

بررسی هیدرولیک فرآیند رسوب‌شویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سد

سهیلا توفیقی^۱، جمال محمد ولی سامانی^{۲*} و سید علی ایوب‌زاده^۳

چکیده

در هنگام رسوب‌شویی تحت فشار با تخلیه رسوبات نهشته شده از مخزن سد به کمک جریان خروجی از دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی، آب‌شستگی به شکل مخروط مقابل تخلیه‌کننده به وجود آمده و توسعه می‌یابد. در این پژوهش، تأثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن، بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی و همچنین هیدرولیک این فرآیند بررسی شده است. آزمایش‌ها با عمق و دبی‌های مختلف جریان در طول‌های مختلف توسعه مجرا برای تعیین ژئومتری مخروط رسوب‌شویی طراحی و انجام شد. برای بررسی هیدرولیک جریان نیز، اندازه‌گیری سرعت جریان با دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر انجام شد. نتایج نشان دهنده تأثیر مثبت توسعه مجرا در مخزن بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی است، به طوری که توسعه مجرا به میزان نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن سبب افزایش طول مخروط رسوب‌شویی به میزان ۴۸، ۸۳ و ۱۱۳ درصد و افزایش حجم مخروط به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا می‌شود. نتایج بررسی هیدرولیک جریان نشان می‌دهد، بردارهای سرعت جریان با نزدیک‌تر شدن به دهانه ورودی مجرا، حالت گسترش یافته خود را از دست داده و گرادیان سرعت در نواحی مجاور آن به شدت افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روابطی با قابلیت برآورد بالا برای تخمین ابعاد مخروط رسوب‌شویی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، تخلیه‌کننده تحتانی، رسوب‌شویی تحت فشار، مخروط رسوب‌شویی.

ارجاع: توفیقی س. محمد ولی سامانی ج. و ایوب‌زاده س. ع. ۱۳۹۵. بررسی هیدرولیک فرآیند رسوب‌شویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سد. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۵۵-۶۳.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: samani_j@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۱۲

مقدمه

برای رفع مشکل رسوب‌گذاری در مخازن سدها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد (گزارش بخش منابع آب یوتا، ۲۰۱۰). یکی از مؤثرترین روش‌های رسوب‌زدایی از مخزن، رسوب‌شویی هیدرولیکی است که به دو نوع آزاد و تحت فشار تقسیم می‌شود. از میان این دو روش، رسوب‌شویی هیدرولیکی تحت فشار، یک روش مؤثر برای بازیابی حجم مفید مخازن سدها است، به طوری که به سبب داشتن تأثیر موضعی آب‌شستگی در اطراف دریچه‌های تحتانی سد، گزینه بسیار مناسبی برای زدودن رسوبات تجمع یافته از آبگیر نیروگاه‌ها است. همچنین این روش مدیریت رسوب برای مناطقی که از مشکل محدودیت منابع آبی رنج می‌برند، بسیار مهم است. در این روش جریان روزنه‌ای خارج شده از دریچه‌های تحتانی سد، با باز شدن ناگهانی این دریچه‌ها، سبب ایجاد نیروی فرساینده بر رسوبات می‌شود (موریس و فان، ۲۰۰۹). در این حالت فرسایش پس‌رونده رخ داده و از نزدیکی دریچه شروع شده و به سمت بالا دست مخزن حرکت می‌کند. در این نوع رسوب‌شویی، رقوم سطح آب در مخزن بالاتر از رقوم مرکزی دریچه و تقریباً ثابت است، به همین دلیل، پس‌روی رسوبات تا حدی ادامه یافته و متوقف می‌شود. در این هنگام توده‌های بزرگی از رسوبات، از نزدیکی دریچه‌ها تخلیه شده و پس از مدتی از انجام رسوب‌شویی، حفره‌ای از آبشستگی به شکل مخروط، جلوی تخلیه‌کننده به وجود آمده و توسعه می‌یابد. مقدار حجم رسوبات تخلیه شده از دریچه سد به پارامترهای مختلفی مانند عمق آب داخل مخزن، دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده‌ها، مشخصات مجرای تخلیه‌کننده، اندازه و نوع رسوبات بستگی دارد (امامقلی‌زاده، ۱۳۸۷).

ارائه یک راهکار مناسب برای افزایش حجم رسوب‌شویی در این روش رسوب‌زدایی که با کمترین اتلاف آب مخزن همراه است می‌تواند گامی برای احیای حجم مفید مخازن و نجات آبگیرها باشد، که در این پژوهش توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن به عنوان راهکار، ارائه و بررسی شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی مختلفی در زمینه رسوب‌شویی تحت فشار انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی‌های لای و چانگ (۲۰۰۱)، شوئرلین و همکاران (۲۰۰۴)، طالب‌بیدختی و نقشینه (۲۰۰۴)، امامقلی‌زاده (۱۳۸۷)، امامقلی‌زاده و همکاران (۲۰۰۶)،

