

مدل سازی و آموزش پارامترهای هیدرولیکی موثر بر رسوب‌شویی

ابوالفضل شمسایی^۱ و مهدی فراست کیش^۲

چکیده

در این تحقیق مدل‌سازی عددی رسوب‌شویی در مخزن سد سفیدرود و تأثیر آن در احیای حجم مخزن در کوتاه مدت و بلند مدت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از مدل عددی 3 GSTARS برای بررسی فازهای مختلف فلاشینگ استفاده شده است. این مدل برای رسوب‌شویی آزاد و تحت فشار تهیه و هرکدام به طور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده بر روی سد سفیدرود نشان می‌دهد با توجه به این که تراز آب مخزن در ابتدای عملیات فلاشینگ یکی از پارامترهای تأثیرگذار در راندمان رسوب‌شویی است، پایین آوردن تراز آب مخزن از تراز نرمال (۲۷۱ متر) به تراز آبیگیری نیروگاه (۲۱۰ متر) موجب کاهش آب مصرفی از ۸۹۷ متر مکعب به ۱۹ متر مکعب برای شستن هر تن رسوب می‌شود. از طرف دیگر بررسی‌ها نشان می‌دهد که در این مخزن فلاشینگ بر رسوبات درشت دانه تأثیرگذار نیست و نمی‌توان از آن به عنوان تنها راه حل برای جلوگیری از کاهش ظرفیت مخزن استفاده نمود و انجام عملیات رسوب‌زدایی تکمیلی نظیر لایروبی، استفاده از سیفون و یا عبور جریان‌های غلیظ از مخزن، علاوه بر رسوب‌شویی سالانه در مخزن سد سفید رود امری اجتناب‌ناپذیر است.

کلمات کلیدی: فلاشینگ، رسوب‌شویی، فرسایش، 3 GSTARS، سد

۱- مقدمه

پدیده فرسایش و انتقال رسوب از جمله فرآیندهای هیدرودینامیکی مهمی است که بسیاری از سیستم‌های هیدرولیکی نظیر حوضه‌های آبریز، رودخانه‌ها، سواحل و بنادر، سدها، پل‌ها، جاده‌ها، کشتزارها و تأسیسات عمرانی را متأثر می‌سازد.

آب و باد به عنوان دو عامل عمده فرسایش و جابجایی مواد رسوبی تلقی می‌گردند که هر یک به نوبه خود اثرات مورفولوژیکی گسترده‌ای را به زمین تحمیل می‌نمایند. فرسایش و حمل مواد در رودخانه‌ها و انباشتگی آن در مخازن در ارتباط نزدیک با مسائل عمرانی است. این مسئله بخصوص در مناطق کوهستانی از حساسیت خاصی برخوردار است. شیب زیاد رودخانه‌ها، ناپایداری خاک، پتانسیل سیل‌خیزی بالا و عوامل دیگر از جمله پارامترهایی هستند که استعداد فرسایش و انتقال رسوب را در چنین مناطقی افزایش داده و عمر مفید سدها را به طور جدی

تهدید می‌نمایند.

از طرفی محدودیت منابع و ضرورت بهره‌گیری از رودخانه‌های کوهستانی که اغلب دارای کیفیت آب مناسبی هستند ما را بر آن می‌دارد تا با استفاده از تحقیقات علمی راه چاره‌ای برای مقابله و کنترل این فرآیند رودخانه‌ای بیابیم.

میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز در ایران به دلایل مختلفی زیاد بوده و این نکته اهمیت پرداختن به مسائل رسوب در مخازن سدها را دوچندان می‌کند. در ایران نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها در حدود ۷/۵ درصد تخمین زده می‌شود که معادل ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال است [۶].

روش‌های مختلفی برای جلوگیری از تجمع رسوبات در مخازن سدها وجود دارد که اهم آن عبارتند از:

- ۱) افزایش انتقال رسوبات از درون مخزن
- ۲) رسوب‌شویی رسوبات انباشته شده در مخزن
- ۳) جلوگیری از ورود جریان غلیظ به مخزن سد به وسیله کنارگذرها
- ۴) تخلیه رسوبات مخزن با استفاده از جریان غلیظ
- ۵) برداشت رسوبات با استفاده از روش‌های مکانیکی

مقاله دریافت ۸۶/۱۱/۱۵ دریافت اصلاح نهایی ۸۷/۳/۲۷

۱- استناد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
پست الکترونیکی: shamsai@sharif.ir

۲- کارشناس ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۸۰۰ میلیون متر مکعب بوده و متوسط سالیانه کاهش حجم مخزن بالغ بر ۲/۲ درصد می‌گردد که خود گویای آن است که به طور متوسط میزان رسوب‌گذاری در سد سفید رود حدود ۱۱ برابر سدهای ذخیره‌ای آمریکا است [۶].

اهمیت مسئله رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ذخیره‌ای ما را به بررسی دقیق این پدیده و اتخاذ تدابیر لازم برای حفظ کارایی مخازن رهنمون می‌سازد. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد فلاشینگ یکی از پرکاربردترین روش‌ها جهت بر طرف نمودن رسوبات انباشته شده در مخزن است. فلاشینگ رسوبات یکی از اقتصادی‌ترین و عملی‌ترین روش‌ها برای حفظ ظرفیت مخازن سدها است. این روش همچنین به عنوان روشی مناسب و اقتصادی جهت احیای ظرفیت برخی از مخازن سدها مورد استفاده قرار گرفته است.

پاول و هیلن (Paule&Dhillon) بر اساس داده‌های صحرایی جمع‌آوری شده از مخازن مورد مطالعه در ۶ کشور، آزمایشات کاربردی فلاشینگ را مرور کرده و گزارش کردند که فلاشینگ یک روش مؤثر برای دفع رسوبات ته‌نشین شده می‌باشد. براساس گزارش آنها، این روش نه تنها برای مخازن کوچک (ظرفیت ذخیره کمتر از 100mm^3) بلکه برای مخازن با مقیاس بزرگ (ظرفیت ذخیره بزرگتر 10000mm^3) نیز قابل استفاده است. علاوه بر آن مشخص شده است که فلاشینگ تحت شرایط خاصی می‌تواند ذرات ریز (یا مواد چسبناک) را نیز به حرکت درآورد [۱۰].

سد سه گورجن (Three Gorges Dam) در چین نیز بر پایه مطالعات فلاشینگ رسوب در مخزن طراحی شده اند. برخی محققین، مانند برسز (Breusers!) عقیده دارند که روش‌های فلاشینگ خیلی موثر نیستند، زیرا فقط به مقادیر رسوبی که با توجه به دبی جریان آب از طریق خروجی شسته شده و دفع می‌شوند محدود می‌گردند. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که بررسی و تحقیق بیشتری روی عوامل اصلی تأثیر گذار بر روی فلاشینگ به نحوی که اطلاعات جامع‌تری از کاربرد فلاشینگ ارائه دهد، صورت گیرد [۱۱].

