نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۸، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۳، ص. ۸۶-۷۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 18, Apr.-May. 2024, p. 71-86

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی کارایی روش پمپ و جت آب در رسوب‌زدایی از مخازن سدها

حسین عبادی[۱]، حجت کرمی[۲]، سعید فرزین[۳*]، اکبر صفرزاده[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

چکیده:

در این پژوهش یک فناوری جدید برای رسوب‌زدایی مستمر و کنترل‌شده از مخزن سد بررسی شده است. این فناوری از یک سیستم مکنده با دو پمپ مجزا تشکیل شده است: یک پمپ لجن‌کش برای برداشت و انتقال رسوبات و یک پمپ شناور فشارقوی برای تولید جت آب برای ایجاد اغتشاش در لایه‌های رسوبی کف مخزن. آزمایش‌های محلی در مخزن سد زنوز به‌عنوان مطالعه موردی در دو حالت با و بدون جت آب انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که جرم رسوبات برداشت‌شده در طول زمان آزمایش از سه فاز رشد، کاهش و تعادل پیروی می‌کند. با توجه به شرایط محلی، خصوصیات خاک و سیستم لایروبی، مقادیر حداکثر جرم رسوبی برداشت‌شده توسط پمپ در حالت بدون جت آب ۱۰۰ گرم بر ثانیه و برای حالت با جت ۲۰۰ تا ۴۳۰ گرم بر ثانیه بوده است. تحلیل ابعادی برای پارامتر نرخ تولید رسوب - مقدار حجم مصالح لایروبی در واحد زمان - انجام و روابط تناسبی مربوط به دبی حجمی رسوب و دبی جرمی رسوب به دست آمد که نشان می‌دهند دبی رسوب با منحنی‌های مشخصه (دبی — ارتفاع) پمپ همگراست. راندمان متوسط رسوب‌زدایی در حالت پمپ با جت آب به ترتیب ۷-۱۴٪ و در حالت بدون جت آب ۲-۳٪ بوده است. این نشان می‌دهد که جریان جت آب تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر افزایش راندمان رسوب‌زدایی دارد و بدون آن برداشت رسوبات ته‌نشین شده قابل‌طرح نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مخزن سد، رسوب‌زدایی، پمپ، جت آب، سد زنوز

مقدمه

افزایش جمعیت انسان‌ها در سراسر نقاط جهان و به‌تبع آن افزایش احتیاجات غذایی موردنیاز، افزایش تقاضا برای مصرف آب و ایجاد رفاه نسبی سبب تغییر تحولات بیشتری در طبیعت شده است که مهار آب‌های سطحی به‌وسیله انواع سدها و به‌خصوص سدهای مخزنی ازجمله این تغییرات می‌باشند. امروزه یکی از بزرگ‌ترین دغدغه‌های موجود در زمینه مدیریت سد و نگهداری آن، بحث تخلیه رسوبات ته‌نشین شده در مخازن سدها هست چراکه عدم توجه به این مسئله عمر و حجم مفید مخزن سد را به‌شدت کاهش داده و موجب صدمات جبران‌ناپذیری می‌شود. برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سد و تخصیص آب برای موارد گوناگون؛ نظیر کشاورزی، صنعت و شرب با توجه به کاهش حجم ذخیره مخزن سدها دچار مشکل می‌شود. به نظر کارشناسان طی چند سال آینده به‌احتمال‌زیاد ظرفیت و پتانسیل‌های موجود در بخش سدسازی کشورها به اتمام می‌رسد. این در حالی است که فرایند رسوب‌گذاری در سدها موجود کشور همچنان تداوم دارد.

تقریباً هر مخزن تحت تأثیر رسوب قرار دارد. برآوردها نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا، به علت رسوب‌گذاری از دست می‌رود (نشریه ۳۰۹، ۱۳۹۶). حتی پروژه‌های جدید احداث مخازن نیز این کاهش ذخیره‌سازی را جبران نمی‌کند. کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD[5]) در تحقیقات خود بیان می‌کند که میزان رسوب‌گذاری در مخازن جهان بیش از ظرفیت ذخیره‌سازی سدهای در حال ساخت است. بر اساس نتایج منتشرشده توسط این کمیته تقریباً ۲۰٪ مخازن دنیا تا سال ۲۰۵۰ غیرقابل استفاده خواهند شد؛ بنابراین رسوب‌زدایی سدها مسئله مهمی در جهت نگهداری آن‌هاست (IRCOLD، ۱۳۷۸).

۱- دانشجوی دکتری عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۴- استاد، پژوهشکده مهندسی آب و آب‌های معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(*- نویسنده مسئول: * Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)

5- International Commission on Large Dams

رسوب‌زدایی و تخلیه رسوب مخزن معمولاً کار بسیار هزینه‌بر است. از سوی دیگر رهاسازی رسوبات به سمت پایین‌دست مخازن منجر به ایجاد فرسایش، مشکلات زیرساختی و تأثیرات کمی و کیفی بر آب‌های زیرزمینی می‌شود. در زمان کاهش حجم رسوبات مخزن و دفع آن، نیروگاه‌های برقابی و سایر طرح‌ها و تأسیسات آبی هزینه‌های زیادی را متحمل می‌شوند. علاوه بر این روش‌های مختلفی که تاکنون برای حذف رسوبات به‌کاررفته‌اند – رسوب شویی رسوبات (عملیات شاس[1])، لایروبی مکانیکی[2] – همگی دارای تبعات منفی به شکل‌های متفاوت می‌باشند که شامل: آسیب رساندن به تأسیسات پروژه، تعطیلی پروژه برای چندین ماه، از دست دادن مقادیر زیاد آب و اثرات منفی مورفولوژی و زیست‌محیطی می‌باشند (Jokiel and Detering, 2011). رسوب‌زدایی هیدرولیکی یا عملیات شاس (به زبان فرانسه) به عملیاتی اطلاق می‌شود که با باز کردن تخلیه کننده‌های تحتانی در کف یا رقوم پایین‌تر، رسوبات انباشته‌شده در کف مخزن در اثر فرسایش کنده‌شده و به همراه جریان آب از مخزن خارج می‌شود.

در کشور الجزایر به‌منظور احیای ظرفیت مخازن کوچک از نوع لایروب مکنده تیغه دار با راندمان اسمی ۵:۱ (۵ مترمکعب آب برای لایروبی یک مترمکعب رسوب) و ظرفیت لایروبی۲۴۰ هزار مترمکعب در ماه استفاده شده است. در صورت انسداد لوله‌های انتقال راندمان این لایروب به ۹:۱ کاهش می‌یابد. در ژاپن عملیات لایروبی به‌منظور کاربرد رسوبات به‌عنوان مصالح ساختمانی در بعضی از مخازن سدها استفاده شده است. در کشور سوئیس نیز تخلیه رسوبات ریزدانه تجمع‌یافته در محدوده دریچه‌های آبگیر مخزن پلاک‌ندرا توسط عملیات لایروبی انجام و رسوبات توسط خط لوله و از روی سد به پایین‌دست منتقل گردید. در سد سفیدرود نیز مطالعات تخلیه رسوب با روش لایروبی توسط گروه مشاورین مجارستانی انجام گرفت. مطابق این مطالعات در صورت استفاده از دوازده واحد لایروب و ظرفیت ۷۰ میلیون تن در سال، در مدت ده سال بخش مهمی از حجم تخلیه می‌گردید (آب منطقه‌ای گیلان، ۱۳۸۵). استفاده از سیستم لایروبی در سد دز با توجه به حجم زیاد رسوبات نهشته شده و هزینه‌بر بودن این روش توصیه نشده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

حسن‌زاده در تحقیقی به مطالعه مسئله حذف رسوب مخازن پرداخته است. اثرات احداث سد بر روی رودخانه که باعث تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی و رسوب جریان و همچنین ظرفیت انتقال می‌شود، بررسی شده است. در این مقاله ضمن تشریح روند رسوب‌گذاری، به ارزیابی‌های اقتصادی منابع هیدرولیکی و طرح معیارهای دقیق جهت حفظ و بهبود وضعیت حاکم پرداخته شده است.

نتایج با استفاده از روش فلاشینگ برای سد سفیدرود به دست آمده است (Hassanzadeh, 1995).

هاچ‌کیس و هوانگ به مطالعه سیستم‌های حذف رسوبات مخازن سدها به روش هیدروساکشن (HSRS[3]) پرداختند که در آن جهت حذف رسوبات و ایجاد مکش لازم از اختلاف انرژی تراز آب بالادست و پایین‌دست مخزن استفاده می‌شود. این روش به‌صورت آزمایشی بر روی دریاچه اتکینسون[4] در رودخانه الخورن[5] در نبراسکا[6] بکار گرفته شده و در آن شکل‌های مختلف دهانه ورودی مکش جهت حذف رسوباتی که به مخزن سد وارد می‌شود، مورد آزمایش قرار گرفته شده است (Hotchkiss and Huang, 1995).

ساکورای و همکاران دو تکنیک انتقال و تأمین رسوب از مخزن سد به رودخانه پایین‌دست که در اثر ساخت سد و کاهش بار رسوبی دچار مشکلات زیست‌محیطی و تغییرات موفورلوژی – مانند تخریب رودخانه، فرسایش بستر و اختلال در مصالح بستر رودخانه – شده است، بررسی کردند. در این دو تکنیک از انرژی پتانسیل آب مخزن و رودخانه پایین‌دست استفاده می‌شود. روش اول شامل یک صفحه مسطح و لوله مکش بوده و در روش دوم از تأسیسات دریچه شیر هوا استفاده شده است. بر اساس نتایج مدل آزمایش فیزیکی ساخته‌شده، هر دو روش قادر به تخلیه رسوبات غیر چسبنده مانند شن و ماسه بوده‌اند (Sakurai et al., 2007).