دیولز و همکاران (۲۰۰۹)، فتحی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۰) و امامقلی‌زاده و فتحی‌مقدم (۲۰۱۴)، اشاره کرد. از بررسی پژوهش‌های ذکر شده چنین استنباط می‌شود که هدف آن‌ها بیشتر شناخت پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر رسوب‌شویی و میزان تأثیر آن‌ها بوده است و پژوهش‌های محدودی در ارتباط با سایر راه‌کارهای افزایش عملکرد فرآیند رسوب‌شویی تحت فشار انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. مشکلاتی شهمیرزادی و همکاران (۲۰۱۰)، با بررسی تأثیر مقاطع عرضی تخلیه‌کننده‌های تحتانی روی ابعاد مخروط رسوب‌شویی نتیجه گرفتند که با افزایش قطر تخلیه‌کننده، ابعاد مخروط رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. احدپور دودران و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهش خود ضمن بررسی تأثیر استفاده از لرزاننده‌ها^۱ در لایه‌های رسوبی نشان دادند که وجود لرزاننده در داخل رسوبات مخزن تأثیر مثبت بر حجم رسوب‌شویی دارد. در پژوهش حاضر رسوب‌شویی تحت فشار با توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سد و همچنین هیدرولیک این فرآیند بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

حجم مخروط رسوب‌شویی به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که انتخاب پارامترهای مؤثر با توجه به اصول اولیه مهندسی رسوب و بررسی مطالعات گذشته در این راستا به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$V_f = f(U_o, H_w, H_s, L_t, D_o, d_{50}, g, \rho_s, \rho_w, \mu, B) \quad (1)$$

که در آن، V_f حجم مخروط رسوب‌شویی، U_o سرعت جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، H_w ارتفاع آب داخل مخزن، بالای مرکز مجرای تخلیه‌کننده، H_s ارتفاع رسوبات تجمع یافته در پشت مخزن، بالای مرکز مجرای تخلیه‌کننده، L_t طول مجرای توسعه داده شده در مخزن، D_o قطر مجرای تخلیه‌کننده تحتانی، d_{50} اندازه متوسط ذره رسوب، g شتاب ثقل، ρ_s چگالی رسوب، ρ_w چگالی آب، μ لزجت دینامیک آب، B عرض مخزن هستند (شکل ۱).

سرعت جریان به صورت زیر محاسبه شده است:

$$U_o = \frac{4Q_o}{\pi D_o^2} \quad (2)$$

کرد. همچنین با توجه به ثابت بودن مقادیر کمیت‌های زیر در تمام آزمایش‌های این پژوهش،

$$H_s = 20 \text{ cm}, D_o = 5 \text{ cm}, d_{50} = 1.15 \text{ mm}, g = 9.81 \frac{m}{s^2},$$

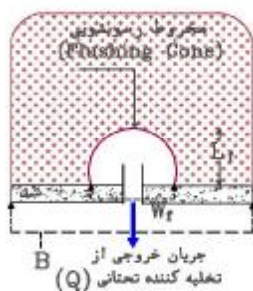
$$\rho_s = 1600 \frac{kg}{m^3}, \rho_w = 1000 \frac{kg}{m^3}, \nu = 10^{-6} \frac{m^2}{s}, B = 1.4 \text{ m}$$

و با جایگذاری آن‌ها در گروه‌های بی‌بعد زیر،

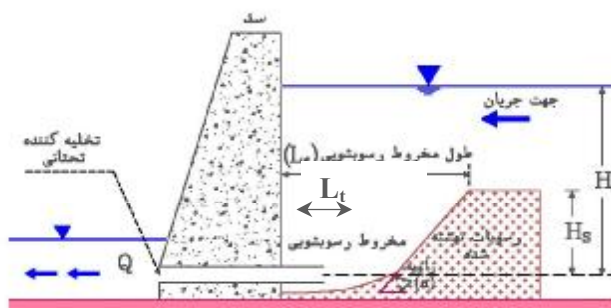
$$V_f^* = \frac{V_f}{H_w^3}, Fr = \frac{U_o}{\sqrt{gH_w}}, H_w^* = \frac{H_w}{H_s}, L_t^* = \frac{L_t}{H_s}$$

می‌توان پارامترهای بی‌بعد باقیمانده را به صورت رابطه (۳)، خلاصه کرد:

$$V_f^* = \psi(Fr, H_w^*, L_t^*) \quad (3)$$



ب) پلان



الف) پروفیل طولی

شکل ۱- معرفی پارامترهای به کار برده شده

است. بدین منظور با استفاده از یک سرریز در قسمت ورودی مدل، در تمام مدت زمان انجام آزمایش‌ها، ارتفاع آب داخل مخزن تنظیم می‌شد. مخزن اصلی مدل دارای طول ۵ متر است که رسوبات در این قسمت از مدل قرار می‌گرفت. ذرات رسوبی مورد استفاده از رسوبات غیرچسبنده از نوع سیلیس با دانه‌بندی یکنواخت و با قطر متوسط رسوب (d_{50})، $1/15$ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی (σ_g)، $1/37$ در نظر گرفته شد. برای انجام رسوب‌شویی، یک مجرای تخلیه‌کننده با مقطع دایره‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر که در خط مرکزی فلوم قرار گرفته بود، استفاده شد. برای جمع‌آوری رسوبات تخلیه‌شده نیز، از یک مخزن به عنوان حوضچه ته‌نشینی رسوبات استفاده شد. همچنین برای کنترل جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، یک سرریز ۶۰ درجه مثلثی در قسمت انتهایی مدل، در نظر گرفته شد.

