

تأثیر بازشدگی دریاچه‌های تخلیه تحتانی سد بر خروج جریان گل آلود (مطالعه موردی: سد سفیدرود)

نفیسه ترکمانزاد^۱، بایرامعلی محمدنژاد^۲ و جواد بهمنش^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

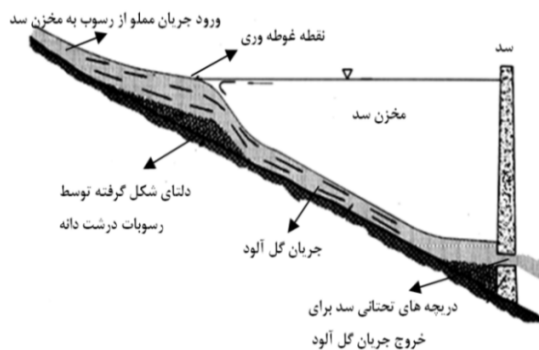
چکیده

در بسیاری از مواقع با ورود سیلاب به مخازن سدها، جریان‌های گل آلود در کف مخزن ایجاد می‌شوند. این جریان یکی از عوامل رسوب‌گذاری و کاهش ظرفیت آب مخازن و عمر مفید سدها می‌باشد. گشودن دریاچه‌های تحتانی سد، روش متداول تخلیه این جریان‌ها و حفظ حجم مفید مخزن می‌باشد. در این تحقیق، پیشروی جریان گل آلود در مخزن سد سفیدرود و میزان تأثیر دریاچه‌های تحتانی سد بر تخلیه جریان گل آلود در سناریوهای مختلف با استفاده از مدل Mike3 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با در نظر گرفتن ورود سیلاب به مخزن به صورت هم‌زمان در ابتدای شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود، جریان گل آلود از طریق شاخه شاهرود زودتر به بدنه سد رسیده و زمان گشودن دریاچه‌های تخلیه تحتانی را تعیین می‌کند. نتایج پروفیل غلظت رسوبات معلق حاصل از مدل‌سازی با داده‌های میدانی در سه مقطع عرضی مقایسه و کالیبره شدند. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر کمتر شاخص‌های خطا، نشان از توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان گل آلود در مخزن سد سفیدرود دارد. همچنین عملکرد بهینه دریاچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود در سناریوهای تعریف شده برای خروج جریان گل آلود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با توجه به پارامترهای راندمان تخلیه رسوب و نسبت وزن رسوبات خروجی از مخزن به حجم آب خروجی و وجود آب کافی در مخزن برای خروج جریان گل آلود، می‌توان بهترین گزینه و عملکرد بهینه دریاچه‌های تخلیه تحتانی را تعیین کرد.

واژگان کلیدی: رسوب‌گذاری مخازن، جریان گل آلود، Mike 3، سد سفیدرود، دریاچه‌های تخلیه تحتانی.

۱- مقدمه

خارج کردن جریان سیلاب و رسوبات ریزدانه در قالب دینامیک جریان‌های گل آلود^۱ با مانور مناسب دریاچه‌های تخلیه تحتانی سد در جهت مدیریت رسوب مخازن و فرآیند کنترل کننده در رسوبگذاری مخزن، به عنوان روشی برای رسوب‌شویی هیدرولیکی مخزن می‌باشد [۵]. شکل (۱) چگونگی پیشروی جریان‌های گل آلود در مخازن سدها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ته‌نشینی رسوبات و پیشروی جریان گل آلود در داخل مخزن سد [۴]

رسوب‌گذاری در مخازن باعث کاهش ظرفیت ذخیره آب، آسیب به تجهیزات نیروگاه‌های برقابی، انسداد دریاچه‌های عمقی و آبگیرها می‌شود و ظرفیت برای تنظیم جریان، تولید انرژی و کنترل سیلاب کاهش یافته و بازده اقتصادی سدها به شدت پایین می‌آید [۱]. کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ اعلام کرده است که سالانه ۱ تا ۲ درصد از ظرفیت ذخیره مخازن سدهای دنیا در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود [۲]. نرخ رسوب‌گذاری در مخازن ایران نیز سالانه حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد ظرفیت اولیه تخمین زده شده است [۳]. در مواقع سیلابی در بازه زمانی کوتاه حجم زیادی از رسوب وارد مخزن سد می‌گردد. جریان‌های گل آلود که به علت داشتن مقدار زیاد رسوب دارای چگالی بالایی نیز هستند در هنگام ورود به مخزن به علت تفاوت چگالی با آب صاف مخزن به صورت جریان لایه‌ای در زیر سطح آب مخزن و در عمق آن در روی شیب بستر به صورت ثقلی به سمت پایین دست و بدنه سد حرکت کرده و باعث انتقال حجم قابل توجهی رسوب به پشت بدنه سد می‌گردند [۴].

مشاهدات میدانی مخزن سد لوزان در آلپ سویس برای کنترل دقت آن استفاده کردند. در سال ۲۰۰۲ مدل عددی سه بعدی توسط Lavelli و همکاران [۱۶] با استفاده از کد CFX-4 به منظور شبیه‌سازی جریان‌های گل‌آلود در دریاچه لوگانو^۳ توسعه یافت. Huang و همکاران [۱۷] یک مدل عددی جریان‌های گل‌آلود 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. Oehy و Schleiss [۱۸] به بررسی کنترل جریان گل‌آلود 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 گل‌آلود را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار دهد. Sequeiros و همکاران [۱۹] به بررسی مدیریت رسوب و تعیین امکان سنجی فرسایش‌پذیری رسوبات ریزدانه بستر به وسیله جت و انتقال آن توسط جریان گل‌آلود در مخزن سدی در شیکاگو پرداختند و یک مدل عددی واسنجی شده برای مطالعه ظرفیت انتقال جریان در شرایط صحرایی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد مقادیر زیادی از رسوب در نزدیکی ناحیه تخلیه جت می‌تواند فرسایش یافته و قسمتی از رسوب فرسایش یافته می‌تواند توسط جریان غلیظ به پایین دست انتقال یابد. Wang و Hu [۲۰] به بررسی راهکارهایی برای مدیریت رسوب مخازن در کشور چین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که فلاشینگ آزاد باعث تنش‌های اکولوژیکی بالایی به اکوسیستم پایین دست مخزن سد می‌شود. آن‌ها رهاسازی جریان گل‌آلود را به عنوان بهترین راهکار برای کنترل رسوب در مخازن پیشنهاد کردند که دارای مزیت استفاده از انرژی برقی بوده و ثبات اکولوژیکی را مورد توجه قرار می‌دهد. Heidarnjad و همکاران [۲۱] یک استراتژی برای دبی جریان گل‌آلود و آنالیز هیدرولیکی مخزن سد دز توسعه دادند و در این راستا از نرم‌افزار Flow3D استفاده کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش تراز فوقانی مخزن از ۳۰۰ به ۳۵۲ متر، دبی جریان گل‌آلود عبوری از دریچه‌های خروجی به ۷۸/۲ درصد افزایش می‌یابد. مطالعات فرسایش و رسوب انجام شده در حوضه آبریز سد سفیدرود بیانگر ظرفیت بالای رسوبزایی این حوضه می‌باشد که همراه با سیلاب از سر شاخه‌های اصلی قزل اوزن و شاهرود وارد مخزن سد سفیدرود می‌شوند. Tolouie [۲۲] رسوب‌گذاری مخزن سد سفیدرود را مورد مطالعه قرار داد. نتایج وی نشان داد که در سد سفیدرود با حجم اولیه ۱۸۰۰

قدیمی‌ترین مشاهدات روی جریان‌های گل‌آلود دریچه‌های توسط Forel [۶] در دریاچه جنوا^۱ در سوئیس انجام شد. مطالعات وی نشان داد که رودخانه رون^۲ مملو از رسوب به داخل دریاچه جریان می‌یابد و یک جریان گل‌آلود ایجاد می‌کند. Parker و همکاران [۷] یک مدل تداخل رسوب برای جریان‌های گل‌آلود در مخازن توسعه دادند. Stefan و Farrell [۸] یک مدل ریاضی دو بعدی را برای جریان ورودی به مخزن در یک هندسه ساده پیشنهاد کردند. Choi [۹] یک مدل متوسط لایه-ای دو بعدی برای جریان‌های گل‌آلود با حل عددی اجزای محدود توسعه داد. از جمله تحقیقات انجام شده دیگر می‌توان به مطالعات Altinakar و همکاران [۱۰] و Yu و Lee [۱۱] اشاره داشت. محمدنژاد و شمسایی [۱۲] یک مدل عددی دو بعدی برای جریان‌های گل‌آلود غیر دائمی 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. محمدنژاد و شمسایی [۱۳] حرکت جریان‌های زیر سطحی و گل‌آلود 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 دادند. نتایج نشان دادند که بیشتر بودن چگالی جریان گل‌آلود نسبت به آب صاف تر 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. رمضانی و قمشی [۱۴] میزان تأثیر جریان‌های غلیظ بر روند رسوب‌گذاری مخزن سد سفیدرود را با استفاده از مدل رایانه‌ای TCM و در یک دوره ۳۰ ساله مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، بازده تله‌اندازی شاخه قزل اوزن حدود ۳۰ درصد و شاخه شاهرود حدود ۲۰ درصد نسبت به حالتی که تأثیر این جریان‌ها نادیده گرفته شود، کاهش می‌یابد و در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، متوسط کاهش حجم سالانه مخزن در شاخه قزل اوزن از ۱/۰۷ به ۰/۷۳ درصد و در شاخه شاهرود از ۰/۵۵ به ۰/۴۳ درصد کاهش می‌یابد. De Cesare و همکاران [۱۵] یک مدل عددی برای جریان دو فازی جهت شبیه‌سازی جریان‌های گل‌آلود ارائه داده و از

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

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

۳- معادله انتقال

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

در معادلات پیوستگی و مومنتم، x و y و z مختصات کارتزین در جهت‌های طولی، عرضی، قائم، قائم، u و v و w مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x و y و z η تراز سطح آب، d عمق آب ساکن، h عمق کل آب ($h = \eta + d$)، g شتاب گرانش، S دبی ناشی از چشمه و چاه، u_s و v_s سرعت‌هایی که آب به داخل آب ساکن جریان می‌یابد، $f = 2\Omega \sin \theta$ پارامتر کریولیس (Ω : سرعت زاویه‌ای چرخشی، θ : 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 می‌باشد. 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 [۲۴].

