

## بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن و دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی در میزان تخلیه

### رسوبات در رسوبشویی تحت فشار

صمد امامقلی زاده<sup>۱</sup>، محمود بینا<sup>۲</sup> و مهدی قمشی<sup>۳</sup>

#### چکیده

رسوبشویی تکنیکی است که از آن می توان به دو صورت آزاد و تحت فشار برای تخلیه رسوبات تجمع یافته در داخل مخزن استفاده نمود. در رسوبشویی تحت فشار زمانی که تخلیه کننده تحتانی به منظور رسوبشویی باز می گردد، در جلوی آن مخروط رسوبشویی تشکیل می گردد. ابعاد مخروط رسوبشویی متأثر از پارامترهای مختلفی است که برای مثال می توان به عمق آب داخل مخزن، دبی جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی، ابعاد تخلیه کننده تحتانی، ژئومتری مخزن، اندازه و نوع رسوبات تجمع یافته در داخل مخزن اشاره نمود. در این تحقیق تأثیر ارتفاع آب روی دریچه و دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی در میزان رسوبشویی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دست یابی به اهداف این پژوهش یک مدل فیزیکی در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و با انجام آزمایش های مختلف با استفاده از رسوبات غیر چسبنده ریزدانه با قطر متوسط  $0/27$  میلی متر به بررسی و مطالعه این امر پرداخته شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد زمانی که ارتفاع آب مخزن بطور متوسط  $31/5$  درصد کاهش می یابد، طول و حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب  $14/5$  و  $41/5$  درصد افزایش می یابد. همچنین زمانی که دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی  $76/6$  درصد کاهش می یابد، طول و حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب  $20/3$  و  $49/9$  درصد کاهش می یابد. علاوه بر آن بر اساس تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده های آزمایشگاهی بدست آمده، روابط بدون بعد برای تخمین حجم و طول مخروط رسوبشویی ارائه شده است.

کلید واژه ها: رسوبشویی، رسوبات غیر چسبنده، تخلیه کننده های تحتانی، مخازن سدها

#### مقدمه

بر اساس گزارش کمیته بین المللی سدهای بزرگ، در جهان بیش از ۴۰۰۰۰ سد بزرگ وجود دارد که از آنها به منظور تامین آب، تولید انرژی، کنترل سیلاب و غیره استفاده می شود. ولی متأسفانه هر ساله بطور متوسط بین  $0/5$  تا  $1$  درصد از حجم کل ذخیره سدهای مذکور در اثر رسوبگذاری از دست می رود. همین گزارش اعلام می دارد که برای حفظ حجم ذخیره موجود در جهان نیاز به ساخت ۳۰۰ تا ۴۰۰ سد بزرگ در هر سال می باشد (۱۰). بنابراین چاره اندیشی به موقع در این امر همراه با درک اهمیت مسئله و کسب آگاهی و مهارت در کاربرد راه حل های علاج بخشی غیر قابل

بی آمدهای مخرب رسوبگذاری به صورت بالقوه در کلیه کشورهای جهان از جمله کشورهای توسعه یافته اروپائی و آمریکائی نیز وجود دارد. برای مثال می توان به سدهای جبیدم<sup>۴</sup> و پالاگندا<sup>۵</sup> در کشور سوئیس، سد گوماندا<sup>۶</sup> در کشور اتریش، سد بایرا<sup>۷</sup> در کشور هند، سدهای هنگشان<sup>۸</sup>، هونگاینجین<sup>۹</sup> و نیوهای<sup>۱۰</sup> در کشور چین و سد سانتو دومی نگو<sup>۱۱</sup> در کشور ونزوئلا اشاره نمود (۲).

۱- دانشجوی سابق دکتری رشته سازه های آبی و استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود

(s\_gholizadeh517@yahoo.com)

۲-۳- دانشجویان سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه

شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۴/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۰/۲۴

4- Gebidam  
5- Palagnedra  
6- Gmumd  
7- Baira  
8- Hengshan  
9- Honglingjin  
10- Naodehai  
11- Santo Domingo

شانزدهم بر می‌گردد. در ارتباط با موثر بودن یا عدم تأثیر روش رسوبشویی در دفع رسوبات نهشته شده در مخازن نظراتی متعددی وجود دارد. همفیل<sup>۷</sup> (۵) اظهار می‌دارد، این که آیا روش رسوبشویی روش مؤثری برای دفع رسوبات در مخازن بزرگ می‌باشد، هنوز مبهم است. همچنین کیان (۷) بیان می‌دارد روش رسوبشویی تنها راه حل مناسب، برای مخازنی می‌باشد که دارای مقدار آب ورودی اضافی به مخزن می‌باشند. عوامل متعددی وجود دارد که مانع استفاده از رسوبشویی می‌گردد. برای مثال می‌توان به اثرات زیست محیطی رسوبشویی مانند از بین رفتن ماهی‌ها، ایجاد آلودگی در پائین دست در اثر رسوبات رها شده و همچنین سایش درپچه‌های تحتانی در اثر غلظت بالای رسوبات اشاره نمود.

از لحاظ بهره‌برداری رسوبشویی را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

#### الف) رسوبشویی همراه با پائین آوردن سطح آب مخزن (رسوبشویی آزاد)

در رسوبشویی آزاد پائین آوردن سطح آب مخزن در مدت زمان مشخص و به دو صورت تدریجی و سریع انجام می‌گیرد. در حالت اول درپچه‌ها به صورت تدریجی، اما نه به صورت کامل باز می‌گردند و بهره‌برداری از رسوبشویی کنترل شده می‌باشد. در حالت دوم، درپچه‌ها به صورت ناگهانی و کامل باز می‌گردند و بهره‌برداری از رسوبشویی کاملاً کنترل نشده می‌باشد.

استفاده از روش رسوبشویی آزاد بعنوان روشی مناسب و اقتصادی جهت بازیابی ظرفیت بعضی از مخازن سدها در جهان مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال با بررسی‌هایی که آتکینسون<sup>۸</sup> (۲) انجام داده اظهار می‌دارد استفاده از رسوبشویی هیدرولیکی در برخی از سدها برای احیای حجم از دست رفته بسیار موثر بوده است. برای مثال موردی

اجتناب و غفلت از آن به ویژه در کشورهای خشک و نیمه خشک جهان از جمله ایران، تهدیدی جدی برای زندگی نسل‌های آینده به‌شمار می‌رود.

#### ۱- روش‌های مختلف رسوبزدائی

راه حل‌های کنترل رسوبگذاری در مخازن سدها را می‌توان به دو دسته کلی، شامل روش‌های مکانیکی و روش‌های هیدرولیکی تقسیم نمود. روش‌های مکانیکی شامل آبخیزداری، افزایش ارتفاع سد، متروکه کردن سد و تدارک منبع جایگزین و ایجاد سیستم کنار گذر<sup>۱</sup> و روش‌های هیدرولیکی شامل عبور دهی جریان غلیظ<sup>۲</sup>، سیفون کردن<sup>۳</sup> و رسوبشویی<sup>۴</sup> می‌باشند. بکارگیری مناسب این روش‌ها مستلزم شناخت توانائی و محدودیت‌شان می‌باشد. بنا به اظهارات کیان<sup>۵</sup> (۷) در برخی موارد ساخت یک سد جدید ممکن است بسیار اقتصادی‌تر از کاهش رسوبگذاری یا برطرف نمودن مواد رسوبی باشد. از میان روش‌های فوق، رسوبشویی (یا عملیات شاس) مؤثرترین روش هیدرولیکی برای حفظ ظرفیت مخازن سد می‌باشد.

