مهندسین آبسام
(طرح و ساخت)
AbSam Company NO:6368

Research, Design & Construction

مدلسازی آب و محیط زیست

تخلیه رسوب سدها

(امکان سنجی –مدل آزمایشگاهی – مدل عددی)

مولفـــان:

دکتر فرهاد دلیری مشاور سدسازی و هیدرولوژیست
مدرس دوره های تخصصی پردیس فنی مهندسی
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

دکتر حسن سید سراجی مشاور سدسازی و مکانیک سیالات
عضو هیئت علمی پردیس فنی مهندسی
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

چاپ اول ۱۴۰۱

دانلود رایگان www.absam.ir

به نام خدا

Knowledge is empty of limit,
so we have not enough time to learn every thing if you want to deep it in the real world.
Farhad Daliri, 2015

شرکت مهندسین آبسام

(طرح و ساخت)

مدلسازی آب و محیط زیست

(تخلیه رسوب سدها)

تالیف:

دکتر فرهاد دلیری هیدرولوژیست

مدرس دوره‌های تخصصی دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

و

دکتر میرحسن سید سراجی مکانیک سیالات

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

چاپ اول ۱۴۰۱

سرشناسه : دلیری، فرهاد. متولد تهران -/1354
عنوان و نام پدیدآور : تخلیه رسوب سدها (امکان سنجی-مدل آزمایشگاهی-مدل عددی) /تالیف فرهاد دلیری و میرحسن سیدسراجی
مشخصات نشر : تهران: شرکت مهندسین آبسام، ۱۴۰۱ چاپ اول.
مشخصات ظاهری : ؟ ص.: مصور، جدول، نمودار چاپ اول.
شابک : ۵-۲۱-۶۹۲۳-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست : فیپا
یادداشت : کتابنامه.
موضوع : امکان سنجی-معیارها – روش تجربی
موضوع : فرایندها - - مکانیک—هیدرولیک
موضوع : مدلسازی –آزمایشگاهی — عددی
شناسه افزوده : شرکت مهندسین آبسام (طرح و ساخت)
رده بندی کنگره : TC۱۴۵ ۱۳۹۳ ۴م۸د/
رده بندی دیویی : ۶۲۷
شماره کتابشناسی ملی : ۳۶۳۴۴۸۵

"کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مهندسین آبسام می باشد"

مدلسازی آب و محیط زیست (تخلیه رسوب سدها)
تالیف: فرهاد دلیری / حسن سیدسراجی
ویراستار و صفحه‌بند: ناشر
نوبت چاپ: چاپ نخست ۱۴۰۱.
ناشر: چاپ حسینی، کرج روبروی دانشگاه تهران
شمارگان: ۵۰۰ جلد
شابک: 5 ــ 21 ــ 6923 ــ 600 ــ 978
سفارش: www.absam.ir
بهاء بارگذاری در سایت آبسام

شرح حال مولفان

"این کتاب به کسانی تقدیم می‌شود که به مدیریت رسوب سد علاقه دارند"

فرهاد دلیری متولد تهران

تخصص: *دکتری مهندسی هیدرولوژی*

تجارب و تحقیقات از ۱۳۸۰: *آب و هواشناسی دینامیک، سدسازی و رودخانه، کنترل سیل، آب زیرزمینی، آبخیزداری، برنامه ریزی آب، رسوب، بهمن، آلودگی.*

سوابق تحصیلی (دانشگاه تهران)

Ph.D. (2016) دکتری مهندسی عمران-آب: مدلسازی پیش بینی اثر **هیدرولیکی** سیل آلوده سد روی آب زیرزمینی، فرصت مطالعاتی استرالیا.

MSc (۱۳۸۵) ارشد **برنامه ریزی** مخازن سدها، "منحنی فرمان **آبسطحی و آب زیرزمینی** جهت طراحی ارتفاع **سد** خاکی علویان با برنامه نویسی"

BSc (۱۳۸۰) لیسانس **هیدرولوژی**، "محاسبات سیل با روش شماره منحنی دلیری، اندازه گیری جریان نهر آبریز مرتعی با ردیابی و اشل Rod"

سوابق تدریس دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی عمران آب و محیط زیست عباسپور، دوره های آموزش تخصصی آب منطقه ای های کشور از ۱۳۹۰

– مدیریت و مدلسازی آب زیرزمینی، بهره برداری چاه شرب و آزمایش پمپاژ

- پیش بینی و کنترل سیل، رواناب شهری، آنالیز و تحلیل آمار، مدیریت رسوب سد، ریزگرده و فرسایش خاک حوضه، نصب و بهره برداری ادوات آب

-بحران آب، خشکسالی و برنامه ریزی کمی- کیفی پیوسته منابع آب - منابع طبیعی، آبخیزداری و ارزیابی زیست محیطی، رادار

-هیدرولوژی، هیدرولیک و هیدروژئولوژی- آموزشکده محیط زیست،دانشگاه علمی کاربردی کرج ۱۳۸۶

تالیفات (کتاب و مقالات) به جز متن حاضر ۴ کتاب دیگر به فارسی و دو کتاب زیر به زبان انگلیسی دانلود رایگان از سایت www.absam.ir با عناوین:

1. F.Daliri. "Uncertainties in Flood Frorecasting Systems Modeling",2020, Absam EPC Co. press. 250p, Rivis 1.
2. F.Daliri. "Principle of Damming", Absam EPC Co. press. 2020, 55p, Edit1.

۳.فرهاد. دلیری. میرحسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، شهری و روستایی- محاسبات عددی، شهید عباسپور، ۷۲۰ص چاپ دوم ۱۳۹۸.

۴.فرهاد. دلیری و میرحسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (تراکم سیستم آبخانه و نشست زمین) ۱۰۳ص چاپ اول سال ۱۴۰۰.

۵.فرهاد دلیری و میرحسن سیدسراجی. آب و هواشناسی دینامیک ، چاپ اول سال ۱۴۰۲.

۶.فرهاد دلیری و میرحسن سیدسراجی. اصول مقدماتی هیدرولوژی شهری، چاپ اول سال ۱۴۰۱.

-چندین مقاله ISI با نوآوری (روش تصمیم گیری نیمه فازی دلیری DSM، روش ابداعی CN سیل، روش استوکستیک رواناب IUDRN در طراحی سدها و خشکسالی، توسعه روش شناسی مفهوم ییلان سفره و برداشت مجاز، توسعه روش شناسی برآورد زمان تمرکز و کاربرد مهندسی زمان ذخیره در کنترل سیل، تعریف سیستمی آبخیزداری و برنامه نویسی مدیریت یکپارچه حوضه IWRM، توسعه مفاهیم برآورد سیل، توسعه مفاهیم واسنجی مولفه‌های ییلان، بررسی تیپ رگبار در سیل و اصلاح تجربی اثر ذوب برف در مدل HEC-HMS، عدم قطعی پیش بینی سیل و ...

-بیش از ۶۰ گزارش فنی در مشاوران معتبر مانند مهاب قدس(کمیته فنی اسبق)، سکو و...

خلاصه بیوگرافی

ایشان از سال ۱۳۸۰ به عنوان هیدرولوژیست شرکت های مشاور آغاز به کار کرده و از سال ۱۳۸۹ همزمان در دفتر ارتباط با صنعت واحد سنجش آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف به عنوان مدیر گروه آب، مشاور و داور مهندسین مشاور، دانشگاه و سازمان‌ها در تهیه دستورالعمل‌ها، بررسی گزارش، مدیر بخش و مدیر پروژه مهندسی رودخانه شرکت های مشاور، کمیته راهبری شکست سدها و تامین آب زیرزمینی برخی از آب منطقه ای های کشور ... مشغول بوده و از سال ۱۳۹۳ به عنوان ناظر فنی و عضو کمیته آبگیری و رسوب در تیم نظارت عالیه پروژه اجرایی سد (ECRD) و نیروگاه رودبار لرستان شرکت سکو و از سال ۱۳۹۶ به عنوان مدیرعامل و رئیس هیئت مدیره شرکت مشاور و پیمانکار مهندسین آبسام (طرح و ساخت) مشغول هستند.

میرحسن سید سراجی *متولد تبریز*

تخصص: *دکتری مهندسی مکانیک سیالات*

تجارب و تحقیقات از 1366: *هیدرولیک رسوب، مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، ارزیابی زیست محیطی، رودخانه*

- کمیته فنی بخش آب-انرژی و محیط زیست شرکت مشاور و پیمانکار مهندسین آبسام (EPC) از سال ۱۳۹۶
- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی از ۱۳۶۸ و تدریس در سایر دانشگاه‌های دولتی و آزاد از ۱۳۷۰ تا زمان حاضر
- کارشناس سدسازی در سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و سازمان برنامه و بودجه بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۸
- ارائه خدمات مشاوره‌ای در شرکت‌های مهندسی مشاور از ۱۳۶۶ تا حال
- مشاور طرح‌های تخصصی و مطالعاتی رسته منابع آب وزارت نیرو، همایش‌های تخصصی و عضو هیأت تحریریه مجله سامانه منابع آب ایران از سال ۱۳۹۲

سوابق تحصیلی

Ph.D دکتری مهندسی مکانیک سیالات از دانشگاه کان فرانسه. رفتارهای هیدرودینامیکی عملیات **رسوب** زدائی سدها.

MSc زمین‌شناسی مهندسی از دانشگاه پاریس7. بررسی **پایداری** خاک‌های آلی کناره‌های دریای خزر.

BSc مهندسی آبیاری و آبادانی از دانشگاه تبریز.

پیشگفتار

باتوجه به نرخ رسوبگذاری سدهای دنیا حتی بیش از ۴ درصد و به طور متوسط ۱٪، و همچنین کم شدن مکان مناسب ساختگاه سد، لذا حفظ ظرفیت مفید سدهای موجود و مدیریت رسوب مخازن از اهمیت بسزایی برخودر است. فلاشینگ یا تخلیه رسوبات در برخی از کشورهای دنیا مانند فرانسه به صورت اجباری و منظم در دستور کار بهره برداری مخازن سدها قرار دارد. اگرچه این موضوع معضلات محیط زیستی دارد ولی روش های سازگار با محیط زیست نیز توسعه یافته اند. با این وجود مسئله رسوبگذاری سدها باعث کاهش مواردی چون تامین آب شرب، تخفیف سیلاب، تامین آب کشاورزی و صنایع، تامین انرژی برق در ساعات پیک و افزایش تبخیر می شود. لذا همانطور که در مرجع ۱ توسط همین مولفین تشریح شده است نیاز زندگی نوع بشر ناپایداری طبیعت و محیط زیست است و تنها می توان با شناخت پیامدهای کارهای مهندسی، اثرات آنها را تخفیف داد دلیری، ۱۳۹۴. همچنین باتوجه به تجربه نویسندگان در تخلیه رسوبات برخی از سدهای داخل کشور و خارج از ایران، و نیاز به دستورالعمل تخلیه رسوبات در خصوص چگونگی نیازسنجی تخلیه رسوب، معرفی روش های متنوع تخلیه رسوب، و به ویژه چارچوب فنی تعیین امکان سنجی و اثربخشی روش های تخلیه رسوبات سدها، این مجموعه تهیه و تدوین شده است.

موارد زیر در این مجموعه به طور خاص مورد توجه قرار گرفت:

-معرفی یک دستورالعمل جهت بررسی نظارتی وضعیت رسوب ورودی و رسوبگذاری مخازن یک سد (فصل ۱)

-معرفی روش شناسی جدید-دلیری، ۱۳۹۳ به منظور محاسبه رسوب معلق ورودی به سد ها (فصل ۱)

-معرفی روش جدید-دلیری، ۱۳۹۳ برآورد بار معلق سیلاب های اندازه گیری نشده رسوب ورودی به سدها (فصل ۱)

-معرفی فرایند و روش های تخلیه رسوب سدها با توجه به مطالعات موردی سد رودبار لرستان، سدهای چین و ژاپن (فصل ۲)

-معرفی چارچوب روش شناسی امکان سنجی و اثر بخشی تخلیه رسوب سدها بر اساس اطلاعات بیش از ۱۵ سد دنیا (فصل ۳)

-توسعه مدل های آزمایشگاهی و عددی به صورت مقدماتی (فصل ۴)

"لطفا" نظرات و پیشنهادات خود را از طریق ایمیل زیر منتقل فرمایید"

فرهاد دلیری و میرحسن سیدسراجی (چاپ اول ۱۴۰۱)

Farhad.daliri@gmail.com

info@absam.ir

www.absam.ir

(دانلود کتاب رایگان از سایت)

فهرست مطالب

پیشگفتار	صفحه
دامنه کاربرد- تعاریف -پیش نیازها	۹
فصل ۱ نیاز سنجی تخلیه رسوب سدها	۱۱
۱-۱ اهمیت سدسازی و رسوبزدایی	۱۱
۱-۲ منابع رسوبات آبی و بادی	۱۲
۱-۳ برآورد رسوبات آبی به مخزن –روش دلیری، ۱۳۹۳	۱۴
۱-۴ بررسی نرخ رسوبگذاری و حجم مرده مخزن	۲۴
۱-۵ معرفی روش های کنترل فرسایش و رسوب حوضه ای	۲۸
۱-۶ معرفی روش های مدیریت رسوب مخازن	۳۰
فصل ۲ فرایندها و روش های تخلیه رسوب	۳۱
۲-۱ فرایند رسوبگذاری مخازن	۳۱
۲-۲ روش های تخلیه رسوب	۳۳
۲-۲-۱ فرایندهای آبشویی (Flushing)	۳۷
۲-۲-۲ بررسی افت تراز سدها	۳۹
۲-۲-۳ پیامد تله اندازی رسوب سدها در رودخانه های پایاب	۳۹
۲-۳ مقایسه برخی از روش های آبشویی	۴۱
۲-۳-۱ فشار آب	۴۱
۲-۳-۲ افت تراز	۴۱
۲-۳-۳ بدون آبشویی	۴۲
۲-۳-۴ آبشویی با ملاحظات محیط زیستی	۴۳
۲-۳-۵ آبشویی با سیلاب دانسیته و ملاحظات زیستی	۴۶
۲-۴ معضلات رسوبات درشت	۴۷
۲-۵ مدلسازی آبشویی سد Genissiat	۴۹
۲-۶ پیامدهای آبشویی	۵۳
فصل ۳ اصول امکان سنجی تخلیه رسوب سدها	۵۵
۳-۱ ضرورت مطالعات امکان سنجی	۵۵

صفحه

۳-۲ آبشویی با سیل فصلی ۵۶
۳-۳ معیارهای ارزیابی اثربخشی آبشویی ۵۷
۳-۳-۱ روش نسبت تعادل رسوب (SBR) ۵۹
۳-۳-۱-۱ ملاحظات فنی ۶۴
۳-۳-۲ روش ظرفیت پایدار (LTCR) ۶۸
۳-۳-۳ مقایسه و دقت روش SBR و LTCR با مثال و معیارهای تکمیلی ۷۷

فصل ٤ مدلسازی آبشویی ۹۶
۴-۱ معادلات مقدماتی و فرایندها ۹۶
۴-۱-۱ زمان بندی بازشدن دریچه تحتانی و آنالیز ریسک فاکتورهای موثر ۱۰۷
۴-۱-۲ کدهای عددی CFD و روابط تجربی بارکف ۱۱۰
۴-۲ مدلسازی آزمایشگاهی ۱۱۳
۴-۲-۱ مدل آزمایشگاهی افت – M.h.Seraji., 2002 ۱۱۴
۴-۲-۲ تشابه دینامیک رسوبات بدون چسبندگی- N.Talebbeydokhti, et al., 2004 ۱۱۴
۴-۲-۳ آبشویی رسوبات چسبنده با فشار – S.Emamgholizadeh, et al., 2014 ۱۱۶
۴-۳ مدلسازی عددی ۱۱۹
۴-۳-۱ اصول مدلسازی مخازن ۱۲۱
۴-۳-۲ مدل های کامپیوتری ۱۲۲
۴-۳-۳ اندازه گیری و پایش ۱۲۳
۴-۴ ملاحظات اقتصادی-اجتماعی و محیط زیست ۱۲۵

منابع

دامنه کاربرد- تعاریف -پیش نیازها

کتاب حاضر به طور خاص برای وزارت نیرو و شرکت های تابعه در خصوص موضوع مدیریت رسوبگذاری مخازن سدها و بررسی اثربخشی و امکان سنجی تخلیه رسوبات از انها ارائه شده و لذا این کتاب برای دانشجویان ارشد رشته های مرتبط با هیدرولوژی و آبخیزداری مفید می باشد.

سدهای مسئله دار

در این مجموعه منظور از سدهای مسئله دار، سدهایی هستند که به دلایل مختلف در حین بهره برداری در سال های اول متوجه می شویم سرعت رسوبگذاری در آنها بیشتر از برآوردهای طراحی می باشد و یا سدهایی که در حال حاضر به دلیل عدم توجه به مدیریت رسوب در مخزن یا آبخیزداری سراب سد، وضعیت مناسبی نداشته و اغلب حجم مرده آنها از رسوب پر شده است. همچنین برای سدهایی که رسوبگذاری انها در حد طراحی بوده و هدف ما افزایش عمر بهره برداری و اقتصادی آنها است.

پیش نیازهای مطالعه این مجموعه جهت درک مفاهیم شامل :

- اصول مهندسی هیدرولوژی
- هیدرولیک رسوب مخازن
- مکانیک سیالات و تا حدی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

"این صفحه خالیست"

فصل ۱ نیاز سنجی تخلیه رسوب سدها

۱-۱ اهمیت سدسازی و رسوبزدایی

بدون وجود و توسعه سدها، امکان توسعه زندگی بشر امکان نداشت. اگرچه مولفین با توسعه و ساخت با سرعت سدسازی مخالف هستند اما با نظر محیط زیستی خشک که فقط عواقب منفی سدسازی را می شمارد مخالف می باشند. هر توسعه ای در طبیعت حتی با تمام ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی و اقتصادی، باعث تخریب منابع طبیعی و محیط زیست خواهد شد و شرط پایداری و توسعه زندگی نوع بشر وابسته به تخریب و ناپایداری طبیعت است (دلیری، ۱۳۹۴ و مرجع ۱). در این خصوص منظور از تخریب طبیعت، تخریب با کنترل با شناخت عواقب جهت مدیریت و کاهش مخاطرات آتی به دلیل ناپایداری های زیست محیطی است. در غیر اینصورت هیچکس حتی حامیان محیط زیست تمایل به آوردن آب با سطل از چاه و رودخانه همانند اجداد خود نیستند و یا در خاموشی شب را به صبح رساندن. اگر هم راه مهندسی برای رفع این موارد بدون سد ساختن تا به امروز داشتند تا به حال عملی شده بود. بخث فنی تری در این خصوص در مرجع ۱ همین مولفین ارائه شده است.

بدون شک عمر مفید سدها بر اساس حجم مرده ناشی از پرشدن رسوبات بر اساس رسوب طرح مشخص می گردد. دلایل مختلفی از جمله محاسبات اشتباه رسوب ورودی، عدم آمار کافی به ویژه در خصوص بار کف و در شرایط سیلابی با بار معلق، خطا در محاسبات رسبگذاری مخزن، تغییرات کاربری و رژیم جریان و بهره برداری سد وجود دارند که باعث می شود عمر اقتصادی و مفید سد کوتاه تر از سال های مورد نظر باشد. اگرچه پر شدن سد از رسوبات در زمان عمر اقتصادی نیز نیاز به مدیریت رسوب دارد اما کنترل و مدیریت و تخلیه رسوبات در سدهای مسئله دار از مهم ترین برنامه های علاج بخشی سدهای موجود و در دست بهره برداری باتوجه به ضرورت تامین آب می باشد.

سدهای مسئله دار سدهایی هستند که از نظر سرعت رسوبگذاری در حین سال های اول آبگیری متناسب با برآوردهای رسوبگذاری زمان طراحی نیستند و لذا نگران پر شدن زودتر از موعد آنها در حین سال های آتی بهره برداری هستیم و یا اینکه به دلیل عدم توجه به مدیریت رسوب مخزن و آبخیزداری بالادست سد حین سال های بهره برداری، در حال حاضر مخزن آنها از رسوبات پر شده و اغلب تراز رسوب نزدیک دریچه های بهره برداری در ترازهای بالاتر از تراز حجم مرده قرار گرفته است.

۱-۲ معرفی منابع رسوبات آبی و بادی

فرسایش آبی و رسوبات آبی

به طور کلی مهمترین منابع رسوب ورودی به سدها از فرسایش آبی دیواره های کنار مخزن و حوضه بالادست سد تشکیل می شود. این نوع فرسایش توسط مجموعه ای از عوامل مانند زمان، اقلیم، بارش، عوامل بیولوژیکی و جنس سازند و خاک در کنار فعالیت های انسانی شکل گرفته و یا تشدید می شود. فرسایش های کناری مخزن اغلب فرسایش توده ای نیز نامیده می شود که ممکن است تحت شرایطی قابل توجه باشد و حتی به دلیل بزرگی توده، با ایجاد موج باعث توسعه پدیده روگذری بدنه سد شده که در سدهای خاکی می بایست توجه خاص شود (۱). فرسایش های توده ای شامل جریان های تند لغزش، ریزش و جریان های کند خمیری سولیفلکسیون می شوند. فرسایش های حوضه ای نیز شامل انوع فرسایش سطحی، ورقه ای، کانالی، خندقی و انحلالی (آهکی و نمکی) بوده که بحشی از رسوبات این نوع فرسایش توسط قدرت و جران آب وقتی که تنش برشی آب از حد بحرانی یا آستانه فرسایش عبور می کند، حمل می گردد. این رسوبات در طی مسیر باتوجه به هیدرولیک مسیر ممکن است بخشی از رسوب را دپو کرده و یا در محل هایی مانند پای سازه های پل، انحناهای رودخانه و یا در قوس ها با سازند سست، فرسایش و کنش های بستر نیز داشته باشند. هیدرولیک این پدیده ها در رودخانه اغلب نتایج نامناسب همچون هیدرولیک مخازن به دست می دهد. لذا اغلب مقدار رسوب منتهی به حوضه (ورودی سد) را بر اساس آنالیز ایستگاه های رسوب سنجی برآورد می کنند تا مقدار رسوب ورودی به مخزن سد برآورد گردد. در حوضه های فاقد آمار نیز از مدل های تجربی و واسنجی ابتدا مقدار فرسایش برآورد و سپس به رسوب تبدیل شده و سرانجام نتایج مدل

های جهت واسنجی با آمار رسوب کنترل می شود(دلیری، ۱۳۸۶). در بند بعدی مثالی از روش محاسبه رسوب ورودی در سد روبار لرستان توسط مولف ارائه شده ا ست همچنین جزوئیات بیشتر آنالیز هیدرومتری رسوب در مرجع ۱ از همین مولفین قابل مطالعه است.

روش های برآورد فرسایش آبی عمدتا" مدل های تجربی هستند که یک نمونه آن روش USLE در مرجع ۳ همین مولفین در خصوص برآورد آلودگی های جامد شهری ارائه شده است.

روش MPSIAC و USLE از معروف ترین روش های تجربی برآورد فرسایش حوضه ای در آبخیزداری هستند. بر اساس این روش ها می توان مقدار رسوب را از رابطعه رسوبدهی که نسبتی از فرسایش می باشد، محاسبه نمود(SDR=SEDIMENT/EROSION).

همچنین استفاده از روش های نقشه برداری به کمک بنچ مارک ها جهت بررسی حرکت های توده ای و اندازه گیری حجم رسوب مرسوم است. در کنار این روش ها استفاده از تلفیق مدل های رواناب و رسوب مانند HEC-HMS و SWAT به منظور محاسبه هیدروگراف لحظه ای و غلظت رسوبات امکان پذیر است.

فرسایش بادی و برآورد آن

این نوع رسوبات که از کنش و حرکت چرخشی یا خیزش رسوبات ریز روی سطح زمین و یا معلق شدن ریز گرده ها تشکیل می شود اغلب در حوضه های خشک سیستان و چاه نیمه ها مشاهده شده است. این نوع رسوبات در مناطق نیمه خشک نیز وجود دارند ولی شاید باتوجه به عدم تحقیقات مناسب هنوز مشخص نیست چند درصد از رسوبات مخازن سد از نوع بادی است. با این وجود قطعا" درصدی از رسوبات همه مخازن شامل این نوع رسبات می شود. لذا باید در هر منطقه این نوع فرسایش بادی مورد توجه قرار گیرد. مدل های مطالعه فرسایش بادی به سه شکل زیر هستند.

-روش های تجربی

روش های تجربی برای مطالعه فرسایش بادی وجود دارند. در اینجا بر اساس جداول نگلی که از مدل های تونل باد و آستانه حرکت و معلق شدن ذرات به دست امده، این روش ها توسعه یافته است که در دروس آبخیزداری و مقاطع بالاتر در رشته بیابان زدایی تدریس می شوند.

-رش های بر پایه هیدرودینامیک باد
-روش های واسنجی با تونل باد.

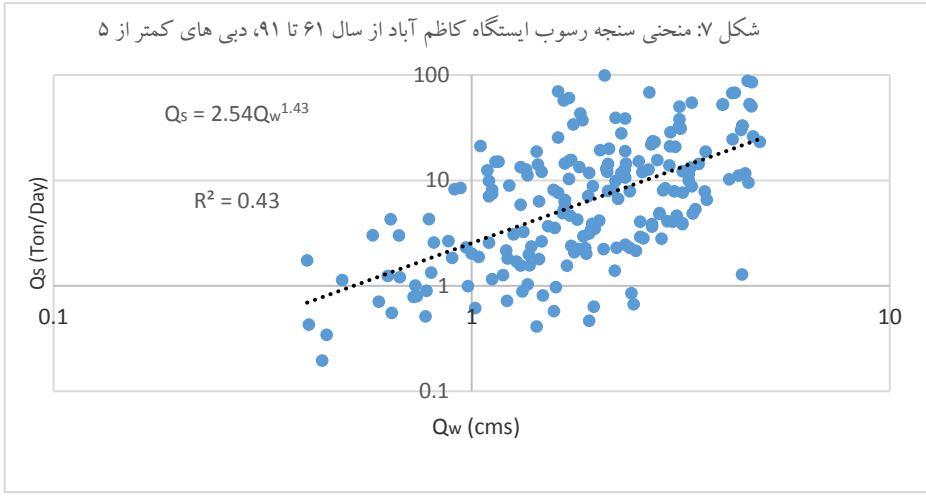
۱-۳ برآورد رسوبات آبی به مخزن -دلیری، ۱۳۹۳

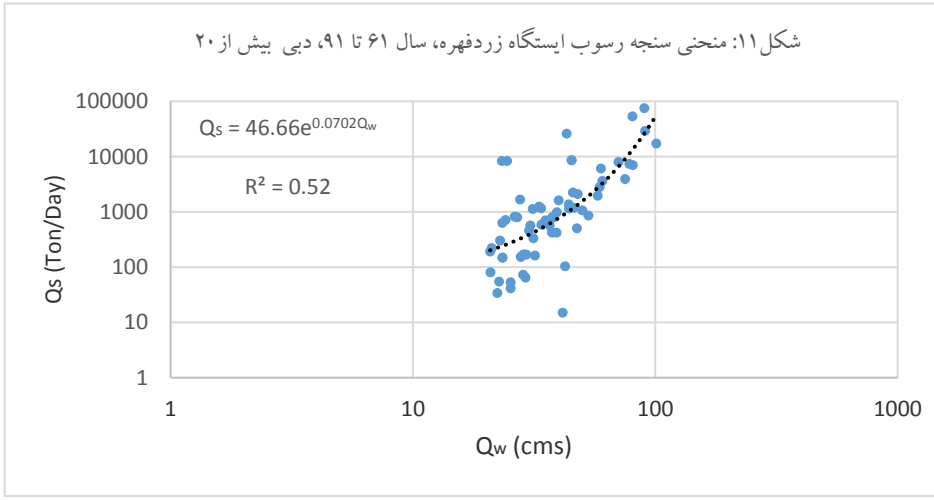
روش های نظارتی برای محاسبه رسوب حوضه سد رودبار لرستان - مطالعه موردی، دلیری، ۱۳۹۳

الف-مسئله محاسبات بار معلق و لحاظ رسوبات سیلاب هایی که هیدرومتری نشده اند:
-روش های مختلفی جهت محاسبه بار معلق وجود دارد. اغلب در این روش ها بین رسوب لحظه ای بر حسب تن بر روز و دبی متوسط آن روز رابطه ای به نام منحنی سنجه رسوب که اغلب روی کاغذ لگاریتمی است ترسیم می گردد. سپس در صورتیکی یک خط مستقیم رسم نشود کلاسه ای از دبی ها تعیین و چند منحنی جهت کاهش ابر نقاط محاسبه می شود. سپس دبی های روازنه تبدیل به توناژ رسوب در هر سال می گردد. اما همیشه این نگرانی وجود دارد که سیلاب هایی از مقطع عبور کرده و رسوب آنها تعیین نشده است. لذا مولف روش ساده زیر را که اغلب جنبه نظارتی دارد معرفی می کند. بدیهی است که روش های دقیق تر جهت محاسبات بار معلق و طراحی احجام و تراز مرده سدها اغلب بر اساس آنالیز هیدروگراف سیل و رسوب می بایست پایه ریزی گردد. در صورتیکه اطلاعات این روش ها موجود نباشد می توان از مفهوم تکنیک زیر و بهبود آن جهت مطالعات و طراحی نیز بهره برد (دلیری، ۱۳۹۲) و مرجع ۱.

روش شناسی اثر سیلاب های با بار معلق در بهبود محاسبات رسوب لحظه ای- دلیری، ۱۳۹۲ مرجع ۱
ابتدا مقدار دبی حداکثر ۱۲ ماه هر ایستگاه در سری آماری موجود بررسی و بزرگترین آن به عنوان دبی شاخص انتخاب می شود. سپس با کنترل دبی های روزانه آن ایستگاه تعداد دبی هایی که بیشتر از این دبی شاخص هستند شمارش می گردد. عدد شمارش شده بر طول سری آماری تقسیم و متوسط رخدادهای سیلاب رسوبدار برآورد می گردد. جهت محاسبه دبی سیلاب رسوبدار از سری دبی لحظه ای متوسط گرفته می شود. سپس مقدار توناژ این دبی از منحنی سنجه رسوب برآورد و در تعداد متوسط رخداد ضرب و نتیجه به توناژ آورد سالانه اضافه می گردد. توناژ آورد سالانه می تواند بر اساس انتقال دبی متوسط روزانه و یا ماهانه روی نمودار سنجه رسوب (شکل ۷ و ۱۱) و جمع ۱۲ ماه برای هر سال طی یک دوره

۳۰ ساله و یا از سایر روش های معروف USBR, FAO و غیره محاسبه گردد. نتیجه این روش در ایستگاه های قلیان، کاکلستان و زردفهره در سراب سد رودبار لرستان با سایر روش های طراحی محاسبه شده توسط شرکت های مشاور قابل رقابت بود.





مطالعه موردی:

مسئله چیست؟ گزارش حاضر باتوجه به حساسیت موضوع رسوب جهت اطمینان از برآورد و نظارت بر مطالعات پیشین و نه طراحی تهیه و تدوین شده است. علاوه براین، نتیجه مقایسه گزارش حاضر با سایر مطالعات می تواند به عنوان راهنمایی از ضرورت یا عدم ضرورت ایجاد سیستم لایروبی هیدرولیکی شرکت SEDI CO AS و مدیریت رسوبدهی مخزن و حوضه کاربرد داشته باشد.

تصویر ماهواره از حوضه و محل سد و ایستگاه های هیدرومتری طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان

بر این اساس مقدار متوسط رخداد و ارزش سیلاب رسوبدار ایستگاه های قلیان، کاظم آباد و زردفهره به ترتیب حدود ۳ رخداد با دبی سیل متوسط ۸۶ مترمکعب برثانیه (۱۶ درصد افزایش تواژ)، ۲ رخداد با دبی سیل متوسط ۴۷ مترمکعب بر ثانیه (۴۱۸ درصد افزایش تواژ) و ۱,۵ رخداد با دبی سیل متوسط ۱۲۴,۴ مترمکعب بر ثانیه (بیش از ۸۰۰ درصد افزایش تواژ) می باشد.

افزایش تواژ بار معلق در اثر سیل به این معنی است که جریان پایه حوضه اغلب صاف و لذا رسوب عمده حوضه در هنگام سیلاب ها و احتمالاً از نوع بار کف منتقل می شوند. همچنین جهت کاهش خطای

برازش آماری باتوجه به درصد خطای توزیع، مقدار توناژ رسوب اصلاح و بار معلق نهایی پیشنهاد گردید(دلیری،۱۳۹۳). بر این اساس متوسط درازمدت بار معلق ویژه ایستگاه های مذکور به ترتیب معادل ۲۰۱، ۱۳۸ و ۷۵۰ تن بر کیلومتر مربع در سال گزارش می شود.

جدول: مقادیر بار معلق سالانه در محل ایستگاه های رسوب سنجی حوضه سد رودبار لرستان-دلیری ۱۳۹۳

ایستگاه رسوبسنجی	قلیان	زردفهره	کاظم آباد
بار معلق (Ton/y)	۶۵۱۵۴ بدون اثر سیل ۷۵۵۴۹ با اثر سیل	۵۳۰۹۹ بدون اثر سیل ۴۸۷۲۸۵ با اثر سیل	۱۰۳۳۸بدون اثر سیل ۶۰۲۸۵ با اثر سیل
بار معلق ویژه ($Ton/Km^2/Y$)	۱۵۷ بدون اثر سیل ۱۸۳ با اثر سیل	۷۱ بدون اثر سیل ۶۵۵ با اثر سیل	۲۴ بدون اثر سیل ۱۲۵ با اثر سیل
دوره آماری*	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱
احتمال خطای همبستگی	٪۲۰	٪۳۲	٪۴۱
نوع همبستگی	چند جمله ای	خطی و نمایی	نمایی، توانی و خطی
بار معلق پیشنهادی دلیری با لحاظ کاهش خطای همبستگی*			
بار معلق *(Ton/y)	۸۳۱۰۴	۵۵۸۴۹۶	۶۰۶۴۲
بار معلق ویژه* ($Ton/Km^2/Y$)	۲۰۱	۷۵۰	۱۳۸
قدس نیرو، آبان ۸۳	۱۴۱	۵۶۷	۶۹
پویری، ۲۰۰۸	۱۹۳	۴۲۱	۱۷۹
مهاب قدس، ۹۱	۸۲۶	۹۰۵	۴۰۴
مساحت (km^2)	۴۱۴	۷۴۴	۴۳۸
شیب رودخانه ٪	۱,۳	۱,۴	۰,۷
رواناب سالانه(cms)	۹,۸۲	۱۱,۰۶	۳,۹۱

ب–بار معلق مخزن سد

بدین منظور می بایست رسوب ایستگاهی تا مخزن سد، روندیابی و پس از محاسبه و لحاظ رسوب میان حوضه بین ایستگاه ها تا سد، بار معلق کل حوضه سد به شرح بندهای زیر محاسبه گردد.

-محاسبه رسوب میان حوضه ای

در این خصوص ابتدا معادله ترکیبی دلیری ۱۳۹۳ به شرح زیر واسنجی و سپس مقدار رسوب میان حوضه سد رودبار لرستان به شرح زیر محاسبه شد:

: توسعه معادله ترکیبی رسوب معلق دلیری ۱۳۹۳

از نظر دلیری (۱۳۹۳) تعمیم رسوب در یک سیستم آبخیز حداقل به ۶ فاکتور اصلی مساحت، دبی، شیب رودخانه اصلی، شیب حوضه، پتانسیل فرسایش و تراکم تاج پوشش گیاهی مرتبط می شود. در این خصوص ایشان با تلفیق رابطه تجربی رسوب فلمینگ (۱۹۶۹)، مدل هیدروفیزیکی و رابطه تجربی سیل کریگر معادله عمومی زیر را برای اولین بار در گزارش حاضر توسعه و سپس ضرایب رابطه مذکور را باتوجه به نتایج آنالیز رسوب معلق ایستگاهی بند پیشین به صورت گرده ای (Lump) در حوضه سد رودبار لرستان به شرح زیر واسنجی نمود(مرجع ۱):

$$SY = C(SY') \pm B$$

$$SY = C(A^s.S.E.[\alpha Q^n]) \pm B$$

SY' معادله ترکیبی رسوب معلق دلیری، ۱۳۹۳ پیش از واسنجی(T/y).

SY معادله ترکیبی رسوب معلق دلیری، ۱۳۹۳ پس از واسنجی(T/y). این رابطه صرفاً جهت تعمیم بار معلق ایستگاهی پس از تعیین ضرائب واسنجی C و B بر اساس آنالیز رسوب ایستگاه های منطقه معرف معتبر است.

A عامل کمی مساحت (km^2) و نمایه آن s که بین ۰,۶ تا ۱ تغییر می کند. مقدار آن با توجه به رابطه کریگر برای هر حوضه از رابطه زیر محاسبه می شود. این عامل روی رسوبدهی و تبدیل فرسایش به رسوب موثر است.

$$s = A^{(0.894A^{-0.048})}$$

S عامل کمی شیب که به شیب خالص رودخانه (S') و شیب حوضه یا پستی و بلندی (S'')که با رابطه $S = S' + S''$ به یکدیگر مرتبط می شوند. (٪).

E عامل توصیفی فرسایش پذیری متوسط حوضه که بین ۱ تا ۲۵ در نوسان است. این عامل در روش مذکور توصیفی از ۳ پارامتر شامل پتانسیل یا حساسیت فرسایش سازندها، رخساره ژئومورفولوژی و کاربری اراضی می باشد. جهت تعیین ارزش توصیفی حساسیت سازندها می بایست بر اساس جدول مقاومت سنگهای تهیه شده در کشور توسط فیض نیا، ۱۳۷۴ مجله منابع طبیعی شماره ۴۷ مقادیر ۱ را برای سازندهای با حساسیت ناچیز و ارزش حدکثر ۱۷ را برای سازندهای با حساسیت بالا نسبت به فرسایش تعیین نمود. سپس هر یک از مقادیر توصیفی سازند می بایست در واحدهای همگن کاری (حسن احمدی، آبخیزداری دانشگاه تهران) باتوجه به رخساره ژئومورفولوژی و کاربری اراضی تا حداکثر عدد ۲۵ با قضاوت کارشناسی به صورت نسبی اصلاح گردد. به عنوان مثال اگر در منطقه ای سازند سخت بدون رخساره کانالی و در واحد همگن دیگر همین سازند سخت با رخساره کانالی دیده می شود بدیهی است که ارزش این عامل به شرطی که مربوط به انحلال سازند نباشد در واحد دوم بیشتر می شود. به همین صورت سطوح با کاربری آیش یا کشاورزی نیز به معنی تولید خاک و رسوب بیشتر که می بایست نسبت به شرایط یکسان اما دست نخورده (طبیعی) ارزش بیشتری از نظر کاربری اراضی داشته باشد. در این خصوص با توجه به جدول مقاومت سنگها (فیض نیا، ۱۳۷۴) و رخساره های فرسایش (کتاب ژئومورفولوژی، حسن احمدی) به همراه کاربری های موجود در حوضه سد رودبار ارزش عامل E محاسبه شد.

Q عامل کمی رواناب که در این جا به صورت سالانه لحاظ شد (cms). همچنین ضرایب این عامل معادل ضرایب رابطه فلمینگ که معرف وضعیت پوشش گیاهی حوضه می باشند از جدول زیر لحاظ می شود:

جدول: مقادیر ضرائیب Q در معادله ترکیبی رسوب معلق دلیری، ۱۳۹۳*

نوع پوشش گیاهی	N	α
جنگل مخلوط پهن برگ و سوزنی برگ	۱,۰۲	۴۰۰۰
جنگل سوزنی برگ با مراتع انبوه	۰,۸۲	۵۹۰۰۰
مراتع تنک همراه با بوته های خار	۰,۶۵	۱۷۷۰۰۰
مناطق بیابانی و فقیر از پوشش	۰,۷۲	۴۴۶۰۰۰

*سایر شرایط که در جدول وجود ندارد بین کلاس ها قابل درون یابی هستند.

