

تأثیر عرض کریدور سازه SFM بر افزایش میزان رسوبات تخلیه شده از مخزن

مهدی فرد شیرایه^۱، سعید عباسی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان*

*Abbasi.saeed@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۸/۰۹/۰۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۸/۰۳/۰۴]

چکیده

مخازن سدها با هدف کنترل سیلاب، ذخیره و تأمین آب برای مصارف پایین دست، تولید انرژی و یا امور تفریحی احداث می‌شوند؛ از این رو حفظ و نگهداری مخازن و به حداقل رساندن تلفات حجم مخزن در اثر ترسیب رسوبات دارای اهمیت بالایی است. در این مقاله راهکاری برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات ته‌نشین شده ارائه شده است که در این روش سازه‌ای موسوم به سازه SFM^۱ متشکل از دو ردیف شمع موازی در قسمت بالادست دریچه تحتانی به کف مخزن نصب می‌شود. در این پژوهش آزمایشگاهی یک تا شش جفت شمع، با نفوذپذیری ۳۷/۵٪ در دو ردیف موازی به فواصل ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر از هم‌دیگر نصب شد تا با عبور جریان آب از پیرامون شمع‌ها و نیز در امتداد کریدور ایجاد شده توسط دو ردیف شمع، علاوه بر تولید گردابه‌ها، منجر به اندرکنش متقابل خطوط جریان و افزایش سرعت نسبی آب در پیرامون شمع‌ها و نیز امتداد کریدور شود. نتایج نشان داد که در بهینه‌ترین حالت استفاده از سازه SFM یعنی کریدور با عرض ۸ سانتی‌متر، حجم رسوبات تخلیه شده از مخزن تا میزان ۲۶۱٪ نسبت به مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: راندمان تخلیه رسوبات، سازه SFM، عرض کریدور، رسوب‌شویی، مخزن.

۱- مقدمه

ترسیب رسوبات در مخازن سدها به ویژه در اطراف دریاچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی به عنوان معضلی اساسی در بیشتر مناطق جهان مطرح است. در این زمینه پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده است که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. لای (1994) با بررسی عددی و آزمایشگاهی رسوب‌شویی و نیز با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۰ مخزن روابطی را برای محاسبه میزان تغییرات ابعاد حفره رسوب‌شویی و تعیین خصیصه‌های جریان در حین رسوب‌شویی پیشنهاد داد [1]. اتکینسون (1966) رسوب‌شویی را بهترین روش برای بازیابی حجم ذخیره مخزن می‌داند [2]. ترسیب رسوبات در مخازن سدها پارامتری مهم در طراحی سدهای ذخیره‌ای است و شناخت فرآیندهای مؤثر در این پدیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [3]. ته‌نشینی رسوبات در مخازن از عواملی است که با گذشت زمان عمر مخازن را کاهش خواهد داد. تخمین زده شده که تجمع رسوبات در مخازن می‌تواند سالانه یک درصد از حجم ذخیره مخازن سدها را کاهش دهد [4]. امامقلی‌زاده و همکاران (2007) در مطالعات خود تأثیر تغییرات جریان و ارتفاع آب بر عملیات رسوب‌شویی تحت فشار را بررسی نمودند [5]. خسرونژاد و همکاران (2008) یک مدل عددی سه بعدی برای تعیین مشخصه‌های جریان آب و تغییرات ابعاد بستر رسوبی در حین فرایند رسوب‌شویی ارائه دادند [6]. مشکاتی و همکاران (2009) تأثیر ابعاد دریاچه تخلیه تحتانی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی در رسوب‌شویی تحت فشار را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [7]. بوئریو و همکاران (2011) با استفاده از مدل عددی Delft3D به مدل‌سازی تأثیر رسوب‌شویی بر توپوگرافی بستر مخزن در سریلانکا پرداختند. آنها مدل کامپیوتری GSTARS4 را نیز برای مدل‌سازی فرسایش حین رسوب‌شویی در یک مخزن در کشور آمریکا به کار بردند [8]. صمدی رحیم (2011) تأثیر تعداد و شکل مقطع دریاچه تخلیه تحتانی را بر ابعاد حفره رسوب‌شویی بررسی کرد [9]. مقدار حجم رسوبات تخلیه‌شونده به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که می‌توان به پارامترهایی همچون هد آب داخل

مخزن، دبی جریان خروجی از دریاچه تخلیه، اندازه و نوع رسوبات تجمع‌یافته در داخل مخزن اشاره نمود [10]. در رسوب‌شویی تحت فشار، رقوم هد آب در مخزن در اثنای عملیات بالا نگه داشته می‌شود و آب به صورت تحت فشار از طریق دریاچه تخلیه تحتانی خارج می‌شود. در این حالت، رسوب‌شویی تنها محدود به ناحیه‌ای کوچک در پیرامون دریاچه تخلیه تحتانی می‌شود و در ازای خروج مقدار زیادی آب، راندمان تخلیه رسوبات اندک است. به همین دلیل رسوب‌شویی تحت فشار در تعداد زیادی از سدهای جهان نتایج مطلوبی به همراه نداشته است [11]. عبدالله پور و همکاران (2012) به منظور گسترش جریان‌های گردابی اطراف دریاچه تخلیه تحتانی مخازن از سازه نیمه استوانه‌ای قائم شکاف‌دار بهره بردند و تأثیر مثبت این سازه را گزارش دادند [12]. فروچارت و کامن (2012) رسوب‌شویی را برای نگهداشتن مخزن در بهترین وضعیت بهره‌برداری ضروری می‌دانند [13]. هاوان و اولسن (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 [14]. پاول و خان (2012، 2014) مشخصه‌های جریان و چگونگی انتقال رسوبات در بالادست دریاچه‌های تخلیه دایره‌ای و شکل‌گیری گردابه‌ها در مجاورت این دریاچه‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که این گردابه‌ها عامل اصلی خروج رسوبات از مخزن هستند [15] و [16]. امامقلی‌زاده و همکاران (2013) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، به شبیه‌سازی و ارائه روابطی برای تعیین هندسه مخروط رسوب‌شویی پرداختند [17]. آهن و همکاران (2013) مدل کامپیوتری GSTARS4 را برای مدل‌سازی رسوب‌شویی در مخزنی در کشور آمریکا به کار بردند [18]. توفیقی و همکاران (2015) نشان دادند که توسعه‌ی مجرای تخلیه تحتانی در مخزن تأثیر مثبت و محسوسی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی دارد؛ به گونه‌ای که توسعه‌ی 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 ۷۴، ۵۰ و ۹۶ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا خواهد شد [19]. مددی و همکاران