چن و همکاران در تحقیقی، رسوب‌زدایی به روش سیفون همراه با تانک شناور و شکل‌های مختلف دهانه مکش– از نوع مسطح یا گوه‌ای با سوراخ و بدون سوراخ– مورد آزمایش قرار دادند. این آزمایش حداکثر فشار مکش و سرعت را هنگامی نشان می‌دهد که فاصله دهانه مکش تا بستر حدود ۲۵ درصد قطر مکش را داشت. در حالتی که این فاصله به ۵۰ درصد یا ۱۰۰ درصد قطر مکش افزایش می‌یافت، فشار مکش به‌سرعت کاهش پیدا می‌کرد. در ضمن کارایی لایروبی رسوب در حالتی که لوله مکش به‌صورت زیرگذر یعنی از ته سد عبور می‌کند بهتر از حالتی که لوله مکش از بالای سد به‌صورت روگذر عبور کند، گزارش شده است (Chen et al., 2010).

شرستا کاربرد شیوه حذف رسوبات به روش هیدروساکشن را بر روی دریاچه‌ها و مرداب‌های انباشته از رسوبات موردبررسی قرار داده و در آن از یک سیستم مکش دوگانه استفاده کرده است. در این روش به‌منظور کاهش مشکلات مربوط به انسداد لوله‌های مکش، در کنار آن از یک لوله جت آب برای درهم شکستن رسوبات کلوخه شده استفاده شده است (Shrestha, 2012).

کائو و چیو به بررسی اثرات مکش بر انتقال رسوب در مجاری

1- Flushing
2- Manual dredging

3- Hydrosuction sediment-removal systems
4- Atkinson
5- Elkhorn
6- Nebraska

بسته پرداخته‌اند. آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌منظور بررسی تأثیر مکش بر انتقال رسوب در جریان‌های مجاری بسته انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ انتقال بار بستر اساساً برای مقادیر کم‌سرعت مکش قبل از افزایش ناگهانی آن- فراتر از یک آستانه مشخص- بدون تغییر باقی می‌ماند. در این مطالعه تجزیه و تحلیل نظری نیروهایی که بر روی یک ذره کروی وارد می‌شوند نیز انجام شده و یک مدل مفهومی برای آنالیز اثرات مکش بر روی حرکت ذرات با در نظر گرفتن سرعت‌های نزدیک بستر ارائه شده است (Cao and Chiew, 2013).

کائو و چیو در یک مقاله دیگر اثر طول ناحیه مکش بر نرخ انتقال رسوب را موردبررسی قرار داده است. در این مطالعه، آزمایش‌هایی برای بررسی اثرات مکش در نرخ انتقال رسوب در یک مجرای افقی با یک ناحیه مکش با طول متغیر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شدت مکش متناسب با همان نسبت سرعت مکش، نرخ انتقال رسوب با طول ناحیه مکش افزایش می‌یابد (Cao and Chiew, 2014).

در کار آلتوس و همکاران، تأثیر جریان جت در رسوب‌زدایی مخازن سدها موردبررسی قرار گرفته شده است. ایده اصلی در اینجا حفظ رسوبات به حالت تعلیق و جلوگیری از ته‌نشینی آن در نزدیکی سد با ایجاد یک میدان جریان مصنوعی و آشفته (جریان چرخشی)، امکان تخلیه و فرار رسوبات از طریق دریچه‌های سد را ممکن می‌سازد (Althaus et al., 2015). چانگ و همکاران یک مدل پیش‌بینی آنلاین برای بهبود عملیات رسوب‌زدایی سدها با استفاده از جریانات غلیظ ارائه دادند. این مدل با نام TCAT[1] از ترکیبی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، ماشین بردار پشتیبان و یک تکنیک پیش‌بینی دومرحله‌ای ساخته شده است. این مدل می‌تواند دبی و غلظت رسوبات ورودی به سد را با دقت بالا پیش‌بینی کند و اطلاعات مفیدی را برای مدیریت رسوبات در طول عملیات رسوب‌زدایی ارائه کند (Chang et al., 2020). ریمینی یک مطالعه در مورد روشی پایدار برای کاهش رسوبات در مخازن سدها انجام داده است و آن را به‌عنوان تنها راهکار مؤثر برای مقابله با این مشکل مطرح کرده است. این روش شامل نصب یک یا چند لایروب در سد است که به‌طور مداوم رسوبات را از مخزن جدا و تخلیه می‌کنند. رسوبات تخلیه‌شده در استخرهایی که در بالادست سد ایجاد شده‌اند ذخیره می‌شوند و آب پس از تصفیه به مخزن سد باز می‌گردد (Remini, 2022).

پرورش‌ریزی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهش خود، روش‌های مختلف رسوب‌زدایی در مخازن سدهای برق‌آبی را از نظر فنی و اقتصادی مقایسه و ارزیابی کرده‌اند. روش‌های شستشوی سریع و مکش آبی، برای رسوب‌زدایی مخازن سدها امکان‌سنجی شده است. شبیه‌سازی پخش یک‌بعدی رسوبات در مخزن، امکان‌پذیری روش‌های رسوب‌زدایی و انتخاب روش بهینه آن و همچنین ارزیابی اقتصادی گزینه‌ها با زبان برنامه‌نویسی فرترن کد نویسی شده است.

شهیرنیا و همکاران (۱۳۹۳) تأثیر تراز رسوب مخزن بر راندمان رسوب‌زدایی تحت‌فشار را موردمطالعه قرار دادند. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی رسوب‌شویی تحت‌فشار و اثر تغییرات تراز رسوبات بر راندمان و ابعاد حفره رسوب شویی پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای مذکور از یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه استفاده شده است. با توجه به نتایج مربوط به ابعاد اندازه-گیری شده مخروط، بین تراز رسوبات و ابعاد مخروط رسوب شویی ارتباط مستقیمی وجود داشت و با افزایش تراز رسوبات نرخ گسترش ابعاد مخروط رسوب شویی افزایش یافته و همچنین راندمان رسوب شویی تحت‌فشار نیز افزایش می‌یافت.

پیشگر و همکاران (۱۳۹۴) مقاله‌ای تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی اثر روزنه‌های مکش رسوب بر عملکرد روش لوله دفن‌شونده در لایروبی مخازن ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، تأثیر آرایش روزنه‌های تحتانی با قطر ۱۶ و ۳۰ میلی‌متر در سه فاصله متفاوت بین روزنه‌ها موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آرایش روزنه‌ها تأثیر چشمگیری بر عملکرد روش دارد و در هر دو قطر روزنه تحتانی، هنگامی‌که روزنه‌ها تنها بر روی قسمت خم لوله مکش قرار گرفته‌اند، عملکرد روش دارای بیشترین مقدار است.

پیشگر و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش دیگری بررسی آزمایشگاهی اثر مشخصه‌های هندسی و مکانیکی لوله مکش بر کارایی روش هیدروساکشن در تخلیه رسوب را انجام داده‌اند. روش هیدروساکشن لوله مکش دفن شونده موردتوجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله بین روزنه‌های تحتانی و چگالی قسمت انحناء لوله مکش بر کارایی روش هیدروساکشن لوله مکش دفن‌شونده است. نتایج نشان داد، اثر افزایش چگالی قسمت انحناء لوله مکش بر کارایی ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است. همچنین، کاهش فاصله بین روزنه‌ها موجب افزایش کارایی روش هیدروساکشن می‌شود.

مددی و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله‌ای به بررسی روشی برای کاهش رسوبات در مخازن سدها با استفاده از جت آب مستغرق پرداخته‌اند. در این مقاله، با انجام آزمایش‌ها در مقیاس کوچک، تأثیر موقعیت، سرعت و نسبت جریان جت آب به جریان خروجی بر راندمان رسوب شویی را موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که با انتخاب موقعیت و نسبت جریان مناسب، می‌توان راندمان رسوب شویی را به حداکثر رساند. این روش می‌تواند در بهبود مدیریت مخازن و افزایش ظرفیت آن‌ها مفید باشد. به‌طور خلاصه تحقیق حاضر یک روش فنی برای رسوب‌زدایی مخازن با استفاده از یک سیستم مکنده دو پمپی معرفی می‌کند. این روش با ایجاد اغتشاش در

1- Turbidity current arrival time

رسوبات با جت آب، آن‌ها را برداشت و انتقال می‌دهد. این روش در مخزن سد زنوز آزمایش شده و راندمان و کارایی آن در بازیابی حجم مخزن ارزیابی شده است. همچنین تأثیر عواملی مانند دانه‌بندی و فشردگی رسوبات و توان پمپ و جت آب بر نرخ تولید رسوب مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

پیش‌بینی چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها

نحوه توزیع رسوب در مخازن سدها موضوعی است که از دیرباز موردتوجه محققان در نقاط مختلف جهان قرار گرفته است. با ورود جریان رودخانه به مخزن سد، شرایط هیدرولیکی به‌خصوص سرعت جریان به‌شدت کاهش‌یافته و پتانسیل انتقال رسوب رودخانه کاهش می‌یابد. در نتیجه ذرات رسوبی به‌تدریج نهشته می‌شود. بار بستر و درشت‌دانه معلق بلافاصله در مناطق ابتدایی مخزن نهشته شده و دلتا را تشکیل می‌دهند. درحالی‌که بخش ریزدانه به ترتیب تا قسمت‌های عمیق مخزن و حتی نزدیکی سد هم نفوذ کرده و سپس نهشته می‌شوند. الگوی توزیع رسوب در مخازن سدها نشان‌دهنده میزان و مکان رسوب‌گذاری در مخزن است. این الگو به عوامل مختلفی مانند خصوصیات رسوب، جریان آب، شکل و ابعاد مخزن، نوع و عملکرد سد و روش‌های رسوب‌زدایی بستگی دارد. برای مدیریت بهینه مخازن و کاهش اثرات منفی رسوب‌گذاری، لازم است الگوی توزیع رسوب در مخازن را به‌صورت دقیق و موثق پیش‌بینی کرد. برای پیش‌بینی توزیع رسوب در مخازن، روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته تقسیم کرد: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی. در این زمینه روش تجربی جدیدی برای پیش‌بینی توزیع رسوب در مخازن بررسی و پیشنهاد شده است که بر اساس مفهوم منحنی رتبه‌بندی رسوب و فرض غلظت یکنواخت رسوب در طول مقطع مخزن استوار می‌باشد (Mohammadzadeh-Habili and Heidarpour, 2010).

