

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر نفوذپذیری سازه SFM بر راندمان تخلیه رسوبات از دریچه‌های تخلیه در مخازن

مهدی فرد شیرایه<sup>۱</sup> و سعید عباسی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه زنجان

\*abbasi.saeed@znu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۱/۳۰)

**چکیده**- ته‌نشینی مواد رسوبی در مخازن ذخیره‌ی آب به خصوص در پیرامون دریچه‌های تخلیه تحتانی از معضلات اصلی در بهره‌برداری از آنها است. در حال حاضر راندمان تخلیه رسوبات از دریچه‌های تخلیه تحتانی بسیار پایین است. در این مقاله روشی جدید برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات ته‌نشین شده ارائه شده است. در این روش سازه‌ی موسوم به سازه SFM (Sediment Flushing Motivator) از دو ردیف شمع موازی در قسمت بالادست دریچه‌ی تحتانی به کف مخزن نصب شد. یک تا شش جفت شمع، با نفوذپذیری‌های ۰/۰٪، ۰/۲۸/۶٪، ۰/۳۷/۵٪، ۰/۴۲/۹٪، ۰/۵۰٪ و ۰/۶۰٪ در دو ردیف موازی به فاصله هشت سانتی‌متر از هم‌دیگر نصب شد. مصالح ماسه‌ای یکنواخت غیرچسبنده با اندازه متوسط ۰/۶۷ میلی‌متر به عنوان رسوبات ته‌نشین شده در مخزن مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بهترین حالت، سازه SFM (نفوذپذیری ۰/۳۷/۵٪ و فاصله هشت سانتی‌متر بین دو ردیف) متوسط حجم رسوبات تخلیه شده از مخزن را نسبت به حالت شاهد (بدون سازه SFM) به میزان ۱۶۱٪ افزایش می‌دهد.

**کلید واژگان:** راندمان تخلیه رسوبات، سازه SFM، دریچه‌های تخلیه، مخزن

## ۱- مقدمه

ته‌نشینی رسوبات در مخازن سدها پارامتری بسیار مهم در طراحی سدهای ذخیره‌ای است. بنابراین شناخت فرآیندهای مؤثر در این پدیده برای محققان مرتبط با مدیریت مخازن و سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (Brandt, 2000). ته‌نشینی رسوبات در مخازن از عواملی است که با گذشت زمان عمر مخازن را کاهش خواهد داد. تخمین زده شده است که تجمع رسوبات در مخازن سدها می‌تواند سالانه یک درصد از حجم ذخیره آن‌ها را کاهش دهد (Toniolo & Parker, 2003). (Atkinson 1996) رسوب‌شویی را بهترین روش برای بازیابی حجم ذخیره‌ی مخزن می‌داند. تا به حال راهکارهای مختلفی برای جلوگیری از تجمع رسوبات در مخازن

پیشنهاد شده است. (Lia (1994) با بررسی عددی و آزمایشگاهی رسوب‌شویی و نیز با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۰ مخزن، روابطی برای مشخصه‌های جریان آب و تغییرات ابعاد بستر رسوبی در حین فرایند رسوب‌شویی ارائه داد. (Emamgholizadeh et al. (2007) در مطالعات خود تأثیر تغییرات جریان و ارتفاع آب بر عملیات رسوب‌شویی تحت فشار را بررسی کردند. مددی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر استفاده از سازه<sup>۱</sup> PBC بر افزایش راندمان تخلیه رسوبات در حین رسوب‌شویی تحت فشار به صورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که طول و عرض ماکزیمم نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به آزمایش شاهد

1. Projecting Bottomless Circular Structure

et al. (2013) در خصوص تأثیر عوامل مختلف با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، به شبیه‌سازی و ارائه روابطی برای تعیین هندسه مخروط رسوب‌شویی پرداختند. (Ahn et al. (2013 مدل کامپیوتری GSTARS4 را برای مدل‌سازی رسوب‌شویی در مخزنی در کشور آمریکا به کار بردند. عبدالله پور و همکاران (۱۳۹۲) به منظور گسترش جریان‌های گردابی اطراف دریچه تخلیه تحتانی مخازن از سازه نیمه استوانه‌ای قائم شکاف‌دار بهره بردند و تأثیر مثبت این سازه را گزارش دادند.

شهرینیا و همکاران (۱۳۹۳) به آزمایش بر روی سه تراز مختلف از رسوبات، با سه ارتفاع آب و سه دبی تخلیه برای هر ارتفاع آب پرداختند و نشان دادند که بین تراز رسوبات و ابعاد مخروط رسوب‌شویی ارتباط مستقیمی وجود دارد. همچنین راندمان رسوب‌شویی تحت فشار با افزایش تراز رسوبات به میزان ۲۹ درصد، حدود دو درصد افزایش داشت. توفیقی و همکاران (۱۳۹۴) نشان دادند که توسعه‌ی مجرای تخلیه تحتانی در مخزن تأثیر مثبت و محسوسی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی دارد؛ به گونه‌ای که توسعه مجرا به نسبت ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن، به طور متوسط باعث افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی، به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا خواهد شد. Powell & Khan (2012, 2014) مشخصه‌های جریان و چگونگی انتقال رسوبات در بالادست دریچه‌های تخلیه دایره‌ای و شکل‌گیری گردابه‌ها در مجاورت این دریچه‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که این گردابه‌ها عامل اصلی خروج رسوبات از مخزن هستند. (Madadi et al. (2016 با پیشنهاد سازه‌ای متشکل از چند لوله سعی کردند که راندمان شستشوی رسوبات از طریق دریچه را افزایش دهند. ایشان برای سازه پیشنهادی خود که ردیفی با چیدمان دایره‌ای بود، سقفی نیز قرار دادند که باعث افزایش راندمان رسوب‌شویی شد. همچنین ایشان رفتار جریان در بالادست دریچه و میزان رسوبات شسته شده توسط جریان خروجی را بررسی کردند و مشاهده کردند که جریان عبوری از میان شمع‌ها، گردابه‌های قوی را در

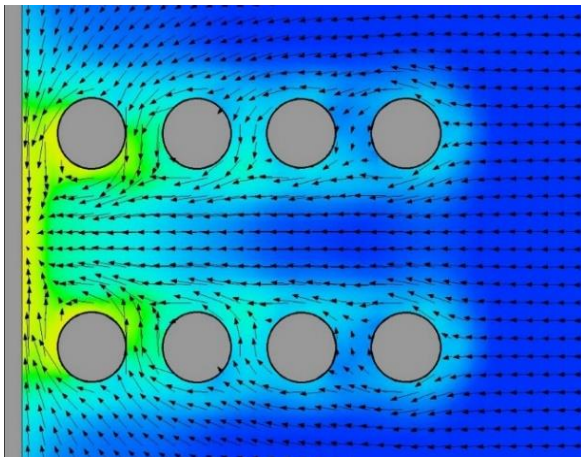
افزایش دارد ولی تغییرات عمق ماکزیمم نسبی ناچیزاست. سازه‌های PBC در واقع لوله‌هایی دایره‌ای هستند که قسمت تحتانی آنها حذف شده است (Crookeston, 2008). Khosronejad et al. (2008) یک مدل عددی سه بعدی برای تعیین مشخصه‌های جریان آب و تغییرات ابعاد بستر رسوبی در حین فرایند رسوب‌شویی ارائه دادند.

Meshkati et al. (2009) تأثیر ابعاد دریچه تخلیه تحتانی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی در رسوب‌شویی تحت فشار را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند.