نسبی آب در امتداد کریدور می شود و بدین ترتیب انتظار می رود که رسوبات بیشتری از مخزن تخلیه شده، ابعاد حفره تخلیه رسوبات گسترش یابد.

شکل ۱. شماتیک سازه SFM

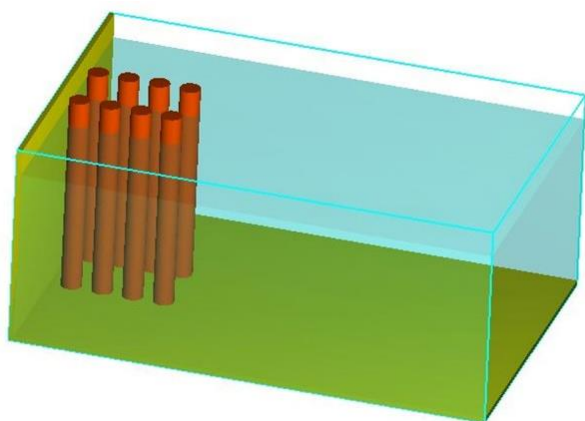


Fig. 1. Schematic view of the SFM structure

از آنجایی که براساس هیدرودینامیک جریان خروجی از دریچه، بیشینه گرادیان سرعت در امتداد قائم بر دریچه است چیدمان شمع ها در راستای عمود بر محور دریچه پیشنهاد شده است. در پیشنهاد سازه SFM به این مطلب توجه شده است که این سازه در مقیاس واقعی اجرایی باشد. بنابراین در تکمیل مطالعه مددی و همکاران (2016) از پیش بینی سقف برای شمع ها چشمپوشی شده است چرا که در مقیاس واقعی، احداث سقف برای گروه شمع ها عملیاتی به نظر نمی رسد. بیشتر تأثیر شمع ها در نزدیکی بستر رسوبی است، از این رو شمع های مرتفع غیراجرایی و اقتصادی هستند در این پژوهش تنها برای تثبیت موقعیت شمع ها، از شمع های مرتفع و صفحه ای مشبک آن هم خارج از محیط آب بهره برده شده است (بدین ترتیب از اثربخشی سقف بر افزایش راندمان رسوب شویی ممانعت به عمل آمد.)؛ همچنین برای تثبیت هرچه بیشتر شمع ها و جلوگیری از تغییر شرایط نفوذپذیری سازه، قسمت تحتانی شمع ها توسط پیچ و مهره به یکدیگر متصل شدند.

(2016) به بررسی تأثیر استفاده از سازه PBC^۱ بر افزایش راندمان تخلیه رسوبات در حین رسوب شویی تحت فشار به صورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج بررسی های ایشان نشان داد که طول و عرض ماکزیمم نسبی مخروط رسوب شویی نسبت به آزمایش شاهد افزایش دارد ولی تغییرات عمق ماکزیمم نسبی ناچیز است [20]. مددی و همکاران (2017) با پیشنهاد سازه ای متشکل از ردیف چند لوله استوانه ای با چیدمان دایره ای که سقفی نیز بر بالای خود داشت، راندمان رسوب شویی را افزایش دادند. همچنین ایشان رفتار جریان در بالادست دریچه و میزان رسوبات شسته شده توسط جریان خروجی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که جریان عبوری از میان شمع ها، گردابه هایی قوی را در جریان خروجی تولید می کند که موجب حرکت رسوبات و تخلیه مقدار زیادی از آنها از مخزن می شود [21]. فرد شیرایه و عباسی (2019) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان نفوذپذیری سازه SFM بر راندمان تخلیه رسوبات از دریچه های تحتانی در مخازن تحت فشار پرداختند. ایشان با بررسی نفوذپذیری های ۰٪، ۲۸/۶٪، ۳۷/۵٪، ۴۲/۹٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ دریافتند که نفوذپذیری ۳۷/۵٪ بهترین بازدهی را در افزایش راندمان رسوب شویی دارد [22]. در حال حاضر راندمان تخلیه رسوبات از دریچه های تخلیه تحتانی بسیار پایین است. در این مقاله به استناد مطالعه پاول و خان (2012، 2014) و با هدف افزایش راندمان تخلیه رسوبات از مخازن تحت فشار، سازه ای موسوم به SFM پیشنهاد شده است. این سازه که متشکل از دو ردیف شمع ایستاده است، در بالادست دریچه تخلیه تحتانی به کف مخزن متصل می شود تا جریان آب، پس عبور از بین شمع ها از دریچه تخلیه تحتانی خارج شود. در شکل (۱) تصویر شماتیک سازه SFM مشهود است.