که در آن Q_o دبی خروجی از مخزن هستند.

با استفاده از آنالیز ابعادی و کاربرد روش π باکینگهام پارامترهای بدون بعد به صورت زیر به دست آمدند:

$$\pi_1 = \frac{V_f}{H_w^3}, \pi_2 = \frac{U_o}{\sqrt{gH_w}}, \pi_3 = \frac{H_w}{H_s}, \pi_4 = \frac{L_t}{H_s}, \pi_5 = \frac{D_o}{H_w},$$

$$\pi_6 = \frac{d_{50}}{H_w}, \pi_7 = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \pi_8 = \frac{U_o H_w}{\nu}, \pi_9 = \frac{B}{H_w}$$

از میان پارامترهای بالا، عدد رینولدز $\pi_8 = \frac{U_o H_w}{\nu}$ بیانگر

تأثیر نیروی لزجت است و با توجه به اینکه مقدار حداقل پارامتر بدون بعد بالا در این پژوهش ۱۳۵۷۹ است، جریان از نوع آشسته بوده و از تأثیر این پارامتر می‌توان صرف‌نظر

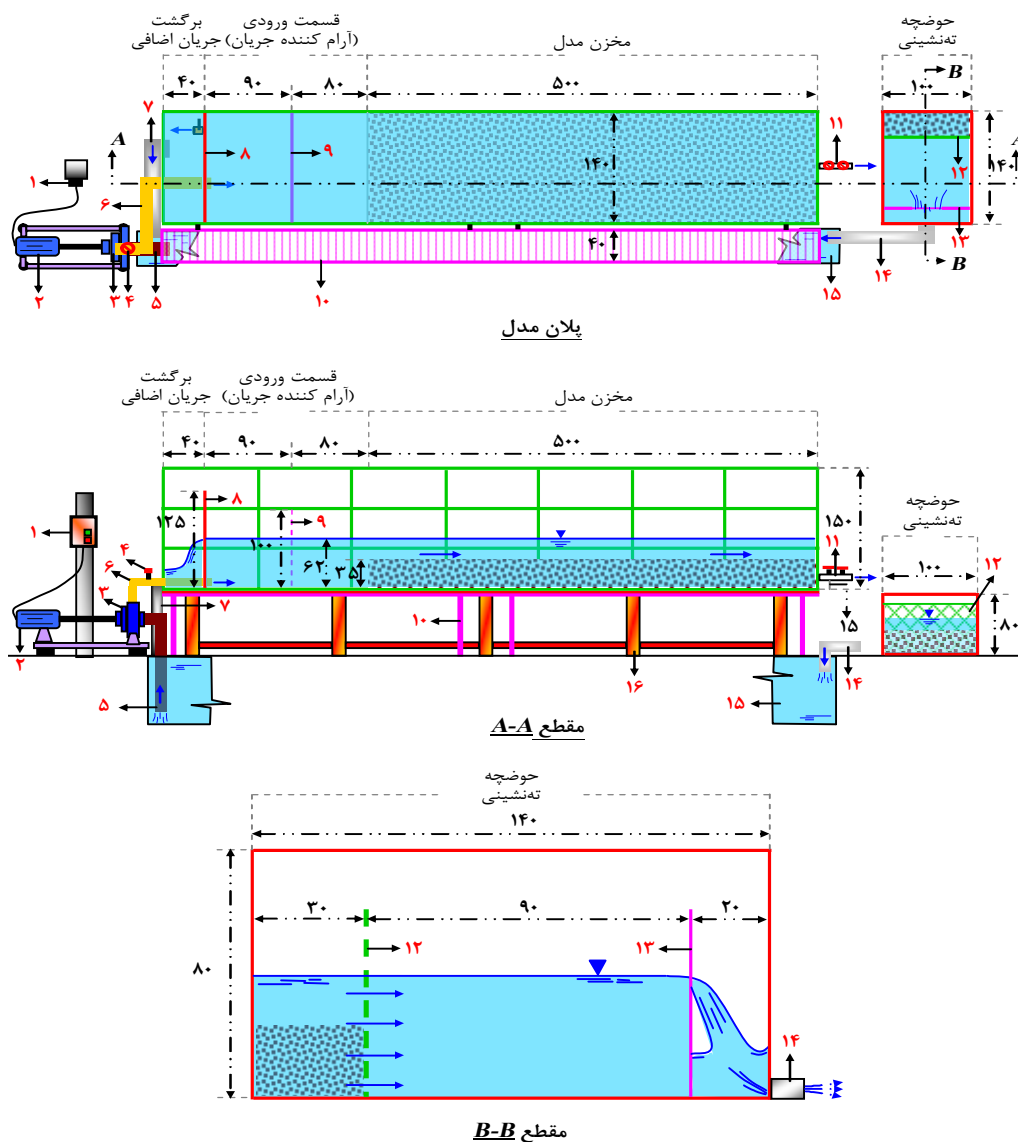
به صورت مشابه طول مخروط رسوب‌شویی نیز به صورت رابطه (۴)، به دست آمد:

$$L_f^* = \psi(Fr, H_w^*, L_t^*) \quad (4)$$

که در آن $L_f^* = \frac{L_f}{H_w}$ است.

