

## بررسی عددی تخلیه جریان پر رسوب رودخانه در زمان سیلاب از مخزن سدها (مطالعه موردی سد رودبار)

میشم فاضلی<sup>۱\*</sup>

راحله قمی<sup>۲</sup>

### چکیده

رسوب گذاری در مخازن سدها به عنوان عاملی تاثیرگذار در کاهش عمر مفید و ظرفیت مخزن، اختلال در بهره برداری از سد، انسداد و فرسایش سازه های آبیگیر، دریچه های تخلیه کننده و متعاقباً افزایش هزینه های نگهداری و سایر زیان های مرتبط، شناخته می شود. این مسئله اهمیت شناخت رفتار هیدرولیکی جریان غلیظ در مخازن سدها را اثبات می نماید. در این تحقیق، روند پیشروی جریان غلیظ رسوبی در مخزن رودبار لرستان توسط نرم افزار Mike3 بررسی شده است. هدف از تحقیق، استحصال حجم مفید مخزن، از طریق تخلیه حداکثری جریان غلیظ رسوبی از دریچه های تخلیه کننده تحتانی می باشد. شبیه سازی سه بعدی هیدرودینامیک جریان و رسوبات در این مخزن صورت گرفته و با فرض ثابت بودن سطح تراز آب مخزن، به طراحی سناریوهای مدل سازی و محاسبه جرم رسوبات تخلیه شده از طریق دریچه های تخلیه کننده تحتانی و سرریز، در هر سناریوی شبیه سازی پرداخته شده است. به عبارتی دیگر، تمام سناریوها با فرض شرط عدم افت تراز آب مخزن، طراحی شده اند. نتایج نشان می دهد، با افزایش دوره بازگشت سیلاب، و به طبع آن افزایش دبی آب ورودی و کاهش غلظت جرمی رسوبات ورودی، راندمان تخلیه رسوب، که به صورت جرم رسوبات تخلیه شده به جرم رسوبات ورودی تعریف گردیده است، افزایش می یابد به طوری که راندمان تخلیه رسوب در سیلاب با دوره بازگشت دو ساله، رو به افزایش بوده و در سیلاب با دوره بازگشت بیست ساله، به بالاترین میزان می رسد. به طور کل بیشترین راندمان تخلیه رسوب، متناسب با سیلاب با دوره بازگشت بیست ساله و برابر ۱۷ درصد می باشد.

### واژه های کلیدی

شبیه سازی سه بعدی، رسوب گذاری جریان پر رسوب ورودی، تخلیه رسوب، راندمان، سد رودبار لرستان

<sup>۱\*</sup> استادیار دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. m.fazeli@srbiau.ac.ir

<sup>۲</sup> دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

## مقدمه

می‌توانند در پایین دست انتشار یابند. این مقدار برای بازشدگی ۲۵٪ هر دو دریچه تحتانی بسیار کمتر است. بنابراین بازشدگی ۵۰٪ دو دریچه یا بسته نگهداشتن یکی از آنها و باز بودن ۱۰۰٪ دیگری، بهترین حالت ممکن برای از دست دادن کمترین میزان آب و در نتیجه بازدهی تخلیه‌ی بهینه می‌باشد (Poyry (2016)).

در مطالعه روی روند رسوب‌شویی مخزن سد سفید رود، روش تخلیه جریان‌های گل‌آلود به‌عنوان راه حل اثر بخشی برای رفع رسوب‌گذاری در این سد، همچنین عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی سد سفید رود در سناریوهای تعریف شده برای خروج جریان گل‌آلود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد 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 گل‌آلود، می‌توان بهترین گزینه و عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی را تعیین کرد و به‌عنوان آسان‌ترین و کم هزینه‌ترین روش کاهش رسوبات در برنامه بهره‌برداری مخزن سد سفید رود توصیه نمود (ترکمانزاد و همکاران (۱۳۹۳)). شبیه‌سازی روند رسوب‌گذاری در شرایط رسوب‌شویی و جریان آب و رسوب در حد فاصل سد دز تا سد تنظیمی دز با استفاده از نرم افزار MIKE11، با هدف پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در زمان فلاشینگ مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق مدل در دو شرایط بهره‌برداری سد تنظیمی دز (رقوم بهره‌برداری حداقل و حداکثر) اجرا گردید و نتایج هر یک جداگانه بررسی و سپس با هم مقایسه گردید (فاضلی پور و همکاران (۱۳۹۰)). در تحقیقی دیگر با استفاده از نرم‌افزار GSTARS3 به بررسی رسوب‌گذاری در مخزن سد زنور با به‌کارگیری داده‌های رودخانه زنور برای سال‌های ۸۸ تا ۹۱ پرداخته شده است. محاسبات حاصل از مدل‌سازی، حجم رسوبات را پس از ۵۰ سال برابر ۱/۹ میلیون متر مکعب نشان می‌دهد و با توجه به حجم مخزن سد که برابر ۵/۱ میلیون مترمکعب است بعد از ۵۰ سال ۳۷ درصد حجم مخزن پر خواهد شد. با توجه به حجم رسوبات وارد شده به مخزن سد، استفاده از راهکارهای مناسب به‌منظور کنترل کاهش حجم رسوبات همانند روش دریچه و روش فلاشینگ توصیه شده است (صادقی و حسن

اصولاً زمانی که سیالی با جرم مخصوصی بیشتر از حد معینی، وارد محیط سیالی با جرم مخصوص دیگر شود، پدیده جریان غلیظ اتفاق می‌افتد. جریان‌های غلیظ در رودها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و منابع عظیم آب به وجود می‌آیند و مشکلاتی از قبیل رسوب‌گذاری و زبان‌های ناشی از آن را در پی خواهند داشت. در بسیاری از مواقع با ورود سیلاب به مخازن سدها، جریان‌های گل‌آلود در کف مخزن ایجاد می‌شوند. این جریان یکی از عوامل رسوب‌گذاری و کاهش ظرفیت آب مخازن و عمر مفید سدها می‌باشد. گشودن دریچه‌های تحتانی سد، روش متداول تخلیه این جریان‌ها و حفظ حجم مفید مخزن می‌باشد. در این تحقیق، پیشروی جریان گل‌آلود در مخزن سد رودبار لرستان و تاثیر میزان بازشدگی دریچه‌های تحتانی سد بر تخلیه جریان گل‌آلود در سناریوهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار Mike3 مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با توجه به پارامترهای راندمان تخلیه رسوب و نسبت وزن رسوبات خروجی از مخزن به وزن رسوبات ورودی به آن، با فرض ثابت بودن تراز آب مخزن، می‌توان بهترین گزینه و عملکرد بهینه دریچه‌های تخلیه تحتانی را تعیین کرد.

کمیسیون بین المللی سدهای بزرگ اعلام کرده که سالانه ۱ تا ۲ درصد از ظرفیت ذخیره‌ی مخازن سدهای دنیا در اثر رسوبگذاری از دست می‌رود (Fan and Morris (1992)). نرخ رسوبگذاری در مخازن ایران نیز سالانه حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد ظرفیت اولیه تخمین زده شده است (ICOLD(1999)). در مطالعه‌ای جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی «مطالعه عددی تخلیه جریان چگال در سد رودبار لرستان»، از مدل ANSYS CFX استفاده شده است. مدل‌سازی‌ها برای تراز نرمال و مینیمم تراز و برای سیلاب‌های مختلف طی چهار سناریو و برای سه میزان بازشدگی ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر سناریو پارامترهایی نظیر حجم کل آب از دست رفته، درصد رسوبات خروجی به‌عنوان تابعی از رسوبات کل ورودی در طی سیلاب و درصد رسوبات خروجی که به بدنه رسیده‌اند، مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج کلی به این صورت است که، بازشدگی ۵۰٪ دریچه‌های تحتانی منجر به بازدهی تخلیه حدود ۳۵٪ می‌شود. علاوه بر آن، بیش از ۸۰٪ از رسوباتی که به بدنه سد می‌رسند،

هدف از این تحقیق بررسی قابلیت نرم افزار Mike3 در شبیه‌سازی حرکت جریان چگال در مخزن رودبار، برآورد راندمان تخلیه رسوب با فرض ثابت ماندن تراز آب مخزن، و پر بودن مخزن در آغاز مدلسازی، بررسی اثر دریاچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی و سرریز در تخلیه جریان چگال تحت فرض مذکور می‌باشد.