مدل‌های ریاضی مختلفی برای شبیه‌سازی عملیات فلاشینگ رسوبات از مخازن سدها به کار گرفته شده است. به طور کلی این مدل‌ها به سه دسته مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم بندی می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از مدل یک بُعدی REFLUSH در این زمینه نام برد. در این مدل

از میان روش‌هایی که عنوان شد، روش لایروبی به دلیل نیاز به صرف انرژی اضافی و هزینه‌های بالا و حجم عملیاتی زیاد معمولاً آخرین گزینه است و در شرایطی که گزینه‌های دیگر قابلیت و راندمان کافی نداشته باشند، به کار گرفته می‌شود. روش سیفون کردن نیز شامل این محدودیت است و بیشتر در اطراف دریچه‌های تخلیه رسوبات و نزدیک بدنه سد به کار گرفته می‌شود. روش کنار گذر نیز معمولاً در مورد مخازن کوچک به کار می‌رود و در مخازن بزرگ که حاوی سیلاب‌های شدیدی هستند برای دستیابی به راندمان کافی، بسیار پرهزینه است. یکی دیگر از روش‌ها در رسوب‌زدایی مخازن سدها، روش فلاشینگ یا آبشویی می‌باشد که موضوع این تحقیق است.

شبیه سازی عددی رسوب‌زدایی مخزن، هم در مرحله طراحی و هم در مرحله بهره‌برداری، کمک بسیاری به طراحی اولیه و مدیریت بهره‌برداری خواهد نمود. این کمک می‌تواند شامل پیش بینی رفتار رسوبی مخزن، پیش بینی نیازهای سازه‌ای و کمک به تنظیم دستورالعمل‌های اجرایی مدیریت رسوب و تخلیه رسوب در زمان بهره‌برداری باشد.

۲- ارزیابی روش‌های رسوب‌زدایی

پدیده رسوب‌گذاری در مخازن سدها که در اثر احداث سد بر روی رودخانه‌ها صورت می‌گیرد، بیش از همه در کاهش ظرفیت ذخیره مخازن ظاهر می‌شود. تحقیقات انجام گرفته توسط دندی و همکاران (Dandy et al 1978) بر روی ۱۱۰۵ سد مخزنی در آمریکا با گنجایش اولیه ۱۱۰ هزار میلیون مترمکعب نشان می‌دهد که در فاصله زمانی کمتر از ۱۹ سال، کاهش حجم یاد شده بالغ بر ۴۲۰۰ میلیون متر مکعب بوده است، بدین معنی که به طور متوسط، سالیانه حجم کل این مخازن حدود ۰/۲ درصد کاهش یافته است [۸]. نتیجه اندازه‌گیری‌های انجام شده در مخزن سد کرج با حجم اولیه ۲۱۲/۵ میلیون متر مکعب نشان می‌دهد که در فاصله زمانی سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۷۰ یعنی یک دوره سی ساله بهره‌برداری از این سد، حجم کل رسوبات در داخل مخزن ۱۱ میلیون متر مکعب بوده است که متوسط کاهش سالیانه حجم مخزن این سد حدود ۰/۱۷ درصد می‌باشد [۹]. در سد سفید رود با حجم اولیه ۱۸۰۰ میلیون مترمکعب تجمع رسوبات در فاصله زمانی ۲۰ سال اولیه بهره‌برداری، حدود

به طور کلی مطالعات عددی متعددی در زمینه آب شویی رسوب از مخازن سدها در نقاط مختلف جهان انجام گرفته است، این مطالعات در قالب مدل های عددی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم بندی می شوند. مدل های عددی یک بعدی و دو بعدی ساده تر بوده و به اطلاعات کمتری نیاز دارند. با واسنجی دقیق این مدل ها می توان از آنها در پیش بینی وضعیت بستر رسوبی بعد از فلاشینگ، حجم رسوب خروجی و ... استفاده نمود.

۳- تشریح عملیات فلاشینگ

در این بخش، سعی بر این خواهد بود تا با استناد به تجارب موجود و مشاهدات انجام شده در مورد نحوه عملیات فلاشینگ و تأثیر آن بر رسوبات در نقاط مختلف مخزن، برخی از خصوصیات این عملیات که به صورت مشابه در مخازن مختلف رخ داده است تشریح گردد.

۴- عملیات فلاشینگ تحت فشار

فلاشینگ تحت فشار، به نوعی از عملیات فلاشینگ اطلاق می شود که در آن تراز سطح آب در مخزن بالاتر از تراز دریاچه فلاشینگ بوده و عملکرد این دریاچه به صورت تحت فشار می باشد. کارایی عملیات فلاشینگ در این حالت محدود بوده و تنها می تواند ناحیه محدودی در جلوی مجرای فلاشینگ را از رسوبات خالی سازد. در این حالت از فلاشینگ، پس از مدتی تراز رسوب در اغلب نقاط مخزن به تراز آب در حالت فلاشینگ تحت فشار رسیده و قسمت عمده حجم مخزن توسط رسوبات اشغال خواهد شد. با این حال، مهم ترین ویژگی عملیات فلاشینگ تحت فشار، قابلیت این عملیات در خارج ساختن رسوبات ته نشین شده در مجاورت محور سد و تأسیسات هیدرولیکی آن می باشد که باعث پاک شدن دهانه مجرای فلاشینگ از رسوبات شده و شرایط را برای انجام فلاشینگ رودخانه ای مهیا می کند.

۵- عملیات فلاشینگ آزاد

در حالتی که فلاشینگ رودخانه ای اتفاق بیفتد (یعنی تراز سطح آب در مخزن تا تراز دریاچه فلاشینگ پایین آورده شود)، سرعت های حاصله در مخزن به بیشترین مقادیر ممکن خواهند رسید (البته تنها در مجرای اصلی جریان) و

پیش بینی نرخ انتقال رسوب توسط معادله (۱) که در دانشگاه Tishingua در چین توسعه داده شده است [۱] انجام می شود:

$$Q_s = \frac{\psi \cdot Q_f^{1.6} \cdot S^{1.2}}{W^{0.6}} \quad (1)$$

در این فرمول، Q_s : بار رسوب (t/s)، Q_f : دبی هنگام فلاشینگ (m^3/S)، S : شیب کانال، W : عرض کانال فلاشینگ، ψ : فاکتور (عامل) مربوط به نوع رسوب می باشد.

از سایر مدل هایی که در زمینه رسوب و رسوب گذاری در رودخانه و مخازن استفاده می شود مدل HEC-6 است. این مدل یک مدل جریان ماندگار یک بعدی است که در سال ۱۹۷۶ توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا تهیه شده است. مدل HEC-6 یک مدل شبیه سازی به منظور ارزیابی آب شستگی و رسوب گذاری است که با توجه به ارتباط تنگاتنگ بین جریان مخلوط آب - رسوب و رسوباتی که در بستر رودخانه وجود دارد و شرایط هیدرولیکی جریان تدوین شده است.

در مدل های دو بعدی از مدل های جریان متلاطم و حل معادلات ناویر-استوکس در دو بعد استفاده می شود. به عنوان مثال لای (Lai) یک مدل حجم کنترل دو بعدی برای جریان غیر ماندگار و مدل انتقال رسوب برای شبیه سازی شکل گیری کانال فلاشینگ هنگام فلاشینگ رسوب توسعه داد [۷].

در مدل های سه بعدی معادلات ناویر-استوکس در سه بعد و مدل های جریان متلاطم مانند $K - \epsilon$ با استفاده از روش های عددی از جمله تفاضل های محدود و حجم کنترل، حل می گردند.