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس و در مدل فیزیکی به شکل مکعب مستطیل و دارای طول کلی ۷ متر، عرض $1/4$ متر و ارتفاع $1/5$ متر که از ۳ قسمت، ورودی مدل، مخزن اصلی و حوضچه ته‌نشینی رسوبات تشکیل شده است، انجام شد (شکل ۲). در قسمت ورودی مدل، تلاطم جریان ورودی مستهلک شده و جریان به صورت آرام وارد مخزن اصلی می‌شد. از آنجایی که در رسوب‌شویی تحت فشار طی انجام عملیات رسوب‌شویی، تراز سطح آب مخزن تقریباً ثابت



۱- تابلوی برق، ۲- الکتروموتور، ۳- پمپ، ۴- شیر کنترل جریان ورودی، ۵- لوله مکش، ۶- لوله دهش، ۷- لوله برگشت جریان اضافی، ۸- سرریز کنترل کننده ارتفاع آب مخزن، ۹- صفحه مشبک، ۱۰- سکوی دسترسی، ۱۱- تخلیه‌کننده تحتانی، ۱۲- صفحه مشبک، ۱۳- سرریز کنترل کننده جریان خروجی، ۱۴- لوله برگشت جریان، ۱۵- مخزن اصلی تأمین آب، ۱۶- چهارچوب نگهدارنده مدل
توجه: تمام ابعاد به سانتی‌متر می‌باشد. همچنین اشکال دارای مقیاس بوده و در مقطع B-B، مقیاس ۴ برابر بزرگتر شده‌اند.

شکل ۲- پلان، پروفیل طولی و مقاطع عرضی مدل همراه با اجزای آن

شد. جدول ۲ نیز دامنه تغییرات پارامترها را در حالت بی‌بعد نشان می‌دهد.

جدول ۱- کمیت پارامترهای مورد بررسی

تغییرات	گروه
۴۷/۵، ۵۵، ۶۴/۵	H_w (cm)
۱، ۲، ۳	Q_0 (L/sec)
۱۰، ۲۰، ۳۰	L_1 (cm)

روش انجام آزمایش‌ها

همان‌گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود، آزمایش‌ها برای سه طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی، سه ارتفاع آب و سه دبی متفاوت برای هر یک از طول‌ها، در تراز رسوبات ثابت ۲۰ سانتی‌متر نسبت به مرکز مجرا انجام شد. همچنین آزمایش‌های با همین شرایط هیدرولیکی در حالت بدون توسعه مجرا در مخزن به عنوان آزمایش‌های شاهد انجام

طولی را داشت، قرار می‌گرفت و از محور نزدیک بدنه سد، برداشت شروع می‌شد. فاصله‌های طولی، با اشل‌هایی که بدین منظور روی کالسکه نصب بود، تنظیم می‌گردید. از آنجا که دستگاه سرعت‌سنج مورد استفاده، توانایی اندازه‌گیری فاصله از سطح رسوبات در هنگام داده‌برداری را دارد، تنظیم فاصله عمودی با خود دستگاه انجام می‌شود ولی برای کنترل فاصله عمودی نیز، اشلی بدین منظور روی کالسکه نصب بود.

نتایج و بحث

تأثیر توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی بر ابعاد

مخروط رسوب‌شویی

در نمودارهای شکل ۳، I, II, III, IV تغییرات حجم و طول مخروط رسوب‌شویی به ترتیب در حالت‌های بدون توسعه مجرا و توسعه به میزان نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، در یک عدد فرود ثابت هرچه طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی افزایش می‌یابد، مقدار حجم و طول بدون بعد مخروط رسوب‌شویی افزایش یافته است. به‌علاوه در نمودارهای مربوط به تغییرات حجم بی‌بعد، در طول مجرای تخلیه‌کننده بیشتر (طول نسبی ۱ و ۱/۵)، نمودارهای مربوطه رشد سریع‌تری دارد. به‌طور مثال با افزایش عدد فرود از ۰/۲۳ به ۰/۴۷ حجم بی‌بعد به ترتیب برای حالت بدون توسعه مجرا و توسعه به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات، به میزان ۱۷، ۱۸، ۳۴ و ۳۷ درصد افزایش یافته که این امر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عدد فرود بر حجم رسوبات تخلیه شده از مخزن در طول‌های بیشتر مجرای تخلیه‌کننده تحتانی است. با در نظر گرفتن تمامی سطح آب‌های مورد آزمایش، نتایج نشان می‌دهد توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی به میزان نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات، به‌طور متوسط سبب افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی، به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد و افزایش طول مخروط به میزان ۴۸، ۸۳ و ۱۱۳ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا شده است. نتایج حاصله نشان از آن است که توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در داخل مخزن تأثیر مثبت و قابل توجه بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی دارد.