رویکرد پیشنهادی تحقیق حاضر جهت حذف رسوبات مخازن سدها

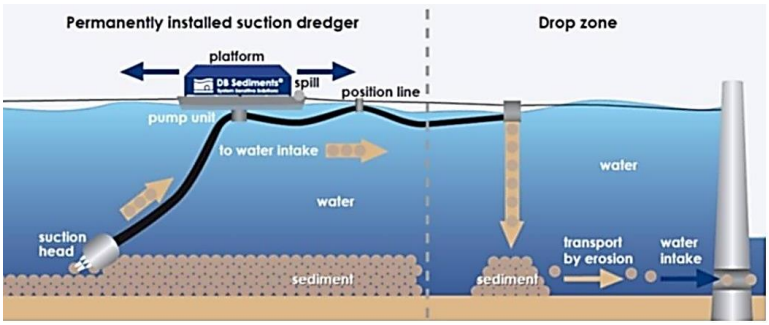
در تحقیق حاضر توسعه یک فناوری در زمینه رسوب‌زدایی مخزن سد ارائه شده است که تحت آن مخزن سد برای ورود و خروج رسوبات وارده مهیا می‌گردد. رسوبات وارده و رسوباتی که طی سالیان متمادی در مخزن سد تجمع یافته‌اند به‌صورت مداوم و پیوسته و تحت غلظت‌های رسوبی کنترل‌شده که با شرایط مورفولوژی و زیست‌محیطی رودخانه سازگاری دارد، به پایین‌دست منتقل می‌شوند. بهره‌برداری مخزن تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و نیازی به تخلیه مخزن و از دست دادن حجم زیادی از آب ذخیره‌شده ندارد.

در مقایسه با سایر روش‌های متداول رسوب‌زدایی، این روش مبتنی بر وسیله‌ای است که امکان انتقال مستمر و کنترل‌شده رسوب مخزن را امکان‌پذیر می‌کند. قسمت‌های اصلی آن شامل یک وسیله شناور مانند قایق که قابلیت جابجایی خودکار و دسترسی به تمام نقاط محدوده مخزن را دارد و به همراه یک سیستم لایروبی مکش مانند استفاده از پمپ‌های مستغرق است که بر روی شناور نصب و توسط کابل از بالا نگهداری می‌شود. در این سیستم با استفاده از پمپ‌های مخصوصی و با ایجاد گرداب مکنده رسوبات بستر به سمت دهانه پمپ مکش شده و توسط لوله رانش به سمت تأسیسات خروجی سد پمپ می‌شود شکل (۱ و ۲). یکی از مزایای اصلی این روش قابلیت جابجایی و دسترسی به تمام رسوبات محدوده مخزن در رسوب‌زدایی است که معمولاً در سایر روش‌ها این مسئله دارای محدودیت است. این ویژگی افزایش راندمان رسوب‌زدایی در این روش را در بر خواهد داشت. به‌طور خلاصه انتقال دائمی رسوبات طی گام‌های ذیل انجام خواهد گرفت:

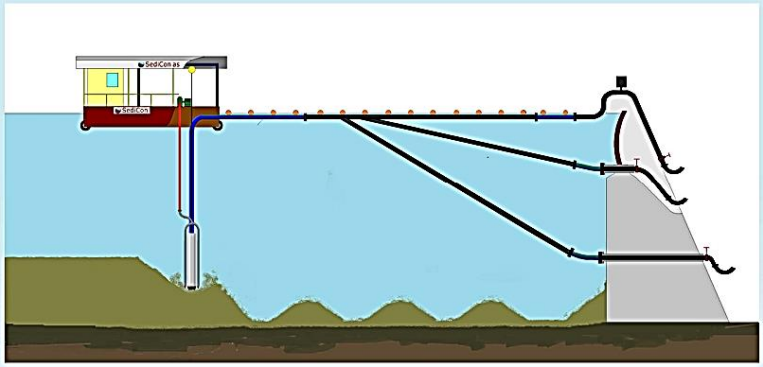
گام ۱: رسوبات به‌وسیله لوله مکش لایروبی می‌شود.

گام ۲: رسوبات توسط سیستم پمپاژ به سمت پایین‌دست سد و یا در قسمت جلوی تأسیسات آبگیری و تخلیه تحتانی انتقال و دپو می‌شود.

گام ۳: رسوبات انباشته‌شده توسط جریان خروجی سد فرسایش یافته و به سمت پایین‌دست رهاسازی می‌شوند.



شکل ۱- انتقال دائمی رسوبات به سمت تأسیسات خروجی سد



شکل۲- حالت‌های مختلف انتقال دائمی رسوبات به سمت پایین‌دست سد

برخی از قابلیت و جنبه‌های قابل‌توجه در این روش پیشنهادی به شرح ذیل است:

- حذف و انتقال مداوم رسوبات از مخزن سد صورت می‌گیرد.
- در مدت‌زمان نسبتاً طولانی در محدوده مورفولوژی و سازگار با محیط‌زیست موجب تغذیه رسوب پایین‌دست می‌شود.
- مدیریت و بهره‌برداری مخزن تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و هم زمان با بهره‌برداری روزانه قابل انجام است.
- روند کلی فرایند رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی رودخانه را به حالت طبیعی و اولیه نزدیک می‌کند.
- به لحاظ تجهیزات کاملاً قابلیت خودکار دارد و از این لحاظ از نظر اقتصادی پتانسیل رقابتی با سایر روش‌ها را دارا است.
- فاقد اثرات منفی (آسیب رساندن به تأسیسات، تعطیلی پروژه تا چندین ماه، از دست دادن مقادیر زیاد آب، تأثیرات مخرب مورفولوژی و زیست‌محیطی و...) است.

سد خاکی موردمطالعه

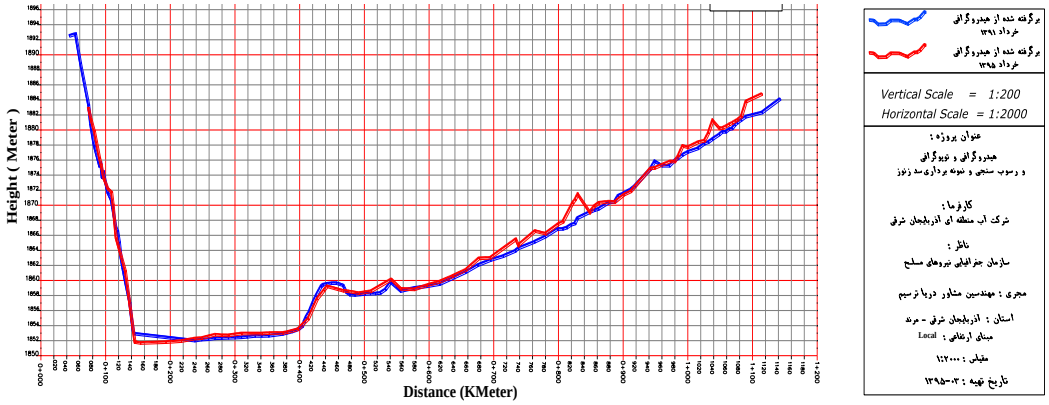
در این پژوهش سد زنوز به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته ناتراوا است که حجم مفید آن ۴/۱۶۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است که در ۴ کیلومتری شهر زنوز در استان آذربایجان شرقی، در شمال غربی ایران قرار دارد. شکل (۳) موقعیت سد زنوز و شکل (۴) نمایی از دریاچه سد را نشان می‌دهند (بندآب، ۱۳۷۷).

با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته، آورد رسوبی سد زنوز برخلاف نتایج مطالعات صورت گرفته بیشتر از میزان برآوردهای اولیه – رسوب ویژه طرح برابر ۴۲۸ مترمکعب در کیلومترمربع در سال– بوده و در مدت‌زمان کمتر (در طول ۸ سال بهره‌برداری) میزان رسوب وارده علاوه بر اشغال حجم مفید سد، در ترازی بالاتر از تراز آبگیری سد قرارگرفته که ضمن احتمال انسداد خروجی سد، تأمین اهداف اولیه سد را با مشکلات زیاد مواجه کرده است.