Althaus (2011) تأثیر قرارگیری جت آب را در مخزن بر افزایش میزان رسوبات تخلیه شده مورد بررسی قرار داد و بیان کرد که در حالت بدون اعمال جت آب، مدت زمان لازم برای رسوب‌شویی دو برابر حالتی است که جت در مخزن کار گذاشته شود. (Boeriu et al. (2011 با استفاده از مدل عددی Delft3D به مدل‌سازی ریاضی تأثیر رسوب‌شویی بر توپوگرافی بستر مخزن در سریلانکا پرداختند. آنها مدل کامپیوتری GSTARS4 را برای مدل‌سازی فرسایشی حین رسوب‌شویی در یک مخزن در کشور آمریکا به کار بردند. (Samadi-Rahim (2011 تأثیر تعداد و شکل مقطع دریچه تخلیه تحتانی را بر ابعاد حفره و عملکرد رسوب‌شویی بررسی کرد. Fruchart &

Camenen (2012) رسوب‌شویی را برای نگه داشتن مخزن در بهترین وضعیت بهره‌برداری ضروری می‌دانند. در رسوب‌شویی تحت فشار، رقوم هد آب در مخزن در اثنای عملیات بالا نگه داشته می‌شود و آب به صورت تحت فشار از طریق دریچه تخلیه تحتانی خارج می‌شود. در این حالت، رسوب‌شویی تنها محدود به ناحیه‌ای کوچک در پیرامون دریچه تخلیه تحتانی می‌شود و در ازای خروج مقدار زیادی آب، راندمان تخلیه رسوبات بسیار اندک است. به همین دلیل رسوب‌شویی تحت فشار در تعداد زیادی از سدهای جهان نتایج مطلوبی به همراه نداشته است (Haudhry & Rehman, 2012). Haun & Olsen (2012) با بررسی داده‌های آزمایشگاهی، توانایی مدل عددی SSIIM2 را در شبیه‌سازی سه بعدی رسوب‌شویی ارزیابی کردند و نتایج آن را قابل قبول گزارش دادند. Emamgholizadeh

انسداد شود. بنابراین در تکمیل مطالعه Madadi et al. (2016) از پیش‌بینی سقف برای شمع‌ها صرف نظر شد. از آنجایی که براساس هیدرودینامیک جریان خروجی از دریچه بیشینه‌گرادیان سرعت در امتداد قائم بر دریچه است چیدمان شمع‌ها در راستای عمود بر محور دریچه به جای چیدمان دایره‌ای پیشنهاد شده تا از اثرات جریان کربدوری نیز بهره گرفته شود.



شکل ۲ شماتیک بردارهای سرعت جریان آب از بین شمع‌های سازه SFM

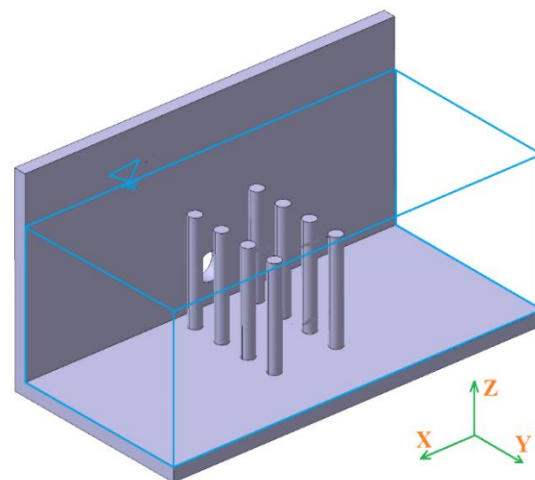
## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه زنجان انجام گرفت. بدین منظور از یک مخزن مکعب مستطیل زیرین به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲/۵، ۲/۰ و ۰/۵ متر و یک مخزن مکعب مستطیل بالایی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲/۰، ۰/۵۵ و ۰/۵ متر و یک فلوم به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۶، ۰/۶ و ۰/۶ متر استفاده شد (شکل‌های ۳ و ۴).

جنس مخزن از ورقه‌های فولادی است. سیستم چرخه‌ای آب به وسیله‌ی پمپاژ آب از مخزن زیرین به فلوم صورت می‌گیرد و جریان از فلوم به مخزن بالایی و سپس مجدداً به مخزن زیرین تخلیه می‌شود. به منظور از بین بردن تلاطم جریان ورودی به مخزن بالایی و آرام شدن جریان، در قسمت خروجی فلوم از جعبه‌ی مشبک و پوشال استفاده شد. پس از پر شدن مخزن بالایی، آب از دریچه تخلیه تحتانی به قطر چهار سانتی‌متر که مجهز به شیر کنترل است؛ با دبی ۲/۰۳ لیتر بر ثانیه تخلیه می‌شود. به

جریان خروجی تولید می‌کند که موجب حرکت رسوبات و تخلیه مقدار زیادی از آنها از مخزن می‌شود.

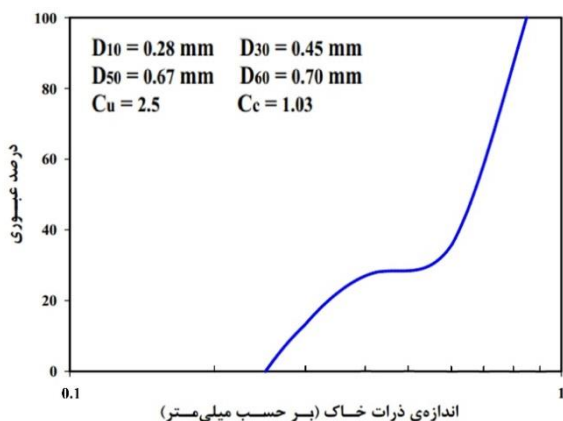
در مقاله حاضر به استناد مطالعه Powell & Khan (2012, 2014) و با هدف افزایش راندمان تخلیه رسوبات از مخازن، سازه‌ای موسوم به SFM پیشنهاد شده‌است. این سازه که متشکل از دو ردیف شمع ایستاده است، در بالادست دریچه تخلیه تحتانی به کف مخزن متصل می‌شود تا جریان آب، پس از عبور از بین شمع‌ها از دریچه تخلیه تحتانی خارج شود (شکل ۱). با توجه به شکل ۲ که حاصل مدل‌سازی اولیه یک نمونه به صورت عددی است، انتظار می‌رود که عبور جریان آب از اطراف شمع‌ها و نیز در امتداد کربدور ایجاد شده توسط دو ردیف شمع، موجب تولید گردابه‌های برخاستگی و نعل اسبی شود. همچنین این حالت باید منجر به اندرکنش متقابل خطوط جریان و افزایش سرعت نسبی آب در امتداد کربدور نیز شده، در نتیجه رسوبات بیشتری از مخزن تخلیه شود.



شکل ۱ شماتیک سازه SFM

در پیشنهاد سازه SFM به این مطلب توجه شده است که این سازه در مقیاس واقعی کاملاً اجرایی باشد. اگرچه قرارگیری سقف در ارتفاع کم (نسبت به بستر رسوبات) می‌تواند موجب هدایت جریان آب به سمت بستر رسوبی و متعاقباً افزایش راندمان رسوب‌شویی شود، اما احداث سقف در مقیاس واقعی برای گروه شمع‌ها عملیاتی به نظر نمی‌رسد. بعلاوه قرارگیری سقف می‌تواند موجب بروز مشکلاتی همچون عدم عبور اجرام شناور در آب و ایجاد

مخزن نه سانتی متر لحاظ شد (تانیمه‌ی دریچه تحتانی) و برای برداشت توپوگرافی بستر از متر لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی متر استفاده شد.



شکل ۵ منحنی دانه بندی رسوبات به کار رفته در آزمایش

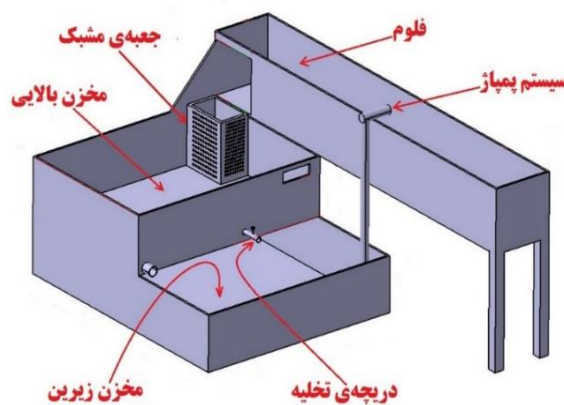
### ۳- سازه SFM (Sediment Flushing Motivator)