با توجه به شکل (۲) که حاصل مدل سازی عددی با نرم افزار FLOW3D است؛ عبور جریان آب از اطراف شمع ها و نیز در امتداد کریدور ایجاد شده توسط دو ردیف شمع، علاوه بر آن که موجب تولید گردابه های برخاستگی و نعل اسبی می شود، منجر به اندرکنش متقابل خطوط جریان و افزایش سرعت

شکل ۳. امکانات آزمایشگاهی



Fig. 3. Experimental setup

مصالص ماسه‌ای غیر یکنواخت و غیر چسبنده با اندازه متوسط 0.67 میلی‌متر (مصالص عبوری از الک $30\#$ و مانده روی الک $100\#$) به عنوان رسوبات ته‌نشین شده در مخزن در نظر گرفته شد. ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب انحناء (Cc) برای رسوبات به‌کار رفته در آزمایش به ترتیب $2/5$ و $1/3$ محاسبه شد. برای برداشت توپوگرافی بستر از متر لیزری با دقت ± 1 میلی‌متر استفاده شد.

۳- سازه SFM

سازه SFM در واقع گروه شمع‌های استوانه‌ای شکل است که در دو ردیف موازی با نفوذپذیری معین و در فواصل مختلف، در قسمت بالادست دریچه تخلیه به کف مخزن متصل می‌شود. تصویر سازه SFM بعد از تعبیه در مخزن، در شکل (۵) نشان داده شده است. برای جلوگیری از تغییر مکان شمع‌ها در فرآیند آزمایش، صفحه‌ای مشبک در قسمت فوقانی شمع‌ها نصب شد. صفحه مشبک یاد شده خارج از محیط آب نصب شد تا از تأثیر آن بر فرایند تخلیه رسوبات جلوگیری شود. شمع‌های مدل سازه SFM با استفاده از میله‌هایی به قطر 20 میلی‌متر ساخته شد و به منظور تثبیت موقعیت شمع‌ها و جلوگیری از تغییر شرایط نفوذپذیری سازه، قسمت تحتانی شمع‌ها توسط پیچ و مهره به یکدیگر متصل شدند و در نهایت سازه SFM در بالادست دریچه تخلیه تحتانی به کف مخزن متصل شد.

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

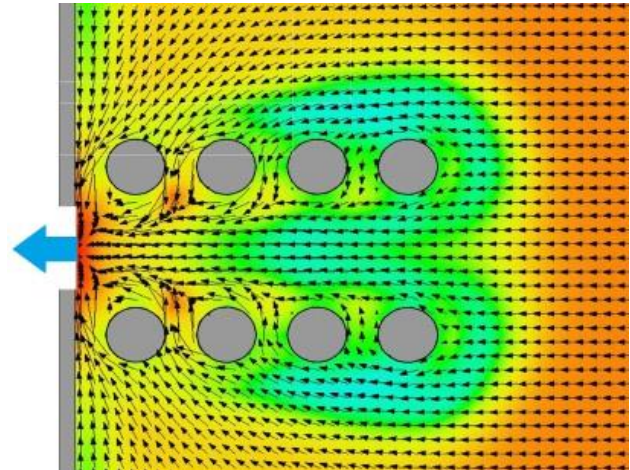


Fig. 2. Schematic view of the flow velocity vectors passing through the SFM columns

۲- امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه پژوهشی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه زنجان انجام شد. بدین منظور از یک مخزن مکعب مستطیل زیرین به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $2/5$ ، $2/0$ و $0/5$ متر و یک مخزن مکعب مستطیل بالایی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $1/5$ ، $2/0$ و $0/55$ متر و یک فلوم به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 4 ، $0/6$ و $0/6$ متر استفاده شد (شکل ۳). سیستم چرخه آب به وسیله پمپاژ آب از مخزن زیرین به فلوم صورت می‌گیرد و جریان از فلوم به مخزن بالایی و سپس دوباره 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 جعبه 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 2 لیتر بر ثانیه تخلیه می‌شود. به منظور تثبیت سطح آب مخزن در یک تراز مشخص، از یک سرریز روگذر استفاده و ارتفاع آب در تراز 40 سانتی‌متر ثابت نگه داشته شد. قسمت خروجی دریچه تخلیه تحتانی با پرده‌ی رسوب‌گیر از جنس الیاف کش‌سان مجهز شد تا رسوبات خروجی از دریچه تخلیه تحتانی مخزن به دقت جمع‌آوری شود.

دو حالت با و بدون سازه SFM انجام شدند. آزمایش بدون سازه SFM به عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد و تأثیر سازه SFM با فواصل مختلف روی مشخصات هندسی مخروط شسته شده و راندمان تخلیه رسوبات بررسی شد.

۵- تحلیل ابعادی

میزان حجم رسوبات تخلیه شده از مخازن سدها ناشی از عواملی همچون 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 غیرچسبنده تابع عوامل متعددی است. این عوامل شامل دبی خروجی از دریچه تخلیه (Q)، جرم حجمی سیال (ρ_w)، جرم حجمی رسوبات (ρ_s)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، اندازه‌ی مؤثر ذرات رسوب (d_{50})، فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر (S)، قطر دریچه تخلیه رسوبات (D_o)، هد آب روی دریچه تخلیه (H)، قطر شمع‌ها (d)، فاصله‌ی بین دو ردیف شمع‌ها یا همان عرض کریدور (L) و تعداد شمع‌ها در هر ردیف (N) هستند. در این پژوهش، مقادیر H ، D_o و d_{50} ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین عدد فروود در همه آزمایش‌ها مقداری ثابت داشته و هم‌چنین جریان خروجی از دریچه تخلیه تحتانی کاملاً متلاطم است و بنابراین می‌توان از تأثیر عدد رینولدز نیز چشم پوشی نمود. مشخصه‌های مخروط رسوب‌شویی نیز 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 به‌واسه آن حجم حفره شسته شده (V_{SFM}) قابل محاسبه است. ارتباط بین پارامترهای فوق توسط رابطه (۱) قابل بیان است:

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

از بین این پارامترها H به دلیل انتخاب هد ثابت، ρ_w ، ρ_s ، μ و d_{50} به دلیل انتخاب نوع یکسان برای رسوبات در تمامی آزمایش‌ها و انتخاب آب به عنوان سیال، $r = \frac{S}{S+d}$ به دلیل

شکل ۵. سازه SFM پس از نصب در مخزن



Fig. 5. SFM structure after installation in the reservoir

۴- روش اجرای آزمایش‌ها

قبل از هر آزمایش رسوبات موجود در مخزن با استفاده از ابزاری مناسب به صورت کاملاً افقی تراز 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 اندازه کافی دور از محل دریچه تخلیه تحتانی قرار دارد، پمپاژ شد. سپس ارتفاع مخزن به آرامی به رقوم مورد نظر رسید و شروع به سرریز شدن نمود و هد آب روی دریچه در رقوم ۴۰ سانتی‌متر تثبیت شد. بدین ترتیب هد آب روی دریچه به میزان ۴۰ سانتی‌متر منظور شد و دریچه تخلیه تحتانی باز شد. 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 (جریان خروجی آب کاملاً زلال) است. بر همین اساس و برای اطمینان کافی، مدت زمان آزمایش‌های تخلیه رسوبات ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بعد از پایان هر آزمایش، شیر دریچه تخلیه تحتانی و جریان ورودی به مخزن بسته شد و آب موجود در مخزن نیز از طریق دریچه 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 اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها برای هر

۷- آزمایش با سازه SFM

با باز شدن دریچه تخلیه تحتانی، جریان با عبور از فضای بین شمع‌ها تخلیه می‌شود. با کم شدن سطح مقطع عبور جریان آب، سرعت موضعی پیرامون شمع‌ها و پس از این 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. چیدمان شمع‌ها نیز تشکیل مسیری کانال مانند می‌دهد که با ایجاد آشفتگی جریان، موجب افزایش راندمان تخلیه رسوبات بستر مخزن می‌شود. شکل (۶) مخروط رسوب‌شویی در حالت آزمایش شاهد (بدون سازه SFM) و با سازه SFM را نشان می‌دهد.

شکل ۶. الف) مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد (بدون سازه SFM) و ب) آزمایش با سازه SFM

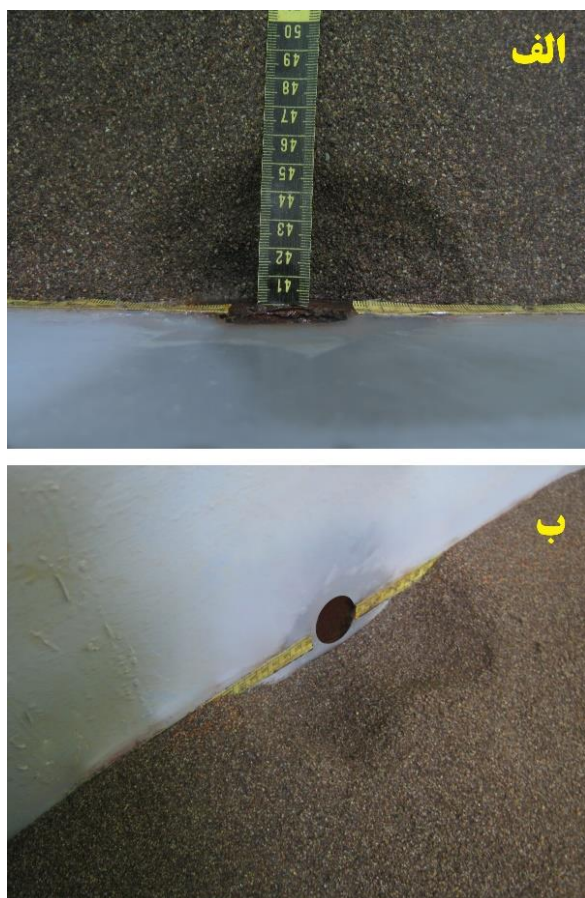


Fig. 6. A) Sediment flushing cone in the reference test (without SFM structure) and B) The result using the SFM structure

انتخاب نفوذپذیری ۳۷/۵٪ در کل آزمایش‌ها و همچنین Q به دلیل دبی ثابت در تمامی آزمایش‌ها در محاسبات مرتبط با آنالیز ابعادی منظور نمی‌شود. تحلیل ابعادی به روش پی باکینگهام، پارامترهای بدون بعد زیر را به عنوان پارامترهای حاکم بر مسئله مشخص نمود:

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

۶- آزمایش شاهد

در آزمایش بدون سازه SFM (آزمایش شاهد)، بلافاصله بعد از باز شدن دریچه 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 حاکی از آن است که مراحل تخلیه رسوبات از مخزن در حالت شاهد به سه بخش مجزا قابل تفکیک 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 می‌شوند و به دنبال آن حفره‌ای کوچک به شکل مخروط در اطراف دریچه تخلیه تحتانی ایجاد می‌شود. ۲- ۳۰ دقیقه‌ی 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. پاول و خان (2012، 2014) نیز شکل‌گیری گردابه‌ها در مجاورت دریچه‌های تحتانی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که این گردابه‌ها عامل اصلی خروج رسوبات از مخزن هستند [15 و 16]. ۳- در ۲۰ دقیقه انتهایی تقریباً روال رسوب‌شویی متوقف می‌شود و می‌توان گفت که در این مرحله، حجم رسوبات خارج شده از دریچه تخلیه تحتانی ناچیز است.

