

جمهوری اسلامی ایران
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها

نشریه شماره ۵۸۹

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

<http://seso.moe.org.ir>

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

nezamfanni.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

شماره: ۱۰۰/۴۷۴۹۰	بخشنامه به دستگاههای اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ: ۱۳۹۱/۶/۱۵	
موضوع: راهنمای مطالعات رسوب گذاری و رسوب زدایی مخازن سدها	
به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین نامه استانداردهای اجرایی طرح های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۸۹ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای مطالعات رسوب گذاری و رسوب زدایی مخازن سدها» از نوع گروه سوم ابلاغ می شود. رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاههای اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۹/۱ اجباری است.  بهروز موادی	

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه‌ی این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده‌ی هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره‌ی بند و صفحه‌ی موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
- ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
- ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
- ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱ معاونت

برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: info@nezamfanni.ir

web: nezamfanni.ir/

پیشگفتار

مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریان‌های سیلابی رودخانه و به منظور کنترل سیلاب، ذخیره‌ی آب برای مصارف پایین‌دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می‌شوند. ترسیب رسوب در مخزن سد باعث از دست رفتن حجم مفید آن شده و از این‌رو حفظ و نگهداری مخازن موجود و به حداقل رساندن تلفات حجم مخزن در اثر ترسیب در اولویت برنامه‌ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. امروزه مدیریت پویای مخازن مقرر می‌کند که کشورها هرچه سریع‌تر اقدام به اجرای روش‌هایی برای کنترل فرسایش نمایند تا آورد رسوب به حداقل ممکن برسد.

بنابراین ضروری است که روش‌های مختلفی برای محاسبه و بررسی چگونگی توزیع رسوب در مخزن، کنترل رسوب ورودی و رسوب‌زدایی مخزن مطالعه و استفاده شود. علاوه بر این تاثیر رسوب‌زدایی بر شرایط پایین‌دست نیز از اهمیت زیادی برخوردار است که باید مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به مطالب فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها» را با هماهنگی امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور در دستور کار قرارداد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به این معاونت ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

هدف این نشریه، ارائه راهنمایی برای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها است که در آن به شناخت عوامل نهشته شدن رسوب در مخازن و روش‌های کنترل و مدیریت موضوع رسوب در مخازن موجود کشور پرداخته شده است. بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی از تلاش و جدیت رئیس امور نظام فنی جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم نیا و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران را آرزومند می‌باشد.

امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود درخصوص این نشریه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

معاون نظارت راهبردی

تابستان ۱۳۹۱

تهیه و کنترل

مجری: موسسه تحقیقات آب

مؤلف اصلی: دکتر محمود شفاعی بجنستان دانشگاه شهید چمران اهواز دکتراي هیدرولیک رسوب

اعضای گروه تهیه کننده:

مرتضی سیدیان	دانشگاه گنبد کاووس	دکتراي سازه‌های آبی
محمود شفاعی بجنستان	دانشگاه شهید چمران اهواز	دکتراي هیدرولیک رسوب
عبدالرضا ظهیری	دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتراي سازه‌های آبی
سپه‌الدین محمودی کردستانی	سازمان آب و برق خوزستان	فوق لیسانس سازه‌های آبی
مصطفی نکوئیان‌فر	سازمان آب و برق خوزستان	فوق لیسانس زمین‌شناسی و نقشه‌برداری
شبنم نوروزپور	دانشگاه شهید چمران اهواز	فوق لیسانس سازه‌های آبی

شایان ذکر است از نظرات آقای دکتر مهدی قمشی (دانشگاه شهید چمران) در رابطه با روش‌های تجربی توزیع رسوب و آقای دکتر صمد اماقلی‌زاده (دانشگاه شاهرود) در ارتباط با رسوب‌زدایی تحت فشار در متن این راهنما استفاده شده است.

اعضای گروه نظارت:

علیرضا دایمی	وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی
حسن سیدسراجی	دانشگاه صنعت آب و برق	دکتراي مکانیک سیالات
عبدالعلی شرقی	دانشگاه شهید بهشتی	دکتراي عمران
اسماعیل طلوعی	کارشناس آزاد	دکتراي عمران
فرهاد قادری	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت فوق لیسانس عمران	
	آب کشور- وزارت نیرو	
رویا ملتشاهی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت فوق لیسانس عمران - مکانیک خاک و مهندس	
	آب کشور- وزارت نیرو	پی

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

دالی بندار	دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و	دکتراي مهندسی عمران
	آبفا- وزارت نیرو	
مسعود حدیدی‌مود	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق لیسانس مهندسی مکانیک
رضا راستی اردکانی	دانشگاه صنعت آب و برق	دکتراي مهندسی عمران
فرزان رفیعا	شرکت مهندسین مشاور کاوشگران	فوق لیسانس مکانیک سنگ و فوق لیسانس
		مهندسی معدن

نوشین رواندوست	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی	لیسانس مهندسی سازه
محمدطاهر طاهری بهبهانی	صنعت آب کشور- وزارت نیرو	
محمد رضا عسکری	شرکت مهندسین مشاور توان آب	فوق لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
مجتبی غروی	شرکت مهندسین مشاور بندآب	دکترای مهندسی عمران
محمد رضا فرشباغ رحیمی	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکترای مهندسی عمران
سپاوش لیتکوهی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناس ارشد منابع آب
علی یوسفی	شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک	دکترای ژئوتکنیک
	شرکت مهندسین مشاور زمین آب، پی	فوق لیسانس مهندسی معدن و زمین شناسی
		مهندسی

اعضای گروه هدایت و راهبردی پروژه:

خشایار اسفندیاری	رئیس گروه امور نظام فنی
فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی
ساناز سرافراز	کارشناس منابع آب امور نظام فنی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۳	فصل اول - کلیات
۵	۱-۱- کلیات
۹	فصل دوم - آمار و اطلاعات و پردازش آنها
۱۱	۱-۲- کلیات
۱۱	۲-۲- جمع‌آوری آمار و اطلاعات
۱۱	۱-۲-۲- تعیین محدوده‌ی مطالعه
۱۲	۲-۲-۲- جمع‌آوری اطلاعات، گزارش‌ها و نقشه‌ها
۱۲	۳-۲-۲- داده‌های مورد نیاز
۱۴	۳-۲- پردازش داده‌ها
۱۵	۱-۳-۲- تعیین مشخصات فیزیوگرافی حوضه
۱۵	۲-۳-۲- ارزیابی داده‌های هواشناسی
۱۶	۳-۳-۲- ارزیابی داده‌های هیدرولوژی
۱۶	۴-۳-۲- رسم منحنی بده سنج‌هی رسوب
۱۷	۵-۳-۲- تخمین بار بستر
۱۷	۶-۳-۲- خاک‌شناسی پوشش گیاهی و کاربری اراضی
۱۹	۷-۳-۲- زمین‌شناسی و ژئوتکنیک
۲۰	۸-۳-۲- ریخت‌شناسی رودخانه‌ها
۲۱	۹-۳-۲- مشخصات فیزیوگرافی حوضه
۲۲	۱۰-۳-۲- مطالعات اجتماعی و اقتصادی
۲۲	۱۱-۳-۲- مطالعات زیست محیطی
۲۲	۱۲-۳-۲- مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب
۲۳	فصل سوم - روش‌های برآورد حجم رسوب نهشته شده در مخزن
۲۵	۱-۳- کلیات
۲۵	۲-۳- نقشه‌برداری مخزن
۲۵	۱-۲-۳- برنامه‌ریزی عملیات نقشه‌برداری
۲۸	۲-۲-۳- روش‌های نقشه‌برداری مخزن سد
۴۰	۳-۳- محاسبه حجم رسوبات نهشته شده
۴۰	۱-۳-۳- روش‌های مبتنی بر محاسبه سطح محصور بین خطوط تراز

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴۳	۳-۳-۲- روش‌های مبتنی بر سطح مقاطع عرضی مخزن
۴۷	۳-۳-۳- روش ضریب ثابت
۴۷	۳-۳-۴- کاربرد GIS
۴۹	۳-۳-۵- روش‌های نوین
۵۳	۳-۴-۴- روش‌های تعیین حجم با استفاده از عمق رسوب نهشته شده
۵۳	۳-۴-۱- روش ردیابی عنصر سزیم ۱۳۷
۵۴	۳-۴-۲- روش عمق‌سنجی زیر سطحی
۵۴	۳-۴-۳- نصب صفحات فلزی مسطح
۵۵	فصل چهارم- الگوی رسوب‌گذاری در مخازن سدها و برآورد عمر مفید سد
۵۷	۴-۱- پیش‌بینی چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها
۵۷	۴-۱-۱- نیم‌رخ طولی رسوب‌گذاری
۶۰	۴-۱-۲- دلتا
۶۳	۴-۱-۳- پروفیل عرضی رسوب‌گذاری
۶۴	۴-۱-۴- سایر عوامل موثر بر الگوی رسوب‌گذاری
۶۶	۴-۲- روش‌های تجربی پیش‌بینی الگوی رسوب‌گذاری
۶۷	۴-۲-۱- ترسیب در مسیل‌ها (بخش تعدیل سیلاب مخزن)
۶۷	۴-۲-۲- توزیع رسوب زیر تراز عادی سطح آب مخزن
۶۸	۴-۲-۳- روش افزایش - سطح
۶۹	۴-۲-۴- روش تجربی کاهش سطح
۷۶	۴-۳- عمر مفید سد
۷۷	۴-۳-۱- راندمان تله‌اندازی
۸۱	۴-۳-۲- وزن مخصوص رسوبات مخزن
۸۵	۴-۳-۳- برآورد عمر مفید سد
۸۷	۴-۳-۴- برآورد حجم مخزن پس از بهره‌برداری
۸۷	۴-۴- تخصیص بخشی از حجم مخزن به عنوان حجم مرده
۸۹	فصل پنجم - کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی در مخازن سدها
۹۱	۵-۱- کلیات
۹۱	۵-۲- کاربرد مدل فیزیکی در مطالعات رسوب‌گذاری مخازن
۹۳	۵-۳- مدل‌های ریاضی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۹۴	۵-۴- مدل های شبه دوبعدی
۹۴	۵-۴-۱- نوارهای جریان
۹۴	۵-۴-۲- لوله های جریان
۹۵	۵-۵- مدل های جفت و غیر جفت
۹۵	۵-۶- معادلات حاکم
۹۷	۵-۷- روش های حل معادلات
۹۸	۵-۸- انواع مدل های ریاضی موجود
۹۸	۵-۸-۱- روش بانهم - کارتر و ساترلند
۹۹	۵-۸-۲- روش چانگ و ریچارد
۹۹	۵-۸-۳- روش یوسل و گراف
۹۹	۵-۸-۴- روش آسادا
۱۰۰	۵-۸-۵- مدل سگره
۱۰۰	۵-۸-۶- روش مريل
۱۰۱	۵-۸-۷- مدل HEC-6
۱۰۲	۵-۸-۸- مدل لوپز
۱۰۲	۵-۸-۹- مدل HRS
۱۰۳	۵-۸-۱۰- مدل فلوویال
۱۰۴	۵-۸-۱۱- مدل کاریچار
۱۰۴	۵-۸-۱۲- مدل چاریمما
۱۰۴	۵-۸-۱۳- مدل MOBED2
۱۰۵	۵-۸-۱۴- مدل FCM
۱۰۵	۵-۸-۱۵- مدل DEPO
۱۰۵	۵-۸-۱۶- مدل DCURL
۱۰۶	۵-۸-۱۷- مدل BRI-STARS
۱۰۶	۵-۸-۱۸- مدل MIKE 11
۱۰۷	۵-۸-۱۹- مدل SED2WES
۱۰۸	۵-۸-۲۰- مدل CCHE1D
۱۰۹	۵-۸-۲۱- مدل FLOW-3D

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۰۹	۵-۸-۲۲- مدل SSIIM
۱۱۰	۵-۸-۲۳- مدل GSTARS3
۱۱۳	۵-۸-۲۴- مدل TABS
۱۱۴	۵-۸-۲۵- مدل Delft3D
۱۱۴	۵-۸-۲۶- مدل HSCTM2D
۱۱۴	۵-۹- مقایسه روش‌های ریاضی
۱۱۵	۵-۱۰- داده‌های مورد نیاز مدل‌های ریاضی
۱۱۵	۵-۱۰-۱- داده‌های هیدرولوژی
۱۱۵	۵-۱۰-۲- داده‌های هندسی
۱۱۷	۵-۱۰-۳- داده‌های هیدرولیکی
۱۱۸	۵-۱۰-۴- داده‌های رسوب
۱۱۸	۵-۱۰-۵- واسنجی، دقت‌سنجی و حساسیت‌سنجی مدل‌های ریاضی
۱۲۰	۵-۱۰-۶- میزان اهمیت داده‌های ورودی
۱۲۰	۵-۱۱- کاربرد مدل‌های ریاضی
۱۲۰	۵-۱۲- نکاتی در خصوص شبیه‌سازی عددی جریان آب و رسوب در مخازن سدها
۱۲۱	۵-۱۳- توصیه‌های کلی برای اجرای مدل ریاضی
۱۲۲	۵-۱۴- مطالعات انجام شده در ایران
۱۲۷	فصل ششم- رسوب‌زدایی مخازن سدها
۱۲۹	۶-۱- کلیات
۱۲۹	۶-۲- رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۳۰	۶-۲-۱- رسوب‌زدایی هیدرولیکی تحت فشار
۱۳۴	۶-۲-۲- رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد
۱۳۵	۶-۳- عوامل موثر بر رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۳۵	۶-۳-۱- هیدرولوژی حوضه آبریز مخزن
۱۳۵	۶-۳-۲- رسوب ورودی به مخزن
۱۳۵	۶-۳-۳- ظرفیت اولیه مخزن (C)
۱۳۶	۶-۳-۴- پتانسیل ترسیب رسوب
۱۳۶	۶-۳-۵- شکل حوضه

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۳۶	۶-۳-۶- دریاچه‌های عمقی (آبیاری)
۱۳۷	۶-۳-۷- شرایط رودخانه پایین‌دست
۱۳۷	۶-۴- زمان رسوب‌زدایی
۱۳۸	۶-۵- راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۳۹	۶-۶- برآورد رسوب خروجی در اثر انجام عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۳۹	۶-۷- معیارهای رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۴۴	۶-۸- روش‌های کمکی برای افزایش راندمان روش رسوب‌زدایی آزاد
۱۴۵	۶-۹- ملاحظات در زمان رسوب‌زدایی
۱۴۶	۶-۱۰- کاربرد رسوب‌زدایی آزاد در سد سفیدرود
۱۵۰	۶-۱۱- سایر روش‌های رسوب‌زدایی
۱۵۰	۶-۱۱-۱- رسوب‌زدایی با استفاده از سیفون
۱۵۰	۶-۱۱-۲- رسوب‌زدایی با استفاده از تونل کنارگذر
۱۵۱	۶-۱۱-۳- احداث کنارگذر لوله‌ای
۱۵۲	۶-۱۱-۴- استفاده پمپ لایروبی
۱۵۲	۶-۱۱-۵- تخلیه بخشی از رسوب در زمان سیلاب
۱۵۳	۶-۱۱-۶- لایروبی مکانیکی
۱۵۹	۶-۱۱-۷- تخلیه رسوب ریزدانه با جریان‌های چگال
۱۷۳	فصل هفتم- بررسی‌های زیست‌محیطی رسوب‌زدایی مخزن
۱۷۵	۷-۱- کلیات
۱۷۵	۷-۲- اثرات نهشته شدن رسوب
۱۷۵	۷-۲-۱- اثرات بالادست سد (شامل مخزن و بالادست آن)
۱۷۸	۷-۲-۲- اثرات پایین‌دست سد
۱۷۸	۷-۲-۳- اثرات درون مخزن سد
۱۸۰	۷-۳- تاثیر اجتماعی - زیست محیطی مواد لایروبی شده
۱۸۰	۷-۴- تاثیر اجتماعی - زیست محیطی عملیات رسوب‌زدایی مخازن
۱۸۰	۷-۴-۱- تاثیر بر کیفیت آب
۱۸۱	۷-۴-۲- تاثیر بر آبزیان
۱۸۲	۷-۴-۳- انتقال مواد رسوبی به شبکه‌های آبیاری و اراضی

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

۱۸۲	۷-۴-۴- انتقال مواد رسوبی بوسیله باد
۱۸۲	۷-۵- پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه پایین‌دست
۱۸۳	۷-۶- نکاتی در خصوص بهبود کیفی آب در خلال رسوب‌زدایی
۱۸۴	۷-۷- اقدامات لازم برای کاهش اثر احداث سد
۱۸۷	پیوست ۱- روش‌های اندازه‌گیری، نمونه‌برداری و تعیین خصوصیات جریان و رسوب
۲۳۹	پیوست ۲- برآورد رسوب ورودی به مخزن و روش‌های آن
۲۶۱	پیوست ۳- سایر منابع قابل استفاده
۲۶۵	منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

عنوان

صفحه

۱۸	شکل ۱-۲- نمونه‌ای از منحنی بده سنج رسوب و برازش معادلات در بده‌های متفاوت
۳۱	شکل ۱-۳- نمایش خطوط مبنا در مخازن بزرگ
۳۲	شکل ۲-۳- نمایش خطوط مبنا در مخازن کوچک
۳۴	شکل ۳-۳- ابزار نقشه‌برداری اتوماتیک
۳۶	شکل ۳-۴- عمق‌سنج مدل NAVISOUND210
۳۶	شکل ۳-۵- آنتن GPS معرف نصب شده بر روی نقطه با مختصات معین
۳۷	شکل ۳-۶- GPS تک فرکانسه MAGELLAN با دقت قابل قبول برای عملیات آبنگاری
۳۹	شکل ۳-۷- قسمت‌های مختلف دستگاه سرعت سنج صوتی (CTD)
۴۱	شکل ۳-۸- نمونه‌ای از منحنی ارتفاع - سطح
۴۲	شکل ۳-۹- برآورد حجم بین خطوط تراز
۴۳	شکل ۳-۱۰- سطح هر مقطع عرضی در مقابل فاصله از محل سد
۴۵	شکل ۳-۱۱- روش ایکن
۴۵	شکل ۳-۱۲- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۷
۴۵	شکل ۳-۱۳- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۸
۴۶	شکل ۳-۱۴- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۹
۴۶	شکل ۳-۱۵- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۰
۴۶	شکل ۳-۱۶- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۱
۴۷	شکل ۳-۱۷- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۲
۴۹	شکل ۳-۱۸- نقشه رقومی سد دز با ILWIS
۴۹	شکل ۳-۱۹- نقشه رقومی سد دز با ArcView

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵۰	شکل ۳-۲۰- تصویر سه‌بعدی از کف مخزن سد دز پس از ساخت سد
۵۰	شکل ۳-۲۱- توزیع عمق بر اساس رنگ در مخزن سد مارون با استفاده از نرم‌افزار ناوبری Hypack
۵۰	شکل ۳-۲۲- پردازش اولیه اطلاعات عمق با استفاده از نرم‌افزار ناوبری Hypack
۵۳	شکل ۳-۲۳- یک نمونه از منحنی سطح و حجم یک سد مخزنی
۵۸	شکل ۴-۱- نمایش توزیع طولی رسوب‌گذاری در مخزن سد
	شکل ۴-۲- نمایش چهار نوع ترسیب طولی در مخزن سدها (معمول‌ترین نوع رسوب‌گذاری دلتا و نواری هستند و رسوب‌گذاری گوه ای بندرت و در شرایط خاصی به‌وجود می‌آید)
۵۹	شکل ۴-۳- نمایش مناطق رسوب‌گذاری طولی در مخزن بزرگ و طولانی
۶۱	شکل ۴-۴- وضعیت تشکیل و توسعه دلتا در سال‌های مختلف (سد باکرا در کشور هند)
۶۱	شکل ۴-۵- نمایش رسوب‌گذاری و فرسایش دلتا در سد مک‌ناری
۶۲	شکل ۴-۶- تغییرات شیب جبهه بالایی دلتا در مقابل شیب رودخانه
۶۲	شکل ۴-۷- تغییرات شیب وجه بالایی دلتا در مقابل شیب رودخانه
۶۴	شکل ۴-۸- مقطع عرضی مخزن سد فرانسیس در سال‌های مختلف بهره‌برداری
۶۵	شکل ۴-۹- نحوه‌ی انتقال دلتا در اثر بهره‌برداری غلط از مخزن سدی در کشور نپال
۶۸	شکل ۴-۱۰- تعیین میزان رسوب در مناطق تسکین سیلاب مخزن
۶۹	شکل ۴-۱۱- مقادیر مختلف m در روش کاهش سطح
۷۰	شکل ۴-۱۲- مقدار m در تعدادی از سدهای ایران
۷۱	شکل ۴-۱۳- تغییرات مقدار m و نوع مخزن در سد دز نسبت به زمان
۷۲	شکل ۴-۱۴- ترسیم سطح نسبی رسوب در مقابل عمق نسبی
۷۴	شکل ۴-۱۵- منحنی‌های $h(p)$ برحسب عمق نسبی P
۷۵	شکل ۴-۱۶- منحنی‌های برازش داده شده برای انواع مختلف مخازن
۷۸	شکل ۴-۱۷- منحنی براون برای تعیین راندمان تله‌اندازی
۷۹	شکل ۴-۱۸- منحنی برون برای تعیین راندمان تله‌اندازی
۸۰	شکل ۴-۱۹- منحنی چرچیل برای تعیین راندمان تله‌اندازی
۸۸	شکل ۴-۲۰- تقسیم‌بندی ظرفیت مخزن به احجام مختلف
۹۸	شکل ۵-۱- نحوه توزیع سرعت در تئوری جت شکل
۹۸	شکل ۵-۲- نحوه شبکه‌بندی و حرکت ذرات در روش باله‌کام - کارتر و ساتراند
۱۰۰	شکل ۵-۳- مقایسه نیم رخ بستر محاسبه شده و مشاهده شده
۱۱۵	شکل ۵-۴- آبنگار واقعی و آبنگار ساخته شده برای اجرای مدل ریاضی
۱۱۷	شکل ۵-۵- مقاطع عرضی برداشت شده سد با کارا در کشور هندوستان
۱۳۰	شکل ۶-۱- نمایش چاله فرسایش یافته در بالادست سد در اثر رسوب‌زدایی تحت فشار
۱۳۲	شکل ۶-۲- نتایج آبنگاری سد دز در سال‌های مختلف
۱۳۳	شکل ۶-۳- تغییرات تراز بستر و قله دلتا نسبت به زمان در سد دز
۱۳۴	شکل ۶-۴- نیم رخ طولی بستر مخزن پس از عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی تحت فشار سد دز در سال ۱۳۸۲

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۳۴	شکل ۵-۶- نحوه عمل رسوب‌زدایی آزاد
۱۴۴	شکل ۶-۶- کانال‌های کمکی برای توسعه فرسایش عرضی
۱۴۵	شکل ۷-۶- نمایی از کانال‌های انحرافی برای توسعه فرسایش طولی
۱۴۶	شکل ۸-۶- نمایی از پایین‌دست سد سفیدرود
۱۴۷	شکل ۹-۶- نمایی از بالادست سد سفیدرود که انباشته شده از رسوب
۱۴۷	شکل ۱۰-۶- نمایی از اقدامات تکمیلی در مخزن سد به منظور افزایش راندمان رسوب‌زدایی
۱۴۸	شکل ۱۱-۶- تصویری از فرسایش پس‌رونده در یکی از کانال‌های حفر شده در سد سفیدرود در حین عملیات رسوب‌زدایی
۱۴۹	شکل ۱۲-۶- اقدامات تکمیلی رسوب‌زدایی سد سفیدرود
۱۴۹	شکل ۱۳-۶- تاثیر عملیات رسوب‌زدایی در سال‌های مختلف بر احیای حجم از دست رفته سد سفیدرود
۱۵۱	شکل ۱۴-۶- نمایش روش سیفون کردن الف- روگذر ب- زیر گذر
۱۵۱	شکل ۱۵-۶- نمایش روش کنارگذر لوله‌ای
۱۵۲	شکل ۱۶-۶- نمایش استفاده از پمپ لایروبی
۱۵۶	شکل ۱۷-۶- نمایش لایروب مکنده
۱۵۶	شکل ۱۸-۶- دامنه عملکرد لایروب مکنده تیغه‌ای
۱۵۷	شکل ۱۹-۶- تغییرات حجم لایروبی تابعی از قطر لوله مکش
۱۵۸	شکل ۲۰-۶- نمایش لایروب مخزن‌دار
۱۶۰	شکل ۲۱-۶- چگونگی تشکیل جریان غلیظ و حرکت آن به درون مخزن
۱۶۱	شکل ۲۲-۶- نمایش مناطق فرسایشی و رسوب‌گذاری در پدیده جریان غلیظ
۱۶۱	شکل ۲۳-۶- نمایش اجزاء جریان غلیظ زیرگذر
۱۶۲	شکل ۲۴-۶- الگوی حرکت جریان‌ات در راس پدیده جریان غلیظ
۱۶۲	شکل ۲۵-۶- انواع اغتشاش در راس جریان (A: حالت خیزآب، B: حالت آشفته)
۱۶۳	شکل ۲۶-۶- نمایش متغیرهای روابط جریان غلیظ
۱۶۵	شکل ۲۷-۶- سرعت بی‌بعد پیشانی جریان به صورت تابعی از شیب
۱۶۶	شکل ۲۸-۶- میزان انتقال غلظت رسوب در اثر جریان غلیظ
۱۶۷	شکل ۲۹-۶- موقعیت مطالعاتی اندازه‌گیری مشخصات جریان غلیظ سد دز
۱۶۸	شکل ۳۰-۶- نمودارهای بده ورودی به سد و خروجی از آن و تراز آب مخزن سد دز در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶
۱۶۸	شکل ۳۱-۶- منحنی بده سنج رسوب معلق ایستگاه تله زنگ در بالادست سد دز
۱۶۹	شکل ۳۲-۶- تغییرات حجم رسوب‌گذاری در طول دریاچه مخزن سد دز
۱۷۰	شکل ۳۳-۶- ضخامت و عرض لایه جریان غلیظ در سد دز با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی
۱۷۱	شکل ۳۴-۶- روندیابی جریان غلیظ در طول مخزن سد دز (۳ اردیبهشت ۸۲)
۱۷۲	شکل ۳۵-۶- روندیابی انتقال رسوبات معلق (جریان غلیظ) در طول مخزن سد دز (۴ اردیبهشت ۸۲)
۱۷۲	شکل ۳۶-۶- تغییرات حجم جریان غلیظ ورودی به مخزن سد دز تابعی از دبی حداکثر لحظه‌ای
۱۸۲	شکل ۱-۷- تغییرات زمانی غلظت رسوب، درجه حرارت، اکسیژن محلول و آمونیاک در دوره رسوب‌زدایی
۱۸۳	شکل ۲-۷- رابطه بین اکسیژن محلول، غلظت رسوب و مدت زمان رسوب‌زدایی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۹۰	شکل پ.۱-۱- چاهک و انبار مربوط به یک ایستگاه آب‌سنجی
۱۹۰	شکل پ.۱-۲- ایستگاه اندازه‌گیری ثبات شناور
۱۹۰	شکل پ.۱-۳- روش محاسبه مساحت و بده در ایستگاه آب‌سنجی
۱۹۲	شکل پ.۱-۴- رابطه بده- اشل در ایستگاه آب‌سنجی
۱۹۵	شکل پ.۱-۵- نمونه‌بردار بار بستر Mühlhofer
۱۹۵	شکل پ.۱-۶- نمونه‌بردار بار بستر (BTMA) Arnhem
۱۹۶	شکل پ.۱-۷- نمونه‌بردار بار بستر کارولی
۱۹۶	شکل پ.۱-۸- نمونه‌بردار بار بستر VUV
۱۹۷	شکل پ.۱-۹- نمونه‌بردار دستی پیت
۱۹۸	شکل پ.۱-۱۰- نمونه‌بردار بار بستر هلی و اسمیت
۲۰۱	شکل پ.۱-۱۱- نمونه‌بردار بار معلق DH-81
۲۰۱	شکل پ.۱-۱۲- نمونه‌بردار بار معلق DH-48
۲۰۲	شکل پ.۱-۱۳- نمونه‌بردار بار معلق DH-59
۲۰۲	شکل پ.۱-۱۴- نمونه‌بردار بار معلق DH-76
۲۰۲	شکل پ.۱-۱۵- نمونه‌بردار بار معلق D-74
۲۰۲	شکل پ.۱-۱۶- نمونه‌بردار بار معلق D-77
۲۰۳	شکل پ.۱-۱۷- نمونه‌بردار بار معلق P-61
۲۰۴	شکل پ.۱-۱۸- نمونه‌بردار بار معلق P-63
۲۰۴	شکل پ.۱-۱۹- نمونه‌بردار بار معلق P-72
۲۰۵	شکل پ.۱-۲۰- نمایی از کدورت سنج مدل 555IR
۲۰۵	شکل پ.۱-۲۱- اجزای تشکیل‌دهنده یک کدورت‌سنج
۲۰۸	شکل پ.۱-۲۲- رابطه کدورت - غلظت رسوب معلق در مخزن سد دز
۲۰۷	شکل پ.۱-۲۳- انواع مختلف نمونه‌بردار چنگکی
۲۰۸	شکل پ.۱-۲۴- نمونه‌بردار بار بستر US BM-60
۲۱۱	شکل پ.۱-۲۵- نمونه‌بردار SPUD
۲۱۰	شکل پ.۱-۲۶- نمونه‌بردار چنگکی
۲۱۱	شکل پ.۱-۲۷- نمونه‌بردارهای پیستونی
۲۱۲	شکل پ.۱-۲۸- نمونه‌بردارهای مختلف
۲۱۲	شکل پ.۱-۲۹- نمونه‌بردارهای دولایه‌ای
۲۱۴	شکل پ.۱-۳۰- نحوه نصب دستگاه‌های سرعت‌سنج و کدورت‌سنج در فواصل مختلف از بستر مخزن سد
۲۱۴	شکل پ.۱-۳۱- موقعیت مقاطع عرضی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد دز در مرحله اول
۲۱۵	شکل پ.۱-۳۲- موقعیت مقاطع عرضی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد دز در مرحله دوم
۲۱۵	شکل پ.۱-۳۳- موقعیت ایستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد لوزان (سوییس)
۲۱۶	شکل پ.۱-۳۴- بویه نشانه در ایستگاه B

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۲۱۸	شکل پ. ۱-۳۵- انواع نمونه‌های دستگاه RBR
۲۱۸	شکل پ. ۱-۳۶- روش نصب دستگاه RBR در نزدیکی کف بستر
۲۱۸	شکل پ. ۱-۳۷- نمونه‌ای از اطلاعات کدورت ثبت شده توسط دستگاه RBR در مخزن سد دز
۲۱۹	شکل پ. ۱-۳۸- دستگاه جریان‌سنج نقطه‌ای RCM 9
۲۲۰	شکل پ. ۱-۳۹- طریقه نصب دستگاه جریان‌سنج نقطه‌ای RCM 9 در کف مخزن سد
	شکل پ. ۱-۴۰- نتایج اندازه‌گیری روزانه پارامترهای مختلف جریان در مخزن سد دز به صورت پروفیل قائم در ایستگاه‌های
۲۲۱	منتخب توسط دستگاه RCM 9 (۲۳ آوریل ۲۰۰۳)
۲۲۲	شکل پ. ۱-۴۱- دستگاه ADCP مدل Continental
۲۲۲	شکل پ. ۱-۴۲- دستگاه ADCP و نحوه عملکرد آن
۲۲۲	شکل پ. ۱-۴۳- طریقه نصب دستگاه ADCP به صورت شماتیک
۲۲۳	شکل پ. ۱-۴۴- پراکنش سرعت جریان در لایه‌های مختلف ثبت شده توسط دستگاه ADCP در مخزن سد دز
۲۲۴	شکل پ. ۱-۴۵- دستگاه Sension جهت اندازه‌گیری متغیرهای کیفی آب
۲۲۵	شکل پ. ۱-۴۶- دستگاه نمونه‌برداری از آب
۲۲۶	شکل پ. ۱-۴۷- دستگاه Diver برای تعیین عمق نمونه‌برداری رسوبات
۲۲۸	شکل پ. ۱-۴۸- رابطه بین وزن و غلظت املاح محلول
۲۳۴	شکل پ. ۱-۴۹- هیدرومتر
۲۳۷	شکل پ. ۱-۵۰- نمای کلی دستگاه تفکیک لیزری
۲۳۷	شکل پ. ۱-۵۱- دستگاه آزمایش نمونه خشک
۲۳۸	شکل پ. ۱-۵۲- دستگاه مربوط به آزمایش مرطوب
۲۴۲	شکل پ. ۲-۱- متوسط رسوب ویژه تابعی از سطح حوضه در مناطق نیمه‌خشک آمریکا
۲۵۲	شکل پ. ۲-۲- کانال پوششی برای کنترل فرسایش بستر
۲۵۲	شکل پ. ۲-۳- روش‌های ترانس‌بندی
۲۵۳	شکل پ. ۲-۴- ایجاد ترانس‌بندی با کاشت درختچه و درخت
۲۵۴	شکل پ. ۲-۵- فاصله بین سدهای تاخیری
۲۵۵	شکل پ. ۲-۶- مقطع سدهای تاخیری
۲۵۷	شکل پ. ۲-۷- موقعیت دهانه خروجی سرریز لوله‌ای
۲۵۷	شکل پ. ۲-۸- انواع حوضچه‌های تاخیری
۲۵۸	شکل پ. ۲-۹- احداث گذر انحرافی
۲۵۹	شکل پ. ۲-۱۰- سه روش احداث مخزن فرعی

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵	جدول ۱-۱- وضعیت منابع آب تجدیدشونده در مناطق مختلف جهان (تا سال ۲۰۰۴)
۶	جدول ۲-۱- نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها در مناطق مختلف جهان
۶	جدول ۳-۱- تقاضا برای احداث مخازن در مناطق مختلف جهان
۷	جدول ۴-۱- وضعیت رسوب در تعدادی از سدهای مخزنی ایران
۱۷	جدول ۱-۲- رابطه بین بار بستر و بار معلق
۴۰	جدول ۱-۳- مقادیر استاندارد دقت در آبنگاری مخازن
۶۰	جدول ۱-۴- معیارهای پیش‌بینی نحوه رسوب‌گذاری در مخزن
۶۹	جدول ۲-۴- شماره یا نوع استاندارد مخازن
۷۲	جدول ۳-۴- مقایسه بین روابط به‌دست آمده توسط برلند و میلر و مودی برای مساحت نسبی رسوب
۷۵	جدول ۴-۴- مقایسه مقادیر m و n ارایه شده توسط برلند و میلر و مودی
۷۶	جدول ۵-۴- مقادیر خطا و انحراف معیار در تعدادی از سدهای ایران
۸۲	جدول ۶-۴- وزن مخصوص ظاهری رسوب نهشته شده در مخازن بر حسب تن در هر متر مکعب
۸۲	جدول ۷-۴- وزن مخصوص ظاهری رسوب نهشته شده پس از زمان طولانی
۸۳	جدول ۸-۴- مقادیر ضریب B (بر حسب Kg/m^3)
۸۴	جدول ۹-۴- مقادیر اولیه وزن مخصوص ظاهری اولیه رسوبات (Kg/m^3)
۸۷	جدول ۱۰-۴- روش‌های تجربی برآورد حجم مخزن پس از بهره‌برداری
۱۲۱	جدول ۱-۵- میزان تاثیر هر یک از داده‌ها در مدل‌های ریاضی
۱۳۳	جدول ۱-۶- شرایط هیدرولیکی جریان در زمان رسوب‌زدایی سد دز
۱۳۸	جدول ۲-۶- تعریف‌های مختلف راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی
۱۴۰	جدول ۳-۶- روابط مختلف برآورد میزان رسوب خروجی در رسوب‌زدایی آزاد براساس مطالعات میدانی
۱۴۱	جدول ۴-۶- روابط مختلف برآورد رسوب خروجی در رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد براساس مطالعات آزمایشگاهی
۱۵۴	جدول ۵-۶- فشردگی تقریبی رسوب ماسه‌ای بر اساس آزمایش SPT
۱۶۶	جدول ۶-۶- مقادیر عدد فرود جرمی (F_p) در محل نقطه غوطه‌وری
۱۶۷	جدول ۷-۶- مشخصات سد دز
۱۷۰	جدول ۸-۶- داده‌های حاصل از یک واقعه از جریانات غلیظ مخزن سد دز
۱۷۹	جدول ۱-۷- اثرات زیست محیطی ناشی از رسوبات سد
۱۸۴	جدول ۲-۷- اقدامات بالادستی سد به منظور کاهش اثرات زیست محیطی
۱۸۵	جدول ۳-۷- اقدامات پایین‌دستی سد به منظور کاهش اثرات زیست محیطی
۲۱۷	جدول پ.۱-۱- ابزار مورد نیاز برای اندازه‌گیری و ردیابی جریان غلیظ
۲۲۰	جدول پ.۲-۱- مشخصات فنی (محدوده اندازه‌گیری و دقت) دستگاه RCM 9
۲۲۳	جدول پ.۳-۱- مشخصات فنی (محدوده اندازه‌گیری و دقت) دستگاه ADCP
۲۳۲	جدول پ.۴-۱- شماره و اندازه سوراخ الک‌ها در استانداردهای مختلف
۲۳۳	جدول پ.۵-۱- ترتیب قرارگیری الک‌ها
۲۳۴	جدول پ.۶-۱- تصحیح درجه حرارت (فرمول پ.۱-۱۱)

فهرست جدول‌ها

عنوان

صفحه

۲۴۳	جدول پ.۲-۱- معادلات تجربی برآورد تولید رسوب در یک حوضه
۲۴۴	جدول پ.۲-۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش E.P.M
۲۴۴	جدول پ.۲-۳- محدوده و مقادیر پارامتر فرسایش در روش E.P.M
۲۴۵	جدول پ.۲-۴- ضریب K در معادله جهانی فرسایش
۲۴۶	جدول پ.۲-۵- ضریب C در معادله جهانی فرسایش
۲۴۷	جدول پ.۲-۶- عوامل مربوط به روش PSIAC و نمرات آن برای تخمین فرسایش حوضه
۲۴۸	جدول پ.۲-۷- روابط تجربی برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از روش عنصر سزیوم ۱۳۷

مقدمه

مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریان‌های سیلابی رودخانه و به منظور کنترل سیل، ذخیره‌ی آب برای مصارف پایین‌دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می‌شوند، ترسیب رسوب در آن باعث از دست رفتن حجم مفید مخزن می‌گردد که به آن تلفات حجم مخزن می‌گویند.