سازه پیشنهادی SFM در واقع گروه شمعه‌های استوانه‌ای شکل است که در دو ردیف موازی به فاصله دو برابر قطر دریچه (هشت سانتی متر) از هم دیگر با نفوذپذیری‌های ۰٪، ۲۸/۶٪، ۳۷/۵٪، ۴۲/۹٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ در قسمت بالادست دریچه تخلیه تحتانی به کف مخزن متصل شده است. تصویر سازه SFM قبل و بعد از تعبیه در مخزن، در شکل ۶ نشان داده شده است. برای جلوگیری از تغییر مکان شمعه‌ها در فرآیند آزمایش، صفحاتی مشبک در قسمت فوقانی شمعه‌ها نصب شد. صفحه‌ی مشبک یاد شده خارج از محیط آب نصب شد تا از تأثیر آن بر فرآیند تخلیه رسوبات جلوگیری شود. شمعه‌های مدل سازه SFM با استفاده از میله‌هایی به قطر ۲۰ میلی متر ساخته شد و به منظور تثبیت موقعیت شمعه‌ها و جلوگیری از تغییر شرایط نفوذپذیری سازه، قسمت تحتانی شمعه‌ها توسط پیچ و مهره به یکدیگر متصل گردید و در نهایت سازه SFM در بالادست دریچه تخلیه تحتانی به کف مخزن متصل شد. در پیشنهاد سازه SFM دو موضوع اساسی مورد توجه قرار گرفته که اولاً تا حد امکان گردابه‌های بیشتری تولید شود و ثانیاً کریدوری برای افزایش نسبی سرعت جریان ایجاد

منظور تثبیت سطح آب مخزن در یک تراز مشخص، از یک سرریز روگذر استفاده و ارتفاع آب در تراز ۴۰ سانتی متر ثابت نگه داشته شد. قسمت خروجی دریچه تخلیه تحتانی با پرده رسوب گیر از جنس الیاف کش سان مجهز گردید تا رسوبات خروجی از دریچه تخلیه تحتانی مخزن به دقت جمع آوری شود.



شکل ۳ امکانات آزمایشگاهی به کار رفته در پژوهش حاضر

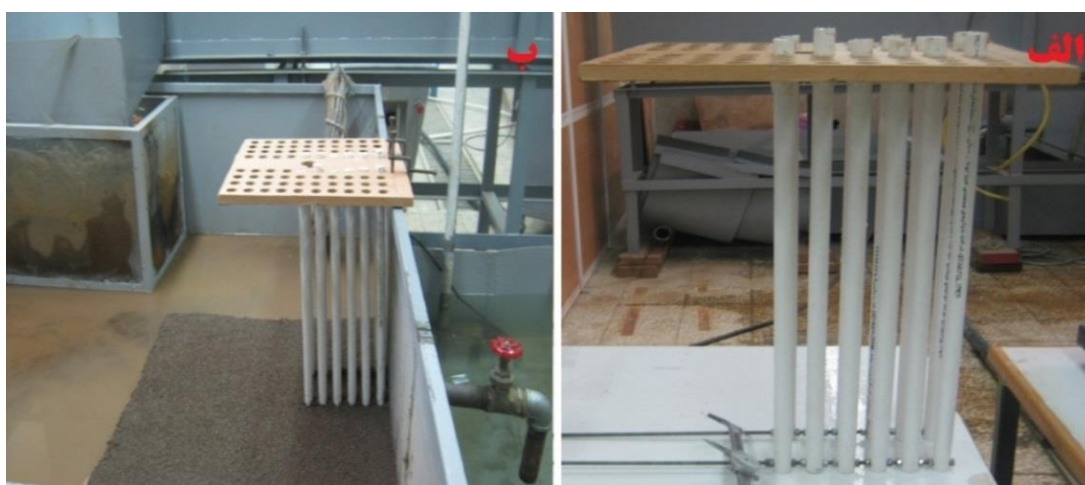


شکل ۴ شماتیک امکانات آزمایشگاهی در پژوهش حاضر

مصالح ماسه‌ای غیر یکنواخت و غیر چسبنده با اندازه متوسط ۰/۶۷ میلی متر (مصالح عبوری از الک #۳۰ و مانده روی الک #۱۰۰) به عنوان رسوبات ته نشین شده در مخزن در نظر گرفته شد. ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب انحاء (Cc) برای رسوبات به کار رفته در آزمایش به ترتیب ۲/۵ و ۱/۰۳ محاسبه شد. منحنی دانه بندی مصالح مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است. عمق رسوبات اولیه در

عبور خطوط جریان از قسمت فوقانی شمع‌ها، گردابه‌های جدیدی نیز به میدان جریان اضافه شوند. طبیعتاً در صورت اجرای شمع‌ها به صورت مستغرق، تأثیر ارتفاع شمع‌ها نیز پارامتری است که نیازمند بررسی مضاعف است. آنچه که قابل پیش‌بینی است، لزوم اجرای شمع‌ها تا ترازوی بالاتر از تراز میانه دریاچه است که قبل از دفن دریاچه در داخل رسوبات و در حین تخلیه رسوبات، وارد عمل شوند.

گردد که در نتیجه این دو عامل راندمان رسوب‌شویی افزایش بیشتری داشته باشد. در آزمایشات انجام شده، شمع‌های سازه SFM به صورت قدری مستغرق در رسوبات و غیر مستغرق در آب منظور شده اند. این امر به دلیل سهولت امر و امکان انجام این کار در محیط آزمایشگاهی صورت گرفته است. لیکن در عمل ممکن است که شمع‌ها در درون مخزن به صورت مستغرق اجرا شوند که انتظار می‌رود با این کار در اثر



شکل ۶ سازه SFM (الف) قبل از تعبیه در مخزن (ب) بعد از تعبیه در مخزن

آزمایش‌ها تا زمانی ادامه یافتند که تغییرات ابعاد مخروط تخلیه رسوبات ناچیز باشد. برای تعیین مدت زمان آزمایش، آزمایشی به مدت چهار ساعت انجام شد و بررسی فیلم تخلیه رسوبات نشان داد که پس از گذشت زمان حدود ۳۰ دقیقه از آغاز آزمایش، میزان تغییرات رسوب‌شویی بسیار ناچیز است. بر همین اساس و برای اطمینان کافی، مدت زمان آزمایش‌های تخلیه رسوبات برابر ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بعد از پایان هر آزمایش، شیر دریاچه تخلیه تحتانی و جریان ورودی به مخزن بسته شد و آب موجود در مخزن نیز از طریق دریاچه ثانوی تعبیه شده در قسمت کناری مخزن به آرامی زهکشی شد. با تعبیه موانعی در مسیر جریان دقت شد که تغییری در ابعاد مخروط شسته شده ایجاد نشود و پس از اتمام عملیات زهکشی ابعاد مخروط رسوب‌شویی توسط متر لیزری و کولیس به دقت

#### ۴- روش اجرای آزمایش‌ها

قبل از هر آزمایش رسوبات موجود در مخزن با استفاده از ابزاری مناسب به صورت کاملاً افقی تراز و سطح بالایی رسوبات بر میانه دریاچه تخلیه تحتانی منطبق شد. برای جلوگیری از فرسایش ناخواسته ناشی از ورود ناگهانی جریان به داخل مخزن، ابتدا جریان با دبی کم به جعبه فلزی مشبک پر از پوشال که به اندازه‌ی کافی دور از محل دریاچه تخلیه تحتانی قرار دارد، پمپاژ شد و بعد از آن که ارتفاع مخزن به آرامی به رقوم هدف رسید شروع به سرریز شدن شود و هد آب روی دریاچه در رقوم ۴۰ سانتی‌متر تثبیت شد. بدین ترتیب هد آب روی دریاچه به میزان ۴۰ سانتی‌متر منظور شد و دریاچه تخلیه تحتانی باز شد. همه آزمایش‌های این پژوهش با دبی ۲/۰۳ لیتر بر ثانیه صورت پذیرفتند.

مذکور نیاز به آزمایشات بیشتری دارد و در این کار پژوهشی منظور نشده است.

مشخصه‌های مخروط رسوب‌شویی عبارتند از: ۱- بیشترین طول مخروط رسوب‌شویی ( $L_s$ )، ۲- بیشترین عرض مخروط رسوب‌شویی ( $W_s$ )، ۳- بیشترین عمق مخروط رسوب‌شویی ( $d_s$ ) و ۴- وزن رسوبات شسته شده ( $W$ ) که به‌واسطه آن حجم حفره شسته شده ( $V_{SFM}$ ) قابل محاسبه است. ارتباط بین پارامترهای فوق توسط رابطه ۱ قابل بیان است:

$$f_1(V_{SFM}, L_s, W_s, d_s, H, \rho_w, \rho_s, \mu, d_{50}, S, d, L, N, D_o) = 0 \quad (1)$$

از بین این پارامترها  $H$  به دلیل انتخاب هد ثابت،  $\rho_s$ ،  $\rho_w$  و  $\mu$  به دلیل انتخاب نوع یکسان برای رسوبات در تمامی آزمایش‌ها و انتخاب آب به عنوان سیال در محاسبات مرتبط با آنالیز ابعادی منظور نمی‌شوند. نتایج تحلیل ابعادی به روش پی باکینگهام، پارامترهای بدون بعد زیر را به عنوان پارامترهای حاکم بر مسئله مشخص کرد:

$$f_2\left(\frac{L_s}{D_o}, \frac{W_s}{D_o}, \frac{d_s}{d_{50}}, \frac{L}{D_o}, \frac{V_{SFM}}{V_R}, r = \frac{S}{S+d}, N\right) = 0 \quad (2)$$

پارامترهای هیدرولیکی و هندسی سازه SFM و دریاچه تخلیه‌ی تحتانی در شکل ۷ نشان داده شده است.

