد.

## نتایج و بحث

### پیشروی جریان گل آلود به طرف مخزن سد

بعد از واقعه سیلابی که از روز 86/1/23، 9:20 صبح شروع شد، ورود جریان گل آلود از شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود و توزیع چگالی جریان در لایه بستر، 10 ساعت بعد از شروع شبیه‌سازی در شکل 10 مشاهده می‌شود.

$Q_s = 1.2445Q_w^{2.3070}$  دبی آب بر حسب  $m^3/s$  و  $Q_s$  دبی رسوب بر حسب (ton/day)، دبی رسوب به صورت نمایی و متناسب با دبی آب تغییر می‌کند که این موضوع در نمودارهای دبی جریان و غلظت رسوبات برای دو رودخانه مشهود است و مقادیر پیک در نمودار غلظت رسوبات، در نمودار دبی آب نیز برای هر دو رودخانه مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده تغییر غلظت رسوبات متناسب با دبی آب می‌باشد.

### سایر پارامترهای ورودی به مدل

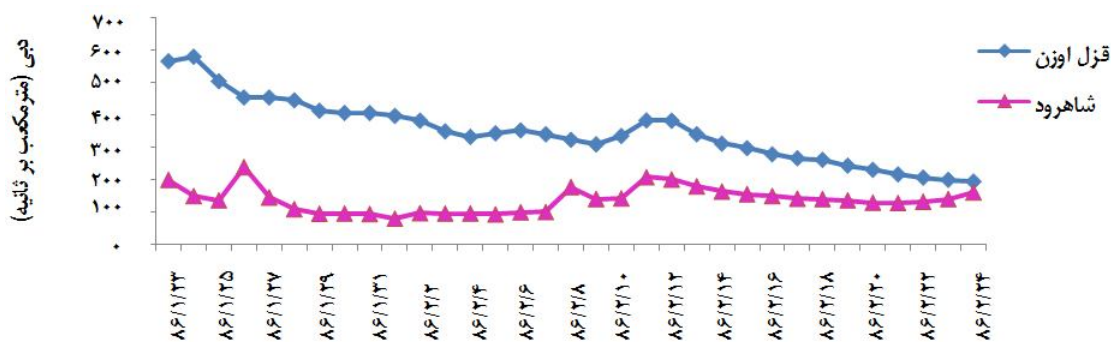
در مدل فوق آشفتگی با مفهوم لزجت گردابه‌ای<sup>1</sup> مدل‌سازی شد. فرمول مورد استفاده در این مطالعه برای لزجت گردابه‌ای در جهت قائم و جهت افقی به ترتیب قانون لگارتم<sup>2</sup> و اسماکورینسکی<sup>3</sup> می‌باشد. در ضمن برای پخش در جهت افقی مقدار فاکتور ثابت در نظر گرفته شد. ارتفاع زبری بستر براساس نمونه‌های مواد بستری 0/05 متر تعیین گردید. با توجه به اندازه‌گیری میدانی چگالی در مخزن، مقادیر چگالی آب و ذرات رسوبی به ترتیب  $999/7 \text{ kg/m}^3$  و  $1000 \text{ kg/m}^3$  تعیین شد. هم‌چنین اطلاعات مربوط به زمان و فواصل زمانی حل برای منقطع‌سازی معادلات با توجه به محدودیت‌هایی نظیر زمان حل مدل و مقدار عدد کورانت تعیین گردید. فواصل زمانی حل مدل برای پایداری 2 ثانیه در نظر گرفته شد که ماکزیمم عدد کورانت موجود در محیط حل مدل برای مدول هیدرودینامیک برابر 0/43 و برای مدول پخش برابر 0/27 به‌دست آمد که هر دو مقدار در محدوده پایداری مدل می‌باشند. هم‌چنین فرض تر و خشک شدن المان‌ها در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. به این ترتیب در طول شبیه‌سازی المان‌هایی که سطح آب در آن‌ها پایین آمده و خشک می‌شدند از محاسبه خارج شده تا حجم محاسبات بالا نرفته و زمان شبیه‌سازی طولانی نگردد.

### نحوه واسنجی و اعتبار سنجی مدل

از طریق اندازه‌گیری میدانی در سد سفیدرود، مدت زمان رسیدن جریان گل آلود به بدنه سد در جریان سیلابی که از روز 86/1/23 شروع شده بود، تعیین گردید. به این ترتیب در مدت 22 ساعت جریان گل آلود ورودی از رودخانه‌های قزل اوزن و شاهرود به بدنه سد رسید. با تغییر یکسری ضرایب در مدل عددی (از جمله فواصل زمانی حل، تعداد گام‌های زمانی و فرمول لزجت گردابی در جهات افقی و قائم) و انتخاب مش بهینه برای منطقه و پایداری مدل، مدت زمان رسیدن جریان گل آلود به بدنه سد در مدل عددی نیز 21 ساعت و 40 دقیقه