شکل ۳- موقعیت سد زنوز در استان آذربایجان شرقی

شکل ٤- نمایی از دریاچه سد زنوز

ازجمله اهداف کاربردی این تحقیق کمک به احیای حجم ازدست‌رفته این سد می‌تواند باشد. به‌منظور شناخت روند رسوب‌گذاری در این سد از نظر مقدار و توزیع زمانی و مکانی آن و آگاهی از میزان مواد جامد رسوب که توسط جریان حمل یا ترسیب می‌گردد اقدام به انجام عملیات هیدروگرافی در سال‌های ۹۱ و ۹۵ شده و بر اساس آن پروفیل طولی رسوب‌گذاری مخزن سد به دست آمده است که در شکل (۵) نمودار آن‌ها ملاحظه می‌گردد.



شکل ۵- پروفیل طولی رسوب‌گذاری مخزن سد زنوز (دریاترسیم، ۱۳۹۵)

راه‌اندازی و ساخت سیستم مکنده پیشنهادی

شکل نهائی سیستم مکنده که برای این تحقیق طراحی، ساخت و استفاده شده است، دارای دو پمپ، سه نازل و لوله و اتصالات است. جهت انجام عملیات لایروبی از یک پمپ از نوع پمپ‌های لجن‌کش استفاده شده است. پمپ مزبور یک پمپ لجن‌کش ۲ اینچ ۱۸ متری هسل مدل WQD10-18-0.75- با توان ۱ اسب بخار/ ۰/۷۵ کیلووات- ازجمله لجن‌کش‌های باکیفیت ساخت ایران است. لجن‌کش دقیقاً مشابه کف‌کش می‌باشد با این تفاوت که سیال با ذرات معلق بزرگ‌تر را مکش می‌نماید. در سیستم مکنده پیشنهادی به همراه پمپ منتخب به‌منظور افزایش راندمان رسوب‌زدایی از یک پمپ شناور فشارقوی جهت تولید جت آب (واترجت) نیز استفاده شده است. این پمپ از نوع پمپ شناور تک فاز گروه ۱۰۲ URD – با توان ۱/۵ اسب بخار/ ۱/۱ کیلووات- است که توسط شرکت پمپیران تولید می‌شود - (شکل شماره ۶). برای اعمال تأثیر جریان جت آب در نزدیکی دهانه پمپ مکش از سه نازل به قطر ۵ میلی‌متر با زاویه پاشش ۴۵° در پیرامون محیط مکش استفاده شده است که شکل شماره (۷) وضعیت قرارگیری آن در اطراف دهانه مکش نشان می‌دهد.

ب. الف.

شکل ٦- الف: پمپ شناور، ب: مشخصات فنی (pumpiran.com)

شکل ۷- نازل جت آب (تعداد: ۳ عدد، قطر: ۵ میلی‌متر، زاویه: ٤٥°)

به‌منظور سهولت در انجام آزمایش با پمپ در حالت‌های مختلف به همراه جت و بدون اثر جت آب از یک تابلوی برق برای روشن و خاموش کردن هر یک از پمپ‌های دستگاه استفاده شده است تا عملکرد آن‌ها تحت کنترل باشد. به‌عبارت‌دیگر در زمان آزمایش ابتدا

کلید پمپ لجن کش روشن شده و متعاقباً با روشن کردن کلید مربوط به پمپ شناور، آزمایش در حالت پمپ با جت و بدون جت قابل انجام بوده است. برای تأمین منبع برق موردنیاز جهت راه‌اندازی الکتروپمپ‌ها نیز از یک موتوربرق بنزینی سیار که قابلیت جابجایی داشته و بتوان به‌راحتی بر روی قایق انتقال داد بهره‌برداری شده است.

در زمان آزمایش ارتباط بین دو پمپ لجن کش و شناور توسط شیلنگ جت آب فشارقوی به قطر ۱/۵ اینچ ایجاد شده است که به‌وسیله بست‌های پیچ و مهره از دو طرف به پمپ‌ها متصل شده است. جریان فشارقوی که به‌وسیله پمپ شناور تولید می‌شود از طریق شیلنگ مذکور به قسمت پمپ لجن‌کش انتقال پیداکرده و از طریق سه نازل موجود در پیرامون دهانه مکش، جریان جت آب به بیرون ایجاد می‌شود. جریان خروجی از پمپ مکش نیز بعد از مکش جریان رسوبات از طریق یک لوله پلی‌اتیلن به قطر لوله رانش ۲ اینچ به بیرون انتقال داده می‌شود. از یک طول مناسب برای رساندن جریان خروجی پمپ لجن کش به خارج از محیط مخزن سد جهت دسترسی به آن برای نمونه‌برداری در حین آزمایش‌های مربوطه استفاده شده است.

در این سیستم پیشنهادی، جریان آب از طریق نازل‌ها با قدرت زیاد به لایه‌ها برخورد کرده و سبب اغتشاش شدید لایه‌ها می‌شود و در نهایت توسط دهانه مکش پمپ لجن‌کش لایه‌های جداشده از سطح مکش یافته و با استفاده از لوله‌های انتقال به محل جمع‌آوری رسوبات منتقل می‌گردد. در شکل شماره (۸) شکل نهائی سیستم لایروبی و مکش که برای انجام آزمایش‌های محلی طراحی و ساخته شده است، نشان داده شده است. لازم به توضیح است که به‌منظور جلوگیری از مدفون شدن دهانه مکش پمپ و ایجاد فاصله مناسب با بستر رسوبات، یک زائده به طول ۱۵ سانتی‌متر در قسمت ورودی دهانه مکش پمپ لجن کش ساخته شده است. پس از ساخت نهایی دستگاه در چند مرحله، تست و راه‌اندازی اولیه تجهیزات در آزمایشگاه و همچنین در سایت سد مخزنی به‌منظور اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم انجام گردید که در شکل شماره (۹) تصویر منتخب از آن به نمایش گذاشته شده است. همان‌طوری که اشاره گردید در این آزمایش‌ها علاوه بر نحوه لایروبی که در بالا اشاره شد، لایروبی بدون جریان جت آب (مکش خالص) نیز آزمایش‌شده و با حالت لایروبی با جت آب مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

شکل ۸- شکل نهائی سیستم لایروبی ساخته‌شده برای آزمایش‌های میدانی

شکل ۹- تست و راه‌اندازی اولیه تجهیزات در آزمایشگاه

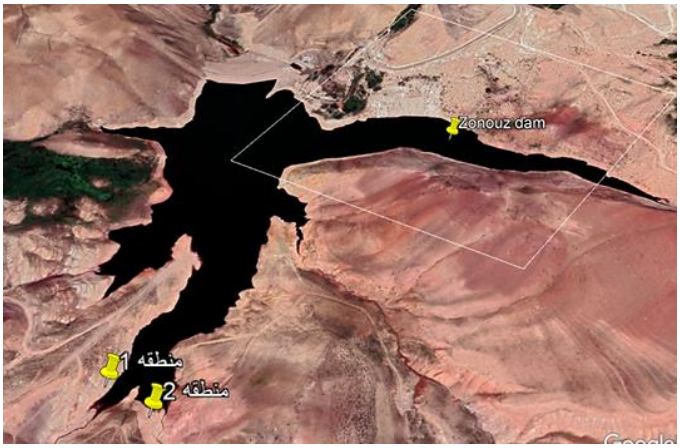
روند کار آزمایش‌های میدانی

به‌منظور انجام آزمایش‌های مربوطه در روش پیشنهادی از یک قایق به‌عنوان سکوی شناور جهت قرار گرفتن تجهیزات موردنظر بر روی آن و همچنین دسترسی به موقعیت‌های مختلف مخزن سد استفاده شده است. در هر مرحله، مجموعه پمپ و جت آب به همراه متعلقات مربوطه بر روی قایق سوار شده و به منتهی‌الیه مخزن سد انتقال داده شده است. پس از قرارگیری و تثبیت در موقعیت مورد نظر در دو حالت پمپ به‌تنهایی و پمپ با جت آب سیستم راه‌اندازی و آزمایش‌های موردنظر انجام شده است. شکل شماره (۱۰) تصویری از مراحل انجام آزمایش‌های میدانی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰- نمایی از مراحل و نحوه انجام آزمایش‌های میدانی

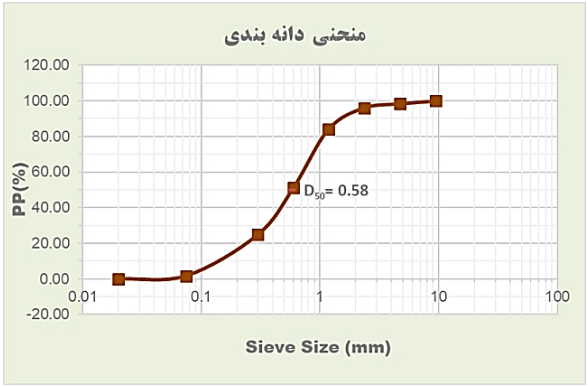
در حین آزمایش، آزمایش‌ها با دوربین ضبط شده و نمونه‌های رسوبی با استفاده از کیسه‌های نخی جهت جمع‌آوری رسوبات، برداشت شده است. در طول مدت‌زمان هر آزمایش از ۱۰ کیسه نخی جداگانه و شماره‌گذاری شده برای نمونه‌برداری رسوبات در فواصل زمانی مختلف از ابتدا تا انتهای آزمایش استفاده شده است و در چند گام زمانی نیز حین آزمایش، اندازه‌گیری دبی آب خروجی از لوله رانش پمپ انجام شده است. پس از برداشت نمونه‌های رسوبی مربوط به هر آزمایش، نمونه‌های جمع‌آوری‌شده در معرض هوا و آفتاب قرار گرفته تا پس از خشک شدن آماده برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها گردد. پس از اندازه‌گیری نسبت به ثبت داده‌ها (وزن رسوبات، زمان) در جداول از پیش تهیه‌شده اقدام و نتایج همه آزمایش‌های انجام‌شده به‌صورت نمودار ترسیم شده‌اند و مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته‌اند.