شکل ۸. تغییرات نسبی عرض مخروط رسوب شویی با تعداد جفت شمع‌ها و عرض کریدور سازه SFM

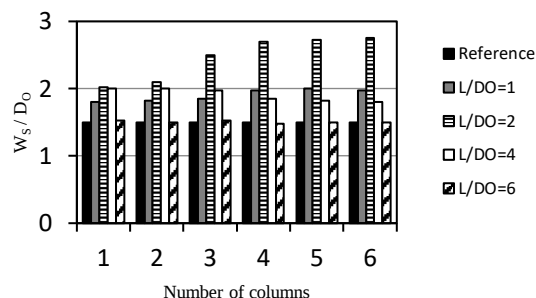


Fig. 8. Relative changes of the sediment flushing cone width with pile count and corridor width of the SFM structure

شکل (۹) تأثیر تعداد جفت شمع‌ها را بر عمق مخروط رسوب شویی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که افزایش تعداد جفت شمع‌ها (N)، عمق نسبی مخروط رسوب شویی (d_s/d_{50}) را افزایش می‌دهد. در حالت $N=6$ و فاصله نسبی (L/D_0) برابر با ۲ (۸ سانتی‌متر)، ماکزیمم طول نسبی مخروط رسوب شویی تا میزان ۱۱۹٪ مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد. افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش طول نسبی مخروط رسوب شویی می‌شود، ولی این افزایش طول نسبی در حالت $N>5$ بسیار اندک است.

شکل ۹. تغییرات نسبی عمق مخروط رسوب شویی با تعداد جفت شمع‌ها و عرض کریدور سازه SFM

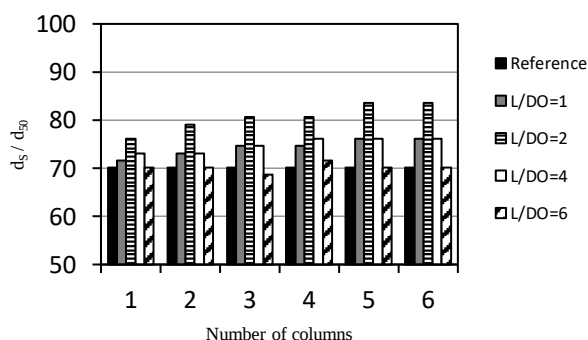


Fig. 9. Relative changes of the sediment flushing cone depth with pile count and corridor width of the SFM structure

۹- مقایسه حجم مخروط رسوب شویی در حالت آزمایشی شاهد و آزمایش با سازه SFM

محاسبه حجم رسوباتی که در هر آزمایش رسوب شویی خارج می‌شود همواره مورد توجه است و خود به تنهایی می‌تواند

۸- تأثیر عرض کریدور سازه SFM بر افزایش میزان رسوبات تخلیه شده از مخزن

ابعاد مخروط رسوب شویی در همه آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. این پارامترها شامل بیش‌ترین طول، عرض، عمق مخروط رسوب شویی و وزن رسوبات شسته شده است که توسط آن‌ها حجم حفره شسته شده و نیز راندمان تخلیه رسوبات قابل محاسبه است. شکل (۷) تأثیر تعداد جفت شمع‌ها را بر طول مخروط رسوب شویی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد جفت شمع‌ها (N)، طول نسبی مخروط رسوب شویی (L_s/D_0) افزایش می‌یابد. در حالت $N=6$ و فاصله نسبی (L/D_0) برابر با ۲ (۸ سانتی‌متر)، ماکزیمم طول نسبی مخروط رسوب شویی تا میزان ۱۸۳٪ مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد. افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش طول نسبی مخروط رسوب شویی می‌شود، لیکن این افزایش طول نسبی در حالت $N>4$ ناچیز است.

شکل ۷. تغییرات نسبی طول مخروط رسوب شویی با تعداد جفت شمع‌ها و عرض کریدور سازه SFM

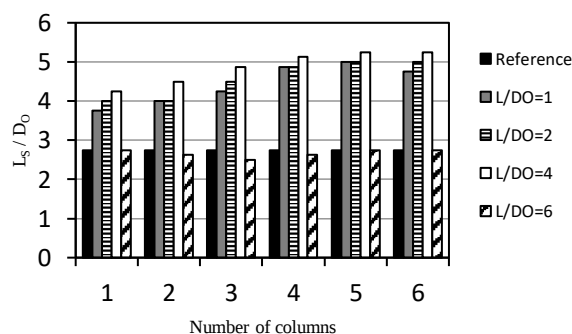


Fig. 7. Relative changes of the sediment flushing cone length with pile count and corridor width of the SFM structure

شکل (۸) تأثیر تعداد جفت شمع‌ها را بر عرض مخروط رسوب شویی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که افزایش تعداد جفت شمع‌ها (N)، عرض نسبی مخروط رسوب شویی (W_s/D_0) را افزایش می‌دهد. در حالت $N=6$ و فاصله نسبی (L/D_0) برابر با ۴ (۱۶ سانتی‌متر)، ماکزیمم عرض نسبی مخروط رسوب شویی تا میزان ۲۸۲٪ مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد.

اظهار نظر قطعی در خصوص تعداد جفت شمع‌های بهینه بستگی به شرایط آزمایش خواهد داشت. شکل (۱۱) 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. مبدا مختصات، بر مرکز دریچه تخلیه تحتانی هماهنگ شده است.