۲-۳- 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° ، 49° شرقی و $36'$ ، $46'$ شمالی در 200 کیلومتری شمال غربی تهران و 100 کیلومتری دریای خزر کمی پائین‌تر از شهر منجیل، بر روی رودخانه

میلیون متر مکعب، تجمع رسوبات در فاصله زمانی 20 سال اولیه بهره‌برداری، حدود 800 میلیون متر مکعب بوده و متوسط سالیانه کاهش حجم مخزن بالغ بر $2/2$ درصد می‌باشد. در مخزن سد سفیدرود طی 10 سال (1359 تا 1370) عملیات رسوبزدایی (شاس) علاوه بر خالی کردن کل رسوبات ورودی به مخزن در این دوره، افزون بر 200 میلیون متر مکعب از رسوبات نهشته شده قبلی نیز تخلیه گردید [۲۳]. هدف از این تحقیق بررسی قابلیت مدل عددی Mike3 در شبیه‌سازی حرکت جریان گل-آلود در سد سفیدرود، کالیبراسیون مدل و بررسی میزان تأثیر بازشدگی‌های دریچه‌های تحتانی سد در تخلیه جریان گل‌آلود ورودی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل ریاضی Mike3

نرم‌افزار Mike3 یک مجموعه مدل ریاضی سه بعدی است که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک تهیه شده است. نرم‌افزار فوق یک سیستم مدل‌سازی هیدرودینامیکی سه بعدی برای مخازن سدها، دریاچه‌ها، خلیج‌ها، مناطق ساحلی و دریاها بوده و برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد، پارامترهای کیفی آب و جابه‌جایی رسوبات چسبنده و غیر چسبنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس شبکه‌بندی منظم و نامنظم تهیه شده که سیستم حل معادلات در این دو حالت به ترتیب از روش تفاضلات محدود و احجام محدود استفاده می‌کند. ماژول‌های مختلفی در مدل Mike3 در حالت شبکه‌بندی نامنظم وجود دارد که با توجه به امکانات ماژول هیدرودینامیک^۱، در این تحقیق از مدل فوق برای شبیه‌سازی استفاده گردید [۲۴].

۲-۲- معادلات حاکم بر جریان در مدل هیدرودینامیک

مدل هیدرودینامیک بر اساس حل عددی معادلات ناویه - استوکس متوسط‌گیری شده رینولدزی تراکم‌ناپذیر سه بعدی با استناد به دو فرضیه بوزینسک و فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. معادلات به کار رفته در مدل عبارتند از:

۱- معادله پیوستگی جریان،

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

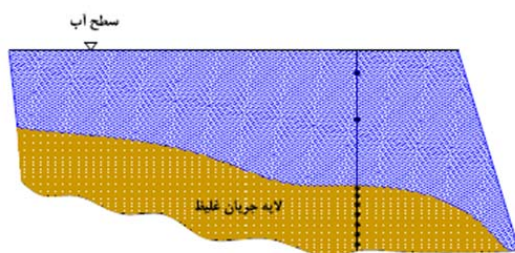
۲- معادلات مومنتم در راستای افقی برای مؤلفه‌های x و y ،

زمان وقوع سیلاب در طول عملیات میدانی، در ۳ مرحله اردیبهشت و خرداد ۱۳۸۵ (مرحله اول)، آبان و آذر ۱۳۸۵ (مرحله دوم) و فروردین و اردیبهشت ۱۳۸۶ (مرحله سوم) انجام شده است که با توجه به زمان انتخابی برای شبیه‌سازی، اندازه‌گیری‌های مرحله سوم برای کالیبراسیون مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله فوق به طور روزانه از دو ایستگاه هیدرومتری گیلوان (در شاخه قزل اوزن و ۲۵ کیلومتری از سد) و لوشان (در شاخه شاهرود و ۱۳ کیلومتری از سد)، از نزدیک بستر نمونه‌برداری آب انجام می‌شد و چنانچه غلظت از حدی بالاتر بود بنابر وقوع جریان گل‌آلود گذاشته شده و نمونه‌برداری از کلیه ایستگاه‌ها انجام گرفته است.

سفیدرود و در پایین دست محل تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود قرار گرفته است. سد سفیدرود از نوع سدهای بتنی پایه‌دار است که در زمان بهره‌برداری، حجم مخزن تقریباً ۱/۸ میلیارد متر مکعب بوده که به دلیل رسوب‌گذاری تا حدود ۱/۱۶ میلیارد متر مکعب رسیده است. ماکزیمم دبی کل ورودی به آن در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد. سد دارای ۵ دریچه تخلیه تحتانی، دو دریچه میانی و دو سرریز سطحی به ترتیب با ظرفیت تخلیه ۸۹۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. شکل (۲) موقعیت جغرافیایی سد سفیدرود را نشان می‌دهد. در سد سفیدرود نمونه‌برداری آب جهت تعیین غلظت رسوبات معلق، در طی سه جریان غلیظ حادث شده در



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی سد سفیدرود و رودخانه‌های ورودی به سد



شکل ۴- شماتیکی از نحوه نمونه‌برداری آب در عمق [۲۵]

برای کالیبراسیون مدل، پروفیل غلظت رسوبات معلق حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه‌های PS3، PS1 و PS10 با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. علت انتخاب ایستگاه‌های فوق در اختیار داشتن داده‌های کاملی از اندازه‌گیری غلظت رسوبات می‌باشد.

نمونه‌بردار استوانه‌ای در شکل (۱) و تصویر شماتیکی از نحوه نمونه‌برداری آب جهت اندازه‌گیری جریان گل‌آلود و مشخص نمودن ضخامت لایه غلیظ مشاهده می‌شود. شکل (۵) و جدول (۱) به ترتیب موقعیت و مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری را براساس UTM^۱ منطقه نشان می‌دهند [۲۵].

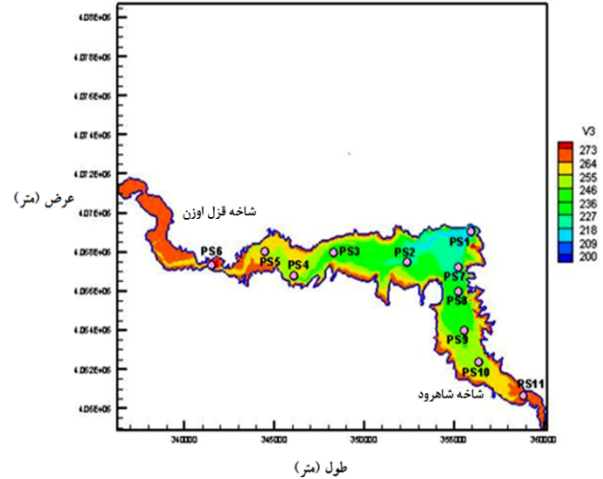


شکل ۳- نمونه‌بردار استوانه‌ای [۲۵]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$\%VE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|}{n} \quad (۷)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (۸)$$



شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب در زمان سیلاب [۲۵]

جدول ۱- مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب در زمان سیلاب [۲۵]

محل نمونه برداری آب	نام ایستگاه	طول (متر)	عرض (متر)
پشت سد سفیدرود	PS1	۳۵۵۹۳۰	۴۰۶۹۰۷۰
رودخانه قزل اوزن	PS2	۳۵۲۳۷۸	۴۰۶۷۴۸۸
"	PS3	۳۴۸۲۶۰	۴۰۶۸۰۰۰
"	PS4	۳۴۶۰۹۰	۴۰۶۶۷۶۹
"	PS5	۳۴۴۴۸۰	۴۰۶۸۰۳۰
"	PS6	۳۴۱۴۹۷	۴۰۶۷۳۳۱
رودخانه شاهرود	PS7	۳۵۵۲۳۳	۴۰۶۷۲۲۹
"	PS8	۳۵۵۲۳۶	۴۰۶۶۰۱۰
"	PS9	۳۵۵۵۵۹	۴۰۶۳۹۹۵
"	PS10	۳۵۶۳۶۳	۴۰۶۲۴۰۰
"	PS11	۳۵۸۸۶۱	۴۰۶۰۶۵۶