مواد رسوبی که وارد مخازن سدها می‌شوند، حاصل عمل فرسایش پوسته‌ی زمین می‌باشند که توسط رودخانه حمل و به مخزن وارد می‌شوند. میزان فرسایش بستگی به عوامل متعددی همچون شرایط آب و هوایی، خصوصیات زمین‌شناسی منطقه، وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی و نوع کاربرد اراضی دارد. از این رو میزان ارتفاع فرسایش خاک ممکن است از ۰/۰۶ میلی‌متر در سال تا ۰/۱۶ میلی‌متر تغییر کند که به طور متوسط در حدود ۱۳۲ تن رسوب در هر کیلومتر مربع در هر سال حاصل می‌شود. بیش‌تر مواد رسوبی فرسایش شده به صورت بار شسته، بار معلق و بار بستر توسط رودخانه حمل می‌شوند. رسوبات فوق‌پس از رسیدن به دریاچه‌های طبیعی یا مصنوعی، مخازن سدها و دریاها، در اثر تغییر شرایط هیدرولیکی ترسیب می‌شوند. مخازن سدها که موضوع این راهنما می‌باشد، از جمله مکانهایی است که ممکن است تا صد درصد رسوبات همراه رودخانه را در خود ذخیره نماید.

از این رو، حفظ و نگهداری مخازن موجود و به حداقل رساندن تلفات حجم مخزن در اثر ترسیب در اولویت برنامه ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. مدیریت پویای مخازن مقرر می‌کند که کشورها هرچه سریع‌تر اقدام به اجرای روش‌هایی برای کنترل فرسایش نمایند تا آورد رسوب به حداقل ممکن برسد. همچنین در کنار این روش‌ها، برای بازیافت بخشی از حجم مخازن از طریق روش‌های کنترل رسوب اقداماتی باید انجام پذیرد.

بنابراین ضروری است که روش‌های مختلفی برای محاسبه و چگونگی توزیع رسوب در مخزن، کنترل رسوب ورودی و رسوب‌زدایی مخزن مطالعه و مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این تاثیر عملیات رسوب‌زدایی بر محیط زیست پایین‌دست نیز از اهمیت زیادی برخوردار است که باید مورد توجه قرار گیرد.

این راهنما به منظور آشنایی کارشناسان صنعت آب کشور با مسایل مرتبط با رسوب در مخازن سدها و آرایه راه‌حل‌های مناسب به منظور برآورد، پیش‌بینی و کنترل رسوب ورودی به مخزن سدها و نیز چگونگی احیای حجم از دست رفته مخزن به کمک روش‌های رسوب‌زدائی و لایروبی تدوین شده است. مطالب فصول اول، دوم، چهارم و پنجم و نیز پیوست‌های الف و ب این راهنما برای مطالعات طراحی سدها و مطالب فصول سوم، ششم و هفتم این راهنما عمدتاً برای مراقبت و نگهداری از مخزن سدها نگاشته شده است. در تهیه این راهنما تلاش شده است تا کلیه‌ی مطالب علمی مرتبط با رسوب در سدها (چه در مرحله‌ی طراحی و یا پس از ساخت در مرحله‌ی مراقبت و نگهداری) در یک مجموعه ارائه گردد از این رو بخشی از مطالب پیوست‌های الف و ب این راهنما با مطالب نشریات شماره ۲۲۰، ۲۲۲ و ۳۴۹ که قبلاً توسط امور نظام فنی، معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری همپوشانی دارد.

- هدف

هدف از تهیه این راهنما شناخت عوامل موثر بر نهشته شدن رسوب در مخازن و روش‌های کنترل این عوامل است. همچنین این راهنما به مدیریت رسوب و مدیریت صحیح بهره‌برداری و نگهداری از مخازن موجود کشور در ارتباط با موضوع رسوب می‌پردازد. تدوین راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها برای یکسان‌سازی دانش طراحی و ارائه روش‌های مناسب با توجه به

وضعیت مخزن مورد مطالعه ضروری است و زمینه لازم برای ارزیابی روش‌های ارائه شده را فراهم کرده و ما را به سوی تدوین استاندارد جامع هدایت خواهد کرد.

– دامنه کاربرد

راهنمای حاضر برای کلیه متخصصینی که بنحوی با طراحی، اجرا و بهره‌برداری پروژه‌های سدسازی مرتبط می‌باشند، قابل استفاده است. این راهنما می‌تواند برای شناخت متغیرهای موثر در آورد رسوب و کنترل و مهار فرسایش و رسوب حوضه، پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در مخزن، انتخاب روش مناسب برای رسوب‌زدایی و شناخت تاثیر عملیات رسوب‌زدایی بر محیط زیست مورد بهره‌برداری قرار گیرد. این راهنما به‌عنوان یک نشریه فنی برای کارشناسان و متخصصین امور سدسازی، برنامه‌ریزی منابع آب و دفاتر مهندسی رودخانه و سواحل وزارت نیرو، هم‌چنین دفاتر مشابه در وزارت جهاد کشاورزی و نیز کارشناسان سازمان حفاظت محیط‌زیست و کلیه مهندسین مشاور مرتبط با بخش مدیریت منابع آب و به‌خصوص سد سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

فصل ۱

کلیات

۱-۱- کلیات

جمعیت جهان در سال ۱۳۸۴ (۲۰۰۴) در حدود شش میلیارد و سیصد و پنجاه میلیون نفر بوده که تا سال ۱۴۳۰ (۲۰۵۰) به حدود ده میلیارد نفر خواهد رسید. این مساله باعث افزایش تقاضا برای مصرف آب به خصوص آب‌های سطحی می‌گردد. جدول (۱-۱) وضعیت منابع آب در مناطق مختلف جهان در سال ۱۳۸۴ را نشان می‌دهد. هر چند که به طور متوسط ۱۲ درصد حجم منابع آب تجدیدشونده طبیعی در مخازن سدها ذخیره می‌شود، ولی این میزان در مناطقی نظیر خاورمیانه تا ۶۰ درصد هم می‌رسد. این جدول اهمیت حفظ و نگهداری مخازن موجود و نیاز به ساخت مخازن جدید را نشان می‌دهد [۱۰۳].

مواد رسوبی که وارد مخازن سدها می‌شوند، حاصل عمل فرسایش پوسته زمین می‌باشد که توسط رودخانه حمل و به مخزن وارد می‌شوند. میزان فرسایش بستگی به عوامل متعددی همچون شرایط آب و هوایی، خصوصیات زمین‌شناسی منطقه، وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی و نوع کاربرد اراضی دارد. از این رو میزان ضخامت فرسایش خاک ممکن است از ۰/۰۶ میلی‌متر در سال تا ۰/۱۶ میلی‌متر تغییر کند که به طور متوسط در حدود ۱۳۲ تن رسوب در هر کیلومتر مربع در هر سال حاصل می‌شود. بیش‌تر مواد رسوبی فرسایش شده به صورت بار شسته، بار معلق و بار بستر توسط رودخانه حمل و در مخازن سدها و دریاها به دلیل تغییر شرایط هیدرولیکی جریان ترسیب می‌شوند. مخازن سدها که موضوع این راهنما می‌باشد، از جمله مکان‌هایی است که می‌تواند تا صد درصد رسوبات همراه رودخانه را در خود ذخیره نماید.

مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریان‌های سیلابی رودخانه و به منظور کنترل سیل، ذخیره آب برای مصارف پایین دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می‌شوند، ترسیب رسوب در آنها باعث از دست رفتن حجم مفید مخزن می‌گردد که به آن تلفات حجم مخزن می‌گویند.

نرخ متوسط ترسیب سالانه یا درصد حجمی از مخزن که توسط رسوب اشغال می‌شود، در مناطق مختلف جهان متفاوت است. مطابق جدول (۱-۲)، هر ساله به طور متوسط بین ۰/۱ تا ۲/۳ درصد از حجم کل ذخیره مخازن سدهای جهان در اثر رسوب گذاری از دست می‌رود. متأسفانه در کشورهایی نرخ رسوب گذاری بالا است که جمعیت بالاتری هم دارند [۱۶۰].

به منظور تامین نیازهای آبی جمعیت و جبران بخشی از حجم مخازن از دست رفته، نیاز به ساخت مخازن جدید نیز می‌باشد. جدول (۱-۳) تقاضا برای ساخت مخازن جدید را در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد [۸۹].

جدول ۱-۱- وضعیت منابع آب تجدیدشونده در مناطق مختلف جهان (تا سال ۲۰۰۴) [۱۰۳]

منطقه	جمعیت (میلیون)	منابع آبی تجدیدشونده داخلی (سال/ کیلومتر مکعب)	منابع آب تجدیدشونده طبیعی برای هر نفر در (سال متر مکعب)	حجم مخازن (کیلومتر مکعب)	درصد منابع آب تجدیدشونده طبیعی که در مخزن نگهداری می‌شود
آسیا	۳۵۷۴	۱۱۱۱۷	۱۴۵۰۸	۱۲۶۲	۹
اروپا	۷۲۹	۶۵۹۲	۷۷۷۱	۱۰۸۳	۱۴
خاورمیانه و شمال آفریقا	۴۳۵	۵۱۷	۶۵۴	۳۹۲	۶۰
آمریکای شمالی	۳۲۶	۵۶۵۰	۵۹۵۳	۱۸۴۵	۳۱
آمریکای مرکزی	۱۷۷	۱۲۱۱	۱۲۵۱	۱۴۸	۱۲
آمریکای جنوبی	۳۶۷	۱۲۲۴۶	۱۷۱۹۵	۸۹۱	۵
اقیانوسیه	۳۱	۱۶۹۴	۱۶۹۴	۱۰۷	۶
صحرای آفریقا	۷۱۴	۳۸۸۷	۵۴۴۷	۳۸۸	۷
جهان	۶۳۵۲	۴۲۹۱۳	۵۴۴۷۳	۶۳۵۲	۱۲

جدول ۱-۲- نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها در مناطق مختلف جهان [۱۶۰]

کشور	درصد رسوب‌گذاری سالانه	درصد کل رسوب‌گذاری
چین	۲/۳	۱۴/۲
هندوستان	۰/۴۶	۹/۶
ژاپن	۰/۱۵	۸/۸
جنوب آسیا	۰/۳۰	۸/۰
جنوب آفریقا	۰/۳۴	۱۱/۴
ترکیه	۱/۵	۵۹/۷
انگلستان	۰/۱۰	—
آمریکا	۰/۲۲	۳/۹
جهان	۱/۰	۱۱/۸

جدول ۱-۳- تقاضا برای احداث مخازن در مناطق مختلف جهان [۱۶۰]

منطقه	حجم مخزن مورد تقاضا (کیلومتر مکعب)		
	۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰	۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰	۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰
اروپا	۴۹	۵۱	۵۴
آمریکای مرکزی و جنوبی	۴۶۷	۴۹۵	۴۲۴
آفریقا	۱۶۷	۲۰۳	۲۴۸
آسیا و اقیانوسیه	۳۱۵	۲۸۱	۲۱۳
مجموع	۹۹۸	۱۰۳۲	۹۳۹

در ایران نیز مساله رسوب‌گذاری در مخازن سدها حائز اهمیت زیادی می‌باشد، چرا که حدود ۷۰ درصد از منابع آب ایران را آب‌های سطحی تشکیل می‌دهد و عدم هماهنگی زمانی بین آبدهی حوضه‌ها و مصارف، نیاز به مخازن ذخیره آب را امری ضروری می‌کند. از طرفی عدم انجام اقدامات موثر آبخیزداری در حد کافی باعث شده است که فرسایش از حوزه‌های آبریز سدها از حد مجاز خیلی بیش‌تر باشد و همین امر معضل رسوب‌گذاری در مخازن سدها را تشدید کند. مطابق جدول (۱-۴)، جمع‌آوری شده از گزارش‌های مختلف، به طور سالانه یک درصد از حجم کل ذخایر مخازن سدهای ایران یعنی حدود ۱۸۰ میلیون مترمکعب پر از رسوب می‌گردد، که تنها برای حفظ وضعیت موجود، سالانه تعداد ۶ سد به اندازه سد طرق باید احداث گردد، در حالی که با توجه به رشد جمعیت، نیاز روزافزون کشور به ذخیره‌ی حجم آب بیش‌تری می‌باشد. از طرفی دو عامل محدودکننده‌ی بسیار مهم برای نیل به این هدف وجود دارد که یکی محدودیت منابع آب طبیعی تجدیدشونده و دیگری کمبود ساختگاه‌های مناسب سدسازی با توجه به عواملی نظیر زمین‌شناسی، آیین‌نامه‌های سخت‌گیرانه‌ی محیط زیستی، هزینه‌ی بالای ساخت می‌باشد.

جدول ۱-۴- وضعیت رسوب در تعدادی از سدهای مخزنی ایران^۱

ردیف	نام سد	سال شروع بهره‌برداری	حجم اولیه (MCM) ^۲	وسعت حوضه آبریز ^۳ (کیلومتر مکعب)	رسوب ویژه (تن در مترمربع در سال)	متوسط حجم رسوب سالیانه (MCM)	حجم رسوب نهشته شده از زمان بهره‌برداری (MCM)	درصد تلفات سالیانه حجم مخزن در اثر رسوب
۱	دز	۱۳۴۱	۳۴۶۰	۱۷۵۲۳	۹۶۰۰۰	۱۴/۰	۶۰۳/۲	۰/۴۱
۲	کارون	۱۳۵۶	۳۱۳۹	۳۷۰۹۲	۱۱۱۰۰۰	۲۵/۰	۷۰۰/۴	۰/۸
۳	زاینده‌رود رود	۱۳۴۹	۱۴۷۰	۴۶۰۰	۶۶۰۰۰	۲/۵	۷۱/۰	۰/۱۷
۴	درودزن	۱۳۵۰	۹۹۳	۴۳۷۲	۲۸۰۰۰	۱/۰	۳۲/۲	۰/۱۰
۵	سفیدرود رود	۱۳۴۱	۱۷۶۵	۵۶۰۰۰	۷۹۰۰۰	۳۷/۰	۵۶۸/۸	۲/۱
۶	استقلال	۱۳۶۲	۳۴۵	۱۰۳۲۵	۴۶۰۰۰	۴/۰	۸۷/۳	۱/۱۵
۷	کرج	۱۳۴۰	۲۰۵	۸۵۰	۷۱۰۰۰	۰/۵	۲۳/۰	۰/۲۴
۸	لار	۱۳۶۰	۹۶۰	۷۴۴	۳۷۴۰۰۰	۲/۳	۳۲/۵	۰/۲۴
۹	لنجان	۱۳۴۶	۹۵	۶۹۱	۸۶۰۰۰	۰/۵	۱۹/۴	۰/۵۲
۱۰	ساوه	۱۳۷۲	۲۹۰	۱۷۰۴۳	۱۱۰۰۰	۱/۶	۱۵/۵	۰/۵۳
۱۱	گلپایگان	۱۳۳۵	۴۲/۳	۱۰۵۰	۱۴۰۰۰	۰/۱	۵/۳	۰/۲۸
۱۲	پانزده خرداد	۱۳۷۳	۲۰۰	۱۰۲۵۰	۵۰۰۰	۱/۴	۴/۶	۰/۲۱
۱۳	چاه نیمه	۱۳۶۱	۶۶۰	-	-	۱/۰	۱۷/۰	۰/۱۵
۱۴	قشلاق (وحدت)	۱۳۵۸	۲۲۴	۱۰۵۸	۵۳۰۰۰	۰/۵	۹/۴	۰/۲۱
۱۵	اکیاتان	۱۳۴۲	۸	۲۱۳	۷۳۰۰۰	۰/۱	۴/۱	۱/۶۳
۱۶	جیرفت	۱۳۷۰	۴۲۵	۷۸۰۰	۹۸۰۰۰	۶/۴	۸۹/۰	۱/۵۰
۱۷	وشمگیر	۱۳۴۱	۶۰	۶۴۵۰	۱۸۰۰۰	۱/۰	۲۴/۶	۱/۶۴
۱۸	طرق	۱۳۶۷	۳۳/۱	۱۰۲۵۰	-	-	۰/۳	۰/۰۹۸
۱۹	کارده	۱۳۶۷	۲۸/۱	۵۹۹	۱۷۰۰۰	۰/۱	۱/۳	۰/۳۱
۲۰	بوکان	۱۳۵۰	۶۵۰	۶۸۹۰	۷۳۰۰۰	۴/۲	۱۰۰	۰/۶۴
۲۱	مهاباد	۱۳۴۹	۲۳۰	۶۵۲	۱۶۹۰۰۰	۰/۹	۳۲/۲	۰/۴۰
۲۲	ارس	۱۳۵۰	۱۳۵۰	۶۱۶۹	۱۶۱۰۰۰	۸/۳	۲۳۱/۴	۰/۶۱
۲۳	پیشین	۱۳۷۲	۱۷۵	۶۹۰۰	۳۲۰۰۰	۱/۸	۷/۳	۱/۰۴

۱- در این جدول MCM میلیون متر مکعب است.

۲- داده‌های این جدول براساس آخرین هیدروگرافی‌های انجام شده از سدهای مذکور تنظیم شده است.

۳- این جدول چکیده داده‌های جدول «میزان رسوبات ورودی به مخازن سدهای بزرگ ایران» می‌باشد که توسط معاونت حفاظت و بهره‌برداری - شرکت مدیریت منابع آب ایران در بهمن‌ماه ۱۳۸۸ تهیه شده است.

فصل ۲

آمار و اطلاعات و پردازش آنها

۲-۱- کلیات

مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها مستلزم در اختیار داشتن آمار و اطلاعات زیادی است که در این بخش اهم این اطلاعات و چگونگی تهیه این آمار ارایه می‌گردد. برای سدهای موجود معمولاً این آمار و اطلاعات قبلاً توسط مهندسين مشاور طراح سد جمع‌آوری و پردازش شده‌اند و بهترین منبع می‌تواند مهندس یا مهندسين مشاور مربوط باشد. بخشی از اطلاعاتی که اینجا اشاره شده است ممکن است برای سدهای در دست مطالعه و یا احداث شده جدید، هنوز در اختیار نباشد که در این صورت با هماهنگی کارفرما باید نسبت به تهیه این اطلاعات و در زمان مناسب اقدام کرد. آنچه اهمیت دارد این است که اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده باید به روز باشند.

از آن‌جا که معمولاً سدهای مخزنی در نقطه خروجی حوضه نسبتاً وسیعی قرار دارند، لذا جمع‌آوری کلیه داده‌ها و گزارش‌ها و سپس پردازش آنها زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. پس ضروری است که حتماً برای هر مخزنی جمع‌آوری اطلاعات به‌طور کامل و حداقل یک بار انجام و با تهیه بانک اطلاعاتی در مطالعات بعدی از آنها استفاده گردد. در آن صورت تنها آن بخش از داده‌ها به روز خواهند شد که نیاز می‌باشند.

در این بخش ابتدا داده‌های مورد نیاز و چگونگی جمع‌آوری آنها ارایه و پردازش آنها توضیح داده خواهد شد.

۲-۲- جمع‌آوری آمار و اطلاعات

۲-۲-۱- تعیین محدوده‌ی مطالعه

با توجه به وسعت حوضه‌ای که مخزن در آن قرار دارد و با در نظر گرفتن اهمیت مطالعه موردنظر، ضروری است ابتدا محدوده‌ی مطالعه تعیین گردد. که ممکن است سطح وسیعی را شامل شود از این رو در پروژه‌های مطالعاتی رسوب‌گذاری مخازن سدها، بهتر است بخش‌های مختلف پروژه توسط مهندسين مشاور متفاوت که تخصص مربوط را دارند انجام گیرد. لذا ضرورت دارد محدوده‌ی مطالعه هر کدام از بخش‌ها تعیین و شرح وظایف آنها دقیقاً مشخص گردد. به طور مثال ممکن است مطالعات مربوط به حوضه شامل برآورد فرسایش، تولید رسوب، روش‌های کنترل رسوب، برآورد رسوب در شاخه‌های فرعی از مطالعات مربوط به رسوب در درون مخزن شامل میزان و چگونگی توزیع آن و بررسی روش‌های رسوب‌زدایی جدا شود و یا مطالعات پایین دست مخزن سد نیز به طور جداگانه بررسی شود. بدیهی است در این صورت نیازی نخواهد بود که در هر مطالعه کلیه اطلاعات و گزارش‌ها و داده‌هایی که در این فصل ذکر شده‌اند جمع‌آوری و پردازش گردد. هر مشاور تنها آن بخش از اطلاعات و آمار را جمع‌آوری و پردازش خواهد کرد که به آن نیاز دارد.

از آن‌جا که نتایج اطلاعات بالادستی برای شروع مطالعات مناطق پایین‌دستی ضروری است، زمانبندی مطالعات باید آنچنان تنظیم گردد تا این اطلاعات به موقع در اختیار استفاده‌کننده قرار گیرد. در صورت انجام مطالعات به طور همزمان، وجود مشاور عالی برای تلفیق اطلاعات و هماهنگی بین مشاورین مختلف بسیار ضروری خواهد بود.

۲-۲-۲- جمع‌آوری اطلاعات، گزارش‌ها و نقشه‌ها

بدیهی است انجام هر مطالعه بدون بررسی کارهای انجام شده‌ی قبلی در آن محدوده مورد مطالعه امکان‌پذیر نخواهد بود. این عمل می‌تواند از دوباره‌کاری‌ها جلوگیری و ضمناً اهدافی را که مطالعات قبلی دنبال می‌کرده‌اند مشخص کند. در این رابطه ضروری است که موارد ذیل تأکید شود:

- کلیه عکس‌های هوایی با مقیاس‌های مختلف که در زمان‌های مختلف تهیه شده‌اند.
- کلیه نقشه‌های توپوگرافی و هیدروگرافی با مقیاس‌های مختلف که در زمان‌های مختلف تهیه شده‌اند
- کلیه نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه و گزارش‌های زمین‌شناسی تهیه شده در آن محدوده که برای اهداف مختلفی تدوین شده‌اند.
- کلیه گزارش‌های مطالعات پایه انجام شده شامل گزارش‌های هواشناسی، هیدرولوژی، هیدرولیک، هیدرولیک رسوب، زمین‌شناسی و ژئوتکنیک
- کلیه گزارش‌های تخصصی شامل مشخصات طرح‌های در دست اجرا و یا ساخته شده در محدوده‌ی مورد مطالعه
- کلیه گزارش‌های مربوط به سد (سازه‌ای، نیروگاه و غیره)
- کلیه مطالعات نیمه تفصیلی، تفصیلی و نقشه‌های خاک‌شناسی در محدوده مورد مطالعه
- نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی و مشخصات هر ایستگاه
- نقشه پراکنش ایستگاه‌های آب‌سنجی و مشخصات کامل هر ایستگاه

۲-۲-۳- داده‌های مورد نیاز

دقت نتایج هر مطالعه‌ای منوط به داشتن داده‌های واقعی، متناسب و دقیق می‌باشد، از این رو تلاش زیادی باید در کسب این داده‌ها انجام داد. داده‌های مورد نیاز در مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی سدها را می‌توان به شرح ادامه بیان کرد.

۲-۳-۱- هواشناسی

رسوب توسط جریان‌های سطحی منتقل می‌شود، از این رو ضروری است که از ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده‌ی طرح کلیه داده‌هایی که به برآورد دقیق‌تر رواناب سطحی کمک می‌کند جمع‌آوری گردد. این داده‌ها عبارتند از:

- آمار نزولات جوی شامل باران و برف
- آمار دما
- آمار تبخیر و رطوبت‌نسبی
- آمار باد

بیش‌تر ایستگاه‌های هواشناسی توسط سازمان هواشناسی کل کشور تاسیس و بهره‌برداری می‌شوند و آمار فوق را می‌توان از این سازمان درخواست کرد. تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی نیز به منظورهای خاصی توسط سایر وزارتخانه‌ها تاسیس و بهره‌برداری می‌شوند از جمله وزارت نیرو (عمده‌ی ایستگاه‌های باران، تبخیر و برف‌سنجی) که داده‌های مربوط به این ایستگاه‌ها باید از وزارت متبوع تهیه گردد.

۲-۲-۳-۲- هیدرولوژی

از آن جا که رسوب ورودی به مخازن سدها بیش تر به جریان های سطحی بستگی دارد، لذا داده های مرتبط با جریان های سطحی باید جمع آوری گردد. در این رابطه باید کلیه ایستگاه های آب سنجی موجود در حوضه ابتدا شناسایی و از آنها بازدید به عمل آمده و اطلاعات زیر از هر ایستگاه آب سنجی استخراج گردد. تقریباً کلیه ایستگاه های آب سنجی زیر نظر وزارت نیرو هستند، بنابراین این داده ها باید از این وزارتخانه تهیه شود:

- سال افتتاح
 - طول و عرض جغرافیایی
 - ارتفاع از سطح دریا
 - فاصله تا نزدیک ترین روستا یا شهر
 - تعیین نزدیک ترین و بهترین مسیر رسیدن به ایستگاه
 - امکانات موجود در ایستگاه (اشل، پل تلفریک و غیره)
 - روش اندازه گیری داده ها (ثبات است، توسط مأمور)
 - مشخصات مقطع در محل ایستگاه مثلاً ممکن است مقطع رودخانه به صورت شریانی باشد که در فصول کم آبی، جریان از محل نصب اشل عبور نکند و از شاخه دورتری عبور کند و یا این که ممکن است در زمان های طغیانی بخشی از جریان از شاخه دیگری که اشل در آن نصب نیست عبور کند.
 - چه داده هایی برداشت می شوند و با چه دوره زمانی (قرائت اشل، اندازه گیری سرعت، اندازه گیری رسوب معلق، اندازه گیری رسوب بستر، نمونه برداری مصالح بستر و داده های مربوط به کیفیت آب)
 - روش اندازه گیری داده ها (مثلاً سرعت با مولینه و با چه دقتی و غلظت رسوب به صورت تجمعی و با چه وسیله ای)
 - مشخصات رودخانه در محل ایستگاه (نوع رودخانه، شیب آن، درجه سینوسی رودخانه، میزان فرسایش پذیری سواحل و بستر، میزان رسوب گذاری در محدوده ایستگاه و امکان تشکیل جزایر در محدوده ایستگاه)
 - دوره ای آماری که داده ها برداشت شده اند و میزان دقت داده های ثبت شده.
 - بررسی شرایط پایین دست که ممکن است در زمان طغیان و در اثر برگشت آب روی داده ها تاثیر گذارد.
 - تغییرات احتمالی اشل و یا مشخصات مقطع و یا جابه جایی هایی که ممکن است در محل ایستگاه در گذشته اتفاق افتاده باشد.
- علاوه بر ثبت مشخصات فوق، داده های زیر از هر ایستگاه آب سنجی باید جمع آوری گردد:
- صفر اشل نصب شده (در زمان نصب و در سال ها مختلف)
 - قرائت اشل (در طول دوره آماری و بده متناظر با آن)
 - منحنی بده - اشل مربوط به آن ایستگاه در دوره های مختلف
 - شیب اندازه گیری شده سطح آب در زمان های مختلف
 - مشخصات دانه بندی رسوب بستر در زمان های مختلف
 - مشخصات دانه بندی معلق در زمان های مختلف

- مقاطع عرضی از ایستگاه در زمان‌های مختلف
 - داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت جریان در زمان‌های مختلف
 - داده‌های مربوط به غلظت رسوب در زمان‌های مختلف
 - داده‌های مربوط به کیفیت آب
- پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، لازم است تا این داده‌ها کنترل، تصحیح و دقت سنجی شوند. همچنین با بررسی داده‌ها و استفاده از روش‌های غیرمستقیم لازم است این داده‌ها طبیعی گردند. به طور مثال ممکن است با استفاده از محاسبه آب برداشتی برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب و مقایسه آن با داده‌های ایستگاه، نسبت به طبیعی بودن داده‌ها اطمینان حاصل کرد. همچنین باید برای ایستگاه‌هایی که طول دوره آماری آنها کم است، این آمار را با توجه به آمار نزدیک‌ترین و مشابه‌ترین ایستگاه آب‌سنجی تطویل کرد. تطویل آمار با استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی نظیر HEC-4 امکان‌پذیر می‌باشد.

۲-۳-۳- مطالعات اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی

به منظور به حداقل رساندن اثرات منفی ناشی از رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن در فعالیت‌های اجتماعی، اقتصادی و نیز زیست‌محیطی، ضروری است اطلاعات جامعی از وضعیت اجتماعی، اقتصادی و محیط زیست در محدوده طرح تهیه گردد. عمده اطلاعات و داده‌های مورد نیاز عبارتند از:

- جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های مطالعات اجتماعی-اقتصادی انجام شده در محدوده طرح
- آمار و نقشه پراکندگی جمعیت ساکن در مناطق محدوده مخزن، رودخانه و بالادست و پایین‌دست.
- وسعت و ارزش اراضی مستعد توسعه کشاورزی، صنعتی و شهری.
- موقعیت مراکز روستایی، شهری و صنعتی و وسعت و ارزش هر یک در محدوده بالادست و پایین‌دست سد که ممکن است تحت تاثیر قرار گیرد.
- چگونگی استفاده از آب رودخانه در پایین‌دست و نحوه توزیع زمانی و مکانی آن.
- جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های انجام شده در خصوص حیات‌وحش، جانوران اهلی و آب‌زیان و همچنین گونه‌های مختلف گیاهی در محدوده طرح.
- جمع‌آوری کلیه مقررات و قوانین موجود در خصوص مناطق تحت حفاظت در محدوده طرح.
- جمع‌آوری کلیه استانداردهای مربوط به کیفیت آب در مناطق مصرف پایین‌دست.
- جمع‌آوری گزارش‌های مربوط به مراکز پرورش ماهی، کارگاه‌ها و کارخانه‌های صنعتی و کیفیت پساب آنها

۲-۳- پردازش داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌ها، نوبت به پردازش آنها می‌رسد تا اطلاعات جدیدی از این داده‌ها کسب گردد. اطلاعات جدید برای برآورد نهایی رسوب‌گذاری و یا انتخاب روش‌های رسوب‌زدایی و تاثیر رسوب‌زدایی بر رودخانه پایین دست مورد نیاز می‌باشند. برای پردازش این داده‌ها باید از مدل‌های ریاضی معتبر که امروزه در اختیار می‌باشد بهره‌گرفت.