شکل ۱۱. مقایسه نیم‌رخ طولی مخروط رسوب‌شویی

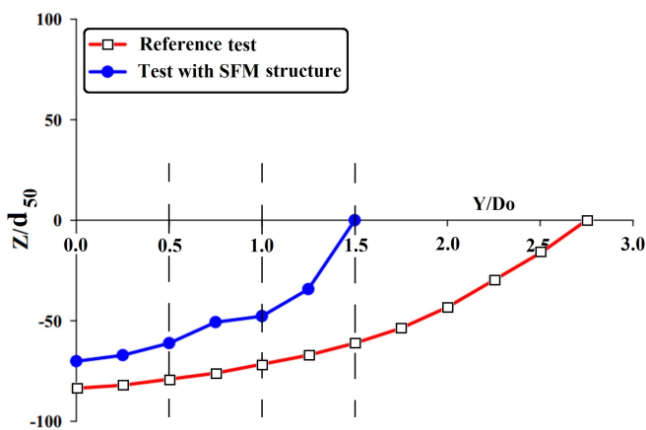


Fig. 11. Comparison of the longitudinal profile of sediment flushing cone

در شکل (۱۲)، تغییرات نیم‌رخ عرضی مخروط رسوب‌شویی در چهار فاصله نسبی (X/D_0) ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ از دریچه تخلیه برای هر دو حالت آزمایش شاهد و آزمایش با سازه SFM ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشخص است، در حالتی که رسوب‌شویی بدون سازه SFM صورت می‌گیرد، با دور شدن از دریچه تخلیه (به سمت بالادست در مخزن) سطح مقطع عرضی مخروط رسوب‌شویی کوچک‌تر می‌شود؛ در حالی که کاهش سطح مقطع عرضی مخروط رسوب‌شویی در حضور سازه SFM به کندی صورت می‌پذیرد. تخمین حجم مخروط رسوب‌شویی برای محاسبه افزایش راندمان رسوب‌شویی مورد نیاز است. در این آزمایش‌ها 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 (۱۳) دیده می‌شود.

شاخصی برای ارزیابی میزان کارایی عملیات رسوب‌شویی باشد [26]. شکل (۱۰) تأثیر تعداد شمع‌ها را بر حجم مخروط رسوب‌شویی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، افزایش تعداد جفت شمع‌ها (N)، حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی (V_{SFM}/V_R) را افزایش می‌دهد. در حالت $N=6$ و فاصله نسبی (L/D_0) برابر با ۲ (۸ سانتی‌متر)، ماکزیمم حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی تا میزان ۲۶۱٪ مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد. افزایش تعداد جفت شمع‌ها باعث افزایش حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی می‌شود، لیکن این افزایش طول نسبی در حالت $N>4$ ناچیز است.

شکل ۱۰. تغییرات نسبی حجم مخروط رسوب‌شویی با تعداد جفت شمع‌ها و عرض کریدور سازه SFM

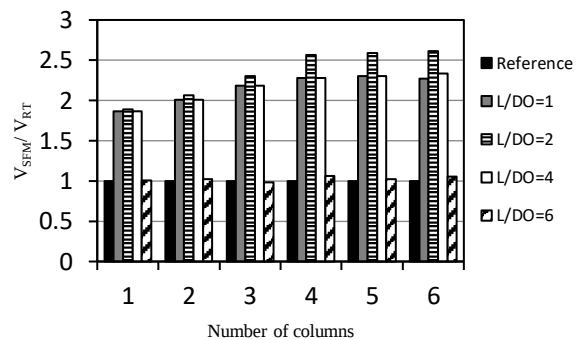


Fig. 10. Relative changes of the sediment flushing cone volume with pile count and corridor width of the SFM structure

به استناد آزمایش‌های انجام شده و با شرایط این آزمایش‌ها، از نظر اقتصادی بهینه‌ترین حالت سازه SFM برای افزایش راندمان رسوب‌شویی (از لحاظ طول، عرض، عمق و حجم رسوبات) شامل چهار الی پنج جفت شمع (تعداد شمع‌های کمتر و راندمان مشابه سایر حالات با شمع‌های بیشتر) است. زمانی که تعداد شمع‌ها از یک تعداد مشخصی بیش‌تر می‌شود، آثار انگیزشی شمع‌ها بر روی جریان کاهش می‌یابد و تأثیر آن روی راندمان رسوب‌شویی کم می‌شود. با توجه به شکل‌های (۶ تا ۹) تأثیر مثبت چهار جفت شمع مستقر در امتداد عمود بر محور دریچه تخلیه قطعی است و تأثیر جفت شمع‌های پنجم و ششم در این آزمایش‌ها به صورت موردی مشاهده می‌شود. اظهار این آزمایشات به صورت موردی مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲. مقاطع عرضی مخروط رسوب شویی در فواصل (الف) $X/D_o=0$ (ب) $X/D_o=0.5$ (ج) $X/D_o=1$

(د) $X/D_o=1.5$

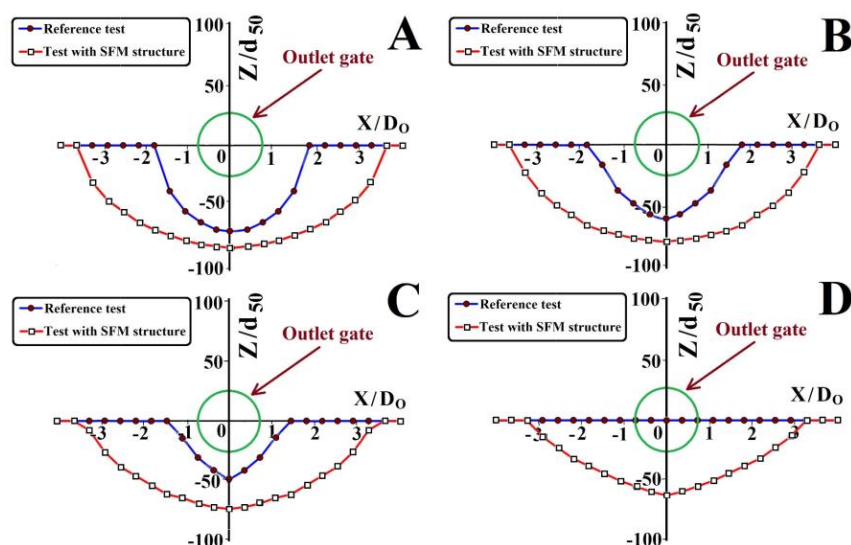


Fig. 12. Transverse cross sections of the sediment flushing cone at the distances of (a) $X/D_o=0$, (b) $X/D_o=0.5$, (c) $X/D_o=1$, and (d) $X/D_o=1.5$