مدل های سه بعدی، پیچیده بوده و نیاز به اطلاعات زیادی دارند و اجرای آن نیز زمان بیشتری می طلبد ولی دقت بیشتری نسبت به مدل های یک و دو بعدی دارند. از جمله مدل های سه بعدی در زمینه فلاشینگ رسوبات مخزن می توان به مدل SSIIM اشاره کرد. این برنامه توسط دکتر السن از دانشگاه تروندهیم (Trondheim) نروژ نوشته و ارائه شده است. وی برنامه جریان آب و حرکت رسوب را برای خصوصیات هندسی در سه بعد به وسیله روش حجم محدود محاسبه می کند [۵].

۱۹۸۶ توسط **یانگ و مولیناس** (Yang & Molina's) به زبان فرترن نوشته شد و دو نسخه GSTARS 2 و GSTARS 2.1 به ترتیب در سال ۱۹۹۸ و ۲۰۰۰ با قابلیت‌های بیشتری نسبت به نسخه اصلی توسط مؤسسه USBR ارائه گردید. در دسامبر سال ۲۰۰۳ آخرین نسخه از سری مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌های آبرفتی تحت عنوان GSTARS 3 به بازار عرضه شد.

در این نرم‌افزار از ترکیب روش‌های حل یک بعدی و ثنوری لوله‌های جریان برای ایجاد یک مدل دو بعدی در پلان استفاده شده است. هدف از توسعه مدل مذکور، شبیه‌سازی جریان در شرایط شبه دو بعدی و تغییرات بستر به صورت شبه سه بعدی می‌باشد. مهمترین توانایی‌های این مدل عبارتند از:

- ۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در کانال‌هایی با مرزهای ثابت و متحرک
 - ۲- محاسبه پروفیل سطح آب در رژیم‌های جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی از این دو
 - ۳- شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای جریان و رسوب در جهت طولی
 - ۴- محاسبه تغییرات پروفیل بستر جریان و مقاطع عرضی و در نظر گرفتن شرایط ویژه از قبیل پایداری دیواره‌ها.
- نرم افزار مذکور دارای چهار قسمت اصلی می‌باشد، اولین قسمت به حل معادلات یک بعدی مومنتم و انرژی برای محاسبات گام به گام سطح آب اختصاص دارد. با استفاده از این قسمت می‌توان پروفیل طولی سطح آب در رژیم‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی را محاسبه نمود.
- در قسمت دوم نرم‌افزار، از تئوری لوله جریان (Stream tubes) استفاده شده است. این قسمت برای محاسبات شبه دو بعدی روندیابی رسوب و جریان به‌کار می‌رود. در این روش پارامترهای هیدرولیکی و روندیابی رسوب برای هر یک از لوله‌های جریان محاسبه شده و با استفاده از آن می‌توان تغییرات عرضی در مقاطع جریان را در شرایط شبه دو بعدی به دست آورد. سطح آب مورد استفاده در محاسبات قسمت دوم از قسمت اول به دست می‌آید. بنابر این سطح آب در تمامی لوله‌های جریان، یکسان در نظر گرفته می‌شود.

به این ترتیب کارایی عملیات فلاشینگ حداکثر خواهد شد. در حالت کلی به هنگام انجام فلاشینگ آزاد در مخازن، رسوبات موجود در مجرای اصلی جریان با نرخ زیاد به خارج از مخزن منتقل خواهند شد و یک کانال عمیق (و در عین حال معمولاً باریک) در میان مخزن تشکیل و جریان رودخانه‌ای در داخل آن برقرار خواهد شد. رسوبات موجود در کناره‌های مخزن معمولاً به صورت مستقیم تحت تأثیر فلاشینگ رودخانه‌ای قرار نمی‌گیرند و تنها در صورتی که دیواره‌های کانال فلاشینگ ایجاد شده در مخزن در اثر ناپایداری شروع به ریزش کند، ممکن است بخشی از رسوبات موجود در کناره‌های مخزن در داخل کانال فلاشینگ رودخانه‌ای ریخته و با جریان آب به خارج از مخزن حمل شوند. به این ترتیب هر قدر شیب بحرانی دیواره‌های کانال ایجاد شده در اثر فلاشینگ رودخانه‌ای کمتر باشد و نیز هر قدر این دیواره‌ها ناپایدارتر باشند، مقدار بیشتری از رسوبات انباشته شده در کناره‌های مخزن امکان خارج شدن از مخزن را خواهند داشت و کارایی عملیات فلاشینگ نیز بیشتر خواهد شد.

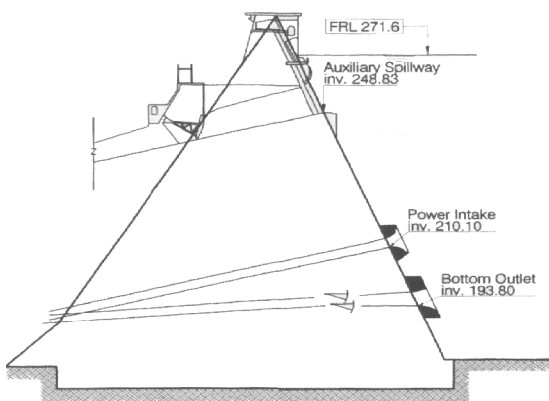
معمولاً با انجام هر نوع عملیات فلاشینگ (رودخانه‌ای یا تحت فشار) می‌توان بخش قابل توجهی از رسوبات انباشته شده در مجاورت سد (به خصوص رسوباتی که در مجاورت دریچه فلاشینگ قرار دارند) را از مخزن خارج ساخت و به این ترتیب، از ایجاد اختلال در بهره برداری از مخزن توسط این دسته از رسوبات جلوگیری کرد (البته مشروط بر این که محل قرارگیری دریچه‌های بهره‌برداری مخزن به صورت مناسبی انتخاب شده باشد). با این حال خارج ساختن دسته دوم از رسوبات که در نقاط دورتر از دریچه فلاشینگ واقع شده‌اند و باعث کاهش حجم مفید مخزن می‌شوند، معمولاً توسط فلاشینگ تحت فشار امکان‌پذیر نیست و در این حالت تنها فلاشینگ رودخانه‌ای کارایی لازم را دارد.

۶- مدل ۱ GSTARS 3

در این تحقیق برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در بالا دست سد از مدل عددی GSTARS 3 استفاده شده است. نسخه اصلی این برنامه تحت عنوان GSTARS در سال

مسئله گزینه ای بسیار مناسب برای بالا بردن راندمان و همچنین برآورد حجم رسوبات تخلیه شده از مخزن بدون نیاز به انجام مساحی می باشد.