۲-۳-۱- تعیین مشخصات فیزیوگرافی حوضه

مشخصات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه را می‌توان با استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و اطلاعاتی که جمع‌آوری شده است تعیین کرد. بازدیدهای صحرایی نیز به تعیین دقیق‌تر مشخصات فیزیوگرافی حوضه کمک خواهد کرد. مشخصاتی که ضروری است در این مرحله استخراج شوند عبارتند از:

- تعیین مساحت زیر حوضه‌ها و حوضه اصلی
- تعیین شبکه آبراهه‌ها، سر شاخه‌های اصلی و فرعی و درجه‌بندی آنها
- تعیین ضریب دو شاخه‌ای شدن و تراکم آبراهه‌ها
- تهیه منحنی هیپسومتری حوضه و تعیین ارتفاع متوسط حداقل و حداکثر
- تهیه پروفیل طولی رودخانه اصلی و تعیین شیب متوسط و نیز شیب رودخانه در بازه‌های مختلف
- تعیین شیب متوسط حوضه
- تعیین درصد پوشش گیاهی منطقه
- تعیین شیب اراضی حاشیه رودخانه‌ها
- تعیین کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

۲-۳-۲- ارزیابی داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده ابتدا از نظر کمی و کیفی بررسی می‌شود تا صحت آنها تایید شود. سپس داده‌های ایستگاه‌هایی که دوره‌ی آماری کم‌تری دارند تطویل می‌شوند. سپس داده‌های مذکور برای محاسبات زیر استفاده می‌شود:

- تهیه نقشه همباران در حوضه
- برآورد مقادیر متوسط ماهانه، سالانه بارندگی و حجم آن
- رسم منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی
- رسم منحنی‌های ارتفاع-سطح-مدت
- محاسبه شدت بارندگی‌های ۱ تا ۱۲ ساعته و ۱ و ۲ و ۳ روزه برای دوره بازگشت‌های مختلف
- برآورد مقادیر متوسط ماهانه، سالانه دما و تعیین مقادیر حداقل و حداکثر لحظه‌ای و محاسبه گرادیان حرارتی
- برآورد مقدار ماهانه و سالانه تبخیر بالقوه از سطح تشنگ و میزان ماهانه و سالانه تبخیر و تعرق بالقوه منطقه طرح
- تعیین چگونگی رژیم بارندگی
- تعیین نسبت میزان برف به کل نزولات جوی
- مطالعه رژیم آبی رودخانه تحت مطالعه از طریق محاسبه یا برآورد متوسط بده در طول ماه‌ها و فصول مختلف
- تعیین سرعت‌های باد با دوره بازگشت‌های مختلف و تعیین گلباد منطقه طرح
- تعیین نوع اقلیم محدوده مطالعه

۲-۳-۳- ارزیابی داده‌های هیدرولوژی

داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های آب‌سنجی به منظور محاسبات زیر استفاده می‌شود:

- رسم هیدروگراف بده روزانه در طول دوره آماری
- تفکیک جریان پایه از جریان سطحی و تعیین سهم هر یک در کل جریان ماهانه سالانه و رودخانه
- رسم منحنی تداوم جریان و تعیین معادله مورد نظر
- بررسی آمار سیلاب ایستگاه‌های هیدرومتری
- تعیین مقادیر سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف ۲ و ۵ و ۱۰ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ساله و PMF
- رسم منحنی غلظت رسوب و بده رسوب در مقابل بده (منحنی بده سنجی رسوب)^۱
- برآورد رسوب ماهانه بر اساس آمار بده روزانه موجود و با استفاده از منحنی بده - سنجی رسوب
- رسم منحنی بده متوسط ماهانه و آورد رسوب ماهانه و تعیین رابطه‌ی بین آنها
- برآورد رسوب معلق سالانه
- محاسبه‌ی رسوب کل با توجه به درصد بار بستر که از جدول (۲-۱) به دست می‌آید.
- محاسبه‌ی رسوب ویژه با توجه به سطح حوضه
- رسم منحنی دانه‌بندی و تعیین اندازه مشخصه‌ی رسوب و تعیین رابطه بین اندازه‌ی مشخصه‌ی رسوب و بده جریان
- تعیین زیر حوضه‌هایی که آورد رسوب بیش‌تری دارند.
- بررسی جریان‌های غلیظ افتاده و تعیین خصوصیات آن

۲-۳-۴- رسم منحنی بده سنجی رسوب

چنانچه فرض گردد که در ایستگاه آب‌سنجی همه‌ی متغیرها ثابت هستند و تنها بده جریان ممکن است تغییر کند، در آن صورت می‌توان اینطور بیان کرد که بده رسوب یا غلظت رسوب تنها تابعی از بده جریان می‌باشد. با رسم داده‌های اندازه‌گیری شده بده رسوب در مقابل بده جریان بر روی کاغذ لگاریتمی منحنی تشکیل می‌شود که آن را منحنی بده سنجی رسوب گویند. از آن جا که فرض ثابت بودن همه متغیرها، کاملاً صحیح نمی‌باشد داده‌های واقع بر منحنی ممکن است خیلی پراکنده باشند و تشکیل منحنی واحدی را ندهند. مشخصات رسوب شامل غلظت دانه‌بندی، جنس رسوب هم‌چنین در دسترس بودن مقدار رسوب قابل انتقال و نیز درجه حرارت آب از جمله متغیرهایی هستند که ثابت نمی‌باشند و از این رو بهتر است تا منحنی بده سنجی به صورت فصلی و یا در محدوده بده‌های متفاوتی ترسیم گردد تا رابطه‌ی به وجود آمده از دقت بیش‌تری برخوردار باشد.

شکل ریاضی منحنی بده سنجی رسوب به صورت

$$Q_s = a Q^n \quad \text{یا} \quad C = Q^n \quad (۲-۱)$$

می باشد. C غلظت رسوب معلق، Q_s بار معلق و Q بده رودخانه می باشد. این رابطه چنانچه بر روی کاغذ لگاریتمی رسم شود به صورت خط با معادله $(2-2)$ خواهد بود:

$$\text{Log } C \text{ یا } \text{Log } Q_s = \text{Log } a + n \log(Q) \quad (2-2)$$

ضرایب a و n را می توان با روش های برازش معادلات یا رگرسیونی توسط نرم افزارهایی چون Excell یا SPSS به دست آورد. در روش مجذور مربع فاصله بین منحنی $(2-2)$ با داده های لگاریتم گرفته شده و نه با داده های با مقیاس واقعی، به حداقل کاهش داده می شود از این رو داده های بزرگ تاثیر بیش تری بر مقادیر a و n خواهند داشت و این منجر به خطای برآورد مقدار Q_s در صورت کاربرد رابطه $(1-2)$ می باشد. برای دقت بیش تر می توان داده ها را به دسته های مختلفی بر حسب مثلا بده تقسیم و برای هر دسته رابطه ریاضی مورد نظر را استخراج کرد. شکل $(1-2)$ این شرایط را نشان می دهد.

۲-۳-۵- تخمین بار بستر

بار بستر معمولا به علت پیچیدگی و دشواری و همچنین متغیرهای متعددی که در میزان آن دخالت دارد، اندازه گیری نمی گردد. از این رو مقدار بار بستر به عنوان درصدی از بار معلق اختیار می شود. مقدار این درصد ممکن است از ۲ تا ۱۵۰ درصد تغییر کند. جدول $(1-2)$ می تواند به عنوان مبنایی برای تعیین محدوده درصد فوق مورد استفاده قرار گیرد.

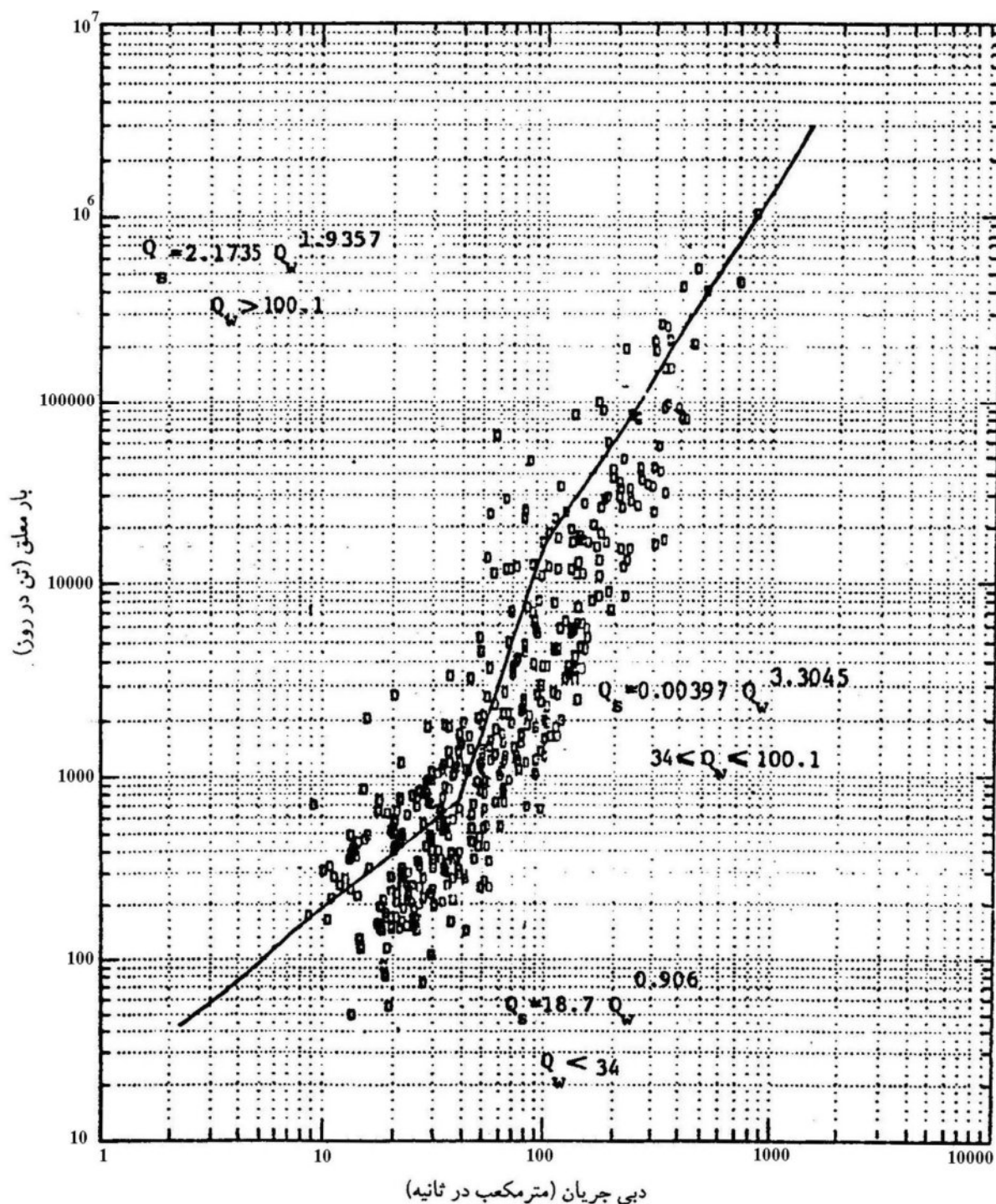
جدول ۲-۱- رابطه بین بار بستر و بار معلق [۱۳۵]

غلظت وزنی رسوب معلق (میلی گرم بر لیتر)	مصالح بستر	ترکیب مصالح معلق	میزان بار بستر بر حسب بار معلق
کوچکتر از ۱۰۰۰	ماسه	۲۰ تا ۵۰ درصد ماسه	۲۵ تا ۱۵۰
از ۱۰۰۰ تا ۷۵۰۰	ماسه	۲۰ تا ۵۰ درصد ماسه	۱۰ تا ۳۵
بزرگتر از ۷۵۰۰	رس، لای، ماسه، کمی شن	کوچکتر از ۲۵ درصد	۵ تا ۱۵
هر غلظتی	رس و لای	ماسه وجود ندارد	< ۲

۲-۳-۶- خاک شناسی پوشش گیاهی و کاربری اراضی

مطالعه خصوصیات خاک های محدوده حوضه ی آبریز مخزن و همچنین حاشیه اطراف رودخانه در پایین دست مخزن، به منظور شناخت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و تعیین گروه های خاک انجام می گیرد. آگاهی از میزان فرسایش پذیری و تاثیر خاک ها بر کیفیت آب از نتایج این مطالعات است.

بررسی پوشش گیاهی حوضه های آبریز از جمله عوامل تاثیر گذار در تغذیه رسوبی رودخانه ها بوده و بر ظرفیت انتقال رسوب اثر می گذارد. با بررسی پوشش گیاهی می توان اطلاعاتی در زمینه نوع گیاهان بومی منطقه و امکان بذریاشی و توسعه پوشش گیاهی در محدوده طرح به دست آورد.



شکل ۲-۱- نمونه‌ای از منحنی بده سنج رسوب و برازش معادلات در بده‌های متفاوت [۲۱]

با تعیین کاربری اراضی در بالادست، تعیین محدوده پایین‌دست مخزن با بازدیدهای میدانی، جمع‌آوری نقشه‌ها و گزارش‌های مختلف از وزارتخانه‌های جهاد کشاورزی، نیرو، راه و ترابری و سازمان محیط زیست امکان‌پذیر است، می‌توان نقشه‌های با کاربری‌های متفاوت را محدوده طرح ایجاد کرد و با تلفیق این نقشه‌ها با مطالعات توسعه رسوب‌گذاری در مخزن بالادست، مناطق تحت تاثیر سیل در آینده را مشخص کرد. همچنین از ترکیب آنها با مطالعات رسوب‌زدایی مخازن سدها، مناطق تحت تاثیر سیل در آینده را مشخص کرد.

۲-۳-۷- زمین‌شناسی و ژئوتکنیک

در چارچوب مطالعات رسوب مخزن سد، شناسایی شرایط زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی زمین محدوده طرح از دو دیدگاه حائز اهمیت است، نخست آن که مخاطرات و مسایل ناشی از زمین‌شناسی منطقه‌ای اعم از حساسیت تشکیلات زمین‌شناسی به فرسایش، شناسایی نواحی دارای ناپایداری‌های دامنه‌ای (لغزش و ریزش)، خاک‌های مشکل‌آفرین و غیره بایستی مورد بررسی واقع شود و دوم آن که شرایط و عوارض زمین‌شناسی در محل طرح‌های مورد نظر برای پایداری و اصلاح ارزیابی و ارایه گردد. در این راستا ضمن جمع‌آوری و بررسی گزارش‌ها و نقشه‌های موجود، پس از انجام بازدیدهای منطقه‌ای از محدوده طرح، نوع و شکل عوارض سطحی زمین و اثرهای آن بر اهداف طرح، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم کلیه عوامل زمین‌شناسی که می‌توانند مشکلاتی را از دیدگاه زمین لغزش، فرسایش، رسوب‌گذاری و سیل‌خیزی ایجاد نمایند، مورد بررسی قرار گیرد و در مجموع کلیه مخاطرات زمین‌شناسی منطقه بحث گردد. در این بخش مسایلی مانند حساسیت تشکیلات زمین‌شناسی به فرسایش و ناپایداری‌های دامنه‌ای حاشیه رودخانه از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. به‌طور کلی در مطالعات زمین‌شناسی رسوب مخازن موارد زیر باید مطالعه گردد:

مشخص نمودن زون‌های زمین‌شناسی منطقه، بررسی وضعیت کوه‌زایی و خشکی‌زایی، نوع چین‌خوردگی‌ها، نوع فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی، سازندها و نحوه گسترش آنها و دگرشیبی

- بررسی سازندهای زمین‌شناسی حوضه و تعیین دامنه و درصد گسترش آنها
- بررسی سنگ‌شناسی حوضه و تعیین دامنه گسترش آنها
- بررسی وضعیت حوضه از نظر زمین‌شناسی ساختمانی، زمین‌ساخت و ساختارهای ویژه
- بررسی وضعیت لرزه‌خیزی حوضه
- بررسی فرآیندهای فرسایشی (مکانیکی و شیمیایی) و تعیین شدت فرسایش‌پذیری هر واحد سنگی و ارایه نقشه حساسیت به فرسایش در هر واحد فیزیوگرافی
- بررسی میزان نفوذپذیری هر یک از واحدهای سنگی و استعداد سیل‌خیزی واحدهای فیزیوگرافی
- بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی واحدهای سنگی و استعداد سیل‌خیزی واحدهای فیزیوگرافی و همچنین بررسی کمی و کیفی آنها بر منابع آب
- بررسی منشا و اثرهای رسوبات در واحدهای فیزیوگرافی و اثرات عوامل جابه‌جایی آنها
- بررسی نوع رسوبات از نظر جنس، خصوصیات فیزیکی (نوع غالب، بافت، جورشدگی) و عامل تولید رسوب بر اساس عملیات صحرایی و تشخیص منشا رسوبات بر اساس واحد سنگی
- بررسی اثرات رسوبات در مناطق پایین‌دست
- بررسی و ارزیابی کیفی منابع قرضه با هدف جلوگیری از ایجاد فرسایش
- مشخص نمودن نوع منابع قرضه (خاک و سنگ) و ارائه نقشه موقعیت جغرافیایی آنها
- مشخص نمودن جنس، استحکام و میزان بلوک‌های قابل استحصال از منابع سنگی
- تعیین نوع خاک (شن، ماسه، سیلت و رس) و بررسی کیفیت هر یک از آنها
- تعیین حجم مصالح و ارایه روش‌های مناسب بهره‌برداری
- تهیه نیم‌رخ‌های طولی زمین‌شناسی رودخانه‌ها و تعیین واحدهای سنگی بستر آبراهه‌های اصلی در هر یک از واحدهای فیزیوگرافی

- تعیین واحدها، تیپ‌ها و رخساره‌های ریخت‌شناسی زمین و ارائه نقشه مربوط
 - بررسی وضعیت پایداری شیب‌ها و ارایه نقشه دامنه‌های ناپایدار
 - تهیه نقشه پراکنش پهنه‌های لغزشی و ریزشی و شیب‌های ناپایدار با استفاده از عکس‌های هوایی و عملیات صحرایی
 - مشخص نمودن جنس مصالح و مکانیسم حرکت و عوامل موثر در زمین لغزش
 - مشخص نمودن واحدهای حساس و ناپایدار
 - مشخص نمودن میزان خسارت و مکان‌های مورد تهدید (از نظر فرسایش، تولید رسوب، سازه‌های مهندسی و...)
 - پیشنهاد روش‌های پایدارسازی برای مناطق حساس
 - بررسی موارد خاص تاثیرگذار در حوضه‌های نظیر گنبد‌های نمکی، معادن و مناطق بهمن‌گیر
 - اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر محدودیت‌های فرسایش‌پذیری، پراکنش زمین، لغزش‌ها، لرزه‌خیزی و مناطق بهمن‌گیر و...
 - ارائه پیشنهاد عملیات اجرایی جهت پیشگیری، اصلاح، کنترل رسوبات واحدهای سنگی رسوب‌زا و پایداری شیب‌ها و حرکات توده‌ای و اولویت‌بندی عملیات اجرایی
- پس از بررسی شرایط موجود منطقه، جهت ارایه طرح‌های مناسب رسوب‌زدایی آگاهی از خصوصیات ژئوتکنیکی توده‌های خاکی و سنگی در محل هر یک از گزینه‌های مورد نظر ضروری بوده و به همراه آن شناخت کافی از منابع قرضه موجود و در دسترس منطقه در انتخاب گزینه برتر و برآورد هزینه تقریبی طرح‌ها بسیار مهم است. لذا در بررسی‌های ژئوتکنیکی اقدامات زیر به انجام می‌رسد.
- پس از جمع‌آوری گزارش‌ها و نقشه‌های موجود در خصوص مطالعات ژئوتکنیک، ابتدا بازدیدهای محلی از محل هر یک از گزینه‌های پیشنهادی برای سازه‌های طرح ساماندهی انجام و ضمن مطابقت مطالعات دفتری، اطلاعات کلی از شرایط محلی گردآوری می‌گردد. در این بازدیدها لازم است شرایط و موقعیت منابع قرضه موجود نیز بررسی گردد.
- با توجه به شناخت حاصل از گام قبل، دستورالعمل عملیات ژئوتکنیک اعم از حفاری‌ها، آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی به منظور شناسایی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاکی و یا سنگی در محل طرح‌ها و نیز خصوصیات کیفی مصالح قرضه تهیه می‌گردد. در این مرحله ممکن است در حین انجام کار با توجه به شرایط منطقه تغییراتی در میزان و نحوه انجام کار پیشنهاد شود، لذا نظارت مستمر بر روند انجام عملیات ژئوتکنیک در دستور کار قرار می‌گیرد.
- پس از اخذ نتایج حاصل از عملیات ژئوتکنیک و بررسی و تحلیل آن، مشخصات زیر سطحی در محدوده طرح‌ها و خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و در صورت نیاز شیمیایی توده‌های خاکی و سنگی ارایه می‌شود. هم‌چنین بر اساس این نتایج خصوصیات کمی و کیفی منابع قرضه نیز ارزیابی شده و در نهایت گزینه‌های مناسب برای تامین منابع قرضه اولویت‌بندی و معرفی می‌شود. بدین ترتیب اطلاعات مورد نیاز برای طراحی روش‌های رسوب‌زدایی در اختیار کارشناسان مرتبط در این مبحث قرار داده می‌شود.

۲-۳-۸- ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

رودخانه‌ها نسبت به تغییر شرایط جریان و یا مشخصات هندسی خود که به طور طبیعی یا مصنوعی (دخاله بشر) ایجاد می‌شود حساسیت و عکس‌العمل نشان می‌دهند. عمدتاً رفتار رودخانه‌ها در شرایط عادی و غیرعادی (وجود عوامل خارجی) رفتاری مشخص و متوازن است که عوامل مختلفی در تعیین نوع و شدت آن موثر می‌باشند. با شناخت قانون‌مندی حاکم بر رودخانه می‌توان رفتار آن را

شناخت و تغییرات آن را به طور کیفی و کمی پیش‌بینی کرد. منظور از رفتار رودخانه‌ها همان واکنش و عملکردی که رودخانه در شرایط مختلف از خود نشان می‌دهد می‌باشد. از این رو برخورد با رودخانه باید کاملاً آگاهانه و مبتنی بر قواعد خاص حاکم بر آن باشد. ریخت‌شناسی یا رفتارشناسی رودخانه مبتنی بر تحلیل عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای سال‌های مختلف از بازه مورد مطالعه و نقشه‌های توپوگرافی و پلان رودخانه می‌باشد. از جمله نکاتی که در این بخش از این مطالعات باید به آن اشاره شود این است که تفاوت در کیفیت، مقیاس و زمان تهیه عکس‌ها و نقشه‌ها ممکن است مشکلات عدیده‌ای را به وجود آورد. به عبارت دیگر ممکن است عکس‌های تهیه شده مربوط به دوره‌های پرآبی و یا کم‌آبی از نظر مقیاس تهیه با یکدیگر متفاوت باشد که عدم توجه به این مساله در دقت تحلیل و تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی تاثیر به سزایی خواهد داشت. بنابراین قبل از بررسی رفتار رودخانه، مراحل زیر در مطالعات ریخت‌شناسی انجام می‌گیرد:

- نگاشت یا تبدیل عکس‌های هوایی به یک مقیاس مشترک
 - تهیه تصویر مسیر رودخانه با استفاده از همپوشانی و یکپارچه‌سازی عکس‌های هوایی
 - مشخص نمودن آدرس مختصات زمینی عارضه‌های همسان موجود در تصویر و دنیای واقعی
 - رقومی نمودن شکل کلی مشخصات رودخانه
 - ذخیره‌سازی اطلاعات به فرمت قابل انتقال در محیط نرم‌افزارهای مورد استفاده در تهیه نقشه‌های ریخت‌شناسی (اتوکید و سیستم اطلاعات جغرافیایی)
- به منظور تبدیل عکس‌های هوایی به یک مقیاس مشترک از چندین نقطه مشترک موجود در عکس‌ها استفاده می‌شود. به طور معمول نقاط مشترک را می‌توان محل تلاقی جاده‌ها و یا محل پل‌ها بر روی رودخانه‌ها و جاده‌ها منظور نمود.
- پس از انجام مراحل فوق و تهیه تصاویر یکپارچه از مسیر رودخانه برای سال‌های مختلف، می‌توان نرم‌افزارهایی مثل AutoCAD یا نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی همچون ArcInfo، Arcview و ArcGIS را به کار برد و با استفاده از ابزار در اختیار، شکل کلی رودخانه، جزیره‌ها، آبراهه‌های جانبی و مانداب‌ها را رقومی نمود. پس از تهیه نقشه ریخت‌شناسی بر اساس عکس‌های ادوار گذشته و شرایط موجود، مشخصه‌های ریخت‌شناسی همچون میزان یا نرخ جابه‌جایی مرکز خم‌ها و میزان انبساط و انقباض شعاع خم‌ها در طول سال‌های مورد بررسی تعیین گردیده و با توجه به معیارهای موجود، رفتار رودخانه در دوره آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به میزان تغییر مکان مرکز خم‌ها و طول شعاع منحنی به‌دست آمده از عکس‌های سال‌های قبل و با عنایت به سال و یا سال‌های مورد پیش‌بینی، میزان تغییرات بر اساس سال موردنظر برون‌یابی می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان بر اساس نتایج به‌دست آمده در سال‌های مورد پیش‌بینی، مسیر یا مسیرهای احتمالی جدید رودخانه را در سال‌های آتی پیش‌بینی کرد.

۲-۳-۹- مشخصات فیزیوگرافی حوضه

برای انجام مطالعات فیزیوگرافی با استفاده از فناوری GIS و نرم‌افزارهای ArcGIS، Arcview و ILWIS و غیره به برآورد پارامترهای فیزیکی حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه از قبیل طول آبراهه اصلی، نوع سیستم زهکشی، شیب متوسط وزنی آبراهه‌ها، مرکز ثقل، شیب متوسط حوضه، طول حوضه، مساحت، محیط، ضرایب شکل، پروفیل طولی آبراهه‌ها، زمان تمرکز و غیره پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱۰- مطالعات اجتماعی و اقتصادی

همزمان با جمع‌آوری گزارش‌ها و داده‌های ارائه شده در بند ۲-۳-۳، ضروری است اقدامات ذیل به منظور تکمیل مطالعات اجتماعی در محدوده طرح انجام گیرد:

- تکمیل پرسشنامه‌های اجتماعی به وسیله مصاحبه با ساکنین محدوده طرح
- شرکت در جلسات مختلف با اعضاء شوراهای محلی و مسئولین دولتی و کسب نظر آنها
- بررسی اجمالی و تعیین ارزش عرفی اراضی حاشیه رودخانه و مخزن
- بررسی آداب و رسوم سنتی در بهره‌برداری از اراضی و آب رودخانه
- بررسی چگونگی مشارکت دادن مردم و آگاه کردن آنها از طرح‌های مرتبط با فرسایش و رسوب
- بررسی آثار اجتماعی و اقتصادی ناشی از پدیده‌های رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی
- بررسی میزان اقدام به قوانین موجود و اشتیاق مردم به مشارکت در طرح‌های توسعه‌ای
- بررسی ایجاد هماهنگی بین مسئولین دولتی و خصوصی ارگان‌های مختلف مستقر در محدوده طرح و چگونگی مشارکت دادن آنها

۲-۳-۱۱- مطالعات زیست محیطی

بررسی آثار زیست‌محیطی احداث مخزن به‌خصوص در ارتباط با رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی یکی از مطالعات مهم می‌باشد. از این‌رو، ضروری است تا پس از جمع‌آوری داده‌ها و گزارش‌های ارائه شده در بند ۲-۳-۳ نسبت به تدوین گزارش زیست‌محیطی با توجه به مطالبی که در این راهنما و به‌خصوص فصل ۷ آمده است، اقدام نمود. تعیین آستانه تحمل آبریان نسبت به غلظت رسوب و تعیین زمان تخم‌ریزی ماهی‌ها و ماه‌های اولیه رشد باید در گزارش زیست‌محیطی ارایه شود. در گزارش زیست‌محیطی باید اثرات ناشی از رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی در محدوده طرح دقیقاً مشخص گردد. در این گزارش لازم است پیشنهادهای اجرایی برای حفاظت از محیط زیست و کیفیت آب و همچنین گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری ارائه گردد. این گزارش باید با علم به قوانین و مقررات زیست محیطی کشور و بین المللی تدوین شده باشد.

۲-۳-۱۲- مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب

از جمله مطالعات ضروری در مخازن سدها، مطالعات تخصصی هیدرولیک جریان و رسوب می‌باشد. هدف اصلی از مطالعات هیدرولیک جریان، آگاهی از خصوصیات جریان نظیر سرعت، عمق، تنش برشی و بده جریان در رودخانه بالادست، محدوده مخزن و رودخانه پائین‌دست می‌باشد. این خصوصیات برای بده‌های سیلابی که هنوز اتفاق نیفتاده‌اند به منظور اعمال روش‌های پیشگیری از خسارات احتمالی بسیار ضروری است. مطالعات هیدرولیک رسوب نیز به منظور بررسی نحوه رسوب‌گذاری در مخزن و رودخانه بالادست، همچنین نحوه فرسایش بستر رودخانه پایین‌دست، به‌خصوص در شرایط جریان‌های سیلابی که ممکن است در طول عمر پروژه با آن روبرو شود، می‌باشد. مطالعات هیدرولیک جریان و رسوب نیازمند استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی می‌باشد که در فصل‌های مختلف این راهنما ارایه شده‌اند.

فصل ۳

روش‌های برآورد حجم رسوب نهشته

شده در مخزن

۳-۱- کلیات

مقدار حجم رسوب نهشته شده در مخزن سد، باید در دوره‌های زمانی مشخص تعیین گردد تا بر اساس آن بتوان نرخ رسوب‌گذاری سالانه و میزان حجم از دست رفته مخزن را تعیین کرد. نتایج به‌دست آمده کمک خواهد کرد تا از تاثیر عملیات کنترل فرسایش و رسوب بالادست، نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و میزان شدت رسوب‌گذاری مطلع شد و سپس بر اساس این نتایج بتوان با برنامه‌ریزی صحیح عمر مفید مخزن را افزایش داد. دقیق‌ترین و معمول‌ترین روش حجم رسوب نهشته شده، انجام عملیات نقشه‌برداری زمینی و آبنگاری^۱ مخزن در زمان‌های مختلف می‌باشد. بدین ترتیب که با انجام عملیات نقشه‌برداری می‌توان حجم مخزن را در هر دوره‌ای محاسبه کرد که پس از کسر کردن حجم مخزن محاسبه شده از عملیات نقشه‌برداری در دوره قبل، حجم رسوب نهشته شده محاسبه خواهد شد. روش‌های دیگری مبتنی بر محاسبه عمق رسوب نهشته شده در مخزن سد نیز استفاده شده‌اند که در صورت محاسبه ضخامت رسوب نهشته شده می‌توان میزان حجم رسوب نهشته شده را از حاصل ضرب ضخامت رسوب در سطح مخزن به‌دست آورد. نظر به اهمیت و کاربرد بیش‌تر محاسبه حجم رسوب نهشته شده با استفاده از عملیات نقشه‌برداری، در این فصل ابتدا عملیات نقشه‌برداری مخزن ارایه می‌شوند سپس روش‌های محاسبه حجم رسوب نهشته شده با استفاده از نتایج عملیات نقشه‌برداری بیان خواهد شد. در انتهای فصل روش‌های دیگر محاسبه ضخامت رسوب نهشته شده نیز ارایه شده‌اند.

۳-۲- نقشه‌برداری مخزن^۲

نقشه‌برداری مخزن با هدف تعیین حجم رسوب‌گذاری و تعیین حجم مفید سد با روش‌های مختلفی انجام می‌گردد. به منظور برنامه‌ریزی صحیح در رابطه با نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و همچنین برآورد نرخ رسوب‌گذاری در مخزن سد ضروری است تا عملیات نقشه‌برداری به صورت دوره‌ای و در طول عمر مخزن برداشت گردد. نتایج حاصل از برداشت‌های نقشه‌برداری برای برنامه‌ریزی طولانی مدت و بهره‌برداری صحیح از مخزن بسیار ضروری است. روش‌های مختلفی برای نقشه‌برداری مخزن وجود دارد ولی قبل از اقدام به هر گونه عملیات نقشه‌برداری و با توجه به این‌که این عملیات بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است، ضروری است تا با یک برنامه‌ریزی صحیح و زمان‌بندی مناسب اقدام شود. در این قسمت ابتدا نکات کلی به منظور تدوین برنامه صحیح عملیات نقشه‌برداری ارایه می‌گردد و سپس روش‌های مختلف نقشه‌برداری ارایه می‌شود.

۳-۲-۱- برنامه‌ریزی عملیات نقشه‌برداری

۳-۲-۱-۱- فواصل زمانی بین نقشه‌برداری‌ها

فاصله‌ی زمانی بین نقشه‌برداری بستگی به خصوصیات مخزن، نرخ رسوب‌گذاری و میزان اعتبار تخصیص یافته به آن پروژه دارد. برای مخازنی که حجم رسوبات ورودی بسیار کم و یا نرخ رسوب‌گذاری آهسته باشد، ممکن است این فاصله‌ی زمانی تا ۱۰ سال هم انتخاب شود. برعکس، برای مخازنی که از نظر اقتصادی و اجتماعی حائز اهمیت هستند و یا نرخ رسوب‌گذاری در آنها زیاد است، ممکن است هر ۲ تا ۳ سال یک بار نیاز به نقشه‌برداری باشد. در چنین مخازنی حتی ممکن است پس از عبور هر سیلاب بسیار بزرگ

1- Bathymetric survey

2- Hydrographic survey

اقدام به نقشه‌برداری گردد. در صورت احداث مخزن در مناطق بالادست مخزن قدیمی، میزان ورود رسوبات به شدت کاهش می‌یابد و در نتیجه می‌توان فواصل بین نقشه‌برداری‌ها را در مخزن قدیمی افزایش داد. فاصله‌ی زمانی نقشه‌برداری و نمونه‌برداری از مخازن در بیش‌تر سدهای ایران ده سال و برای سدهایی که از اهمیت بیش‌تری و یا خطرپذیری زیادی دارند پنج سال می‌باشد.

۳-۱-۲-۲- ملاحظات اقتصادی

برنامه‌ریزی برای نقشه‌برداری بستگی به اعتبار پروژه دارد. معمولاً این عامل تعیین‌کننده انتخاب روش نمونه‌برداری، کمیت و کیفیت داده‌ها و چگونگی پردازش داده‌ها می‌باشد. امروزه سرعت عملیات نقشه‌برداری مخازن نسبت به چهل سال پیش، بیش از ۷۵ برابر و نسبت به پانزده سال پیش ده برابر شده است. دلیل آن هم پیشرفت ابزار عملیات نقشه‌برداری و به وجود آمدن روش‌های نوین پردازش داده‌ها می‌باشد. قبل از این که وسایل و ابزار الکترونیکی در نقشه‌برداری مخازن مورد استفاده قرار گیرد، اطلاعات براساس مشاهدات یا اندازه‌گیری فواصل به صورت دستی انجام می‌گرفته است. در روش‌های سنتی زمان زیادی برای تعیین موقعیت خطوط مبنا صرف می‌گردید ضمن این که به دو تا سه وسیله شناور نسبتاً بزرگ و حداقل پنج تا هشت متخصص فنی نیاز بود. علاوه بر این راندمان کار هم نسبتاً پایین بود چرا که با این حجم وسیله و متخصص، داده‌های مربوط به یک تا حداکثر پنج خط مبنا در روز برداشت می‌گردید. امروزه با پیشرفت سیستم‌های رایانه‌ای و کاربرد ابزار امواج کوتاه، تعداد متخصص مورد نیاز به شدت کاهش یافته است. سرعت برداشت داده‌ها امروزه به ۵ تا ۱۰ خط مبنا در روز با سه نفر متخصص رسیده است. در شرایط فعلی پردازش داده‌ها بسیار سریع‌تر از زمان‌های گذشته انجام می‌گیرد.

