

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخزن سد با استفاده از سازه‌اتاقک رسوب

قربان مهتابی^{۱*} و سعید مظفری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب و عضو بنیاد ملی نخبگان، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۳۰

چکیده

در چند دهه اخیر به دلیل افزایش جمعیت و نیاز فزاینده به آب، سدسازی توسعه پیدا کرده است، اما رسوب‌گذاری داخل مخازن سدها همواره باعث کاهش کارایی و طول عمر مخازن بوده است. در این تحقیق، با نصب سازه منشوری شکل به نام اتاقک رسوب در جلو تخلیه‌کننده تحتانی، تأثیر این سازه بر راندمان رسوب‌شویی تحت فشار بررسی شده است. در این سازه، در دیواره جلویی و کناری آن، شکاف‌های عمودی با عرض بازشدگی (b)، تعداد و آرایش مختلف (موقعیت) تعبیه گردید. شکاف‌ها در سه حالت تکی، دوتایی و سه‌تایی با بازشدگی‌های ۷/۵-۱/۲۵ سانتی‌متر (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و b/D قطر دریچه تخلیه) انتخاب شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در مدل‌های دو شکاف جلویی با مجموع بازشدگی ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$)، با افزایش فاصله شکاف‌ها راندمان رسوب‌شویی به میزان ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، در مدل‌های دو شکاف کناری متقارن با مجموع بازشدگی ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$)، با فاصله گرفتن شکاف‌ها از دیواره کناری مخزن، راندمان رسوب‌شویی به میزان ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. در مدل‌های سه شکاف متقارن با مجموع بازشدگی ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$)، افزایش تعداد شکاف‌ها نتوانست راندمان رسوب‌شویی را افزایش دهد. در مدل‌های دو شکاف ترکیبی (ترکیب یک شکاف در دیواره جلویی با یک شکاف در دیواره کناری) با مجموع بازشدگی ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$)، راندمان رسوب‌شویی افزایش چشمگیری نشان داد به‌طوری‌که راندمان رسوب‌شویی در این مدل، نسبت به مدل دو شکاف کناری متقارن تا ۵۰ درصد افزایش نشان داد.

واژه‌های کلیدی

آرایش شکاف، تخلیه‌کننده تحتانی، جریان گردابی، رسوب‌زدایی

مقدمه

آب جایگزین و بالا بردن راندمان استفاده از آب، نیاز به احداث مخازن ذخیره برای مدیریت مصرف روز به روز در حال افزایش است (White, 2000). با توجه به محدود بودن منابع آب شیرین، غفلت از این موضوع به خصوص در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مثل ایران که با کمبود شدید آب روبه‌رو است، تهدید جدی برای نسل‌های آتی کشور به‌شمار می‌رود. از طرفی، به دلیل بالا بودن فرسایش خاک در

در دنیا حدود ۴۰۰۰۰ سد مخزنی بزرگ برای اهداف مختلف ساخته شده است. سالانه در حدود نیم تا یک درصد از حجم این مخازن به دلیل رسوب‌گذاری از بهره‌برداری خارج می‌شود و برای جبران همین مقدار حجم از دست رفته مخازن، سالانه به‌طور میانگین ۳۵۰ سد مورد نیاز است. روند فزاینده مصرف آب نشان می‌دهد به رغم وجود منابع

حوضه‌های آبخیز کشور، مسئله رسوبات ورودی به مخزن سد و نحوه مدیریت آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. رسوبات درون مخزن سد، علاوه بر از بین بردن اهداف مورد انتظار از سد، مشکلات دیگری ایجاد می‌کند، مانند بالا آمدن سطح آب و در نتیجه تبخیر بیشتر از مخزن، ورود رسوبات به توربین‌ها و خوردگی پره‌های توربین و غیره (Fang & Cao, 1996). بنابراین، مدیریت پایدار مخازن ایجاب می‌کند که با تخلیه رسوبات انباشته شده در بخش حجم مفید مخزن از طریق روش‌های رسوب‌زدایی مثل لایروبی، رسوب‌شویی، تخلیه جریان غلیظ، سیفونی کردن، ظرفیت جدیدی برای مخزن ایجاد کرده و مخزن را احیا نمود (Breusers et al., 1982).

از میان روش‌های مختلف برای تخلیه رسوبات انباشته شده داخل مخازن، رسوب‌شویی هیدرولیکی یکی از بهترین روش‌هاست (Atkinson, 1996; Fruchard & Camenen, 2012). در روش رسوب‌شویی هیدرولیکی، با باز کردن دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی، از قدرت جریان آب برای تخلیه رسوبات ته‌نشین شده مخزن استفاده می‌شود. رسوب‌شویی هیدرولیکی به دو دسته اصلی رسوب‌شویی تحت فشار و آزاد طبقه‌بندی می‌شود (Fan, 1985). در روش رسوب‌شویی آزاد، آب مخزن سد به صورت کامل تخلیه و ارتفاع آب پایین آورده می‌شود، یعنی رقوم ارتفاعی سطح آب پایین‌تر از رقوم ارتفاعی دریچه قرار می‌گیرد. به عبارتی دیگر، جریان به صورت آزاد و رودخانه‌ای داخل مخزن برقرار می‌شود (Fan, 1985)؛ اما در رسوب‌شویی تحت فشار لازم نیست سطح آب زیاد پایین آورده شود و در مدت رسوب‌شویی سطح آب بالاتر از رقوم دریچه تحتانی است. در این نوع رسوب‌شویی، حرکت عمودی آب باعث ایجاد تنش برشی روی رسوبات

تجمع یافته خواهد شد و به ایجاد فرسایش پس‌رونده^۱ می‌انجامد که از نزدیکی دریچه شروع می‌شود و به سمت بالادست مخزن حرکت می‌کند. در نتیجه این شرایط، توده‌ای از رسوبات از دریچه تحتانی خارج می‌شود و حفره‌ای مخروط شکل تشکیل می‌یابد. با گذشت زمان، این مخروط بزرگ‌تر می‌شود تا به تعادل برسد. باید در نظر داشت که این نوع از رسوب‌شویی به صورت موضعی است و میزان گسترش و راندمان آن بستگی به ارتفاع آب، نوع رسوبات، مقطع دریچه تحتانی یا استفاده از راهکار اجرایی مناسب دارد (Morris & Fan, 2009).

