

بررسی گسترش جریان‌های گردابی اطراف دریچه تحتانی مخزن‌ها برای افزایش راندمان فلاشینگ

حمیدرضا جلیلی^{۱*} و علی حسین‌زاده دلیر^۲

چکیده

بسیاری از مخزن‌های دنیا با مشکل رسوب‌گذاری حاد در پشت سد روبرو هستند، که در بسیاری از موارد این رسوب‌گذاری موجب بسته شدن دریچه تحتانی و انباشت بیشتر رسوب در پشت مخزن می‌شود. طبق گزارش‌های بین‌المللی یکی از راه‌های مؤثر برای رسوب‌شویی از مخزن‌های بزرگ، فلاشینگ جزئی (تحت فشار) است. اما این روش سبب تخلیه مقداری از رسوبات شده و به خودی خود، قادر به خارج کردن مخزن از بحران رسوب‌گذاری نیست. در این مطالعه با توجه به شناخت جریان‌های گردابی ایجاد شده در اطراف دریچه تحتانی، با استفاده از یک سازه خاص سعی در گسترش این گرداب‌ها برای افزایش رسوب‌شویی در فلاشینگ جزئی شده است. نتایج حاکی از آن است که با استفاده از یک سازه نیمه‌استوانه‌ای امکان افزایش راندمان فلاشینگ جزئی تا ۱۶/۴ برابر حالت معمولی میسر خواهد شد. پس، با توجه به نتایج به دست آمده و با کاربردی کردن این روش در مخزن‌ها بزرگ و نیز مخزن‌هایی که با وضعیت حاد رسوب‌گذاری روبرو هستند، می‌توان با از دست دادن حجم اندکی از آب مخزن در یک زمان کوتاه، مقدار زیادی از رسوبات را شسته و به خارج از مخزن انتقال داد.

واژه‌های کلیدی: جریان‌های گردابی، دریچه تحتانی، سازه نیمه‌استوانه‌ای، مخزن، فلاشینگ جزئی.

ارجاع: جلیلی ح. و حسین‌زاده دلیر ع. ۱۳۹۳. بررسی گسترش جریان‌های گردابی اطراف دریچه تحتانی مخزن‌ها برای افزایش راندمان فلاشینگ. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۶۲-۵۱.

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: jalili_hr87@ms.tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۱۷

مقدمه

عمر مفید مخزن‌ها به طور معمول با جمع شدن رسوبات در مخزن و در نتیجه کاهش حجم مفید مخزن، محدود می‌شود (گلز ۱۹۷۷). براساس گزارش‌های بین‌المللی، سالانه ۱ درصد از حجم مفید کل مخزن‌های دنیا بر اثر رسوب‌گذاری از بین می‌رود و با بسته شدن دریچه‌های تخلیه تحتانی سد، این وضع بدتر می‌شود. این در حالی است که محل یک مخزن، منحصر به فرد بوده و امکان جابجایی مخزن (در صورت پایان یافتن عمر مفید آن) به سادگی امکان ندارد. بنابراین روش‌هایی که موجب افزایش عمر مفید مخزن‌ها می‌شوند، برای طراحی مخزن‌های جدید و یا مدیریت مخزن‌های موجود مهم هستند. پدیده انتقال رسوب یک فرایند طبیعی در بیشتر رودخانه‌های دنیا بوده و در رودخانه‌های در حالت رژیم، رسوب ورودی به هر قسمت رودخانه تقریباً برابر با رسوب خروجی از آن قسمت است. ولی در صورت احداث یک سد بر روی این رودخانه با کاهش سرعت جریان در نزدیکی سد و در نتیجه ته‌نشینی رسوبات ورودی و انباشت آن‌ها در پشت سد روبرو خواهیم شد. به طور کلی روش‌های مدیریت رسوبات را می‌توان به سه دسته به شرح زیر طبقه‌بندی کرد (هارتمن، ۲۰۰۴):

۱- کاهش رسوب ورودی به مخزن‌ها (از طریق روش‌های آبخیزداری)

۲- کاهش ته‌نشینی رسوبات معلق وارد شده به مخزن‌ها

۳- رسوب‌شویی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن‌ها

در این مطالعه، سومین روش، بررسی شده است. فلاشینگ یکی از روش‌های مؤثر و شناخته شده در بین پژوهشگران است که برای رسوب‌شویی از مخزن‌ها با دریچه‌های تخلیه تحتانی به کار گرفته می‌شود. فلاشینگ به طور کلی به دو دسته کامل (فلاشینگ با جریان آزاد) و جزئی (فلاشینگ تحت فشار) تقسیم‌بندی می‌شود. در فلاشینگ کامل، آب مخزن به طور کامل تخلیه شده و رسوب‌شویی به شبکه‌ای از کانال‌هایی (شکل ۱ الف) که با جریان آزاد آب حفر شده‌اند محدود می‌شود (لای، ۱۹۹۴). فلاشینگ جزئی، در یک زمان کوتاه انجام شده و سطح آب در مخزن پس از پایان فلاشینگ همچنان بالا است. رسوب‌شویی در این روش فقط به یک حفره مخروطی شکل (شکل ۱ ب) اطراف دریچه تحتانی محدود می‌شود. بعد از مدت کوتاهی از آغاز فلاشینگ جزئی، ابعاد حفره فلاشینگ ثابت شده و

آب خارج شده از مخزن صاف و رسوب‌شویی بعد از آن انجام نمی‌شود. این حالت تا زمانی که جریان خارج شده از دریچه تحتانی به‌صورت آزاد انجام شود (فلاشینگ کامل) ادامه خواهد یافت. پس از ایجاد جریان آزاد در دریچه تحتانی، سرعت جریان در جهت طولی در مخزن افزایش یافته و رسوب‌شویی از مخزن به‌صورت شیارهایی در بستر مخزن، تا تخلیه کامل آب ادامه خواهد یافت.



شکل ۱ الف- شیارهای ایجاد شده در فلاشینگ کامل (حاج حسینی و همکاران، ۲۰۰۸)



شکل ۱ ب- حفره مخروطی شکل ایجاد شده در فلاشینگ جزئی (پاول، ۲۰۰۷)

در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در دنیا، فلاشینگ کامل بیشتر بررسی شده است، که دلیل آن نیز، مؤثرتر بودن این روش در بسیاری از مطالعات کاربردی صورت گرفته در جهان است (وو، ۱۹۸۹). اما این روش دارای محدودیت‌ها و معایب بزرگی است، که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

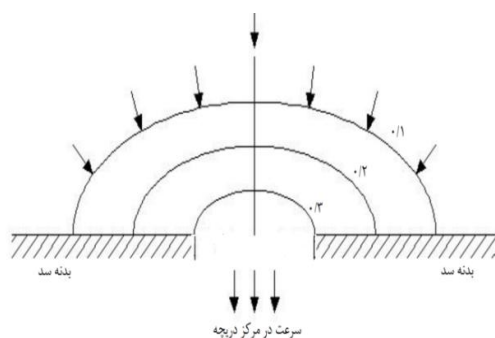
۱- این روش فقط در مخزن‌های کوچک (مخزن‌هایی که ظرفیت آن‌ها کمتر از ۳۰ درصد میانگین رواناب سالانه باشد) و با عرض کم با صرفه است، زیرا این مخزن‌ها به راحتی پر و خالی می‌شوند، اما این روش در مخزن‌های بزرگ قابل اجرا نیست (پاول، ۲۰۰۷).