#### روش رسوبشویی هیدرولیکی

رسوبشویی هیدرولیکی به روشی گفته می‌شود که از آن برای تخلیه رسوباتی که از قبل در داخل مخزن نهشته شده‌اند بوسیله باز کردن تخلیه‌کننده‌های تحتانی (درکف یا رقوم پایین) بکار می‌رود. از رسوبشویی می‌توان هم برای رسوبزدائی مخازن کوچک و هم برای مخازن بزرگ استفاده نمود. رسوبشویی هیدرولیکی تکنیک جدیدی نیست و سابقه استفاده از این روش به سال‌های دور برمی‌گردد. برون<sup>۶</sup> (۳) اظهار می‌دارد که قدیمی‌ترین روش رسوبشویی که در کشور اسپانیا توسط D'Rohan مورد استفاده قرار گرفت به قرن

1- By-Passing

2- Density Current Venting

3- Siphoning

4- Flushing

5- Qian

6- Brown

7- Hemphil

8- Atkinson

زمانی که تخلیه‌کننده‌های تحتانی باز می‌شوند رسوبات مجاور آن همراه جریان آب حرکت کرده و از آن خارج می‌گردند. در این حالت فرسایش پسرونده<sup>۶</sup> اتفاق افتاده و از نزدیکی دریچه شروع شده و به سمت بالادست مخزن حرکت می‌کند. اگر بتوان سطح آب مخزن را به اندازه کافی پایین آورد بطوری که در داخل مخزن جریان رودخانه‌ای اتفاق بیفتد، ابتدا یک کانال اصلی در میان رسوبات ایجاد شده و فرسایش رسوبات از بازه بالادست مخزن شروع شده و به پایین دست حرکت می‌کند که به آن اصطلاحاً فرسایش پیشرونده<sup>۷</sup> می‌گویند. در هنگام باز شدن دریچه‌های تحتانی، حرکت جریان آب موجب ایجاد تنش برشی بر روی رسوبات نهشته شده گردیده و زمانی که تنش برشی ایجاد شده بیشتر از مقاومت برشی رسوبات گردد ذرات رسوبی جابه‌جا می‌شوند. در این هنگام توده‌های بزرگی از رسوبات، از نزدیکی دریچه‌ها خارج شده و با گذشت زمان و تخلیه رسوبات، یک مخروط رسوبشویی<sup>۸</sup> در نزدیکی تخلیه‌کننده تشکیل می‌شود (شکل ۱). ابعاد مخروط رسوبشویی و مدت زمان لازم برای تشکیل و به پایدار رسیدن ژئومتری آن، بستگی به عمق آب داخل مخزن، دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، ارتفاع رسوبات و نوع رسوبات تجمع یافته دارد و ممکن است از چند ساعت تا چند روز ادامه یابد. برای مثال آزمایش‌ها انجام شده بر روی مدل مخزن جببدم در کشور سوئیس نشان داد که مخروط رسوبشویی پس از مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت به حالت تعادل می‌رسد (۶).

تا به حال در مورد رسوبشویی تحت فشار مطالعاتی کمی صورت گرفته است. با این حال در این زمینه می‌توان به مطالعات وایت و بتس<sup>۹</sup> اشاره نمود. آنها به منظور بدست آوردن طول

می‌توان به سد مانگاهو<sup>۱</sup> واقع در کشور نیوزلند اشاره نمود. این سد در سال ۱۹۵۸ به بهره‌برداری رسید و پس از ۳۴ سال بهره‌برداری ۵۹ درصد از حجم اولیه خود را در اثر رسوبگذاری از دست داد. رسوبشویی انجام شده در سال ۱۹۶۹ در این سد موجب گردید ۷۵٪ از رسوبات تجمع یافته در مدت یک ماه از مخزن خارج گردد. همچنین سدهای دیگری نیز وجود دارند که انجام رسوبشویی در آنها موجب احیای حجم اولیه در آنها شده است که برای مثال می‌توان به سد کاچی<sup>۲</sup> واقع در کشور کاستریکا، مخزن لویزا<sup>۳</sup> واقع در کشور آمریکا، مخزن جببدم واقع در کشور سوئیس، مخازن سانمنگشیا<sup>۴</sup> و هیسونگلین<sup>۵</sup> در کشور چین و مخزن سفیدرود در کشور ایران اشاره نمود (۶).

### ب) رسوبشویی بدون پائین آوردن سطح آب مخزن (رسوبشویی تحت فشار)

در رسوبشویی تحت فشار در طول مدت انجام رسوبشویی، معمولاً تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد برای مدت زمان معینی باز شده و سطح آب مخزن تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود. رسوبات مجاور دهانه‌های خروجی شسته شده و حفره مخروطی شکلی در جلوی آن تشکیل می‌شود. این روش دارای اثرات موضعی در دفع رسوبات می‌باشد. بنابراین از این روش معمولاً زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بخواهند رسوبات نهشته در اطراف ورودی آبیگر را بر طرف نمایند (۶).

### هیدرولیک و چگونگی تخلیه رسوبات

همان طوری که قبلاً ذکر شد رسوبشویی فرآیندی است که طی آن رسوباتی که از قبل در داخل مخزن نهشته شده اند با باز کردن دریچه‌های تحتانی همراه جریان آب از مخزن خارج می‌شوند.

6- Retrogressive Erosion  
7- Progressive Erosion  
8- Flushing Cone  
9- White & Bettess

1- Mangahao  
2- Cachi  
3- Loiza  
4- Sanmenxia  
5- Heisonglin

### تئوری و آنالیز ابعادی

همان طوری که قبلاً ذکر شد زمانی که دریاچه‌های تحتانی به منظور رسوبشویی باز می‌شود حرکت جریان آب موجب حرکت رسوبات نهشته شده می‌گردد. اگر رسوبشویی به صورت تحت فشار انجام گیرد، پس از مدتی یک مخروط رسوبشویی به شکل یک قیف در مجاورت تخلیه‌کننده‌ها تشکیل می‌گردد (شکل ۱). حجم مخروط رسوبشویی ( $V_f$ ) بستگی به پارامترهای مختلفی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی ( $Q_f$ )، ارتفاع آب داخل مخزن ( $H_w$ )، ارتفاع رسوبات تجمع یافته در پشت مخزن ( $H_s$ )، اندازه ذره رسوب ( $d_{50}$ )، سرعت متوسط جریان آب خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی ( $u_f = \frac{Q_f}{A_G} = \frac{1}{4} \pi D_G^2$ )، که در آن  $A_G$  مساحت سطح مقطع تخلیه‌کننده تحتانی و  $D_G$  قطر دریاچه می‌باشد، شتاب ثقل ( $g$ )، چگالی آب ( $\rho_w$ )، تفاصل چگالی رسوب و آب ( $\rho_s - \rho_w$ )، لزجت سینماتیکی آب ( $\nu$ )، عرض مخزن ( $B$ ).

به عبارت ریاضی می‌توان نوشت:

$$V_f = f(u_f, H_w, H_s, D_G, g, \rho_s - \rho_w, \rho_w, B, d_{50}, \nu) \quad (1)$$

با آنالیز ابعادی ۱۱ پارامتر مذکور با استفاده از روش باکینگهام، و با در نظر گرفتن پارامترهای  $\rho_w$ ،  $u_f$  و  $D_G$  به عنوان متغیرهای تکراری، ۸ پارامتر بدون بعد به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\Pi_1 = \frac{V_f}{D_G^3}, \Pi_2 = \frac{u_f^2}{g D_G}, \Pi_3 = \frac{H_w}{D_G}, \Pi_4 = \frac{H_s}{D_G}$$

$$\Pi_5 = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \Pi_6 = \frac{d_{50}}{D_G}, \Pi_7 = \frac{B}{D_G}, \Pi_8 = \frac{u_f D_G}{\nu}$$

