# بررسی آزمایشگاهی ابعاد چاله آبشستگی در بالادست دریچه تحتانی مخزن سد برای شکل‌های مختلف دریچه روزنه‌ای با استفاده از رسوب‌شویی تحت فشار

افسانه الهی[1*] و سید محمود کاشفی‌پور[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲- استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۱

## چکیده

**رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار یکی از روش‌های مؤثر برای رفع مشکل رسوب‌گذاری در مخازن سد می‌باشد، که تأثیر بسیار موضعی داشته و برای خارج کردن رسوبات نهشته شده اطراف ورودی آبگیر نیروگاه نیز به‌کار می‌رود. برای طراحی مناسب دریچه‌های تخلیه‌کننده‌ی تحتانی و سایر سازه‌های مرتبط با رسوب‌شویی هیدرولیکی مخازن، بررسی مشخصات حفره ایجاد شده در رسوب‌شویی تحت‌فشار امری ضروری به نظر می‌رسد. برای انجام این پژوهش یک مدل فیزیکی در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و با اجرای آزمایش‌های مختلف تأثیر شکل دریچه تحتانی بر روی حجم و ابعاد حفره رسوب‌شویی بررسی گردید. برای دست‌یابی به این هدف، آزمایش‌ها بر روی چهار دریچه با شکل‌های دایره، نیم‌دایره، مستطیل و مربع با سطح مقطع‌های یکسان ۱۸ سانتی متر مربع، پنج ارتفاع آب ۳۰، ٤٥، ٥٥، ٦٥ و ۷۸ سانتی متر و در نتیجه پنج دبی تخلیه متفاوت روی هر دریچه انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد، شکل دریچه تحتانی پارامتر مهمی در پدیده رسوبشویی هیدرولیکی می‌باشد و با تغییر آن، ابعاد حفره آبشستگی نیز تغییر می‌کند. نتایج همچنین نشان داد که به ازای یک ارتفاع آب ثابت در مخزن و در یک زمان مشخص، ابعاد آبشستگی برای دریچه‌های مربعی و نیم‌دایره‌ای بیشتر از دریچه‌ی مستطیلی و دریچه‌ی مستطیلی نیز بیشتر از دریچه‌ی دایره‌ای است و در ارتفاع‌های کمتر (دبی‌های کمتر) این تفاوت محسوس‌تر است. همچنین طول آبشستگی و حجم مخروط رسوب‌شویی با ارتفاع آب افزایش و برای دریچه دایره‌ای از همه کمتر است.**

**کلید واژه‌ها:** رسوب‌شویی تحت فشار، تخلیه کننده تحتانی، مخازن سدها، تراز سطح آب، حفره رسوب‌شویی، آبشستگی.

# Laboratory Analysis of the Flushing Cone Dimensions at the Upstream Bottom Outlets of Dam Reservoir for Different Entrance Shape of Bottom Outlets Using Pressure Flushing

A. Elahi[1*] and S. M. Kashefipour[2]

1*- M. Sc. student of Water Structures Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2- Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received:6 July 2014 Accepted: 2 November 2014

## Abstract

One of the most effective techniques for removing the deposited sediments from reservoirs is pressure flushing which has only much local effects. It is often applied as a clearing process to remove sediment saround the entrance of intakes.In order to make rational design of bottom outlets and other sediment flushing structures, the understanding of the characteristics of a scour funnel in under pressure flushing is significant. The physical model was constructed in the Hydraulic Laboratory at the Water Sciences Engineerin Faculty of Shahid Chamran University of Ahvaz and by performing various experiments on the effect of bottom outlet shape on the volume and dimensions of flushing cone was experimentally investigated. For this purposes, the experiments on 4 bottom outlets with a circular, semicircular, rectangular and square cross-sectional area equal to 18 $cm^2$, five water levels of 30, 45, 55, 65, 78 cm, resulting in five different discharges on the bottom outlet, was performed. The results of this survey revealed that

the shape of the lower opening is an important parameter in hydraulic flushing, changing of which results in change of scouring diameter. Results also showed that for a specific water level in the reservoir and for a specific time the scouring dimension for square valves and semicircle valves are more than one of rectangular valves. The scouring dimensions of rectangular valves are more than one of circular valves. The difference is more perceptible in lower water heights (i. e. lower discharge). The length of scouring and the volume of flushing cone increases with incrsing head and is the least for circular valves.

**Keywords:** Pressure flushing, Bottom outlet, Storage reservoirs, Water level, Flushing cone, Scour.

**مقدمه**

تمام رودخانه‌ها رسوب و آب حمل می‌کنند و احداث سد باعث تغییر شرایط انتقال آب و رسوب می‌شود. معمولاً به‌دلیل این که نهشته شدن رسوب در مخزن سد تدریجی می‌باشد، در دوره بهره‌برداری چندان به آن توجه نمی‌شود و یا به عبارتی نادیده گرفته می‌شود تا این که مشکلی از نظر بهره‌برداری به وجود آید. دلیل آن هم این است که تغییرات بالا آمدن سطح رسوب ازدید عموم پنهان می‌باشد. از طرفی وقتی مخزن پر از آب شد به‌راحتی می‌توان آب اضافی را از طریق سرریز و یا دریچه‌ها به خارج هدایت کرد ولی رسوبات نهشته شده را نمی‌توان به این راحتی تخلیه کرد. با در نظر گرفتن موارد فوق و با توجه به این که تجمع رسوب در مخزن سد تأثیر کوتاه مدت و بلند مدتی را هم در بالادست سد و هم در پایین دست سد ایجاد می‌کند، ضروری است که قبل از بروز هرگونه مشکلی پتانسیل آن مشکل بررسی و با پیش‌بینی‌های به موقع نسبت به اصلاح آن اقدام کرد (بی‌نام، ۱۳۹۱). نگرانی در مورد از دست دادن ظرفیت مخازن به علت رسوب‌گذاری توسط محمود[1] (۱۹۸۷) مطرح شد و به تازگی در بسیاری از انجمن ها و نشریات بیان شده است. با توجه به سرعت متوسط کاهش حجم مفید مخازن سد، می‌توان تخمین زد که سالانه حجمی معادل ۴۵ کیلومتر مکعب از ظرفیت ذخیره سدهای جهان کاهش می‌یابد. هزینه جایگزین کردن حجم از دست رفته بدون در نظر گرفتن هزینه‌های زیست محیطی و همچنین هزینه‌های اجتماعی و فرهنگی ساخت سد جدید، معادل ۱۳ بیلیون دلار آمریکا در هر سال برآورد شده است (پالیمری و همکاران[2]، ۲۰۰۳).

مخازن موجود در ایران نیز از بحث‌های فوق مستثنی نیست و گزینه رسوب‌گذاری و مشکلات ناشی از آن در برنامه بهره‌برداری از مخازن در نظر گرفته نشده است. میزان کاهش حجم مخزن در سد سفیدرود سالانه حدود ۴۰ میلیون متر مکعب است، در حالی‌که حجم اولیه آن ۱/۷ میلیارد متر مکعب بوده است و در فاصله کوتاهی (کمتر از ۲۵ سال) این ظرفیت به حدود نصف رسیده است و در حال حاضر چندین سال است که وزارت نیرو با عملیات شاس رسوب روند رسوب‌گذاری در آن را کند می‌نماید. در عملیات شاس، سعی می‌شود قسمتی از رسوب ته‌نشین شده در مخزن توسط سیلاب‌های طبیعی یا ساختگی تخلیه گردد (گودرزی، ۱۳۷۹).