: واسنجی رابطه

ابتدا ارزش مجهولات رابطه مذکور در حوضه ایستگاه های هیدرومتری محاسبه و مقدار SY' تعیین می گردد. سپس باتوجه به ارزش های رسوبسنجی ایستگاه های معرف منطقه، ضرایب اصلاحی معادله مذکور تعیین و معادله به شکل زیر نوشته می شود:

SY معادله رسوب معلق واسنجی شده حوضه سد رودبار (T/y)

$$SY = 0.0002\,(SY')^{0.9607} \pm \%24$$

: رسوب معلق میان حوضه بر اساس معادله ترکیبی دلیری ۱۳۹۳

در این خصوص با توجه به روابط توسعه و واسنجی شده فوق الذکر و پارامترهای حوضه میانی، مقدار رسوب معلق حوضه میانی معادل ۷۹۲۸۳,۱۷ تن در سال با دبی ویژه معلق ۱۲۰ تن در سال در کیلومتر مربع به شرح زیر محاسبه شد:

عامل فیزیوگرافیک: مساحت یکی از مهمترین این فاکتورها می باشد. مساحت میان حوضه معادل ۶۵۹ کیلومتر مربع است. لذا محدودیت سطح در معادلات بالا وجود ندارد. لذا توان S معادل ۰,۶۵۴ محاسبه و عامل سطح معادل ۶۹,۷ گزارش می گردد.

عامل توپوگرافیک: پستی و بلندی و شیب از عوامل اصلی این فاکتور هستند. در اینجا تک عامل شیب از نوع شیب مسیرهای حرکت رسوب شامل مخزن تا سد، گلیان تا مخزن، کاظم آباد تا مخزن و زردفهره تا مخزن معادل ۱,۰۳ درصد به عنوان متوسط مسیرهای اصلی انتقال رسوب و شیب حوضه معادل ۵,۴ درصد و عامل شیب معادل ۶,۴ درصد تا مخزن لحاظ شدند.

عامل هیدرولوژیک: پاسخ هیدرولوژیکی جریان حوضه به ویژه معرف شرایط نفوذ، شیب حوضه، بارش و تبخیر حوضه می باشد. مقدار این عامل در میان حوضه سد بر اساس گزارش بازنگری آبدهی شرکت سکو طی سری ۵۷ ساله رودخانه رودبار در محل سد معادل ۳,۷۹ cms گزارش شده است.

عامل پوشش زنده: در این خصوص باتوجه به جدول فلمینگ و تصاویر ماهواره مقدار ضرایب برای نمای معادله ۰,۷۳ و ضریب آن ۱۱۸۰۰۰ منظور شد.

عامل پتانسیل فرسایش:
عمده رخساره های حوضه میانی از نوع کانالی و شیار، توده سنگی، ریزش های رودخانه ای و مخروط افکنه می باشد. مقدار سطوح آیش و فرسایش پاشمانی که در تولید بار معلق حوضه نقش دارند نیز بسیار اندک می باشد. برعکس حدود ۵۰ درصد رخساره ها مربوط به توده های سنگی است که در تولید بار کف حوضه میانی نقش دارند. لذا انتظار می رود پتانسیل فرسایش در حدود سراب ایستگاه های کاظم آباد و قلیان بوده و عمده پتانسیل بارکف مخزن نیز به حوضه میانی مرتبط باشد. همچنین توده های سنگی عمدتاً نزدیک مخزن قراردارند. مقدار توصیفی عامل حساسیت میان حوضه معادل ۶,۴ لحاظ شد.

-روندیابی رسوب ایستگاهی
انتقال رسوب از نقاط ایستگاهی تا ورودی مخزن سد ممکن است با روش های هیدرولیک رسوب یا سایر مدل های تجربی و ریاضی با پارامترهای متعدد برآورد گردد. در این خصوص باتوجه به اینکه اغلب ماندرهای طول مسیر غیرساختمانی هستند لذا موضوع رسوبگذاری رسوبات در طول مسیر رودخانه های اصلی نیز قابل توجه می باشد. همچنین در روندیابی رسوب می بایست اثر کاهشی یا افزایشی سایر

تاسیسات موجود در منطقه را بر رسوب ورودی سد محاسبه نمود. باتوجه به هدف نظارتی گزارش حاضر و نیاز به برداشت های میدانی عمده و همچنین جهت اطمینان از عدم برآورد دست پایین، فرض شد تمامی رسوبات وارد مخزن سد می شوند.

جدول: محاسبه رسوب معلق میان حوضه با روش ترکیبی دلیری، ۱۳۹۳

عامل مساحت (km^2)	۶۹,۷
شیب مسیر ٪	۱,۰۳
شیب حوضه ٪	۵,۴
رواناب سالانه(cms)	۳,۷۹
پوشش گیاهی (n)	۰,۷۳
پوشش گیاهی (α)	۱۱۸۰۰۰
پتانسیل فرسایش	۶,۴
بار معلق ویژه ($T / km^2 / y$)	۱۲۰
بار معلق (T/Y)	۷۹۲۸۳
احتمال خطای همبستگی٪	± 24

-بار معلق حوضه سد

در این خصوص با توجه به نتایج بند حاضر توناژ متوسط درازمدت رسوب معلق ورودی به مخزن سد معادل ۸۶۰ هزار تن بر سال (۰,۸۶ میلیون تن بر سال) با بار ویژه ۳۸۱ تن بر کیلومتر مربع در سال گزارش می گردد.

جدول: بار معلق حوضه سد روبار لرستان*

مساحت (km^2)	۲۲۵۵
رواناب سالانه(cms)	۲۸,۵۸
بار معلق ویژه قبل از اصلاح ($T / km^2 / y$)	۳۴۶,۵
بار معلق قبل از اصلاح (T/Y)	۷۸۱۵۲۵,۲
خطای تجربی محاسباتی٪	$\pm \leq 10$
بار معلق پیشنهادی (T/Y)	۸۶۰۰۰۰
بار معلق ویژه اصلاح شده ($T / km^2 / y$)	۳۸۱
توناژ ۵۰ ساله (MT)	۴۳

بار کف ورودی به مخزن سد

باتوجه به نسبت حمل رسوبات حاصل از شرایط سیلابی حوضه در بند پیش این احتمال وجود دارد که عمده رسوبات سد یا بخش قابل توجهی از آنها مربوط به رسوبات بار کف در شرایط سیلابی باشد. اگر چه این نسبت اغلب بین 5 تا 25 درصد بار معلق فرض می شود اما مطالعات نشان داده که این نسبت می تواند بین ۲ تا ۱۵۰ درصد نیز متغیر باشد. لذا باتوجه به نتایج بند پیش جهت تدقیق و برآورد این نسبت از روش های هیدرولیک رسوب در هیدرولوژی استفاده می شود. در این خصوص روش های مختلفی چون روش انشتین، روش تصادفی، و... وجود دارد اما اغلب این روش ها ضمن اینکه نیاز به برداشت های صحرایی متعدد دارند نتایج بسیار متفاوتی در رودخانه های دنیا نشان داده اند. با این وجود می توانند در قضاوت های مهندسی راهنمای مناسبی باشند.

در این گزارش باتوجه به نقش نظارتی مشاور، روش ساده تر مادوک (۱۹۷۵) که بر اساس مشخصات کمی مواد بستر، بافت مواد معلق و غلظت مواد معلق پایه ریزی شده، درصد بار کف نسبت به مواد معلق ۴ حوضه زردفهره، کاکلستان، قلیان و حوضه میانی سد رودبار و مقدار بار کف منطقه و زیرحوضه ها در جدول زیر ارائه شده است.

جدول: بار کف حوضه سد روبار لرستان*

نام حوضه	درصد بار کف مادوک	درصد بار کف تجربی	درصد بار کف پیشنهادی	تونآژ بار کف TON/Y	بار ویژه کف $Ton/km^2/y$
زردفهره	۱۲	۲۵	۱۸	100530	۱۳۵
کاکلستان	۱۲	۱۵	۱۳	7884	۱۸
قلیان	۱۲	۲۵	۱۸	14959	۳۶
حوضه میانی	۲۳	۲۲	۲۳	18235	۲۸
حوضه سد	-	-	۱۷	141608	۶۳

*محاسبات جهت نظارت و مقایسه مطالعات گذشته انجام شده و لذا دقت محاسبات طراحی را ندارد.

٤-١ بررسی نرخ رسوبگذاری و حجم مرده مخزن سد

نظام رسوبگذاری بار کل مخزن سد

از بند پیشین، بار کل رسوب ورودی به مخزن سد معادل ۱ میلیون تن در سال برآورد می شود بطوریکه حدود ۱۷ درصد این بار مربوط به رسوبات درشت تر بار کف می باشد. جهت طراحی تراز دریچه های مختلف سد و همچنین منحنی های بهره برداری فرمان تامین آب، کنترل سیل، نیاز زیست محیطی و غیره می بایست ابتدا توزیع رسوب با روش های تجربی کاهش سطح، حداقل توان جریان یا سایر روش های عددی برآورد گردد. این کار توسط مشاور محترم طراح انجام شده است. در این گزارش جهت کنترل نتایج از منظر نظارتی محاسبات زیر انجام شد:

ابتدا بر اساس محاسبات و فرضیات آنالیز رسوبات منطقه فرض شد که توزیع رسوبات ورودی به مخزن سد شامل ۸۳ درصد رسوبات ریز و عمدتاً لای و رس و مابقی شن هستند. لذا دانسیته حجمی (Bulk Density) یا وزن مخصوص رسوبات با فرض لای–رس و بهره برداری با افت تراز متوسط برای سال اول معادل ۹۶۶ و برای شن ۱۴۹۷ با متوسط وزنی ۱۰۵۶ کیلوگرم بر متر مکعب لحاظ شد(۷). باتوجه به اینکه هدف این گزارش برآورد تراز عمق مرده سد می باشد لذا وزن مخصوص برای ۱۰ سال بهره برداری باتوجه به ضریب سفت شدن و بار رسوبات به عدد معادل ۱۱۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب اصلاح شد. حال مقدار متوسط حسابی وزن مخصوص های وزنی سال اول و سال آخر به میزان ۱۱۰۱ وارد محاسبات به کمک رابطه زیر شد:

$$Loss_{Annual} = \frac{T_c S_{ed}}{V_i} \times 100$$

رابطه بالا درصد حجم سالانه غیریکپارچه از دست رفته مخزن را بواسطه رسوب ورودی (S_{ed}) و حجم اولیه مخزن (V_i) برای راندمان رسوبگذاری (T_c) نشان می دهد. بدیهی است که جهت افزایش دقت این رابطه، می بایست محاسبات برای گام های زمانی کوچک باتوجه به شدت متغیر بودن پارامترها محاسبه شود. در اینجا رسوب ورودی حدود ۱ میلیون تن برآورد شد. لذا باتوجه به دانسیته حجمی معادل ۱۱۰۱ مقدار حجم رسوبات ورودی حدود ۰,۹ میلیون مترمکعب در سال برآورد می شود. باتوجه به حجم مخزن سد در تراز پر که حدود ۲۲۰ میلیون متر مکعب می باشد و همچنین ضریب تله اندازی مخزن معادل ۰,۹۴ مشخص می شود که سالانه ۰,۳ درصد از حجم مخزن معادل ۷۳۸۰۰۰ مترمکعب به صورت غیریکپارچه

از رسوب پر می شود. اگر تمام این رسوب معلق فرض شود، احتمالاً ۷۰ درصد آن باتوجه به شکل باریک مخزن معادل ۵۱۷۰۰۰ مترمکعب پشت سد و به صورت یکپارچه قرار می گیرد. لذا احتمالاً تراز کف دریچه های تحتانی (۱۶۴۵) و اصلی(۱۶۵۰) باتوجه به حجم تراز متناظر آنها (حدود ۳ و ۴,۵۹ میلیون مترمکعب) به ترتیب پس از ۶ و ۱۰ سال از رسوب پر خواهند شد. اگر محاسبات برای شرایط و فرضیات مختلف با فرض بدون عملیات لایروبی و فلاشینگ (تخلیه رسوب) نیز تکرار شود بطوریکه به جای ۷۰ درصد ارزش ۳۰ درصد و وزن مخصوص های مختلف برای ورودی های متفاوت رسوب نیز امتحان گردد در خوشبینانه ترین حالت تراز کف این دو دریچه پس از ۱۵ تا ۲۰ سال با احتمال زیاد از رسوب پر خواهد شد(دلیریف ۱۳۹۳). جهت کنترل نتایج بالا از رابطه تجربی مورتی نیز به شرح زیر استفاده شد:

– رابطه مورتی

مورتی معادله زیر را برای تعیین مقدار تخمینی ته نشست گل و لای در منطقه ذخیره مخزن توصیه می کند.

$$Q_s = kc^n$$

Q_s درصد کل سیلت در ذخیره مرده

c درصد نسبت رسوب ورودی به ظرفیت کل برای y سال

ضرایب معادله از جدل مورتی.

جدول مورتی: ارزش‌های n و k در معادله مورتی

کد مخزن	شکل مخزن	k	n
I	دریاچه	۳/۳۹	۰/۷۸
II	تپه و دشت سیلابی	۹/۳۳	۰/۵۶
III	تپه	۲۵/۱۲	۰/۳۵
IV	دره تنگ و باریک	۳۲/۳۶	۰/۳

در این خصوص شکل مخزن سد رودبار باتوجه به قضاوت کارشناسی دره ای می باشد. بر اساس نمودارهای ترسیم ضریب شکل و نتایج موجود، این شکل دریاچه ای به اشتباه گرفته شده اشت. لذا باتوجه به ارزش سایر پارامترها ارزش معادله مورتی حدود ۷۴ درصد می شود. همانطور که ذکر شد حجم کل

بار ورودی باتوجه به وزن مخصوص وزنی ۱,۱ معادل ۹۰۸۲۶۵ مترمکعب برای ۱ تا ۱۰ سال بهره برداری محاسبه شد. لذا بر اساس رابطه مورتی انتظار می رود حدود ۶۷۲۱۱۶ مترمکعب در هر سال به طور متوسط از حجم دخیره مرده کاهش یابد. لذا پس از ۵۸ سال بهره برداری، حجم مرده سد رودبار لرستان (تراز ۱۶۸۶) در شرایط تراز با نوسان عادی بهره برداری و بدون هیچگونه عملیات مدیریتی رسوب حوضه و مخزن از رسوب سیلتی و گل و لای به همراه مقداری شن و ماسه پر خواهد شد. عمر مفید پروژه نیز ۵۰ سال می باشد. بر همین اساس اگر نرخ پر شدن رسوب بر اساس رابطه مورتی فرض شود لذا احتمالاً تراز کف دریچه های تحتانی (۱۶۴۵) و اصلی(۱۶۵۰) به ترتیب پس از ۵ و ۷ سال از رسوب پر خواهند شد. اگر تمامی مواد رسوبی حجم مرده از لای و سیلت فرض شود با افزایش وزن مخصوص می توان انتظار داشت که سال های مذکور کمی بیشتر شوند اما به نظر بیشتر از ۲ برابر یعنی به ترتیب ۱۰ و ۱۴ سال نخواهند شد.

مقایسه سوابق، عدم قطعیت ها و پیشنهاد روش منتخب، دلیری، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳

به طورکلی می توان عنوان نمود محاسبات رسوب ورودی مشاور طراح (پویری) نسبت به سایر محاسبات به واقعیت نزدیک تر باشد. همچنین اگرچه در این گزارش محاسبات توزیع رسوب مخزن (با روش افزایش سطح یا حداقل توان جریان یا عددی) انجام نشد اما کنترل نتایج با روش های تجربی مورتی و قضاوت کارشناسی تراز ۱۶۸۶ حجم مرده را پس از حدود ۵۰ سال توسط قدس نیرو تایید می کند. عمده عدم قطعیت های موجود که باعث تفاوت در محاسبات مشاوران مختلف شده به شرح زیر می باشد:

-محاسبه اشتباه وزن مخصوص رسوبات و لحاظ دانسیته ذرات به جای دانسیته حجمی

-محاسبات اشتباه رسوب معلق میان حوضه و برآورد بیش از اندازه رسوب به دلیل عدم توجه به سازند، شیب و رخساره ژئومورفولوژی (با این وجود به دلیل انتخاب شکل اشتباه مخزن به صورت دریاچه ای بازهم ترازها پایین تر محاسبه شده و مخزن دیرتر پر شده است).

-استفاده از دبی رسوب ویژه ایستگاه های نامناسب همچون تنگ پنج

علاوه بر اشتباهات مذکور، عدم قطعیت های محاسباتی نیز برای موارد بالا در کنار برخی از عدم قطعیت ها همچون عدم قطعیت های ذاتی نیز وجود دارند. در خصوص عدم قطعیت های محاسباتی می توان به عنوان نمونه انتخاب دانسیته حجمی نامناسب به دلیل عدم اطلاعات یا توزیع عمودی با تغییرات زمانی دانسیته رسوبات را ذکر کرد. در خصوص عدم قطعیت های ذاتی ممکن است در ۵ سال اول بهره برداری سد اساساً سیل مهمی رخ نداده و یا برعکس در طی ۲ سال پی در پی سیلاب های مهم مشاهده شوند. لذا نتایج بر اساس شرایط متوسط ارائه شده اند. جهت کاهش ریسک های اخیر باید از روش های آنالیز عدم قطعیت استفاده شود(دلیری ۱۳۹۴ و مرجع ۱ و 8).

آیا سد رودبار لرستان نیاز به عملیات لایروبی یا تخلیه رسوب مخزن و مدیریت رسوب حوضه ای دارد؟ اگرچه رسوب ورودی و همچنین رسوبگذاری مخزن سد رودبار نسبت به بسیاری از سدهای کشور از وضعیت مناسب تر و پیچیدگی کمتری برخوردار می باشد (برخی از سدهای کشور سالانه حدود ۱,۵ درصد حجم خود را از دست می دهند) اما باتوجه به موقعیت تراز کف دو دریچه تحتانی (۱۶۴۵) و اصلی (۱۶۵۰) قطعاً این دو دریچه بسیار زود تر از عمر مفید سد با رسوب مماس می گردند. این موضوع با کنترل اسناد طراحی قبل از جایگزینی سد RCC (غلتکی بتنی) که تراز دریچه تحتانی را در رقوم حجم مرده حدود ۱۶۷۰ تا ۱۶۸۰ محاسبه کرده بود نیز همخوانی دارد. اگرچه قرارگرفتن تراز تحتانی در داخل بدنه سد خاکی پر مخاطره است، و بهتر است در داخل بدنه کوه به صورت تونل بوده و یا گزینه نوع سد تغییر کند[9]. بررسی گزارش هالکرو و دیگر اسناد حاکی از آن است که مناسب ترین تراز فنی-اقتصادی عملیات شاسینگ (فلاشینگ یا تخلیه رسوب) در رقوم حدود ۱۶۵۵ می باشد. این تراز متناظر با محور دریچه اصلی (Main) می باشد. لذا موقعیت دریچه اصلی سد خاکی رودبار باتوجه به محدودیت های فنی بدنه سد پس از تغییر نوع سد جهت عملیات فلاشینگ تعبیه و اجرا شده است. با این وجود جهت عملیات شاسینگ می بایست همیشه جلوی دریچه و طولی از مخزن با ابعاد مناسب خالی از رسوب باشد تا سفت شدن آن بین هر نوبت عملیات تخلیه جریان غلیظ سیل گل آلود دچار اختلال نگردد. اینکه آیا مسئله زیر رسوب رفتن دریچه تحتانی نیز با فلاشینگ دریچه اصلی به تنهایی و یا همزمان به لحاظ هدر رفت آب خالی از اشکال نیست بدیهی است اما قطعاً این موضوع نیز در کنار سایر سناریوهای فنی پیشتر

توسط مشاور محترم طراح (پویری) در مراحل طراحی، کنترل و ارزیابی شده است. لذا می توان نتیجه پاسخ بند حاضر را به شرح زیر خلاصه نمود:

-نیاز قطعی عملیات تخلیه رسوب با جریان غلیظ سیل سرد و گل آلود جهت حفظ بهره برداری از دریچه های اصلی و تحتانی یا روش مناسب دیگر محرض است.
-نیاز لایروبی فضای جلوی دریچه هایی که قرار است عملیات شاسینگ را انجام دهند.
-از نظر مشاور هالکرو مبنی بر محاسبات انجام شده، اجرای فلاشینگ ترجیحاً پس از ۵۰ سال یا ضرورت در طی بهره برداری توصیه شده است. در این خصوص پیشنهاد هالکرو یکبار در هر ۱۰ سال و ترجیحاً پس از ۵۰ سال بوده است. مشکل اصلی این رویکرد احتمال سفت شدن رسوبات می باشد. لذا نیاز به عملیات لایروبی هیدرولیکی در این رویکرد نیز در بازه های زمانی کوتاه تر قابل بررسی است.
-از نظر دلیری، ۱۳۹۲ باتوجه به اینکه سد رودبار لرستان بر پایه بهره برداری با فلاشینگ پایه ریزی شده است در صورت تایید مشاور طراح مبنی بر عدم تاثیر منفی تخلیه آب بواسطه لایروبی و شاسینگ روی بهره برداری سد، اجرای عملیات کنترل رسوب حوضه ای و احداث سد رسوب گیر ضروری نمی باشد. در غیر اینصورت جهت کاهش تلفات آب و درصد تضمین برق، احداث سد رسوبگیر و عملیات آبخیزداری به ویژه در حوضه زردفهره قابل بررسی و مطالعه است.

۱-۵ روش های کنترل فرسایش و رسوب حوضه ای

روش های کنترل فرسایش به منشاء و آغاز توجه دارند و قطعا" روی کاهش رسوب نیز اثر بخشی دارند. این روش ها می توانند بیولوژیکی یا سازه ای باشند. روش های که روی کنترل رسوب توجه دارند اغلب در میانه حوضه یا در محل طرح به معضل توجه کرده و اغلب راهی جز روش های سازه ای ندارند.
به طورکلی اگر هدف کنترل در زمانی سریع مد نظر باشد (جراحی) باید از روش های سازه ای مانند ایجاد سدهای وزنی سری روی دامنه (چکدم های آبخیزداری روی دامنه های بدون سازند مارنی – انحلالی)، ایجاد سدهای وزنی یا تکیه گاهی رسوبگیر روی رودخانه و یا ایجاد سازه های فلزی ۱ متری و یا گابیون ها روی دامنه های محتمل به لغزش استفاده کرد. اصول طراحی این روش های آبخیزداری مشابه طراحی سدهای رسوبگیر و سایر سدهای بزرگ عمرانی است. تنها در مورد سدهای سری که حداکثر ۵ تا ۸ متر

ممکن است مرتفع باشند، باید فاصله سدهای سری طوری باشد که سرعت جریان آب از حد آستانه فرسایش بیشتر نشود. این سدهای سری پس از مدتی از رسوب پر شده و باعث تثبیت خاک و کاهش شیب می شوند.

در عملیات بیولوژیک کنترل فرسایش آبی و بادی عمدتا" باتوجه به اقلیم منطقه ممکن است زمانی حدودی ۲ تا ۱۰ سال طول بکشد تا اثر عملیات بیولوژیک آبخیرداری مشخص شود. همچنین در نگرش سیستمی آبخیرداری باید به نوع کاربری و پراکنش انها در کنار یکدیگر در کنار مدیریت زراعی و سایر مسائل اجتماعی و اقتصادی مانند افزایش شغل در واحد سطح و .. نیز توجه شود (دلیری، ۱۳۸۸). در این خصوص می توان به مهندسی زمان زخیره و زمان تمرکز نیز در اثر بخشی کارهای آبخیرداری در کنار چکدم های سری که نقش رسوبگیری و کاهش سرعت آب را دارند نیز اشاره کرد (۱). دلیری، ۱۳۸۶ با مطالعات کارهای آبخیزداری در شهرستانک چالوس به طور خاص اثر سازه های چکدم سری را بررسی کرد و متوجه شد این سازه های رسوبگیر می توانند حداکثر روی سیلاب های تا ۲۵ ساله به مقدار ۱۳ تا ۱۵ درصد اثر کاهشی داشته باشند (دلیری، ۱۳۸۶). علاوه بر روش های مذکور می توان انتقال رسوب با روش های بای پس، ایجاد حوضچه های رسوبگیر، ایجاد تالاب های مصنوعی یا استفاده از تالاب طبیعی را نیز به این لیست اضافه نمود (۱ و ۳).

روش شناسی کنترل فرسایش و رسوب حوضه ای به این صورت است که ابتدا باید نقش رخساره های فرسایشی موجود بالادست سد در رسوبدهی حوضه بررسی شود تا مشخص گردد کدام یک نقش کلیدی از نظر حجم ومیزان رسوبدهی دارند. به عنوان مثال اگر نقش اصلی رسوبدهی حوضه یک سد مربوط به فرسایش های کناری رودخانه ای از نوع خندق طولی (گالی) باشد روش کنترل فرسایش ممکن است دیوارسازی باشد و اگر مربوط به خندق داخل حوضه باشد باید روی سر گالی جایی که خندق به بالادست توسعه می یابد با ایجاد یک سد وزنی به طوری که سر گالی زیر هد آب قرار بگیرد اقدام نمود. سپس باید پوشش گیاهی را نیز پس از مدتی توسعه داد. همچنین می توان با عملیات مهندسی رودخانه نیز اقدام به تغییر شیب یا طول مسیر جهت ته نشست رسوبات قبل از سد نمود. لذا اساسا" شناخت فرایند و مکانیسم فرسایش آبی یا بادی نوع فرسایش یا فرسایش هایی که موثر در رسوبدهی حوضه هستند، جهت مدیریت رفتار رسوب حوضه ضروری است تا بتوان روش مناسب کنترل فرسیاش و رسوب را مشخص نمود(۱).

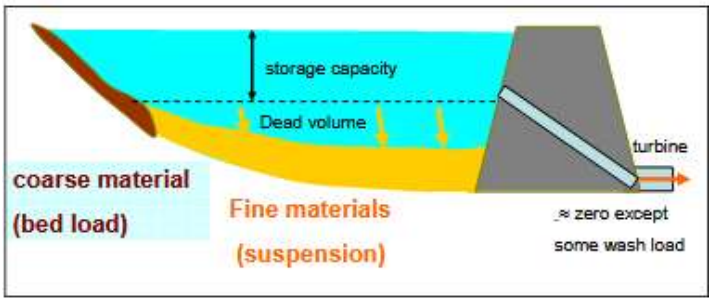
۱-٦ روش های مدیریت رسوب مخازن

حتی اگر حوضه بالادست یک سد در شرایط مناسب کلیماکس (۱) باشد بطوریکه میزان رسوبدهی حوضه ای در شرایط پایدار قرار داشته باشد، ضرورت حفظ حجم مخزن از دیدگاه عمر اقتصادی مخزن لازم است. کارهای آبخیزداری هرچند با اثر کم می توانند باعث کاهش حجم سرریز سد، افزایش طول عمر طراحی حجم مرده، افزایش بده پایه و کاهش ظرفیت تصفیه خانه های آب بعد از سد، و سایر اثرات ملموس و غیر ملموس و مستقیم و غیر مستیقم در حوضه باشد.

لذا نباید مدیریت رسوب مخازن سد را وقتی آغاز کرد که به بحران مشخص مانند سد دز رسیده باشد. در سال ۱۳۸۵ بر اساس مطالعه مولف در شرکت مهاب قدس، فاصله تراز رسوب سد دز با دریچه برقابی (Power intake) حدود ۱۲ متر بود. در این شرایط نه تنها کارهای آبخیزداری جواب نخواهد داد، حتی روش های تخلیه رسوب نیز به دلیل قفل شدن دریچه های تحتانی به دلیل عدم باز شدن طی سال ها متمادی امکان پذیر نیست و یا اگر باشد با خسارت فراوان به دریچه ها و تحمیل هزینه خواهد بود. بدیهی است لایروبی نیز در وسعت کم قابل توصیه و در محدوده دریچه ها جهت باز شدن جلو دریچه موثر می باشد. با این وجود فشار رسوبات به بدنه نیز نباید فراموش شود.

به طور کلی روش های مدیریت رسوب داخل مخازن سدها به شرح زیر است:

- منحنی فرمان بهره برداری. در زمان سیلاب می توان با برنامه ریزی مشخص و محاسبات مدل های موجود، شرایط و وضعیت رسوب مخزن را جهت حفظ و تامین آب و خروج رسوبات معلق به کار گرفت. مطالعه بیشتر در مرجع ۱ و ۱۳ همین مولفین وجود دارد.
- تخلیه رسوبات که می توان به سه روش کلی تخلیه از دریچه یا فلاشینگ (شاس رسوب)، تخلیه با روش های هیدرولیکی و تخلیه مکانیکی تقسیم نمود. این روش ها در فصل ۲ معرفی و با مثال تشریح شده اند.

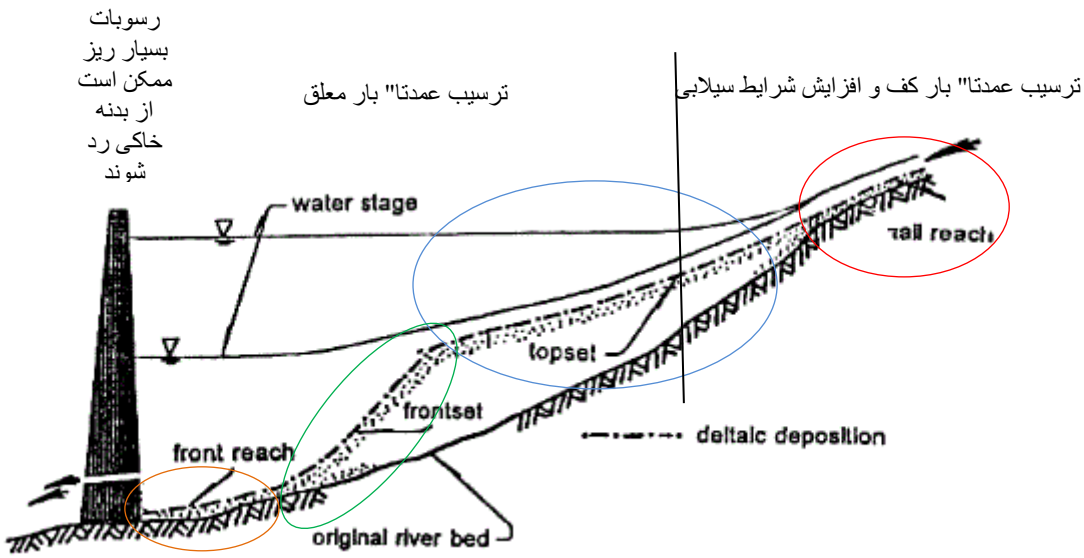


فصل ۲ فرایندها و روش های تخلیه رسوب

در فصل پیش روش های مدیریت رسوب حوضه ای با روش های آبخیزداری (مدیریت آبخیز یا آبخیزداری – Watershed Management شامل کلیه روش های مدیریت عناصر هیدروسیستم مرتبط به یکدیگر حوضه مانند آبهای سطحی و زیرزمینی و مولفه های زیست محیطی آن مانند انواع آلودگی و رسوبات می باشد) و مدیریت رسوب مخازن سد ذکر شد. در ایجا فرایند ها و روش های تخلیه رسوب سدها و به ویژه روش های آبشویی (Flushing) یا شاس رسوب پس از تشریح فرایند رسوبگذاری در سدها تشریح شده است.

۲-۱ فرایند رسوبگذاری مخازن

توزیع رسوب در مخازن به عوامل مختلفی بستگی دارد. مهمترین این عوامل شامل دانه بندی و قطر ذرات، شکل مخزن، و منحنی فرمان بهره برداری مخزن می باشد. اساسا" رسوبات ریز دیرتر و نزدیک به بدنه سد نشست می کنند. شکل مخازن به ۴ گروه عمده باتوجه به منحنی نسبت عمق به سطح دریاچه ها یا بر اساس روابط شکل مخزن تعیین می شود. به طور کلی مخازن یا باریک یا دریاچه هستند و یا بین این دو شکل قرار دارند. مخازن باریک باعث می شوند عمده رسوبات ریز در حجم مرده مخزن عمدتا" به صورت رسوبات پیوسته دپو شوند. در مخازن دریاچه ای عمده رسوبات به صورت ناپیوسته در مخزن پخش می شوند. در شکل ۱ شماتیک توزیع نرمال رسوب در مخازن را نمایش داده است.

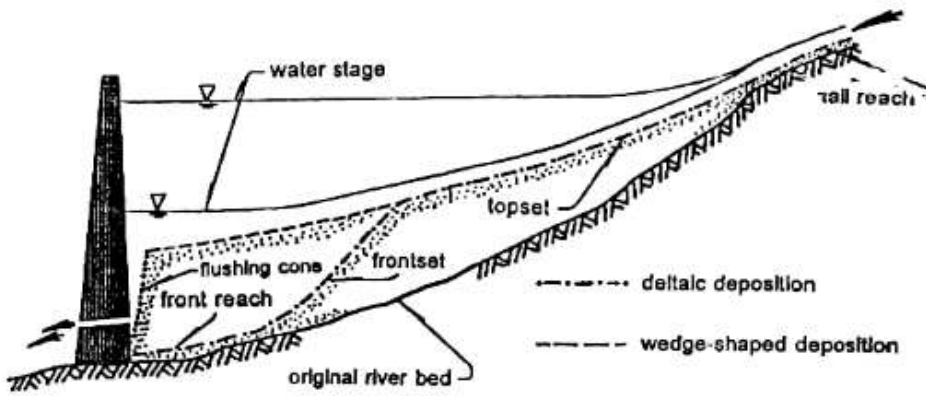


شکل ۱: توزیع رسوب در یک مخزن نمونه با سطح آب بالا (فلاشینگ ناقص) و افت تراز (فلاشینگ مفید)

از شکل ۱ مشخص است که رسوبگذاری در مخازن و تشکیل قسمت های مختلف دلتا شامل ۴ بخش مجزا است که با دایره های رنگی مجزا شده اند. این حالت قبل از ایجاد تنش های ناشی از فشار آب و رسوب یا افت تراز مخزن طی سال ها تشکیل می شود. قسمت اول که بلافاصله بعد از بازه رودخانه در مخزن شروع می شود دنباله آغازین (Tail reach) نام دارد که اغلب در نوسانات تراز مخزن همچون قسمت دوم (میانی یا بالای رسوبات- Topset) به طور متناوب در خارج و داخل آب قرار می گیرند. قسمت پیشانی (Frontset) و قسمت انتهایی دلتا (Front reach) به بدنه سد نزدیک تر هشتند.

در واقع به دلیل سطح مقطع دیواره آب مخزن و لذا کاهش سرعت آب در مخزن، رسوبات بر اساس وزن خود، در مخزن توزیع می شوند. این توزیع رسوب ممکن است چندین سال طول بکشد و سپس ممکن است در اثر ورود جریان های رسوب دار یا افت تراز مخزن، قسمت پیشانی دلتا، به بدنه سد نزدیک تر شده و پس از مدت حتی فشارهایی به بدنه و دریچه ها وارد آورد. عدم استفاده از دریچه ها و این نوع فشارها می تواند تخلیه رسوبات را در سال های پایانی عمر مفید مخزن با دشواری روبرو کند (سد دز). لذا ممکن است کل قسمت های ۱ و ۲ دلتا به صورت گوه ای به شکل قسمت ۳ در آمده و نزدیک بدنه سد شوند. این فرایندها اغلب در سدهای با مخزن باریک به صورت یکنواخت

تر وجود دارد و در مخازن دریاچه ای به صورت غیریکنواخت تر دیده می شود. این روند در عملیات آبشویی (Flushing) نیز با سرعت بیشتر اتفاق می افتد بطوریکه در این حالت مخروط آبشویی مشابه شکل ۲ شکل می گیرد (Flushing cone).



شکل ۲: پیشرفت قسمت های مختلف دپوی دلتا به سمت بدنه سد و ایجاد مخروط آبشویی

۲-۲ روش های تخلیه رسوب

سالانه درصدی از حجم مخازن به دلیل ورود رسوبات کسر شده و لذا نه تنها حجم مفید مخزن کم می شود بلکه سطح تبخیر به دلیل کم شدن عمق مخزن بیشتر می گردد. روش های عمده تخلیه رسوبات به شرح زیر است:

- لایروبی مکانیکی. این روش نیاز به ماشین الات داشته و صرفا" برای مخازن کوچک قابل توصیه است. علاوه بر هزنیه ها و محدود بودن عملیات، این روش صرفا" برای بخش هایی که مخزن خالی از آب است امکان داشته و لذا به صورت موردی ممکن است عملیاتی شود.

- روش های هیدرولیکی. این روش بسیار گسترده است. اما اصول این روش بر اساس مفهوم سیفون (بدون نیاز به انرژی برق) یا با ایجاد لجن کش و پمپ و لوله های انتقال عملیاتی می شود. در این روش بخش کمی از آب نیز تلف شده و بیشتر برای برداشت رسوب در محل های خاص مثلا" نزدیک دریچه یا حفظ کانال فلاشینگ قابل توصیه است.

مطالعه موردی: لایروبی و امکان سنجی تخلیه رسوب سد رودبار لرستان با روش هیدرولیکی-مرجع ۱ دلیری ۱۳۹۳

مسئله تمهیدات لازم کنترل رسوب مخزن سد رودبار لرستان در سال ۱۳۹۳ و حین ساخت.

- بررسی پروپوزال Tom Jacobsen هیدرولوژیست از شرکت SEDI CO AS نروژی و ارزیابی گزارشات رسوب مشاوران و پیمانکاران، فرهاد دلیری ۱۳۹۳، مشاور سکو، آب نیرو.

عمده ترین روش های مدیریت رسوب کوتاه مدت سدها شامل شاسینگ و لایروبی و مدیریت درازمدت رسوب شامل بهره برداری صحیح مخزن و آبخیزداری حوضه سد می باشد. اگرچه شرایط فنی شاسینگ در سد رودبار امکان پذیر بود اما موضوع لایروبی نیز جهت افرایش عمر اقتصادی و باز ماندن مسیر کانال شاسینگ ضروری است.

لایروبی ممکن است مکانیکی یا هیدرولیکی باشد. در اینجا هدف لایروبی هیدرولیکی از نوع مکش بدون صرف انرژی (Gravity) بود. هدف اصلی کنترل رسوبات دهنه آبگیرها و دریچه تحتانی جهت حفظ اجرایی ماندن عملیات فلاشینگ در سال های آتی بود. مشخصات سیستم پیشنهادی:

-شناور یا رفت (Raft)

روی شناور معمولاً ۲ تا ۳ نفر کارگر مسقر شده که عملیات را طی دستورالعملی معین انجام می دهند.

-مکنده (Suction head)

مکنده دو قطعه اصلی جهت مکش رسوبات و ایجاد فشار یا جت آبی جهت شل کردن رسوبات قدیمی دارد.

-لوله های انعطاف پذیر شناور

این لوله ها اغلب بین شناور و محل کوپل ها و در مخزن آب قرار می گیرند.

-لوله های HDPE که اغلب جهت کارگذاری و تحمل فشارهای بالا مناسب هستند.

در این سیستم می بایست باتوجه به رابطه برنولی و افت های مسیر، فشار لازم تامین گردد. هرچه فشار بیشتر شود راندمان سیستم بالاتر رفته اما ملاحظات مقاومت سیستم نیز ضروری می شود. لذا تنها مصرف انرژی، در زمان روشن کردن جت بوده که نیاز به برق دارد. قدرت جت اغلب مناسب کندن رسوبات چسبنده تا 50Kpa می باشد. این سیستم می تواند رسوباتی با قطر تا ۳۵۰ میلیمتر را لایروبی کند. ظرفیت سیستم ۳۰۰ تا ۴۰۰ مترمکعب در ساعت بوده و عموماً محدودیت عمق ندارد. غلظت رسوبات خروجی ممکن است بین ۴۰ تا ۹۰ گرم بر لیتر باشد. این سیستم در شرایط ایده آل و روشن بودن ۸ ساعت در روز ممکن است تا ۱ میلیون مترمکعب رسوب در سال توانایی لایروبی داشته باشد.