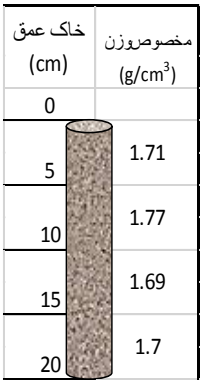
در هر مرحله آزمایش، موقعیت جغرافیایی محل آزمایش و تراز سطح آب داخل مخزن سد نیز در جداول مزبور ثبت شدند. در شکل شماره (۱۱) تصویر هوایی موقعیت نواحی که آزمایش‌های میدانی در منتهی‌الیه مخزن سد زنوز انجام‌گرفته، نشان داده شده است. از دو منطقه جداگانه (شماره ۱ و ۲) به‌منظور انجام آزمایش‌های میدانی استفاده شده است.



شکل ۱۱- موقعیت مناطق آزمایش میدانی در سد زنوز (۵۷۶۶۷۶ طول شرقی و ۴۲۷۰۶۳۱ عرض شمالی)

به‌منظور شناخت و کسب اطلاع از خواص فیزیکی خاک مورد آزمایش و مشخصات اولیه آن من‌جمله وزن مخصوص طبیعی رسوبات، اقدام به نمونه‌برداری به‌صورت دست‌نخورده در چند نقطه و عمق مختلف گردید و وزن مخصوص خاک موردنظر به‌دست‌آمده است. در هر مرحله آزمایش، اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک هر ۵ سانتیمتر و تا عمق ۲۰ سانتیمتر تکرار شده است. دانه‌بندی خاک محل نیز به روش مکانیکی با استفاده از الک‌های در دسترس – به تعداد ۶ الک به شماره‌های ۴، ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰، ۲۰۰ – صورت گرفت. منحنی دانه‌بندی خاک به همراه قطر متوسط (D_{50}) و وزن مخصوص آن در عمق‌های مختلف در شکل شماره (۱۲) ارائه شده است.





شکل ۱۲- منحنی دانه‌بندی و وزن مخصوص خاک در اعماق مختلف

در جدول شماره (۱) کلیه آزمایش‌های میدانی که به‌صورت کامل انجام‌شده و داده‌های آن ثبت شدند به همراه تاریخ‌های انجام آزمایش و موقعیت جغرافیایی آن آورده شده است. البته در برخی موارد، آزمایش‌های انجام‌شده به دلیل مشکلات عدیده‌ای که در حین انجام آزمایش عارض می‌شد مجبور به تکرار آزمایش شده و چندین بار آزمایش تجدید شده است. لازم به توضیح است به‌منظور بررسی دقیق نتایج آزمایش‌های به‌دست‌آمده، علاوه بر آزمایش‌هایی که در منتهی‌الیه مخزن سد صورت گرفته آزمایش‌های دیگری نیز در یک استخر آب به ابعاد ۱/۶×۲/۶×۰/۹ متر با شرایط کنترل‌شده و با استفاده از رسوبات با دانه‌بندی مشخص (D_{50}=0.26mm) انجام گرفته است.

جدول ۱- حالت‌های مختلف آزمایش‌های میدانی انجام‌شده

شماره آزمایش	نوع آزمایش	تاریخ (شمسی)	موقعیت جغرافیایی Y(m N)	موقعیت جغرافیایی X(m E)	شماره منطقه	محل آزمایش	دبی آب (lit/s)	ارتفاع آب (cm)	تراز دریاچه (m)
۱	بدون جت	۱۴۰۱/۰۳/۰۵	۴۲۶۹۸۹۰	۵۷۶۶۵۶	منطقه (۱)	سد زنوز	۲/۸۸	۹۰	**۱۸۷۸**
۲	بدون جت	۱۴۰۱/۰۳/۰۶	۴۲۶۹۸۹۸	۵۷۶۷۳۵	منطقه (۲)	سد زنوز	۲/۸۲	۱۰۰	**۱۸۷۸**
۳	بدون جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۳	۴۲۶۹۸۹۰	۵۷۶۶۵۶	منطقه (۱)	سد زنوز	۱/۸۸	۵۰	**۱۸۷۶**
۴	با جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۳	۴۲۶۹۸۹۰	۵۷۶۶۵۶	منطقه (۱)	سد زنوز	۱/۸۸	۵۰	**۱۸۷۶**
۵	بدون جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۳	۴۲۶۹۸۹۰	۵۷۶۶۵۶	منطقه (۱)	سد زنوز	۲/۸۲	۶۰	**۱۸۷۶**
۶	با جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۳	۴۲۶۹۸۹۰	۵۷۶۶۵۶	منطقه (۱)	سد زنوز	۲/۸۲	۶۰	**۱۸۷۶**
۷	بدون جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۴	۴۲۶۹۸۹۸	۵۷۶۷۳۵	منطقه (۲)	سد زنوز	۱/۸	۴۵	**۱۸۷۶**
۸	با جت	۱۴۰۱/۰۴/۱۴	۴۲۶۹۸۹۸	۵۷۶۷۳۵	منطقه (۲)	سد زنوز	۳/۷۶	۷۰	**۱۸۷۶**
۹	بدون جت	۱۴۰۱/۰۴/۲۷	–	–	-	استخر	۲/۱۵	۵۰	-
۱۰	با جت	۱۴۰۱/۰۴/۲۷	–	–	-	استخر	۲/۷	۵۰	-
۱۱	بدون جت	۱۴۰۱/۰۴/۲۸	–	–	-	استخر	۲/۱۵	۵۰	-
۱۲	با جت	۱۴۰۱/۰۴/۲۸	–	–	-	استخر	۲/۷	۵۰	-

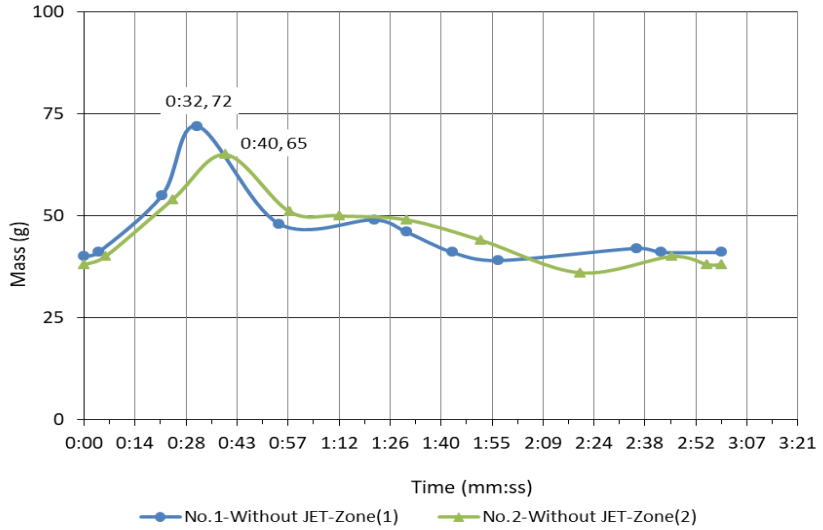
نتایج و تحلیل داده‌ها

گزارش آزمایش‌های میدانی برداشت رسوب پمپ و جت آب

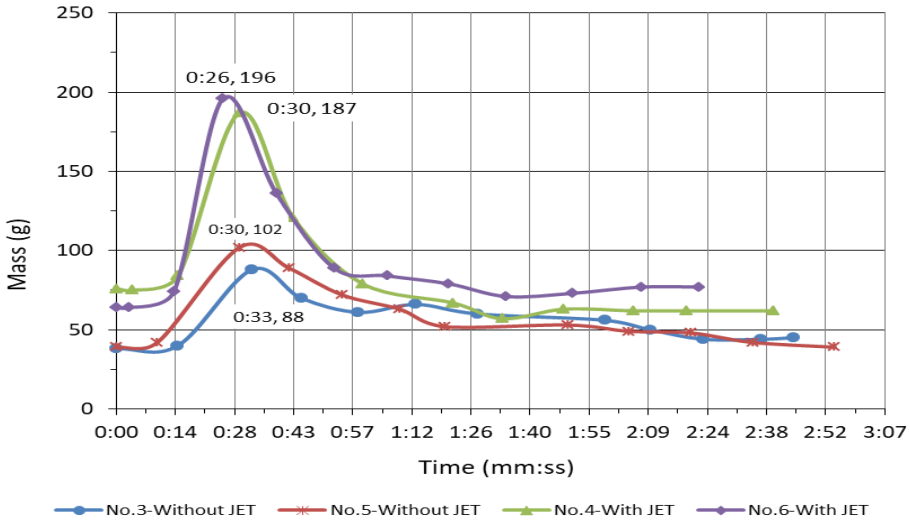
در این پژوهش، یک فناوری جدید برای رسوب‌زدایی مخزن سد ارائه شده است که قابلیت انتقال پیوسته و کنترل‌شده رسوب را دارد. این فناوری بر اساس استفاده از یک سیستم مکنده با جت آب طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌های میدانی با نصب پمپ و جت آب روی قایق و حرکت به سمت مخزن سد انجام شده‌اند. در هر آزمایش، سیستم در دو حالت با و بدون جت آب فعال شده و رسوبات برداشت‌شده توسط دوربین ثبت و نمونه‌برداری شده‌اند. سپس، وزن و خصوصیات رسوبات اندازه‌گیری و داده‌های مربوطه (وزن رسوبات، زمان) در جداول خاص ثبت شده‌اند. آزمایش‌های میدانی مطابق جدول شماره (۱) انجام گردیده است. نمودارهای شکل (۱۳) تا (۱۶) تغییرات جرم رسوبات برحسب زمان را نشان می‌دهند. در این نمودارها، یک منحنی صعودی با شیب زیاد در ابتدای آزمایش دیده