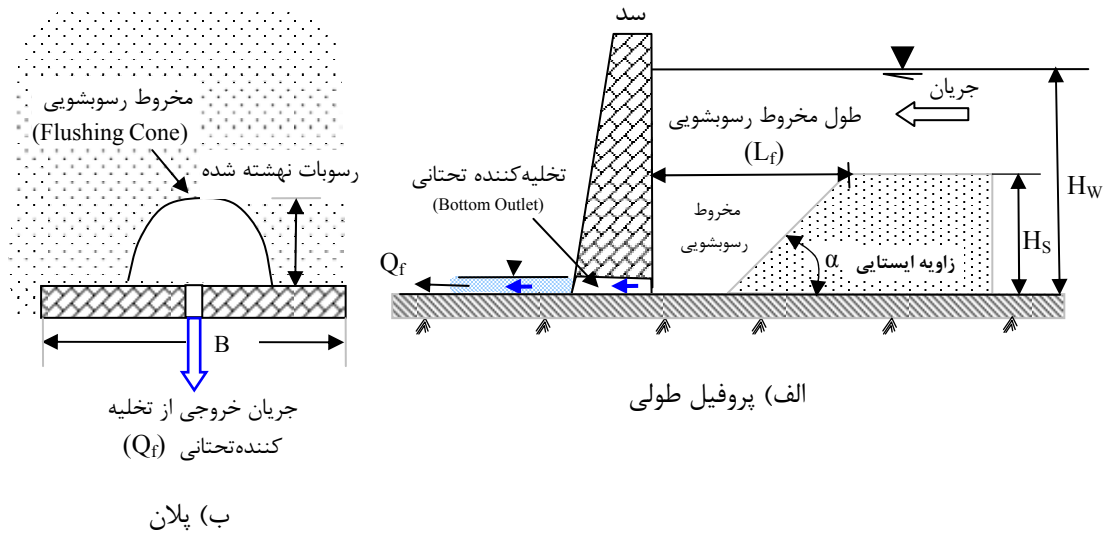
با ترکیب پارامترهای بدون بعد  $\Pi_2$  و  $\Pi_5$  و

مخروط رسوبشویی در مدت زمان انجام رسوبشویی تحت فشار مطالعاتی انجام داده‌اند. آنها اظهار داشتند طول مخروط رسوبشویی به عمق آب داخل مخزن و دبی خروجی از مخزن بستگی دارد. آنها بر اساس اجرای مدل ریاضی یک بعدی، شکل ۲ را برای تعیین فاصله تقریبی طول مخروط رسوبشویی ارائه نمایند. همچنین فانگ و کائو<sup>۱</sup> (۴) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از رسوبات شنی با اندازه بین ۰/۱ تا ۰/۳ میلی متر با قطر متوسط mm ۰/۱۵ گزارش نمودند، وقتی مخروط رسوبشویی به تعادل می‌رسد شیب در جهت طولی و جانبی تقریباً مساوی یکدیگر می‌باشند. شیب در جهت طولی برابر با ۱/۶۳:۱ معادل با ۳۱/۵ درجه بدست آمد که مقداری کمتر از زاویه ایستایی برای رسوب مذکور (۳۲/۵ درجه) می‌باشد. اسچورلین و همکاران<sup>۲</sup> (۸) نیز بر اساس مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از رسوبات شنی با قطر متوسط mm ۰/۸۸۴ اظهار داشت در رسوبشویی تحت فشار در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی حفره قیفی شکل<sup>۳</sup> تشکیل می‌گردد و گسترش طولی و عرضی آن محدود می‌باشد (شکل ۳). همچنین شیب مخروط رسوبشویی در نقاط اندازه‌گیری شده تقریباً همیشه برابر با زاویه ایستایی رسوبات در شرایط مستغرق (تقریباً ۳۵ درجه) بود. به عبارت بهتر شکل پلان آن تقریباً نصف محیط دایره بود. وی علت آن بدین گونه توضیح می‌دهد که قدرت فرسایش تخلیه‌کننده در تمام جهات تقریباً مساوی یکدیگر می‌باشد. همچنین زمانی که مخروط رسوبشویی به تعادل می‌رسد، دیگر هیچ گونه رسوبی از مخزن خارج نمی‌گردد، مگر اینکه ارتفاع آب مخزن کاهش یابد.

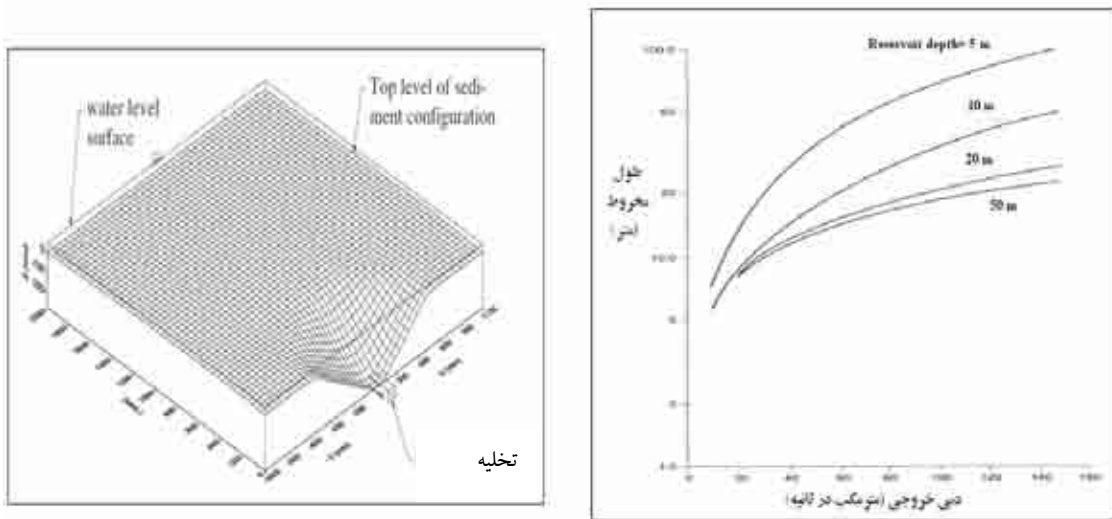
1- Fang & Cao

2- Scheuerlein *et al.*

3- A Funnel Shape Crater



شکل ۱- شماتیکی از مخروط رسوبشویی در سیستم رسوبشویی تحت فشار: الف) پروفیل طولی ب) پلان



شکل ۳- نمای سه بعدی از حفره رسوبشویی در حالت رسوبشویی تحت فشار

شکل ۲- فاصله تقریبی طول مخروط رسوبشویی

مخروط رسوبشویی انجام شد، رابطه زیر را برای طول مخروط رسوبشویی می توان نوشت:

$$\frac{L_f}{D_G} = k_L \cdot \left( \frac{u}{\sqrt{g(G_S - 1)D_G}} \right)^{\alpha_L} \cdot \left( \frac{H_W}{D_G} \right)^{\beta_L} \quad (5)$$

بر اساس آزمایش های در نظر گرفته شده در این تحقیق سعی بر این است که بر اساس داده های جمع آوری شده  $k_L$ ،  $\alpha_L$  و  $\beta_L$  تعیین خواهد شد، و در نهایت رابطه بدون بعدی استخراج نمود تا با استفاده از آن به توان طول مخروط رسوبشویی را تعیین کرد.

### مواد و روش ها

#### ۱- شرح مدل فیزیکی

با توجه به سه بعدی بودن الگوی جریان در نزدیکی تخلیه کننده های تحتانی و همچنین دخیل بودن تعداد پارامترهای زیاد در این پدیده، بررسی رفتار ریاضی فرآیند رسوبشویی بسیار مشکل و پیچیده می باشد (۸)، لذا برای شناخت این پدیده و رسیدن به اهداف این تحقیق بکارگیری مدل فیزیکی در نظر گرفته شده است. مدل در نظر گرفته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. این مدل دارای سه قسمت اصلی می باشد: - قسمت ورودی مدل (ناحیه آرام کننده جریان) - مخزن مدل - حوضچه ته نشینی رسوبات.