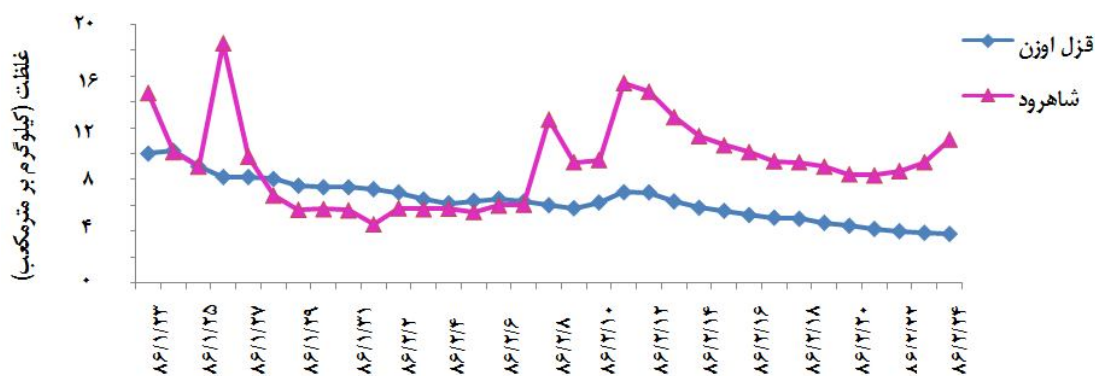
1- Eddy Viscosity  
2- Log Law Formula  
3- Smagorinsky Formula





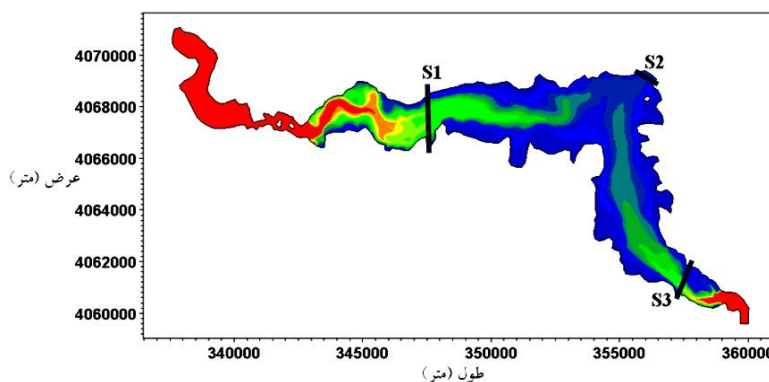
زمان (روز)

شکل 7- هیدروگراف های جریان ورودی به مخزن دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود



زمان (روز)

شکل 8- غلظت رسوبات معلق جریان ورودی به مخزن دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود



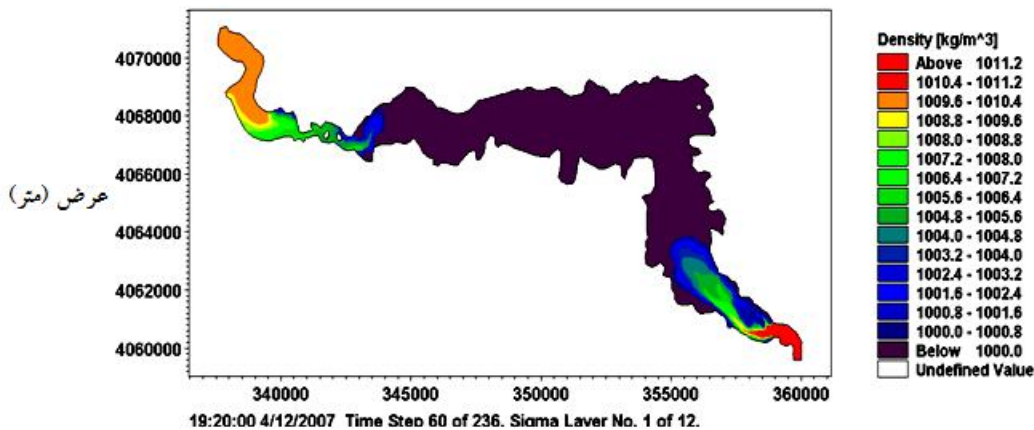
شکل 9- موقعیت مقاطع عرضی برای تحلیل پروفیل های غلظت رسوبات معلق در روز 86/1/24 ، 5 بعدازظهر

خروج جریان گل آلود را تعیین می‌کند و معیار واسنجی مدل قرار گرفت. با گذشت 6 ساعت و 10 دقیقه از رسیدن اولین زبانه‌های جریان گل آلود به سد، جریان ورودی از شاخه قزل اوزن نیز در روز 86/1/24 ، 1:10 ظهر به سد می‌رسد که در شکل 12 توزیع چگالی جریان در لایه بستر، در زمان رسیدن جریان گل آلود به بدنه سد از

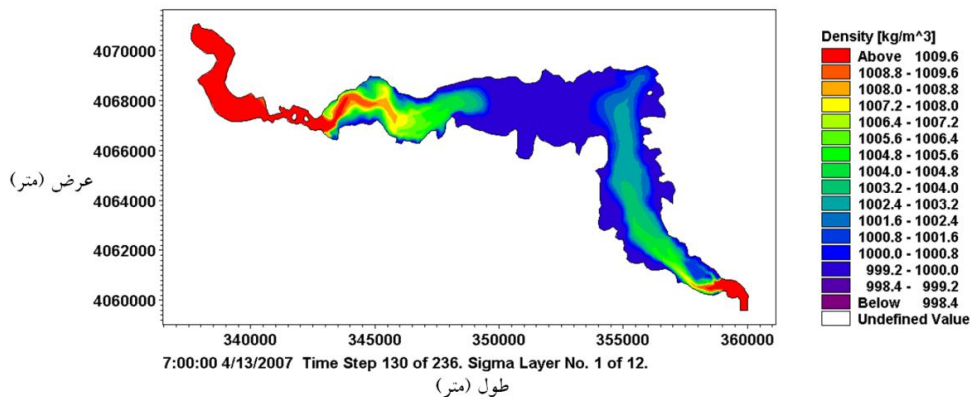
در شکل 11 اولین زبانه‌های جریان گل آلود در لایه کف بعد از گذشت 21 ساعت و 40 دقیقه، از شاخه شاهرود و در روز 86/1/24 ، 7 صبح به بدنه سد می‌رسند که این مسئله به دلیل کوتاه بودن طول مجرای جریان و شیب زیاد در این شاخه نسبت به شاخه قزل اوزن می‌باشد و به این ترتیب زمان باز شدن دریچه‌های تحتانی سد برای

دلیل آن افزایش حجم آب می‌باشد که باعث بالا رفتن میزان درون آمیختگی ذرات آب صاف به داخل جریان گل‌آلود می‌شود و در نهایت غلظت جریان گل‌آلود از خود کاهش نشان می‌دهد.

