

## بررسی تأثیر تراز رسوب مخزن بر راندمان رسوبدایی تحت فشار

مینا شهیرنیا<sup>1</sup>، سید علی ایوبزاده<sup>2\*</sup>، جمال محمد ولی سامانی<sup>3</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

2- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

3- استاد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

\* تهران، صندوق پستی 336 -- 14115

ayyoubzadeh@yahoo.com

**چکیده-** در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی رسوب‌شویی تحت فشار و اثر تغییرات تراز رسوبات بر راندمان و ابعاد حفره رسوب‌شویی پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای مذکور از یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. آزمایشات بر روی سه تراز رسوبات، سه ارتفاع آب و سه دبی تخلیه برای هر ارتفاع آب انجام گرفت. با توجه به نتایج مربوط به ابعاد اندازه‌گیری شده مخروط، بین تراز رسوبات و ابعاد مخروط رسوب‌شویی ارتباط مستقیمی وجود دارد و انتظار می‌رود با افزایش تراز رسوبات نرخ گسترش ابعاد مخروط رسوب‌شویی افزایش یابد. همچنین راندمان رسوب‌شویی تحت فشار با افزایش تراز رسوبات تجمع یافته در مخزن افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش تراز رسوبات به میزان میانگین 29 درصد، راندمان به طور میانگین 2 درصد افزایش می‌یابد. از طرفی مشاهده شد شکل مخروط رسوب‌شویی در پلان به نیم‌دایره نزدیک بوده و گسترش عرضی آن در کلیه آزمایش‌ها از گسترش طولی بیشتر است. در نهایت بر اساس داده‌های آزمایشگاهی روابط بدون بعدی برای پیش‌بینی ابعاد حفره رسوب‌شویی شامل طول، عرض و حجم حفره بدست آمد. این روابط دارای ضریب تبیین بالایی (حداقل 99 درصد) بوده و تخمین خوبی را ازایه می‌کنند.

**کلیدواژگان:** رسوب‌شویی تحت فشار، تراز رسوبات، مدل فیزیکی، آنالیز ابعادی.

### 1- مقدمه

(2000). لذا، با توجه به اینکه ایران یک کشور خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، هر گونه غفلت از این موضوع عواقب جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت و این تهدید بزرگی برای زندگی نسل‌های آینده به شمار می‌رود. از طرفی امروزه به دلیل آیین‌نامه‌های سختگیرانه زیست-محیطی و عدم وجود مکان‌های مناسب برای احداث سد

رسوب‌گذاری در مخازن سدها یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی سدهای ذخیره‌ای است. لذا شناخت فرایندهای مؤثر در این پدیده برای محققان مرتبط با مدیریت مخازن و سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. این مشکل مخصوصاً در مناطق استوایی و نیمه خشک به دلیل بالا بودن دبی جریان رسوب، بارزتر است (Brandt,

بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که این روش در محافظت از توربین‌ها در نیروگاه‌های برقی نقش بسزایی دارد (Fang and Cao, 1996). پدیده‌ی تشکیل مخروط رسوب‌شویی تحت فشار تاکنون توسط برخی از محققان گزارش شده است. همچنین مطالعات گذشته نشان داده است مدت زمان لازم برای تشکیل کامل حفره آبستگي و پایدار شدن آن به نوع رسوبات، دبی خروجی، تراز آب مخزن و ارتفاع رسوبات تجمع یافته پشت دیواره‌ی مخزن بستگی دارد و ممکن است چند ساعت تا چندین روز به طول انجامد (Lai and Shen, 1996; Meshkati Shahmirzadi et al., 2009).

فانگ و کائو گزارش کرده‌اند که شیب جانبی حفره رسوب‌شویی تقریباً معادل زاویه ایستایی رسوبات در شرایط مستغرق می‌باشد و شیب در جهت طولی تقریباً با شیب در جهت عرضی برابر است (Fang and Cao, 1996). اسپورلین و همکارانش بیان کردند، زمانی که مخروط رسوب‌شویی به تعادل رسید، دیگر هیچ‌گونه رسوبی از مخزن خارج نمی‌شود، مگر اینکه ارتفاع آب مخزن کاهش یابد (Scheuerlein et al., 2004).

امامقلی‌زاده و همکارانش و همچنین فتحی‌مقدم و همکارانش به منظور شبیه‌سازی و دستیابی به الگوی رفتار جریان در همسایگی دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی، به مطالعه بر روی مدل فیزیکی و آزمایشگاهی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش تراز سطح آب پشت دیواره مخزن و افزایش دبی تخلیه‌کننده‌ها تنش برشی اعمال شده روی رسوبات افزایش یافته و در نتیجه ابعاد حفره گسترش می‌یابد و رسوبات از فواصل دورتری به سمت تخلیه‌کننده‌ها سرازیر می‌شوند (امامقلی‌زاده و جهانی، 1387؛ Fathi-Moghadam et al., 2009; Emamgholizadeh, 2005).

همچنین مشکاتی شه‌میرزادی و همکارانش نیز در آزمایش‌های خود گزارش کردند حجم رسوبات تخلیه

و تأثیرات سدها بر روی اکولوژی رودخانه، توجه و دقت ویژه‌ای بر روی تقلیل و ته‌نشینی رسوبات در مخازن سدها در نظر گرفته می‌شود. امروزه از شیوه‌های مختلفی برای توسعه عمر مفید مخازن در جهان استفاده می‌شود که بطور خلاصه عبارتند از: عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک، عبوردهی جریان غلیظ، رسوب‌شویی هیدرولیکی، استفاده از سیستم کنارگذر برای جریان‌های غلیظ و دفع رسوبات مخزن بوسیله ادوات مکانیکی مانند لایروبی و سیفون کردن. بکاربردن این روش‌ها مستلزم شناخت کامل آنها از نظر توانایی و محدودیت‌های آنها می‌باشد، بطوری که گاهی اوقات ممکن است بکار بردن این روش‌ها در برخی از مخازن اقتصادی نباشد (Atkinson, 1996).

در این بین رسوب‌شویی هیدرولیکی به عنوان یک روش مؤثر در احیای حجم از دست رفته مخزن بدون تحمیل هزینه‌های ناشی از اجرای روش‌های مکانیکی حذف رسوبات مطرح است (Atkinson, 1996). بطور کلی، در رسوب‌شویی هیدرولیکی دو نوع عملیات برای خارج کردن رسوبات از مخزن وجود دارد که با توجه به رقوم سطح آب مخزن در حین انجام رسوب‌شویی، نوع عملیات رسوب‌شویی متفاوت می‌باشد. فان و موریس، رسوب‌شویی را به دو دسته اصلی رسوب‌شویی آزاد و تحت فشار طبقه‌بندی کرده‌اند (Lai and Shen, 1996).