از مخزنی که عملیات فلاشینگ با تخلیه کامل در آن انجام شده مخزن سفیدرود است. در این مخزن عملیات فلاشینگ با تخلیه کامل در فصل غیرآبیاری (مهر تا بهمن) از سال ۱۳۵۹ به طور سالانه انجام می‌گیرد. مخزن سفیدرود از تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود با حجم اولیه ۱۷۶۰ میلیون متر مکعب (در رقوم نرمال ۲۷۱/۶۵ متر) ساخته شده و از سال ۱۳۴۲ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. طول مخزن در شاخه قزل‌اوزن حدود ۲۵ کیلومتر و در شاخه شاهرود حدود ۱۳ کیلومتر و مساحت آن حدود ۵۴ کیلومتر مربع است. سد سفیدرود از نوع وزنی با پشت‌بندی به ارتفاع حداکثر ۱۰۶ متر و مجهز به دو سر ریز لاله‌ای شکل با تراز آستانه ۲۷۱/۶۵ متر و به ظرفیت کلی ۳۰۰ m³/sec و دو سر ریز کمکی (تخلیه کننده نیمه عمقی) با تراز آستانه ۲۴۸/۸ و ۲۵۰/۲ متر و با ظرفیت کل ۲۰۰۰ m³/sec می‌باشد، این سد دارای پنج آبگیر نیروگاه با تراز آستانه ۲۱۰/۱ و ۲۵۰/۲ متر و با ظرفیت کل ۱۶۰ m³/s، پنج تخلیه کننده عمقی با تراز آستانه ۱۹۱/۳ متر (سه مجرای ساحل راست) و ۱۹۳/۸ (دو مجرای ساحل چپ) جمعاً به ظرفیت ۹۸۰ m³/s می‌باشد. نیروگاه برقی سد مجهز به ۵ واحد جمعاً به قدرت ۸۷/۵ مگاوات، بلافاصله در پایاب سد قرار دارد [۱۳].



شکل ۲ محل قرار گیری دریچه های سد سفیدرود

در قسمت سوم نرم‌افزار از تئوری حداقل نرخ اتلاف انرژی برای محاسبه عرض و عمق کانال استفاده شده است. با استفاده از این قسمت می‌توان عرض جریان را هم به عنوان یک پارامتر مجهول محاسبه کرد.

در قسمت مربوط به حل رسوب نرم افزار 3 GSTARS، ملاحظات مربوط به پایداری دیواره‌های جانبی کانال‌های طبیعی نیز لحاظ شده است.

اطلاعات مورد نیاز این مدل برای مدل‌سازی شامل مقاطع عرضی رودخانه، هیدروگراف ورودی و خروجی، دبی رسوب، دانه بندی بستر و بار معلق و رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب است. در این نرم افزار، ۱۶ معادله رسوب وجود دارد که هر یک از این روابط برای شرایط خاصی توسعه پیدا کرده‌اند. انتخاب دقیق رابطه انتقال رسوب تنها با واسنجی دقیق مدل امکان پذیر است. در این تحقیق با توجه به شرایط سفید رود و شرایط معادلات، پس از کالیبراسیون مدل با داده های موجود، رابطه یانگ به عنوان رابطه‌ای منتخب در نظر گرفته شده است.

یانگ معادله ۲ را که برای جریان مملو از رسوب با غلظت بالایی از بار شست و شو به کار می‌رود ارائه کرد.

$$\log C_{Tg} = 5.165 - 0.153 \log \frac{\omega_m^d}{v_m} - 0.297 \log \frac{U_o}{\omega_m} + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{\omega_m^d}{v_m} - 0.480 \log \frac{U_o}{\omega_m} \right) \log \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{VS}{\omega_m} \right) \quad (2)$$

در این فرمول W_m : سرعت سقوط ذره در جریان مملو از رسوب، V_m : ویسکوزیته سینماتیکی جریان مملو از رسوب، γ_s, γ_m : وزن مخصوص جریان پر از رسوب و وزن مخصوص رسوب می باشد.

تحلیل های انجام شده را می توان به بررسی فلاشینگ در دو حالت کوتاه مدت و بلند مدت تقسیم کرد. در تحلیل کوتاه مدت فلاشینگ آزاد و تحت فشار به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفته اند.

بررسی عملیات فلاشینگ در مخزن سد سفیدرود

با توجه به این که عملیات رسوب‌زدایی منجر به از دست رفتن حجم بالایی از آب ذخیره شده در مخزن می‌شود و همچنین هزینه های بالای مساحی مخزن در پایان هر دوره فلاشینگ، به کار بردن مدل عددی جهت بررسی این

۷- مدل سازی فلاشینگ

یکی از روش های مؤثر در احیای ظرفیت ذخیره مخزن و از بین بردن رسوبات انباشته شده در بستر رودخانه روش فلاشینگ است. در این تحقیق با توجه به اهمیت مسئله رسوب در مخازن و همچنین هزینه های بالای مساحی مخازن، به کمک مدل عددی رسوب‌شویی در مخزن سد سفیدرود مورد بررسی قرار گرفت.

عملیات فلاشینگ را از دو دیدگاه می توان تحلیل نمود. دیدگاه اول بررسی فلاشینگ در طول یک دوره اجرای آن در مخزن. به عبارت دیگر مطالعه نحوه تخلیه رسوبات از هنگام باز شدن دریچه های تحتانی به منظور رسوب‌شویی تا زمان شروع مجدد آبیگری مخزن. دیدگاه دوم بررسی تاثیرات انجام فلاشینگ در تعیین ظرفیت مخزن در طی سال های بهره برداری از سد.

تأکید مدل سازی کوتاه مدت بر راندمان فلاشینگ و چگونگی بالا بردن آن در مدت رسوب‌شویی در مخزن است، در حالی که مدل دراز مدت به نحوه مدیریت و همچنین کیفیت و یا عدم کیفیت رسوب‌شویی در احیای ظرفیت مخزن در طی عمر مفید سد می پردازد.

۸- کالیبراسیون مدل

برای کالیبره کردن یک مدل عددی باید ابتدا مدل را در یک دوره زمانی مشخص اجرا و نتایج مدل سازی را با اطلاعات میدانی انتهای دوره مقایسه نمود. سپس با تغییر دادن پارامترهای مختلف نتایج به دست آمده را تا حد امکان به واقعیت نزدیک کرد.

در این تحقیق دو روش برای کالیبراسیون در نظر گرفته شده است.

۱- کالیبراسیون بر مبنای پروفیل بستر

۲- کالیبراسیون بر مبنای حجم رسوبات انتقالی

در مدل سازی فلاشینگ دراز مدت از روش اول و در مدل کوتاه مدت از روش دوم استفاده می شود.

۹- کالیبراسیون بر اساس پروفیل بستر

این روش هنگامی قابل استفاده است که حداقل در دو مقطع زمانی نقشه هیدروگرافی مخزن موجود باشد. در این حالت مدل بر اساس نقشه توپوگرافی ابتدای دوره تهیه و در

فاصله زمانی دو هیدروگرافی اجرا می گردد. سپس مقاطع به دست آمده از خروجی نرم افزار با نقشه توپوگرافی انتهای دوره مطابقت داده می شود. در این روش معمولاً به جای استفاده از کلیه مقاطع موجود در مسیر رودخانه، تنها چند مقطع در محل های مناسب انتخاب و ملاک کالیبراسیون قرار می گیرد و یا این که پروفیل طولی خط القعر مبنای کالیبراسیون قرار می گیرد.