رسوب‌گذاری و انتقال رسوبات در مخازن سدها مشکلات و خسارت‌های کوتاه مدت و بلند مدت زیادی به همراه داشته است. از جمله کاهش ظرفیت ذخیره مخزن، افزایش تبخیر از سطح مخزن، بالا رفتن تراز سطح آب مخزن و سیلابی شدن اراضی اطراف دریاچه سد، بالا آمدن تراز سفره‌ی آب زیرزمینی و زه‌دار شدن اراضی اطراف، ورود رسوبات به توربین‌ها و در نتیجه سائیده شدن پره‌های توربین، ورود و ته‌نشینی رسوب در تونل‌ها و کانال‌های آبگیر و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال آب و ... .

بنابراین حل مسأله‌ی رسوب‌گذاری در مخازن سدها الزامی به نظر می‌رسد. برای این منظور از روش‌های مختلفی برای کنترل رسوب‌گذاری می‌توان استفاده کرد که به‌طور خلاصه عبارتند از (امامقلی زاده و جهانی، ۱۳۸۷):

عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک

عبوردهی جریان غلیظ[3]

استفاده از سیستم کنارگذر برای جریان‌های غلیظ

رسوب‌شویی هیدرولیکی[4]

دفع رسوبات مخزن به‌وسیله ادوات مکانیکی مانند لایروبی و سیفونی کردن[5]

به طور کلی، رسوب‌شویی به دو صورت، رسوب‌شویی آزاد[6] و تحت فشار[7] در مخازن سدها انجام می‌پذیرد.

رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار به سبب داشتن تأثیر موضعی آبشستگی در اطراف دریچه‌های تحتانی[8] سد، گزینه بسیار مناسبی برای زدودن رسوب تجمع یافته از آبگیر نیروگاه‌ها می‌باشد. در این روش ارتفاع آب درون مخزن سد همواره از تراز ارتفاعی دریچه‌های تحتانی بالاتر می‌ماند و به همین دلیل بدان رسوب‌شویی تحت فشار می‌گویند. در حین رسوب‌شویی سطح آب داخل مخزن تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود.

1 - Mahmood
2 - Palmieri *et al.*

3 - Density Current Venting
4 - Hydraulic Flushing
5 - Siphoning
6 - Free flushing
7 - Pressure flushing
8 - Bottom Outlet

با باز شدن ناگهانی دریچه‌های تحتانی سد، عملیات بهره‌برداری از این روش آغاز می‌گردد به گونه‌ای که جریان روزنه‌ای خارج شونده از دریچه‌های تحتانی، با ایجاد یک نیروی فرساینده رسوبات تجمع یافته پشت سد را خارج می‌گرداند. در این روش پس از مدتی از انجام رسوب‌شویی حفره یا چاله‌ای از آبشستگی به شکل مخروط یا قیف[1] در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی بوجود آمده و به سمت بالا دست توسعه می‌یابد.

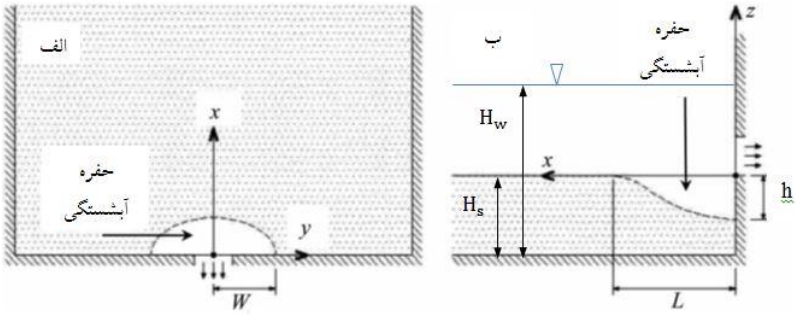
پیشروی چاله به سمت بالادست تا زمانی ادامه دارد که مخروط تشکیل شده به تعادل برسد. مدت زمان لازم برای تشکیل کامل حفره رسوب‌شویی[2] و به تعادل رسیدن آن بهتر از سطح آب داخل مخزن، ارتفاع رسوبات نهشته شده بالای تخلیه‌کننده تحتانی، نوع رسوبات، دبی خروجی از تخلیه‌کننده و ... بستگی دارد وممکن است از چند ساعت تا چند روز به طول انجامد.

در زمینه رسوب‌شویی تحت فشار دانشمندان مختلفی به تحقیق پرداختند که در ادامه برخی از آنها به طور مختصر شرح داده می‌شود.