۱۰- خلاصه و نتیجه گیری

رسوب شویی هیدرولیکی مخازن به عنوان یکی از روش های احیای قسمتی از حجم ذخیره مفید مخازن و همچنین کاهش حجم و عمق رسوبات در اطراف دریچه های تأسیساتی مخازن، همواره مد نظر پژوهشگران بوده است. در خلال رسوب شویی هیدرولیکی مقدار قابل توجهی از آب ذخیره شده مخزن تخلیه می شود. بنابراین آن دسته از روش هایی که در ازای مصرف آب یکسان، تخلیه رسوبات بیشتری انجام دهند، مطلوب تر خواهند بود. در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده از سازه SFM برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات مخازن تحت فشار پیشنهاد و بررسی شد. به این منظور از سازه SFM با یک تا شش جفت شمع با نفوذپذیری ۳۷/۵٪ استفاده شد. مشخصه های مخروط رسوب شویی شامل طول، عرض، عمق و حجم مخروط رسوب شویی در هر مورد اندازه گیری شد و با نتایج متناظر در نمونه شاهد (بدون سازه SFM) مقایسه شد. نتایج این کار پژوهشی را به طور خلاصه می توان در بندهای زیر عنوان نمود:

- افزایش تعداد جفت شمع ها (N)، نسبت حجم مخروط رسوب شویی (V_{SFM}/V_R) را افزایش می دهد.

شکل ۱۳. الف) توپوگرافی مخروط رسوب شویی در آزمایش شاهد و ب) در آزمایش با سازه SFM

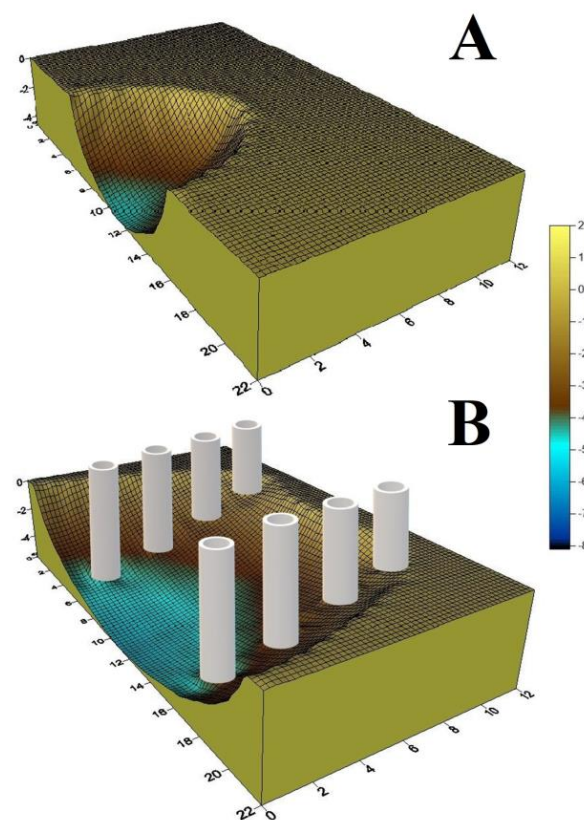


Fig. 13. A) Topography of the sediment flushing cone in the reference test and B) the experiment including the SFM structure

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.

[9]. Samadi-Rahim A. 2011 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 (In Persian).

[10]. 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. International journal of Ocean System Engineering, 2(2), pp 21.

[11]. Haudhry M. A. and Rehman H. R. 2012 Worldwide experience of sediment flushing through reservoirs. Journal of Engineering and Technology Management, 31(3):395-408.

[12]. Abdollahpour M. 2012 The effect of eddy flow on the sediment desilting from the reservoir's bottom outlet. M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran (In Persian).

[13]. 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.

[14]. Haun S. and Olsen N. R. B. 2012 Three-dimensional numerical modelling of the flushing process of the Kali Gandaki hydropower reservoir. lake and reservoir management, 17(1):25-33.

[15]. Powell D. N. and Khan A. 2012 Scour upstream of a circular orifice under constant head. Journal of Hydraulic Research, 50(1): 28-34.

[16]. Powell D. N. and Khan A. 2014 Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. Journal of Hydraulic Engineering, 141(2):04014076.

[17]. Emamgholizadeh S., Bateni S. M. and Jeng D. S. 2013 Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol 26 (10), pp 2551-2558.

[18]. 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. International journal of sediment research, 28, 182-193.

[19]. Tofighi S., Samani J. M. V. and Ayyubzadeh S. A. 2015 Pressure flushing with expanding bottom outlet channel within dam reservoir. Modares Civil Engineering journal, 15(2):127-206 (In Persian).