جدول ۲- دامنه تغییرات گروه‌های بدون بعد

گروه‌های بی‌بعد	دامنه تغییرات
V_i^*	۰/۰۵-۰/۲۵۳
L_f^*	۰/۵۳۵-۱/۳۴۷
Fr	۰/۲۰۲-۰/۷۱
L_t^*	۰/۵-۱/۵
H_w^*	۲/۳۷-۳/۲۲

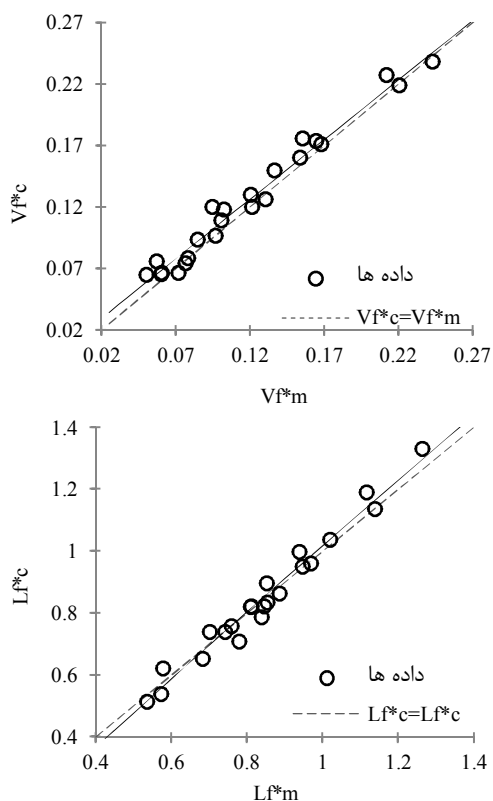
برای انجام آزمایش‌ها ابتدا ارتفاع آب مورد نظر در مخزن تأمین و پس از برقراری جریان در دبی مشخص، رسوب‌شویی شروع می‌شد. بعد از مدتی، رسوبات، تحت فشار آب با غلظت خیلی بالا از دریچه خارج شده (تخلیه ناگهانی) و یک حفره مخروطی شکل جلوی دریچه تشکیل می‌شد. مدت زمان لازم برای شکل‌گیری مخروط رسوب‌شویی و تعادل آن بسته به دبی جریان خروجی و ارتفاع آب داخل مخزن متفاوت بود، به‌طور متوسط ۹۰٪ رسوبات در ۲۰ دقیقه اول از زمان شروع تخلیه ناگهانی از تخلیه‌کننده خارج می‌شد. با این حال تمامی آزمایش‌ها به مدت یک ساعت بعد از زمان تخلیه ناگهانی ادامه می‌یافت تا زمانی که حفره رسوب‌شویی به تعادل رسیده و غلظت رسوبات خروجی به حد صفر برسد. پس از برقراری تعادل و قطع عملیات رسوب‌شویی، با استفاده از متر لیزری با دقت یک میلی‌متر، کار برداشت نقاط شروع می‌شد. سپس با در دست داشتن اطلاعات مربوط به توپوگرافی کف مخروط رسوب‌شویی و به کمک نرم‌افزار Surfer، حجم ناحیه رسوب‌شویی شده محاسبه می‌شد.

همچنین برای بررسی هیدرولیک جریان در داخل مخروط رسوب‌شویی از دستگاه سرعت‌سنج ADV با نرخ داده‌برداری ۲۰۰ نمونه در ثانیه استفاده شد (نورتک، ۲۰۰۵). بدین منظور اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان در محور عمودی در راستای محور مرکزی مجرا و به فاصله ۵ سانتی‌متری از یکدیگر، در دبی خروجی ۳ لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب مخزن ۴۷/۵ سانتی‌متر، برای سه طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. علاوه بر این در شرایط ذکر شده، برای دستیابی به پلان جریان در داخل مخروط رسوب‌شویی، برداشت سرعت جریان در حالتی که فاصله نقاط برداشت سرعت از هم ۵ سانتی‌متر بود انجام شد. بدین صورت که بعد از به تعادل رسیدن مخروط رسوب‌شویی، دستگاه سرعت‌سنج روی کالسکه‌ای که قابلیت جابه‌جایی به صورت عرضی و

پیش‌بینی ابعاد مخروط رسوب‌شویی است. شکل ۴، نیز مقایسه‌ای بین مقادیر محاسبه شده (با اندیس c) و مقادیر اندازه‌گیری شده (با اندیس m) پارامترها را برای داده‌های آموزش نشان می‌دهد. دیده می‌شود که بهترین خط برازش داده شده از میان نقاط هر نمودار دارای زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه (شیب ۱ به ۱) است که نشان دهنده دقت بالای برآورد، با روابط ارائه شده است.

