

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با اتصال سازه PBC به دریچه تخلیه رسوب

محمد رضا مددی، مجید رحیم‌پور* و کورش قادری**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. تلفن: ۰۳۴۱)۳۲۲۰۰۴۱،

پیام‌نگار: rahimpour@uk.ac.ir

** به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ دانشیار؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۳

چکیده

رسوب‌گذاری مخازن سدها همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در استفاده پایدار از این سازه‌ها و عامل اصلی از دست رفتن حجم ذخیره آنها مطرح بوده است. یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های مهندسی برای حفظ ظرفیت ذخیره مخازن، تخلیه دوره‌ای رسوب با رسوب‌شویی تحت فشار است. مرور منابع علمی مختلف نشان می‌دهد که در حال حاضر راندمان رسوب‌شویی تحت فشار بسیار پایین است. در این مقاله تأثیر استفاده از سازه نوع PBC بر راندمان تخلیه رسوب در حین رسوب‌شویی تحت فشار به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. در این راستا از سازه PBC با چهار قطر و چهار طول نسبی مختلف در مخزن سد استفاده شد. مصالح ماسه‌ای غیرچسبنده با اندازه متوسط ۳/۶ میلی‌متر به‌عنوان رسوب بستر مخزن در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با کاربرد سازه PBC با مشخصه $L_{PBC}/D_{outlet} = 5/26$ و $D_{PBC}/D_{outlet} = 1/32$ راندمان رسوب‌شویی در مقایسه با شاهد $4/57$ برابر شده است. با افزایش طول نسبی سازه، طول و عرض ماکزیمم نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به شاهد افزایش یافت ولی تغییرات عمق ماکزیمم نسبی ناچیز بود. همچنین، کلیه پارامترهای هندسی مخروط رسوب‌شویی در قطر بی‌بعد $D_{PBC}/D_{outlet} = 1/32$ حداکثر مقدار خود را داشتند.

واژه‌های کلیدی

راندمان رسوب‌شویی، رسوب‌شویی مخازن، سازه PBC، مخروط آبشستگی

مقدمه

(Chen *et al.*, 2010; Althaus, 2011; Zhang *et al.*,

2011). یکی از رایج‌ترین روش‌ها، تخلیه هیدرولیکی رسوبات با رسوب‌شویی است که در آن از قدرت جریان آب برای تخلیه مواد ته‌نشین شده در مخزن سد استفاده می‌شود. این روش به‌علت مزایای بیشتر و محدودیت‌های کمتر، اغلب مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. آتکینسون (Atkinson, 1996) رسوب‌شویی را بهترین روش بازبایی حجم ذخیره مخزن برمی‌شمرد. فروچارت و کامنن (Fruchart & Camenen, 2012) رسوب‌شویی را برای نگه‌داشتن مخزن در بهترین وضعیت بهره‌برداری ضروری می‌دانند. رسوب‌شویی می‌تواند به دو صورت باشد:

یکی از مشکلات جدی در استفاده پایدار از سدها، ته‌نشینی مواد رسوبی در مخزن آنهاست که می‌تواند پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم زیادی در بالادست، پایین‌دست و محل سد داشته باشد. کاهش حجم ذخیره مفید، کاهش توانایی سد در تولید برق در سدهای برق‌بلی، مسدود شدن دریچه‌ها و آبگیرها، و تخریب سازه‌های تخلیه و ماشین‌های هیدرولیکی از مهم‌ترین پیامدهای ته‌نشینی و تجمع رسوب در مخازن است. تاکنون راهکارهای مختلفی برای جلوگیری از تجمع رسوب در مخازن سدها پیشنهاد شده است

آب و عرض کانال رسوب‌شویی بستگی دارد. پاول و خان (Powell & Khan, 2012, 2015) مشخصه‌های جریان و چگونگی انتقال رسوب را در بالادست دریچه‌های تخلیه دایره‌ای بررسی کردند و شکل‌گیری گردابه‌ها را در مجاورت این دریچه‌ها گزارش دادند و اظهار داشتند این گردابه‌ها عامل اصلی خروج رسوب از مخزن هستند. امام‌قلی‌زاده و همکاران (Emamgholizadeh *et al.*, 2006, 2007) و فتحی‌مقدم و همکاران (Fathi-Moghadam *et al.*, 2010) با بررسی آزمایشگاهی رسوب‌شویی تحت فشار در سدهای مخزنی، روابط بدون بعدی را برای تخمین حجم مخروط رسوب‌شویی ارائه دادند و نتیجه گرفتند که ابعاد مخروط رسوب‌شویی با عمق آب داخل مخزن و اندازه نهشته در مخزن نسبت عکس و با دبی خروجی از تخلیه‌کننده نسبت مستقیم دارد.

مشکاتی و همکاران (Meshkati *et al.*, 2009) تأثیر ابعاد دریچه تحتانی را بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی در رسوب‌شویی تحت فشار به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. صمدی‌رحیم (Samadi-Rahim, 2011) تأثیر تعداد و شکل مقطع دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی را بر ابعاد حفره و عملکرد رسوب‌شویی تحت فشار بررسی کرد. شهیرنیا و همکاران (Shahirnia *et al.*, 2014) با بررسی تأثیر رقوم رسوب مخزن بر راندمان رسوب‌زدایی تحت فشار نشان دادند که سرعت گسترش ابعاد مخروط رسوب‌شویی با تراز رسوب تجمع یافته در مخزن رابطه مستقیم دارد.

توفیقی و همکاران (Tofighi *et al.*, 2015) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده در مخزن بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی، می‌گویند توسعه مجرا تأثیری مثبت و محسوس بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی دارد. عبدالله‌پور (Abdollahpour, 2012)، جلیلی و حسین‌زاده دلیر (Jalili & Hosseinzadeh-Dalir, 2014) و محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2014) به‌منظور گسترش جریان‌های گردابی اطراف دریچه تحتانی سدها از سازه

آزاد (پایین آوردن کامل سطح آب مخزن) و تحت فشار (پایین آوردن جزئی سطح آب مخزن). در رسوب‌شویی تحت فشار، رقوم سطح آب در مخزن در اثنای عملیات بالا نگه‌داشته می‌شود و آب به‌صورت تحت فشار از طریق دریچه‌های تحتانی خارج می‌گردد. در این حالت، رسوب‌شویی محدود به ناحیه‌ای کوچک در اطراف دریچه تخلیه می‌شود و در ازای خروج مقدار زیادی آب، راندمان تخلیه رسوب بسیار کم است. به‌همین دلیل رسوب‌شویی تحت فشار در تعداد زیادی از سدهای جهان نتایج مطلوبی به‌همراه نداشته است (Chaudhry & Rehman, 2012).

در خصوص مکانیزم رسوب‌شویی و پارامترهای مؤثر بر آن، مطالعات عددی و آزمایشگاهی خوبی توسط محققان صورت گرفته است. لای (Lai, 1994) با بررسی عددی و آزمایشگاهی رسوب‌شویی آزاد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی خود و اطلاعات مربوط به ده مخزن در کشور چین، روابطی برای تخمین مشخصات مخروط رسوب‌شویی ارائه داد. خسرونژاد و همکاران (Khosronejad *et al.*, 2008)، یک مدل عددی سه‌بعدی را برای پیش‌بینی مشخصه‌های جریان و تغییرات بستر رسوبی در حین رسوب‌شویی ارائه دادند. نتایج مدل ارائه شده این محققان با داده‌های مشاهداتی تطابق خوبی داشت. بوئریو و همکاران (Boeriu *et al.*, 2011) با استفاده از نرم‌افزار Delft3D به مدلسازی ریاضی تأثیر رسوب‌شویی بر توپوگرافی بستر مخزن سدی در سریلانکا پرداختند. آن و همکاران (Ahn *et al.*, 2013) مدل کامپیوتری GSTARS4 را برای مدلسازی فرایندهای فرسایشی حین رسوب‌شویی در یک مخزن در کشور آمریکا به‌کار بردند.

