

Experimental Investigation of Temporal Development of the Sediment Flushing Cone in Reservoirs Affected by DBE Structure

HADI HAGHJOUEI¹, MAJID RAHIMPOUR^{1*}, KOUROSH QADERI¹, SAMEH A. KANTOUSH²

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2. Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University, Kyoto, Japan.

(Received: Apr. 3, 2020- Revised: July. 1, 2020- Accepted: July. 13, 2020)

ABSTRACT

Reduction of reservoir storage capacity due to high rate of sedimentation affects all the purposes of dam operation, such as hydropower energy production and seasonal flood control. Using some sediment management techniques are not economically and technically affordable and one of the main solutions, especially in arid and semi-arid regions, is pressurized flushing that faced with low efficiency as a main challenge. In this research a new structure named DBE was used for enhancing sediment removal efficiency. Therefore DBE structure with four different lengths and four diameters in three discharges mode was investigated. For carrying out the experiments, non-cohesive silica sediment with a median diameter of $D_{50} = 0.73 \text{ mm}$ was used and temporal development of sediment flushing cone was investigated. Finally the best dimensions of the structure that leads to creation of the maximum sediment flushing cone dimensions and the minimum scouring equilibrium time were presented. Also, time dependent dimensionless equations for calculating the sediment flushing cone dimensions were presented.

Keywords: Pressurized Flushing, Temporal Development of Sediment Flushing Cone, Scouring Equilibrium, Dendritic Bottomless Extended Structure.

بررسی آزمایشگاهی توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی در مخازن سدها تحت تأثیر سازه DBE

هادی حق‌جوئی^۱، مجید رحیم‌پور^{۱*}، کورش قادری^۱ و سامح احمد قنطوش^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲. موسسه تحقیقاتی پیشگیری از بحران (DPRI)، دانشگاه کیوتو، کیوتو، ژاپن.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۲۳)

چکیده

کاهش حجم مفید مخازن به دلیل نرخ بالای رسوب‌گذاری در مخازن سدها، کلیه اهداف بهره‌برداری سد از جمله تولید انرژی برق‌آبی و کنترل سیلاب‌های فصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این میان استفاده از برخی روش‌های مدیریت رسوب به دلایل فنی و اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و یکی از عمده‌ترین راهکارها بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از رسوب‌شویی تحت فشار می‌باشد که مهم‌ترین چالش پیش‌روی این روش، راندمان پایین رسوب‌شویی است. در این مقاله در راستای ارتقای راندمان رسوب‌شویی از یک سازه جدید موسوم به DBE^۱ استفاده شده است. در این خصوص سازه DBE با چهار طول، چهار قطر در سه حالت دبی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها از رسوبات غیرچسبنده با جنس سیلیس دارای قطر متوسط ۰/۷۳ میلی‌متر استفاده و توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی در آزمایش‌های انجام شده بررسی شد. در پایان بهترین مشخصه عملکرد سازه‌ای که منتج به بیشترین ابعاد مخروط رسوب‌شویی و کمترین مدت زمان تعادل آبشستگی شد، مشخص و روابط وابسته به زمان به منظور پیش‌بینی پارامترهای مخروط رسوب‌شویی ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌شویی تحت فشار، توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی، تعادل آبشستگی، سازه DBE، مخروط رسوب‌شویی.

مقدمه

پس از ورود یک رودخانه به مخزن، سطح مقطع جریان افزایش و سرعت آن کاهش می‌یابد، بنابراین ظرفیت انتقال رسوب کاهش یافته و منجر به ته‌نشینی رسوبات می‌شود (Annandale, 2005). مهمترین اثر رسوب‌گذاری در مخازن، کاهش ظرفیت ذخیره سد است که بر تأمین آب، تولید انرژی برق‌آبی و کنترل سیلاب تأثیرگذار خواهد بود (Dreyer and Basson, 2018). علاوه بر کاهش حجم مفید مخازن، رسوب‌گذاری در مخزن پیامدهای دیگری نیز دارد که از آن جمله می‌توان به ورود رسوبات به دریچه‌های نیروگاه و اختلال در کار توربین‌ها و خوردگی آن‌ها، انسداد و گرفتگی آبگیرها، افزایش تراز بستر در بالادست مخزن و به دنبال آن گسترش دامنه و پهنه سیلاب، افزایش بار اضافی روی بدنه سد و موارد دیگر اشاره کرد (Morris and Fan, 2009). از طرف دیگر افزایش سطح آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت طبیعی رودخانه در کنترل سیلاب و انحراف یا عقب‌نشینی آب مجموعه ای از آثار منفی رسوب‌گذاری در بالادست سد است (Tigerk et al., 2009). تحقیقات میدانی گسترده بر سدهای ژاپن در خصوص

تأثیر رسوب‌گذاری بر استحصال انرژی برق‌آبی، نشان می‌دهد رسوب‌گذاری تأثیرات زیان‌آوری بر راندمان کاربرد آب هم در ظرفیت ذخیره و هم آبرسانی به تجهیزات سد ایجاد می‌کند (Okumura and Sumi, 2012). رسوبات انباشته‌شده پشت سد همچنین می‌تواند پایداری سازه را به دلیل اعمال فشارهای اضافی تحت تأثیر قرار دهد و همچنین فعل و انفعالات شیمیایی ایجادشده در رسوبات می‌تواند بر بتن و پوشش سطحی بدنه تأثیرگذار باشد (Schellenberg et al., 2017).

در تحقیقات مختلفی در جهان، روش‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که هرکدام تأثیرات و محدودیت‌های خاص خود را به همراه دارد (Basson & Rooseboom, 1999; Morris & Fan, 2009; Sumi, 2015; Morris, 2010; Morris, 2015). فلاشینگ به عنوان روش هیدرولیکی تخلیه رسوب در سد از طریق دریچه تحتانی تعریف شده و از نظر تقسیم‌بندی به دو نوع آزاد و تحت فشار تقسیم‌بندی می‌شود (Morris and Fan, 2009). در خصوص تفاوت بین این دو نوع رسوب‌شویی، اگر هدف عاری کردن آبگیرها از رسوب باشد،

تحتانی، بر افزایش راندمان رسوب‌شویی پرداختند و حجم رسوبات تخلیه‌شده و راندمان رسوب‌شویی را به میزان ۱۶۱٪ افزایش دادند. علی‌رغم تحقیقات مختلف صورت گرفته در خصوص تعادل آبشستگی و توسعه زمانی آن در حفاظت رودخانه و پایه‌های پل، این مورد در بررسی توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی تحت فشار کمتر مورد مطالعه قرار گرفته که در این خصوص شاخص‌ترین مطالعه صورت گرفته مربوط به تحقیق Meshkati *et al.* (2009) است، که در آن نویسندگان به بررسی تغییرات زمانی گسترش مخروط رسوب‌شویی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که در یک ارتفاع ثابت آب مخزن و در یک زمان مشخص، میزان عمق آبشستگی در دبی تخلیه بزرگتر، بیشتر و زمان رسیدن به تعادل کمتر است. هدف از این تحقیق بررسی توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی تحت تأثیر سازه جدیدی به نام DBE است که ویژگی بارز آن قابلیت رسوب‌شویی در جهات مختلف مخزن علاوه بر راستای طولی مخزن است که با توجه به وصل شدن انشعابات سازه به یک نقطه مشخص، علاوه بر ایجاد گردابه در راستای هر کدام از شاخه‌ها، منجر به تقویت قدرت گردابه‌ها در جریان خروجی نیز خواهد شد و ابعاد مخروط رسوب‌شویی افزایش خواهد یافت.

مواد و روش‌ها

شرح مدل فیزیکی

به منظور بررسی تأثیر سازه‌ای و میزان رسوب‌شویی تحت فشار، مدل فیزیکی و هیدرولیکی مخزن سد و آبگذر در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شد. مدل فیزیکی مذکور به شکل مکعب مستطیل و دارای ابعاد ۷/۵ متر طول، ۳/۵ متر عرض و ۱/۸ متر ارتفاع و از قسمت‌های عمده‌ای شامل مخزن اصلی، آبگذر، محفظه تله اندازی رسوب، نواحی آرام‌کننده جریان در ورودی مخزن اصلی و آبگذر، کنتور حجمی اندازه‌گیری جریان ورودی و سرریز مثلی اندازه‌گیری جریان خروجی تشکیل شده است (شکل ۱).