در روش رسوب‌شویی تحت فشار، در شرایطی که رقوم سطح آب در مخزن بالاتر از رقوم مرکزی دریچه و تقریباً ثابت است، رسوباتی که از قبل در مخزن نهشته شده‌اند به وسیله باز کردن تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد، همراه با جریان آب خروجی از مخزن، تخلیه شده و از آن خارج می‌شوند. مقدار حجم رسوبات تخلیه شونده از دریچه سد به پارامترهای مختلفی مانند شرایط هیدرولیکی مخزن، دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، ارتفاع رسوبات تجمع یافته در مخزن و ... بستگی دارد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- آنالیز ابعادی

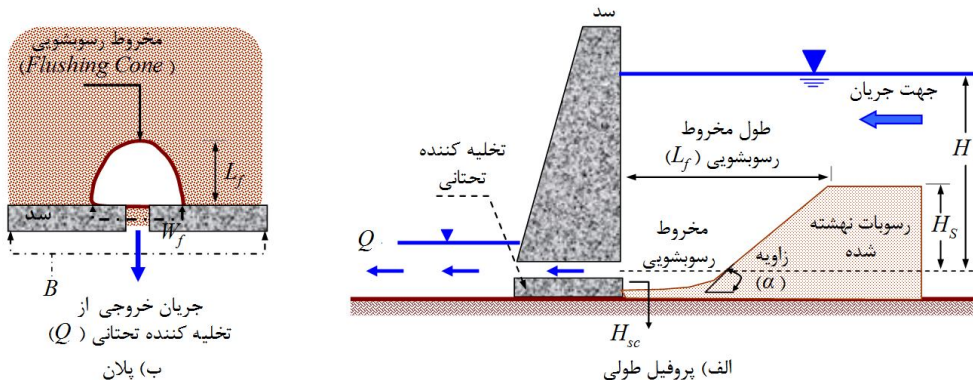
همان‌طور که قبلاً ذکر شد در رسوب‌شویی تحت فشار پس از برقراری جریان از دریچه تخلیه‌کننده تحتانی، رسوبات نهشته شده در مخزن شروع به حرکت کرده و حفره‌ای قیفی شکل در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی شکل خواهد گرفت. ابعاد (حجم، طول و عرض) این حفره و راندمان رسوب زدائی،  $\Omega$  به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که اهم آن‌ها عبارتند از (شکل 1):

سرعت جریان خروجی  $(U = \frac{Q}{A})$  (که در آن  $A$  مساحت باز شدگی دریچه است)، ارتفاع آب در مخزن  $(H)$ ، ارتفاع رسوبات تجمع یافته در پشت دریچه تخلیه  $(H_s)$ ، موقعیت تخلیه‌کننده  $(H_{sc})$ ، قطر متوسط ذرات رسوبی  $(d_{50})$ ، شتاب ثقل  $(g)$ ، چگالی رسوبات  $(\rho_s)$ ، عرض سد در محل بدنه  $(B_R)$ ، طول مخزن  $(L_R)$ ، چگالی آب  $(\rho)$  و لزجت دینامیکی آب  $(\mu)$ . با انتخاب پارامترهای  $H$ ،  $U$  و  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش باکینگهام، 8 گروه بدون بعد برای پارامترهای مشخصه (متغیرهای مستقل و مؤثر) بدست می‌آیند.

شده و هم چنین راندمان رسوب‌شویی با ابعاد دریچه تخلیه‌کننده رابطه مستقیم دارد (مشکاتی شه‌میرزادی و همکاران، 1388).

در برخی دیگر از تحقیقات در خصوص تأثیر عوامل مختلف با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، به شبیه‌سازی و ارائه روابطی برای تعیین هندسه مخروط رسوب‌شویی پرداخته شده است (Emamgholizadeh et al., 2013).

بررسی‌های فوق نشان می‌دهد که با وجود مطالعاتی که در زمینه راندمان رسوب‌شویی تحت فشار و ابعاد حفره ایجاد شده در سال‌های اخیر صورت گرفته و تأثیر عواملی نظیر تراز آب پشت سد بر روی عملکرد دریچه‌های تخلیه‌کننده با استفاده از انجام آزمایش‌ها و استفاده از مدل فیزیکی مورد توجه قرار گرفته است، لیکن بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد تاکنون بررسی آزمایشگاهی که تأثیر تراز رسوبات تجمع یافته در نزدیکی بدنه سد را مورد ملاحظه قرار دهد، به انجام نرسیده است؛ لذا در تحقیق حاضر تلاش شده تا گامی برای پر کردن این خلاء برداشته شود.



$$\Omega = \bar{\phi} \left( \frac{U}{\sqrt{gH}}, \frac{H_s}{H}, \frac{B_R}{H} \right) \quad (2)$$

در روابط (1) و (2) نماد  $\Omega$  شامل هر خصوصیت قابل اندازه گیری از پدیده بوده که بصورت بدون بعد بیان می شود. در این تحقیق، پارامترهای بدون بعد ذیل مورد بررسی قرار گرفته اند:

$$\Omega_1 = \frac{V_f}{H^3}, \quad \Omega_2 = \frac{L_f}{H}, \quad \Omega_3 = \frac{B_f}{H}, \quad \Omega_4 = \frac{V}{V_{wR}}$$

$$\Omega_5 = \frac{V_f}{V}, \quad \Omega_6 = \frac{V_f}{V_{wR}}$$

پارامترهای  $\Omega_1$  تا  $\Omega_3$  به ترتیب حجم، طول و عرض مخروط رسوب شویی بدون بعد شده با ارتفاع آب در مخزن و پارامتر  $\Omega_4$  حجم آب تخلیه شده به حجم آب در مخزن است. پارامتر  $\Omega_5$  که نسبت حجم رسوبات تخلیه شده به حجم آب مصرف شده در مدت زمان تعادل را نشان می دهد توسط کیان به عنوان راندمان رسوب شویی ( $\eta$ ) تعریف شده است (Qian, 1982).

پارامتر  $\Omega_6$  را می توان به صورت نسبت دبی جریان تخلیه شده،  $Q$ ، به دبی مشخصه مخزن  $Q_R$  نیز تعریف کرد یعنی:

$$\Omega_6 = \frac{Q}{Q_R} \quad (3)$$

که در این رابطه دبی مشخصه مخزن  $Q_R$  عبارتست از:

$$Q_R = \frac{V_{wR}}{T_s} \quad (4)$$

که  $V_{wR}$  حجم آب متناظر با تراز آب در مخزن می باشد و عبارتست از:  $V_{wR} = B_R L_R H$  و  $T_s$  زمان توقف توسعه مخروط رسوب شویی و یا زمان تعادل بستر رسوبی در مخزن پس از ایجاد فرایند رسوب شویی است.

رابطه (2) برای پارامترهای  $\Omega_1$  تا  $\Omega_3$  بصورت رابطه ریاضی صریح و به شکل ذیل مورد بررسی قرار می گیرد:

$$\Omega = K \left( \frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^a \left( \frac{B_R}{H} \right)^b \left( \frac{H_s}{H} \right)^c \quad (5)$$

از طرف دیگر با توجه به اصول آنالیز بعدی، می توان هر یک از گروه های بدون بعد مستقل در پدیده را با یک خصوصیت وابسته جایگزین کرد، مشروط به اینکه

لیکن با توجه با توجه به محدودیت های آزمایشگاهی و در نتیجه ثابت بودن برخی از پارامترها و عدم بررسی تغییرات آنها در این تحقیق، ترکیب و دسته بندی مناسب از گروه های بدون بعد با توان های معلوم جایگزین پارامترهای بدون بعد گردیده و نهایتاً هر خصوصیت بدون بعد از پدیده مورد نظر را می توان به شکل تابعی ذیل نشان داد:

$$\Omega = \phi \left( \frac{U}{\sqrt{gH}}, \frac{H_s}{H}, \frac{B_R}{H}, \frac{H_{sc}}{d_{50}}, \frac{L_R}{B_R}, \frac{d_{50}}{B_R}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{\rho U H}{\mu} \right) \quad (1)$$

اما مقادیر 4 پارامتر بدون بعد در کلیه آزمایش ها ثابت و مطابق جدول 1 می باشند.

جدول 1 مقادیر پارامترهای بدون بعد ثابت در تحقیق حاضر

$s = \frac{\rho_s}{\rho}$	$\frac{d_{50}}{B_R}$	$H_{sc}^* = \frac{H_{sc}}{d_{50}}$	$\frac{B_R}{L_R}$
2/65	0/00023	104	0/28

مقادیر جدول 1 بر اساس ثابت بودن قطر متوسط ذرات رسوبی ( $d_{50}$ )، چگالی آب ( $\rho_w$ )، چگالی ذرات رسوبی ( $\rho_s$ )، عرض ( $B_R$ ) و طول مخزن در محل سد ( $L_R$ ) بدست می آیند.