جدول ۳- صحت‌سنجی آماری روابط ارائه شده

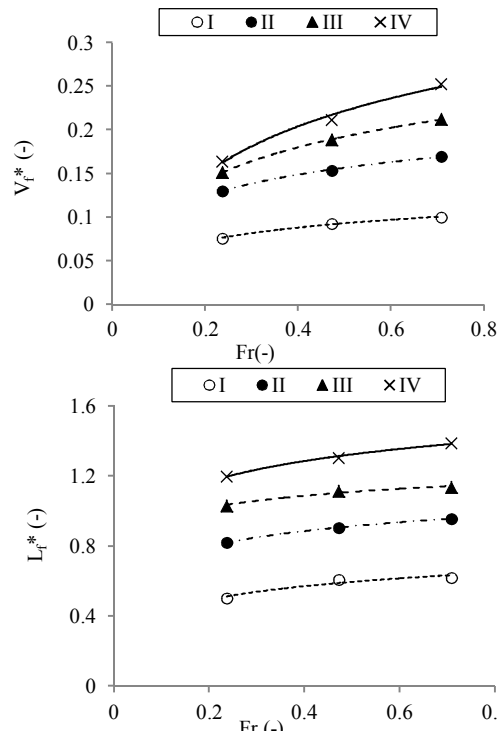
L_f^*		V_f^*		R^2
آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	
۰/۹۷۴	۰/۹۵۶	۰/۹۷۰	۰/۹۶۲	
۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	RMSE



شکل ۴- مقایسه مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها

بررسی هیدرولیک جریان

در شکل ۵، نمودارهای مربوط به پروفیل‌های مؤلفه افقی و قائم سرعت در اولین محور مقابل مجرای توسعه داده شده در مخزن، در سه طول مورد بررسی مجرای تحتانی آورد شده است.



شکل ۳- تغییرات حجم و طول در حالت توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی و حالت بدون توسعه آن در مخزن

روابط بدون بعد پیش‌بینی حجم و طول مخروط رسوب‌شویی

برای ارائه روابط بدون بعد برای پیش‌بینی حجم و طول مخروط رسوب‌شویی، داده‌های مورد نظر، به دو دسته تقسیم شدند. دسته اول، ۸۰٪ داده‌ها هستند که تحت عنوان داده‌های آموزش^۱ و دسته دوم، ۲۰٪ داده‌ها که داده‌های آزمون^۲ نام‌گذاری شدند.

انتخاب داده‌های آزمون به صورت تصادفی انجام شده است. از دسته اول برای به دست آوردن ضریب‌های روابط غیرخطی و از دسته دوم داده‌ها برای صحت‌سنجی این روابط استفاده شد. برای تعیین ضریب‌های روابط موجود، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. روابط پیش‌بینی حجم و طول مخروط رسوب‌شویی به شرح زیر، به دست آمد:

$$V_f^* = 3.77(Fr)^{0.3}(H_w^*)^{-3.2}(L_t^*)^{0.28} \quad (5)$$

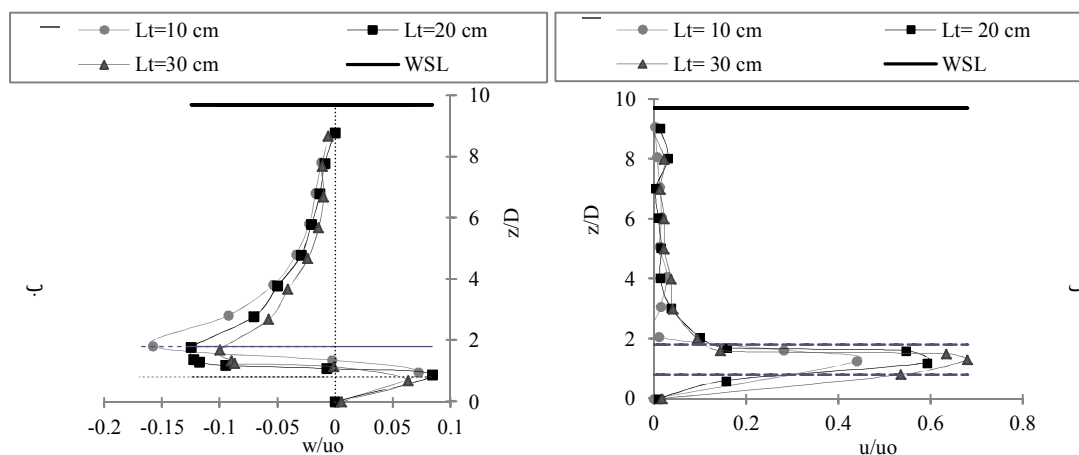
$$L_f^* = 3.11(Fr)^{0.15}(H_w^*)^{-1.12}(L_t^*)^{0.34} \quad (6)$$

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2)، برای داده‌های آموزش و آزمون در جدول ۳، نشان دهنده عملکرد مناسب روابط ارائه شده برای

1- Training set
2- Test set

رسیده و از محور مرکزی تا سطح نزدیک رسوبات مؤلفه قائم سرعت مثبت و رو به بالا به دست آمد. به طوری که می‌توان گفت در محدوده متأثر از مکش تخلیه‌کننده، حرکت عمومی جریان آب به سمت ورودی مجرا برای شستن رسوبات سبب سرعت منفی در این قسمت شده و در نزدیکی محور مرکزی که جهت اصلی جریان در حوالی این محور به صورت افقی است به مقدار صفر رسیده و از محور مرکزی به پایین، جریان روبه بالا که موجب ایجاد آبستگی زیر دریچه شده است سبب سرعت مثبت در این قسمت شده است. در مقایسه پروفیل‌های این شکل، سرعت قائم در مرز بالایی مجرا در طول مجرای ۱۰ سانتی‌متر بیشترین میزان را به خود اختصاص داده و با افزایش طول از این میزان کاسته شده است. این مسئله را می‌توان بدین گونه توجیه کرد که با افزایش طول مجرا، انحنای خطوط جریان برگشتی از بدنه به سمت دهانه ورودی مجرا کمتر شده و لذا مؤلفه سرعت در راستای طولی مجرا غالب بوده است.