توسعه سیستم‌های هیدروگرافی GPS^۱ نیز به میزان زیادی هم مدت زمان عملیات را و هم هزینه‌ها را کاهش داده است. به علاوه، راندمان برداشت داده‌های صحرایی را نیز افزایش داده است. ضمن این که تعداد نیروهای متخصص مورد نیاز نیز کاهش یافته است. مهم‌ترین بخش صرفه‌جویی در هزینه‌ها مربوط به تسریع در کنترل شبکه خطوط تراز زیر سطح آب قبل از اقدام به عملیات آب‌نگاری می‌باشد. امروز با استفاده از وسایل عمق‌سنجی صوتی^۲ و استفاده همزمان از سیستم RTK GPS^۳ می‌توان به‌طور پیوسته عمق آب زیر مخزن را برداشت کرد. این سیستم امکان آن را فراهم می‌سازد تا کنترل‌های اولیه را که ممکن بود هفته‌ها طول بکشد، در چند ساعت انجام داد. افراد متخصص مورد نیاز به دو نفر کاهش یافته است. در این سیستم حجم زیادی از داده‌های برداشتی به سرعت و به‌طور مستقیم در رایانه ذخیره می‌شوند.

استفاده از ابزار صوت‌سنج چندمیله‌ای^۴، هر چند سرعت کار را باز هم بیش‌تر خواهد کرد و نمای سه‌بعدی مخزن خیلی سریع‌تر و دقیق‌تر تهیه خواهد شد ولی این روش نیاز به اعتبار اولیه زیادتر و متخصصین خاص دارد.

البته تجربه افراد نقشه بردار و متخصصین مربوط نیز در کاهش هزینه‌ها بسیار موثر است. چون همان‌طور که اشاره شد بخش عمده‌ای از هزینه‌ها مربوط به برنامه‌ریزی انجام کار، تهیه امکانات، آموزش و کنترل کار می‌باشد.

1- Global positioning system hydrography

2- Single – beam fathometer

3- Real-time kinematics

4- Multiple beam fathometer

۳-۲-۱-۳- شناسایی منطقه جمع‌آوری اطلاعات و مدارک

برای برنامه‌ریزی صحیح عملیات نقشه‌برداری، انجام بازدیدها و جمع‌آوری اطلاعات و مدارک از وضعیت مخزن و تاسیسات جانبی بسیار ضروری است. بازدید و شناسایی اولیه منطقه عملیاتی دارای اهمیت بسیار زیادی در طراحی مقدماتی و زمان‌بندی نقشه‌برداری می‌باشد. از مواردی مانند وضعیت توپوگرافی محدوده مخزن، منطقه مکش تاسیسات تخلیه‌کننده تحتانی، وضعیت مخزن سد از نظر حجم آب موجود، تراز سطح آب و بده ورودی باید بررسی اولیه و از تاسیسات جنبی و سد بازدید به عمل آید. همچنین ضروری است تا اطلاعات اولیه و مدارک موجود تهیه گردند. این اطلاعات عبارتند از: نقشه‌های توپوگرافی اولیه مخزن، نقشه جانمایی سد و تاسیسات جنبی، طول آمارهای تراز آب مخزن، داده‌های مربوط به وزش باد (سرعت و جهت)، بارش‌های جوی، دما و تبخیر در محل سد، ترازهای نرمال و حداکثر سطح آب، تراز تاج سد و وضعیت حریم مخزن که باید با استفاده از اطلاعات موجود تغییرات تراز سطح آب مخزن در طول سال و در سال‌های مختلف نیز تعیین گردد. اطلاعات کاملی از نحوه بهره‌برداری از مخزن سد به‌خصوص نیازهای آبی پایین‌دست و اطلاع از حداقل رقوم سطح آب مخزن در مخازن نیروگاهی نیز بسیار مفید است.

۳-۲-۱-۴- برنامه‌ریزی عملیات و تجهیز کارگاه

قبل از شروع عملیات و ورود افراد نقشه‌بردار، در منطقه باید فعالیت‌های اولیه انجام گردد. به‌طوری‌که امکانات اسکان افراد، دفتر کار و انبار، تهیه شناور مورد نیاز عملیات آبی و وسایط نقلیه زمینی و استخدام نیروی کارگری مورد نیاز فراهم گردد. در این راستا امکانات کارفرما موجود در محل از نظر اقامت، غذا، منابع انرژی الکتریکی و تهیه قایق مناسب همچنین نوع سیستم‌های مخابراتی باید مد نظر قرار گیرد. سرپرست پروژه پس از بررسی‌های اولیه در ارتباط با روش‌های مورد استفاده تصمیم‌گیری نماید و در قرار دادن و آرایش صحیح افراد دقت لازم را مبذول نموده و مبادرت به تهیه نگاره پیشرفت عملیات برای کنترل پروژه در تمام مراحل کاری نماید. تجهیزات کارگاهی مورد نیاز عبارتند از:

- دستگاه عمق‌سنج صوتی دو فرکانسه با دقت در حد یک سانتی‌متر
- دستگاه‌های GPS و DGPS^۱ با دقت یک سانتی‌متر به منظور تعیین موقعیت نقاط و رپرها
- دوربین‌های نقشه‌برداری زمینی از نوع توتال استیشن با دقت حداقل فاصله ترازیبی ۱۰ سانتی‌متر مسطحاتی و ۳ سانتی‌متر ارتفاعی.
- مدل‌های با فرکانس‌های مختلف که بتوان در نقاط مختلف مخزن به کار برد. از مدل‌های با فرکانس ۱۹۰ تا ۲۱۰ کیلوهرتز نباید در اعماق بیش‌تر از ۷۰ متر استفاده کرد.
- سنجنده‌های سرعت صوت برای اندازه‌گیری و انجام تصحیحات مربوط به تغییرات سرعت صوت
- نمونه‌گیرهای آب و غلظت رسوب باید تهیه شود تا بتوان در نقاط مختلف و در اعماق مختلف نمونه‌های مورد نظر را تهیه کرد.
- دستگاه تولید برق سیار با قدرت مناسب برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز
- قایق مناسب برای عملیات نقشه‌برداری با تجهیزات لازم
- چادر صحرایی

1- Differential global positioning system

۳-۲-۱-۵- رپرگذاری

عملیات نقشه‌برداری شامل برداشت‌های زمینی و برداشت‌های زیر سطح آب می‌باشد. یکی از روش‌های متداول نقشه‌برداری برداشت نقاط زیر سطح آب در حول خط عرضی و عمود بر محور مخزن است که به آن خط مبنا گفته می‌شود. چگونگی انتخاب خطوط مبنا در قسمت روش خط مبنا ارایه شده است. پس از انتخاب خطوط مبنا باید موقعیت دو سر خط در محل رپرگذاری شود. رپرهای اصلی باید براساس مشخصات فنی نقشه‌برداری (نشریه شماره ۹۵) و دستورالعمل‌های تیپ نقشه‌برداری (نشریه شماره ۳-۱۱۹) سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به ابعاد $۳۰ \times ۴۰ \times ۲۵$ سانتی‌متر در کارگاه ساخته و در محل کار گذاشته شوند. رپرهای فرعی از میل‌گردهای ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر که در محل مورد نظر بتن‌ریزی می‌شوند، می‌باشند. رپرهای از نظر موقعیت باید در تراز یا بالاتر از حداکثر تراز سطح آب مخزن یا تراز تاج سد احداث شوند. چنان‌چه در مخزن سدی قبلاً عملیات هیدروگرافی انجام شده است، رپرهای قدیمی باید ابتدا شناسایی و موقعیت و رقوم آنها از طریق دستگاه GPS یا DGPS کنترل شود.

۳-۲-۱-۶- تهیه برنامه زمانبندی

برنامه زمانبندی عملیات نقشه‌برداری زمینی و زیرسطحی از جمله اقداماتی است که باید قبل از شروع هر گونه عملیاتی تهیه و به تایید کارفرما برسد، برنامه زمان‌بندی باید مدت زمان مورد نیاز برای انجام کلیه اقدامات حتی جزئی را که ضروری است مشخص کند. زمان شروع عملیات و زمان پایان عملیات نیز دقیقاً مشخص گردد. در تدوین برنامه زمانبندی باید به نکات زیر توجه کرد:

- عملیات آبنگاری نباید در زمان سیلاب رودخانه برداشت گردد.
- عملیات آبنگاری نباید در زمان‌هایی که باد شدید وجود دارد ادامه یابد زیرا باعث ایجاد خطای زیادی خواهد شد.
- نقشه‌برداری‌های زیرسطحی باید زمانی صورت گیرد که تراز سطح آب در بالاترین حد خود قرار دارد.
- نقشه‌برداری‌های زمینی نیز باید در زمانی که تراز سطح آب در پایین‌ترین حد قرار دارد انجام گیرد.

۳-۲-۲- روش‌های نقشه‌برداری مخزن سد

برای تعیین حجم رسوبات نهشته شده در زیر آب، دو روش وجود دارد که شامل روش خطوط تراز و روش خطوط مبنا می‌باشد. در شرایطی هم ممکن است از ترکیب این دو روش استفاده شود. انتخاب روش بستگی به مقدار و نحوه توزیع رسوب، در اختیار داشتن نقشه‌های اولیه، هدف از نقشه‌برداری و دقتی که در انجام کار مدنظر است، دارد.

۳-۲-۲-۱- نقشه‌برداری خطوط مبنا^۱

روش خطوط مبنا از روش‌های قدیمی است که به‌طور گسترده در مطالعات رسوب مخازن از آن استفاده می‌شود. با این روش می‌توان میزان رسوب‌گذاری را با کم‌ترین تعداد داده‌های صحرایی و با دقت قابل قبولی محاسبه کرد. در این روش، ابتدا خطوط مبنا مشخص می‌شوند، سپس رپرگذاری شده و رقوم آنها برداشت می‌گردد. آنگاه پستی و بلندی مخزن در امتداد هر خط مبنا اندازه‌گیری می‌شود و با به کار بردن روش‌های تعیین حجم رسوب که در قسمت ۳-۳ ارایه گردیده است، میزان حجم رسوب‌گذاری در مخزن تعیین می‌گردد. هم‌چنین، می‌توان ضخامت رسوب‌گذاری را در هر خط مبنا مشخص و نهایتاً نیم رخ طولی بستر را به‌دست آورد.

۳-۲-۱-۱-۱- موقعیت خطوط مبنا

خطوط مبنا در سدهای جدید هم در بالادست سد و هم در پایین دست آن انتخاب می‌شوند. خطوط بالادست برای محاسبه‌ی حجم رسوبات نهشته شده و خطوط پایین دست برای برآوردهای کف کنی استفاده می‌شوند. تعیین موقعیت خطوط مبنا بهتر است بر مبنای توصیه‌های زیر صورت گیرد:

- خطوط مبنا باید عمود بر محور مخزن و یا عمود بر محور شاخه‌های فرعی و یا به عبارتی عمود بر خطوط تراز باشند. دقت شود که زاویه بین خطوط مبنا و منحنی‌های تراز نباید از ۳۰ درجه تجاوز کند.
- موقعیت خطوط طوری انتخاب می‌شود که متوسط دو خط مبنای متوالی معرف شرایط بین خطوط مبنا باشد.
- خطوط مبنا از دهانه‌ی هر یک از شاخه‌های اصلی یا فرعی شروع و سایر خطوط در جهت بالادست انتخاب خواهند شد.
- مهم‌ترین خطوط مبنای مخزن در پایین دست به فاصله‌ی کمی از بالادست محل سد انتخاب می‌شود.
- فاصله‌ی بین خطوط مبنا در مکان‌هایی مانند محل تشکیل دلتا و یا مکان‌های خاص دیگر، بهتر است کوتاه‌تر انتخاب شود. همچنین در موقعیت‌ها یا سازه‌هایی که نسبت به رسوب‌گذاری یا فرسایش (پایین دست سد) بسیار حساس می‌باشند، خطوط مبنا باید تعریف شوند. مثلاً در محل دهانه‌ی ورودی به نیروگاه یا در پایین دست در محل خروجی نیروگاه یا موقعیت پل‌هایی که ممکن است پایین دست یا بالادست سد قرار داشته باشند.
- خطوط مبنا در شاخه‌ی اصلی و یا شاخه‌های فرعی باید تا مکان‌هایی که امکان رسوب‌گذاری وجود دارد، ادامه یابند و نیز در پایین دست تا مکان‌هایی که پتانسیل رسوب‌گذاری دارد. مقدار تقریبی خطوط مبنا که باید در نقشه‌برداری در نظر گرفته شوند را می‌توان از رابطه‌ی تجربی زیر که توسط سازمان احیا اراضی آمریکا ارائه شده است، به دست آورد:

$$(1-3) \quad A^{0.7452} = 2/942 \text{ تعداد خطوط مبنا}$$

که در این رابطه A سطح مخزن در تراز نرمال آب بر حسب هکتار می‌باشد.

- با توجه به حساسیت بدنه سد و سایر تاسیسات بهتر است فاصله بین خطوط مبنا از محور سد تا یک کیلومتری آن به منظور تهیه نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، برابر ۲۵ متر و از یک کیلومتری تا انتهای مخزن به منظور تهیه نقشه‌های ۱:۵۰۰۰، ۵۰ متر و حداکثر ۱۰۰ متر انتخاب گردد.

تعداد داده‌های مورد نیاز بستگی به نیاز پروژه، شرایط مخزن، هزینه جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل آنها و میزان قابلیت و محدودیت سیستم جمع‌آوری داده‌ها دارد. به طور کلی موقعیت جدید افقی GPS را می‌توان در هر ثانیه به روز کرد، دستگاه الکترونیکی عمق سنج صوتی یک میله‌ای نیز قادر است که در هر ثانیه عمق تعداد ۲۰ نقطه یا بیش تر نقاط را قرائت کند. رایانه‌های پیشرفته نیز امروزه قادر هستند که تمام این اطلاعات را ذخیره و بلافاصله با نرم‌افزارهای موجود پردازش کنند. بنابراین این‌که چه سیستمی استفاده شود بستگی به مدیریت پروژه دارد. توصیه کلی این است که در زمان جمع‌آوری داده‌ها، تا آن‌جا که ممکن است تلاش گردد تا داده‌های زیادی برداشت و ذخیره کرد. بدیهی است گزینش داده‌ها که برای محاسبات نهایی ضروری است باید پس از جمع‌آوری داده‌ها صورت گیرد.

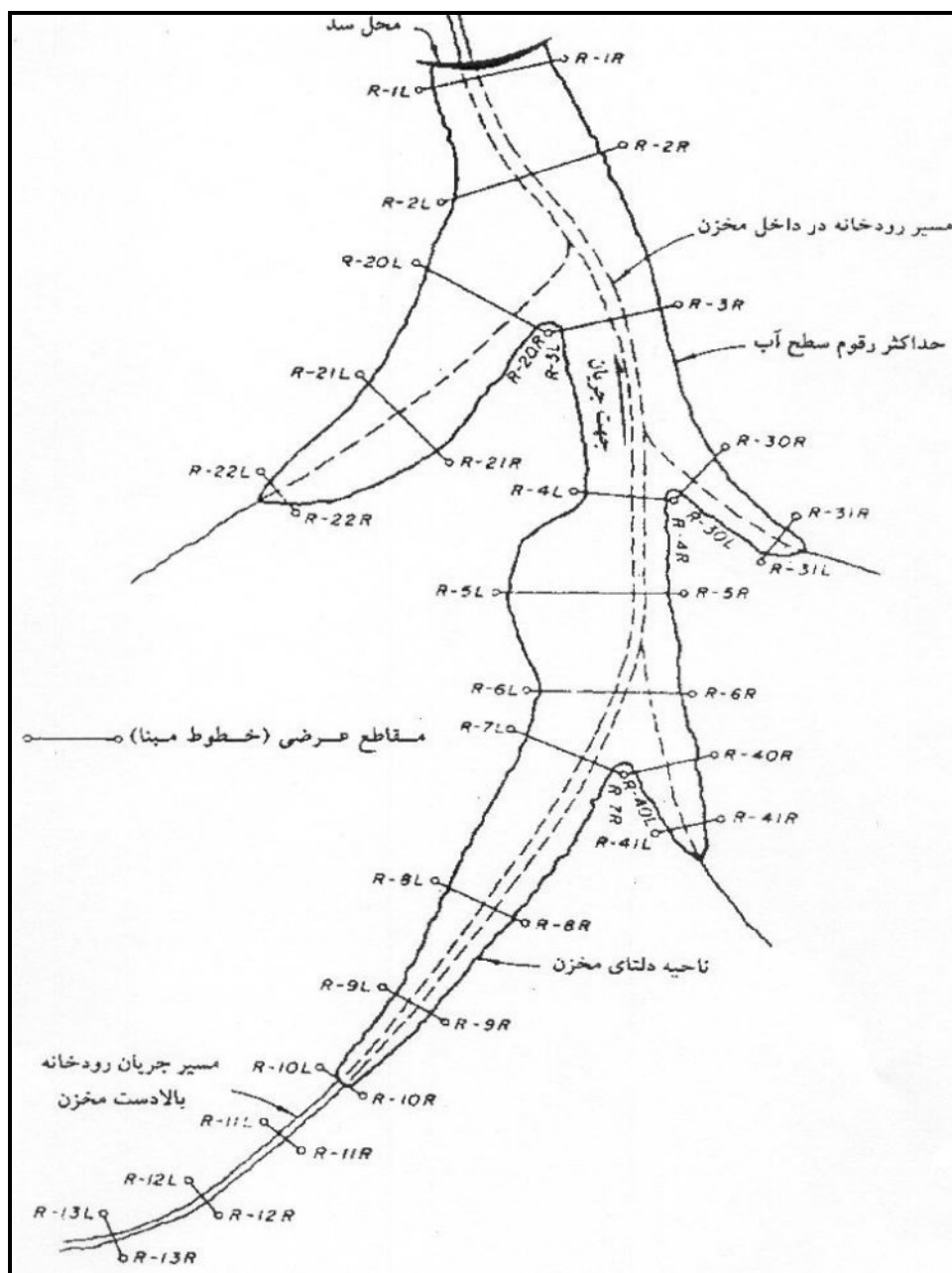
در صورتی که از دستگاه‌های عمق سنج صوتی یک میله‌ای استفاده می‌شود، فاصله بین خطوط باید طوری باشد که در نهایت تراکم مناسبی از داده‌ها فراهم گردد تا بتوان به اهداف مورد نظر دست یافت.

در روش خطوط مبنا در طراحی اولیه فرض بر این است که یکنواختی توپوگرافی بین خطوط مبنا برقرار است. این فرضیه در صورتی که تغییر ناگهانی وجود نداشته باشد صحیح نیست. از این رو ضروری است که نقشه‌برداران در زمان جمع‌آوری داده‌ها، دقت لازم را به عمل آورند تا در صورت مشاهده تغییر ناگهانی بستر بین دو خط مبنا، فاصله خطوط مبنا را اصلاح کنند. فواصل خطوط مبنا در صورت استفاده از دستگاه عمق‌سنج صوتی یک میله‌ای حدود ۱۰۰ متر (۳۰۰ فوت) توسط USBR^۱ برای مخازن بزرگ و برای مخازن کوچک فاصله در حدود ۳۰ تا ۷۰ متر (۱۰۰ تا ۲۰۰ فوت) رعایت می‌شود تا توپوگرافی بستر با دقت اندازه‌گیری شود. البته در مخازن بزرگ در صورتی که بستر مخزن تقریباً مسطح می‌باشد و اعتبار پروژه هم با محدودیت مواجه می‌باشد، می‌توان فاصله بین خطوط را تا ۲۰۰ متر (۶۰۰ فوت) و یا حتی ۷۰۰ متر (۲۰۰۰ فوت) هم اختیار کرد. دستگاه‌های عمق‌سنج صوتی چندین میله‌ای قادر هستند تا تمام بستر زیر سطح آب را برداشت کنند ولی مسلماً این روش از نظر زمانی طولانی‌تر و از نظر اقتصادی هزینه بیش‌تری در بر دارد. بنابراین این که از چه سطحی نقشه‌برداری صورت گیرد و تا کجا ادامه یابد بستگی به اهداف مطالعه و اعتبار مورد نظر دارد. توصیه این است که کل سطح مخزن در تراز حداکثر سطح آب مجاز و یا در صورت امکان تا تراز تاج سد برداشت گردد.

۳-۲-۱-۲- شماره‌گذاری خطوط مبنا

یکی از سیستم‌های شماره بندی پیشنهاد شده برای شناسایی خطوط مبنا برای مخازن بزرگ در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. اولین خط مبنا بلافاصله در بالادست سد با شماره‌ی (R-1) مشخص می‌شود و باقی خطوط به‌طور متوالی تا بالادست مسیر جریان رودخانه‌ی اصلی شماره‌گذاری می‌شود. شماره‌گذاری انشعابات و شاخه‌های فرعی نیز به همین روش شماره‌گذاری می‌شود. شماره‌گذاری این انشعابات از مبنای ۱۰ شروع می‌گردد. به عنوان مثال، در شکل (۱-۳) آخرین خط مبنا، روی شاخه‌ی اصلی شماره‌ی ۱۳ است و خط مبنای دهانه‌ی اولین انشعابات، با شماره‌ی ۲۰ مشخص شده است. هر خط مبنا به وسیله‌ی حرف R در انتها برای سمت راست و حرف L در انتها برای سمت چپ مخزن علامت‌گذاری می‌شود و جهت‌های راست و چپ با توجه به جهت جریان مشخص می‌گردد. اگر در نقشه‌برداری‌های آینده نیاز به اضافه کردن خطوط مبنا باشد، این خط مبنا به وسیله‌ی یک شماره و یک حرف مشخص می‌شود. مثلاً در شکل (۱-۳) خط مبنا 8A می‌تواند بین خطوط مبنای ۸ و ۹ قرار گیرد. از سیستم شماره‌گذاری‌های دیگر نیز می‌توان استفاده کرد. به عنوان مثال، شماره‌ی خطوط مبنا می‌تواند بیانگر رودخانه یا دره‌ی مخزن باشد. این روش وقتی سودمند است که فاصله‌ی میان خطوط مبنا تعیین می‌شود و یا یک خط مبنای جدید میان خطوط مبنایی که از قبل موجود است، ایجاد می‌گردد.

در انتهای هر خط مبنا باید یک علامت ثابت توسط سازه‌ی بتنی (رپر) که روی آن ارتفاع و شماره‌ی خط مبنا مشخص شده است، ایجاد گردد. این علامت‌ها باید در بالای حداکثر تراز آب مخزن و دور از خط ساحلی مخزن قرار گیرد و باید به‌طور دقیق از یک نقطه‌ی ثابت و یا یک گوشه‌ی مشخص و یا یک مبنای ارتفاعی موجود تعیین محل گردد و ارتفاع آنها نیز ثبت گردد.



شکل ۳-۱- نمایش خطوط مبنا در مخازن بزرگ [۱۴۶]

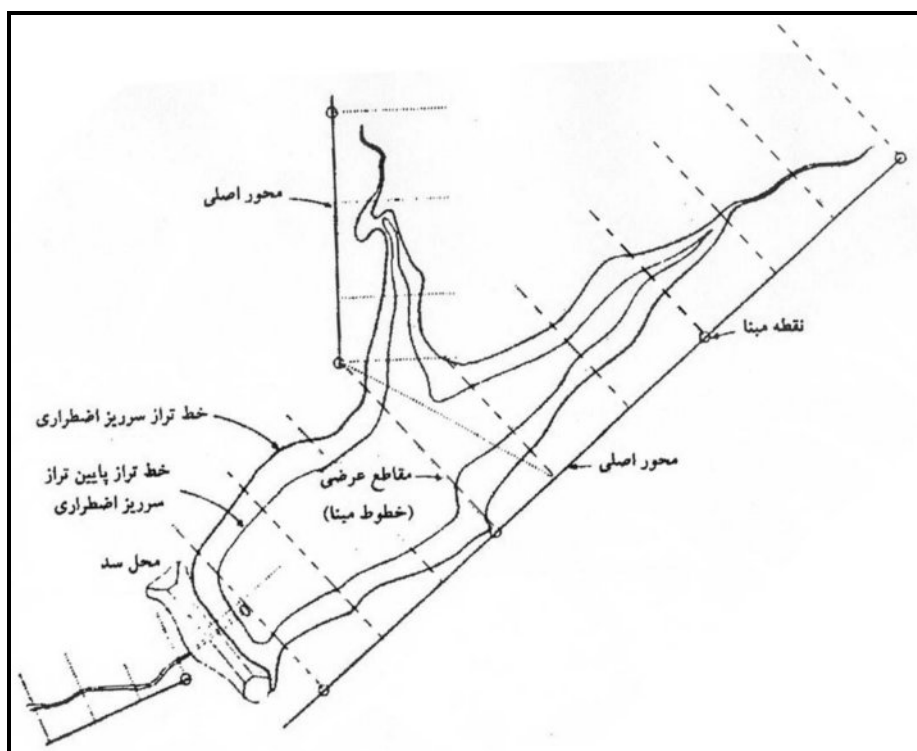
این مبنای ارتفاعی در صورت امکان بهتر است با یک سیستم مختصات موجود مرتبط گردد. این عمل موجب خواهد شد تعیین محل نقاط مبنا در نقشه‌برداری‌های بعدی آسان شود و نیز این امکان را فراهم می‌آورد که اگر به طور تصادفی تخریب شده باشند، بتوان مجدداً آنها را مستقر نمود. معمولاً یک حصار فلزی در مجاورت این علامت‌ها نصب می‌شود. مقطع‌برداری اولیه‌ی خطوط مبنای مخزن می‌تواند در محل به وسیله‌ی برداشت ارتفاع خطوط مبنا انجام گیرد. توصیه شده است برای مخازن بزرگ و کم‌عمق، نیم‌رخ عرضی مخزن توسط ایجاد امواج رادیویی برداشت شود. در مخازن کوچک از سیستم خطوط مبنایی که به عنوان نمونه در شکل (۳-۲) نشان داده شده است می‌توان استفاده کرد. این روش، ترکیبی از خطوط تراز و سیستم خطوط مبنا است و شامل نقشه‌برداری از خط تراز سرریز اضطراری و نیز یک خط تراز پایین‌تر از آن و همچنین خطوط مبنا در محل‌های حساس است. توصیه می‌شود خط تراز پایین‌تر، در رقوم حدود یک سوم کل ارتفاع سد و زیر رقوم سرریز اضطراری انتخاب گردد. در این روش محورهای

اصلی در امتداد مخزن انتخاب و سپس خطوط مبنا عمود بر این محورها رسم و با یک عدد و یک حرف مشخص می‌گردد. محل تقاطع محور اصلی با خطوط مبنا رپرگذاری می‌شود تا مقطع برداری مجدد از خطوط مبنا در آینده آسان باشد.

۳-۲-۲- روش خطوط تراز

روش خطوط تراز بر مبنای اطلاعات کامل توپوگرافی استوار می‌باشد. این روش دقیق‌ترین روشی است که با آن می‌توان حجم مخزن و در نتیجه اطلاعات کاملی از رسوبات نهشته شده مخزن را به دست آورد. امروزه تهیه‌ی خطوط تراز مخازن با روش‌های نوین نقشه‌برداری زمینی و عکس‌برداری هوایی با سرعت چند روز انجام می‌گیرد، در نقشه‌های توپوگرافی مخزن، خطوط تراز با فواصل یکسان رسم می‌شوند. برای رسم خطوط تراز بالای سطح آب از نقشه‌برداری هوایی می‌توان استفاده کرد. بدین ترتیب که، در هر رقمی که سطح آب قرار دارد، می‌توان عکس‌های هوایی برداشت نمود. توصیه می‌شود سطح آب مخزن به پایین‌ترین سطح رسانده و سپس برداشت عکس‌های هوایی شروع شود. در این صورت، یک نقشه‌ی معتبر که سطح مخزن را پوشش می‌دهد، به دست خواهد آمد. البته برای تهیه‌ی نقشه‌های توپوگرافی بیرون سطح آب معمولاً از تراز یاب و یا عکس‌های هوایی استفاده می‌شود. نقشه‌برداری هیدروگرافی یا تهیه‌ی نقشه‌های توپوگرافی در زیر سطح آب و یا رسم خطوط تراز زیر سطح آب از روش‌های فتوگرامتری به کمک امواج رادیویی استفاده می‌شود که در ادامه فصل به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

استفاده از روش خطوط تراز برای مواقعی که حجم انباشت رسوب زیاد و به صورت نامنظم ترسیب شده باشد، مناسب‌تر است. البته این روش به زمان زیادی نیاز دارد و هزینه‌های اجرایی آن زیاد است. برای کاهش هزینه می‌توان آن را با روش خطوط مبنا ترکیب کرد، بدین ترتیب که در مکان‌های مهم مثل دریاچه‌ی اصلی مخزن از روش خطوط تراز استفاده کرد و در سایر بخش‌ها از روش خطوط مبنا. روش خطوط تراز هنوز هم از روش‌های پرهزینه است هر چند که با پیشرفت وسایل و ابزار الکترونیکی و کامپیوتری امروزه سرعت برداشت زیاد شده است ولی چون روش خطوط تراز نیاز به جمع‌آوری داده‌های گسترده‌ای دارد زمان بیش‌تری برای جمع‌آوری داده‌ها نیاز است. البته محاسبه حجم رسوب و حجم مخزن با استفاده از روش خطوط تراز بسیار دقیق‌تر از روش خطوط مبنا می‌باشد.



شکل ۳-۲- نمایش خطوط مبنا در مخازن کوچک

در روش خطوط تراز با انجام نقشه‌برداری هیدروگرافی مختصات X ، Y و Z هر نقطه با استفاده یکی از سیستم‌های مختصات نظیر UTM تعیین می‌گردد برای دقت بیش‌تر تمام خطوط تراز واقع در زیر سطح آب و خطوط تراز بالای سطح آب باید برداشت گردند.

تهیه نقشه مناسب توپوگرافی با روش عکس‌برداری هوایی و زمانی که تراز سطح آب در پایین‌ترین رقوم قرار داد، امکان‌پذیر است. ولی از آن‌جا که چنین شرایطی بندرت اتفاق می‌افتد از این روش برای تهیه خطوط تراز از ترکیب روش فتوگرامتری و هیدروگرافی استفاده می‌شود. البته برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها، بهتر است که داده‌های فتوگرامتری (داده‌های هوایی) زمانی که مخزن نسبتاً خالی است برداشت گردد و داده‌های آبنگاری نیز در شرایطی که سطح آب در بالاترین تراز قرار دارد، برداشت شود. در این صورت داده‌ها همپوشانی زیادی دارند که از آنها برای صحت‌سنجی استفاده خواهد شد. مناطق بالای سطح تراز آب را نیز می‌توان با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی که اخیراً تهیه شده‌اند مشخص کرد.

۳-۲-۲-۱- نقشه‌برداری آبنگاری^۱

به عملیاتی که در آن عمق آب اندازه‌گیری شود آبنگاری گویند. این علم پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته است. شاید اولین و قدیمی‌ترین روش استفاده از سنگ و طناب بوده است ولی امروزه برای انجام نقشه‌برداری خطوط تراز از ابزار اتوماتیک آبنگاری استفاده می‌شود. استفاده از این وسایل ضمن افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، سرعت عمل انجام کار را نیز بالا برده است. این وسایل توسط شرکت‌های سازنده‌ی متعددی ساخته و در بازار موجود هستند که به‌عنوان نمونه شکل (۳-۳) یکی از این ابزار قابل حمل و سبک را نشان می‌دهد. این دستگاه متشکل از دستگاه GPS، وسیله‌ی ریزموج^۲ (خط مینا - خطوط مینا یا خط مینا-آزموت) و میله‌ی عمق‌سنج صوتی^۳ که می‌تواند تا ۲۰۰ کیلوهرتز امواج صوتی ایجاد کند، است. مبدل‌های^۴ عمق‌سنج‌های صوتی قابلیت انتخاب بسامدهای^۵ زیادی را دارند و بنابراین با توجه به نیاز مطالعه باید انتخاب شوند. به‌طور کلی مبدل‌های با قابلیت تولید امواج با بسامدهای ۱۰۰ کیلوهرتز و بیش‌تر قادر هستند تا شرایط پستی و بلندی بستر را دقیق‌تر و با جزئیات بیش‌تری برداشت کنند. البته از معایب این مبدل‌ها این است که در محل‌هایی که پوشیده از پوشش گیاهی و یا تجمع مواد غلیظ (گل‌آلود) باشد، ممکن است موقعیت بستر را اشتباه محاسبه کند.

با این وسایل می‌توان مختصات X ، Y و Z هر نقطه‌ای را که قایق در آن قرار دارد، مشخص کرد. دقت در اندازه‌گیری عمق حدود ده سانتی‌متر است و درخصوص فاصله‌ها هم ممکن است از حدود چند سانتی‌متر تا چند متر باشد. میزان خطا بستگی به ابزار و سیستم ماهواره‌ای دارد که از آن استفاده می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده توسط این وسایل از طریق واقع‌نگار^۶ به رایانه منتقل و توسط نرم‌افزارهای خاصی تبدیل به مقاطع عرضی یا خطوط تراز رقوم می‌شود. در تهیه‌ی نقشه‌های خطوط تراز، موقعیت نقاطی که برداشت می‌شوند، باید بیش‌تر به هم نزدیک باشند. یا به عبارتی تراکم نقاط برداشت شده باید نسبت به روش معمولی خطوط مینا

1- Hydrographic

2- Microwave

3- Fathometer

4- Transducer

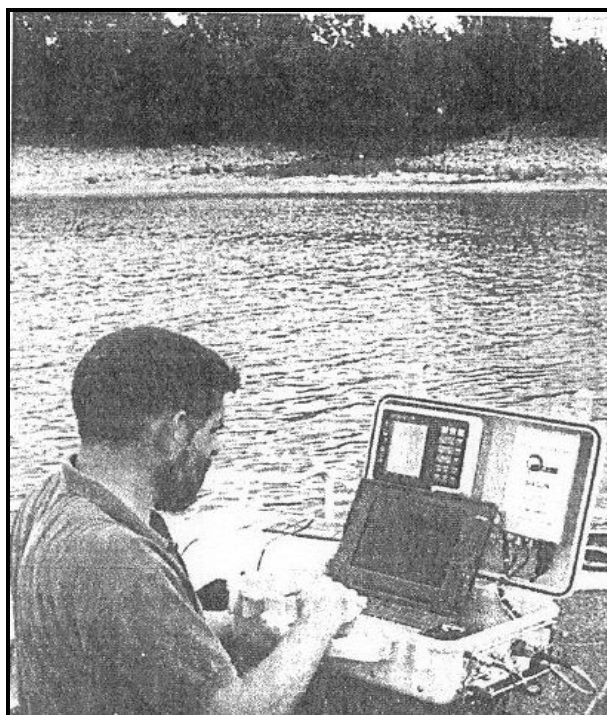
5- Frequencies

6- Data logger

بیش‌تر باشد، به‌طوری که هر چه نقاط برداشت شده به هم نزدیک‌تر باشند، درون‌یابی بین نقاط برای تعیین خطوط تراز با دقت بهتری انجام خواهد گرفت.