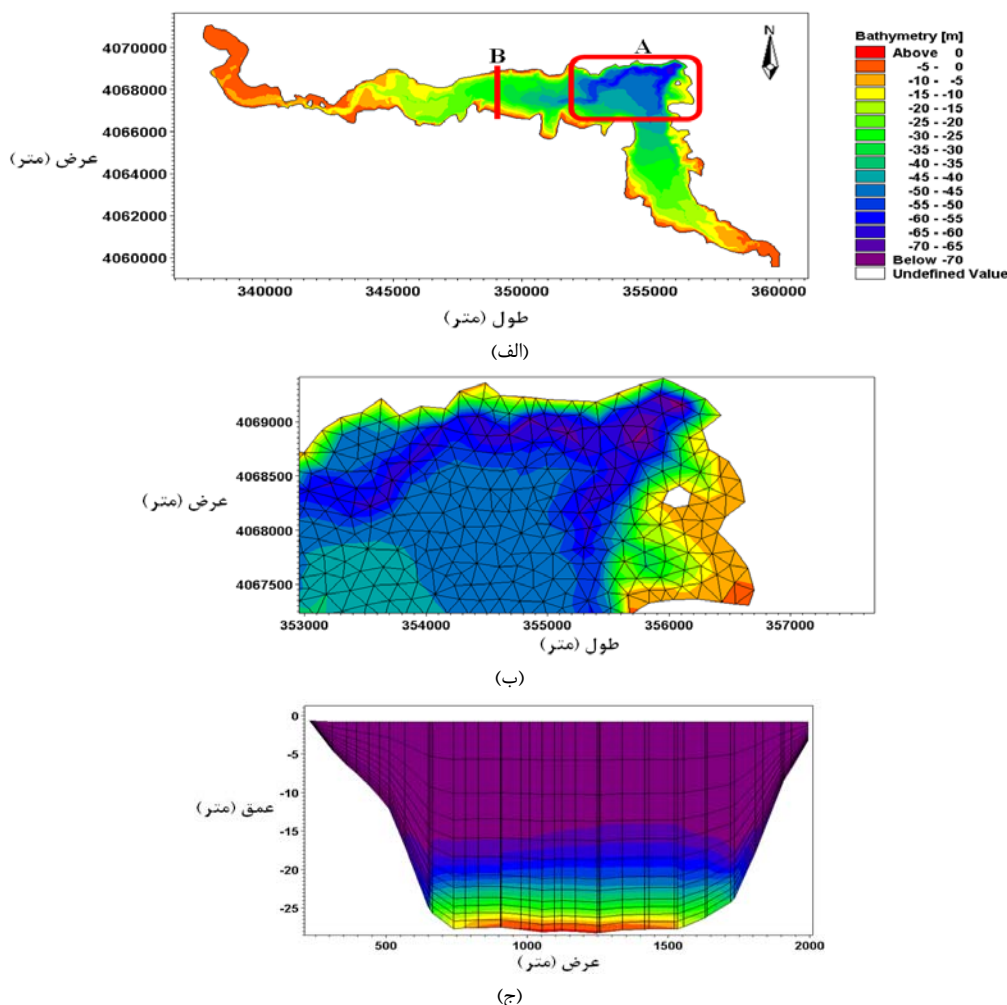
۲-۴-۱- اطلاعات ورودی به مدل

۲-۴-۱-۱- المان‌بندی و عمق‌سنجی مخزن

برای تعریف هندسه منطقه از نقشه توپوگرافی مخزن سد سفیدرود استفاده شد. جهت ساخت شبکه نامنظم مدل Mike3 از المان‌های مثلثی استفاده می‌کند. با توجه به محدودیت‌های زمانی، تأمین دقت و پایداری مدل، المان‌بندی بهینه انتخاب شد و از طریق درون‌یابی بسی‌متری مخزن تولید گردید. در ضمن ۱۲ لایه عمقی به کار گرفته شده در مدل براساس ضخامت لایه‌ها به طور غیر یکنواخت توزیع شده‌اند. در شکل (۶) المان‌بندی افقی و نمونه‌ای از لایه‌بندی در جهت قائم نشان داده شده است. بسی-متری مخزن نشان می‌دهد که قسمت‌های بالا دست مخزن از عمق کمتری برخوردار است و با حرکت از بالادست به سمت دیواره سد، عمق مخزن بیشتر می‌گردد. همان طوری که مشاهده می‌شود برای دقت بیشتر و نمایش بهتر جریان گل‌آلود، ضخامت لایه‌ها در کف کمتر در نظر گرفته شد.

برای بیان کمی هم‌پوشانی داده‌های میدانی با نتایج شبیه‌سازی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای درصد پیش‌بینی ($\%VE$) و خطای مطلق (MAE) که به صورت زیر بیان می‌شوند، استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i)^2} \quad (۵)$$



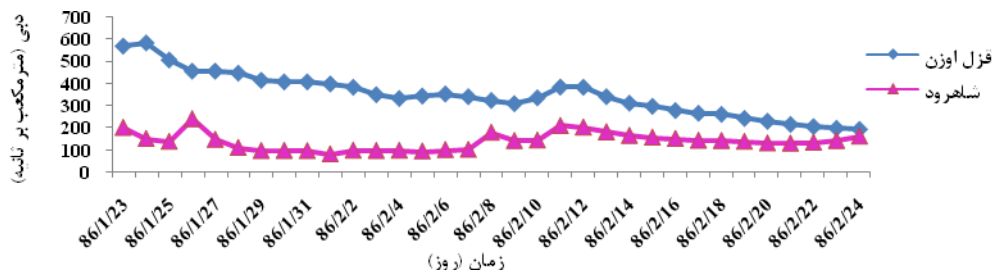
شکل ۶- مان‌بندی افقی و نمونه‌ای از لایه‌بندی در جهت قائم، الف) عمق‌سنجی مخزن سد سفیدرود با مدل Mike3، ب) نمونه‌ای از مان‌بندی افقی منطقه در قسمت A، ج) نمونه‌ای از لایه‌بندی در جهت قائم در قسمت B

۲-۴-۲- شرایط مرزی

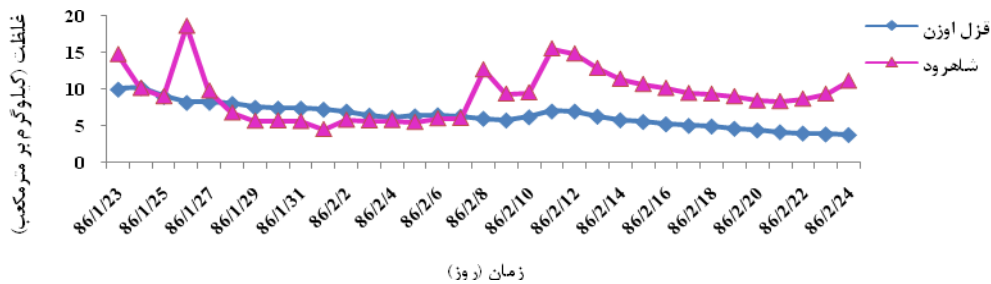
شرایط مرزی ورودی برای دبی جریان به صورت هیدروگراف دبی‌های روزانه و غلظت رسوبات جریان به صورت نمودارهای غلظت‌های روزانه در مرزهای ورودی جریان در شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود از روز ۲۳ فروردین ۱۳۸۶ تا ۲۴ اردیبهشت ۱۳۸۶ تعیین شد که در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. علت انتخاب این توالی زمانی وجود دبی سیلابی به همراه ورود جریان گل‌آلود با غلظت بالا از شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در طول مدت فوق، حداکثر و غلظت رسوبات دبی ورودی به مخزن از طریق شاخه قزل اوزن در روز ۲۴ فروردین و به ترتیب به مقدار ۵۸۱ متر مکعب بر ثانیه و ۱۰/۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و از طریق شاخه شاهرود در روز ۲۶ فروردین به مقدار ۲۴۰ متر مکعب بر ثانیه و ۱۸/۶ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در هر سناریو، رقوم سطح آب مخزن ۲۶۱/۶۵ بود که در قسمت شرایط مرزی در محل سد به

مقدار ۱۰- متر در مدل اعمال شد. غلظت رسوبات معلق مخزن در قسمت شرایط مرزی در محل سد صفر در نظر گرفته شد که به معنی آب کاملاً صاف است. به عنوان شرط مرزی خروجی برای جریان آب نیز مقادیر دبی‌های خروجی از سد سفیدرود طبق سناریوهای تعیین شده برای بازشدگی دریچه‌های تحتانی (جدول (۲)) به مدل معرفی گردید.

دبی‌های خروجی با مقادیر منفی و همچنین موقعیت دریچه‌ها در قسمت چاهک^۱ نرم‌افزار اعمال شدند. با توجه به زمان‌های وقوع حداکثر دبی و غلظت رسوبات ورودی به مخزن و هدررفت کمتر آب مخزن، حداکثر مدت زمان باز نگه داشتن دریچه‌ها به مدت ۴۸ ساعت تعیین شد. دو سرریز سطحی برای ثابت نگه داشتن سطح آب در مخزن در دو طرف دریاچه سد با تعیین موقعیت آن‌ها تعریف شد که با افزایش تراز آب در مخزن، سرریز گردد.



شکل ۷- هیدروگراف‌های جریان ورودی به مخزن دو رودخانه فزل اوزن و شاهرود



شکل ۸- غلظت رسوبات معلق جریان ورودی به مخزن دو رودخانه فزل اوزن و شاهرود

جدول ۲- گزینه‌های اجرای مدل‌سازی

تراز اولیه مخزن سد (m)	دبی خروجی از سد (m³/s)	دبی آب ورودی از بالادست رودخانه به سد (m³/s)		مدت زمان باز بودن دریچه‌ها (ساعت)	محدوده مدل‌سازی	سناریو
		فزل اوزن و شاهرود	فزل اوزن و شاهرود			
۲۶۱/۶۵	-	سری زمانی	سری زمانی	-	کل مخزن سد	۱
۲۶۱/۶۵	۹۸۰	سری زمانی	سری زمانی	۰.۲۴، ۰.۱۲ ۴۸، ۰.۳۶	کل مخزن سد	۲
۲۶۱/۶۵	۷۳۵	سری زمانی	سری زمانی	۰.۲۴، ۰.۱۲ ۴۸، ۰.۳۶	کل مخزن سد	۳
۲۶۱/۶۵	۴۹۰	سری زمانی	سری زمانی	۰.۲۴، ۰.۱۲ ۴۸، ۰.۳۶	کل مخزن سد	۴
۲۶۱/۶۵	۲۴۵	سری زمانی	سری زمانی	۰.۲۴، ۰.۱۲ ۴۸، ۰.۳۶	کل مخزن سد	۵

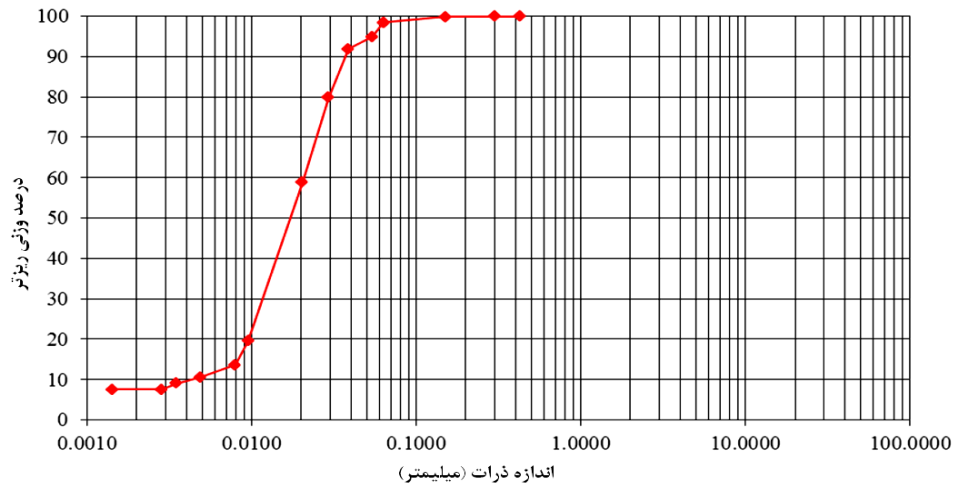
۲-۴-۳- سایر پارامترهای ورودی به مدل

با توجه به جریان متلاطم رودخانه‌ها، معادلات ناویه-استوکس جوابگو نبوده و به همین دلیل مدل آشفتگی در مدل‌های ریاضی تعریف می‌شود. در مدل فوق آشفتگی با مفهوم لزجت گردابه‌ای مدل‌سازی می‌شود. لزجت گردابه‌ای در حالت سه بعدی به صورت جداگانه برای انتقال قائم و افقی توصیف می‌شود. رابطه مورد استفاده در این مطالعه برای لزجت گردابه‌ای

در جهت قائم و جهت افقی به ترتیب قانون لگاریتم^۲ و اسماگورینسکی^۳ [۲۶] به دلیل دقت بالای آن‌ها می‌باشد. برای پخش در جهت افقی مقدار فاکتور ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر (شکل (۹))، رسوبات نهشته شده در مخزن سد سفیدرود از سه نوع خاک ماسه ریز، سیلت و رس تشکیل یافته است. به این ترتیب ارتفاع زبری بستر براساس نمونه‌های مواد بستری ۰/۰۵ متر تعیین گردید.