می‌شود که به حداکثر جرم رسوب می‌رسد. سپس، یک منحنی نزولی با شیب کمتر رخ می‌دهد که به یک جرم ثابت همگرایی پیدا می‌کند. با توجه به شرایط محلی، خصوصیات خاک و سیستم لایروبی، مقادیر حداکثر جرم رسوب برای پمپ در دو حالت بدین شرح است:

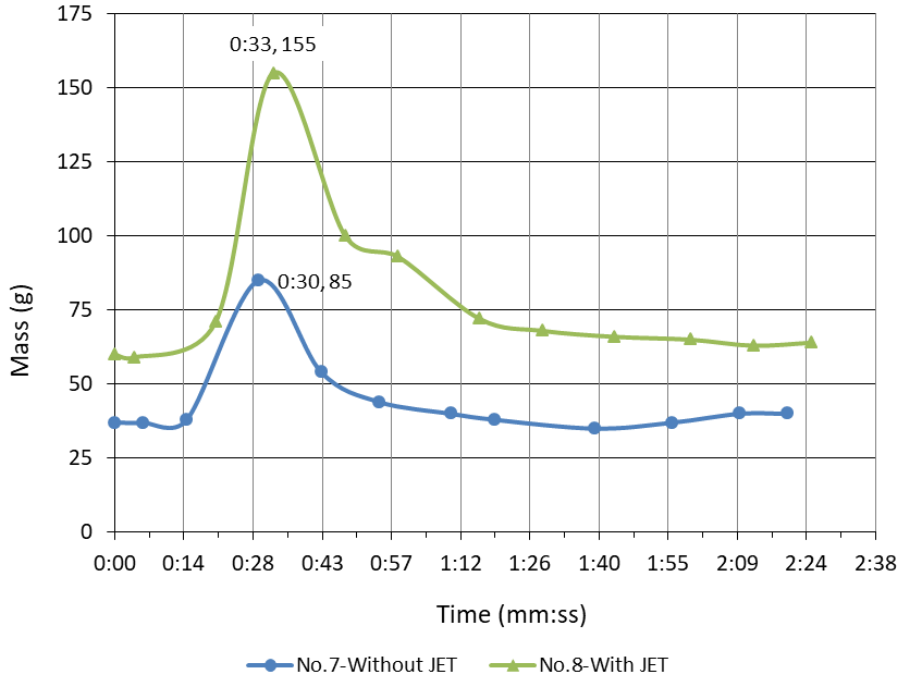
بدون جت	۱۰۰ g/s
با جت	۲۰۰ ~ ۴۳۰ g/s



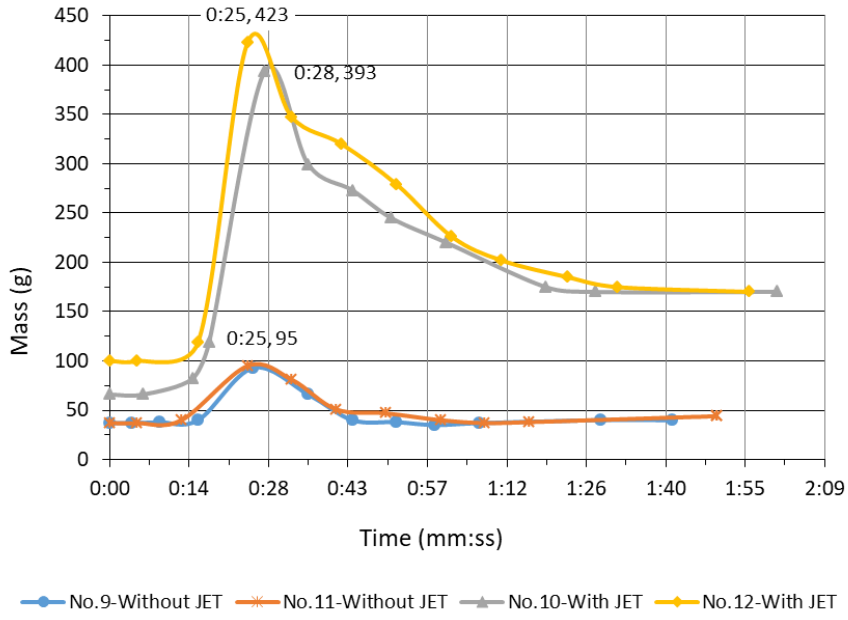
شکل ۱۳- نمودار تغییرات جرم رسوبات برداشت‌شده در طول زمان آزمایش - پمپ بدون جت آب، منطقه (۱) و (۲) مخزن سد – آزمایش شماره (۱) و (۲)



شکل ۱٤- نمودار تغییرات جرم رسوبات برداشت‌شده در طول زمان آزمایش - پمپ با/ بدون جت آب، منطقه (۱) مخزن سد- آزمایش شماره (۳)، (٤)، (٥) و (٦)



شکل ۱۵- نمودار تغییرات جرم رسوبات برداشت‌شده در طول زمان آزمایش - پمپ با/ بدون جت آب؛ منطقه (۲) مخزن سد - آزمایش شماره (۷) و (۸)



شکل ۱۶- نمودار تغییرات جرم رسوبات برداشت‌شده در طول زمان آزمایش - پمپ با/ بدون جت آب ؛ استخر آزمایش - آزمایش شماره (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)

تحلیل ابعادی

در این تحقیق در حالت مکش خالص (بدون حضور جت آب) فرض شده است پارامتر نرخ تولید یا انتقال رسوب Q_s – مقدار حجم مصالح لایروبی در واحد زمان – تابعی از دانه‌بندی ذرات رسوب با

قطر معرف d_{50}، توان پمپ P و تراکم رسوبات (γ_s، وزن مخصوص رسوبات) است؛ بنابراین تابع Q_s به‌صورت عبارت ذیل بیان می‌شود:

$$Q_s = f(d_{50}; P; \gamma_s) \quad (۱)$$

مطابق آنالیز ابعادی در این شرایط خواهیم داشت:

$$Q_s = \alpha {d_{50}}^a P^b {\gamma_s}^c \quad (۲)$$

$$[L^3T^{-1}] = \alpha[L]^a[ML^2T^{-3}]^b[ML^{-2}T^{-2}]^c \quad (۳)$$

درنتیجه با به دست آوردن مقادیر a، b و c از تساوی دو طرف رابطه بالا، تناسب زیر به دست می‌آید:

$$Q_s = \alpha {d_{50}}^{-1} {\gamma_s}^{-1} P \quad (۴)$$

$$Q_s = \alpha \frac{P}{d_{50} \times \gamma_s} \quad (۵)$$

با فرض رابطه توان به‌صورت $P = \gamma_w Q_w H$ و تعریف چگالی نسبی طبق رابطه $S = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ به دو رابطه ذیل بنام **دبی حجمی رسوب** (Q_{vs}) و **دبی جرمی رسوب** (Q_{ms}) خواهیم رسید:

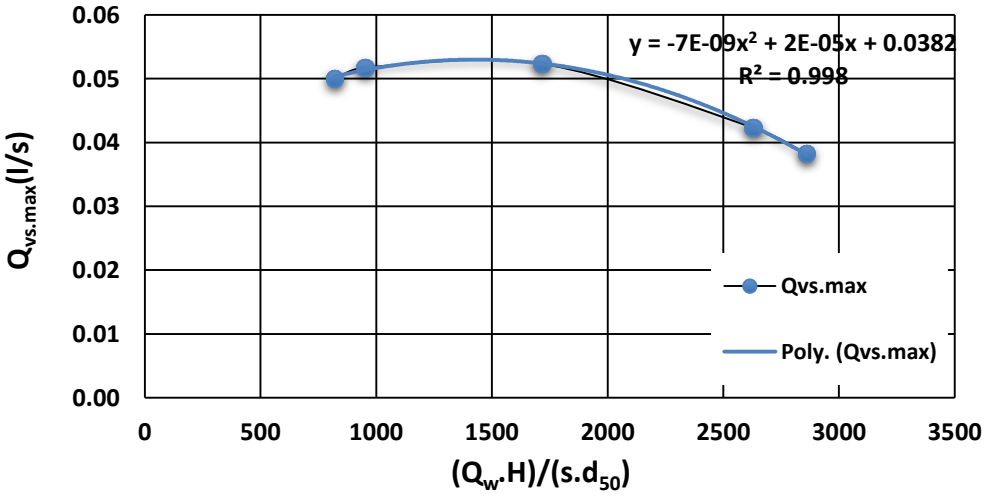
$$Q_{vs} = \alpha \frac{Q_w . H}{S . d_{50}} \quad (l/s) \quad (۶)$$

