



The Investigation and Evaluation of the Pressure Flushing Through Storage Reservoirs Using Physical Models

S. Emamgholizadeh¹, M. Bina²,
M. Ghomeshi³ and H. Jahani⁴

Abstract

Sedimentation in reservoirs is one of the most serious problems of most dams. Sustainable reservoir management necessitates the deposited sediment must be removed to reduce the inactive storage of the reservoir. Different methods can be used accordingly to control sedimentation and maintenance of the dam reservoir. Dredging, sluicing, and flushing are among these methods. In flushing methods, the previously deposited sediment would be flushed from the reservoir by opening the bottom outlets. In the pressure flushing method, the amount of the flushed sediments depends on many parameters such as the water depth over the bottom outlets, the discharge through bottom outlets, the size of the outlets, the geometry of the reservoir, and the size and type of the sediments.

In this study laboratory experiments were performed to investigate the flushing processes during pressure flushing. The effects of the discharge through bottom outlets and the water depth over the bottom outlets were investigated using 3 sizing of non-cohesive sediments (fine, medium, and coarse sediments). The physical model was constructed in the Hydraulic Laboratory at the Water and Science Collage of the University of Shahid Chamran, Ahwaz, Iran. The results indicated that the amount of sediment flushed increases as the depth of water in reservoir decreases and the discharge from outlets increases. Under the same conditions the flushed sediment volume is increased moving from coarse sediments to fine sediments.

Keywords: Pressure Flushing, Sedimentation, Bottom Outlet, Storage Reservoir.

بررسی و ارزیابی رسوب‌شوئی تحت فشار در سدهای مخزنی با استفاده از مدل فیزیکی

صمد امامقلی زاده^۱، محمود بینا^۲،
مهدی قمشی^۳ و حسام جهانی^۴

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سدها مشکلی است که بسیاری از سدهای در حال بهره‌برداری با آن مواجه می‌باشند. مدیریت پایای مخزن ایجاب می‌نماید که حجم ذخیره مفید مخزن که بوسیله انباشت رسوبات از دست می‌رود از طریق روشهای رسوبزدائی مانند لایروبی، عبور دهی جریان غلیظ، رسوب‌شوئی و یا دیگر روشهای رسوبزدائی حفظ و بازیافت گردد. در روش رسوب‌شوئی، رسوباتی که از قبل در مخزن نهشته شده‌اند بوسیله باز نمودن دریچه‌های تختانی سد همراه با آب خروجی از دریچه‌ها شسته شده و از آن خارج می‌گردند. مقدار حجم رسوبات تخلیه شونده به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که برای مثال می‌توان به عمق آب داخل مخزن، دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده تختانی، اندازه و نوع رسوبات تجمع یافته و مشخصات فیزیکی مجرای تخلیه رسوبات اشاره نمود. جهت انجام این پژوهش یک مدل فیزیکی در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و با انجام آزمایشات مختلف به بررسی و مطالعه این امر پرداخته شد. سپس با آنالیز ابعادی پارامترهای فوق‌الذکر به تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده پرداخته شده و رابطه‌ای بدون بعد برای تخمین حجم مخروط رسوب‌شوئی ارائه گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد برای دست یابی به حداکثر راندمان در تخلیه رسوبات در رسوب‌شوئی تحت فشار می‌بایستی تا آنجائیکه بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد ارتفاع آب مخزن را کاهش داد و دریچه‌ها با حداکثر ظرفیت‌شان بهره‌برداری شوند.

کلمات کلیدی: رسوب‌شوئی تحت فشار، رسوب، تخلیه‌کننده‌های تختانی، مخازن سدها

1- Assistant Professor of Shahrood University
2- Assistant Professor of Shahid Chamran University
3- Assistant Professor of Shahid Chamran University
4-Engineer Khuzestan Water and Power Authority (KWPA)

۱- استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز
۳- دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز
۴- کارشناس سازمان آب و برق خوزستان

۱- مقدمه

جریان خروجی از آن بصورت آزاد خارج می‌گردد. به عبارت بهتر در این روش از رسوب‌شوئی جریان ورودی به مخزن بدون متوقف شدن، از آن خارج شده و در داخل مخزن جریان رودخانه‌ای اتفاق می‌افتد.

رسوب‌شوئی تحت فشار^۳: در این روش لازم نیست که ارتفاع آب مخزن زیاد پائین آورده شود. در طول مدت زمان انجام رسوب‌شوئی رقوم سطح آب مخزن بالاتر از رقوم ارتفاعی بالای دریچه بوده و جریان خروجی از آن به صورت تحت فشار می‌باشد.

۲-۲- کاربرد رسوب‌شوئی

از رسوب‌شوئی می‌توان برای دفع رسوبات تجمع یافته و بهبود بخشیدن ظرفیت مخزن استفاده نمود. همچنین از این روش می‌توان هم برای مخازن کوچک و هم برای مخازن بزرگ استفاده نمود. (Pitt and Thompson, 1984) پیشنهاد کردند، مخازنی که نسبت آب ذخیره در آنها نسبت به جریان ورودی به آنها کمتر از ۰/۵ می‌باشد، روش رسوب‌شوئی هیدرولیکی روشی مناسب برای حفظ ظرفیت ذخیره مخزن می‌باشد. علاوه بر آن از آن می‌توان بطور موفقیت آمیز در مخازن آبیاری و نیروگاه‌ها که در پریودهای روزانه تا ماهانه سطح آب مخزن پایین می‌افتد، استفاده نمود.

همچنین از رسوب‌شوئی می‌توان در مخازنی که از لحاظ هیدرولوژیکی بزرگ می‌باشند ولی در اثر تجمع رسوبات ظرفیت‌شان کوچک شده است استفاده کرد. رسوباتی که در اثر رسوب‌شوئی از مخزن بر طرف می‌گردند، اندازه شان از ذرات شنی^۴ تا رسی^۵ تغییر می‌کنند. برای مثال عملیات رسوب‌شوئی در مخازن نیروگاهی کوچک کاجی^۶ و جییدم^۷ و مخزن آبیاری سد بزرگ سفیدرود و همچنین استفاده از عمل ترکیبی رسوب‌شوئی عبوردهی رسوبات و رسوب‌شوئی در سد Sanmenxia و Heisonglin اشاره نمود (Morris and Fan, 1997).