2- Log law formula
3- Smagorinsky formula

1- Eddy viscosity



شکل ۹- منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر

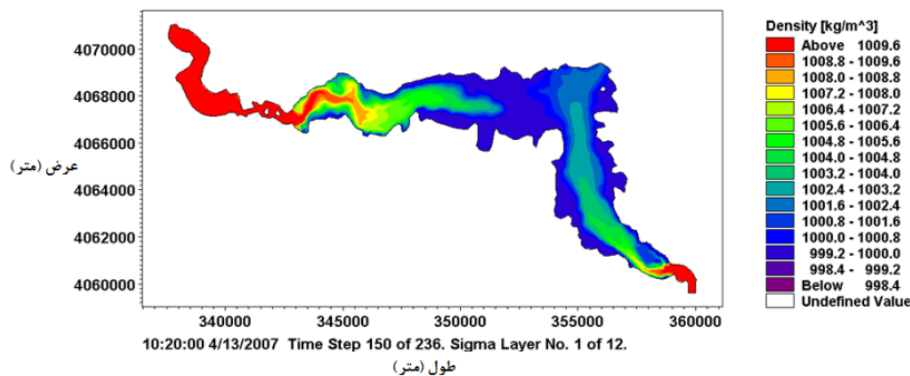
۲۵ ساعت، از شاخه شاهرود و در روز ۸۶/۱/۲۴ ساعت ۱۰:۲۰ صبح زودتر به بدنه سد رسید که به دلیل کوتاه بودن طول مجرای جریان و شیب زیاد در این شاخه نسبت به شاخه قزل اوزن می‌باشد و به این ترتیب زمان گشودن دریچه‌های تحتانی سد برای تخلیه جریان گل‌آلود را تعیین می‌کند. همچنین نتایج نشان دادند که جریان گل‌آلود شاخه قزل اوزن در مدت زمان ۳۱ ساعت و ۴۰ دقیقه به بدنه سد می‌رسد. الگوی جریان گل‌آلود در مخزن سد در لایه کف به ترتیب در زمان رسیدن جریان گل‌آلود شاخه شاهرود (شکل ۱۰) و شاخه قزل اوزن (شکل ۱۱) به بدنه سد نشان داده شده است. جهت جلوگیری از اتلاف و هدر رفت آب مخزن، با رسیدن جریان به بدنه سد از طریق شاخه شاهرود در روز ۸۶/۱/۲۴ ساعت ۱۰:۲۰ صبح، دریچه‌های تخلیه تحتانی برای خروج جریان گل‌آلود با توجه به سناریوهای تعیین شده گشوده می‌شوند.

با توجه به اندازه‌گیری چگالی در مخزن، مقادیر چگالی آب و ذرات رسوبی به ترتیب $999/7 \text{ kg/m}^3$ و 2650 kg/m^3 تعیین شد. 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 ۲ ثانیه در نظر گرفته شد که ماکزیمم عدد کورانت موجود در محیط حل مدل برای ماژول هیدرودینامیک برابر $0/43$ و برای ماژول پخش برابر $0/27$ به دست آمد که هر دو مقدار در محدوده پایداری مدل می‌باشند. همچنین فرض تر و خشک شدن المان‌ها در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

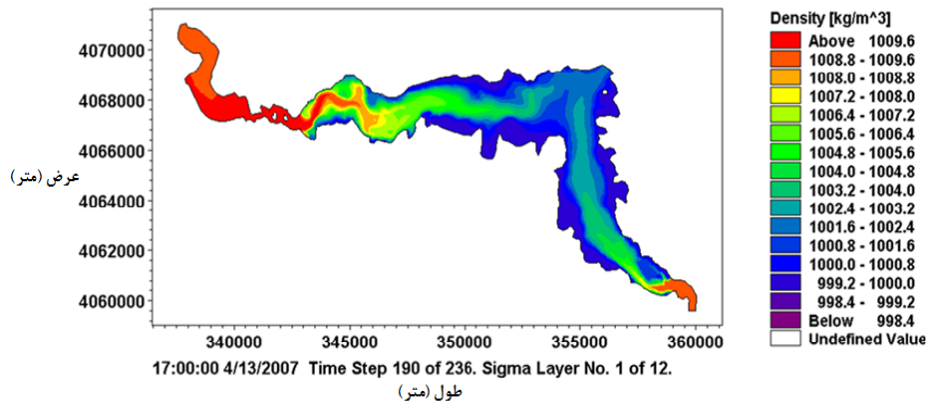
۳- نتایج و بحث

۳-۱- زمان رسیدن جریان گل‌آلود به بدنه سد

در سناریو ۱ بعد از واقعه سیلابی که از روز ۸۶/۱/۲۳ ساعت ۹:۲۰ صبح شروع شد، جریان گل‌آلود در لایه کف بعد از گذشت



شکل ۱۰- الگوی جریان گل‌آلود و توزیع چگالی جریان در لایه کف، در زمان رسیدن جریان گل‌آلود شاخه شاهرود به سد



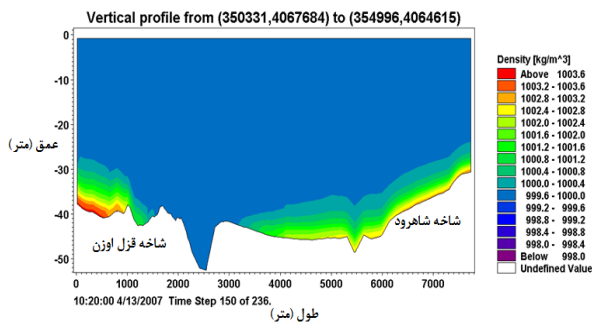
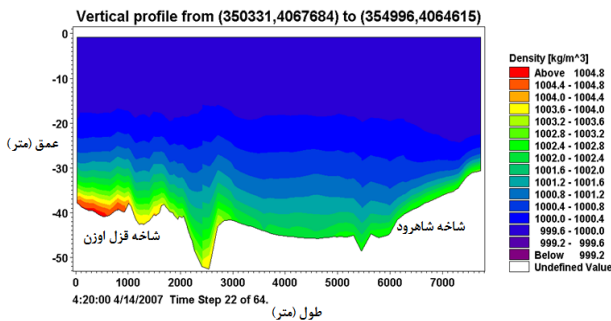
شکل ۱۱- الگوی جریان گل‌آلود و توزیع چگالی جریان در لایه کف، در زمان رسیدن جریان گل‌آلود شاخه قزل اوزن به سد

۳-۲- سرعت حرکت جریان گل‌آلود

با توجه به طول مخزن در خط القعر برای شاخه شاهرود (۱۳ کیلومتر) و قزل اوزن (۲۵ کیلومتر) و زمان رسیدن جریان گل-آلود این دو رودخانه به بدنه سد، سرعت متوسط جریان گل‌آلود در زمان رسیدن آن به بدنه سد در شاخه شاهرود 0.144 m/s و شاخه قزل اوزن 0.219 m/s تعیین گردید. لازم به ذکر است که به همین ترتیب می‌توان سرعت متوسط حرکت جریان گل‌آلود را در فواصل مختلف در داخل مخزن محاسبه کرد. همچنین با توجه به این که مدل سه‌بعدی است و سرعت جریان در سه جهت x ، y و z در هر زمان و مقطعی از مخزن از جمله نتایج خروجی مدل می‌باشد، می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان گل‌آلود را در هر زمان و مقطعی تعیین کرد.

۳-۳- پروفیل طولی جریان گل‌آلود

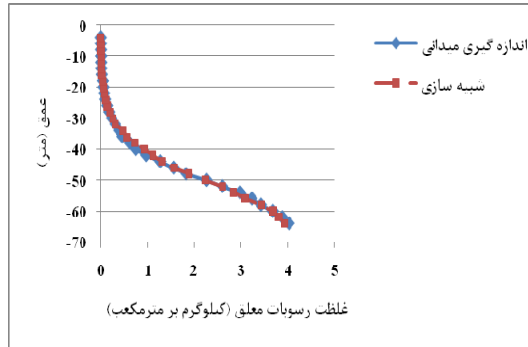
شکل (۱۲) الگوی حرکت جریان گل‌آلود در مقطع طولی مخزن سد در زمان رسیدن جریان گل‌آلود به سد و ۱۸ ساعت بعد از آن را نشان می‌دهد که موقعیت بدنه و پیشانی جریان گل‌آلود به خوبی قابل رویت است و نشان می‌دهد که مدل می‌تواند فرم کلی جریان‌های گل‌آلود را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان می‌دهند که بعد از گذشت کمتر از یک روز از رسیدن جریان گل‌آلود به سد (۱۸ ساعت)، جریان فوق‌کل محدوده مخزن را در نزدیکی بدنه سد تحت تأثیر قرار داده است.