قسمت خط‌چین در این شکل‌ها محدوده مجرای تخلیه‌کننده تحتانی را نشان می‌دهد. همچنین (z) فاصله از کف مخروط، (x) فاصله از بدنه در راستای محور مرکزی دریچه و (y) فاصله در راستای عمود بر محور مرکزی دریچه هستند که با قطر مجرای تخلیه‌کننده و مؤلفه‌های سرعت افقی (u) و قائم (w) جریان، با سرعت جریان خروجی از دریچه تحتانی بی‌بعد شده‌اند. با توجه به شکل (۵-الف)، با نزدیک‌تر شدن به دهانه ورودی مجرا در راستای عمودی، سرعت افقی افزایش یافته و در محور مرکزی مجرا به بیشینه مقدار خود رسیده است. همچنین با افزایش طول مجرا، ماکزیمم سرعت افقی مقداری افزایش یافته است. در شکل (۵-ب)، نیز همان‌طور که دیده می‌شود مؤلفه قائم سرعت، در نزدیکی ورودی مجرا دارای ماکزیمم مقدار (از نظر قدرمطلق) خود در مرز بالا و پایینی آن است (z/D=0.6 and 1.8). در محدوده متأثر از مکش مجرا تا محور مرکزی مجرا، سرعت منفی و روبه پایین، در نزدیکی محور مرکزی مجرا به مقدار تقریباً صفر

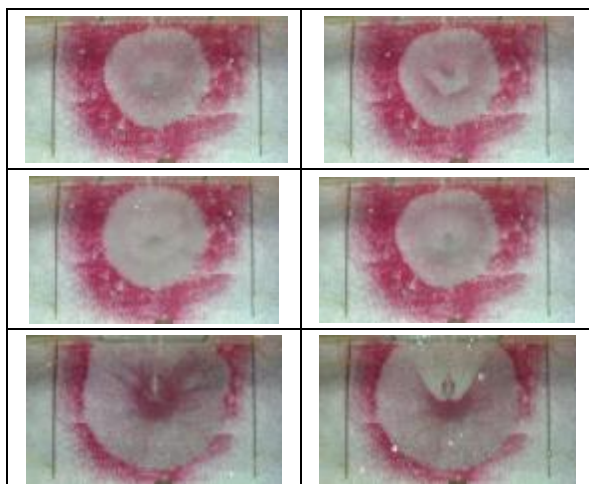


شکل ۵- پروفیل‌های قائم الف) مؤلفه افقی و ب) مؤلفه قائم سرعت

گرادیان سرعت در ناحیه مجاور دهانه ورودی مجرا به شدت افزایش می‌یابد. در حقیقت می‌توان گفت افزایش گرادیان سرعت سبب ایجاد تنش برشی وارد بر رسوبات شده و در جاهایی (محدوده مخروط رسوب‌شویی) که تنش برشی ایجاد شده بیش از مقاومت برشی بحرانی رسوبات شده، رسوبات به حرکت درآمده‌اند.

بررسی روند تغییرات بردارهای سرعت جریان

شکل ۶، بردارهای سرعت جریان را در پروفیل طولی خط مرکزی جریان و شکل ۷، نمای پلان بردارهای سرعت را در نزدیکی کف مخروط رسوب‌شویی در ($L_t = 20 \text{ cm}$) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها بردارهای سرعت جریان به دلیل فشار مکشی اعمالی از طرف تخلیه‌کننده‌ها حالت گسترش یافته خود را از دست داده و در مجاورت دریچه، توزیع آن‌ها غیریکنواخت شده و



شکل ۸- نحوه گسترش مخروط رسوب‌شویی

نتیجه‌گیری

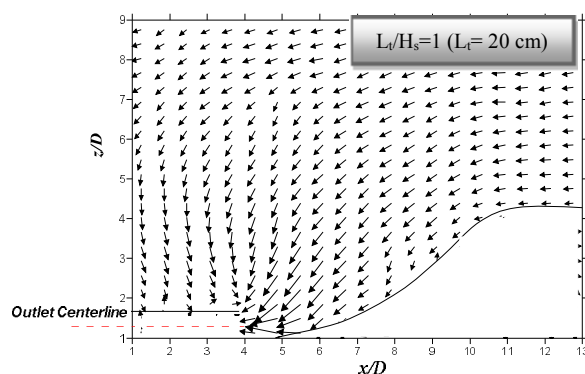
توسعه مجرای تخلیه‌کننده تحتانی در مخزن سد تأثیر قابل توجهی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی دارد به طوری که توسعه مجرا به میزان نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع رسوبات در مخزن سبب افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی، به میزان ۵۰، ۷۴ و ۹۶ درصد و افزایش طول مخروط به میزان ۴۸، ۸۳ و ۱۱۳ درصد نسبت به حالت بدون توسعه مجرا می‌شود.

با افزایش عدد فرود، میزان رسوبات تخلیه شده از مخزن افزایش می‌یابد و تأثیر عدد فرود بر میزان رسوبات تخلیه شده از مخزن در طول‌های بیشتر مجرای تخلیه‌کننده تحتانی بیشتر است.