هان و اولسن (Haun & Olsen, 2012) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، توانایی مدل عددی SSIM2 را در شبیه‌سازی سه‌بعدی رسوب‌شویی ارزیابی کردند و نتایج آن را قابل قبول گزارش دادند. طالب‌بیدختی و نقشینه (Talebbeydokhti & Naghshineh, 2004) با آزمایش روی مدل فیزیکی نشان دادند که شدت تخلیه رسوب حین رسوب‌شویی به میزان جریان خروجی، گردابیان سطح

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...

اجرا شد. بدین منظور یک مخزن مکعب مستطیل به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲/۵، ۱/۳ و ۱/۲ متر ساخته شد. قسمتی از ضلع روبه‌روی و بخشی از ضلع جانبی مخزن از جنس شیشه ساخته شد تا وضعیت جریان و توسعه مخروط رسوب‌شویی در حین آزمایش به‌خوبی مشاهده و فیلمبرداری شود. سایر قسمت‌های مخزن از جنس ورقه‌های گالوانیزه فولادی ساخته شد. سیستم تأمین آب که طرح شماتیک و تصویر آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده شامل مخزنی زیرزمینی است که آب آن با یک پمپ گریز از مرکز و از طریق لوله‌ای به قطر ۷۵ میلی‌متر به مدل مخزن پمپاژ می‌شود؛ پس از پر شدن مخزن، آب از دریچه تخلیه (به قطر ۹/۵ سانتی‌متر) خارج و پس از عبور از حوضچه‌های آرامش مجدداً به سمت مخزن زیرزمینی هدایت می‌شود. انتهای حوضچه آرامش با پرده رسوب‌گیر از جنس الیاف کشسان مجهز شده است تا رسوب خروجی از مخزن در آنها تله‌اندازی گردد. وزن رسوب خارج شده، پس از خشک شدن در آون، به‌دست می‌آید.

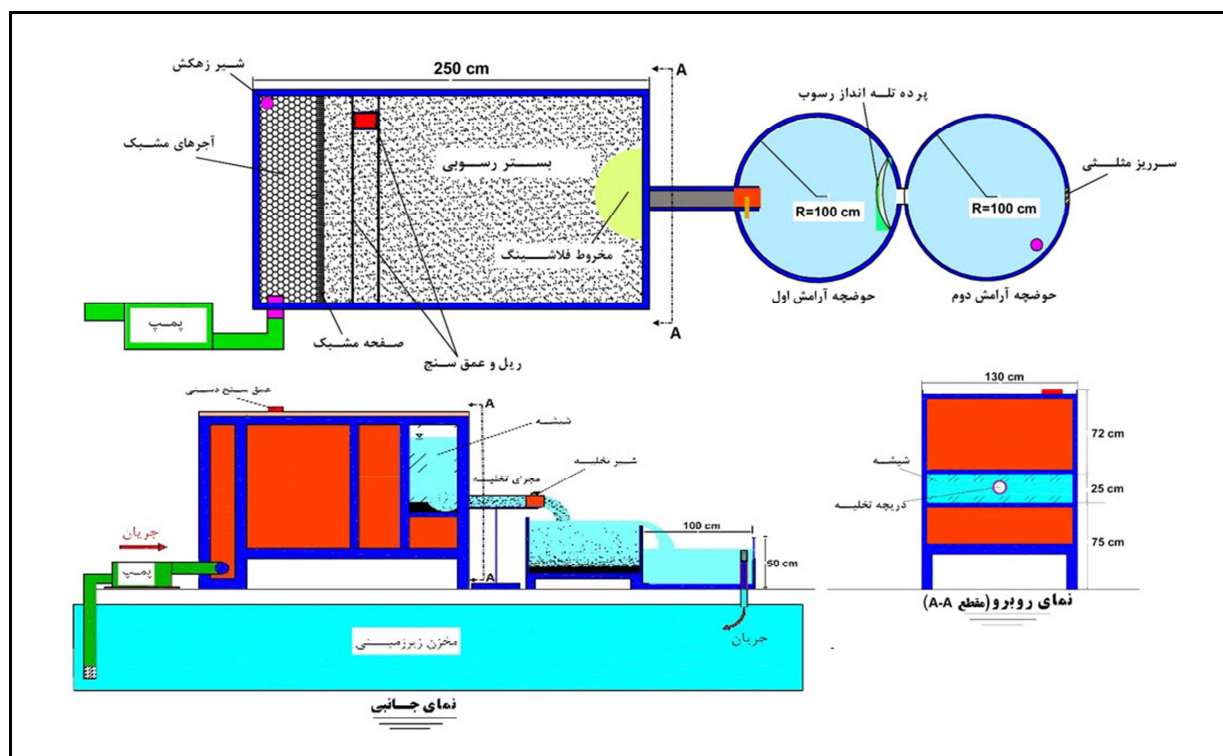
نیمه استوانه‌ای قائم شکاف‌دار استفاده و تأثیر مثبت این سازه را در تخلیه رسوب گزارش کردند.

در پژوهش حاضر، با هدف افزایش راندمان تخلیه رسوب در رسوب‌شویی تحت فشار و در اقدامی نوآورانه سازه PBC^۱ به لبه بالادست دریچه تحتانی سد متصل شد تا جریان تحت فشار آب، پیش از خروج از دریچه، مجبور به عبور از فضای محدود داخل سازه گردد و بدین ترتیب با تقویت قدرت فرسایشی جریان، رسوبات بیشتری از مخزن شسته و تخلیه شود. این سازه به‌علت هندسه خاص خود باعث می‌شود محور گردابه‌هایی که در مجاورت دریچه تخلیه شکل می‌گیرد به‌صورت افقی درآید و ضمن تقویت قدرت این گردابه‌ها، موجب وسیع‌تر شدن ابعاد تخلیه رسوب خواهد شد.

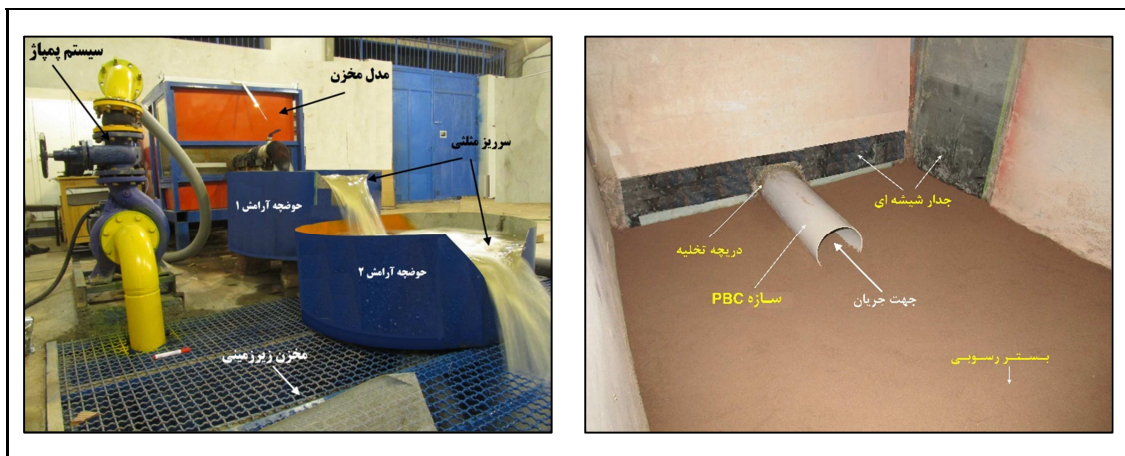
مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان



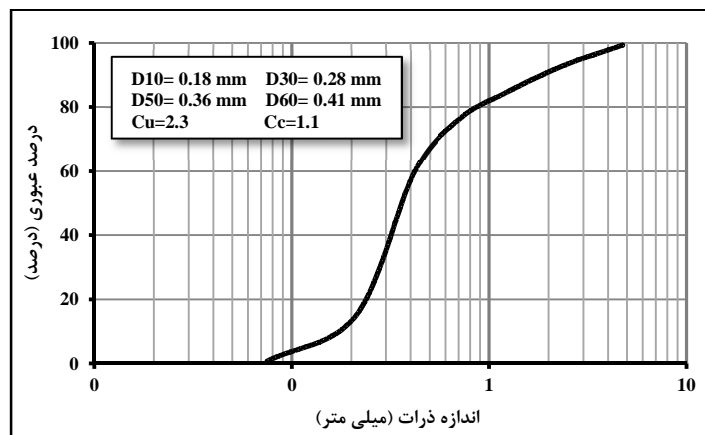
شکل ۱- شماتیک از مدل ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقات مهندسی آب و سازه‌های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان



شکل ۲- امکانات آزمایشگاهی به کار رفته در پژوهش حاضر

عنوان ماده ته‌نشین شده در مخزن در نظر گرفته شد که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود. ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب انحنا (C_c) برای ماده رسوبی مورد استفاده به ترتیب ۲/۳ و ۱/۱ محاسبه شد.