قسمت ورودی مدل دارای ابعادی به طول ۰/۹ متر، عمق ۱/۲ متر و عرض ۱/۱ متر می باشد. در این قسمت تلاطم جریان ورودی به مدل گرفته شده و جریان به صورت آرام وارد قسمت اصلی مدل (مخزن) می گردد. همچنین در این قسمت به منظور کنترل رقوم سطح آب مخزن از یک سرریز استفاده گردید، که با استفاده از آن آب مازاد ورودی به مدل به مخزن اصلی آزمایشگاه برگشت داده می شد. برای قسمت مخزن طول ۵ متر (بیشتر از ۴ برابر عرض مدل) انتخاب گردید. ارتفاع مدل ۰/۶۵ متر و

گرفتن جذر از آن، پارامتر را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Pi_2 = \frac{u_f}{\sqrt{g \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} D_G}} = \frac{u_f}{\sqrt{g(G_S - 1) D_G}}$$

$$\frac{V_f}{D_G^3} = f\left(\frac{u_f}{\sqrt{g(G_S - 1) D_G}}, \frac{H_W}{D_G}, \frac{H_S}{D_G}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \frac{d_{50}}{D_G}, \frac{B}{D_G}, \frac{u_f D_G}{\nu}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $R_e = \frac{u_f D_G}{\nu}$  بیانگر تاثیر نیروی لزجت می باشد، با توجه به اینکه در این تحقیق مقدار حداقل این پارامتر بدون بعد ۱۲۹۵۲ می باشد، لذا از تاثیر این پارامتر می توان صرف نظر کرد. همچنین با توجه به ثابت بودن مقدار پارامترهای بدون بعد  $\Pi_5 = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = 1.65$ ،  $\Pi_4 = \frac{H_S}{D_G} = 4.6$

و  $\Pi_7 = \frac{B}{D_G} = 12$ ،  $\Pi_6 = \frac{d_{50}}{D_G} = 0.0054$ ، رابطه

(۲) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_f}{D_G^3} = f\left(\frac{u_f}{\sqrt{g(G_S - 1) D_G}}, \frac{H_W}{D_G}\right) \quad (3)$$

رابطه (۳) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_f}{D_G^3} = k_V \cdot \left( \frac{u}{\sqrt{g(G_S - 1) D_G}} \right)^{\alpha_V} \cdot \left( \frac{H_W}{D_G} \right)^{\beta_V} \quad (4)$$

در این تحقیق تلاش شده است بر اساس آزمایش ها مختلف در نظر گرفته شده و داده های جمع آوری شده ضرایب  $k_V$ ،  $\alpha_V$  و  $\beta_V$  تعیین خواهد شد و در نهایت رابطه بدون بعدی استخراج خواهد شد تا با استفاده از آن به توان حجم مخروط رسوبشویی را برآورد نمود.

در رسوبشویی تحت فشار علاوه بر دانستن مقدار حجم رسوبات تخلیه شده، دانستن پارامتر طول مخروط رسوبشویی ( $L_f$ ) نیز مهم می باشد (شکل ۲). این پارامتر نیز مانند حجم مخروط رسوبشویی تابعی از متغیرهایی است که قبلا ذکر شدند. با آنالیز ابعادی با روشی مشابه که برای حجم

### ۳- چگونگی انجام آزمایش

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق آزمایش‌ها در سه مرحله با سه ارتفاع آب مختلف انجام گردید. در مرحله اول، آزمایش‌ها با ارتفاع آب ۶۰ سانتی‌متر با ۹ دبی مختلف انجام گردید. در مرحله دوم، آزمایش‌ها با ارتفاع آب ۴۶ سانتی‌متر با ۵ دبی مختلف انجام گردید و در مرحله سوم، آزمایش‌ها با ارتفاع آب ۳۰ سانتی‌متر با ۵ دبی مختلف انجام گردید. در مجموع ۱۹ آزمایش انجام گرفت. جدول‌های ۱ و ۲ اطلاعات مربوط به هر آزمایش را نشان می‌دهد.

نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که در هر مرحله ابتدا رسوبات به صورت یکنواخت در سر تاسر مدل با ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر پهن می‌گردید. پس از تنظیم ارتفاع آب مورد نظر در مدل تخلیه‌کننده انتهائی باز می‌گردید. شکل ۶ مدل را در حین انجام آزمایش نشان می‌دهد (نما از روبرو).

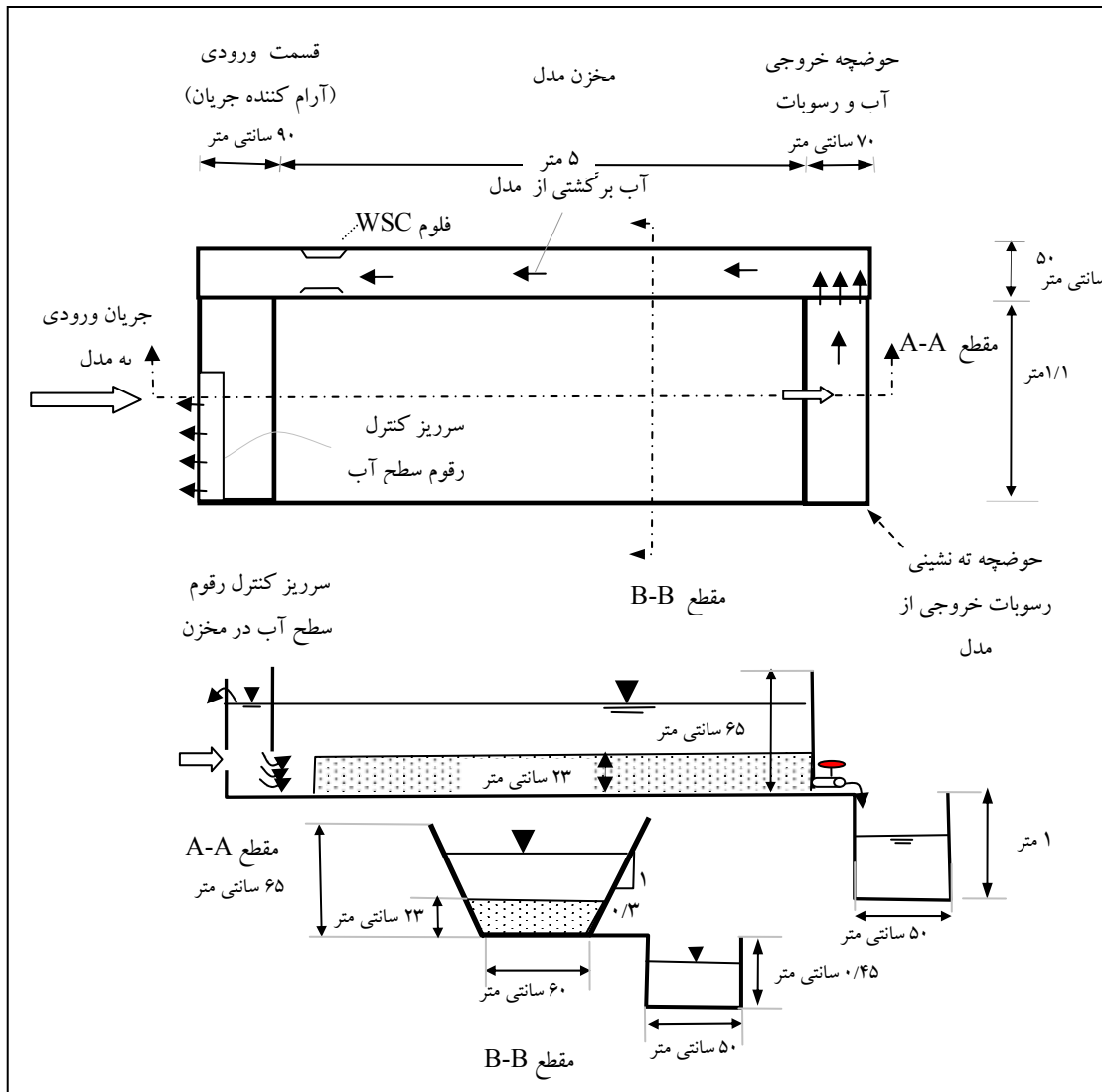
در شروع آزمایش، زمانی که تخلیه‌کننده تحتانی باز می‌گردید، رسوبات تحت فشار آب همراه جریان آب با غلظت خیلی بالا از دریچه‌ها خارج شده و با گذشت زمان غلظت رسوبات خروجی کاهش می‌یافت. به طوری که تقریباً ۹۰ درصد رسوبات در ۳۰ دقیقه اول از زمان باز شدن تخلیه‌کننده تحتانی، در اثر رسوبشویی خارج می‌گردید. با این حال تمامی آزمایش‌ها به مدت یک ساعت، تا زمان تقریباً به تعادل رسیدن حفره رسوبشویی ادامه می‌یافت. به طوری که نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد در انتهای آزمایش غلظت رسوبات خروجی از تخلیه‌کننده ناچیز بود. شکل ۷ نمونه‌ای از تغییرات غلظت خروجی از تخلیه‌کننده را در مدت زمان انجام رسوبشویی نشان می‌دهد.