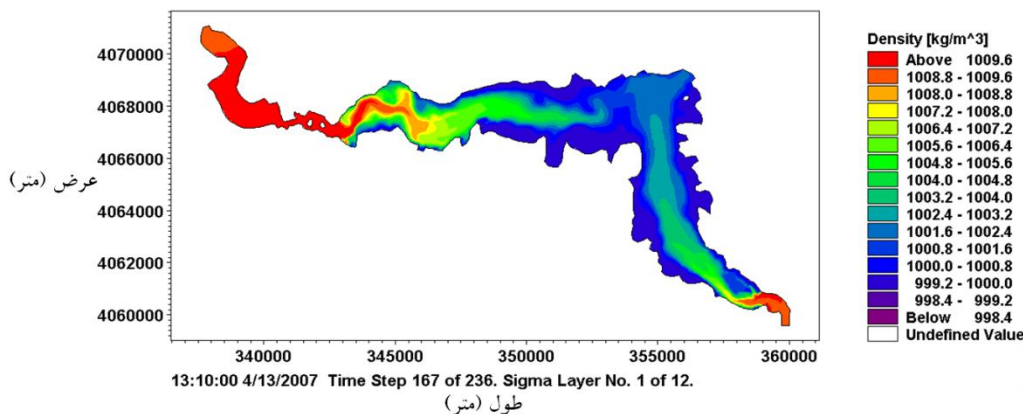
طریق شاخه قزل اوزن ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که چگالی جریان با پیشروی به سمت سد کاهش یافته و به چگالی سیال پیرامون (آب) نزدیک‌تر می‌شود و به تبع آن غلظت جریان گل‌آلود نیز کاهش می‌یابد. که این مسئله در جریان‌های گل‌آلود امری طبیعی و



شکل 10- توزیع چگالی جریان در لایه بستر 10 ساعت بعد از ورود جریان گل‌آلود



شکل 11- توزیع چگالی جریان در لایه بستر در زمان رسیدن جریان گل‌آلود به سد از شاخه شاهرود

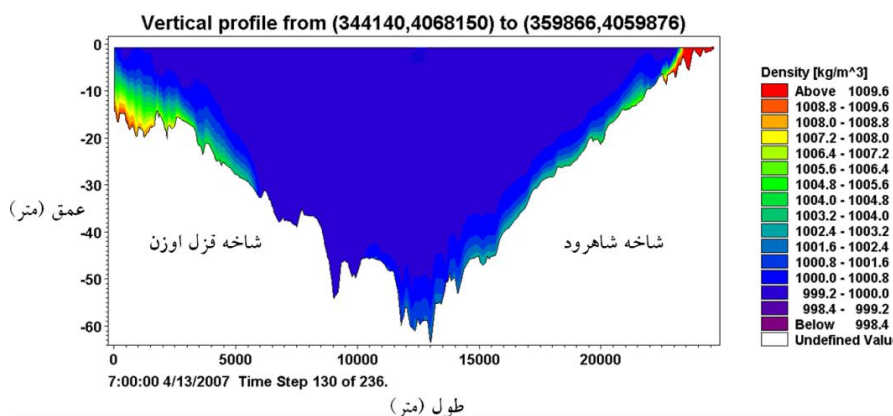


شکل 12- توزیع چگالی جریان در لایه بستر در زمان رسیدن جریان گل‌آلود به سد از شاخه قزل اوزن

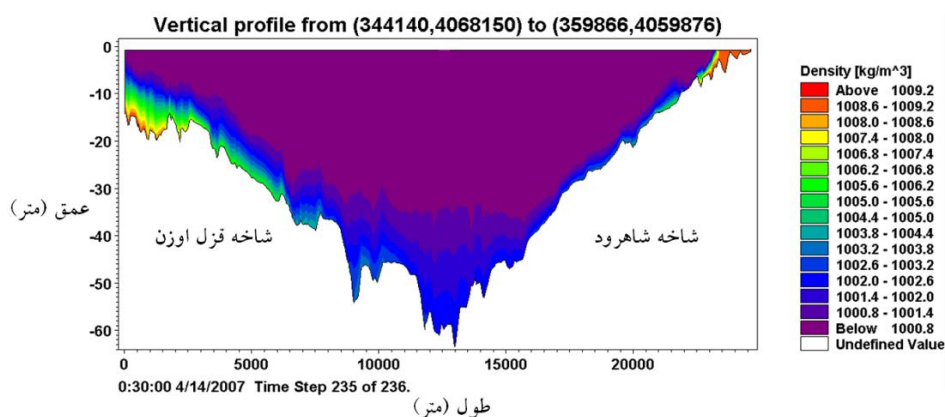
جریان های گل آلود را شبیه سازی کند. نتایج نشان می دهند که بعد از گذشت کمتر از یک روز از رسیدن جریان گل آلود به سد (17 ساعت و 30 دقیقه)، جریان فوق کل محدوده مخزن را در نزدیکی بدنه سد تحت تأثیر قرار داده است.