به‌منظور از بین بردن تلاطم جت جریان ورودی به مخزن و کاهش قدرت فرسایشی آن، در ۴۵ سانتی‌متر ابتدایی مخزن از آجرهای مشبک و دیواره عمودی به‌عنوان آرام‌کننده جریان استفاده شد. مصالح ماسه‌ای با اندازه متوسط ۰/۳۶ میلی‌متر و انحراف هندسی ۲/۲۴ به



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات به کار رفته

گردید. جریان ورودی به مخزن با یک شیر فلکه قابل تنظیم بود. برای اندازه‌گیری جریان خروجی، یک سرریز مثلثی با زاویه رأس نود درجه به کار گرفته شد که در انتهای حوضچه رسوب‌گیر دوم تعبیه شده بود. ضمن آنکه برای افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها، از روش حجمی اندازه‌گیری جریان استفاده شد.

عمق رسوب در مخزن ۴۰ سانتی‌متر - منطبق بر لبه پایینی دریچه تخلیه - لحاظ گردید. برای اندازه‌گیری سطح آب و برداشت توپوگرافی مخروط آبشستگی، از یک عمق سنج دستی با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. تغییرات زمانی ابعاد مخروط رسوب‌شویی با دوربین عکاسی پیشرفته Canon Powershot SX 160 IS ثبت

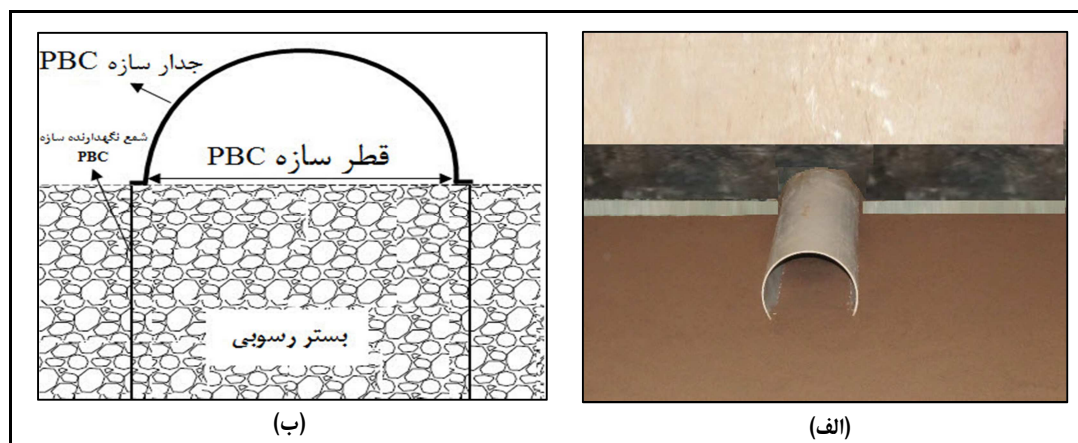
افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...

سازه PBC

نخست اینکه نیروی وزن آبی که به صورت عمودی بر سازه وارد می‌شود از طریق قوس سازه مستقیماً به ستون‌هایی وارد خواهد شد که روی آن قرار دارد و از آن طریق به بستر مخزن منتقل و از تمرکز تنش بر محور مرکزی سازه جلوگیری می‌شود (مشابه با آنچه در سدهای قوسی اتفاق می‌افتد). بدین ترتیب احتمال شکست یا ناپایداری سازه در مقابل نیروی هیدرواستاتیک آب از بین می‌رود. دوم اینکه مواد رسوبی ریزدانه‌ای که در مخزن معلق‌اند، قابلیت تجمع یافتن روی سازه را ندارند زیرا قوسی بودن سازه باعث سُرخوردن این مواد از روی آن و ته‌نشین شدن در مخزن می‌شود. در پژوهش حاضر مدل سازه PBC با استفاده از لوله‌های پی‌وی‌سی با قطرهای (۱۶۰، ۱۵۰، ۱۲۵ و ۱۱۰ میلی‌متر) و طول‌های (۵۰۰، ۴۰۰، ۲۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر) ساخته شد. سازه‌ها از یک طرف به لبه بالادست دریچه تخلیه متصل‌اند و از طرف دیگر در تماس کامل با رسوبات بستر به داخل مخزن توسعه داده شدند.

سازه‌های PBC در واقع لوله‌هایی دایره‌ای هستند که قسمت تحتانی آنها حذف شده است (Crookeston, 2008). شکل ۴ طرح شماتیک این سازه را در کنار تصویر آن بعد از تعبیه در مخزن سد نشان می‌دهد. این سازه از یک طرف به بدنه سد متصل است و از یک طرف روی ستون‌هایی قرار می‌گیرد که از طریق یک‌سری شمع‌های عمودی تا عمقی از رسوب در بستر مخزن سد نفوذ می‌کنند. جریان آب در هنگام عبور از درون سازه PBC در قسمت تحتانی با مصالح بستر در تماس است. این نوع از سازه‌ها را سازه‌های زیست محیطی شناخته شده‌اند.

نیروهایی که بر سازه PBC وارد می‌شود شامل وزن آب روی سازه و وزن مواد رسوبی است که احیاناً روی سازه ته‌نشین می‌شوند. همان‌طور که مشخص است، سازه PBC دارای مقطع قوسی است که دو نتیجه به‌همراه دارد:



شکل ۴- (الف) سازه PBC، مدل مورد استفاده در پژوهش حاضر و (ب) طرح شماتیک

روش اجرای آزمایش‌ها

ابتدا مخزن به آرامی با شیلنگ آب با دبی کم پر شد و بعد از آنکه ارتفاع آب در مخزن به رقوم مورد نظر رسید، پمپ روشن و دریچه تخلیه باز شد. با تنظیم شیر فلکه ابتدایی، جریان طوری تنظیم شد که برای ارتفاع مورد نظر، دبی ورودی با دبی خروجی برابر باشد. همه آزمایش‌های این پژوهش برای دبی ۱۴/۵ لیتر بر ثانیه و بار آبی ۶۰

قبل از آغاز هر آزمایش، رسوبات موجود در مخزن با استفاده از یک سطح صاف‌کن منشوری به صورت افقی تراز شد به طوری که سطح بالایی رسوبات منطبق بر لبه پایینی دریچه تخلیه باشد. برای جلوگیری از فرسایش‌های ناخواسته ناشی از ورود ناگهانی جریان به داخل مخزن،

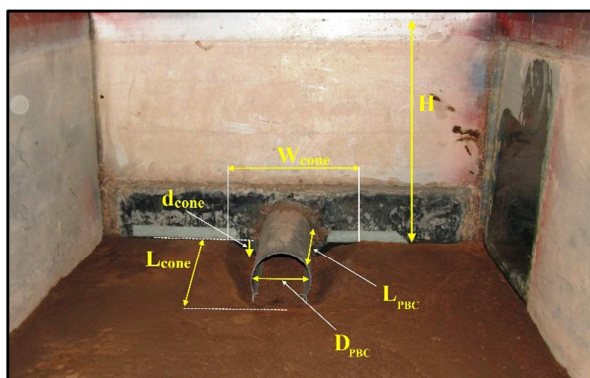
آزمایش‌ها برای دو حالت با و بدون سازه PBC دنبال شد. آزمایش بدون سازه به‌عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد و تأثیر سازه PBC با طول‌ها و قطرهای مختلف روی مشخصات مخروط رسوب‌شویی و راندمان رسوب‌شویی بررسی گردید.