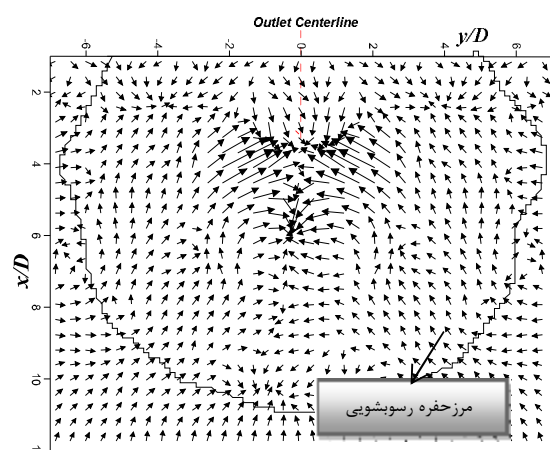
با افزایش طول مجرای تخلیه‌کننده تحتانی ماکزیمم سرعت افقی (در جهت جریان) مقداری افزایش می‌یابد که محل آن درست در محور مقابل دهانه ورودی مجرا است.

مؤلفه قائم سرعت جریان در مرز بالایی مجرا از نظر اندازه دارای بیشینه مقدار با علامت منفی، در نزدیکی محور مرکزی به دلیل اینکه جهت اصلی جریان در حوالی این محور به صورت افقی است، به مقدار تقریباً صفر رسیده و در مرز پایینی مؤلفه قائم جریان به سمت بالا بوده و بیشینه سرعت مثبت در مرز پایینی مجرا رخ می‌دهد.

بردارهای سرعت جریان در مجاورت دهانه ورودی مجرا، به دلیل فشار مکشی اعمالی از طرف تخلیه‌کننده تحتانی، حالت گسترش یافته خود را از دست می‌دهند و گرادیان سرعت در ناحیه مجاور دهانه ورودی مجرا به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۶- پروفیل بردارهای سرعت جریان در محور مرکزی فلوم



شکل ۷- نمای پلان بردارهای سرعت جریان

شکل ۸، نحوه گسترش مخروط رسوب‌شویی، از مرحله تخلیه ناگهانی تا تعادل را در همان طول مجرا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود بین پلان بردارهای سرعت (شکل ۷) و تصاویر شکل ۸ که نحوه گسترش مخروط رسوب‌شویی در اثر حرکت رسوبات را نشان می‌دهد، هماهنگی خوبی وجود دارد. از نزدیکی بدنه تا ورودی مجرای تخلیه تحتانی بردارهای سرعت جریان به سمت دهانه ورودی حرکت می‌کنند که می‌تواند نشان دهنده حرکت رسوبات قبل از نقطه تعادل مخروط رسوب‌شویی از نزدیکی بدنه به سمت ورودی مجرای تحتانی باشد که در تصویر ۸، از شکل ۸ می‌توان حرکت رسوب را در این ناحیه مشاهده کرد. همچنین در مجاورت ورودی مجرا حالت قلبی شکل بردارهای سرعت به سمت خروجی مشاهده می‌شود که در تصاویر الف تا ت شکل ۸ نیز حرکت رسوبات به همین شکل است.

Journal of Science and Technology; Transaction
B. 28(B1): 119-136.

13. Utah Division of Water Resources. 2010. Managing Sediment in Utah's Reservoirs. pp. 43-70.

منابع

۱. امامقلی‌زاده ص. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر میزان تخلیه رسوبات در رسوب‌شویی تحت فشار. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵(۴): ۲۱۹-۲۳۴.
2. Ahadpour Dodaran A. Park S. Mardashti A. and Noshadi M. 2012. Investigation of dimension changes in the under pressure hydraulic sediment flushing cavity in storage dams under the effect of localized vibrations in the sediment layers. International Journal of Ocean System Engineering. 2(2): 71-82.
3. Dewals B. J. Brasseur N. Erpicum S. Archambeau P. and Piroton M. 2009. Flushing with limited sediment availability. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR). pp. 4289-4296.
4. Emamgholizadeh S. Bina M. Fathi- Moghadam M. and Ghomeysi M. 2006. Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir. Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences. 1(4): 7-16.
5. Emamgholizadeh S. and Fathi-Moghadam M. 2014. Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs. Journal of Hydrologic Engineering. 19(4): 674-681.
6. Fathi-Moghadam M. Emamgholizadeh S. Bina M. and Ghomeshi M. 2010. Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. Journal of Hydraulic Research. 48(4): 509-514
7. Lai J. S. and Chang F. 2001. Physical modeling of hydraulic desiltation in Tapu reservoir. International Journal of Sediment Research. 16(3): 363-379.
8. Meshkati Shahmirzadi M. E. Dehghani A. A. Sumi T. Mosaedi A. and Meftah H. 2010. Experimental investigation of pressure flushing technique in reservoir storages. Water and Geoscience. pp. 132-137.
9. 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, Electronic Version. 784 p.
10. Nortek. 2005. ADV Users Manual' Nortek As. Norway. 86 p.
11. 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.
12. Talebbeydokhti N. and Naghshineh A. 2004. Flushing sediment through reservoirs. Iranian