### پروفیل طولی جریان گل آلود

شکل 13 الگوی حرکت جریان گل آلود در مقطع طولی مخزن سد در زمان رسیدن جریان گل آلود به سد و 17 ساعت و 30 دقیقه بعد از آن را نشان می دهد که موقعیت بدنه و پیشانی جریان گل آلود به خوبی قابل رویت است و نشان می دهد که مدل می تواند فرم کلی



شکل 13 (الف) - الگوی حرکت جریان گل آلود در مقطع طولی مخزن در زمان رسیدن جریان گل آلود به سد



شکل 13 (ب) - الگوی حرکت جریان گل آلود در مقطع طولی مخزن 17 ساعت و 30 دقیقه بعد از رسیدن جریان گل آلود به سد

عمق 25 متری و به ترتیب به مقدار  $1006 \text{ kg/m}^3$  و  $10/11 \text{ kg/m}^3$  مشاهده می شود و هر چه به سمت سطح آب حرکت می کنیم، چگالی جریان به چگالی سیال پیرامون (آب) نزدیک تر شده و تا  $999/7027 \text{ kg/m}^3$  کاهش نشان می دهد و به تبع آن غلظت تا  $0/0043 \text{ kg/m}^3$  کاهش یافته و تقریباً به صفر نزدیک می شود. مقطع 2 در پشت سد واقع شده است که عمق جریان به بیش از 60 متر می رسد. ماکزیمم چگالی جریان و غلظت رسوبات در مرکز و در عمق 64 متری به ترتیب  $1002/15 \text{ kg/m}^3$  و  $3/93 \text{ kg/m}^3$  می باشد. در این مقطع کاهش چگالی جریان به اندازه ای است که 4 متر پایین تر از سطح جریان، به چگالی آب در دمای  $10^\circ \text{C}$  ( $999/7 \text{ kg/m}^3$ ) و غلظت

### بررسی پروفیل های غلظت رسوبات معلق در بدنه جریان گل -

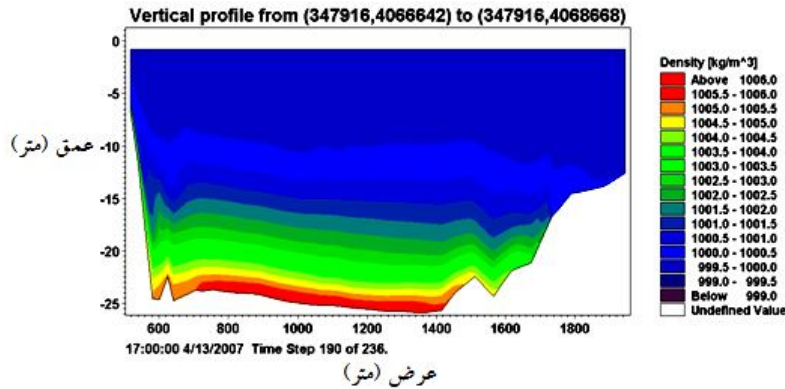
#### آلود و اعتبارسنجی مدل عددی

با توجه به انتخاب سه مقطع عرضی در رودخانه های ورودی به سد و در داخل دریاچه سد در روز 86/1/24، 5 بعد از ظهر، نتایج حاصل از شبیه سازی چگالی جریان و پروفیل های غلظت رسوبات معلق در این مقاطع مورد ارزیابی قرار گرفت.

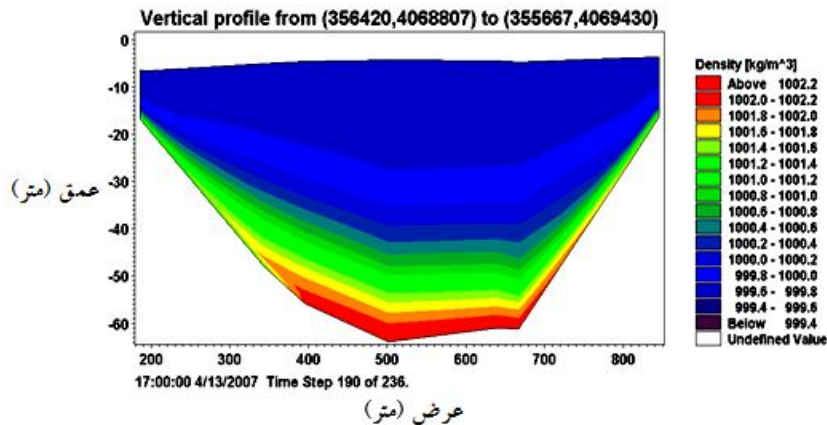
نتایج شبیه سازی برای چگونگی توزیع چگالی جریان در مقاطع 1، 2 و 3 در شکل های 14، 15 و 16 نشان داده است. مقطع 1 در رودخانه قزل اوزن می باشد و عمق جریان در این مقطع 25 متر می باشد. بیشترین مقدار چگالی و غلظت رسوبات تقریباً در مرکز در

به ترتیب تا مقادیر  $999/8 \text{ kg/m}^3$  و  $0/16 \text{ kg/m}^3$  کاهش می‌یابند. همان طوری که ملاحظه می‌شود در مقاطع عرضی انتخابی بیش-ترین غلظت رسوبات در عمق بوده و با پیشروی به سمت سطح آب کاهش می‌یابد. این مسئله به این دلیل است که جریان گل‌آلود در خط القعر حرکت می‌کند و بیش‌ترین غلظت در عمیق‌ترین نقطه مقطع عرضی مشاهده خواهد شد. دلیل کاهش غلظت رسوبات در مقاطع عرضی به سمت سد در اثر افزایش حجم آب و در نتیجه‌ی پدیده درون آمیختگی ذرات آب صاف با جریان گل‌آلود می‌باشد.