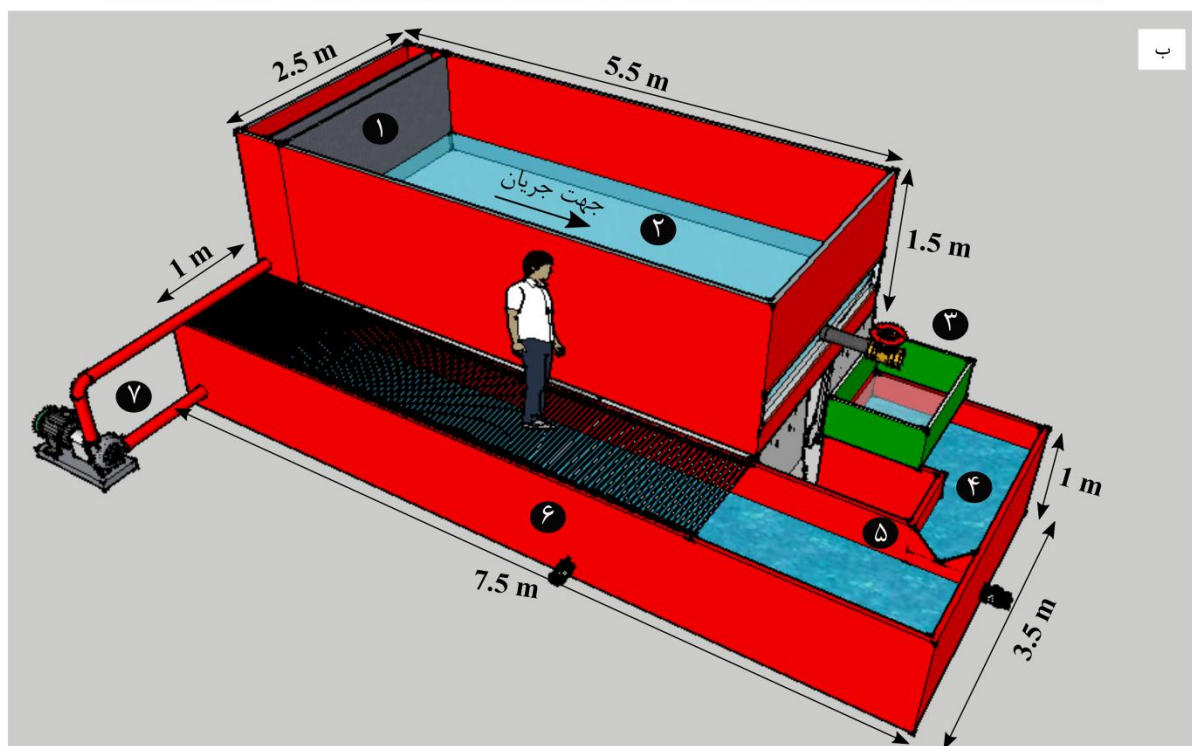
در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از ابتدای مخزن دو صفحه مشبک برای کاهش تلاطم جریان ورودی به مخزن و آرام کردن جریان ورودی قرار گرفته است. در قسمت جلویی و کناری مدل به منظور مشاهده هر چه بهتر وضعیت جریان و نحوه تخلیه رسوب، از شیشه لایننت با ضخامت ۲۲ میلی‌متر استفاده شده است و در قسمت جلو دریچه خروجی دایره‌ای شکل به قطر ۱۲۰ میلی‌متر تعبیه

این روش به طور قطع بهترین گزینه برای مخازنی است که تخلیه‌کننده تحتانی زیر دریچه‌های آبگیر قرار گرفته است، زیرا نسبت به روش رسوب‌شویی آزاد، آب بسیار کمتری مصرف می‌کند (Kondolf *et al.*, 2014; Morris, 2015). رسوب‌شویی تحت فشار می‌تواند ظرفیت از دست رفته مخزن سد را احیا کرده و منجر به برنامه‌ریزی زمانی مناسبی برای تزریق رسوب در پایین دست و حفظ شرایط زیست‌محیطی آن شود (Espa *et al.*, 2019).

در خصوص رسوب‌شویی تحت فشار و عوامل تأثیرگذار بر افزایش راندمان و حجم رسوب‌شویی، تحقیقات متعددی صورت گرفته است که بیشتر این تحقیقات، شامل بررسی تأثیرات عوامل هیدرولیکی نظیر ارتفاع آب روی دریچه تحتانی، دبی خروجی، شکل و قطر دریچه، نوع و ارتفاع رسوبات بالای دریچه بر مکانیزم و توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی است (Dreyer., 2018; Powell and Khan, 2015). نکته مشابه تمامی این تحقیقات بررسی شرایط تأثیرگذار موجود مخزن و عدم بررسی عوامل تأثیرگذار خارجی بر ایجاد گردابه و تلاطم و افزایش خروج رسوبات بود. در خصوص عوامل تأثیرگذار خارجی بر افزایش راندمان رسوب‌شویی تحقیقات نسبتاً محدودی در دنیا صورت گرفته است (Ahadpour Dodaran *et al.* (2012); Althaus *et al.* (2014)) که ویژگی مشترک تحقیقات مذکور افزایش راندمان رسوب‌شویی با استفاده از انرژی برق است. شاخص‌ترین تحقیق صورت گرفته در خصوص افزایش راندمان رسوب‌شویی بدون صرف انرژی و در قالب تمهیدات سازه‌ای، تحقیقات (Madadi *et al.* (2016, 2017)) است که نویسندگان مقاله تأثیر یک گروه پایه دایره‌ای شکل و سازه^۱ PSC را در افزایش راندمان رسوب‌شویی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده و در خصوص گروه پایه دریافته‌اند زمانی که قطر پایه‌ها و فاصله آنها یکسان باشد بهترین نتیجه حاصل می‌شود و استفاده از گروه پایه‌ها در رسوب‌شویی مخزن منجر به افزایش ۲۵۰ درصدی رسوب‌شویی در مقایسه با حالت شاهد (بدون سازه) خواهد شد. نویسندگان مقاله در خصوص سازه PSC به این نتیجه رسیدند که این سازه گردابه‌های افقی ایجاد شده در تحقیقات (Powell (2007)) را به گردابه‌های عمودی تبدیل می‌کند و بیشترین میزان رسوب‌شویی زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت بدون بعد طول سازه به قطر خروجی $(\frac{L_{SC}}{D_0})$ برابر ۵/۲۶ و نسبت بدون بعد قطر سازه به قطر خروجی $(\frac{D_{SC}}{D_0})$ برابر ۱/۳۲ باشد، که در این حالت حجم مخروط رسوب‌شویی ۴/۵ برابر آزمایش شاهد است. (Fard Shiraye and Abbasi (2019)) به بررسی تأثیر سازه SFM^۲ یعنی استفاده از دو ردیف شمع موازی در بالادست دریچه

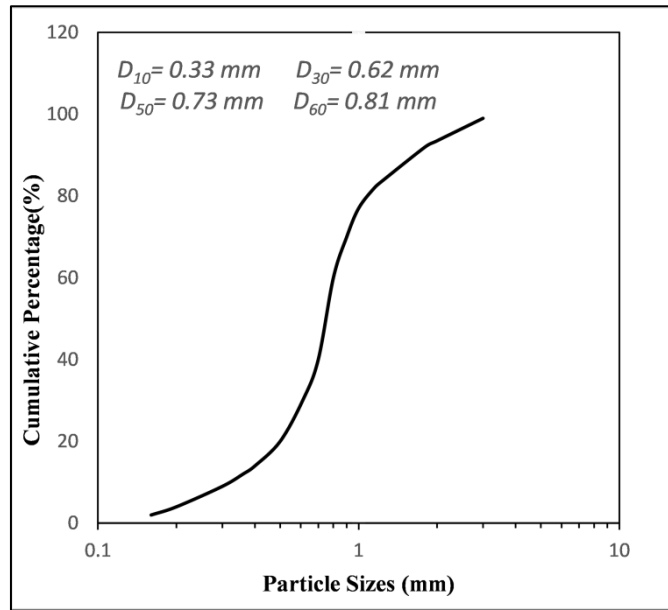
است. جریان رسوبی پس از عبور از لوله خروجی ابتدا وارد بخش رسوب‌گیر شده و سپس وارد ناحیه آرام‌کننده می‌شود.