۲- رسوبات شسته شده در دلتای رودخانه (بالادست

حالت فلاشینگ آزاد) می‌رسد. همچنین براساس مطالعه انجام شده توسط پاول (۲۰۰۷) سرعت جریان در اطراف دریچه تحتانی، با دور شدن از دریچه، به سرعت کم می‌شود، بدین شکل که با دور شدن از دریچه به مقدار یک D (مقدار بازشدگی دریچه تحتانی) سرعت جریان به مرز ۱۰ درصد سرعت جریان اطراف دریچه می‌رسد (شکل ۲ ب).



شکل ۲ الف - گرداب‌های ایجاد شده اطراف دریچه تحتانی (پاول، ۲۰۰۷)



شکل ۲ ب - خطوط تراز سرعت اطراف دریچه تحتانی (پاول، ۲۰۰۷)

راجاراتنم و همفریس (۱۹۸۲) توزیع سرعت و فشار را در اطراف دریچه تخلیه اندازه‌گیری کردند و یک کاهش فشار شدید در زیر دریچه در نتیجه شتاب شدید جریان در آن ناحیه مشاهده کردند. این پژوهشگران نشان دادند که این کاهش فشار در زیر دریچه به میزان ۴۰ درصد فشار هیدرواستاتیک بوده و این کاهش فشار با دور شدن از دریچه به میزان ۵ برابر بازشدگی آن به صفر خواهد رسید. نتایج مدل عددی استفاده شده توسط حاج حسینی و همکاران (۲۰۰۸) نیز نشان می‌داد، که با کاهش بازشدگی دریچه تحتانی بر مقدار رسوب‌شویی از مخزن افزوده می‌شود. براساس اطلاعات به دست آمده از ماهیت جریان‌های اطراف دریچه و با توجه به این موضوع می‌توان با محدود کردن مسیر یک جریان بر سرعت و که

مخزن) ممکن است، قبل از خارج شدن از مخزن (در اثر فلاشینگ) در نزدیکی سد ته‌نشین شده و در این شرایط فلاشینگ مؤثر نبوده و انباشت رسوبات بیشتر می‌شود.

۳- یکی از نگرانی‌های استفاده از این روش خروج رسوبات با غلظت بالا و با سرعت کم، از دریچه تخلیه تحتانی است، که باعث جمع شدن این رسوبات در پایین‌دست سد و به هم زدن شرایط محیطی می‌شود (جانسن، ۱۹۹۹). به همین دلیل تغییر در شرایط محیط‌زیستی توسط فلاشینگ کامل، یکی از مانع‌های استفاده از این روش است.

۴- انجام دوره‌ای این روش، باعث هدررفت مقدار زیادی از آب ذخیره شده در پشت سدها می‌شود و برای بسیاری از منطقه‌های کم آب غیرممکن است.

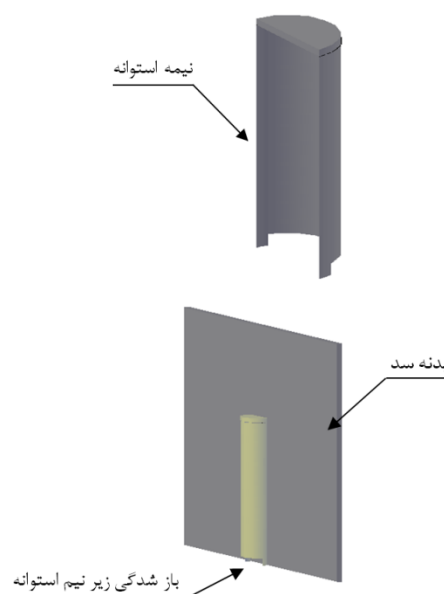
۵- رسوب‌شویی در این روش، به شیارهای ایجاد شده در مخزن، محدود می‌شود. این در حالی است که نقطه بحرانی جمع‌شدن رسوبات در مخزن اطراف دریچه تحتانی مخزن‌ها است، که در این روش رسوب‌شویی کاملی در اطراف دریچه انجام نمی‌شود.

هدف از انجام این پژوهش، افزایش راندمان در فلاشینگ تحت فشار و به دنبال آن افزایش رسوب‌شویی در اطراف دریچه تحتانی مخزن‌ها بوده است. پس برای نیل به اهداف از پیش تعیین شده این پژوهش، باید شناخت کاملی از عملکرد جریان در مخروط فلاشینگ^۱ به دست آید. به همین دلیل در ادامه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌پردازیم. براساس بسیاری از مطالعات انجام شده بر روی مکانیسم جریان در اطراف دریچه تحتانی مخزن، از جمله مطالعات راجاراتنم و همفریس (۱۹۸۲)، وایت و بتس (۱۹۸۴)، جانسون (۱۹۹۹) و پاول (۲۰۰۷)، در شروع فلاشینگ تحت فشار، دو دسته گرداب (شکل ۲ الف) با جهت‌های متفاوت در زیر دریچه تحتانی ایجاد می‌شوند، که همین گرداب‌ها به بلند شدن رسوب از بستر مخزن و خارج شدن از دریچه تحتانی کمک بسیاری می‌کنند.

این گرداب‌ها در فلاشینگ جزئی دارای طول عمر بسیار کوتاهی بوده و پس از گذشت زمان کمی از شروع فلاشینگ، ناپدید شده و پس از آن آب خروجی از مخزن صاف و زلال می‌شود و تخلیه رسوبات صفر شده و حفره فلاشینگ ایجاد شده به یک حالت پایدار (تا رسیدن به