۱۰- کالیبراسیون بر مبنای حجم رسوبات انتقالی

هنگامی که نقشه توپوگرافی در دو بازه زمانی مناسب در دسترس نباشد و یا این که هدف از مدل سازی محاسبه حجم رسوبات خارج شده از مخزن باشد می توان میزان رسوبات انتقال یافته در مخزن را ملاک کالیبراسیون قرار داد. همچنین با توجه به این که در این روش می توان احجام رسوبات انتقالی را در هر گام زمانی کنترل کرد، در مدل سازی کوتاه مدت فلاشینگ نتایج این کالیبراسیون از دقت بالاتری نسبت به روش قبل برخوردار است. بدین منظور با توجه به خروجی های نرم افزار، تغییرات حجم رسوب در هر گام زمانی محاسبه می گردد و سپس به کمک تحلیل های آماری میزان انطباق نتایج مدل و داده های حاصل از نمونه برداری بررسی می شود. با توجه به این که نمونه برداری رسوب در ایستگاه های رسوب سنجی در فواصل زمانی معین انجام می گردد، می توان گام های زمانی مدل را با تناوب نمونه بردار رسوب یکسان کرد و خروجی مدل را در هر گام با اطلاعات حاصل از نمونه گیری انطباق داد.

برای کالیبره کردن مدل، با تغییر در پارامترهای مختلف و چندین بار اجرای مدل، حجم زیادی از اطلاعات به دست می آید که باید به نحوی با یکدیگر مقایسه شوند. در این تحقیق از روش آزمون فرض و به کمک نرم افزار SPSS نتایج حالت های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۱۱- فلاشینگ کوتاه مدت

مدل سازی کوتاه مدت رسوب زدایی مخزن سد سفیدرود بر اساس اطلاعات آخرین مساحی مخزن در سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ صورت گرفته است. فلاشینگ انجام شده در این سال از تاریخ سوم مهرماه آغاز و تا بیستم آذرماه به مدت

۱۲- فلاشینگ کوتاه مدت تحت فشار

در فلاشینگ تحت فشار دو پارامتر تراز آب مخزن در شروع فلاشینگ و سرعت تخلیه نقش مهمی در میزان و گستردگی تأثیر رسوب‌زدایی در مخزن ایفا می‌کند. این دو پارامتر برخلاف سایر پارامترهای مؤثر بر فلاشینگ نظیر دبی جریان، دبی رسوب و دانه‌بندی به شرایط محیطی وابسته نبوده و به نحوه بهره‌برداری سد بستگی دارند. در این تحقیق تأثیر تراز ابتدایی و سرعت تخلیه به دو صورت بررسی شده است. در قسمت اول حجم رسوبات مقایسه گردیده و در قسمت دوم وضعیت پروفیل طولی مخزن قبل و بعد از فلاشینگ تعیین شده است.

۷۷ روز ادامه داشته است.

براساس اطلاعات موجود، زمان رسوب‌شویی در این سال، ۷۷ روز بوده که طی ۱۴ روز ابتدای آن مخزن تخلیه شده و در ۶۳ روز جریان رودخانه‌ای در مخزن ایجاد شده است. تراز سطح آب در آغاز عملیات فلاشینگ ۲۳۴/۶+ گزارش شده است که ۳۷ متر پایین‌تر از تراز نرمال و ۲۵ متر بالاتر از تراز دریاچه آبیگیری نیروگاه می‌باشد. به دلیل تفاوت رفتار ذرات رسوبی در مخازن با رفتار آن‌ها در جریان رودخانه و قابلیت GSTARS 3 در مدل‌سازی مخازن، فرآیند مدل‌سازی رسوب‌شویی در کوتاه مدت به دو بازه زمانی تقسیم شده است. ابتدا برای ۱۴ روز اول فلاشینگ تحت فشار و سپس برای ۶۳ روز بعدی، فلاشینگ آزاد مد نظر قرار گرفته است.

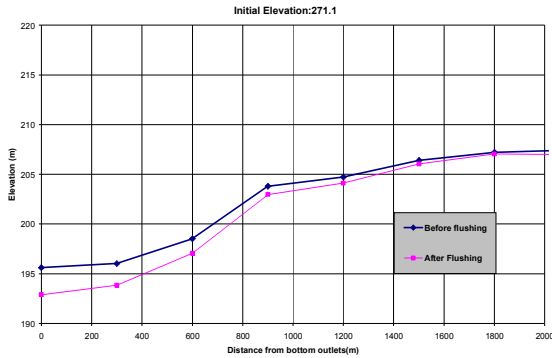
جدول ۱ نتایج مدل‌سازی فلاشینگ تحت فشار با تراز ابتدایی و سرعت تخلیه متفاوت

مدل	تراز ابتدایی	میزان آب تخلیه شده (متر مکعب)	میزان رسوب خروجی (تن)	مدت زمان تخلیه (روز)	ظرفیت تخلیه دریاچه‌ها (درصد)	راندمان*	آب مصرفی برای شست‌وشوی هر تن رسوب (متر مکعب)
اطلاعات میدانی	236.4	98,651,520	674,657	14	64%	0.68%	146
کالیبراسیون	236.4	98,651,520	673,270	14	64%	0.68%	147
تراز کالیبراسون	236.4	98,651,520	737,440	9	100%	0.75%	134
تراز آبیگیر نیروگاه	210.1	643,228	32,708	1	100%	5.08%	20
تراز نرمال مخزن	271.6	938,179,000	1,045,533	19	100%	0.11%	897

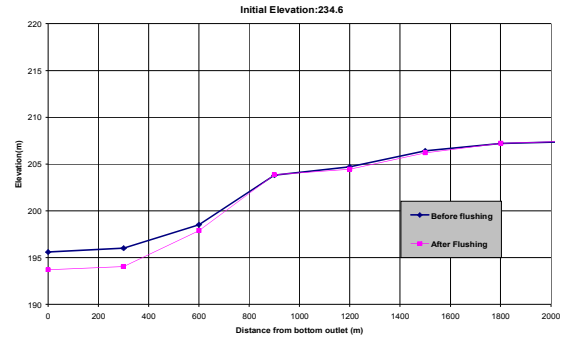
سرعت در مجرای تخلیه احتمال پدیده کاویتاسیون را زیاد می‌کند، بالا بردن بیش از حد سرعت جریان خروجی به منظور افزایش راندمان فلاشینگ چندان مناسب نیست. مسئله دیگری که در فلاشینگ تحت فشار اهمیت دارد، میزان تأثیرگذاری فلاشینگ در طول مخزن است، چرا که بیشترین مزیت فلاشینگ تحت فشار، شست و شوی رسوبات اطراف دریاچه‌ها است. در شکل‌های (۱) تا (۴) پروفیل طولی بستر در نواحی اطراف ساختگاه سد قبل و بعد از فلاشینگ در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که با کاهش تراز آب مخزن در ابتدای عملیات فلاشینگ می‌توان از حجم آب لازم برای شست و شوی هر تن رسوب کم کرد و راندمان فلاشینگ را بالا برد. به عنوان مثال پایین آوردن سطح آب مخزن از تراز نرمال (۲۷۱ متر) تا تراز آبیگیری نیروگاه (۲۱۰ متر) موجب کاهش آب مصرفی از ۸۹۷ متر مکعب به ۱۹ متر مکعب برای شستن هر تن رسوب گردیده است.