جدول ۱: مصرف آب با تخلیه ۱ میلیون مترمکعب رسوب در سال با غلظت های مختلف رسوب در عملیات لایروبی

غلظت-گرم بر لیتر	حجم هدر رفت آب –مترمکعب	نسبت به متوسط آورد رودخانه٪	ملاحظات
۹۲ ایده آل	۱۱ میلیون	۲	امکان پذیر است
۴۰ جهت مقایسه	۲۵ میلیون	۴	امکان پذیر است
۱۰ جهت مقایسه	۱۰۰ میلیون	۱۷	امکان پذیر نیست

بر اساس جدول مذکور و همچنین مقایسه غلظت های یک رودخانه طبیعی، غلظت ۱۰ درصد بسیار ناچیز است. لذا انتظار است که سیستم مذکور در دامنه ۴۰ تا ۹۰ درصد بهره برداری شود. همچنین باتوجه به متوسط آورد بیش از ۶۰۰ میلیونی حوضه، تخلیه رسوبات با این روش کم هزینه و مصرف آب کاملاً منطقی است. در عملیات شاسینگ (آبشویی یا تخلیه از دریچه ها) آب بیشتری تلف می شود. بعلاوه خسارات فنی و معضلات زیست محیطی با تنش بیشتری سیستم را تحت تاثیر قرار می دهد.

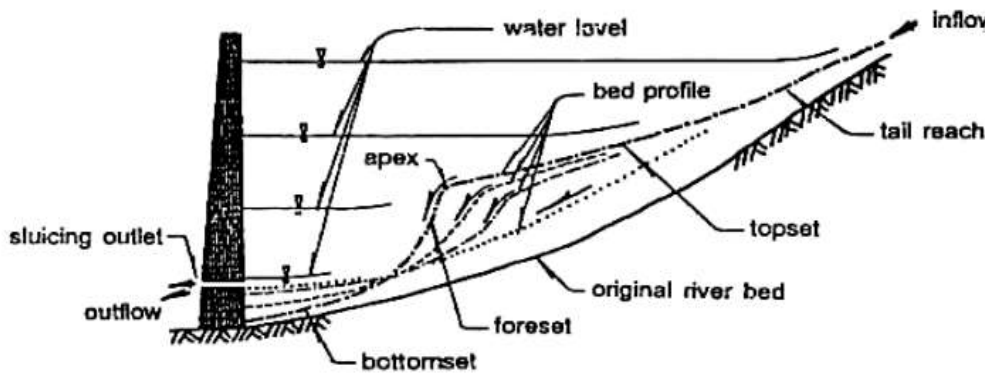
- تخلیه رسوبات به کمک جریان های پر رسوب که نیاز به پایین بودن سطح آب مخزن است.
- بازکردن دریچه های تحتانی و تخلیه رسوبات به کمک افت مخزن.
- تخلیه رسوبات به کمک جریان دانسیته (Density currents). این جریان یا باید دمای کمتری نسبت به مخزن داشته باشد یا باتوجه به هیدروگراف غلظت رسوب، در زمان مناسب دریچه ها

باز شده تا بر اساس جریان سنگین تر عملیات تخلیه رسوبات صورت پذیرد. تعیین این زمان نسبتا"دشوار بوده و با مدلسازی عددی ممکن است بتوان آن زمان را تعیین نمود. در این حالت که به آن در برخی منابع Sluicing نیز می گویند نیاز نیست سطح آب مخزن پایین باشد.

۲-۲-۱ فرایندهای آبشویی (Flushing)

به طورکلی در اغلب روش های آبشویی که در بند پیش عنوان شد بخش عمده ای از آب مخزن همراه رسوبات خالی شده و لذا عملکرد مخزن برای دوره ای متوقف می گردد. البته ممکن است همیشه عملیات آبشویی موفقیت آمیز نباشد اما این روش کم هزینه می باشد. لذا بهتر است این عملیات در فصول پرآب اجرا شود. همچنین می توان از آب باقی مانده در مخزن و یا بارش های فصلی بهره برد. ضمنا" بهر است عملیات شاسینگ باتوجه به شدت رسوبگذاری مخزن(فصل۱)، در فواصل زمانی مناسب اجرا شود تا کانال شاسینگ همیشه یک مسیر آزاد در جلوی دریچه داشته باشد. خود دریچه های تحتانی تخلیه نیز باید سرویس های دوره ای لازم را داشته باشند.

به طور کلی با باز شدن دریچه ها به دلیل افزایش سرعت در محدوده دریچه، ذرات از مسیر دپوی دلتا یا سر دلتا در قسمت سوم (پیشانی دلتا) مکیده شده و این مسئله باعث نزدیک شدن سر پیشانی دلتا (Apex) به سمت بدنه و ایجاد مخروط آبشویی می گردد (شکل ۳).



شکل ۳: فرایند پیشرفت رسوبات دلتا در اثر عملیات فلاشینگ

با باز ماندن دریچه و افزایش سرعت و غلظت جریان خروجی رسوب، مقدار غلظت به یک حداکثری که ممکن است حدود $0.5 * 10^6$ ppm باشد برسد و باید مدتی ادامه یابد تا نتیجه مناسب حاصل شود. اغلب ذکر شده جریان آبشویی باید با وردودی ۲ تا ۴ برابر جریان پایه همراه باشد اما در صورت وجود فشار و تراز در خود محزن نیز ممکن است با دبی کم نیز شدنی باشد. محل قرار گیری دریچه ها باید در طراحی طوری باشد که در مناسب ترین عمق و زاویه با خروج رسوبات حین آبشویی برخوردار باشند تا راندمان سیستم بالا باشد. این موارد به عنوان برسی اثربخشی و امکان سنجی آبشویی بوده که در فصل ۳ بحث شده است.

دبی رسوبات فلاشینگ، به خصوصیات رسوبات مخزن، تداوم فلاشینگ و دبی جریان، هندسه کانال فلاشینگ (پهنای کانال) و گرادیان سطح مخزن مرتبط است. کانال فلاشینگ نیز اغلب تحت تاثیر خصوصیات هندسه مسیر رودخانه قبل از احداث سد می باشد. با این وجود می توان فرایند فلاشینگ را به دو مرحله تقسیم نمود. گام اول کنده شدن رسوبات گذشته به کمک جریان و گام دوم انتقال رسوبات به کمک جریان های با غلظت بالای رسوب از مخزن. این مسئله به سطح تراز مخزن نیز وابسته است. از شکل ۲ و ۳ نیز مشخص است که وقتی تراز بالا باشد، تنها ممکن است یک تغییر جزئی از تشکیل مخروط فلاشینگ ایجاد شود و اغلب کانال فرسایشی از بالادست کنترل می شود. ولی در ترازهای پایین این کانال از پایین دست و نزدیک بدنه به سمت بالا توسعه می یابد و در این حالت کارائی آبشویی بیشتر و موثر تر می باشد. این تغییرات مرحله ای رسوبات دلتا، در اثر قرسایش و افت تراز به فرسایش قهقرائی از پایین دست به سمت بالادست معروف است. لذا کانال ایجاد شده فلاشینگ در دوره عملیات فلاشینگ به تدریج پهن تر و عمیق تر می شود. با این وجود ممکن است بخشی از این رسوبات زیر دریچه تحتانی در داخل حجم مرده وارد شوند و لذا از دریچه خارج نگردند. لذا در این حالت فلاشینگ اگرچه توانسته بخشی از رسوب داخل مخزن را خارج کند ولی اثربخش نبوده است. حتی بدتر از ان ممکن است حجم عظیمی از مخروط فلاشینگ کنده شده و در مسیر دریچه و یا نزدیک بدنه قرارگیرد. در هر صورت غلظت خروجی اگر به تدریج کم شده و آب زلال خارج شود یعنی اینکه شرایط مخروط فلاشینگ و رسوبات دلتا فعلا" پایدار شده و دیگر با روش فلاشینگ رسوبی خارج نمی شود. این شرایط پایدار ممکن است بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه نیز مشاهده شود. اگرچه در صورت ایجاد سرعت زیاد جریان در اثر افت شدید تراز مخزن ممکن است همیشه مقداری از رسوبات دلتا در جریان خروجی دریچه ها مشاهده شود.

۲-۲-۲ بررسی افت تراز سدها

باید توجه نمود افت و خیز تراز مخزن می بایست باتوجه به بدنه سد و سایر ملاحظات از یک محدوده استانداری به ازای واحد زمانی خارج نشود. این مسئله می تواند به کمک مدل هایی چوت Mike بررسی شود. دلیری، ۱۳۹۳به منظور بررسی آبگیری اولیه سد رودبار لرستان و بررسی نرخ افت و اخیز تراز مخزن باتوجه به دبی های مختلف تخلیه کننده های تحتانی و میانی و سرریز اضطراری، رفتار مخزن را در مدل HEC-HMS شبیه سازی نمود (۱). به طور کلی مسئله افت تراز در سدهای خاکی و بتنی نیاز بررسی دارد ولی در سدهای خاکی بیشتر به افت تراز حساس هستند. شاید افت های بیش از ۰,۵ یا ۱ متر در روز به ویژه در زمان اولین آبگیری سدهای خاکی پرمخاطره باشد.

۲-۲-۳ پیامد تله اندازی رسوب سدها در رودخانه های پایاب

به طور متوسط بیش از ۱ درصد حجم ذخیره سدهای دنیا هر سال به دلیل رسوبات حوضه ای در حال پرشدن می باشد. این مسئله در کشورهای در حال توسعه که به کشاورزی وابسته هستند مانند ایران بسیار شدیدتر بوده و لذا فرسایش خاک و رسوبدهی حوضه های ایران از متوسط جهایی طبق مطالعات F.A.O بسیار بیشتر می باشد. با این وجود همه رودخانه ها در شرایط کلیماکس خود همانطور که توسط همین مولفین در مرجع ۱ نیز تشریح شده است همیشه یک حد تعادلی از بار رسوبات معلق و بار کف را تولید خواهند کرد. لذا وقتی مانعی مانند سد در مسیر رودخانه باشد این تعادل بهم می خورد و باعث پیامدهای شامل فرسایش و رسوبگذاری در مسیر رودخانه به شکل زیر خواهد بود که می بایست در مطالعات و بهره برداری سدها مورد توجه قرار بگیرد. در خصوص اثرات و پیامدهای کاهش رسوب ناشی از سدها در پایین دست ابتدا باید سدها را به دو نوع کوچک و بزرگ تقسیم و سپس هر یک را جداگانه بررسی کرد.

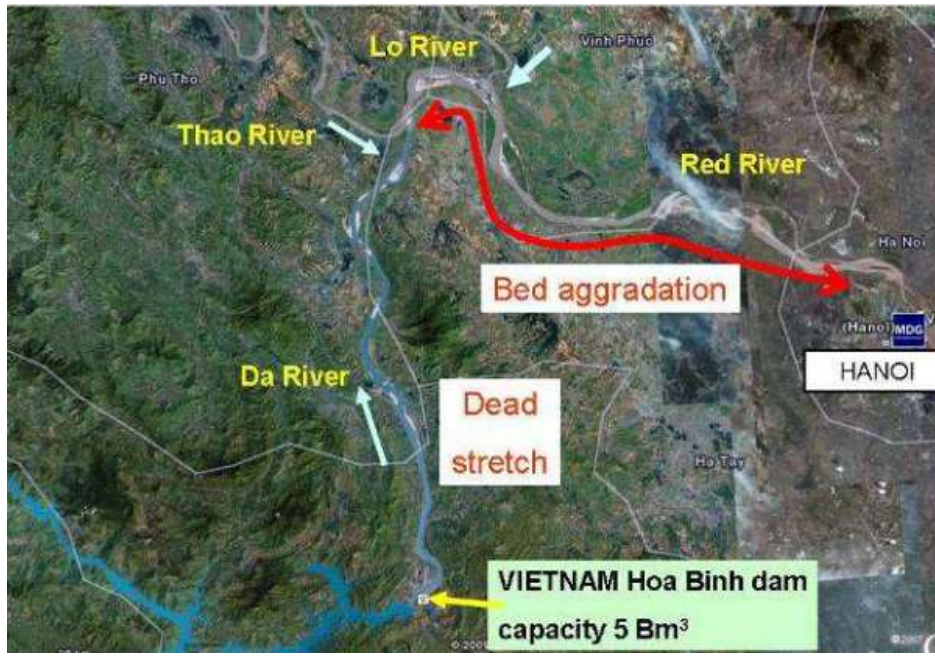
سدهای کوچک

سدهای کوچک (در حد چند میلیون متر مکعب ظرفیت و معمولا" زیر ۲۰ متر ارتفاع) اغلب نمی توانند سیلاب ها را کامل مهار کنند ولی می توانند حجم عمده ای از رسوبات به یژه رسوبات درشت بار کف را به تله انداخته و لذا جریان پس از سد دارای قدرت کنش مجدد به ویزه از نظر بار کف می شود و کنش

و فرسایش رودخانه ای زیاد می گردد تا قدرت کنش و حمل رودخانه به تعادل طبیعی برسد. در فرانسه گزارش شده است که این کنش تا بالای ۱۴ متر نیز در رودخانه های آلپی طی سال های گذشته دیده شده است. این پیامد بسیار آرام شروع می شود و اغلب وقتی متوجه ان می شویم که آثار آن واضح شده باشد. از پیامدهای این کنش بستر نیز می توان به مسائل ایجاد شده در تراز سفره زیرزمینی مانند تغییر شیب و حرکت ان، مشکلات در سازه های تامین آب، آبشستگی سازه هایی چون پایه پل ها، دایک ها، و تشدید فرسایش ساحلی را اشاره نمود.

سدهای بزرگ

برخلاف سدهای کوچک؛ در سدهای بزرگ عمده سیل و رسوبات سیل به تله می افتد و لذا جریانی بدون بار رسوب در پایین دست مشاهده می شود. این موضوع باعث ایجاد تجمعات جزایر رسوبی در تقاطع های رودخانه های فرعی با رودخانه اصلی که سد روی آن است خواهد شد زیرا جریان رودخانه اصلی قطع شده و لذا حمل طبیعی رودخانه اصلی به دلیل نبود یا کاهش جریان مختل شده و جریان رودخانه های فرعی نیز توان انتقال این رسوبات را نداشته و لذا جزایر رسوبی تشکیل می شود(شکل۴).

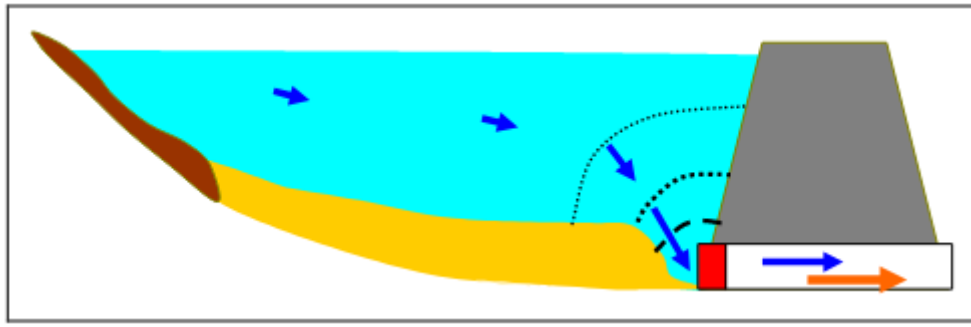


شکل ۴: تجمع رسوبات در پایین دست سد Hoa Binh در ویتنام [16]

۲-۳ مقایسه برخی از روش های آبشویی

۲-۳-۱ فشار آب

در این روش آبشویی، برخی مواقع دریچه تحتانی در زمان محدود باز می شود و لذا تلفات آب و توقف تولید انرزی ایجاد نمی شود. بر این اساس طبق افزایش سرعت موضعی ایجاد شده در محدوده نزدیک دریچه، باعث می شود ضمن اینکه دریچه ها باز و بست و سرویس شوند، همیشه جلوی دریچه ها برای فلاشینگ های اساسی تر مهیا باشند(شکل ۵).

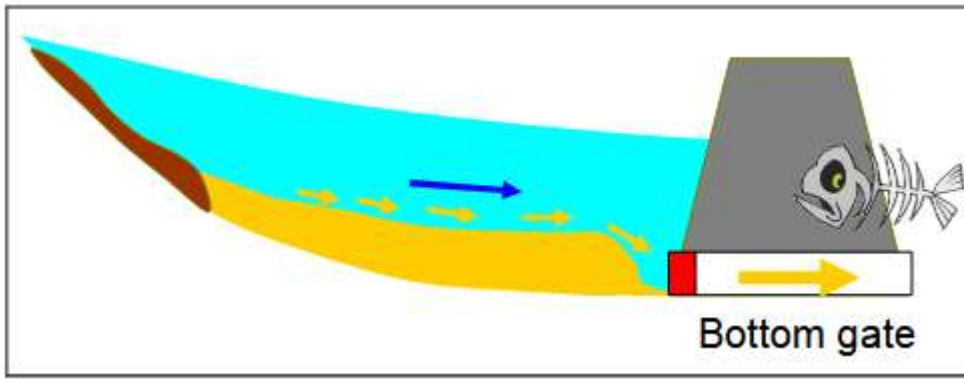


شکل ۵: اصول روش آبشویی بار معلق با فشار موضعی آب [16]

لذا این روش در واقع خیلی موثر در تخلیه کلیه رسوبات مخزن سد نیست زیرا سرعت آب تنها در محدوده دریچه زیاد می شود و لذا این روش صرفا" برای باز نگهداشتن جلوی دریچه و سرویس و کنترل های دوره ای دریچه ضرریست.

۲-۳-۲ افت تراز

در این روش با باز ماندن دریچه های تحتانی، تراز سفره پایین آمده و سرعت در اثر گرادیان ایجاد شده افت سطح سفره، در محدوده بیشتری از مخزن افزایش می یابد تا حجم قابل توجهی از رسوبات مخزن بدون توجه به مسائل زیست محیطی، از مخزن تخلیه شوند(شکل ۶).

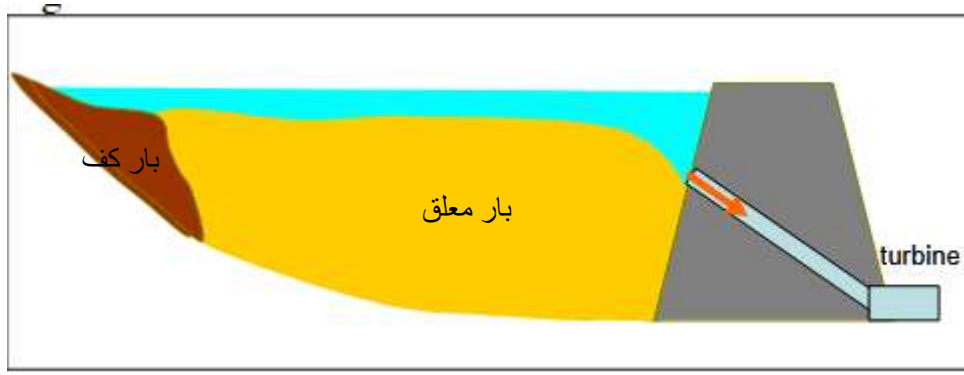


شکل ۶: اصول روش آبشویی بار معلق با افت تراز آب بدون ملاحظات زیستی [16]

این نوع فلاشینگ را آبشویی سخت (Hard Flushing) نیز می نامند زیرا حجم و غلظت زیاد و غیر قابل کنترلی از رسوبات مخزن به پایین دست سد منتقل می شود لذا خسارات زیست محیطی وارده به محیط آبزیان، مرگ مستقیم ماهیان، و رسوبگذاری محیط تخم ریزی آنها می تواند وسیع باشد. لذ این روش آبشویی نیز از نظر محیطی پایدار نبوده و قابل توصیه نیست.

۲-۳-۳ بدون آبشویی

همانطور که در قسمت پیشگفتار و قسمت های پیشین ذکر شد اساسا" احداث سد یا هر نوع سازه ای که باعث بهبود زندگی بشر شود واجب است. با این وجود توجه به محیط زیست جهت کاهش آسیب و پیامدهای این نوع سازه ها، ضروریست. اگر به دلیل پیامدهای زیستی هیچ گونه آبشویی صورت نگیرد، اگرچه ممکن است در طی ده ها اتفاق مشهودی برای سد نیافتد اما سرنجام دریچه های تحتانی برای همیشه از کار می افتند و رسوبات ضمن پر کردن حجم مفید سد، نزدیک دریچه های توربین برقابی شده و ضمن افزون شدن خسارات، احیا و آبشویی و یا تخلیه رسوبات مخزن کاری بسیار دشوار تر خواهد شد (شکل ۷).

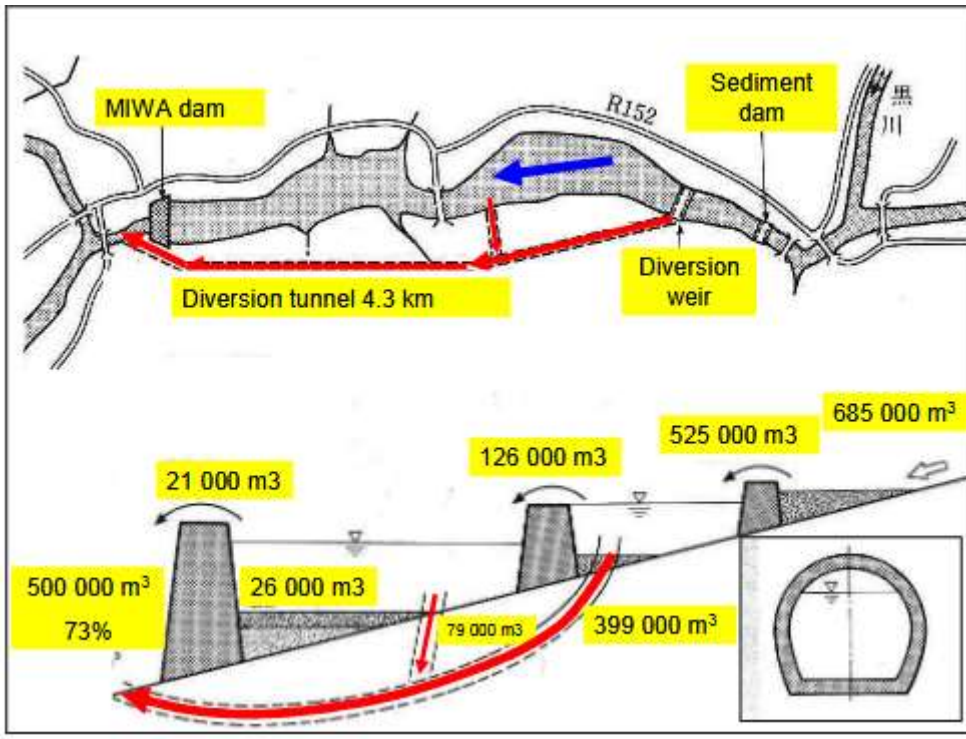


شکل ۷: پرفیل رسوبگذاری بار معلق و بار کف مخزن در اثر عدم آبشویی طی چند دهه [16]

در این شرایط تامین آب شرب، کشاورزی، صنعت و برق با درصد کمتر و یا ناچیز عملیاتی می شود. اگرچه در این شرایط جریان پایه و آب بیشتری به سمت پایاب می رسد ولی رسوبات ریز می توانند مسیر مخزن را به سمت توربین و رودخانه طی کرده و ضمن خسارات تعمیر تیغه های توربین (به ویژه با حوضه های سازند گرانیتی) و توقف انرژی، شاهد آبشویی های بدون کنترل در اثر سیلاب های فصلی و انتقال حجم زیادی رسوب به پایین دست سد نیز خواهیم بود. علاوه بر این رها کردن چنین مخزنی پر از آت و آشغال و رسوب و چوب نتایج بدتری در پی خواهد داشت. لذ این نگرش نیز به پایداری سیستم و محیط لطمه وارد می کند.

۲-۳-٤ آبشویی با ملاحظات محیط زیستی

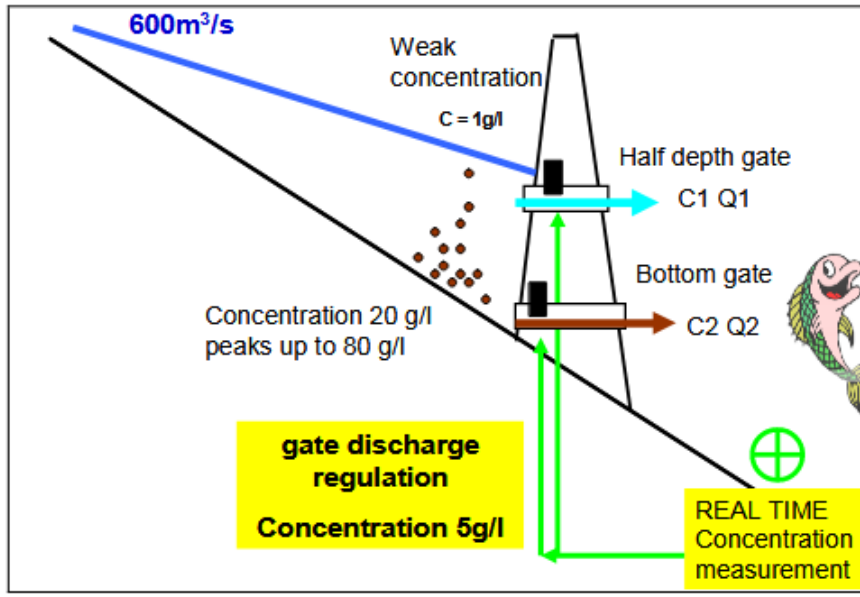
باتوجه به نکات ارائه شده در سراسر بندهای پیش و فصل اول، سدسازی یک ضرورت است و نیاز آبشویی یک اصل واجب جهت بهره برداری حتی در حوضه های پایدار و یا با عملیات آبخیزداری. روش و تکنیک تخلیه رسوبات در هر سد و منطقه ممکن است متنوع باشد و حتی روش هایی به صورت خرد جمعی و خاص یک منطقه به ذهن تیم مسئول خطور کند. مثلا" در شکل ۸ ترکیبی از روش های سد رسبگیر و سپس بای پس رسوبات به کمک سریرز و تونل انحرفی نمونه ای از این عملیات تخلیه رسوبات است که باید با یکی از روش های آبشویی، هیدرولیکی و مکانیکی نیز همراه شود. در شکل ۸ نمونه ای از روش های مختلف مدیریت رسوب سد Miwa در ژاپن نمایش داده شده است.



شکل ۸: انتقال رسوبات با روش بای پس با تونل، سد رسوبگیر و آبشویی مخزن–سد Miwa ژاپن [16]

برای اینکه روش مدیریت رسوب مخازن سازگار با محیط باشد، ابتدا باید درک درستی از محیط فون و فلور و جانوارن آبزی و محیط پیرامون سیستم به دست آورد. به عنوان مثال نیاز آبی فون، فلور و گیاهان به آب و یا آبزیان به اکسژن و سایر مواد مغذی یا آلاینده های خاص می تواند یک شاخص باشد. همچنین شاخص کلیدی آبشویی می تواند غلظت رسوبات خروجی از دریچه ها باشدکه می بایست غلظت خروجی منطبق بر شرایط رسوبات رودخانه در شرایط طبیعی سیستم (شرایط کلیماکس تشریح شده توسط همین مولفین در مرجع ۱) تعیین شود تا آستانه و حد نهایی این غلظت برای زمان ها و تداوم های مختلف مشخص گردد.

در روش آبشویی سازگار با محیط زیست، تراز مخزن تا جایی پایین می اید که آستانه و حدود شاخص های فوق الذکر مثلا" غلظت رسوب، در خروجی دریچه های سد بیشتر از حد مجاز مشاهده نشود. این غلظت ها دارای تداوم مشخص برای هر پارامتر معینی هستند (شکل ۹).



شکل ۹: پرفیل بدنه سد و مخزن سد Genissiat روی رودخانه Rhone فرانسه [16]

در طی ۴۰ سال عمر سد Genissiat با چندین روش سازگار با محیط زیست هر ۳ سال یکبار آبشویی انجام شده است. بر اساس تحقیقات میدانی، مقدار غلظت مناسب رسوب که به محیط زیست اکوسیستم پایاب سد آسیب نرساند معادل 5g/l به طور متوسط بوده است. سایر مقادیر نیز با شرایط زیر به دست امده است:

10g/l حداکثر ۶ ساعت

15g/l حداکثر ۳۰ دقیقه.

غلظت رسوب خروجی دریچه ها در زمان واقعی توسط ابزار اشعه گاما و یک روش تکمیلی پیکنومتر یا دانسیته سنج شامل پارمترهای دانسیته آب و دما سنجش شده است (فیلتر و خشک کردن و وزن

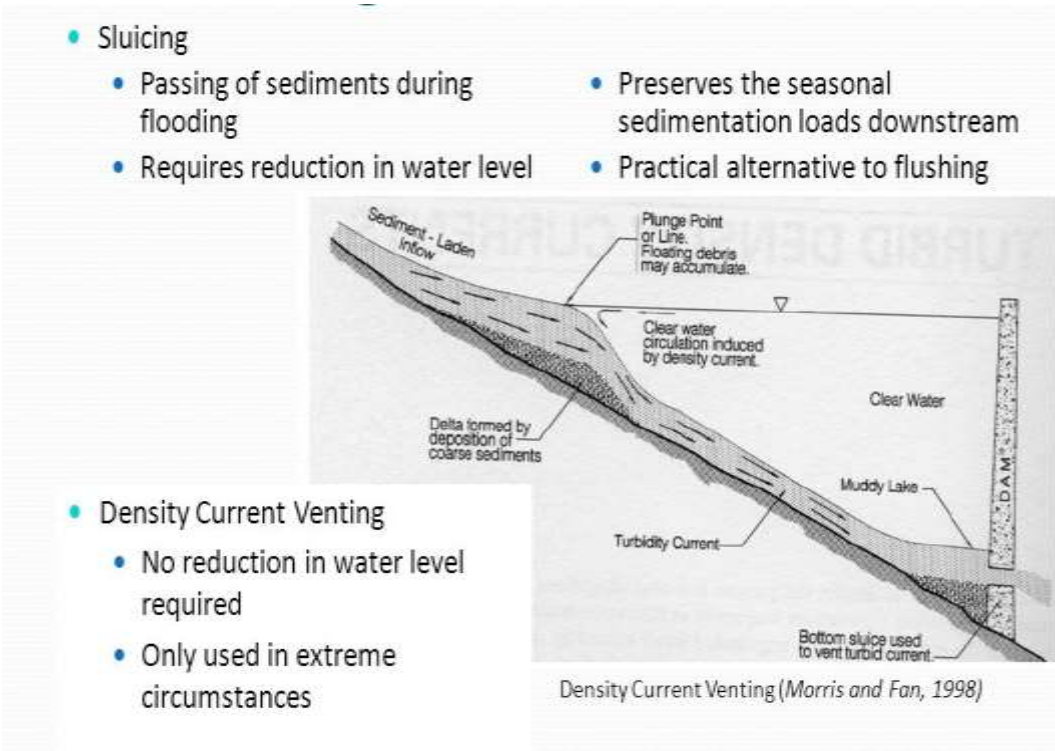
کردن). با این وجود طبیعی است که کارائی آبشویی سازگار با محیط زیست از آبشویی سخت به دلیل محدودیت بازشدن میزان و زمان دریچه و لذا غلظت کمتر رسوبات، پایین تر باشد.

۲-۳-۵ آبشویی با سیلاب دانسیته و ملاحظات زیستی

به طورکلی ترکیب روش های افت و استفاده از سیلاب های ورودی به مخزن سد و یا به تنهایی می تواند در کارائی آبشویی موثر باشد. سیلاب ها می تواند از ذوب برف نیز ناشی شوند. این سیلاب ها به دلیل دمای پایین می توانند به دلیل چگالی بالاتر نسبت به آب مخزن، در کف مخزن حرکت کرده و نیازه به پاین اوردن و خالی بودن مخزن ممکن است کمتر شود (شکل ۱۰). در کشور سئویس این روش ذوب برف فصلی جهت آبشویی استفاده شده است.

جریان های لایه بندی شده – جریان دانسیته (۱)

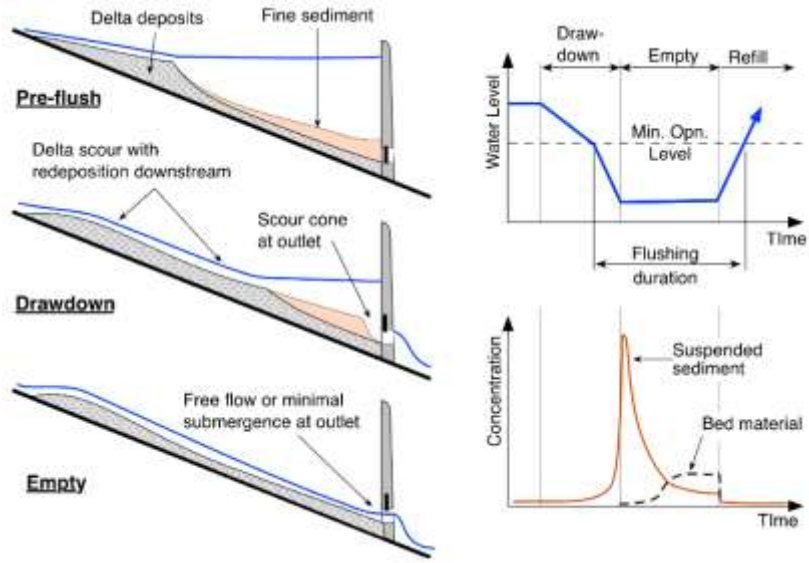
جریان های لایه بندی بر حسب مورد و هدف متفاوت هستند. مثلاً بین آب و هوا، بین لایه های آب و سایر آلاینده ها از منظرهای مختلف تغیر فاز وجود داشته و خصوصیات فیزیکی لایه های مختلف ایجاد می گردد. در خصوص موضوع تخلیه رسوب یک مخزن فرضی می توان فرض نمود دانسیته آب مخزن ρ_a و دانسیته جریان سنگین تر کف مخزن که ممکن است در اثر رسوب، دما یا جریان با املاح بیشتر باشد برابر ρ_b باشد. در این حالت در مخزن فرضی یک شرایط لایه بندی با نسبت $\Delta\rho/\rho=(\rho_b-\rho_a)/\rho_b$ ایجاد شده است. البته حتی اگر مخزن بدون لایه باشد همیشه می توان بالای سطح آب (هوا) و زیر سطح آب (مخزن) دو لایه سیال با دانسیته مختلف را لحاظ نمود. در شرایط بدون لایه بندی مخزن عدد فرود ($F=\frac{V}{(gy)^{0.5}}$) می باشد. اما وقتی مخزن دارای دو لایه باشد می بایست مقدار شتاب گرانشی بر اساس رابطه $g'=(\Delta\rho/\rho)g$ اصلاح و مقدار عدد فرود چگالیمتر F_D وارد محاسبات گردد. این موضوع به مفهوم دیگر در هیدرولیک رسوب رودخانه به نام عدد رسوب معروف است. با نوشتن معادله انرژی بین دو مقطع کف مخزن می توان مقدار سرعت آب را در محیط چگالتر محاسبه نمود.



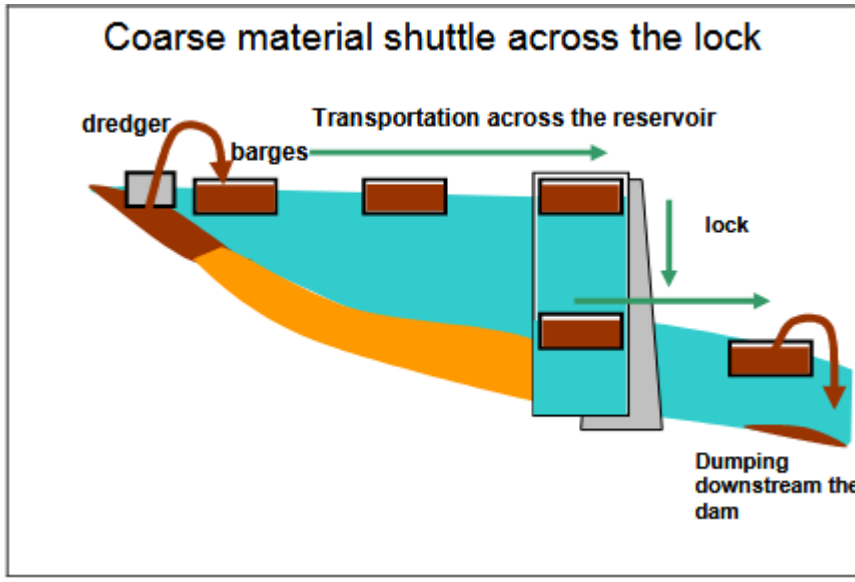
شکل ۱۰: مقایسه دو روش آبشویی با جریان سیل فصلی و جریان دانسیته [1]

۲-٤ معضلات رسوبات درشت

عمده روش های بالا که در خصوص آبشویی ذکر شد نمی توانند باعث تخلیه بار کف که در سراب سد دلتا تشکیل می دهند موثر باشند. در شکل ۱۱ سدیگراف غلظت در شرایط مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است عمده غلظت تخلیه کنده تحتانی مربوط به بار معلق می باشد. لذا تخلیه این مواد درشت اغلب با روش های مکانیکی و یا باتوجه به امکانات و تمهیدات خاص سد که در زمان ساخت سد ایجاد شده امکان پذیر است. مثلا" می توان به کمک قایق های کوچک این مواد را جمع و به پایین دست دست منتقل کرد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: مقایسه گراف غلظت رسوب دریچه سد در شرایط مختلف آبشویی با روش افت تراز



شکل ۱۲: انتقال مواد بار کف دپو شده در سراب مخزن سد به پایاب سد

۲-۵ مدلسازی آبشویی سد Genissiat

در این خصوص جهت مدلسازی می توان از مدل MIKE یا مدل GSTAR3 و یا از کدهای موجود The CFD code SSIIM بهره برد. با این وجود مدل هایی که اثر لغزش داخل مخزن را در اثر افت تراز لحاظ کنند ممکن است اهمیت داشته باشد. به طور کلی جهت مدلسازی آبشویی باید موراد زیر توجه شود:

- آغاز حرکت ذرات

در خصوص بار کف باید تنش برشی ذره از تنش برشی بحرانی τ_c (N/m^2) بیشتر شود تا ذره شروع به حرکت کند. تنش برشی (τ) خود تحت تاثیر غلظت سیال، دما، فشار، نیروی دراگ، اصطکاک، شکل ذره، قطر ذره، و دانسینه مواد می باشد.

مسئله آستانه حرکت مواد معلق به دو موضوع بستگی دارد. اول اینکه آیا سن این مواد معلق در زیر آب، آنقدر بوده که سفت و یکپارچه شوند یا خیر. در حالت معلق بودن وقتی نسبت سرعت سقوط ذرات (U_*) از نصف سرعت توربلانس (w) بیشتر شود حرکت ذرات آغاز می شود ($U_*>w/2$).