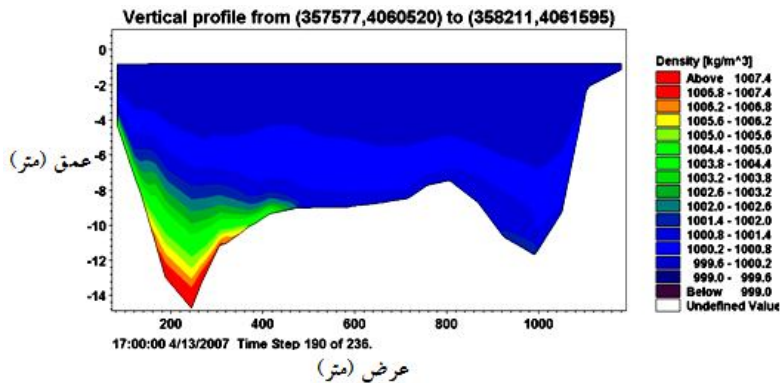
صفر می‌رسد. به این ترتیب امکان تعیین ضخامت جریان گل‌آلود در مقطع فوق وجود دارد که ارتفاع جریان گل‌آلود به مقدار 60 متر تعیین گردید. شکل 16 نیز نتایج شبیه‌سازی چگالی جریان در مقطع 3 بر روی رودخانه شاهرود را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در مقطع فوق نشان داد که ماکزیمم چگالی جریان و غلظت رسوبات در سمت چپ مقطع در عمق 14 متری و به ترتیب به مقدار  $1007/5 \text{ kg/m}^3$  و  $12/52 \text{ kg/m}^3$  اتفاق می‌افتد و همان طور که قابل انتظار است با حرکت به سمت سطح آب چگالی جریان و به تبع آن غلظت رسوبات



شکل 14 - چگونگی توزیع چگالی جریان در مقطع S1 در داخل مخزن سد در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر



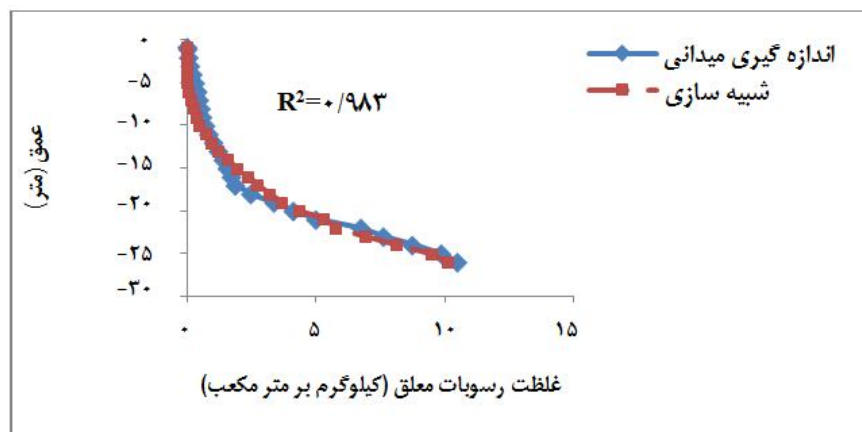
شکل 15 - چگونگی توزیع چگالی جریان در مقطع S2 در پشت سد در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر



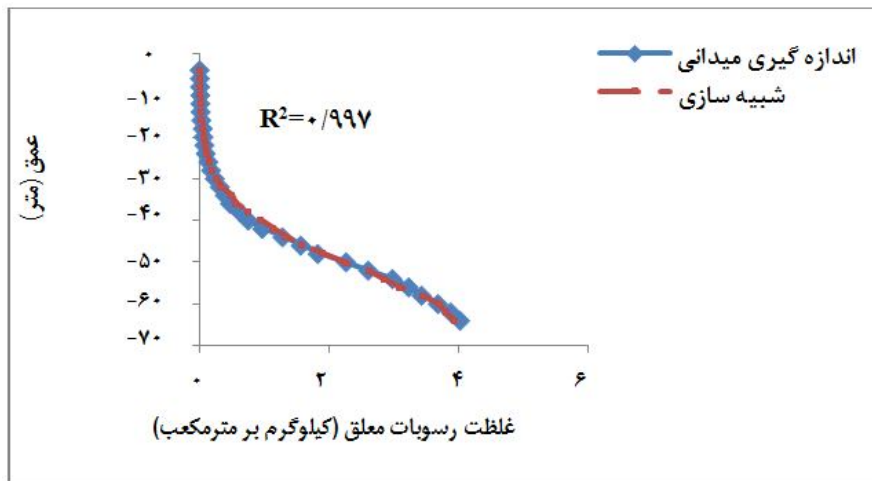
شکل 16 - چگونگی توزیع چگالی جریان در مقطع S3 بر روی رودخانه شاهرود در روز 86/1/24، 5 بعدازظهر

شاخص‌های آماری همچون ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر کم جذر میانگین مربعات خطا و خطای مطلق در جدول 2 نیز بیانگر قابلیت خوب مدل Mike3 در همپوشانی پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و عددی در مقاطع مورد نظر می‌باشد.