عبدالله پور و حسین زاده دلیر (۱۳۹۲) با کارگذاری سازه نیم‌استوانه در جلوی تخلیه کننده تحتانی، تأثیر این سازه در ایجاد جریان گردابی برای تخلیه رسوبات را مورد آزمایش قرار دادند. همچنین در زیر سازه شکاف‌هایی در ارتفاع و طول‌های مختلف ایجاد کردند. بررسی‌های آنها نشان دادکه تغییرات حجم رسوب‌شویی در یک سطح آب حساسیت کمتری نسبت به طول شکاف دارد و تغییرات حجم رسوب‌شویی نسبت به ارتفاع شکاف زیاد است. شهیرنیا و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی آزمایشگاهی اثر تراز سطح آب مخزن در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوب‌شویی تحت فشار پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که در یک بازه زمانی مشخص، با افزایش تراز سطح آب، نرخ افزایش ابعاد حفره‌ی رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. پاول و خان[3] (۲۰۱۲)عملکرد جابه‌جایی و همچنین وسعت و شکل آبشستگی بالادست یک روزنه‌ی دایره‌ای، تحت شرایط جریان ماندگار برای اندازه‌های مختلف رسوب و ارتفاع‌های متفاوت روی روزنه را بررسی کردند. نتایج نشان داد حداکثر عمق آبشستگی و طول آبشستگی با ارتفاع یا سرعت افزایش می‌یابد و با اندازه رسوب کاهش پیدا می‌کند، همچنین حداکثر نیم‌عرض حفره آبشستگی با ارتفاع آب برای رسوب ریز و متوسط افزایش پیدا می‌کند، در حالی که با تغییر ارتفاع آب برای رسوبات درشت دانه ثابت باقی می‌ماند. فتحی‌مقدم و همکاران[4] (۲۰۱۰) به منظور شناخت هر چه بهتر نحوه‌ی رسوب زدائی با استفاده از عمل فلاشینگ، از یک مدل فیزیکی استفاده کرده و اعلام داشتند که با عمل فلاشینگ، در داخل مخزن و در مقابل خروجی‌های تحتانی یک محدوده قیفی شکل در اثر خروج بخشی از رسوبات ته‌نشین شده ایجاد می‌شود. آنها با آزمایش‌های متعدد توانستند دو معادله را برای تعیین طول و ارتفاع این محدوده قیفی شکل و در نتیجه مقدار حجم رسوباتی که می‌توان با عمل فلاشینگ از مخزن سد خارج ساخت به‌دست آوردند. مشکاتی شهمیرزادی و همکاران (۱۳۸۸) مراحل شکل‌گیری حفره آبشستگی و تغییرات ابعاد حفره را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این تحقیق آزمایش‌ها در پایان فواصل زمانی مختلف متوقف و مقادیر طول، عرض و عمق حفره آبشستگی برداشت شده و مجدداً آزمایش‌ها انجام می‌شدند. همچنین مشکاتی شهمیرزادی و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر قطر تخلیه‌کننده‌های تحتانی بر روی ابعاد مخروط رسوب‌شویی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. امامقلی زاده (۱۳۸۶) به منظور بررسی و ارزیابی رسوب‌شویی تحت فشار از مدل فیزیکی استفاده کرد. آزمایش‌ها با یک تراز ثابت رسوبات غیرچسبنده با سه اندازه مختلف (درشت دانه، متوسط و ریزدانه) و سه ارتفاع آب متفاوت و دبی‌های متغیر انجام گرفت. نتایج تحقیق او نشان داد که مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن مخروط رسوب‌شویی بستگی به دبی مورد آزمایش و ارتفاع آب مخزن دارد. برای مثال ایشان در نتایج خود بیان می‌کند که در دبی هشت لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب ۵۲ سانتیمتر، حدوداً ۱۰ دقیقه بعد از باز شدن دریچه، آب خروجی از مدل صاف شده و مخروط رسوب‌شویی به تعادل می‌رسد و گسترش طولی و عرضی مخروط رسوب‌شویی در جلوی تخلیه کننده تقریباً با هم برابر است، ولی در دبی‌های بیشتر گسترش طولی آن مقداری بیشتر از گسترش عرضی می‌باشد. فانگ و کائو[5] (۱۹۹۶)بر اساس مطالعات آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که شیب حفره رسوب‌شویی تقریباً برابر با شیب پایدار رسوبات درشرایط مستغرق می‌باشد. وایت و بتس[6] (۱۹۸۴) مطالعاتی را به منظور به‌دست آوردن حد تأثیر رسوب‌شویی در مدت زمان انجام رسوب‌شویی تحت فشار انجام دادند. آن‌ها بیان داشتند که گسترش طولی مخروط رسوب‌شویی به عمق آب داخل مخزن و دبی خروجی از دریچه‌ها بستگی دارد.

علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد در زمینه شناخت فرایند رسوب‌شویی هیدرولیکی، اطلاعاتی در زمینه بررسی شکل‌های مختلف دریچه تحتانی وجود ندارد. در این تحقیق به کمک مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، به بررسی کمی وکیفی گسترش حفره آبشستگی در حین رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار در شرایط هیدرولیکی مختلف پرداخته شده است.

1 - Funnel Shape
2 - Flushing Cone
3 - Powell and Khan
4 - Fathi Moghadam *et al.*
5- Fang and Cao
6- White and Bettess




**شکل ۱- سیستم مختصات و پارامترهای حفره آبشستگی، الف) پلان، ب) نمای جانبی**

ارتفاع آب داخل مخزن( $H_w$)، ارتفاع رسوب( $H_s$)، عمق آبشستگی( h)، طول مخروط رسوب‌شویی( L)، نیم‌عرض مخروط رسوب‌شویی( W)

### تئوری و تحلیل ابعادی

حجم مخروط رسوب‌شویی ($V_{scouring}$) بستگی به پارامترهای مختلفی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:
سرعت متوسط جریان آب خروجی از میان تخلیه کننده تحتانی ($U_{outlet}=\frac{Q_{outlet}}{A_{outlet}}$)، که در آن $Q$: دبی جریان آب خروجی از تخلیه کننده تحتانی و $A$: سطح مقطع دریچه تحتانی می‌باشد)، ارتفاع آب داخل مخزن ($H_w$)، ارتفاع رسوبات نسبت به کف دریچه تحتانی ($H_s$)، قطر متوسط رسوبات تجمع یافته($d_{50}$)، شتاب ثقل ($g$)، چگالی آب ($\rho_w$)، چگالی رسوبات نهشته شده ($\rho_s$)، عرض مخزن ($B$)، لزوجت دینامیکی سیال ($\mu$)، محیط دریچه تحتانی ($P$، برای مشخص کردن تفاوت شکل دریچه‌های تحتانی)، (شکل ۱).

بنابراین رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{scouring}=f(U_{outlet},H_w,H_s,B,P,g,\rho_s,\rho_w,d_{50},\mu) \quad (۱)$$

با انجام تحلیل ابعادی به روش $\pi$ باکینگهام و با درنظر گرفتن پارامترهای ($U_{outlet}$)، ($H_w$) و ($\rho_w$) به عنوان متغیرهای تکراری، هشت پارامتر بدون بعد به صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\Pi_1=\frac{V_{scouring}}{H_w^3} \quad , \quad \Pi_2=\frac{H_s}{H_w} \quad , \quad \Pi_3=\frac{B}{H_w} \quad ,$$
$$\Pi_4=\frac{P}{H_w} \quad , \quad \Pi_5=\frac{H_w g}{U^2} \quad , \quad \Pi_6=\frac{\rho_s}{\rho_w}$$
$$\Pi_7=\frac{d_{50}}{H_w} \quad , \quad \Pi_8=\frac{\mu}{\rho_w H_w U}$$

با توجه به اینکه پارامترهای $H_s$، $B$، $g$، $\rho_s$، $\rho_w$ و $d_{50}$ ثابت هستند، می‌توان از پارامترهای بی‌بعد آنها صرف نظر کرد. همچنین از آنجا که حداقل مقدار عدد رینولدز ($\Pi_8$)، برای تمام آزمایش‌ها برابر ۲۵۲۰۰۰ می‌باشد، لذا می‌توان از آن نیز صرف‌نظر کرد. بنابراین حجم بی‌بعد رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$\frac{V_{scouring}}{H_w^3}=f(\frac{H_s}{H_w},\frac{P}{H_w},\frac{U_{outlet}}{\sqrt{g\times H_w}}) \quad (۲)$$

از طرفی $Fr_{outlet}=\frac{U_{outlet}}{\sqrt{g\times H_w}}$؛ در نتیجه:

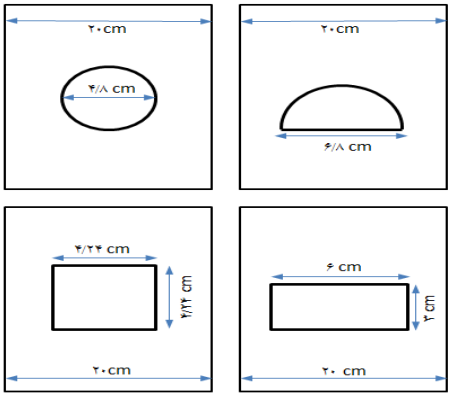
$$\frac{V_{scouring}}{H_w^3}=f(\frac{H_s}{H_w},\frac{P}{H_w},Fr_{outlet}) \quad (۳)$$

رابطه (۳) پارامترهای بی‌بعد اصلی آزمایش را نشان می‌دهد.