## ۶- آزمایش شاهد؛ مشاهدات کلی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی فرایند آبستگي زمان است (Melville & Chiew, 1999). در آزمایش بدون سازه SFM (آزمایش شاهد)، بلافاصله بعد از باز شدن دریاچه تخلیه تحتانی، جریان رسوبی با غلظت زیاد از مخزن خارج می‌شود. با گذشت زمان، غلظت جریان رسوبی کاهش یافته و پس از حدود ۱۵ دقیقه جریان خروجی از مخزن تقریباً زلال می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی فیلم گرفته شده حاکی از آن است که مراحل تخلیه رسوبات از مخزن

اندازه‌گیری شد. زمان لازم برای آماده کردن بستر رسوبی، نصب سازه SFM، پر کردن تدریجی مخزن، اجرای آزمایش، زهکشی کردن آب مخزن و در نهایت برداشت نتایج در هر آزمایش، حدود شش ساعت است. آزمایش‌ها برای هر دو حالت با و بدون سازه SFM انجام شدند. آزمایش بدون سازه SFM به‌عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد و تأثیر سازه SFM با نفوذپذیری‌های مختلف روی مشخصات هندسی مخروط شسته شده و راندمان تخلیه‌ی رسوبات بررسی شد.

## ۵- تحلیل ابعادی

تخلیه رسوبات ناشی از اندرکنش جریان و رسوبات، وجود گردابه‌ها، تلاطم کامل جریان و رفتار سه بعدی سرعت جریان است. در حالت استفاده از سازه SFM، حجم مخروط شسته شده ( $V_{SFM}$ ) در مصالح ماسه‌ای یکنواخت غیر چسبنده تابع عوامل متعددی است. این عوامل شامل دبی خروجی از دریاچه تخلیه تحتانی ( $Q$ )، جرم حجمی سیال ( $\rho_w$ )، جرم حجمی رسوبات ( $\rho_s$ )، لزجت دینامیکی سیال ( $\mu$ )، اندازه مؤثر ذرات رسوب ( $d_{50}$ )، فاصله شمع‌ها از یکدیگر ( $S$ )، قطر دریاچه تخلیه رسوبات ( $D_o$ )، هد آب روی دریاچه تخلیه ( $H$ )، قطر شمع‌ها ( $d$ )، فاصله بین دو ردیف شمع‌ها ( $L$ ) و تعداد شمع‌ها در هر ردیف ( $N$ ) است.

در این پژوهش، مقادیر  $H$ ،  $D_o$  و  $d_{50}$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین عدد فرود در همه آزمایش‌ها مقداری ثابت دارد و هم‌چنین جریان خروجی از دریاچه تخلیه تحتانی کاملاً متلاطم است؛ بنابراین می‌توان از تأثیر عدد رینولدز نیز چشم‌پوشی نمود. مقدار حجم رسوبات تخلیه‌شونده به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که می‌توان به هد آب داخل مخزن، دبی جریان خروجی از دریاچه تخلیه تحتانی، اندازه‌ی مؤثر تجمع یافته در داخل مخزن اشاره کرد (Dodaran et al., 2012). به نظر می‌رسد که با افزایش دبی جریان، قطر دریاچه و هد آب داخل مخزن و نیز با کاهش اندازه مؤثر رسوبات نهشته شده در مخزن، ابعاد مخروط رسوب‌شویی گسترش یابد که بررسی دقیق تغییر مقدار افزایش راندمان رسوب‌شویی متناظر با تغییر پارامترهای



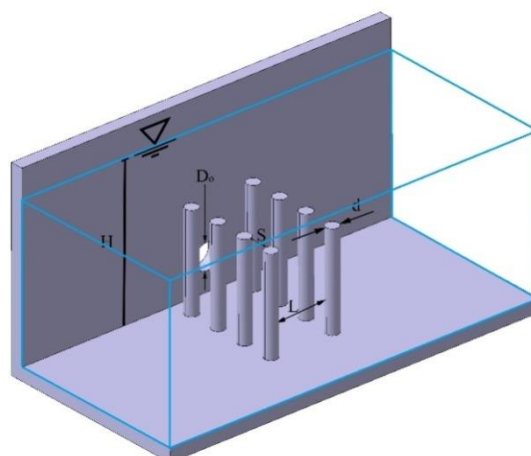


شکل ۸ مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد (بدون سازه SFM)

عبور از فضای بین شمع‌ها تخلیه شد. با کم شدن سطح مقطع عبور جریان آب، سرعت و متعاقباً تنش برشی جریان افزایش می‌یابد و موجب می‌شود که حجم بیشتری از رسوبات بستر مخزن از جای خود کنده شده و همراه با جریان خروجی از دریچه تخلیه تحتانی، خارج شود. نحوه چیدمان شمع‌ها نیز تشکیل مسیری کانال مانند می‌دهد که با افزایش فشار و ایجاد تلاطم، موجب افزایش راندمان تخلیه رسوبات بستر مخزن می‌شود. شکل ۹ مخروط رسوب‌شویی در حالت آزمایش با سازه SFM با نفوذپذیری ۵۰٪، ۶ جفت شمع را نشان می‌دهد که در آن فاصله‌ی بین دو ردیف موازی شمع‌ها دو برابر قطر دریچه تخلیه تحتانی است.



شکل ۹ مخروط رسوب‌شویی در آزمایش با سازه SFM



شکل ۷ پارامترهای هیدرولیکی و هندسی سازه SFM و دریچه تخلیه

در حالت شاهد به سه بخش مجزا تفکیک پذیر است: ۱- لحظات ابتدایی آزمایش: در این زمان رسوبات بستر در اطراف دریچه تخلیه تحتانی تحت تأثیر تنش برشی زیاد ناشی از سرعت و تلاطم بالای جریان خروجی از جای خود کنده شده و همراه با جریان آب از دریچه تخلیه خارج می‌شود و متعاقباً حفره‌ای کوچک به شکل مخروط در اطراف دریچه تخلیه تحتانی ایجاد می‌شود. ۲- ۳۰ دقیقه اولیه: دو گردابه در دو طرف دریچه تخلیه تحتانی شکل می‌گیرد که در نتیجه آنها رسوبات بستر مخزن به داخل آنها کشانده شده و همراه با جریان خروجی، از مخزن خارج می‌شوند. قدرت مکش و ابعاد گردابه‌ها به مرور زمان تغییر می‌کند و پس از گذشت قریب به ۳۰ دقیقه قدرت فرسایشی آنها تقریباً به صفر می‌رسد. ۳- در ۲۰ دقیقه انتهایی تقریباً روال رسوب‌شویی متوقف می‌گردد و می‌توان گفت که در این مرحله، حجم رسوبات خارج شده از دریچه تخلیه تحتانی ناچیز است.