پارامتر بدون بعد  $\frac{\rho U H}{\mu}$  در رابطه (1) که بیان کننده اثر لزجت سیال در پدیده است، عدد رینولدز جریان بوده که حداقل آن در تخلیه کننده و مخزن به ترتیب معادل 927000 و 714 می باشد که با مقایسه با مقادیر حداقل 2000 و 500، به ترتیب در مجاری روباز عریض و لوله ها برای ایجاد جریان آشفته، از اثر این پارامتر بدون بعد هم می توان در پدیده صرف نظر کرد؛ ضمناً حداقل عدد رینولدز ذره در آزمایش ها برابر 146/6 بوده که بیش از حداقل مقدار 70 برای ایجاد بستر کاملاً زبر هیدرولیکی است. لذا رابطه (1) به شکل رابطه (2) ساده می شود:

برازش اضافی<sup>1</sup> روابط بدون بعد ابعاد مخروط رسوب‌شویی، داده‌های آزمایشگاهی به دو دسته تقسیم شدند؛ دسته اول که 80 درصد کل داده‌ها را تشکیل می‌دادند به عنوان داده‌های واسنجی<sup>2</sup> و دسته دوم داده‌ها که 20 درصد باقی‌مانده را شامل می‌شوند به عنوان داده‌های آزمون<sup>3</sup> در نظر گرفته شدند. به منظور محاسبه ضرایب روابط مذکور از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

## 2-2- مشخصات مدل آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌ها از یک فلوم مکعب مستطیل شکل با ابعاد 7/1 متر طول، 1/4 متر عرض و 1/5 متر ارتفاع، واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. این مدل از 4 قسمت اصلی (به ترتیب ناحیه تخلیه جریان اضافی، قسمت ورودی مدل (ناحیه آرام کننده جریان)، مخزن مدل و حوضچه ته‌نشینی رسوبات) تشکیل شده است. مخزن مدل به عنوان مهم‌ترین بخش دارای طول 5 متر، ارتفاع 1/5 متر و عرض 1/4 متر می‌باشد. بدنه مدل از جنس شیشه بوده تا هرگونه تغییرات در پدیده رسوب‌شویی بتواند به سهولت مشاهده شود. دریچه تخلیه‌کننده با مقطع دایره‌ای شکل و قطر 2 اینچ در خط مرکزی فلوم در نظر گرفته شد. ضمناً تراز محور مرکزی تخلیه‌کننده از بستر مخزن (فلوم) بطور ثابت و برابر 15 سانتی‌متر بوده است (شکل 2). تمام آزمایش‌ها با استفاده از رسوبات غیرچسبنده از نوع سیلیس با قطر متوسط 1/15 میلی‌متر، ضریب یکنواختی 1/87 و انحراف معیار هندسی 1/37 انجام شد. بنابراین با توجه به این که مقدار ضریب یکنواختی کوچک‌تر از 4 و انحراف معیار هندسی کمتر از 1/5 می‌باشد، می‌توان گفت ذرات رسوبی دانه‌بندی یکنواخت دارند.

پارامترهای بدون بعد جدید دارای استقلال کمی باشند. بعلاوه پارامترهای ثابت در مسأله مورد تحقیق را می‌توان جایگزین پارامترهای ثابت دیگر در گروه‌های بدون بعد نموده، مشروط بر آنکه همگنی بعدی رعایت شود. لذا با توجه به این موارد روابط (6) و (7) برای  $\Omega_4 = \Omega_6/\Omega_5$  قابل استخراج هستند:

$$\Omega_5 = \bar{\phi}_1 \left( \frac{H_s}{H}, \frac{Q}{Q_R}, H_s^* \right) \quad (6)$$

$$\Omega_6 = \bar{\phi}_2 \left( \frac{H_s}{H}, \frac{Q}{Q_R}, F^* \right) \quad (7)$$

که در این روابط  $H_s^*$  نسبت تراز محور دهانه تخلیه کننده به اندازه متوسط ذرات رسوبی بستر مخزن و  $F^*$  نوعی از عدد فرود بوده که در اینجا تحت عنوان "عدد فرود بستر مخزن" مورد توجه قرار گرفته است لذا:

$$H_s^* = \frac{H_{sc}}{d_{50}} \quad (8)$$

$$F^* = \frac{Q}{B_R L_R \sqrt{g d_{50} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}} \quad (9)$$

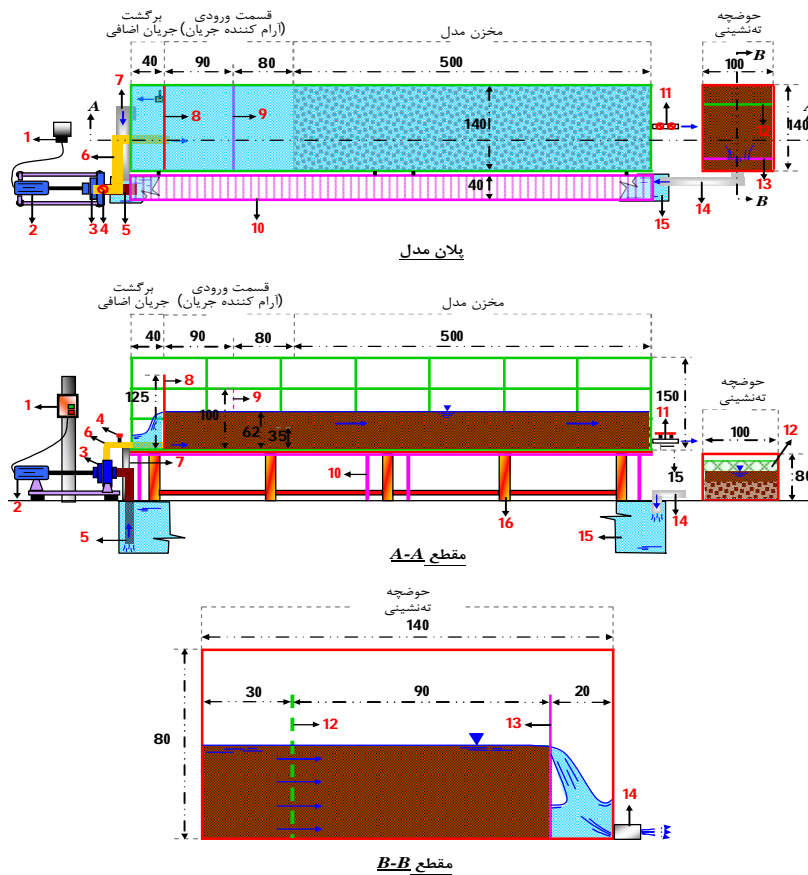
جدول 2 نیز دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد مذکور را نشان می‌دهد:

جدول 2 محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد

پارامتر بدون بعد	دامنه تغییرات
$V_f/H^3$	0/0044 - 0/128
$L_f/H$	0/206 - 0/662
$w_f/H$	0/465 - 1/457
$U/\sqrt{gH}$	0/885 - 1/117
$B_R/H$	2/171 - 2/979
$H/H_s$	2/35 - 6/45

همان‌طور که ذکر شد هدف از آنالیز ابعادی بدست آوردن روابط بدون بعد برای پیش‌بینی ابعاد مخروط رسوب‌شویی می‌باشد. در این تحقیق برای اجتناب از