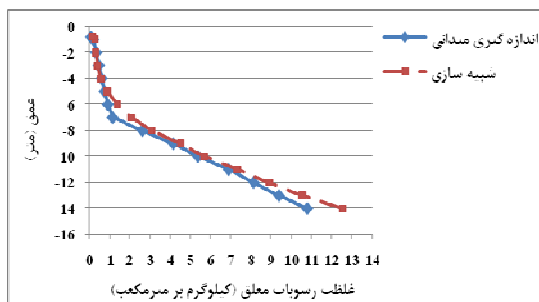
شکل ۱۲- الگوی حرکت جریان گل‌آلود در مقطع طولی مخزن در زمان رسیدن جریان گل‌آلود به سد (راست) و ۱۸ ساعت بعد از آن (چپ)

۳-۳- کالیبراسیون مدل

با توجه به مطالعات قبلی انجام شده در ارتباط با مقایسه مقادیر میدانی غلظت رسوبات در ایستگاه‌های PS1، PS3 و PS10 با نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل در سناریو ۱ در روز ۲۴ فروردین ۸۶، مشاهده شد که هم‌پوشانی خوبی بین داده‌های میدانی و شبیه‌سازی پروفیل غلظت رسوبات وجود دارد. این پروفیل‌های غلظت نشان‌دهنده تشکیل جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود و پیشروی آن به سمت بدنه سد



شکل ۱۴- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و برآورد شده توسط مدل Mike3 در ایستگاه PS1 در نزدیکی بدنه سد



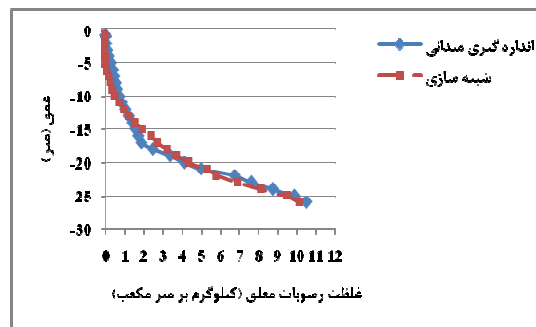
شکل ۱۵- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و برآورد شده توسط مدل Mike3 در ایستگاه PS10 در شاخه شاهرود

۳-۴- رسوبات و حجم آب ورودی به مخزن

با توجه به داده‌های دبی و غلظت رسوبات معرفی شده به مدل، مقادیر رسوبات و حجم آب ورودی از طریق رودخانه‌های شاهرود و قزل اوزن در مدت زمان تعیین شده برای سناریوها محاسبه شد. لازم به ذکر است رسوبات و حجم آب ورودی در مدت زمان ۲۵ ساعتی که طول می‌کشد تا جریان گل‌آلود به سد برسد نیز در این محاسبات در نظر گرفته شد. جدول (۴) نتایج حجم آب V_w ، وزن رسوبات M_s و غلظت رسوبات ورودی C_m را از رودخانه‌های شاهرود و قزل اوزن، و در مجموع به ترتیب در مدت ۳۷، ۴۹، ۶۱ و ۷۳ ساعت گذشته از اجرای مدل در سناریوها نشان می‌دهد.

می‌باشد. غلظت رسوبات در جریان گل‌آلود ورودی از رودخانه‌های قزل اوزن و شاهرود به سمت بدنه سد، به دلیل افزایش حجم آب و پدیده درون آمیختگی کاهش می‌یابد.

برای بیان کمی این هم‌پوشانی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای درصد پیش‌بینی (%VE) و خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر کم جذر میانگین مربعات خطا، خطای درصد پیش‌بینی و خطای مطلق در جدول (۳) نیز بیانگر قابلیت خوب مدل Mike3 در هم‌پوشانی پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و شبیه‌سازی در مقاطع مورد نظر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب تبیین بالای ۰/۹۸۳ برای هر سه مقطع عرضی مورد بررسی حاصل شده است و بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۹۷) مربوط به مقطع PS1 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 شاخص‌های متفاوت خطا به منظور بررسی بهتر قابلیت‌های مدل عددی مربوطه از زوایای مختلف است.



شکل ۱۳- پروفیل غلظت رسوبات معلق میدانی و برآورد شده توسط مدل Mike3 در ایستگاه PS3 در شاخه قزل اوزن

جدول ۳- نتایج شاخص‌های خطا و ضرایب تبیین مدل Mike3 در مرحله کالیبراسیون برای سد مخزنی سفیدرود

ردیف	مقاطع عرضی	R^2	RMSE	MAE	%VE
۱	PS3	۰/۹۸۳۸۰۹	۰/۴۲۲۹۸۷	۰/۳۳۳۳۸۳	۰/۳۷۳۰۵۹
۲	PS1	۰/۹۹۷۹۸۸	۰/۰۶۸۸۹۳	۰/۰۴۲۶۵۴	۰/۰۸۲۴۵۲
۳	PS10	۰/۹۹۴۳۵۲	۰/۶۷۹۱۲۰	۰/۴۷۷۴۲۶	۰/۲۸۲۰۲۰

جدول ۴- مقادیر رسوبات و آب ورودی به مخزن سد سفیدرود در مدت زمان اجرای مدل

ردیف	مدت زمان اجرای مدل (ساعت)	رودخانه	$M_s(\text{ton})$	$V_w(\text{Mm}^3)$	$C_m(\text{kg/m}^3)$
۱	۳۷	شاهرود	۲۷۹۷۳۴/۱۵	۲۲/۷۵۳۲	۱۲/۲۹
		قزل اوزن	۷۷۶۸۸۷/۷۶۴۹	۷۶/۶۵	۱۰/۱۳
		مجموع	۱۰۵۶۶۲۱/۹۱۴۸۶۷	۹۹/۴۰۳۲	۱۰/۶۲
۲	۴۹	شاهرود	۳۳۵۲۴۴/۱۰۸۳۱۵	۲۸/۷۹۲۸	۱۱/۶۴
		قزل اوزن	۹۸۱۶۶۷/۱۳۱۵۳۲	۹۸/۹۲۲	۹/۹۲
		مجموع	۱۳۱۶۹۱۱/۲۳۹۸۴۷	۱۲۷/۷۱۴۸	۱۰/۳۱
۳	۶۱	شاهرود	۳۸۹۰۲۹/۷۰۰۹	۳۴/۷۵۴۴	۱۱/۱۹
		قزل اوزن	۱۱۷۸۰۹۱/۰۱۸	۱۲۰/۷۳۸	۹/۷۵
		مجموع	۱۵۶۷۱۲۰/۷۱۹	۱۵۵/۴۹۲۴	۱۰/۰۷
۴	۷۳	شاهرود	۵۶۲۵۲۴/۱۳۶۱	۴۴/۵۱۰۴	۱۲/۶۳
		قزل اوزن	۱۳۴۴۰۳۴/۵۷۴	۱۴۰/۶۹۴	۹/۵۵
		مجموع	۱۹۰۶۵۵۸/۷۱	۱۸۵/۲۰۴۴	۱۰/۲۹

۳-۵- رسوبات و حجم آب خروجی از مخزن

با توجه به گزینه‌های اجرای مدل‌سازی، مقادیر رسوبات و حجم آب خروجی در بازشدگی ۱۰۰٪ (جدول ۵)، ۷۵٪ (جدول ۶)، ۵۰٪ (جدول ۷) و ۲۵٪ (جدول ۸) دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود در مدت زمان‌های بازشدگی متفاوت محاسبه گردید.

نتایج نشان دادند که حجم آب و وزن رسوبات ورودی از طریق رودخانه‌های شاهرود و قزل اوزن با گذشت زمان از شروع جریان سیلابی به سمت سد افزایش می‌یابد و همچنین حجم آب و وزن رسوبات ورودی از رودخانه قزل اوزن به داخل مخزن به مراتب بیشتر از رودخانه شاهرود بوده و این مسئله نشان از تأثیر بالای رودخانه قزل اوزن در تأمین آب مخزن سد سفیدرود و تأثیر به سزای این شاخه در رسوب‌گذاری مخزن سد در دوره انتخابی برای اجرای مدل می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر رسوبات و آب خروجی از سد در حالت بازشدگی ۱۰۰٪ دریچه‌های تخلیه تحتانی

مدت زمان بازشدگی (ساعت)	$Q_{out}(\text{m}^3/\text{s})$	$V_w(\text{m}^3)$	$M_s(\text{ton})$	$V_s(\text{m}^3)$	$C_m(\text{kg/m}^3)$
۱۲	۹۸۰	۴۲۳۳۶۰۰۰	۷۰۳۶۵/۴۴۰۱	۲۶۵۵۲/۹۹۶۲۶	۱/۶۶
۲۴	۹۸۰	۸۴۶۷۲۰۰۰	۱۹۳۸۴۲/۵۱۸۲	۷۳۱۴۸/۱۲۰۰۹	۲/۲۹
۳۶	۹۸۰	۱۲۷۰۰۸۰۰۰	۳۴۸۸۶۱/۱۵۲۸	۱۳۱۶۴۵/۷۱۸۴	۲/۷۵
۴۸	۹۸۰	۱۶۹۳۴۴۰۰۰	۵۲۷۸۶۴/۴۲۱۸	۱۹۹۱۹۴/۱۲۱۴	۳/۱۲

جدول ۶- مقادیر رسوبات و آب خروجی از سد در حالت بازشدگی ۷۵٪ دریچه‌های تخلیه تحتانی

مدت زمان بازشدگی (ساعت)	$Q_{out}(\text{m}^3/\text{s})$	$V_w(\text{m}^3)$	$M_s(\text{ton})$	$V_s(\text{m}^3)$	$C_m(\text{kg/m}^3)$
۱۲	۷۳۵	۳۱۷۵۲۰۰۰	۵۶۶۳۰/۶۶۹۱۴	۲۱۳۷۰/۰۶۳۸۳	۱/۷۸
۲۴	۷۳۵	۶۳۵۰۴۰۰۰	۱۵۳۲۸۱/۴۰۳۸	۵۷۸۴۲/۰۳۹۱۷	۲/۴۱
۳۶	۷۳۵	۹۵۲۵۶۰۰۰	۲۷۳۷۳۹/۷۷۱۴	۱۰۳۲۹۸/۰۲۷	۲/۸۷
۴۸	۷۳۵	۱۲۷۰۰۸۰۰۰	۴۱۲۲۷۷/۹۷۷۶	۱۵۵۵۷۶/۵۹۵۳	۳/۲۵