نقشه‌برداری‌های خودکار^۱ مزایای بسیاری دارند که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- برداشت داده‌های زیاد در کوتاه‌ترین زمان
 - از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند.
 - این روش بر مبنای مختصات نقاط، استوار است و وابسته به پرگذاری موقعیت خطوط مبنا نیست.
 - ردیابی خطوط مبنا در نقشه‌برداری‌های بعدی به صورت خودکار انجام می‌شود و در نتیجه شناسایی این خطوط با دقت بسیار بالایی صورت می‌گیرد.
 - تمام داده‌های برداشت شده بلافاصله به فایل‌های رایانه‌ای منتقل می‌شوند که به آسانی می‌توانند تبدیل به نقشه‌های رقومی شوند. در این صورت با استفاده از نرم‌افزارهای موجود حجم مخزن به سادگی و با دقت قابل محاسبه خواهد بود.
 - با قراردادن نقشه‌های حاصل از آبنگاری‌هایی که در زمان‌های مختلف برداشت شده‌اند، به راحتی می‌توان مقدار رسوب‌گذاری یا فرسایش را در طول مخزن مشخص نمود.
- برای تهیه‌ی خطوط تراز بالای سطح آب از روش‌های نقشه‌برداری زمینی نظیر استفاده از تراز یاب و غیره یا از روش‌های نقشه‌برداری هوایی^۲ می‌توان استفاده کرد. بخاطر این که این روش‌ها در مقایسه با روش‌های خودکار آبنگاری پرهزینه‌تر و زمان‌برتر هستند، بهتر است عملیات آبنگاری در زمانی انجام شود که سطح آب مخزن بالا است.



شکل ۳-۳- ابزار نقشه‌برداری اتوماتیک [۱۰۳]

1- Automatic

2- Photogrammetry

۳-۲-۲-۲- روش انجام عملیات آبنگاری

در این مرحله تمام نقاط واقع در خطوط طراحی شده با استفاده از وسایل مربوط مانند عمق‌یاب الکترونیکی که در یک قایق تعبیه شده است، عمق‌یابی می‌گردد. برداشت عمق با حرکت از یک طرف دریاچه به طرف دیگر و در امتداد خطوط صورت می‌گیرد. اطلاعات مربوط به عمق در روش‌های قبلی به صورت منحنی ذخیره می‌گردد اما در روش مدرن اطلاعات عمق در رایانه قابل حمل و قابل اتصال به عمق‌سنج صوتی^۱ ذخیره می‌گردد.

در انجام عملیات عمق‌یابی در مناطق بسیار کم عمق مخزن با توجه به بروز احتمال خطر برای شناور و مبدل می‌توان به جای استفاده از دستگاه‌های عمق‌یاب الکترونیکی از اشل‌های مدرج و یا طناب و وزنه استفاده کرد. در این صورت سطح آب بر روی اشل و یا طناب وزنه دقیقاً مشخص شده و موقعیت آن با استفاده از وسایل مناسب برداشت و ثبت می‌گردد.

هم‌چنین اندازه‌گیری تغییرات قائم سطح آب به منظور اعمال تصحیحات بر روی عمق‌های اندازه‌گیری شده برای انتقال آنها به سطح مبنای عمق جهت تعیین پستی و بلندی بستر و اندازه‌گیری حجم مخزن ضروری است. برای افزایش دقت در محاسبه عمق‌ها در انتقال آنها به سطح مبنای موردنظر بهتر است که فاصله زمانی ما بین دو قرائت متوالی تراز سطح آب بر روی اشل کوچک باشد. با توجه به این که هدف از انجام عملیات عمق‌سنجی در مخازن سدها تعیین پستی و بلندی بستر سد و در نهایت محاسبه حجم و سطح مخزن می‌باشد می‌توان هر سطحی را به عنوان سطح مبنا اختیار کرد اما بهتر است یک سطح مبنای ملی به عنوان مثال سطح متوسط دریا^۲ را به عنوان سطح مبنای عمق‌سنجی انتخاب نمود. البته همان‌طور که در قبل ذکر شد باید توجه داشت که تغییرات احتمالی تراز سطح آب در زمان انجام عملیات عمق‌سنجی جهت ارجاع عمق‌های اندازه‌گیری شده به سطح مبنای موردنظر باید مشاهده و ثبت گردند.

اکثر دستگاه‌های عمق‌سنج آبنگاری قابلیت دریافت آب‌خور (فاصله عمودی سطح آب تا زیر دستگاه مبدل) را دارند. در هنگام انجام عملیات عمق‌یابی باید آب‌خور مبدل به دقت اندازه‌گیری شده و به دستگاه معرفی و اعمال شود. در این صورت عمق‌سنج به طور خودکار اندازه آب‌خور را به عمق‌های اندازه‌گیری شده اضافه می‌نماید. در صورتی که دستگاه قابلیت دریافت آب‌خور را نداشته باشد باید اندازه آن در هنگام پردازش به عمق‌ها اضافه گردد. قابل ذکر است هنگام اندازه‌گیری آب‌خور باید شناور کاملاً در حال سکون و افقی بوده و سطح آب آرام باشد.

همزمان با تعیین عمق باید عملیات تعیین موقعیت مسطحاتی نیز انجام گردد. دقت موقعیت مسطحاتی بستگی به مقیاس عملیات دارد. هر چه مقیاس عملیات بزرگ‌تر باشد نیاز به دقت بیش‌تر و لزوماً دستگاه‌های تعیین موقعیت دقیق‌تر می‌باشد. در انجام عملیات عمق‌یابی به روش کلاسیک یا غیر خودکار برای تعیین موقعیت از فاصله‌یاب‌های الکترونیکی به صورت فاصله - فاصله استفاده می‌گردد. این دستگاه مرکب از چند واحد فرستنده گیرنده و واحد کنترل و نمایش فواصل می‌باشد. حداقل دو دستگاه فرستنده گیرنده در نقاطی با مختصات معلوم مستقر شده و ضمن برقراری ارتباط رادیویی با فرستنده - گیرنده داخلی شناور، فواصل شناور از آنها توسط واحد کنترل به نمایش در می‌آید. بدین منظور هم‌چنین از دستگاه‌های تئودولیت یا زاویه سنج با دقت حداقل یک دقیقه ۳۶۰ قسمتی جهت استفاده در برداشت عوارض و تعیین موقعیت می‌توان استفاده نمود. البته جهت ایجاد نقاط کنترل افقی با استفاده از زوایای اندازه‌گیری شده توسط تئودولیت‌ها، بهتر است از زاویه‌یاب‌های با دقت یک ثانیه استفاده گردد. در انجام عملیات عمق‌سنجی به روش مدرن یا خودکار برای تعیین موقعیت، روش متداول اندازه‌گیری با گیرنده‌های ماهواره‌ای می‌باشد. گیرنده‌های مختلفی با

1- Ecosounder

2- Mean sea level(MSL)

دقت‌های متفاوتی در بازار در دسترس کاربران می‌باشد. گیرنده‌های مورد استفاده در نقشه‌برداری و آبنگاری از دقت‌های بالاتری نسبت به دیگر گیرنده‌های ماهواره‌ای برخوردارند. در انجام عملیات با مقیاس بزرگ حتما باید از روش‌های تفاضلی استفاده نمود. در روش تفاضلی تصحیحات موقعیت به دو صورت پردازش بعدی و آنی به اندازه‌گیری‌های موقعیتی اعمال می‌شوند.

در روش خودکار از دو دستگاه GPS به صورت DGPS استفاده می‌گردد، به طوریکه یک دستگاه در محلی با مختصات معین و ثابت نصب می‌گردد. این دستگاه مبنا یا معرف نامیده می‌شود و دستگاه دیگر در قایق قرار می‌گیرد. این دستگاه رور^۱ نامیده می‌شود. این دو دستگاه GPS با استفاده از سیستم رادیویی با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، به طوری که سیستم برداشت مختصات به صورت RTK عمل نموده و تصحیحات لازم روی مختصات برداشت شده انجام می‌گردد.

در این روش دستگاه GPS Rover با استفاده از اتصال USB به رایانه قابل حمل که عمق‌سنج نیز به آن متصل شده است وصل می‌گردد. از موارد قابل توجه این است که آنتن GPS باید کاملاً قائم و طی عملیات نزدیک مبدل باشد و تلاش گردد کاملاً منطبق بر آن نصب گردد. در غیر این صورت تصحیح مربوط به فاصله ما بین این دو به موقعیت عمق‌های اندازه‌گیری شده اعمال گردد.

استفاده از دستگاه‌های GPS بعثت مشکلات مربوط به برقراری دید مستقیم آنتن به ماهواره جهت دریافت علایم ماهواره در نواحی کوهستانی و سدها باید بسیار با احتیاط صورت گیرد. تعداد ماهواره‌ها در افق دید در هنگام انجام عملیات نباید کمتر از ۴ بوده و شرایط هندسی ماهواره‌ها موسوم به Dop^2 نباید از ۴ تجاوز کند. بدین منظور در ساعاتی باید عملیات انجام شود که Dop لازم تامین گردد، در غیر این صورت در ادامه عملیات از روش غیر خودکار باید استفاده گردد.



شکل ۳-۴- عمق‌سنج مدل NAVISOUND210



شکل ۳-۵- آنتن GPS معرف نصب شده بر روی نقطه با مختصات معین

1- Rover

2- Dilution of precision



شکل ۳-۶- GPS تک فرکانسه MAGELLAN با دقت

قابل قبول برای عملیات آبنگاری

۳-۲-۲- خطاهای نقشه‌برداری

همان‌طور که قبلاً هم ارایه شد، نقشه‌برداری‌های مخزن و محاسبه‌ی نسبتاً دقیق اختلاف بین نقشه‌برداری‌های متوالی به منظور محاسبه‌ی نرخ رسوب‌گذاری در مخزن می‌باشد. از این رو، محاسبه‌ی نرخ رسوب‌گذاری به کوچک‌ترین خطاهایی که در محاسبه‌ی حجم مخزن ممکن است اتفاق افتد، بسیار حساس است. به‌خصوص اگر میزان نرخ رسوب‌گذاری کم باشد، میزان خطا حتی در حد چند صدم در برآورد حجم می‌تواند خطاهای ده‌ها درصدی را در محاسبه‌ی نرخ رسوب‌گذاری به همراه داشته باشد. در صورت استفاده از روش خطوط مبنا، مخازن کوچک نزدیک به ده درصد خطا خواهد داشت که البته این میزان خطا بستگی به روش محاسبه، تعداد خطوط مبنا و وضعیت قرارگیری خطوط مبنا دارد. حتی اختلاف حجم محاسبه شده تا سی درصد هم گزارش شده است. چنان‌چه از روش خطوط مبنا استفاده شود، ضروری است که خطوط مبنا به‌طور مرتب و دقیق نقشه‌برداری شوند تا تغییرات نیم رخ برداشت شده نشان‌دهنده‌ی رسوب‌گذاری انجام شده در حد فاصل زمانی بین دو نقشه‌برداری باشد. بدیهی است در صورتی که نقشه‌برداری‌های بعدی با دقت انجام نشوند، به‌طورمثال، در یک ایستگاه عرض بالای خطوط مبنا با عرض خطوط مبنای قبلی بسیار متفاوت باشند، در آن صورت، نمی‌توان موقعیت خطوط مبنای جدید را به‌طور دقیق مشخص و در نتیجه نمی‌توان خطوط اصلی نقشه‌برداری اولیه را ایجاد نمود.

در صورتی که قرار باشد روش نقشه‌برداری مخزن تغییر کند، مثلاً از روش خطوط مبنا به روش خطوط تراز تغییر یابد، در آن صورت حجم مخزن باید هم با داده‌های حاصل از روش جدید و هم با داده‌های به‌دست آمده از روش قبلی محاسبه شود تا اختلاف مشخص گردد. این درصد اختلاف بعدها می‌تواند برای تخمین حجم استفاده شود.

در صورت تغییر در تراز کف مخزن به دلیل اصلاحاتی که ممکن است در دریاچه‌ی تحتانی صورت گیرد، کل داده‌های مورد استفاده در محاسبه‌ی حجم مجدداً باید براساس تراز کف جدید اصلاح شوند.

خطاهای دیگری که ممکن است به‌وجود آید، عدم تشخیص دقیق موقعیت بستر می‌باشد. به‌خصوص اگر بر روی بستر رسوبات بسیار شل که هنوز تحکیم نیافته‌اند قرار داشته باشند، یا این که بستر پوشیده از جنگل‌ها و پوشش گیاهی مستغرق باشد. هم‌چنین ممکن است به دلیل لایه‌بندی حرارتی مخزن، خطاهای ناشی از دستگاه امواج صوتی برای تعیین دقیق موقعیت بستر به‌وجود آید که بهتر است برای جلوگیری از این خطاها، دستگاه قبلاً واسنجی شده باشد.

طی عملیات هیدروگرافی پدیده‌های مختلفی نیز ممکن است خطای عملیات را افزایش دهد و باید با بررسی‌های لازم عملیات زمانی انجام گردد تا این‌که خطای ناشی از موارد فوق به حداقل برسد. مثلاً در هنگام سیلابی شدن، یا شکل گرفتن جریان غلیظ که با خطای غیرمجاز در طول مخزن همراه خواهد بود و نباید عملیات ادامه پیدا کند. همچنین انجام عملیات هیدروگرافی در شرایط وزش باد شدید و ایجاد امواج که موجب بروز خطاهای خیزش یعنی پرتاب شدن شناور هنگام موج به سمت بالامی گردد برخورد امواج از دو سو به شناور باعث خطای غلطش و یا خطای پیتچ^۱ می‌گردد. این خطا در اثر نوسان شناور حول محور عرضی در نتیجه برخورد امواج به سینه یا پاشنه شناور به وجود می‌آید. در چنین شرایطی عملیات باید سریعاً متوقف گردیده و ادامه عملیات به زمان مناسب دیگری موکول گردد. ابعاد شناور مورد استفاده باید طوری باشد که وضعیت متعادلی را در حرکت داشته باشد و قبل از انجام عملیات مبدل در محل مناسب و عمود بر سطح آب مخزن در کنار قایق قرار گیرد و در طول عملیات از وضعیت خود جابجا نشود تا خطای مایل شدن آن نیز رخ ندهد.

همچنین همان‌طوری که در قسمت قبل توضیح داده شد در صورتی که از روش خودکار یا مدرن استفاده می‌گردد، زمانیکه خطای Dop^۲ (این خطا ناشی از آرایش نامناسب و تعداد کم ماهواره‌ها حاصل می‌گردد) به وجود می‌آید باید ادامه عملیات برداشت متوقف گردد.

۳-۲-۴- واسنجی ابزار نقشه‌برداری

برای اطمینان از اینکه اطلاعات با کیفیت بالا برداشت می‌شوند، واسنجی دستگاه عمق‌سنج صوتی ضروری است. از آن‌جا که تمام دستگاه‌های عمق‌سنج صوتی از سرعت صوت در آب بهره می‌گیرند، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین تصحیح مربوط به سرعت صوت در آب بخاطر تغییرات درجه حرارت، جرم مخصوص آب، شوری و غلظت رسوب نسبت به عمق می‌باشد، زیرا در بیش‌تر مخازن عمیق، تغییرات درجه حرارت آب بسیار زیاد است که در این صورت سرعت صوت از محل تولید تا بستر و برگشت آن به دستگاه ثابت نخواهد بود. مقدار تغییرات قابل ملاحظه است به‌طور مثال در صورت اختلاف ۵/۵ درجه سانتیگراد در درجه حرارت مایع، سرعت صوت ۲۱ متر در ثانیه تغییر می‌کند که باعث تغییر در عمق اندازه‌گیری به اندازه ۰/۲۵ متر در هر ۱۵ متر عمق آب خواهد شد.

برای واسنجی ابتدا لازم است که عمق واقعی در عمیق‌ترین نقطه اندازه‌گیری شود و عمق‌سنج با این عمق تنظیم گردد. البته چنان‌چه احتمال تغییرات سرعت صوت در موقعیت‌های مختلف نیز باشد، بهتر است که در چندین موقعیت واسنجی شود.

روش دیگر هم تعیین سرعت صوت با حس‌گر سرعت می‌باشد. این حس‌گر قادر است تا سرعت صوت را در هر فوت عمق اندازه‌گیری و سپس سرعت متوسط را در طول عمق محاسبه کند. دستگاه عمق‌سنج صوتی باید با روش بار چک^۳ یا دستگاه تعیین سرعت صوت به صورت اندازه‌گیری مستقیم یا اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکی آب واسنجی گردد. در صورتی که عمق آب کم‌تر از ۲۰ متر باشد، مرسوم‌ترین روش جهت واسنجی دستگاه عمق‌یاب برای سرعت صوت استفاده از روشی موسوم به بار چک می‌باشد. در این روش یک صفحه فلزی با ابعاد مشخص به طوری به کمک طناب در داخل آب در عمق مورد نظر دقیقاً زیر مبدل قرار می‌گیرد. در زمان انجام این کار دستگاه عمق‌سنج صوتی باید روشن باشد و به طور همزمان عمق غیرواقعی را اندازه‌گیری و اعلام نماید.

1- Pitch

2- Dilution of precision

3- Barcheck

از دیگر مواردی که ممکن است خطاهایی در اندازه‌گیری‌ها ایجاد شود خطاهای مربوط به نحوه قرارگیری میله حس‌گر^۱ دستگاه می‌باشد چرا که عمود بر سطح آب نگاه داشتن طناب‌ها و قرار دادن صفحه در زیر مبذل در هنگام وزش بادهای شدید و وجود جریان‌های آبی بسیار مشکل می‌باشد. در چنین مواقعی تجربه و مهارت سکان‌دار شناور در انجام مانور در اطراف طناب مدرج حائز اهمیت است. در زمان پایین بردن صفحه فلزی بهتر است مقدار افزایش طول طناب مدرج، عددی صحیح از واحد طول باشد. طی عملیات عمق‌یابی سدها باید در دو نوبت ابتدا و انتهای عملیات روزانه مبادرت به انجام بار چک نمود. همچنین به علت وجود اختلاف در پارامترهای فیزیکی آب در مناطق مختلف، بار چک باید در هنگام انجام عملیات هر روزه صورت گیرد.

روش دیگر واسنجی دستگاه عمق‌سنج صوتی به شرح ذیل است. با توجه به این که محاسبه عمق آب توسط دستگاه‌های صوتی الکترونیکی، عمق‌سنجی از طریق ارسال امواج صوتی در آب و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج می‌باشد باید توجه داشت که سرعت صوت در آب تابعی از درجه حرارت، فشار و شوری است و مقدار آن به علت تغییر عوامل فیزیکی ذکر شده در لایه‌های مختلف آب تغییر می‌کند لذا توصیه می‌شود، سرعت صوت در لایه‌های مختلف آب منطقه عملیات در هر روز کاری به وسیله دستگاه‌های سرعت سنج صوت اندازه‌گیری گردد (دستگاه CTD).

قابل ذکر است از روش بار چک برای اعماق کم‌تر از ۲۰ متر استفاده می‌گردد و در صورتی که عمق آب بیش از ۲۰ متر باشد با ترسیم نمودار تغییرات سرعت به تغییر عمق ناشی از انجام روش بار چک و ادامه آن برای عمق‌های بیش از ۲۰ متر (حداکثر تا ۵۰ متر) نسبت به تصحیح عمق‌ها به دلیل خطای سرعت صوت اقدام کرد و در اعماق بیش‌تر استفاده از این روش اصلاً توصیه نمی‌شود و حتماً باید از دستگاه CTD و با روش دوم که شرح داده شد استفاده گردد.



شکل ۳-۷- قسمت‌های مختلف دستگاه سرعت سنج صوتی (CTD)

واسنجی ابزار نقشه‌برداری یا توتال استیشن‌ها^۲ و فاصله‌یاب‌ها باید به صورت آزمایشگاهی و میدانی روی فواصل معلوم کنترل گردد و نهایتاً در دستگاه‌های GPS علاوه بر کنترل‌های آزمایشگاهی باید هنگام استفاده میدانی به تعداد ماهواره‌ها در افق دید کاملاً توجه گردد به طوریکه Dop مربوط، هیچ زمانی از چهار تجاوز ننماید.

1- probe

2- Total Station

جدول ۳-۱- مقادیر استاندارد دقت در آبنگاری مخازن

سیستم	عمق	دقت عمق
مکانیکی	$d < 5 \text{ m}$	5 cm
صوتی	$d < 5 \text{ m}$	5 cm
صوتی	$d < 15 \text{ m}$	15 cm
صوتی	$d < 30 \text{ m}$	30 cm
صوتی	$d < 30 \text{ m}$	۱٪ عمق

۳-۳- محاسبه حجم رسوبات نهشته شده

یکی از روش‌های معمول برآورد حجم رسوب نهشته شده در مخزن کسر کردن حجم جدید اندازه‌گیری شده مخزن از حجم اولیه مخزن می‌باشد. از این رو لازم است تا به طور دوره‌ای مخزن نقشه‌برداری و حجم آن محاسبه گردد. روش‌های محاسبه حجم مخزن با استفاده از نتایج نقشه‌برداری مخزن در این قسمت ارائه می‌شوند.

۳-۳-۱- روش‌های مبتنی بر محاسبه سطح محصور بین خطوط تراز^۱

این روش‌ها بر این فرض استوار هستند که سطح اشغال شده بین دو خط تراز پارامتر بهتری برای محاسبه حجم بین دو خط تراز می‌باشد. هر چه فاصله بین خطوط تراز کوچک‌تر باشد، حجم محاسبه شده از دقت بیش‌تری برخوردار است. تجربیات نشان می‌دهد که خطوط تراز با فاصله ۶۰ سانتی‌متر کافی است. روش‌هایی که بر اساس محاسبه سطح بین خطوط تراز استوار هستند عبارتند از: روش ارتفاع - سطح، روش اصلاح شده شبه منشوری، روش متوسط سطح خط تراز و روش سیمپسون.

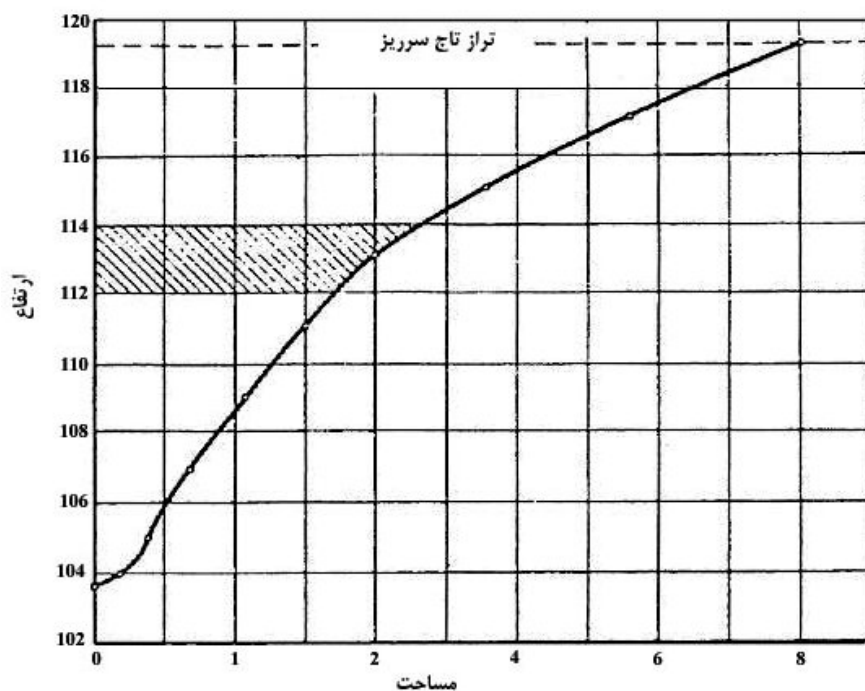
۳-۳-۱-۱- روش ارتفاع - مساحت^۲

دقت این روش بستگی به دقت منحنی ارتفاع - سطح دارد و لازم است تا این منحنی با دقت کافی تهیه شده باشد. این منحنی بدین صورت تهیه می‌شود که ابتدا سطح محصور توسط هر خط تراز بوسیله پلانیمتر اندازه‌گیری و سپس این مقدار در مقابل تراز مربوط رسم می‌شود، همان‌طور که در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.

پس از رسم منحنی می‌توان حجم مخزن را به‌دست آورد. بدین صورت که حجم مخزن برابر است با مساحت سطحی که محصور است بین منحنی و محور y . برای محاسبه آن می‌توان احجام جزئی بین سطوح تراز را با هم جمع کرد. این حجم جزئی نیز برابر است با مساحت بین منحنی و محور y در حد فاصل دو ارتفاع همان‌طور که در شکل (۳-۸) به صورت هاشور زده نشان داده شده است. چنان‌چه فرض شود که فاصله بین خطوط تراز Δy باشد در آن صورت حجم مخزن برابر خواهد بود با:

1- Contour area methods

2- Stage area method



شکل ۳-۸- نمونه‌ای از منحنی ارتفاع - سطح

$$V_R = \left[\frac{A_b + A_s}{2} + \sum_{i=1}^{N-2} A_i \right] \Delta y \quad (3-2)$$

که در آن:

V_R = حجم مخزن

A_b = سطح مربوط به خط تراز بستر

A_s = سطح مربوط به خط تراز سطح آب در تراز بستر

A_i = سطح مربوط به خط تراز i ام

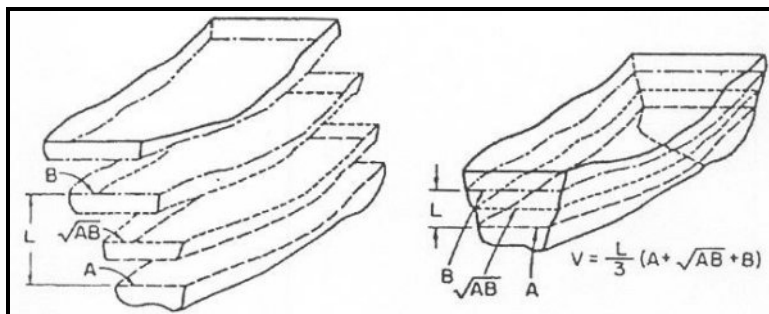
N = تعداد خطوط تراز

در این روش فرض شده است که تغییرات سطوح بین دو ارتفاع، خط تراز، به صورت خطی تغییر می‌کند. روش ارتفاع - سطح روشی مستقیم، ساده و دقیق می‌باشد و از آن‌جا که نقشه‌های خطوط تراز معمولاً در اختیار می‌باشند، این روش کاربرد بیش‌تری دارد.

۳-۳-۱-۲- روش اصلاح شده شبه منشوری^۱

در این روش نظیر روش قبلی، سطح هر تراز توسط پلانیمتر اندازه‌گیری می‌گردد. اگر Δy فاصله بین خطوط تراز باشد در آن صورت حجم مخزن مطابق شکل (۳-۹) برآورد می‌شود. مقدار حجم را می‌توان از رابطه ریاضی زیر محاسبه کرد:

$$V_R = \frac{L}{3} [A + \sqrt{AB} + B] \quad (3-3)$$



شکل ۳-۹- برآورد حجم بین خطوط تراز

که در آن:

A = سطح مربوطه به خط تراز پایینی

B = سطح مربوطه به خط تراز بالایی

L = فاصله بین دو خط تراز

۳-۳-۱- روش متوسط سطح خط تراز^۱

در این روش نیز در ابتدا سطح واقع شده بین هر خط تراز توسط پلانیمتر اندازه‌گیری می‌شود. سپس حجم مخزن با متوسط‌گیری از دو سطح اندازه‌گیری شده بین دو خط متوالی تراز به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_R = L \left(\frac{A+B}{2} \right) \quad (۴-۳)$$

که متغیرها قبلاً تعریف شده‌اند.

۳-۳-۱- روش سیمپسون^۲

در این روش نیز لازم است تا ابتدا سطح بین دو خط تراز توسط پلانیمتر اندازه‌گیری گردد. چنان‌چه فاصله بین خطوط تراز مساوی و برابر Δy باشد و تعداد خطوط تراز نیز زوج باشد در آن صورت می‌توان از این روش استفاده کرد. در روش سیمپسون از بین سه نقطه یک منحنی درجه دو عبور داده می‌شود، از این رو نسبت به سایر روش‌ها که در آنها رابطه بین سطح و خط تراز خطی فرض می‌شود، دقیق‌تر است. رابطه ریاضی این روش به شرح زیر است:

$$V_R = \frac{\Delta y}{3} [A_0 + A_N + 4(A_1 + A_3 + \dots + A_{N-1}) + 2(A_2 + A_4 + \dots + A_{N-2})] \quad (۵-۳)$$

در این رابطه $A_0, A_1, \dots, A_N$ عبارتند از سطح محصور در هر خط تراز و یا مساحت سطح مقطع عرضی، Δy فاصله بین خطوط تراز و یا مقاطع عرضی و N تعداد خطوط تراز و یا مقاطع عرضی است.

1- Average contour area method

2- Simpsons rule

۳-۳-۲- روش‌های مبتنی بر سطح مقاطع عرضی مخزن^۱

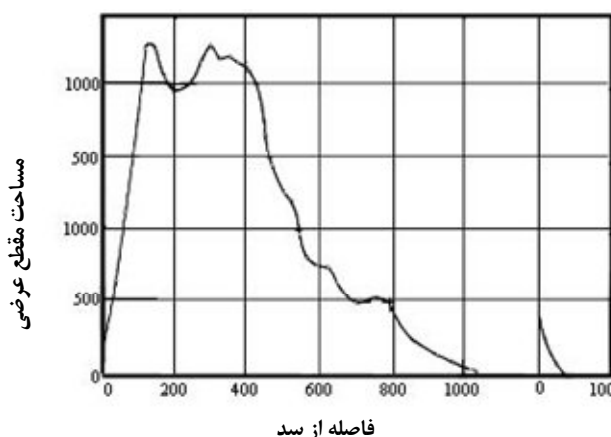
چنانچه مقاطع عرضی مخزن سد در فواصل مناسب در اختیار باشند از این روش‌ها می‌توان برای محاسبه حجم مخزن استفاده کرد. سه روش متفاوت در این رابطه به وجود آمده است که در ادامه ارائه شده است.

۳-۳-۲-۱- روش متوسط سطح^۲

در این روش متوسط سطح دو مقطع عرضی متوالی محاسبه و در فاصله طولی بین دو مقطع ضرب می‌شود تا حجم بین دو مقطع به دست آید. حجم کل مخزن با جمع کردن احجام به دست آمده، محاسبه می‌شود.

۳-۳-۲-۲- روش سطح مقطع عرضی در مقابل فاصله از سد^۳

در این روش ابتدا مساحت هر مقطع عرضی محاسبه و سپس مقادیر آن در مقابل فاصله از محل سد رسم می‌گردد. آنگاه از بین نقاط رسم شده منحنی عبور داده می‌شود همان‌طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. در این صورت مقدار حجم مخزن برابر خواهد شد با مساحت سطح محصور شده بین منحنی و محور X. در این روش فرض شده است که مقاطع عرضی موازی سد هستند. همچنین میزان فاصله از سد نیز بر روی خط عمود بر سد و مقاطع عرضی قرار دارد.



شکل ۳-۱۰- سطح هر مقطع عرضی در مقابل فاصله از محل سد

۳-۳-۲-۳- روش ایکن

معادله اساسی این روش به شرح زیر است:

$$V_c = \frac{A}{3} [(E_1 + E_2) / (W_1 + W_2)] + \frac{A'}{3} [(E_1 + E_2) / (W_1 + W_2)] + (h_3 \times E_3 + h_4 \times E_4) / 3 \quad (3-6)$$

که در آن: V_c = حجم بین مقاطع عرضی، A = مساحت کل خط تراز تاج سد، A' = بخشی از مساحت محصور بین دو مقطع عرضی و در تراز تاج سد [abcd در شکل (۳-۱۱) تراز]، E = مساحت مقطع عرضی زیر تراز تاج، W = عرض مقطع عرضی در تراز تاج سد و h که در شکل (۳-۱۱) ارائه شده است.

1- Cross – sectional area methods

2- Average end area methods

3- Cross-sectional area versus distance from dam

اگر مقاطع عرضی R_1 و R_2 موازی نباشد، لازم است که فواصل L_1 و L_2 تعیین و آنگاه سطح A محاسبه گردد. به‌طوری‌که L_1 : فاصله‌ی عمودی بین نیم رخ عرضی پایین‌دست تا نقطه‌ی ساحلی سمت راست مقطع عرضی بالادست (سمت راست در نگرش به بالادست مشخص می‌شود) و L_2 : فاصله عمودی بین مقاطع عرضی بالادست تا نقطه ساحلی سمت چپ مقاطع عرضی پایین دست.

شکل (۱۲-۳) مربوط به حجم جزیی محصور با سه مقطع عرضی تا هر صفحه‌ی افقی از جمله سطح آزاد آب است (منظور قسمت‌هایی از سه مقطع عرضی یا سه امتداد مقاطع است).

$$\text{حجم جزیی} = (Z_1 + Z_2 + Z_3) S / 3 \quad (۷-۳)$$

متغیرهای به کار رفته در این رابطه در شکل (۱۲-۳) تعریف شده‌اند.