1. Over Fitting  
2. Calibration Data  
3. Test Data



شکل 2 مدل آزمایشگاهی مورد استفاده  
 توجه: تمام ابعاد به سانتی‌متر می‌باشد. همچنین اشکال دارای مقیاس بوده و در مقطع B-B مقیاس 4 برابر بزرگتر شده‌اند.  
 1- تابلی برق، 2- الکتروموتور، 3- پمپ، 4- شیر کنترل جریان ورودی، 5- لوله مکش، 6- لوله دهش،  
 7- لوله برگشت جریان اضافی، 8- سرریز کنترل کننده ارتفاع آب مخزن، 9- صفحه مشبک، 10- سکوی دسترسی،  
 11- تخلیه‌کننده تحتانی، 12- صفحه مشبک، 13- سرریز کنترل کننده جریان خروجی، 14- لوله برگشت جریان،  
 15- مخزن اصلی تأمین آب، 16- چهارچوب نگهدارنده مدل

### 2-3- نحوه انجام آزمایش‌ها

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش‌ها در 3 تراز رسوب داخل مخزن (فاصله تراز رسوبات تا محور مرکزی روزنه خروجی) و برای هر تراز رسوب، 3 ارتفاع آب و 3 دبی جریان خروجی انجام شد. ضمناً تغییرات تراز رسوبات با توجه به ثابت بودن موقعیت دریچه تخلیه کننده با تغییر در ضخامت رسوبات نهشته شده اولیه در مخزن صورت گرفته است. برای هر تراز رسوب 9 آزمایش و در مجموع 27 آزمایش انجام گرفت. جدول 3 مشخصات آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

انجام این تحقیق شامل مراحل زیر بود:

قبل از انجام آزمایش در هر مرحله، رسوب در داخل مدل

بصورت لایه لایه ریخته می‌شد تا به ارتفاع نهایی مورد نظر برسد.

جدول 3 تعداد آزمایش‌های انجام شده و دیگر اطلاعات مربوط به هر آزمایش

تعداد آزمایش‌ها	دبی خروجی (L/s)	ارتفاع آب در مخزن (cm)	ارتفاع رسوبات بالای دریچه تخلیه (cm)
9	3.2، 1	47.55، 64/5	20
9	3.2، 1	47.55، 64/5	15
9	3.2، 1	47.55، 64/5	10

سپس برای صاف کردن رسوبات ریخته شده در مدل از

شویی برداشت شود. برای این کار از یک متر لیزری که بر روی یک کالسکه نصب می‌شود، استفاده می‌گردید. به منظور دقت بیشتر در برداشت پروفیل بستر از یک شبکه-بندی ثابت (2/5×2/5 سانتی‌متر) در بستر استفاده شد که برداشت‌ها در گره‌های آن صورت می‌گرفت. رقوم ارتفاعی گره‌ها با توجه به مختصات آن‌ها به نرم‌افزار SURFER داده شده و حجم مخروط در هر آزمایش با دقت محاسبه می‌شد. عرض و طول مخروط نیز در انتهای آزمایش با استفاده از متر نواری اندازه گرفته می‌شدند.

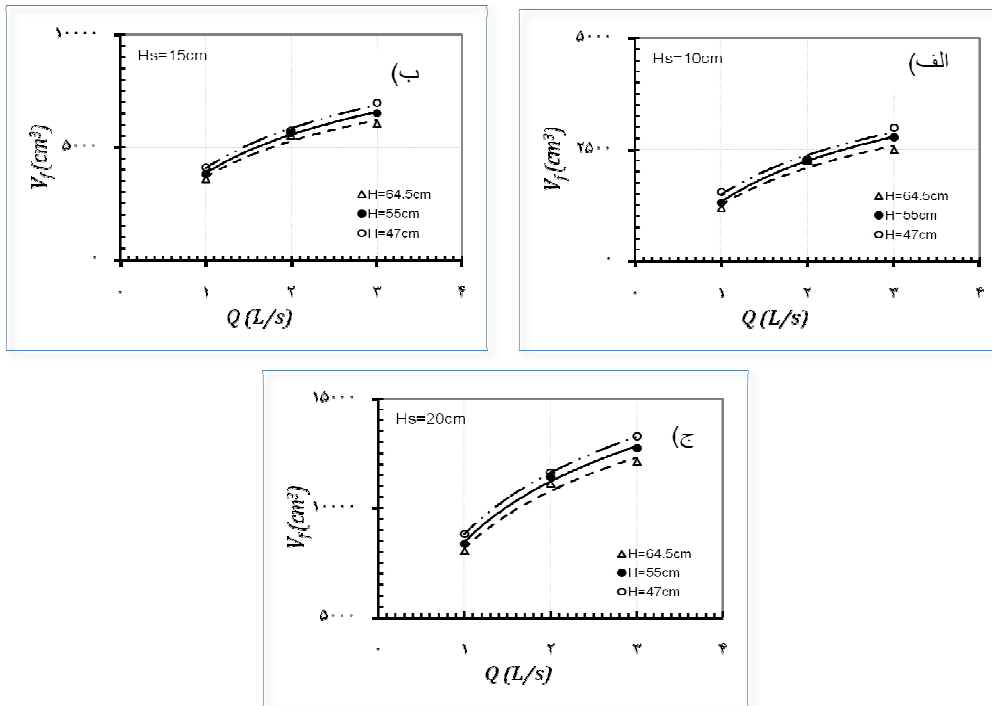
از زمان‌های بسیار مهم در پدیده رسوب‌شویی تحت فشار می‌توان به زمان نقطه تخلیه ناگهانی رسوبات، زمان توقف و زمان تعادل اشاره کرد. در تحقیق حاضر زمان نقطه تخلیه ناگهانی رسوبات، مدت زمان از لحظه باز شدن دریچه تخلیه‌کننده تحتانی تا رسیدن حفره به زمان شروع ناگهانی تخلیه مخلوط آب و رسوب می‌باشد. همچنین زمان توقف، مدت زمان لازم از زمان تخلیه ناگهانی رسوبات تا زمان به تعادل رسیدن مخروط رسوب‌شویی می‌باشد. زمان تعادل نیز مجموع زمان‌های نقطه تخلیه ناگهانی رسوبات و زمان توقف می‌باشد (شهرنیا، 1391).

### 3- نتایج و بحث

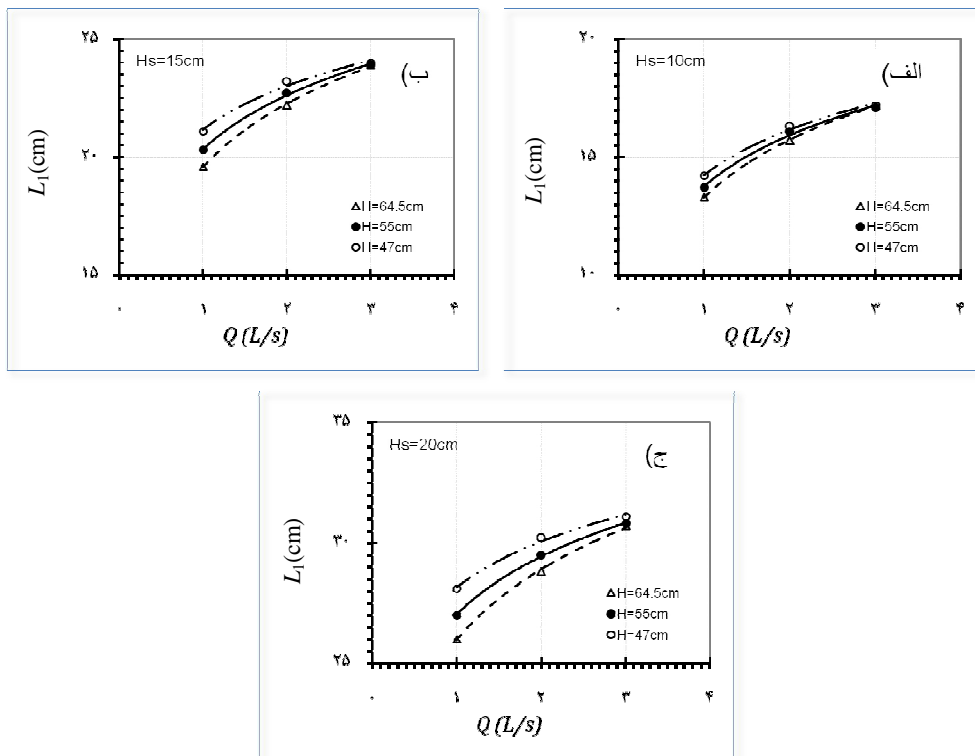
به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق و تفسیر نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده، نخست این نتایج در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های 3 تا 5 به‌ترتیب نتایج تغییرات حجم، طول و عرض مخروط رسوب‌شویی را در مقابل دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده و تحت شرایط مختلف تراز آب و رسوب در مخزن نشان می‌دهد. بخش‌های الف، ب و ج در همه این شکل‌ها به‌ترتیب بیانگر نتایج حاصل در ترازهای 10، 15 و 20 سانتی‌متر رسوب در پشت دهانه تخلیه‌کننده رسوب بوده است. منحنی‌ها در هر شکل، برای سه تراز آب در مخزن ارائه شده است.