#### ۷- آزمایش با سازه SFM؛ مشاهدات کلی

سازه SFM در اطراف دریچه‌ی تخلیه‌ی تحتانی بر روی کف مخزن نصب شد. با باز شدن دریچه تخلیه تحتانی، جریان با

### ۸- تأثیر میزان نفوذپذیری سازه SFM بر

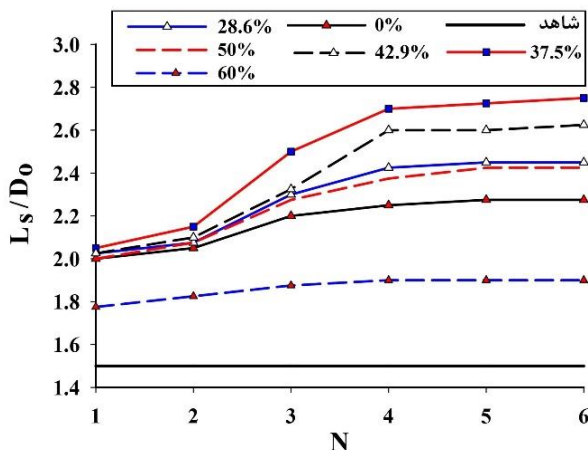
#### افزایش راندمان تخلیه رسوبات

ابعاد مخروط رسوب شویی در همهی آزمایشها اندازه گیری شد. این پارامترها شامل بیشترین طول، بیشترین عرض و بیشترین عمق مخروط رسوب شویی و نیز وزن رسوبات شسته شده است که به واسطه ی آنها حجم حفره شسته شده و نیز راندمان تخلیه رسوبات قابل محاسبه است. پس از گذشت زمانی مشخص از آغاز آزمایش تخلیه رسوبات بستر، آزمایش به حالت تعادل می رسد که در این حالت، تغییرات حجم مخروط رسوب شویی نسبت به زمان ناچیز است و به مقداری ثابت می رسد. به استناد مطالعات (۲۰۰۴) Scheuerlein et al. وقتی مخروط رسوب شویی به تعادل رسید، دیگر هیچ گونه رسوبی از مخزن خارج نخواهد شد، مگر اینکه هد آب مخزن کاهش یابد.

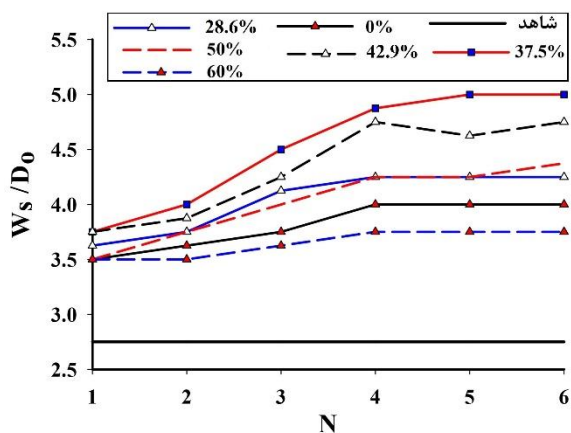
برای دستیابی به بهترین نسبت فاصله بین دو ردیف موازی جفت شمعه ها ( $L/D_0$ )، آزمایشی با سازه SFM با چهار جفت شمعه و نفوذپذیری ۴۲/۹٪ انجام شد. در این شرایط با توجه به شکل ۱۰ بیشترین تأثیر نسبت فاصله بین دو ردیف موازی شمعه ها بر حجم رسوبات تخلیه شده در حالت ( $L/D_0=2$ ) دیده می شود و به همین دلیل، تمامی آزمایشها با نسبت فاصله  $L/D_0=2$  انجام گرفت.

( $L_s/D_0$ ) را افزایش می دهد. در حالت  $N=6$  و نفوذپذیری ۳۷/۵٪، ماکزیمم طول نسبی مخروط رسوب شویی نسبت به حالت شاهد ۸۳٪ افزایش نشان می دهد. افزایش تعداد جفت شمعه ها باعث افزایش طول نسبی مخروط رسوب شویی می شود، لیکن این افزایش طول نسبی در حالت  $N>4$  ناچیز است.

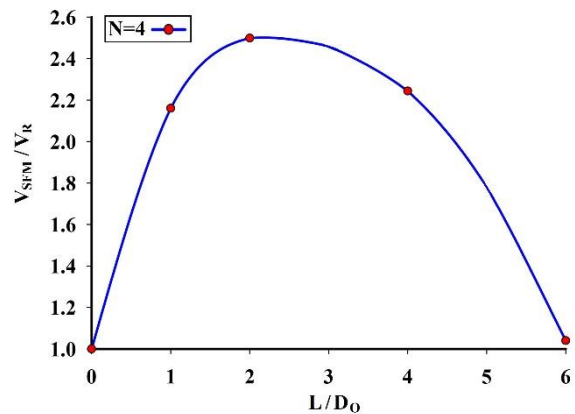
شکل ۱۲ تأثیر تعداد جفت شمعه ها را بر عرض مخروط رسوب شویی نشان می دهد. دیده می شود که افزایش تعداد جفت شمعه ها ( $N$ )، طول نسبی مخروط رسوب شویی ( $W_s/D_0$ ) را افزایش می دهد. در حالت  $N=6$  و نفوذپذیری ۳۷/۵٪، ماکزیمم عرض نسبی مخروط رسوب شویی نسبت به حالت شاهد ۸۲٪ افزایش نشان می دهد.



شکل ۱۱ تغییرات نسبی طول مخروط رسوب شویی با تعداد جفت شمعه ها و نفوذپذیری سازه SFM



شکل ۱۲ تغییرات نسبی عرض مخروط رسوب شویی با تعداد جفت شمعه ها و نفوذپذیری سازه SFM



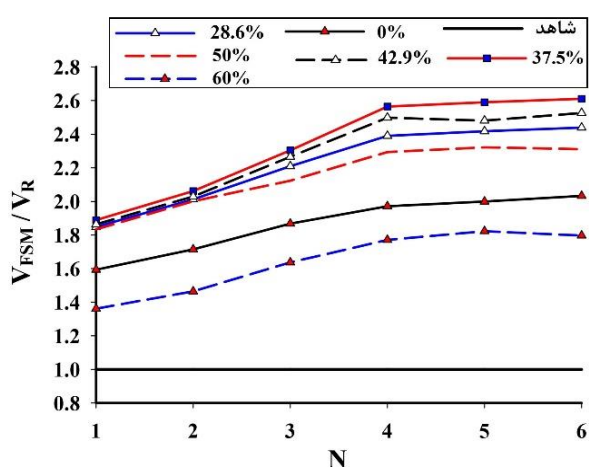
شکل ۱۰ تغییرات حجم مخروط رسوب شویی با نسبت فاصله براساس سازه SFM دو ردیف چهار شمعی

شکل ۱۱ تأثیر تعداد جفت شمعه ها را بر طول مخروط رسوب شویی نشان می دهد. دیده می شود که افزایش تعداد جفت شمعه ها ( $N$ )، طول نسبی مخروط رسوب شویی



رسوب‌شویی نسبت به حالت شاهد ۱۶۱٪ افزایش نشان می‌دهد. افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی می‌شود.

این افزایش حجم نسبی در حالت  $N > 4$  بسیار اندک است. به استناد آزمایش‌ها انجام شده و با شرایط این آزمایش‌ها، از نظر اقتصادی بهینه‌ترین حالت سازه SFM برای افزایش راندمان رسوب‌شویی (از حیث طول، عرض، عمق و حجم رسوبات) شامل چهار الی پنج جفت شمع (تعداد شمع‌های کمتر و راندمان مشابه سایر حالات با شمع‌های بیشتر) است.



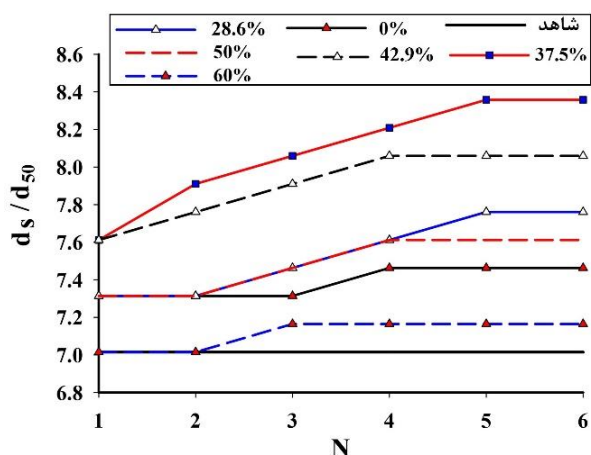
شکل ۱۴ تغییرات نسبی حجم مخروط رسوب‌شویی با تعداد جفت شمع‌ها و نفوذپذیری سازه SFM

دلیل افزایش میزان رسوبات تخلیه شده در اثر نصب سازه‌ی SFM ایجاد جریان‌ات گردابه‌ای نعل‌اسبی و همچنین افزایش انرژی جریان خروجی در اثر ایجاد یک کریدور بین دو ردیف شمع‌ها است. زمانی که تعداد شمع‌ها از یک تعداد مشخصی بیشتر می‌شود، اثرات انگیزشی شمع‌ها بر روی جریان کاهش می‌یابد و تأثیر آن بر روی راندمان رسوب‌شویی کم می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ تأثیر مثبت چهار جفت شمع مستقر در امتداد عمود بر محور دریچه‌ی تخلیه قطعی است و تأثیر جفت شمع‌های پنجم و ششم در این آزمایشات به صورت موردی مشاهده می‌شود. اظهار نظر قطعی در خصوص تعداد جفت شمع‌های بهینه بستگی به شرایط آزمایش خواهد داشت.