تحلیل ابعادی

تخلیه رسوب از مخازن با رسوب‌شویی تحت فشار مکانیزم پیچیده‌ای دارد که ناشی از اندرکنش جریان و رسوب، وجود گردابه‌ها، تلاطم کامل جریان و بردارهای سه‌بعدی سرعت جریان است. با توجه به شکل ۵، در حالت استفاده از سازه‌های PBC افقی متصل به دریچه تخلیه، حجم مخروط رسوب‌شویی (\forall_{cone}) در مصالح غیرچسبنده تابع عواملی چند است؛ مانند سرعت متوسط جریان خروجی از دریچه تخلیه (u_{outlet})، ارتفاع آب روی دریچه (H)، اندازه مؤثر ذرات رسوب (D_{50})، جرم مخصوص سیال (ρ_w)، جرم مخصوص رسوب (ρ_s)، لزوجت دینامیکی سیال (μ)، شتاب گرانش ثقل (g)، قطر دریچه تخلیه (D_{outlet})، قطر سازه (D_{PBC}) و طول سازه (L_{PBC}).

سانتی‌متر روی دریچه تخلیه صورت پذیرفت. مطالعات قبلی تأثیر تغییرات جریان و ارتفاع آب را بر عملیات رسوب‌شویی تحت فشار بررسی کرده‌اند (Emamgholizadeh et al., 2007).

آزمایش‌ها تا زمانی ادامه یافت که تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی ناچیز باشد. برای این پژوهش، مدت‌زمان تعادل آبستگي ۵ ساعت در نظر گرفته شد؛ این مدت‌زمان با اجرای آزمایشی بلندمدت و بررسی فیلم آبستگي محاسبه گردید. در این حالت، تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی طی دو ساعت کمتر از یک میلی‌متر بوده است. بعد از پایان هر آزمایش، شیر تخلیه تحتانی و جریان ورودی به مخزن به آرامی بسته شدند، آب موجود در مخزن نیز از طریق شیر تعبیه شده در کف مخزن به آرامی زهکش گردید به‌طوری‌که تغییری در ابعاد مخروط آبستگي ایجاد نشود. پس از آن، اندازه‌گیری‌ها آغاز شد. فرآیند آماده کردن بستر رسوبی، پر کردن تدریجی مخزن، اجرای آزمایش و در نهایت زهکش کردن تدریجی آب پس از هر آزمایش در مجموع ۷۲ ساعت به‌طول می‌انجامید.



شکل ۵- پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر رسوب‌شویی

با استفاده از تحلیل ابعادی و کاربرد تئوری π -باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد مؤثر در رسوب‌شویی تحت فشار به‌صورت رابطه ۲ قابل محاسبه‌اند:

این متغیرها در شکل تابعی به‌صورت رابطه ۱ نوشته می‌شوند:

$$f(\forall_{cone}, u_{outlet}, H, \rho_s, \rho_w, \mu, g, D_{50}, D_{outlet}, D_{PBC}, L_{PBC}) = 0 \quad (1)$$

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...

جداول ارائه می‌گردد.

$$f\left(\frac{\nabla_{cone}}{D_{outlet}^3}, \frac{H}{D_{outlet}}, \frac{D_{50}}{D_{outlet}}, \frac{D_{PBC}}{D_{outlet}}, \frac{L_{PBC}}{D_{outlet}}, G_s, Re, Fr\right) = 0 \quad (2)$$

آزمایش شاهد؛ مشاهدات کلی

در آزمایش‌های بدون سازه PBC (آزمایش شاهد)، بلافاصله با باز شدن دریچه تخلیه، جریان رسوبی با غلظت بالا^۱ از مخزن خارج شد. با گذشت زمان، از غلظت جریان کاسته شد و پس از حدود ۱۵ دقیقه جریان خروجی از مخزن تقریباً زلال و عاری از رسوب گردید. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که فرایند تخلیه رسوب در این حالت به دو مرحله قابل تفکیک است. در دقایق اولیه آزمایش، رسوب بستر در اطراف دریچه تحت تأثیر تنش برشی زیاد ناشی از سرعت و تلاطم بالای جریان خروجی از جای خود و همراه با جریان آب به بیرون از مخزن منتقل شد که در نتیجه آن حفره‌ای کوچک به شکل مخروط در مقابل دریچه تخلیه به وجود آمد. این مرحله، زمانی کوتاه، کمتر از یک دقیقه، از آزمایش را به خود اختصاص داد.

بعد از این مرحله، دو گردابه مجزا در دو طرف دریچه تخلیه شکل گرفت. این گردابه‌ها رسوب را از کف مخروط رسوب‌شویی به داخل خود کشانده و به جریانی تزریق می‌کردند که در حال خروج از دریچه تخلیه بود (شکل ۶). ابعاد و قدرت مکش این گردابه‌ها، یکی از آنها ساعتگرد و دیگری پاد ساعتگرد، در طول آزمایش به صورت متناوب تغییر می‌کرد. گاهی نیز گردابه‌ها با هم ترکیب می‌شدند و گردابی قوی‌تر تشکیل می‌دادند. این تغییرات در سراسر آزمایش پی‌درپی صورت می‌پذیرفت. هرچه قدرت این گردابه‌ها بیشتر می‌شد، میزان رسوب خروجی از دریچه تخلیه نیز افزایش می‌یافت.

تزریق رنگ در مخزن نشان داد که جریان به صورت شعاعی به دریچه تخلیه نزدیک می‌شود. هرچه جریان به دریچه نزدیک‌تر شود، سرعت و به تبع آن قدرت حمل رسوب آن افزایش می‌یابد. در پایان آزمایش، یک مخروط

که در آن،

$$Re = \frac{\rho u_{outlet} D_{outlet}}{\mu} \quad , \quad Fr = \frac{u_{outlet}}{\sqrt{g D_{outlet}}}$$

عدد فرود دریچه؛ و $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ چگالی

مخصوص رسوبات. برای اهداف این پژوهش، مقادیر D_{outlet} ، H و D_{50} ثابت در نظر گرفته شدند. بنابراین، عدد فرود در همه آزمایش‌ها مقداری ثابت داشته است. از طرف دیگر، چون در همه آزمایش‌ها از یک نوع رسوب استفاده شد، پارامتر G_s نیز از معادله بالا قابل حذف خواهد بود. همچنین، جریان خروجی از دریچه تخلیه کاملاً متلاطم بوده، بنابراین می‌توان از تأثیر عدد رینولدز چشم پوشید. با توجه به آنچه گفته شد، رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ قابل ارائه است.

$$\frac{\nabla_{cone}}{D_{outlet}^3} = f_1\left(\frac{D_{PBC}}{D_{outlet}}, \frac{L_{PBC}}{D_{outlet}}\right) \quad (3)$$

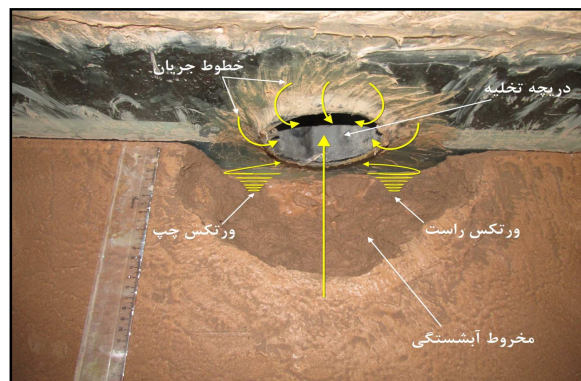
همان‌طور که مشخص است، طول و قطر سازه PBC دو پارامتر مؤثر بر حجم مخروط آبستگي (حجم رسوب تخلیه شده) محسوب می‌شوند. مشخصه‌های مخروط رسوب‌شویی که در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند مشتمل‌اند بر: ۱- بیشترین طول مخروط رسوب‌شویی، ۲- بیشترین عرض مخروط رسوب‌شویی، ۳- بیشترین عمق مخروط رسوب‌شویی و ۴- توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی. این پارامترها برای آزمایش شاهد و آزمایش‌های همراه با سازه PBC صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد، پژوهش حاضر به صورت آزمایشگاهی و با هدف ارائه راهکاری نوین در جهت افزایش راندمان تخلیه رسوب حین رسوب‌شویی تحت فشار اجرا شده است. نتایج آزمایش‌ها در قالب نمودارها و

پاول (Powell, 2007) بر اساس مشاهدات خود نتیجه گرفت که شکل و جهت این شیارها تابعی از جهت چرخش و قدرت گردابه‌هاست.