- در حالت $N=6$ (تعداد جفت شمع‌ها برابر شش) و فاصله نسبی بین دو ردیف شمع $L/Do=2$ (عرض کریدور برابر با ۸ سانتی‌متر) متوسط حجم رسوبات تخلیه شده از مخزن تا میزان ۲۶۱٪ مقدار مشابه در حالت شاهد (بدون سازه SFM) افزایش می‌یابد؛ لیکن از حالت چهار جفت شمع به بعد، افزایش حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به حجم حالت شاهد تقریباً متوقف است.
- با توجه به ملاحظات اقتصادی (هزینه‌های مربوط به اجرای شمع‌ها) می‌توان حالت چهار جفت شمع با نفوذپذیری ۳۷/۵٪ و نسبت فاصله $L/Do=2$ را بهینه‌ترین حالت سازه SFM برای افزایش راندمان تخلیه رسوبات در پیرامون دریچه تخلیه در مخزن مورد مطالعه در این پژوهش دانست.
- بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان عنوان نمود که سازه SFM، سازه‌ای کاربردی است و به منظور افزایش راندمان تخلیه رسوبات از اطراف دریچه‌های تخلیه در مخازن قابل پیشنهاد است.

References

۱۴- منابع

- [1]. Lai J. S. 1994 Hydraulic flushing for reservoir desiltation. Ph.D. Thesis, University of California, USA.
- [2]. Atkinson E. 1996 The feasibility of flushing sediment from the reservoir. Report ID 137, p 99.
- [3]. Brandt S. A. 2000 A review of reservoir desiltation. International journal of sediment research, Vol 15, pp 321-342.
- [4]. Toniolo H. and Parker G. 2003 1D Numerical Modeling of Reservoir Sedimentation. Proceeding, IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, pp 257-468.
- [5]. Emamgholizadeh S., Bina M. and Ghomesi M. 2007 The effect of reservoir water level and the outflow discharge through bottom outlet on the sediment removal in pressurized flushing. Journal of Agricultural Science, 30 (4: A):61-76.
- [6]. Khosronejad A., Rennie C. D., Salehi Neyshabouri A. A. and Gholami I. 2008 Three-dimensional numerical modeling of reservoir sediment release. Journal of Hydraulic Research, 46 (2):209-223.
- [7]. 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 of Science, Engineering and Technology, 58:1107-1111.
- [8]. Boeriu P., Roelvink D., Mulatu C. A., Thilakasiri C. N., Moldovanu A. and Margaritescu M. 2011 Modeling

reservoirs: an experimental study. Water resources management. Nov 1;31(14):4633-47.

[22]. Fard shirayeh M, Abbasi S. 2019 Experimental investigation of impact of SFM structures permeability on sediment flushing efficiency from outlet gates in reservoirs. Journal of Hydraulics, Vol 14(2), (In Persian).

[20]. Madadi, M.R., Rahimpour, M. and Qaderi, K., 2016 Sediment flushing upstream of large orifices: an experimental study. Flow Measurement and Instrumentation, 52, pp.180-189.

[21]. Madadi MR, Rahimpour M, Qaderi K. 2017 Improving the pressurized flushing efficiency in

Impact of corridor width of SFM structure on reservoirs' flushed sediment increment

Mehdi Fard Shirayeh¹, Saeed Abbasi² *

1 M.S. in Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan

2 * Assistant professor, Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Abbasi.Saeed@znu.ac.ir

Abbasi.saeed@znu.ac.ir

Abstract: Dam reservoirs are constructed in order to flood control, reserve and provide water for downstream use, energy production and/or recreational purposes. Sedimentation is one of the most important operational conflicts in the world; surface run-off water erodes and carries the sediments on their route to the downstream all the time. Because sedimentation in reservoirs would reduce its useful volume, to reserve and retain the present reservoirs and to minimize the dissipation of reservoir volume because of sedimentation is very important. As a result, presentation of an appropriate method for increasing the efficiency of pressurized sediment flushing could be a significant way in increasing the useful lifetime of dams and also in surviving the pools with less water wasting. In this manner, using some hybrid method for increasing the efficiency of sediment flushing could be highlighted. At present, the efficiency of sediment flushing from outlet gates is very low. In this paper, a new method to increase the efficiency of sediment flushing is presented in which a structure namely SFM structure consisted of two parallel piles rows is installed on reservoir bed at the upstream of outlet gate. In this experimental research one to six pairs of piles with a permeability of 37.5% in two parallel rows at distances of 4, 8, 16 and 24 cm from each other were installed. The water flow will exit through the outlet gate after passing among the piles. Redirection of streamlines around the piles and also passing the flow along the corridor will cause some horseshow and wake vortices and also will cause the situation so as the sediments will rise and start to move. This will make the streamlines to interact and the proportional velocity of water to increase along the corridor and as a result, it is anticipated that more sediments will flush from the outlet gate and the flushing cavity volume will expand toward upstream. In this research it is noted that the SFM structure to be applicable and easy to construct inside a full-scale reservoir; so despite Madadi et al (2016), there is no ceiling on top of the columns because in prototype scale construction of such huge roof is not applicable. Because the maximum velocity gradient is normal to the outlet gate based on flow hydrodynamics, the arrangement of the columns is proposed to be perpendicular to the gate axis. Uniform non-cohesive sandy aggregates with a mean size of 0.67 mm were utilized as packed sediment in the reservoir. The results showed that the flushed sediment from the reservoir increases by 261% when the SFM structure with corridor width of 8 cm is utilized compared to that of the reference test (without SFM structure). Based on economic considerations and results of the present study (direct and indirect costs of piles construction) one can see that the four pairs of piles with permeability of 37.5% and row distances of $2D_o$ ($L/D_o=2$) is the most optimum case among the tested cases of SFM structure in increasing the efficiency of sediment flushing around and through outlet gate in reservoirs. Considering the results, the SFM structure is an applicable structure and further investigations should be performed in order to find its design charts.

Keywords: sediment flushing efficiency, SFM structure, corridor width, flushing, reservoir.