یک تیغه مسطح‌کننده استفاده می‌شد. پس از تنظیم تراز رسوبات، لازم بود قبل از انجام آزمایش دبی خروجی تنظیم شود.

برای این کار برای خروجی دو دریچه در نظر گرفته شد که دریچه اول وظیفه تنظیم جریان خروجی را بر عهده دارد و دریچه دوم بصورت کاملاً باز و یا کاملاً بسته می‌باشد. به منظور کنترل دبی خروجی از دریچه تخلیه‌کننده تحتانی و اطمینان از صحت آن، ابتدا دریچه دوم در حالت کاملاً بسته قرار می‌گرفت و سپس ارتفاع سرریز ابتدایی متناسب با تراز سطح آب مورد نیاز تنظیم می‌شد. سپس پمپ تأمین آب روشن و تراز سطح آب به ارتفاع مورد نیاز رسانیده می‌شد. در این زمان دریچه دوم در حالت کاملاً باز قرار می‌گرفت و دبی خروجی از دریچه اول با استفاده از روش حجمی محاسبه می‌شد. دبی خروجی از دریچه تخلیه‌کننده تحتانی توسط یک سرریز 60 درجه که در حوضچه ته‌نشینی رسوبات قرار داشت کنترل می‌شد. به منظور کاهش تلاطم جریان خروجی و آرام کردن آن، از یک صفحه مشبک فلزی درون حوضچه ته‌نشینی استفاده شد. با حصول اطمینان از درستی دبی خروجی، دریچه دوم در حالت بسته قرار گرفته و آب باقی‌مانده در مدل توسط شیر فلکه 2 اینچ نصب شده بر روی مانع طراحی شده در ابتدای مدل تخلیه می‌شد. با باز شدن دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی، رسوبات نهشته شده در مخزن در اثر مکش ایجاد شده در مجرای تخلیه‌کننده شروع به حرکت کرده و تخلیه رسوبات تا زمان تعادل مخروط رسوب‌شویی ادامه داشت. به منظور اطمینان از به تعادل رسیدن مخروط رسوب‌شویی، تمامی آزمایش‌ها به مدت یک ساعت از زمان باز شدن دریچه تخلیه‌کننده تحتانی ادامه می‌یافت. پس از پایان آزمایش، برای اینکه شکل مخروط تغییر نکند، ابتدا دریچه دوم بطور کامل بسته می‌شد و سپس پمپ تأمین آب خاموش می‌گردید. در انتهای هر آزمایش لازم بود پروفیل مخروط رسوب-

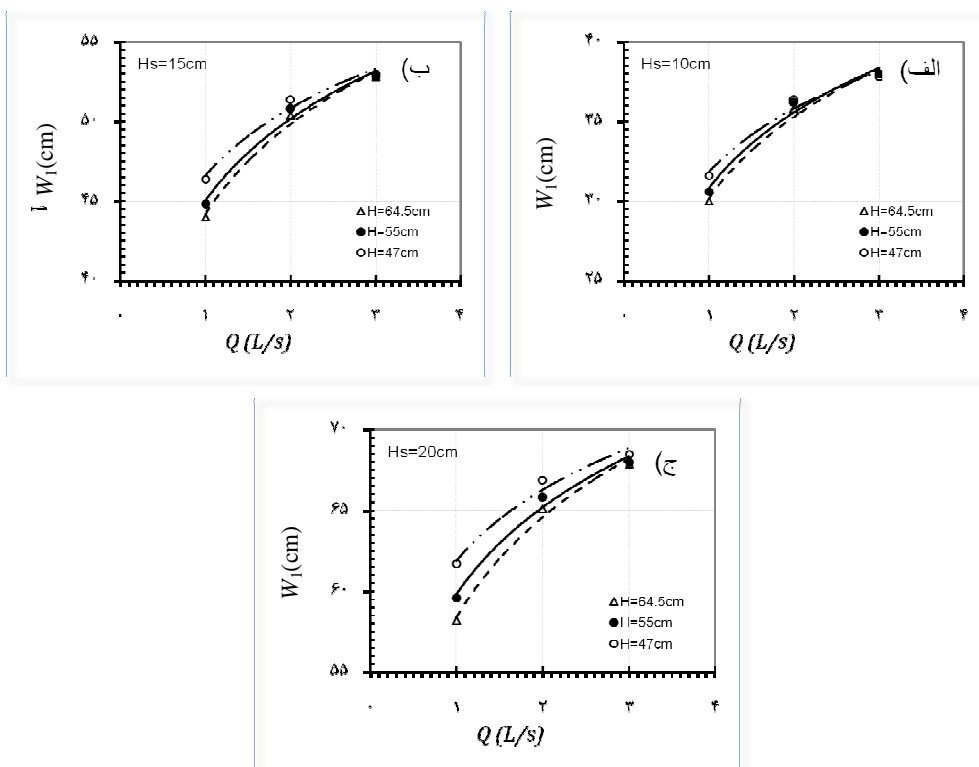


شکل 3 نتایج اندازه‌گیری شده تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی و دبی جریان تخلیه‌کننده با ارتفاع آب در مخزن تحت مقادیر مختلف ضخامت رسوبات: (الف) 10 cm، (ب) 15 cm، (ج) 20 cm



شکل 4 نتایج اندازه‌گیری شده تغییرات طول مخروط رسوب‌شویی و دبی جریان تخلیه‌کننده با ارتفاع آب در مخزن تحت مقادیر مختلف ضخامت رسوبات: (الف) 10 cm، (ب) 15 cm، (ج) 20 cm





شکل 5 نتایج اندازه‌گیری شده تغییرات عرض مخروط رسوب‌شویی و دبی جریان تخلیه کننده با ارتفاع آب در مخزن تحت مقادیر مختلف ضخامت رسوبات: (الف) 10 cm، (ب) 15 cm، (ج) 20 cm