از آنجاکه در رسوب‌شویی تحت فشار تلفات آب پایین‌تر است، محققان همواره به دنبال استفاده از راهکارهای مناسب برای افزایش راندمان این نوع رسوب‌شویی به عنوان راه‌حلی مناسب برای افزایش طول عمر سد بوده‌اند. مطالعات متعدد در زمینه افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار وجود دارد که از میان آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

آلتوس (Althous, 2011) با کمک جت آب با آرایش‌های خطی و دایره‌ای در داخل مخزن، گزارش کرد که آرایش دایره‌ای دارای عملکرد بهتری نسبت به آرایش خطی در افزایش راندمان رسوب‌شویی است. صمدی رحیم (Samadi-Rahim, 2011) تأثیر تعداد و شکل مقطع دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی را بر عملکرد رسوب‌شویی بررسی و گزارش کرد که دریچه‌های مربع شکل در تمام موقعیت‌های نصب، نسبت به دریچه‌های دایره‌ای، راندمان بالاتری دارند. محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2014) با استفاده از مدل فیزیکی، تأثیر سازه نیم‌استوانه شکافدار در جلو دریچه تحتانی را آزمایش کردند و نتیجه گرفتند این سازه ظرفیت رسوب‌شویی را تا ۱۰ برابر نسبت به حالت بدون سازه افزایش می‌دهد. پاول

رسوب شویی را به طور متوسط به میزان یک برابر افزایش می دهد. رسولی و همکاران (Rasouli *et al.*, 2019) با بررسی اثر رسوبات چسبنده و غیرچسبنده بر تشکیل مخروط رسوب شویی گزارش دادند که در رسوبات غیرچسبنده الگوی فرسایش پس رونده است و مخروط رسوب شویی پس از ۹-۱۱ دقیقه به تعادل می رسد. در عملیات رسوب شویی تحت فشار، همیشه تلاش بر این بوده است که ضمن جلوگیری از رها سازی بیشتر آب مخزن، راندمان رسوب شویی مخزن تشدید شود. در تحقیق حاضر، برای تقویت جریان های گردابی اطراف دریچه تحتانی و با هدف افزایش راندمان رسوب شویی تحت فشار، از یک سازه جدید با سهولت اجرایی مناسب به نام اتاقک رسوب استفاده شد. به منظور بررسی کارایی سازه پیشنهادی، آزمایش هایی روی مدل فیزیکی یک مخزن سد به همراه سازه اتاقک رسوب با پارامترهای مورد بررسی شامل عرض شکاف ها، تعداد و آرایش (قرارگیری) شکاف ها در دو تراز مختلف سطح آب مخزن اجرا شد که نتایج آن گزارش می شود.

مواد و روش ها

تحلیل ابعادی

دبی رسوبات تخلیه شده (Q_s) حین عملیات رسوب شویی تحت فشار با کمک اتاقک رسوب، تابعی از ارتفاع آب داخل مخزن (H_w)، شتاب ثقل (g)، وزن مخصوص آب (ρ_s)، قطر متوسط ذرات رسوبی (d_{50})، قطر دریچه تخلیه کننده تحتانی (D)، لزوجت دینامیکی سیال (μ)، وزن مخصوص رسوبات (ρ_s)، عرض اتاقک (B)، طول اتاقک (L) و عرض شکاف یا بازشدگی (b) است (رابطه ۱).

$$f1(Q_s, H_w, g, \rho_w, \mu, d_{50}, D, B, L, b) = 0 \quad (1)$$

و خان (Powell & Khan, 2015) با بررسی مشخصه های جریان و چگونگی انتقال رسوب در اطراف تخلیه کننده تحتانی، شکل گیری جریان های گردابی را در مجاورت دریچه تحتانی گزارش کردند و این گردابه ها را عامل اصلی خروج رسوب دانستند. توفیقی و همکاران (Tofighi *et al.*, 2015) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر توسعه مجرای تخلیه کننده بر ابعاد مخروط رسوب شویی، به این نتیجه رسیدند که توسعه مجرا تأثیری مثبت و محسوس بر ابعاد مخروط رسوب شویی دارد. مددی و همکاران (Madadi *et al.*, 2016) با کار گذاشتن سازه استوانه افقی شیاردار در مقابل دریچه تخلیه رسوب (با مشخصه قطر استوانه به قطر خروجی برابر ۱/۳۲)، راندمان رسوب شویی این سازه را چهار برابر راندمان رسوب شویی نمونه شاهد گزارش دادند.

مهتابی و همکاران (Mahtabi *et al.*, 2018) با بررسی تأثیر تعداد ردیف، نوع آرایش و ارتفاع صفحات مستغرق در رسوب شویی تحت فشار دریافتند که آرایش شعاعی نسبت به آرایش موازی صفحات عملکرد خیلی مناسب تری در رسوب شویی دارد. کریمی و مهتابی (Karimi & Mahtabi, 2018) گزارش کردند که در بهترین حالت آرایش شعاعی، عملکرد رسوب شویی در شرایط هیدرولیکی مختلف، در مقایسه با نمونه شاهد، به طور متوسط ۱۱ برابر است. گزارش همچنین اضافه می کند در این نوع آرایش، با افزایش ارتفاع آب رسوب شویی افزایش پیدا می کند. امیرجانی و همکاران (Amirjani *et al.*, 2019) تأثیر نوع رسوبات چسبنده و غیرچسبنده بر حفره رسوب شویی را با حضور سازه نیم استوانه بررسی کردند و نشان دادند که رسوبات چسبنده فرسایش بیشتری نسبت به رسوبات غیرچسبنده دارند و نیز اینکه استفاده از سازه نیم استوانه حجم

با کاربرد روش π -باکینگهام، رابطه بالا را می‌توان به صورت رابطه ۲ نشان داد:

$$f_2\left(\frac{Q_s}{(D^{2.5}g^{0.5}\rho_w)}, \frac{H_w}{D}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{\mu}{\rho_w D^{1.5}g^{0.5}}, \frac{B}{D}, \frac{L}{D}, \frac{b}{D}\right) = 0 \quad (2)$$

بخشی از ضلع جانبی از پلکسی گلاس ساخته شد. در قسمت ورودی آب، ناحیه‌ای برای آرام و یکنواخت شدن جریان ورودی تعبیه شده است. مخزن ثانویه (رسوب گیر) نیز به شکل مستطیل به طول ۱/۶ متر، عرض ۱/۲ و ارتفاع ۱ متر و از دو قسمت مجزا تشکیل شده است. قسمت اول (رسوب گیر) همان است که خروجی مخزن اصلی روی آن قرار دارد و آب حاوی رسوبات وارد این قسمت می‌شود و پس از آرام شدن جریان و ته نشینی رسوبات، آب از طریق یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه (برای اندازه گیری جریان خروجی دريچه تحتانی) وارد قسمت اصلی مخزن ثانویه می‌شود که وظیفه تأمین آب را بر عهده دارد. علاوه بر این، از یک مخزن کمکی نیز برای تأمین آب در آزمایش‌ها با ترازهای بالا استفاده شد تا از هر گونه اتلاف آب در آزمایش‌های متعدد جلوگیری شود. در این مجموعه، یک پمپ سانتریفیوژ (پمپ اصلی) آب را از مخزن ثانویه می‌گیرد و به داخل مخزن اصلی پمپاژ می‌کند. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق نیز از جنس ماسه بسته شده با قطر متوسط (d_{50}) برابر ۰/۵۱ میلی‌متر است و با توجه به قرارگیری دريچه تحتانی در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از کف مخزن، عمق رسوب ۳۰ سانتی‌متر منطبق بر لبه پایینی دريچه لحاظ شد. شکل ۲ تصویر واقعی مدل آزمایشگاهی مخزن رسوب گیر به همراه اتاقک رسوب نصب شده مقابل دريچه تحتانی را نشان می‌دهد.