شده که لوله خروجی مخزن با قطر ۱۱۰ میلی‌متر از آن عبور کند. برای اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی به ترتیب از یک کنتور حجمی و یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه استفاده شده



شکل ۱- الف) مدل فیزیکی مخزن سد و آبگذر و ب) طرح شماتیک مدل شامل ۱: ناحیه آرام‌کننده جریان ورودی، ۲: مخزن اصلی و رسوب، ۳: محفظه تله اندازه‌گیری رسوب، ۴: ناحیه آرام‌کننده جریان خروجی، ۵: سرریز مثلثی، ۶: آبگذر و ۷: پمپ و کنتور حجمی

گرم بر سانتی مترمکعب، وزن مخصوص حقیقی ۲/۵۶۴ گرم بر سانتی مترمکعب و نسبت جذب آب ۰/۹ درصد است (شکل ۲).

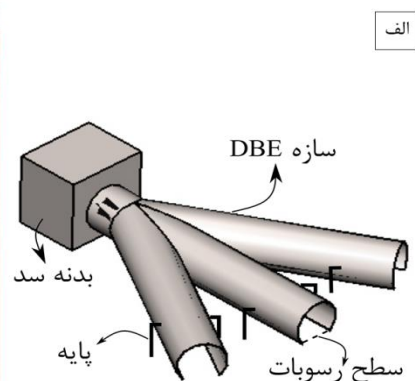
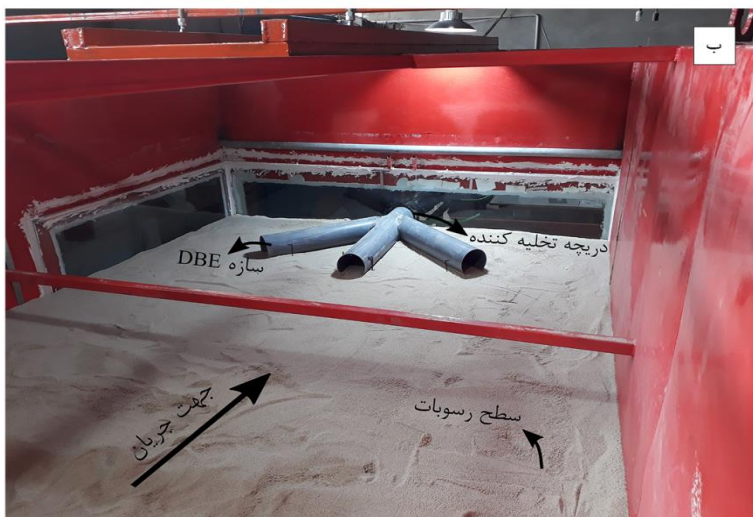


شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ذرات سیلیس استفاده شده در آزمایش

منتقل می‌شود که این موضوع بیانگر جلوگیری از تمرکز تنش بر محور مرکزی سازه و افزایش پایداری سازه در مقابل نیروهای وارده است. در این تحقیق با توجه به ثابت بودن ارتفاع رسوبات منطبق بر لبه پایینی دریچه تخلیه‌کننده، سطح پایینی سازه نیز دقیقاً منطبق بر رسوبات است. در این سازه جریان آب در هنگام عبور از محدوده داخلی سازه با بستر در تماس است. در تحقیق حاضر سازه‌های DBE با طول‌های ۳۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر و قطرهای ۱۲۵، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و زاویه ۳۰ درجه بین شاخه‌ها طراحی و ساخته شده است.

سازه DBE

در این تحقیق از سازه DBE استفاده شده است تا تأثیر این سازه بر رسوب‌شویی مخزن در جهات مختلف شامل طولی و عرضی بررسی شود. سازه از یک طرف به دریچه تخلیه‌کننده تحتانی و از طرف دیگر از طریق پایه‌های فلزی به رسوبات داخل مخزن منتهی شده است (شکل ۳). مشابه سازه PSC استفاده شده در تحقیقات مددی و همکاران (۲۰۱۷)، سازه DBE از لوله‌هایی که قسمت تحتانی آن حذف شده، تشکیل شده است و به دلیل مقطع دایره‌ای شکل کلیه نیروهای وارد بر سازه شامل نیروی هیدرواستاتیک و نیروی ناشی از وزن رسوبات از طریق پایه‌ها به بستر مخزن



شکل ۳- الف) شمای کلی سازه DBE و ب) نحوه قرارگیری آن در مخزن

تحلیل ابعادی

$$\frac{V_c}{D_o^3} = f_2\left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}}, \frac{H_w}{D_o}, \frac{H_s}{D_o}, \frac{D_{50}}{D_o}, \frac{D_{DBE}}{D_o}, \frac{L_{DBE}}{D_o}, \frac{t}{T_e}, \theta, N, G_s, Re\right)$$

که در آن Re عدد رینولدز جریان خروجی و G_s نسبت چگالی ذرات رسوب به چگالی آب است، نظر به اینکه در تمام آزمایش‌ها از رسوب یکنواخت استفاده شده است از تأثیر پارامتر G_s می‌توان صرف‌نظر کرد. همچنین عدد رینولدز جریان خروجی از درجه تخلیه، کاملاً متلاطم است بنابراین می‌توان از تأثیر عدد رینولدز چشم‌پوشی کرد (مددی و همکاران، ۱۳۹۵). در این تحقیق همچنین ارتفاع آب روی دریاچه (H_w)، اندازه متوسط ذرات رسوب (D_{50})، قطر دریاچه تخلیه (D_o)، ارتفاع رسوب (H_s) و زاویه بین شاخه‌ها (θ) ثابت در نظر گرفته شده است، بنابراین رابطه ۳ را می‌توان به صورت رابطه ۴ نوشت:

$$\frac{V_c}{D_o^3} = f_3\left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}}, \frac{D_{DBE}}{D_o}, \frac{L_{DBE}}{D_o}, \frac{L_{DBE}}{D_o}, \frac{t}{T_e}\right)$$

بنابراین بررسی تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی بر اساس تغییرات طول و قطر سازه و دبی خروجی اهداف اصلی تحقیق حاضر می‌باشند.

نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها برای سه دبی ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۸ لیتر بر ثانیه، چهار طول سازه ۳۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر و چهار قطر ۱۲۵، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر انجام شده است. بنابراین مجموع آزمایش‌ها برابر ۴۸ آزمایش است که اطلاعات مربوط به آزمایش‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

در این تحقیق هدف افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی با استفاده از سازه DBE متصل به دریاچه تخلیه می‌باشد. اساس کار این سازه افزایش اندرکنش جریان و رسوب، ایجاد گردابه‌ها، تلاطم کامل جریان و بردارهای سه‌بعدی سرعت جریان است. در سازه افقی DBE حجم مخروط رسوب‌شویی (V_c) در مصالح غیرچسبنده به عواملی از جمله دبی جریان خروجی از دریاچه تخلیه (Q_o)، ارتفاع آب روی دریاچه (H_w)، ارتفاع رسوب روی دریاچه (H_s) اندازه متوسط ذرات رسوب (D_{50})، جرم مخصوص سیال (ρ_w)، جرم مخصوص رسوب (ρ_s)، لزوجت دینامیکی سیال (μ)، شتاب گرانش ثقل (g)، قطر دریاچه تخلیه (D_o)، قطر سازه (D_{DBE})، طول سازه (L_{DBE}) مدت زمان تعادل آبشستگی (T_e)، مدت زمان انجام هر آزمایش (t)، زاویه بین شاخه‌های سازه (θ) و تعداد شاخه‌ها (N) بستگی دارد:

(رابطه ۱)

$$V_c = f(Q_o, H_w, H_s, D_{50}, \rho_w, \rho_s, \mu, g, D_o, D_{DBE}, L_{DBE}, T_e, t, \theta, N)$$

بر اساس آنالیز ابعادی و تئوری π باکینگهام رابطه ۲ حاصل می‌شود:

(رابطه ۲)

$$\frac{V_c}{D_o^3} = f_1\left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}}, \frac{H_w}{D_o}, \frac{H_s}{D_o}, \frac{D_{50}}{D_o}, \frac{D_{DBE}}{D_o}, \frac{L_{DBE}}{D_o}, \frac{Q_o t}{D_o^3}, \frac{Q_o T_e}{D_o^3}, \theta, N, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{4\rho Q_o}{\mu \pi D_o}\right)$$

رابطه ۲ را می‌توان بر اساس پارامترهای جایگزین و ساده-سازی به صورت رابطه ۳ بازنویسی کرد:

(رابطه ۳)

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	L_{DBE} (cm)	دبی خروجی (L/s)	شماره آزمایش	L_{DBE} (cm)	دبی خروجی (L/s)	شماره آزمایش	L_{DBE} (cm)	دبی خروجی (L/s)
۱			۱۷			۲	۳۰	۱۸
۲	۳۰		۱۸	۳۰		۳	۳۰	۱۹
۳	۳۰		۱۹	۳۰		۴	۳۰	۲۰
۴	۳۰		۲۰	۳۰		۵	۳۰	۲۱
۵	۳۰		۲۱	۳۰		۶	۳۰	۲۲
۶	۳۰		۲۲	۳۰		۷	۳۰	۲۳
۷	۳۰		۲۳	۳۰		۸	۳۰	۲۴
۸	۳۰	۱۲/۵	۲۴	۳۰	۱۲/۵	۹	۳۰	۲۵
۹	۳۰	۱۲/۵	۲۵	۳۰	۱۲/۵	۱۰	۳۰	۲۶
۱۰	۳۰	۱۲/۵	۲۶	۳۰	۱۲/۵	۱۱	۳۰	۲۷
۱۱	۳۰	۱۲/۵	۲۷	۳۰	۱۲/۵	۱۲	۳۰	۲۸
۱۲	۳۰	۱۲/۵	۲۸	۳۰	۱۲/۵	۱۳	۳۰	۲۹
۱۳	۳۰	۱۲/۵	۲۹	۳۰	۱۲/۵	۱۴	۳۰	۳۰
۱۴	۳۰	۱۲/۵	۳۰	۳۰	۱۲/۵	۱۵	۳۰	۳۱
۱۵	۳۰	۱۲/۵	۳۱	۳۰	۱۲/۵	۱۶	۳۰	۳۲
۱۶	۳۰	۱۲/۵	۳۲	۳۰	۱۲/۵			

عمودی (سه ردیف افقی و چهار ردیف عمودی) و دوربین عکاسی پیشرفته با قابلیت کنترل از راه دور، عکس‌ها ثبت گردید. سپس عکس‌ها به صورت سه بعدی تحلیل و خروجی آن به صورت پروفیل سه بعدی ترسیم گردید. به منظور تحلیل خطاهای ناشی از اندازه‌گیری در تکنیک کاوش تصویر در ابتدا به تحلیل و صحت سنجی اندازه‌گیری حجم یک مکعب با ابعاد مشخص پرداخته شد. در این خصوص خطای اندازه‌گیری داده‌ها ۱/۴ میلی‌متر در یک فاصله ۴۰ سانتی‌متری تعیین شد. نتایج با خطای اندازه‌گیری دستگاه اسکنر سه بعدی DPI-8 استفاده شده در تحقیقات (Dreyer, 2018) مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۲)، که این مقایسه بیانگر دقت مناسب تکنیک اندازه‌گیری و برداشت توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی تحقیق حاضر است.

رسوبات با توجه به خط‌کش‌های نصب‌شده در مخزن به سطح موردنظر می‌رسد. به منظور جلوگیری از برهم خوردن وضعیت رسوبات در ابتدای هر آزمایش از یک پمپ کف کش با دبی کم استفاده شده است، پس از اینکه سطح آب مخزن به میزان موردنظر رسید پمپ گریز از مرکز روشن و دریچه تخلیه باز می‌شود. بار آبی استفاده شده برای تمامی آزمایش‌ها به صورت یکسان ۵۵ سانتی‌متر است.

برای اندازه‌گیری سطح آب از عمق سنج دستی با دقت ۱ میلی‌متر و خط‌کش‌های نصب‌شده در کناره‌های مخزن استفاده شده است. به منظور برداشت توپوگرافی مخروط رسوب‌شویی در هر آزمایش از تکنیک کاوش تصویر^۱ استفاده شده است. به صورتی که پس از اتمام هر آزمایش و اطمینان از تخلیه کامل مخزن اصلی با استفاده از ریل حرکت دوربین، با فاصله‌های مشخص افقی و

جدول ۲- تحلیل خطای تکنیک کاوش تصویر (درصد)

تکنیک کاوش تصویر		دستگاه اسکنر سه بعدی DPI-8		محدوده اندازه‌گیری (m)
حداقل خطا	خطای اندازه‌گیری (RMSE)	حداقل خطا	خطای اندازه‌گیری (RMSE)	
۰/۵۱	۰/۲۶	۰/۵۰	۰/۲۰	کمتر از ۱
۰/۵۸	۰/۳۱	۰/۸۰	۰/۵۰	بین ۱ تا ۲

حرکت جریان از شاخه‌های منشعب و رسیدن به یک نقطه متمرکز در نزدیک دریچه، منجر به ایجاد گردابه قوی به خصوص در زیر دریچه خروجی می‌شود. همچنین در طول شاخه‌ها به دلیل اختلاف فشار بیرون و درون سازه، فرسایش ایجاد شده از نوع پایپینگ در دو طرف و طول سازه است. اثرات عبور دبی از دریچه تخلیه کننده تحتانی به صورت زیر تشریح می‌کند: (۱) تأثیر موضعی دریچه تخلیه کننده تحتانی (۲) یک حرکت کلی در بخش عمده مخزن. در طول رسوب شویی تحت فشار فقط تأثیر موضعی (مکانی) دریچه تخلیه کننده تحتانی، منجر به حذف رسوب از مخزن سد می‌شود و فاصله‌ای که این تأثیر مکانی بر رسوبات عمل می‌کند خیلی محدود است و نمی‌تواند رسوبات موجود در بخش عمده‌ای از مخزن را درگیر کند. در این تحقیق استفاده از سازه و شاخه‌های داخل مخزن بر حرکت مخروط رسوب‌شویی در بخش عمده مخزن تأثیرگذار است و عملاً محدودیت ذکر شده در منابع تحقیقاتی صورت گرفته بر روی رسوب شویی تحت فشار را تا حد زیادی مرتفع می‌کند.

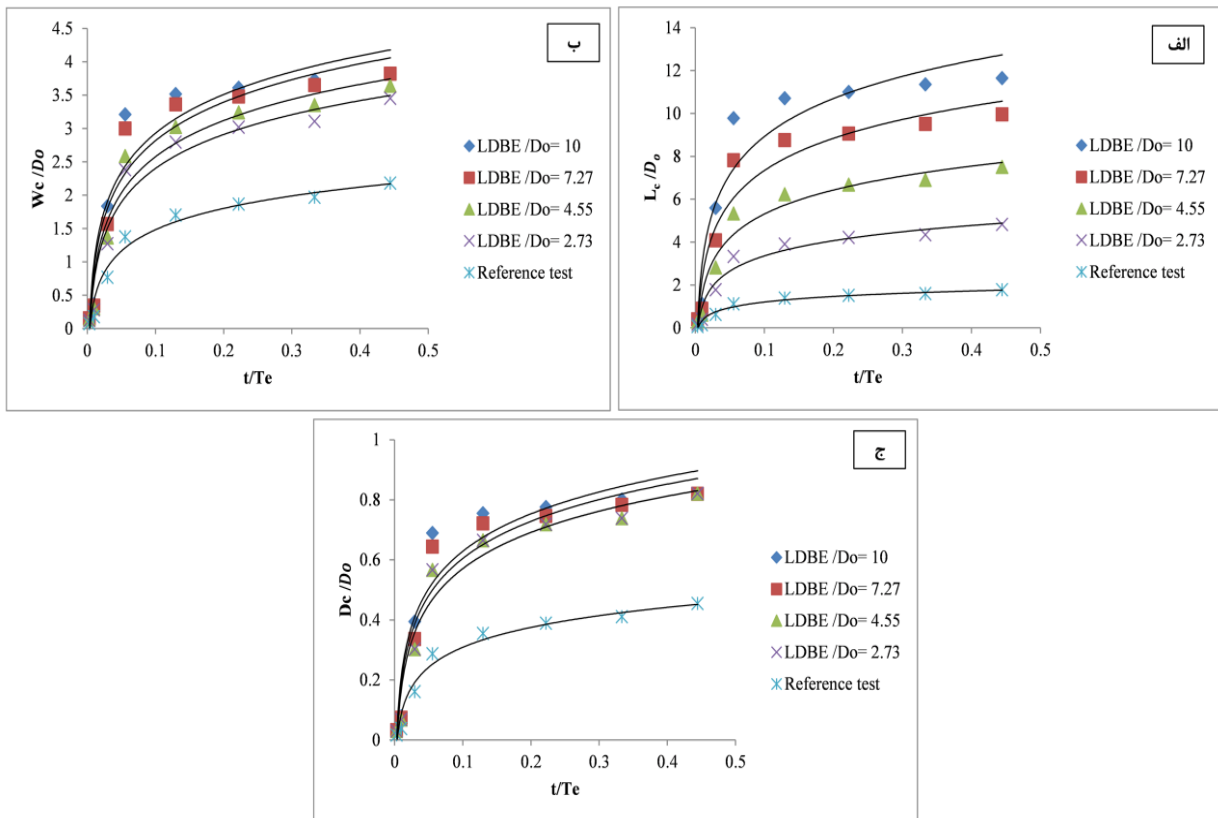
بررسی توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی ایجاد شده تحت تأثیر افزایش طول و قطر سازه