همچنین تأثیر افزایش سرعت تخلیه نسبت به تأثیر افزایش تراز آب در بالا بردن حجم رسوبات تخلیه شده بر اثر فلاشینگ بسیار اندک است و با توجه به این که افزایش

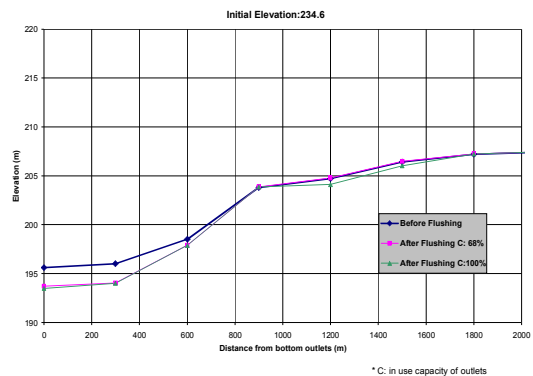


شکل ۶ پروفیل طولی قبل و بعد از انجام فلاشینگ با تراز ابتدایی ۲۷۱/۱ (تراز نرمال مخزن)



شکل ۳ پروفیل طولی قبل و بعد از فلاشینگ با تراز ابتدایی ۲۳۴/۶

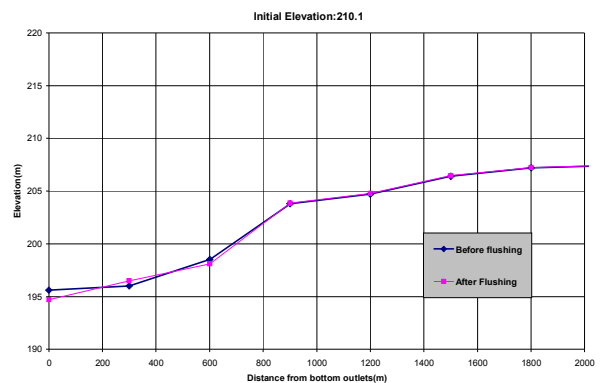
همان طور که در شکل های (۳) تا (۶) مشاهده می شود، در حالتی که فلاشینگ از تراز ۲۱۰/۱ شروع می شود، طول تأثیر فلاشینگ به ۲۰۰ متر محدود می گردد و در حالتی که فلاشینگ از تراز نرمال مخزن آغاز می گردد این طول به بیش از ۱۶۰۰ متر می رسد. با این حال حتی اگر فلاشینگ از ترازهای پایین آغاز شود می توان در زمانی که مخزن خالی است و جریان رودخانه ای در مخزن به وجود آمده است با انجام رسوب زدایی مکانیکی (لایروبی) رسوبات انباشته شده در نواحی اطراف ساختگاه سد را برطرف نمود.



شکل ۴ پروفیل طولی قبل و بعد از انجام فلاشینگ با تراز ابتدایی ۲۳۴/۶ با استفاده از ظرفیت کامل

۱۳- فلاشینگ آزاد

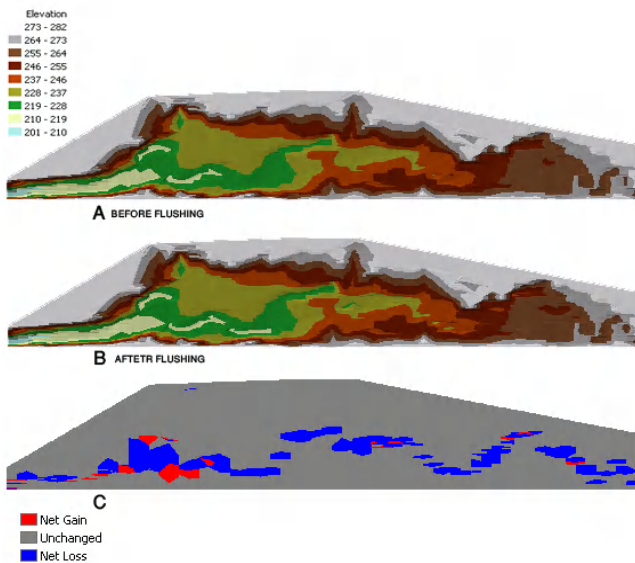
در فلاشینگ آزاد که پس از تخلیه کامل مخزن اجرا می شود، جریان رودخانه ای در کل مخزن به وجود می آید. در این حالت جریان در کانالی که میان انباشت رسوبات پدید آمده به حرکت در می آید و ضمن فرسایش بستر، رسوبات را از مخزن خارج می سازد. در طول انجام فلاشینگ آزاد ابتدا کانالی کم عرض در انباشت رسوب تشکیل شده سپس با گذشت زمان، عرض کانال افزایش می یابد تا شیب کانال به زاویه پایداری خاک در آن ناحیه نزدیک گردد. در این هنگام رسوبات خارج شده از مخزن فقط شامل رسوباتی است که به همراه جریان ورودی از مخزن خارج می شوند و تغییری در حجم رسوبات انباشته شده نخواهیم داشت.



شکل ۵ پروفیل طولی قبل و بعد از انجام فلاشینگ با تراز ابتدایی ۲۱۰/۱ (تراز آبگیر نیروگاه)

برای مدل کردن این نوع فلاشینگ از اطلاعات ۶۳ روز جریان رودخانه ای به وجود آمده در مخزن از تاریخ ۸۳/۷/۱۴ تا ۸۳/۹/۲۵ استفاده شده است که پس از

(۸)، C قابل مشاهده است.



شکل ۸ مقایسه پلان مخزن در قبل و بعد از انجام رسوب‌شویی در سال ۱۳۸۳

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، در فلاشینگ آزاد ابتدا کانالی با عرض کم در انباشت رسوب ایجاد شده و با گذشت زمان به‌علت ناپایداری دیواره این کانال، عرض کانال افزایش می‌یابد تا شیب کانال به زاویه پایدار نزدیک شود. هرچه فاصله زمانی بین انجام دو فلاشینگ متوالی بیشتر شود، به‌علت تحکیم صورت گرفته در انباشت رسوب، شیب پایدار دیواره کانال افزایش یافته و عرض کانال به وجود آمده در انباشت رسوبات کمتر و به‌تبع آن حجم رسوبات خروجی بر اثر فلاشینگ کاهش می‌یابد.

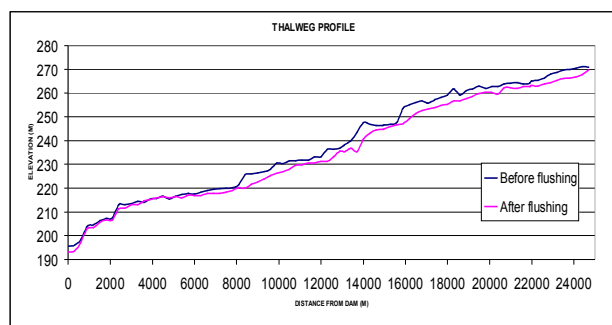
بررسی اثر فلاشینگ بر دانه‌های رسوبی

براساس نمونه برداری انجام شده گستره دانه‌بندی از ماسه ریز تا رس درشت دانه است. ۷۰٪ دانه‌بندی بستر ریزدانه و ۳۰٪ آن درشت دانه است. میانگین دانه بندی بستر رودخانه را می‌توان به صورت نمودار شکل (۹) نمایش داد.