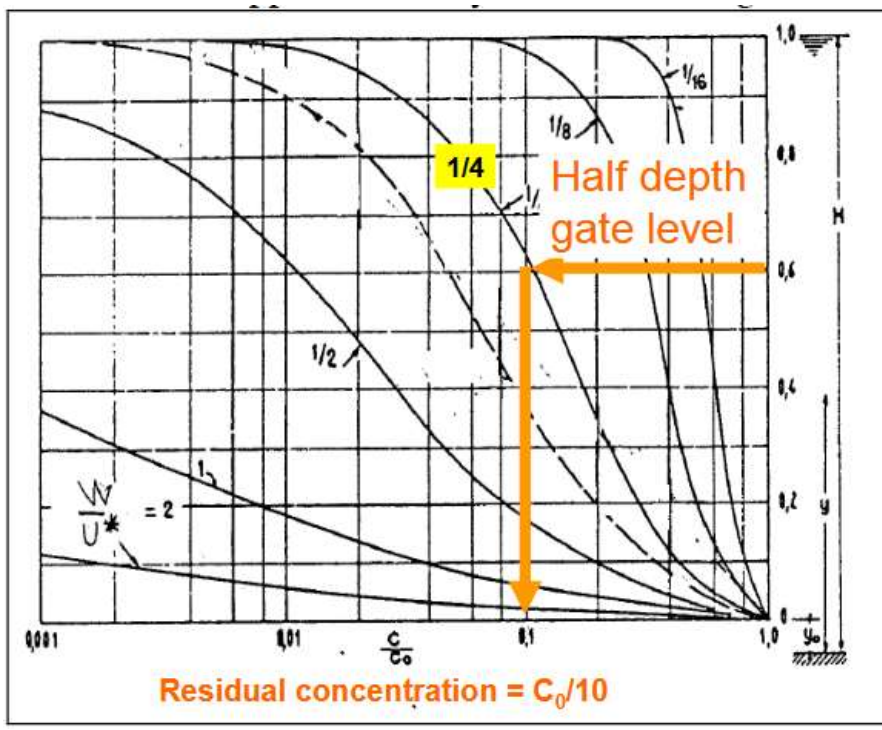
اگر مواد معلق تحکیم شده باشند تنش بحرانی با توان ۴ یا ۵ تابع غلظت و زمان متناسب می شود:

$$\tau_c = f(c^4 \text{ to } c^5)$$

همچنین در این حالت باید با مغزه گیری از اعماق لایه لایه ای رسوبات، مشخصات و پارامترهای فیزیکی مشخص شود. لذا مدل انتخابی باید اثر این لایه بندی را تشخیص دهد.

- توجه به گرادیان و غلظت خروجی برای مدیریت آبشویی زیستی

در انجا باید از مدل های ریاضی با درک آشفتگی بهره برد. روش دیگر ایجاد رابطه بین این پارمتر و دبی خروجی دریچه یا استفاده از دیاگرام هانتر رز که در شکل ۱۳ مثال زده شده است. با فرض نسبت w/ U_* برابر ¼ و مقدار بازشدگی نصف دریچه برابر با ۶۰ درصد ارتفاع سد، مشخص می شود که غلظت خروجی معادل ۱۰ درصد غلظت بازشدگی کل دریچه تحتانی می شود.

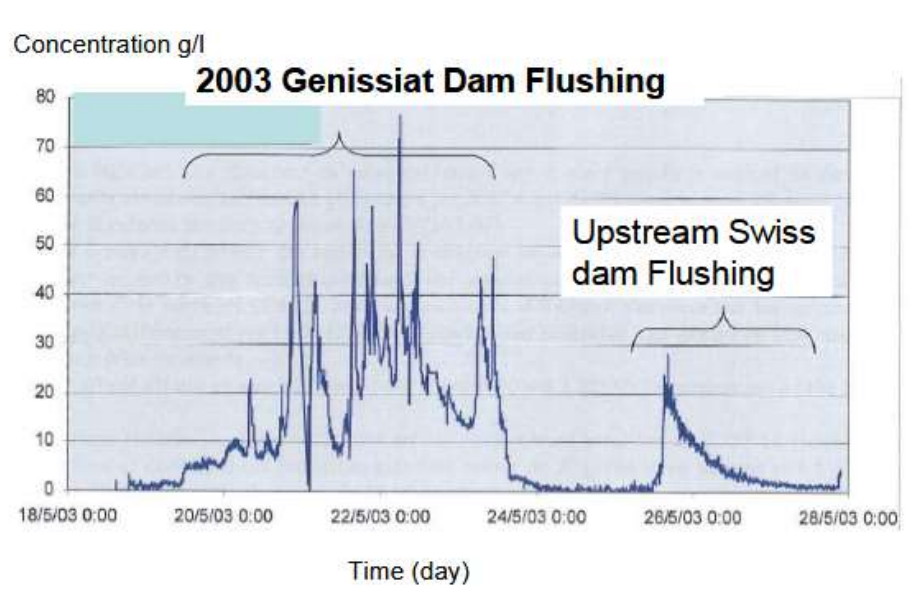


شکل ۱۳: مثال از کاربرد دیاگرام هانتر رز (Hunter Rouse)

- لغزش در مخزن

در اثر افت تراز، ناپایداری دامنه در مخزن باتوجه به نوع سازند محتمل است. به طورکلی سازندهای مارنی با املاح و شیب کافی و وجود رس های از نوع اماس پذیر، محتمل به لغزش هستند. رفتار رس ها با حضور آب بسیار متنوع هستند و برخی آماس پذیر و برخی منقبض شونده بوده و با حذف فشار آب، ممکن است رفتارهای مختلفی از جمله انواع حرکات توده ای در مخزن ایجاد کنند(۱ و ۵). در سد مذکور با افت تراز، پدیده لغزش که ریزش حجم عمده ای از

رسوبات است نزدیک خروجی رخ می دهد و این مسئله باعث افزایش غلظت خروجی در هنگام آبشویی شد (شکل ۱۴).

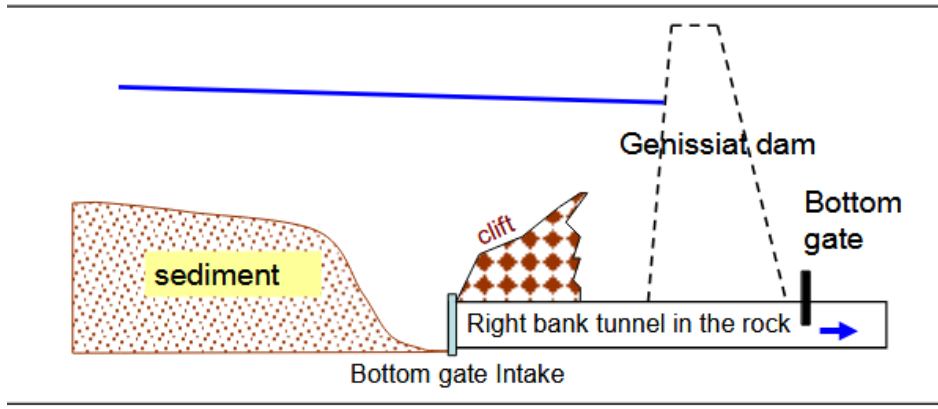


شکل ۱۴: غلظت بار معلق از دریچه تحتانی سد Genissiat در طول آبشویی [16]

درک این پدیده لغزش در مدلی به نام RubarBE توسط Irstea (2006) توسعه یافته است.

- ریسک حضور دیوار رسوبی جلوی دریچه

اگر نیاز به درک جریان در محدوده دریچه به دلیل حضور یک دیواری محکمی از رسوبات باشد باتوجه به وجود جریان غلیظ، این نوع جریان نیوتنی نبوده و لذا فقط معادلات هیدرولیکی که در عمده مدل ها وجود دارد رفتارها را توضیح نمی دهد. در اینجا باید از مدل های مقیاسی یا آزمایشگاهی-فیزیکی بهره برد. جریان در این محدوده سه بعدی می باشد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: رسوبگذاری در جلوی دریچه تحتانی سد Genissiat [16]

- انتخاب مدل آبشویی سد Genissiat

مخزن این سد مانند سد رودبار لرستان در ایران باریک می باشد. همچنین اغلب دامنه های کوه مجاور مخزن آن از صخره های آهکی تشکیل شده است. این صخره ها باتوجه به املاح خود ممکن است سخت یا نرم باشند. اگرمواد عمده از نوع مارن با رس اماس پذیر باشند پدیده لغزش مشاهده می شود. برای مدلسازی آبشویی این مخزن می توان از یک مدل یک بعدی که حرکت مواد بستر را نیز درک کند (Mobile bed) نیاز است.

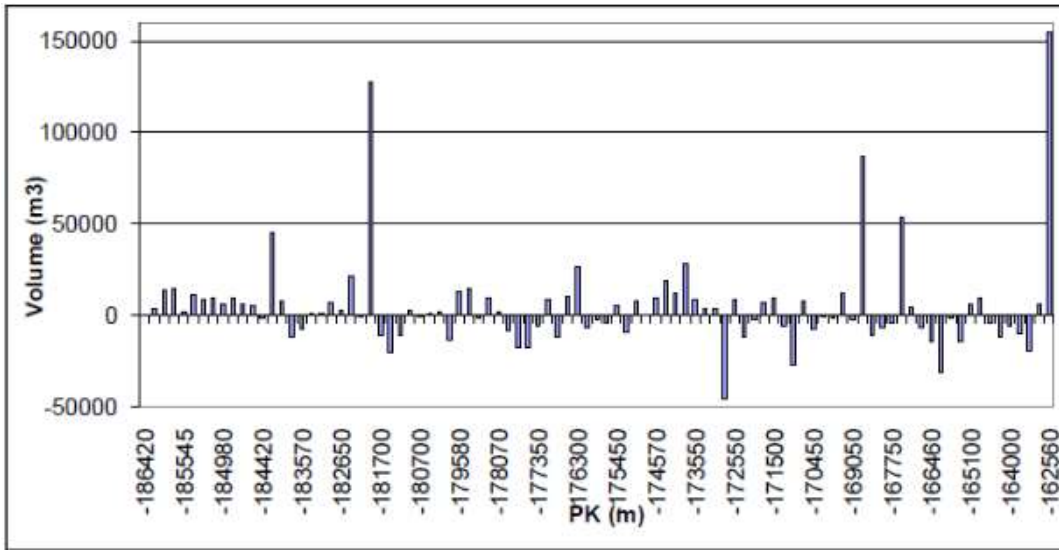
همچنین علاوه بر مدل ریاضی و اندازه گیری مستقیم از روش های تجربی Engelung Hansen و Bagnold,1966 نیز استفاده شده است.

مواردی که از خروجی مدل و روش ها می توان بهره گرفت:

- درک بهتر جهت بهبود شرایط زیستی پایین دست
- درک خصوصیات فیزیکی و دینامیکی رسوبات ورودی به سد

- تفکیک اثرات بار معلق و بار کف
- درک بهتر فرایندهایی که باعث افزایش غلظت خروجی می شود
- تعیین شرایط آبشویی کارا از نظر میزان زمان بازمانگی دریچه و شرایط
- برسی لغزش ها و آبشستگی نزدیک دریچه، کانال فلاشینگ و فرایند این نوع فرسایش های موضعی به کمک مدل های جزئی تر.

در شکل ۱۶ می توان نتایج شبیه سازی مدل مذکور را پس از یک دوره طولانی واسنجی که از اطلاعات ۲۰۰۳ استفاده کرده مشاهده کرد. مقدار بار کف خروجی از دریچه به کمک ابزار هلی اسمیت و بار معلق با روش گاما در کنار دانه بندی ذرات اندازه گیری شده است.



شکل ۱۶: محاسبه زون های فرسایش و رسوبگذاری در مخزن سد Genissiat [16]
(منفی علامت فرسایش و مثب علامت رسوبگذاری)

۲-۶ پیامدهای آبشویی

وقتی هدف آبشویی باشد باید روش ها و پیامدهای آبشویی قبل از اجرایی شدن بررسی شود. برخی از این موارد را می توان به کمک مدل های ریاضی بند پیش ارزیابی نمود. به طورکلی باید پیامدهای آبشویی

ناشی از بار کف و معلق از منظرهای مهندسی مانند آبشستگی ها و فرسایش در طول مسیر بالادست و پایین دست سد، بنده سد، سازه های رودخانه مانند پل ها و اجزای آن در کنار مسائل زیستی اکوسیستم پایاب در مسیر رودخانه ارزیابی شود. در اینجا مهم ترین مسئله البته توجه به افزایش عمر مفید سد به کمک تخلیه رسوبات است که به عنوان هدف اصلی و محوری می بایست برای ۳۰ تا ۵۰ سال اتی مورد توجه و برنامه ریزی شود.

به طورکلی پیامدهای آبشویی شامل خسارات به اجزای بدنه سد تا ایجاد مسائل زیستی همچون خسارات مشابه ناشی از عدم آبشویی که در بندهای پیش ذکر شد می بایست لیست و برآیند عواقب بررسی و تصمیم گیری شود.

فصل ۳
اصول امکان سنجی تخلیه رسوب سدها

۳-۱ ضرورت مطالعات امکان سنجی

بررسی امکان سنجی و اثر بخشی یا کارائی آبشویی رسوبات مخازن سد، از جنبه های مختلف هزنیه های تحمیل شده زیستی تا نیاز به ظرفیت پایدار مخزن، می تواند در دو فاز صورت بگیرد. در این فصل فاز مقدماتی بر اساس معیارهای ساده پایه ریزی می شود. مطالعات دقیق تر می تواند بر اساس برداشت داده های میدانی با مدل های عددی و روش های تجربی در کنار روش های مقدماتی این فصل جهت تصمیم گیری در خصوص طراحی و مطالعه اثربخشی آبشویی قبل از اجرایی شدن استفاده شود. بر اساس مطالعه روی نتایج واقعی آبشویی ۱۴ سد دنیا مشخص شد معیارهای که در این فصل ارائه شده انطباق قابل قبولی با واقعیت داشته است.

به طورکلی حداقل اطلاعات مورد نیاز از اثربخشی آبشویی شامل ۱- مقدار رسوب تخلیه شده از مخزن که انتظار است این مقدار حدقل با رسوبگذاری بین آبشویی ها برابر باشد، ۲- ظرفیت آزاد شده از آبشویی که برای کارائی بالا حداقل نیاز است ۵۰ درصد ظرفیت اولیه مخزن، ذخیره پایدار ایجاد شود.

بر اساس بررسی ۱۴ سد مذکور مشخص شد که آبشویی در ۴۲ درصد این سدها باعث آزاد شدن بیش از ۵۰ درصد ظرفیت پایدار از حجم اولیه مخزن شده است و معیارهای ارائه شده در این فصل نیز به خوبی

این مسئله را پیش بینی کرده است. ولی در سایر سدها (معادل ۵۸ درصد)، آبشویی کمتر از ۳۰ درصد ظرفیت آزاد برای مخزن مهیا کرده است[17].

باتوجه به اینکه سالانه حجمی (حدود ۱ درصد حجم سدهای دنیا، Yoon,1992) از مخازن سدها در در دنیا طی فرایند رسوبگذاری در حال کاهش است و همچین در حال حاضر عمده سایت ها مناسب سدسازی استفاده شده، لذا در آینده مسئله تامین آب از سدهای موجود بسیار اهمیت دارد. در حال حاضر علاوه بر اینکه سایت های مناسب سدسازی کم شده، و فشارها و حساسیت های محیط زیست نیز افزوده شده اند، لذا علاوه بر روش های مدیریت رسوب سدها جهت کاهش رسوبگذاری، روش های آبشویی در جایی که امکان داشته باشد، عموما" یکی از روش های مناسب و کم هزینه تر تخلیه رسوبات مخزن در مقابل سایر روش های مکانیکی و لایروبی جهت بهره برداری پایدار ظرفیت سدها هستند.

در این فصل معیارهای کمی توسعه داده شده و روش های محاسبه انها با داده های واقعی ۱۴ سد آبشویی شده در دنیا [17] جهت بررسی امکان سنجی و اثربخشی فلاشینگ، در خصوص مطالعه و طراحی اینکه آیا در آن سد، امکان احیای ظرفیت از دست رفته برای حفظ و بهره برداری در درزامدت وجود دارد یا خیر معرفی و بررسی می شود.

همچنین لازم به ذکر است روش های آبشویی که در این مجموعه اشاره شده، تنها روش تخلیه رسوبات معلق نیستند. در این خصوص می توان به منبع [18] جهت مطالعه بیشتر مراجعه نمود.

۳-۲ آبشویی با سیل فصلی

روش آبشویی مورد نظر دراین فصل، روش استفاده از سیلاب فصلی بوده که با افت تراز (Drawdown) مخزن طی هفته ها یا ماه ها و ورود سیلاب های با بار معلق زیاد، عمل تخلیه رسوبات صورت می گیرد. این نوع آبشویی اغلب Sluicing نام دارد.

مطالعه موردی

- در سد Mangahao نیوزیلند، طی ۳۴ سال پس از اولین آبگیری، ۵۹ درصد حجم مفید سد پر شد. با عملیات فلاشینگ (آبشویی) در این این سد در سال ۱۹۶۹ طی یک ماه، توانستند ۷۵ درصد رسوبات جمع شده را تخلیه کنند (Jowett,1984).

۳-۳ معیارهای ارزیابی اثربخشی آبشویی

معیارهای اثربخشی آبشویی ممکن است برای هر روش آبشویی متفاوت باشد ولی اصول کلی آن یکسان است. به عنوان مثال دلیری، ۱۳۹۳ جهت بررسی مسئله محاسبه اثر فلاشینگ روی تلفات آب مخزن و اقتصادی بودن آن و سایر ملاحظات فنی سد رودبار لرستان موارد زیر را به صورت تجربی باتوجه شرایط منطقه لحاظ کرد:

به طورکلی حداقل شرایط امکان پذیری شاس رسوب با روش سیل فصلی (Sluicing) (تخلیه رسوبات) به شرح زیر می باشد (این روش با روش آبشویی سیلاب دانسیته متفات است):

-پایین بودن نسبت حجم مخزن به جریان ورودی (خالی بودن نسبی مخزن). یک معیار کمی و کلی در این خصوص نسبت ۱ به ۵۰ (۱/۵۰) یا نسبت ظرفیت مخزن به جریان سالانه ورودی است که هرچه به این نسبت نزدیک و کمتر باشد معرف کارائی بیشتر آبشویی است. با این وجود بررسی های میدانی حاکی از ان است که این معیار همیشه درست نبوده است.

-جریان های فصلی سیلاب با دانسیته و نیروی کافی. دانسیته سیلاب ممکن است در اثر وجود رسوب با دانه بندی مناسب، وجود املاح و نمک، دما یا تمامی موارد ایجاد شود. این موضوع می تواند معیار مهمی در اثربخشی انواع روش های آبشویی داشته باشد و نیاز به افت تراز را کمتر نماید.

-شیب تند و دره باریک مخزن.

درصورت وجود حداقل شرایط مذکور می بایست با مدلسازی رفتار مخزن در سناریوهای مختلف اثر شاسینگ روی کارائی تخلیه رسوب (توصیه می شود حداقل ۵۰ درصد باشد) و شرایط بهره برداری ارزیابی گردد. شرایط بهره برداری شامل تغییر در ترازهای مورد نیاز و درصد تضمین تامین های چندگانه طرح می باشد. بدیهی است که با اجرای عملکرد مخزن می توان بهره وری عملیات شاسینگ را ارزیابی و نسبت به اجرای آن تصمیم گیری نمود. ضمناً اگر قرار باشد دریچه تحتانی روی تراز بهینه شاسینگ اجرا گردد می بایست موارد زیر توجه شود:

-باتوجه به اینکه در این شرایط تراز مرده ممکن است بسیار بالاتر از تراز دریچه شاسینگ باشد می بایست زمان مناسب فلاشینگ باتوجه به تحکیم رسوبات و آورد رسوب رودخانه تعیین و عملیاتی شود. لذا شاید بهتر است در طراحی قبل از ساخت، محور بهینه عملیات شاسینگ با مدلسازی تعیین شود تا محور دریچه تحتانی در آن راستا قرار گیرد.

- در طی هر عملیات فلاشینگ، کانالی به نام کانال شاسینگ (فلاشینگ) در محور میانی رودخانه – مخزن ایجاد می شود. این کانال بین هر عملیات تخلیه رسوب از گل و لای و رسوبات درشت تر پر شده و لذا عملیات لایروبی کانال شاسینگ (با روش های سیفون یا هیدرولیکی روش های لایروبی) یا تناوب بیشتر فلاشینگ نیز می بایست مورد توجه باشد.

-در صورتیکه سیلاب های مورد نیاز در زمان مناسب فراهم نباشد می توان با احداث سد و ایجاد سیلاب های مصنوعی عملیات شاسینگ را انجام داد.

-بر اساس مطالعات Pitt and Thompson, 1984 ذکر شد، آبشویی موثر عموما" وقتی مشاهده می شود که تراز مخزن به حدود نصف ارتفاع سد رسیده باشد و ظرفیت دریچه خروجی حداقل بین ۲ تا ۲,۵ برابر جریان سالانه باشد.

-یک معیار مهم دیگر این است که مقدار رسوبات خروجی از دریچه تخلیه تحتانی در زمان فلاشینگ آنقدر باشد تا یک تعادل مناسب طولانی مدت، بین رسوب ورودی و خروجی برقرار شود. این معیار به نام نسبت SBR در بند بعدی کمی شده و می بایست طوری باشد تا یک ذخیره مناسب ایجاد گردد.

-یک معیار دیگر این است که هزینه های فلاشینگ، از منافع بیشتر نشود. هزینه ها شامل آب از دست رفته در زمان فلاشینگ، هزینه خسارات و تعمیر دریچه ها در اثر ذراتی مانند گرانیت یا هزینه های ساخت و جایگزین کردن یک دریچه جدید، هزینه های غیر ملموس زیست محیطی و اجتماعی ناشی از رسوبات با غلظت بالا در پایاب سد و سیستم رودخانه (۱) (مانند کاهش تخم ریزی ماهی ها و کاهش صید و اقتصاد

مردم)، و سایر موارد خاص هر منطقه که ممکن است پس از مطالعه مشخص شود. منافع مستقیم اصولا" ارزش آب اضافی که در سد ذخیره می شود را شامل می گردد.

۳-۳-۱ روش نسبت تعادل رسوب (SBR)

رابطه معیار نسبت تعادل رسوب معادل نسبت جرم رسوبات فلاشینگ شده سالانه به جرم رسوبات دپو شده سالانه بوده و به صورت زیر بدست می آید:

$$SBR = \frac{Q_s T_f}{N M_{in} TE}$$

اگر این نسبت از واحد بیشتر شود یعنی تعادل رسوب ایجاد می شود و لذا کارائی آبشویی مناسب است.

$$Q_s = \Psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{W^{0.6}}$$

(رابطه Tsinghua University Method)

Q_s: ظرفیت انتقال رسوب (ton/s) از مخزن در حال آبشویی.

T_f: تداوم آبشویی.

N: فاصله بین آبشوی ها به سال.

M_{in}: مقدار رسوبات ورودی که می توان از روش های فصل ۱ و آنالیز رسوب ایستگاهی استفاده نمود.

TE: راندمان تله اندازی رسوب مخزن از منحنی براون (شکل ۱)

Q_f: دبی آبشویی (m^3/s). روش تعیین دبی در ادامه ارائه شده است.

S: شیب کف که ممکن است با شیب رودخانه قبل از رسوبگذاری یکی باشد(m/m).

W: پهنای کانال آبشویی (m). از رابطه زیر باتوجه به شرایطی که در ادامه و مثال ارائه شده است .

$$W = 12.8 Q_f^{0.5}$$

Ψ: ضریب ثابت که به نوع و شرایط رسوبات مثلا" وضعیت سفت شدن، و قطر ذرات رسوب بستگی داشته و باید بر اساس واسنجی از داده های واقعی برای مطالعات دقیق تر و یا از ارقام توصیه شده توسط دلیری، ۱۴۰۰ که بر اساس داده های موجود در دنیا و شرایط مشخص محاسبه شده برای بررسی های اولیه فاز ۱ از جدول ۱ استخراج نمود.

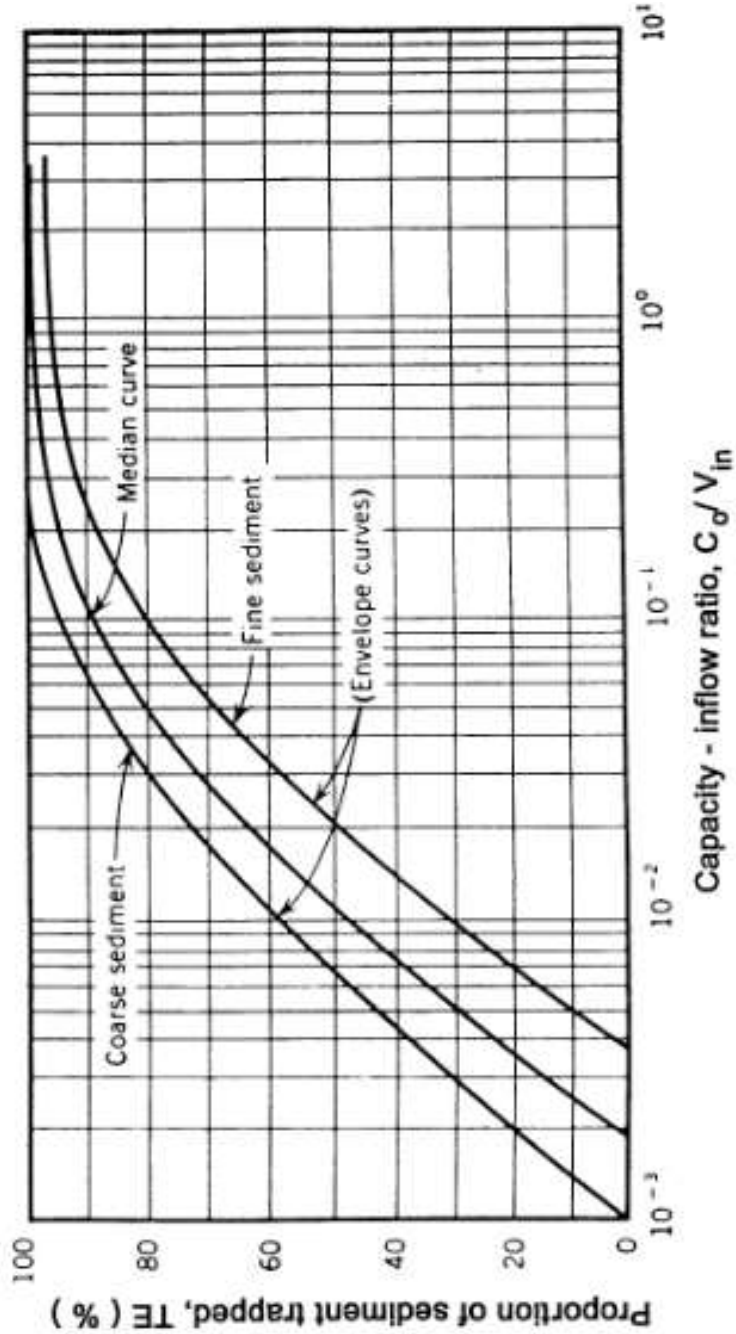
جدول ۱ مقادیر ثابت معادله TUM جهت بررسی کارائی آبشویی پیشنهادی دلیری، ۱۴۰۰

Ψ	مشخصات رسوب، دبی و فواصل آبشویی
۱۶۰۰	رسوبات از نوع لای (Loess) و آبشویی سالانه (عدم سفت شدن رسوبات)
۶۵۰	رسوبات ریز ($D_{50}<0.1mm$) و آبشویی سالانه
۳۰۰	رسوبات متوسط ($D_{50}>0.1mm$) و آبشویی سالانه
۱۸۰	آبشویی سالانه با دبی های پایین
۱۱۴	آبشویی با دبی معرف ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه و ذرات عمدتا" شنی ($0.5>D_{50}>0.1$)
۶۷	آبشویی با دبی معرف ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و ذرات عمدتا" شنی ($0.5>D_{50}>0.1$)
۴۵	آبشویی با دبی معرف ۴۰ مترمکعب بر ثانیه و آبشویی ۲ ساله با رسوبات سیلتی
۳۰	رسوبات ریز ($D_{50}<0.1$)، ۸۰ درصد رسوبات سیلتی – رسی، آبشویی پس از سال ها از آبگیری

*‘‘سایر شرایط را می توان ارزیابی و به صورت تجربی درویابی یا برون یابی نمود’’

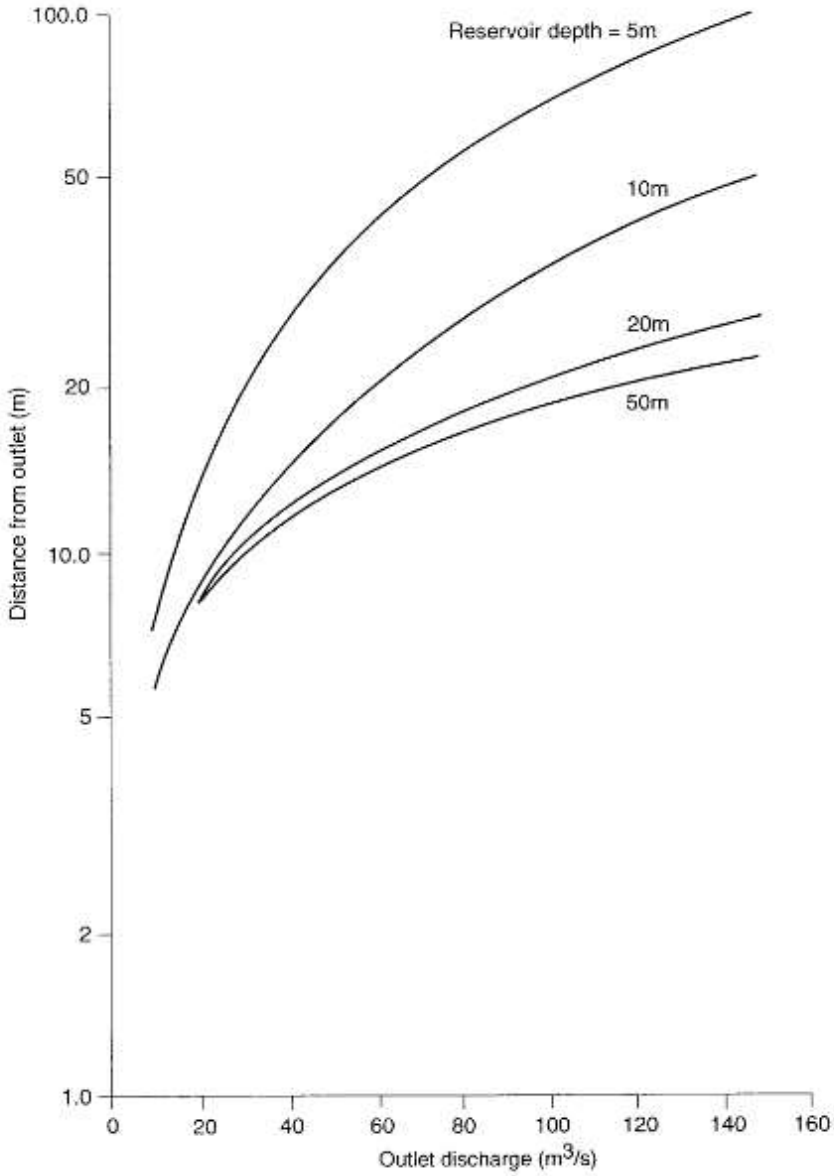
روش آبشویی با افت کامل، یعنی آنقدر تراز مخزن پایین بیاید، تا عمق جریان رودخانه به شرایط قبل از آبگیری برسد. عموما" آبشویی های بدون افت کامل، کارائی کمی دارند مگر اینکه از سیلاب های دانسیته بدون افت قابل توجه تراز استفاده شود که البته آن روش نیز قطعی نیست.

باید توجه کرد وقتی دریچه تحتانی باز می شود، سرعت در نزدیکی دریچه زیاد شده و باعث آبشستگی موضعی می شود و لذا در فاصله بیشتر از دریچه، سرعت کم و بدون آبشستگی خواهد بود. این موضوع بر اساس تحقیقات با یک مدل غیر لزج ساده و معیار سرعت کف معادل ۰٫۱ متر بر ثانیه به عنوان آستانه فرسایش، بررسی و تایید شده است (شکل ۲)



شکل ۱ منحنی براون جهت تعیین درصد تله اندازی رسوب مخازن سد

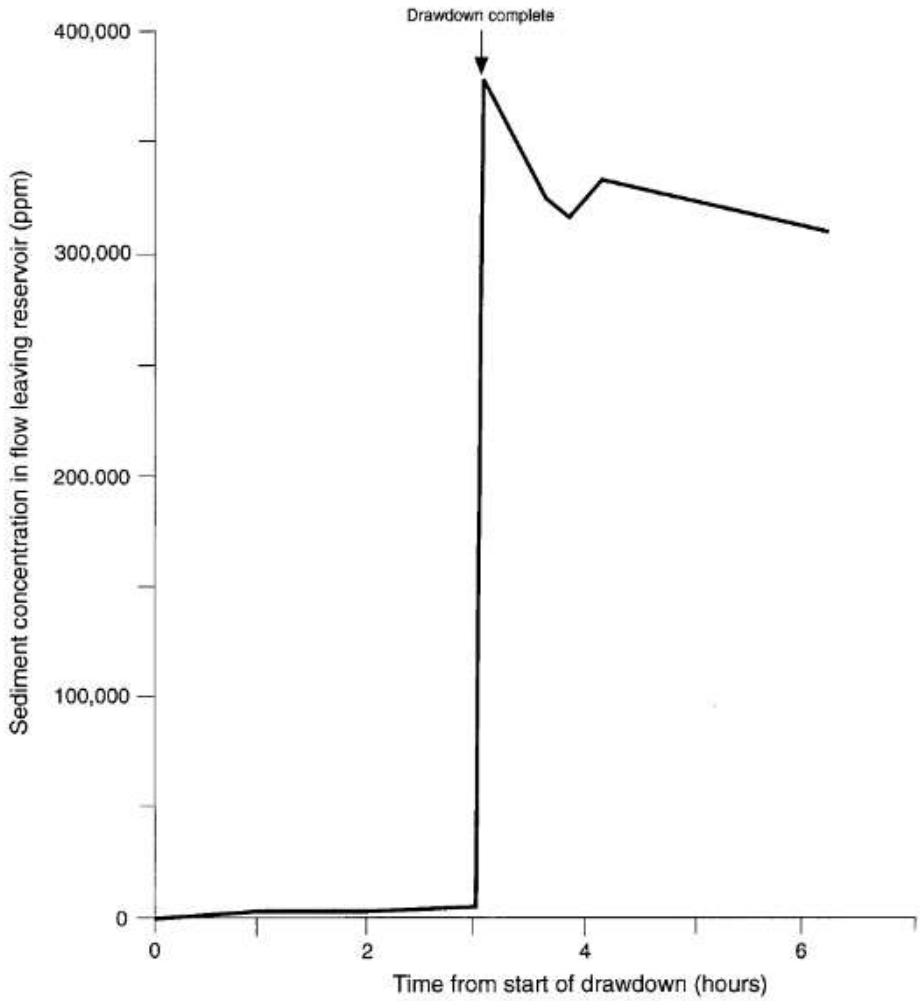
(منحنی چرچیل نیز قابل توصیه است)*



شکل ۲: محدوده آبشستگی آبشویی با افت ترازهای مختلف مخزن فرضی [White and Bettess,1984]

بر اساس مدلسازی عددی سه بعدی جریان غیر لزج و لحاظ اثر آشفتگی، آستانه تنش برشی آبشستگی و زبری بستر نتایج شکل ۲ تایید شد و البته مشخص شد که فاصله آبشستگی در شکل ۲ زیادتر برآورد شده

است(فصل مدلسازی). به طورکلی وقتی برای اولین بار دریچه باز می شود، اگرچه هد مخزن با سرعت و دبی دریچه متناسب است، ولی تغییرات شتاب سرعت در ابتدا بسیار موضعی است. همچنین مدت زمان و جنس رسوبات روی سفت شدن و تنش آستانه کنش اثر می گذارد. با این وجود وقتی تراز آب کاهش و مخزن نزدیک به خالی شدن می شود بیشترین کارائی ابشویی مشاهده می گردد(شکل۳).



شکل۳: غلظت خروجی رسوبات سد Baira در هند در ترازها پایین و افت کامل

در افت های ناقص تراز و یا وقتی ظرفیت خروجی دریچه کم باشد، افت تراز اغلب در بالادست و مخزن مشهود بوده و لذا در آن ناحیه فرایند رسوبگذاری و فرسایش به صورت متناوب باتوجه به نوسان تراز دیده می شود. در واقع ممکن است تراز کف رودخانه در سراب طی سال هایی بیشتر و طی سال هایی کمتر شود. اگر ضریب ثابت Ψ در روش(TUM (IRTCES,1985 به درستی محاسبه و و اسنجی شود مقدار خطای این رابطه با احتمال ۸۷درصد حدود ۱۳ درصد خواهد بود. با این وجود اغلب به دلیل نبود اطلاعات و گرده ای بودن این رابطه برای مقادیر ثابت، و همچنین تغییر دبی ممکن است خطا از داده های مشاهده ای بین نصف تا دو برابر نیز برسد. که البته در مطالعات فاز اول آبشویی قابل قبول است.

۳-۳-۱-۱ ملاحظات فنی

اگر نسبت $SBR>1$ باشد به این معنی است که کارائی روش آبشویی طرح شده احتمالا" رضایت بخش خواهد بود. اگر این نسبت در وضع موجود و قبل از طراحی و ساخت پایین است، باید سیستم را طوری طراحی نمود تا این نسبت بیشتر از یک شود تا کارائی آبشویی رضایت بخش شود. اگر سد ساخته شده است باید روش آبشویی را عوض کرد. به عنوان مثال تغییر در فصل هایی که دبی بیشتری تامین می کنند و یا تعبیه دریچه های بزرگتر در سد می تواند بررسی شود. در خصوص محاسبات متغییرهای روابط این روش در بند و فصول قبل مطالبی ذکر شد. در ادامه ملاحظات فنی دیگری با ذکر مثال ارائه می گردد:

- پیش بینی دبی آبشویی (Q_f)

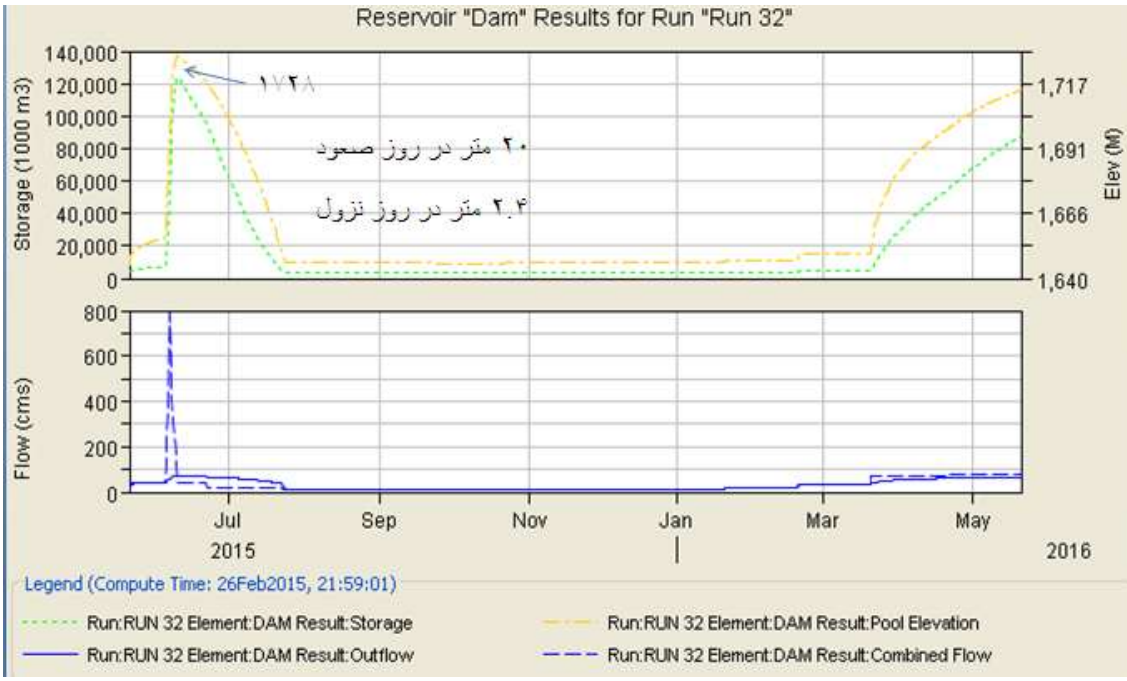
پیش بینی دبی آبشویی مخزن می تواند به کمک مدلسازی خروجی دریچه های سد و ترسیم هیدروگراف آن و نهایتا" انتخاب دبی معرف که نزدیک به دبی حداکثر است و ممکن است حدود ۸۰ درصد دبی اوج باشد، در روش TUM انتخاب گردد. راه دیگر تبدیل هیدروگراف خروجی مخزن به سدیگراف رسوب لحظه ای است(۳). حجم زیر این منحنی به عنوان حجم رسوبات آبشویی شده خواهد بود که باتوجه به سطح زیر هیدروگراف جریان، می توان غلظت رسوبات را برحسب PPM نیز تعیین نمود.