نتایج و بحث

توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی آزمایش‌های مندرج در جدول (۲)، با استفاده از تصویربرداری مداوم در طول آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است، در این خصوص در ابتدا با بررسی دقیق فیلم اجرای آزمایش به صورت بلندمدت، مدت زمان تعادل آبشستگی ۲۷۰ دقیقه بدست آمد. محاسبات مربوط به توسعه زمانی آزمایش‌ها در زمان‌های ۰/۸۷، ۲/۶۷، ۸، ۱۵، ۳۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه انجام و بررسی‌های لازم صورت گرفت. نقطه مشترک کلیه آزمایش‌ها این است که به صورت متوسط در یک بازه زمانی ۱۵ دقیقه حدود ۸۰ درصد و در بازه زمانی ۳۵ دقیقه حدود ۹۰ درصد عملیات رسوب‌شویی انجام می‌گردد. با شروع آزمایش ابتدا حجمی از رسوبات تحت تأثیر باز شدن دریچه و ایجاد تلاطم زیاد و سرعت بالای جریان خروجی از مخزن تخلیه شد، لازم به ذکر است این مرحله زمانی کمتر از یک دقیقه به طول انجامید که با تحقیقات گذشته نظیر تحقیقات Madadi et al. (2017) مطابقت دارد. مرحله بعد تأثیر همزمان گردابه‌ها و جریان خروجی است که این گردابه‌ها در زیر و دو طرف دریچه خروجی با عملکرد متناوب منجر به تخلیه رسوبات می‌شود.

طول بدون بعد مخروط رسوب شویی $(\frac{L_c}{D_o})$ با افزایش حداکثری ۶/۶ برابری نسبت به آزمایش شاهد و ۲/۴ برابری نسبت به طول بدون بعد ۲/۷۳ سازه مواجه شده و رسوب شویی زودتر به تعادل می‌رسد. همچنین در اثر افزایش این طول، عرض بدون بعد مخروط رسوب شویی $(\frac{W_c}{D_o})$ با افزایش حداکثری ۱/۷۵ برابری و عمق بدون بعد مخروط $(\frac{D_c}{D_o})$ با افزایش حداکثری ۲/۱ برابری نسبت به آزمایش شاهد همراه است.

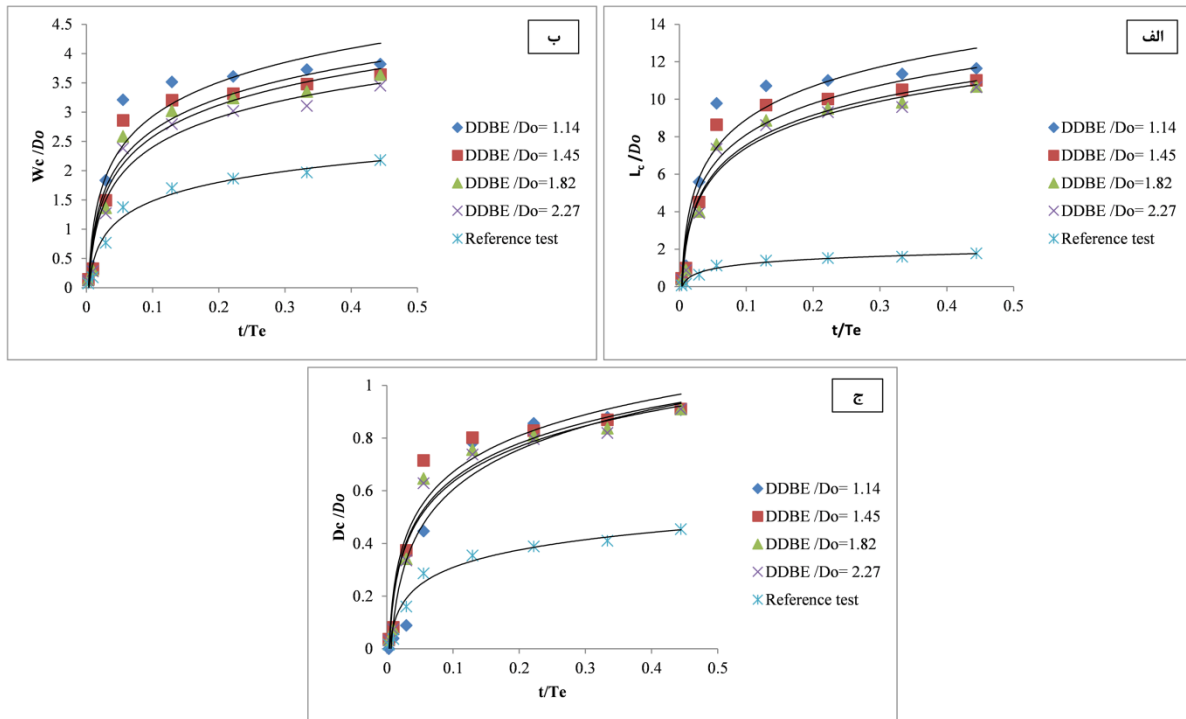
پس از انجام هر آزمایش علاوه بر عکس برداری از نقاط مختلف، حداکثر طول، عرض و عمق مخروط رسوب شویی نیز اندازه گیری شد و بر این اساس برای حالات مختلف تغییرات طول و قطر سازه DBE، سه نمودار مربوط به تغییرات طول، عرض و عمق مخروط رسوب شویی تهیه شد (شکل ۴). با بررسی توسعه زمانی مخروط رسوب شویی به صورت یکپارچه، نتیجه حاکی از آن است که با افزایش مشخصه بدون بعد طول سازه $(\frac{L_{DBE}}{D_o})$ از ۲/۷۳ به ۱۰،



شکل ۴- تغییرات (الف) طول، (ب) عرض و (ج) عمق مخروط رسوب شویی با افزایش شاخص بدون بعد طول سازه DBE

به دلیل کاهش سطح مقطع جریان سرعت بیشتری ایجاد شده و به تناسب آن تنش برشی و نیروی ناشی از آن افزایش می‌یابد. این سرعت منجر به کنده شدن ذرات رسوب و قرارگیری آنها در حالت تعلیق می‌شود و این منجر به افزایش تأثیر سرعت در خروج رسوبات شده و در عمل محدودیت اعلام شده در تحقیقات (Morris, 2015) مبنی بر تأثیر کم سرعت به منظور خروج رسوبات در رسوب شویی تحت فشار مرتفع می‌گردد. در این تحقیق قطر با ابعاد بدون بعد ۱/۱۴ به عنوان قطر بدون بعد بهینه بدست آمد. همچنین در دبی یکسان، تغییرات عرض و عمق مخروط رسوب شویی در حالات مختلف افزایش قطر سازه تفاوت چشمگیری با هم نداشته‌اند و روند نسبتاً ثابتی را نشان می‌دهند.