رسوبات و مشاهده اثر گرداب‌ها بر این انتقال بوده است. این رسوبات همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، در طول مخزن به پهنای ۱ متر و تا ارتفاعی به میزان ۰/۲۳ متر بالاتر از کف کاذب مخزن (۰/۱۵ متر ارتفاع کف کاذب تا کف دریچه تخلیه، ۰/۵۰۸ متر قطر دریچه تخلیه و ۰/۳ متر رسوب بالای دریچه) ریخته شده و سطح آن‌ها در هر آزمایش صاف می‌شود. مقدار بازشدگی دریچه در هر آزمایش به میزان ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتی‌متر) تعیین شده است. برای جلوگیری از خطا در برداشت‌ها، مقدار ثابت و اندکی به عنوان دبی ورودی در هر آزمایش در نظر گرفته می‌شود. دو سری آزمایش در این پژوهش بررسی قرار می‌شود: الف) فلاشینگ جزئی به صورت معمول که در بسیاری از سدها به اجرا در می‌آید ب) فلاشینگ جزئی با استفاده از تغییرات ایجاد شده در اطراف دریچه تحتانی مخزن. در طول هر آزمایش، دبی جریان خروجی و رسوب خارج شده و تراز سطح آب در مخزن در فواصل زمانی معین (۱۱ فاصله زمانی در طول ۵۰ دقیقه کل آزمایش) اندازه‌گیری می‌شود. در پایان هر آزمایش نیز، توپوگرافی بستر مخزن در اطراف حفره آبشستگی برداشت شده و نیز وزن کل رسوب تخلیه شده از مخزن پس از خشک کردن رسوبات با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم محاسبه می‌شود. نمونه‌برداری از آب و رسوب خارج شده، با استفاده از سط‌های کالیبره شده ۱۳ لیتری و زمان سنجی با دقت ۰/۰۱ ثانیه انجام می‌شود. ابتدا آزمایش‌های پایه (آزمایش‌های مربوط به حالت فلاشینگ معمولی) انجام شده و سپس با نصب سازه نیمه‌استوانه‌ای، آزمایش‌های بعدی با همان شرایط به اجرا در می‌آید. در این مطالعه برای کاهش خطاهای احتمالی، کلیه آزمایش‌ها حداقل با یک بار تکرار انجام می‌گیرد. در ابتدای هر آزمایش برای جلوگیری از حرکت رسوبات قبل از پر شدن مخزن دریچه خروجی مخزن تا رسیدن سطح آب مخزن به مکان دلخواه و ثابت در هر آزمایش (۵۰ سانتی‌متر بالای کف دریچه تخلیه) بسته نگاه داشته می‌شود. پس از رسیدن سطح آب به محل دلخواه، جریان ورودی قطع و سپس دریچه به طور کامل باز شده و همزمان زمان سنج شروع به کار کرده ($t = 0$ s) و پس از این زمان دبی خروجی بیشتر از دبی ورودی گشته و فلاشینگ شروع می‌شود و سطح آب مخزن کم می‌شود. در این پژوهش ۵ نیمه‌استوانه با سایزهای ۲، ۴،

شدت آن افزود و همچنین با دور شدن از دریچه از سرعت جریان کاسته و بر فشار هیدرواستاتیک آن افزوده می‌شود، ایده جهت دادن به مسیر جریان از کف مخزن در این پژوهش بررسی شد و پس از آزمایش‌های متفاوت به صورت آزمون و خطا در نهایت بهترین سازه برای هدایت جریان خروجی از کف مخزن، سازه‌ای نیمه‌استوانه‌ای با یک بازشدگی در کف آن (به عنوان ورودی جریان و رسوب) تشخیص داده شد، که در شکل ۳ به نمایش درآمده است.



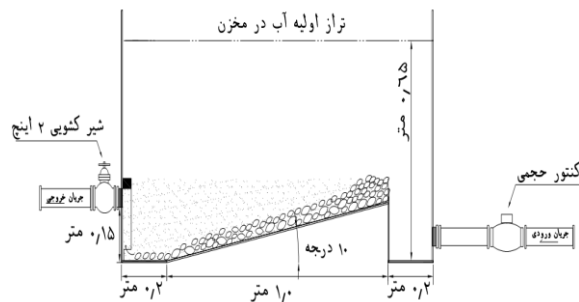
شکل ۳- نمایی از نیمه‌استوانه قابل نصب بر بدنه سد

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز در یک مخزن با عرض و طول ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر، از جنس فایبرگلاس انجام شده است. برای دریچه تحتانی این مخزن که در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بر روی کف کاذب نصب شده است، از یک شیر کشویی قطع و وصل ۲ اینچ استفاده شده است (شکل ۴). برای کاهش تلاطم جریان ورودی به مخزن ابتدا جریان آب وارد یک حوضچه آرام کننده شده و سپس وارد دریچه تحتانی می‌شود. در این مطالعه از رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۰/۵۱ میلی‌متر ($D_{50}=0.51$) و جرم مخصوص ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده می‌شود، که این رسوبات نوعی ماسه قرمز هستند. دلیل استفاده از این رسوبات با وزن مخصوص پایین، بررسی بهتر نحوه انتقال

در نیمه‌استوانه‌های ۶ و ۲ اینچ بررسی می‌شود.

۶، ۸ و ۱۰ اینچ از جنس PVC آزمایش می‌شود که برای بررسی اثر بازشدگی زیر نیمه‌استوانه نیز چندین بازشدگی



شکل ۴- نمایی از مدل آزمایشگاهی (نمای مدل شماتیک و مدل اجرا شده)

$(\frac{P_s}{\rho})$ صرف‌نظر کرد. چون ضریب جریان در همه آزمایش‌ها ثابت است. پس براساس معادله ۳ می‌توان گفت که عدد فرود برای همه آزمایش‌ها ثابت است. پارامترهای باقیمانده شامل یک ترم مشابه عدد رینولدز، قطر دریچه و رسوبات که به ارتفاع آب بالای دریچه وابسته شده‌اند. در جریان‌های متلاطم همانند آنچه که در اطراف دریچه رخ می‌دهد می‌توان از اثر عدد رینولدز چشم‌پوشی کرد. پس سه پارامتر باقیمانده شامل ارتفاع آب بالای دریچه، قطر رسوب و قطر دریچه هستند. در این مطالعه قطر بازشدگی دریچه و نیز قطر ذره رسوبی در کلیه آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است و فقط ارتفاع آب روی دریچه متفاوت خواهد بود.

نتایج و بحث

براساس نتایج شهودی اولیه، هنگامی که فلاشینگ جزیی معمولی (بدون استفاده از نیمه‌استوانه) انجام می‌شود، فقط اطراف دریچه تخلیه و اندکی پایین تر از کف دریچه (در حدود $0.1 D$) از رسوب خالی شده و پس از مدت کوتاهی رسوب‌شویی متوقف و شکل حفره فلاشینگ پایدار می‌شود (شکل ۵ الف). در زمان شکل‌گیری حفره فلاشینگ، گرداب‌هایی با جهت‌های متفاوت در زیر دریچه آشکارا مشاهده می‌شود که این گرداب‌ها دارای طول عمر کوتاه و با قدرت انتقال رسوب پایین هستند. این نتایج با بررسی‌های پژوهشگرانی چون پاول (۲۰۰۷) و جانسون (۱۹۹۹) به طور کامل سازگار است.