رسوب‌شویی با حجم محدود در مقابل دریچه تخلیه ایجاد شد که درون آن یکسری مرز و شیار که تحت تأثیر گردابه‌های موجود شکل گرفتند، قابل مشاهده بود.

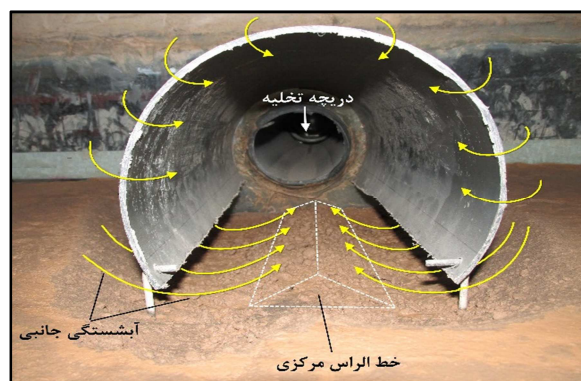


شکل ۶- وضعیت جریان خروجی از دریچه تخلیه، آزمایش شاهد

بیرون از مخزن منتقل شود. از طرفی، به علت اختلاف فشار بیرون و درون سازه، فرسایش نوع پایپینگ در دو طرف سازه و در طول آن رخ داد و بدین ترتیب رسوبات از دو طرف سازه در فرایندی پس‌رونده شسته و به جریانی تزریق شد که در حال عبور از درون سازه بود (شکل ۷). در این حالت، رسوب‌شویی هم از مقابل دهانه سازه و هم از اطراف آن با سرعت زیاد صورت پذیرفت.

آزمایش با سازه PBC؛ مشاهدات کلی

در این حالت، یک لوله افقی که قسمت تحتانی آن بریده شده بود در تماس کامل با بستر رسوبی به دریچه تخلیه متصل گردید. بدین ترتیب با باز شدن دریچه تخلیه، جریان مجبور بود از فضای محدود درون سازه رد شود. با محدود شدن سطح مقطع، سرعت و به تبع آن تنش برشی جریان افزایش یافت و موجب گردید حجم بیشتری از رسوبات بستر از جای خود کنده و به



شکل ۷- وضعیت جریان خروجی از دریچه تخلیه، آزمایش با سازه PBC

می‌دهند که تغییرات زمانی مخروط رسوب‌شویی تابعی است از شرایط جریان، هندسه دریچه تخلیه و مشخصه‌های رسوب (Meshkati et al., 2009). در حالت

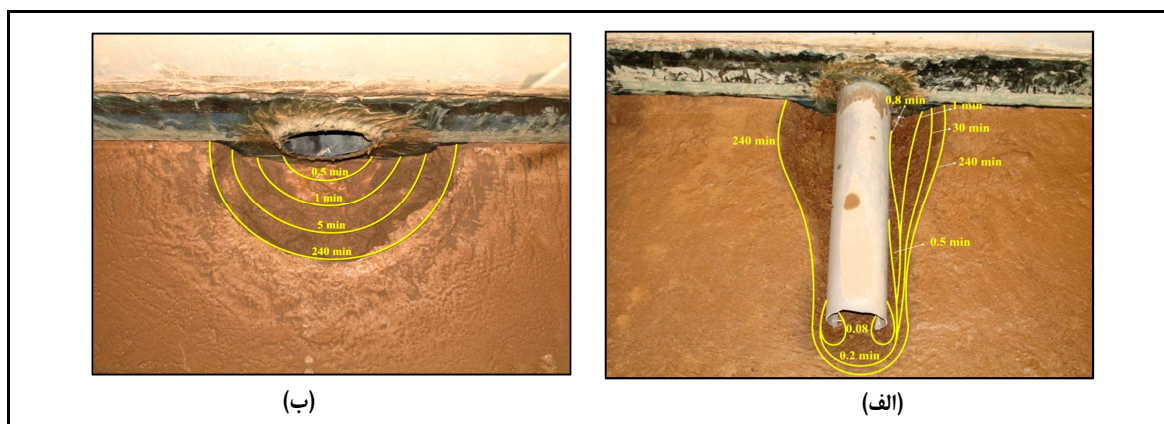
تغییرات زمانی مخروط رسوب‌شویی

زمان، یکی از پارامترهای مهم در مطالعات آبشستگی است (Melville & Chew, 1999). مطالعات قبلی نشان

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...

فرسایش پایپینگ آغاز شد و مخروط رسوب‌شویی به‌صورت جانبی (عرضی) توسعه یافت. با شروع فرسایش پایپینگ، جریان با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر برای رسیدن به دریچه تخلیه، رسوبات را همراه با خود شست و از دریچه خارج کرد. به‌همین دلیل توسعه عرضی مخروط رسوب‌شویی در مجاورت دریچه تخلیه بیشتر بود؛ این توسعه عرضی با افزایش فاصله از دریچه تخلیه در امتداد سازه کاهش یافت. شکل ۸ توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی را در آزمایش شاهد و آزمایش با حضور سازه PBC نشان می‌دهد.

آزمایش شاهد، توسعه مخروط رسوب‌شویی در هر لحظه از زمان، مکان هندسی یک نیم‌دایره بود که مرکز آن در مرکز دریچه تخلیه و شعاع آن دائم در حال افزایش بوده است. سرعت رشد اندازه شعاع در ابتدای آزمایش بسیار بالا بود ولی با گذشت زمان کاهش یافت و نهایتاً به مقداری نزدیک به صفر رسید که شرایط تعادلی^۱ نامیده می‌شود. شکل نهایی حفره آبستگي به‌صورت نیم‌مخروط بوده است. در حالت آزمایش با سازه، شروع آبستگي از انتهای لبه بالادست لوله و از دو طرف آن شروع شد و در امتداد لوله ادامه یافت تا به دیواره پایین دست مخزن (دریچه تخلیه) رسید. پس از آن،



شکل ۸- (الف) توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش با سازه PBC و (ب) آزمایش شاهد

نسبت به زمان ناچیز است و به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد. نتایج اندازه‌گیری شیب تعادلی دیواره‌های مخروط رسوب‌شویی برای آزمایش‌ها نشان داد که در آزمایش شاهد، شیب دیواره مخروط رسوب‌شویی تقریباً ۲۶ درجه است که برابر با زاویه قرار رسوبات مورد استفاده است. در این خصوص، مشاهدات این پژوهش با اندازه‌گیری‌های امام‌قلی‌زاده و همکاران (Emamgholizadeh *et al.*, 2006) و فتحی‌مقدم و همکاران (Fathi-Moghadam *et al.*, 2010) مطابقت دارد.