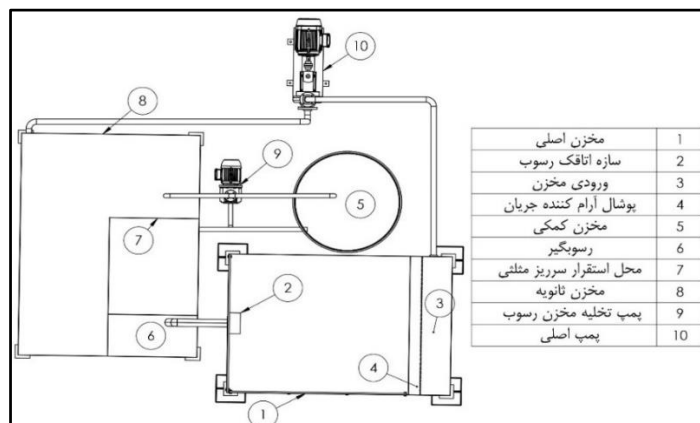
با توجه به ثابت بودن پارامترهای d_{50} ، ρ_w ، ρ_s ، B ، L و D در تمامی آزمایش‌ها، می‌توان از پارامتر بی بعد مربوط صرف نظر کرد. از این رو، رابطه نهایی به صورت رابطه ۳ نمایش داده می‌شود:

$$F = \frac{Q_s}{D^{2.5}g^{0.5}\rho_w} = f_3\left(\frac{H_w}{D}, \frac{b}{D}\right) \quad (3)$$

با توجه به رابطه فوق، میزان بی بعد رسوبات تخلیه شده ($F = \frac{Q_s}{D^{2.5}g^{0.5}\rho_w}$) تابعی از پارامترهای ارتفاع بی بعد آب داخل مخزن (H_w/D) و عرض بی بعد شکاف یا بازشدگی (b/D) است. در این تحقیق، علاوه بر دو متغیر ارتفاع آب مخزن و عرض شکاف، آرایش (موقعیت) و تعداد شکاف‌های اتاقک نیز بررسی شدند.

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان اجرا شد. از یک مدل فیزیکی مخزن رسوب استفاده گردید که دارای چهار قسمت است: سیستم تأمین آب، مخزن اصلی (مدل مخزن سد)، مخزن ثانویه (رسوب گیر) و مخزن کمکی (شکل ۱). مدل مخزن سد به شکل مستطیل به طول ۱/۵ متر، عرض یک متر و ارتفاع ۱/۲ متر است. به منظور پایش بهتر جریان و مخروط رسوب شویی، ضلع روبه رویی و



شکل ۱- پلان مدل آزمایشگاهی به همراه اجزای مختلف آن

Fig. 1- The plan of laboratory model with its various components



شکل ۲- تصویر واقعی مدل آزمایشگاهی مخزن به همراه اتاقک رسوب نصب شده مقابل دریچه تحتانی

Fig. 2- The actual image of the reservoir laboratory model with the sediment chamber mounted in front of the bottom outlet

سازه اتاقک رسوب

در نظر گرفته شد. در این سازه منشوری، سقف اتاقک نیز هم‌تراز لبه بالایی دریچه تحتانی است. دیواره جلویی و کناری اتاقک، شکاف‌های عمودی با عرض بازشدگی (b) و آرایش (قرارگیری) گوناگون تعبیه شده به گونه‌ای که این شکاف‌ها تا سقف اتاقک امتداد دارند. شکاف‌ها در سه حالت تکی، دوتایی و سه‌تایی با بازشدگی مختلف $1/25$ - $7/5$ سانتی‌متر ($0/25$ ، $0/5$ ، 1 و $b/D = 1/5$) بررسی شدند. طرح شماتیک مدل‌های مورد بررسی این سازه در جدول ۱ نشان داده شده است.

سازه اتاقک رسوب درواقع مکعب مستطیلی است که در جلو دریچه تحتانی نصب شده است. مدل اتاقک رسوب با استفاده از ورق آهن ۲ میلی-متری تهیه گردید. این سازه از یک طرف به بدنه سد متصل است و از طرف دیگر تا عمق مخزن امتداد دارد. عرض اتاقک (B) به اندازه دو برابر قطر (D) دریچه تحتانی یعنی ۱۰ سانتی‌متر ($B/D = 2$) و طول آن به‌اندازه سه برابر قطر دریچه تحتانی یعنی ۱۵ سانتی‌متر ($L/D = 3$)

جدول ۱- نام‌گذاری مدل‌های اتاقک رسوب در آرایش (قرارگیری) شکاف‌ها و عرض‌های مختلف

Table 1- Symptoms of sediment chamber models in arrangement of (position) slots and different widths

شماره مدل Model number	شماره ۱ Number 1	شماره ۲ Number 2	شماره ۳ Number 3
نام مدل Name of model			
مدل تک شکاف جلویی A: (2.5 or 5 or 7.5 cm) Single front slot model: A			
مدل دو شکاف جلویی B: (2.5 and 2.5 cm) Two front slots model: B			
مدل دو شکاف کناری C: (2.5 and 2.5 cm) Two side slots model: C			
مدل سه شکاف نوع ۱ D: (1.25 and 2.5 and 1.25 cm) Three slots-type 1 model: D			
مدل دو شکاف ترکیبی E: (2.5 and 2.5 cm) Two combined slots model: E			
مدل سه شکاف نوع ۲ F: (2.5 and 2.5 and 2.5 cm) Three slots-type 2 model: F			
مدل سه شکاف ترکیبی G: (2.5 and 1.25 and 1.25 cm) (2.5 and 2.5 and 2.5 cm) Three combined slots model: G			

مدل‌ها از لحاظ راندمان رسوب‌شویی انتخاب گردید.

اجرای آزمایش

قبل از هر آزمایش، مدل مورد نظر سازه اتاقک رسوب در جلو دریچه تحتانی نصب و سطح رسوبات موجود در مخزن با استفاده از ابزار مناسب منطبق بر لبه پایینی دریچه تراز شد. برای جلوگیری از فرسایش ناشی از ورود آبی به مخزن، در ابتدا شیر آب لوله ورودی به مدل خیلی آرام باز و بعد از مدتی به‌طور کامل باز می‌شد تا اینکه سطح آب به ارتفاع مورد نظر آزمایش برسد. پس از رسیدن آب به ارتفاع لازم، دریچه تحتانی مخزن (با قطر تقریبی ۵ سانتی‌متر، D قطر دریچه) باز و آب حاوی رسوبات وارد مخزن ثانویه می‌شد. آزمایش‌ها در دو ارتفاع ۲۰

در حالت تکی، شکاف در وسط دیواره جلویی با بازشدگی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر (۰/۵، ۱ و ۱/۵ b/D) بررسی گردید (جدول ۱، مدل‌های سری A). در حالت دوتایی، شکاف‌ها با بازشدگی ۲/۵ سانتی‌متر ($b/D = ۱$) در دیواره جلویی و کناری به‌صورت متقارن قرار داده شدند (جدول ۱، مدل‌های سری B و C). در حالت سه‌تایی، دو شکاف با بازشدگی ۱/۲۵ یا ۲/۵ سانتی‌متر (۰/۲۵ و ۰/۵ b/D) در دیواره کناری و یک شکاف با بازشدگی ۲/۵ سانتی‌متر (۰/۵ b/D) در دیواره جلویی تعبیه گردید (جدول ۱، مدل‌های سری D و F). سرانجام با جمع‌بندی نتایج مدل‌های مختلف و بررسی تکمیلی دو مدل ترکیبی (نامتقارن) دوتایی و سه‌تایی (جدول ۱، مدل‌های سری E و G)، بهترین

رسوب‌شویی مخزن را تا ۱۰ برابر نسبت به حالت بدون سازه (مدل شاهد) افزایش دهند. نتایج این بخش با تحقیق محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2014) همخوانی بسیار مناسبی دارد که می‌گویند سازه نیم استوانه درپوش‌دار توانسته است ظرفیت رسوب‌شویی مخزن را تا ۱۰ برابر نسبت به حالت بدون سازه افزایش دهد.