۲-۳- محدودیت استفاده از رسوب‌شوئی

استفاده از عمل رسوب‌شوئی برای دفع رسوبات دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که عبارتند از:

۱- این روش نیاز به مخزن با مورفولوژی خاصی دارد، یعنی مخزن بایستی باریک اما دارای مخزن طویل و بدون شاخه‌های فرعی باشد که معمولا به راحتی یافت نمی‌شود. ۲- این روش نیاز به امکانات شستشو یا تخلیه در دیواره سد دارد، که به ندرت در سدها موجود می‌باشد (بخصوص در سدهای قدیمی). ۳- این روش به حجم آب زیادی نیاز دارد، لذا برای مخازن مناطق خشک و نیمه خشک جایی

بر اساس گزارش کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ سالانه بطور متوسط بین ۰/۵ تا ۱ درصد از حجم کل ذخیره سدهای موجود در اثر رسوبگذاری از دست می‌رود (Atkinson, 1988). بنابراین هرگونه غفلت از این موضوع به ویژه در کشورهای خشک و نیمه خشک جهان مانند ایران، تهدید جدی برای زندگی نسلهای آینده به شمار می‌رود. متأسفانه رسوبات ته‌نشین شده در مخازن سدها علاوه بر اینکه موجب از بین بردن اهداف مورد انتظار از ساخت یک سد مانند کنترل سیلاب، تامین آب، تولید انرژی، آبیاری و کشتیرانی می‌گردد، موجب تحت تأثیر قرار دادن سیستم رودخانه از جنبه‌های متعددی می‌گردد که برای مثال می‌توان به موارد غرقاب شدن اراضی کشاورزی و مسکونی ناشی از بالا آمدن رقوم سطح آب در بالادست مخزن بخصوص در ناحیه دلتائی دریاچه سد، کف کنی و تخریب سواحل رودخانه در پایین دست، مشکلات ناشی از وارد شدن رسوبات به تجهیزات مربوط به توربین‌ها و سیستم‌های برق آبی، انسداد دریچه‌ها و آبگیرها اشاره نمود (Fang and Cao, 1996). بنابراین مدیریت پایایی^۱ مخزن، ایجاب می‌نماید که حجم ذخیره مفید مخزن که بوسیله انباشت رسوبات از دست می‌رود از طریق روش‌های رسوبزدائی مانند تخلیه جریان غلیظ، سیفون کردن، لایروبی و رسوب‌شوئی حفظ و بازیافت گردد. به این ترتیب با بر طرف نمودن رسوبات نهشته شده، مخزن را می‌توان احیاء و ظرفیت ذخیره جدیدی ایجاد نمود (Breusers et al., 1982).

۲- روش رسوب‌شوئی هیدرولیکی

رسوب‌شوئی هیدرولیکی به روشی گفته می‌شود که در آن با باز نمودن تخلیه‌کننده‌های تحتانی (درکف یا رقوم پایین‌تر) برای ایجاد فرسایش رسوبات فرسایش پذیر که از قبل در داخل مخزن نهشته شده‌اند بکار می‌رود. رسوب‌شوئی تکنیک جدیدی نیست و سابقه استفاده از این روش به سال‌های دور برمی‌گردد. (Brown (1943 اظهار می‌دارد که قدیمی‌ترین روش رسوب‌شوئی که در کشور اسپانیا مورد استفاده قرار گرفت به قرن شانزدهم بر می‌گردد.

۲-۱- طبقه بندی رسوب‌شوئی

(Fan (1985 عمل رسوب‌شوئی را به دو گروه تقسیم نمود:
رسوب‌شوئی آزاد^۲: در این روش ارتفاع آب مخزن بوسیله باز شدن تخلیه‌کننده‌های تحتانی پایین آورده شده و مخزن بطور کامل تخلیه می‌گردد. بسته به ظرفیت تخلیه‌کننده‌های تحتانی و حجم مخزن، این کار ممکن است روزها طول بکشد. در این روش رقوم سطح آب مخزن، پایین‌تر از رقوم ارتفاعی بالای دریچه می‌باشد و

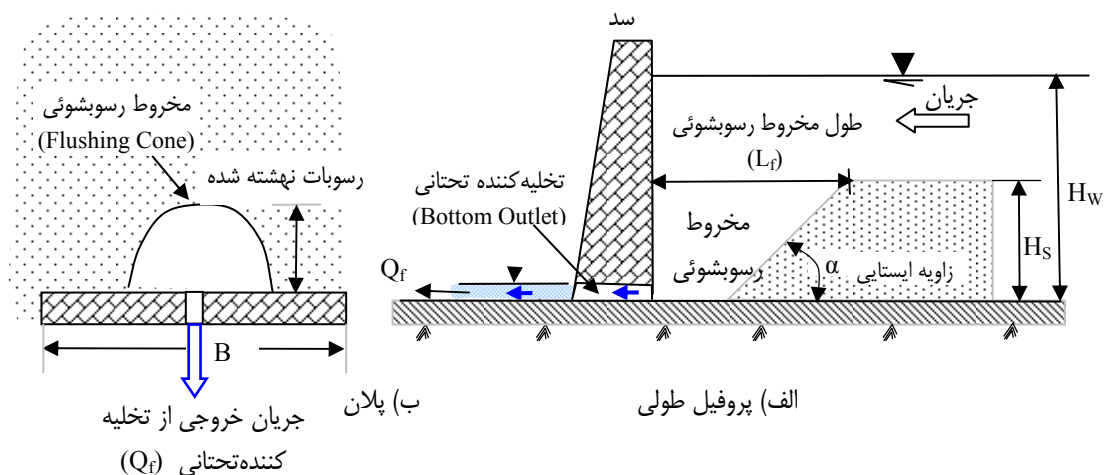
(1984) White and Bettes به منظور بدست آوردن حد فاصله رسوب‌شویی در مدت زمان انجام رسوب‌شویی تحت فشار مطالعاتی انجام دادند. آنها اظهار داشتند گسترش طولی مخروط رسوب‌شویی بستگی به عمق آب داخل مخزن و دبی خروجی از سد دارد، بطوریکه به ازای یک دبی ثابت هرچه مقدار ارتفاع آب داخل مخزن کاهش یابد، میزان گسترش طولی مخروط رسوب‌شویی به سمت بالادست افزایش می‌یابد. مطالعات آزمایشگاهی (1996) Fang and Cao نشان می‌دهد شیب حفره تشکیل شونده پس از انجام رسوب‌شویی تقریباً برابر با شیب پایدار رسوبات در شرایط مستغرق می‌باشد. در رسوب‌شویی تحت فشار بعد از اینکه تخلیه‌کننده تحتانی باز می‌گردد، بعد از مدتی حفره یا چاله‌ای از آبستنگی به شکل مخروطی یا قیفی در جلوی آن بوجود آمده و توسعه می‌یابد (شکل ۱). این روش معمولاً زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بخواهند رسوبات نهشته در اطراف ورودی آبگیر را برطرف نمایند (Morris and Fan, 1997). مدت زمان لازم برای تشکیل کامل حفره آبستنگی و به پایدار رسیدن ابعاد هندسی آن بسته به نوع رسوبات، تراز آب مخزن و ارتفاع رسوبات تجمع یافته بالای تخلیه‌کننده تحتانی دارد و ممکن است از چند ساعت تا چند روز باشد. برای مثال آزمایشات انجام شده بر روی مدل مخزن جی‌بیدم (Gebidam) در کشور سوئیس نشان داد که حفره آبستنگی پس از مدت زمان ۲ تا ۳ ساعت به حالت تعادل می‌رسد (Brandt, 2000).

برای مثال کاربردی در استفاده از رسوب‌شویی تحت فشار می‌توان به سد دز اشاره نمود. سد دز از جمله سدهای مهم کشور است که متأسفانه به علت عدم انجام آبخیزداری مناسب در حوضه آبریز آن، با مشکل تجمع رسوب در دهانه آبگیر نیروگاه مواجه می‌باشد.