$$Q_{ms} = \alpha \frac{\rho_w . Q_w . H}{d_{50}} \quad (g/s) \quad (۷)$$

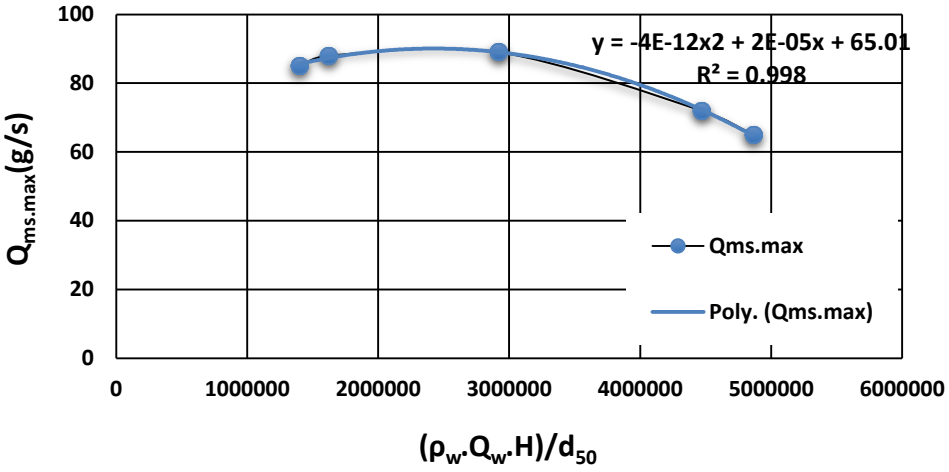
که در آن γ_w و ρ_w وزن مخصوص و چگالی آب، Q_w دبی پمپ و H ارتفاع پمپاژ می باشد.

برای تعیین ضریب تناسب در روابط بالا، از داده‌های آزمایش‌های رسوب‌زدایی با پمپ بدون جت استفاده شده است. سپس، با استفاده از عبارات حجمی و جرمی، دبی رسوب برای هر آزمایش محاسبه شده است. نتایج محاسباتی و مشاهداتی دبی رسوب در نمودارهای شکل (۱۷) و (۱۸) رسم شده‌اند. همچنین، منحنی‌های درجه‌دو برای برازش داده‌ها به‌کاررفته‌اند. این منحنی‌ها دارای درجه رگرسیون بالایی هستند و نشان می‌دهند که دبی رسوب به‌صورت شبیه به منحنی‌های مشخصه (دبی– ارتفاع) پمپ تغییر می‌کند.

در این بخش، نتایج آزمایش‌های میدانی در حالت‌های مختلف رسوب‌زدایی با پمپ با و بدون جت آب بررسی شده‌اند. راندمان رسوب‌زدایی ($\bar{Q}_s/\bar{Q}_w$) به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی عملکرد سیستم مکنده استفاده شده است که در آن $\bar{Q}_s$ و $\bar{Q}_w$ متوسط حداکثر دبی رسوبی و دبی پمپ در آزمایش‌های میدانی می‌باشند. جدول (۲) مقادیر متوسط راندمان رسوب‌زدایی در دو حالت آزمایشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- برازش منحنی تحلیل ابعادی برآورد دبی حجمی رسوب



شکل ۱۸- برازش منحنی تحلیل ابعادی برآورد دبی جرمی رسوب

جدول۲- راندمان رسوب‌زدایی در دو حالت پمپ با / بدون جت آب

متوسط راندمان رسوب‌زدایی $(\bar{Q}_s/\bar{Q}_w)$	پمپ بدون جت	٪۲-۳
	پمپ با جت	٪۷-۱٤

با تحلیل جدول (۲)، می‌توان نتیجه گرفت که جت آب نقش مؤثری در افزایش راندمان رسوب‌زدایی دارد. در حالت با جت آب، راندمان رسوب‌زدایی تا ۱۴٪ افزایش یافته است. در حالت بدون جت آب، راندمان رسوب‌زدایی خیلی کم بوده و برداشت رسوبات ته‌نشین شده قابل‌طرح و توجیه‌پذیر نمی‌باشد.

رسوب‌زدایی مخزن سد زنوز:

در این تحقیق، رسوب‌زدایی مخزن سد زنوز به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این سد در طول ۸ سال بهره‌برداری با مشکلات رسوب‌گیری روبرو شده است. بر اساس مطالعات طراحی، حجم مخزن سد در تراز نرمال ۶ میلیون مترمکعب بوده است؛ اما در طول ۸ سال، ۰/۹۰۴ میلیون مترمکعب رسوب وارد مخزن شده است به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت به‌طور متوسط سالانه در حدود ۱۱۳ هزار مترمکعب وارد مخزن سد شده است. این رسوبات حجم مفید سد را کاهش داده و تراز آبگیری سد را تهدید کرده‌اند.

در این راستا مسئله برداشت رسوبات سالانه وارده به مخزن سد به‌وسیله سیستم لایروبی پیشنهادی با پمپ آزمایشی منتخب – لجن‌کش تک فاز (۲ اینچ) هسل، ۰/۷۵ کیلووات، WQD10-18-0.75 و جت آب موردبررسی قرار گرفته است. دبی رسوب برای پمپ در دو حالت بدون و با جت آب به ترتیب ۱۰۰ g/s و ۴۳۰ g/s ~ ۲۰۰ بوده و وزن مخصوص رسوبات $1/7 g/cm^3$ به‌دست‌آمده است. مدت‌زمان لازم برای رسوب‌زدایی با پمپ و جت آب حدود ۱۴ تا ۳۰ سال خواهد بود. برای کاهش این مدت‌زمان، می‌توان ظرفیت پمپاژ را افزایش داد یا تعداد پمپ‌های فعال را بیشتر کرد.

در صورت برداشت رسوبات سالانه وارده به مخزن سد در مدت‌زمان یک سال، نرخ تولید رسوب و یا دبی رسوب به میزان ۶۰۰۰g/s (معادل ۳/۵۳ l/s) مورد نیاز خواهد بود. با احتساب راندمان رسوب‌زدایی برابر ۱۴٪، جدول شماره (۳) مشخصات پمپ مناسب را نشان می‌دهد. این مشخصات می‌توانند در انتخاب پمپ مناسب مورداستفاده قرار گیرد.

جدول ۳- مشخصات پمپ لازم برای رسوب‌زدایی مخزن سد زنوز

مشخصات پمپ (با راندمان رسوب‌زدایی برابر ۱٤٪)	توان پمپ	دبی پمپ
	P >۷/۵ kw	Q >۲۵ l/s

در ارتباط با هزینه‌های رسوب‌زدایی مخزن سد با استفاده از روش پمپ و جت آب می‌توان گفت:

- از نظر هزینه سرمایه اولیه، روش پمپ و جت آب یک روش گران‌قیمت است که نیاز به خرید و نصب تجهیزات پیچیده و ایجاد سکوی شناور متحرک دارد. برای مثال، برای برداشت رسوبات سالانه وارده به مخزن سد مفروض، یک پمپ با توان حداقل ۷/۵ کیلووات و دبی حداقل ۲۵ لیتر بر ثانیه لازم است که قیمت آن بستگی به نوع و مدل پمپ دارد. علاوه بر این، نیاز به خرید و نصب لوله‌ها، شیرآلات، اتصالات، سیستم کنترل و ابزار دقیق، سیستم تولید جت آب و سایر تجهیزات جانبی است که هزینه آن‌ها باید به هزینه سرمایه اولیه اضافه شود.
- از نظر هزینه عملیاتی و نگهداری، روش پمپ و جت آب نیاز به مصرف انرژی زیاد و نیروی انسانی متخصص دارد. برای مثال، برای برداشت رسوبات سالانه وارده به مخزن سد مفروض، حداقل ۱ سال زمان و یک پمپ با توان حداقل ۷/۵ کیلووات و دبی حداقل ۲۵ لیتر بر ثانیه لازم است. اگر فرض شود که پمپ به‌طور متوسط ۸ ساعت در روز کار کند و قیمت هر کیلووات ساعت برق در ایران حدود ۱۰۰۰ تومان باشد، هزینه مصرف برق پمپ در یک سال حدود ۱۶ میلیارد تومان خواهد بود. هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات، هزینه تأمین قطعات یدکی و سایر هزینه‌های جاری است که باید به هزینه عملیاتی و نگهداری اضافه شود.
- از نظر بازده، روش پمپ و جت آب یک روش مؤثر است که می‌تواند رسوبات را با ضخامت و بافت مختلف از کف مخزن به سمت تخلیه کننده تحتانی سد هدایت کند. این روش می‌تواند میزان ظرفیت مخزن را افزایش دهد و عمر سد را طولانی‌تر کند. این روش همچنین می‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب مخزن را بهبود بخشد و تأثیرات منفی رسوبات بر روی سازه‌های سد را کاهش دهد. قابلیت جابجایی خودکار و دسترسی به تمام نقاط محدوده مخزن از نقاط برجسته این روش محسوب می‌شود.
- از نظر اجرایی، روش پمپ و جت آب یک روش پیچیده است که نیاز به مدیریت دقیق و کنترل فرآیند رسوب‌زدایی دارد. این روش نیاز به نیروی انسانی متخصص و آموزش‌دیده دارد که بتوانند تجهیزات را نصب و تنظیم کنند و مشکلات احتمالی را رفع کنند. این روش همچنین نیاز به انجام مطالعات پیش از اجرا و پس از اجرا دارد که بتوانند اثرات روش بر روی مخزن و محیط را ارزیابی کنند.