### معرفی مدل MIKE3

نرم‌افزار Mike3 یک مجموعه نرم‌افزاری سه‌بعدی است که توسط موسسه هیدرولیک دانمارک تهیه شده است. نرم‌افزار 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 و جابجایی رسوبات چسبیده و غیرچسبیده 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 نرم‌افزار Mike3 در حالت شبکه‌بندی نامنظم وجود دارد که با توجه به امکانات ماژول هیدرودینامیک<sup>۲</sup>، در این تحقیق از این ماژول و همچنین ماژول انتقال سیال گل<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی استفاده گردیده است.

نرم‌افزار Mike 3 FM قادر به شبیه‌سازی جریانات سه بعدی ناپایدار با در نظر گرفتن چگالی متغیر، عمق نگاشت<sup>۴</sup>، آشفتگی جریان، نیروی جذر و مد، نیروی کوریولیس، نیروی شکست امواج، اصطکاک بستر و نیروی باد و سایر عوامل جوی در محاسبات می‌باشد. این نرم‌افزار یک مدل حجم محدود صریح<sup>۵</sup> می‌باشد و بنابراین توانایی حل معادلات بر روی شبکه‌های نامنظم را داراست (DHI software(2011)).

مدل Mike3 flow model FM دارای ماژول‌های مختلفی است که هرکدام از ماژول‌ها فرآیند خاصی را شبیه‌سازی می‌کند. این ماژول‌ها عبارتند از:

هیدرودینامیک (Hydrodynamic Module-HD)، انتقال (Transport Module)، کیفیت آب (ECO Lab

زاده (۱۳۹۴)). شبیه‌سازی سه‌بعدی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد نهند تبریز با استفاده از نرم‌افزار MIKE3 انجام و به این نتیجه رسیده که سالانه حدود ۰/۱۲۵ میلیون مترمکعب رسوب وارد مخزن سد نهند می‌شود و در صورتی که هیچگونه عملیات رسوب‌زدایی انجام نگیرد پس از ۶۶ سال، مخزن سد غیر قابل بهره‌برداری خواهد بود (عاشوری (۱۳۹۳)). یک مدل عددی جهت کنترل بازدهی رسوب‌شویی در مخزن سدها ارائه گردیده که در آن میدان جریان و بار معلق جامد شبیه‌سازی شده است. نرم‌افزاری سه‌بعدی که در آن معادلات حرکت (معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس<sup>۱</sup>) به همراه معادله انتقال رسوب حل می‌گردد. در این مدل از روش  $k-\epsilon$  استاندارد برای مدلسازی آشفتگی استفاده شده و مزیت اصلی آن، استفاده از روش ریز شدن مش یا به اصطلاح AMR در شبکه‌بندی میدان جریان است. بررسی‌ها نشان داد در سناریوی با هیدروگراف ۱۰۰ ساله، با وجود بسته بودن خروجی تحتانی در بیش از نیمی از زمان شبیه‌سازی، حجم رسوبات استخراج شده از مخزن بسیار بیشتر از دو سناریوی دیگر است (مهاجری و صفرزاده (۱۳۹۴)). در تحقیقی، مطالعه رسوب‌شویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سدها صورت گرفته است. در این تحقیق، رسوبات مجاور دریاچه‌های تخلیه‌کننده به شکل موضعی حذف گردیده و میزان گسترش حد تاثیر آن محدود است، از طرفی به دلیل اتلاف آب پایین در این روش، ارائه‌ی یک راهکار مناسب برای افزایش حد تاثیر فرآیند رسوب‌شویی تحت فشار می‌تواند گامی برای افزایش عمر سد و همچنین نجات آبگیرها با کمترین اتلاف آب باشد (توفیقی و همکاران (۱۳۹۴)).

در تحقیقی میزان تاثیر جریان‌های غلیظ بر روند رسوب‌گذاری مخزن سد سفید رود با استفاده از مدل رایانه‌ای TCM و در یک دوره ۳۰ ساله مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان دادند که در صورت خروج جریان‌های غلیظ از سد، روند کاهش حجم سالیانه مخزن کمتر می‌شود (رضانی و قمشی، ۱۳۹۰).

<sup>۴</sup> Bathymetry

<sup>۵</sup> Explicit

<sup>۱</sup> Navier-Stokes

<sup>۲</sup> Hydrodynamic module

<sup>۳</sup> Mud transport

• معادلات انتقال و پخش (شوری و دما)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] c + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) - k_p c + c_s s \quad (3)$$

در معادلات پیوستگی و مومنوم،  $x$ ،  $y$  و  $z$  مختصات کارترین در جهت‌های طولی، عرضی و قائم،  $u$ ،  $v$  و  $w$  مولفه‌های سرعت در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $\square$  تراز سطح آب،  $d$  عمق آب ساکن،  $h$  عمق کل آب ( $h = \square + d$ )،  $g$  شتاب گرانش،  $S$  دبی ناشی از چشمه و چاه،  $SS$  مومنوم ناشی از چشمه و چاه،  $u_s$  و  $v_s$  سرعت‌هایی که آب به داخل آب ساکن جریان می‌یابد،  $f = 2 \square \sin \theta$  پارامتر کریولیس ( $\Omega$ ): سرعت زاویه‌ای چرخشی،  $\theta$ : عرض جغرافیایی)،  $\rho$  چگالی آب،  $\rho_0$  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 پخش افقی است (DHI software(2011)).

### منطقه مورد مطالعه

سد رودبار لرستان از نظر تقسیمات کشوری در استان لرستان، صد کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز، در مختصات جغرافیایی  $49^{\circ}41'7''$  طول شرقی و  $32^{\circ}54'23''$  عرض شمالی روی رودخانه رودبار (از سرشاخه‌های رودخانه دز شرقی) و در محدوده‌ی رشته کوه زاگرس در غرب ایران واقع شده است. مورفولوژی رودخانه در این منطقه و چرخش مسیر آن در پایین دست محل احداث سد به گونه‌ای است که اختلاف ارتفاع طبیعی حدود ۳۰۰ متر را ایجاد می‌کند (در محلی که رودخانه، نام الکن به خود می‌گیرد). توپوگرافی منطقه بسیار خشن و تکتونیزه بوده و هدف از طرح، استفاده از پتانسیل توپوگرافی منطقه برای اخذ انرژی الکتریکی است. نیروگاه این سد دارای ظرفیت ۴۵۰ مگاوات می‌باشد.

رودخانه رودبار از سرشاخه‌های اصلی شاخه شرقی دز یا بختیاری می‌باشد. سرشاخه‌های اصلی این رودخانه شامل رودخانه‌های قلیان (که خود از سرشاخه‌های دره دزدان، داعی و دره لکو تشکیل شده است)، رودخانه کاکلستان و رودخانه و

(Module-EL، انتقال رسوبات چسبیده Mud Transport)

(Module-MT، انتقال رسوبات غیر چسبیده Sand)

(Transport Module-ST، ردیابی حرکت ذرات Particle)

(Tracking Module-PT، مازول هیدرودینامیک جزء

اساسی محاسباتی در کل مازول‌ها می‌باشد و به‌عنوان مبنایی برای سایر مازول‌ها است. خروجی این مازول به‌عنوان ورودی سایر مازول‌ها به‌کار گرفته می‌شود. به همین دلیل در انجام مدل‌سازی هیدرودینامیکی می‌بایست دقت بالایی را صرف کرد.

### معادلات حاکم بر مدل Mike3-FM

سیستم مدل‌سازی بر اساس حل عددی معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس با اعمال فرضیات سیال تراکم‌ناپذیر، فرض بوسینسک<sup>۱</sup> و فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. بنابراین مدل شامل معادلات بقاء، مومنوم، حرارت، شوری و چگالی است. در مدل Mike3 فرض بر آن است که چگالی تنها تابعی از حرارت و شوری می‌باشد عملاً به علت استفاده از این نرم‌افزار در مناطق ساحلی و نواحی کم عمق است از تاثیر فشار بر چگالی صرف‌نظر شده است. همچنین سیستم مختصات قائم به‌کار گرفته شده در مدل حاضر سیستم مختصات سیگما می‌باشد. در ادامه معادلات حاکم تعریف شده در سیستم مختصات دکارتی ارائه شده است (DHI software(2011)). جریان سه‌بعدی سیالات تراکم‌ناپذیر لزج را می‌توان از طریق معادلات بقای جرم، انرژی و معادله اندازه حرکت بیان کرد. این معادلات در واقع بیان ریاضی اصول پایستگی جرم، انرژی و اندازه حرکت هستند.