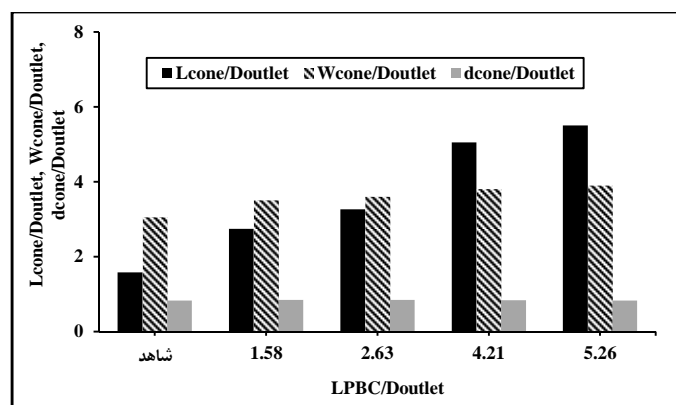
برای رسوب‌های دانه‌ای غیرچسبنده، فنگ و کائو (Fang & Cao, 1996) نیز گزارش داده‌اند که شیب

تأثیر سازه PBC بر هندسه مخروط رسوب‌شویی

مشخصه‌های هندسی مخروط رسوب‌شویی که در تمامی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شدند شامل حداکثر عمق، حداکثر طول، حداکثر عرض، شیب تعادلی دیواره‌ها، توپوگرافی و مقاطع طولی و عرضی هستند که از طریق آنها حجم حفره آبستگي (حجم رسوب خارج شده) و راندمان رسوب‌شویی نیز محاسبه گردید. در ادامه، به تأثیر حضور سازه بر هر یک از این مشخصه‌ها پرداخته می‌شود. پس از گذشت زمانی مشخص از ابتدای هر آزمایش رسوبی، گفته می‌شود که آن آزمایش به شرایط تعادلی رسیده است. در این حالت، تغییرات ابعاد حفره آبستگي

می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش طول نسبی سازه از ۱/۵۸ به ۵/۲۶، طول و عرض ماکزیمم نسبی مخروط رسوب‌شویی نسبت به شاهد به ترتیب ۳/۴۸ و ۱/۲۸ برابر شده است. در این حالت، عمق ماکزیمم نسبی مخروط رسوب‌شویی (d_{cone}/D_{outlet}) برای همه طول‌ها تقریباً ثابت و با آزمایش شاهد برابر بوده است.

دیواره‌های مخروط رسوب‌شویی می‌تواند از روی زاویه قرار رسوبات تخمین زده شود. آزمایش‌های با سازه نشان می‌دهد که سازه PBC روی شیب دیواره‌های مخروط رسوب‌شویی اثر کاهنده دارد. شکل ۹ تأثیر طول بی‌بعد سازه PBC را بر سه مشخصه طولی، عرضی و عمقی مخروط رسوب‌شویی نشان



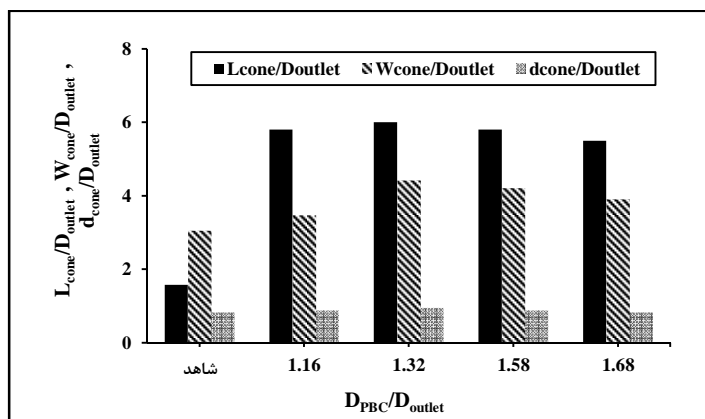
شکل ۹- تغییرات ابعاد هندسی مخروط رسوب‌شویی با تغییر طول نسبی سازه PBC در مقایسه با آزمایش شاهد

در قطرهای کوچک‌تر از قطر بی‌بعد ۱/۳۲، به‌رغم اینکه سرعت جریان افزایش پیدا کرده محدود شده، تحت تأثیر سازه کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، در قطر بی‌بعد ۱/۱۶، جریان در عرض کمتری با بستر رسوبی در تماس است و به‌همین دلیل ابعاد حفره آبشستگی، در مقایسه با قطر بی‌بعد ۱/۳۲، کاهش نسبی داشته است. بنابراین، می‌توان قطر بی‌بعد ۱/۳۲ را به‌عنوان قطر بهینه در شرایط آزمایشگاهی این پژوهش معرفی کرد.

از جمله اطلاعات لازم در زمینه واسنجی مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی آبشستگی، مقاطع طولی و عرضی حفره‌های آبشستگی است. شکل ۱۱ نیم‌رخ طولی مخروط رسوب‌شویی را در دو حالت آزمایش شاهد و آزمایش دارای سازه PBC مقایسه می‌کند. این نیم‌رخ منطبق بر محور مرکزی که از مرکز دریچه می‌گذرد ($y=0$)، رسم شده است.

در شکل ۱۰ تأثیر مشخصه قطر بی‌بعد سازه PBC بر حداکثر عمق، طول و عرض نسبی مخروط رسوب‌شویی نشان داده شده و با حالت آزمایش شاهد مقایسه گردیده است. تأثیر سازه PBC بر توسعه طولی، عمقی و عرضی مخروط رسوب‌شویی در همه قطرهای سازه PBC، در مقایسه با آزمایش شاهد، کاملاً مشهود است. در این شکل مشخص است که همه پارامترهای L_{cone}/D_{outlet} ، W_{cone}/D_{outlet} و d_{cone}/D_{outlet} در نسبت بی‌بعد $D_{PBC}/D_{outlet}=1/32$ حداکثر مقدار خود را دارند و در مقایسه با آزمایش شاهد، به ترتیب ۲۸۰، ۴۵ و ۱۴ درصد افزایش نشان می‌دهند. در قطرهای نسبی بزرگ‌تر، به‌علت بزرگ‌تر شدن سطح مقطع مجرای سازه، طبق رابطه پیوستگی، سرعت جریان و به تناسب آن تنش برشی و قدرت جریان برای جدا کردن رسوبات از مخروط رسوب‌شویی و خارج کردن آنها از مخزن کاهش یافته است.

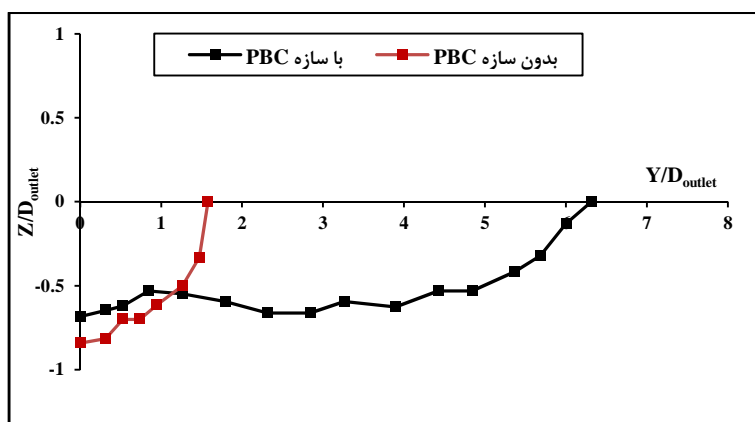
افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...