مطابق شکل ۳، در حالت تک شکاف جلویی با کاهش عرض بازشدگی، راندمان رسوب‌شویی افزایش یافته است. با کاهش عرض بازشدگی (افزایش انقباض) سرعت آب ورودی از شکاف افزایش می‌یابد و منجر به تشدید رسوب‌شویی می‌شود. از آنجاکه انقباض زیاد مقطع می‌تواند احتمال انسداد جریان یا افزایش بیش از حد سرعت و تبعات خاص آن را به همراه داشته باشد، مدل A2 با عرض شکاف برابر قطر دریچه تحتانی یعنی ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$)، برای مقایسه با مدل‌های بعدی در نظر گرفته شد. گفتنی است در تحقیقات عبدالله‌پور و حسین‌زاده دلیر (Abdolahpour & Hosseinzadeh-Dalir, 2013) روی سازه نیم‌استوانه شکاف‌دار، عرض بهینه شکاف برابر قطر دریچه تحتانی معرفی شد. مطابق نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، تغییرات راندمان رسوب‌شویی در برابر تغییرات ارتفاع آب (H_w/D) ناچیز است. این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات محمدی و همکاران روی سازه نیم‌استوانه درپوش‌دار همخوانی خوبی دارد. دلیل این مسئله را می‌توان سرپوشیده بودن سازه دانست. سرپوشیده بودن سازه باعث می‌شود که نیروی ناشی از بار آب بالای سازه به‌طور مستقیم به جریان‌های گردابی تشکیل شده در داخل سازه وارد نشود و گردابه‌ها کمتر تحت تأثیر نیروی ناشی از بار آبی قرار بگیرند (Mohammadi *et al.*, 2014).

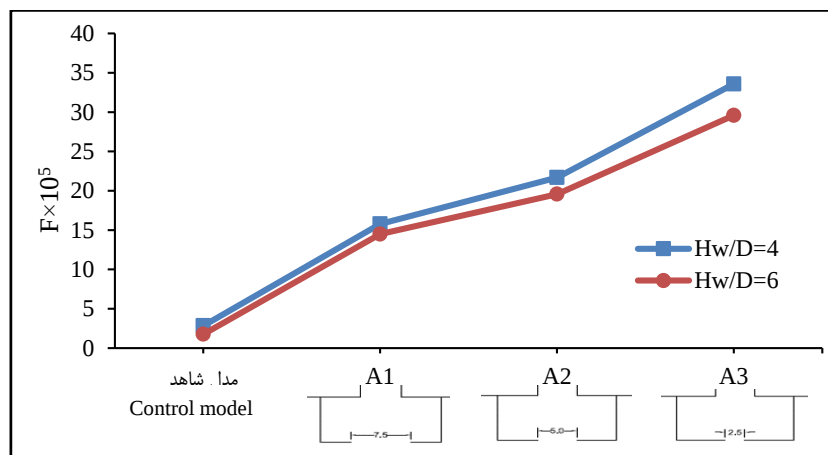
و ۳۰ سانتی‌متر و دبی ثابت ۲ لیتر بر ثانیه اجرا شد. با باز شدن دریچه تخلیه‌کننده تحتانی، رسوبات تحت فشار آب از مخزن خارج می‌شد که در لحظات اولیه هم‌زمان با تشکیل مخروط آب‌شستگی، رسوبات با غلظت خیلی زیاد از تخلیه‌کننده خارج می‌شد اما با گذشت زمان غلظت خروجی کاهش می‌یافت. در خلال آزمایش، گسترش مخروط آب‌شستگی به تدریج کاهش می‌یافت و آزمایش‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که فرسایش تقریباً حذف شود. مدت (زمان) آزمایش‌ها بعد از باز شدن دریچه و خروج رسوبات از آن، حدود یک ساعت بود. در پایان هر آزمایش، دریچه تخلیه‌کننده تحتانی بسته می‌شد و با تخلیه آب قسمت رسوب‌گیر مخزن ثانویه، رسوبات جمع‌آوری و پس از خشک کردن در آون، وزن می‌شدند.

نتایج و بحث

نتایج کارکرد مدل‌های مورد نظر جداگانه و به‌نحوی بررسی شد که حالت بهینه هر سری مدل در کنار مدل‌های بعدی مقایسه و سرانجام بهترین مدل با بیشترین راندمان رسوب‌شویی معرفی شود. تا حد ممکن نیز سعی گردید مدل‌ها با عرض شکاف مساوی با یکدیگر مقایسه شوند (به‌غیر از مدل‌های سری A).

اتاقک با تک شکاف جلویی (مدل‌های A1, A2, A3)

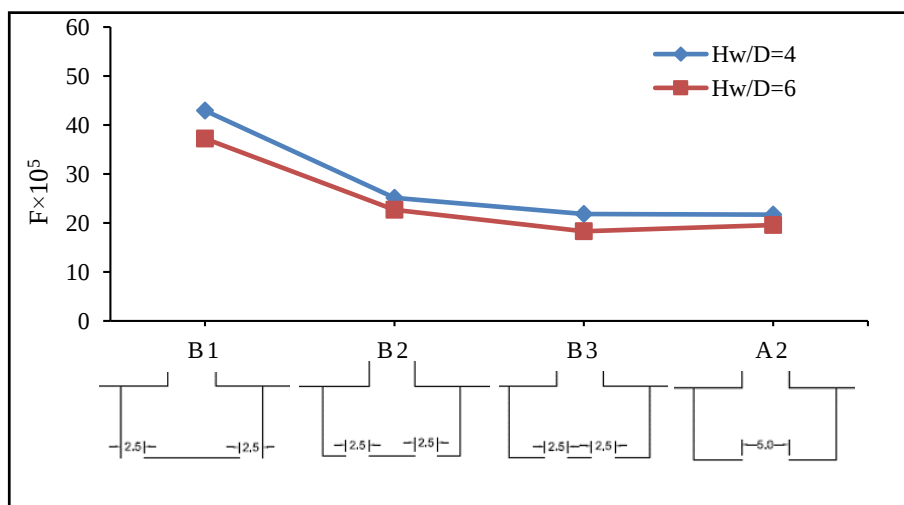
در این حالت فقط یک شکاف با عرض‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر (۰/۵، ۱ و ۱/۵ b/D) در دیواره جلویی اتاقک وجود داشت (مدل‌های A1, A2, A3). نتایج عملکرد رسوب‌شویی این مدل‌ها به همراه مدل شاهد (مدل بدون اتاقک) در شکل ۳ نشان می‌دهد این مدل‌های اتاقک رسوب توانسته‌اند عملکرد



شکل ۳- عملکرد رسوب‌شویی اتاقک رسوب در حالت تک شکاف جلویی با عرض‌های ۷/۵، ۵ و ۲/۵ سانتی‌متر ($b/D=1/5$ و ۱ و ۰/۵)
 Fig. 3- The flushing performance of sediment chamber with mode of single front slot and 2.5, 5 and 7.5 cm openings ($b/D=0.5, 1$ and 1.5)

شکاف ۵ سانتی‌متری (A1) است. با افزایش فاصله شکاف‌ها از هم عملکرد رسوب‌شویی اتاقک افزایش یافته است، به‌طوری‌که مدل دو شکاف جلوی B1 عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد (۱۰۰ درصد افزایش). به نظر می‌رسد با فاصله گرفتن شکاف‌ها، جریان‌های گردابی مستقل و قوی در اطراف شکاف‌ها تشکیل شده و همین امر به افزایش رسوب‌شویی انجامیده است. مشابه مدل‌های قبلی، تغییرات راندمان رسوب‌شویی در برابر تغییرات ارتفاع آب (H_w/D) ناچیز است.