همانطور که قبلاً بیان شد بعد از واسنجی مدل عددی در راستای اعتبارسنجی آن نیز، پروفیل غلظت رسوبات معلق حاصل از نتایج شبیه‌سازی در مقاطع 1، 2 و 3 با مقادیر میدانی آن‌ها در مقاطع PS3، PS1 و PS10 در روز 86/1/24، 5 بعد از ظهر مورد مقایسه قرار گرفت و همان‌طور که در اشکال 17، 18 و 19 مشاهده می‌شود همپوشانی خوبی بین داده‌های غلظت رسوبات معلق میدانی و شبیه‌سازی در مقاطع فوق وجود دارد. برای بیان کمی این همپوشانی از



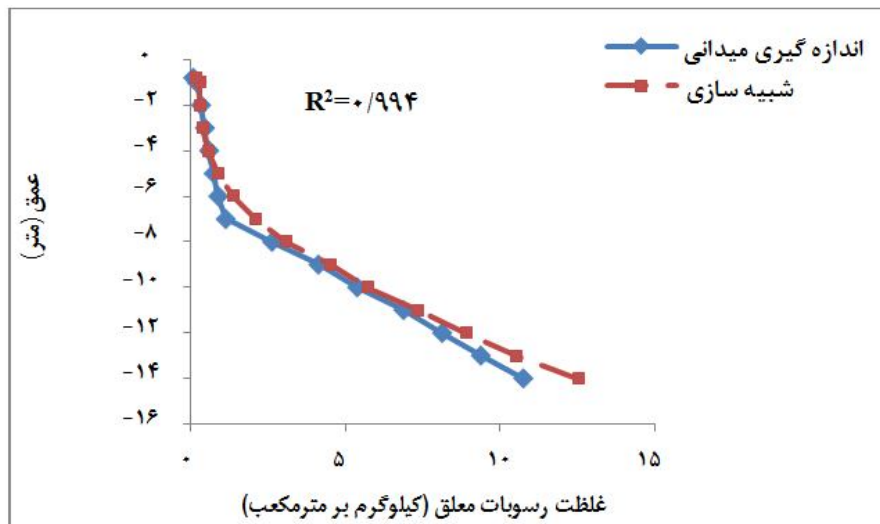
شکل 17- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و بر آورد شده توسط مدل Mike3 در مقطع S1 (PS3)



شکل 18- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و بر آورد شده توسط مدل Mike3 در مقطع S2 (PS1)

جدول 2- نتایج شاخص‌های خطا و ضرایب تبیین مدل Mike3 در مرحله اعتبارسنجی برای سد مخزنی سفیدرود

ردیف	مقاطع عرضی	$R^2$	RMSE	MAE
1	(PS3) S1	0/983	0/422	0/333
2	(PS1) S2	0/997	0/068	0/042
3	(PS10) S3	0/994	0/679	0/477
	متوسط مقادیر شاخص‌ها	0/992	0/39	0/284



شکل 19- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و برآورد شده توسط مدل Mike3 در مقطع S3 (PS10)

بعدی کامل در رایانه‌های شخصی برای شبیه‌سازی جریان گل‌آلود سدها با ابعاد واقعی، به دلیل شبکه محاسباتی حجیم و زمان‌های شبیه‌سازی طولانی، عملاً قابل کاربرد نیست.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان گل‌آلود در سد سفیدرود و مقایسه نتایج مدل با داده‌های میدانی نشان داد که علاوه بر تخمین مناسب زمان رسیدن جریان گل‌آلود به محل دریاچه‌های تخلیه تحتانی، مدل قابلیت شبیه‌سازی مناسب پروفیل غلظت در مقاطع مختلف را نیز دارد. نتایج عددی در شبیه‌سازی تکامل تدریجی و نحوه حرکت جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود، مدت زمان رسیدن جریان گل‌آلود به بدنه سد و مقایسه پروفیل غلظت رسوبات حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های میدانی در مقاطع عرضی در راستای اعتبارسنجی مدل و مقادیر بالای شاخص‌های تبیین و مقادیر کم‌تر شاخص‌های خطا، بیانگر قابلیت خوب مدل Mike3 در همپوشانی پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و شبیه‌سازی در مقاطع مورد نظر و توانایی آن در شبیه‌سازی جریان‌های گل‌آلود در مخازن سدها می‌باشد. از کاربردهای این شبیه‌سازی تعیین زمان باز و بسته شدن بهینه دریاچه‌های تحتانی جهت خروج حجم قابل توجهی از رسوبات بدون ته نشینی در مخزن و ابزار مناسبی برای مدیریت آبیگری و مدیریت زمان استفاده از نیروگاه‌ها با توجه به مقدار مجاز غلظت رسوبات خروجی از دریاچه‌های آن‌ها در زمان‌های مختلف می‌باشد.