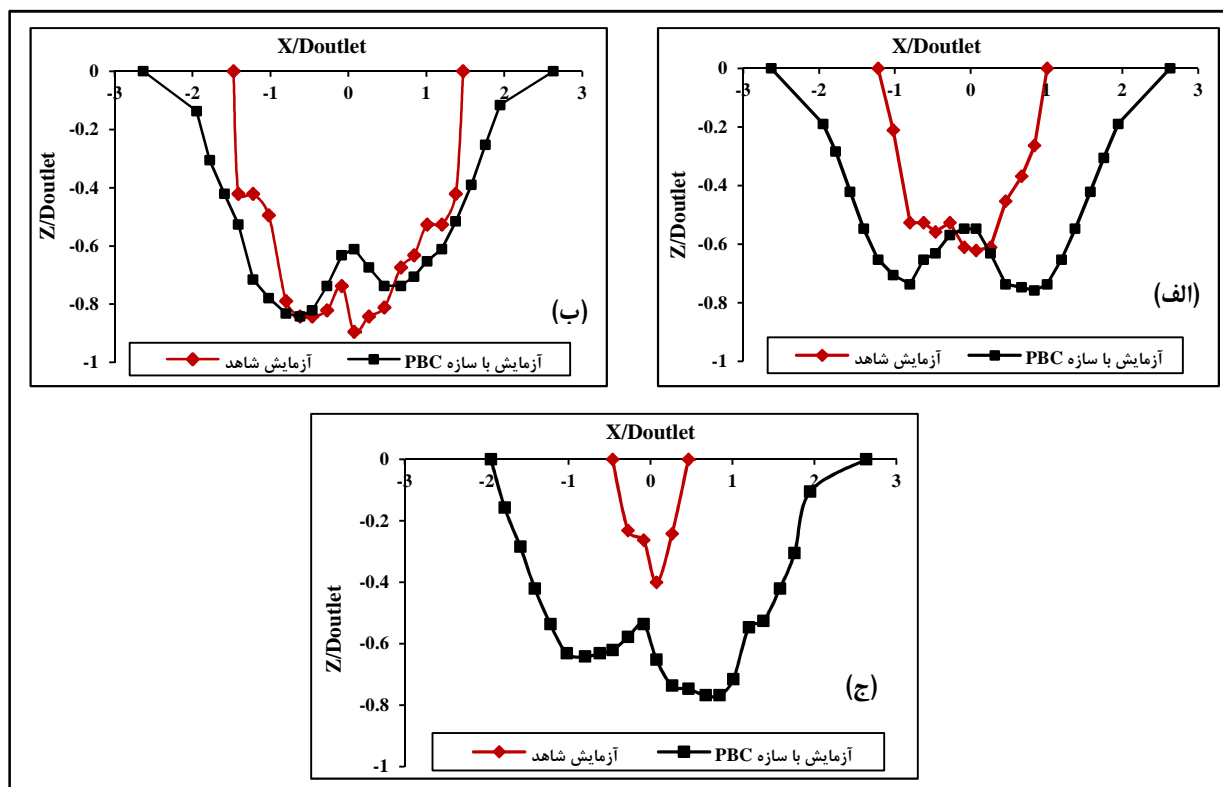
شکل ۱۰- تغییرات ابعاد هندسی مخروط رسوب‌شویی با تغییر قطر نسبی سازه PBC در مقایسه با آزمایش شاهد

(به سمت بالادست در مخزن) سطح مقطع عرضی مخروط رسوب‌شویی کوچک و کوچک‌تر می‌شود در حالی که در حضور سازه PBC، ابعاد مخروط رسوب‌شویی همواره مقدار تقریباً ثابتی دارد. به بیان دیگر، با محاسبه مساحت مقطع عرضی در هر یک از فواصل مذکور مشخص می‌شود که نسبت مساحت مقطع در دورترین فاصله نزدیک‌ترین فاصله ($y/D_{outlet}=0/53$) در آزمایش شاهد برابر با $9/22$ ولی در آزمایش دارای سازه PBC برابر با $1/14$ است که مقطع عرضی تقریباً ثابت را در سرتاسر طول سازه نشان می‌دهد.

یادآوری می‌شود که در این مقاله با فرض اینکه مبدأ مختصات منطبق بر مرکز دریچه تخلیه باشد، جهت مثبت محور X در سمت راست دریچه (دید از بالادست)، جهت مثبت محور Y در امتداد محور مرکزی دریچه به سمت بالادست و جهت مثبت محور Z رو به بالا در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲، تغییرات نیم‌رخ عرضی مخروط رسوب‌شویی در سه فاصله نسبی (y/D_{outlet}) $0/53$ ، $1/53$ و 1 نسبت به دریچه تخلیه برای هر دو حالت آزمایش شاهد و آزمایش با سازه PBC ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، در حالتی که رسوب‌شویی بدون سازه صورت می‌گیرد، با دور شدن از دریچه تخلیه



شکل ۱۱- مقایسه نیم‌رخ طولی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد با آزمایش دارای سازه PBC



شکل ۱۲- مقاطع عرضی مخروط رسوب‌شویی در فواصل مختلف از دریچه تخلیه
 (الف) $Y/D_{outlet}=1$, (ب) $Y/D_{outlet}=0.53$ و (ج) $Y/D_{outlet}=1.53$

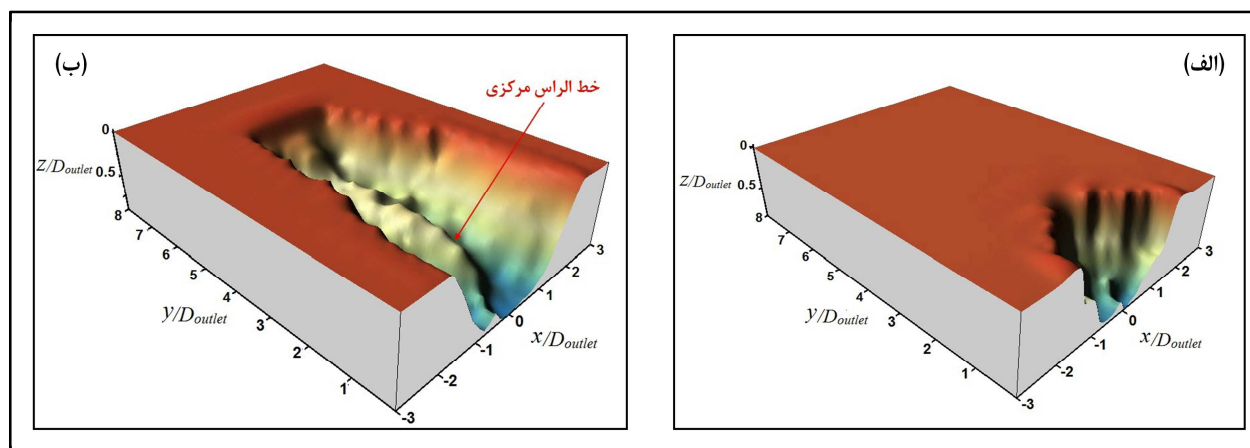
از نکات قابل توجه این است که در تمام آزمایش‌های با سازه یک خط‌الراس دقیقاً در محور میانی سازه شکل گرفته بود که در این شکل کاملاً مشهود است. همان‌طور که مشخص است کار گذاشتن سازه PBC تأثیری چشم‌گیر بر حجم تخلیه رسوب در عملیات رسوب‌شویی تحت فشار داشته است. طبق مطالبی که در بخش تحلیل ابعادی ارائه شد، در حالت وجود سازه PBC، طول و قطر نسبی سازه دو فاکتور مؤثر در میزان حجم رسوب‌شویی (حجم مخروط رسوب‌شویی) هستند. برای آزمایش‌های صورت‌گرفته در این پژوهش، رابطه ۴ میزان اثر این مشخصه‌ها را بر حجم مخروط رسوب‌شویی نشان می‌دهد.

$$\frac{V_{cone}}{D_{outlet}^3} = 1.37 \left(\frac{D_{PBC}}{D_{outlet}}\right)^{0.6} \left(\frac{L_{PBC}}{D_{outlet}}\right)^{0.9} \quad (4)$$

مقایسه حجم مخروط آبشستگی در حالت با و بدون سازه PBC

محاسبه حجم رسوباتی که در هر آزمایش رسوب‌شویی از مخزن سد خارج می‌شود همواره مورد توجه است و خود به تنهایی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی میزان کارایی عملیات رسوب‌شویی باشد ضمن اینکه آگاهی از حجم مخروط رسوب‌شویی برای محاسبه راندمان رسوب‌شویی مورد نیاز خواهد بود. در این پژوهش از یک عمق‌سنج دستی و یک فریم شبکه‌بندی‌شده برای اندازه‌گیری مقادیر x ، y و z مخروط رسوب‌شویی استفاده شد. بدین ترتیب که پس از پایان هر آزمایش توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی اندازه‌گیری شد که نمونه‌ای از آنها در شکل ۱۳ دیده می‌شود. شکل ۱۳- الف، مخروط رسوب‌شویی را در آزمایش شاهد و شکل ۱۳- ب مخروط رسوب‌شویی را در آزمایش با سازه PBC نشان می‌دهد. مشخصات سازه به‌کار رفته در این حالت

افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با...



شکل ۱۳- (الف) توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش شاهد و (ب) آزمایش با سازه PBC

آزمایش دارای سازه PBC با مشخصه $L_{PBC}/D_{outlet} = 5/26$ و $D_{PBC}/D_{outlet} = 1/32$ راندمان رسوب‌شویی 0.05243 به دست آمد که تقریباً $4/57$ برابر حالت بدون سازه و نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه سازه بر راندمان رسوب‌شویی است.