که بایستی به جای از دست دادن آب، آب را ذخیره کرد، روش مناسبی نمی‌باشد. ۴- بسته به نوع رسوب‌شویی بایستی مخزن را کاملاً خالی و یا سطح آب آن را تا حدی پایین آورد. ۵- عمل رسوب‌شویی موجب می‌گردد که رسوبات رها یافته از مخزن باعث ایجاد جریان با غلظت بسیار بالا نسبت به جریان طبیعی رودخانه گردد. پریود اولیه رسوب‌شویی که بسته به اندازه مخزن از چند ساعت تا چندین روز تغییر می‌کند، بی‌نهایت تحت تأثیر غلظت رسوب می‌باشد. عموماً در بعضی از سایتها مقدار این پارامتر ۱۰۰ گرم در لیتر و در سایت‌های دیگر مقدار آن بیشتر از ۱۰۰۰ گرم در لیتر می‌باشد (Morris and Fan, 1997). غلظت بالای رسوبات در پایین دست موجب ایجاد اثرات غیر قابل قبول و ایجاد مشکلاتی مانند مسدود کردن کانال‌های آبیاری و مشکلات زیست محیطی برای موجودات آبی در پائین دست سد می‌گردد.

۲-۴- رسوب‌شویی تحت فشار

در رسوب‌شویی تحت فشار در طول مدت انجام رسوب‌شویی، تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد برای مدت زمان معینی باز شده و سطح آب مخزن تقریباً ثابت می‌باشد. زمان باز شدن تخلیه‌کننده‌های تحتانی، حرکت عمومی جریان آب به سمت دریچه‌ها موجب ایجاد نیروی فرساینده بر روی رسوبات نهشته شده می‌گردد، لذا همراه جریان آب خروجی از آن، رسوبات نهشته شده از طریق تخلیه‌کننده‌های تحتانی از سد خارج می‌گردد (Morris and Fan, 1997). در زمینه رسوب‌شویی تحت فشار مطالعاتی مختلفی توسط محققین مختلف انجام گرفته است که برای مثال می‌توان به مطالعات (1984) White and Bettes، (1990) Di Silvio، (1996) Lai and Shen و (2004) Scherllein et al. اشاره نمود.



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

که به صورت ریاضی آن را می‌توان بصورت زیر نوشت :

$$f(V_f, Q_f, H_w, H_s, B, A_G, g, \rho_s, \rho_w, d_s) = 0$$

$$V_f = f(Q_f, H_w, H_s, B, A_G, g, \rho_s, \rho_w, d_s)$$

با آنالیز ابعادی پارامترهای مذکور خواهیم داشت:

$$\frac{1}{H_s} \frac{V_f^3}{H_s} = f\left(\frac{Q_f}{A_G}, \frac{H_s}{d_s}, \frac{H_s}{H_w}, \frac{r_G}{B}, \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) \quad (1)$$

با توجه به ثابت بودن B, ρ_s, ρ_w, r_G رابطه ۱ را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{H_s} \frac{V_f^3}{H_s} = f\left(\frac{Q_f}{A_G}, \frac{H_s}{d_s}, \frac{H_s}{H_w}\right) \quad (2)$$

با جایگزینی $u_f = \frac{Q_f}{A_G}$ در رابطه ۲ خواهیم داشت:

$$\frac{1}{H_s} \frac{V_f^3}{H_s} = f\left(\frac{u_f}{\sqrt{g.H_w}}, \frac{H_s}{d_s}, \frac{H_s}{H_w}\right) \quad (3)$$

u_f ، سرعت متوسط جریان آب در دهانه ورودی تخلیه کننده تحتانی می‌باشد.

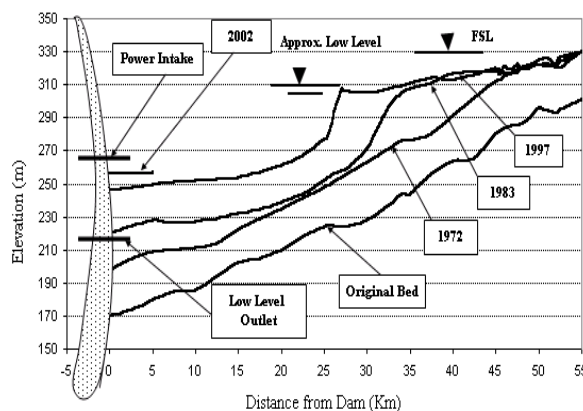
در این تحقیق تلاش بر این است تا براساس آزمایشات مختلف در نظر گرفته شده و داده‌های جمع آوری شده، شکل و رابطه بدون بعدی استخراج نمود تا با استفاده از آن بتوان حجم مقدار رسوباتی را که می‌توان با استفاده از روش رسوب‌شویی تحت فشار از مخزن رسوب‌زدائی نمود برآورد نمود.

رسوب‌گذاری بیش از ۱۵ میلیون متر مکعب در سال موجب شده که ظرفیت مخزن بطور قابل ملاحظه‌ای، کاهش یابد. به طوری که، براساس عملیات هیدرو گرافی انجام شده در سالهای ۱۳۵۱، ۱۳۶۲، ۱۳۷۶ و ۱۳۸۱ سطح رسوبات مخزن در نزدیکی بدنه سد سالانه ۲ متر افزایش می‌یابد. در حال حاضر رقوم رسوبات در فاصله تقریبی ۱۲ متری رقوم آبگیرهای نیروگاه قرار گرفته است (شکل ۲) (Emamgholizadeh et al., 2005).

۳- تئوری و آنالیز ابعادی

همان طوری که قبلاً ذکر شد زمانی که دریچه‌های تحتانی به منظور رسوب‌شویی باز می‌شوند حرکت عمومی جریان آب موجب حرکت رسوبات نهشته شده می‌گردد. در زمان انجام رسوب‌شویی اگر سطح آب مخزن ثابت باشد، پس از مدتی مخروط رسوب‌شویی به شکل یک قیف در مجاورت تخلیه‌کننده‌ها تشکیل می‌گردد (شکل ۲). حجم مخروط رسوب‌شویی (V_f) بستگی به پارامترهای مختلفی دارد که مهمترین آنها عبارتند از :

دبی جریان خروجی از تخلیه کننده تحتانی (Q_f)، ارتفاع آب داخل مخزن (H_w)، ارتفاع رسوبات تجمع یافته در پشت مخزن (H_s)، عرض مخزن در محل سد (B)، ابعاد تخلیه کننده تحتانی (در صورتیکه تخلیه کننده تحتانی مستطیلی باشد $A_G = b_G \times d_G$) و در صورتیکه دایره‌ای شکل باشد، مانند دریچه‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است $A_G = \pi r_G^2$ که شعاع دریچه می‌باشد، شتاب ثقل g ، چگالی رسوبات نهشته شده ρ_s ، چگالی آب ρ_w ، قطر دانه‌های رسوبات تجمع یافته (d_s).