استفاده از سازه نیمه‌استوانه‌ای (با قطر اولیه ۶ اینچ) در جلوی دریچه تحتانی سد، قدرت گرداب‌ها را بیشتر کرده و

تحلیل ابعادی

مهم‌ترین پارامتر در مطالعه راندمان فلاشینگ جزیی، براساس مطالعات جگوییچ و همکاران (۲۰۰۹) نسبت دبی رسوبی خارج شده از مخزن به دبی جریان آب خارج شده از مخزن Q_s/Q_w است. مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر این نسبت شامل دانسیته جریان (ρ) ، ویسکوزیته جریان (μ) ، اندازه متوسط ذرات (d_{50}) ، دانسیته ذرات (ρ_s) ، هد کلی بالای مرکز دریچه تحتانی (H) ، قطر دریچه تحتانی (D) ، ضریب جریان (C_d) ، شتاب جاذبه (g) هستند که معادله ۱ این پارامترهای مؤثر را نشان می‌دهد:

$$Q_s/Q_w = f(\rho, \mu, d_{50}, \rho_s, H, D, C_d, g) \quad (1)$$

ضریب جریان نشان دهنده هندسه دریچه است که چنان که در معادله ۲ و ۳ نشان داده شده است تابعی از عدد فرود است.

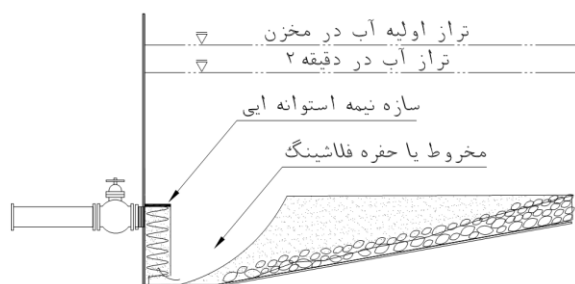
$$Q = C_d A_0 \sqrt{2gH} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2gH}} = \frac{V}{\sqrt{2gH}} = \frac{F_r}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Q برابر شدت جریان و A_0 برابر مساحت دریچه است. سرعت جریان عبوری از دریچه تابعی از ارتفاع آب بالای مرکز دریچه، شتاب جاذبه و ضریب جریان است. متغیرهای تکرار شونده، ارتفاع آب بالای دریچه، شتاب جاذبه و چگالی جریان انتخاب می‌شوند که به‌صورت معادله ۴ نشان داده شده است:

$$Q_s/Q_w = f\left(\frac{H \rho \sqrt{gH}}{\mu}, \frac{d_{50}}{H}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D}{H}, C_d\right) \quad (4)$$

برای همه آزمایش‌ها، رسوبات از جنس ماسه قرمز با جرم مخصوص یکسان بوده پس می‌توان از ترم دانسیته نسبی



شکل ۵ ب- حفره فلاشینگ در فلاشینگ جزئی هنگام استفاده از نیمه‌استوانه

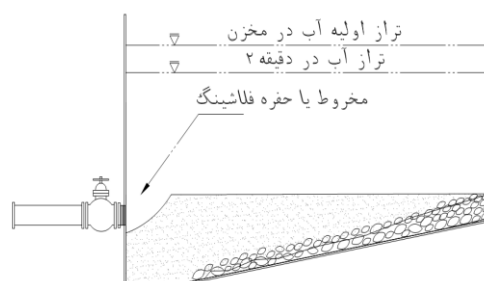
براساس تحلیل ابعادی برای بررسی راندمان فلاشینگ از پارامتر بی‌بعد $\frac{Q_s}{Q_w}$ در مقابل پارامتر بی‌بعد $\frac{D}{H}$ استفاده می‌شود که نتایج این بررسی در شکل ۶ الف در نموداری لگاریتمی ارایه شده است. در شکل ۶ ب نیز مقایسه‌ای بین کل رسوب خارج شده از مخزن در آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است که ۷ حجم کل رسوب (که از تقسیم جرم بر وزن مخصوص حاصل شده است) و D قطر بازشدگی دریچه تحتانی است. همچنان که در شکل ۶ الف مشاهده می‌شود، با کاهش ارتفاع سطح آب و در نتیجه افزایش نسبت $\frac{D}{H}$ با کاهش راندمان فلاشینگ روبه رو می‌شویم.

با توجه به شکل ۶ الف، می‌توان گفت که آهنگ تخلیه رسوبات در نیمه‌استوانه‌های ۸ و ۱۰ اینچی با بقیه نیمه‌استوانه‌ها متفاوت است، زیرا در این نیمه‌استوانه‌ها از شدت تخلیه اولیه (که بیش از ۹۵ درصد رسوب‌شویی در همان ۲ دقیقه اول آزمایش رخ می‌دهد) که در نیمه‌استوانه‌های ۲، ۴ و ۶ اینچ به نسبت شدید است دیگر خبری نیست و در عوض آهنگ ملایم‌تری در کل زمان فلاشینگ دارند. هرچند که با توجه به نتایج حجم کل رسوب خارج شده (شکل ۶ ب) نیمه‌استوانه‌های ۸ و ۱۰ اینچ راندمان پایین‌تری را نسبت به دیگر سازه‌ها ارایه می‌کند.

دلیل این کاهش را می‌توان به تغییر در شرایط گرداب‌ها، در قطرهای ۸ و ۱۰ اینچ بیان کرد زیرا براساس نتایج شهودی به دست آمده، در نیمه‌استوانه‌های ۸ و ۱۰ اینچ فقط یک گرداب و آن هم با آشفتگی بسیار دیده شده است و این نشان از کاهش قدرت گرداب‌ها دارد. پس می‌توان این گونه بیان کرد، که با افزایش قطر نیمه‌استوانه‌ها از قدرت گرداب‌ها هم کاسته می‌شود. براساس شکل ۶ ب بیشترین مقدار رسوب‌شویی در کل زمان فلاشینگ

آشکارا گرداب‌هایی با قدرت بالا داخل استوانه دیده می‌شوند علاوه بر این طول عمر این گرداب‌ها نیز بیشتر شده و تا انتقال کلیه رسوبات اطراف نیمه‌استوانه تا کف مخزن ادامه می‌یابد. حجم حفره فلاشینگ با اندازه گیری‌های صورت گرفته با استفاده از این نیمه‌استوانه به طور تقریبی ۱۵ برابر می‌شود. این در حالی است که سطح آب در یک سطح یکسان با فلاشینگ معمولی در پایان آزمایش قرار می‌گیرد (شکل ۵ ب).