جدول ۷- مقادیر رسوبات و آب خروجی از سد در حالت بازشدگی ۵۰٪ دریچه‌های تخلیه تحتانی

مدت زمان بازشدگی (ساعت)	$Q_{out}(m^3/s)$	$V_w(m^3)$	$M_s(ton)$	$V_s(m^3)$	$C_m(kg/m^3)$
۱۲	۴۹۰	۲۱۱۶۸۰۰۰	۴۱۱۸۸/۵۸۵۸۵	۱۵۵۴۲/۸۶۲۵۹	۱/۹۵
۲۴	۴۹۰	۴۲۳۳۶۰۰۰	۱۰۹۸۵۸/۹۲۴۹	۴۱۴۵۶/۱۹۸۰۶	۲/۶
۳۶	۴۹۰	۶۳۵۰۴۰۰۰	۱۹۳۸۵۶/۶۰۴۵	۷۳۱۵۳/۴۳۵۶۸	۳/۰۵
۴۸	۴۹۰	۸۴۶۷۲۰۰۰	۲۸۹۲۶۱/۲۵۸۸	۱۰۹۱۵۵/۱۹۲	۳/۴۲

جدول ۸- مقادیر رسوبات و آب خروجی از سد در حالت بازشدگی ۲۵٪ دریچه‌های تخلیه تحتانی

مدت زمان بازشدگی (ساعت)	$Q_{out}(m^3/s)$	$V_w(m^3)$	$M_s(ton)$	$V_s(m^3)$	$C_m(kg/m^3)$
۱۲	۲۴۵	۱۰۵۸۴۰۰۰	۲۳۳۳۲/۲۲۹۱۶	۸۸۰۴/۶۱۴۷۷۸	۲/۲
۲۴	۲۴۵	۲۱۱۶۸۰۰۰	۶۱۰۴۳/۱۰۱۵۴	۲۳۰۳۵/۱۳۲۶۵	۲/۸۸
۳۶	۲۴۵	۳۱۷۵۲۰۰۰	۱۰۶۸۷۸/۵۰۸۴	۴۰۳۳۱/۵۱۲۶۱	۳/۳۷
۴۸	۲۴۵	۴۲۳۳۶۰۰۰	۱۵۸۳۴۹/۳۳۳۳	۵۹۷۵۴/۴۶۵۴۱	۳/۷۴

که این افزایش راندمان به دلیل بالا بودن وزن رسوب خروجی در درصدهای بالای بازشدگی است. همچنین در هر سناریو، با افزایش مدت زمان باز نگه داشتن دریچه‌ها به دلیل خروج رسوبات بیشتر، راندمان تخلیه نیز افزایش می‌یابد.

۳-۷- نسبت رسوب به آب تخلیه شده

مقایسه وزن رسوبات خروجی نسبت به حجم آب خروجی از مخزن در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی (جدول (۱۰)) نشان داد که با کاهش درصد بازشدگی دریچه‌ها، به ازای حجم آب از دست رفته، رسوبات بیشتری توسط دریچه‌ها تخلیه می‌شود و در هر سناریو، با افزایش مدت زمان باز نگه داشتن دریچه‌ها، به دلیل خروج رسوبات بیشتر، نسبت رسوبات تخلیه شده به حجم آب از دست رفته نیز افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهند که بیشترین حجم آب و وزن رسوبات تخلیه شده در حالت حداکثر ظرفیت خروجی دریچه‌ها (۱۰۰ درصد بازشدگی) و باز نگه داشتن آن‌ها به مدت ۴۸ ساعت بوده و کمترین حجم آب و وزن رسوبات در بازشدگی ۲۵ درصدی و مدت زمان ۱۲ ساعت از سد تخلیه می‌گردد. همچنین با افزایش درصد باز شدگی دریچه‌ها، غلظت رسوبات خروجی از طریق دریچه‌ها به مراتب کمتر می‌شود که این کاهش غلظت به دلیل بالا بودن نسبت حجم آب خروجی به وزن رسوب خروجی در درصدهای بالای بازشدگی می‌باشد. در هر سناریو، با افزایش مدت زمان باز بودن دریچه‌ها، به دلیل خروج رسوبات بیشتری نسبت به حجم آب خروجی، غلظت رسوبات تخلیه شده نیز افزایش می‌یابد.

۳-۶- راندمان تخلیه رسوب

راندمان تخلیه رسوب در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی سد (جدول (۹)) نشان داد که با افزایش درصد باز شدگی دریچه‌ها، راندمان تخلیه رسوب به مراتب بیشتر می‌شود

جدول ۹- راندمان تخلیه در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود

راندمان تخلیه (درصد)				درصد بازشدگی دریچه‌های تخلیه تحتانی سد
مدت زمان باز نگه‌داشتن دریچه‌ها (ساعت)				
۴۸	۳۶	۲۴	۱۲	۱۰۰
۲۷/۶۹	۲۲/۲۶	۱۴/۷۲	۶/۶۶	۷۵
۲۱/۶۲	۱۷/۴۷	۱۱/۶۴	۵/۳۶	۵۰
۱۵/۱۷	۱۲/۳۷	۸/۳۴	۳/۹	۲۵
۸/۳۱	۶/۸۲	۴/۶۴	۲/۲۱	

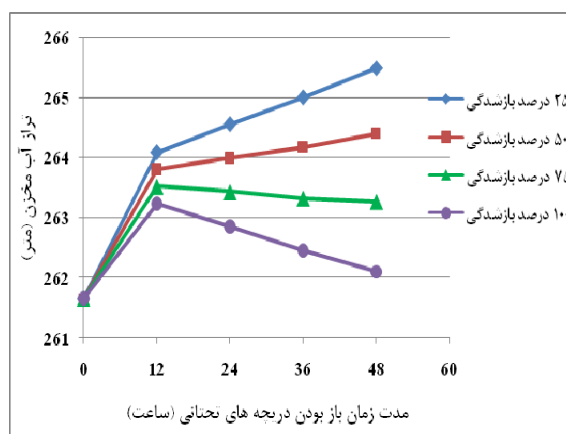
جدول ۱۰- نسبت وزن رسوبات خروجی به حجم آب خروجی در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود

نسبت وزن رسوبات خروجی (تن) به حجم آب خروجی (میلیون متر مکعب)				درصد بازشدگی دریچه‌های تخلیه تحتانی سد
مدت زمان باز نگه‌داشتن دریچه‌ها (ساعت)				
۴۸	۳۶	۲۴	۱۲	
۳۱۱۷/۱۱	۲۷۴۶/۷۷	۲۲۸۹/۳۳	۱۶۶۲/۰۷	۱۰۰
۳۲۴۶/۰۸	۲۸۷۳/۷۳	۲۴۱۳/۷۳	۱۷۸۳/۵۳	۷۵
۳۴۱۶/۲۶	۳۰۵۲/۶۷	۲۵۹۴/۹۳	۱۹۴۵/۷۹	۵۰
۳۷۴۰/۳	۳۳۶۶/۰۴	۲۸۸۳/۷۴	۲۲۰۴/۴۸	۲۵

۳-۸- تراز آب مخزن

مخزن خارج شده و تراز آب مخزن به میزان زیادی نسبت به بازشدگی‌های دیگر افت کرده و اتلاف آب بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر رسوبات بیشتری نسبت به رسوبات ورودی از مخزن نسبت به حالت‌های دیگر تخلیه می‌شود همچنین به دلیل حجم بالای آب خروجی از دریچه‌ها در این حالت، نسبت وزن رسوبات به حجم آب خروجی از مخزن پایین می‌باشد. بنابر این در صورتی که در خروج آب مخزن، محدودیتی وجود نداشته باشد، حالت فوق برای تخلیه جریان گل آلود انتخاب می‌شود. طبق نتایج به دست آمده، در بازشدگی ۲۵ درصد و به مدت ۴۸ ساعت به ازای حجم آب از دست رفته، رسوبات بیشتری نسبت به بازشدگی‌های دیگر تخلیه شده و تراز آب مخزن به طور ناگهانی به مقدار زیاد کاهش نمی‌یابد. لازم به ذکر است که در این حالت بازشدگی، راندمان تخلیه رسوبات پایین می‌باشد. بنابراین در صورتی که محدودیت در خروج آب مخزن وجود داشته و حفظ حجم آب مخزن مدنظر باشد، به طوری که به ازاء کمترین حجم آب خروجی از مخزن، مقدار رسوبات بیشتری از طریق دریچه‌ها تخلیه گردد، بازشدگی ۲۵ درصد و به مدت ۴۸ ساعت جهت تخلیه جریان گل آلود انتخاب می‌گردد که اتلاف آب کمتری اتفاق بیافتد. در صورتی که حد متوسطی برای خروج حجم آب از مخزن مدنظر باشد، گزینه‌های متفاوتی با توجه به در نظر گرفتن پارامترهای مربوطه در دست می‌باشد. در بازشدگی ۵۰ درصد دریچه‌ها به مدت ۴۸ ساعت، مقدار رسوبات خروجی به ازای حجم آب از دست رفته تقریباً مشابه با بازشدگی ۲۵ درصد به مدت ۳۶ ساعت می‌باشد. در بازشدگی ۵۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت، راندمان تخلیه رسوب و حجم آب خروجی نسبت به بازشدگی ۲۵ درصد به مدت ۳۶ ساعت بیشتر می‌باشد. در این شرایط با توجه به اهمیت آب، یکی از این دو گزینه می‌تواند انتخاب گردد. در صورتی که با کمبود آب مواجه بوده و حفظ حجم آب مخزن در دستور کار قرار گیرد، گزینه بازشدگی ۲۵ درصدی دریچه‌ها به مدت ۳۶ ساعت نسبت به حالت دیگر

در شکل (۱۶) تغییرات تراز آب مخزن با توجه به رابطه تراز-حجم آب مخزن سد سفیدرود در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی سد ملاحظه می‌شود. نتایج نشان دادند که تراز آب مخزن با گذشت زمان از بازشدگی‌های ۷۵ و ۱۰۰ درصدی دریچه‌ها، کاهش داشته و در بازشدگی‌های ۵۰ و ۲۵ درصد، افزایش می‌یابد. به این ترتیب بالاترین تراز آب مخزن در حالت ۲۵ درصد بازشدگی دریچه‌ها به مدت ۴۸ ساعت و کمترین مقدار آن مربوط به ۱۰۰ درصد بازشدگی به مدت ۴۸ ساعت می‌باشد.