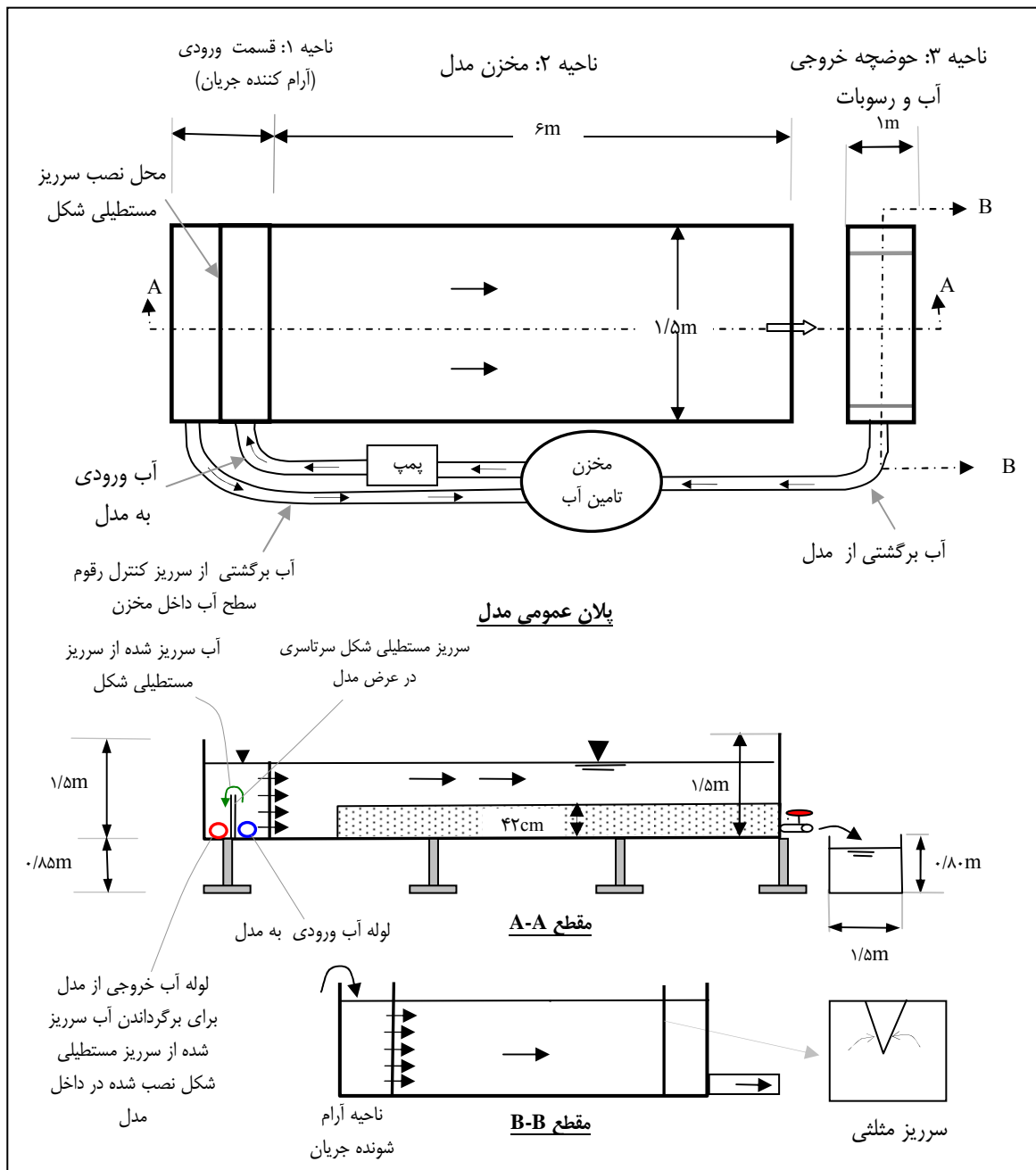
شکل ۲- پروفیل طولی مخزن سد در سال‌های مختلف (Emamgholizadeh et al., 2005)

۴- مواد و روشها

۴-۱ - شرح مدل فیزیکی

اهداف این پژوهش از مدل فیزیکی استفاده شده است. 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 ۷ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۱/۵ متر ساخته شد. مدل دارای سه قسمت اصلی می باشد: ۱- قسمت ورودی مدل (ناحیه آرام کننده جریان) ۲- مخزن مدل ۳- قسمت اندازه گیری جریان خروجی از مدل (حوضچه ته نشینی رسوبات) (شکل ۳).

با توجه به اینکه در پدیده رسوب شویی تحت فشار الگوی جریان در نزدیکی تخلیه کننده های تحتانی سه بعدی می باشد و همچنین به دلیل دخیل بودن تعداد پارامترهای زیاد در این پدیده، بررسی رفتار ریاضی آن بسیار مشکل و پیچیده می باشد (Scheuerlein et al., 2004). بدین منظور در این تحقیق برای شناخت این پدیده و رسیدن به



شکل ۳ - پلان مدل، پروفیل طولی و مقاطع عرضی همراه با جزئیات مربوطه

قسمت ورودی مدل دارای ابعادی به طول ۱ متر، عمق ۱/۵ متر و عرض ۱/۵ متر می‌باشد. در این قسمت تلاطم جریان ورودی به مدل گرفته شده و جریان بصورت آرام وارد قسمت اصلی مدل (مخزن) می‌گردد. قسمت اصلی مخزن دارای طول ۶ متر، ارتفاع ۱/۵ متر و عرض ۱/۵ متر بود. همچنین به منظور کنترل ارتفاع آب داخل مخزن از یک سرریز استفاده گردید، و آب مازاد ورودی به مدل با استفاده از یک لوله ۳ اینچی به مخزن اصلی تامین آب برگشت داده می‌شد.

به منظور رسوب‌شوئی، یک تخلیه‌کننده با مقطع دایره‌ای شکل (شیر ۲ اینچ) در خط مرکزی مقطع خروجی در نظر گرفته شد. از آنجائیکه زمان انجام رسوب‌شوئی، مکش جریان آب در دهانه ورودی تخلیه‌کننده تحتانی موجب می‌شود مقداری از رسوبات پایین‌تر از رقوم کف دریچه نیز شسته شوند، بدین منظور، رقوم ارتفاعی تخلیه‌کننده تحتانی ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از رقوم کف مدل در نظر گرفته شد. لذا با در نظر گرفتن ارتفاع رسوب در مدل برابر با ۴۲ سانتی‌متر، ارتفاع رسوب بالاتر از رقوم کف تخلیه‌کننده تحتانی برابر با ۳۲ سانتی‌متر و ارتفاع رسوب زیر رقوم ارتفاعی آن ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. رسوبات پس از خروج از تخلیه‌کننده تحتانی وارد مخزن مکعب مستطیل شکل (حوضچه ته‌نشینی رسوبات) با ابعادی به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸۰ متر که در پایین دست مدل قرار داده شد بود می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، از یک سرریز ۲۶ درجه استفاده گردید. آب خروجی از مدل پس از اندازه‌گیری بوسیله یک لوله ۵ اینچ به مخزن اصلی تامین آب آزمایشگاه برگشت داده می‌شد. شکل ۳ پلان مدل، پروفیل طولی و مقاطع عرضی همراه با جزئیات مربوطه را نشان می‌دهد.

