

## بررسی خصوصیات جریان‌های غلیظ در مخزن سد سفیدرود

یوسف رمضانی<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup> و حسین خزیمه نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۲۵

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

<sup>۲</sup> استاد، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Email: y.ramezani@birjand.ac.ir

### چکیده

رسوبگذاری در مخازن سدها امری اجتناب ناپذیر است که جریان‌های غلیظ یکی از مهم‌ترین عوامل موثر توزیع رسوب در آن‌ها می‌باشند. شناختن خصوصیات جریان‌های غلیظ در یک سد می‌تواند کمک شایانی جهت مدیریت و خروج این جریان‌ها از مخزن سد باشد. سد سفیدرود در استان گیلان به عنوان یکی از سدهای مخزنی مهم کشور است که دارای مشکلات زیادی در زمینه رسوبگذاری و از دست رفتن حجم مخزن می‌باشد. در تحقیق حاضر، وقوع جریان‌های غلیظ در سد سفیدرود و خصوصیات آن شامل سرعت پیشانی، عمق نقطه غوطه‌وری و فاصله آن از بدنه سد در دبی‌ها و ترازهای مختلف سطح آب مخزن، با استفاده از مدل TCM مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند، بسته به دبی جریان و تراز بهره‌برداری مخزن، عمق نقطه غوطه‌وری تغییراتی بین ۲/۲ تا ۸/۳ متر، محل تشکیل آن بین ۶ تا ۱۱ کیلومتری از سد و سرعت پیشانی جریان غلیظ تغییراتی تا ۰/۴۸ متر در ثانیه را نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: جریان‌های غلیظ، سرعت پیشانی جریان، سد سفیدرود، مدل TCM، نقطه غوطه‌وری

## Investigating Turbidity Currents Properties in Sefidroud Dam Reservoir

Y Ramezani<sup>1\*</sup>, M Ghomeshi<sup>2</sup> and H Khozeyme-Nejad<sup>3</sup>

Received: 22 September 2013 Accepted: 15 June 2014

<sup>1</sup>- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Birjand, Iran

<sup>2</sup>- Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Iran

<sup>3</sup>- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Birjand, Iran

\*Corresponding author, Email: y.ramezani@birjand.ac.ir

### Abstract

Sediment deposition in reservoirs is inevitable and the turbidity current is one of the most important factors that affects sediment distribution in reservoirs. Knowledge about the turbidity currents properties can help to manage and release these currents from dam reservoirs. The Sefidroud dam reservoir has many problems on water storage due to sediment deposition. In this study, the properties of these currents including head velocity, plunge point depth and its distance from the dam are simulated by TCM model, in different discharges and water elevations of the Sefidroud reservoir. The results show, depending on the discharge and water elevation, plunge point depth changes from 2.2 to 8.3 m, its distance is between 6-11 km from the dam structure and the head velocity variation is up to 0.48 m/sec.

**Keywords:** Head velocity, Plunge point, Sefidroud dam, TCM model, Turbidity current

### مقدمه

همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک جریان غلیظ در مخزن، دارای چهار منطقه می‌باشد: منطقه اول؛ قسمت ورودی جریان با چگالی همگن نامیده شده که منطقه قبل از تداخل با آب مخزن می‌باشد. منطقه دوم که ناحیه غوطه‌وری نامیده می‌شود؛ در یک نقطه از جریان بنام نقطه غوطه‌وری<sup>۲</sup>، اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب درون مخزن به تعادل رسیده و جریان غلیظ زیر لایه ساکن، شروع به حرکت می‌نماید. منطقه سوم؛ بدنه جریان می‌باشد که به فاصله بین نقطه غوطه‌وری و پیشانی جریان اطلاق می‌گردد. منطقه چهارم؛ قسمت گریزی شکل جلوی جریان است،

سدسازی از جمله پروژه‌های بسیار پر هزینه می‌باشد که مسأله رسوبگذاری در مخزن سد مهمترین عامل محدودکننده عمر مفید آن به شمار می‌آید. یکی از عوامل بسیار مهم در رسوبگذاری مخازن و نحوه توزیع رسوبات، پدیده جریان غلیظ<sup>۱</sup> می‌باشد. گراف (۱۹۷۱) وجود اختلاف در یکی از عوامل دما، غلظت مواد محلول و غلظت مواد معلق را عامل ایجاد اختلاف در مقدار جرم مخصوص ذکر نموده است. در مخازن سدها، علت ایجاد جریان غلیظ، اختلاف میان جرم حجمی آب زلال درون مخزن و آب گل آلود حاوی رسوبات معلق ورودی به مخزن، به خصوص در هنگام سیلاب می‌باشد.