با این وجود انتخاب دبی معرف نیاز به تجربه و ملاحظات فنی هیدرولوژیست نیز دارد. ملاحظات فنی یعنی اینکه این دبی در عمل توسط دریچه های سد تامین می شود یا خیر. علاوه بر محدودیت های زیستی دبی رسوب آبشویی که در فصل پیش ذکر شد، نرخ افت تراز باید در محدوده مجاز ایمنی بدنه سد باشد.

مسئله نرخ صعود و تراز آب در سدهای خاکی و بتنی و به ویژه مسئله افت در سدهای خاکی حائز اهمیت است. اهمیت این مسئله در آبگیری های اولیه دو چندان می شود. در این خصوص می توان ظرفیت تخلیه کننده ها و رفتار مخزن را به کمک مدل هایی همچون HEC-HMS بررسی نمود – دلیری ۱۳۹۳ بحث کاملی در خصوص آبگیری و آنالیز ریسک سیلاب های ورودی انجام داده است (۱ و ۱۵).

جزئیات محاسبات عمده موارد مرتبط با سیل ورودی و آبگیری اولیه سد، در فصل های ۱ تا ۳ و پیوست مرجع ۱ همین مولفین ارائه شده است. جهت مطالعه بیشتر زمینه های مدلسازی بارش–رواناب و سیستم های پیش بینی و هشدار سیل و مدیریت بحران سیل به کتاب زیر یا مرجع ۱ و 8 همین مولف مراجعه شود.

Kevin Sene , Flood warning, Forecasting and Emergency Response.2008
Keith Beven, Rainfall-Runoff Modelling, 2012



شکل۴: شبیه سازی مخزن سد رودبار لرستان–سد خاکی با هسته مایل رسیGC–آنالیز ریسک آبگیری دلیری ۱۳۹۳ مرجع ۱

انتخاب دبی ممکن است به صورت اولیه و فرضی باشد. به طورکلی وقتی مخزن در حال افت است دبی ابتدا کم و سپس زیاد می شود و بعد از ایجاد یک حداکثر، با تناسب افت تراز شروع به کاهش می نماید. وقتی مخزن خالی شود، دبی برابر دبی رودخانه در همان فصل می گردد که می توان مقدار متوسط ان را از روی آنالیز سری زمانی ایستگاه ورودی مخزن محاسبه نمود. در زمان طراحی باید ظرفیت مناسب دریچه ها انتخاب شود. در واقع ممکن است افزایش قیمت بزرگتر شدن دریچه همیشه غیر اقتصادی نباشد زیرا در غیر اینصورت ممکن است در زمان فلاشینگ، با مشکل روبرو شد. اگر دبی ورودی و فلاشینگ زیادتر از ظرفیت طراحی خروجی باشد، مسئله رسوبگذاری در سراب سد به دلیل برگشت آب مشاهده می شود. لذا در زمانبندی آبشویی با روش افت کامل باید به مقدار دبی رودخانه و ظرفیت دریچه ها نیز توجه نمود. همچنین مسئله ایجاد سیل مصنوعی پایاب سد و مسائل زیست محیطی رسوب نیز باید توجه شود.

- T_f: تداوم آبشویی.

تداوم آبشویی به حجم مخزن نیز بستگی دارد. در مخازن کوچک ($x<14Mm^3$) ممکن است پس از ۳ ساعت نیز اوج غلظت مشاهده شود. به طورکلی دبی رسوب در ساعات اولیه آبشویی (۸ تا ۱۰ ساعت اول) مهمترین زمان جهت بررسی کارائی آبشویی است و پس از آن اغلب باتوجه به جنس رسوبات و اینکه رسوبات تحکیم شده اند یا خیر، شرایط ثابت شده و دبی جریان کم رسوب مشاهده می شود. انتخاب تداوم و فراوانی باتوجه به اینکه قرار است آبشویی از چه روشی باشد و میزان تناوب آبشویی ها که در سد انجام شده است فرق دارد. مثلا" در روش افت ناچیز تراز همراه سیلاب فصلی به تداوم سیلاب بستگی دارد و در روش با افت کامل تراز بدون سیل باتوجه به بزرگی مخزن و ظرفیت تخلیه کننده ها ممکن است روزها و هفته ها طول بکشد (شکل۴) و یا در روش بدون افت تراز با سیلاب دانسیته ممکن است یک میزان دبی و تداوم دیگری ایجاد شود. همچنین ظرفیت دریچه های تخلیه تحتانی نیز مهم است.

تجربه فلاشینگ در برخی از سدها که مدت های زیادی است آبشویی نکردند نشان داده بسته به جنس رسوبات مسئله متفاوت است. مثلا" اگر جنس رسوبات جلوی دریچه از نوع شن و ماسه یا رس های غیر آماس پذیر غیر چسبنده باشد ممکن است در ساعات ابتدایی آبشویی، حجم زیادی از غلظت رسوبات مشاهده شده و سپس کاهش چشمگیری ایجاد گردد. در گزارشات دیگر بر اساس داده های سدی در

هند Ichari, India,1987 آبشویی با جریان آزاد طی یک روز در سال ۱۹۸۱ انجام شد. غلظت حداکثر رسوبات تا ۹۱۰۰۰ ppm گزارش شد.

انتخاب تداوم در عملیات واقعی علاوه بر موارد بالا به نسبت ظرفیت مخزن به جریان ورودی، اهداف آبگیری مخزن و بار رسوبات ورودی مرتبط است. از نظر مولفین عدم قطعیت های روابط بالا عمدتا" دبی و تداوم و ضریب ثابت می باشد. ایشان توصیه کردند در صورت نبود اطلاعات جهت واسنجی ضریب ثابت معادله، ابتدا ضریب ثابت بر اساس جدول ۱ پیشنهادی دلیری، ۱۴۰۰ انتخاب شود. تداوم نیز می تواند انقدر باشد تا ابتدا غلظت حداکثر رسوب و سپس شرایط پایدار با جریان بدون رسوب یا کم رسوب ایجاد شود. لذا می توان طوری تداوم را انتخاب کرد که باتوجه به ظرفیت تخلیه کننده، نسب SBR بیشتر از ۱ شود.

- W: پهنای کانال آبشویی.

یکی از عدم قطعیت های روابط دبی-پهنا که پیشتر نیز اشاره شد، تعیین پهنای کانال فلاشینگ است. اگر یک دبی برای طرح آبشویی لحاظ شود می توان به کمک رابطه بالا مقدار ان را در شرایطی که رودخانه آبرفتی است و محدودیت پهن شدن به دلیل دیواره های سنگی مخزن نباشد برآورد نمود. در مخازن باریک با سازندهای سخت بستر و کنار رودخانه، می بایست پهنای اولیه رودخانه را قبل از آبگیری برداشت نمود. بدیهی است بین این دو عدد باید ارزش کمتر را برای پهنا در محاسبات آبشویی لحاظ نمود. اگر به جای تک دبی از هیدروگراف دبی چنانچه در بالا نیز تشریح شد، استفاده گردد می توان دبی وزنی هیدروگراف را با لحاظ وزن بیشتر به دبی های حداکثر، انتخاب و از رابطه بالا عرض کانال آبشویی را تخمین زد. با این وجود در صورت وجود داده دبی-رسوب دریچه، محاسبه رسوب از منحنی سدیگراف به جای رابطه TUM نیز می تواند جهت کنترل نتایج مفید باشد. به طورکلی بررسی های میدانی قبل و پس از آبگیری جهت تدقیق و کنترل در صورت امکان به ویژه زمان پیمایش مخزن توصیه می شود.

- S: شیب کف کانال.

هدف اصلی آبشویی، حفظ تراز کف مخزن در محل رودخانه و در عرض و مقاطع پایاب تا سراب سد می باشد. لذا قراردادن شیب کانال فلاشینگ با شیب رودخانه قبل از آبگیری منطقی است. زیرا در انتهای فرایند آبشویی، شیب کانال احتمالا" با شیب رودخانه قبل از آبگیری یکی می شود. با این وجود شیب کف کانال ممکن است بر اساس اختلاف تراز حداکثر و تراز آبشویی نسبت به طول مخزن محساسبه شود. طول مخزن به کمک شیب مشخص رودخانه و ارتفاع سد از پایه تا تاج (شکل های مثال زیر: تصاویر کمکی) و تانژانت زاویه محاسبه می شود.

۳-۳-۲ روش ظرفیت پایدار (LTCR)

این روش (Long Term Capacity Ratio) در واقع معیاری برای ارزیابی نتیجه فلاشینگ است و اگر این معیار رضایت بخش باشد یعنی ظرفیت ذخیره مخزن سد بعد از عملیات فلاشینگ، می تواند در یک دوره طولانی بین هر فلاشینگ به صورت پایدار جهت بهره برداری استفاده شود(شکل های مثال).

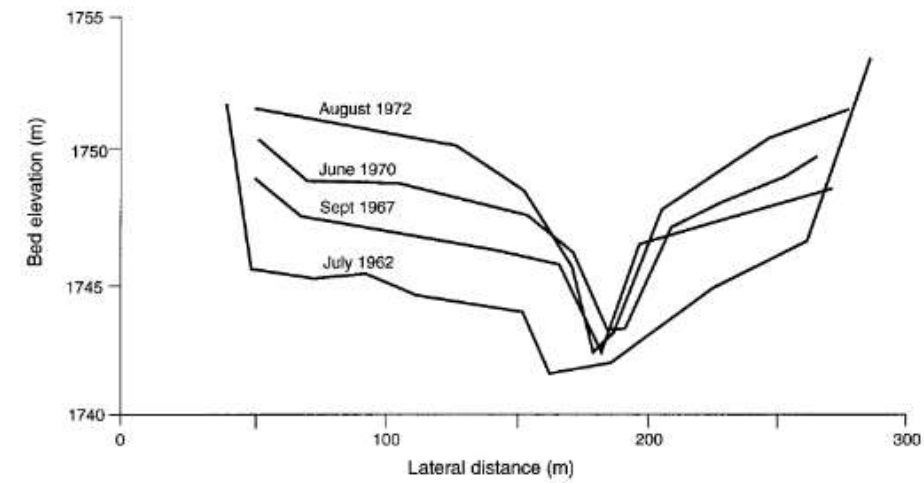
$$\text{LTCR}=\frac{Sustainable\ capacity\ after\ flushing}{Original\ capacity}$$

$$\text{LTCR}=\frac{Area\ B}{Area\ A\ Plus\ Area\ B}$$

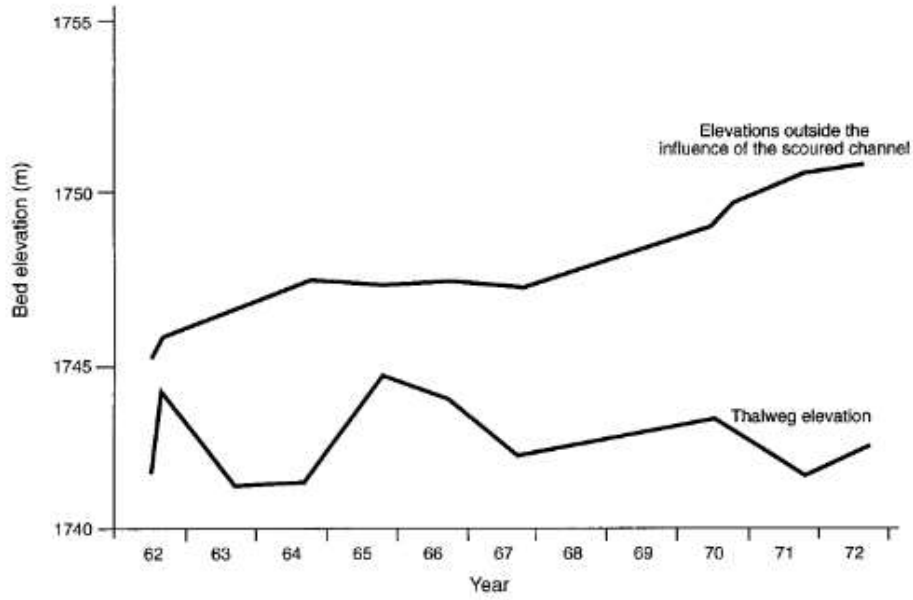
اگر نسب LTCR از ۰,۵ (۵۰ درصد) بیشتر شود یعنی کارائی فلاشینگ قابل قبول است و ارزش های نزدیک واحد نیز نمایان کننده شرایط بهتر معیار می باشد. با این وجود قابل قبول بودن و عملیاتی بودن فلاشینگ وقتی است که این معیار در کنار بررسی های اقتصادی شامل هزینه های فلاشینگ و منفعت های حاصل شده و ملاحظات اجتماعی-اقتصادی و زیستی پایاب سد نیز منطقی باشد.

اگر پهنای ایجاد شده از آبشستگی فلاشینگ بیشتر از پهنای مخزن باشد و یا به عبارتی مخزن باریک باشد، مقدار رسوبات کمی در مخزن بعد از فلاشینگ باقی می ماند که این شرایط بسیار خوب است. البته معمولا" پهنای این کانال کمتر از پهنای مخزن می شود. در شکل ۵ که از یک عملیات واقعی برداشت و ترسیم شده است مشخص است که کانال فلاشینگ با پهنای کم طی سال ها با فلاشینگ ایجاد شده و

تقریبا" مشخصات آن معادل شیب و مشخصات رودخانه اصلی باقی مانده است اما مناطق اطراف آن طی سال ها از رسوب پر شده و تراز آن بالاتر باقی مانده است.



(a) Cross sections showing channel formed by flushing



(b) Variation of elevation with time

شکل ۵: الگوی رسوبگذاری و تشکیل کانال فلاشینگ در مخزن سد Heisonglin ۱۸۰ متر از سراب سد (17)

مخزن سد بالا، در شکل ۵ اگرچه کوچک و حدود ۸,۶ میلیون متر مکعب بود اما حتی با فلاشینگ های نسبتا" منظم خیلی رضایت بخش نبود. در سدهای بزرگ با مخازن ۹۶۴۰ میلیون متر مکعبی نیز چنین نتایجی مشاهده شده است (مخزن سد Sanmenxia,1985).

اغلب شکل کانال فلاشینگ ذوزنقه ای با عمق متناسب با نوسان تراز عملکرد مخزن و تراز کف رودخانه و پهنای معادل آبشستگی با شیب های دیوراه که به زاویه داخلی و مشخصات خاک کناره مخزن مرتبط است. روش محاسبه شیب کناره (Side slope) مخزن در ادامه تشریح شده است. این حجمی که در هر بار فلاشینگ در مخزن ایجاد می شود معادل حجم یا ظرفیت پایدار مخزن (Area B) می باشد.

- پیش بینی شیب کناره کانال فلاشینگ.

جهت پیش بینی و محاسبه شیب های کناره کانال فلاشینگ که در اثر بازشدن دریچه سد ایجاد می شود می بایست یکسری مجهولات و پیش فرض هایی مشخص شود. به طور کلی رسوبات دپو شده ممکن است طی گذشت زمان و در اثر فشار لایه های بالایی و نوسان تراز آب (در معرض و مستغرق شدن) به صورت فشرده و سخت شده (هم جوش) و یا به صورت دانه ای و غیر هم جوش باشند. در حالت همجوش اغلب این دیواره ها به صورت عمودی هستند. در حالت غیر هم جوش شیب یا زاویه دیوار با افق ممکن است کمتر از ۲,۵ درصد نیز برسد. در برخی سدها مشاهده شده است که این شیب نزدیک بدنه سد حدود ۵ درصد و در فاصله های دورتر عمودی هستند. به طور کلی شیب کناره کانال که در اثر فلاشینگ توسعه می یابد به موارد زیر بستگی دارد:

- خصوصیات رسوبات
- درجه هم جوشی (Consolidation)
- عمق رسوبات
- نوسانات تراز آب در زمان فلاشینگ.

مورد اخر در رسوبات عمدتا" شنی به عنوان مثال وقتی عمل فلاشینگ صورت می گیرد و فشار منفذی منفی ایجاد می شود، شیب دیواره ها عموی می شود ولی وقتی دوباره زیر آب می روند و فشار منفذی متعادل می شود بخشی از دیواره ها، ریزش (Collapse) می کنند. جهت پیش بینی حد زاویه پایدار

رسوبات، روابط و گراف هایی بر اساس مفاهیم مذکور و مشاهدات آزمایشگاهی و مدل های عددی توسعه پیدا کرده اند که در ادامه ارائه شده است.

جدول ۲: توصیف کیفی شرایط پایداری رسوبات مختلف تحت شرایط مستغرق و خشک

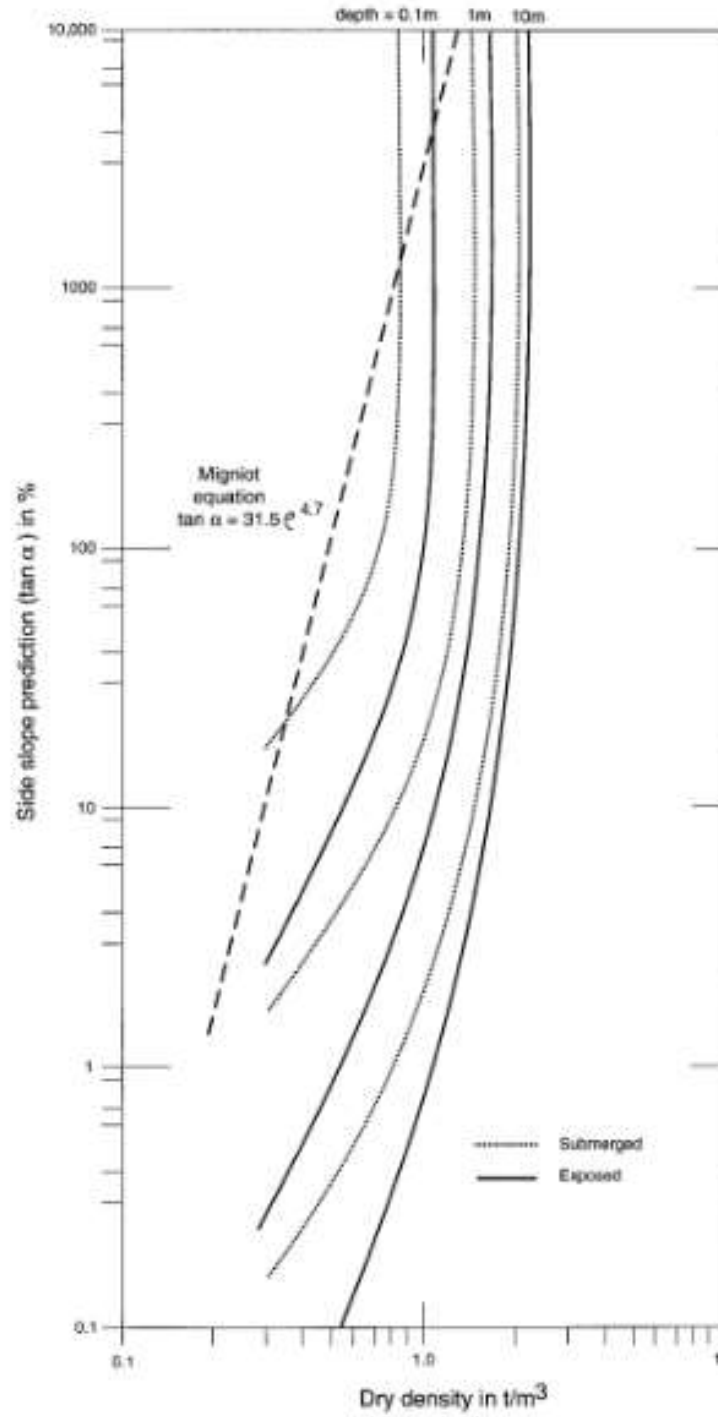
نوع رسوب	خارج آب	زیر آب	نزدیک بدنه سد	دور از بدنه
شن	نزدیک ۴۵ درجه	ریزش		
همجوش	نزدیک عمودی	نزدیک عمودی		
غیر همجوش	از ۲,۵ ٪ آغاز می شود	از ۲,۵ ٪ آغاز می شود	حدود ۵٪	نزدیک عمودی

اگر (α) زاویه شیب پایدار بر حسب درجه باشد طبق مطالعات $\tan\alpha$ با دانسیته خشک رسوبات (ρ_d) متناسب است. مقدار دانسیته رسوبات یا باید با نمونه برداری و یا از طریق رابطه لین و کولزر (۱۹۵۳) برآورد شود. ضریب این تناسب در حالت مستغرق ۶,۳ و در حالت خارج از آب معادل ۳۱,۵ متغییر است. بر اساس مشاهدات با شیب واقعی ایجاد شده در مخازن سدها در اثر فلاشینگ، مشخص شده که این رابطه مشروط به درست بودن متغییر دانسیته و لحاظ شرایط رابطه، حدود ۱۰ برابر کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی زاویه شیب را برآورد می کند.

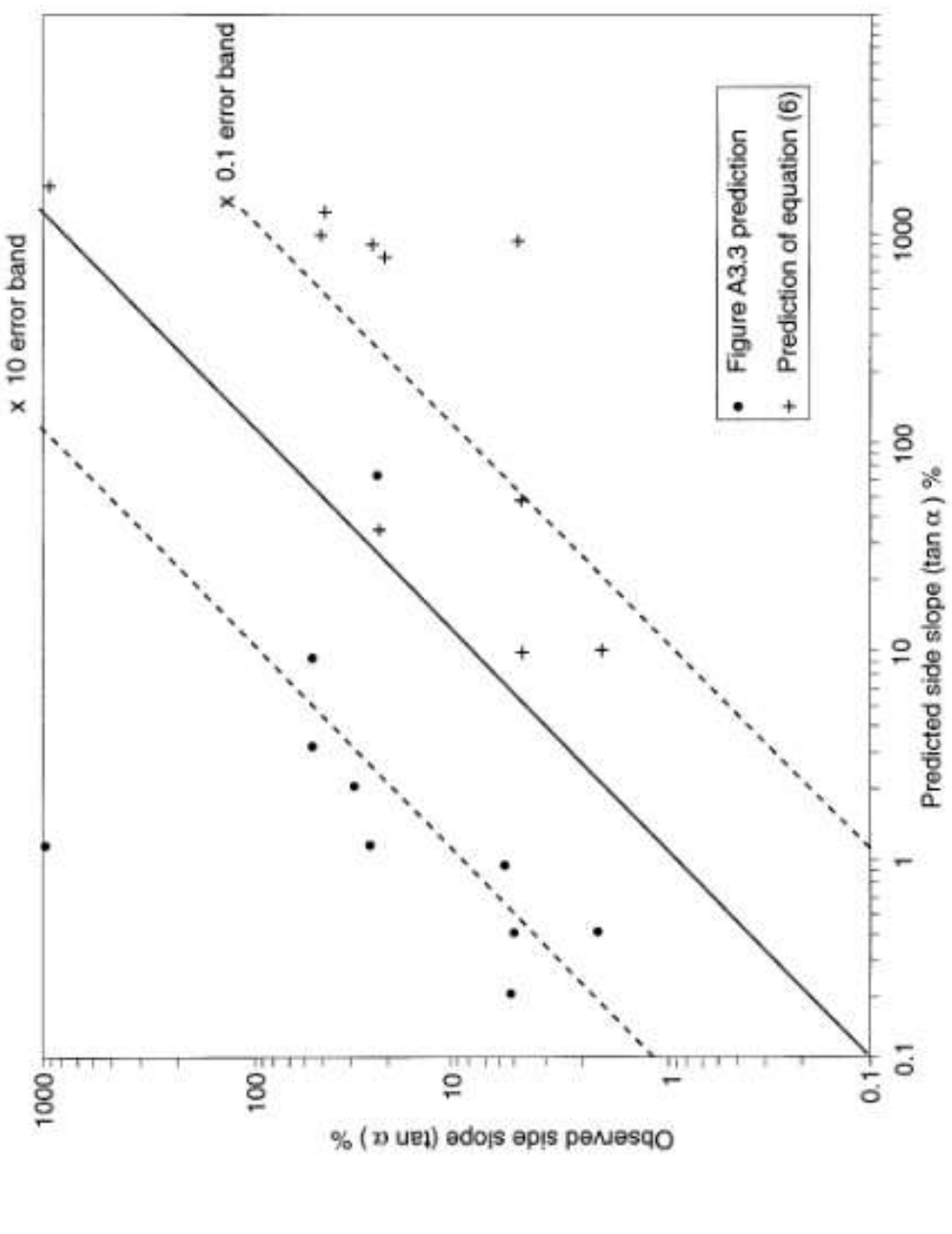
$$\mathrm{Tan}\alpha = \beta\, \rho_d$$

$.(t/m^3)\ \rho_d$

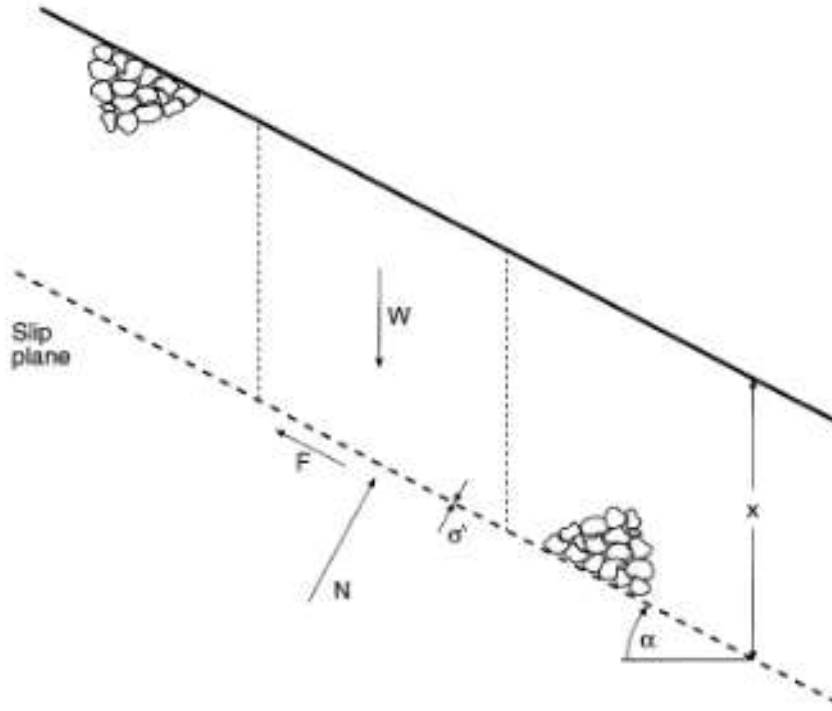
لذا استفاده از این روابط و نمودار شکل ۶ به عنوان روش دوم که از روی مقایسه برآیند نیروها برای شرایط خشک و مستغرق به دست امده است، باید با احتیاط و کنترل میدانی و یا بر اساس مقایسه با نمودار شکل ۷ که از روی نتایج واقعی چند سد (از جمله سد سفید رود) به دست امده، اصلاحاتی صورت بگیرد.
شکل ۶ از روی قوانین فیزیک و با مقایسه برآیند نیروهای وزن توده روی یک سطح لغزش، و تعادل نیروی اصطکاک، وزن و تنش موثر محاسبه شده اند (شکل ۸).



شکل ۶: شیب های پیش بینی شده در حد پایداری (برای رس و سیلت)



شکل ۷: مقایسه نتایج محاسبه شیب های کناری پیش بینی شده و ایجاد شده پس از فلاشینگ



weight W = ρ_{bulk} x g (N/m²)

normal force N = W cos α

friction force F = N tan ϕ if no pore water pressures

ϕ is angle of friction

$F = \sigma' \tan \phi$, where σ' is effective stress

force balance gives F = W sin α

شکل ۸: محاسبه برآیند نیروها اصطکاک، عمود بر سطح، وزن و تنش موثر (واحد سطح)

تنش موثر (σ') در خاک چسبنده برابر تنش کل (σ) منهای فشار منفذی آب (μ) به شکل زیر است:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

فشار منفذی در حضور آب و در خاک های چسبنده غیر شنی قابل توجه است. اگر رسوبات از شن خالص تشکیل شده باشد، فشار منفذی وجود ندارد و لذا در محاسبه تعادل برآیند نیروها مقادیر $\alpha=\emptyset$ برقرار خواهد بود. α زاویه شیب پایدار و $\emptyset$ زایه داخلی اصطکاک رسوبات است. مقدار $\emptyset$ برای شن از نوع کوارتز حدود ۴۰ درجه است که متناظر با شیب های حدود ۱:۱ و ۱,۵ : ۱ می باشد.

"تنش کل در واقع معادل حاصلضرب ارتفاع رسوبات در وزن مخصوص رسوبات و فشار منفذی آب معادل حاصلضرب ارتفاع آب در وزن مخصوص آب می باشد. هرچه تنش موثر بیشتر باشد، زاویه پایداری شیب نیز بیشتر می شود و در حضور آب و خاک های غیر شنی، این تنش موثر کمتر شده لذا زاویه پایداری رسوبات نیز کمتر می گردد."

لذا در خاک های چسبنده باید در روش محاسبه برایند نیروها، اثر فشار منفذی آب نیز لحاظ شود. در واقع تنش موثر متناسب با نیروی داخلی بین ذرات رسوب بوده و هرچه این نیرو بیشتر شود تنش موثر و لذا زاویه پایداری بیشتر می شود.

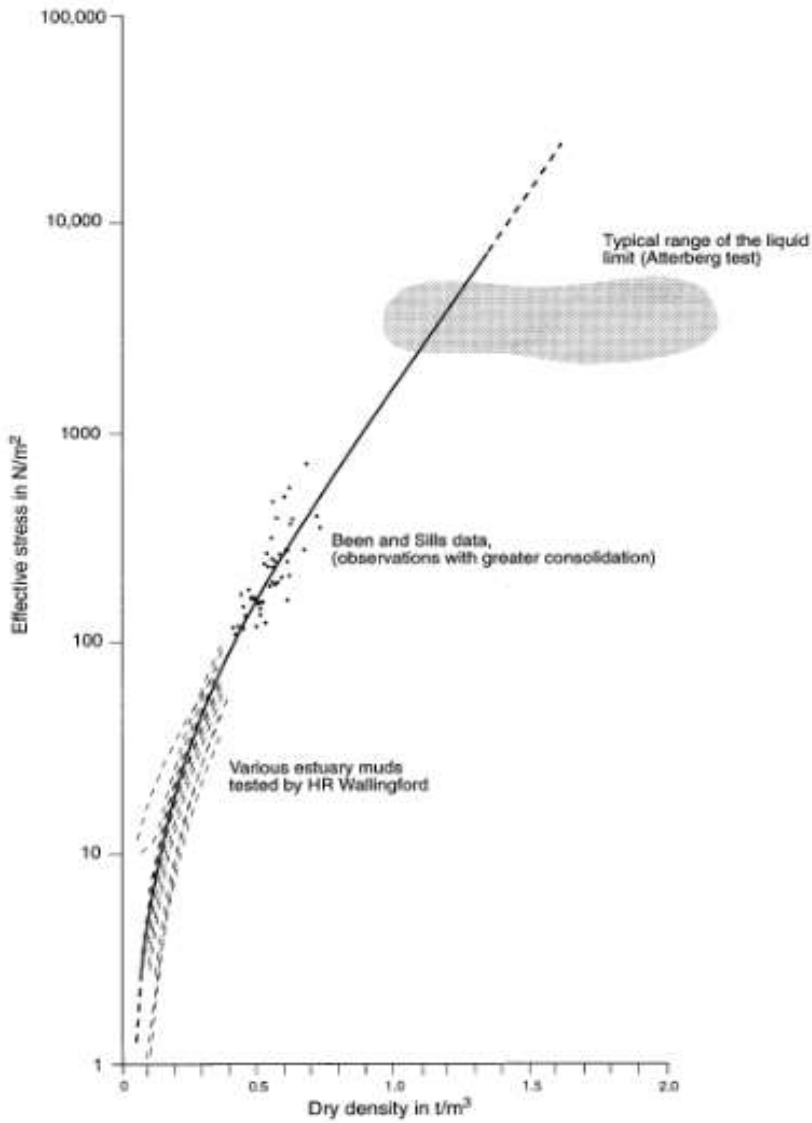
در حالتی که رسوبات از نوع هم جوش و یکپارچه هستند، در واقع در اثر وزن لایه های بالایی، رسوبات فشرده و هم جوش شده و لذا آب از داخل منافذ خارج و تنش موثر و دانسیته متناسبا" زیاد می شوند. در شکل ۹ منحنی متوسط شرایط ترسیم شده است(HR Wallingford, 1990, & et., all,1981).

از این مفاهیم برای توسعه شکل ۶ استفاده شده است. و می توان به کمک روابط و مفاهیم شکل ۸ نیز مقدار زاویه داخلی را پس از نمونه برداری و محاسبه دانسیته خشک و حجمی (بالک) و تنش موثر، پیش بینی نمود: در اینجا x عمق رسوبات در شکل ۸ می باشد.

$$\rho_{bulk} \; x \; g \; \sin\alpha \; = \; \sigma' \; \tan\phi$$

در شکل ۹ منحنی تا شرایط محتوی رطوبت معمول حدود اتربرگ و برای تحکین کامل رس و سیلت ادامه داده شده است. آقای Bolton,1979 بیان کرد که نیروی برشی خاک در حدود اتربرگ $2kN/m^2$ است، که متناظر با زاویه اصطکاک داخلی $\emptyset = ۳۰^o$ در شکل ۶ و معادل با یک تنش موثر داخلی حدود $3.5kN/m^2$ می باشد. از این اطلاعات نیز می شود به زاویه شیب پایدار رسید. در شکل ۶

همچنین زاویه شیب پایدار برای عمق های مختلف رسوب و شرایط قبل از معرض هوا در اثر افت تراز (دانسیته حجمی مستغرق جهت محاسبه برآیند نیروها) و شرایط بیرون از آب نیز محاسبه شده است. این اختلاف زاویه شیب پایدار در شرایط خشک و مستغرق تا ۵ برابر نیز می رسد.



شکل ۹: رابطه تنش موثر و دانسیته در یک خاک و رسوبات مصب (بر اساس مدل های عددی و آزمایشگاهی)

۳-۳-۳ مقایسه و دقت روش SBR و LTCR با مثال و معیارهای تکمیلی

دقت روش های مذکور صرفا" برای مطالعات اولیه و امکان سنجی بوده و برای مطالعات طراحی می بایست علاوه بر این روش ها از مدل های عددی یا روش های دقیق تر نیز بهره گرفته شود.

مقایسه نتایج روش های مذکور با نتایج فلاشینگ در ۱۴ سد دنیا (سفید رود از ایران، و سایر کشورهای آمریکا، چین، هند، شوروی سابق، سوئیس، استرالیا، ونزوئلا) نشان داد که روش LTCR اغلب بدون واسنجی به واقعیت نزدیک تر است. یعنی در غالب موارد با نتایج واقعی فلاشینگ و پیش بینی کارائی همخوانی داشته است. البته در این جا ضرایب روش SBR توسط مولفین تا حدی اصلاح شده است که اگر از آن ضرائب استفاده می شد نتایج دو روش هر دو قابل قبول می شد(جدول۱). با این وجود این دو روش مناسب مطالعات اولیه بوده و برای فاز ۲ و تصمیم گیری یا طراحی ابعاد و موقعیت تخلیه کننده های سد، و یا عملیات اجرایی باید نتایج این دو روش به عنوان مبنای مدلسازی عددی (فصل ۵) در کنار سایر کنترل های لازم استفاده و سپس تصمیم گیری شود.

در این ۱۴ سد ۶ سد در عمل دارای فلاشینگ موفق بودند (جدول ۳). لازم به ذکر است نتایج روش LTCR بدون واسنجی، با تمام نتایج واقعی در شرایط فلاشینگ موفق و ناموفق همخانی داشته و کارائی را به درستی نشان داده است. اما روش SRB بدون واسنجی در مواردی نتایج نامناسب داده است البته این نتایج بر اساس ضریب رابطه TUM قبل از واسنجی بوده و لذا اگر بر اساس جدول ۱ پیشنهادی دلیری این ضرایب انتخاب شود نتایج این روش نیز در دامنه قابل قبول با واقعیت قرار می گیرد.

معرفی چهار زیر معیار تکمیلی دیگر جهت ارزیابی کارائی فلاشینگ و ارزیابی محدودیت ها:

- یکی از این محدودیت ها در سدهایی که فلاشینگ ناموفق داشته اند مربوط به افت ناقص تراز مخزن بود. مقدار یا نسبت افت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{DDR}= 1-\frac{flushing\ flow\ depth}{normal\ flow\ depth}$$

محاسبات نسبت عمق جریان فلاشینگ به عمق جریان نرمال در مثال زیر ارائه شده است.

اگر مقدار DDR کمتر از ۰,۷ شود می گویند افت ناقص بوده و احتمالا" کارائی فلاشینگ پایین است. البته در روش های فلاشینگ با سیلاب دانسیته ممکن است بتوان با افت های کم، کارائی مناسب داشت.

- زمانی که افت کامل باشد و تراز آب روی تالوگ (کف رودخانه قبل از آبگیری) قرار گیرد در این حالت در روش SBR خروجی رسوب مستقل از افت تراز شده و به جریان ورودی وابسته می شود که آنرا SBR_d می نامند. لذا در این حالت محدودیت تخلیه رسوب به جریان ناکافی جریان ورودی می تواند مرتبط شود.

جدول ۳: نتایج ارزیابی کارائی فلاشینگ روش های SBR و LTCR در سدهای با فلاشینگ موفق*

Reservoir Name	Country	Initial Capacity (Mm^3)	SBR Value	LTCR Value	Estimated Long Term Capacity (% of original)
Baira	India	9.6	7	0.85	about 85%
Gebidem	Switzer-land	9	7	0.99	near 100%
Gmund	Austria	0.93	21	0.98	about 86%
Hengshan	China	13.3	about 3	0.77	about 75%
Palagnedra	Switzer-land	5.5	33	1.0	100% *
Santo Domingo	Venezuela	3	11	1.0	97% *

ضریب روش TUM قبل از اعمال واسنجی و پیشنهادی دلیری، به کار گرفته شده است*.