۴-۲- رسوبات مورد استفاده و دانه بندی آن

برای انجام آزمایشات از رسوبات غیرچسبنده در سه اندازه، درشت دانه، متوسط و ریزدانه مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به اینکه ذرات رسوب مورد استفاده بایستی دارای دانه‌بندی یکنواخت باشند،

بدین منظور رسوبات در نظر گرفته شده از الک شماره‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ گذرانده شدند. الک‌های مذکور به ترتیب دارای مش‌های به قطر ۲ mm، ۰/۶ mm و ۰/۲۵ mm می‌باشند. رسوبات بدست آمده عبارتند از:

- رسوبات درشت دانه (رسوبات عبوری از الک شماره ۱۰ و مانده برالک شماره ۳۰)
- رسوبات متوسط (رسوبات عبوری از الک شماره ۳۰ و مانده برالک شماره ۶۰)
- رسوبات ریزدانه (رسوبات عبوری از الک شماره ۶۰)

۵- تعداد آزمایشات

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق آزمایشات با سه نوع رسوب انجام گردید. در هر یک از حالت‌ها آزمایشات با سه ارتفاع آب و در هر ارتفاع آب با ۵ دبی مورد آزمایش قرار گرفت. سه ارتفاع آب و ۵ دبی در نظر گرفته شده به ترتیب ۵۲، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر و ۱، ۳، ۴/۵، ۶ و ۸ لیتر در ثانیه بودند. در مجموع برای هر دانه بندی ۱۵ آزمایش و در کل ۴۵ آزمایش انجام گرفت. جدول ۱ اطلاعات مربوط به هر آزمایش را نشان می‌دهد.

۶- نحوه انجام آزمایشات

برای انجام آزمایشات، ابتدا رسوبات غیر چسبنده به صورت لایه لایه 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 بصورت لایه لایه در داخل مدل ریخته می‌گردید. به منظور متراکم کردن رسوبات ریخته شده در داخل مدل، با استفاده از یک قطعه چوب با سطح مقطع مستطیلی شکل به ابعاد ۴×۶ سانتی متر به رسوبات ضربات منظمی وارد می‌شد. این عمل تا رسیدن ارتفاع نهائی رسوبات به اندازه ۴۲ سانتی‌متر ادامه می‌یافت. این عمل در انجام تمامی آزمایشات بصورت یکسان عمل می‌گردید.

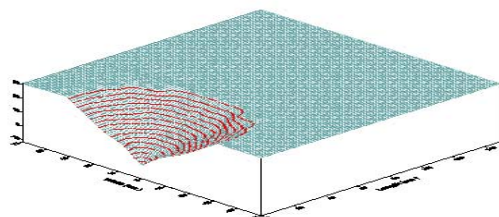
جدول ۱- تعداد آزمایشات در نظر گرفته شده و دیگر اطلاعات مربوط به هر آزمایش

تعداد آزمایش در هر حالت	قطر تخلیه کننده تحتانی (cm)	ضخامت رسوب در مدل (cm)	تعداد ارتفاع آب مخزن	تعداد دبی‌ها	نوع رسوب	آزمایشات در نظر گرفته شده
۱۵	۵	۴۲	۳	۵	رسوب نوع ۱	حالت ۱
۱۵	۵	۴۲	۳	۵	رسوب نوع ۲	حالت ۲
۱۵	۵	۴۲	۳	۵	رسوب نوع ۳	حالت ۳

پس از پایان یافتن هر آزمایش، برای اینکه شکل مخروط رسوب‌شوئی تغییر نکند و به صورت نهائی خودش باقی بماند، ابتدا دریچه تخلیه رسوبات بسته می‌شد. سپس برای تخلیه آب داخل مخزن از یک شیر ۳ اینچی که بدین منظور در قسمت ورودی مدل در نظر گرفته شده بود استفاده می‌گردید. آب داخل مخزن تا ارتفاع هم تراز رسوبات تخلیه می‌گردید و فقط آب داخل مخروط رسوب‌شوئی باقی می‌ماند. سپس برای تخلیه آب داخل مخروط رسوب‌شوئی، شیر تخلیه کننده انتهائی خیلی آرام باز می‌شد تا آب داخل مخروط بدون اینکه شکل مخروط تغییر کند تخلیه گردد. بسته به حجم مخروط این کار ممکن بود ساعت‌ها طول بکشد.

۷- اندازه گیری حجم مخروط رسوب‌شوئی

برای اندازه‌گیری حجم مخروط رسوب‌شوئی، ابتدا آب داخل مخروط رسوب‌شوئی تخلیه می‌گردید. سپس با استفاده از ارتفاع سنج نقطه‌ای با دقت میلی‌متر، برداشت مقاطع عرضی در مدل انجام می‌گردید. سپس به منظور بدست آوردن حجم مخروط رسوب‌شوئی در گزینه‌های مختلف، از نرم افزار SURFER 8 استفاده گردید. با استفاده از این نرم افزار و معرفی مقاطع عرضی برداشت شده حجم رسوبات رسوب‌شوئی بدست آمد. برای مثال شکل ۴ الف و ب به ترتیب پلان و نما سه بعدی از مخروط رسوب‌شوئی را پس از انجام آزمایش با دبی ۳ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۹۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد که در این آزمایش از رسوب درشت دانه استفاده گردید. همچنین شکل ۵ پروفیل طولی خط مرکزی مخروط رسوب‌شوئی را در حالتی که رسوبات از نوع درشت دانه (بین الگ ۱۰ و ۳۰) بودند، در ۵ آزمایش انجام شده نشان می‌دهد.

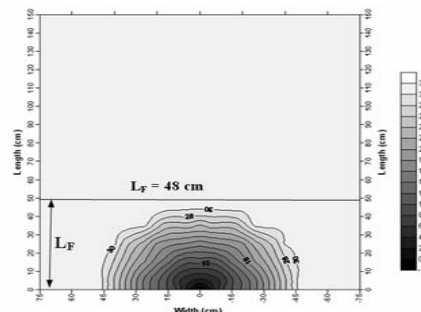


شکل ۴ ب - نمای سه بعدی از مخروط رسوب‌شوئی پس از انجام آزمایش با دبی ۳ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۹۰ سانتی‌متر

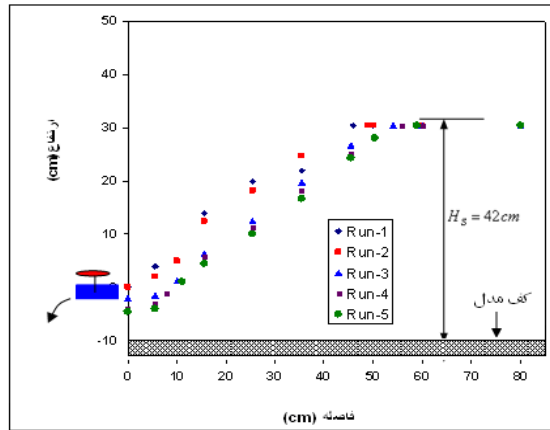
با روشن نمودن پمپ آب وارد مدل می‌گردید. پس از رسیدن ارتفاع آب داخل مدل به ارتفاع مورد آزمایش (۵۲، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر)، تخلیه‌کننده تحتانی باز می‌گردید. شیر تخلیه‌کننده تحتانی متناسب با دبی مورد آزمایش (۱، ۳، ۴/۵، ۶ و ۸ لیتر در ثانیه)، باز می‌گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از تخلیه‌کننده، از سرریز مثلی شکل با زاویه ۲۶ درجه استفاده گردید. از آنجائیکه برای اندازه‌گیری جریان خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی لازم بود جریان آرام و تلاطم آن از بین برده شود، بدین منظور از صفحه مشبک فلزی در داخل حوضچه مستطیلی شکل استفاده گردید.