شکل ۱۶- تغییرات تراز آب مخزن در شرایط مختلف عملکرد دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود

۳-۹- عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی

با مقایسه نتایج پارامترهای مورد بررسی و وجود آب کافی در مخزن برای خروج جریان گل آلود، عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفیدرود برای تخلیه جریان گل آلود تعیین شد. نتایج نشان دادند که علی‌رغم بالاترین راندمان تخلیه در بازشدگی ۱۰۰ درصد و مدت ۴۸ ساعت، حجم بالایی از آب

انحرافی می‌گذرد و در مواقعی که جریان خروجی از سد دارای غلظت بالایی است، می‌توان با بستن ورودی‌های شبکه از ورود رسوبات جلوگیری کرد، که در این صورت شبکه در مدت کمتری بسته خواهد بود و امر آبیاری مختل نخواهد شد. همچنین درخصوص ترمیم دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی سد در اثر خروج جریان گل‌آلود، انجام عملیات پوشش فلزی دریچه‌ها پیشنهاد می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Fan, J., Morris, G. L., "Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118 (3), 354-369.
- [2] ICOLD, "World Register of Dams, Update", International Commission on Large Dams, Paris, 1999.
- [3] Water Research Institute, "Sedimentation in the Reservoir of Large Dams", Ministry of Energy, Iran, 2000.
- [4] De Cesare, G., Muller, P., Schleiss, A., "Experiments on the Entrainment of Sediment into Suspension by a Dense Bottom Current", Journal of Geophysical Research (Oceans), 2009, 98 (C3), 4793-4807.
- [5] Hay, A. E., "Turbidity Currents and Submarine Channel Formation in Rupert Inlet", Journal of Geophysical Research, 1987, 92, 2883-2900.
- [6] Forel, F. A., "Theorie du ravin sous-lacustre", Le leman, F. Rouge, Lausanne. Switzerland, 1892, V.1, 381-386.
- [7] Parker, G., Fukushima, Y., Pantin, H. M., "Self-Accelerating Turbidity Currents", Journal of Fluid Mechanics, 1986, 171, 145-181.
- [8] Farrell, G. J., Stefan, H. G., "Mathematical Modeling of Plunging Reservoir Flows", Journal of Hydraulic Research, 1988, 26 (5), 525-537.
- [9] Choi, S. U., "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, 1999, 37 (2), 257-271.
- [10] Altinakar, M. S., Graf, W. H., Hopfinger, E. J., "Water and Sediment Entrainment in Weakly Depositing Turbidity Current on Small Slopes", Proc., XXV Congr. Int. Ass. Hydr. Res, 1993.

اولویت دارد. همچنین نتایج نشان دادند که در بازشدگی ۷۵ درصد به مدت ۴۸ ساعت، مقدار رسوبات خروجی به ازای حجم آب از دست رفته تقریباً مشابه با بازشدگی ۵۰ درصد به مدت ۳۶ ساعت است. در بازشدگی ۷۵ درصد به مدت ۴۸ ساعت، راندمان تخلیه رسوب و حجم آب خروجی نسبت به بازشدگی ۵۰ درصد به مدت ۳۶ ساعت به مراتب بیشتر بوده که در این مورد نیز تعیین کننده بازشدگی بهینه اهمیت آب مخزن می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان دادند با ورود سیلاب به مخزن به صورت هم‌زمان در ابتدای شاخه‌های قزل اوزن و شاهرود و با توجه به شرایط ورودی دبی و غلظت، جریان گل‌آلود از طریق شاخه شاهرود زودتر به بدنه سد رسیده و زمان گشودن دریچه‌های تخلیه تحتانی را تعیین می‌کند. نتایج عددی در شبیه‌سازی پیشروی جریان گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود، مقایسه پروفیل غلظت رسوبات حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های میدانی و مقادیر بالای شاخص‌های تبیین و مقادیر کمتر شاخص‌های خطا، بیانگر قابلیت خوب مدل Mike3 در شبیه‌سازی جریان‌های گل‌آلود در مخزن سد سفیدرود می‌باشد. بررسی پروفیل غلظت رسوبات معلق نشان دهنده تشکیل جریان گل‌آلود در مخزن و پیشروی آن به سمت بدنه سد می‌باشد. نتایج نشان دادند که کاهش غلظت جریان گل‌آلود در مسیر حرکت آن در مخزن و ضخامت قابل توجه جریان گل‌آلود در نزدیکی بدنه سد، راندمان تخلیه رسوب و نسبت وزن رسوبات خروجی به حجم آب از دست رفته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی برای خروج جریان گل‌آلود در شرایطی تعیین شد که تا حد امکان اجازه خروج رسوبات به همراه سیلاب وجود داشته و در عین حال تراز آب مخزن به مقدار زیادی افت نکند. با توجه به هزینه‌های بسیار بالا و از دست دادن حجم قابل توجهی از آب مخزن در عملیات شاس که تاکنون برای رسوب‌زدایی در مخزن این سد مورد استفاده قرار گرفته، استفاده از روش تخلیه جریان‌های گل‌آلود می‌تواند راه حل اثر بخشی برای رفع رسوب‌گذاری در سد سفیدرود باشد که برخلاف عملیات شاس، ملاحظات ایمنی سد را در نظر گرفته و اثر مخربی بر محیط زیست پایین دست خود ندارد و به عنوان آسان‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش کاهش رسوبات در برنامه بهره‌برداری مخزن سد سفیدرود، توصیه می‌گردد. در حالت باز بودن دریچه‌ها به هنگام وقوع سیلاب، رسوبات در زمان کمتری از رودخانه و سدهای

- Turbidity Currents with Application to a Reservoir for Flood and Pollution Control in Chicago, Illinois", *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47 (3), 340-348.
- [20] Wang, Z. Y., Hu, C. H., "Strategies for Managing Reservoir Sedimentation", *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24 (4), 369-384.
- [21] Heidarnejad, M., Halvai, D., Bina, M., "The Proper Option for Discharge the Turbidity Current and Hydraulic Analysis of Dez Dam Reservoir", *World Applied Sciences Journal*, 2011, 13 (9), 2052-2056.
- [22] Tolouie, E., "Reservoir Sedimentation and De-siltation", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, 1993.
- [۲۳] شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان، "گزارش رسوب‌زدایی سد سفیدرود"، کمیته رسوب‌زدایی سد سفیدرود، ۱۳۷۰-۱۳۵۹.
- [24] DHI Software, "MIKE 3 Flow Model FM Manual, Hydrodynamic Module", Scientific Documentation, DHI Water and Environment, 2011.
- [۲۵] گروه مطالعات میدانی و محیط زیست مؤسسه تحقیقات آب، "مطالعات رسوب‌گذاری سد مخزنی سفیدرود"، گزارش نهایی عملیات میدانی سد سفیدرود، مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۶.
- [26] Smagorinsky, J., "General Circulation Experiment with the Primitive Equations", *Monthly Weather Review*, 1963, 91 (3), 99-164.
- [11] Lee, H. Y., Yu, W. S., "Experimental Study of Reservoir Turbidity Current", *J. Hydr. Eng. ASCE*, 1997, 123 (6), 520-528.
- [۱۲] محمدنژاد، ب.، شمسایی، ا.، "مدل‌سازی رسوب‌گذاری مخازن سدها در اثر جریان چگال"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۱۳۸۲.
- [۱۳] محمدنژاد، ب.، شمسایی، ا.، "مدل‌سازی عددی حرکت جریان‌های زیر سطحی در مخازن سدها"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران، ایران، ۱۳۸۷.
- [۱۴] رضائی، ی.؛ قمشی، م.، "بررسی میزان تأثیر جریان‌های غلیظ بر روند رسوب‌گذاری مخزن سد سفیدرود"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۹۰، ۲۵ (۴)، ۸۸۰-۸۷۴.
- [15] De Cesare, G., Schleiss, A., Hermann, F., "Impact of Turbidity Current on Reservoir Sedimentation", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127 (1), 6-16.
- [16] Lavelli, A., Boillat, J. L., De Cesare, G., "Numerical 3D Modeling of the Vertical Mass Exchange Induced by Turbidity Currents in Lake Lugano (Switzerland)", 5th International Conference on Hydro Science and Engineering, ICHE, 2002.
- [17] Huang, H., Imran, J., Pirmez, C., "Numerical Model of Turbidity Currents with a Deforming Bottom Boundary", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131 (4), 283-293.
- [18] Oehy, C. D., Schleiss, A. J., "Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133 (6), 637-648.
- [19] Sequeiros, O. E., Cantero, M. I., Garcia, M. H., "Sediment Management by Jets and

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Dam Bottom Outlet Gates on Venting of Turbidity Current (Case Study: Sefid-Rud Dam)

Nafiseh Torkamanzad ^{a,*}, Bayram Ali Mohammadnezhad ^b, Javad Behmanesh ^a

^a MS Student of Water Structures, Department of Water Engineering, University of Urmia, Iran

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Iran

Received: 13 October 2013; **Accepted:** 06 November 2013

Keywords:

Reservoirs sedimentation, Turbidity current, Mike3, Sefid-Rud dam, Bottom outlet gates.

1. Introduction

In many cases, with entering the floods in the reservoirs of dams, turbidity currents are occurred at the bottom of reservoir. This current is one of agents in sedimentation and reducing the water capacity of reservoirs and useful life of dams. Opening bottom gates is a conventional method of this currents venting and preservation of the useful volume of the reservoir. Sefid-Rud reservoir dam is the largest hydroelectric dam in Gilan which has a lot of sedimentation problems. In this research, advancing the turbidity current in Sefid-Rud reservoir dam was surveyed and the effect of bottom gates of Sefid-Rud dam on venting of turbidity current was evaluated in different scenarios by using Mike3 Model.