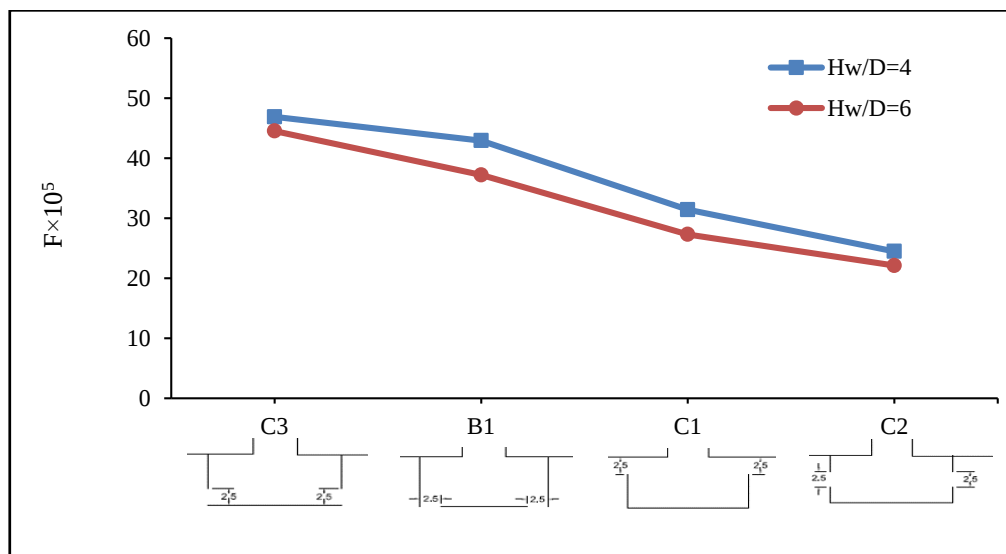
اتاقک با دو شکاف جلویی (مدل‌های B1, B2, B3) در این حالت، دو شکاف در دیواره جلویی اتاقک، هر یک به عرض ۲/۵ سانتی‌متر با آرایش‌های متقارن، قرار داده شده (مدل‌های B1, B2, B3). با توجه به اینکه در این سه مدل مجموع عرض شکاف‌ها برابر ۵ سانتی‌متر ($b/D=1$) است، مدل A1 یعنی تک شکاف جلویی با عرض ۵ سانتی‌متر نیز برای مقایسه در شکل ۴ آورده شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش، عملکرد مدل دو شکاف جلویی متقارن (B3) تقریباً مشابه عملکرد مدل تک



شکل ۴- عملکرد رسوب‌شویی اتاقک رسوب در حالت دو شکاف جلویی (مدل‌های B1, B2, B3) با $b/D=1$
 Fig. 4- The flushing performance of sediment chamber with mode of two front slots (B1, B2, B3 models) and $b/D=1$

بهترین مدل شکل ۴ یعنی مدل B1 برای مقایسه در شکل ۵ نیز ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این شکل نشان می‌دهد که بهترین عملکرد رسوب‌شویی به ترتیب مربوط به مدل C3 و B1 است.

اتاقک رسوب با دو شکاف کناری متقارن (مدل-های C1, C2, C3) در این حالت، دو شکاف متقارن (به صورت روبه-رو)، هر یک در دیواره کناری اتاقک قرار گرفته‌اند و عرض هر یک از آنها ۲/۵ سانتی‌متر است.



شکل ۵- عملکرد رسوب‌شویی اتاقک رسوب در حالت دو شکاف کناری متقارن (مدل‌های C1, C2, C3) با $b/D=1$

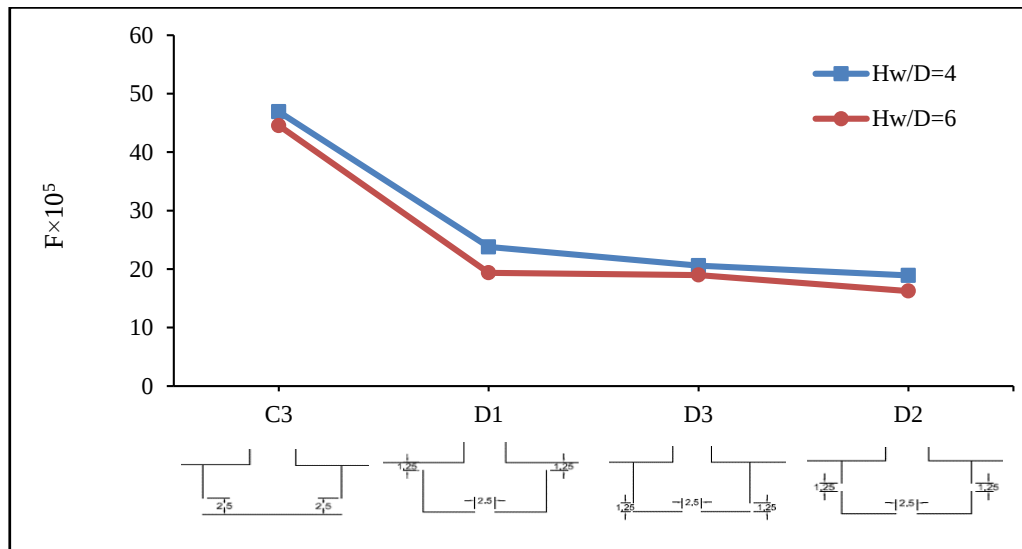
Fig. 5- The flushing performance of sediment chamber with mode of two symmetrical side slots (C1, C2, C3 models) and $b/D=1$

بر اثر دیواره باشد.

اتاقک رسوب با سه شکاف نوع ۱ (مدل‌های D1, D2, D3)

در این حالت، هر مدل سه شکاف دارد. یک شکاف در وسط دیواره جلویی به عرض ۲/۵ سانتی‌متر و دو شکاف متقارن (به صورت روبه‌رو) در دیواره‌های کناری هر یک به عرض ۱/۲۵ سانتی‌متر (مجموع عرض شکاف‌ها برابر ۵ سانتی‌متر، $b/D=1$). موقعیت شکاف جلویی ثابت است و موقعیت شکاف‌های کناری مشابه مدل‌های سری B تغییر داده شد. در شکل ۶، نتایج مدل‌های اتاقک با سه شکاف نوع ۱ (مدل‌های D1, D2, D3) ارائه شده است.