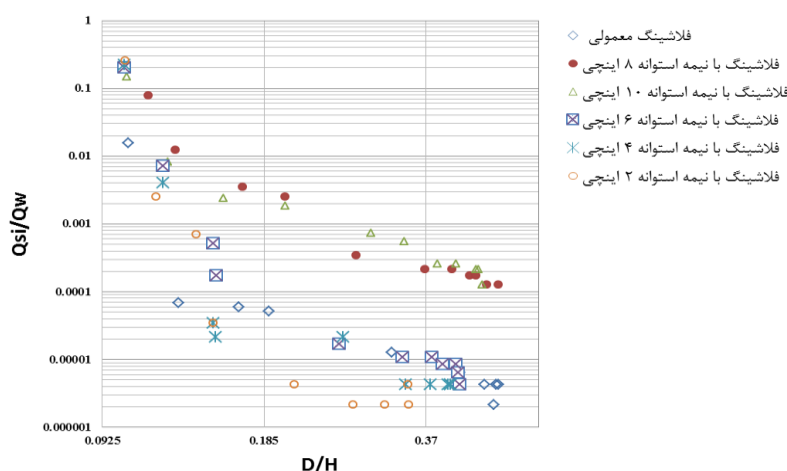
با تخلیه رسوبات اطراف نیمه‌استوانه (شکل ۵ ب) رسوبات بالادست حالت غیرپایدار به خود گرفته و به طرف دهانه نیمه‌استوانه شروع به لغزش می‌نمایند و هنگام نزدیک شدن به دهانه با گرداب‌های داخل نیمه‌استوانه به طرف بالا مکیده شده و به خارج از سد انتقال می‌یابند. در کلیه آزمایش‌های انجام شده دو دسته گرداب در دو طرف استوانه مشاهده می‌شود که با نتایج پاول (۲۰۰۷) به طور کامل همخوانی دارد. البته در نیمه‌استوانه‌های ۸ و ۱۰ اینچ این گرداب‌ها به یک گرداب بزرگ تبدیل شده و دیگر اثری از دو دسته گرداب نیست. در فلاشینگ معمولی، گرداب‌های کوچک ایجاد شده به طور کامل بعد از مقدار کمی فاصله گرفتن از زیر دریچه تحتانی (۱/۳ برابر مقدار بازشدگی دریچه) به کلی حذف می‌شوند. اما هنگام استفاده از این روش (استفاده از نیمه‌استوانه در جلوی دریچه تحتانی) گرداب‌ها تا ۶ برابر بازشدگی دریچه تحتانی در زیر دریچه مشاهده می‌شوند و حذف نمی‌شوند. با توجه مشاهدات صورت گرفته (شکل‌های ۵ الف و ب)، تقریباً ۹۰ درصد مقدار رسوب‌شویی در آزمایش‌ها در همان ۲ دقیقه اول اتفاق می‌افتد و بعد از گذشت ۵ دقیقه از آزمایش رسوب‌شویی تقریباً متوقف شده و حفره فلاشینگ حالت پایداری به خود می‌گیرد.



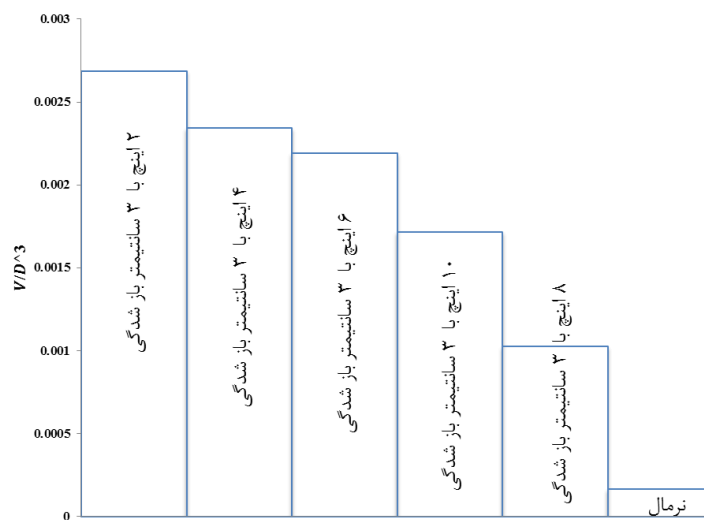
شکل ۵ الف- حفره فلاشینگ در فلاشینگ جزئی در حالت معمولی

دریچه‌های تحتانی را در ارتفاع‌های بالاتری نصب می‌کنند، که با این عمل رسوب‌شویی از مخزن را تا زمانی که مخزن در وضع حادی قرار گیرد (زمانی که رسوب به نزدیکی دریچه تحتانی برسد) به طور عملی غیرممکن می‌نماید. این در حالی است که با استفاده از این روش، این امکان وجود دارد که از همان ابتدای آب‌گیری سد، رسوب‌شویی نیز انجام شود و به همین دلیل می‌توان از حجم مرده مخزن‌ها به مقدار زیادی کاست.

به ترتیب متعلق به نیمه‌استوانه‌های ۲، ۴ و ۶ اینچی است. باید توجه داشت که تعیین بهترین قطر برای سازه نیمه‌استوانه‌ای به عوامل زیادی وابسته است که مهم‌ترین آن‌ها، ارتفاع قرارگیری دریچه تحتانی است. بدین گونه که با کاهش یافتن سطح نصب دریچه تحتانی، این امکان وجود دارد که مقدار قطر بهینه تعیین شده برای نیمه‌استوانه افزایش یابد زیرا تخلیه رسوبات در این حالت به گرداب‌هایی با قدرت کمتر نیاز دارد. در حال حاضر بسیاری از طراحان، برای افزایش عمر مفید مخزن‌ها،



شکل ۶ الف- مقایسه راندها فلشینگ جزئی در قطرهای متفاوت نیمه‌استوانه (با بازشدگی ۳ سانتی‌متر) با حالت معمولی



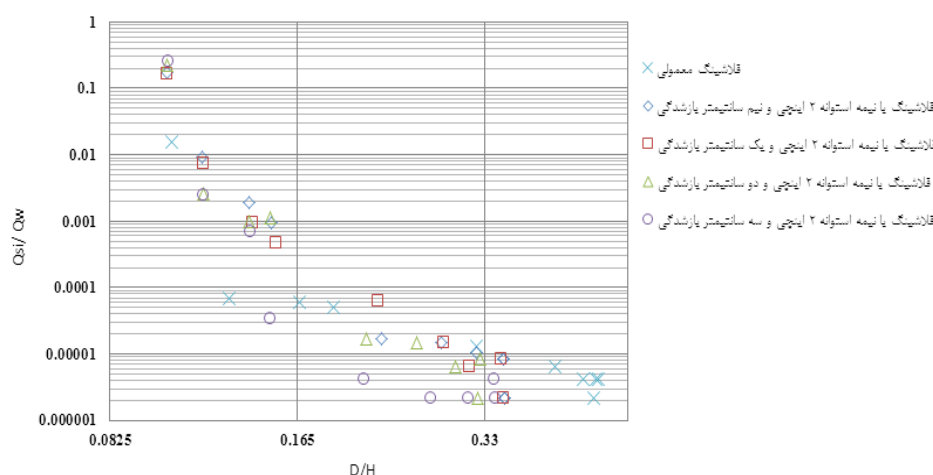
شکل ۶ ب- مقایسه بین حجم کل رسوب تخلیه شده در آزمایش‌های مختلف