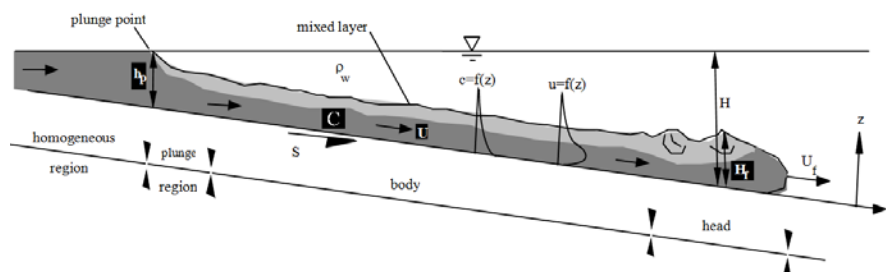
<sup>2</sup> Plunge point

<sup>1</sup> Turbidity current

هدایت به موقع آنها از تخلیه کننده‌های تحتانی سد، می‌تواند مقدار رسوبگذاری در مخزن به ویژه در قسمت‌های عمیق را کاهش دهد.

که پیشانی جریان نامیده شده و مهمترین قسمت جریان غلیظ به حساب می‌آید.

از آنجایی که این جریان‌ها در ابتدای مخزن سد تشکیل شده و تا مجاورت سد حرکت می‌نمایند، لذا



شکل ۱- ترکیب فیزیکی یک جریان غلیظ (قمشی، ۱۹۹۵).

طراحی نیز در این تحقیق پیشنهاد شده است. ترابی پوده و همکاران (۱۳۸۷) تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها و نیز مقایسه آن با مقاطع ثابت را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان دادند سرعت بی بعد پیشانی جریان غلیظ در واگرایی‌ها بیشتر و همگرایی‌ها کمتر از مقاطع ثابت می‌باشد. وانگ و هو (۲۰۰۹) به بررسی راهبردهای مختلف مدیریت رسوب مخازن در کشور چین پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که رسوب زدایی آزاد باعث تنش‌های بوم زیستی زیاد به زیست بوم پایین‌دست مخزن سد می‌شود. آنها ذخیره آب صاف و رهاسازی جریان غلیظ را به عنوان بهترین راهکار برای کنترل رسوب در مخازن پیشنهاد نمودند. این روش دارای مزیت استفاده از انرژی برقآبی بوده و ثبات زیست‌بوم را مورد توجه قرار می‌دهد. سکوییرس و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی مدیریت رسوب با استفاده از جت و جریان غلیظ در مخزن سدی در شیکاگو پرداختند. آنها در این مطالعه به تعیین امکان سنجی فرسایش پذیری رسوبات ریزدانه بستر به وسیله جت و انتقال آن توسط جریان غلیظ پرداختند. یک مدل عددی واسنجی شده برای مطالعه ظرفیت انتقال جریان در شرایط صحرائی به کار گرفته شد. نتایج نشان دادند مقادیر زیادی از رسوب در نزدیکی ناحیه تخلیه جت می‌تواند فرسایش یافته و قسمتی از رسوب فرسایش یافته می‌تواند توسط جریان

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات گسترده‌ای در زمینه جریان‌های غلیظ صورت گرفته است. محمد نژاد و شمسایی (۱۳۸۲) یک مدل عددی دو بعدی حجم محدود برای جریان‌های غلیظ غیر دائمی را در مخازن سدها توسعه داده و نقش آن را در رسوبگذاری دریاچه پشت سدها بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که عمق جریان غلیظ پس از ورود به مخزن افزایش یافته و سرعت آن کم می‌گردد. این کاهش سرعت باعث ته نشینی رسوبات در طول مسیر جریان غلیظ در داخل مخزن می‌شود. بصیرزاده و صمدی بروجنی (۱۳۸۲) به امکان سنجی هدایت جریان‌های غلیظ مخزن سد دز به سمت مجاری سرریز با استفاده از شافت قائم مستغرق پرداخته و پیش‌بینی کردند با این روش راندمان تله اندازی مخزن از حدود ۱۰۰ درصد به ۶۴ درصد برسد. محمودیان شوشتری و همکاران (۱۳۸۴) به بررسی آزمایشگاهی کشش آب ساکن در جریان‌های غلیظ پرداختند و نشان دادند گرچه شدت اختلاط با افزایش شیب افزایش می‌یابد، اما این روند افزایشی در شیب‌های زیاد متوقف خواهد شد. اوهی و شلیس (۲۰۰۷) به بررسی کنترل جریان غلیظ توسط موانع نفوذپذیر و صلب در مخازن سدها به وسیله شبیه‌سازی عددی و مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان دادند طراحی مناسب موانع می‌تواند جریان غلیظ را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار دهد. برخی توصیه‌های

## مواد و روش‌ها

### معرفی مدل TCM

مدل رایانه‌ای TCM نسخه توسعه یافته DEPO می‌باشد که توسط قمشی (۱۹۹۵) تهیه گردیده است. این مدل توانایی پیش‌بینی بلند مدت رسوبگذاری در مخازن سدها همراه با در نظر گرفتن وقوع پدیده جریان غلیظ، به صورت یک بعدی را داشته و همچنین قادر به تحلیل حرکت جریان آب و رسوب در مجاری روباز می‌باشد. از دیگر خصوصیات این مدل توزیع رسوبات در هر مقطع به صورت شبه دو بعدی و متناسب با عمق جریان می‌باشد. لحاظ اثرات رسوبات چسبنده و همچنین پدیده زرهی شدن بستر<sup>۱</sup> در روند فرسایش و رسوبگذاری از دیگر مزایای این مدل می‌باشد.