مطابق شکل ۵، آرایش شکاف‌های مدل C3 مانند آرایش شکاف‌های مدل B1 است با این تفاوت که در مدل C3 شکاف‌ها در ابتدای دیواره کناری قرار دارند. مناسب بودن عملکرد مدل با دو شکاف کناری (C3) نسبت به مدل با دو شکاف جلویی (B1) می‌تواند به دلیل جهت جت آب ورودی به اتاقک و نقش آن در تقویت جریان‌های گردابی باشد. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که با نزدیک شدن شکاف‌ها به دریچه تحتانی و دیواره مخزن، عملکرد رسوب‌شویی کاهش پیدا می‌کند (۵۰ درصد کاهش) که این مسئله می‌تواند ناشی از گسترش نیافتن مناسب جریان‌های گردابه‌ای و تضعیف آنها



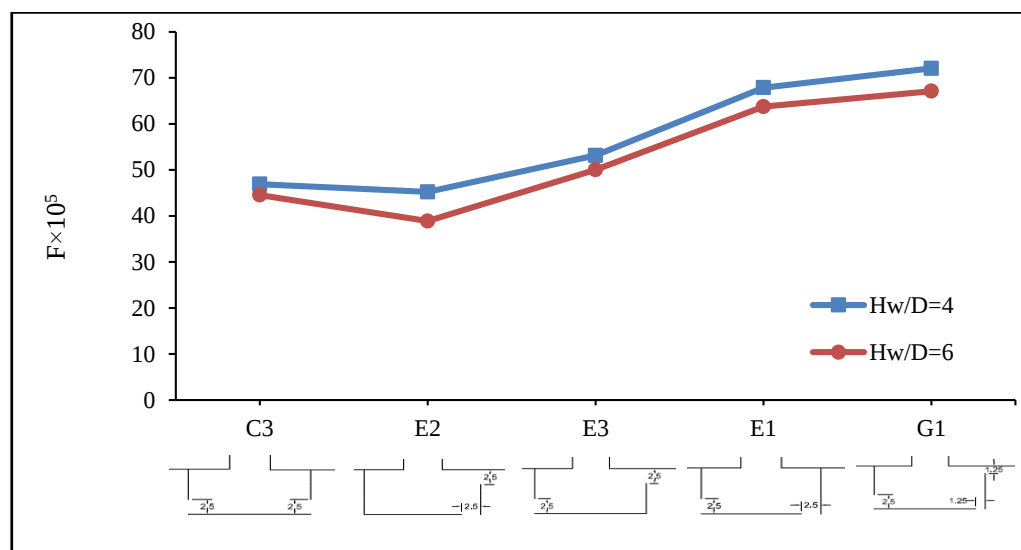
شکل ۶- عملکرد رسوب‌شویی اتاقک رسوب در حالت سه شکاف نوع ۱ (مدل‌های D1, D2, D3) با $b/D = 1$
 Fig. 6- The flushing performance of sediment chamber with mode of three slots-type 1 (D1, D2, D3 models) and $b/D = 1$

به‌صورت ترکیبی در دیواره‌های جلویی و کناری قرار گرفتند (مجموع عرض شکاف‌ها برابر ۵ سانتی‌متر، ۱ حالت (E1, E2, E3) به‌همراه بهترین مدل حالت‌های قبلی یعنی مدل C3 (دو شکاف کناری متقارن) و یک مدل جدید با سه شکاف ترکیبی (G1) با مجموع عرض بازشدگی برابر ۵ سانتی‌متر ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که از بین مدل‌های دو شکاف ترکیبی، مدل E1 راندمان بهتری نسبت به دو مدل دیگر (E2 و E3) دارد. آرایش شکاف‌های این مدل در واقع ترکیب شکاف‌های مدل C3 و B1 است که در سری مربوط به خود، بهترین راندمان را داشتند. به‌نظر می‌رسد در مدل ترکیبی E1 آرایش شکاف‌های ورودی اتاقک باعث هم‌افزایی و تقویت جریان گردابی داخل اتاقک و تشدید رسوب‌شویی شده است. مطابق شکل ۷، مدل ترکیبی E2 عملکردی مشابه با عملکرد مدل C3 دارد اما در مدل ترکیبی E1، عملکرد رسوب‌شویی نسبت به دو مدل E2 و C3 حدود ۵۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

مدل C3 با دو شکاف کناری متقارن به‌عنوان بهترین مدل حالت‌های قبلی، برای مقایسه به شکل ۶ اضافه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده از این شکل، عملکرد رسوب‌شویی اتاقک با سه شکاف نوع ۱ در هر سه آرایش تقریباً یکسان بوده و نسبت به مدل C3 (دو شکاف کناری متقارن) عملکرد خیلی ضعیف‌تری دارد که نشان می‌دهد با وجود ثابت بودن مجموع عرض همه شکاف‌ها، افزایش تعداد شکاف (از طریق کاهش عرض شکاف‌های کناری) کمکی به افزایش راندمان رسوب‌شویی نمی‌کند. دلیل این مسئله می‌تواند ناشی از تداخل جریان‌های ورودی شکاف‌های کناری با جریان ورودی شکاف جلویی باشد که منجر به تضعیف جریان‌های گردابی شده است. در این سری مدل‌ها نیز تغییرات راندمان رسوب‌شویی در برابر تغییرات ارتفاع آب (H_w/D) ناچیز است.

اتاقک رسوب با دو شکاف ترکیبی (مدل‌های E1, E2, E3)

در این حالت، دو شکاف به عرض ۲/۵ سانتی‌متر

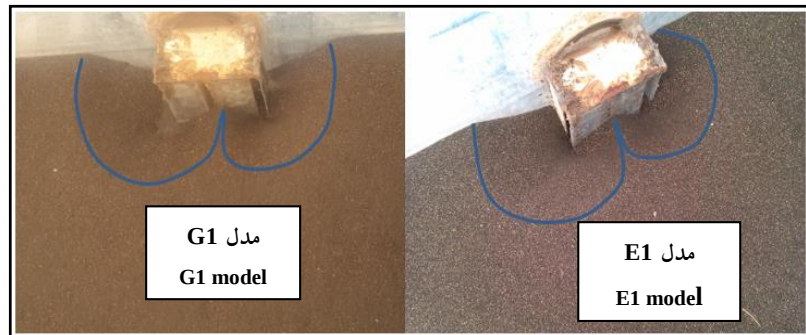


شکل ۷- عملکرد رسوب شویی اتاقک رسوب در حالت دو شکاف ترکیبی (مدل های E1, E2, E3) با $b/D=1$

Fig. 7- The flushing performance of sediment chamber with mode of two combined slots (E1, E2, E3 models) and $b/D=1$

رسوب شویی را به طور متوسط ۱۱ برابر نمونه شاهد افزایش می دهد. مددی و همکاران (Madadi et al., 2016) نیز راندمان رسوب شویی سازه استوانه افقی شیاردار را ۴ برابر راندمان رسوب شویی نمونه شاهد گزارش داده اند. مقایسه عملکرد رسوب شویی سازه پیشنهادی اتاقک رسوب با سازه های به کار رفته در مطالعات محققان نشان می دهد اتاقک رسوب ضمن داشتن سهولت و قابلیت اجرایی بیشتر، توانایی موثری در افزایش راندمان رسوب شویی مخزن دارد. در جمع بندی کلی نتایج این تحقیق می توان گفت که مدل دو شکاف ترکیبی E1 در بین تمامی مدل ها (با مجموع بازشدگی شکاف برابر یعنی $b/D=1$)، بهترین عملکرد را دارد و بیشترین مقدار رسوب تخلیه شده را به دست می دهد.