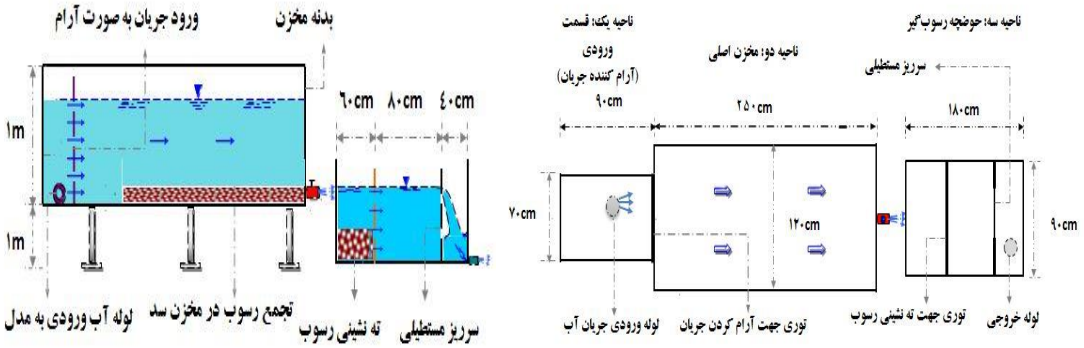
### مواد و روش‌ها

ابعاد هندسی مدل بایستی به گونه‌ای باشد که وقتی تخلیه کننده تحتانی به منظور انجام عملیات رسوب‌شویی باز می‌گردد، حد تأثیر رسوب‌شویی به دیواره‌های مدل نرسد. با توجه به مشخص نبودن ابعاد حفره رسوب‌شویی، قبل از ساخت مدل اصلی با توجه به تحقیقات محققین قبلی و روابط ارائه شده توسط آن‌ها ابعاد مدل و به خصوص عرض مخزن مشخص گردید. لذا مدل در نظر گرفته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. مدل به شکل مکعب مستطیل با طول ۳/۴ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر ساخته شد. مدل دارای سه قسمت اصلی می‌باشد: قسمت ورودی مدل (ناحیه آرام کننده جریان)، مخزن اصلی و حوضچه ته‌نشینی رسوبات.

قسمت ورودی مدل دارای ابعادی به طول ۹۰ سانتی‌متر، عرض ۷۰ سانتی‌متر و عمق ۱ متر می‌باشد. در این قسمت تلاطم جریان ورودی به مدل گرفته شده و جریان به‌صورت آرام وارد قسمت اصلی مدل (مخزن) می‌گردد. قسمت اصلی مخزن دارای طول ۲/۵ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱متر می‌باشد. به منظور دست‌یابی به اهداف این تحقیق آزمایش‌هایی با چهار دریچه تحتانی به شکل‌های دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای، مربعی و مستطیلی با مساحت مقطع ثابت ۱۸ سانتی‌متر مربع و ارتفاع لبه‌ی پایینی تا مخزن معادل ۲۰ سانتی‌متر، انجام می‌شد (شکل ۲).




**شکل ۲- نمایی از چهار مقطع روزنه‌ای و مشخصات هندسی آن‌ها**




**شکل ۳- شماتیکی ازپلان و نمای جانبی مدل فیزیکی مورد استفاده با جزئیات مربوطه**

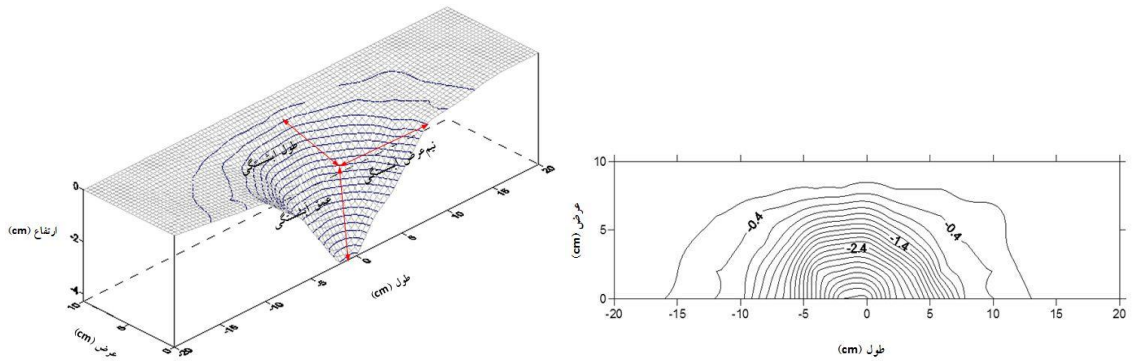
رسوبات پس از خروج از تخلیه‌کننده تحتانی وارد مخزن مکعب مستطیل شکل (حوضچه ته‌نشینی رسوبات) با ابعادی به طول ۱/۸ متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر که در پایین دست مدل قرار داده شده بود می‌گردید. دبی جریان توسط یک فلومتر الکترومغناطیسی نصب شده روی لوله ۸ اینچی ورودی آب به مخزن، اندازه‌گیری می‌شد. همچنین به منظور کنترل ارتفاع آب داخل مخزن، قبل از انجام آزمایش‌ها و وارد کردن رسوبات به درون مخزن چندین آزمایش با هر چهار مقطع برای تعیین دبی متناسب با هر ارتفاع انجام گردید. آب خروجی از مدل به وسیله یک لوله ۱۴ اینچی به مخزن اصلی تأمین آب آزمایشگاه برگشت داده می‌شد. شکل (۳) شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش‌ها از رسوب غیر چسبنده و یکنواخت با $d_{50} = ۰/۵$ میلی‌متر استفاده گردید.

در هریک از حالت‌ها آزمایش‌ها با پنج ارتفاع آب (۳۰، ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۸ سانتی‌متر) مورد آزمایش قرار گرفت و در کل ۲۰ آزمایش انجام شد.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا رسوبات در کف مدل ریخته می‌شد. برای اینکه هوا در داخل رسوبات محبوس نگردد، قبل از ریختن رسوبات در مدل، ابتدا مقداری آب وارد مدل می‌گردید، سپس رسوبات به‌صورت لایه لایه ریخته می‌شد. به منظور متراکم کردن رسوبات ریخته شده در داخل مدل، با استفاده از یک پلکسی ۲۰ میلی‌متری با سطح مقطع مستطیلی که یک دسته در وسط آن تعبیه شده بود به رسوبات ضربات منظمی وارد می‌شد. این عمل تا رسیدن ارتفاع نهایی رسوبات به اندازه ۲۰ سانتی‌متر (رسوبات در زیر لبه‌ی پایینی هر چهار دریچه قرار می‌گرفتند) ادامه می‌یافت، این رقوم به نحوی بود که سطح بالایی رسوبات تا پایین‌ترین نقطه‌ی دریچه خروجی یکسان بود و در انجام تمامی آزمایش‌ها به صورت یکسان عمل می‌شد. ابتدا دریچه را کاملاً بسته سپس با روشن شدن پمپ آب و تنظیم دبی مرتبط با ارتفاع آب دلخواه به وسیله شیر تعبیه شده روی لوله آب ورودی به مخزن (۱/۵ تا ۳/۹ لیتر بر ثانیه)، آب به آرامی از زیر ناحیه آرام کننده وارد مدل می‌شد.پس از رسیدن ارتفاع آب داخل مدل به ارتفاع مورد آزمایش، تخلیه‌کننده‌ی تحتانی باز می‌گردید. مدت زمان هر آزمایش ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین با قرار دادن یک صفحه مشبک در قسمت ورودی، تلاطم جریان از بین می‌رفت و در قسمت ته نشینی رسوبات نیز با قرار دادن یک توری از ورود رسوبات به لوله خروجی جلوگیری می‌شد. بعد از پایان یافتن هر آزمایش شیر تخلیه کننده انتهایی باز می‌گردید تا آب درون مخزن تخلیه و اندازه گیری‌ها با متر لیزری انجام گردد.