مدل‌سازی ۶۳ روزه توسط 3 GSTARS ضمن دستیابی به پروفیل‌های طولی و عرضی بعد از فلاشینگ و مقایسه آن با حالت قبل از فلاشینگ، تأثیر رسوب‌شویی بر دانه‌های رسوب با ابعاد مختلف بررسی شده است.

بررسی پروفیل طولی بستر بعد از فلاشینگ آزاد

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، فلاشینگ آزاد برخلاف فلاشینگ تحت فشار، که تأثیر طولی محدود در مخزن دارد، در تمام طول رودخانه موجب فرسایش می‌گردد.



شکل ۷ تراز خط‌القعر رودخانه قبل و بعد از فلاشینگ آزاد

همان‌طور که دیده می‌شود تراز خط‌القعر در نواحی نزدیک ساختگاه سد ۲ تا ۲/۵ متر و در فواصل دورتر ۰/۵ تا ۲ متر پایین آمده است، همچنین در بخش‌های کوچکی از طول مخزن تغییری در تراز خط‌القعر مشاهده نمی‌شود.

بررسی پروفیل عرضی بستر بعد از فلاشینگ آزاد

با مقایسه پروفیل‌های عرضی در مقاطع مختلف مشاهده می‌شود که فلاشینگ آزاد در مقاطع میانی و ابتدایی مخزن بیشتر باعث افزایش عرض کانال شست و شو در این مقاطع می‌گردد. این پدیده به‌علت تمایل رسیدن زاویه شیب کانال شست و شو به مقدار شیب پایدار خاک آن ناحیه است.

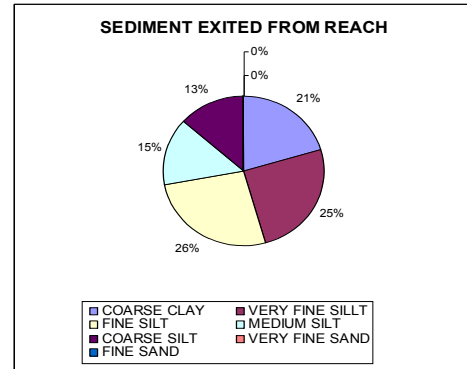
در شکل (۸)، A پلان مخزن براساس پروفیل‌های عرضی قبل از رسوب‌شویی به‌صورت TIN نشان داده شده است. در شکل (۸)، B پلان مخزن پس از رسوب‌شویی دیده می‌شود. با مقایسه این دو پلان توسط نرم‌افزار Arc GIS تغییرات عرضی به وجود آمده تحت فلاشینگ آزاد در شکل

حضور ذرات رس در لایه فعال بستر موجب افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات می‌گردد و باعث می‌شود که تنش برشی لازم برای حرکت ذرات بیشتر از حالتی شود که این مسئله به علت تنش برشی بالاتری است که این ذرات برای حرکت به آن نیاز دارند. ذرات به‌طور مجزا (عدم وجود ذرات رسی در مجاورت آن‌ها) به حرکت درمی‌آیند. به عبارت دیگر وجود ذرات رس موجب محدود شدن نرخ فرسایش شن و ماسه در بسترهایی از این نوع می‌شود.

با توجه به این که ۳۰٪ رسوبات بستر شامل درشت دانه‌هایی هستند که تحت رسوب‌شویی به حرکت در نمی‌آیند، لزوم اعمال روش‌های تکمیلی مانند لایروبی در این مخزن به اثبات می‌رسد.

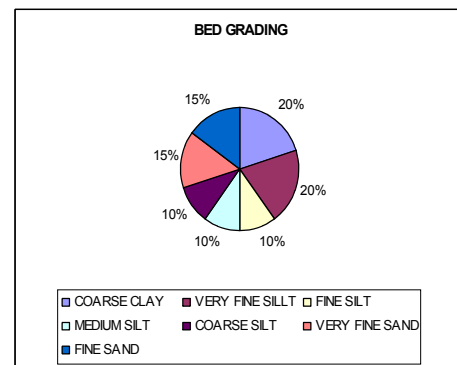
۱۴- بررسی فلاشینگ در درازمدت

در این بخش به اثرات طولانی‌مدت فلاشینگ در مخزن پرداخته شده است. در این حالت ابتدا مدل براساس پروفیل‌های عرضی مساحی شده در سال ۱۳۶۳ تهیه و بر مبنای پروفیل‌های عرضی بستر در سال ۱۳۸۳ کالیبره شده است. سپس مدل با اطلاعات آورد رودخانه در ۱۰ سال آینده که براساس سری‌های زمانی با استفاده از نرم‌افزار MINI TAB پیش‌بینی شده است در سه حالت بدون رسوب‌شویی، رسوب‌شویی سالانه و رسوب‌شویی دوساله اجرا و میزان انباشت رودخانه در ۵ و ۱۰ سال آینده محاسبه گردیده است. نتایج این محاسبه در جدول ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۹ دانه‌بندی بستر رسوبی در مخزن سد سفید رود

پس از اجرای مدل براساس داده‌های فلاشینگ سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ میزان رسوبات تخلیه شده از مخزن به تفکیک اندازه دانه‌ها به‌دست آمده است. شکل (۱۰)



شکل ۱۰ دانه‌بندی رسوبات خروجی از مخزن سد سفید رود در فلاشینگ سال ۱۳۸۳

نتایج مدل‌سازی بیانگر این مسئله است که فلاشینگ آزاد تقریباً بر رسوبات درشت دانه تأثیری ندارد.

جدول ۲ برآورد رسوبات انباشته شده در مخزن پس از ۵ و ۱۰ سال

عملکرد مخزن	میزان رسوب انباشت شده پس از پنج سال (میلیون متر مکعب)	میزان رسوب انباشت شده پس از ده سال (میلیون متر مکعب)
بدون رسوب‌شویی	110	287
رسوب‌شویی سالانه	19	36
رسوب‌شویی دو سالانه	57	104

تراز نرمال مخزن آغاز گردد طول تأثیر به بیش از ۱۶۰۰ متر خواهد رسید.

۴- در فلاشینگ تحت فشار مخزن سفید رود با تراز ابتدایی ۲۳۶/۴ متر، در صورتی که از ظرفیت کامل مسیرهای تخلیه استفاده شود حجم رسوبات خروجی تنها ۹٪ نسبت به زمانی که از ۶۴٪ ظرفیت مجرای تخلیه استفاده می‌شود افزایش می‌یابد. با توجه به احتمال وقوع کاویتاسیون و ایجاد خوردگی توسط ذرات رسوب، استفاده ۱۰۰٪ از ظرفیت مجرای تخلیه توصیه نمی‌شود.

۵- فلاشینگ آزاد در خلاف فلاشینگ تحت فشار، که تأثیر طولی محدودی دارد، در تمام طول رودخانه موجب فرسایش می‌گردد.

۶- فلاشینگ آزاد در ابتدا و میانه مخزن بیشتر موجب افزایش عرض کانال شست و شو و در انتهای مخزن موجب افزایش عمق مسیر جریان می‌شود. مقدار آب مصرف شده برای شست و شوی هر تن رسوب در فلاشینگ آزاد انجام شده در سال ۱۳۸۳ مخزن سد سفیدرود ۱۷ متر مکعب محاسبه شده است.