با توجه به هزینه‌های بسیار بالا و از دست دادن حجم قابل توجهی از آب مخزن در عملیات شاس (فلاشینگ آزاد) که تاکنون برای رسوب‌زدایی در مخزن سد سفیدرود مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از روش تخلیه جریان‌های گل‌آلود در هنگام وقوع سیلاب برای رسوب‌زدایی رسوبات ورودی می‌تواند راه حل اثربخشی برای رفع رسوب‌گذاری در سد سفیدرود باشد و به عنوان کم‌هزینه-

همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب تبیین بالای 0/983 برای هر سه مقطع عرضی مورد بررسی حاصل شده است و بالاترین ضریب تبیین (0/997) مربوط به مقطع 2 که در پشت سد واقع شده می‌باشد. علت تفاوت حداکثر و حداقل مقادیر شاخص‌های خطا در مقاطع عرضی مربوطه، تعریف متفاوت این شاخص‌ها و نیز تعداد غلظت رسوبات معلق متفاوت مربوط به هر مقطع می‌باشد. لازم به ذکر است ارائه فرمول متفاوت شاخص خطا به منظور بررسی بهتر قابلیت‌های مدل عددی مربوطه از زوایای مختلف است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل Mike3 برای شبیه‌سازی حرکت جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود به کار گرفته شد. برای این منظور ابتدا مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت و مدل نهایی برای بررسی حرکت جریان گل‌آلود براساس سناریوهای مختلف وقایع سیلابی شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به ماژول به کار رفته در این مدل برای شبیه‌سازی جریان گل‌آلود و در نظر گرفتن پارامتر غلظت، کاربرد مدل برای جریان‌های گل‌آلود بقایای مناسب است. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل برای تعیین زمان رسیدن جریان غلیظ به بدنه سد و در نتیجه نحوه باز و بسته نمودن دریاچه‌های تخلیه تحتانی برای خارج ساختن جریان‌های گل‌آلود کارایی مناسبی دارد. علاوه بر این با توجه به اینکه این مدل در عمق، لایه‌های متوسط‌گیری شده را در نظر می‌گیرد لذا یک مدل شبه سه‌بعدی بوده و لذا ضمن در اختیار قرار دادن مشخصات جریان در عمق براساس شرایط مسئله از سرعت حل بالایی نسبت به مدل‌های سه‌بعدی کامل برخوردار بوده که در نتیجه برای هندسه سدهای با مقیاس واقعی قابل استفاده است. در حالی که مدل‌های سه-

مطالعات فرآیند رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی در مخازن سدها و ارائه مدل ریاضی برای پیش‌بینی الگوی رسوب‌گذاری در آن‌ها همراه با مطالعه موردی مخزن سد سفیدرود. گزارش نهایی عملیات میدانی سد سفیدرود، موسسه تحقیقات آب.

محمد نژاد ب و شمسایی ا. 1382. مدل‌سازی رسوب‌گذاری مخازن سدها در اثر جریان چگال. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

محمد نژاد ب و شمسایی ا. 1387. مدل‌سازی عددی حرکت جریان - های زیرسطحی در مخازن سدها. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق.

Altinakar, M.S., Graf, W.H and Hopfinger, E.J. 1993. Water and Sediment Entrainment in Weakly Depositing Turbidity Current on Small Slopes. Proc., XXV Congr., International Association Hydraulic Research, V.2.

Bell, H.S. 1942. Density currents as agents for transporting sediments. Journal of Geology. Vol. 50.

Choi, S.U. 1999. Layer-averaged modeling of two-dimensional turbidity currents with a dissipative-Galerkin finite element method, Part II: Sensitivity analysis and experimental verification. Journal of Hydraulic Research. 37.2: 257-271.

De Cesare, G., Schleiss, A and Hermann, F. 2001. Impact of Turbidity Current on Reservoir Sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering. 127.1: 6-16.

De Cesare, G., Muller, P and Schleiss, A. 2009. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. Journal of Geophysical Research (Oceans). 98.C3: 4793-4807.

DHI Software. 2011. MIKE 3 flow model FM manual, Hydrodynamic Module, scientific documentation, DHI Water & Environment.

Fan, J and Morris, G.L. 1992. Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 118.3: 354-369.

Farrell, G.J and Stefan, H.G. 1988. Mathematical modeling of plunging reservoir flows. Journal of Hydraulic Research. 26.5: 525-537.

Ford, D.E and Johnson, M.C. 1981. Field Observation of Density Currents in Impoundments. Proceedings Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE. V.2, New York, USA.

Forel, F.A. 1892. Theorie du ravin sous-lacustre, Le leman, Vol. 1, F. Rouge, Lausanne. Switzerland. 381-386.

Graf, W.H. 1971. Hydraulics of Sediments Transport, McGraw-Hill, New York, Water Res. Publ., Littleton, CO, USA.

ترین روش کاهش رسوبات در برنامه بهره‌برداری مخزن سد، توصیه می‌گردد. این روش، برخلاف عملیات شاس ملاحظات ایمنی سد را در نظر گرفته و اثر مخربی بر محیط زیست پایین دست خود ندارد. در حالت باز بودن دریاچه‌های تحتانی سد به هنگام وقوع سیلاب، جریان رسوبی به پایاب سد هدایت شده و از رسوب آن‌ها در مخزن سد جلوگیری می‌شود و رسوبات در زمان کم‌تری از رودخانه و سدهای انحرافی می‌گذرد و در مواقعی که جریان خروجی از سد دارای غلظت بالایی است، می‌توان با بستن ورودی‌های شبکه از ورود رسوبات جلوگیری شود که در این صورت شبکه در مدت کم‌تری بسته خواهد ماند و امر آبیاری مختل نخواهد شد. اما در صورت بسته بودن دریاچه‌های تحتانی، جریان گل‌آلود با برخورد به بدنه سد خود را به ارتفاع بالاتر خواهد کشاند و توربین‌های سد در معرض خطر جریان گل‌آلود قرار می‌گیرند و حجم زیادی از آب صاف مخزن را تحت تأثیر خود قرار داده که تا مدت بیش‌تری غلظت آب خروجی در رودخانه و به تبع آن در شبکه آبیاری بالا خواهد ماند. به این ترتیب باز بودن دریاچه‌ها در زمان رسیدن جریان گل‌آلود به سد، دارای تأثیر مثبت برای حفظ ظرفیت مخزن و محافظت از توربین‌ها بوده و لیکن تأثیر منفی آن بالا بردن غلظت در رودخانه و به تبع آن در شبکه آبیاری می‌باشد.