شکل (۱۳-۳) مربوط به حجم جزیی محصور بین صفحه افقی (معمولاً سطح آزاد آب) و قسمت‌هایی از دو صفحه موازی و دو نیم رخ غیرموازی به زاویه‌ی α است. در این حالت:

$$\text{حجم جزیی} = \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{4} \right) (\sin \alpha) (L_1 L_2 + L_2 L_3 + 2 L_1 L_4) \times Z_1 + (L_1 L_2 + 2 L_2 L_3 + L_1 L_4) \times Z_2 + \quad (۸-۳)$$

$$(2 L_1 L_2 + L_2 L_3 + 2 L_1 L_4) \times Z_3 + (2 L_1 L_2 + 2 L_2 L_3 + L_1 L_4) \times Z_4$$

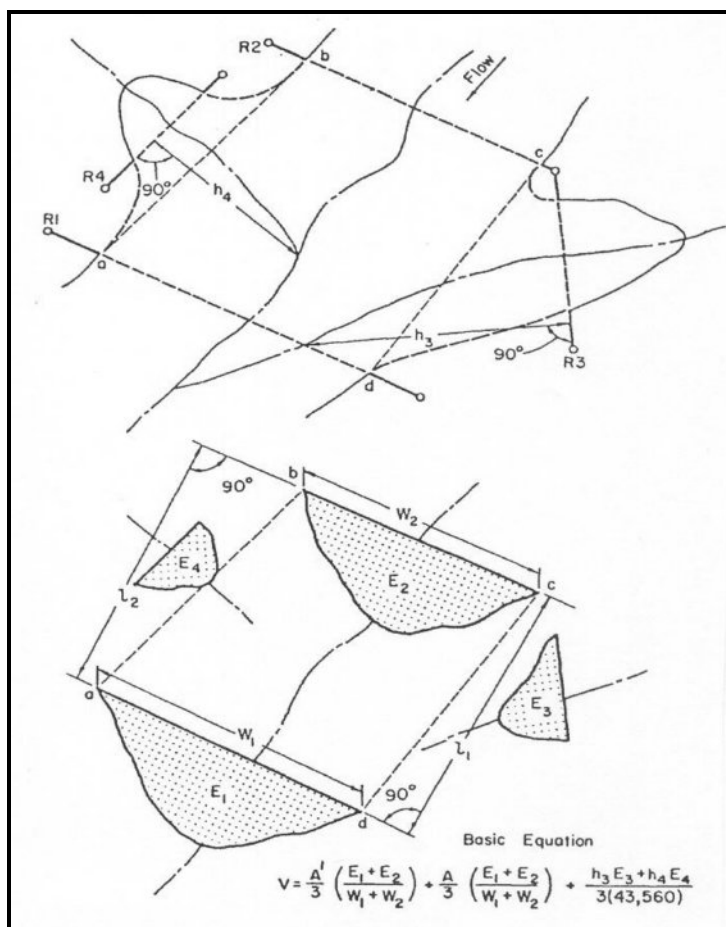
پارامترهای L_1 ، L_2 ، L_3 و L_4 در شکل (۱۳-۳) تعریف شده‌اند. بدیهی است در صورتی که دو نیم رخ با هم موازی باشند نتایج حاصل از این روش مشابه با دومین روش مندرج در این مبحث خواهد بود.

اگر یکی از دو نیم رخ غیر موازی دیواره‌ی سد یا مخزن باشد رابطه‌ی (۸-۳) با توجه به شکل (۱۴-۳) به صورت رابطه (۹-۳) ساده می‌شود:

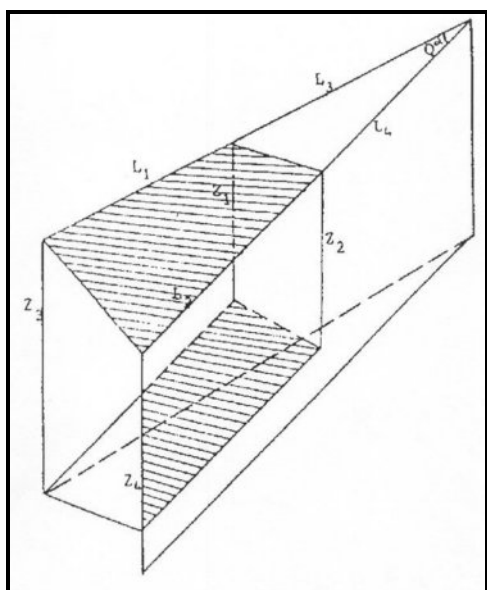
$$\text{حجم جزیی} = \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \right) (\sin \alpha) (L_1 L_2 + L_1 L_4) \times Z_3 + (L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_4) \times Z_1 \quad (۹-۳)$$

اگر نقطه تلاقی دو نیم رخ غیر موازی، خارج از محدوده‌ی مخزن نباشد و این نقطه بر دیواره مخزن یا سد منطبق باشد، در این صورت رابطه‌ی (۸-۳) با توجه به شکل (۱۵-۳) به صورت زیر ارائه می‌گردد:

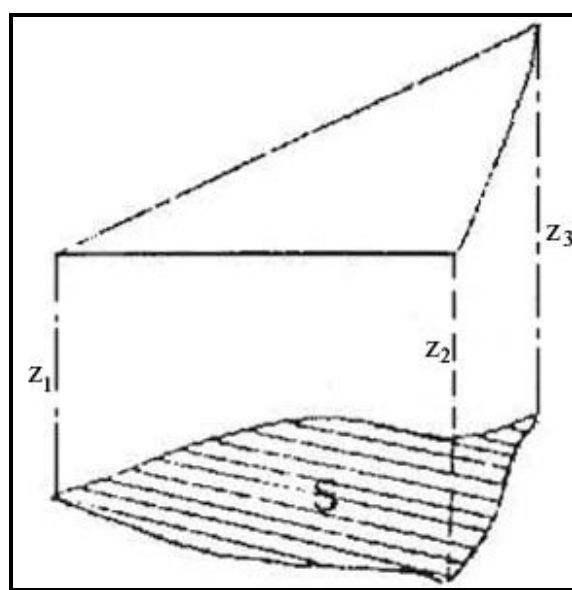
$$\text{حجم جزیی} = \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \right) (\sin \alpha) L_3 L_4 (Z_1 + Z_2) \quad (۱۰-۳)$$



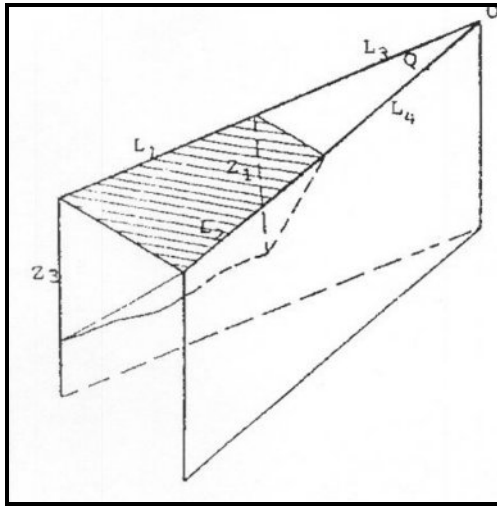
شکل ۳-۱۱- روش ایکن



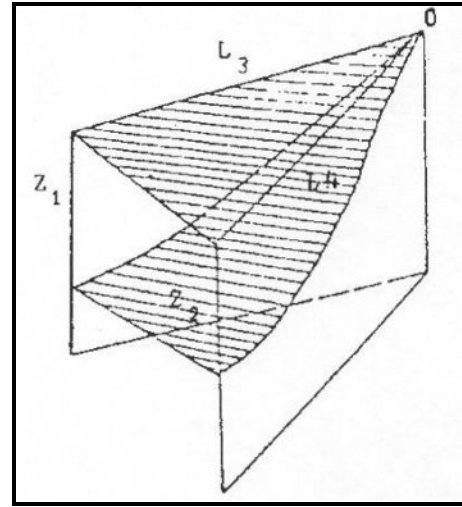
شکل ۳-۱۳- حجم جزئی مربوط به رابطه ۸-۳



شکل ۳-۱۲- حجم جزئی مربوط به رابطه ۷-۳



شکل ۳-۱۵- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۰



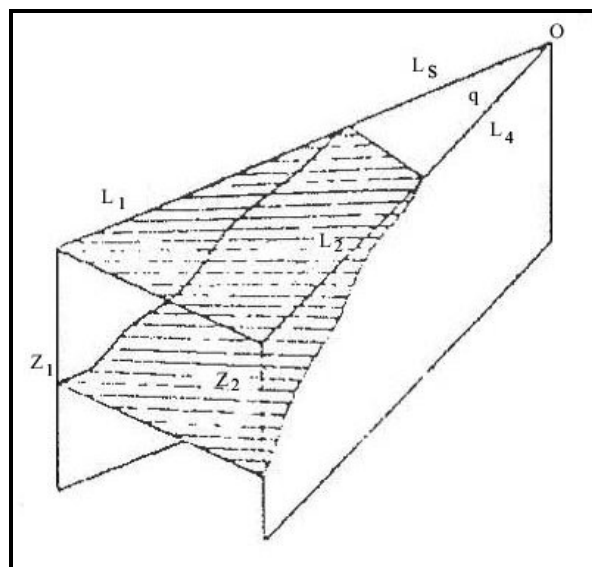
شکل ۳-۱۴- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۹

شکل (۳-۱۶) نیز مربوط به دو نیم‌رخ غیرموازی است که محل تلاقی آنها خارج از محدوده‌ی مخزن باشد، با این تفاوت که حجم جزئی بین یک صفحه قائم و دیواره مخزن محاسبه می‌شود. بنابراین:

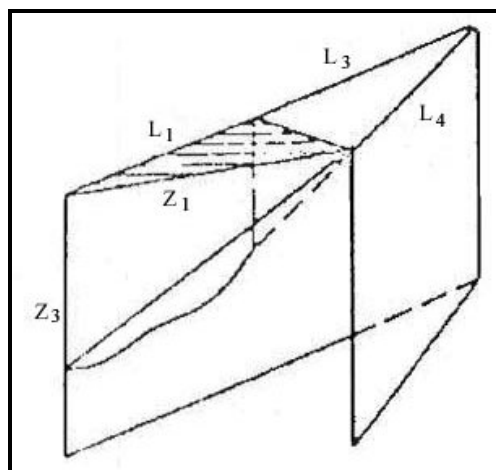
$$\text{حجم جزئی} = \left(\frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \right) (\sin \alpha) (L_1 L_2 + L_2 L_3 + 2 L_1 L_4) \times Z_1 + (L_1 L_2 + 2 L_2 L_3 + L_1 L_4) \times Z_2 \quad (3-11)$$

شکل (۳-۱۷) مربوط به دو نیم‌رخ غیرموازی است که در آن یکی از نیم‌رخ‌ها قبل از دیگری تمام شده است، در حالی که نیم‌رخ دیگر ادامه دارد. در نقطه‌ی اتمام، عمق کف نسبت به صفحه‌ی سطح آزاد برابر صفر است. حجم جزئی در قسمت مربوط به بعد از اتمام یک نیم‌رخ برابر است با:

$$\text{حجم جزئی} = \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \right) (\sin \alpha) L_1 L_4 (Z_1 + Z_3) \quad (3-12)$$



شکل ۳-۱۶- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۱



شکل ۳-۱۷- حجم جزئی مربوط به رابطه ۳-۱۲

۳-۳-۳- روش ضریب ثابت^۱

این روش توسط بولر به وجود آمده است. در این روش باید داده‌های هیدروگرافی شامل مقاطع عرضی و هم‌چنین نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط تراز قابل قبول در اختیار باشد. مثل تمام روش‌هایی که قبلاً اشاره شد، سطح محصور بین هر خط تراز تا رقوم تاج سد محاسبه می‌گردد. هم‌چنین مساحت هر مقطع عرضی تا رقوم تاج سد محاسبه می‌شود.

در این روش حجم بین دو مقطع عرضی متوالی و مساحت محصور به خط تراز تاج سد را بازه می‌گویند. هم‌چنین آن بخش از حجم بازه که محدود به سطوح خطوط تراز می‌باشد را زیر بازه می‌نامند در آن صورت حجم هر زیر بازه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_s = V_o (A'_s + A''_s) / (A'_o + A''_o) = P (A'_s + A''_s) \quad (3-13)$$

که در این رابطه

$$V_s = \text{حجم زیر بازه}$$

$$V_o = \text{حجم اولیه بازه (قبل از ترسیب)}$$

$$A_o = \text{مساحت مقطع عرضی بالادست سد اولیه}$$

$$A_s = \text{مساحت اولیه زیربازه}$$

$$P \text{ نیز برابر است با نسبت } V_o \text{ به } (A'_o + A''_o)$$

علائم پرین و زگون نشان دهنده مساحت مربوط به مقطع پایین‌دست و بالادست است.

۳-۳-۴- کاربرد GIS

استفاده از GIS در مطالعات برآورد کاهش حجم مخازن در اثر رسوب‌گذاری، عمدتاً به منظور تکمیل مطالعه هیدروگرافی مخازن سدها انجام می‌گیرد که در نهایت علاوه بر کنترل نتایج اندازه‌گیری‌های هیدروگرافی، با ارایه هندسه سه‌بعدی از وضعیت پستی و بلندی کف مخزن، وضعیت رسوب‌گذاری در مخازن ملموس‌تر می‌گردد. از جمله نتایج کاربردی چنین مطالعاتی می‌توان به برآورد دقیق حجم مخازن و تخمین نرخ سالانه رسوب‌گذاری در مخازن اشاره نمود.

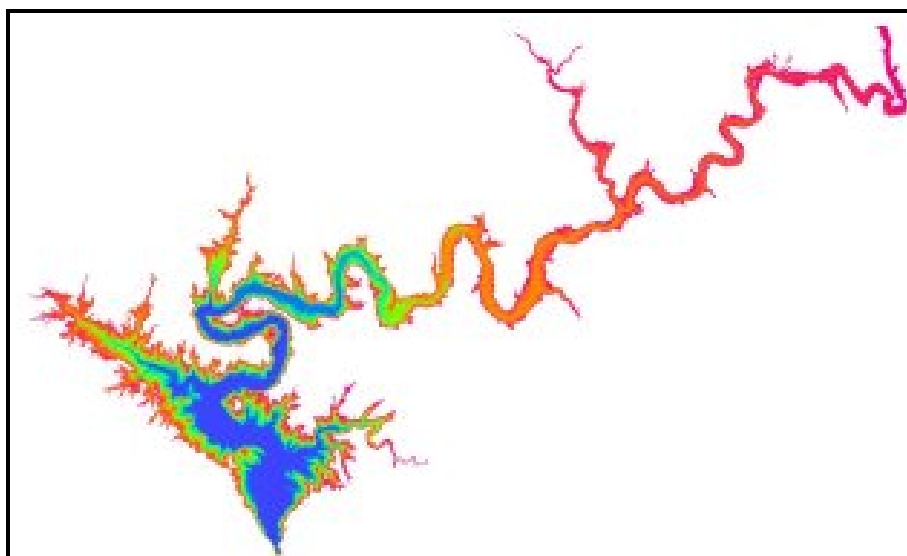
در مرحله نخست لازم است با استفاده از داده‌های توپوگرافی مخزن در دوره پیش از احداث سد، ضمن مشخص نمودن محدوده مخزن در تراز عادی، مدل رقومی ارتفاع^۱ مخزن تهیه گردد. مدل رقومی ارتفاع، درواقع یک ماتریس رقومی بوده که هریک از سلولهای آن دارای سه پارامتر X (طول جغرافیایی)، Y (عرض جغرافیایی) و Z (ارتفاع از سطح دریا) می‌باشند و با استفاده از داده‌های توپوگرافی یا هیدروگرافی به کمک نرم‌افزارهای GIS از قبیل ArcView یا ArcGIS تهیه می‌گردد. البته نقشه‌های توپوگرافی موجود باید ابتدا ویرایش شوند که این عمل را می‌توان با AutoCAD map انجام داد. در این مرحله پس از لایه‌بندی و کنارگذاری آنها خطوط تراز و نقاط توپوگرافی کدگذاری می‌شود. دقت در این مرحله اهمیت زیادی دارد و رفع خطاها باعث افزایش دقت محاسبات حجم مخزن می‌گردد. پس از رقومی کردن نقشه‌ها و تهیه نقشه DEM می‌توان به کمک نرم‌افزارهایی چون ILWIS و ArcView سطوح محصور بین هر خط کنتور و نهایتاً با استفاده از روش‌هایی که قبلاً بیان شدند حجم مخزن را به‌دست آورد. بنابراین اطلاعات توپوگرافی یا هیدروگرافی که غالباً متشکل از نقاط ارتفاعی یا خطوط تراز توپوگرافی می‌باشند، با یک شبکه پیوسته از سلولهای دارای ارتفاع، تحت عنوان DEM جایگزین می‌گردد. مهم‌ترین مزیت استفاده از DEM، پیوستگی و یکپارچگی اطلاعات ارتفاع مربوط به نقاط مختلف در منطقه موردنظر می‌باشد، به‌طوری‌که می‌توان ارتفاع هر نقطه را با مشخص نمودن مختصات X و Y آن نقطه با سرعت و دقت مناسب تعیین کرد.

با تهیه DEM از داده‌های نقشه‌های زمینی و آبنگاری مخزن سد و مشخص بودن تراز عادی می‌توان حجم مخزن را تعیین کرد. لذا تهیه DEM پس از عملیات هیدروگرافی مخزن، کمک شایانی به برآورد دقیق حجم مخزن سد می‌کند. علاوه بر این، در صورتی که داده‌های توپوگرافی مخزن در دوره پیش از ساخت سد و داده‌های هیدروگرافی سال‌های آتی بعد از آبیگری سد موجود باشد، می‌توان با تهیه دو نمونه رقومی ارتفاع (DEM) در یک سیستم مختصاتی، حجم رسوب نهشته شده در مخزن را با دقت بالا برآورد کرد و در نهایت متوسط نرخ سالانه رسوب‌گذاری، متوسط سالانه افزایش تراز کف مخزن و همچنین کاهش سالانه حجم مخزن را محاسبه کرد. استفاده از ماژول‌های^۲ سه‌بعدی از دیگر کاربردهای GIS بوده که با کمک آن می‌توان هندسه سه‌بعدی کف مخزن را تهیه کرده و مناطقی از مخزن که طی سال‌های گذشته با نرخ بیش‌تری نسبت به سایر نقاط مخزن رسوب‌گذاری شده‌اند را مشخص نمود. علاوه بر این، با تلفیق لایه DEM و لایه مسیر رودخانه اصلی می‌توان نیم رخ طولی رودخانه را قبل و بعد از سد تهیه کرد. لذا می‌توان میزان بالا آمدن بستر بالادست سد و کف کنی رودخانه پایین‌دست سد را تعیین نمود.

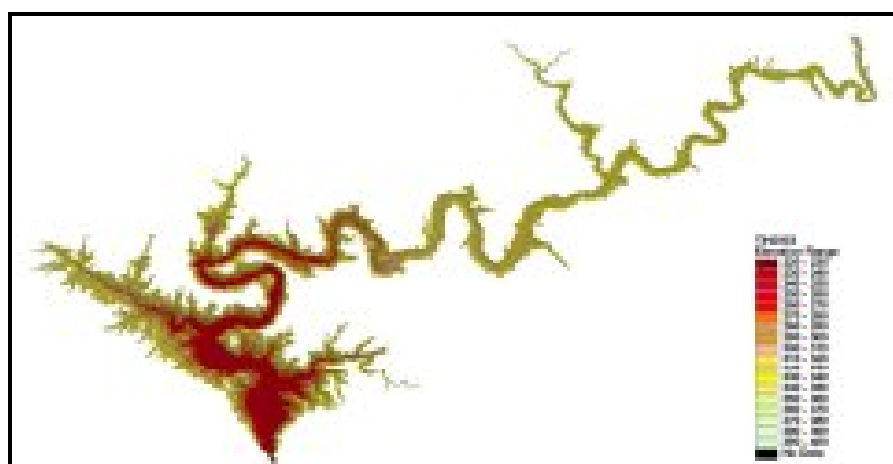
به عنوان مثال می‌توان به مطالعاتی که جهت بررسی تغییرات کف مخزن سد در انجام گرفته، اشاره کرد. شکل (۳-۱۸) و (۳-۱۹) به ترتیب DEM کف مخزن سد در را با استفاده از نرم‌افزارهای ILWIS و ArcView نشان می‌دهد. همچنین شکل (۳-۲۰) تصویر سه‌بعدی از کف مخزن سد در را نشان می‌دهند.

1- Digital elevation model (DEM)

2- module



شکل ۳-۱۸- نقشه رقومی سد دز با ILWIS [۳۵]

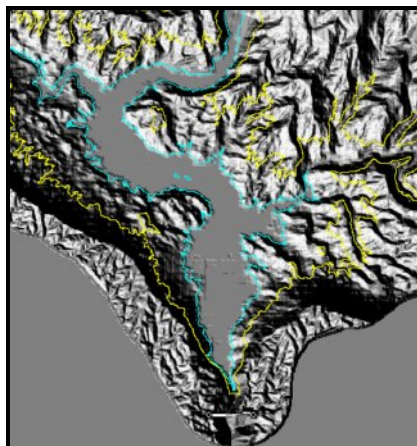


شکل ۳-۱۹- نقشه رقومی سد دز با ArcView [۳۵]

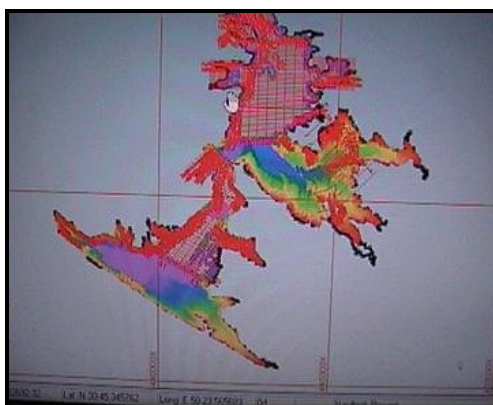
۳-۳-۵- روش‌های نوین

با پیشرفت علم و به کارگیری روش‌های نوین نقشه‌برداری هم‌چنین گسترش ماشین‌های رایانه، نرم‌افزارهایی به وجود آمده‌اند که سرعت و دقت محاسبات رابطه‌طور چشمگیری افزایش دادند. تعدادی از این نرم‌افزارها عبارتند از: AutoCAD، SURFER، Microstation، SDR MAP، ArcINFO و ArcGIS. نرم‌افزاری که توسط USBR استفاده می‌شود قابلیت متصل شدن با نرم‌افزارهای ARC/INFO را دارد. برای رسم خطوط تراز زیر سطح آب از نرم‌افزار TIN استفاده می‌شود که قادر است تا مختصات نقاطی که به فواصل غیرمنظم برداشت شده است را به کار برد. این نرم‌افزار علاوه بر رسم سطح محصور بین هر خط تراز (سطح محاط)، حجم مخزن را نیز با یکی از روش‌هایی که ارایه شد محاسبه می‌کند. نرم‌افزار هیدروگرافی باید حداقل قادر به جمع‌آوری داده‌ها از دستگاه عمقیاب و گیرنده‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای باشد. کلیه داده‌ها به صورت مستقیم توسط نرم‌افزار جمع‌آوری شده و جهت انجام اقدامات بعدی در حافظه رایانه ذخیره می‌شود. طراحی خطوط و عمق‌یابی و دریافت و نمایش سایر اطلاعات نقشه‌برداری نظیر: خط ساحلی، علایم

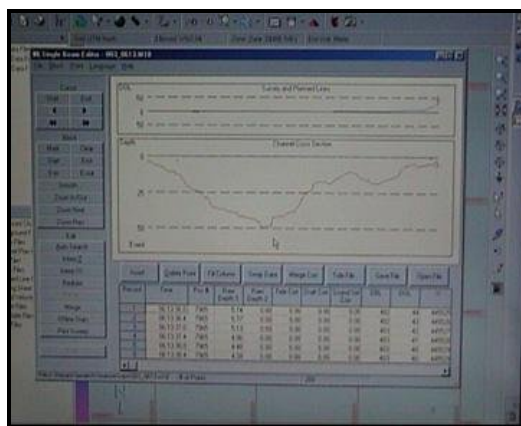
آبنگاری و نقشه‌های توپوگرافی نواحی مجاور ساحل به صورت پس زمینه به همراه اطلاعات و تنظیمات ژئودتیکی^۱ و پردازش داده‌ها از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌باشد. از نرم‌افزارهای متداول ناوبری در این خصوص Hypack می‌باشد.



شکل ۳-۲- تصویر سه‌بعدی از کف مخزن سد دز پس از ساخت سد



شکل ۳-۲۱- توزیع عمق بر اساس رنگ در مخزن سد مارون
با استفاده از نرم‌افزار ناوبری Hypack



شکل ۳-۲۲- پردازش اولیه اطلاعات عمق با استفاده از نرم‌افزار ناوبری Hypack

۳-۳-۵-۱- محاسبات، پردازش و کنترل‌ها

منظور از محاسبات، انجام محاسبات بر روی داده‌های برداشت شده آبی جهت تهیه نقشه نهایی عمق‌یابی می‌باشد. در روش‌های قبلی دقت استخراج عمق بستگی به توانایی تفکیک نمودار^۱ کاغذی دارد. هر مقدار عرض نمودار بیش‌تر باشد و در زمان انجام عملیات دامنه کوچک‌تری انتخاب گردد، عمق‌های استخراج شده دارای دقت بیش‌تری می‌باشند. عمق محل تقاطع خط ثابت و اثر نیم رخ بستر بر روی نمودار، عمق مربوط به نقطه ثابت می‌باشد اما در روش مدرن برداشت‌های عمق مخزن مستقیماً در رایانه مورد پردازش قرار می‌گیرد.

هدف از پردازش داده‌های عمق‌سنجی حذف داده‌های غلط و ناخواسته و اعمال تصحیحات ضروری بر روی داده‌ها (سرعت صوت، آب‌خور مبدل^۲ و غیره) و نهایتاً تبدیل داده‌های پردازش شده به شکل مورد نظر است. مبنای عمق‌ها نسبت به سطح مبنا توسط اعمال مقدار اختلاف فاصله قائم تراز سطح آب از سطح مبنای عمق‌یابی صورت می‌گیرد. با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج صوت و یا روش بار چک نسبت به تعیین سرعت صوت در لایه‌های مختلف ضمن عملیات نقشه‌برداری اقدام و هنگام پردازش، تصحیحات لازم بر روی عمق‌ها انجام می‌گردد. بار چک روشی است که برای واسنجی دستگاه عمق‌سنجی صوتی^۳ به کار می‌رود. در این روش، سرعت رفت و برگشت صوت تا عمق معینی از مخزن زیر قایق اندازه‌گیری می‌گردد.

هم‌چنین شناور هیدروگرافی در ضمن حرکت در آب تحت تاثیر نوسانات سطح آب قرار می‌گیرد. این نوسانات باعث می‌گردد که شناور دارای نوسانات قائم، طولی و عرضی گردد که باعث ایجاد خطایی در مقدار عمق‌های اندازه‌گیری شده می‌گردد و باید تصحیحات لازم اعمال گردد (اندازه‌گیری این نوسانات نیاز به تجهیزات پیشرفته اندازه‌گیری نوسانات شناور دارد که قابل نصب بر روی شناورهای کوچک نمی‌باشد لذا زمان انجام عملیات باید زمانی انتخاب گردد که سطح آب دارای حداقل نوسانات باشد).

ممکن است به دلایل مختلف نظیر قرار گرفتن اجسامی ما بین مبدل‌ها و بستر، عمق‌های اندازه‌گیری شده واقعی نباشد. بررسی این مساله و اصلاح آن مشکل و نیاز به کارشناس با تجربه دارد. البته با بررسی عمق‌های مجاور و پستی و بلندی بستر می‌توان به نادرست بودن آن پی برد. در صورت رفع نشدن شک و تردید در این مورد باید عملیات تکرار گردد.

موارد دیگری که ممکن است موجب خطا گردد، عبارتند از: تغییرات قائم سطح آب در زمان انجام عملیات، ثبت نادرست تغییرات قائم تراز سطح آب، نادرست بودن مقیاس اشل و یا به دلیل دور بودن بیش از حد اشل اندازه‌گیری شده تغییرات تراز سطح آب از منطقه عملیاتی و بالاخره بررسی درستی داده‌های اندازه‌گیری شده، میزان دقت برداشت نقشه و ترسیم آنها در انطباق با استانداردهای آبنگاری باید بررسی و کنترل شود. کلیه داده‌ها و اطلاعات ثبت شده نظیر اصوات تراز سطح آب و نمودار تغییرات آن بر حسب زمان، کلیه اطلاعات ترسیم شده بر روی نقشه‌های نهایی عمق‌یابی و مستند شده و داده‌های مربوط به سرعت صوت در آب باید دقت‌سنجی شوند. انجام و اعمال تصحیحات بر روی داده‌ها و اسناد و مدارک ثبت و نگهداری اطلاعات و کلیه فایل‌های ضبط داده‌ها و اطلاعات پردازش شده و ترسیم پوشه رایانه‌ای نیز باید در حین انجام و پایان عملیات آبی توسط سرپرست پروژه یا افراد قابل اطمینان مورد بررسی و کنترل قرار گیرند.

1- Chart
2- Transducer
3- fathometer

با توجه به این که ممکن است زمان انجام عملیات آبنگاری^۱ تراز آب مخزن سد در تراز داغ آب قرار نداشته باشد لذا برداشت پستی و بلندی مناطقی که خارج از آب قرار دارد (از سطح آب تا تراز داغ آب) باید از طریق عملیات زمینی برداشت و نقشه مربوط تهیه شود.

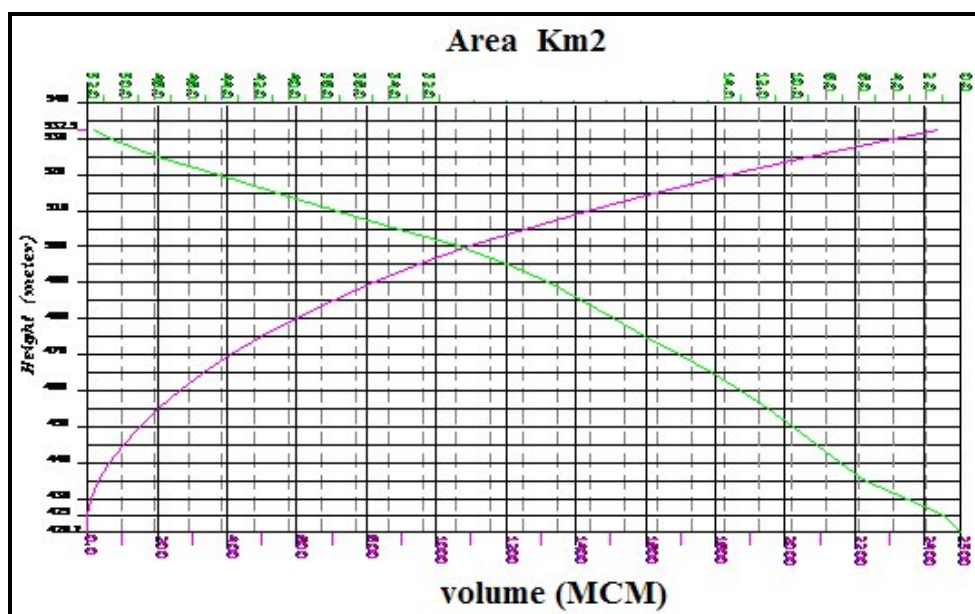
۳-۵-۲- تعیین حجم مخزن

در این مرحله کلیه نقشه‌های توپوگرافی مخزن از روش‌های آبنگاری و عملیات زمینی تهیه گردیده است. اکنون باید دو نقشه تهیه شده از روش آبی و زمینی به یکدیگر متصل گردیده تا آماده انجام محاسبات حجم و سطح مخزن شود که نهایتاً جداول و منحنی‌های مربوط تهیه می‌گردد و در بهره‌برداری سد مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه سطح و حجم روش‌های مختلفی که قبلاً ارایه شده‌اند استفاده می‌شود.

منحنی سطح و حجم در بهره‌برداری از سد که اهداف ساخت سد را در برمی‌گیرد (مانند تامین نیروی برق، تامین آب کشاورزی و کنترل سیلاب) دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. شکل (۳-۲۳) نمونه‌ای از این منحنی‌ها مربوط به سد مخزنی را نشان می‌دهد. روش‌های خودکار بسیاری برای محاسبه سطح و حجم مخازن سدها در دسترس بوده و می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند. معمولاً یک مدل رقومی DTM از عملیات توپوگرافی - هیدروگرافی برای تولید مدل شبکه مثلث‌بندی غیرمنظم TIN تولید و منحنی میزان‌ها در فاصله هر نیم متر رسم و مساحت هریک از منحنی‌ها محاسبه می‌شود. حجم محصور در هر منحنی می‌تواند در نرم‌افزار مربوط محاسبه شود.

برای محاسبه سطح هر منحنی تراز می‌توان از نرم‌افزارهای مانند Auto CAD، SDR MAP، Microstation، Techplot cor و غیره استفاده کرد. معمولاً نتایج حاصله دارای دقت یکسانی می‌باشند. برای محاسبه احجام مخازن در ارتفاعات مختلف نرم‌افزارهای، Microstation-Bently و SDRMAP با در نظر گرفتن DTM تشکیل شده می‌تواند نتایج با دقت بهتری ارایه نماید. با توجه به این که نتایج عملیات آبنگاری مخزن سد که با هزینه‌های بسیار بالا انجام می‌گردد کاربردی می‌باشد و همان‌طور که قبلاً ذکر گردید در بهره‌برداری سد از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد، لذا باید دقت محاسبات احجام سطح و حجم با استفاده از روش‌های مختلف کنترل گردد تا نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار باشد.

البته این نکته را باید یادآوری نمود که دقت محاسبات سطح و حجم مخزن سدها در درجه اول به فاصله و خطوط طراحی آبنگاری و ترسیم نقشه‌های (DTM) بستگی دارد. منحنی‌های سطح و حجم در فرم‌های استاندارد آن رسم می‌شوند و اطلاعات آنها در جدول مربوط ارایه می‌شوند.



شکل ۳-۲۳- یک نمونه از منحنی سطح و حجم یک سد مخزنی

از بهترین روش‌های کنترلی محاسبات سطح و حجم مخازن استفاده از نرم‌افزارهای GIS مانند ArcGIS، ArcView، ArcINFO می‌باشد.

در این روش‌ها ابتدا مدل شبکه مثلث‌بندی غیرمنظم TIN تولید و سپس مدل DEM آن تولید و نهایتاً با استفاده از نرم‌افزارهای ذکر شده سطح و حجم محاسبه می‌گردد.

۳-۴- روش‌های تعیین حجم با استفاده از عمق رسوب نهشته شده

یکی از روش‌های تعیین نرخ رسوب‌گذاری، تعیین ضخامت رسوب نهشته شده بالای سطح افقی مبنا در مدت زمان معینی می‌باشد که با ضرب کردن این ضخامت در مساحتی که رسوب نهشته شده باشد، حجم رسوب نهشته شده در این مدت به دست می‌آید. روش‌های مختلفی برای تعیین ضخامت رسوب نهشته شده وجود دارد که در این قسمت توضیح داده می‌شود.