با قبول اختلاف در شدت تغییر ترازهای آب و بستر، مدل در ابتدا معادلات مربوط به جریان آب در مخزن را حل نموده و پس از محاسبه مشخصات هیدرولیکی جریان، فرایند رسوبگذاری در مخزن را با در نظر رفتن یک حجم کنترل برای هر مقطع و حل مکرر معادلات انتقال رسوب و جریان غلیظ، شبیه‌سازی می‌نماید. جریان درون مخزن به صورت ماندگار، غیریکنواخت و یک بعدی در نظر گرفته شده است. شرط لازم جهت بررسی جریان‌های غلیظ و روندیابی آن توسط مدل، غوطه‌وری جریان ورودی و تشکیل نقطه غوطه‌وری در بالادست مخزن می‌باشد. بنابراین مدل با استفاده از روابط آکیاما و استفان (۱۹۸۵)، عمق غوطه‌وری جریان را برای دبی‌های مختلف ورودی و کلیه مقاطع از بالادست به پائین دست کنترل می‌نماید.

در صورت تشخیص محل تشکیل جریان غلیظ، مراحل روندیابی آن شامل محاسبه عمق، سرعت و دبی حجمی آن برای کلیه مقاطع بین محل تشکیل تا دیواره سد انجام می‌شود. روش بکار رفته در مدل، دستگاه معادلات سه گانه ارائه شده توسط فوکوشیما و همکاران (۱۹۸۵) می‌باشد که توسط گارسیا (۱۹۹۴) تکمیل و ارائه گردیده است.

مدل، معادلات دیفرانسیل جزئی جریان غلیظ را

غلیظ به پایین دست انتقال یابد. ظرفیت انتقال جریان کاملاً وابسته به شرایط اولیه جت تخلیه شده دارد. آن و لی (۲۰۱۰) به بررسی خصوصیات نقطه غوطه‌وری در یک جریان غلیظ پرداختند. آنها از یک مدل دو بعدی صحت سنجی شده جریان غلیظ استفاده نمودند. به منظور واسنجی مدل ارائه شده، آزمایشاتی در یک مدل آزمایشگاهی انجام گرفت. عدد رینولدز، غلظت رسوب و عدد فرود جرمی به عنوان پارامترهای مورد نظر برای تحلیل شرایط وقوع نقطه غوطه‌وری مورد استفاده قرار گرفتند. جورجولاس و همکاران (۲۰۱۰) مدل عددی سه بعدی جریان غلیظ را ارائه کردند. آنها دینامیک و ساختار جریان غلیظ را به وسیله فرض یک جریان چند فاز و برنامه‌نویسی در مدل FLUENT شبیه‌سازی نمودند که توافق خوبی بین مشاهدات کمی و کیفی یک جریان غلیظ در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی مشاهده شد.

سد مخزنی سفیدرود از نوع بتنی وزنی پایه دار، به ارتفاع ۱۰۶ متر و طول تاج ۴۲۵ متر می‌باشد و در محل تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود قرار گرفته است. این سد، تنها سد مخزنی استان گیلان بوده و نقش بسیار مهمی در تأمین آب و کنترل سیلاب‌های مخرب منطقه ایفا می‌کند. مطالعات فرسایش و رسوبگذاری انجام شده در مورد حوضه آبریز سد سفیدرود بیانگر ظرفیت بالای رسوبزائی این حوضه می‌باشد. در سد سفیدرود تاکنون مطالعه‌ای در خصوص بررسی خصوصیات جریان‌های غلیظ انجام نشده است. با توجه به اهمیت سد و نظر به اینکه مخزن سد در مرحله بهره‌برداری می‌باشد، انجام این مطالعات و بررسی خصوصیات جریان‌های غلیظ در این سد امری ضروری به نظر می‌رسد. در سد سفیدرود با آورد سالانه ۴/۵ میلیارد متر مکعب آب، ۴۳ میلیون تن رسوب وارد مخزن می‌شود. از این مقدار ۲۵ میلیون تن از شاخه قزل‌اوزن، ۶ میلیون تن از شاخه شاهرود و ۲ میلیون تن از رودخانه‌های فرعی می‌باشد (رضانی، ۱۳۸۷). با توجه به اهمیت بسیار بیشتر شاخه قزل اوزن، خصوصیات جریان‌های غلیظ در این شاخه از سد سفیدرود مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

<sup>۱</sup> Bed armoring

قزل اوزن از دو نقشه هیدروگرافی سال ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ استفاده شده است. مقاطع عرضی با استفاده از نرم افزار Arc GIS، استخراج و به مدل معرفی شد. تعداد ۶۱ مقطع از شاخه قزل اوزن تهیه گردید. مقاطع به فاصله ۲۵۰ متر از یکدیگر می‌باشند. طول دریاچه سد در شاخه قزل اوزن ۲۳ کیلومتر می‌باشد. ضرایب تنگ شدگی و باز شدگی ۰/۱ و ۰/۳ برای مقاطع معمولی و ۰/۶ برای باز شدگی‌های ناگهانی در نظر گرفته شد.