در هر حال استفاده عملی از نتایج مدل‌های عددی در شرایط واقعی نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی مدل با داده‌های کامل غلظت، سرعت جریان در چند مقطع و زمان رسیدن جریان غلیظ به بدنه سد می‌باشد. در ادامه تحقیقات می‌توان به بررسی عملکرد بهینه دریاچه‌های تحتانی سد جهت تخلیه رسوبات ورودی به مخزن و هم‌چنین مطالعه ظرفیت آبیاری رودخانه‌ها در پایین دست سد سفیدرود در حالت‌های مختلف بازشدگی دریاچه‌های تحتانی سد و رها سازی بدها پرداخت.

## منابع

رضانی، ی و قمشی م. 1390. بررسی میزان تأثیر جریان‌های غلیظ بر روند رسوب‌گذاری مخزن سد سفیدرود. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، 4:25، 874-880.

شفیعی، ع و خاتجانی، م.ج. 1376. بررسی تخلیه رسوب در مخازن سدها به وسیله یک مدل فیزیکی. نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، 1:9، 36-43.

صمدی بروجنی، ح و محمد ولی سامانی، ی.ج. 1381. ارزیابی تأثیر رسوب‌شویی سد دز بر کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول با مدل Mike11. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، 1277-1285.

گروه مطالعات میدانی و محیط زیست موسسه تحقیقات آب. 1386.

- Lugano (Switzerland). In: Proceedings 5th international conference on hydro science and engineering. ICHE.
- Lee, H.Y and Yu, W.S. 1997. Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 123.6: 520-528.
- Middleton, G.V. 1966. Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 3: 523-546.
- Oehy, C.D and Schleiss, A.J. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133.6: 637-648.
- Sequeiros, O.E., Cantero, M.I and Garcia, M.H. 2009. Sediment management by jets and turbidity currents with application to a reservoir for flood and pollution control in Chicago, Illinois. *Journal of Hydraulic Research*. 47.3: 340-348.
- Wang, Z.Y and Hu, C.H. 2009. Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research*. 24.4: 369-384.
- Heidarnejad, M., Halvai, D and Bina, M. 2011. The proper option for Discharge the turbidity current and Hydraulic Analysis of Dez Dam Reservoir. *World Applied Sciences Journal*. 13.9: 2052-2056.
- Heimsund, S., Hansen, E. W. M., and Nemeč, W. 2002. Computational 3D fluid-dynamics model for sediment transport, erosion and deposition by turbidity currents. In: Knoper M, Cairncross B (eds) Abstracts, international association of sedimentologists 16th international sedimentological congress, Rand Afrikaans University, Johannesburg. 151-152.
- Huang, H., Imran, J and Pirmez, C. 2005. Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131.4: 283-293.
- Jacobsen, T. 1999. Sustainable reservoir development: The challenge of reservoir sedimentation, Hydropower into the next century-III, Gmunden, Austria. *Conference Proceedings*, pp. 719-728.
- Lavelli, A., Boillat, J.L and De Cesare, G. 2002. Numerical 3D modeling of the vertical mass exchange induced by turbidity currents in Lake



## Application of Mike3 Model in the Simulation of Turbidity Current in the Reservoirs of Dams (Case Study: Sefid-Rud Reservoir Dam)

N. Torkamanzad<sup>1</sup>, B. Ali Mohammadnezhad<sup>2</sup> and J. Behmanesh<sup>3\*</sup>

Received: Sep.23, 2015

Accepted: Jan.27, 2016

### Abstract

The turbidity currents are one of agents in sedimentation of dam reservoirs which are entered in the reservoirs of dams through the increase in suspended sediments concentration in river flows. This process decreases water capacity of reservoirs and useful life of dams. Opening lower gates is a conventional method of this currents evacuation. To open the gates, having information about manner of movement and the arrival time to the dam body of these currents, plays an important role in optimal time management of the gates opening and closing. In this research, advancing the turbidity current in Sefid-Rud reservoir dam was simulated by using Mike3 Model and an unstructured mesh. The results showed that after starting the flood, the first traces of turbidity currents reached the dam through the Shah-Rud branch and determined the exact opening of the dam lower gates and was considered as the calibration model. Investigation of suspended sediments concentration profile in cross-sections showed that the maximum concentration is occurred in the depth and as moving towards the surface of water, decreases and the concentration of sediments in turbidity current entering from Gezel-Ozan and Shahroud rivers is  $10.11 \text{ kg/m}^3$  and  $12.52 \text{ kg/m}^3$ , respectively and by reaching the dam is decreased to  $3.93 \text{ kg/m}^3$ . The results of suspended sediments concentration profile are compared with field data in three cross-sections and the model validation was performed. High values of coefficient of determination and low values of error coefficients show the ability of model in simulation of turbidity current in Sefid-Rud reservoir dam.

**Keywords:** Reservoir Sedimentation, Turbidity Currents, Sefid-Rud Dam, Numerical Simulation

---

1-Former MSc Student of Water Structures, Department of Water Engineering, Urmia University

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University

(\* - Corresponding Author Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)