همچنین لازم بود در طول مدت زمان انجام هر آزمایش، ارتفاع آب داخل مخزن ثابت نگه داشته شود. بدین منظور برای ثابت ماندن ارتفاع آب داخل مدل، از سرریز مستطیل شکلی که بدین منظور در ناحیه ورودی مدل پیش‌بینی شده بود استفاده گردید (شکل ۳). بدین گونه که ارتفاع سرریز، متناسب با ارتفاع آب مورد نظر برای انجام آزمایش تنظیم می‌گردید. آب مازاد ورودی به مدل، از سرریز مستطیلی شکل، سرریز شده و توسط یک لوله ۳ اینچی به مخزن اصلی برگشت داده می‌شد. (شکل ۳).

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 خروجی کاهش می‌یافت. تمام آزمایشات تا زمانی که حفره رسوب‌شوئی به تعادل برسد ادامه می‌یافت. بطوریکه در انتهای هر آزمایش غلظت خروجی از تخلیه‌کننده ناچیز بود. مدت زمان لازم برای شکل‌گیری مخروط رسوب‌شوئی و به تعادل رسیدن آن بستگی به دبی جریان خروجی، ارتفاع آب داخل مخزن و نوع رسوبات دارد. در این تحقیق آزمایشات حدوداً به مدت یک ساعت انجام می‌گردید.



شکل ۴ الف - توپوگرافی بستر مخروط رسوب‌شوئی پس از انجام آزمایش با دبی ۳ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۹۰ سانتی‌متر



شکل ۵ - پروفیل طولی از خط مرکزی مخروط رسوب شوئی پس از انجام آزمایشات با استفاده از رسوبات درشت دانه

۸- نتایج و تجزیه تحلیل آن

آزمایشات انجام شده با استفاده از رسوبات غیر چسبنده نشان می‌دهد زمانیکه رسوب شوئی به صورت تحت فشار صورت می‌گیرد و شرایط جریان به گونه‌ای بود که جریان دائمی در مخزن برقرار می‌گردد (دبی ورودی به مدل برابر با دبی خروجی از تخلیه کننده بوده و سطح آب مخزن ثابت نگه داشته می‌شد) در جلوی تخلیه کننده مخروط رسوب شوئی پایدار^۸ تشکیل می‌گردد. پدیده تشکیل مخروط رسوب شوئی، نتایج محققین قبلی مانند (Di Silvio (1990), Scherllein et al. و Fang (1996), Lai and Shen (1996) (2004) را تأیید می‌نماید.

- مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن مخروط رسوب شوئی بستگی به دبی مورد آزمایش، ارتفاع آب مخزن دارد. برای مثال در دبی ۸ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۵۲ سانتی متر، حدوداً ۱۰ دقیقه بعد از باز شدن دریچه، آب خروجی از مدل صاف شده و مخروط رسوب شوئی به تعادل می‌رسد.
- گسترش طولی و عرضی مخروط رسوب شوئی در جلوی تخلیه کننده تقریباً با هم برابر می‌باشد، ولی در دبی‌های بیشتر (دبی‌های ۶ و ۸ لیتر در ثانیه) گسترش طولی آن مقداری بیشتر از گسترش عرضی آن بود.
- وقتی مخروط رسوب شوئی به تعادل می‌رسد شیب در جهت طولی و جانبی تقریباً مساوی یکدیگر می‌باشند. برای مثال مقدار آن برای رسوبات درشت دانه ($d_{50} = 1.2mm$) برابر با $31/4^\circ$ می‌باشد، که تقریباً نزدیک به زاویه ایستایی آن تحت شرایط مستغرق می‌باشد.

همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای موثر، که قبلاً انجام گرفت (رابطه ۳)، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بصورت شکل‌های بدون بعد ۶، ۷ و ۸ به تفکیک دانه بندی در زیر آمده است. در این

شکل‌ها محور افقی مقدار محاسبه شده $\frac{u_f}{\sqrt{gH_W}}$ (سرعت

متوسط جریان آب در دهانه ورودی تخلیه کننده تحتانی و H_W ، ارتفاع آب داخل مخزن) می‌باشد. لازم به توضیح است همانطویکه قبلاً نیز بیان شد برای هر ارتفاع آب در نظر گرفته شده، ۵ دبی مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به اینکه در طول مدت زمان انجام هر آزمایش، ارتفاع آب داخل مخزن ثابت بود، لذا دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی نیز ثابت می‌باشد. با استفاده از رابطه $u_f = \frac{Q_f}{A_G}$ (دبی خروجی از تخلیه کننده و A_G مساحت سطح مقطع خروجی از تخلیه کننده)، سرعت متوسط جریان آب در دهانه تخلیه کننده تحتانی (u_f) قابل محاسبه می‌باشد.

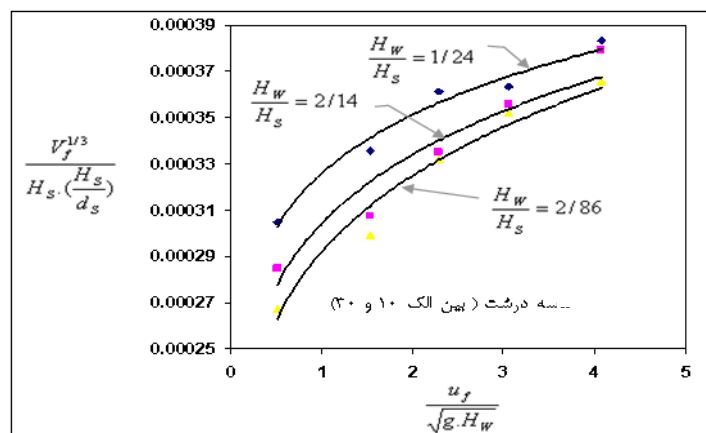
محور عمودی شکل‌های مذکور $\left(\frac{V_f^{1/3}}{H_s} \cdot \frac{H_s}{d_s}\right)$ می‌باشد که با

مشخص بودن حجم رسوبات تخلیه شده (V_f)، ارتفاع رسوب در نظر گرفته شده (H_s) و قطر رسوبات (d_s)، مقدار آن برای گزینه‌های در نظر گرفته شده محاسبه گردید. در شکل‌های مذکور منحنی بالائی برای حالتی است که ارتفاع آب داخل مخزن ۵۲ سانتی متر بوده است، به عبارت بهتر حالتی است که نسبت ارتفاع

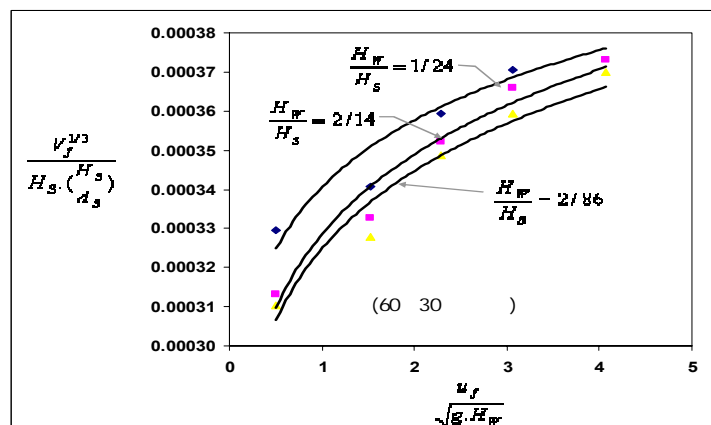
آب مخزن به ارتفاع رسوب برابر با ۱/۲۴ بوده است $\left(\frac{H_W}{H_s} = 1/24\right)$.