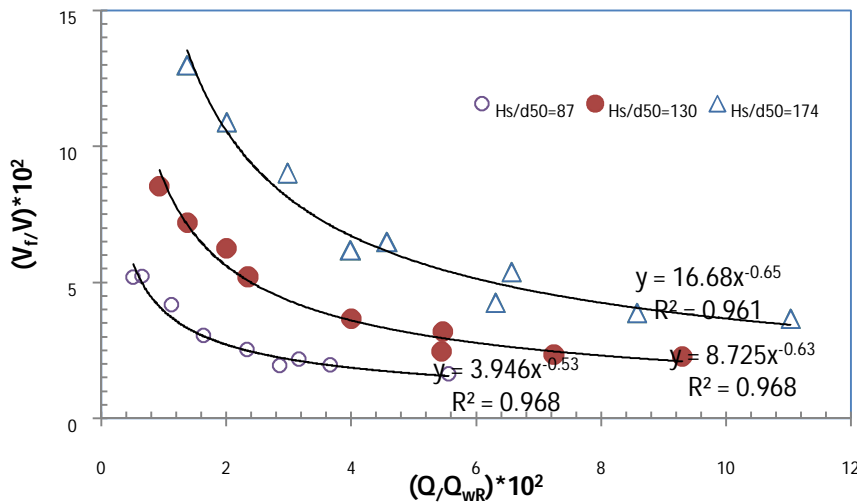
راندمان رسوب‌شویی را نشان می‌دهد. برازش رابطه نمائی بر نتایج حاصل از مقادیر معین ارتفاع نسبی رسوبات  $(H_s/d_{50})$  با ضریب تبیین حداقل 0/961 و انطباق مناسب مقادیر مشاهده‌ای بر منحنی‌های برازش داده شده، گویای امکان ارائه روابط صریح به‌منظور تخمین راندمان رسوب‌شویی در مقیاس‌های واقعی مخازن است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دبی خروجی و کاهش تراز رسوبات در جلو دهانه تخلیه کننده، راندمان رسوب‌شویی کاهش یافته که به معنای جریان تخلیه با غلظت کمتر از بار رسوبی است که دلیل آن کاهش ظرفیت انتقال رسوبات با توجه به کاهش رسوبات در جلو دهانه آبرگیر برای تخلیه و همچنین افزایش حجم تخلیه آب از مخزن است. فرمهای توانی نشان داده شده در شکل 6 را می‌توان با رابطه ساده‌ای به شکل زیر تخمین زد:

$$\frac{V_f}{V} = \sigma \left( \frac{Q}{Q_R} \right)^n \quad (10)$$

بر اساس این شکل‌ها، در همه موارد تحت شرایط ثابت سایر پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی، ابعاد حفرة رسوب‌شویی شامل حجم، عرض و روند افزایشی را با افزایش دبی خروجی از تخلیه کننده نشان می‌دهد، یعنی با افزایش جریان، میزان تخلیه رسوب و گسترش مخروط رسوب‌شویی مشاهده می‌شود.

در مرحله بعد و به‌منظور دستیابی به امکان تعمیم نتایج در مقیاس‌های واقعی از مخازن سدها و براساس آنچه که در بخش آنالیز ابعادی تشریح شد، تغییرات و گسترش مخروط رسوب‌شویی در قالب گروه‌های بدون بعد و برای ارزیابی روابط (6) و (7) مورد بررسی قرار گرفت. شکل 6 حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی در مقابل دبی بدون بعد شده جریان تخلیه کننده را نشان می‌دهد. صرف‌نظر از شرایط تراز آب و رسوب در مخزن، برای شرایط ثابت از این پارامترها، شکل 6 روند کاهشی



شکل 6 ارزیابی رابطه (6) برای تغییرات راندمان رسوب‌شویی با دبی نسبی جریان خروجی از تخلیه کننده

تخلیه کننده بر اساس رابطه (7) نیز بر حجم مخروط رسوب‌شویی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 8 نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. در این شکل، راندمان رسوب‌شویی در مقابل ارتفاع نسبی رسوب مخزن  $(H_s/H)$  برای سه حالت اعداد فرود رسوب مخزن 0/001، 0/002 و 0/003 ترسیم شده‌اند.

با توجه به شکل 8، روند افزایشی حجم مخروط رسوب‌شویی با ضخامت نسبی رسوب در پشت دهانه تخلیه رسوب مشابه است؛ به این ترتیب که در یک عدد فرود رسوب مخزن (که در این تحقیق نشان دهنده جریان معین تخلیه کننده  $Q$  است) با افزایش ضخامت نسبی رسوب در مخزن  $H_s/H$  راندمان رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. علت این امر با توجه به ثابت بودن عمق آب در مخزن،  $H$  و دبی خروجی از تخلیه کننده،  $Q$ ، به معنای افزایش  $H_s$  یعنی افزایش ضخامت رسوب در جلو دهانه آبرگیر (افزایش رسوبات در معرض جریان) و در نتیجه افزایش غلظت انتقال رسوب به به داخل تخلیه کننده خواهد بود. همچنین تأثیر کمی افزایش دبی جریان و ارتفاع رسوبات در تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی، در ترازهای مختلف رسوب، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول‌های 5 و 6 نشان داده شده‌اند.

که ضریب  $\sigma$  و مقدار ثابت  $\lambda$  توابع معینی از ارتفاع نسبی رسوب در مخزن می‌باشند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر رابطه‌ای خطی برای ضریب  $\sigma$  (رابطه 11) و  $\lambda$  (رابطه 12) می‌باشد:

$$\sigma = a_{\sigma} \left( \frac{H_s}{H} \right) + b_{\sigma} \quad (11)$$

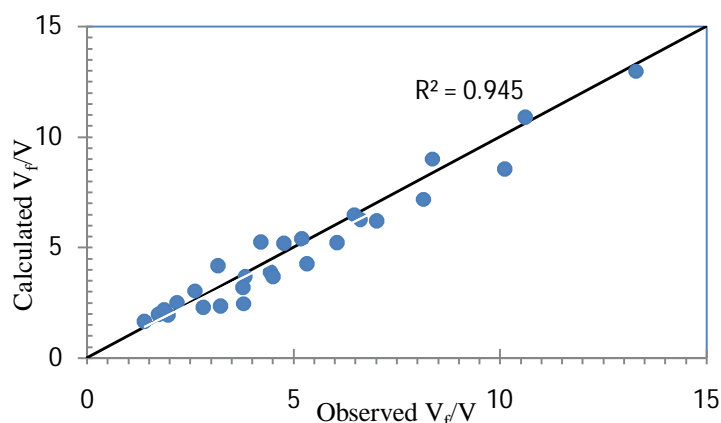
$$\lambda = a_{\lambda} \left( \frac{H_s}{H} \right) + b_{\lambda} \quad (12)$$

در این روابط مقادیر ضرایب و ثابت‌ها مطابق جدول 4 است. لازم به ذکر است در رابطه (10) دبی نسبی جریان برحسب درصد و راندمان رسوب‌شویی برحسب درصد می‌باشند.

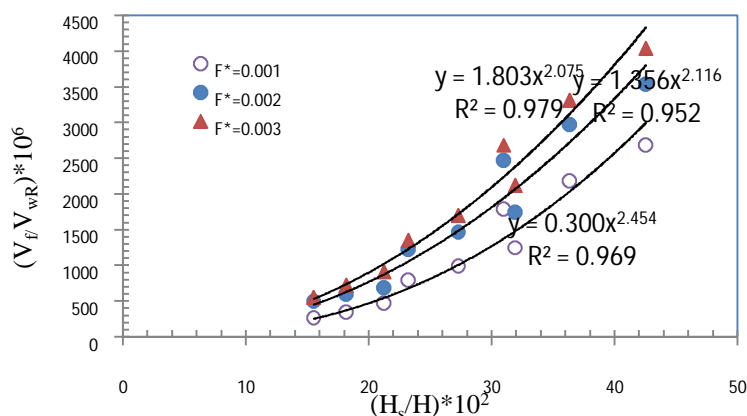
جدول 4 ضرایب و ثابت‌های روابط (11) و (12)

	a	b
$\sigma$	0/146	-9/31
$\lambda$	0/001	-0/424

مقادیر برآورد شده راندمان رسوب‌شویی توسط رابطه (10) در مقابل تمام مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل 7 ترسیم شده است. ضریب تبیین 0/945 و نزدیکی نقاط مشاهده‌ای با خط انطباق کامل، بیانگر برازش مناسب نتایج حاصل از این تحقیق توسط این رابطه است. تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی مخزن و جریان خروجی



شکل 7 مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و محاسبه شده راندمان رسوب‌شویی توسط رابطه (10)