به‌طور خلاصه، روش پمپ و جت آب یک روش نوین و مؤثر برای رسوب‌زدایی مخزن سد است که در صورت داشتن شرایط مناسب و امکانات لازم، می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای حفظ و بهره‌برداری از سدها مورداستفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، نتایج آزمایش برداشت رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد با استفاده از سیستم لایروبی با پمپ آزمایشی و جریان جت آب ارائه شده است. نمودار تغییرات جرم رسوبات برداشت‌شده در هر دو حالت با و بدون جت آب از سه فاز صعودی، نزولی و ثابت تشکیل شده است. در ابتدا یک روند صعودی داشته که به‌سرعت به حداکثر مقدار خود رسیده‌اند و در ادامه یک روند کاهشی در نمودارها برقرارشده که به‌تدریج به سمت یک حالت ثابت و پایدار رسیده‌اند.

راندمان متوسط رسوب‌زدایی ($\bar{Q}_s/\bar{Q}_w$) در حالت با جت آب به ترتیب ۷-۱۴٪ و در حالت بدون جت آب ۲-۳٪ بوده است. این نشان می‌دهد که جریان جت آب تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر افزایش راندمان رسوب‌زدایی دارد و بدون آن برداشت رسوبات ته‌نشین شده منطقی نخواهد بود. همچنین، دبی رسوبی با منحنی‌های مشخصه (دبی - ارتفاع) پمپ هماهنگ بوده و تحلیل ابعادی نشان داده است که رابطه تناسب بین دبی حجمی و جرمی رسوب وجود دارد. برای برداشت رسوبات سالانه وارده به مخزن سد مفروض با سیستم لایروبی پیشنهادشده و پمپ آزمایشی - پمپ لجن کش تک فاز (۲ اینچ) هسل، ۰/۷۵ کیلووات، WQD10-18-0.75- همزمان با جریان جت، حداقل ۱۴ سال زمان لازم است. با فرض برداشت رسوبات سالانه سد در مدت یک سال با نرخ تولید رسوب به میزان ۶۰۰۰g/s (معادل l/s ۳/۵۳) و راندمان رسوب زایی برابر ۱۴٪، پمپ مناسب باید دارای توان حداقل ۷/۵ کیلووات و دبی حداقل ۲۵ لیتر بر ثانیه باشد.

تقدیر و تشکر

کلیه تجهیزات و دستگاه‌های موردنیاز در این مرحله با هماهنگی و زیر نظر شرکت پمپیران تأمین و اقدام شده و در زمان اجرا نیز از امکانات و عوامل بهره‌برداری و نگهداری شرکت آب منطقه‌ای

آذربایجان‌شرقی واقع در سد زنوز استفاده شده است که بدین‌وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

منابع

پرورش‌ریزی، ع.، سادات هلبر، س. و فرهودی، ج. ۱۳۹۳. امکان‌سنجی فنی و به‌گزینی اقتصادی روش‌های مختلف رسوب‌زدایی در مخازن سدهای برق‌آبی (مطالعه موردی سد باراسونا–اسپانیا). نشریه علمی– پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی. ایران. ۱ (۳): ۶۳–۷۳.

پیشگر، ر.، ایوب‌زاده، س. و قدسیان، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش روزنه‌های مکش رسوب بر عملکرد روش لوله دفن‌شونده در لایروبی مخازن. مجله علمی– پژوهشی عمران مدرس، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۰ (۱): ۱–۱۴.

پیشگر، ر.، ایوب‌زاده، س.، صانعی، م. و قدسیان، م. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی اثر روزنه‌های مکش رسوب بر عملکرد روش لوله دفن‌شونده در لایروبی مخازن. مجله علمی– پژوهشی عمران مدرس، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۶ (۲): ۱–۱۴.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان امور سدها. ۱۳۸۵. گزارش عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود. وزارت نیرو.

شهیرنیا، م.، ایوب‌زاده، س. و سامانی، ج. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر تراز رسوب مخزن بر راندمان رسوب‌زدایی تحت‌فشار. مجله علمی– پژوهشی مهندسی آب و خاک، دانشگاه تربیت مدرس. ۹ (۱): ۱–۱۴.

کمیته ملی سدهای بزرگ ایران. ۱۳۷۸. مسائل رسوب در سدهای بزرگ. وزارت نیرو، معاونت امور آب. چهارمین کارگاه آموزشی کمیته تخصصی هیدرولیک در سدها.

مددی اسفاد، ز.، احمدی، م. و رحیم‌پور، م. ۱۳۹۷. مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان جت دایره‌ای بر رسوب شویی مخازن. نشریه هیدرولیک. ۱۳ (۴): ۱۱۱–۱۲۰.

مهندسین مشاور بندآب. ۱۳۷۷. مجموعه گزارش‌های طرح سد مخزنی زنوزچای. شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی، تبریز.

مهندسین مشاور دریا ترسیم. ۱۳۹۵. گزارش فنی عملیات هیدروگرافی و رسوب‌سنجی سد زنوز. شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی، تبریز.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی. ۱۳۹۱. راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها. وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا. نشریه شماره ۵۸۹.

وزارت نیرو. ۱۳۹۶. راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها. معاونت امور آب و آبفا، دفتر استانداردها. نشریه شماره ۳۰۹.

Althaus, J., De Cesare, G. and Schleiss, a. 2015. Sediment Evacuation from Reserv oirs through Intakes by Jet Induced Flow. Journal of Hydraulic Engineering. 141 (2): 9.

Chen, S.-C., Wang, S.-C. and Wu, C.-H. 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. International Journal of Sediment Research- INT J SEDIMENT RES. 25 (2): 149-160.

Cao, D. and Chiew, Y.-M. 2013. Suction Effects on Sediment Transport in Closed-Conduit Flows. Journal of Hydraulic Engineering. 140 (5): 04014008.

Cao, D., Chiew, Y.-M., and Liu, X. 2014. Effect of Suction Zone Length on Sediment Transport. Journal of Hydraulic Research. 53 (1): 49–59.

Chang, M.-J., Lin, G.-F., Chen, P.-A., Lee, F.-Z., and Lai, J.-S. 2020. Development of a real-time forecasting model for turbidity current arrival time to improve reservoir desilting operation. Hydrological Sciences Journal. 65 (6): 1022-1035.

Hassanzadeh, Y. 1995. The Removal of Reservoir Sediment. Water International (IWRA). 20 (3): 151-154.

Hotchkiss, R. and Huang, Xi. 1995. Hydro suction sediment – Removal System (HSRS): Principles and Field Test. Journal of Hydraulic Engineering-asce. 121 (6): 479-489.

Jokiel, C. and Detering, M. 2011. An Innovative Sediment Removal Solution-Application and Project Experiences. Germany: DB Sediments GmbH.

Mohammadzadeh-Habili, J. and Heidarpour, M. 2010. New empirical method for prediction of sediment distribution in reservoirs. Journal of Hydrologic Engineering. 15 (1): 813-821.

Remini, B. 2022. Sustainable desilting of dams. LARHYSS Journal. 19 (3): 43-68.

Shrestha, H. 2012. Application of Hydrosuction Sediment Removal System (HSRS) on Peaking Ponds. Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment. 11 (12): 43-48.

Sakurai, T., Kashiwai, J. and Kubo, Y. 2007. Sediment discharge facility using sheet and pipe. Civil Engineering Journal. 48 (12): 30-35 (in Japanese).

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 18, Apr.-May. 2024, p. 71-86

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۸، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۳، ص. ۸۶-۷۱

Investigating the Efficiency of Pump and Water Jet Technique for Desilting Dam Reservoirs

H. Ebadi[1], H. Karami[2], S. Farzin[3*], A. Safarzadeh[4]
Recived: Oct.30, 2023 Accepted: Jan.03, 2023

Abstract

This paper presents a novel technology for desilting dam reservoirs in a continuous and controlled manner. The proposed technology utilizes a suction system that incorporates two pumps: a dredge pump for removing and transporting sediments, and a high-pressure submersible pump for generating water jets to create turbulent flows in the bottom sediment layers. To evaluate the effectiveness of the proposed technology, local experiments were conducted in two cases: with the suction pump alone and with the addition of water jet flow. These experiments were conducted at the end of the reservoir of Zenouz Dam, which serves as a case study. The collected sediment mass was measured over time, and the resulting mass-time graphs revealed three distinct phases: ascending, descending, and constant. Based on the local conditions, soil properties and dredging system, the maximum sediment mass removal rates by the pump were 100 g/s for the case without water jet and ranged from 200 to 430 g/s for the case with water jet. Dimensional analysis was performed to determine the relationship between sediment yield and parameters such as sediment volumetric flow rate and sediment mass flow rate. The results showed that the variations of sediment discharge followed the same characteristic curves (discharge - height) of the pump. The average de-sedimentation efficiency was found to be 7-14% and 2-3% for the experimental pump modes with and without the jet flow, respectively. This indicates that the water jet flow has a significant influence on enhancing the de-sedimentation efficiency, and without it, the sediment removal would not be feasible.

Keywords: Dam Reservoir, Desiltation, Jet Flow, Pump, Zenouz Dam

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
3- Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
4- Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran
(*-Corresponding Author Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)