**شکل ٤- نمایی از حفره رسوب‌شویی**




**شکل ٥- توپوگرافی و نمای سه‌بعدی از مخروط رسوب‌شویی پس از انجام آزمایش با دریچه نیم‌دایره‌ای و ارتفاع ٥٥ سانتی‌متر نسبت به خط مرکزی دریچه**

به منظور محاسبه حجم مخروط رسوب‌شویی نیز از نرم افزار سرفر[1] نسخه‌ی هشت استفاده گردید. شکل (۴) نمایی از حفره رسوب‌شویی در حالت رسوب‌شویی تحت فشار را نشان می‌دهد و شکل (۵) توپوگرافی و نمای سه بعدی از مخروط رسوب‌شویی آزمایش با دریچه نیم‌دایره‌ای و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر نسبت به خط مرکزی دریچه را برای مثال نشان می‌دهند.

## نتایج و بحث

مشاهدات صورت گرفته زمان انجام آزمایش‌ها نشان می‌دهد، زمانی‌که دریچه تخلیه رسوب باز می‌گردید، رسوبات تحت فشار آب از دریچه خارج می‌شدند. به‌تدریج فرسایش رسوبات از نزدیکی دریچه به سمت بالادست گسترش می‌یافت. همچنین عملکرد رسوب‌شویی به این صورت است که در ابتدا رسوب به صورت شعاعی (خطی) به سمت دریچه تخلیه کننده از بستر کشیده می‌شود. رسوبات از کف کنده شده و قبل از خروج از تخلیه کننده، در راستای خطوط جریان در آب معلق می‌شوند. این مرحله بین ۳۰ ثانیه تا ۱ دقیقه ماندگار است. بعد از این حرکت اولیه، دو گردابه با گردش در خلاف جهت هم زیر دریچه تشکیل می‌شود و از طرفین به سمت مرکز حرکت می‌کنند. قابل ذکر است که گردابه‌ها در حالی تشکیل می‌شوند که بیشتر رسوب هنوز به شکل شعاعی در حال حرکت است. در این مرحله گردابه‌ها کمک می‌کنند تا رسوب نزدیک دریچه به داخل جریان اصلی کشیده شود. هر دو عملکرد آبشستگی همزمان و برای مدت بسیار کوتاهی اتفاق می‌افتند (کمتر از ۶۰ ثانیه). برآمدگی به وجود آمده در چند دقیقه ابتدایی از تشکیل حفره، در خط مرکزی دریچه نشان از وجود این گردابه‌ها و شعاعی نبودن حرکت ذرات رسوب داشت. بعد از این یکی از گردابه‌ها در جابه‌جایی رسوب از حفره آبشستگی غالب خواهد شد. با پیشرفت آبشستگی گردابه‌ها تشکیل می‌شوند و از بین می‌روند، قدرت می‌گیرند و ضعیف می‌شوند، اطراف منطقه‌ی آبشستگی رفت و برگشت می‌کنند و حفره بزرگی ایجاد می‌نمایند و پس از گذشت ۱۰ – ۱۲ دقیقه به جزئی ثابت تبدیل خواهد شد و حفره آبشستگی به تعادل می‌رسد. پس نتیجه می‌شود که اندازه مساحت آبشستگی در ابتدا وابسته به ساختمان گردابه‌ای است که زیر دریچه تکامل می‌یابد. در واقع بیشترین مقدار رسوب در اثر حرکاتی که از گردابه‌ها ناشی می‌شود از دریچه تخلیه خارج می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع آب درون مخزن در حجم مخروط رسوب‌شویی، در شکل (۶) حجم مخروط رسوب‌شویی

1 - Surfer 8

به‌دست آمده در مقابل ارتفاع آب درون مخزن برای چهار شکل دریچه تخلیه کننده رسوب ترسیم شده است.

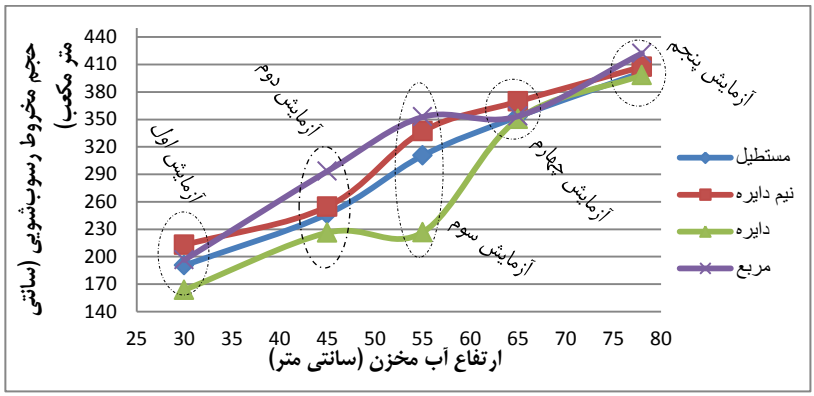
در رسوب‌شویی تحت فشار علاوه بر دانستن حجم رسوب‌شویی، دانستن مقدار طول تأثیر رسوب‌شویی و عمق آبشستگی نیز اهمیت زیادی دارد. با استفاده از داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها طول تأثیر رسوب‌شویی و عمق آبشستگی در مقابل ارتفاع آب درون مخزن برای چهار شکل مختلف دریچه به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) ملاحظه می‌گردد، بین ارتفاع آب درون مخزن و پارامترهای رسوب‌شویی یعنی حجم، طول و عمق رسوب‌شویی، ارتباط مستقیم وجود دارد. به عبارت دیگر زمانی که ارتفاع آب مخزن در هر چهار شکل دریچه، افزایش می‌یابد، این امر موجب افزایش ابعاد رسوب‌شویی (حجم، طول و عمق حفره رسوب‌شویی) می‌گردد. زمانی که ارتفاع آب درون مخزن افزایش می‌یابد، دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین برای تخلیه حجم بیشتر رسوبات و گسترش طولی مخروط رسوب‌شویی در رسوب‌شویی تحت فشار بهتر است تا جایی که شرایط بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد، دریچه‌های تخلیه کننده با حداکثر ظرفیت خود مورد بهره‌برداری قرار گیرند. زیرا افزایش دبی جریان (افزایش ارتفاع آب ثابت درون مخزن) منجر به افزایش سرعت جریان در داخل مخروط رسوب‌شویی می‌گردد و در نتیجه گردابه‌های ایجاد شده درون حفره رسوب‌شویی حجم رسوب بیشتری را از دریچه تخلیه می‌کنند.

همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی بیان‌گر آن است که بین چهار دریچه مربعی، مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و دایره‌ای، با سطح مقطع‌های یکسان ۱۸ سانتی‌مترمربع، در یک ارتفاع یکسان، در آزمایش دوم، سوم و پنجم برای دریچه مربعی، و در آزمایش اول و چهارم برای دریچه نیم‌دایره‌ای، رسوب‌شویی بیشتر از دریچه مستطیلی و دایره‌ای است. بدین معنی که در دریچه‌های مربعی و نیم‌دایره‌ای ابعاد حفره بزرگتر بوده و به تبع آن حجم رسوب بیشتری از مخزن خارج می‌گردد و شاید بتوان گفت میان دریچه مربعی و نیم‌دایره‌ای از لحاظ ابعاد آبشستگی پشت آنها تفاوت چندانی وجود ندارد. بعد از دریچه‌های مربعی و نیم‌دایره‌ای از بین چهار دریچه‌ی مورد آزمایش دریچه مستطیلی حجم رسوب‌شویی بیشتری را داشته‌است. همچنین دریچه دایره‌ای در تمام آزمایش‌ها کمترین حجم رسوب‌شویی را داشته است. یکی از دلایلی که دریچه‌ی دایره‌ای رسوب‌شویی کمتری نسبت به سایر دریچه‌ها دارد، می‌تواند این باشد که ضلع کف در خروجی رسوب در دریچه دایره‌ای تقریباً معادل صفر است، در نتیجه می‌تواند روی الگوی خروج جریان و ابعاد رسوب شسته شده تأثیرگذار باشد. همچنین با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که در ارتفاع‌های آب بیشتر (بیشتر از ۶۵ سانتی‌متر و دبی‌های بیشتر از ۳/۴ لیتر بر ثانیه) فشردگی نقاط بیشتر است. بدین معنی که در این محدوده از ارتفاع آب درون مخزن، تغییرات حجم رسوب خروجی از دریچه، همچنین ابعاد چاله شسته شده در پشت دریچه تحتانی با تغییر شکل دریچه تغییرات چندانی ندارد. پس نتیجه گرفته می‌شود در ارتفاع‌های کم جریان یا دبی‌های پایین‌تر تغییر شکل دریچه محسوس‌تر است و در ارتفاع‌های بالا شکل دریچه چندان تأثیری در حجم رسوب‌شویی ندارد. همین نتایج در مورد طول و عمق آبشستگی نیز صدق می‌کند.

به منظور بررسی تأثیر کمی افزایش ارتفاع آب مخزن در افزایش طول، حجم و عمق مخروط رسوب‌شویی، برای چهار شکل مختلف دریچه تحتانی، با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، مقایسه انجام گرفت. بدین منظور ابعاد مخروط رسوب‌شویی به‌دست آمده در آزمایش‌های دوم، سوم، چهارم و پنجم برای چهار دریچه مربعی، مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و دایره‌ای نسبت به آزمایش اول مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده در جدول (۱) ارائه گردیده است.

مقایسه انجام شده در جدول (۱) نشان می‌دهد، برای هر چهار دریچه، زمانی‌که ارتفاع آب درون مخزن افزایش می‌یابد، دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی افزایش می‌یابد، مقدار حجم، طول و عمق رسوب‌شویی نیز افزایش می‌یابد. برای مثال ردیف آخر جدول فوق نشان می‌دهد در دریچه‌ی نیم‌دایره‌ای زمانی‌که ارتفاع آب مخزن از ۳۰ سانتی‌متر به ۷۸ سانتی‌متر افزایش می‌یابد (۱۶۰ درصد افزایش ارتفاع) و دبی خروجی از تخلیه کننده از مقدار ۱/۵ به ۳/۸ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد (۱۵۳ درصد افزایش دبی)، موجب افزایش حجم، طول و عمق مخروط رسوب‌شویی به ترتیب به مقدار ۹۱، ۵۰ و ۴۲ درصد می‌گردد.

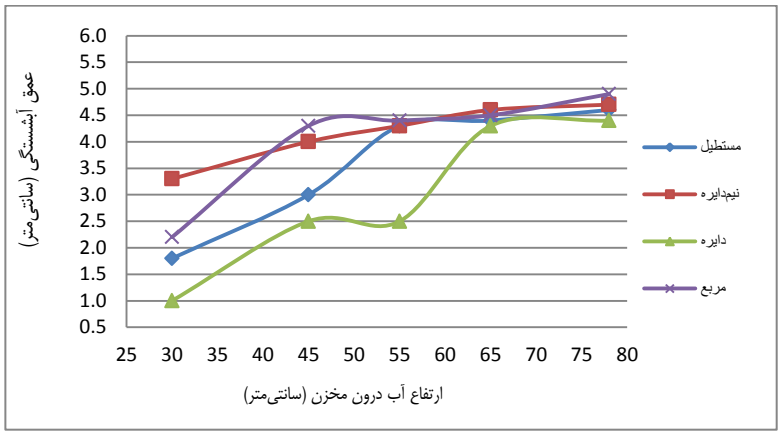
در مجموع افزایش ارتفاع آب مخزن به‌طور متوسط به مقدار ۱۰۲ درصد، موجب افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی به مقدار ۷۴ درصد و همچنین موجب افزایش طول و عمق به ترتیب به مقدار ۵۹ و ۱۲۷ درصد می‌گردد.