مدل هیدرودینامیک بر اساس حل عددی معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدزی تراکم‌ناپذیر سه‌بعدی با استناد به دو فرضیه بوسینسک و فشار هیدرواستاتیک می‌باشد.

معادلات حاکم عبارتند از:

• معادله پیوستگی:

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

• معادله مومنوم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + u_i SS \quad (2)$$

<sup>1</sup> Bossinesqu

بعدی (شکل (۲)) و همچنین تعداد ۲۰ لایه عمقی، در شبکه‌بندی قائم، لحاظ شده که در نتیجه تعداد کل المان‌های مدل سه‌بعدی برابر با تعداد ۴۸,۰۰۰ المان می‌باشد. ضمن اینکه به دلیل ماهیت جریان چگال، که در عمق تشکیل می‌گردد، برای دقت بیشتر و نمایش بهتر جریان چگال، ضخامت لایه‌های زیرین کمتر و به مرور و با حرکت از کف با سمت سطح آب، بر ضخامت لایه‌های مش‌بندی افزوده می‌گردد (شکل (۳) و (۴)).

#### • شرایط مرزی

برای اعمال شرایط مرزی از هیدروگراف سیلاب‌های احتمالی، در مرز ورودی و نیز منحنی دبی-اشل سرریز و تخلیه‌کننده تحتانی در مرز خروجی استفاده شده است. سیلاب‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دو دریچه تخلیه‌کننده، در قسمت چاهک<sup>۱</sup> اعمال شده که به دلیل خروج جریان از آنها، دبی منفی برای آنها در نظر گرفته شده است. برای محاسبه غلظت رسوبات ورودی در ابتدا با توجه به هیدروگراف غلظت رسوبات ورودی (شکل (۶))، غلظت‌های اولیه استخراج شده و سپس به دلیل عدم وجود اندازه‌گیری‌های میدانی، به کمک روابط زیر غلظت‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی محاسبه می‌گردند.

هرگان می‌باشند. این رودخانه در مسیر خود یک رشته ارتفاعات U شکل و به طول ۳۸ کیلومتر را دور زده و به رودخانه الکن تغییر نام پیدا می‌کند.

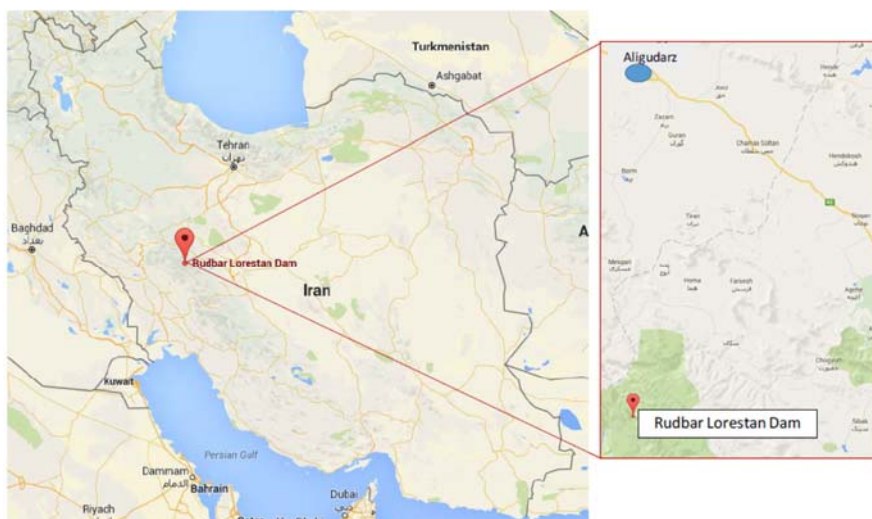
مساحت حوضه آبریز رودخانه تا محل احداث سد رودبار لرستان ۲۲۵۵ کیلومتر مربع و میزان متوسط جریان سالانه‌ی رودخانه در محل سد معادل ۳۰/۲ مترمکعب در ثانیه است.

#### اطلاعات ورودی به مدل

#### • شبکه‌بندی و عمق‌سنجی مخزن

جهت تعریف هندسه‌ی مخزن از نقشه توپوگرافی مخزن سد رودبار استفاده شده است. با توجه به مساحت مخزن (حدود ۴ کیلومتر مربع) می‌باشد، مختصات جغرافیایی حدود ۶۰۰ نقطه جهت نقاط مرزی مخزن و همچنین حدود ۱۵۰۰ نقطه از نقاط داخل مخزن و خط القعر استخراج و به مدل ارائه شده است. با توجه به اینکه حداکثر تراز مخزن ۱۷۶۴ متر می‌باشد، لذا پیاده کردن کانتور خطوط هم تراز با ارتفاع ۱۷۶۵ متر به‌عنوان مرزهای مخزن، اولین گام می‌باشد.

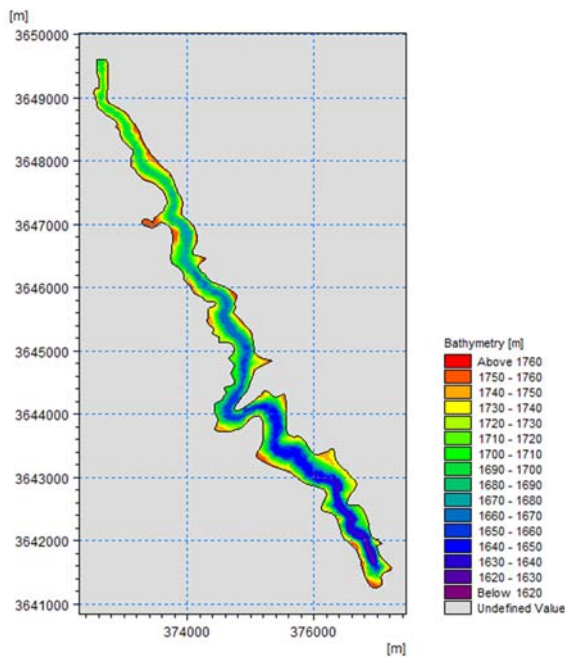
جهت ساخت شبکه‌ی نامنظم، نرم‌افزار Mike3 از المان‌های مثلثی استفاده می‌کند. برای تشکیل شبکه‌بندی مناسب و ساخت المان‌های بهینه، در نظر گرفتن عواملی همچون محدودیت زمان، تامین دقت و پایداری مدل الزامی است. با اعمال ملاحظات فوق، تعداد ۲۴۰۰ المان در شبکه‌بندی دو



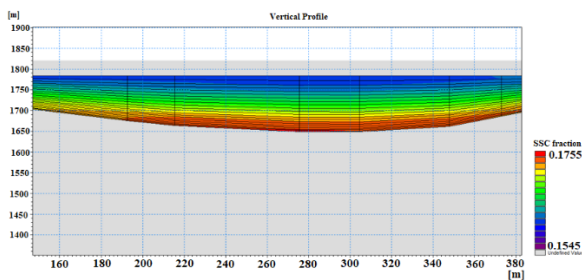
شکل (۱): موقعیت جغرافیایی مخزن رودبار لرستان

<sup>1</sup> source

تحقیق ضریب  $b$  به توصیه‌ی محققان Mulder and Syvitski (1995)، برابر با  $0.5$  در نظر گرفته شده در حالی که ضریب  $a$  می‌بایست برای هر مخزن بر اساس داده‌های موجود تعیین گردد. این مقدار بستگی به ویژگی‌های هیدرولوژیکی و جغرافیایی حوضه آبریز دارد. تنها داده‌ی موجود در زمینه بار معلق، جرم کل سالانه آن برابر با  $1/3$  میلیون تن می‌باشد (Poyry (2008)). از طرفی متوسط دبی ماهانه آب نیز در گزارش موجود است. بنابراین متوسط دبی ماهانه رسوبات،  $Q_s$ ، با استفاده از معادله (۴) و با تغییر در ضریب  $a$  جهت رسیدن به جرم کل رسوبات سالانه  $1/3$  میلیون تن محاسبه می‌گردد.