رابطه دبی آب - دبی بار معلق رودخانه قزل اوزن (ایستگاه گیلوان) با استفاده از نرم افزار spss محاسبه گردید. نرم افزار spss قادر به محاسبه همبستگی توانی داده‌ها به صورت غیرخطی می‌باشد. این رابطه برای ایستگاه گیلوان  $Q_S=19 Q_W^{1.54}$  بدست آمد. در این رابطه،  $Q_W$  دبی جریان بر حسب  $m^3/s$  و  $Q_S$  دبی رسوب معلق بر حسب ton/day می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده در بخش رسوب سد، نسبت بار بستر به بار معلق در ایستگاه معادل ۲۰ درصد در نظر گرفته شد (رمضانی، ۱۳۸۷). پس از اعمال این ضریب و اضافه نمودن آن به دبی بار معلق، رابطه دبی آب - دبی رسوب بدست آمد. پس از نمونه‌برداری از ایستگاه گیلوان، دانه‌بندی بار معلق با استفاده از دستگاه تفکیک لیزری انجام شد. اصول کار این دستگاه، بر اساس سنجش میزان پخشیدگی اشعه‌های لیزر در برخورد با ذرات رسوب معلق درون آب می‌باشد. بار بستر در ایستگاه گیلوان برداشت نمی‌شود. به همین منظور برای دانه‌بندی بار بستر، پس از انجام نمونه‌برداری، از دانه‌بندی رسوبات ریزدانه مواد بستر ایستگاه استفاده گردید. مدل TCM قادر به پذیرش دانه‌بندی مواد بستر در تمامی مقاطع می‌باشد. پس از نمونه‌برداری از ایستگاه، دانه‌بندی مواد بستر بوسیله الک در آزمایشگاه مکانیک خاک انجام شد. برای دانه‌بندی مواد بستر درون مخزن نیز از نتایج موجود (۳ مقطع در شاخه قزل اوزن) استفاده گردید. در جدول ۱ درصد هر دسته از ذرات رسوبی معرفی شده به مدل TCM نشان داده شده است. مقطع ۳ نزدیکترین مقطع به دیواره سد می‌باشد.

به روش تفاضل محدود رانگ-کوتا مرتبه چهارم<sup>۱</sup> حل نموده و برای محاسبه نیمرخ‌های سطح آب از روش گام به گام استاندارد استفاده می‌نماید.

نحوه توزیع رسوبات در هر مقطع به روش توزیع نسبی می‌باشد. در این روش، تغییرات بستر همه نقاط سطح مقطع که زیر سطح آب قرار می‌گیرند را در بر می‌گیرد و مقدار تغییر در هر نقطه به ارتفاع آب روی آن یا عمق جریان بستگی خواهد داشت. معادله‌ای که بدین منظور در مدل مورد استفاده قرار گرفته، به صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta h_1 = \Delta h_{nw} \cdot \left[ \frac{y_1}{y_{nw}} \right]^{(1+m)} \quad [1]$$

که در این رابطه،  $\Delta h_1$  میزان تغییرات نهشته در هر نقطه از سطح مقطع،  $\Delta h_{nw}$  میزان تغییرات نهشته در خط القعر مقطع جریان،  $y_1$  ارتفاع آب روی نقطه مورد نظر،  $y_{nw}$  عمق آب ورودی نقطه خط القعر و  $m$  توان منحنی توزیع رسوب می‌باشد که نحوه توزیع رسوبات در بعد عرضی (دیواره‌ها و خط القعر) را نشان می‌دهد و می‌توان مقداری بین صفر تا یک برای آن در نظر گرفت. مقدار  $m=0$  وزن بیشتری به توزیع رسوبات در دیواره‌ها می‌دهد در حالی که  $m=1$  وزن بیشتری به توزیع رسوبات در خط القعر می‌دهد.

مدل TCM در مورد شبیه‌سازی جریان غلیظ در سدهایی نظیر دن، کرخه، کارون ۱ و مارون بکار رفته است (رمضانی، ۱۳۸۷).

#### جمع‌آوری و آماده‌سازی اطلاعات مورد نیاز

شبیه‌سازی جریان غلیظ در مخازن با استفاده از مدل‌های ریاضی نیاز به اطلاعات زیادی دارد که دقت نتایج بدست آمده بستگی زیادی به آنها خواهد داشت. در این تحقیق از اطلاعات و آمار ایستگاه گیلوان (در شاخه قزل اوزن و ۲۵ کیلومتری از سد) استفاده شد. با توجه به نقصان اطلاعات در برخی موارد، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های صحرائی به عمل آمد.

برای تهیه مقاطع عرضی سد سفیدرود در شاخه

<sup>1</sup> Fourth-order Runge-Kutta method

جدول ۱- درصد هر دسته از ذرات رسوبی معرفی شده به مدل TCM.