- محدودیت نسبت پهنای کانال فلاشینگ. این پهنا از رابطه تجربی که قبلا" ارائه شده از روی دبی رابطه TUM پیش بینی می شود. این پهنا تقریبا" معادل پهنای آبشستگی است.

$$\text{FWR} = \frac{pridicted\ flusging\ width}{representative\ bottom\ width\ of\ reservoir}$$

این پهنا ممکن است بیشتر از پهنای مخزن در همان تراز فلاشینگ باشد. اگر FWR به طور قابل توجهی از واحد کمتر باشد، لذا پهنای فلاشینگ می تواند یک محدودیت برای آبشستگی باشد. البته این موضوع در مخازنی که شیب تند کناره ها باعث یک رسوبگذاری باریک و گرفتگی شود، به صورت مشروط ارزیابی می شود:

- شیب های خیلی تند کناره مخزن. شیب تند کناره مخزن می تواند تحت شرایطی محدویت برای عملیات فلاشینگ باشد. اثر این محدودیت می تواند به کمک نسبت پهنای مخزن یا TWR کمی شود:

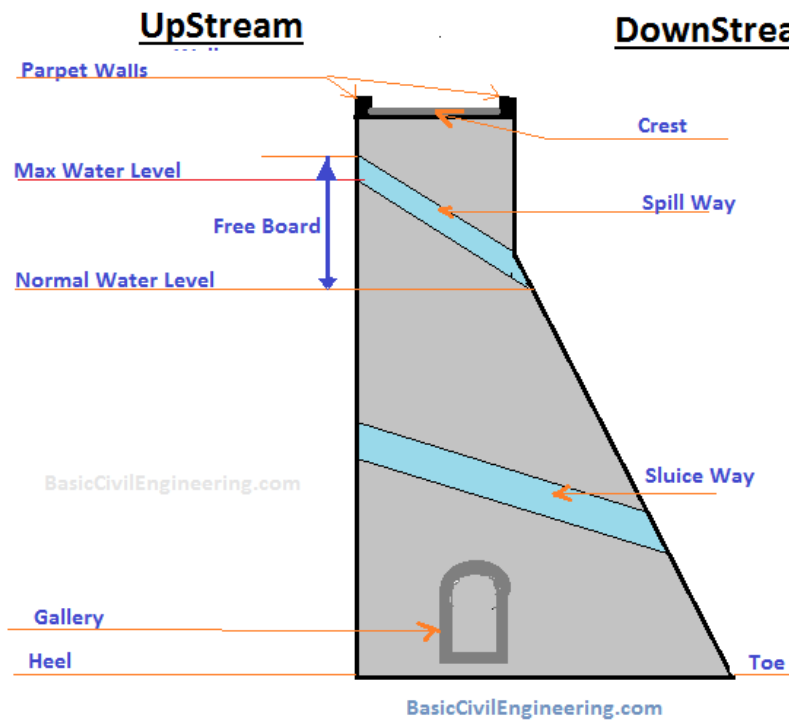
$$\text{TWR} = \frac{top\ width\ of\ scoured\ valley}{actual\ top\ width}$$

در این نسبت و در خصوص آبشستگی دره، و محاسبات پهنای بالای مخزن، محدودیت ها مربوط به کف مخزن بوده و از افت تراز مستقل می باشد. اگر محدودیت FWR مهم باشد، نسبت TWR باید از واحد بیشتر شود (حداقل معادل ۲ شود)، تا شرایط کارا بودن فلاشینگ ارضا شود. اگر نسبت FWR یک محدودیت برای فلاشینگ محسوب نشود، نسبت TWR معادل واحد یا حتی نزدیک واحد می تواند نشان از کارائی قابل قبول فلاشینگ باشد.

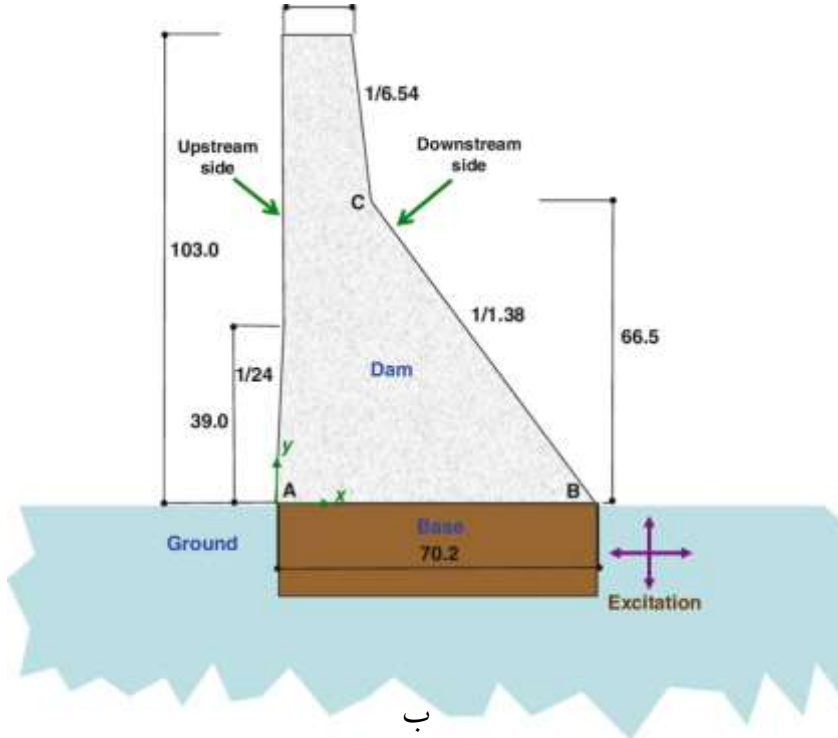
-**مثال ۱:** محاسبه معیارهای دو روش SBR و LTCR و چهار معیار تکمیلی SBR_d، DDR، FWR و TWR جهت ارزیابی کارائی فلاشینگ مخزن سد Baira در هند. (جدول ۴ و شکل های کمکی ۱۰ الی ۱۲).

جدول ۴: داده های مخزن Baira در هند

Reference:	Jaggi and Kashyap, 1984
Original storage capacity :	1.56Mm³ dead storage (total storage not given, but the geometry estimated below suggests 9.3Mm³)
Reservoir length:	4.1km (estimated from dam height and river slope)
Elevation of top water level above river bed at dam :	51m
Representative bottom width :	25m (estimated from Plates A and C)
Representative side slope :	1 : 2 (estimated from photographs)
Annual water inflow :	1900Mm3 (estimated from typical discharges for monsoon and non-monsoon periods)
Annual sediment inflow :	0.3Mt (from siltation after 18 months)
Sill height of outlet relative to base of dam :	16.4m (base of dam elevation was derived from dam height quoted)
Outlet rating constant defined: discharge / (2g water level above sill)$^{0.5}$	24m² (derived from rating curves)
Typical flushing discharge :	44m³/s (derived indirectly from sediment concentrations and sediment loads)
Typical duration of flushing :	31 hours
Sediment type in Tsinghua University method:	No information, type III taken due to low flows
Typical side slope in reservoir deposits after flushing :	1 : 3.3 (Plate C)
Estimated long term capacity :	Close to original (85% of deposited silt removed by first flushing, despite a relatively low discharge)

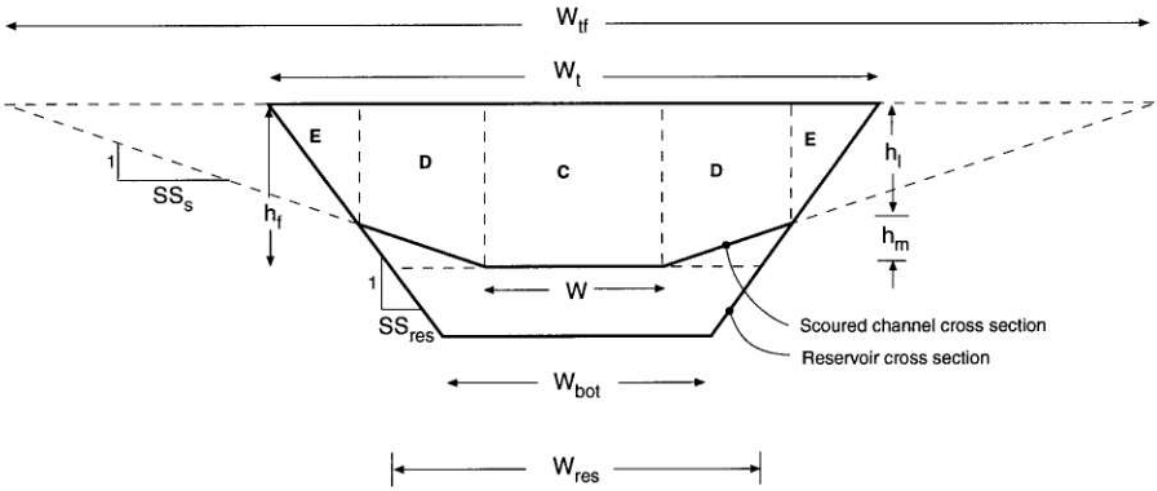


الف

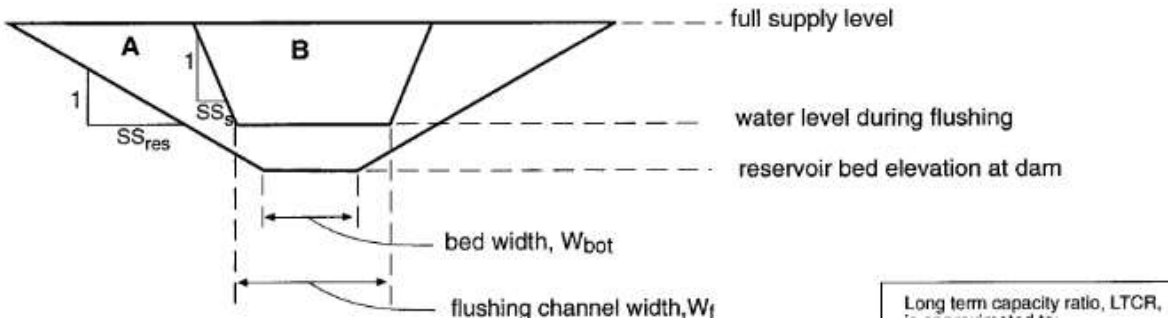


ب

شکل ۱۰: شکل های کمکی جهت محاسبه روش SBR و LTCR

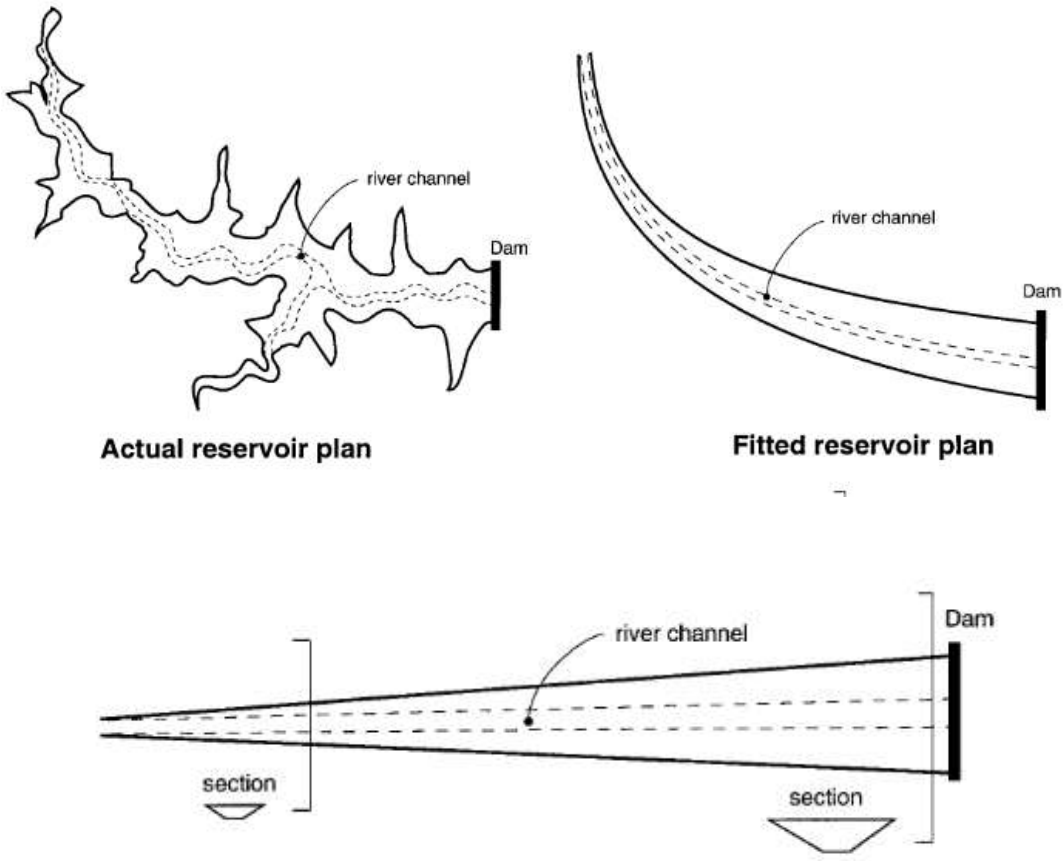


الف-مقطع عرضی بلافاصله بالادست سد از هندسه ساده شده با تقریب منشوری همراه کانال آبشستگی محدود شده کناره های مخزن



ب-هندسه ساده شده مخزن سد جهت محاسبات معیار LTCR

شکل ۱۱: شکل های کمکی جهت محاسبه روش SBR و LTCR (الف و ب) (17)



شکل ۱۲: شکل های کمکی جهت محاسبه روش SBR و LTCR (17)

مشخصات واحدها و علائم پارامترها به زبان انگلیسی جهت آشنایی با اصطلاحات:

(قبلا" به فارسی در متن اشاره شده اند)

C_o	-	the original storage capacity of the reservoir (m^3)
L	-	reservoir length (m)
EI_{max}	-	elevation of top water level (m)
EI_{min}	-	the minimum bed elevation, which is usually the river bed elevation immediately upstream from the dam (m)
W_{bot}	-	a representative bottom width for the reservoir (m)
SS_{res}	-	a representative side slope for the reservoir
SS_s	-	a representative side slope for the deposits exposed during flushing, it can be derived using Equation with density computed using Lane and Koelzer's (1953) method (the method is reported by Vanoni, 1975)
V_{in}	-	mean annual inflow volume (m^3)
M_{in}	-	mean annual sediment inflow (tonnes)
Q_f	-	representative discharge passing through reservoir during flushing (or sluicing if appropriate) (m^3/s)
T_f	-	duration of flushing (days)
EI_f	-	water surface elevation at the dam during flushing, derived from Q_f, outlet sill elevation and outlet design (m)
Type	-	sediment type for the Tsinghua University method for predicting sediment loads in flushing flows

SS_s در واقع همان شیب کناره کانال فلاشینگ است که روش پیش بینی آن قبلا" تشریح شده است. محاسبه سایر پارمترها مثل رسوب ورودی به مخزن نیز در فصول قبل ارائه شده است. مقدار EL_f یا تراز آب مخزن در طول فلاشینگ، بر اساس منحنی تداوم جریان بازشدگی دریچه، تراز کف دریچه و دبی

خروجی محاسبه می شود. نوع رسوب بر اساس ضرائب پیشنهادی دلیری یا از ضرائب پیشنهادی رابطه TUM قبل از واسنجی محاسبه می شود.

روش SBR:

$$SBR = \frac{M_f}{M_{dep}}$$

در اینجا صورت کسر معادل جرم متوسط رسوباتی است که در اثر عملیات فلاشینگ در طول مدت معین مثلا" یکسال از مخزن خارج شده و مخرج معادل جرم متوسط رسوباتی است که در همان مدت در مخزن دپو شده است.

ارزش پارامترهای مثال ۱ از جدول ۴ و یا روش های برآورد شده

$C_o = 9.6Mm^3$

$L = 4{,}100m$

$El_{max} = 1123m$

$El_{min} = 1072m$

$W_{bot} = 25m$

$SS_{res} = 1 : 2$

$SS_s = 1 : 3.3$

$V_{in} = 1{,}900Mm^3$

$M_{in} = 300{,}000t$

$Q_f = 44m^3/s$

$T_f = 1.29$ days (31 hours)

پهنای معرف مخزن در سراب سد متناظر با تراز سطح آب فلاشینگ:

$$W_{res} = W_{bot} + 2\ SS_{res}\ (El_f - EL_{min})$$

پهنای فلاشینگ که قبلا" همراه روش محاسبه دبی فلاشینگ تشریح شد(رابطه دبی–پهنای فلاشینگ):

$$W_f = 12.8\ Q_f^{0.5}$$

iii) در اینجا پس از محاسبه دو ارزش پهنای فلاشینگ و پهنای مخزن، هر کدام کوچکتر بود را به عنوان پهنای معرف جریان فلاشینگ انخاب می شود.

برآورد شیب طولی طی فلاشینگ:

$$S = \frac{El_{max} - El_f}{L}$$

مقدار ضریب پیشنهادی رابطه TUM قبل از واسنجی جهت پیش بینی مقدار رسوب ناشی از فلاشینگ، به صورت زیر است که در مثال حاضر استفاده شده است اما در عمل توصیه مولفین استفاده از جدول ۱ می باشد(از نظر مولفین کتاب حاضر ضرائب زیر مناسب نبوده و جدول ۱ توصیه می شود):

$\psi = 1600$ for fine loess sediments

$\psi = 650$ for $D_{50} < 0.1mm$

$\psi = 300$ for $D_{50} > 0.1mm$

$\psi = 180$ if the flushing discharge is low (say less than $50m^3/s$)

در مثال حاضر با نظر سایر محققین با یک فاکتور حدود ۳۳ درصد از مقدار Q_s در رابطه TUM جهت واسنجی استفاده شده است.

محاسبه مقدار رسوب فلاش شده سالانه بر اساس همگن سازی واحدها:

$$M_f = 86,400\ T_f\ Q_s$$

مقدار رسوب دپو شده:

$$M_{dep} = M_{in}\ TE / 100$$

در اینجا مقدار درصد تله اندازی مخزن می تواند از منحنی براون (شکل ۱) بر اساس C_0 (ظرفیت ذخیره اولیه مخزن – m^3) و V_{in} (حجم جریان ورودی سالانه– m^3) محاسبه می شود. البته اگر روش فلاشینگ به کمک بازشدن دریچه Sluicing و افت کامل تراز در یک دوره طولانی مدت صورت بگیرد می بایست درصد تله اندازی معادل ۱۰۰٪ لحاظ شود.

محاسبه تراز فلاشینگ (EL_f):

$$1072 + 16.4 = 1088.4\ m$$

$$El_f = 1088.4 + \frac{(Q_f/C)^2}{2g}$$

$$El_f = 1088.4 + \frac{(44/24)^2}{19.62} = 1088.57m$$

C: ثابت تداوم جریان دریچه از منحنی تداوم جریان دریچه (m^2).

مقدار پهنای مخزن در تراز فلاشینگ معادل ۹۱,۲۸ متر از رابطه زیر و پهنای فلاشینگ بر اساس دبی فلاشینگ معادل ۸۴,۹ متر محاسبه شد و لذا پهنای کمتر یعنی ۸۴,۹ متر به عنوان پهنای معرف کانال فلاشینگ لحاظ شد.

$$W_{res} = 25 + 2\ 2\ (1088.57 - 1072)$$

و شیب طولی فلاشینگ معادل:

$$S = 0.008398$$

$$S = \frac{1123 - 1088.57}{4100}$$

بر اساس رابطه TUM مقدار بار رسوب تخلیه شده (Q_s) تحت شرایط مذکور فلاشینگ باتوجه به ضریب کاهشی با نظر کارشناسی معادل ۵,۷۵ تن بر ثانیه و برای طول مدت فلاشینگ معادل ۶۴۱۰۰۰ تن به دست می آید.

جهت محاسبه درصد تله اندازی از منحنی براون استفاده شد. باتوجه به عدم دسترسی به داده های دقیق قطر رسوبات مخزن، منحنی میانه براون انتخاب و بر اساس نسبت ظرفیت اولیه مخزن به حجم جریان ورودی، درصد تله اندازی ۳۰٪ انتخاب شد. لذا مقدار رسوبات دپو شده معادل ۹۰۰۰۰ تن در سال برآورد شد. بر این اساس مقدار SBR برابر ۲۱,۳ به دست امد. که حاکی از کارائی بالای فلاشینگ تحت این شرایط از نظر روش مذکور می باشد.

روش LTCR:

برخی از پارامترهای روش SBR در اینجا نیز تکرار می شود. جهت محاسبه پهنای دره فرسایش یافته فلاشینگ در تراز بالای مخزن:

$$W_{tf} = W + 2\ SS_s\ (EI_{max} - EI_f)$$

$$W_{tf} = 84.9 + 2\ 3.3\ (1123 - 1088.57)$$

$$= 312.1m$$

حال می بایست پهنای مخزن در همین تراز محاسبه شود:

$$W_t = 25 + 2\ 2\ (1123 - 1072)$$

$$= 229m$$

در اینجا شرط را بررسی می کنیم:

If $W_{tf} \leq W_t$ لذا هندسه مخزن نمی تواند محدودیتی برای پهن شدن دره فلاشینگ ایجاد کند و سطح مقطع فلاشینگ از رابطه زیر بپیش بینی می شود:

$$A_f = \frac{W_{tf} + W}{2} (El_{max} - El_f)$$

if $W_{tf} > W_t$ لذا دره آبشستگی فلاشینگ توسط دره مخزن محدود می شود (شکل ۱۱، الف):

$$h_m = \frac{W_{res} - W}{2\ (SS_s - SS_{res})}$$

$$h_l = El_{max} - El_f - h_m$$

$$h_f = El_{max} - El_f$$

$$A_f = W\ h_f + (h_f + h_l)\ h_m\ SS_s + h_l^2\ SS_{res}$$

A_f is the sum of area C, areas D and areas E

همچنین سطح مخزن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$A_r = \frac{W_t + W_{bot}}{2} (El_{max} - El_{min})$$

و مقدار LTCR:

$$LTCR = \frac{A_f}{A_r}$$

باتوجه به مقادیر ارائه شده در مثال واقعی داریم: $\text{if } W_{tf} > W_t$

$$h_m = \frac{91.28 - 84.9}{2\ (3.3 - 2)}$$

$$= 2.454m$$

$$h_l = 1123 - 1088.57 - 2.454$$

$$= 31.98m$$

$$h_f = 1123 - 1088.57$$

$$= 34.43m$$

$$A_f = 84.9\ 34.43 + (34.43 + 31.98)\ 2.454\ 3.3 + 31.98^2\ 2$$

$$= 5{,}506m^2$$

$$A_r = \frac{229 + 25}{2} (1123 - 1072)$$

$$= 6{,}477m^2$$

لذا مقدار LTCR برابر ۰,۸۵ محاسبه می شود که بیانگر کارائی مناسب فلاشینگ (۸۵٪) و امکان پذیری اجرای عملیات فلاشینگ از نظر فنی است. اما از نظر اقتصادی و سایر ملاحظات زیستی و اجتماعی- اقتصادی نیز باید مسئله ارزیابی شود.

همچنین:

$$DDR = 1 - \frac{1088.57 - 1072}{1123 - 1072}$$

$$= 0.68$$

مقدار DDR بد نیست. بهتر است این معیار بالای ۰,۷ باشد البته این معیار را باید باتوجه به معیار نسبت پهنای فلاشینگ و LTCR ارزیابی کرد که آنها نیز نسبتا" بالا هستند. با این وجود این نسبت DDR در اینجا حاکی از افت ناقص است که اغلب کارائی فلاشینگ در این شرایط پایین می باشد ولی در اینجا سایر پارامترها نیز اثر مثبت گذاشته و لذا کارایی را می توان خوب ارزیابی نمود که نتایج با واقعیت نیز همخوانی داشته است.

محاسبات در حالت افت کامل

زمانی که هدف پیش بینی کارائی مخزن در شرایط افت کامل مخزن باشد، روش SBR با علامت اختصاری SBR_d نمایش داده می شود. اصول محاسبات با مثال بالا یکسان است با این تفاوت که به جای EL_f یا تراز آب فلاشینگ، تراز آب حداقل مخزن EL_{min} قرار می گیرد($EL_f = EL_{min}$).

شیب طولی فلاشینگ همانند رابطه قبل محاسبه می شود ولی به جای تراز فلاشینگ باید تراز حداقل افت یعنی ۱۰۷۲ متر قرار بگیرد. لذا شیب معادل ۰,۰۱۲۴۴ حساب می شود.

پارامتر یا ضریب رابطه TUM براساس پیشنهاد دلیری (جدول ۱، می توان برای سایر شرایط درون یابی یا برون یابی نمود) و یا بر اساس شرایط موجود و اطلاعات داده شده توسعه دهنده رابطه TUM حدود ۱۸۰ می باشد. البته در اینجا نتیجه بر عدد ۳ به صورت تجربی و نظر محقق دیگر (۱۷) تقسیم شده که به

ضریب جدول ۱ نزدیک است. لذا مقدار دبی رسوب (Q_s) معادل ۱۹,۲ تن بر ثانیه حساب شد. بر اساس طول دوره بازماندن دریچه و درصد تله اندازی ۳۰ درصد، نسبت SBR_d معادل ۲۳,۸ به دست می آید.

رابطه معیار نسبت پهنای فلاشینگ(FWR):

در اینجا مقدار این نسبت بیشتر از واحد بوده و لذا حاکی از کارایی مناسب این معیار دارد.

$$FWR = \frac{W_f}{W_{bot}}$$

$$FWR = \frac{84.9}{25}$$

$$= 3.4$$

معادله دبی – پهنا فلاشینگ صورت کسر قبلا" ارائه شده است. مخرج کسر نیز معادل پهنای کف مخزن در شکل ۱۱ که داده ورودی محسوب می شود.

رابطه معیار (TWR):

$$TWR = \frac{W_{td}}{W_t}$$

دراینجا صورت کسر معادل پهنای دره فرسایش یافته فلاشینگ در تراز آب بالا مشروط به افت کامل است. مخرج کسر نیز پهنای بالای مخزن که رابطه آن قبلا" نیز برای روش LTCR استفاده شد:

$$W_t = W_{bot} + 2\ SS_{res}\ (El_{max} - El_{min})$$

جهت محاسبه صورت کسر:

ابتدا مقدار پهنای فلاشینگ W_f را از رابطه دبی–پهنا محاسبه و با پهنا کف مخزن W_{bot} که داده ورودی است مقایسه و هر کدام کوچکتر بود را به عنوان پارامتر پهنای کف دره فرسایش یافته درافت کامل با علامت W_{bf} لحاظ می شود و در رابطه زیر جهت محاسبه صورت معیار TWR استفاده می شود:

$$W_{td} = W_{bf} + 2\ SS_s\ (EI_{max} - EI_{min})$$

باتوجه به داده های مثال، پهنای واقعی مخزن ۲۵ متر (W_{bot}) و پهنای فلاشینگ (W_f) قبلا" معادل ۸۴,۹ متر محاسبه شده است که عدد ۲۵ متر کمتر می باشد لذا در ادامه محاسبات پهنای ۲۵ متر معرف پهنای فلاشینگ خواهد بود.

$$W_{td} = 25 + 2\ 3.3\ (1123 - 1072)$$

$$= 361.6m$$

لذا مقدار این نسبت ۱,۵۸ حساب می شود و می توان پیش بینی نمود عملیات فلاشینگ تحت این شرایط نتیجه مناسب خواهد داد.

باتوجه به اینکه کلیه معیارها در دامنه مناسب بودند لذا می توان نتیجه گرفت در این سایت و با این شرایط می توان از نظر فنی، عملیات فلاشینگ را موفق پیش بینی نمود. لازم به ذکر است این معیارها باید باهم مناسب باشند زیرا ممکن است یک یا دو مورد از معیارها مناسب ولی نتیجه فلاشینگ به دلیل پایین بودن یک معیار به ویژه معیار DDR، موفقیت امیز نباشد. این مسئله در جدول ۵ و مقایسه با شرایط سدهای واقعی تایید شده است.

بر اساس جدول ۵ می توان تفسیر نمود معیار نسبت افت موثرترین معیار تصمیم گیری می باشد. لذا در طراحی ابعاد دریچه تحتانی می بایست ملاحظات خاص در زمان طراحی به کمک شبیه سازی دریچه نمود (۱۵). البته افزایش مدت فلاشینگ نیز یک راهکار دیگر تحت شرایط دریچه های موجود یا محدویت عدم امکان تعویض دریچه می باشد.

جدول۵: مقایسه نتایج پیش بینی معیارهای ارزیابی کارائی فلاشینگ با عملیات واقعی (۱۷)

Reservoir Name	(i) DDR Value	(ii) SBR_d Value	(iii) FWR Value	(iv) TWR Value
Reservoirs flushed successfully				
Baira	0.68	24	3.4	1.6
Gebidem	0.93	20	6.7	1.5
Gmund	0.89	58	5.2	1.3
Hengshan	0.77	about 4	0.10	7.1
Palagnedra	1.00	33	1.4	1.0
Santo Domingo	1.00	11	1.4	1.8
Reservoirs flushed unsuccessfully				
Guanting	0.81	**0.3**	**0.04**	**0.5**
Guernsey	**0.44**	3.2	1.4	**0.26**
Heisonglin	0.77	about 1	**0.06**	**0.8**
Ichari	**0.31**	33	9.9	1.4
Ouchi - Kurgan	**0.14**	110	about 2	**about 0.3**
Sanmenxia	0.75	4.8	**0.26**	**0.9**
Sefid - Rud	0.96	4.3	**0.3**	**0.1**
Shuicaozi	**0.37**	15	1.0	2.1

مقایر پررنگ شده تاکید به معیارهایی دارد که ارزیابی آنها نامناسب بوده است*

DDR: معیار ارزیابی محدودیت افت ناقص

SBR_d: معیار تعادل رسوب مستقل از افت

FWR: معیار تنگ شدگی کف مخزن در اثر رسوب یا هندسه

TWR: معیار شیب های کناری در تراز بالا

مدت زمان بهینه فلاشینگ می تواند با بهینه سازی منحنی های هدر رفت و سود ناشی از فلاشینگ محاسبه شود. پارمترهای دیگر موثر در فلاشینگ شامل هندسه مخزن، شیب های کناری و جریان های ورودی (سیل دانسیته) قابل دسترس هستند که این موارد خارج از طراحی یا بهره برداری مخزن بوده و در زمان مکان یابی سد می بایست توجه شوند(۱).

نکته دیگر که باید توجه شود این است که در این ۴ معیار جدول ۵، معیاری که در ان پیش بینی شیب کناره کانال فلاشینگ نیاز است قطعا" با خطای زیادی بر اساس روش های موجود فعلی همراه خواهد بود و لذا سه معیار دیگر از اطمینان بیشتری برخوردار هستند اگرچه در ارزیابی کلی کارائی فلاشینگ در فاز ۱ این مسئله خیلی مهم نیست.

نکته دیگر این است که دراینجا حجم اولیه ۱۴ مخزن سد از زیر $14Mm^3$ تا بالای ۱۰ هزار میلیون مترمکعب وجود دارد. بررسی جدول ۵ نشان می دهد در مخازن بزرگ (بالا ۵۰ میلیون متر مکعب) اغلب پهنای کانال فلاشینگ می تواند یک محدودیت محسوب شود. لذا حفظ شرایط کانال فلاشینگ در مسیر دریچه تحتانی در طول بهره برداری به کمک فلاشینگ های دوره ای در زمان مناسب در مخازن بزرگ مهم تر است. از نظر دلیری جهت محاسبات تخلیه رسوب سدها می توان تقسیم بندی زیر را بر اساس حجم اولیه ظرفیت مخازن استفاده نمود:

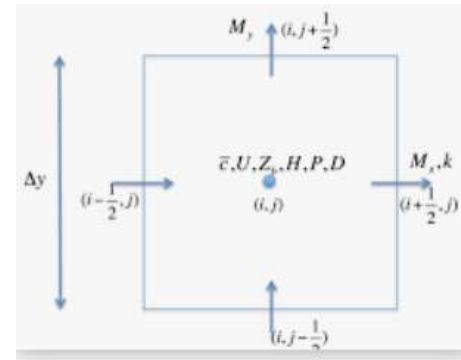
زیر ۱۴ میلیون متر مکعب: مخازن کوچک

۱۴ تا ۵۰ میلیون مترمکعب: مخازن متوسط

بالا ۵۰ میلیون متر مکعب: مخازن بزرگ.

به طورکلی در ارزیابی فلاشینگ باید به مسائل هیدرولوژیکی، هندسه مخزن، خصوصیات رسوب و نیازهای عملکردی مخزن (دریچه ها و ..) می توان به کمک شبیه سازی و جزئیات بیشتر به ویژه جهت مدلسازی سیلاب های دانسیته (فصل ۵) توجه شود(دلیری، ۱۳۹۳)، (Tolouie et al, 1991).

نکته مهم دیگر از جدول ۵ این است که ۸ سدی که در واقعیت فلاشینگ ناموفق داشتند، از نظر عمده معیارها پتانسیل یک فلاشینگ خوب را با اجرای تمهیداتی داشتند و یا از نظر سایت سد مشکلی نداشتند بلکه می بایست ابعاد و ظرفیت دریچه تحتانی و مسئله افت مناسب در زمان فلاشینگ حل می شد.



عددی

فصل ٤

مدلسازی آبشویی

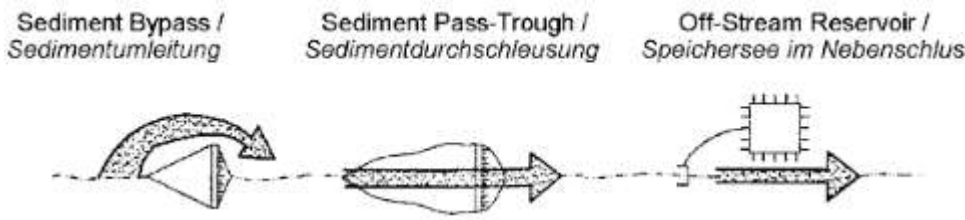
آزمایشگاهی

٤-١ معادلات مقدماتی و فرایندها

جهت مطالعات تخلیه رسوب لازم است کلیه جوانب ارزیابی شود. آیا جریان ورودی حد بالا یا سیلاب با دوره بازگشت مشخص و مناسب برای شرایط مرزی تراز مخزن وجود دارد؟ دما و یا غلظت رسوب این جریان ورودی چگونه است و چه تاثیری در تخلیه رسوب می گذارد؟ آیا تخلیه رسوبات صرفا" با فشار آب پشت مخزن و بدون نیاز به جریان ورودی کفایت می کند؟ چه میزان افت تراز می تواند ضمن تخلیه رسوب، مخاطره ای برای سازه نداشته و ضمنا" مشکلات تامین آب و مسائل زیستی پایین دست و اجتماعی را حداقل می کند؟ آیا افت و تخلیه آب سد باعث بحران در شرایط تامین آب می شود؟ شدت این بحران چقدر است و آیا می توان تامین آب و یا مدیریت بحران نمود؟ تخلیه رسوبات چه تاثیرات منفی زیست محیطی در پایاب سد خواهد گذاشت؟ خسارات وارده به دریچه تحتانی در اثر رسوبات به ویژه شن های کوارتزی چقدر و به چه نحوی است؟ آیا فشار و تخلیه رسوب و افت تراز از نظر ژئوتکنیکی در سدهای خاکی و یا در سدهای بتنی مخاطره ای خواهد داشت؟ رفتار رسوبات پشت مخزن نسبت به بازشدگی های مختلف دریچه تحتانی چگونه است؟ آیا تراز کف و محور دریچه، ابعاد و زاویه آن جهت فلاشینگ در شرایط بهینه قبل از اجرا طراحی شده است؟ آیا هندسه و مشخصات شیب و شکل و نسبت های عمق به سطح مخزن جهت اجرای سد از منظر فلاشینگ مناسب انتخاب شده است؟ باتوجه به حجم و شرایط مختلف مخزن، حفظ و توسعه کانال فلاشینگ پشت دریچه به چه تمهیداتی نیاز دارد؟ تناوب مناسب

فلاشینگ ها و مدت زمان بازشدگی دریچه ها چگونه تعیین شود؟ و .. پاسخ بسیاری از این سوالات می تواند با مدلسازی عددی تا حد مناسبی پیدا شود تا بتوان تصمیم مناسبی جهت حل معظل رسوبات سدهای کشور که قطعا" طی سال های آتی اگر به آن توجه نشود ممکن بسیار دیر شده و غیر قابل حل باقی بماند. در این بند ابتدا معادلات مقدماتی فرایند تخلیه رسوبات که در فصول گذشته به صورت تشریحی و تجربی ارائه شد، همراه برخی شرایط مرزی مثلا" وجود سیلاب های با مشخصات مختلف در کنار تجربه های موجود بررسی و تحلیل می شود.

در واقع باید توجه داشت می توان اجازه نداد تا رسوبات در مخزن با روش باز کردن دریچه در زمان ورود رسوب یا جریان دانسیته دپو شوند (کنترل دپو رسوبات–Sluicing) و یا اگر دپو شدند آنها را به صورت هیدرولیکی فلاش (شاسینگ یا فلاشینگ) کرد. سایر روش های مدیریت رسوب مخزن و حوضه سد (آبخیزداری و مهندسی رودخانه و توسعه پوشش گیاهی، بانکت بندی، اتلاف انرژی، دیوارسازی، کنترل فرسایش کناری، بای پس و ..) در فصل ۱ و ۲ کتاب حاضر اشاره شده و جزئیات آنها توسط همین مولفین در مرجع ۱ ارائه شده است. شکل ۱ سه نمونه از روش های بای پس رسوب را نمایش می دهد که می توان شرایط جریان و رسوب بای پس را نیز محاسبه یا مدل نمود. ضمنا" روش بای پس نیاز به شرایط خاص توپوگرافی و جریان دارد که همیشه امکان پذیر نیست.



شکل ۱: برخی از انواع دفع رسوب از سد: بای پس، انتقال از داخل بدنه سد، خروج و نگهداری رسوب

علاوه بر روش های بالا می توان موضوع جبران سازی مخزن (Compensation) را مطرح کرد. این روش یعنی بررسی افزایش ارتفاع سد، یا ایجاد تعبیه دریچه جدید، اصلاح و تغییر برنامه عملکرد مخزن و یا ایجاد مخازن در بالادست یا احداث سد در جای دیگر می باشد.

لذا همیشه یک روش ممکن است جوابگو نبوده و ترکیبی از روش ها مانند روش های مکانیکی در کنار روش های مذکور به کار گرفته شود. روش های مکانیکی و لایروبی که در فصول قبل نیز اشاره شد، متنوع هستند. حتی لایروبی علمی در رودخانه می تواند در کاهش رسوبات ورودی موثر باشد(شکل۲).

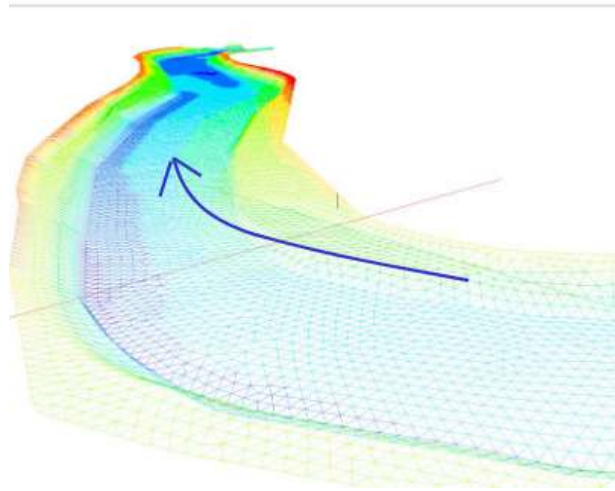
شکل ۲: لایروبی مکانیکی از نوع مکش

قبل از لایروبی در رودخانه می بایست مدل هیدولیکی جریان و رسوب رودخانه باتوجه به سازه های موجود در مسیر و اثرات جریان های ادی (Eddy) در سر ماندرها و سازندهای حساس طراحی و مسیر و ابعاد برداشت رسوبات از نظر فنی و سایر ملاحظات زیستی سراب و پایاب بررسی شده باشد. موضوع هیدولیک رسوب رودخانه در ارتباط با دینامیک تغییرات مسیر رودخانه در مرجع ۲۴ توسط همین مولفین به ویژه در رودخانه های مرزی باتوجه به دینامیک آب و هوا جهت تصمیمات هیدروپولیتیک تالیف شده است. لایروبی در مخازن و رودخانه ها ممکن است به صورت خشک، خیس و یا مکش باشد. برخی از روش های مکش در فصول قبل اشاره شده است.

در این کتاب عمدتا" روی موضوع فلاشینگ (Flushing) که یک نوع روش حذف هیدرولیکی رسوب می باشد تمرکز شده است. اگرچه با روش های مدلسازی می توان اثر سایر عملیات لایروبی در رودخانه و مخازن و یا اثر سیفون و یا روش های دیگر حذف و مدیریت رسوب را نیز بررسی و روش مناسب مدیریت رسوب مخازن را گزینه یابی نمود.