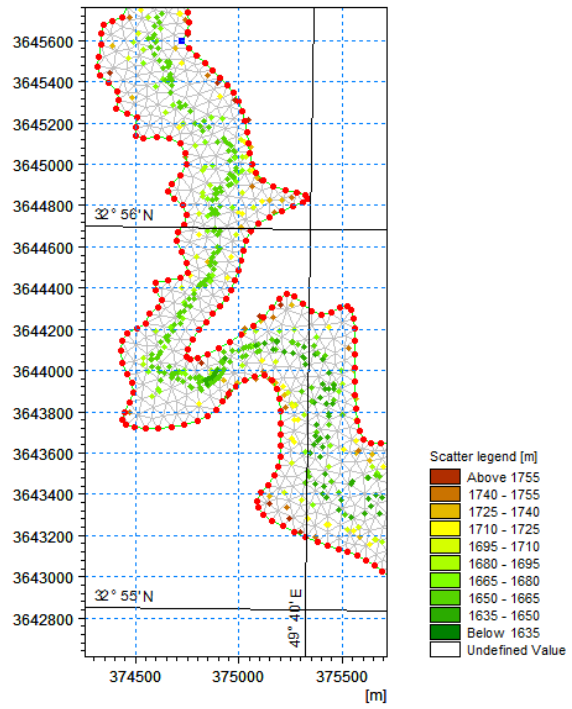


شکل (۳): پلان مخزن رودبار لرستان در نرم افزار MIKE3

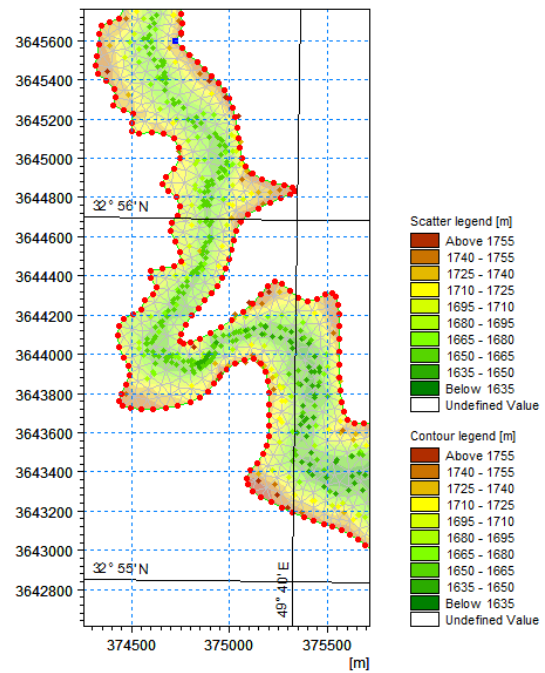


شکل (۴): نمونه ای از شبکه بندی در راستای عمق

لازم به ذکر است تمامی سناریوها با فرض کاملاً پر بودن مخزن (تراز نرمال برابر با ۱۷۵۶ متر) و در ابتدای فصل زمستان و آغاز سیلاب‌ها، اجرا شده‌اند. از سویی دیگر فرض بر این است که تراز مخزن ثابت بوده و در پایان شبیه‌سازی، تقریباً به تراز نرمال برسد. به عبارت دیگر، افت تراز آب مخزن صفر بوده و با



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) شبکه بندی افقی مدل، (ب): درونیایی مدل پس از شبکه بندی

رابطه بین دبی رسوبات معلق ( $Q_s$ ) و دبی آب ( $Q_w$ ) به شکل زیر می‌باشد:

$$Q_s = aQ_w^b \quad (4)$$

که ضرایب  $a$  و  $b$  بر اساس اطلاعات موجود جریان ماهانه و همچنین بار معلق مجاز سالانه تعریف می‌گردند. در این

به صورت یک سری زمانی به مدل داده شده است. بدیهی ست با افزایش دوره بازگشت سیلاب، به دلیل افزایش دبی آب ورودی، میزان شوری و به طبع آن غلظت جرمی رسوبات ورودی نیز کاهش خواهد یافت.

در این مدلسازی، آشفتگی با مفهوم لزجت گردابه‌ای<sup>۴</sup> مدلسازی می‌شود. لزجت گردابه‌ای در حالت سه‌بعدی به صورت جداگانه برای انتقال قائم و افقی توصیف می‌گردد. روابط به کار رفته در این شبیه‌سازی برای لزجت گردابه‌ای در جهت قائم و افق، به ترتیب، کی-اپسیلون<sup>۵</sup> و اسماکورینسکی<sup>۶</sup> به دلیل دقت بالای آنها می‌باشند. در این تحقیق ضرایب پخش افق و قائم جریان غلیظ رسوبی، به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۱ مترمربع بر ثانیه لحاظ شده‌اند.

به دلیل عدم وجود اطلاعات دقیق از اندازه ذرات معلق رسوبی در مخزن رودبار، به نمونه‌برداری‌های انجام شده از مخزن سد دز (در مراجع) و رودخانه رودبار، متوسط قطر ذرات ۵۰ میکرون در نظر گرفته شده است KWPA – Khuzestan (Water & Power Authority (2005)).

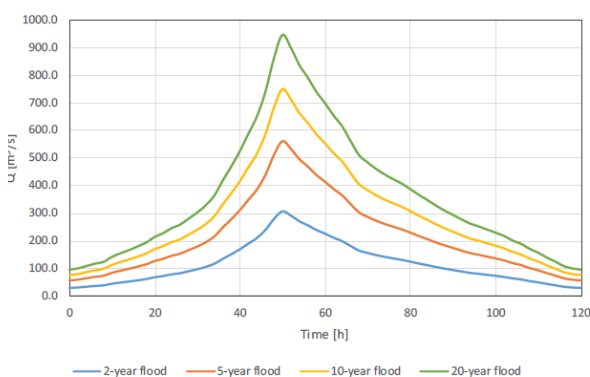
سرعت سقوط ذرات با توجه به قطر ۵۰ میکرون برابر با ۰/۰۲۲ متر بر ثانیه، زبری بستر برابر با ۰/۰۱ متر و تعداد لایه‌های بستر برابر با ۱ انتخاب می‌شوند.

مقادیر اولیه‌ی متغیرهای هیدرودینامیکی در این شبیه‌سازی، از آنجایی که محدوده مورد بررسی مخزن یک سد می‌باشد، از نوع ثابت انتخاب شده است به گونه‌ای که ارتفاع اولیه سطح آزاد برابر با تراز نرمال مخزن و ۱۷۵۶ متر و همچنین تمامی سرعت‌های اولیه صفر در نظر گرفته شده است. چگالی مخلوط آب و رسوبات برابر با ۱/۲ تن بر مترمکعب و چگالی ذرات برابر با ۲/۶ تن بر مترمکعب اندازه‌گیری شده است.

#### • صحت سنجی

در این مطالعه به دلیل عدم وجود داده‌های واقعی مورد نیاز برای کالیبراسیون و صحت سنجی، تنها امکان صحت سنجی از روابط تجربی و روند یابی سیلاب میسر می‌باشد. برآورد سرعت جریان چگال از معادله (۶) و مقایسه آن با سرعت متوسط حرکت جریان چگال می‌تواند تاییدکننده صحت

فرض ثابت بودن سطح آب مخزن، راندمان تخلیه رسوب محاسبه گردد. به همین دلیل برای تمامی سناریوها، در مرز خروجی، شرط مرزی مطابق با منحنی دبی-اشل سرریز به گونه‌ای تعریف شده است که با افزایش سطح تراز مخزن از ۱۷۵۶ متر، دبی خروجی معادل با آن، تخلیه گردد.



شکل (۵): هیدروگراف جریان ورودی سیلابهای مخزن رودبار (Poyry (2008))

#### • سایر پارامترهای ورودی به مدل

زمان شبیه‌سازی برابر با ۱۲۰ ساعت (۵ شبانه روز)، که برابر با طول دوره وقوع هر سیلاب، می‌باشد. گام‌های زمانی، سی دقیقه و فرکانس خروجی داده‌ها برابر ۲ می‌باشد (به ازای هر ۲ گام زمانی، یک خروجی ارائه می‌گردد).

ماژول هیدرودینامیک به عنوان پایه و اساس شبیه‌سازی بوده و خروجی آن به عنوان ورودی سایر ماژول‌ها استفاده می‌گردد. دیگر ماژول به کار رفته در این شبیه‌سازی، ماژول انتقال سیال گل<sup>۱</sup> می‌باشد.