نوع رسوب	قطر ذرات (mm)	ایستگاه (مواد بستر)	مقطع ۳ (مواد بستر)	مقطع ۱۳ (مواد بستر)	مقطع ۲۶ (مواد بستر)	بار معلق	بار بستر
رس	۰/۰۰۲-۰/۰۰۴	۰	۵۰	۴۲	۱۰	۴۱	۰
سیلت خیلی ریز	۰/۰۰۴-۰/۰۰۸	۰	۲۱	۱۵	۴	۲۳	۰
سیلت ریز	۰/۰۰۸-۰/۰۱۶	۰	۱۶	۱۳	۲۶	۱۹	۰
سیلت متوسط	۰/۰۱۶-۰/۰۳۲	۰	۶	۲۰	۴۱	۱۱	۰
سیلت درشت	۰/۰۳۲-۰/۰۶۲۵	۳	۷	۱۰	۱۹	۶	۴
ماسه خیلی ریز	۰/۰۶۲۵-۰/۱۲۵	۱۳	۰	۰	۰	۰	۱۸
ماسه ریز	۰/۱۲۵-۰/۲۵	۶۰	۰	۰	۰	۰	۷۸
ماسه متوسط	۰/۲۵-۰/۵	۲۴	۰	۰	۰	۰	۰
ماسه درشت	۰/۵-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰

#### واسنجی مدل

می‌باشند. بنابراین هر یک از فاکتورهای فوق‌الذکر، در دبی‌های مختلف و سه رقوم بهره‌برداری ۲۴۰، ۲۵۰ و ۲۶۰ متر سد سفیدرود مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است رقوم تاج سد ۲۷۷ متر می‌باشد.

واسنجی مدل بر اساس تغییرات ضریب مانینگ و معادلات انتقال رسوب و توان منحنی توزیع رسوب (m) با استفاده از دو مقطع اندازه‌گیری شده در سال-های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ صورت پذیرفت. لازم به ذکر است در بازه سال‌های مذکور، هیچ‌گونه عملیات رسوبشویی از مخزن سد انجام نشده و تمامی رسوبات در مخزن ته‌نشین شده‌اند. برای شاخه قزل اوزن ضریب مانینگ ۰/۰۲۳، معادله انتقال رسوب یانگ و مقدار  $m=0/7$  برای توان منحنی توزیع رسوب بدست آمد. مقادیر ضرایب مانینگ واسنجی شده بر اساس سعی و خطای ضریب مانینگ و بدست آوردن ارتفاع آب در مدل و مقایسه آن با ارتفاع آب مشاهداتی در ایستگاه گیلوان با استفاده از روابط دبی-اشل صورت پذیرفت.

#### نتایج و بحث

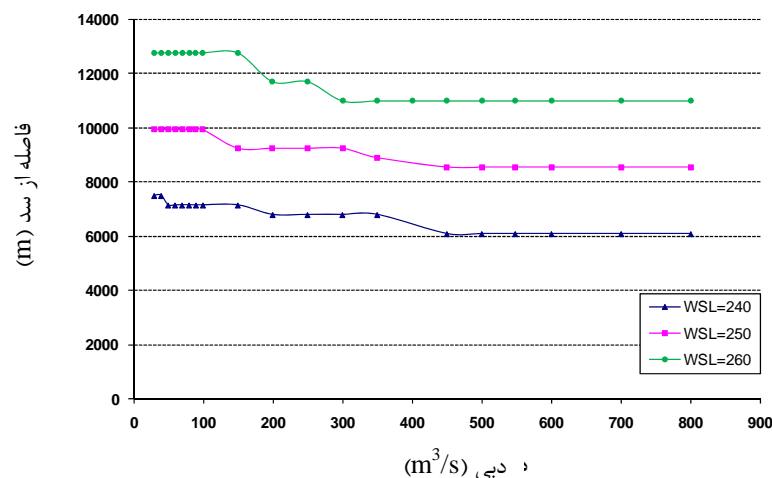
**امکان تشکیل جریان‌های غلیظ**  
هر چه احتمال تشکیل این جریان‌ها بیشتر باشد، به دلیل قابلیت انتقال رسوبات به طرف بدنه سد، میزان تأثیرگذاری آن‌ها بیشتر خواهد بود. به دلیل وجود مجموعه شرایط مساعد تشکیل جریان‌های غلیظ در مخزن سد سفیدرود، احتمال وقوع آن‌ها را حتی برای دبی‌های کم، بالا برده است. غلظت مواد معلق و درصد رس رسوبات ورودی، هندسه مخزن و رقوم سطح آب مخزن از جمله عوامل مهم در تشکیل جریان‌های غلیظ می‌باشند. براساس نتایج حاصله از اجرای مدل در دوره‌های زمانی، جریان‌های غلیظ در دبی‌های کم نیز تشکیل شده‌اند.

از جمله مشخصه‌های مهم یک جریان غلیظ عمق نقطه غوطه‌وری، محل تشکیل آن در مخزن و همچنین سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد. مقادیر هر یک از این پارامترها برای هر دبی ورودی به مخزن سد، در صورت تشکیل جریان غلیظ، توسط مدل TCM محاسبه گردیده و در خروجی مدل ثبت می‌گردد. رقوم سطح آب در مخزن (رقوم بهره‌برداری) و دبی جریان عامل مشترک و بسیار مؤثر در خصوصیات جریان غلیظ

**محل تشکیل نقطه غوطه‌وری**  
نقطه غوطه‌وری جریان غلیظ، محل جداسازی جریان گل‌آلود ورودی از آب صاف درون مخزن می‌باشد. محل تشکیل نقطه غوطه‌وری بستگی کامل به عمق آب، دبی جریان ورودی و غلظت رسوبات و همچنین خصوصیات هندسی مخزن همانند شیب بستر دارد.