پس از پایان یافتن آزمایش، با استفاده از ارتفاع سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر برداشت مقاطع عرضی در مدل انجام می‌گردید. همچنین فاصله طولی مخروط رسوبشویی رسوبات ( $L_f$ ) در پایان

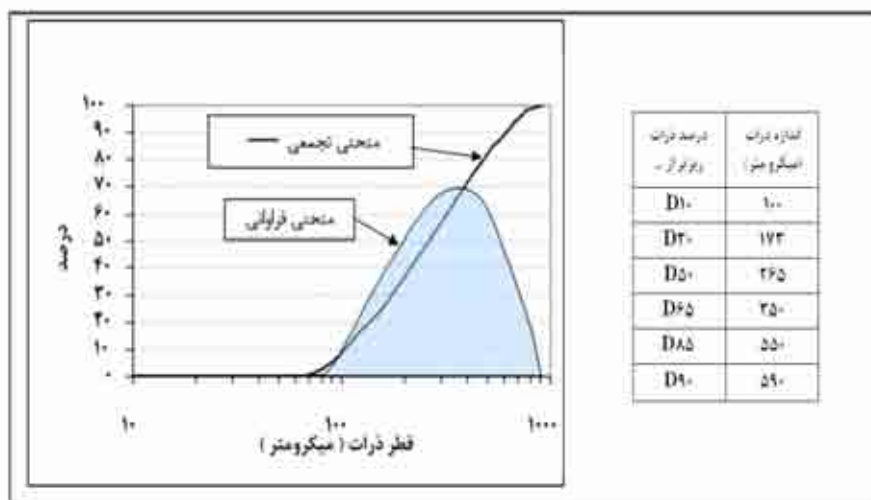
مقطع آن ذوزنقه‌ای شکل با عرض ۰/۶ متر در قسمت پایینی و ۱/۱ متر در قسمت بالائی بود. به منظور رسوبشویی یک تخلیه‌کننده تحتانی با مقطع دایره‌ای شکل (شیری با قطر ۵ سانتی‌متر) در مرکز مقطع خروجی با فاصله ۵ سانتی‌متر از کف مدل قرارداد شد. رسوبات پس از خروج از تخلیه‌کننده تحتانی وارد حوضچه ته‌نشینی رسوبات به شکل مستطیلی با عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۱ متر گردیده و پس از ته‌نشین شدن رسوبات، آب صاف خروجی از آن بوسیله یک کانال مستطیل شکل به مخزن اصلی آزمایشگاه برگشت داده می‌شد. برای اندازه‌گیری جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی از فلوم WSC استفاده گردید. این فلوم در قسمت انتهائی یک کانال مستطیلی با عرض ۰/۵ متر، عمق ۰/۴۵ متر و طول ۶/۶ متر که در مجاورت و موازی مخزن اصلی مدل قرار داشت، جایگذاری گردید. شکل ۴ طرح مدل، پروفیل طولی و مقاطع عرضی همراه با جزئیات مربوطه را نشان می‌دهد.

### ۲- رسوبات مورد استفاده و دانه بندی آن

با توجه به اینکه ذرات رسوب باید در طول مدل به صورت یکنواخت پهن می‌گردیدند، و با توجه به ابعاد گسترده مدل و حجم بالای رسوبات مورد نیاز، از ماسه طبیعی استفاده گردید. به منظور یکنواختی ذرات رسوبی، رسوبات مورد نظر از روش الک کردن بدست آمد. دانه بندی مصالح مورد استفاده که با استفاده از دستگاه لیزری دانه بندی ذرات بدست آمد، در شکل ۵ ارائه شده است. رسوبات مورد استفاده دارای اندازه بین ۰/۰۷ تا ۱ میلی‌متر با قطر متوسط  $0.27\text{ mm}$ ، انحراف معیار هندسی  $1/87$  و چگالی نسبی  $2/65$  می‌باشد. در صورتی که معیار هندسی رسوبات بزرگتر از عدد ۲ باشد، آن رسوبات غیر یکنواخت خواهد بود (۱). با توجه به اینکه معیار هندسی رسوبات بدست آمده در این تحقیق ( $1/87$ ) کوچکتر از عدد ۲ می‌باشد، لذا رسوبات مورد استفاده را تقریباً می‌توان یکنواخت در نظر گرفت.



شکل ۴- طرح مدل، پروفیل طولی و مقاطع عرضی آن همراه با جزئیات مربوطه



شکل ۵- منحنی دانه بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها

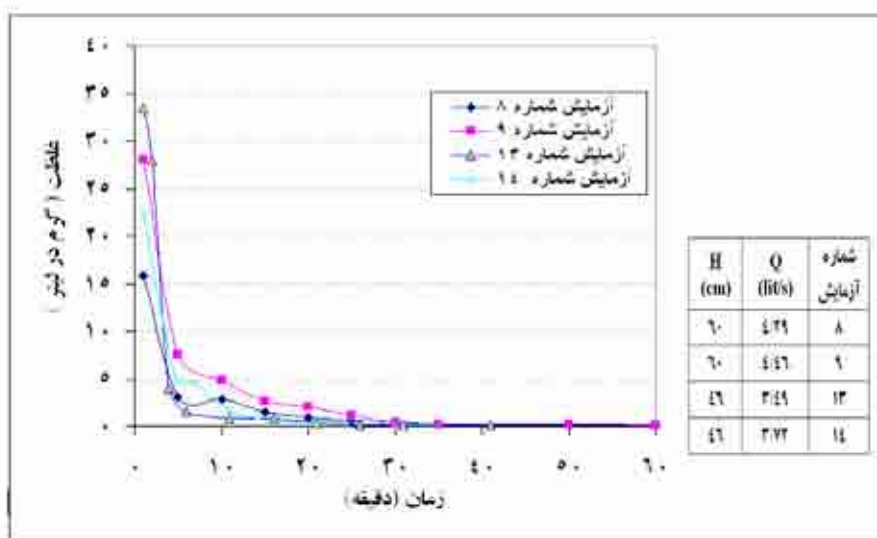


رسوبشویی شده بدست آمد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب توپوگرافی و نما سه بعدی از مخروط رسوبشویی تشکیل شده در جلوی تخلیه کننده تحتانی را نشان می دهد.