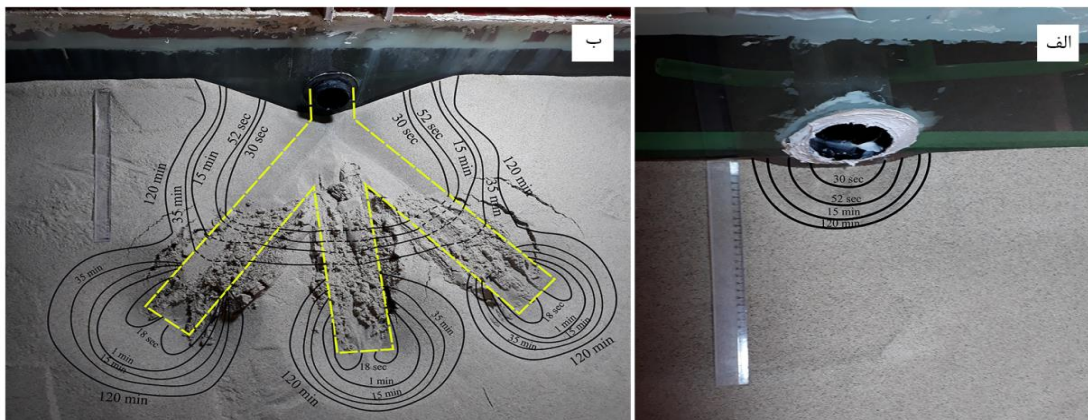
اگرچه تغییرات طول نشان دهنده تفاوت عمق و عرض مخروط رسوب شویی با حالت بدون سازه است، اما نکته قابل ملاحظه اینکه در دبی یکسان، تغییرات عرض و عمق مخروط رسوب شویی در حالات مختلف افزایش طول سازه، تفاوت چشمگیری با هم نداشته‌اند و روند نسبتاً ثابتی را دنبال می‌کنند. در خصوص افزایش قطر سازه، تأثیر تغییرات مشخصه بدون بعد قطر با آزمایش شاهد یعنی حالت بدون سازه مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد با افزایش مشخصه بدون بعد قطر سازه $(\frac{D_{DBE}}{D_o})$ از ۱/۱۴ به ۲/۲۷، اگرچه طول، عرض و عمق مخروط رسوب شویی نسبت به آزمایش شاهد با افزایش مواجه می‌شود اما بیشترین طول بدون بعد مخروط رسوب شویی $(\frac{L_c}{D_o})$ مربوط به قطر بدون بعد ۱/۱۴ است (شکل ۵). در حقیقت در قطرهای کوچکتر



شکل ۵- تغییرات (الف) طول، (ب) عرض و (ج) عمق مخروط رسوب شویی با افزایش شاخص بدون بعد قطر سازه DBE

ابتدایی و ۹۲ درصد در ۳۵ دقیقه ابتدایی آزمایش تخلیه می شود. همچنین ماکزیمم ابعاد مخروط رسوب شویی مربوط به شاخص بدون بعد دبی $\frac{Q_0}{\sqrt{g D_0^5}} = 1.43$ می باشد که در این حالت مدت زمان تعادل آبشستگی نیز سریع تر است. شکل (۶) توسعه زمانی مخروط رسوب شویی را در دو حالت آزمایش شاهد و مشخصه بدون بعد $\frac{L_{DBE}}{D_0} = 10$ ، $\frac{D_{DBE}}{D_0} = 1.14$ و $\frac{Q_0}{\sqrt{g D_0^5}} = 1.43$ یعنی بهترین عملکرد سازه، نشان می دهد.

بررسی توسعه زمانی مخروط رسوب شویی بیانگر این است که در ابتدا تحت تأثیر موضعی دریاچه تخلیه کننده تحتانی بخشی از رسوبات تخلیه می گردد که این مورد مبین تأثیر فرسایش پیش رونده است، سپس بلافاصله به دلیل اختلاف فشار داخل و بیرون سازه و ایجاد فرسایش پایبینگ راستای شاخه های سازه DBE شروع به تخلیه رسوبات می کند. با تحلیل سه بعدی تصاویر و بررسی عملکرد سازه در بهترین حالت یعنی مشخصه بدون بعد طول $\frac{L_{DBE}}{D_0} = 10$ و مشخصه بدون بعد قطر $\frac{D_{DBE}}{D_0} = 1.14$ می توان دریافت ۸۴ درصد حجم مخروط رسوب شویی در ۱۵ دقیقه



شکل ۶- توسعه زمانی مخروط رسوب شویی در (الف) آزمایش شاهد و (ب) بهترین عملکرد سازه

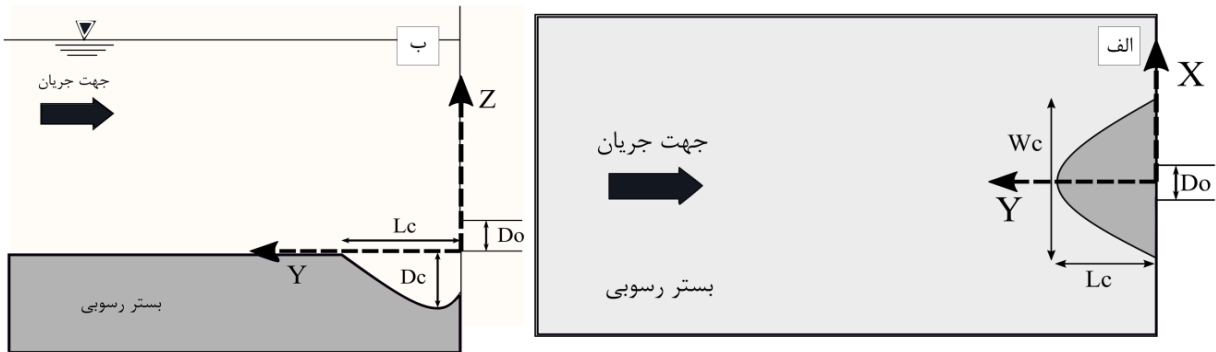
مخروط رسوب شویی بر اساس محورهای ارائه شده در شکل (۷)

به منظور بررسی دقیق تر از پروفیل های طولی و عرضی

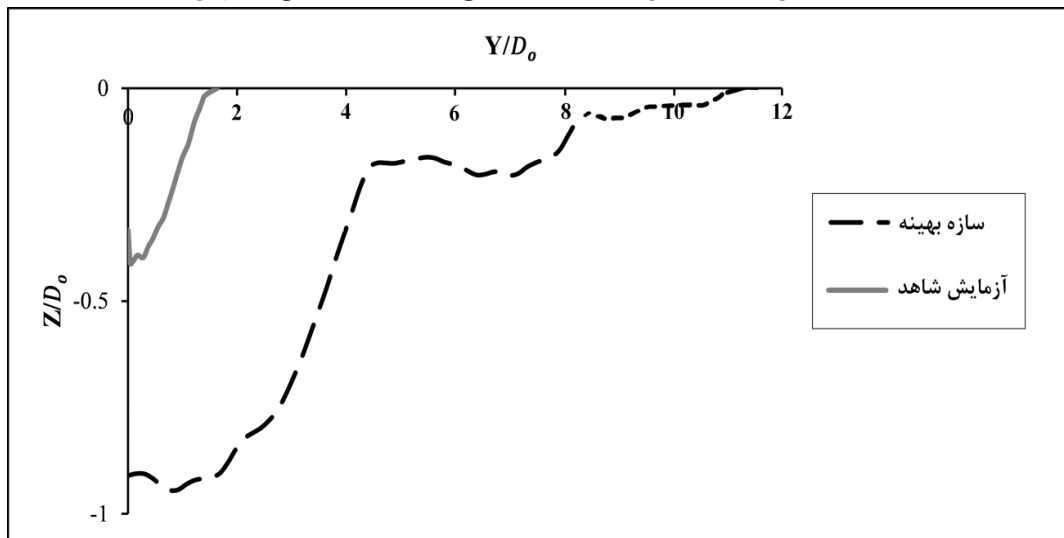
ایجادشده در اثر استفاده از سازه بهینه با مشخصه بدون بعد طول $\frac{L_{DBE}}{D_o} = 10$ و مشخصه بدون بعد قطر $\frac{D_{DBE}}{D_o} = 1.14$ و آزمایش شاهد را در $Y/D_o = 1$ و $Y/D_o = 0.5$ را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج می‌توان دریافت عمق مخروط رسوب‌شویی با فاصله گرفتن از خروجی و نقطه تمرکز جریان عبوری از سه شاخه سازه، کاهش می‌یابد که این مورد نشان‌دهنده شدت گردابه‌ها در محل تلاقی سه شاخه است.