۳-۴-۱- روش ردیابی عنصر سزیم ۱۳۷

با توجه به مطالبی که در قسمت پ. ۲-۲-۶ ارائه شده است، عنصر رادیواکتیو سزیم ۱۳۷ در سال‌های ۱۹۵۴ تا ۱۹۶۴ در اثر آزمایش‌های هسته‌ای در سطح زمین پراکنده و با خاک‌های رس پیوند یافته است. در این روش با نمونه‌برداری از رسوبات نهشته شده بستر مخزن و اندازه‌گیری غلظت این عنصر در لایه‌های رسوب می‌توان لایه‌ای را که حاوی غلظت سزیم بیش‌تری است تعیین کرد. موقعیت این لایه به عنوان لایه مبنا منظور می‌گردد که می‌توان بدین ترتیب ضخامت رسوبات نهشته شده از سال ۱۹۶۴ تاکنون را محاسبه کرد. با این روش تنها می‌توان ضخامت لایه‌های رسوبی جدید را که روی لایه حاوی عنصر سزیم ۱۳۷ قرار دارند مشخص کرد و ضخامت رسوب لایه‌های زیرین را نمی‌توان تعیین کرد. از این روش برای تعیین حجم رسوبات نهشته شده در تعدادی از دریاچه‌های طبیعی ایالت می‌سی‌سی‌پی استفاده شده است.

۳-۴-۲- روش عمق‌سنجی زیر سطحی

دستگاه عمق‌سنجی زیر سطحی، وسیله‌ای است که با استفاده از امواج صوتی می‌تواند عمق لایه‌ها را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه قادر به تولید فرکانس‌های زیاد در حد ۲۴۰ کیلوهرتز تا فرکانس‌هایی در حد ۵ تا ۲۴ کیلوهرتز می‌باشد. فرکانس‌های زیاد توسط لایه‌های بسیار نرم و فرکانس‌های کم توسط لایه‌های بسیار سخت نظیر سنگ مادر منعکس می‌شود. در شرایط ایده‌آل، ضخامت رسوب تا حد ده سانتی‌متر نیز با این روش قابل اندازه‌گیری است. با این روش ضخامت کل رسوبات آبرفتی مشخص می‌شود و نمی‌توان موقعیت توپوگرافی اولیه بستر مخزن را مشخص کرد. این روش در بعضی از مخازن کاربرد ندارد چرا که امواج صوتی توسط لایه‌ای که حاوی آب - گاز باشد منعکس می‌گردد. در بعضی از مخازن گاز متان در لایه‌های رسوبی در اثر فعل و انفعالات مواد آلی موجود در آن لایه تولید می‌شود و در نتیجه لایه‌ای مخلوط از آب و گاز به وجود می‌آید که باعث انعکاس امواج صوتی می‌گردد.

۳-۴-۳- نصب صفحات فلزی مسطح

عمق رسوب‌گذاری در مخازن سدها را می‌توان با نصب صفحات مسطح در نقاط مشخصی و در کف مخزن اندازه‌گیری کرد. صفحات مسطح این مزایا را دارند که هیچ‌گونه تاثیری روی جریان آب نمی‌گذارند و یا باعث تجمع گل در نزدیک بستر نمی‌شوند. در بعضی از مخازن نرخ رسوب‌گذاری بسیار کم است مثلاً چند سانتی‌متر در سال و لذا نمی‌توان از طریق نقشه‌برداری دوره‌ای مخزن نرخ رسوب‌گذاری و یا عمق رسوبات نهشته شده را تعیین کرد. در این مناطق با استفاده از روش صفحات مسطح می‌توان با دقت قابل قبولی ضخامت ضخامت لایه‌های رسوبی را برآورد کرد. با توجه به این که صفحات در زیر رسوب مدفون می‌شوند، موقعیت آنها تنها از طریق فلزیاب‌ها و GPS مشخص گردد. در مناطقی که به طور تناوبی سطح آب مخزن پایین آورده می‌شود این روش بسیار موفقیت‌آمیز است. یکی از معایب این روش پر هزینه بودن استخراج داده‌ها می‌باشد. البته این روش نباید جایگزین روش نقشه‌برداری دوره‌ای مخازن سدها گردد و تنها به عنوان روش تکمیلی باید استفاده شود.

فصل ۴

الگوی رسوب‌گذاری در مخازن سدها

و برآورد عمر مفید سد

۴-۱- پیش بینی چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها

با ورود جریان رودخانه به مخزن سد، شرایط هیدرولیکی به خصوص سرعت جریان به شدت کاهش و پتانسیل انتقال رسوب رودخانه کاهش می یابد. در نتیجه ذرات رسوبی به تدریج نهشته می شوند. بار بستر و بخش درشت دانه بار معلق بلافاصله در مناطق ابتدایی مخزن نهشته شده و دلتا را تشکیل می دهند. در حالی که بخش ریزدانه بار معلق تا قسمت های عمیق مخزن و حتی تا نزدیک سد هم نفوذ کرده و سپس نهشته می شود. مخازنی که تنها یک رودخانه ورودی دارند معمولاً رسوب گذاری در آنها به صورت یکنواخت می باشد ولی حتی رسوب گذاری در چنین مخازنی هم به هم شباهتی ندارند و بیش تر تابع شرایط توپوگرافی، هیدرولیکی، خصوصیات رسوب و چگونگی بهره برداری از مخزن می باشد. در مخازنی که با تغییرات سطح آب زیاد در سال مواجه هستند، وضعیت رسوب گذاری متفاوت است چرا که بخشی از تپه های رسوبی ممکن است مجدداً فرسایش یافته و به نقاط پایین دست مخزن منتقل شوند. معمولاً رسوب در اثر سه عامل به درون مخزن و حتی تا نزدیکی های سد منتقل می شود که آن ها عبارتند از:

– انتقال مواد درشت دانه به صورت بار بستر در طول شیب پایین دست دلتا

– انتقال مواد ریز دانه توسط جریان به سمت مخزن

– انتقال مواد بسیار ریزدانه توسط جریان چگال

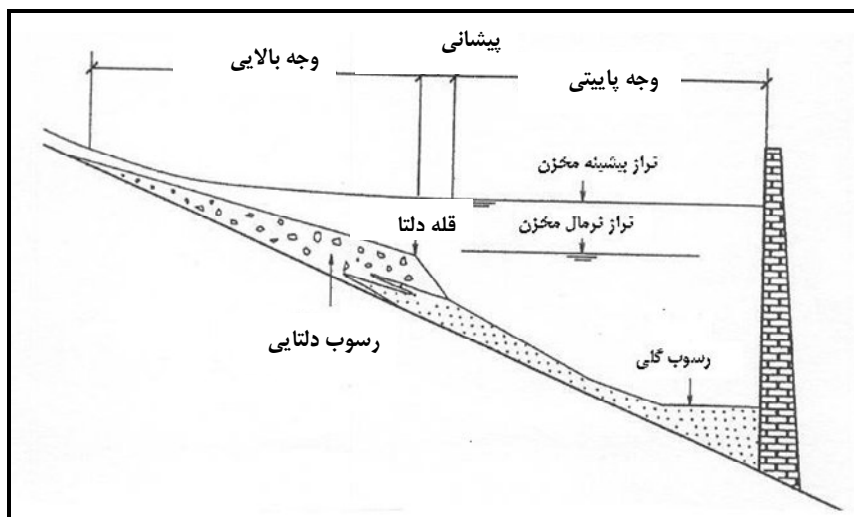
لغزش توده ای سواحل نیز از پدیده های دیگری است که در تعدادی از سدها اتفاق می افتد و ممکن است حجم زیادی رسوب را وارد مخزن کند. همه این عوامل باعث می شود که به تدریج بخشی از حجم مخزن توسط رسوب اشغال شود. در مواقعی ممکن است حجم رسوب ورودی به مخزن در مقایسه با حجم مخزن کم باشد ولی به علت ترسیب آن ها در مکان های نامناسب، مثلاً در محل ورودی به نیروگاه، مشکلات خاصی را ایجاد کند، از این رو پیش بینی الگوی توزیع رسوب در مخازن همه سدها بسیار اهمیت دارد. روش های پیش بینی توزیع رسوب با دقت بیش تر با استفاده از مدل های ریاضی صورت می گیرد که در فصل ۵ این راهنما ارایه شده است. مباحث این فصل بیش تر اختصاص به روش های تجربی پیش بینی توزیع رسوب دارد.

۴-۱-۱- نیمرخ طولی رسوب گذاری

شکل (۴-۱) توزیع طولی رسوب گذاری در یک مخزن سد را به صورت نمونه نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، مخزن سد به سه بازه وجه بالایی^۱، قله^۲ و پیشانی یا وجه پایینی^۳ تقسیم شده است. در بازه اولی، دلتا با ترسیب مصالح درشت دانه تشکیل می شود. در این بازه با افزایش رقوم پیشانی یا نقطه عطف منحنی طولی رسوب گذاری، شیب به تدریج کاهش می یابد. انتهای این بازه آخرین مکانی است که مصالح درشت دانه مواد بستر تا آن فاصله منتقل می شوند. از این نقطه به بعد مصالح ریزدانه مواد بستر بر روی شیب تند ایجاد شده در جبهه پایین دست دلتا حرکت می نمایند ولی در فاصله کمی ترسیب می شوند. پس از آن بازه سوم است که عمدتاً مصالح بسیار ریز توسط جریان گل آلود به آن بازه منتقل می شوند. شیب این بازه به خصوص در نزدیکی های سد افقی و یا حتی معکوس می باشد. در محل سد رسوبات ریز دانه تشکیل دریاچه گل آلود می دهند. علاوه بر مصالح بسیار ریز، مواد آلی که توسط آبزیان در درون مخزن تولید شده اند نیز در این مکان ترسیب می شود.

1- Topset bed
2- Pivot point
3- Foreset bed

در شرایط نادری مثلاً سیلاب‌های شدید، لغزش دیوارهای مخزن و یا حرکت جریان‌های واریزه‌ای ممکن است سبب انتقال بخشی از مواد درشت‌دانه به منطقه سوم شود که در این صورت نیم‌رخ عمقی رسوبات به صورت لایه لایه خواهد بود. به‌طور کلی چهار نوع ترسیب طولی در مخازن سدها تشخیص داده شده است که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

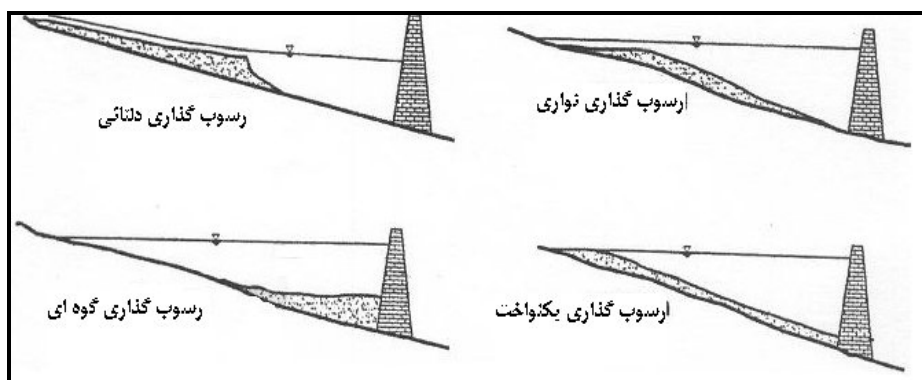


شکل ۴-۱- نمایش توزیع طولی رسوب‌گذاری در مخزن سد

چهار نوع شکل رسوب‌گذاری نشان داده شده در شکل (۴-۲) به خصوصیات رسوب بستر رودخانه، درصد رسوبات ریزدانه همراه جریان و نوع بهره‌برداری از مخزن بستگی دارد که ذیلاً توضیح داده می‌شود:

- رسوب‌گذاری دلتایی^۱ که بیش‌تر شامل ذرات درشت دانه (شن و ماسه) و بخش سیلت می‌باشد. این نوع ترسیب در مخازنی که نسبت حجم اولیه مخزن (C) به حجم جریان ورودی (I) زیاد می‌باشد و در آن‌ها تغییرات تراز سطح آب کم می‌باشد، اتفاق می‌افتد.
- رسوب‌گذاری گوه‌ای^۲ بیش‌تر در مخازن کوچک و یا مخازن بزرگ که در زمان سیلاب سطح آب بسیار پایین آورده شود، به طوریکه جریان رودخانه‌های برقرار شود و رسوبات نهشته شده در دوردست در اثر فرسایش عمومی بستر^۳ و فرسایش پس‌رونده^۴ به نزدیکی سد منتقل شوند و در مخازنی که نسبت C/I در آن‌ها کوچک و نوع رسوبات ریزدانه هستند و یا این‌که تغییرات سالانه تراز سطح آب مخزن زیاد است نیز اتفاق می‌افتد.

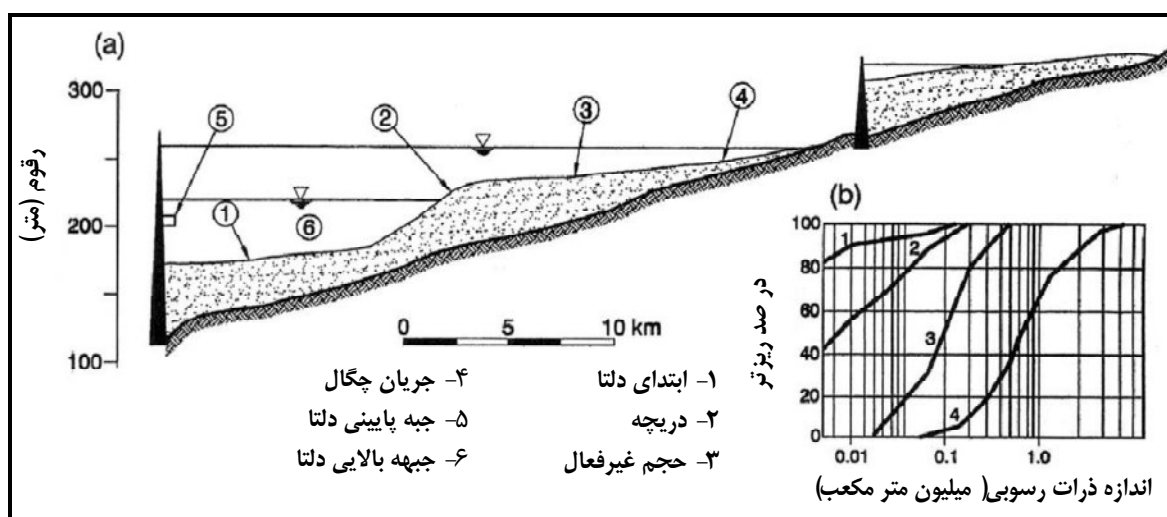
1- Delta silting
2- Wedge silting
3- Progressive erosion
4- Retrogressive erosion



شکل ۴-۲- نمایش چهار نوع ترسیب طولی در مخزن سدها [۱۰۳]

(معمول ترین نوع رسوب گذاری دلتا و نواری هستند و رسوب گذاری گوهه ای بندرت و در شرایط خاصی به وجود می آید)

- رسوب گذاری مخروطی^۱ نوع معمول رسوب گذاری در مخازن طولی می باشد. در این نوع رسوب گذاری دانه بندی رسوبات هر چه به سمت سد نزدیکتر شود، ریزتر می گردد.
 - رسوب گذاری یکنواخت یا نواری^۲، هر چند که این نوع رسوب گذاری غیر معمول است ولی ممکن است در مخازن کم عرض با تغییرات سطح آب زیاد اتفاق افتد. چنین نوع رسوب گذاری در مخازنی که نسبت C/I زیاد است، رخ می دهد.
- شکل (۳-۴) نیز وضعیت رسوب گذاری طولی را در یک مخزن بزرگ طولی نشان می دهد. منحنی دانه بندی رسوبات ترسیب شده نیز در این شکل نشان داده شده است. البته به علت متغیرهای بسیار زیادی که در عمل ترسیب دخالت دارند، این نوع رسوب گذاری ممکن است در مخازن دیگر اتفاق نیفتد و یا به عبارتی پروفیل طولی رسوب گذاری از مخزنی به مخزن دیگر متفاوت باشد. معیارهایی نیز برای پیش بینی نوع رسوب گذاری در مخازن سدها توسط محققین مختلف ارائه شده است که در جدول (۴-۱) مشاهده می شوند.



شکل ۴-۳- نمایش مناطق رسوب گذاری طولی در مخزن بزرگ و طولانی [۱۰۳]

جدول ۴-۱- معیارهای پیش‌بینی نحوه رسوب‌گذاری در مخزن [۱۶۱]

محقق	رسوب‌گذاری دلتا	رسوب‌گذاری نواری	رسوب‌گذاری گوه‌ای شکل
-----	$\frac{\Delta H}{H_0} < 0.15$ $\frac{V_r}{Q_S} > 2$	-----	$\frac{\Delta H}{H_0} > 0.15$ $\frac{V_r}{Q_S} < 2$
Jiao (1980)	$\frac{\Delta H}{H_0} < 0.1$ $\frac{CV_r}{Q_S} > 10^8$	$0.1 \leq \frac{\Delta H}{H_0} < 0.1$ $0.25 \times 10^8 < \frac{CV_r}{Q_S} < 10^8$	$\frac{\Delta H}{H_0} \geq 0.1$ $\frac{CV_r}{Q_S} < 0.25 \times 10^8$
Luo (1977)	$0.78 < \frac{Q_S}{\gamma'_S V} < 1.75$	$1.1 < \frac{Q_S}{\gamma'_S V} < 3.98$	$4.38 < \frac{Q_S}{\gamma'_S V} < 5.2$
۱- توضیح در رابطه با جدول (۴-۱): در این جدول، ΔH = تغییرات تراز سطح آب در دوره H_0 (m) Δt ارتفاع آب بالای دریچه‌های عمقی در دوره Q_S (m) Δt حجم رسوب ورودی در دوره زمان Δt (m³)، C غلظت وزنی رسوب ورودی Q، Kg/m³ بده متوسط جریان V_r، m³/sec حجم متوسط مخزن در مدت زمان Δt (m³) و γ'_S وزن مخصوص اشباع رسوب نهشته شده (T/m³)، به طور مثال چنان‌چه شرایط در مخزن سد طوری باشد که معیار $\frac{\Delta H}{H_0} < 0.15$ و $\frac{V_r}{Q_S} > 2$ برقرار باشد، در آن صورت نوع رسوب‌گذاری در این مخزن به صورت دلتا خواهد بود. Δt فاصله زمانی بین آبنگاری‌ها می‌باشد.			

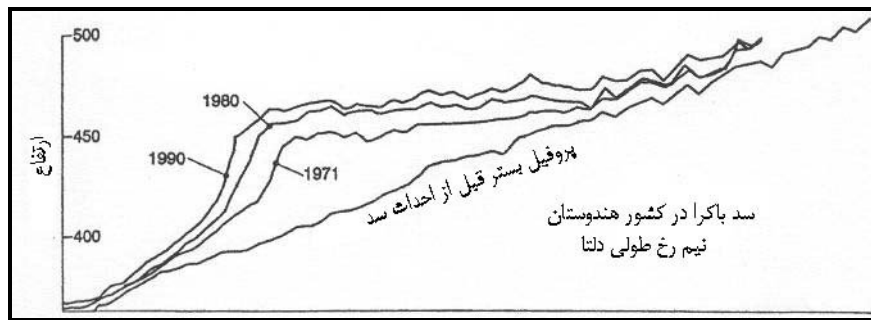
۴-۱-۲- دلتا

دلتا در محل ورود رودخانه به مخزن تشکیل و به تدریج به پایین‌دست و بالادست کشیده می‌شود. به طور کلی دلتاهای تشکیل شده در مخازن سدها دارای سه مشخصه می‌باشند:

- شیب جبهه بالایی و جبهه پایین‌دست قله کاملاً با هم متفاوت هستند. به طوری که شیب جبهه بالایی بسیار کم‌تر از شیب جبهه پایینی قله است.
- دانه‌بندی رسوبات نیز در جبهه بالادست و جبهه پایین‌دست قله کاملاً متفاوت می‌باشد. دانه‌بندی ذرات رسوبی در جبهه بالایی قله درشت‌تر از جبهه پایینی قله است.
- تراز قله بستگی به نوع بهره‌برداری از مخزن سد و عمق مخزن دارد. در مخازن عمیق که در ترازهای متفاوتی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، دلتاها در ترازهای مختلفی تشکیل شده‌اند.

شکل (۴-۴) وضعیت تشکیل و توسعه دلتا را در سد باکرا در کشور هند نشان می‌دهد. در سد گوانتینگ در کشور چین، دلتا ابتدا با سرعت ۳ کیلومتر در سال به سمت پایین‌دست و همزمان با سرعت ۲/۶ کیلومتر در سال به بالادست کشیده شد.

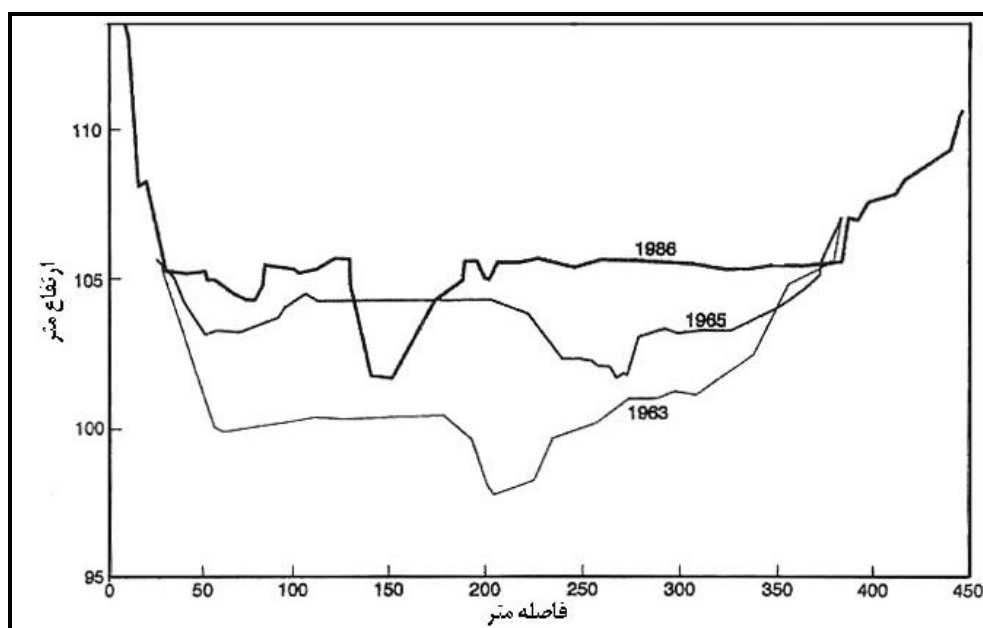
با رسیدن دلتا به نقاط عمیق و عریض مخزن، سرعت رشد آن کاهش می‌یابد. با توسعه دلتا به سمت پایین‌دست، ذرات درشت دانه بر روی ذرات ریزدانه ترسیب می‌شوند. مصالح درشت دانه نظیر قلوه سنگ باعث تشکیل توده‌ای عظیم دلتا می‌شود و با بالا آمدن سطح آب مخزن در زمان ورود سیلاب، دلتا به سمت بالا دست کشیده خواهد شد، زیرا ذرات درشت دانه با سرعت نهشته می‌شوند. بدیهی است با پایین رفتن سطح آب مخزن و ایجاد جریان رودخانه‌ای بخشی از دلتا مجدداً توسط جریان رودخانه‌ای فرسایش می‌یابد. شکل (۴-۵) پدیده رسوب‌گذاری و فرسایش مجدد را در محل تشکیل دلتا در مخزن سد مک ناری نشان می‌دهد.



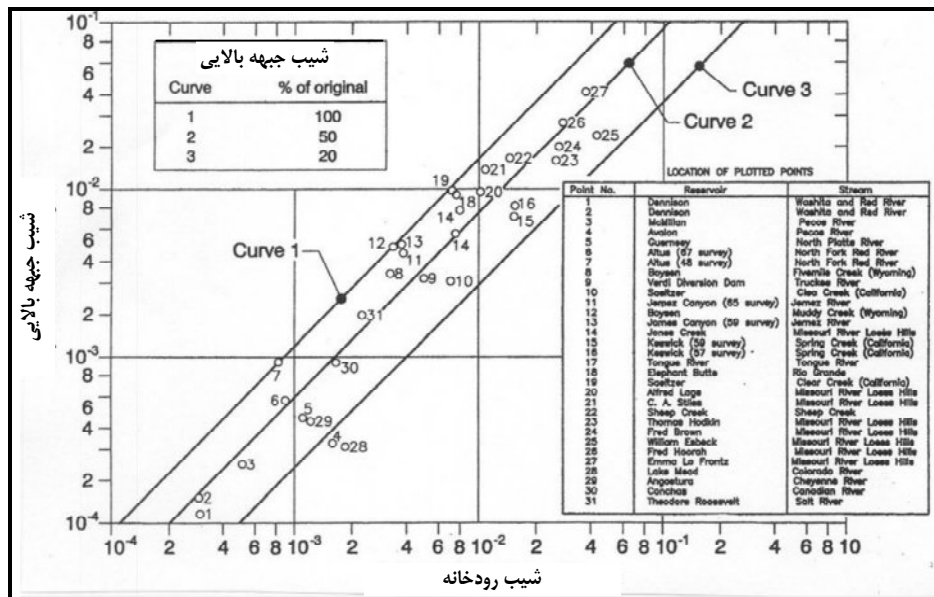
شکل ۴-۴- وضعیت تشکیل و توسعه دلتا در سالهای مختلف (سد باکرا در کشور هند) [۱۰۳]

رشد دلتا را می توان با اطلاع از مقدار شیب دلتا پیش بینی کرد و از این طریق تراز سطح آب در زمان سیلاب را می توان برآورد کرد. همان طور که در شکل (۴-۴) دیده می شود، دلتا دارای دو شیب کند و تند به ترتیب در وجه بالایی و پیشانی آن است. شیب دلتا مهم ترین پارامتری است که بر اساس آن می توان طول بالا آمدن بستر رودخانه بالا دست و حجم رسوب ذخیره شده را تعیین کرد. اطلاعات حاصل از سدهای آمریکا نشان داده است که شیب دلتا ممکن است از حداقل ۲۰ درصد شیب رودخانه اصلی تا صد در صد شیب رودخانه اصلی تغییر کند. شکل (۴-۶) شیب وجه بالا دست دلتا را در مقابل شیب رودخانه نشان می دهد. در تعدادی از مخازن شیب وجه بالایی دلتا برابر نصف شیب رودخانه اصلی است. البته با توجه به تغییرات زیاد شیب وجه بالایی دلتا در مخازن مختلف، استفاده از مقادیر تقریبی در محاسبات و پیش بینی ها توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا ممنوع شده است و توصیه شده است تا حتما با انجام مدل ریاضی توسعه دلتا پیش بینی گردد.

شیب تند پیشانی دلتا را می توان با استفاده از روابط تجربی یا از نتایج آبنگاری مخازن مشابه با تقریب تعیین کرد. نتایج اداره احیا اراضی آمریکا نشان داده است که شیب پیشانی ۶/۵ برابر شیب وجه بالایی می باشد. اختلاف شیب تا صد برابر نیز گزارش شده است. در مخازنی که رسوبات بسیار ریزدانه وارد آن می شوند شیب پیشانی ممکن است تا ۱/۶ برابر شیب وجه بالایی هم باشد. به طور کلی رودخانه هایی که مصالح رسوبی درشت دانه حمل می کند، شیب پیشانی بسیار تندتری خواهند داشت تا مخازنی که رسوبات ریزدانه حمل می کنند.

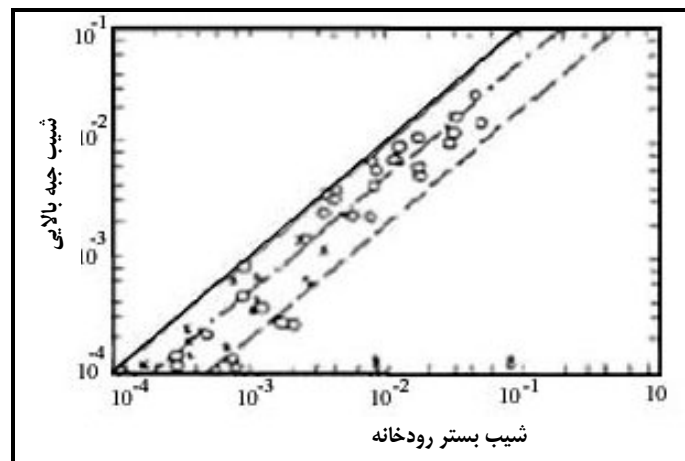


شکل ۴-۵- نمایش رسوب گذاری و فرسایش دلتا در سد مکناری [۱۰۳]



شکل ۴-۶- تغییرات شیب جبهه بالایی دلتا در مقابل شیب رودخانه [۵۱]

شکل (۴-۷) نیز داده‌های حاصل از ۴۵ مخزن را در رابطه با شیب وجه بالایی دلتا در مقابل شیب اصلی رودخانه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷- تغییرات شیب وجه بالایی دلتا در مقابل شیب رودخانه [۱۶۵]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خطوط رسم شده در شکل (۴-۷) دارای معادلاتی به صورت زیر می‌باشند.

خط ۱ $S_D = S_0$

خط ۲ $S_D = 0.5 S_0$

خط ۳ $S_D = 0.2 S_0$

در این روابط S_0 شیب رودخانه و S_D شیب وجه بالایی دلتا است. با توجه به روابط ارائه شده ملاحظه می‌شود که مقدار شیب تعادلی وجه بالایی دلتا، کوچک‌تر از شیب اصلی رودخانه است. مقدار شیب تعادلی به عوامل مختلفی بستگی دارد. این عوامل عبارتند از: بده غالب (بده با دوره بازگشت ۱/۵ ساله)، زبری رودخانه، دانه‌بندی مواد بستر، ظرفیت انتقال رسوب، مرفولوژی رودخانه و نوع ترکیب رسوب به صورت بار معلق یا بار بستر. شرایطی هم که باید حاصل شود تا شیب وجه بالایی دلتا به حالت تعادل برسد عبارتند

از: برقراری جریان یکنواخت، برقراری رابطه پیوستگی و قرار گرفتن رودخانه در شرایط رژیم. روابط تجربی متعددی برای شیب تعادلی ارائه شده‌اند که تعدادی از آن‌ها به شرح زیر است [۱۶۱]:

$$S_e = 1.28 \times 10^{-4} \left(\frac{Cw}{q^{0.6}} \right)^{0.305} \quad (۱-۴)$$

که در آن:

q = بده در واحد عرض در فصل پر آبی $m^3/sec/m$

C = غلظت متوسط وزنی رسوب در فصل پرآبی kg/m^3

w = سرعت متوسط سقوط ذرات رسوبی معلق (cm/sec)

$$S_e = 0.00455 \left[\left(\frac{C}{Q} \right)^{0.5} D_{50} \right]^{0.59} \quad (۲-۴)$$

که:

Q = بده لبریز (m^3/sec)

C = متوسط غلظت رسوب در فصل سیلابی kg/m^3

D_{50} = اندازه متوسط ذرات مصالح رسوبی بستر

$$\frac{S_e}{S_o} = 19.5 \left(\frac{D_{50R}}{D_{50}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{HV} \right)^{0.15} \quad (۳-۴)$$

D_{50R} = اندازه متوسط ذرات رسوبی ورودی

D_{50} = اندازه متوسط ذرات رسوبی کف رودخانه

H = ارتفاع بالا آمدن بستر بر حسب متر

V = حجم مخزن متناسب با ارتفاع آب در مخزن

و در صورت بار بستر:

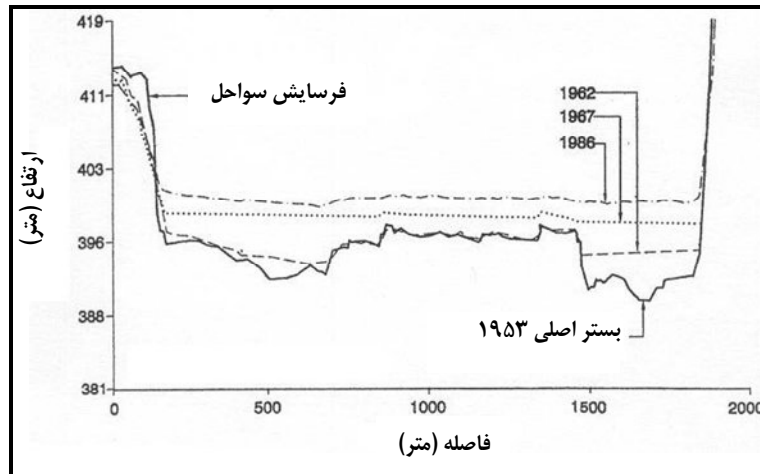
$$\frac{S_e}{S_o} = 0.79 (HQ_m S_o)^{-0.17} \quad (۴-۴)$$

Q_m = بده متوسط سالانه بر حسب (m^3/sec)

۴-۱-۳- پروفیل عرضی رسوب گذاری

شکل (۸-۴) مقطع عرضی مخزن سدی را در سال‌های مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، رسوب ابتدا در قسمت‌های عمیق مقطع عرضی ترسیب می‌شود و این عمل آنقدر ادامه دارد تا یک سطح همتراز با سایر نقاط مقطع ایجاد گردد. سپس رسوب گذاری تقریباً در تمام عرض صورت خواهد گرفت. البته کاهش سطح آب مخزن و احیاناً برقراری جریان

رودخانه‌ای در مخزن ممکن است فرسایش‌هایی را در بخش‌هایی از مقطع عرضی به وجود آورد که با بالا آمدن سطح آب مخزن و نهشته‌شدن مواد مجدداً این مناطق پر خواهد شد.



شکل ۴-۸- مقطع عرضی مخزن سد فرانسیس در سال‌های مختلف بهره‌برداری [۱۰۳]

دلایل این که چرا مصالح رسوبی ابتدا در خط‌القعر (تالوگ) رودخانه ترسیب می‌شوند، عبارتند از:

- انتقال مواد توسط جریان چگال که دارای غلظت رسوب زیاد می‌باشد از خط‌القعر صورت می‌گیرد که باعث ترسیب تدریجی می‌شود.
- با توجه به تغییرات غلظت در عمق و این که غلظت رسوب همیشه در کف بیش‌تر است، نقاطی از عرض رودخانه که عمق بیش‌تری دارند دارای غلظت رسوب بیش‌تری نسبت به سایر نقاط عرض رودخانه هستند. در نتیجه در صورت ایجاد شرایط رسوب‌گذاری در کل عرض، رسوبات بیش‌تری در مکان‌های عمیق‌تر ترسیب می‌شود.
- حتی اگر فرض شود که رسوب‌گذاری در عرض مخزن به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد، مطمئناً با توجه به این که رسوب‌گذاری به عمق آب بستگی دارد، نرخ رسوب‌گذاری در محل‌های عمیق بیش‌تر خواهد بود.