شکل ۱۵ تأثیر نفوذپذیری سازه SFM در حالت چهار جفت شمع ( $N=4$ ) بر نسبت حجم مخروط رسوب‌شویی را نشان

افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش عرض نسبی مخروط رسوب‌شویی می‌شود، ولی این افزایش طول نسبی در حالت  $N > 4$  بسیار اندک است.

شکل ۱۳ تأثیر تعداد جفت شمع‌ها را بر عمق مخروط رسوب‌شویی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که افزایش تعداد جفت شمع‌ها ( $N$ )، عمق نسبی مخروط رسوب‌شویی ( $ds/d_{50}$ ) را افزایش می‌دهد. در حالت  $N=6$  و نفوذپذیری ۳۷/۵٪، ماکزیمم عمق نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به حالت شاهد ۱۹٪ افزایش نشان می‌دهد. افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش عمق نسبی مخروط رسوب‌شویی می‌شود، ولی این افزایش طول نسبی در حالت  $N > 5$  بسیار اندک است.



شکل ۱۳ تغییرات نسبی عمق مخروط رسوب‌شویی با تعداد جفت شمع‌ها و نفوذپذیری سازه SFM

## ۹- مقایسه حجم مخروط رسوب‌شویی در

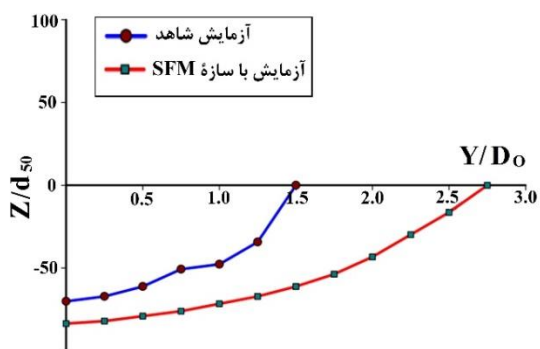
### حالت با و بدون سازه SFM

محاسبه حجم رسوباتی که در هر آزمایش رسوب‌شویی خارج می‌شود همواره مورد توجه است و خود به تنهایی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی میزان کارایی عملیات رسوب‌شویی باشد (Morris & Fan, 2010).

شکل ۱۴ تأثیر تعداد شمع‌ها را بر حجم مخروط رسوب‌شویی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، افزایش تعداد جفت شمع‌ها ( $N$ )، حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی ( $V_{FSM}/V_R$ ) را افزایش می‌دهد. در حالت  $N=6$  و نفوذپذیری ۳۷/۵٪، ماکزیمم عمق نسبی مخروط

می‌دهد. با توجه نتایج آزمایشات مشاهده شد که در حالت نفوذپذیری ۰٪ با عبور جریان آب از کریدور ایجاد شده بین دو ردیف از شمع‌ها، راندمان رسوب‌شویی نسبت حالت شاهد افزایش یافته است. با بهره‌گیری از سازه SFM با نفوذپذیری ۲۸٪/۱۶، علاوه بر عبور جریان آب از میان کریدور ایجاد شده بین دو ردیف از شمع‌ها، آشفستگی حاصل از عبور جریان آب از میان شمع‌ها و ایجاد گردابه‌های موضعی موجب افزایش راندمان رسوب‌شویی می‌شود. در حالت نفوذپذیری ۳۷٪/۵، این نوع تلاطم، آشفستگی جریان و گردابه‌های موضعی (که حاصل از عبور جریان آب از میان شمع‌ها است) به بالاترین حد خود رسیده و این شرایط بیش‌ترین راندمان رسوب‌شویی را به خود اختصاص می‌دهد. با افزایش بیشتر نفوذپذیری سازه SFM از شدت گردابه‌ها کاسته می‌شود تا جایی‌که در نفوذپذیری ۶۰٪، حالت کریدوری سازه نیز تقریباً بی‌اثر می‌شود. به طور خلاصه در این آزمایشات با افزایش میزان نفوذپذیری از ۰٪ تا ۳۷٪/۵، راندمان تخلیه رسوبات افزایش و پس از آن با افزایش میزان نفوذپذیری از ۳۷٪/۵ تا ۶۰٪ راندمان تخلیه رسوبات کاهش می‌یابد.

از گاهی از حجم مخروط رسوب‌شویی برای محاسبه افزایش راندمان رسوب‌شویی مورد نیاز خواهد بود. در این آزمایشات برای اندازه‌گیری طول و عرض از یک کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری عمق از یک متر لیزری به دقت یک میلی‌متر استفاده شد. توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی در حالت شاهد و در حالت آزمایش با سازه SFM چهار جفت شمعی با نفوذپذیری ۳۷٪/۵ در شکل ۱۸ دیده می‌شود. در شکل نشان داده شده نسبت فاصله دو ردیف موازی جفت شمع‌ها  $Ls/Do=2$  است.



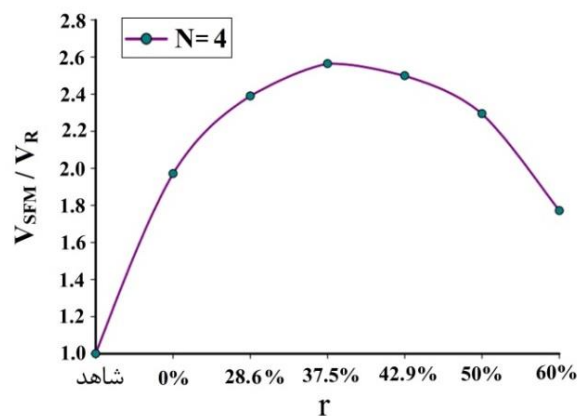
شکل ۱۶ مقایسه‌ی نیم‌رخ طولی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد و آزمایش با سازه SFM

راندمان تخلیه رسوب، شاخصی برای سنجش میزان موفقیت رسوب‌شویی است. (Qian (1982) با ارائه رابطه ۳ راندمان رسوب‌شویی را به صورت نسبت حجم رسوبات شسته شده به حجم آب مصرفی در رسوب‌شویی تعریف می‌کند که در جریان رسوب‌شویی مصرف شده است:

$$E = \frac{\forall cone}{\forall w} \times 100\% \quad (3)$$

که در آن E راندمان رسوب‌شویی بر حسب درصد؛  $\forall cone$  حجم مخروط رسوب‌شویی و  $\forall w$  حجم آب تخلیه شده

می‌دهد. با توجه نتایج آزمایشات مشاهده شد که در حالت نفوذپذیری ۰٪ با عبور جریان آب از کریدور ایجاد شده بین دو ردیف از شمع‌ها، راندمان رسوب‌شویی نسبت حالت شاهد افزایش یافته است. با بهره‌گیری از سازه SFM با نفوذپذیری ۲۸٪/۱۶، علاوه بر عبور جریان آب از میان کریدور ایجاد شده بین دو ردیف از شمع‌ها، آشفستگی حاصل از عبور جریان آب از میان شمع‌ها و ایجاد گردابه‌های موضعی موجب افزایش راندمان رسوب‌شویی می‌شود. در حالت نفوذپذیری ۳۷٪/۵، این نوع تلاطم، آشفستگی جریان و گردابه‌های موضعی (که حاصل از عبور جریان آب از میان شمع‌ها است) به بالاترین حد خود رسیده و این شرایط بیش‌ترین راندمان رسوب‌شویی را به خود اختصاص می‌دهد. با افزایش بیشتر نفوذپذیری سازه SFM از شدت گردابه‌ها کاسته می‌شود تا جایی‌که در نفوذپذیری ۶۰٪، حالت کریدوری سازه نیز تقریباً بی‌اثر می‌شود. به طور خلاصه در این آزمایشات با افزایش میزان نفوذپذیری از ۰٪ تا ۳۷٪/۵، راندمان تخلیه رسوبات افزایش و پس از آن با افزایش میزان نفوذپذیری از ۳۷٪/۵ تا ۶۰٪ راندمان تخلیه رسوبات کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵ تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی با سازه SFM نسبت به حالت شاهد با نفوذپذیری