همین‌طور منحنی میانی و پائینی برای حالتی است که ارتفاع آب داخل مخزن به ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ سانتی متر بوده است

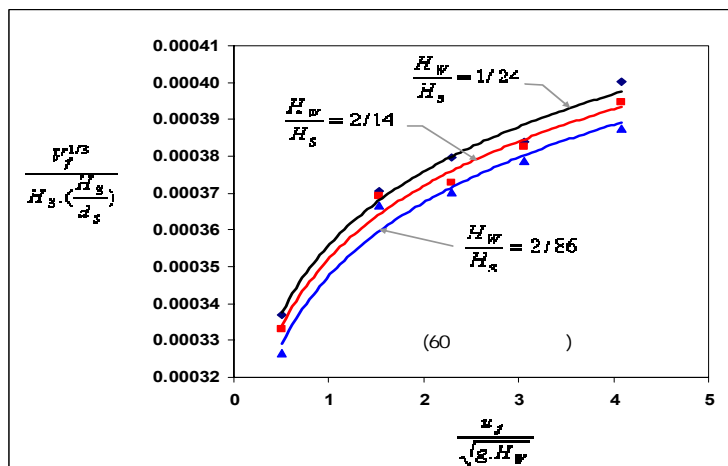
$$\left(\frac{H_W}{H_s} = 2/86\right) \text{ و } \left(\frac{H_W}{H_s} = 2/14\right)$$



شکل ۶- شکل بدون بعد مربوط به حجم مخروط رسوب‌شویی برای رسوبات نوع ۱



شکل ۷- شکل بدون بعد مربوط به حجم مخروط رسوب‌شویی برای رسوبات نوع ۲



شکل ۸- شکل بدون بعد مربوط به حجم مخروط رسوب‌شویی برای رسوبات نوع ۳

درصد) و همچنین وقتی که ارتفاع آب مخزن از ۹۰ سانتی‌متر به ۵۲ سانتی‌متر (کاهش ارتفاع به میزان ۴۲ درصد) کاهش می‌یابد، با استفاده از داده‌های بدست آمده انجام شده است.

۱-۸- تأثیر ارتفاع آب مخزن در میزان تخلیه رسوبات
به منظور بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن در میزان تخلیه رسوبات مقایسه‌ای بین حجم مخروط رسوب‌شویی در حالتی که ارتفاع آب مخزن از ۱۲۰ سانتی‌متر به ۵۲ سانتی‌متر (کاهش ارتفاع به میزان ۵۷

میزان افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی نسبت به حالتی که ارتفاع آب مخزن ۱۲۰ سانتیمتر بوده است محاسبه شده و به تفکیک برای ۵ دبی آزمایش شده در جدول ۲ آمده است.

رسوب‌شویی مصادف با رسیدن رقوم سطح آب به حداقل تراز بهره‌برداری مخزن باشد. همچنین در حین عملیات رسوب‌شویی تخلیه‌کننده‌های تحتانی بایستی با حداکثر ظرفیت مانور شوند.

۸-۲- تأثیر دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی در میزان تخلیه رسوبات

به منظور بررسی تأثیر دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی در میزان تخلیه رسوبات مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده انجام شده که در جدول ۳ آمده است.

همان طوری که در جدول مذکور مشاهده می‌کنید زمانی که به ازای یک ارتفاع ثابت دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی افزایش می‌یابد میزان حجم مخروط رسوب‌شویی افزایش می‌یابد. برای مثال ردیف آخر جدول مذکور نشان می‌دهد زمانی که ارتفاع آب مخزن ۱۲۰ سانتیمتر می‌باشد، افزایش دبی از ۱ به ۸ لیتر در ثانیه (۸۸ درصد افزایش) موجب افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی می‌گردد. مقدار این افزایش در حالتی که رسوبات از نوع ماسه درشت، متوسط و ریز دانه باشند به ترتیب برابر با ۶۱، ۴۱ و ۴۰ درصد می‌باشد. مطلب فوق در شکل‌های بدون بعد ۶ تا ۸ نیز نشان داده شده است. به عبارت بهتر برای داشتن حداکثر راندمان در رسوب‌شویی تحت فشار بهتر است تا جایی که شرایط بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد، درپچه‌های تخلیه‌کننده با حداکثر ظرفیت خود مورد بهره‌برداری قرار بگیرند.

همان طوری که در جدول ۲ ملاحظه می‌کنید، مقایسه نتایج بدست نشان می‌دهد به ازای یک دبی ثابت، کاهش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش حجم رسوب‌شویی می‌گردد. برای مثال ردیف ۱ جدول ۲ نشان می‌دهد زمانی که ارتفاع آب مخزن از ۱۲۰ به ۵۲ کاهش یابد (۵۶/۷ درصد کاهش) و آزمایش با دبی ۱ لیتر در ثانیه انجام شود، مقایسه حجم مخروط رسوب‌شویی با ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر نسبت به ۵۲ سانتی‌متر نشان می‌دهد در حالتی که رسوبات از نوع ماسه درشت، متوسط و ریز دانه باشند حجم مخروط رسوب‌شویی به ترتیب به میزان ۳۲/۳۲، ۱۶/۴۰ و ۸/۹۳ درصد افزایش می‌یابد.

مطلب فوق به وضوح در شکل‌های بدون بعد ۶ تا ۸ نیز نشان داده شده است. بنابراین در رسوب‌شویی تحت فشار برای داشتن حداکثر راندمان (افزایش حجم رسوب‌شویی) بهتر است تا جایی که شرایط بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد، ارتفاع آب مخزن را کاهش داد. به عبارت بهتر توصیه می‌شود در مخازنی که امکان انجام رسوب‌شویی آزاد وجود ندارد، رسوب‌شویی تحت فشار زمانی صورت گیرد که رقوم سطح آب مخزن در حالت مینیمم بهره‌برداری باشد. بنابراین در استفاده از رسوب‌شویی تحت فشار بایستی سعی شود تراز آب مخزن تا حد ممکن پایین برده شود و یا اینکه زمان انجام عملیات