استفاده شد. با بررسی و مقایسه پروفیل طولی مخروط رسوب‌شویی ایجادشده در اثر استفاده از سازه بهینه با مشخصه بدون بعد طول $\frac{L_{DBE}}{D_o} = 10$ و مشخصه بدون بعد قطر $\frac{D_{DBE}}{D_o} = 1.14$ و آزمایش شاهد می‌توان دریافت، سطح مقطع شسته شده در راستای طولی هنگام استفاده از سازه DBE با ابعاد بهینه، از نظر طول و عمق به ترتیب با افزایش حداکثری $6/6$ و $2/1$ برابری نسبت به آزمایش شاهد همراه خواهد بود (شکل ۸).

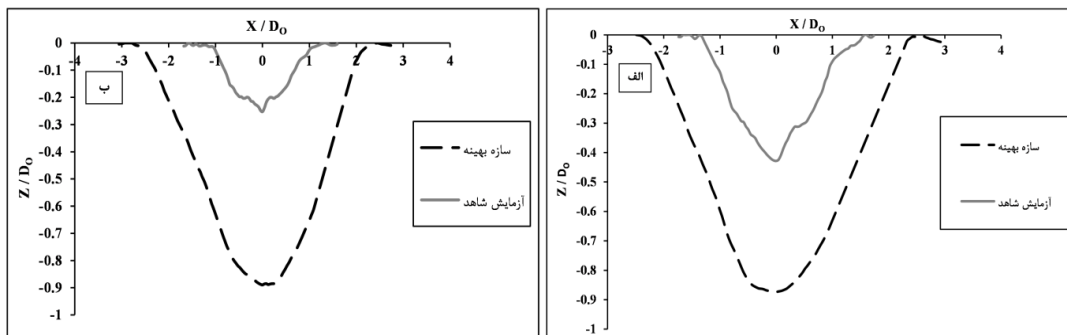
شکل (۹) مقایسه پروفیل عرضی مخروط رسوب‌شویی



شکل ۷- طرح شماتیک مخزن و مخروط رسوب‌شویی شامل الف) دید جانبی و ب) پلان



شکل ۸- پروفیل طولی مخروط رسوب‌شویی در حالت آزمایش شاهد و استفاده از سازه DBE



شکل ۹- مقایسه پروفیل عرضی مخروط رسوب‌شویی در مقاطع الف) $Y/D_o = 0.5$ و ب) $Y/D_o = 1$

بیشترین حجم محاسبه‌شده مخروط مربوط به سازه DBE با

همچنین بررسی حجم مخروط رسوب‌شویی نشان می‌دهد

$$\frac{L_c}{D_o} = 3.092 \left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}} \right)^{0.604} \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.363} \left(\frac{L_{DBE}}{D_o} \right)^{0.703} \left(\frac{D_{DBE}}{D_o} \right)^{-0.363}$$

(رابطه ۶)

$$\frac{W_c}{D_o} = 3.454 \left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}} \right)^{0.814} \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.365} \left(\frac{L_{DBE}}{D_o} \right)^{0.136} \left(\frac{D_{DBE}}{D_o} \right)^{-0.332}$$

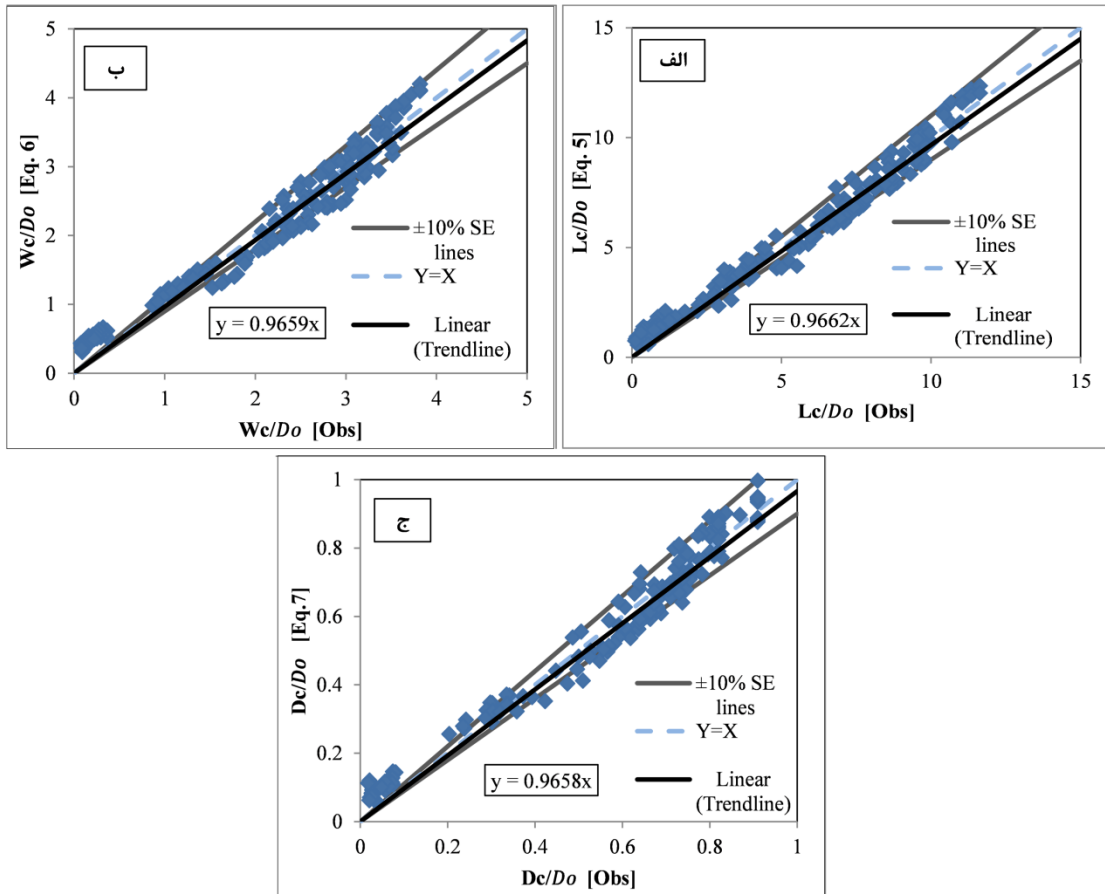
(رابطه ۷)

$$\frac{D_c}{D_o} = 0.785 \left(\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}} \right)^{0.349} \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.369} \left(\frac{L_{DBE}}{D_o} \right)^{0.174} \left(\frac{D_{DBE}}{D_o} \right)^{-0.128}$$

(رابطه ۵)

مشخصه بدون بعد طول $\frac{L_{DBE}}{D_o} = 10$ و مشخصه بدون بعد قطر $\frac{D_{DBE}}{D_o} = 1.14$ در شاخص بدون بعد دبی $\frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}} = 1.43$ به میزان 0.30475 مترمکعب است که در مقایسه با آزمایش شاهد در شرایط مشابه دبی بدون بعد، افزایش $36/55$ برابری را نشان می‌دهد.