نقطه غوطه‌وری در ۷/۶ کیلومتری از سد می‌باشد که با افزایش دبی به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، فاصله محل تشکیل نقطه غوطه‌وری به ۶ کیلومتری از سد کاهش می‌یابد.

برای رقوم بهره‌برداری ۲۵۰ مخزن سد، در دبی ۲۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۹/۹ کیلومتری از سد می‌باشد که با افزایش دبی به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، فاصله محل تشکیل نقطه غوطه‌وری به ۸/۴ کیلومتری از سد کاهش می‌یابد.



شکل ۲ - محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در سه رقوم مختلف سطح آب مخزن سد سفیدرود.

دبی‌های بیشتر از ۳۰۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۱۱ کیلومتری از سد ثابت می‌باشد. در یک دبی ثابت، کاهش رقوم بهره‌برداری در مخزن موجب انتقال محل تشکیل نقطه غوطه‌وری به سمت سد می‌شود. در دبی ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، برای رقوم بهره‌برداری ۲۶۰ مخزن سد، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۱۱ کیلومتری از سد می‌باشد که با کاهش رقوم بهره‌برداری به ۲۵۰ و ۲۴۰، این فاصله به ۸/۴ و ۶ کیلومتری از سد کاهش می‌یابد.

#### عمق تشکیل نقطه غوطه‌وری

نقطه غوطه‌وری جریان غلیظ، محل جداسازی جریان گل‌آلود ورودی از آب صاف درون مخزن می‌باشد. عمق تشکیل نقطه غوطه‌وری بستگی به دبی

نتایج حاصل از اجرای مدل به صورت نموداری برای رقوم‌های مختلف سطح آب در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار بیانگر تغییرات فاصله تشکیل نقطه غوطه‌وری تا دیواره سد نسبت به دبی برای رقوم‌های مختلف سطح آب می‌باشد.

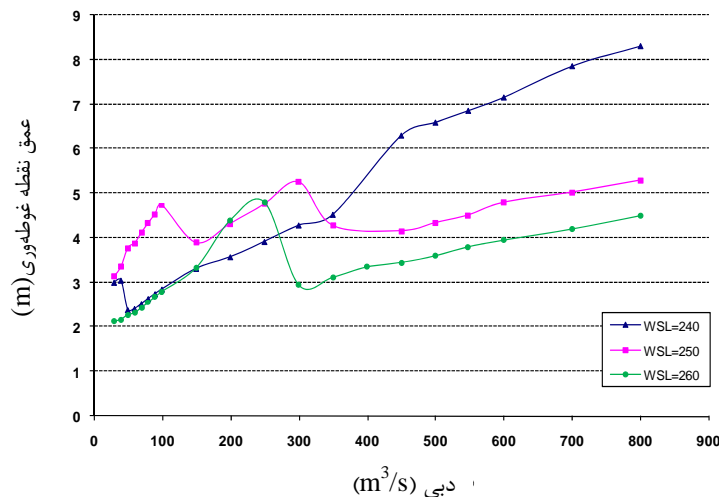
به طور کلی در یک رقوم مشخص بهره‌برداری، با افزایش دبی، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری به سمت سد پیشروی می‌نماید. برای رقوم بهره‌برداری ۲۴۰ مخزن سد، در دبی ۲۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل

همچنین، برای رقوم بهره‌برداری ۲۶۰ مخزن سد، در دبی ۲۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۱۲/۸ کیلومتری از سد می‌باشد که با افزایش دبی به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، فاصله محل تشکیل نقطه غوطه‌وری به ۱۱ کیلومتری از سد کاهش می‌یابد.

در یک رقوم بهره‌برداری ثابت و در دبی‌های زیاد، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. برای رقوم بهره‌برداری ۲۴۰ مخزن سد، برای دبی‌های بیشتر از ۴۵۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۶ کیلومتری از سد ثابت می‌باشد. برای رقوم بهره‌برداری ۲۵۰ مخزن سد، برای دبی‌های بیشتر از ۴۵۰ متر مکعب در ثانیه، محل تشکیل نقطه غوطه‌وری در ۸/۴ کیلومتری از سد ثابت می‌باشد. همچنین، برای رقوم بهره‌برداری ۲۶۰ مخزن سد، برای

غوطه‌وری نسبت به دبی در رقوم‌های مختلف سطح آب می‌باشد.

جریان و غلظت رسوبات ورودی و همچنین مشخصات ژئومتری و هیدرولیکی مقطع محل تشکیل نقطه غوطه‌وری خواهد داشت. شکل ۳ بیانگر تغییرات عمق نقطه



شکل ۳ - عمق نقطه غوطه‌وری در سه رقوم مختلف سطح آب مخزن سد سفیدرود.

طور کلی تغییر شرایط هیدرولیکی جریان در محل تشکیل نقطه غوطه‌وری می‌باشد.