شکل 8 رابطه بین حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی و تراز نسبی رسوبات با تغییرات اعداد فرود بستر مخزن

جدول 5 تأثیر افزایش دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی در تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی

تراز رسوبات ( $H_s$ )	متوسط درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی ( $V_f$ )	متوسط درصد تغییرات طول مخروط رسوب‌شویی ( $L_f$ )	متوسط درصد تغییرات عرض مخروط رسوب‌شویی ( $W_f$ )
(cm)	%	%	%
20	43/1	11/7	12/1
15	58/4	14/7	15/1
10	87/1	20/9	20/5

جدول 6 تأثیر کاهش ارتفاع آب مخزن در تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی

تراز رسوبات ( $H_s$ )	متوسط درصد تغییرات حجم مخروط رسوب‌شویی ( $V_f$ )	متوسط درصد تغییرات طول مخروط رسوب‌شویی ( $L_f$ )	متوسط درصد تغییرات عرض مخروط رسوب‌شویی ( $W_f$ )
(cm)	%	%	%
20	5/2	3/1	2/1
15	7/4	2/8	1/7
10	12/1	2/2	1/4

حجم، طول و عرض مخروط رسوب‌شویی بدست آمده در سه تراز رسوب نسبت به یکدیگر مقایسه شده‌اند. جدول 7 مقادیر کمی تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی را در مقابل افزایش تراز رسوبات نشان می‌دهد. هم چنین نتایج نشان می‌دهد که بین تراز رسوبات نهشته شده در مخزن و راندمان رسوب‌شویی ارتباط مستقیم وجود دارد. در واقع می‌توان گفت به ازای یک دبی تخلیه و ارتفاع آب ثابت، با افزایش تراز رسوبات، راندمان رسوب‌شویی افزایش خواهد یافت؛ چرا که با کاهش تراز رسوبات مدت زمان توقف کاهش چشمگیری نخواهد داشت، لذا حجم آب مصرفی بالا و در نتیجه راندمان رسوب‌شویی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج قبلی می‌توان اظهار داشت، افزایش تراز رسوبات از یک طرف باعث حداکثر شدن ابعاد مخروط شده و از طرفی دیگر راندمان رسوب‌شویی را افزایش می‌دهد. اما نباید از این موضوع غافل بود که افزایش بیش از حد رسوبات باعث تحکیم رسوبات نهشته شده گردیده و این امر سبب ایجاد مشکلاتی در خروج رسوبات از تخلیه کننده خواهد شد، به نحوی که اقدامات اضافی برای سهولت تخلیه رسوبات و در نتیجه صرف هزینه بیشتر الزامی خواهد بود، لذا ملاحظات اقتصادی نیز در مدیریت رسوب‌شویی مخازن باید در استفاده از این نتایج مورد توجه قرار گیرد.

بدین منظور حجم، طول و عرض مخروط رسوب‌شویی بدست آمده در سه تراز آب مخزن و سه دبی خروجی نسبت به یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول‌ها متوسط درصد کاهش ارتفاع آب مخزن 18/5 درصد و متوسط درصد افزایش دبی جریان 150 درصد بوده است. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر کاهش تراز سطح آب در دبی‌های بالاتر بیشتر است. بنابراین برای تخلیه حجم بیشتر رسوبات بهتر است تا جایی که شرایط بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد، بازشدگی دریچه‌های تخلیه‌کننده با حداکثر ظرفیت مجاز خود (به لحاظ وقوع کاویتاسیون) و حداقل تراز بهره‌برداری ممکن انجام شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که به ازای یک دبی ثابت، اختلاف حجم حفره بین ترازهای بالایی رسوب در دو حالت مورد بررسی (20 و 15 سانتی‌متر) بیش از اختلاف ترازهای پایینی (15 و 10 سانتی‌متر) است. علاوه بر این تأثیر دبی در تراز رسوب بالاتر بر روی حجم حفره نیز بیشتر است. از طرفی در یک تراز رسوب و تراز آب ثابت، اختلاف حجم مخروط بین جریان‌های تخلیه پایین (دبی‌های 1 و 2 لیتر بر ثانیه) بیش از جریان‌های تخلیه بالا (دبی‌های 2 و 3 لیتر بر ثانیه) می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر کمی افزایش تراز رسوبات نهشته شده در مخزن در تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی،

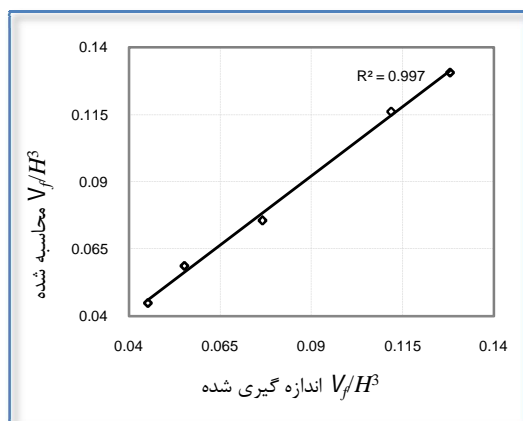
جدول 7 تأثیر افزایش تراز رسوبات مخزن در تغییرات ابعاد مخروط رسوب‌شویی

تغییرات تراز رسوبات	A (%)	B (%)	C (%)
متوسط درصد تغییرات حجم ( $V_f$ )	433	158	106
متوسط درصد تغییرات طول ( $L_f$ )	87	43	31
متوسط درصد تغییرات عرض ( $W_f$ )	86	42	30

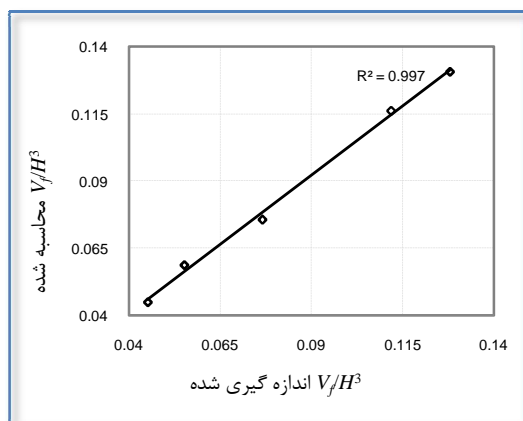
A: تغییر تراز رسوبات از 10 به 20 سانتی‌متر (افزایش 100 درصدی)

B: تغییر تراز رسوبات از 10 به 15 سانتی‌متر (افزایش 50 درصدی)

C: تغییر تراز رسوبات از 10 به 20 سانتی‌متر (افزایش 100 درصدی)



الف) داده‌های واسنجی



ب) داده‌های آزمون

شکل 9 حجم مخروط رسوب‌شویی محاسبه شده در مقابل حجم مخروط رسوب‌شویی اندازه‌گیری شده

همچنین به منظور ارزیابی روابط ارائه شده، تجزیه و تحلیل‌های آماری روابط فوق با استفاده از معیارهای آماری درصد میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) در جدول 9 ارائه شده است.

جدول 9 تجزیه و تحلیل آماری روابط ارائه شده برای

داده‌های واسنجی و تست

داده‌های تست		داده‌های واسنجی		رابطه
MAE (%)	$R^2$	MAE (%)	$R^2$	
2/84	0/997	6/13	0/994	(19)
1/36	0/995	2/05	0/992	(20)
0/85	0/997	1/71	0/995	(21)

همچنین باید در نظر داشت با افزایش تراز رسوبات مخزن، حجم ذخیره مفید مخزن کاهش یافته و آسیب‌های جانی و مالی مناطق حریم مخزن و همچنین ورود مستقیم رسوبات به توربین‌های نیروگاه در اثر وقوع سیلاب‌های احتمالی می‌توانند به شدت افزایش یابند. جدول 8 نشان دهنده متوسط راندمان رسوب‌شویی بدست آمده در ترازهای مختلف رسوبات است.