متعلق به بازشدگی ۳ سانتی‌متری (0.2D) (شکل‌های ۷ الف و ۸ الف) است که راندها فلشینگ در این حالت به‌طور تقریبی ۱۶/۴ برابر مقدار رسوب‌شویی در حالت معمولی می‌شود. در بین نیمه‌استوانه‌های ۶ اینچی

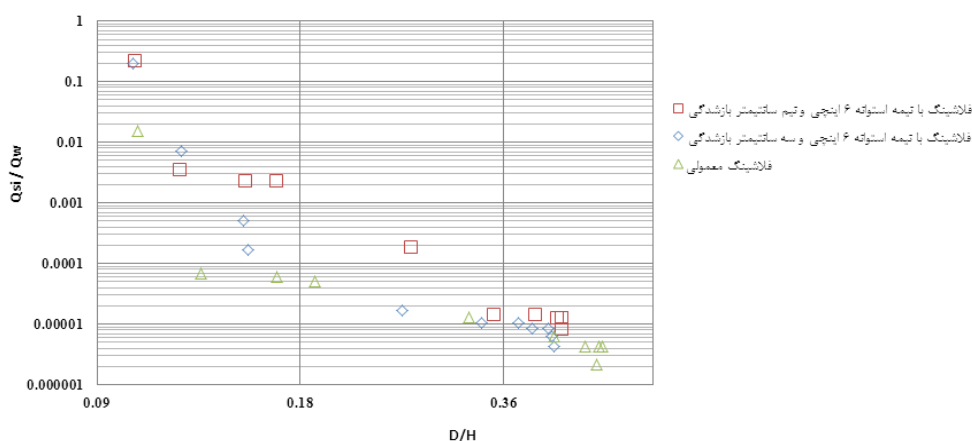
برای بررسی تأثیر میزان بازشدگی زیر سازه نیمه‌استوانه‌ای نیز آزمایش‌های زیادی بر روی نیمه‌استوانه‌های ۲ و ۶ اینچی به انجام رسید که نتایج نشان داد که بیشترین رسوب‌شویی در بین نیمه‌استوانه‌های ۲ اینچی (1D)،

برای افزایش راندمان نیمه‌استوانه، مساحت بازشدگی زیر نیمه‌استوانه باید حداقل برابر با مساحت بازشدگی دریچه تحتانی باشد تا بهترین عملکرد حاصل شود. هر چند که با کاهش مقدار بازشدگی زیر نیمه‌استوانه بر سرعت جریان عبوری افزوده می‌شود و در نتیجه بر شدت گرداب‌ها و رسوب‌شویی افزوده می‌شود (نتیجه به دست آمده توسط حاج حسینی و همکاران (۲۰۰۸)) اما این نکته را باید در نظر داشت که حد کاهش مساحت جریان ورودی (زیر نیمه‌استوانه) به اندازه مساحت جریان خروجی (دریچه تحتانی مخزن) بوده و کاهشی بیش از آن باعث ایجاد افت زیاد و کاهش راندمان خواهد شد.

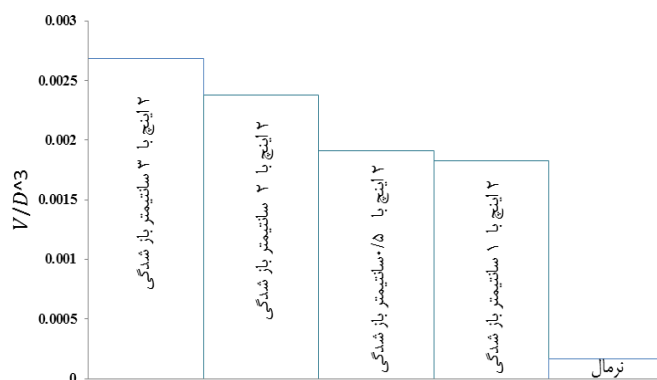
بیشترین رسوب‌شویی متعلق به بازشدگی نیم سانتی‌متری (شکل‌های ۷ ب و ۸ ب) بوده که راندمان فلاشینگ در این حالت به طور تقریبی $15/3$ برابر مقدار رسوب‌شویی در حالت معمولی می‌شود. دلیل این تفاوت را می‌توان با اندازه‌گیری مساحت بازشدگی نیمه‌استوانه و مقایسه آن با مقدار بازشدگی دریچه تخلیه مشخص کرد. با اندازه‌گیری‌های انجام شده مساحت زیر نیمه‌استوانه‌های ۲ اینچی با نیم، یک و دو سانتی‌متر بازشدگی از مساحت بازشدگی دریچه کمتر بوده ولی مساحت زیر نیمه‌استوانه ۶ اینچی با بازشدگی نیم سانتی‌متری تقریباً برابر با بازشدگی دریچه است. پس به طور کلی می‌توان گفت که



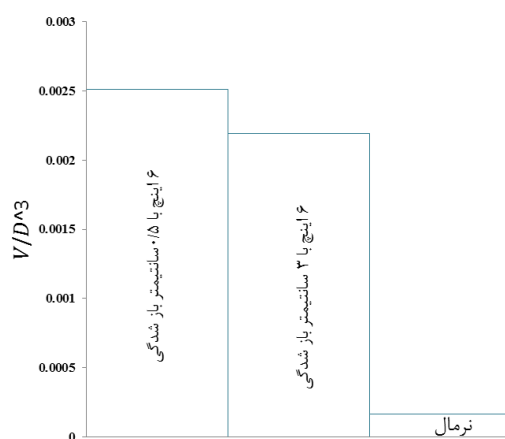
شکل ۷ الف - مقدار رسوب‌شویی در بازشدگی‌های متفاوت نیمه‌استوانه ۲ اینچی



شکل ۷ الف - مقدار رسوب‌شویی در بازشدگی‌های متفاوت نیمه‌استوانه ۲ اینچی



شکل ۸ الف - حجم کلی رسوب تخلیه شده در نیمه‌استوانه‌های ۲ اینچی (حفره فلاشینگ)



شکل ۸ ب - حجم کلی رسوب تخلیه شده در نیمه‌استوانه‌های ۶ اینچی (حفره فلاشینگ)