جدول ۲- تأثیر ارتفاع آب مخزن در میزان تخلیه رسوبات

دبی (لیتر در ثانیه)	مقایسه نتایج بدست نشان می‌دهد به ازای یک دبی ثابت، کاهش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش حجم رسوب‌شویی می‌گردد.		
	ماده درشت (بین الک ۱۰ و ۳۰)	ماده متوسط (بین الک ۳۰ و ۶۰)	ماسه ریز (کوچکتر از الک ۶۰)
۱	۳۲/۳۲	۱۶/۴۰	۸/۹۳
۳	۲۸/۸۴	۱۰/۹۳	۳/۱۸
۴/۵	۲۲/۳۷	۸/۷۴	۴/۴۷
۶	۹/۰۱	۸/۷۵	۴/۱۱
۸	۱۳/۱۱	۸/۹۲	۹/۰۶
۱	۱۸/۲۲	۱۴/۲۲	۳/۶۳
۳	۲۲/۸۰	۶/۹۸	۱/۱۵
۴/۵	۲۰/۳۳	۵/۸۶	۵/۴۳
۶	۶/۰۱	۳/۵۵	۱/۱۹
۸	۱۱/۶۷	۶/۴۲	۳/۹۲

جدول ۳- تأثیر دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی در میزان تخلیه رسوبات

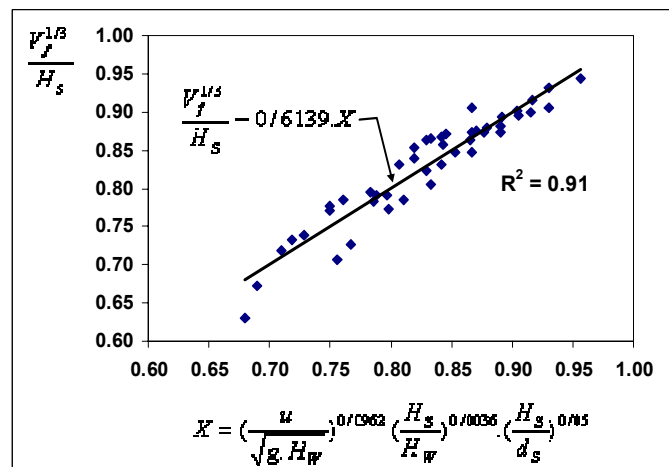
ارتفاع آب مخزن (سانتی متر)	دبی (لیتر در ثانیه)	درصد افزایش دبی (نسبت به دبی ۱ لیتر در ثانیه)	ماسه درشت (بین الک ۱۰ و ۳۰)	ماسه متوسط (بین الک ۳۰ و ۶۰)	ماسه ریز (کوچکتر از الک ۶۰)
			درصد افزایش حجم رسوب شوئی	درصد افزایش حجم رسوب شوئی	درصد افزایش حجم رسوب شوئی
۵۲	۳	۶۷	۲۵	۱۰	۲۵
۵۲	۴/۵	۷۸	۴۰	۲۳	۳۰
۵۲	۶	۸۳	۴۵	۳۰	۳۲
۵۲	۸	۸۸	۵۰	۳۶	۴۰
۹۰	۳	۶۷	۲۱	۱۷	۲۷
۹۰	۴/۵	۷۸	۳۸	۳۰	۲۹
۹۰	۶	۸۳	۴۹	۳۷	۳۴
۹۰	۸	۸۸	۵۴	۴۱	۴۰
۱۲۰	۳	۶۷	۲۹	۱۵	۲۹
۱۲۰	۴/۵	۷۸	۴۸	۲۹	۳۱
۱۲۰	۶	۸۳	۵۶	۳۶	۳۶
۱۲۰	۸	۸۸	۶۱	۴۱	۴۰

مسأله مانند ارتفاع آب داخل مخزن، دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی، نوع و دانه بندی رسوبات ته نشین شده و موارد دیگر که قبلا به آنها اشاره شد، از نرم افزار SPSS استفاده گردید. نتایج بدست آمده بصورت رابطه بدون بعد ۴ و شکل ۹ ارائه شده است.

(۴)

$$\frac{V_f^{1/3}}{H_s} = 0.6139 \left(\frac{u_f}{\sqrt{g \cdot H_w}} \right)^{0.10962} \left(\frac{H_s}{d_s} \right)^{0.105} \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{0.0036}$$

۳-۸- رابطه بدون بعد برای تعیین حجم مخروط رسوب شوئی زمانیکه دریچه‌های تحتانی به منظور رسوب شوئی بازمی‌گردد، رسوبات نهشته شده تحت فشار آب همراه جریان آب خروجی از مخزن خارج می‌گردد. در این حالت فرسایش پسرونده^۴ اتفاق افتاده و از نزدیکی دریچه شروع شده و به سمت بالادست مخزن حرکت می‌کند. اگر ارتفاع آب مخزن ثابت بماند میزان پسروری مخروط رسوب شوئی تا حدی ادامه یافته و متوقف می‌گردد. به منظور بررسی ارتباط بین حجم مخروط رسوب شوئی و دیگر پارامترهای دخیل در



شکل ۹- رابطه بدون بعد حجم مخروط رسوب شوئی و سایر پارامترها دخیل در مسأله

Series C, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 159-171.

Emamgholizadeh, S., Samadi, H. and Bina, M. (2005), The flushing of the sediment near the power intakes in the Dez Reservoir. *River Basin Management* 2005, Italy.

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.

Fan, J. (1985), Methods of preserving reservoir capacity. Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs: *A contribution to the International Hydrological Programme*, IHP-II Project A. 2.6.1 Panel, S. Bruk, ed., Unesco, Paris, pp. 65-164.

Lai, J.S. and Shen, H.W. (1996), Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34(2), pp. 237-255.

Morris, G. L. and Fan, J. (1997), Reservoir Sedimentation Handbook: "*Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*", McGraw-Hill, New York.

Pitt, J.D. and Thompson, G. (1984), The impact of sediment on reservoir life. Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium, July, D.E. Walling, S.S.D. Foster, and P. Wurzel, eds, IAHS Publication No. 144, pp. 541-548.

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.

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 No.144, pp. 577-587.

۹- تشکر

مولفین این مقاله از حمایت مالی دفتر تحقیقات و استانداردهای معاونت توسعه سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان کمال تقدیر و تشکر را می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Sustainable Management
- 2- Free Flushing
- 3- Pressure Flushing
- 4- Gravel
- 5- Clay
- 6- Cachi
- 7- Gebidaam
- 8- A stable flushing cone formation
- 9- Retrogressive Erosion

۱۰- مراجع

Atkinson, E. (1988), The feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137.

Brandt, S. A. (2000), A review of reservoir desiltation. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 15(2000), pp. 321-342.

Brandt, S.A. and Swenning, J. (1999), Sedimentological and geomorphological effects of reservoir flushing: the Cach Reservoir, Costa Rica, 1996. *Geografiska Annaler*, Vol. 81A (3), pp. 391-407.

Breusers, H.N.C., Klaassen, G.J., Brakel, J. and Roode, F.C. (1982), Environmental impact and control of reservoir sedimentation. *Fourteenth International Congress on Large Dams, Transactions*, Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 May, Vol. 3, pp. 353-372

Brown, C.B. (1943), The Control of Reservoir Silting. United States Department of Agriculture, Miscellaneous Publication No. 521

Di Silvio, G. (1990), Modeling desiltation of reservoirs by bottom-outlet flushing. Movable bed physical models, H.W., Shen, ed. NATO ASI

تاریخ دریافت مقاله: ۱ شهریور ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۳ تیر ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۷ تیر ۱۳۸۶