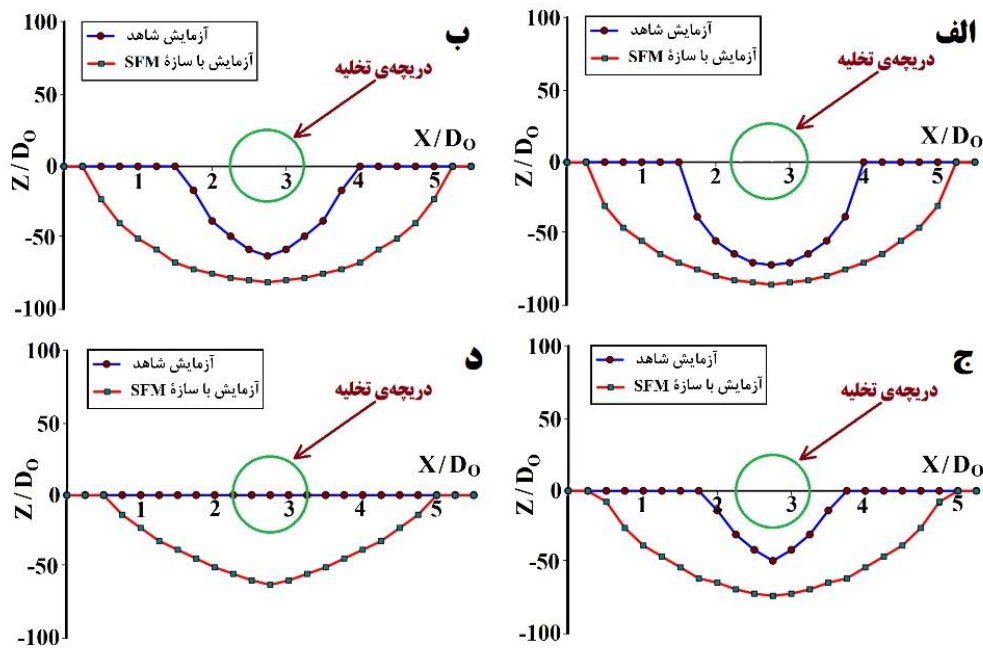
شکل ۱۶ نیم‌رخ طولی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد و آزمایش با سازه SFM را نشان می‌دهد. موقعیت محورهای X, Y, Z در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. مبدأ مختصات، بر مرکز دریچه‌ی تخلیه‌ی تحتانی منطبق شده‌است. در شکل ۱۷، تغییرات نیم‌رخ عرضی مخروط رسوب‌شویی در چهار فاصله‌ی نسبی (Y/Do) ۰، ۰/۵، ۱ و

آزمایش شاهد تعریف کرد. رابطه‌ی ۴ بیانگر نحوه محاسبه راندمان رسوب‌شویی در تحقیق حاضر است:

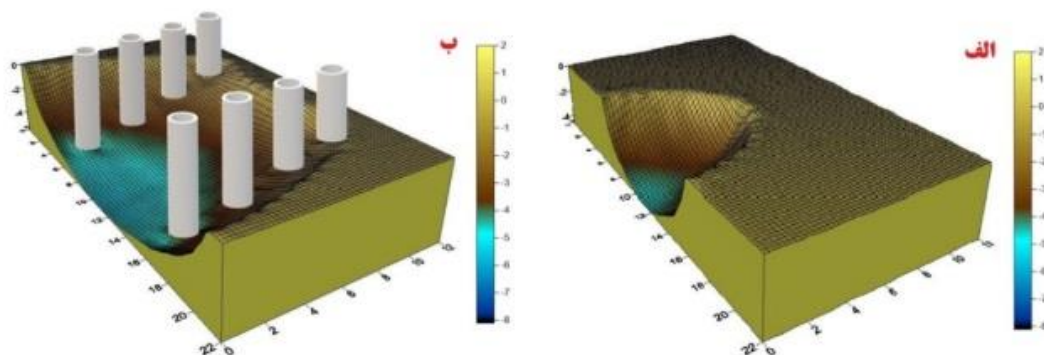
$$E = \frac{\nabla_{SFM}}{\nabla_R} \times 100\% \quad (۴)$$

راندمان تخلیه رسوبات در حضور سازه‌ی SFM به درصد در جدول ۱ نشان داده شده است.

است. از آنجایی که در این آزمایشات دبی، مدت زمان آزمایش و هد کل ثابت بود، بر همین اساس مقدار آب مصرفی برای رسوب‌شویی در کل آزمایشات ثابت است. بنابراین راندمان تخلیه رسوبات را می‌توان نسبت حجم مخروط رسوب‌شویی به حجم مخروط رسوب‌شویی در حالت



شکل ۱۷ مقاطع عرضی مخروط رسوب‌شویی در فواصل (الف)  $Y/D_o=0$  (ب)  $Y/D_o=0.5$  (ج)  $Y/D_o=1$  (د)  $Y/D_o=1.5$



شکل ۱۸ (الف) توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی بدون سازه SFM (ب) با سازه SFM چهار جفت شمعی

جدول ۱ راندمان تخلیه‌ی رسوبات در حضور سازه SFM به درصد

	نفوذپذیری (%)					
	۰	۲۸/۶	۳۷/۵	۴۲/۹	۵۰	۶۰
شاهد (بدون شمع)	۱۰۰	-	-	-	-	-
شماره‌های تخلیه‌شده	یک ردیف	۱۵۹	۱۸۵	۱۸۹	۱۸۶	۱۸۳
	دو ردیف	۱۷۱	۲۰۱	۲۰۶	۲۰۳	۲۰۰
	سه ردیف	۱۸۷	۲۲۱	۲۳۰	۲۲۷	۲۱۲
	چهار ردیف	۱۹۷	۲۳۹	۲۵۶	۲۵۰	۲۲۹
	پنج ردیف	۲۰۰	۲۴۲	۲۵۹	۲۴۸	۲۳۲
شش ردیف	۲۰۳	۲۴۴	۲۶۱	۲۵۳	۲۳۱	۱۸۰

- با توجه به ملاحظات اقتصادی می‌توان حالت چهار جفت شمع با نفوذپذیری ۳۷/۵٪ و نسبت فاصله L/Do=۲ را بهینه‌ترین حالت سازه SFM برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات در پیرامون دریچه تخلیه در مخزن مورد مطالعه در تحقیق حاضر دانست.
- بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان امیدوار بود که سازه SFM، سازه‌ای کاربردی باشد و به منظور افزایش راندمان تخلیه رسوبات از اطراف دریچه‌های تخلیه در مخازن به عنوان یک سازه هیدرولیکی جدید پیشنهاد می‌شود.

### ۱۰- خلاصه و نتیجه‌گیری

از بین روش‌های احیای حجم ذخیره مفید مخازن و کاهش حجم و عمق رسوبات در اطراف دریچه‌های تأسیساتی مخازن، رسوب‌شویی هیدرولیکی مخازن همواره مد نظر محققان بوده است. رسوب‌شویی هیدرولیکی در تخلیه رسوبات مخازن راندمان بالایی ندارد و اغلب علاوه بر هدررفت مقدار قابل توجهی از آب ذخیره شده، و در زمانی اندک مجدداً رسوب‌شویی مورد نیاز خواهد بود. در این پژوهش آزمایشگاهی برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات مخازن تحت فشار استفاده از سازه SFM پیشنهاد و بررسی شد. بر این اساس از سازه SFM با شش جفت شمع و شش نفوذپذیری مختلف استفاده شد. مشخصه‌های مخروط رسوب‌شویی شامل حالت بهینه طول نسبی، عرض نسبی، عمق نسبی و حجم مخروط رسوب‌شویی در هر مورد اندازه‌گیری شد و با اندازه‌گیری‌های متناظر در نمونه شاهد (بدون سازه SFM) مقایسه شد. نتایج این کار پژوهشی را به طور خلاصه می‌توان در بندهای زیر عنوان نمود:

- مقایسه نشان داد که افزایش تعداد جفت شمع‌ها (N)، نسبت حجم مخروط رسوب‌شویی ( $V_{SFM} / V_R$ ) را افزایش می‌دهد.
- در حالت N=۶ (تعداد جفت شمع‌ها برابر شش) و نفوذپذیری ۳۷/۵٪ ماکزیمم حجم مخروط رسوب‌شویی به حجم حالت شاهد ( $V_{SFM} / V_R$ ) ۱۶۱٪ افزایش نشان می‌دهد. لیکن از حالت چهار جفت شمع به بعد، افزایش حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به حجم حالت شاهد تقریباً متوقف می‌شود.