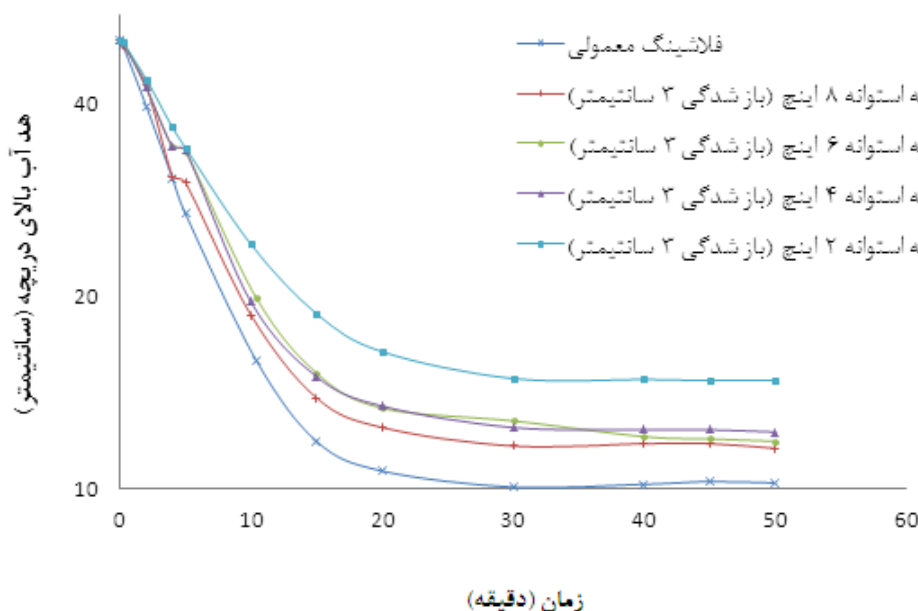
بسیاری از پژوهشگران از جمله پاول (۲۰۰۷) و جانسون (۱۹۹۹) نیز بیان شده است.

با توجه به شکل ۹ الف، نرخ کاهش سطح آب مخزن، در طی زمان کم می‌شود و تا دقیقه ۲۰ شیب این کاهش شدید بوده و پس از آن شیب کاهش سطح آب کم می‌شود. همچنین می‌توان گفت که با استفاده از سازه نیمه‌استوانه‌ای سطح آب در مدت زمان بیشتری تخلیه می‌شود و در نتیجه نیمه‌استوانه کوچک‌تر (۲ اینچ) کندترین فلاشینگ (کمترین مقدار هدررفت آب، بیشترین مقدار رسوب‌شویی) و حالت معمولی سریع‌ترین فلاشینگ (بیشترین مقدار هدررفت آب، کمترین مقدار رسوب‌شویی) را ایجاد می‌کند. همچنان که در شکل ۹ ب مشاهده می‌شود، بیشترین نرخ تخلیه جریان از مخزن در دقیقه ۲ (۴ درصد از کل زمان فلاشینگ) اتفاق می‌افتد. مقدار بسیار کمتر دبی جریان در اولین برداشت (شکل ۹ ب)،

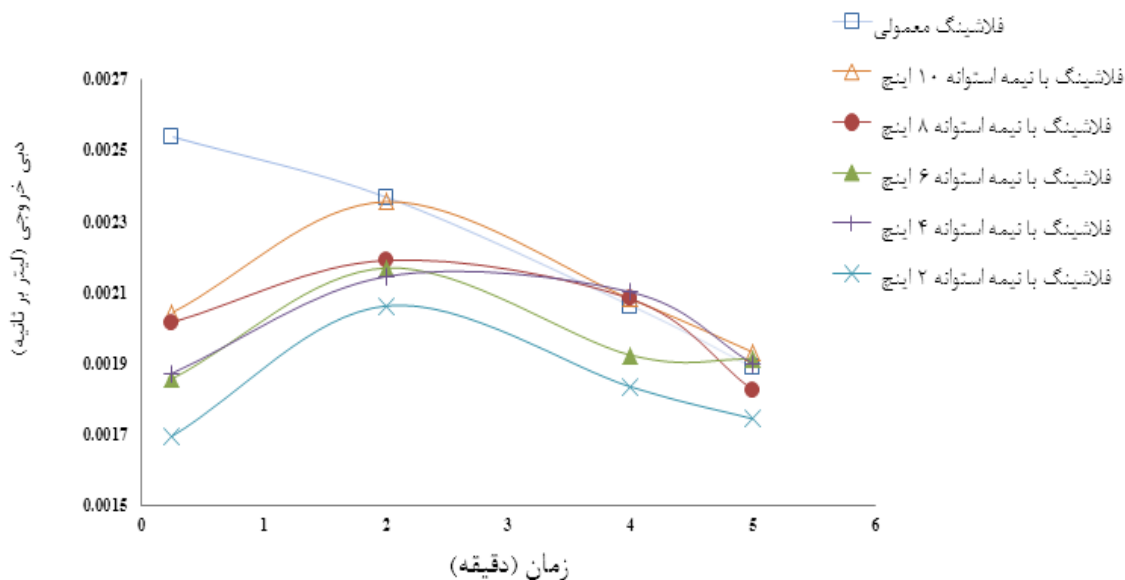
در این پژوهش برای بررسی تأثیر قطر نیمه‌استوانه‌ها، بر روی قدرت گرداب‌های ایجاد شده، از ذرات ۴ میلی‌متری شن ($D_{50} = 4 \text{ mm}$) با جرم مخصوص 2650 kg/m^3 استفاده شد. بدین گونه که در ابتدای هر آزمایش به تعداد ۸ دانه شن با ابعاد مشخص در بستر مخزن و در دهانه نیمه‌استوانه قرار داده شده و سپس بستر رسوبی روی مخزن پخش شد. پس از اجرای این آزمایش‌ها، مشاهده شد که فقط نیمه‌استوانه‌های ۲، ۴ و ۶ اینچ قادر به انتقال ذرات شنی ۴ میلی‌متری به خارج از مخزن بوده و نیمه‌استوانه‌های ۸ و ۱۰ اینچ قادر به انتقال کامل این ذرات به خارج از مخزن نیستند که نشان از کاهش قدرت گرداب‌ها با افزایش قطر نیمه‌استوانه می‌دهد. این تغییر از نیمه‌استوانه ۶ اینچ به بعد کاهش معناداری می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به کاهش در سرعت جریان با فاصله گرفتن از دریچه تحتانی نسبت داد. این نکته توسط

ذکر است این پدیده از مزیت‌های این روش است زیرا بیشترین مقدار رسوب‌شویی در همان ۲ دقیقه اول رخ می‌دهد و کمترین میزان هدررفت جریان آب نیز نسبت به حال معمولی فلاشینگ در همان زمان رخ می‌دهد.