چگالی مایعات تابعی از دما و شوری فرض می‌شود. چگالی بر ساختار جریان (سرعت جریان) و انتقال و انتشار پارامترهایی چون دما و شوری اثرگذار است. چگالی در مدل Mike3 را می‌توان به چهار صورت بدون وابستگی به دما و شوری (باروتروپیک<sup>۲</sup>)، وابسته به دما، وابسته به شوری و وابستگی همزمان به دما و شوری (باروکلینیک<sup>۳</sup>) مدل کرد (DHI software (2011)).

در این تحقیق جهت بررسی بهتر حرکت و لایه‌بندی جریان چگال در کف، چگالی سیال به صورت تابعی از شوری با شوری پایه ۱ واحد در نظر گرفته و شرط مرزی شوری در مرز ورودی

<sup>4</sup> Eddy viscosity

<sup>5</sup> K-epsilon formula

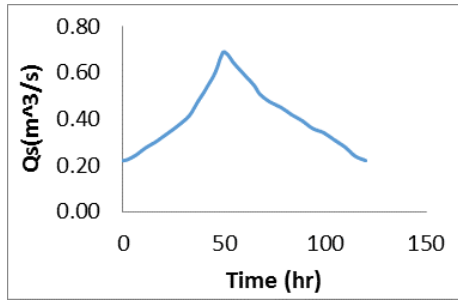
<sup>6</sup> Smagorinsky formula

<sup>1</sup> Mud transport

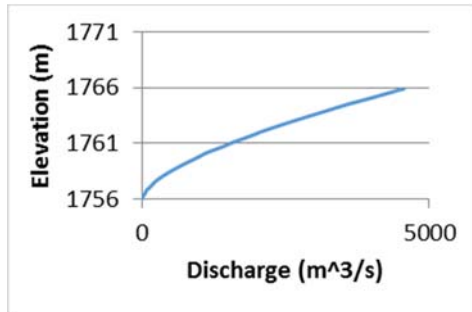
<sup>2</sup> barotropic

<sup>3</sup> baroclinic

۸۱..... بررسی عددی تخلیه جریان پر رسوب رودخانه در زمان سیلاب از مخزن سدها (مطالعه موردی سد رودبار)



شکل (۶): هیدروگراف ورودی رسوبات، سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله



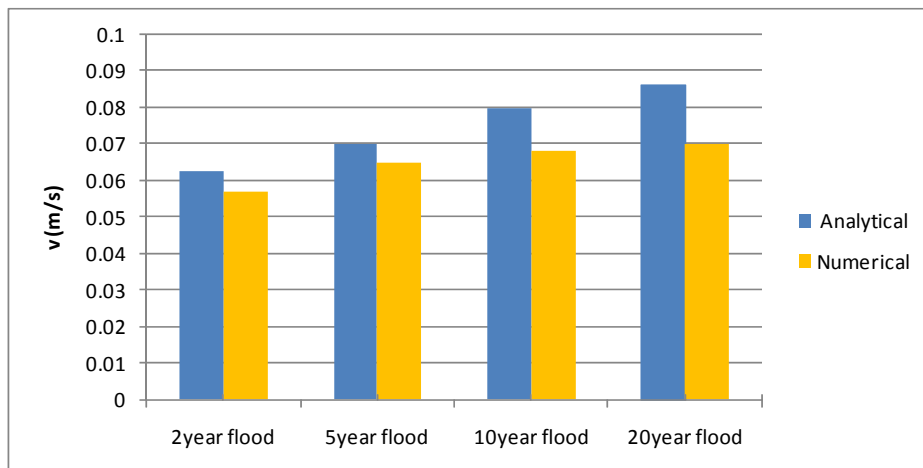
شکل (۷): منحنی دبی-اشل سرریز

شبیه‌سازی انجام شده باشد. برای محاسبه سرعت جریان چگال از رابطه زیر استفاده می‌شود:

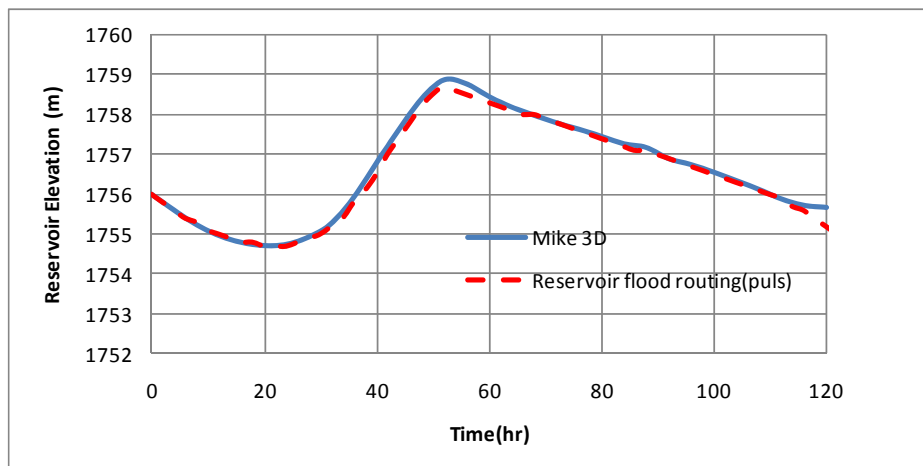
$$V = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} g h} \quad (۶)$$

که در آن  $\Delta\rho$  اختلاف چگالی،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $h$  برابر با ارتفاع جریان چگال در محل تشکیل پیشانی می‌باشد. در محاسبه سرعت جریان چگال ارتفاع جریان چگال حدود ۱۵ متر در کف مخزن و اختلاف چگالی از ۰/۰۸ تا ۰/۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

مشاهده می‌شود اختلاف حدوداً ۲۰ درصدی در سرعت متوسط پیشانی جریان چگال، با سرعت برآورد شده از روابط تحلیلی وجود داشته و سرعت‌های منطبق بر رابطه‌ی تحلیلی (معادله (۶)) بالاتر از سرعت متوسط پیشانی جریان چگال می‌باشند.



شکل (۸): اختلاف سرعت متوسط جریان چگال و سرعت تجربی پیشانی جریان چگال



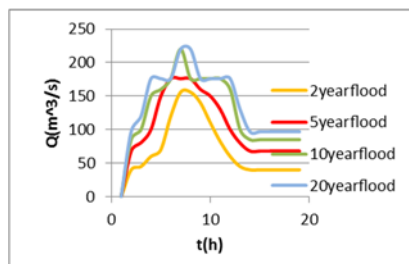
شکل (۹): صحت سنجی شبیه‌سازی از طریق روندیابی مخزن و انطباق سطح تراز مخزن در دو حالت



جدول (۱): برآورد غلظت جرمی رسوبات ورودی

	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	kg/s	kg/m <sup>3</sup>	lit/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	ton
	Qw	Qs	Qtotal	Qm(total)	چگالی کل	غلظت حجمی رسوبات	غلظت جرمی رسوبات	حجم رسوبات	جرم رسوبات
Oct	10.9	0.07	10.97	10989	1001.35	0.84	2.19	24760	64375
Nov	14.1	0.08	14.18	14201	1001.19	0.74	1.93	27252	70856
Dec	19.8	0.10	19.90	19920	1001.00	0.63	1.63	33371	86764
Jan	20.3	0.10	20.40	20421	1000.99	0.62	1.61	33789	87853
Feb	26.8	0.12	26.92	26939	1000.86	0.54	1.40	35067	91174
Mar	48.7	0.16	48.86	48888	1000.64	0.40	1.04	52336	136073
Apr	94.6	0.22	94.82	94861	1000.46	0.29	0.75	70589	183532
May	98.3	0.22	98.52	98567	1000.45	0.28	0.73	74355	193323
Jun	52.5	0.16	52.66	52695	1000.62	0.39	1.00	52586	136724
Jul	27.8	0.12	27.92	27942	1000.85	0.53	1.37	39542	102809
Aug	17.2	0.09	17.29	17311	1001.07	0.67	1.75	31103	80867
Sep	12.3	0.08	12.38	12394	1001.27	0.79	2.06	25453	66179
								500203.2	1300528