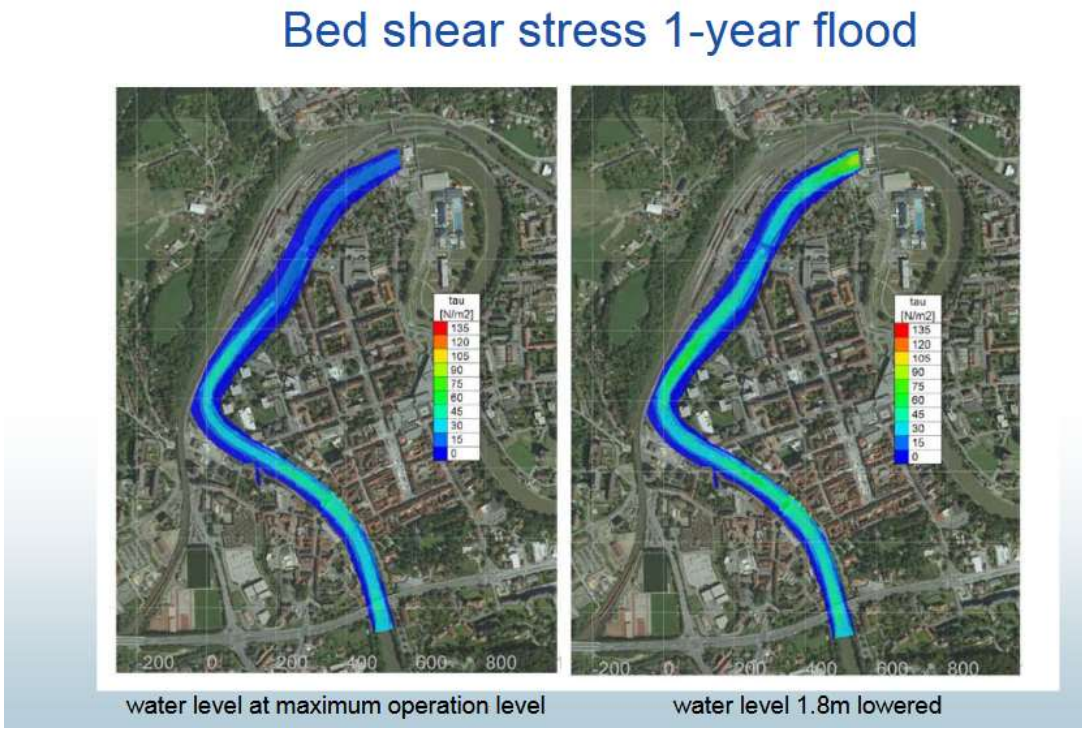
در فرایند فلاشینگ نیاز است مسائل زیر بررسی شود(دلیری، ۱۴۰۱):

- اگر جریان ورودی نیاز می باشد، حداقل دبی باید ۵۰ تا ۷۰ درصد سیل ۱ ساله باشد. اگرچه این معیار نمی تواند همیشه درست باشد.
- یک سیستم پیش بینی بارش-رواناب حوضه، شاید احتمال موفقیت را بالاتر ببرد.
- موقعیت تراز مخزن باتوجه به شرایط مهم است. بهتر است تراز آب پایین تر از سرریز باشد. به طور کلی تراز مخزن و نیاز به افت آن همراه جریان سیل ورودی باید هم از نظر تخلیه رسوب و هم از نظر مسئله ریسک کنترل سیلاب پایاب در کنار مسائل زیستی حجم رسوب و آلودگی رسوب مورد توجه باشد.
- ظرفیت دریچه ها و تسهیلات موجود در موفقیت و عملی شدن فلاشینگ اهمیت دارد.
- پیش بینی رواناب خروجی سد در مسیرهای بحرانی پایاب رودخانه
- مشکلات ناشی از جریان های با رسوبات خاص و مقادیر بسیار بالا
- نوع کاربری سد و هندسه مخزن و رودخانه –شکل ۳
- پارامترهای هیدرولوژی و توزیع دانه بندی و جنس رسوبات در مخزن و رودخانه - شکل ۴
- نسبت های بار معلق و کف و مقادیر دپو مخزن و رودخانه
- آلودگی های ناشی از رسوبات
- غلظت رسوبات در شرایط نرمال مخزن و سیلاب –شکل۵
- رابطه بین تعادل رسوب بین مخزن و رودخانه پایاب از نظر کنش و رسوبگذاری
- آخرین فلاشینگ انجام شده در مخزن مشخصات فنی ان
- نرخ رسوبگذاری مخزن بر اساس اندازه گیری ها طی سال های بهره برداری گذشته شکل ۶
- سایر معیار و موارد سایت هر خاص مورد مطالعه
- آنالیز ریسک جهت محاسبه اثر هیدرولوژی در برنامه ریزی و طراحی فلاشینگ



شکل ۳: هندسه تهیه شده از سیستم رودخانه و مخزن فرضی جهت ورود به مدل عددی

شکل ۴: نمونه گیری از جنس و خصوصیات رسوبات



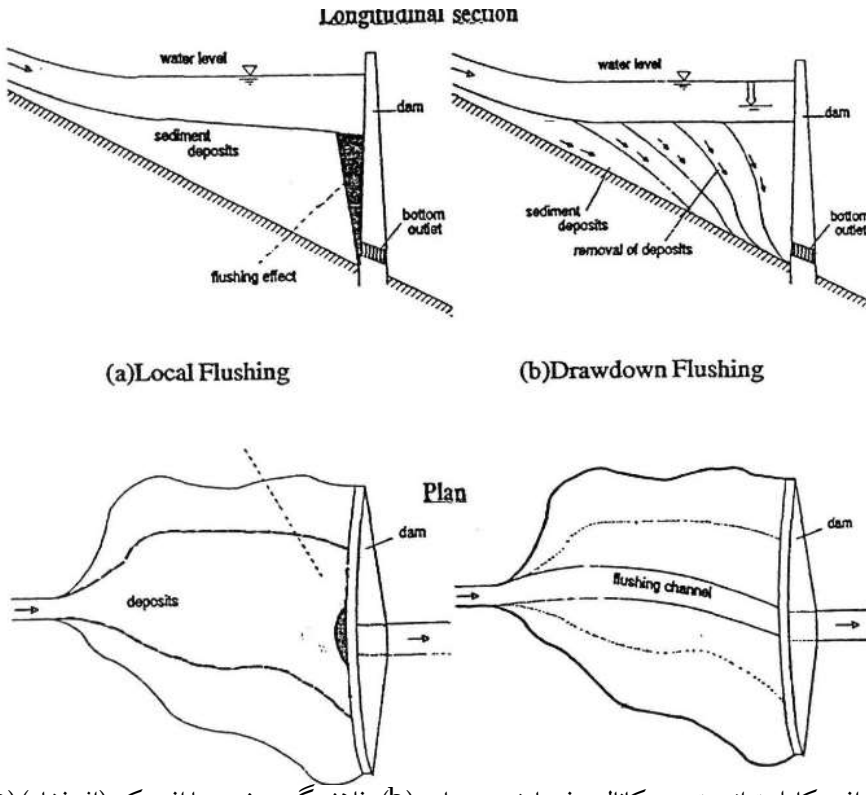
شکل ۵: تراز، ریسک سیل، رسوب متناظر و تنش برشی کف سیلاب ۱ ساله برای تراز افت کرده و حداکثر یک مخزن

before flushing	during flushing	after flushing
Morphology in the reservoir/tailwater/downstream	Oxygen concentration	
Photo documentation		Photo documentation
Sediment concentration	Sediment concentration	
Fish population in the reservoir and downstream		Fish population in the reservoir and downstream
Fish population in a reference stretch		
Macrobenthos		Macrobenthos
Water quality		
Acoustic sounding of the river bed		Acoustic sounding of the river bed
Grain-size-distribution in the reservoir		Grain-size-distribution in the reservoir
Oxygen conditions		

شکل ۶: اندازه گیری های توصیه شده قبل، حین و پس از فلاشینگ

پس از ورود رسوبات رودخانه به مخزن، سرعت جریان به دلیل افزایش عمق آب مخزن، کاهش می یابد. سپس باتوجه به جنس و وزن رسوبات، لایه هایی از رسوبات در طول مخزن شروع به نشست کرده و تشکیل زون های دلتا را می دهند(Deltaic deposition). این لایه بندی در اثر بازشدن دریچه ها و بهره برداری و همچنین جریان های ورودی بعدی دستخوش تغییر نیز می شود(شکل های ۱ فصل ۱). همچنین نشست رسوبات در پهنای مخزن اغلب غیر یکنواخت می باشد.

با بازشدن دریچه تحتانی ممکن است مخروط فلاشینگ در اثر جابجایی رسوبات ایجاد شود(شکل ۲ فصل۱). البته اگر رسوبات هنوز تحکیم نشده باشند و نیروی برشی ناشی از سرعت حاصل از باز شدن دریچه کافی باشد (شکل ۳ فصل ۱) رسوبات از فاصله نزدیک بدنه ممکن است تخلیه شود. با این وجود فلاشینگ با افت تراز ناقص نمی تواند پاسخگوی اهداف باشد. به طور کلی عمل فلاشینگ به دو شکل با جریان بدون رسوب و جریان دانسیته همراه افت مناسب نتایج بهتری ارائه می دهد. لذا در زمان جریان های فصلی و یا سیلاب های دانسیته (دمای پایین و رسوب زیاد) همراه افت کامل کارائی بیشتر می شود.



شکل ۷: فلاشینگ با افت کامل تراز و توسعه کانال و فرسایش رسوبات (b)، فلاشینگ موضعی با افت کم (اثر فشار) (a)

البته همیشه هدف فلاشینگ کنش رسوبات نیست. ممکن است هدف تخلیه همزمان رسوب جریان ورودی با بازکردن دریچه باشد. در این حالت اگر جریان دانسیته لازم را داشته باشد و بتوان زمان رسیدن جریان دانسیته را به دریچه به خوبی مدل کرد، ممکن است نیازی به افت تراز هم نباشد. اگرچه شرایط اجرای سیل دانسیته مشخص است، اغلب عملیاتی شدن شرایط سیل دانسیته مشکل است. همچنین از شکل ۷ نیز مشخص است که اگر نیروی برشی آب روی خاک ناکافی باشد و یا به دلیل تحکیم رسوبات و یا عدم وجود کانال فلاشینگ(به ویژه در مخازن پهن)، ممکن است با افت تراز مخزن، تنها فلاشینگ به صورت موضعی و ناقص صورت بگیرد.

رابطه بین پهنای کانال فلاشینگ و دبی که از روی مطالعات آزمایشگاهی و میدانی و تئوری رژیم توسعه داده شده، در فصل قبل تشریح شده است(Atkinson,1996).

علاوه بر موارد بالا، سخت شدن رسوبات، یا حضور رسوبات چسبنده و یا دور شدن دپو از سد می توانند در میزان تخلیه رسوبات اثر منفی بگذارند. این موارد در برآورد رسوب تخلیه شده فلاشینگ، با روش هایی مانند روش TUM ارائه شده در فصل قبل، باعث ایجاد خطا می شود. زیرا این روش ها گرده ای بوده و اغلب برای شرایط متوسطی از مشاهدات توسعه یافته اند. همچنین کارائی فلاشینگ در مخازن باریک بالاتر از مخازن پهن است. البته اثر مخزن پهن در مخازن باریک، می تواند وقتی که نسبت پهنای کانال فلاشینگ به پهنای دره خیلی پایین باشد نیز ایجاد شود. اثر مثبت کانال فلاشینگ فقط به دلیل ایجاد شرایط مناسب انتقال کانالی نیست، بلکه با ایجاد یک شرایط فرسایش متناوب کناری و کف کانال و نیز تشدید ریزش می تواند باعث افزایش شدت انتقال رسوب از مخزن نیز می شود. اغلب بررسی موارد مذکور یا به صورت اطلاعات میدانی کوتاه مدت فلاشینگ های واقعی و یا آزمایشگاهی وجود دارد لذا استفاده از مدل های عددی برای شبیه سازی دوره های طولانی مدت رفتار فلاشینگ و همچنین لحاظ پارامترهای بیشتر این اثرات ضرروی است.

اغلب مدلسازی عددی رفتار فلاشینگ مخازن جهت سادگی و نیاز ۱ بعدی است. این مدل های ۱ بعدی برای مخازن باریک مناسب هست. همچنین در این مدل ها کانال فلاشینگ نیز لحاظ نمی شود زیرا به دلیل باریک بودن مخزن فرض می شود پهنای این کانال نزدیک پهنای دره مخزن باشد (فصل ۳). تا سال های ۲۰۰۰ اغلب مدلسازی عددی انتشار رسوبات مخزن با دبی ثابت جهت بررسی فلاشینگ و تغییرات پروفیل آبشستگی کف مخزن استفاده می شده است. همچنین بررسی شیب های کناری پایدار کانال امکان

پذیر است. البته در دره های پهن، پهنای کانال فلاشینگ مشخص می شد. در آن زمان اغلب فرسایش دوره ای در کانال فلاشینگ مدل می شد. اگرچه این مدل ها سپس بر اساس داده های واقعی واسنجی شده و علاوه بر کنش کانال، دپو رسوبات مخزن نیز به خوبی شبیه سازی می شد.

بعدها مدل های دو بعدی غیر دائم برای شبیه سازی جریان و توزیع رسوبات مخازن نیز توسعه داده شد (Bechteler and Nujic,1996). البته این مدل ها نیز هنوز نیاز به توسعه داشتند (شکل ۸).

معادلات مقدماتی جریان و رسوب مخازن

- مدل ۲ بعدی حجم محدود، (Lai,1994) در سیستم هذلولی غیر خطی (Hyperbolic) معادلات جریان به شکل برداری:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q)$$

Vectors: $q = [h, hu, hv]^T$;
Source/Sink: $b(q)$;
Flux vectors: $f(q) = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T$ in x;
$g(q) = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2]^T$ in y

با انتگرال گیری از معادله جزئی بالا روی Ω بر اساس تئوری واگرایی داریم:

$$\iint_{\Omega} q_i d\omega = -\int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega$$

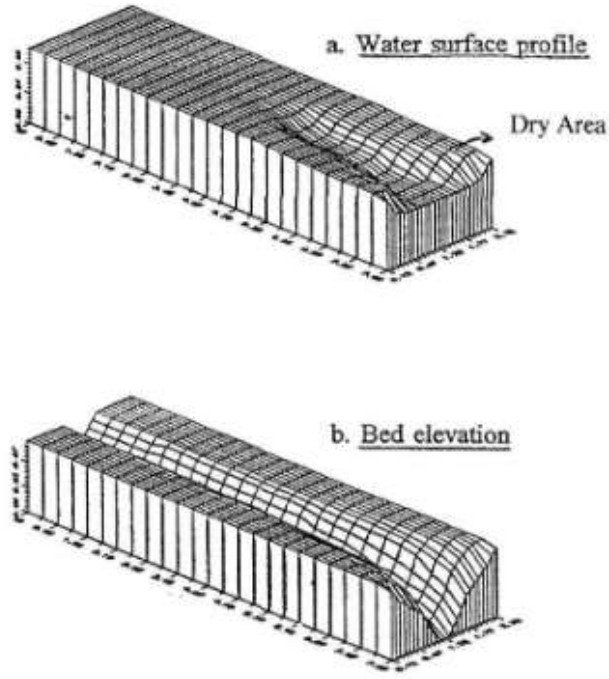
$$F(q) = [f(q), g(q)]^T$$

بر اساس گسسته سازی معادله بالا، معادله اساسی FVM به دست می آید:

$$A\frac{dq}{dt} = -\sum_{j=1}^{m} F_n^j(q) L^j + Ab(q)$$

معادله پیوستگی بار کف:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)}\left[\frac{\partial (S_{b,x})}{\partial x} + \frac{\partial (S_{b,y})}{\partial y}\right] = 0$$



شکل ۸: نتایج کارهای Lai,1994 (25)

بر اساس نظر Atkinson,1996 موارد زیر جهت مطالعات امکان سنجی فلاشینگ توصیه شده است:

-عمق جریان کانال فلاشینگ نباید از ۳۰ درصد عمق جریان تراز نرمال آبگیری بیشتر شود. شاید بهتر باشد این عمق با عمق جریان رودخانه قبل از آبگیری مقایسه شود و از این عمق بیشتر نباشد.

-حجم رسوبات تخلیه شده سالانه باید از حجم دپو شده بیشتر باشد

-پهنای فلاشینگ پیش بینی شده (فصل ۳) اگر از پهنای دره کف مخزن به صورت قابل توجهی کمتر باشد، می تواند یک محدودیت به ویژه در مخازن پهن محسوب شود.

- اگر پهنای فلاشینگ در سطر قبل یک محدودیت است، پهنای فرسایش یافته دره در تراز پر سد، باید ۲ برابر پهنای واقعی مخزن در تراز پر مخزن باشد. اگر پهنای فلاشینگ یک محدودیت نیست، پهنای دره فرسایش یافته و واقعی در تراز پر می توانند برابر باشند.

لازم به ذکر است جهت رسیدن به شرایط مورد اول، باید ابعاد و ظرفیت دریچه ها نیز در طراحی دیده شده باشد. همچنین مسئله کنترل سیل پایین دست و .... همچنین از نظر اقتصادی هدر رفت آب در کوتاه مدت جهت فلاشینگ مناسب، باعث سود تامین آب در درازمدت می شود. با این وجود این هد رفت آب نیز باید باتوجه به کاربری سد بررسی شود. مسئله اقتصادی و محاسبه هدر رفت آب در فصل ۱ ارائه شده و آنالیز ریسک سیل و کانال فلاشینگ در ادامه ارائه می شود.

آنالیز مهندسی عملکرد فلاشینگ و رفتار رسوب در مخزن

به طورکلی درک شرایط جریان و رسوبات نزدیک سد (رسوبات دورتر از بدنه سد کمتر تحت تاثیر فلاشینگ هستند) و دریچه ها، پیچیده و آشفته می شود و استفاده از داده های میدانی و مدل های فیزیکی ناگزیر است. این مسئله در مخازن بزرگ، مهم تر نیز می شود. برخی از این پیچیدگی ها که مورد توجه می باشد:

-برگشت آب از بدنه یا رسوبات دپو شده

-برگشت آب بین مخزن و رودخانه و رسوبات دپو شده

-فرسایش ناشی از برگشت آب

-فرسایش و دپو بار کف

-اندرکنش رسوبات دپو شده و جریان دانسیته

-اهمیت اطلاعات و داده های صحیح

-درک فرایند رسوبگذاری در هر مخزن خاص

-اهمیت مقایسه نتایج مدل های فیزیکی و عددی و میدانی

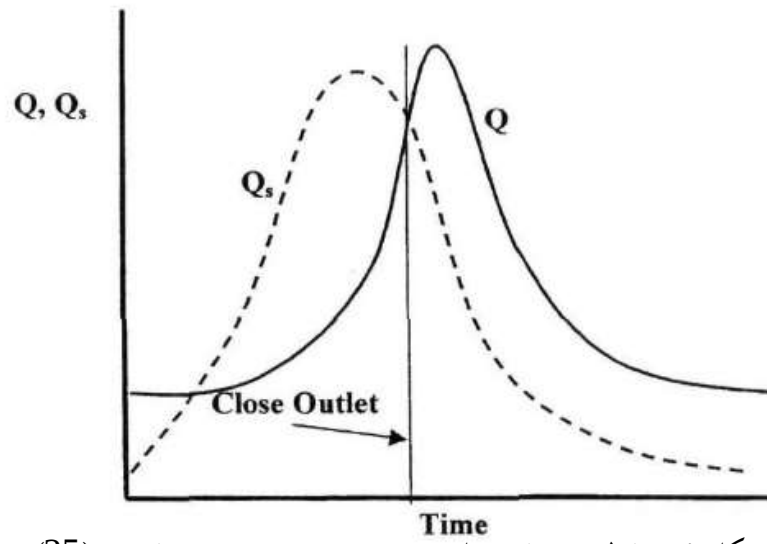
-تعیین تغییرات ضریب زبری و مقاومت جریان و تغییرات هندسه در سیستم رودخانه و مخزن باتوجه به دپو و فرسایش رسوبات

-مدلسازی درازمدت و دینامیک رفتار رسوبگذاری مخزن جهت برنامه ریزی حفاظ و پایداری ظرفیت مفید مخزن (۲۴)

-توجه به سازگاری ترازهای بهره برداری مخزن مانند کنترل سیل، تامین آب و شیب کانال فلاشینگ

٤-١-١ زمان بندی باز شدن دریچه تحتانی و آنالیز ریسک فاکتورهای موثر

اگر هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن و سدیگراف رسوب متناظر آن محاسبه شود (شکل ۹)، محل تلاقی اول دو نمودار زمان باز شدن دریچه تحتانی و محل تلاقی دوم، زمان بسته شدن دریچه است.

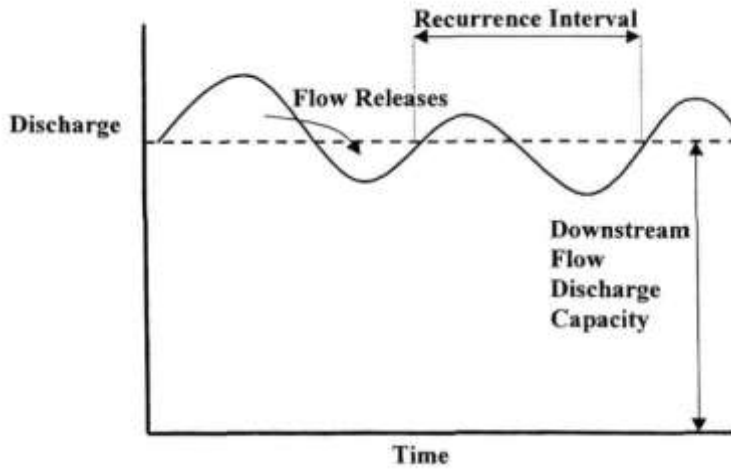


شکل ۹: روابط دبی های سیل و رسوب ورودی به مخزن فرضی (25)

روش های محاسبه هیدروگراف و سدیگراف در مراجع ۱ و ۳ همین مولفین و مرجع ۷ ارائه شده است. در واقع با این روش، هم به حفظ و تامین آب توجه شده، و هم رسوب وارد شده به مخزن تا حد ممکن

از دریچه تحتانی (Bottom outlet) خارج شده است. البته اگر این سیلاب در اثر دمای پایین یا گل آلودگی زیاد، چگال باشد نتایج بهتری انتظار خواهد رفت. با این وجود برخلاف تئوری ساده این روش، عدم قطعیت های زیادی وجود دارد که ممکن است بتوان به کمک آنالیز ریسک و عدم قطعیت های هیدرولوژیکی، آنها را تا حد ممکن مدیریت نمود. بحث کاملی در خصوص مفاهیم پایه آنالیز ریسک و عدم قطعیت در مرجع ۱ و تاحدی در خصوص عدم قطعیت ژئوتکنیکی سدهای خاکی در مرجع ۸ و ۹ توسط مولفین این کتاب ارائه شده است. در این خصوص عدم قطعیت هایی مانند خرابی دریچه، ریزش و لغزش توده های حجیم دامنه های مخزن، ورود رسوبات درشت و خرابی دریچه، و یا بسته شدن مسیر (اهیمت لایروبی های موردی جهت تکمیل فرایند فلاشینگ) و .. قابل ذکر است که کارائی این روش را کاهش می دهد. ضمنا" در شکل ۹ هیچ اشاره ای به میزان حداکثر توربیدتی رسوب مجاز پایاب از نظر آبزیان و حیات وحش، حداقل اکسیژن مورد نیاز، (معیارهای اکولوژیکی) به عنوان محدودیت های مقدار رسوب ناشی از فلاشینگ نشده است.

لذا در گام نخست، آنالیز ریسک زمان رسیدن پیک سیل و رسوب و آنالیز روابط آنها در هر حوضه سراب سد، جهت مدیریت فلاشینگ نیاز است. همچین باید ظرفیت عبور سیل ایمن از بازه های بحرانی پایاب سد تعیین شود (خط چین افقی در شکل ۱۰).



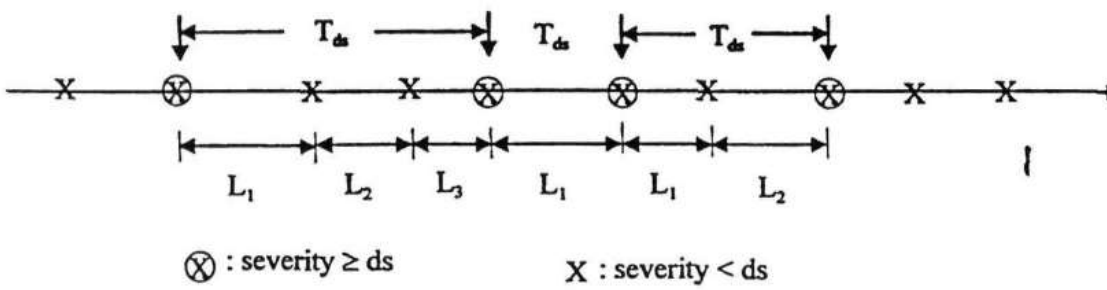
شکل ۱۰: نمایش موج های سیل وارد شده و رهاسازی ها از یک مخزن فرضی (25)

بدیهی است در عملیات فلاشینگ می بایست به مسئله کنترل سیل و رهاسازی ایمن پایاب رودخانه نیز طبق مثال شکل ۱۰ توجه شود. در سدهایی که برای تخفیف سیل طراحی شده اند برخلاف اهداف کنترل سیل، تنها بخشی از سیل ذخیره و بخشی رها می شود بطوریکه ظرفیت خالی مخزن با توجه به محدودیت پایاب، برای سیل های احتمالی بعدی نیز وجود داشته باشد. در این نوع سدها، هدف تحفیف پیک سیل خاص در بازه ای معین می باشد. با این وجود اگر حجم مخزن و مشخصات سرریز صرفا" بر اساس یک سیل با دوره بازگشت مشخص طراحی شود(۱)، ممکن است وقایع سیلاب های متوالی با حجم ها، تداوم و بزرگی های متفاوت باعث شکست سیستم شود. لذا حجم هر موج سیل و زمان تکرار موج سیل بعدی هر دو اهمیت دارد (۱۰). ریسک این دو مفهوم توسط (Hsieh, Wen Shen, 1999) مورد توجه قرار گرفت. در این خصوص با روش های شبیه سازی و برنامه ریزی مخازن و همچنین آنالیز ریسک و عدم قطعیت توسط دلیری در مرجع ۱ نیز این مفاهیم بسط داده شده اند.

در اینجا دو خصوصیت ریسک سیل به نام ۱-رخداد سیل یا Run و ۲-دوره بازگشت وجود دارد که توسط Shiau (1997) مشابه روش آنالیز خشکسالی روش Run که روش ترسیمی آن توسط دلیری، ۱۳۹۳ در مرجع ۱ تشریح شده به شرح زیر ارائه می شود:

-رخداد سیل. در اینجا هر رخداد یا Run شامل یک مقدار بالاتر از حد مشخص مثلا" ظرفیت پایاب رودخانه لحاظ می شود. هر رخداد نیز دارای دو مشخصه اصلی است. حجم و تداوم هر رخداد در بالای سطح بحرانی یا همان آستانه ظرفیت ایمن پایاب عبور سیل.

-دوره بازگشت. دوره بازگشت سیل می تواند برای حجم یا دبی پیک سیل بررسی شود. در واقع فاصله متوسط زمانی تکرار رخداد یا رخداد بیشتر از یک حد را دوره بازگشت رخداد می نامند.



شکل ۱۱: مفهوم و روش محاسبه دوره بازگشت سیل برای حجم برابر یا بیشتر از d_s

رابطه شکل ۱۱ به صورت زیر می باشد:

$$T_{dS} = \sum_{i=1}^{N_{ds}} L_i$$

لذا محاسبه دوره بازگشت حجم سیلاب و فواصل تکرار آن شامل ریسک رهاسازی حجم سیل و رسوب مخازن چند منظوره در مطالعات فلاشینگ که در شکل ۹ ارائه شده، ضروریست. لازم به ذکر است که بین دوره بازگشت حجم سیل و رخداد متناظر سیل آن رابطه معنی دار وجود دارد ولی این رابطه با سایر مشخصات سیل مانند تداوم و غیره مرتبط نمی شود و نیاز به انالیز های ریسک هیدرولوژیکی مناسب مانند تویع های پیوسته (joint) بین حجم و تداوم نیاز می باشد که خارج از متن کتاب حاضر می باشد (۱). ضمنا" نیاز است در کنار موضوعات فنی فلاشینگ، سایر ریسک ها مانند لغزش در کنار سایر محدودیت و ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی و اقتصادی نیز در این نتایج مورد توجه باشد.

٤-۱-۲ کدهای عددی CFD و روابط تجربی بارکف

در مطالعات رسوب مخازن می توان از معادلات ناویر استوکس بهره برد. این معادلات اثر لزجت سیال را برخلاف روش های اویلر ارائه می دهند.

رابطه جریان. اثر آشفتگی و پیوستگی جریان را به صورت زیر می توان در نظر گرفت:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P\delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} \right)$$

$-\rho \overline{u_i u_j}$ تنش رینولدز آشفته.

در معادلات مشتقات جرئی بالا U سرعت آب، t زمان، و x مولفه مکان و P فشار هیدرودینامیک یا انرژی جنبشی است. δ یا Kronecker delta در واقع در محاسبات شرطی صفر یا ۱ می باشد.

کدهای CFD در مدل SSIIM ممکن است برای محاسبات مذکور استفاده شود. در این کدها، معادلات ناویر استوکس به روش حل میانگین رینولدز (RANS) به صورت ۳بعدی با معادلات پیوستگی برای محاسبات آشفتگی جریان حل می شوند. جهت حل عددی می توان از طرح گسسته سازی روش حجم-محدود و طرح عددی Upwind برای حل معادلات تفاضل جزئی هاپربولیک استفاده شود. تنش های آشفتگی رینولدز ممکن است از مدل k-ε و مقدار فشار از روابط ساده موجود محاسبه شوند.

بار معلق در مدل مذکور به صورت توزیع اندازه چندگانه رسوبات در محل های مشخص، با معادلات انتشار-همرفت زیر مدل می شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t}+U_j\frac{\partial c}{\partial x_j}+w\frac{\partial c}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial c}{\partial x_j}\right)$$

در اینجا c غلظت رسوبات معلق در طول زمان t و محورهای مکان x و z .

w سرعت سقوط ذرات رسوب و Γ ضریب پخش آشفتگی.

بار کف ممکن است به کمک دو رابطه معروف وان-راین و یا مولر-پیتر-مایر محاسبه شود.

- رابطه وان-راین (۱۹۸۴)

$$\frac{q_{b,i}}{d_i^{1.5}\sqrt{\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w}}}=0.053\frac{\left(\frac{\tau-\tau_{c,i}}{\tau_{c,i}}\right)^{2.1}}{d_i^{0.3}\left(\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w\nu^2}\right)^{0.1}}$$

q مقدار انتقال بارکف برای کلاس اندازه رسوبات در واحد عرض، ρ دانسیته آب و رسوب، g شتاب ثقل، d قطر میانه کلاس مشخص رسوب، τ تنش برشی و تنش برشی بحرانی برای قطر میانه کلاس رسوب از روش تحلیلی منحنی شیلدز، v لزجت دینامیک سیال.

- رابطه مایر-پیتر-مولر (توضیحات بیشتر در کتاب هیدرولوژی عمومی گروه آبخیزداری محمد مهدوی مرجع ۷ دسترس است).

اگرچه این رابطه برای محاسبه بار کف رودخانه های تند پیشنهاد شده است ولی در برخی از تحقیقات نتایج در مخازن حتی از روش وان-راین نیز مناسب تر بوده است.

$$q_{b,i} = \frac{1}{g}\left[\frac{\rho_w g r I - 0.047 g(\rho_s - \rho_w) d_{50}}{0.25 \rho_w^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}}}\right]^{\frac{3}{2}}$$

I شیب خط انرژی، r شعاع هیدرولیکی.

باتوجه به تغییرات کف مخزن در طول فلاشینگ باید مقدار تغییرات زبری بستر k_s و ارتفاع شکل بستر Δ در طول فلاشینگ برای عمق آب y نیز پیش بینی شود.

$$k_S = 3.0\, d_{90} + 1.1\Delta\left(1.0 - e^{\left(\frac{-25\Delta}{7.3y}\right)}\right)$$

ارتفاع شکل بستر از رابطه زیر وان-راین ۱۹۸۴ قابل پیش بینی است:

$$\frac{\Delta}{y} = 0.11\left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{0.3}\left(1 - e^{-0.5\left(\frac{\tau - \tau_{c,i}}{\tau_{c,i}}\right)}\right)\left(25 - \left(\frac{\tau - \tau_{c,i}}{\tau_{c,i}}\right)\right)$$

لازم به ذکر است در مدل SSIIM می توان گرید ها را طوری طراحی نمود که با تغییر شکل بستر و یا خشک و تر شدن سلول ها در اثر افت و خیز تراز آب سازگار شوند و لذا این مسئله در مدلسازی بارکف مخازن و رودخانه ها اهمیت دارد.

در جدول ۱ که از یک مخزن نمونه جهت مثال از توزیع ذرات رسوب در در دو محل جلوی سرریز و ابتدای وردی مخزن ارائه شده است.

جدول ۱: درصد توزیع دانه بندی رسوبات در دو قسمت سرریز و ورودی مخزن نمونه

Grain Size [mm]	Fraction at the weir [%]	Fraction at the entrance of the reservoir [%]
100 - 72	5	25
72 - 52	5	20
52 - 36	10	15
36 - 24	10	15
24 - 11	10	10
11 - 6	20	10
6 - 3	15	3
3 - 1.5	15	1
1.5 - 0.5	10	1

٤-٢ مدلسازی آزمایشگاهی

توسعه مدل های آزمایشگاهی جهت درک عمیق و توسعه مدل های عددی، ضرروی است. همچنین می توان از این مدل ها جهت مطالعات میدانی به ویژه در مقیاس های یک مخزن یا مدلسازی رفتار دریچه ها نیز استفاده نمود. در این خصوص نیاز است تا ابتدا به کمک آنالیزهای تشابه هندسی و دینامیک، ابعاد مسئله را آزمایشگاهی نمود، و سپس نتایج را به ابعاد مورد نظر تبدیل و یا تفسیر نمود. در ادامه مدل آزمایشگاهی سه موضوع زیر در خصوص فلاشینگ مورد توجه قرار گرفته است:

- اثر افت تراز برای بازشدگی های مختلف دریچه با ترازهای مختلف مخزن
- آنالیز ابعادی رفتار رسوبات بدون چسبندگی
- بررسی تخلیه رسوبات چسبنده

٤-٢-١ مدل آزمایشگاهی افت – M.h.Seraji., 2002

سراجی، ۱۳۸۱، در رساله دکتری خود، نسبت به بررسی سناریوهای مختلف افت تراز مخزن، با بازشدگی های مختلف دریچه تحتانی روی کنش بستر و لذا بررسی کارائی فلاشینگ رسوبات تحقیق انجام داد. در این خصوص به کمک اندازه گیری سرعت جریان با لیزر طبق قانون داپلر، در فواصل معین از بدنه سد تا سراب سد و اعماق مختلف اقدام نمود. بر اساس این اندازه گیری ها تحت سناریوهای مذکور، به کمک برخی از پارامترهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک و تهیه و تفسیر منحنی های مختلف مانند سرعت برشی، تنش برشی بحرانی (منحنی شیلدز) و .. با نتایج فلاشینگ مقایسه نمود. به طورکلی نتایج حاکی از آن بود که کارائی فلاشینگ در افت های بیشتر و فواصل نزدیک به بدنه، بالاتر بوده و هرچی فاصله بیشتر و افت کمتر می شود کارائی فلاشینگ نیز کمتر می گردد. در واقع افت مناسب باعث ایجاد کانال فلاشینگ در اثر فرسایش دوره ای (Retrogressive erosion) اپکس (Apex) روسبات به سمت سراب می گردد.

٤-٢-٢ تشابه دینامیک رسوبات بدون چسبندگی- N.Talebbeydokhti, et al., 2004

با توجه به قضیه باکینگهام می توان تابع متغییرهای موثر در فلاشینگ رسوب مخزن را به شکل زیر نوشت:

$$f\left(C_s, u, h, S, g, \gamma, \gamma_s - \gamma, w\right) = 0$$

در اینجا غلظت رسوب C_s، سرعت متوسط جریان u، عمق جریان h، شیب انرژی S، شتاب ثقل g، وزن مخصوص آب و رسوب γ، γ_S و سرعت سقوط ذره w.