**شکل ٦- تغییرات حجم حفره آبشستگی در برابر تغییرات ارتفاع آب درون مخزن برای شکل‌های مختلف دریچه**



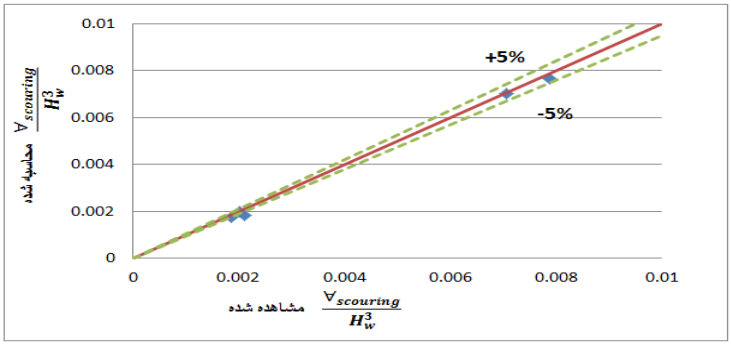

**شکل ۷- تغییرات طول حفره آبشستگی در برابر تغییرات ارتفاع آب درون مخزن برای شکل‌های مختلف دریچه**




**شکل ۸- تغییرات عمق حفره آبشستگی در برابر تغییرات ارتفاع آب درون مخزن برای شکل‌های مختلف دریچه**

**جدول ۱- تأثیر افزایش ارتفاع آب مخزن در افزایش ابعاد رسوب‌شویی**

| شکل دریچه | ارتفاع آب مخزن | دبی | درصد افزایش ارتفاع آب (نسبت به ارتفاع آب در آزمایش اول) | درصد افزایش دبی (نسبت به دبی آزمایش اول) | درصد افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی | درصد افزایش طول مخروط رسوب‌شویی | درصد افزایش عمق مخروط رسوب‌شویی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مربع | ۴۵ | ۲/۵ | ۵۰ | ۵۶ | ۴۹ | ۳۰ | ۹۵ |
| | ۵۵ | ۲/۹ | ۸۳ | ۸۱ | ۷۹ | ۴۸ | ۱۰۰ |
| | ۶۵ | ۳/۴ | ۱۱۶ | ۱۱۲ | ۸۰ | ۵۵ | ۱۰۴ |
| | ۷۸ | ۳/۸ | ۱۶۰ | ۱۳۷ | ۱۱۵ | ۵۹ | ۱۲۲ |
| مستطیل | ۴۵ | ۲/۵ | ۵۰ | ۵۶ | ۲۹ | ۳۸ | ۶۶ |
| | ۵۵ | ۲/۸ | ۸۳ | ۷۵ | ۶۳ | ۶۹ | ۱۳۸ |
| | ۶۵ | ۳/۴ | ۱۱۶ | ۱۱۲ | ۸۵ | ۹۲ | ۱۴۴ |
| | ۷۸ | ۳/۹ | ۱۶۰ | ۱۴۳ | ۱۱۰ | ۹۷ | ۱۵۵ |
| دایره | ۴۵ | ۲/۷ | ۵۰ | ۸۰ | ۳۸ | ۴۲ | ۱۵۰ |
| | ۵۵ | ۲/۹ | ۸۳ | ۹۳ | ۳۹ | ۴۵ | ۱۵۰ |
| | ۶۵ | ۳/۴ | ۱۱۶ | ۱۲۶ | ۱۱۴ | ۱۰۵ | ۳۳۰ |
| | ۷۸ | ۳/۸ | ۱۶۰ | ۱۵۳ | ۱۴۳ | ۱۱۷ | ۳۴۰ |
| نیم‌دایره | ۴۵ | ۲/۶ | ۵۰ | ۷۳ | ۱۹ | ۱۹ | ۲۱ |
| | ۵۵ | ۲/۹ | ۸۳ | ۹۳ | ۵۸ | ۳۶ | ۳۰ |
| | ۶۵ | ۳/۴ | ۱۱۶ | ۱۲۶ | ۷۳ | ۴۲ | ۳۹ |
| | ۷۸ | ۳/۸ | ۱۶۰ | ۱۵۳ | ۹۱ | ۵۰ | ۴۲ |
| متوسط درصد افزایش ... | | | ۱۰۲ | ۱۰۵ | ۷۴ | ۵۹ | ۱۲۷ |



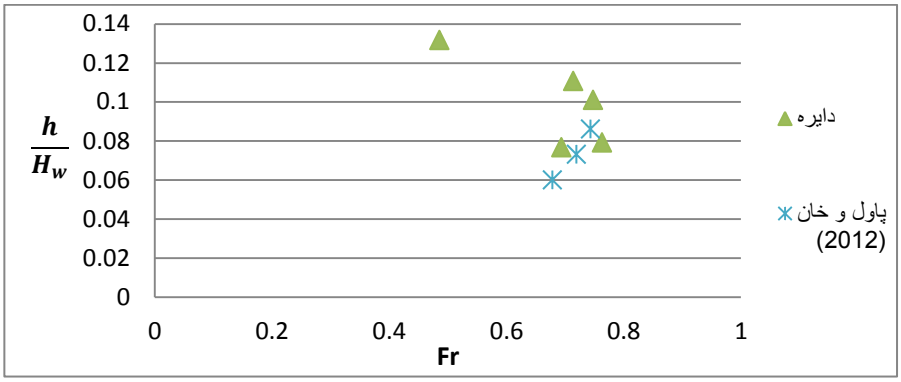

**شکل ۹- مقایسه بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده حجم مخروط رسوب‌شویی**

**استخراج رابطه بدون بعد**

از تحلیل ابعادی ارائه شده، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر حجم مخروط رسوب‌شویی به‌دست آمد. به منظور یافتن مناسبترین رابطه‌ای که بین این پارامترها و حجم مخروط رسوب‌شویی وجود دارد از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و تجزیه و تحلیل آماری روی پارامترها توسط این نرم‌افزار صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به نرم‌افزار داده شد و توسط نرم‌افزار مورد تحلیل قرار گرفت و ضرایب روابط بدون بعد آنها به‌دست آمد. روابط به‌دست آمده از این تحلیل آماری در رابطه چهار برای حجم مخروط رسوب‌شویی ارائه شده‌است:

$$\frac{\forall_{scouring}}{H_w^3} = 0.022\left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{-2.6}\left(\frac{P}{H_w}\right)^{-0.21}(Fr)^{0.3} \qquad (۴)$$

مقدار ضریب تعیین در رابطه (۴)، ۰/۹۸ می‌باشد و همان‌گونه که در رابطه (۴) ملاحظه می‌شود، پارامترهای بدون بعد $\frac{H_s}{H_w}$، $\frac{P}{H_w}$ و Fr تأثیرگذارترین پارامترها بر روی حجم مخروط رسوب‌شویی می‌باشند. این پارامترها در سطح اطمینان ۹۸ درصد برای معادله حجم رسوب‌شویی معنی‌دار بوده‌اند. ضریب تعیین بالا نشان دهنده دقت بالا و همبستگی قوی بین پارامترهای این رابطه می‌باشد. رابطه (۴) برای هر یک از دریچه‌ها بر اساس ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده در این تحقیق به‌دست آمده است. به منظور حصول اطمینان از رابطه‌ی حاصله، با ۲۰ درصد داده‌های باقی مانده، صحت‌سنجی صورت پذیرفت. در شکل (۹) نمودار صحت‌سنجی ارائه شده است.