2. Methodology

2.1. The Mike3 model

Mike3 is a three-dimensional numerical model which has developed by the Danish Hydraulic Institute for simulation of free-surface flows, cohesive/non cohesive sediment transport and water quality using structured or unstructured grids. There are different modules for unstructured grids in Mike3 model. In this research, the hydrodynamic module was used for simulation according to the features of this module. The model based on unstructured grids uses a finite volume method to integrate numerical equations [1].

2.2. Sefid-Rud dam and field measurements

Sefid-Rud reservoir dam is located at the 200 km distance in northwest of Tehran and 100 KM from Caspian Sea near the Manjil city, at downstream of the confluence of Ghezel-Ozan and Shah-Rud rivers. The Sefid-Rud dam is a buttress concrete dam, with 106 m height, normal level 271.65 m and has 5 bottom outlet gates, 2 middle gates and 2 surface weirs. At the time of operation, water volume was about 1.8 milliard cubic meters but due to the sedimentation has been reduced to about 1.16 milliard cubic meter. In Sefid-Rud dam, water sampling was carried out in three turbidity currents that occurred during the floods. The times of water sampling for the determination of suspended sediments concentration were May and June 2006 (stage 1), November and December 2006 (stage 2) and March and April 2007 (stage 3). In this research, the third stage measurements were used to calibrate the numerical model according to the choice of time for the simulation [2].

2.3. Input data of numerical model

2.3.1. Grids and bathymetry

The topography map of reservoir Sefid-Rud dam was used to define the area geometry. The Mike3 model uses triangular elements for unstructured grids. According to time limits, providing accuracy and model stability, the optimum grid was chosen. The bathymetry of reservoir was generated by using the method of interpolation.

* Corresponding Author

E-mail addresses: n.torkamanzad@yahoo.com (Nafiseh Torkamanzad), b.mohammadnezhad@urmia.ac.ir (Bayram Ali Mohammadnezhad), j.behmanesh@urmia.ac.ir (Javad Behmanesh).

2.3.2. Boundary conditions

Boundary conditions were specified at the inflow boundaries contained Gezel-Ozan and Shah-Rud rivers and outflow of bottom outlet gates. The daily discharge hydrograph and concentration of suspended sediments diagram for 33 days (April 12, 2007 to May 14, 2007) were used at the inflow boundaries. Output discharges values from Sefid-Rud dam were entered model according to scenarios for opening the bottom outlet gates. Also boundary conditions at the dam site such as water surface elevation and concentration of suspended sediments were entered 261.65 and zero (i.e. clear water), respectively.

2.3.3. Other input data

The turbulence was modeled using eddy viscosity in Mike3. Log Law formula and Smagorinsky [3] formula were used for eddy viscosity at vertical and horizontal directions respectively. The bed roughness height was assumed 0.05 m based on bed material samples. The maximum CFL¹ number for the hydrodynamic model was 0.43, and for the advection-diffusion model was 0.27, which were both in the stability range of the model. Water and sediment particles density were determined 999.7 kg/m³ and 2650 kg/m³, respectively.

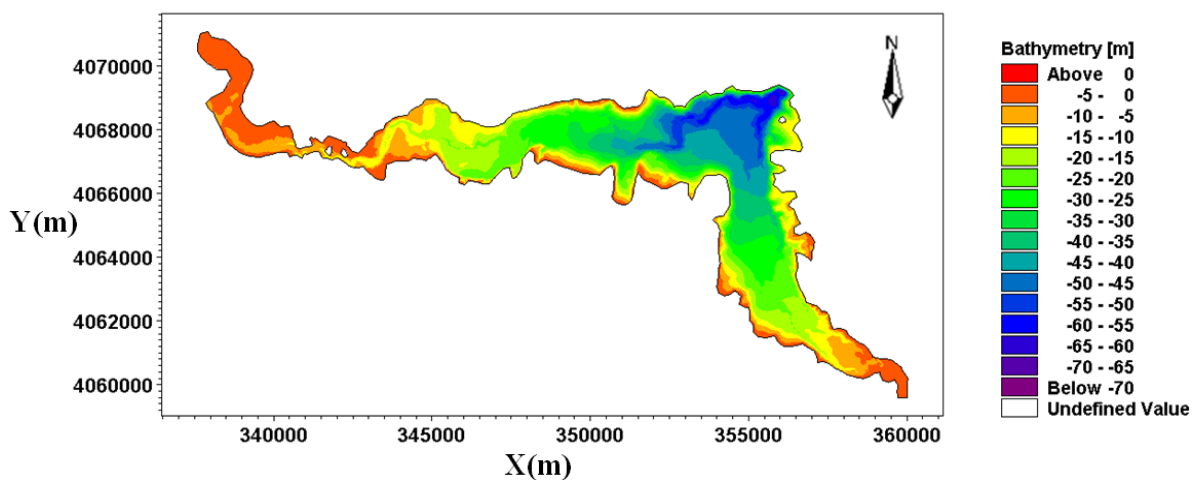


Fig. 1. Bathymetry of Sefid-Rud reservoir dam in Mike3 model

3. Results and discussion

3.1. Reaching time of turbidity current to the dam

According to entering flood into reservoir at the same time in beginning of Ghezel-Ozan and Shah-Rud branches, turbidity current reached the dam body through the Shah-Rud branch earlier than Ghezel-Ozan branch and determined the time opening of bottom outlet gates.

3.2. Model calibration

Investigation of suspended sediments concentration profile in cross-sections indicated the formation of turbidity current in reservoir and its progress toward the dam body. Also concentration profiles during the progressive of turbidity current from the beginning of entering Ghezel-Ozan and Shah-Rud rivers into reservoir showed that by reaching the dam body, sediments concentration is decreased due to the increasing volume of water and entrainment phenomenon. Modeling results were compared with field data in three cross-sections and were calibrated. High values of deterministic coefficient and low values of error coefficients showed the ability of model used in simulation of turbidity current in Sefid-Rud reservoir dam.

3.3. Sediments evacuation efficiency

Sediments evacuation efficiency in different operations of bottom outlet gates showed that increasing in gates opening because of increasing removed sediments weight was caused to increase the sediments evacuation efficiency. In each scenario, increasing the operation time of gates due to more sediments output increased the sediments evacuation efficiency.

3.4. Removed sediments respect to outflow water

Removed sediments weight respect to outflow water unit volume from reservoir in different operations of bottom outlet gates showed that by the decrease of gates opening, per volume of outflow water, more sediments were removed from gates. In each scenario, increasing the operation time of gates opening due to more sediments output increased the removed sediments respect to outflow water.

3.5. Water surface elevation in reservoir

Water surface elevation changes in different operations of bottom outlet gates according to elevation-volume of Sefid-Rud dam reservoir showed that in the time period of 48 hours for the gates operation, maximum and minimum of water surface elevation were occurred in the case of 25 and 100 percent gates opening respectively.

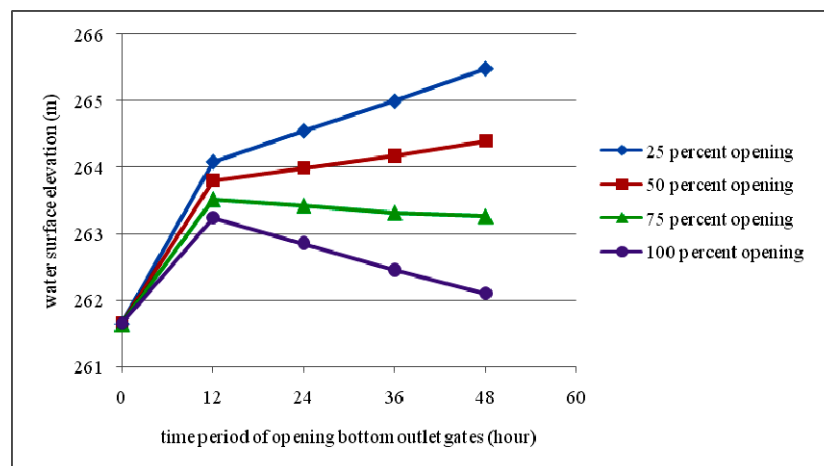


Fig. 2. Water surface elevation changes in different operations of bottom outlet gate at Sefid-Rud dam

3.6. Optimum operation of bottom outlet gates

According to the results of studied parameters and the existence of enough water in the reservoir for the venting of turbidity current in defined scenarios, optimum operation of bottom outlet gates was determined. The result showed that if there is no limit for outflow of reservoir water, the complete gates opening in time period of 48 hours is chosen for venting of turbidity current, but in the case of reservoir water volume preservation, the 25 percent gates opening in time period of 48 hours is chosen for venting of turbidity current that more sediments are removed by gates per minimum volume of outflow water from reservoir.

4. Conclusions

The results showed that according to entering flood into reservoir at the same time in beginning of Ghezel-Ozan and Shah-Rud branches, turbidity current reached the dam body through the Shah-Rud branch earlier than Ghezel-Ozan and determined the time opening of bottom outlet gates. Modeling results of suspended sediments concentration profile were compared with field data in three cross-sections and were calibrated. High values of deterministic coefficient and low values of error coefficients show the ability of the used model in simulation of turbidity current in Sefid-Rud reservoir dam. Also the optimum operation of bottom outlet gates of Sefid-Rud dam for venting of turbidity current in defined scenarios was studied. The results showed that according to sediment evacuation efficiency and removed sediments weight respect to outflow water volume from reservoir parameters and existence of enough water in reservoir for venting of turbidity current, the best option and optimum operation of bottom outlet gates can be determined.

5. References

- [1] DHI Software, "MIKE 3 Flow Model FM Manual, Hydrodynamic Module", Scientific Documentation, DHI Water and Environment, 2011.
- [2] Water Research Institute Field Measurements and Environmental Group, "Sedimentation Studies of Sefid - Rud Reservoir Dam", Final Report of Sefid-Rud Dam Field works, 2007.
- [3] Smagorinsky, J., "General Circulation Experiment with the Primitive Equations", Monthly Weather Review, 1963, 91 (3), 99-164.