۷- تأثیر فلاشینگ بیشتر بر رسوبات ریزدانه مخزن دیده می‌شود و تقریباً بر ذرات درشت دانه بی تأثیر است.

۸- بنا بر نتایج مدل‌سازی بلند مدت در صورت انجام فلاشینگ سالانه و منظم، پس از گذشت ۱۰ سال، ۳۶ میلیون متر مکعب رسوب در مخزن ته‌نشین می‌شود به عبارت دیگر سالانه بیش از ۳/۵ میلیون متر مکعب از حجم مخزن کاسته می‌شود.

۹- با توجه به نتایج بند های ۷ و ۸ لزوم انجام عملیات رسوب‌زدایی تکمیلی نظیر لایروبی، سیفون و غیره علاوه بر رسوب‌شویی سالانه در مخزن سد سفید رود امری اجتناب ناپذیر است.

۱۰- با مقایسه مقدار رسوبات انباشته شده در مخزن در حالت‌های بدون رسوب‌شویی، رسوب‌شویی سالانه و رسوب‌شویی دو سالانه می‌توان نتیجه گرفت که در صورت رسوب‌شویی سالانه در هر سال ۲۵/۱ میلیون متر مکعب و در صورت رسوب‌شویی دو سالانه، هر دو سال ۱۸/۴ میلیون متر مکعب رسوب از مخزن خارج می‌شود.

۱۱- درصد تله اندازی در مدل پیش‌بینی ۱۰ سال آینده در حالت بدون رسوب‌شویی با در صد تله اندازی رسوبات ثبت

نتایج ارائه شده در جدول ۲ بیانگر این مسئله است که حتی در صورت انجام فلاشینگ به‌صورت منظم و سالانه، پس از گذشت ۱۰ سال، ۹۳ میلیون تن رسوب در مخزن انباشته می‌شود که تقریباً معادل ۳۶ میلیون متر مکعب است. به‌عبارت دیگر سالانه بیش از ۳/۵ میلیون متر مکعب از حجم ذخیره مخزن کاسته می‌شود و لذا علاوه بر اجرای منظم فلاشینگ باید از روش‌های دیگر مانند لایروبی، عبور جریانات غلیظ، انحراف مسیر جریان رسوبات جهت کاهش رسوبات انباشته شده در مخزن کمک گرفت.

همچنین با مقایسه رسوبات انباشته شده در حالت بدون رسوب‌شویی با حالت‌های رسوب‌شویی سالانه و دو سالانه می‌توان نتیجه گرفت که در صورت رسوب‌شویی سالانه، در هر سال ۲۵/۱ میلیون متر مکعب و در صورت رسوب‌شویی دو سالانه، در هر سال ۹/۲ میلیون متر مکعب رسوب بر اثر رسوب‌شویی از مخزن خارج می‌شود.

۱۵- نتیجه گیری

۱- در طی انجام یک دوره عملیات فلاشینگ، از مجموع رسوبات خارج شده از مخزن، حداکثر ۸٪ رسوبات بر اثر فلاشینگ تحت فشار و حداقل ۹۲٪ رسوبات بر اثر فلاشینگ آزاد تخلیه می‌شوند، لذا فلاشینگ آزاد از اهمیت بیشتری برخوردار است و فلاشینگ تحت فشار با تخلیه مخزن می‌تواند شرایط را برای فلاشینگ آزاد فراهم سازد. به عبارت دیگر بالا بودن تراز آب مخزن در آغاز عملیات فلاشینگ تحت فشار، حجم رسوبات خروجی و حجم آب مصرف شده برای شست و شوی هر تن رسوب را افزایش می‌دهد.

۲- در فلاشینگ تحت فشار مخزن سفیدرود در صورتی که تراز آب مخزن در آغاز عملیات ۲۷۱/۶ (تراز نرمال مخزن) باشد، حجم آب لازم برای شست و شوی هر تن رسوب ۸۹۷ متر مکعب و در صورتی که تراز آب مخزن در ابتدا ۲۱۰/۱ (تراز آبیگیری نیروگاه) باشد، حجم آب لازم برای شست و شوی هر تن رسوب ۱۹ متر مکعب می‌باشد.

۳- طول تأثیر فلاشینگ تحت فشار در صورتی که عملیات از تراز آبیگیری نیروگاه آغاز شود به فاصله ۲۰۰ متر از ساختگاه سد محدود می‌شود، در حالی که اگر عملیات از

- [6] Tolouie, E., West, J. R. and Billam, J. Sedimentation and desiltation in the Sefid-Rud reservoir. Paper presented at the British Geomorphological Research Group meeting on Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs, St Andrews, UK, 1991.
- [7] Dan G. Batuca and Jan M. Jordan January Silting and Desilting of Publisher: Taylor & Francis, Inc, ISBN: 9054104775, 2000.
- [8] Dendy, F.E. Summary of Reservoir Deposition Surveys made in the U.S.A. Dept. of Agr. Misc publ. 1362, 1975.
- [9] Hassanzadeh, Y. "The Removal of Reservoir Sediment". Water International, IWRA, Cambridge, U. S.A. Vol, 120, No. 3, 1995. pp256-277.
- [10] Paul, T. C., and Dhilon, G.S. Sluice Dimensioning for Desilting Reservoirs. "International Water Power & Dam construction May, P 40-44. 32- Peterson. M.s. (1986). "River Engineering", Rentice-Hall International.(UK), ltd, 1988.
- [11] Lai, D. and Hseh, W. and Shen, H. "Flushing Sediment through Reservoirs". Journal of Hydraulic Research, Vol 34 No. 2, 1996. pp243-256.

[۱۲] مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی

مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۱.

[۱۳] سازمان آب منطقه ای گیلان، "گزارش عملیات

رسوب‌زدایی مخزن سد سفیدرود"، ۱۳۸۰.

شده در ۱۷ سال اولیه بهره‌برداری (بهره‌برداری بدون رسوب‌شویی) تطابق دارد.

۱۶- پی‌نوشت

- ¹- Generalized Sediment Transport for Alluvial River Simulation version 3
²- Triangular Irregular Network

مراجع

- [1] Fan, J., and Morris, G. L. "Reservoir sedimentation. II: Reservoir desiltation and long-term storage capacity" J. Hydraulic. Eng., 1992 v 118, n 3, pp370-384.
- [2] Molinas, A. and Wu, B. "User's primer for Bri-Stars (BRIDGE Stream Tube model for Alluvial Simulation)" Fort Collins, Colo., Federal Highway Administration Project No. DTFH61-93-C-00068, Hydrau-Tech, Inc. 1997, p43.
- [3] Olsen, R.N. "SEDIMENTATION IN THE ANGOSTURA RESERVOIR: STUDIES AND EXPERIENCES". Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, October, Yichang, China, 2004.
- [4] Brandt S.A. "Reservoir desiltation by means of hydraulic flushing" Institute of Geography, University of Copenhagen, 1999.
- [5] Olsen, K. v. "Modeling sedimentation and flushing in shallow reservoirs (MIKE21C)" River and flood management department, DHI water and environment, Denmark, 2003.