**شکل ۱۰- نمودار پارامترهای بدون بعد نسبت عمق آبشستگی به ارتفاع آب درون مخزن در مقابل عدد فرود و مقایسه با نتایج پاول و خان (۲۰۱۲)**

**مقایسه با مطالعات صورت گرفته در گذشته**

شکل (۱۰) نمودار پارامترهای بدون بعد نسبت عمق آبشستگی به ارتفاع آب درون مخزن ($\frac{h}{H_w}$) در مقابل پارامتر بدون بعد عدد فرود (Fr)، که با نتایج پاول و خان (۲۰۱۲) مقایسه شده است را نشان می‌دهد. پاول و خان (۲۰۱۲) در تحقیقات خود از یک روزنه‌ی دایره‌ای به قطر ۱۵/۲۴ سانتی‌متر و مساحت سطح مقطع ۱۸۲/۴۱ سانتی‌متر استفاده کردند. ارتفاع رسوبات را نسبت به کف مدل ۲۲/۸۸ سانتی‌متر در نظر گرفتند. این رقوم به نحوی بود که سطح بالایی رسوبات تا پایین‌ترین نقطه‌ی دریچه خروجی یکسان بود. همچنین آزمایش‌ها تحت سه ارتفاع ثابت آب درون مخزن ۴۵/۷۲، ۶۰/۹۶ و ۷۶/۲۰ سانتی‌متر و سه اندازه مختلف رسوب ۰/۲۹، ۰/۷۳ و ۰/۸۹ میلی‌متر انجام شد که برای مقایسه از نتایج مربوط به رسوب با قطر ۰/۷۳ میلی‌متر به دلیل نزدیک بودن به اندازه رسوب تحقیق حاضر استفاده شد. پاول و خان (۲۰۱۲)، $H_w$ را، ارتفاع آب بالای مرکز روزنه در نظر گرفتند، به همین دلیل در این قسمت، ارتفاع آب درون مخزن برای مقایسه، به صورت ارتفاع آب بالای مرکز روزنه تغییر یافت.

همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل (۱۰) مشخص است، در مقایسه انجام شده میان نتایج دریچه دایره‌ای این تحقیق و نتایج پاول و خان، مقادیر به‌دست آمده در تحقیق حاضر بیشتر است. این امر می‌تواند به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌های پاول و خان (۲۰۱۲) باشد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به مجموعه بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌ها نتایج نهایی این تحقیق را می‌توان در بندهای زیر خلاصه کرد:

- ✓ در دریچه‌های مربعی و نیم‌دایره‌ای ابعاد حفره بزرگ‌تر بوده و به تبع آن حجم رسوب بیشتری از مخزن خارج می‌گردد و شاید بتوان گفت میان دریچه مربعی و نیم‌دایره‌ای از لحاظ ابعاد آبشستگی پشت آنها تفاوت چندانی وجود ندارد. بعد از دریچه‌های مربعی و نیم‌دایره‌ای از بین چهار دریچه‌ی مورد آزمایش دریچه مستطیلی حجم رسوب‌شویی بیشتری را داشته است. همچنین دریچه دایره‌ای در تمام آزمایش‌های کمترین حجم رسوب‌شویی را داشته‌است.
- ✓ عملکرد رسوب‌شویی به این صورت است که در ابتدا رسوب به‌صورت شعاعی (خطی) به سمت دریچه تخلیه کننده از بستر کشیده می‌شود. بعد از این حرکت اولیه، دو گردابه با گردش در خلاف جهت هم زیر دریچه تشکیل می‌شود و از طرفین به سمت مرکز حرکت می‌کنند. در این مرحله گردابه‌ها کمک می‌کنند تا رسوب نزدیک دریچه به داخل جریان اصلی کشیده شود. بعد از این یکی از گردابه‌ها در جابه‌جایی رسوب از حفره آبشستگی غالب خواهد شد.
- ✓ بین ارتفاع آب درون مخزن و پارامترهای رسوب‌شویی یعنی حجم، طول، نیم‌عرض و عمق رسوب‌شویی، ارتباط مستقیم وجود دارد.
- ✓ در ارتفاع‌های آب کم، تغییر شکل دریچه محسوس‌تر است و در ارتفاع‌های بالا شکل دریچه چندان تأثیری در ابعاد رسوب‌شویی ندارد.
- ✓ همان‌طوری که نتایج آزمایش‌ها انجام شده نشان می‌دهد راندمان رسوب‌شویی تحت فشار در دفع رسوبات پایین بوده و اثر آن در دفع رسوبات موضعی می‌باشد. بنابراین استفاده از این روش بایستی در شرایط خاص مانند موارد ذیل که امکان رسوب‌شویی آزاد وجود ندارد توصیه گردد:

در حالتی که مشکل منابع آب وجود داشته باشد به عبارت بهتر مخازنی که حجم جریان ورودی به مخزن خیلی کمتر از حجم ذخیره‌شان می‌باشد و پر کردن مجدد مخزن در کوتاه مدت میسر نمی‌باشد.

در سدهایی که مجاری تخلیه کننده آنها از ظرفیت چندانی برای تخلیه کامل مخزن به منظور رسوب‌شویی آزاد برخوردار نمی‌باشد. به علت شرایط خاص برخی از سدها که تخلیه مخزن ممکن نمی‌باشد. برای مثال در این مورد می‌توان به سد دز اشاره نمود، این سد تنظیم بسامد برق کشور را انجام می‌دهد، لذا تخلیه مخزن به منظور رسوب‌شویی ممکن نمی‌باشد.

## منابع

۱- امامقلی زاده، ص. و ح. جهانی. ۱۳۸۷. بررسی هیدرولیک جریان در رسوب‌شویی تحت فشار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، چهارمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران.

۲- امامقلی زاده، ص. ۱۳۸۶. بررسی و ارزیابی رسوب‌شویی تحت فشار در سدهای مخزنی با استفاده از مدل فیزیکی. پایان نامه دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

۳- بی نام. ۱۳۹۱. راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۱.

۴- شهیرنیا، م.، ایوب‌زاده، س. ع.، توفیقی، س. و ع. صمدی رحیم. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر تراز سطح آب مخزن در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوب‌شویی تحت فشار، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۵- عبدالله پور، م. و ع. حسین‌زاده دلیر. ۱۳۹۲. تأثیر قرارگیری سازه نیم‌استوانه بر راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن، نشریه دانش آب و خاک، ۲۳ (۲): ۲۸۲-۲۶۹.

۶- گودرزی، م. ۱۳۷۹. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در سد زاینده رود، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران.

۷- مشکاتی شهمیرزادی، م. ا.، دهقانی، ا. ا.، امامقلی زاده، ص. و ا. مساعدی. ۱۳۸۸. بررسی زمانی گسترش مخروط آبشستگی در رسوبشویی هیدرولیکی تحت فشار. اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود.

8- Fang, D. and S. Cao. 1996. An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir. Proccedings of The 6th Federal Interagency Sedimentation Conf. Las Vegas, March 10-14, pp. 178 - 184.

9- Fathi Moghadama, M., Emamgholizadeh, S., Binaa, M. and M. Ghomeshi. 2010. Physical modeling of pressure flushingfor desilting of non-cohesive sediment. Journal of Hydraulic Research,48(4): 509–514.

10- Mahmood, K. 1987. Reservoir sedimentation: Impact, extent, and mitigation. Paper No.71, The World Bank, Washington D.C., USA, 118p.

11- Meshkati Shahmirzadi, M. E., Dehghani, A. A., Sumi, T., Naser, Gh. and A. Ahadpour. 2010. Experimental investigation of local half-cone scouring against dam. Riverflow, Germany, September, pp. 8-10.

12- Palmieri, A. F., Annandale Shah, G. W. and A. Dinar. 2003. Reservoir conservation. volume I: The Rescon Approach, The World Bank, Washington, USA.

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

14- White, W. R. and R. Bettess. 1984. The Feasibility of flushing sediments through reservoirs. Challengesin African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium, July, D.E. Walling, S.S.D. Foster, P. Wurzel, eds, IAHSPublication, 144: 577-587.