#### سرعت حرکت پیشانی جریان غلیظ

یکی از عوامل بسیار مهم در میزان انتقال رسوبات توسط جریان‌های غلیظ، سرعت پیشانی جریان غلیظ در محل تشکیل می‌باشد. این عامل خود به عمق و محل تشکیل نقطه غوطه‌وری و همچنین مشخصات ژئومتری و هیدرولیکی مخزن بستگی دارد. شکل ۴ نشان دهنده تغییرات سرعت پیشانی جریان نسبت به دبی در رقوم‌های مختلف سطح آب می‌باشد. بطور کلی، افزایش دبی ورودی، موجب بالا رفتن سرعت پیشانی جریان غلیظ خواهد شد.

یکی از علل این موضوع افزایش غلظت رسوبات در اثر افزایش دبی و در نتیجه بالا رفتن چگالی جریان غلیظ می‌باشد که موجب افزایش سرعت می‌گردد. البته تغییر خصوصیات هیدرولیکی جریان همانند عمق و سرعت آب نیز مؤثر خواهند بود. برای رقوم بهره‌برداری ۲۴۰ مخزن سد، با افزایش دبی از ۲۵۰ متر مکعب در ثانیه به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، سرعت پیشانی جریان غلیظ از ۰/۲۷ به ۰/۴۸ متر در ثانیه

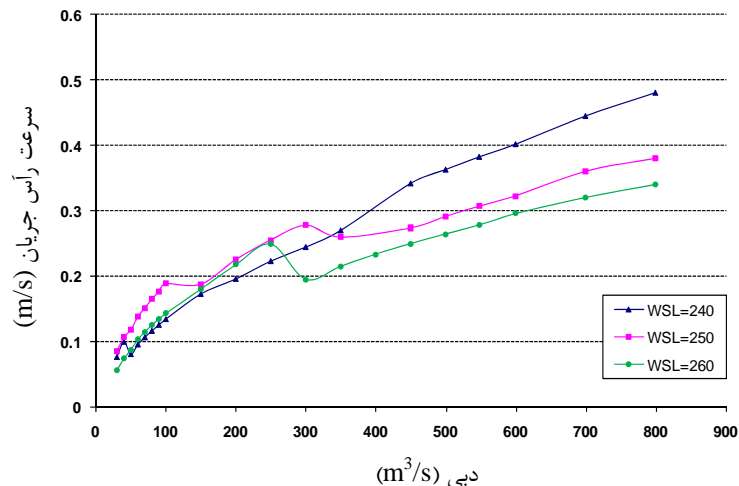
به طور کلی در یک رقوم بهره‌برداری مشخص، افزایش دبی باعث افزایش عمق نقطه غوطه‌وری خواهد شد. برای رقوم بهره‌برداری ۲۴۰ مخزن سد، با افزایش دبی از ۴۵۰ متر مکعب در ثانیه به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، عمق نقطه غوطه‌وری از ۶/۳ متر به ۸/۳ متر افزایش می‌یابد. برای رقوم بهره‌برداری ۲۵۰ مخزن سد، با افزایش دبی از ۴۵۰ متر مکعب در ثانیه به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، عمق نقطه غوطه‌وری از ۴/۱ متر به ۵/۲ متر افزایش می‌یابد. برای رقوم بهره‌برداری ۲۶۰ مخزن سد، با افزایش دبی از ۴۵۰ متر مکعب در ثانیه به ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، عمق نقطه غوطه‌وری از ۳/۴ متر به ۴/۵ متر افزایش می‌یابد. در یک دبی ثابت (به جز دبی‌های کم)، با افزایش سطح آب مخزن عمق نقطه غوطه‌وری کاهش خواهد یافت. در دبی ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، با افزایش رقوم بهره‌برداری مخزن سد از ۲۴۰ به ۲۵۰ و ۲۶۰، عمق نقطه غوطه‌وری از ۸/۳ متر به ۵/۲ متر و ۴/۵ متر کاهش خواهد یافت.

وجود پرش‌های ناگهانی در کاهش یا افزایش ارتفاع تشکیل غوطه‌وری، به دلیل تغییرات عمق آب و به



پیشانی جریان غلیظ از ۰/۴۸ متر در ثانیه به ۰/۳۸ و ۰/۳۴ متر در ثانیه کاهش خواهد یافت. اما در دبی‌های کمتر، اثرات رقوم بهره‌برداری در مخزن تحت تأثیر عوامل دیگر از جمله خصوصیات هندسی مقطع محل تشکیل قرار گرفته و نتیجه متفاوت خواهد بود.

افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش رقوم بهره‌برداری در مخزن، بدلیل افزایش سطح مقطع جریان، کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ را به همراه دارد. این موضوع در دبی‌های زیاد مشاهده می‌گردد. در دبی ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه، با افزایش رقوم بهره‌برداری مخزن سد از ۲۴۰ به ۲۵۰ و ۲۶۰، سرعت



شکل ۴ - سرعت پیشانی جریان غلیظ در سه رقوم مختلف سطح آب مخزن سد سفیدرود.