مقایسه عملکرد مدل دو شکاف ترکیبی E1 با مدل سه شکاف ترکیبی (G1, شکل های ۷ و ۸) (با مجموع بازشدگی شکاف برابر) نشان می دهد که تفاوت محسوسی در عملکرد رسوب شویی این دو مدل مشاهده نمی شود. از طرفی، نتایج بررسی ها نشان می دهد که مدل دو شکاف ترکیبی E1 ظرفیت رسوب شویی مخزن را بیش از ۲۱ برابر نسبت به حالت بدون سازه افزایش داده است. عبدالله پور و حسین زاده دلیر (Abdollahpour & Hosseinzadeh-Dalir, 2013) با بررسی عملکرد سازه نیم استوانه شکاف دار می گویند نصب این سازه توانسته است عملکرد رسوب شویی را به میزان ۳۰ برابر حالت مدل شاهد افزایش دهد. کریمی و مهتابی (Karimi & Mahtabi, 2018) نیز گزارش کرده اند بهترین حالت نصب آرایش شعاعی صفحات مستغرق، عملکرد



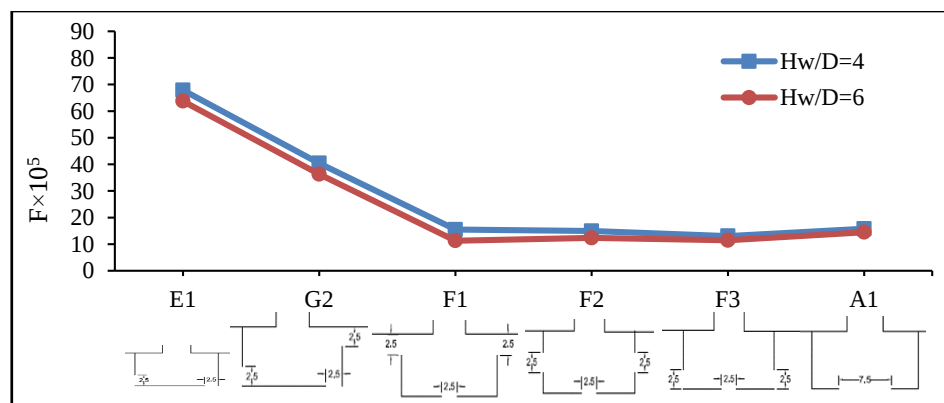
شکل ۸- حفرة آب شستگی ایجاد شده با مدل دو شکاف ترکیبی E1 و مدل سه شکاف ترکیبی G1 (با مجموع بازشدگی یکسان)

Fig. 8- The scour hole created by the two combined slots E1 and three combined slots G1 models (with the same total opening)

شکل ۹ نشان می‌دهد عملکرد مدل اتاقک با سه شکاف نوع ۲ در هر سه حالت تقریباً ثابت است و تفاوت چندانی با مدل تک شکاف جلویی با عرض ۷/۵ سانتی‌متر (A1) ندارد؛ اما مدل سه شکاف ترکیبی G2 راندمان بسیار بهتری نسبت به مدل‌های سه شکاف نوع ۲ دارد و راندمان رسوب‌شویی را تقریباً ۳ برابر افزایش داده است. از طرفی، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل دو شکاف ترکیبی E1 (۱) و مدل سه شکاف G2 ($b/D = 1/5$) نشان می‌دهد که عملکرد رسوب‌شویی مدل E1 تقریباً دو برابر عملکرد رسوب‌شویی مدل G2 است.

اتاقک رسوب با سه شکاف نوع ۲ (مدل‌های F1, F2, F3)

در بخش تکمیلی، مدل‌های اتاقک با سه شکاف نوع ۲ (مشابه مدل‌های سری D) و با مجموع بازشدگی ۷/۵ سانتی‌متر ($b/D = 1/5$) بررسی شدند. این مدل‌ها از سه شکاف به عرض ۲/۵ سانتی‌متر تشکیل شده‌اند که یک شکاف در وسط دیواره جلویی و دو شکاف در دیواره‌های کناری قرار دارند. در کنار این مدل‌ها، یک مدل سه شکاف ترکیبی (G2) که از سه شکاف ۲/۵ سانتی‌متر نامتقارن تشکیل شده نیز بررسی گردید (مشابه مدل G1).



شکل ۹- عملکرد رسوب‌شویی اتاقک رسوب در حالت سه شکاف نوع ۲ (مدل‌های F1, F2, F3) با $b/D = 1/5$

Fig. 9- The flushing performance of sediment chamber with mode of three slots-type 2 (F1, F2, F3 models) and $b/D = 1.5$

رسوب شویی اتاقک افزایش می یابد، به طوری که عملکرد مدل دو شکاف جلویی B1 نسبت به دو مدل دیگر (B2, B3) ۱۰۰ درصد افزایش داشته است.

- بهترین عملکرد رسوب شویی مربوط به مدل C3 (افزایش ۵۰ درصد نسبت به دو مدل دیگر) است. بهتر بودن عملکرد مدل C3 نسبت به مدل B1 نشان می دهد قرارگیری شکاف ها در ابتدای دیواره کناری تأثیر بیشتری در راندمان رسوب شویی دارد.

- عملکرد رسوب شویی این مدل اتاقک در هر سه آرایش تقریباً یکسان است و نسبت به مدل C3 عملکرد خیلی ضعیفی دارد.

- مدل E1 راندمان بهتری نسبت به دو مدل دیگر (E2 و E3) دارد، به طوری که عملکرد رسوب شویی این مدل نسبت به مدل E2 حدود ۵۰ درصد افزایش نشان می دهد.

- عملکرد مدل مورد بحث در این پژوهش در هر سه حالت تقریباً ثابت است و مشابه با عملکرد مدل تک شکاف جلویی با عرض ۷/۵ سانتی متر (A1) می باشد.

- در مجموع می توان گفت که نصب اتاقک رسوب با شکاف هایی با مجموع بازشدگی برابر قطر دریچه تحتانی ($b/D=1$) و با آرایش نامتقارن (طرح مدل E1) دارای بهترین عملکرد در تشدید رسوب شویی است و می تواند ظرفیت رسوب شویی مخزن را بیش از ۲۱ برابر نسبت به حالت بدون سازه افزایش دهد.

در مجموع می توان گفت که اجرای شکاف هایی با مجموع بازشدگی برابر قطر دریچه تحتانی و با آرایش نامتقارن (طرح مدل E1) بهترین عملکرد را در تشدید رسوب شویی دارد. در این مدل، به نظر می رسد قرارگیری بازشدگی ها به گونه ای است که جهت جت های آب ورودی به داخل اتاقک رسوب همسو با یکدیگر است و جریان گردابه ای تشکیل شده در داخل اتاقک را تقویت و در نتیجه رسوب شویی را تشدید کرده است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر نصب سازه منشوری اتاقک رسوب در جلو تخلیه کننده تحتانی بر افزایش راندمان رسوب شویی تحت فشار مخزن سد بررسی شد. برای این منظور، آزمایش هایی روی یک مدل فیزیکی مخزن به همراه سازه اتاقک رسوب با پارامترهای مورد نظر شامل عرض شکاف ها، تعداد و آرایش (قرارگیری) شکاف ها در دو تراز مختلف سطح آب مخزن اجرا و نتایج آن به شرح زیر جمع بندی شد:

- با کاهش عرض بازشدگی، راندمان رسوب شویی افزایش می یابد، به طوری که مدل A3 (با عرض شکاف برابر ۲/۵ سانتی متر) راندمان رسوب شویی مخزن را ۱۰ برابر نسبت به حالت بدون سازه (مدل شاهد) افزایش داده است.