هنگام استفاده از سازه نیمه‌استوانه‌ای در مقایسه با حالت معمولی فلاشینگ، می‌تواند در نتیجه تخلیه حجم زیادی از رسوب در این زمان باشد، که در دقیقه‌های ابتدایی باید کلیه رسوبات اطراف استوانه تخلیه شود. این حالت سبب کاهش مقدار دبی جریان، در دقایق اولیه می‌شود. قابل



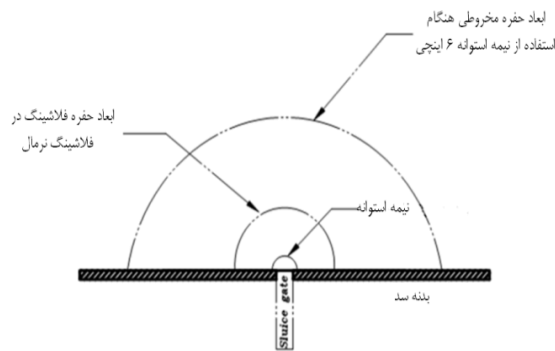
شکل ۹ الف- نرخ کاهش در در سطح آب مخزن



شکل ۹ ب- مقایسه دبی خروجی از دریچه تحتانی

مشاهده می‌شود، ابعاد حفره فلاشینگ به طرز چشم‌گیری در هنگام استفاده از سازه نیمه‌استوانه‌ای افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده از برداشت‌های توپوگرافی بستر مخزن، همچنان که در شکل ۱۰ و نیز جدول ۱



شکل ۱۰- ابعاد به دست آمده حفرة فلاشینگ

نتیجه دیگری که از اشکال حفرةهای فلاشینگ در این پژوهش به دست آمده است، شکل نیم‌بیضی این حفرة است و این تاییدی بر نتایج پاول (۲۰۰۷) است. زیرا نتایج وی نشان می‌داد که با افزایش نرخ H/D شکل حفرة از نیم‌دایره به سمت نیم بیضی تغییر شکل می‌دهد. در این آزمایش نیز از H/D بزرگ‌تری نسبت به آزمایش‌های پاول (۲۰۰۷) استفاده شده است که نتایج اندازه‌گیری حفرة فلاشینگ نشان از یک نیم‌بیضی می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه مشخصات حفرة فلاشینگ ایجاد شده در دو حالت معمولی و هنگام استفاده از سازه نیمه‌استوانه

ردیف	مشخصات نیمه‌مخروط فلاشینگ	حالت نرمال (cm)	حالت استفاده از نیمه استوانه ۶ اینچی (cm)
۱	قطر بزرگ نیمه‌مخروط فلاشینگ (بالای مخروط)	۳۰/۰	۹۵/۰
۲	قطر بزرگ نیمه‌مخروط فلاشینگ (کف مخروط)	۱۵/۴	۳۷/۰
۳	قطر کوچک نیمه‌مخروط (بالای مخروط)	۱۶/۵	۴۲/۰
۴	قطر کوچک نیمه‌مخروط (کف مخروط)	۷/۰	۱۷/۰
۵	ارتفاع نیمه‌مخروط	۵۳/۵	۶۵
۶	حجم کلی نیمه‌مخروط (سانتی‌مترمکعب)	۱۷۴۳/۰	۲۷۷۸۶/۰

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش افزایش راندمان فلاشینگ جزیی و در نتیجه آن افزایش رسوب‌شویی از مخزن بوده است که این مهم توسط نصب سازه‌ای نیمه‌استوانه‌ای با یک بازشدگی در کف در اطراف دریچه تحتانی میسر شد. با توجه به مورد آزمایش قرار گرفتن نیمه‌استوانه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ اینچی با بازشدگی‌های متفاوت نتایج کلی زیر حاصل شد:

۱- به عنوان یک نتیجه کلی، بهترین سازه، نیمه‌استوانه‌ای است که سطح وسیع‌تری از اطراف دریچه تخلیه را در معرض گرداب‌ها قرار می‌دهد و گرداب‌هایی ایجاد می‌کند که دارای قدرت کافی برای تخلیه رسوبات هستند.

۲- در این مطالعه (با سطح نصب دریچه تحتانی در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر یا $6D$ نسبت به کف مخزن)، نیمه‌استوانه ۲ اینچی با ۳ سانتی‌متر بازشدگی، با $16/4$ برابر افزایش در مقدار رسوب‌شویی بهترین نتیجه را به خود اختصاص داده است.

۳- تقریباً بیش از ۹۰ درصد مقدار رسوب‌شویی در فلاشینگ جزیی در کمتر از ۴ درصد زمان کل فلاشینگ کامل (۲ دقیقه اول آزمایش) انجام می‌شود.

۴- قدرت گرداب‌ها از نیمه‌استوانه ۶ اینچی ($3D$) به بعد دچار کاهش تغییر شکل و کاهش قدرت می‌شوند.

۵- با کاهش مقدار بازشدگی زیر نیمه‌استوانه بر مقدار رسوب‌شویی افزوده می‌شود اما این کاهش نباید کمتر از مساحت بازشدگی دریچه تحتانی باشد زیرا نتیجه معکوس می‌دهد.

۶- فلاشینگ (جزیی و کامل) در حالت معمولی، در صورتی که سطح رسوب مخزن به حدی بحرانی (نزدیکی دریچه تحتانی) نرسد، مؤثر نخواهد بود. اما با توجه به تخلیه رسوبات از کف مخزن در هنگام استفاده از سازه نیمه‌استوانه‌ای، از همان ابتدای آگیری می‌توان رسوبات انباشت شده در مخزن را به خارج از مخزن منتقل کرده و نیازی به پر شدن حجم مرده مخزن از رسوبات نیست.

۷- با توجه به تخلیه کامل رسوبات اطراف دریچه تحتانی، در این روش همواره می‌توان کارکرد مناسب این دریچه‌ها را تضمین کرد.

۸- در صورت کاربردی شدن این روش با توجه به تغذیه سازه نیمه‌استوانه از کف مخزن، دیگر نیازی به در نظر گرفتن یک حجم زیاد برای حجم مرده مخزن‌ها در طراحی‌ها نیست و این حجم به حجم مفید مخزن تبدیل می‌شود.

منابع

1. Golze A. R. 1977. Handbook of dam engineering. Van Nostrand Reinhold Company, Inc. 78 - 100.
2. Hajhosaini M. SalehiNeyshabouri S. A. A. and Gholami E. 2008. Numerical modeling of sluice gate opening and its effect on the amount of outlet sediment in the reservoirs. Water Resource Management 3th Conference, University of Tabriz, Iran. 10-15.
3. Hartmann S. 2004. Sediment Management of Alpine Reservoirs Considering Ecological And Economical Aspects. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18-21, 2004, Yichang.
4. Janssen R. H. A 1999. An Experimental Investigation of Flushing Channel Formation During Reservoir Drawdown. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. UMI Number: 973127. 147-161.
5. Jugović C. J. Strohmeier S. Schuster G. and Nachtnebel H. P. 2009. Hydraulic Flushing of Alpine Reservoirs– Model Study. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia, 1-5 September 2009.
6. Lai J. S. 1994. Hydraulic flushing for reservoir desaltation. Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley. 56-81.
7. Powell D. N. 2007. Sediment Transport Upstream of Orifice. Ph.D. Dissertation, Clemson University. UMI Number:38-76. 3290698. 168 p.
8. Rajaratnam N. and Humphries J. 1982. Free Flow Upstream of Vertical Sluice Gates. Journal of Hydraulic Research. 19(3):210-238.
9. White W. R. and Bettess R. 1984. The feasibility of flushing sediments through reservoirs. Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare symposium, July. IAHS publication. 144:577-587.
10. Wu C. M. 1989. Hydraulic properties of reservoir desalting. Proceedings of the 23rd IAHR Congress, Ottawa, B587-B593.135-145.