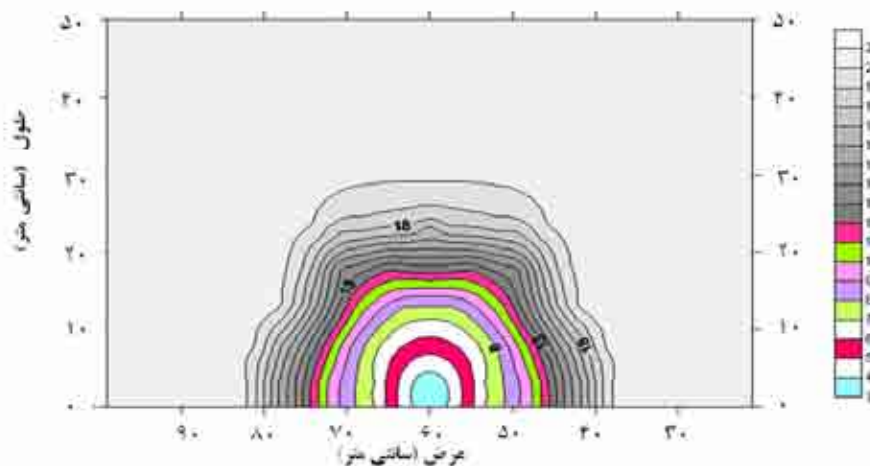
بدست آمده، به منظور بدست آوردن حجم مخروط رسوبشویی در گزینه های مختلف، از نرم افزار Surfer 8 استفاده گردید. با استفاده از این نرم افزار و معرفی مقاطع عرضی برداشت شده حجم رسوبات



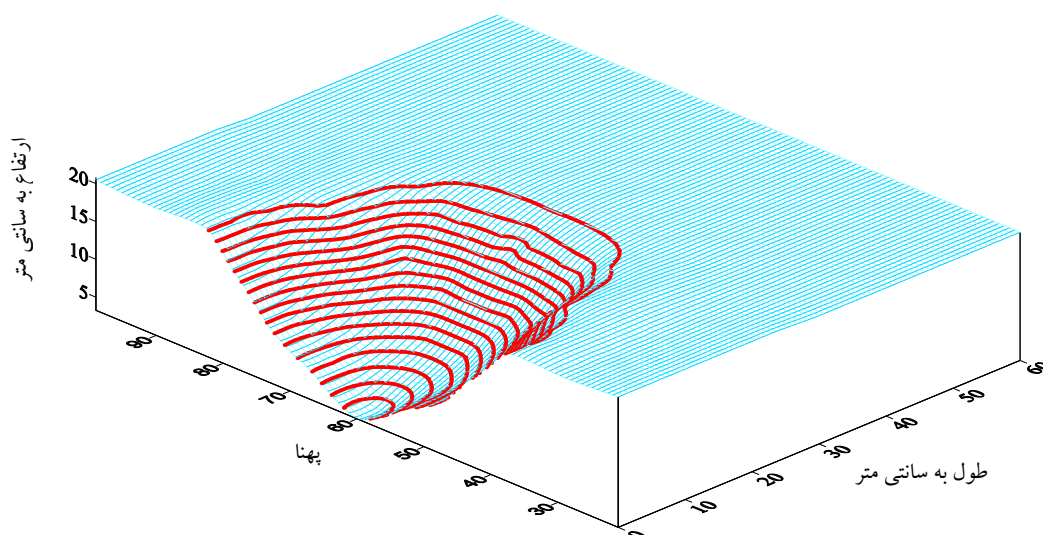
شکل ۶- مدل مخزن در حین آزمایش (نما از روبرو) با دبی ۲/۲۱ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۶۰ سانتی متر بالای دریچه



شکل ۷- ارتباط بین غلظت رسوبات خروجی از تخلیه کننده تحتانی نسبت به زمان انجام رسوبشویی



شکل ۸- توپوگرافی از بستر مدل پس از انجام آزمایش با دبی ۲/۲۱ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۶۰ سانتی متر



شکل ۹- نما سه بعدی از بستر مدل پس از انجام آزمایش با دبی ۲/۲۱ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۶۰ سانتی متر

جدول ۱- تعداد آزمایش‌های در نظر گرفته شده و دیگر اطلاعات مربوط به هر آزمایش

آزمایش‌ها در نظر گرفته شده	ارتفاع آب نسبت به کف مدل		تعداد دبی‌ها	ضخامت رسوب در مدل	
	مدل (سانتی‌متر)	مدل (سانتی‌متر)		مدل (سانتی‌متر)	مدل (سانتی‌متر)
حالت ۱	۶۰	۶۰	۹	۲۳	۲۳
حالت ۲	۴۶	۴۶	۵	۲۳	۲۳
حالت ۳	۳۰	۳۰	۵	۲۳	۲۳

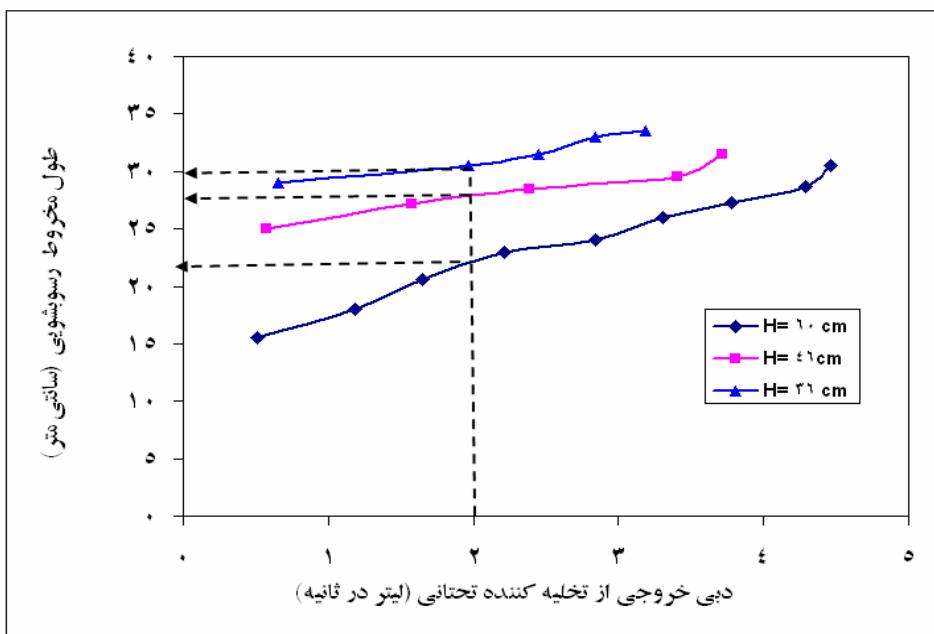
## نتایج و بحث

شکل های مذکور ملاحظه می کنید به ازای یک دبی ثابت، کاهش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش حجم و طول مخروط رسوبشویی می گردد. برای مثال در حالتیکه دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی برابر با ۲ لیتر در ثانیه می باشد و ارتفاع آب مخزن به ترتیب ۳۶، ۴۶ و ۶۰ سانتی متر باشد، طول مخروط رسوبشویی به ترتیب ۳۰، ۲۷/۵ و ۲۲ سانتی متر، و حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب ۱۱۸۸۵، ۱۰۲۳۲ و ۵۹۵۴ سانتی متر مکعب می باشد. به عبارت بهتر به ازای یک دبی ثابت، کاهش ارتفاع

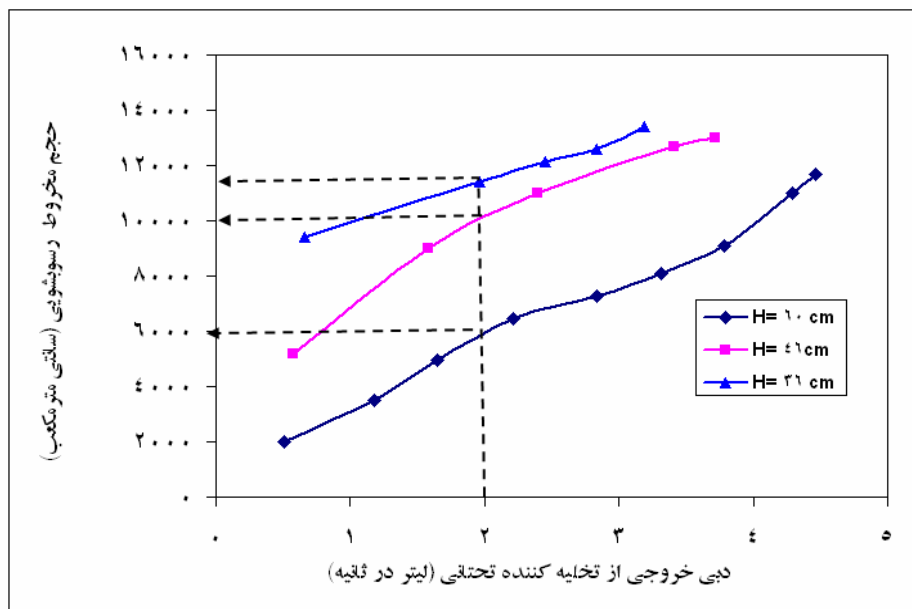
نتایج حاصل از اندازه گیری و حجم مخروط رسوبشویی محاسبه شده با استفاده از نرم افزار Surfer 8 و شرایط هر یک از گزینه ها در جدول ۲ آمده است. با استفاده از نتایج بدست آمده، طول و حجم مخروط رسوبشویی در مقابل دبی جریان به ازای سه ارتفاع ۳۶، ۴۶ و ۶۰ سانتی متر در شکل های ۱۰ و ۱۱ ترسیم شده است در شکل های ۱۰ و ۱۱ منحنی های بالایی، میانی و پایینی به ترتیب مربوط به به ارتفاع ۶۰، ۴۶ و ۳۶ سانتی متر می باشد. همان طوری که در