در نهایت معادلات (۵) تا (۷) به منظور ارتباط بین پارامترهای مخروط رسوب‌شویی و متغیرهای بررسی شده در آنالیز ابعادی ارائه شد:



شکل ۱۰- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده روابط (۵) تا (۷) طول (ب) عرض و (ج) عمق مخروط رسوب‌شویی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق توسعه زمانی مخروط رسوب‌شویی در حالت استفاده از سازه DBE در چهار حالت طول، چهار حالت قطر و سه حالت دبی مجموعاً ۴۸ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد سازه مذکور به دلیل افزایش پروفیل سرعت در خروجی، دامنه تأثیر فرسایش پس‌رونده را افزایش می‌دهد. بهترین مشخصه سازه از نظر ایجاد بیشترین ابعاد و حجم مخروط رسوب‌شویی، مربوط

بررسی ارتباط آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه‌شده روابط (۵) تا (۷) با ترسیم خط برازش یافته بین نقاط، خطوط $\pm 10\%$ درصد خطا و بهترین خط توافق نشان می‌دهد هر سه خط برازش یافته در محدوده خطوط $\pm 10\%$ درصد خطا قرار گرفته و شیب خط برازش نزدیک به ۱ می‌باشد (شکل ۱۰)، که این نشانگر ارتباط مناسب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه‌شده روابط (۵) تا (۷) می‌باشد.

نسبت به آزمایش شاهد شد. در نهایت بررسی معادلات آماری ارائه شده جهت توسعه ابعاد مخروط رسوب شویی وابسته به زمان از همبستگی خوبی برخوردار بود.

واژگان لاتین

Q_o	دبی خروجی (مترمکعب بر ثانیه)
H_w	ارتفاع آب بالای دریچه تخلیه کننده (متر)
H_s	ارتفاع رسوب بالای دریچه تخلیه کننده (متر)
D_{50}	قطر متوسط ذرات (میلی متر)
ρ_w	جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)
ρ_s	جرم مخصوص رسوب (کیلوگرم بر مترمکعب)
μ	لزوجت دینامیکی سیال (کیلوگرم بر متر-ثانیه)
G_s	نسبت چگالی ذرات رسوب به چگالی آب (بدون بعد)
D_o	قطر دریچه تخلیه (متر)
D_{DBE}	قطر سازه DBE (متر)
L_{DBE}	طول سازه DBE (متر)
L_c	طول مخروط رسوب شویی (متر)
W_c	عرض مخروط رسوب شویی (متر)
D_c	عمق مخروط رسوب شویی (متر)
θ	زاویه بین شاخه های سازه DBE (بدون بعد)
N	تعداد شاخه های سازه DBE (بدون بعد)
Re	عدد رینولدز (بدون بعد)
V_c	حجم مخروط رسوب شویی (مترمکعب)
T_e	مدت زمان تعادل آبشستگی (دقیقه)
t	مدت زمان انجام آزمایش (دقیقه)

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Ahadpour Dodaran, A., Park, S. K., Mardashti, A. and Noshadi, M. (2012). Investigation of dimension changes in under pressure hydraulic sediment flushing cavity of storage dams under effect of localized vibrations in sediment layers. *International Journal of Ocean System Engineering*, 2(2):71-81.

Althaus, J., De Cesare, G. and Schleiss A. J. (2014). Sediment Evacuation from Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 04014078: 1-9 DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000970.

Annandale, G. W. (2005). Reservoir Sedimentation. In M.G. Anderson (ed.). *John Wiley & Sons Ltd. Encyclopedia of Hydrological Sciences*.

Basson, G.R. & Rooseboom, A. 1999. *Dealing with reservoir sedimentation*. Pretoria: Water Research Comission

Dreyer, S., and Basson, G. (2018). Investigation of the shape of low-level outlets at hydropower dams for local pressure flushing of sediments, *International*

به مشخصه بدون بعد طول $10 = \frac{L_{DBE}}{D_{outlet}}$ ، مشخصه بدون بعد قطر $1.14 = \frac{D_{DBE}}{D_{outlet}}$ و مشخصه بدون بعد دبی $1.43 = \frac{Q_o}{\sqrt{g D_o^5}}$ است. با تحلیل زمانی مخروط رسوب شویی در بهترین مشخصه سازه DBE می توان دریافت ۸۴ درصد حجم مخروط رسوب شویی در ۱۵ دقیقه ابتدایی و ۹۲ درصد در ۳۵ دقیقه ابتدایی آزمایش تخلیه می شود که البته در این حالت تعادل آبشستگی زودتر از سایر حالات اتفاق می افتد. همچنین این سازه به دلیل وجود شاخه در جهات مختلف مخزن با توجه به اختلاف فشار داخل و خارج سازه و ایجاد فرسایش پایپینگ (نشتی)، منجر به افزایش حجم مخروط رسوب شویی به میزان ۳۶/۵۵ برابر نسبت به حالت شاهد (بدون سازه) می شود. بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای طول و قطر سازه DBE نشان می دهد افزایش مشخصه بدون بعد طول سازه از ۲/۷۳ به ۱۰، منجر به افزایش حداکثری ۶/۶ برابری طول مخروط رسوب شویی نسبت به آزمایش شاهد می شود. همچنین در اثر افزایش این طول، عرض مخروط رسوب شویی با افزایش حداکثری ۱/۷۵ برابری و عمق مخروط با افزایش حداکثری ۲/۱ برابری نسبت به آزمایش شاهد همراه بود. در خصوص تغییرات قطر مشخص گردید بیشترین تغییرات ابعاد مخروط رسوب شویی مربوط به قطر با نسبت بدون بعد ۱/۱۴ است به این دلیل که در قطرهای کوچکتر به دلیل کاهش سطح مقطع جریان سرعت بیشتری ایجاد شده و به تناسب آن تنش برشی و نیروی ناشی از آن افزایش می یابد. در نهایت مشخص گردید استفاده از سازه با ابعاد بدون بعد طول $10 = \frac{L_{DBE}}{D_{outlet}}$ و قطر $1.14 = \frac{D_{DBE}}{D_{outlet}}$ منجر به افزایش ۳۶/۵۵ برابری حجم مخروط و راندمان رسوب شویی

conference of sustainable dam engineering in an ever-charging world, South Africa.

Dreyer, S. (2018). Investigating the influence of low-level outlet shape on the scour cone formed during pressure flushing of sediments in hydropower plant reservoirs, *Dissertation*, University of Stellenbosch.

Espa, P., Batalla, R. J., Brignoli, M. L., Crosa, G., Gentili, G. and Quadroni, S. (2019). Tackling reservoir siltation by controlled sediment flushing: Impact on downstream fauna and related management issues. *PLOS ONE*, 14(6), e0218822.

Fard Shyraye, M. and Abbasi, S. (2019). Experimental study on the effects of SFM structure on the sediment discharge efficiency from outlet gates in the reservoirs. *Iranian Journal of Hydraulic*, 14(2): 17-31. (In Farsi)

Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., ... Yang, Ch. T. (2014). Sustainable sediment

- management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents Earth's Future. *Earth's Future*. 256–280.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M. and Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M. & Qaderi, K. (2017). Improving the Pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study. *Water Resources Management*, 31(14), 4633–4647.
- 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. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 3:10–27
- Morris, G. L. and Fan, J. (2009). Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use; New York, McGraw Hill, Electronic Version, pp: 784.
- Morris, G. L. (2015). Management alternatives to combat reservoir sedimentation. In *Zurich First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*. 181–193.
- Okumura, H. and Sumi, T. (2012). Reservoir Sedimentation Management in Hydropower Plant Regarding Flood Risk and Loss of Power Generation. Kyoto.
- Powell, D. N. (2007). *Sediment transport upstream of orifice*. Ph.D. dissertation, Clemson University, Clemson, South Carolina, United States.
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2015). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014076.
- Schellenberg, G., Donnelly, C. R., Holder, C., Briand, M. H. and Ahsan, R. (2017). Sedimentation and Hydropower: Impacts and Solutions Sedimentation, *Dam Safety and Hydropower: Issues, Impacts and Solutions*. 24. [Online], from: [http://www.hydroworld.com/content/dam/hydroworld/onlinearticles/2017/04/Sedimentation Dam Safety and Hydropower- Issues Impacts and Solutions.pdf](http://www.hydroworld.com/content/dam/hydroworld/onlinearticles/2017/04/Sedimentation_Dam_Safety_and_Hydropower-Issues_Impacts_and_Solutions.pdf).
- Sumi, T. and Kantoush, S. A. (2010). Integrated Management of Reservoir Sediment Routing by Flushing, Replenishing, and Bypassing Sediments in Japanese River Basins Dam. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics*, Seoul, Korea. 831–838.
- Tigrek, S., Gobelez, O. and Aras, T. (2009). Sustainable management of reservoirs and preservation of water quality. 53:41–53. [Online], from: <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=801179>