به بدنه سد در دبی‌های سیلابی و ترازهای مختلف سطح آب مخزن محاسبه و با باز کردن به موقع دریچه‌های تحتانی می‌توان مانع از ته‌نشینی رسوبات در مخزن گردید. بهترین شرایط حالتی است که جریان غلیظ در مناطق ابتدایی مخزن با غلظت زیاد تشکیل و با سرعت پیشانی زیاد و عمق کم طی کمترین زمان در طول مخزن حرکت کرده و به سمت دریچه‌های تحتانی ادامه مسیر دهد. با توجه به اینکه قسمت اعظم رسوبات وارد شده به سدها در دبی‌های سیلابی اتفاق می‌افتد، می‌توان با خروج به موقع جریان‌های غلیظ ایجاد شده در اثر آنها، گامی موثر در حفظ ظرفیت مخزن سد برداشت. حالت بهینه شرایطی است که تا حد امکان اجازه خروج رسوبات به همراه سیلاب‌ها را بدهد و در عین حال حجم ذخیره مخزن قادر به تأمین آب مورد نیاز در بدترین شرایط سال را داشته باشد. تهیه این برنامه بهره‌برداری بهینه مخزن، نیازمند انجام مطالعات دقیق برنامه‌ریزی منابع آب به همراه مطالعات رسوب با

خصوصیات ژئومتری مقطع محل تشکیل جریان غلیظ شامل شیب کف، سطح مقطع جریان و همچنین نحوه توزیع رسوبات از عوامل مؤثر در تغییرات ناگهانی سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشند.

#### نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی در سد سفیدرود جریان غلیظ در دبی‌های نسبتاً کم هم شکل می‌گیرد که اهمیت توجه به این جریان‌ها را در این سد مشخص می‌نماید. در مدیریت مخزن سد سفیدرود به خوبی می‌توان از مشخصات جریان غلیظ استفاده نمود. بدین ترتیب که با داشتن دبی سیلاب عبوری از ایستگاه هیدرومتری بالادست سد و تراز سطح آب مخزن و با توجه به نمودارهای ارائه شده، فاصله نقطه غوطه‌وری جریان از سد و سرعت پیشانی آن را بدست آورده و با داشتن این دو پارامتر، زمان رسیدن جریان غلیظ به بدنه سد را محاسبه نمود. با این روش، زمان رسیدن جریان غلیظ

روش، برخلاف عملیات شناس (رسوب زدایی آزاد) که تاکنون برای رسوبزدایی در مخزن این سد مورد استفاده قرار گرفته است، ملاحظات ایمنی سد را در نظر گرفته و امکان استفاده از انرژی برقآبی را دارا بوده و همچنین اثر مخربی بر محیط زیست پایین دست خود ندارد.

در نظر گرفتن مدیریت جریان‌های غلیظ و نحوه مانور دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی سد می‌باشد. با توجه به هزینه‌های بسیار بالای رسوبزدایی مخزن، استفاده از این پدیده به عنوان آسان‌ترین و کم هزینه‌ترین روش کاهش رسوبات در مخزن سد سفیدرود در برنامه بهره‌برداری آبی مخزن سد، توصیه می‌گردد. این

#### منابع مورد استفاده

- صبیرزاده ح، و صمدی بروجنی ح، ۱۳۸۲. امکان سنجی هدایت جریان‌های غلیظ مخزن سد دز به سمت مجاری سرریز با استفاده از شافت قائم مستغرق. ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ترابی پوده ح، امامقلی زاده ص و یونسی ح، ۱۳۸۷. تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها و مقایسه آن با مقاطع ثابت. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق تهران.
- رضانی ی، ۱۳۸۷. بررسی روند رسوبگذاری مخزن سد سفیدرود. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- محمد نژاد ب و شمسایی ا، ۱۳۸۲. مدل سازی رسوبگذاری مخازن سدها در اثر جریان چگالی. ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- محمودیان شوشتری م، قمشی م و کرم زاده ن، ۱۳۸۴. بررسی آزمایشگاهی کشش آب ساکن در جریان‌های غلیظ. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه باهنر کرمان.
- Akiyama J and Stefan H, 1985. Turbidity current with erosion and deposition. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 111(12): 6-16.
- An RD and Li J, 2010. Characteristic analysis of the plunging of turbidity currents. *Journal of Hydrodynamics* 22(2): 274-282.
- Fukushima Y, Parker G and Pantin HM, 1985. Self accelerating turbidity currents in over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 123-147.
- Garcia MH, 1994. Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 120(11): 1240-1263.
- Georgoulas AN, Angelidis PB, Panagiotidis TG and Kotsovinos NE, 2010. 3D numerical modelling of turbidity currents. *Environmental Fluid Mechanics* 10(6): 603-635.
- Ghomeshi M, 1995. Reservoir sedimentation modelling. Ph.D. Thesis. University of Wollongong. Australia.
- Graf WH, 1971. *Hydraulics of sediment transport*. Mc Graw-Hill Book Company. New York. USA.
- Oehy CD and Schleiss AJ, 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 133(6): 637-648.
- Sequeiros OE, Cantero MI and Garcia MH, 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 ZY and Hu CH, 2009. Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research* 24(4): 369-384.