نتیجه‌گیری

از میان روش‌های مختلف حفظ و بازیابی حجم ذخیره مفید مخازن، رسوب‌شویی هیدرولیکی مخازن همواره مورد توجه است و به صورت رایج به کار گرفته می‌شود. در حال حاضر این تکنیک در تخلیه رسوب‌های مخزن سد راندمان بالایی ندارد. یعنی در ازای خروج حجم زیادی از آب ذخیره شده در مخزن، مقدار ناچیزی رسوب تخلیه می‌شود. در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده از سازه PBC برای افزایش راندمان تخلیه رسوب حین رسوب‌شویی پیشنهاد و بررسی شد. بر این اساس، از سازه PBC با چهار طول و چهار قطر مختلف استفاده شد. مشخصه‌های مخروط رسوب‌شویی شامل طول ماکزیمم، عرض ماکزیمم، عمق ماکزیمم و شیب دیواره‌ها در هر مورد اندازه‌گیری شد و با اندازه‌گیری‌های متناظر در آزمایش شاهد (بدون سازه PBC) مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان داد که در قطر نسبی $1/68$ ، با افزایش طول نسبی سازه از $1/58$ به $5/26$ ، راندمان تخلیه نسبت به آزمایش شاهد $319/57$ درصد افزایش می‌یابد. در این

راندمان رسوب‌شویی

راندمان رسوب‌شویی شاخصی برای سنجش میزان موفقیت رسوب‌شویی است. گزارش‌هایی که قبلاً در این خصوص پژوهشگران مختلف ارائه داده‌اند نشان می‌دهد که هم در مطالعات میدانی (Morris & Fan, 2010) و هم در شرایط آزمایشگاهی (Emamgholizadeh & Fathi-Moghadam, 2014) رسوب‌شویی تحت فشار بسیار پایین است به این معنی که حجم زیادی آب باید از مخزن سد خارج شود تا حجم کمی از رسوبات انباشته شده در مخزن سد شسته و به پایین دست منتقل شود. کیان (Qian, 1982) راندمان رسوب‌شویی را به صورت نسبت حجم رسوبات شسته شده به حجم آبی تعریف می‌کند که در رسوب‌شویی مصرف شده است و رابطه ۵ را برای محاسبه راندمان ارائه داده است:

$$E = \frac{\nabla_{cone}}{\nabla_w} \quad (5)$$

که در آن،

E = راندمان رسوب‌شویی؛ ∇_{cone} = حجم رسوب خارج شده طی رسوب‌شویی (مترمکعب)؛ و ∇_w = حجم آب خارج شده از مخزن طی رسوب‌شویی (مترمکعب). برای آزمایش‌های اجرا شده در این پژوهش، راندمان رسوب‌شویی در آزمایش شاهد 0.0094 بوده است. برای

آزمون قطر بی بعد ۱/۳۲ به عنوان قطر بهینه به دست آمد که در آن بیشترین حجم رسوب شویی روی داده است. راندمان تخلیه رسوب نیز به عنوان تابعی غیرخطی از طول و قطر بی بعد سازه تعیین شد. بر اساس نتایج این پژوهش نشان داده شد که سازه PBC سازه‌ای است کاربردی و عملی (در کلیه مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری) به منظور افزایش راندمان عملیات رسوب شویی در مخازن سدها پیشنهاد می‌شود که آزمایش‌های پژوهش حاضر در مخازن با ابعاد متفاوت و شرایط آزمایشگاهی دیگر نیز دنبال شود تا نتایج این پژوهش و موفقیت کاربرد سازه PBC در مخازن واقعی تایید گردد.

مراجع

- 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)
- 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. Flushing sediment from reservoirs: RESFLUSH user manual. Report OD/ITM 54. HR Wallingford. UK.
- 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.*
- Chaudhry, M. A. and Rehman, H. R. 2012. Worldwide experience of sediment flushing through reservoirs. *Mehran Uni. Res. J. Eng. Technol.* 31(3):395-408.
- Chen, S. C., Wang, S. C. and Wu, C. H. 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *Int. J. Sediment Res.* 25, 149-160.
- 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.
- Emamgholizadeh, S. and Fathi-Moghadam, M. 2014. Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs. *J. Hydrol. Eng.* 19, 674-681.
- 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., Bina, M., Fathi-Moghadam, M. and Ghomeshi, M. 2006. Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir. *ARNP J. Eng. Appl. Sci.* 1(4): 7-16.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Bina, M. and Ghomeshi, M. 2010. Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. *J. Hydraul. Res.* 48(4): 509-514.
- Fang, D. and Cao, S. 1996. An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir. *Proceeding of 6th Federal Interagency Sedimentation Conference.* Las Vegas.
- 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.

- 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.
- Jalili, H. and Hosseinzadeh-Dalir, A. 2014. Effect of development of eddies around the reservoir's bottom outlet to improve the flushing efficiency. *Water Res. J.* 15, 51-62. (in Persian)
- 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.
- Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng-ASCE.* 125(1): 59-65.
- 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.
- Mohammadi, M. N., Salmasi, F., Hosseinzadeh-Dalir, A. and Arvanaghi, H. 2014. Experimental investigation of the effect of semi-circular structure on the capacity of pressurized flushing of sediments from the reservoirs. *J. Water Soil Sci.* 24(2): 21-30. (in Persian)
- Morris, G. L. and Fan, J. 2010. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watershed for Sustainable Use.* McGraw Hill. New York.
- Powell, D. N. 2007. Sediment transport upstream of orifice. Ph. D. Thesis. Clemson University. UMI Number: 3290698.
- 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. 2015. Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *J. Hydraul. Eng.* 141(2): Doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000960, 04014076.
- Qian, N. 1982. Reservoir sedimentation and slope stability; technical and environmental effects. *Proceeding of 14th International Congress on Large Dams, Transactions.* Rio de Janeiro. Brazil.
- 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)
- Shahirnia, M., Ayyubzadeh, S. A. and Samani, J. M. V. 2014. Investigation of the effect of sediment level on the pressure flushing efficiency. *J. Hydraul.* 9(1): 11-25. (in Persian)
- Talebeydokhti, N. and Naghshineh, A. 2004. Flushing sediment through reservoirs. *Iranian J. Sci. Technol.* 28(B1): 119-136.
- Tofighi, S., Samani, J. M. V. and Ayyubzadeh, S. A. 2015. Pressure flushing with expanding bottom outlet channel within dam reservoir. *Modares Civil Eng. J.* 15(2): 127-206. (in Persian)
- Zhang, X., Zhang, Y. and Zhang, L. 2011. Analysis on reservoir desilting by spiral flow. *Proceeding of The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE).* July 15-17. Inner Mongolia. China.



Improving the Reservoir's Pressurized Flushing Efficiency by Connecting PBC Structure to the Dam Bottom Outlet

M. R. Madadi, M. Rahimpour* and K. Qaderi

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: rahimpour@uk.ac.ir.

Received: 25 January 2016, Accepted: 12 May 2016

Reservoir sedimentation is always known as a serious problem for sustainable use of reservoirs and the main factor of reservoirs storage loss. One of the most common engineering techniques for preserving the reservoirs storage capacity is the periodical desilting of reservoirs by hydraulic flushing. Review of the literature shows that the pressurized flushing operation is currently accomplished with low efficiency. In this paper, the effect of PBC structure on the sediment removal efficiency during pressurized flushing operation was experimentally investigated. In this way, PBC structure with four relative length and four relative diameters were used in the reservoir. Non-cohesive sand particles with $D_{50}=0.36$ mm were used as the deposited sediments in the reservoir. The results showed that by using the PBC structure with $L_{PBC}/D_{outlet} = 5.26$ and $D_{PBC}/D_{outlet} = 1.32$, the flushing efficiency became 4.57 times more than that of reference test. By increasing the relative length of PBC structure, the maximum relative length and width of flushing cone increased, respectively, compared to the reference test while the variation of the maximum relative depth was negligible. In addition, all the geometric parameters of flushing cone had their maximum values at $D_{PBC}/D_{outlet} = 1.32$.

Keywords: Flushing Cone, Flushing Efficiency, PBC Structure, Reservoir Desilting