سازه) صورت می‌پذیرد. در سناریوی دوم، دریچه‌ی تخلیه‌کننده ثانویه، از ابتدا به صورت کامل باز، و دبی دریچه تخلیه‌کننده اصلی به گونه‌ای تعیین شده است که تراز آب مخزن در انتهای شبیه‌سازی، دچار افت نگردد. این دبی با تغییر در میزان دبی هیدروگراف سیلاب ورودی در دسترس، جهت ثابت نگه داشتن تراز آب مخزن، به صورت شکل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است ظرفیت دریچه تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه، برابر با ۲۷ مترمکعب بر ثانیه بوده که از ابتدا تا پایان دوره مدلسازی باز در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): دبی تنظیمی دریچه اصلی در سناریوی دوم

جدول (۲): سرعت متوسط حرکت جریان چگال

سیلاب با دوره	زمان رسیدن جریان چگال به بدنه سد (ساعت)	سرعت متوسط جریان چگال (متر بر ثانیه)
بازگشت ۲ ساله	۵۳	۰/۰۵۷
بازگشت ۵ ساله	۴۶	۰/۰۶۵
بازگشت ۱۰ ساله	۴۳٫۸	۰/۰۶۸
بازگشت ۲۰ ساله	۴۳	۰/۰۷

اختلاف بارز سرعت‌های تجربی با سرعت متوسط جریان چگال، روند نزولی آن از سیلاب با دوره بازگشت ۲ به سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله می‌باشد. که دقیقاً برخلاف روند صعودی همین اعداد در سرعت متوسط برآوردی می‌باشند. دلیل آن دخیل بودن اختلاف چگالی در رابطه‌ی (۷) است. چگالی در سیلاب‌های با دوره بازگشت پایین، بالاتر بوده و با افزایش دوره بازگشت سیلاب و متعاقباً افزایش دبی آب، چگالی کاهش و در نتیجه سرعت تجربی برآوردی نیز کم خواهد شد.

از سوی دیگر، با ارائه‌ی شرایط مرزی به کار برده در مدل Mike3 flow model، از جمله هیدروگراف ورودی هر سیلاب، منحنی دبی-اشل سرریز و دبی خروجی دریچه تخلیه‌کننده، در هر سناریو، به مدل‌هایی که قابلیت اجرای روندیابی سیلاب را دارند، مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل Mike3 با آن (شکل (۱۰))، اعتبار شبیه‌سازی سنجیده شد و انطباق نتایج حاصل از دو مدل فوق، نشان‌دهنده‌ی صحیح بودن شبیه‌سازی شامل توپوگرافی و عمق سنجی مخزن، هیدرودینامیک جریان و رسوبات می‌باشد.

### نتایج و بحث

دو سناریو جهت بررسی حرکت جریان چگال و راندمان رسوب شویی در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، هر دو دریچه تخلیه‌کننده تحتانی بسته، و تخلیه تنها از طریق سرریز و مطابق با شرط مرزی اعمالی (منحنی دبی-اشل این

که مطابق شکل (۱۱)، در پروفیل مخزن بین مقاطع (IP49) تا (IP68)، یعنی در فاصله طولی ۵۸۰۰ الی ۸۳۰۰ متر واقع گردیده است (شدیدترین خم حدوداً در ۶۹۰۰ متری رخ می‌دهد). بررسی تاثیر آن بر سرعت پیشانی جریان چگال، در جدول (۳) و شکل (۱۲) ارائه گردیده است.

### سرعت حرکت جریان چگال

سرعت متوسط جریان چگال، با توجه به طول مخزن در خط القعر (برابر با ۱۱ کیلومتر) و زمان رسیدن ذرات غلیظ رسوبی به بدنه سد محاسبه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد سرعت حرکت جریان چگال در سناریوهای ۱ و ۲ تفاوت چندانی نداشته و مطابق جدول (۲) می‌باشند.

همانطور که از نتایج مشخص است، جریان گل‌آلود پس از رسیدن به خم، دچار افت سرعت خواهد شد. این افت در مورد سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله صفر، و در سایر سیلاب‌ها به‌طور متوسط بین ۵ الی ۱۰ درصد می‌باشد. از سوی دیگر، در سیلاب‌های با دوره بازگشت ۲ و ۲۰ ساله، جریان گل‌آلود پس از عبور از خم، با ۵ الی ۶ درصد کاهش سرعت به سمت بدنه سد ادامه می‌دهد. اما در سیلاب‌های ۵ و ۱۰ ساله، جریان گل‌آلود پس از عبور از خم، سعی در بازیابی سرعت اولیه را داشته و با حدود ۱۲ الی ۱۹ درصد افزایش سرعت، به پیشروی در امتداد خط‌القعر ادامه می‌دهد.

### پروفیل طولی جریان چگال

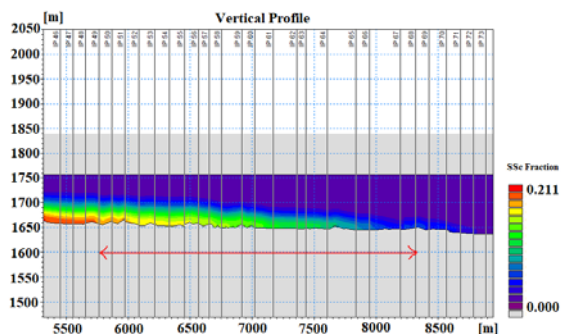
شکل (۱۳) نشان‌دهنده‌ی الگوی حرکت جریان چگال در مقطع طولی مخزن در زمان رسیدن جریان چگال به سد می‌باشد. موقعیت بدنه و پیشانی جریان چگال قابل رویت بوده و بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی فرم کلی جریان‌های گل‌آلود است. نتایج نشان می‌دهد به‌طور متوسط، پس از گذشت کمتر از یک روز از رسیدن جریان چگال به بدنه مخزن، جریان فوق کل محدوده مخزن را در نزدیکی بدنه سد تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین به‌دلیل سه‌بعدی بودن مدل، امکان تعیین سرعت حرکت و غلظت جریان چگال، در هر زمان و هر مقطع از مخزن میسر می‌باشد.

### پروفیل‌های غلظت و سرعت جریان چگال در عمق

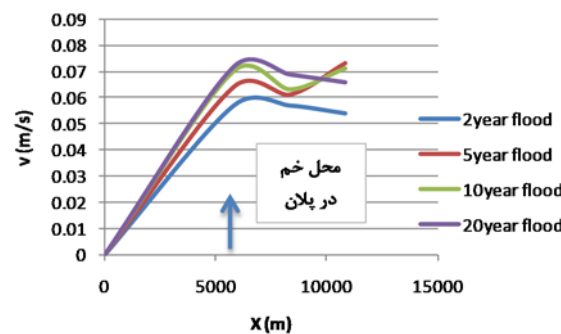
جهت بررسی پراکندگی ذرات و پخش ذرات غلیظ رسوبی، پروفیل‌های غلظت و سرعت حرکت آنها استخراج شده

جدول (۳): اثر خم بر سرعت جریان حرکت جریان چگال

سرعت پیشانی جریان چگال بعد از عبور از خم (متر بر ثانیه)	سرعت پیشانی جریان چگال در طول حرکت در خم (متر بر ثانیه)	سرعت پیشانی جریان چگال قبل از رسیدن به خم (متر بر ثانیه)	سیلاب با دوره
۰/۰۵۴	۰/۰۵۷	۰/۰۵۷	بازگشت ۲ ساله
۰/۰۷۳	۰/۰۶۱	۰/۰۶۴	بازگشت ۵ ساله
۰/۰۷۱	۰/۰۶۳	۰/۰۷	بازگشت ۱۰ ساله
۰/۰۶۶	۰/۰۶۹	۰/۰۷۲	بازگشت ۲۰ ساله



شکل (۱۱): محدوده وقوع خم در پروفیل مخزن رودبار



شکل (۱۲): سرعت حرکت پیشانی جریان چگال در طول مخزن و اثر خم در افت آن

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، هر دو سناریو با فرض پر بودن کامل مخزن در ابتدای شبیه‌سازی، و ثابت ماندن تراز آب مخزن در طول شبیه‌سازی در مورد سناریوی دوم، طرح شده‌اند. در ادامه به بررسی پارامترهای تاثیرگذار پرداخته خواهد شد.