جدول ۲- نتایج حاصل از انجام آزمایش ها در گزینه های مختلف

شماره آزمایش	ارتفاع آب ( $H_w$ ) (سانتی متر)	دبی خروجی از تخلیه کننده ( $Q_f$ ) (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع رسوب در مدل ( $H_s$ ) (سانتی متر)		نسبت ارتفاع آب به رسوب ( $H_w / H_s$ )	طول مخروط رسوبشویی ( $L_f$ ) (سانتی متر)	حجم مخروط رسوبشویی ( $V_f$ ) (سانتی متر مکعب)
			ارتفاع رسوب	مدل			
۱	۶۰	۰/۵۱	۲۳	۲۳	۲/۶	۱۵/۵	۲۰۰۰
۲	۶۰	۱/۱۸	۲۳	۲۳	۲/۶	۱۸	۳۰۰۰
۳	۶۰	۱/۶۵	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۲	۵۷۰۰
۴	۶۰	۲/۲۱	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۳	۶۶۰۰
۵	۶۰	۲/۸۴	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۴	۷۰۰۰
۶	۶۰	۳/۴۹	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۶	۷۳۰۰
۷	۶۰	۳/۸۸	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۷/۳	۷۵۰۰
۸	۶۰	۴/۲۹	۲۳	۲۳	۲/۶	۲۸	۱۱۰۰۰
۹	۶۰	۴/۴۹	۲۳	۲۳	۲/۶	۳۰/۵	۱۱۷۰۰
۱۰	۴۶	۰/۵۷	۲۳	۲۳	۲	۲۵	۵۲۰۰
۱۱	۴۶	۴/۴۶	۲۳	۲۳	۲	۲۸/۲	۹۰۰۰
۱۲	۴۶	۲/۳۹	۲۳	۲۳	۲	۲۸/۵	۱۱۰۰۰
۱۳	۴۶	۳/۴۹	۲۳	۲۳	۲	۲۹	۱۲۷۰۰
۱۴	۴۶	۳/۷۲	۲۳	۲۳	۲	۳۱/۵	۱۳۰۰۰
۱۵	۳۶	۰/۶۶	۲۳	۲۳	۱/۶	۲۹	۹۴۰۰
۱۶	۳۶	۲/۳۹	۲۳	۲۳	۱/۶	۳۰/۵	۱۱۴۰۰
۱۷	۳۶	۲/۴۵	۲۳	۲۳	۱/۶	۳۱/۵	۱۱۶۰۰
۱۸	۳۶	۲/۸۴	۲۳	۲۳	۱/۶	۳۳	۱۲۶۰۰
۱۹	۳۶	۳/۱۹	۲۳	۲۳	۱/۶	۳۳/۵	۱۳۴۰۰



شکل ۱۰- ارتباط بین طول مخروط رسوبشویی، ارتفاع آب داخل مخزن و دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی در رسوبشویی تحت فشار



شکل ۱۱- ارتباط بین حجم مخروط رسوبشویی، ارتفاع آب داخل مخزن و دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی در رسوبشویی تحت فشار

به منظور بدست آوردن ضرایب رابطه بدون بعد (۳)  $(\beta_V, \alpha_V, k_V)$  و همچنین ضرایب رابطه بدون بعد ۵  $(\beta_L, \alpha_L, k_L)$  برای تعیین حجم و طول مخروط رسوبشویی، به تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده های بدست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS پرداخته شد، و ضرایب مذکور بدست آمد. با جای گذاری ضرایب بدست آمده در روابط بدون بعد ۵ و ۶، رابطه های پیش بینی حجم و طول مخروط رسوبشویی در رسوبشویی تحت فشار به صورت زیر بدست آمد:

$$\frac{V_f}{D_G^3} = 6609 \left( \frac{u}{\sqrt{g(G_S - 1)D_G}} \right)^{0.46953} \left( \frac{H_W}{D_G} \right)^{-1.0337} \quad (7)$$

$$\frac{L_f}{D_G} = 189 \left( \frac{u}{\sqrt{g(G_S - 1)D_G}} \right)^{0.1733} \left( \frac{H_W}{D_G} \right)^{-0.5672} \quad (8)$$

در شکل های ۱۲ و ۱۳ ارتباط بین  $\frac{V_f}{D_G^3}$  و  $\frac{L_f}{D_G}$  اندازه گیری شده و  $\frac{L_f}{D_G}$  و  $\frac{V_f}{D_G^3}$  محاسبه شده را نشان داده شده است.

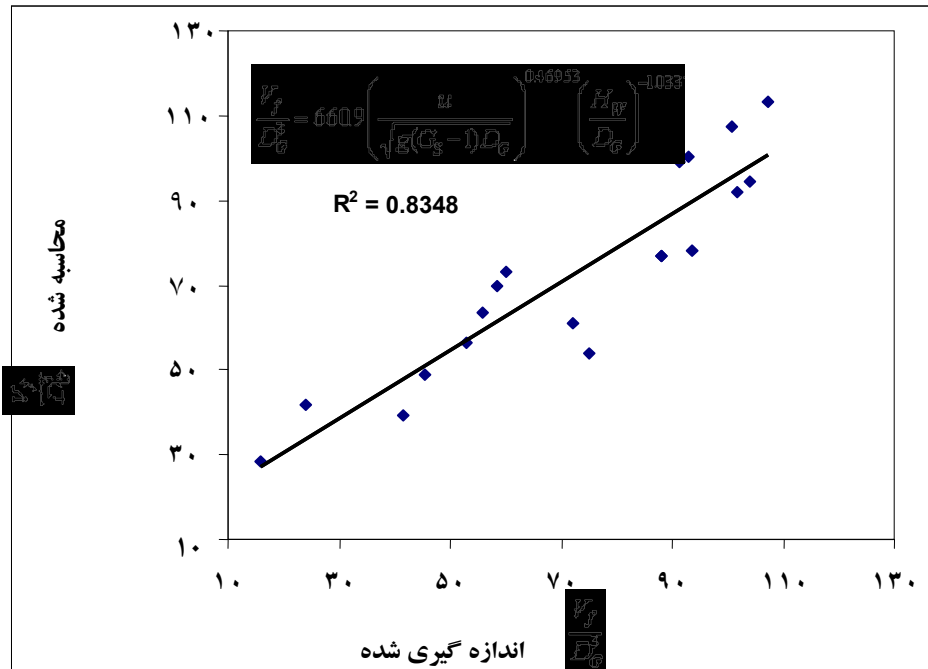
با توجه به روابط ۷ و ۸ می توان بیان داشت، توان مثبت پارامتر بدون  $\Pi = \frac{u}{\sqrt{g(G_S - 1)D_G}}$  نشان می دهد، افزایش سرعت جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی که نتیجه افزایش دبی جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی می باشد و همچنین کوچکتر شدن اندازه ذره موجب خواهد شد، حجم و طول مخروط رسوبشویی افزایش یابد. همچنین با توجه به اینکه در انجام آزمایش ها قطر دریچه  $(D_G)$  ثابت بوده است، توان منفی پارامتر بدون بعد دوم  $(\Pi = \frac{H_W}{D_G})$  بیانگر آن است که کاهش ارتفاع آب داخل مخزن، تاثیر مثبت در افزایش حجم و طول مخروط رسوبشویی دارد.