### ۱۲- فهرست علائم

$V_{SFM}$	حجم مخروط شسته شده با سازه SFM
$V_R$	حجم مخروط شسته شده در حالت شاهد
$Q$	دبی خروجی از دریچه تخلیه
$\rho_w$	جرم حجمی سیال
$\rho_s$	جرم حجمی رسوبات
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال
$d_{50}$	اندازه‌ی مؤثر ذرات رسوب
$S$	فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر
$Do$	قطر دریچه تخلیه رسوبات
$H$	هد آب روی دریچه تخلیه
$d$	قطر شمع‌ها
$L$	فاصله بین دو ردیف شمع‌ها
$N$	تعداد شمع‌ها در هر ردیف
$L_s$	بیشترین طول مخروط رسوب‌شویی

Brandt, S. A. (2000). "A review of reservoir desiltation". *Int. J. Sediment Research*, Vol. 15, pp. 321-342.

Crookeston, B. M. (2008). "A laboratory study of streambed stability in bottomless culverts". M. Sc. Thesis. Civil and Environmental Engineering. Utah State University. Logan. Utah.

Dodaran, A., Park, S.K., Mardashti, A. and Noshadi, M. (2012). "Investigation of Dimension Changes in Under Pressure Hydraulic Sediment Flushing Cavity of Storage Dams Under Effect of Localized Vibrations in Sediment Layers", *Int. J. Ocean System Engineering*, 2(2): 71-81.

Emamgholizadeh, S., Bina, M. and Ghomeshi M. (2007). "The effect of reservoir water level and the outflow discharge through bottom outlet on the sediment removal in pressurized flushing". *Agric. Sci. J.* 30(4:A): 61-76. (in Persian)

Emamgholizadeh, S., Bateni, S.M. and Jeng D.S. (2013). "Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry". *Eng. Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26(10): 2551-2558.

Fruchart, F. and Camenen, B. (2012). "Reservoir sedimentation: different type of flushing-friendly flushing: example of Genissiat dam flushing". *ICOLD International Symposium on Dams for a Changing World*. Japan.

Haudhry, M. A. and Rehman, H. R. (2012). "Worldwide experience of sediment flushing through reservoirs". *Mehran Uni. Res. J. Eng. Technol.* 31(3): 395-408.

Haun, S. and Olsen, N. R. B. (2012). "Three-dimensional numerical modelling of the flushing process of the Kali Gandaki hydropower reservoir". *Lakes Reserv. Res. Manag.* 17(1): 25-33.

Khosronejad, A., Rennie, C. D., Salehi Neyshabouri, A. A. and Gholami, I. (2008). "Three-dimensional numerical modeling of reservoir sediment release". *J. Hydraul. Res.* 46(2): 209-223.

Lai, J. S. (1994). "Hydraulic flushing for reservoir desiltation". Ph.D. Thesis. University of California. USA.

Madadi, M., Rahimpour, M. and Qaderi, K. (2016). "Sediment flushing upstream of large orifices: an experimental study". <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.007>.

Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers". *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 125(1): 59-65.

$W_s$	بیشترین عرض مخروط رسوب شویی
$d_s$	بیشترین عمق مخروط رسوب شویی
$W$	وزن رسوبات شسته شده
$r$	نفوذپذیری سازه SFM

### ۱۳- منابع

توفیقی، س.، محمد ولی سامانی، ج.، و ایوب زاده، ع. (۱۳۹۴). "رسوب شویی تحت فشار با توسعه‌ی مجرای تخلیه کننده تحتانی در مخزن سد"، *مجله علمی - پژوهشی مدرس عمران*، دوره پانزدهم، شماره ۲، ۱۳۶-۱۲۷.

شهیرنیا، م.؛ ایوب زاده، ع. و محمدولی سامانی، ج. (۱۳۹۳). "بررسی تأثیر تراز رسوب مخزن بر راندمان رسوب زدایی تحت فشار"، *مجله علمی - پژوهشی هیدرولیک*، دوره ۹، شماره ۱.

عبدالله پور، م. و حسین زاده دلیر، ع. (۱۳۹۲). "تأثیر قرارگیری سازه نیم استوانه بر راندمان رسوب شویی تحت فشار در مخازن"، *نشریه دانش آب و خاک*، جلد ۲۳، شماره ۲، ۲۸۲-۲۶۹.

مددی، م. و رحیم پور، م. قدری، ک. (۱۳۹۵). "افزایش راندمان رسوب شویی تحت فشار مخازن با اتصال سازه PBC به دریچه تخلیه رسوب"، *مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، جلد ۱۷، شماره ۶۶، ۸۹-۷۱.

Ahn, J., Yang, C. T., Boyd, P. M., Pridal, D. B. and Remus, J. I. (2013). "Numerical modeling of sediment flushing from Lewis and Clark Lake". *Int. J. Sediment Res.* 28, 182-193.

Althaus, J. (2011). "Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow". Ph. D. Thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. Switzerland.

Atkinson, E. (1996). "The feasibility of flushing sediment from the reservoir". Report ID 137, p. 99.

Boeriu, P., Roelvink, D., Mulatu, C. A., Thilakasiri, C. N., Moldovanu, A. and Margaritescu, M. (2011). Modeling the flushing process of reservoirs. Proceedings of International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development.



Meshkati, M. E., Dehghani, A. A., Naser, G., Emamgholizadeh, S. and Mosaedi, A. (2009). "Evolution of developing flushing cone during the pressurized flushing in reservoir storage". World Academy Science, Eng. Technol. 58: 1107-1111.

Morris, G.L. and Fan, J. (2010). "Reservoir Sedimentation Handbook: Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use". McGraw-Hill, New York, p. 784.

Powell, D. N. and Khan, A. (2012). "Scour upstream of a circular orifice under constant head". J. Hydraul. Res. 50(1): 28-34.

Powell, D. N. and Khan, A. (2014). "Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions". J. Hydraul. Eng. 141(2): 04014076.

Qian, N. (1982). "Reservoir sedimentation and slope stability, technical and environmental effects". Fourteenth International Congress on Large Dams, Transactions, Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 May, 3: 639-690.

Samadi-Rahim, A. (2001). "Experimental investigation of the effect of number and shape of bottom outlets on the size of flushing cone and the performance of pressure flushing in storage dam". M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.

Scheuerlein, H., Tritthart, M. and Nunez Gonzalez, F. (2004). "Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs". Conference Proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran, 245-254.

Toniolo, H. and Parker, G. (2003). "1D Numerical Modeling of Reservoir Sedimentation", Proceeding, IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, 457-468.

# Experimental study on the effects of SFM structure on the sediment discharge efficiency from outlet gates in the reservoirs

Mahdi FardShyrayeh<sup>1</sup> and Saeed Abbasi<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. in Hydraulic structures, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran

\*[abbasi.saeed@znu.ac.ir](mailto:abbasi.saeed@znu.ac.ir)

## Abstract

The deposition of the sedimentary materials in water reservoirs, especially around the bottom outlet gates, is one of their main operational problems. The efficiency of the sediment discharge from the bottom outlet gates is also very low. In the present study, a new method is proposed to increase the deposited sediments discharge efficiency, in which the so-called SFM<sup>1</sup> structure consists of two parallel rows of columns has been installed at the reservoir bed upstream of the outlet gate. One to six pairs of the columns with a permeability of 0%, 28.6%, 37.5%, 42.9%, 50%, and 60% were installed in two parallel rows at relative placement spaces of 1, 2, 4 and 6 times the outlet gate diameter. Non-cohesive uniform sand aggregates with an average particle size of 0.67 mm were tested as deposited sediment on the reservoir bed. The results showed that the SFM structure considering the best conditions (i.e. a permeability of 37.5% and relative distance of two rows of 2D) increased the average sediment discharge volume by 161% compared to the control case (reference test without SFM installation).

**Keywords:** Sediment discharge efficiency, SFM structure, Outlet gates, Reservoir.