از سوی دیگر، همانطور که در اشکال شماره (۲) و (۳) مشاهده می‌شود، یک خم در پلان مخزن رودبار وجود دارد

### راندمان تخلیه رسوب

نتایج حاصل از محاسبات مربوط به راندمان تخلیه رسوبات که به صورت معادله (۷) تعریف شده است، در جدول شماره (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است تمام محاسبات در مقطع مرجع (حدود ۳۰۰ متر قبل از دریاچه اصلی) انجام شده است.

$$\text{جرم} / \text{جرم رسوبات خروجی} = \text{راندمان رسوب شویی} \quad (۷)$$

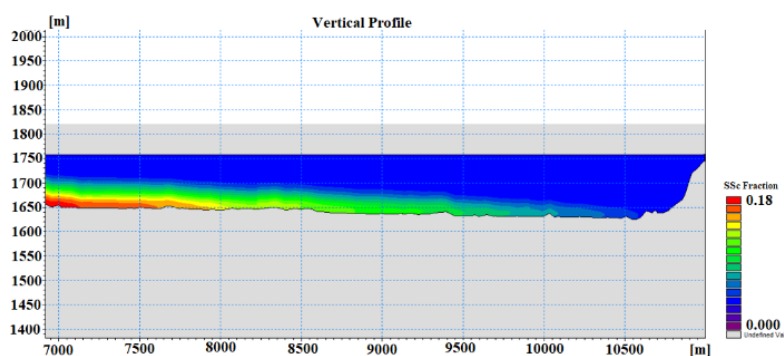
۱۰۰ \* (رسوبات ورودی)

نتایج نشان می‌دهد با فرض کمترین هدر رفت آب (عدم افت تراز آب مخزن)، بالاترین راندمان تخلیه رسوب مربوط به سناریوی دوم سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله می‌باشد. به‌طور کلی آنچه از نتایج واضح است، با افزایش دوره بازگشت سیلاب‌ها، یعنی افزایش دبی آب و کاهش غلظت جرمی رسوبات ورودی، راندمان رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. در جدول (۵) مقادیر رسوبات تخلیه شده در سناریوی دوم از هر سازه‌ی تخلیه‌کننده به تفکیک ارائه گردیده است.

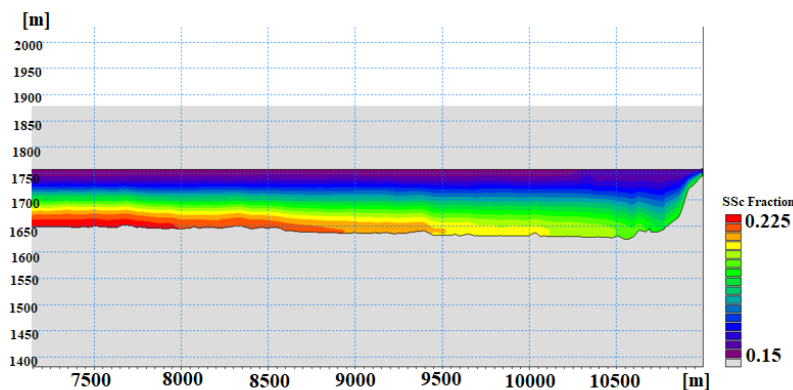
(شکل‌های (۱۲) و (۱۳)) که نشان‌دهنده‌ی تجمع غلظت رسوبات در کف و همچنین بالا بودن سرعت حرکت ذرات در نزدیکی‌های بستر می‌باشد. همانطور که از این اشکال واضح است، با افزایش دوره بازگشت سیلاب، یعنی افزایش دبی آب و غلظت جرمی رسوبات ورودی، پروفیل‌های غلظت پهن‌تر و سرعت‌های بالاتری را شاهد هستیم.

در شکل (۱۴) پروفیل غلظت رسوبات در یک زمان، در سه مقطع (ip40)، (ip60) و (ip88) که هر یک در فواصل ۷۰۰۰، ۱۰۴۰۰ و ۱۰۶۰۰ متری در پروفیل مخزن واقع شده‌اند، در سناریوی دوم، در سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله، نشان داده شده است.

شکل (۱۶) نشان می‌دهد جریان چگال به دلیل وزن و بر اثر نیروی جاذبه‌ی زمین، شروع به ته‌نشینی کرده و تنها درصدی از آن به نزدیکی بدنه‌ی سد خواهند رسید. همانطور که در این شکل پیداست، با حرکت در امتداد خط‌القعر، پخش ذرات غلیظ و پراکندگی غلظت رسوبات کاهش یافته و از پهنای پروفیل‌های غلظت، کاسته می‌شود.



(الف)

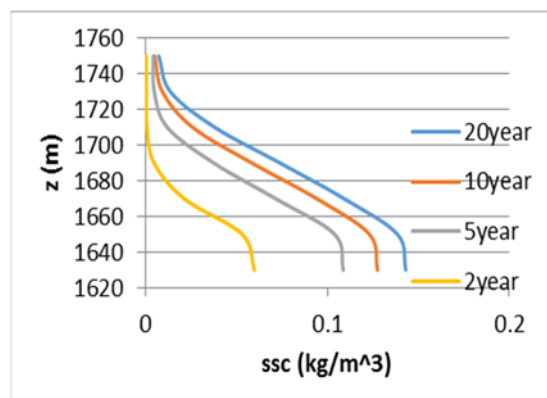
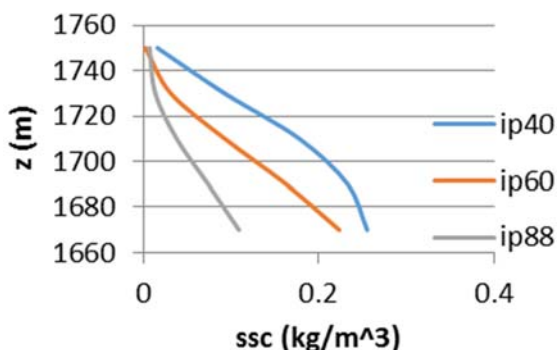


(ب)

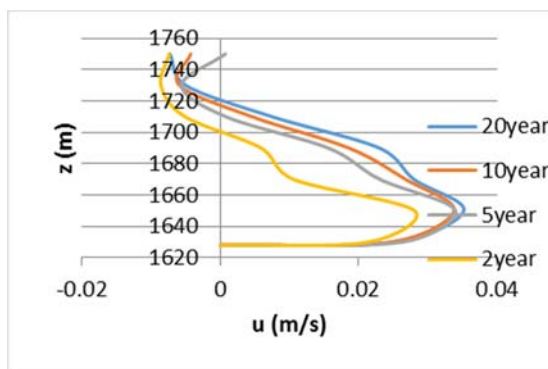
شکل (۱۳): الگوی حرکت جریان چگال در مقطع طولی مخزن نزدیک بدنه سد، (الف) پس از ۴۳ ساعت، (ب) پس از ۶۸ ساعت

همانطور که مشاهده می‌شود سناریوی دوم در حالت کلی راندمان بالاتری نسبت به سناریوی اول داشته و این موضوع نشان می‌دهد، بسته بودن دریاچه‌ها و تخلیه تنها از طریق سرریز، به لحاظ راندمان رسوب‌شویی نتایج خوبی در پی نخواهد داشت و باز بودن صددرصدی دریاچه ثانویه و تنظیم دبی تخلیه‌ی دریاچه اصلی، دارای الویت است.

همانطور که مشخص است دریاچه تخلیه‌کننده اصلی، بیشترین نقش در تخلیه جریان چگال را داشته و جرم عمده‌ی رسوبات تخلیه شده در هر سناریو از این محل بوده است. دریاچه تخلیه‌کننده ثانویه به دلیل ظرفیت تخلیه‌ی پایین، تاثیرگذاری کمتری خواهد داشت.



شکل (۱۴): پروفیل غلظت رسوبات در سیلابهای مختلف در ۱ کیلومتر بالادست بدنه سد



شکل (۱۵): پروفیل های سرعت رسوبات ۱ کیلومتر بالادست بدنه سد در سیلابهای مختلف (سناریوی دوم، حالتی که دبی دریاچه اصلی به گونه ای تنظیم شده که افت تراز مخزن اتفاق نیفتد).