آب مخزن منجر به افزایش طول و حجم مخروط رسوبشویی می گردد. در مجموع مقایسه کمی نتایج حاصل از اندازه گیری آزمایش ها انجام شده نشان می دهد زمانی که ارتفاع آب مخزن از ۶۰ به ۴۶ سانتی متر (کاهش ۲۳ درصدی ارتفاع آب مخزن) و همچنین از مقدار ۶۰ به ۳۶ سانتیمتر (کاهش ۴۰ درصدی ارتفاع آب مخزن) موجب شده است طول مخروط رسوبشویی به ترتیب ۷ و ۲۲ درصد و همچنین حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب ۲۶ و ۵۷ درصد افزایش می یابد.

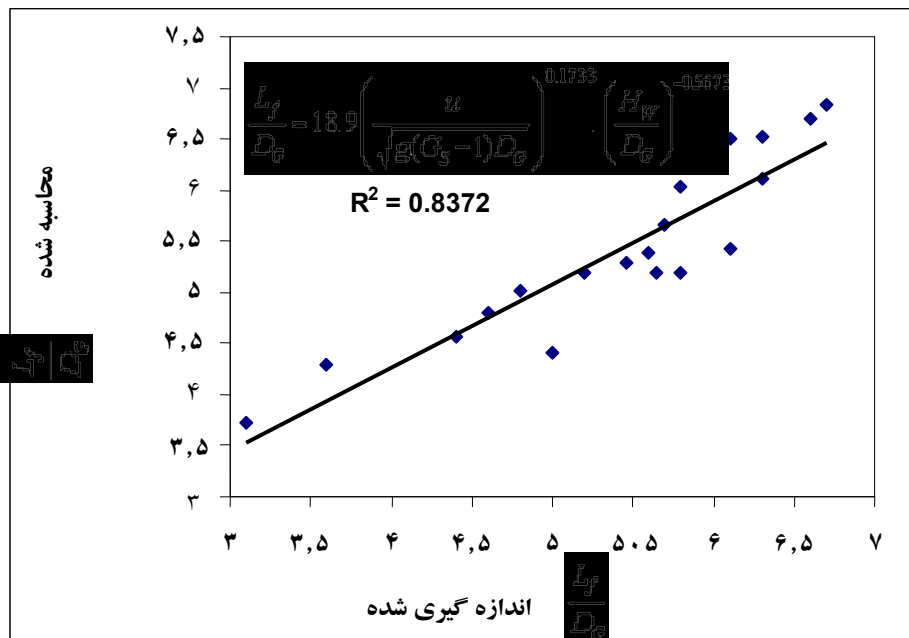
به عبارت بهتر برای افزایش حجم و طول مخروط رسوبشویی بهتر است تا جایی که شرایط بهره برداری مخزن اجازه می دهد، ارتفاع آب داخل مخزن را کاهش داد. این کار موجب خواهد شد شرایط مخزن به سمت جریان رودخانه ای متمایل شده و سرعت جریان در داخل مخزن افزایش یابد. این مطلب به خوبی در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همچنین این مطلب بوسیله محققین قبلی مانند وایت و بتس (۱۴) و اسپچورلین و همکاران (۸) نیز تاکید شده بود.

همچنین اندازه گیری شیب حفره رسوبشویی تشکیل شده در این تحقیق نشان می دهد که مقدار شیب در جهت طولی بطور متوسط برابر با ۳۵ درجه می باشد. محققین قبلی مانند فانگ و کائو (۴) مقدار شیب مخروط رسوبشویی را برای ذرات رسوبی با اندازه  $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$  برابر با  $31/5$  درجه بدست آوردند. همچنین اسپچورلین و همکاران (۸) اظهار داشت شیب حفره رسوبشویی تقریباً برابر با زاویه ایستایی رسوبات در شرایط مستغرق برابر می باشد و برای ذرات رسوبی با قطر متوسط  $0.184 \text{ mm}$ ، زاویه شیب حفره رسوبشویی تقریباً برابر با ۳۵ درجه می باشد.

ارائه رابطه بدون بعد برای تعیین حجم و طول مخروط رسوبشویی



شکل ۱۲- ارتباط بین  $\frac{V_f}{D_g}$  اندازه گیری شده و  $\frac{V_f}{D_g}$  محاسبه شده



شکل ۱۳- ارتباط بین  $\frac{L_f}{D_g}$  اندازه گیری شده و  $\frac{L_f}{D_g}$  محاسبه شده

### نتیجه گیری

روش رسوبشویی تحت فشار دارای اثرات موضعی در دفع رسوبات می‌باشد، بنابراین از این روش زمانی می‌توان مورد استفاده قرار داد که بخواهند رسوبات را به صورت موضعی (مانند رسوبات نهشته در اطراف ورودی آبگیر) برطرف نمایند. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به دو صورت بیان نمود:

#### الف- تاثیر دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی

همان طوری که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد، زمانی که دبی جریان خروجی به ازای یک رقوم ثابت افزایش می‌یابد، حجم و طول مخروط رسوبشویی بیشتر می‌گردد. بطوری که مقایسه کمی داده های بدست آمده نشان می‌دهد، زمانی که دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی ۷۶/۶ درصد کاهش می‌یابد، طول و حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب ۲۰/۳ و ۴۹/۹ درصد کاهش می‌یابد.

#### ب- تاثیر ارتفاع آب داخل مخزن

همان طوری که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد، زمانی که ارتفاع آب مخزن کاهش می‌یابد، به ازای یک دبی ثابت، طول و حجم مخروط رسوبشویی بیشتر می‌گردد. بطوری که مقایسه کمی داده های بدست آمده نشان می‌دهد،

زمانی که ارتفاع آب مخزن به طور متوسط ۳۱/۵ درصد کاهش می‌یابد، طول و حجم مخروط رسوبشویی به ترتیب ۱۴/۵ و ۴۱/۵ درصد افزایش می‌یابد.

به عبارت بهتر توصیه می‌شود در مخزنی که امکان انجام رسوبشویی آزاد وجود ندارد، رسوبشویی تحت فشار زمانی صورت گیرد که رقوم سطح آب مخزن در حالت می‌نیم بهره برداری باشد. بنابراین به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان بیان نمود که در استفاده از رسوبشویی تحت فشار بایستی سعی شود تراز آب مخزن تا حد ممکن پایین برده شود و یا اینکه زمان انجام عملیات رسوبشویی مصادف با رسیدن رقوم سطح آب به حداقل تراز بهره برداری مخزن انتخاب شود و ضمناً در حین عملیات، تخلیه کننده‌های تحتانی با حداکثر ظرفیت مانور شوند.

### سیاسگزاری

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است. بدین وسیله از مسوولین آن دانشکده کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

### منابع

۱. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۳. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۷۰ ص.
2. Atkinson, E. 1996. The feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137, HR Wallingford, UK, 99 p.
3. Brown, C.B. 1943. The Control of Reservoir Silting. United States Department of Agriculture, Miscellaneous Publication, No. 521:166.
4. Fang, D., and Cao, S. 1996. An experimental study on scour funnel in front of a sediment flushing outlet of a reservoir. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, March, 10-14: pp: 78-84.

5. Hemphill, R.G. 1931. Silting and life of southwestern reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 95: 1060-1074.
6. Morris, L.M., and Fan, J. 1997. Reservoir Sedimentation Handbook. design and management of dams, reservoirs and watershed for sustainable use. McGraw Hill, New York, 748 p.
7. Qian, N. 1982. Reservoir sedimentation and slope stability; technical and environmental effects. Fourteenth International Congress on Large Dams, Transactions, Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 May, 3, pp: 639-690.
8. Scheuerlein, H. Tritthart, M., and Nunez Gonzalez, F. 2004. Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs. Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran. pp: 245-254.
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, D.E. Walling, S.S.D. Foster, P. Wurzel, eds, IAHS Publication, 44: 577-587.
10. White, R. 2000. Flushing of Sediments from Reservoirs. ICOLD, World Register of Large Dams, HR Wallingford, UK, 166 p.