علاوه بر این با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و قرار دادن آن‌ها در روابط بدون بعد (مشابه رابطه (3))، ضرایب روابط مذکور برای 22 سری از داده‌های آزمایشگاهی (داده‌های واسنجی) بصورت زیر بدست آمدند:

$$\frac{V_f}{H^3} = 0.352 \left( \frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{2.421} \left( \frac{B_R}{H} \right)^{0.703} \left( \frac{H_s}{H} \right)^{2.37} \quad (13)$$

$$\frac{L_f}{H} = 1.111 \left( \frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{0.767} \left( \frac{B_R}{H} \right)^{0.17} \left( \frac{H_s}{H} \right)^{0.902} \quad (14)$$

$$\frac{W_f}{H} = 2.572 \left( \frac{U}{\sqrt{gH}} \right)^{0.782} \left( \frac{B_R}{H} \right)^{0.118} \left( \frac{H_s}{H} \right)^{0.895} \quad (15)$$

همچنین به منظور صحت‌سنجی روابط پیشنهادی، مقادیر ابعاد مخروط رسوب‌شویی برای داده‌های آزمون توسط این روابط محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شدند.

شکل 9 مقادیر حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی محاسبه شده در مقابل مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده برای الف) داده‌های واسنجی و ب) داده‌های آزمون را نشان می‌دهد.

جدول 8 متوسط راندمان رسوب‌شویی بدست آمده در

ترازهای مختلف رسوبی

تراز رسوبات ( $H_s$ ) (cm)	متوسط زمان توقف ( $T_s$ ) (s)	متوسط حجم آب مصرفی ( $V_{ws}$ ) (L)	متوسط راندمان رسوب‌شویی ( $\eta$ ) (%)
20	94	199	7
15	73	159	4/6
10	41	90	3/1

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر ارتفاع رسوبات جلو دهانه تخلیه رسوب بر میزان رسوب تخلیه شده و ابعاد حفره رسوب‌شویی در شرایط مختلف جریان‌های تخلیه و تراز آب در مخزن با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفت.

خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر ارائه می‌شود:

1- با استفاده از آنالیز ابعادی، نتایج حاصل از حجم مخروط رسوب‌شویی نشان از وجود روابطی توانی بین راندمان رسوب‌شویی و دبی نسبی جریان تخلیه کننده رسوب است که ضریب تبیین این روابط نشان دهنده برازش مناسب این شکل از معادلات بر داده‌هاست.

2- آنالیز نتایج نشان داد که می‌توان تمام آزمایش‌های این تحقیق را در قالب یک رابطه کلی به شکل نمایی بین راندمان رسوب‌شویی و درصد دبی جریان تخلیه کننده رسوب ارائه داد. ضریب و نمای این رابطه به ارتفاع نسبی رسوبات پشت دهانه تخلیه کننده بستگی دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که تابع بیان کننده ضریب و ثابت این روابط می‌توانند بخوبی با رابطه‌ای خطی تقریب زده شوند.

3- رابطه بین حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی و تراز نسبی رسوبات برای مقادیر مختلف جریان‌های نسبی تخلیه در اعداد فرود بستر مخزن نیز بیان کننده روابط و روند مشابهی برای غلظت رسوب تخلیه شده از مخزن می‌باشد، گرچه این روابط روندی کاهشی از حجم نسبی مخروط رسوب‌شویی با تراز رسوب را نشان می‌دهند. (شکل 8).

4- روابطی بصورت حاصل ضرب توان‌هایی از پارامترهای عدد فرود جریان در تخلیه کننده، عرض نسبی مخزن و تراز نسبی رسوبات پشت تخلیه کننده برای پیش‌بینی و تعیین حجم، عرض و طول مخروط رسوب‌شویی در

محدوده پارامترهای بدون بعد این تحقیق ارائه شد.

5- از بررسی نمودارهای ترسیم شده برای داده‌های واسنجی و آزمون و همچنین تجزیه و تحلیل آماری روابط پیشنهادی، نتیجه گرفته شد روابط مذکور در بند 4 با دقت بالا و مناسبی (بیش از 0/99) ابعاد مخروط رسوب‌شویی را برآورد می‌کنند و می‌توان از آن‌ها در شرایط مشابه مخازن سدها استفاده کرد.

6- با بررسی آنالیز حساسیت بر روی سه پارامتر تراز رسوبات، سرعت خروجی و تراز سطح آب مشخص شد رابطه پیشنهادی برای حجم بدون بعد مخروط رسوب‌شویی نسبت به تغییرات تراز رسوبات بیشترین حساسیت را دارد و سرعت جریان خروجی از تخلیه‌کننده و ارتفاع آب، در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

#### 5- فهرست علائم

$A$	مساحت باز شدگی دریچه
$B_R$	عرض مخزن
$d_{50}$	قطر متوسط ذرات رسوبی
$g$	شتاب ثقل
$H$	ارتفاع آب در مخزن
$H_s$	ارتفاع رسوبات در مخزن
$H_{sc}$	اختلاف ارتفاع محور تخلیه کننده از کف مخزن
$L_f$	طول مخروط رسوب‌شویی
$L_R$	طول مخزن
$Q$	دبی جریان خروجی
$T_s$	متوسط زمان توقف
$U$	سرعت جریان خروجی
$V$	متوسط حجم آب تخلیه شده
$V_f$	حجم مخروط رسوب‌شویی
$W_f$	عرض مخروط رسوب‌شویی
$\mu$	لزجت دینامیکی آب
$\rho$	چگالی آب
$\rho_s$	چگالی رسوبات
$\eta$	متوسط راندمان رسوب‌شویی

## 6- منابع

- 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 6th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, March 10-14, pp. I.78-I.84.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Bina, M. and Ghomeshi, M. (2010). "Physical modeling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment". J. Hydraul. Res. 48(4), pp. 509-514.
- Lai, J. S. and Shen, H. W., (1996). "Flushing sediment through reservoirs". Journal of Hydraulic Research, Vol. 34(2), pp. 237-255.
- Meshkati Shahmirzadi, M. E., Dehghani, A. A., Sumi, T., Mosaedi, A. and Meftah, H. (2009). "Experimental investigation of pressure flushing technique in reservoir storages". Water and Geoscience, pp. 132-137.
- Morris, G.L. and Fan, J. (2009). "*Reservoir Sedimentation Handbook: Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*". McGraw-Hill, New York, p. 784.
- 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, Vol. 3, pp. 639-690.
- 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.
- امامقلی زاده، ص. و جهانی، ح. (1387). "بررسی هیدرولیک جریان در رسوب‌شویی تحت فشار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی". چهارمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- شهرینیا، م. (1391). "بررسی ارزیابی تأثیر تراز رسوبات در رسوب‌شویی تحت فشار در سدهای مخزنی با استفاده از مدل فیزیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.
- مشکاتی شه‌میرزادی، م. ا.، دهقانی، ا. ا.، ناصر، غ و امامقلی زاده، ص. (1388). "تأثیر ابعاد دریچه تحتانی بر حجم و ابعاد مخروط آبستگي در رسوب‌شویی تحت فشار"، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه.
- Atkinson, E. (1996). "The feasibility of flushing sediment from the reservoir". Report OD 137, p. 99.
- Brandt, S. A. (2000). "A review of reservoir desiltation". International Journal of Sediment Research, Vol. 15, pp. 321-342.
- Emamgholizadeh, S. (2005). Pressure flushing of sediment through storage reservoir: Laboratory testing. J. Inst. Eng. (India), CEDiv. 89(5), pp. 23-27.
- Emamgholizadeh, S., Batani, S.M. and Jeng D.S. (2013). "Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry". Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 26 (10), pp. 2551-2558.