شکل (۱۶): مقایسه پروفیل غلظت در یک گام زمانی در سه مقطع مختلف در ۱ کیلومتر بالادست بدنه سد

جدول (۴): نتایج راندمان تخلیه رسوب

راندمان تخلیه رسوبات (درصد)	میزان رسوبات تخلیه شده (تن)		میزان رسوبات ورودی (تن)	
۱/۲	۴۲۵	۳۴۴۰۵/۸۲	سناریوی اول	سیلاب ۲ ساله
۷/۹	۲۷۴۱/۵۰	۳۴۴۰۵/۸۲	سناریوی دوم	
۳	۱۴۰۱/۸۱	۴۶۲۹۵/۳۴	سناریوی اول	سیلاب ۵ ساله
۱۱/۸	۵۴۵۴/۳۶	۴۶۲۹۵/۳۴	سناریوی دوم	
۴/۸	۲۵۷۲/۵۸	۵۳۲۰۴/۷۲	سناریوی اول	سیلاب ۱۰ ساله
۱۴/۳	۷۶۰۹/۹۸	۵۳۲۰۴/۷۲	سناریوی دوم	
۶/۷	۳۸۳۲/۵۷	۵۷۱۱۲/۳۲	سناریوی اول	سیلاب ۲۰ ساله
۱۶/۶	۹۴۸۳/۸۰	۵۷۱۱۲/۳۲	سناریوی دوم	

جدول (۵): مقادیر رسوبات تخلیه شده از هر سازه به تفکیک در سناریوی دوم

جرم رسوبات تخلیه شده				
جرم کل رسوبات تخلیه شده (تن)	سرریز (تن)	دریاچه تخلیه کننده ثانویه (تن)	دریاچه تخلیه کننده اصلی (تن)	سیلاب
۲۷۴۱/۵۰	۱۱/۸۵	۶۴۷/۷۳	۲۰۸۱/۸۸	۲ ساله
۵۹۲۴/۵۹	۵۱۸/۵۶	۹۱۸/۹۳	۴۴۸۷/۰۹	۵ ساله
۸۴۲۵/۱۶	۱۱۴۲/۲۷	۱۰۲۷/۴۶	۶۲۵۵/۴۲	۱۰ ساله
۱۰۵۷۶/۵	۲۱۵۱/۷۳	۱۱۰۷/۸۱	۷۳۱۶/۹۷	۲۰ ساله

## نتیجه گیری

نتایج حاصله در یک جمع بندی کلی عبارتند از:

۱. با فرض ثابت بودن تراز آب مخزن و کاملاً پر بودن آن، هر چه سیلاب با دوره بازگشت بزرگتری رخ دهد، راندمان رسوب شویی بالاتری حاصل خواهد شد. به عبارتی دیگر با افزایش دبی آب ورودی، چگالی و شوری و در نتیجه غلظت جرمی رسوبات ورودی کاهش یافته، ولی راندمان رسوب شویی افزایش خواهد یافت. این مسئله به علت سرعت القایی بیشتر جریان چگال و رسیدن زودتر جریان چگال به خروجی است. در کل راندمان رسوب شویی حداکثر ۱۷ درصد به دست آمده است.
۲. متوسط زمان رسیدن جریان چگال به تخلیه کننده بین ۴۰ ساعت (در سیلاب با دوره بازگشت ۲۰ ساله) تا ۵۰ ساعت (در سیلاب با دوره بازگشت ۲ ساله) خواهد بود. این بدان معنی است که بعد از حدود ۲ روز می توان تخلیه کننده را باز نمود تا رسوبات معلق تخلیه شوند.
۳. جریان گل آلود در عبور از خم دچار افت ۵ الی ۱۱ درصدی می شود. به عبارتی دیگر وجود خم در مسیر حرکت جریان گل آلود، بر سرعت حرکت این نوع جریان، در محدوده خم و حتی بعد از عبور از آن، تاثیرگذار می باشد. با این حال بیشترین سرعت جریان چگال در مخزن حدود ۰/۰۷ متر بر ثانیه است. با توجه به طول ۱۱ کیلومتری مخزن، این سرعت معادل زمان ۴۰ ساعت رسیدن جریان چگال به تخلیه کننده است.

## References

- 1- Ashouri, Erfan. Mohamadi, Mirali. (1393). "3D simulation of sedimentation trend in dam reservoir by MIKE3 (Case study: Nahand Dam)", Msc thesis, Urmia university, (In Persian).
- 2- DHI Software, (2011). "MIKE 3 Flow Model FM Manual, Hydrodynamic Module", Scientific Documentation, DHI Water and Environment.
- 3- Fan, J., Morris, G.L., (1992). "Reservoir sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 118 (3), 354-369.
- 4- Fazelpour, A., Hemadi, K., Fathi moghadam, M., (1390). "Simulation of dez river sedimentation trend between dez dam and dezfool diversion dam under flushing with MIKE11, MSc thesis, Shahid chamran university, (In Persian).

- 5- ICOLD, (1999). "World Register of Dams, Update", International Commission on Large Dams, Paris,
- 6- Khuzestan Water & Power Authority (2005). "Dez Dam Rehabilitation Project, Stage 2, Task 1, Reservoir Operation Review and Sediment Study, unpublished project report ", ACRES International in association with Dezab Consulting Engineers.
- 7- Mohajeri, S.H. Safarzadeh, A. (1394) " Numerical study of sediment venting in reservoirs. Iranian hydroelectric power journal, vol 6 , (In Persian).
- 8- Mulder, T. Syvitski P.M. (1995) "Turbidity current generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans". Journal of Geology, 103(3): 285-299.
- 9- Poyry, (2008). "Roudbar Lorestan HPP: Update of hydrology". Unpublished report
- 10- Poyry, Laboeatoire De Constructions Hydraulic, LCH, EPFL-LCH/GDC-AA-SV, (2016) "Numerical study on turbidity currents venting at Rudbar Lorestan Reservoir", Three-Dimensional Analysis, 1.
- 11- Ramazani, Y. GHamoshi, M. (1390) " on the study of turbidity current on sedimentation trend in sefidroud reservoir", Water and Soil journal, Vol 25, No 4, P 874-880, (In Persian).
- 12- Sedghi, Akbar., Hasanzadeh, Y. (1394). "Numerical modeling of reservoir sedimentation by GSTARS (Case study: Zonooz dam), Symposium of Civil, Architecture and urbanization. (In Farsi)
- 13- Tofighi, S., Samani, S.M.V, Ayoubzadeh, S.A., (1394) " presseried sediment venting by adding bottom outlet in dam reservoir". Modares Civil journal, 15, No 2, (In Persian).
- 14- Torkmanzad, N., Mohammadnejad, B., Behmanesh, J., (1393). "The effect of dam bottem outlets opening on venting turbidity current (Case study: Sefid rood dam)". Journal of environmental and civil engineering, Vol44, No 1, (In Persian).

## Numerical study of river sediment venting during flood from the reservoir of dams (case study of Rudbar dam)

Meysam Fazeli<sup>\*1</sup>  
Raheleh Ghomi<sup>2</sup>

### Abstract

Sedimentation in dam reservoirs is known as crucial factor of reducing dam operating life-time. Decreasing reservoir capacity, disorder in dam operation, blockage and corrosion of intake structures, drain valves and increase costs of maintenance are the main undesirable effects. Turbidity current during flood time as a significant reason of sediment deposition near dam body, is highly complicated phenomenon and hard to comprehend. In this study, the density current has been simulated in Roudbar Lorestan dam reservoir by a 3D numerical software, Mike3. The principal objective of this modelling is to answer how much gravity current concentration can be vented during flood time from bottom outlets in order to decrease sediment deposition near dam intakes. Moreover, arriving time of turbidity current to dam intakes must be estimated precisely to regulate intake discharge for approaching to optimal operation condition. Simulating scenarios have been designed to calculate and evaluate how much sediment mass can be vented from bottom outlet to save more volume capacity in reservoir when flood with various return time period occurs. In defined scenarios, part of the flood passing over spillway can be discharged from bottom outlets to evacuate fine grain sediments when gravity current reaches near dam intakes. It means that dam's normal level cannot be decreased during sediment venting to maintain electricity production potential. The results show that the higher return period of flood, the much more sediment discharge efficiency where efficiency has been defined as the mass of discharged sediments to the mass of incoming sediments. The maximum efficiency of sediment venting occurs in the flood with 20-year return period and reaches a peak at 17%.

### Keywords

3D simulation, Sedimentation, Turbidity current, Sediment venting, Venting efficiency, Roudbar dam

---

<sup>1</sup>\*Department of Civil, Art and Architecture, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
M.fazeli@srbiau.ac.ir

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.