به کمک آنالیز ابعادی و ساده سازی متغیرهای بی بعد، به رابطه زیر که در فصل ۳ امکان سنجی استفاده شده یا TUM می رسیم:

$$Q_{os} = E \frac{Q_o^{1.6} S_w^{1.2}}{B^{0.6}}$$

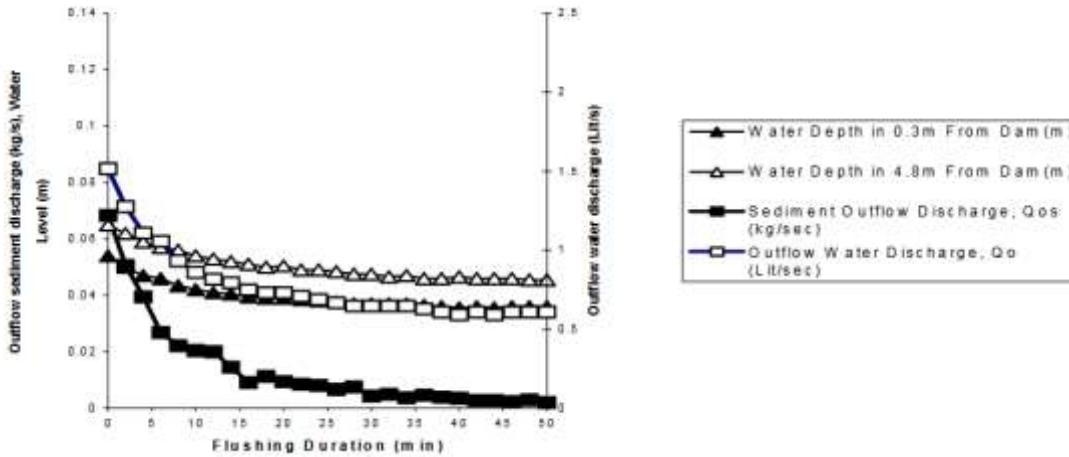
مقدار E یا ضریب فرسایش پذیری در فصل ۳ به صورت تجربی در جدول ۱ توسط دلیری پیشنهاد شده است. می توان این ضریب را از رابطه زیر نیز محاسبه نمود:

$$E = \frac{\gamma_s k_o}{gw\ (G_s - 1) n^{2.4}}$$

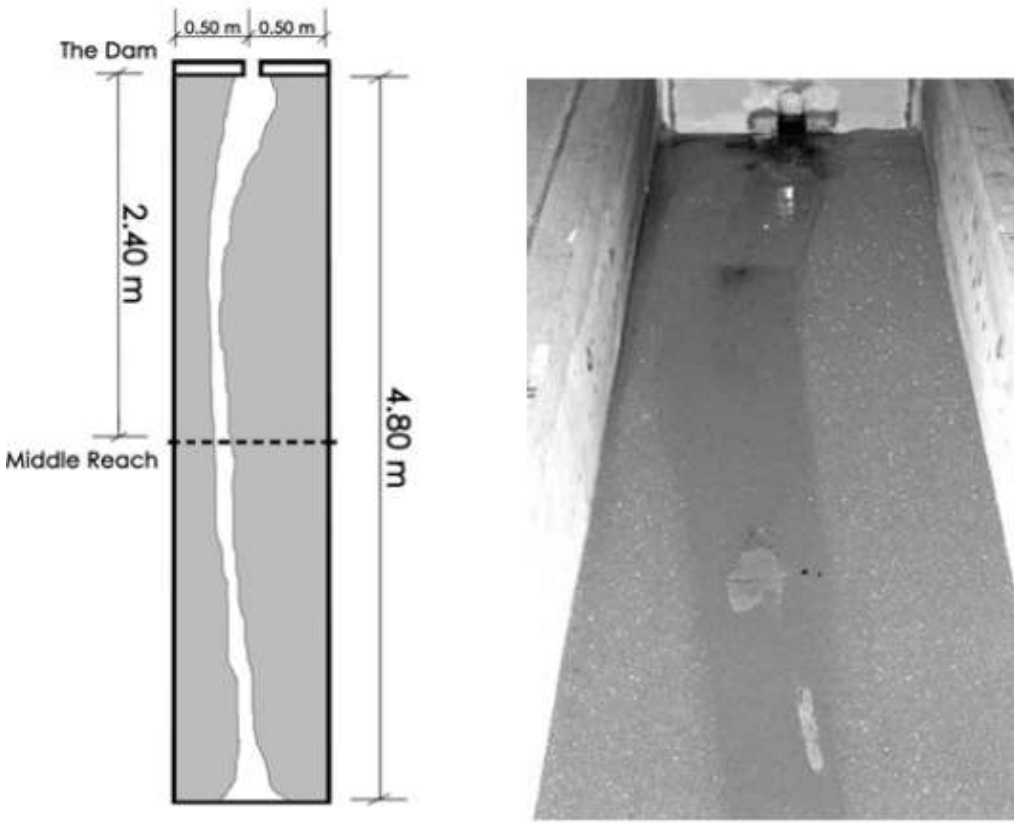
$$k_o = \frac{k\gamma}{g}$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma}$$

زبری مانینگ n. تعیین k تنها با واسنجی و اندازه گیری میدانی و یا آزمایشگاهی و ترکیب این دو قابل محاسبه است. نتایج آزمایش دینامیکی (**N. Talebbeydokhti, et al, 2004**) رفتار مخزن و بازشدگی دریچه در شکل و نمودارهای زیر نمایش داده شده است:



شکل ۱۲: رابطه دبی فلاشینگ و رسوب خروجی و عمق آب در پایاب و سراب مخزن –دبی ورودی ۰,۴۶۷۸ L/s. (27)



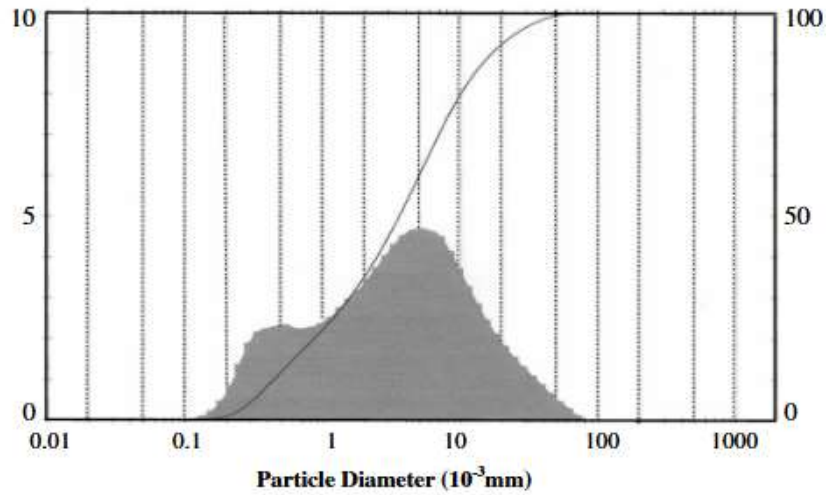
شکل ۱۳: تصویر و موقعیت کانال فلاشینگ ایجاد شده در آزمایش تخلیه رسوب سد (27)

٤-۲-۳ آبشویی رسوبات چسبنده با فشار – S.Emamgholizadeh, et al., 2014

اثر فشار آب در سدهای بزرگ روی رسوب، باعث ایجاد یک فرسایش به شکل قیف در اثر جریان های با تنش برشی زیاد همراه نیروی های گردشی ورتکس می شود. رفتار هیدرودینامیک این پدیده ها توسط محققین بالا در سال ۲۰۱۴ روی رسوبات چسبنده صورت گرفته است.

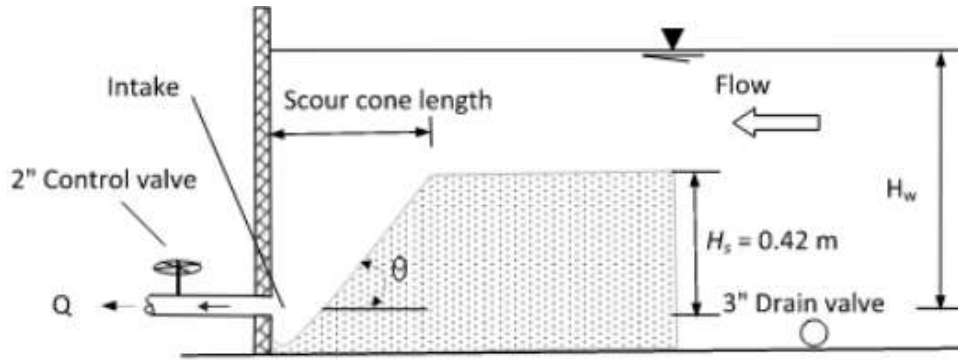
رسوبات چسبنده از نظر اندازه ذرات و رفتار مولکولی در محیط تر و خشک دارای تعریف و ویژگی های مشخصی هستند. مثلا" انواع رس کائولینیت، مونت مورینولیت، زئولیت، ورمی کولایت، و ... وجود دارد که برخی آماس پذیر یا غیر آماس پذیر هستند. این ویژگی باعث می شود رس های آماس کننده در حضور آب، منبسط شده و اگر روی سطح لغزش باشند با ایجاد نیروی بالابرده (Uplift) احتمال ریزش

توده ای از رسوبات (حرکات توده ای) افزایش یابد. شکل زیر توزیع زنگوله ای بین قطر ذرات و حالت چسبنده بودن را نشان می دهد.



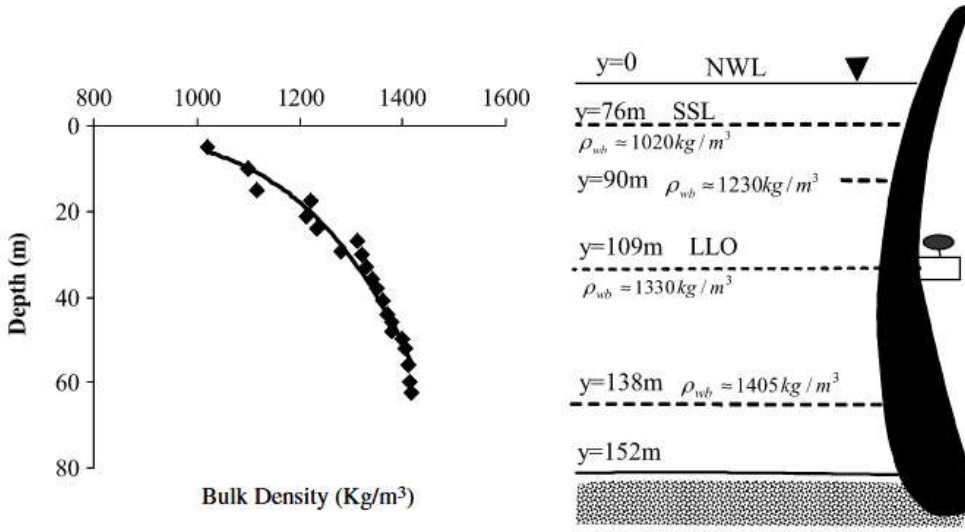
شکل ۱۴: منحنی آزمایش درجه بندی رسوبات چسبنده (28)

فرایند فرسایش رسوبات چسبنده به دو شکل سطحی و توده ای است. در حالت سطحی در واقع ذرات رسوب در اثر نیروی های هیدرودینامیک دراگ و لیفت حرکت می کنند. در واقع نیروهای فرسایشی باید بر مقاومت این ذرات فایق آیند. در حرکات توده ای فرایند و نیروهای زهکشی در داخل خاک نیز اثر دارند و به نیروی های برشی بیشتری نیاز است(شکل ۱۵ الی ۱۸).

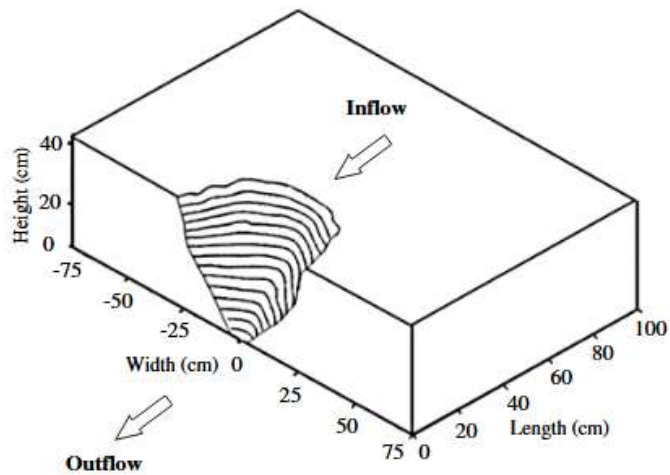


شکل ۱۵: شماتیک آزمایش فلاشینگ با فشار و ایجاد مخروط آبشستگی در مجاورت دریچه های سد(۲۸)

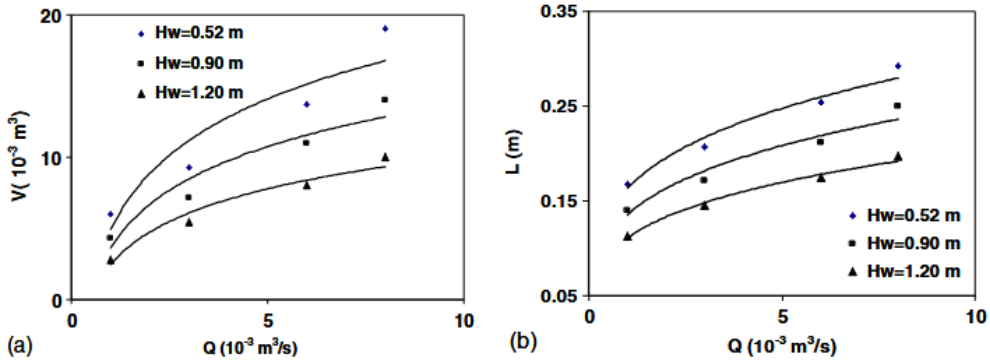
به طورکلی نتایج حاکی از آن است که اثر عمق آب، دبی و دانسیته حجمی رسوب مهم ترین نقش را در فرایند توسعه شکل مخروط فلاشینگ و عملکرد تخلیه رسوبات چسبنده با فشار آب را داشتند. باید توجه داشت که دانسیته رسوبات با گذشت زمان و فشار لایه ها در ترازهای پایین تر بیشتر می شود (شکل۱۶).



شکل ۱۶: گرادیان دانسیته رسوبات پشت سد دز و موقعیت دریچه تحتانی (28)



شکل ۱۷: نمای سه بعدی لایه رسوبات و توسعه مخروط فلاشینگ اطراف دریچه تحتانی سد فرضی (28)



شکل ۱۸: اثر دبی و تراز روی توسعه طول و حجم مخروط قیفی آبشستگی رسوبات چسبنده (28)

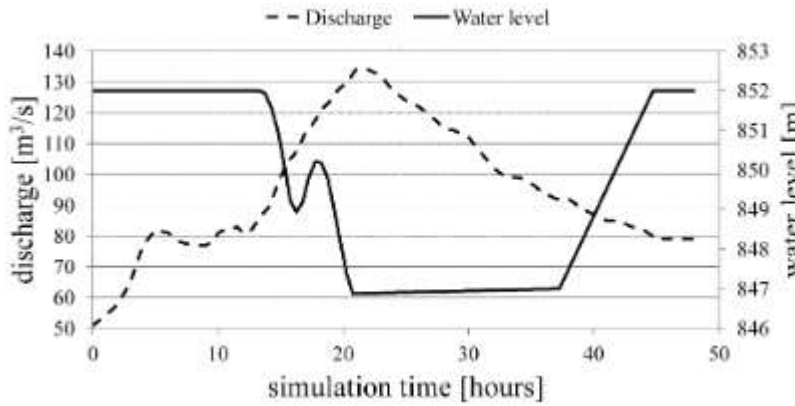
٤-۳ مدلسازی عددی

حل معادلات رسوب مخازن ممکن است بر اساس جریان غیر لزج یا لزج باشد. در بند CFD معادلات اصلی سیال لزج (ناویر استوکس) معرفی شد. در واقع معادلات غیر لزج اویلر نتایج مناسبی ارائه نخواهند کرد با این وجود ممکن است برای مطالعات اولیه و ساده مانند مثال زیر استفاده شوند.

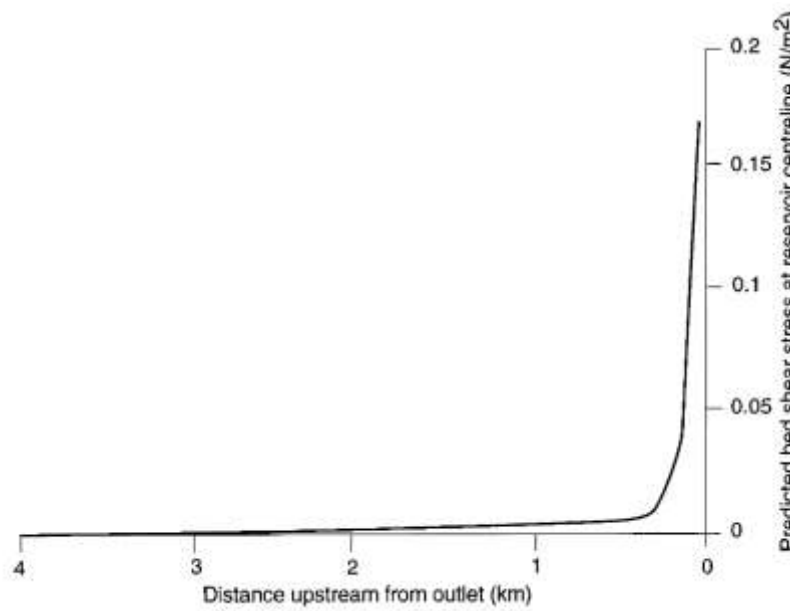
به طورکلی وقتی دریچه تحتانی باز می شود، بردارهای سرعت با مقدار زیاد در نزدیک دریچه باعث ایجاد تنش برشی متناسب سرعت و لذا کنش و آبشستگی می شود. این شرایط در فواصل دورتر از دریچه کمتر و در فواصلی نیز بی اثر می شود. اقایان White and Bettess (1984) جهت بررسی اثر افت ناقص در فلاشینگ، یک مدل عددی ساده غیر لزج را توسعه دادند. هندسه مخزن را به صورت منشوری و افقی و دریچه تحتانی به عنوان یک سینک در مدل فرض شد. همچین برای تعیین کارائی موثر فلاشینگ، یک معیار آستانه آبشستگی نیاز بود. این معیار را معادل حداقل سرعت جریان ۰,۱ m/s در کف بستر لحاظ کردند. محاسبات شبیه سازی بر اساس کدهای PHOENICS CFD پایه ریزی شد. از این سرعت می شود به تنش برشی رسید. همچنین می دانیم رابطه تنش برشی بحرانی از رابطه زیر باتوجه به مقدار دانسیته رسوبات (kg/m^3) می تواند محاسبه شود:

$$\tau_{cr} = 0.0012 \ \rho^{1.2}$$

در اینجا دبی خروجی را ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه تعیین کردند. چگونگی طراحی این دبی و هیدروگراف دبی و رسوب در فصول قبل و همچنین کتب دیگر مولفین کتاب حاضر ارائه شده است. لذا می توان به جای یک دبی ثابت، هیدروگراف دبی و رسوب را مانند شکل ۱۹ پیش بینی نمود. نتیجه مدلسازی عددی در شکل ۲۰ ارائه شده است.



شکل ۱۹: هیدروگراف دبی و رسوب متناظر در طول فلاشینگ



شکل ۲۰: پیش بینی تنش برشی در یک مخزن فرضی ایده آل در اثر فلاشیگ با شرایط ذکر شده

٤-٣-١ اصول مدلسازی مخازن

مدلسازی در مخازن سد ممکن است برای لایه بندی حرارتی و کیفی جهت بهره برداری و طراحی آبگیرها و مسائل زیست محیطی و یا برای انتقال موج سیل و یا بهره برداری شیلات، طراحی ابعاد سد، سرریز و .. انجام شود. یکی دیگر از بحث های مدلسازی مخازن سد مربوط به عملکرد و اجرای عملیات فلاشینگ رسوبات می باشد. در این خصوص نیاز به محاسبات رسوب ورودی و رسوبگذاری که در فصل اول این کتاب و سراسر مطالب کتاب حاضر ارائه شد، به عنوان مقدمه و پیش نیاز طراحی مدل مفهومی کیفی نیاز می شود. یک مدل مفهومی ساده به صورت شکل ۲۱ می باشد.

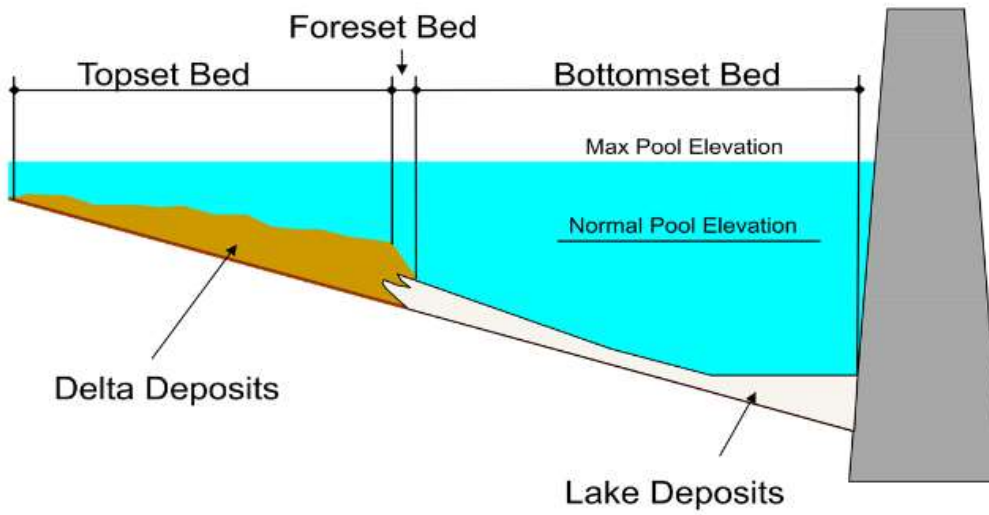


Figure 5. Conceptual View of Reservoir Deposition Zones

شکل ۲۱: مدل مفهومی زون های رسوبگذاری مخزن فرضی به صورت برش طولی

در خصوص روش های حل عددی مانند روش اجزای محدود و تفاضل محدود نیز در کتاب مدلسازی آب و محیط زیست مرجع ۱ نوشته همین مولفین بحث شده است.

در خصوص مدلسازی رسوب مخازن می بایست علاوه بر موارد ارائه شده در سراسر کتاب حاضر، توجه شود که بستر و شکل هندسه و پارامترهای هیدرودینامیک مخزن در طول فلاشینگ ثابت نیستند. همچنین به دلیل افت تراز می بایست در مدل عددی سلول های گرید در سطح افق و ستون عمودی به درستی و به

تعداد و ابعاد مناسب از نظر همگرایی حل عددی توجه شود. لذا بهتر است مدلی انتخاب شود که قابلیت سازگاری در ساختار گریدبندی در طول فرایند اجرای مدل همانند توضیحات بند ۴-۱-۲ وجود داشته باشد. همچنین در خصوص ابعاد سلول و گام زمانی مدل روابط کمکی و انواع شرایط مرزی مانند شرط مرزی نیومن یا دریکله در مرجع ۱ جهت همگرا شدن حل عددی تشریح شده است. به طورکلی شرایط مرزی مدلسازی رسوب مخازن در سراب برای جریان و رسوب ورودی تعریف می شود و در پایاب نیاز به تعریف نیست مگر اینکه بر حسب ضرورت در مدل باشد. نکته دیگر این است که باید جنس رسوبات وارد شده به مخزن از نظر ابعاد و ویژگی چسبنده (معمولا" کمتر از ۰٫۰۰۲mm) یا غیر چسبنده بودن مشخص شود تا بتوان مدل مناسب طراحی و نتایج تفسیر شود. به عنوان مثال اغلب ورودی رسوب سدهای کوهستانی درشت می باشد. اگر رسوبات درشت باشند اغلب این رسوبات ممکن است تا بالای ۶۰ درصد به عنوان خروجی اصلی فلاشینگ دیده شوند. در این حالت باید معادلات انتقال رسوب بار کف مانند معادلات وان-راین یا مایر-پیتر-مولر (بند۴-۱-۲) در کنار معادلات بار معلق در مدل لحاظ شود. همچنین ممکن است در این شرایط نیاز باشد تا درصد دانه بندی رسوبات با کلاس های مختلف در نقاط مختلف مخزن مانند نزدیک دریچه و سراب مخزن تعیین شود. در خصوص مخازنی که عمده رسوبات آنها چسبنده باشد نیز نیاز به اطلاعات مربوط به حرکات توده ای، زاویه داخلی، ضخامت رسوبات فعال، و معادلات مربوطه خواهد بود. جهت تعیین دبی حداقل فلاشینگ به منظور کنش اولیه و تخریب لایه آرمور در صورت وجود این لایه، به این اطلاعات و داده های تکمیلی نیاز می شود. مثلا" در یک مخزن فرضی ممکن است حداقل دبی کنش لایه آرمور ۸۰ مترمکعب برثانیه جهت تولید تنش برشی موثر و بحرانی باشد. در حال حاضر اغلب مدل مخازن ۱ یا ۲ بعدی استفاده می شود. زیرا داده های کمتر و پیچیدگی کمتری نیاز دارد. البته انتظار است باتوجه به پیشرفت سیستم های به روز تر و داده های بیشتر از مخازن موجود، تمایل استفاده بیشتر از مدل های سه بعدی نیز ایجاد شود.

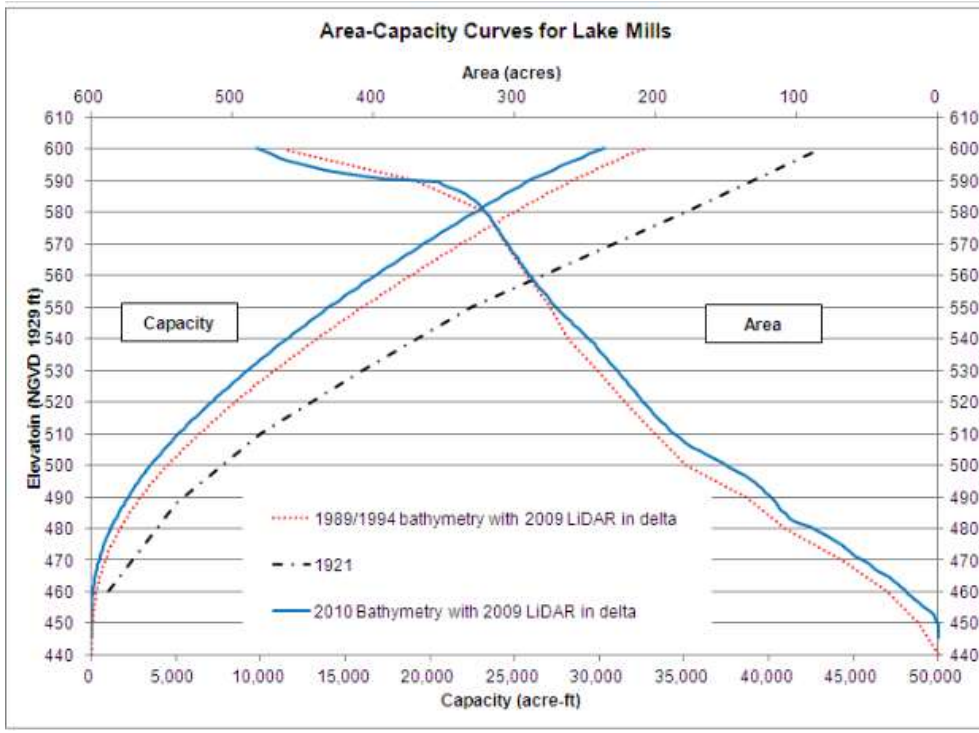
٤-۳-۲ مدل های کامپیوتری

از نظر مولفین این کتابف اساسا" اگر کارشناس اصول فنی موضوع مورد نظر (در اینجا رسوب مخزن) را بداند، نیازی به تالیف کتاب در خصوص مدل های کامپیوتری نیست. زیرا این مدل ها دارای متن های جامع و کامل در خصوص قابلیت ها و چگونگی توسعه هستند. با این وجود در اینجا به ذکر نام ۴ مدل

مناسب شامل SRH-2D، HEC-RAS و GSTARS4 و GSTARS3 اکتفا می شود. بدیهی است نتایج تمامی این مدل ها که اغلب بر اساس کدهای CFD (بند۴-۱-۲) پایه ریزی می شوند بدون واسنجی و صحت سنجی قابل استفاده نیستند. همچنین ممکن است باتوجه به شرایط نیاز شود تا کدهای این مدل ها به کمک نرم افزارهایی چون فلوئنت، یا SSIIM در تحقیقات توسعه یا اصلاح شود. جهت واسنجی این مدل ها نیاز به پایش و اندازه گیری می باشد.

٤-۳-۳ اندازه گیری و پایش

قبل، حین و بعد از عملیات فلاشینگ مخازن نیاز به داده های مختلفی است که نیاز به اندازه گیری و پایش با ابزارهای مختلف دارد. به عنوان مثال اطلاعات از هندسه مخزن به کمک باتیمتری صورت می گیرد. روش های باتیمتری در کتاب هیدرولوژی عمومی گروه آبخیزداری، محمد مهدوی مرجع ۷ ارائه شده است. به کمک این اطلاعات می توان منحنی شکل ۲۲ را ترسیم کرد. این منحنی در مطالعات رسوبگذاری و طراحی منحنی فرمان بهره برداری مخازن کاربرد بسیاری دارد (۱).



شکل ۲۲: منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن Mills روی رودخانه Elwha واشینگتن با روش GIS

علاوه بر روش های سنتی باتیمتری در مرجع ۷، روش های به روز مانند استفاده از رادیوسند نیز وجود دارد (شکل های ۲۳ و ۲۴).

Figure 2. Survey vessel (top) and terrain product (bottom) from recent Lake Roosevelt survey (Ferrari, 2012).

شکل ۲۳

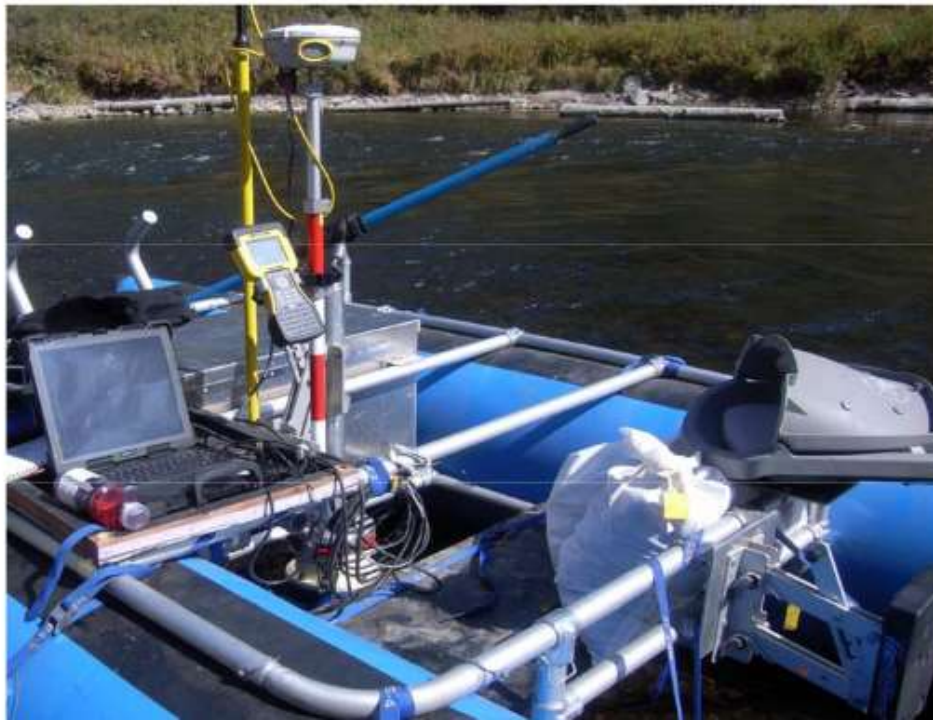


Figure 3. Example bathymetric equipment setup with RTK GPS, ADCP, and laptop on river cataraft for shallow reservoir areas or riverine segments. Photography courtesy of Sedimentation & River Hydraulics Group, Reclamation, Denver, Colorado.

شکل ۲۴

علاوه بر موارد بالا، پایش دبی و غلظت رسوب خروجی از دریچه های سد حین فلاشینگ برای کنترل زیست محیطی (بند ۴-۴) و واسنجی رابطه TUM برای تحقیقات و عملیات آتی فلاشینگ همراه اطلاعات باتیمتری ضروری است.

٤-٤ ملاحظات اقتصادی-اجتماعی و محیط زیست

از حدود ۳۰ سال پیش همیشه بحث اثرات مختلف سدسازی روی زیست بوم وجود داشت. به عنوان نمونه اثر غلظت رسوبات به ویژه در زمان تخم ریزی آبزیان، باعث کاهش جمعیت ماهی و امور مشاغل مرتبط

به آبزیان می گردد. لذا مسئله بازشدن نامناسب دریچه می تواند روی مسائل اقتصادی – اجتماعی نیز اثرات منفی بگذارد. در این خصوص رساله های دکتری جهت ارتباط هیدرودینامیک و بهره برداری مخازن سد با رویکردهای مذکور صورت گرفته است. در این خصوص می توان به کمک پارامترهایی چون میزان اکسیژن مجاز و ارتباط ان با غلظت رسوبات و تداوم های خروجی، نسبت به طراحی شرایط بیهینه منحنی فرمان فلاشینگ اقدام نمود(۱).

یکی از روش های ارزیابی ریسک زیست محیطی فلاشینگ توسط Moridi & Yazdi,2016 که توسط Crosa et al,2010 توسعه داده شده، ارزیابی شده است:

$$SEV = A + B.Ln(ED) + C.Ln(SSC)$$

در اینجا SEV نتایج مدل ریسک زیستی حیات آبزیان ناشی از رسوبات، A,B,C ضرائب ثابت واسنجی که باتوجه به جنس و گونه آبزیان (مثلا" ماهی سالمون و ...) از جداول مربوط قابل دسترس می باشد و یا می بایست بر اساس تحقیات میدانی محاسبه شود، DE تداوم تخلیه رسوب بر حسب ساعت، SSC غلظت رسوبات جامد (میلی گرم بر لیتر). بر اساس این رابطه می توان حین مطالعات فنی و طراحی عملیات فلاشینگ، به کمک چنین روابطی ملاحظات زیستی را نیز وارد سناریوهای مختلف محاسبات فنی نمود. همچنین می توان با ایجاد رابطه های دیگر بین مدل مذکور و سایر ملاحظات اجتماعی-اقتصادی، به سایر ملاحظات مورد نیاز نیز توجه نمود. در خصوص محاسبه مقدار مجهولات رابطه بالا در فصول گذشته کتاب حاضر مطالب کافی ارائه شده است. همچنین می توان به کمک مدل هایی چون MIKE11 این اثرات را به صورت روندیابی در بازه های پایاب رودخانه سد نیز منتقل نمود.

مطالعات حاکی از آن است که اگر مقدار مدل مذکور بیش از ۹ شود باعث مرگ آبزیان می شود. لذا باید این محدویت را به کمک مدل بالا به مقدار آستانه غلظت رسوب با تداوم مشخص مجاز، به عنوان یک محدودیت زیستی فلاشینگ برای بازه بحرانی مورد نظر تعیین نمود. سپس باتوجه به محدودیت های فنی مثلا" حداقل دبی کنش لازم، اقدام به سناریوسازی جهت بهینه سازی و طراحی منحنی فرمان بهینه فلاشینگ نمود. همچنین شاخص ریسک مدل رگرسیونی بالا ممکن است خصوصیات مختلفی را به جز حیات آبزیان مانند سمی شدن آب، بحث های اقتصادی، و .. را نیز وارد محاسبات کند.

منابع

۱. فرهاد دلیری، میرحسن سید سراجی (۱۳۹۸)، مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، حوضه های شهری و روستایی. محاسبات عددی، چاپ دوم، حمایت شرکت مهندسین آبسام (طرح و ساخت)، (www.absam.ir).

۲. دلیری، فرهاد، ۱۳۸۶. مطالعات فرسایش و رسوب سید شیرین دره، شرکت وزنا (روش MPSIAC).

۳. فرهاد دلیری، حسن سید سراجی (۱۴۰۱)، مدلسازی آب و محیط زیست (اصول مقدماتی هیدرولوژی شهری) چاپ اول، حمایت شرکت مهندسین آبسام (طرح و ساخت)، (www.absam.ir).

۴. حسن احمدی، کنترل فرسایش بادی، گروه آبخیزداری دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.

۵. حسن احمدی، کنترل فرسایش آبی، گروه آبخیزداری دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.

۶. سادات فیض نیا، (۱۳۷۴). "توسعه جدول مقاومت سنگها به فرسایش در ایران". مجله منابع طبیعی شماره ۴۷ .

۷. محمد مهدوی، (. "هیدرولوژی کاربردی – جلد دوم)، گروه آبخیزداری دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.

8. Farhad.Daliri. “Uncertainty in flood forecasting modeling”, 250p. 2020.www.absam.ir.
9. Farhad. Daliri., “ Principle of damming”, 50p., Press Absam EPC., www.absam.ir.

۱۰. دلیری، فرهاد.، سیدسراجی، میرحسن.، و خلقی، مجید. (۱۳۸۸)، "مدیریت و برنامه ریزی سیستم آبخیز با استفاده از مدل بهینه سازی،"(مطالعه موردی: آبخیز گرمابدشت گلستان)، مجله آبخیزداری دانشگاه تهران و CAB International ، ۶۲(۲):247-256.

۱۱. دلیری، فرهاد.، سلاجقه، علی.، خلقی، مجید.، و سید سراجی، میرحسن. (۱۳۸۸)، "آینده و اصول آبخیزداری حوضه های شهری و سدها با نگرش مهندسی سیستم ها،" پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری(مدیریت پایدار بلایای طبیعی)، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۱۲. فرهاد دلیری، ۱۳۸۶. مطالعه اثربخشی کنترل سیل شهرستانک، مهاب قدس، سازمان جنگلها و مراتع آبخیرداری کشور.

۱۳. فرهاد دلیری، پایان نامه ارشد، منحنی فرمان سد علویان، علوم و تحقیقات تهران ۱۳۸۵.

۱۴. محمود شفاعی بجستان، "هیدرولیک رسوب" چاپ سوم، ۱۳۸۴.

۱۵. فرهاد، دلیری، " مدلسازی رفتار آبگیری سد رودبار لرستان" با مدل HEC-HMS، ۱۳۹۳ شرکت سکو کارفرما آب نیرو.

16. F. Fruchard, B. Camenen. “ Resevoir sedimentation: different type of flushimg – friendly flushing example of Genissiat dam flushing. ICOLD International Symposium on Dams for a changing world, Jun 2012, Kyoto, Japan. 6p. hal-00761305.
17. E. Atkinson, 1996. “ The feasibility of flushing sediment from reservoirs” HR Wallingford, UK.
18. Brabben T E, 1988. “Reservoir desilting methods”. Report OD/TN 32. HR Wallingford, UK.

۱۹. دلیری فرهاد (۱۳۹۳)، نظارت فنی بر محاسبات رسوبدهی حوضه و رسوبگذاری سد رودبار لرستان(بررسی نیاز لایروبی، شاسینگ، سدرسوبگیر)، فاز اجرایی پروژه سد و نیروگاه لرستان، شرکت سکو، آب نیرو.

۲۰. دلیری فرهاد (۱۳۹۳)، نظارت بررسی لایروبی هیدرولیکی (وزنی) سد رودبار لرستان، سد و نیروگاه لرستان، شرکت سکو، آب نیرو.

۲۱. دلیری فرهاد ،(۱۳۸۸) تهیه روش شناسی کنترل سیل رودخانه و حوضه سد کارون ۴، مشاور مهاب قدس، آب نیرو.

۲۲. دلیری فرهاد ، (۱۳۸۹)، بررسی امکان کنترل رسوب جهت حفظ شرایط آبگیر برقابی سد دز، مشاور مهاب قدس،آب منطقه ای.

۲۳. دلیری. فرهاد، نظارت بر لایروبی رودخانه ها، خرید و نصب و تعمیر ایستگاه های هیدرومتری و دیتالاگر آب زیرزمینی، پروژه پایش مستمر شبکه سنجش منابع آب سطحی و زیرزمینی، آب منطقه ای های کشور، شرکت آبسام (همکار)، ۱۳۹۵.

۲۴. دلیری فرهاد و حسن سیدسراجی. آب و هواشناسی دینامیک. چاپ اول ۱۴۰۲. دانلود www.absam.ir.

25. Hsieh, Wen Shen, 1999. “ Flushing sediment through reservoir” jour. Hydraulic research, Vol. 37,. No. 6.
26. Mir Hassan Seyed Seraji, 2002. These ”Etude du transport sedimentaire associe au phenomene de chasse d’un barrage” Doctorate de I’Universite de Caen, 163p.

27. N.Talebbeydokhti and A.Naghshine, 2004. “Flushing sediment through reservoir” Iranian Journal of Science & Technology, Trans B, Vol. 28, No. B1.
28. S. Emamgholizade and M.Fathi-Moghadam, “Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs” J.Hydro1.Eng. 2014.19:674-681.
29. A.Moridi and J.Yazdi, 2016. “Sediment flushing of reservoirs under environmental considerations”, Springer Water Resources Manage. DOI 10.1007/s11269-017-1620-y.

AbSam
EPC Co.
Research, Design & Construction
www.absam.ir

Environmental & Water Modeling

Dams Sediment Flushing

(Feasibility – Laboratory model – Numerical modelling)

1 th Print 2022

BY:

Dr. Farhad Daliri , Dam Consultant & Hydrologist
Instructor
Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University

Dr. Hassan Seyed Seraji , Dam Consultant & Fluid Mechanics
Assistant Professor
Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University

AbSam EPC Co.

Research, Design & Construction

Environmental & Water Modeling

Dams Sediment Flushing

(Feasibility – Laboratory model – Numerical modelling)

1 th Print 2022

By:

Dr. Farhad Daliri Dam Consultant and Hydrologist
Instructor Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University
info@absam.ir

Dr. Hassan Seyed Seraji Dam Consultant and Fluid Mechanics
Assistant Professor Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University
mhseraji@pwut.ac.ir

شرکت مهندسین آبسام (طرح و ساخت)

شرکت مهندسین مشاور و پیمانکار آبسام (طرح و ساخت) از ترکیب شرکت مهندسین مشاور مهاب سیل کشتمان (سال ۱۳۸۵) با شرکت پیمانکار آبنگار کارون (سال ۱۳۷۵) در سال ۱۳۹۶ تاسیس شده است. زمینه های کاری:

۱. مشاور و پیمانکار آب- انرژی و محیط زیست (سد، رودخانه، نفت و گاز، آبیاری و ...)
۲. مشاور و پیمانکار راه و ساختمان
۳. نقشه برداری و GIS , IT
۴. تهیه، نصب و راه اندازی ادوات و ابزار و هوشمندسازی
۵. صدور خدمات فنی و مهندسی ارزش و روابط بین الملل

جزئیات در سایت رسمی شرکت www.absam.ir قابل دسترسی می باشد.

"کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مهندسین آبسام می باشد."

شابک: ۵-۲۱-۶۹۲۳-۶۰۰-۹۷۸

Free Download: www.absam.ir

مولفان: دکتر فرهاد دلیری، دکتر حسن سید سراجی