- با افزایش فاصله شکاف ها از هم عملکرد

مراجع

- Abdolahpour, M., & Hosseinzadeh-Dalir, A. (2013). Effect of semi-cylinder structure position on pressurized flushing efficiency of reservoirs. *Journal of Water and Soil Science*, 23 (2), 269-282. (in Persian)
- Amirjani, R., Kamanbedast, A., Heydarnejad, M., Bordbar A., & Masjedi, A. (2019). Investigation of the effect of the kind of sediments and the change in the bottom outlet form

- using a semi-cylinder structure on the score cone by a physical model. *Journal of Water and Soil Science*, 22 (4), 85-97. (in Persian)
- Althous, J. (2011). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow (Ph. D. Thesis) Ecole polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland.
- Atkinson, E. (1996). Flushing sediment from reservoirs: RESFLUSH user manual. *Report OD/ITM 54*. HR Wallingford. UK.
- Breusers, H. N. C., Klaassen, G. J., Brakel, J., & Roode, F. C. (1982). Environmental impact and control of reservoir sedimentation. *Fourteenth International Congress on Large Dams. Transactions*. 3-7 May. Rio de Janeiro. Brazil. 3, 353-372.
- Fan, J. (1985). *Methods of Preserving Reservoir Capacity*. In: Bruk, S. (editor) *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*, UNESCO, Paris.
- Fang, D., & Cao, S. (1996). An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir. *The 6th Federal Interagency Sedimentation Conference*. Las Vegas.
- Fruchard, F., & 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*.
- Karimi, S., & Mahtabi, G. (2018). Effect of radial arrangement of submerged vanes in increasing the flushing efficiency of dam reservoir. *J. Water Soil Sci*. 28 (1):43-56. (in Persian)
- Madadi, M.R., Rahimpour, M., & Qaderi, K. (2016). Improving the reservoir's pressurized flushing efficiency by connecting PBC structure to the dam bottom outlet. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. 17(66): 71-86. (in Persian)
- Mahtabi, G., Karimi, S., & mohamadiuon, M. (2018). Effect of the number of rows, height and arrangement of submerged vanes in flushing of dam reservoir. *Water and Soil Conservation*. 25(1): 285-296. (in Persian)
- Mohammadi, M. N., Salmasi, F., Hosseinzadeh-Dalir, A., & Arvanaghi, H. (2014). Experimental investigation of the effect of semi-circular structure on the capacity of pressurized flushing of sediments from the reservoirs. *Journal of Water and Soil Science*, 24 (2), 21-30. (in Persian)
- Morris, G. L., & Fan, J. (2009). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watershed for Sustainable Use*. McGraw Hill. New York.
- Powell, D. N., & Khan, A. (2015). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 267-283.
- Rasouli, A. A., Bordbar, A., Kamanbedast, A. A., Masjedi, A., & Heidarnajad M. (2019). Effect of sediments type on scour cone in pressure flushing. *Iranian Journal of Watershed Management Sci. Eng*. 13 (44), 83-89. (in Persian)
- 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 dams (M. Sc. Thesis) Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Persian)
- Tofighi, S., Samani, J. M. V., & Ayyubzadeh, S. A. (2015). Pressure flushing with expanding bottom outlet channel within dam reservoir. *Modares Civil Engineering Journal*, 15 (2), 127-206. (in Persian)
- White, R. (2000). *Flushing of Sediments from Reservoirs*. ICOLD. World Register of Large Dams. HR Wallingford. UK.

Enhancement the Pressurized Flushing Efficiency of Dam Reservoir Using Sediment Chamber Structure

G. Mahtabi* and S. Mozafari

*Corresponding author: assistant Professor, Water engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Email: ghmahtabi@gmail.com

Received: 20 October 2019, Accepted: 20 January 2020

Extended Abstract

Introduction

In the recent decades, Dams construction have been developed due to increasing of population and growing need for water. However, sediment deposition inside the reservoirs has always caused to reduce the efficiency and the life time of the reservoirs. Several methods by which the life enhancement of storage reservoir can be made are: watershed management, dredging, flushing of sediments from reservoir, sediment routing/sluicing, sediment bypassing and density current venting; these methods are used independently or in combination (Breusers *et al.*, 1982). Sediment flushing is a technique whereby previously accumulated and deposited sediments in a reservoir were hydraulically eroded and removed by accelerated flows generated by opening the bottom outlets of the dam. Flushing sediments through a reservoir has been used for a long time and has been practiced successfully and found to be inexpensive in many cases (Atkinson, 1996; Fruchard & Camenen, 2012). However, the engineers are generally interested in implementing the applicable measures for increasing the sediment removal from these reservoirs which encounters the excess deposition problems. In this study, by installing a prismatic structure named "sediment chamber" in front of the bottom outlet, the effects of this structure on increasing the pressurized flushing efficiency were investigated.

Methodology

The experimental setup consisted of an elevated rectangular tank for the reservoir (1.5 * 1 * 1.2m) and for the sump. The reservoir was 1.5m long, 1 m wide, and 1.2m deep. The diameter of circular orifice of reservoir outlet was $D=5$ cm. The bottom outlet center was 30 cm above the reservoir floor. The reservoir drained into the sump through the orifice and the flow was re-circulated from there. The space between the bottom outlet invert and the reservoir bed was filled with sediment. Non-cohesive sediment (sand with median size 0.51 mm) was used. A prismatic structure named the "sediment chamber" in front of the bottom outlet was used to increase the pressurized flushing efficiency. In front and side walls of this structure, vertical slots with different opening width (b), number and arrangement (position) were considered. Slits were selected in three modes of single, binary and triple with 1.25-7.5 cm openings ($b/D=0.25, 0.5, 1, 1.5$ and $D=$ the outlet diameter). The tests were conducted under two constant head of 20 and 30 cm above the bottom outlet. The tests were run until the bed topography reached equilibrium state, involving negligible sediment motion

within the scour hole. The test duration lasted 1 hour. At the end of each test, the transported sediments were collected and weighed after drying in the oven.

Results and Discussion

Experimental results showed that in models with two front slot and a total opening of 5 cm ($b/D=1$), the flushing efficiency showed a 100% increase with increasing of slot distance. Also in models with two symmetrical side slots and a total opening of 5 cm ($b/D=1$), with going away the slots from the side wall of the sediment tank, the flushing efficiency increased by 50%. In the models with three symmetric slots and a total opening of 5 cm ($b/D=1$), increasing the number of slots could not increase the flushing efficiency. In the models with two combined slots (a slot in the front wall with a slot in the side wall) with a total openings of 5 cm ($b/D=1$), the flushing efficiency showed a significant increase, so that the flushing efficiency of this model showed a 50% increase with respect to the models with two symmetrical side slots.

Conclusions

In this study, the effects of a prismatic structure, sediment chamber, in front of the bottom outlet on increasing the pressurized flushing efficiency was investigated. The results showed that the model with two combined slots (combination of a slot in the front wall and a slot in the side wall) with a total openings of 5 cm ($b/D=1$) had the best performance of sediment flushing and increased the flushing efficiency more than 21 times, compared to the control model.

Keywords: Bottom Outlet, Flushing, Slot Arrangement, Vortex Flow