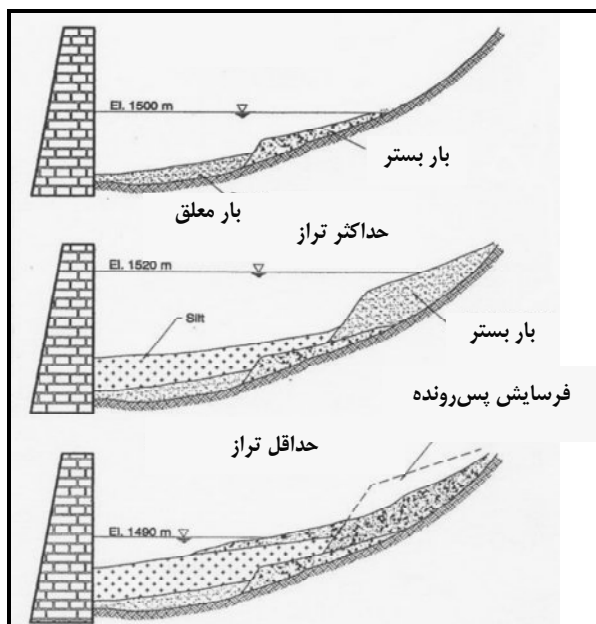
۴-۱-۴- سایر عوامل موثر بر الگوی رسوب‌گذاری

۴-۱-۱- سیلاب‌های بزرگ

سیلاب‌های بزرگ، عامل اصلی ورود حجم زیادی از رسوب به مخازن سدها می‌باشند. وقوع این طوفان‌ها در زمان‌ها و شرایط مختلفی و در حوضه‌های فرعی متفاوتی اتفاق می‌افتد که باعث انتقال رسوب متفاوت (از نظر حجم و جنس) می‌گردد. چنین شرایطی باعث می‌گردد که رسوبات نهشته شده به صورت لایه لایه باشند. البته این حالت ممکن است در منطقه تشکیل دلتا به ندرت دیده شود ولی در بازه‌های دومی و سومی وجود دارد. به‌خصوص وجود لایه‌های ماسه در بین ذرات رسوبی بسیار ریزدانه در بازه سومی حاکی از انتقال آنها توسط یک سیلاب بزرگ می‌باشد.

۴-۱-۴- نحوه بهره‌برداری مخزن سد

شرایط بهره‌برداری از مخزن سد، تاثیر بسیار زیادی بر وضعیت رسوب‌گذاری مخزن سد دارد. در مخازنی که تغییرات سالیانه سطح آب مخزن زیاد می‌باشد، مصالح بالادست دلتا ممکن است فرسایش یافته و در فاصله‌ای نزدیک‌تر به سد مجدداً ترسیب شوند. شکل (۴-۹) نحوه‌ی انتقال دلتا را در اثر بهره‌برداری غلط از مخزن سدی در کشور نپال نشان می‌دهد. ترسیب رسوب در نزدیک سازه سد باعث ایجاد مشکلاتی در مخزن چون پر کردن زود هنگام حجم مرده سد و غیرقابل استفاده شدن دریچه‌های تحتانی می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع رسوب در این مکان ممکن است باعث ورود آن‌ها به نیروگاه و ایجاد خسارت به توربین‌ها گردد از این رو برای جلوگیری از پیشروی دلتا به سمت سد، ضروری است شرایط بهره‌برداری مخزن مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۴-۹- نحوه‌ی انتقال دلتا در اثر بهره‌برداری غلط از مخزن سدی در کشور نپال [۵۳]

۴-۱-۳- لغزش توده‌ای سواحل مخزن

مخازن سدها دارای سواحل طولانی می‌باشد از این رو امکان ایجاد ناپایداری در سواحل آن‌ها و بروز لغزش‌های توده‌ای وجود دارد که در این صورت نه تنها حجم زیادی رسوب به‌خصوص به بازه سوم و نزدیک سد وارد می‌کنند بلکه مخاطراتی را برای سازه‌های احداث شده در سواحل مخزن فراهم می‌کنند. لغزش ناگهانی توده سواحل نیز ممکن است امواج ناگهانی مرتفعی را ایجاد کند. بدترین واقعه از این نوع که تاکنون اتفاق افتاده مربوط به سد وایونت در ایتالیا است. در اثر این واقعه که در سال ۱۹۶۳ اتفاق افتاد، توده‌ای به حجم ۲۴۰ میلیون متر مکعب با سرعت ۳۰ متر در ثانیه به درون مخزن سدی به حجم ۱۵۰ میلیون متر مکعب لغزید. این عمل باعث تشکیل موج مرتفعی گردید، به طوریکه ارتفاع موج روی سرریز به حدود ۱۰۰ متر رسیده است. هر چند این سد قوسی با ارتفاع ۲۶۵ متر تخریب نگردید ولی این سانحه باعث غرق شدن ۲۶۰۰ نفر گردید.

۴-۱-۴- فرسایش در مخزن

هر چند که معمولاً پدیده رسوب‌گذاری در مخازن، پدیده‌ی غالب می‌باشد ولی فرسایش بستر نیز در شرایطی ممکن است اتفاق افتد. دو نوع فرسایش که در منطقه محل ورود جریان به مخزن مشاهده می‌شود عبارتند از: یکی فرسایش در اثر کاهش تراز سطح آب مخزن که در فصول خشک اتفاق می‌افتد و باعث می‌شود پس‌زدگی آب به فروافتادگی تبدیل و جریان رودخانه‌ای در محل تشکیل دلتا ایجاد و در نتیجه فرسایش پس‌رونده در بستر رودخانه به‌وجود آید. دومین نوع فرسایش نیز در همین منطقه و در زمان پرشدن مخزن و بالا آمدن سطح آب اتفاق می‌افتد. در چنین شرایطی معمولاً تراز سطح آب تلاطم زیادی دارد که باعث فرسایش پیش‌رونده می‌گردد.

در اثر پدیده فرسایش پس‌رونده، میزان رسوب منتقل شده به تدریج افزایش می‌یابد و رسوبات ممکن است تا نزدیکی‌های سد هم حمل شوند. ولی در اثر پدیده فرسایش پیش‌رونده، رسوبات تا فاصله کم‌تری حمل می‌شوند زیرا با بالا آمدن سطح آب مخزن هم از میزان مصالح فرسایش یافته کم می‌شود هم در فاصله کم‌تری ترسیب می‌شوند. از این رو در بعضی از سدها، تلاش می‌شود تا با ایجاد تمهیداتی، فرسایش پس‌رونده را ایجاد و یا تشدید نمایند تا بتوانند میزان رسوبات بیش‌تری را از مخزن به خارج منتقل کنند. در این رابطه به فصل ۸ مراجعه شود.

روش‌های تجربی برای پیش‌بینی فرسایش نیز به‌وجود آمده‌اند. برای این منظور معادله پیوستگی رسوب را می‌توان در بازه‌ای که فرسایش اتفاق افتاده به صورت زیر نوشت:

$$\gamma' \Delta V = (Q_{So} - Q_{Si}) \Delta t \quad (۵-۴)$$

که در آن γ' وزن مخصوص مواد ترسیب شده است و ΔV حجمی است که در زمان Δt فرسایش یافته است. Q_{Si} و Q_{So} نیز مقدار بده رسوب خروجی و ورودی می‌باشند. چنان‌چه بتوان مقدار Q_{So} را برآورد کرد، می‌توان مقدار ΔV را از رابطه فوق به‌دست آورد. مطالعات انجام شده در کشور چین نشان می‌دهد که می‌توان رابطه زیر را برقرار کرد [۱۶۵]:

$$Q_{So} = E \frac{Q^{1.6} S^{1.2}}{B^{0.6}} \quad (۶-۴)$$

که در آن E ضریبی است که به اندازه ذرات بستگی دارد و مقدار آن برای ذرات کوچک‌تر از 0.1 میلی‌متر برابر ۶۵۰ و برای ذرات بزرگ‌تر از 0.1 میلی‌متر برابر ۳۰۰ و برای ذرات چسبیده مقدار آن ۱۸۰ است. در این رابطه Q بده جریان خروجی (m^3/sec)، S شیب بستر و B نیز عرض رودخانه برحسب متر است.

۴-۲- روش‌های تجربی پیش‌بینی الگوی رسوب‌گذاری

با رسوب‌گذاری تدریجی در مخزن، منحنی ارتفاع - حجم مخزن نیز تغییر می‌کند. برای پیش‌بینی نحوه‌ی تغییرات این منحنی، روش‌های تجربی برای برآورد توزیع رسوب در مخزن به‌وجود آمده‌اند. این روش‌ها هر چند به دقت روش‌های عددی نیستند ولی خیلی سریع‌تر هستند و به داده‌های اولیه کم‌تری نیاز دارند. پس از انجام عملیات نقشه‌برداری مخزن، از الگوی مشاهده شده توزیع رسوب می‌توان نوع روش تجربی مناسب را برای پیش‌بینی توزیع آن در آینده انتخاب کرد. توجه شود که روش‌های تجربی نمی‌توانند

موقعیت نهشته شدن رسوبات را در مخزن پیش بینی کنند و تنها می توان با این روش ها تغییرات ایجاد شده در روابط ارتفاع - حجم و ارتفاع - سطح مخزن را پیش بینی کرد.

۴-۲-۱- ترسیب در مسیل ها^۱ (بخش تعدیل سیلاب مخزن)

مسیل ها مناطق حاشیه مخزن سد هستند که تنها در زمان های سیلابی مستغرق می شوند. به این مناطق بخش تعدیل سیلاب مخزن نیز گفته می شود. در نتیجه نرخ رسوب گذاری در این مناطق نسبت به سایر مناطق مخزن کم تر است. چنانچه رسوبات زیادی به همراه سیلاب منتقل شوند و تراز سطح آب هم در زمان سیلاب به مدت زمان زیادی بالای تراز مسیل قرار گیرد، امکان نهشته شدن مواد در این مناطق زیاد خواهد بود. برای تخمین میزان رسوبات نهشته شده در این مناطق می توان از شکل (۴-۱۰) استفاده کرد. در این شکل محور عمودی شاخص مسیل و محور افقی در صدی از رسوبات که در مسیل ها تله اندازی شده اند را نشان می دهد. شاخص مسیل نیز توسط رابطه زیر تعریف می شود:

$$F.I = \frac{D_{FP}}{D_{BFP}} \times P \quad (4-7)$$

که در آن: $F.I$ = شاخص مسیل، D_{FP} = عمق آب در مسیل (اختلاف تراز سطح آب تا بستر مسیل)، D_{BFP} = عمق آب زیر بستر مسیل (اختلاف تراز بستر مسیل تا بستر مخزن)، P = درصد زمانی که تراز آب مخزن بالاتر از بستر مسیل قرار دارد.

۴-۲-۲- توزیع رسوب زیر تراز عادی سطح آب مخزن

روش های تجربی توزیع رسوب در مخزن سد توسط سازمان احیای اراضی آمریکا ارایه شده است و به طور گسترده استفاده می شود. این روش ها بر اساس چهار گام اساسی استوار است:

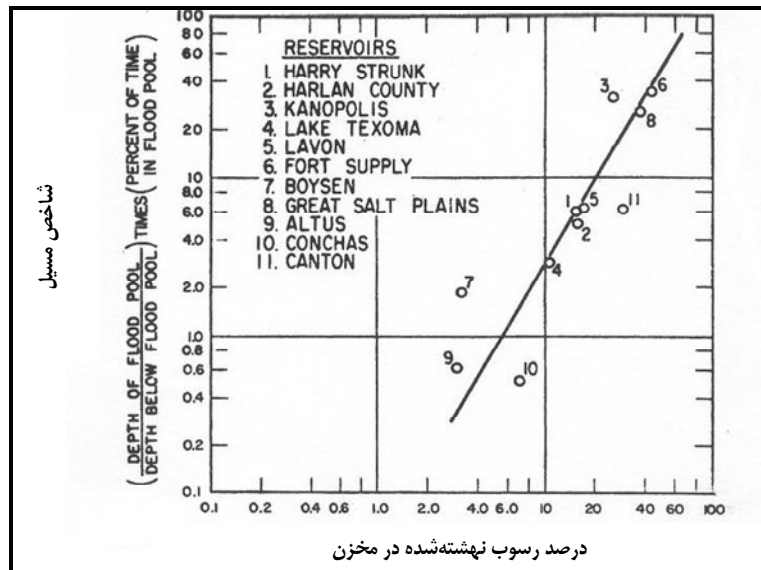
الف- ابتدا حجم مواد رسوبی که باید در مخزن توزیع شود تعیین گردد. در مخازنی که قبلا عملیات نقشه برداری انجام گرفته است و حجم مواد نهشته شده تعیین گردیده، می توان فرض کرد که نرخ رسوب گذاری در آینده نیز با همین منوال صورت خواهد گرفت. در مورد سدهای جدید می توان تلفات حجم مخزن را با استفاده از میزان رسوب ورودی، راندمان تله اندازی و وزن مخصوص ظاهری رسوب تراکم یافته پیش بینی کرد.

ب- با استفاده از وضعیت هندسی مخزن، منحنی استاندارد توزیع رسوب مربوط رسم می گردد. در مخازن موجود، از نتایج توزیع رسوب که با انجام عملیات نقشه برداری مخزن به دست آمده است در تعیین منحنی استاندارد استفاده می شود.

ج- وقتی که رقوم مصالح نهشته شده در مخزن سد تعیین گردید، این رقوم ارتفاع تراز جدید بستر (صفر جدید اشل) خواهد بود.

د- با به کار بردن منحنی استاندارد تعیین شده، مقدار توزیع رسوب بالای تراز جدید بستر محاسبه می گردد. سپس مقدار به دست آمده از منحنی های ارتفاع - سطح و ارتفاع - حجم مخزن کسر تا منحنی های اصلاح شده به دست آیند.

قدم های فوق برای هر حجم رسوب ورودی مجددا برداشته می شود. روش فوق را می توان با استفاده از نرم افزارهایی چون Excel به سادگی انجام داد.



شکل ۴-۱۰ تعیین میزان رسوب در مناطق تسکین سیلاب مخزن [۱۰۳]

۴-۲-۳- روش افزایش - سطح^۱

فرض اساسی در این روش بر این است که احجام رسوب‌گذاری یکسان، با ضخامت یکسانی در مخزن ترسیب می‌شوند. البته توزیع رسوب‌گذاری از یک مخزن به مخزن دیگر متفاوت است ولی قابل پیش‌بینی است. هندسه مخزن، نوع بهره‌برداری و دانه‌بندی رسوب تماماً روی نحوه توزیع رسوب تاثیر می‌گذارند. روش افزایش سطح بر پایه اصول ریاضی استوار می‌باشد و اولین بار توسط کریستوفانو^۲ ارایه گردیده است. در این روش نهشته‌شدن رسوبات در یک مخزن توسط افزایش مساحت مخزن در هر ارتفاع به مقدار ثابت تخمین زده می‌شود. این روش به کمک رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$S = A_0(H - Y_0) + V_0 \quad (۴-۸)$$

که در آن:

S = حجم رسوباتی که باید در مخزن توزیع گردد (مترمکعب)

A_0 = مساحت اولیه مخزن در ارتفاع صفر جدید^۳

H = عمق مخزن در حداکثر سطح نرمال آب (متر)

Y_0 = عمق رسوبات نهشته شده بر حسب متر (ارتفاع صفر جدید)

V_0 = حجم رسوبات در زیر ارتفاع صفر جدید (مترمکعب)

رابطه (۴-۸) در حقیقت بیانگر این مطلب است که کل حجم رسوبات S شامل قسمتی است که به طور یکنواخت در ارتفاع

بالای Y_0 توزیع می‌شود و قسمتی که در زیر ارتفاع صفر نهشته شده است.

1- Area-increment method

2- E.A.Cristofano

3- New zero elevation

۴-۲-۴- روش تجربی کاهش سطح^۱

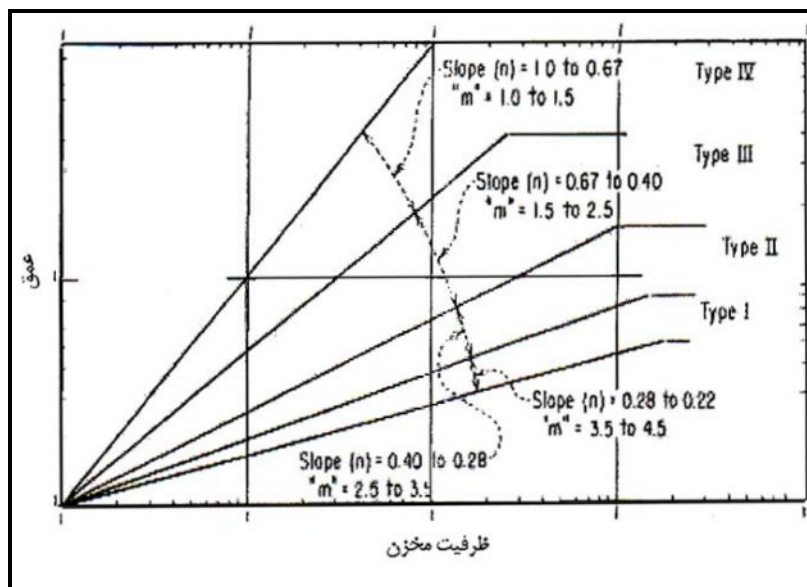
این روش بر پایه نتایج واقعی حاصل از مخازن بزرگ به دست آمده است. بررسی های آبنگاری سدهای مختلف نشان داده است که رابطه ای بین شکل مخزن و درصد رسوبات نهشته شده در عمق های مختلف مخزن وجود دارد. با توجه به این مطلب، برلند و میلر براساس تحلیل ۳۰ سد در ایالات متحده، مخازن را به ۴ نوع استاندارد مطابق جدول (۲-۴) طبقه بندی نمودند.

روش تجربی کاهش سطح برای تعیین توزیع احتمالی رسوبات، در دو مرحله به شرح زیر انجام می گیرد:

- مرحله اول: دسته بندی مخزن مورد نظر در یکی از چهار نوع تیپ منحنی استاندارد، مطابق جدول (۲-۴).
 - مرحله دوم: انجام محاسبات توزیع رسوبات نهشته شده در ارتفاعات مختلف مخزن با آزمون و خطا و با استفاده از متوسط مساحت انتهایی در هر دو ارتفاع متوالی و به کار بردن فرمول منشوری برای برآورد حجم رسوب، تا زمانی که حجم تجمعی رسوب محاسبه شده مساوی حجم رسوب تعیین شده از قبل گردد.
- مقدار پارامتر m در جدول (۲-۴) بدین ترتیب تعیین می گردد که ابتدا ظرفیت مخزن (بر روی محور افقی) و عمق مخزن (بر روی محور عمودی) در یک کاغذ تمام لگاریتمی رسم می شود. سپس عکس شیب خط حاصل محاسبه می گردد که برابر مقدار m می باشد همان طور که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. شکل (۴-۱۳) نیز مقدار m را در تعدادی از سدهای ایران نشان می دهد.

جدول ۴-۲- شماره یا نوع استاندارد مخازن [۱۴۷]

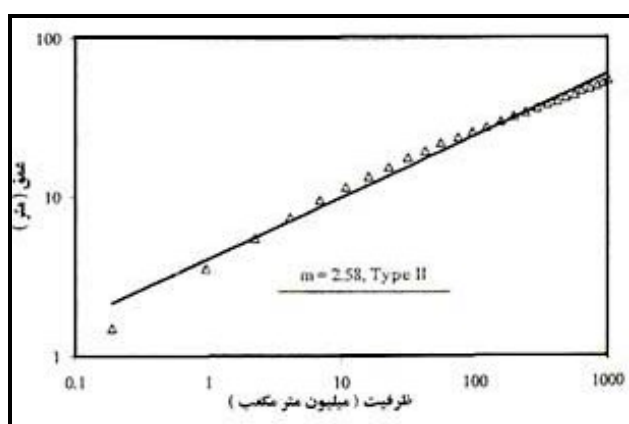
شماره یا نوع استاندارد	نوع مخزن	پارامتر "m"
I	دریاچه معمولی ^۲	۳/۵-۴/۵
II	سیل دشت تپه ای ^۳	۲/۵-۳/۵
III	کوهپایه ای ^۴	۱/۵-۲/۵
IV	دره ای شکل، کوهستانی ^۵	۱-۱/۵

شکل ۴-۱۱- مقادیر مختلف m در روش کاهش سطح [۱۴۷]

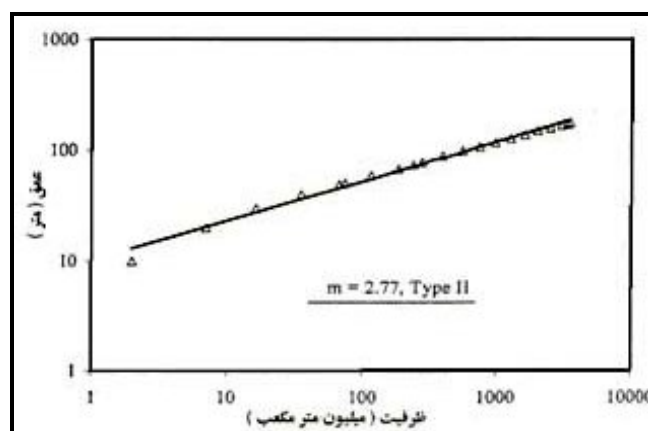
- 1- Empirical area reduction method
- 2- Lake
- 3- Hill
- 4- Gorge
- 5- Flood plain-Foot hill

توجه شود که مقدار m با افزایش نسبت رسوبات به ظرفیت مخزن تغییر می‌کند، شکل ۴-۱۳ تغییرات m در سد دز را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد، به طوری که مخزن مورد نظر از تیپ استاندارد مخازن منحرف می‌شود که در این صورت روش کاهش سطح کم‌تر کاربرد دارد.

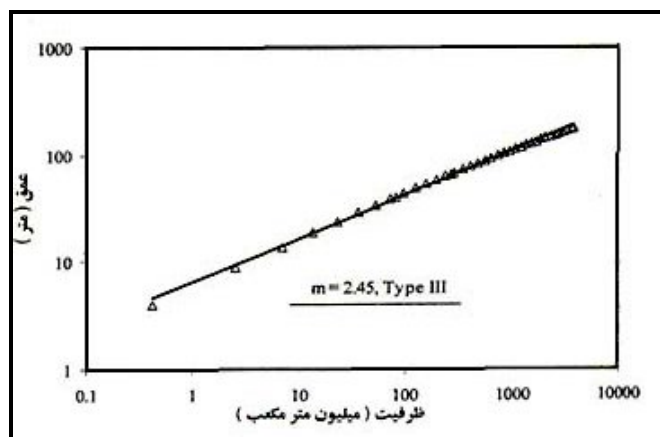
با مراجعه به منحنی‌های ارتفاع - سطح و ارتفاع - حجم اولیه مخزن و با داشتن میزان رسوباتی که در طی مدت معین در پشت سد جمع خواهد شد، می‌توان با چندین تقریب حجم رسوب محاسبه شده را با حجم رسوب تعیین شده از قبل برابر نمود. بدین ترتیب ارتفاع رسوب جمع شده در مخزن محاسبه خواهد شد. این روش می‌تواند برای هر محدوده‌ای از عمق مخزن تا حداکثر سطح آب به کار برده شود. نهایتاً منحنی‌های ارتفاع - سطح و ارتفاع - حجم مخزن پس از رسوب‌گذاری ترسیم می‌گردد.



ب- سد درود زن

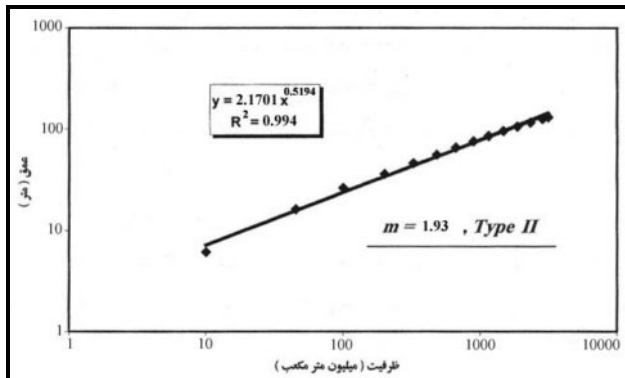


الف- سد دز

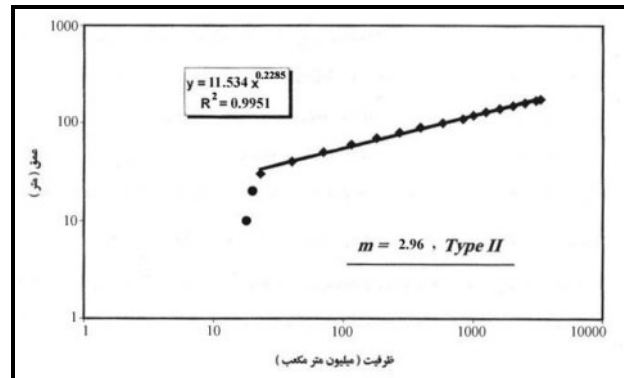


ج- سد شهید عباسپور

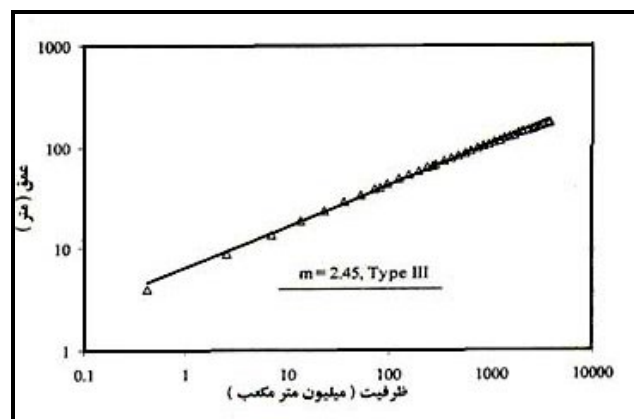
شکل ۴-۱۲- مقدار m در تعدادی از سدهای ایران [۲۳]



ب- سال ۱۳۶۲



الف- سال ۱۳۴۱



ج- سال ۱۳۷۶

شکل ۴-۱۳- تغییرات مقدار m و نوع مخزن در سد دز نسبت به زمان [۲۳]

مقایسه بین نتایج حاصله از روش تجربی کاهش سطح با نتایج واقعی به دست آمده از مخازن، هماهنگی خوبی را نشان داده است. بنابراین، از این روش به خوبی می توان برای کنترل اولیه توزیع احتمالی رسوب استفاده کرد. در روش تجربی کاهش سطح، ضریب عمق نسبی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$P = \frac{Y}{H} \quad (۹-۴)$$

که در آن:

Y = تراز ارتفاعی از کف مخزن

H = اختلاف ارتفاع بین سطح تراز نرمال آب (تاج سرریز) و تراز کف مخزن

در هر عمق نسبی، یک مساحت نسبی رسوبات وجود دارد. این مساحت بر طبق روابط تجربی به دست آمده توسط برلند و برای هر یک از انواع تیپ مخازن در جدول (۳-۴) ارائه شده است. لازم به توضیح است که ستون دوم این جدول روابط ارائه شده توسط برلند و میلر و ستون سوم جدول روابط اصلاح شده توسط مودی را بیان می کنند که هر دو برای مقایسه در یک جدول برای انواع تیپ های مخازن آورده شده اند.

جدول ۴-۳- مقایسه بین روابط به‌دست آمده توسط برلند و میلر و مودی برای مساحت نسبی رسوب [۲۳]

نوع مخزن	برلند و میلر	مودی
I	$a = 3.417P^{1.5}(1-P)^{0.2}$	$a = 5.074P^{1.85}(1-P)^{0.35}$
II	$a = 2.324P^{0.5}(1-P)^{0.4}$	$a = 2.487P^{0.57}(1-P)^{0.41}$
III	$a = 15.238P^{1.1}(1-P)^{2.3}$	$a = 16967P^{-1.15}(1-P)^{2.32}$
IV	$a = 4.232P^{0.5}(1-P)^{2.5}$	$a = 1.486P^{-0.25}(1-P)^{1.34}$

در این جدول، a مساحت نسبی و P عمق نسبی است. شکل‌های (۴-۱۳ الف) و (۴-۱۳ ب) ترسیم سطح نسبی رسوب درمقابل عمق نسبی را برای روش‌های مودی و برلند و میلر نشان می‌دهند.

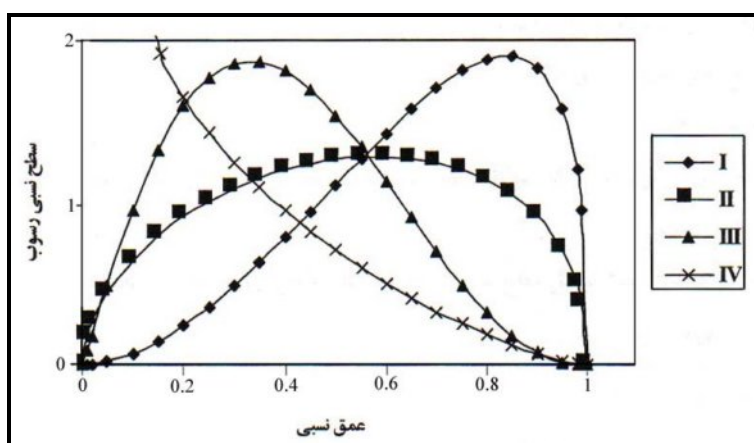
معادله اساسی در روش کاهش سطح به قرار زیر است:

$$S = \int_0^{Y_0} A dy + \int_{Y_0}^H K.a.dy \quad (۴-۱۰)$$

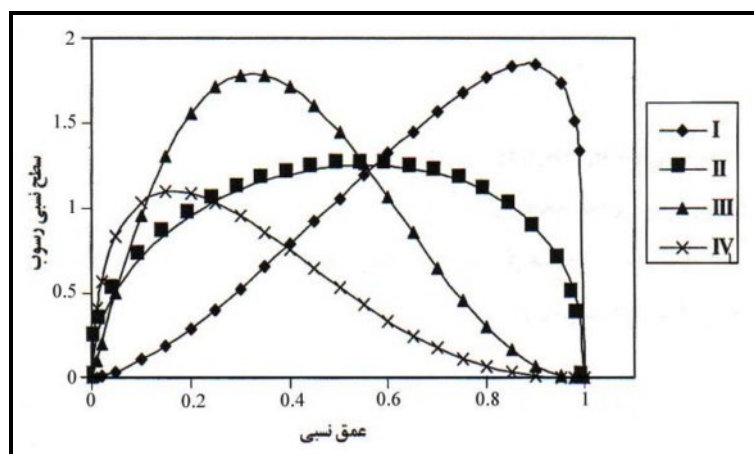
در این معادله متغیرهای به کار رفته عبارتند از:

S = حجم کل رسوب که در مخزن نهشته می‌شود.

H = ارتفاع مخزن در تراز عادی



الف- روش مودی



ب- روش برلند و میلر

شکل ۴-۱۴- ترسیم سطح نسبی رسوب درمقابل عمق نسبی [۱۷]

Y_0 = تراز بستر رسوبات پس از انباشت رسوب

A = سطح مخزن در ترازهای مختلف

dy = جزر ارتفاع

a = سطح نسبی رسوب است که پس از انتخاب نوع مخزن، مقادیر آن به ازای مقادیر مختلف عمق نسبی P قابل محاسبه است.

K = ضریب تناسب جهت تبدیل سطح نسبی رسوب به سطح واقعی و از رابطه (۴-۱۱) به دست می آید:

$$K = \frac{A_0}{a_0} \quad (۴-۱۱)$$

که در آن:

A_0 = سطح واقعی مخزن در تراز Y_0

a_0 = سطح نسبی مخزن در تراز Y_0

ترم اول معادله (۴-۱۰) حجم رسوبات ته نشین شده از کف تا ارتفاع Y_0 و ترم دوم آن حجم رسوبات از تراز Y_0 تا تراز نرمال سد خواهد بود. با انتگرال گیری از معادله اخیر و پس از ساده نمودن، معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{1 - v_0}{a_0} = \frac{S - V_0}{HA_0} \quad (۴-۱۲)$$

که

v_0, V_0 = حجم واقعی و نسبی مخزن در تراز Y_0

A_0, a_0 = سطح نسبی و واقعی مخزن در تراز Y_0

در روش مودی هدف محاسبه Y_0 ، یعنی تعیین عمق رسوبات نهشته شده در مخزن می باشد. جهت تعیین Y_0 توابع $h_{(p)}$

و $h'_{(p)}$ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$h_{(p)} = \frac{1 - V_{(p)}}{a_{(p)}} \quad (۴-۱۳)$$

$$h'_{(p)} = \frac{S - V_{(Y)}}{H.A_{(Y)}} \quad (۴-۱۴)$$

با توجه به این که $P = \frac{Y}{H}$ است، در نتیجه:

$$h'_{(p)} = \frac{S - V_{(P,H)}}{H_0.A_{(P,H)}} \quad (۴-۱۵)$$

که در آنها:

H = ارتفاع کف مخزن تا تراز نرمال سطح آب مخزن

$h_{(p)}$ = تابعی از عمق نسبی، سطح نسبی، حجم نسبی مخزن بر اساس یکی از چهار نوع مخزن

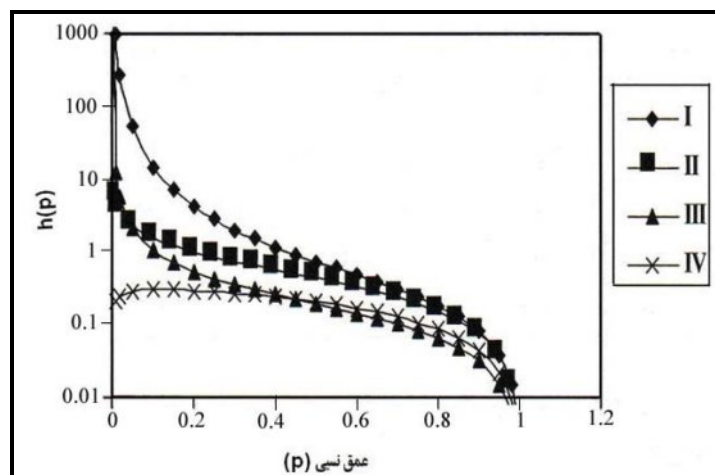
$h'_{(p)}$ = تابعی از عمق، سطح و حجم مخزن و نیز حجم رسوبات درون مخزن برای مخزن موردنظر

$V_{(P,H)}$ = ظرفیت مخزن در تراز داده شده

$S =$ حجم کل رسوبات ورودی به مخزن که نهشته می‌شود

$A_{(p,H)} =$ سطح مخزن در تراز داده شده

در شکل (۱۵-۴) منحنی‌های $h(p)$ برحسب عمق نسبی P برای هر یک از تیپ‌های مختلف مخزن نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۴- منحنی‌های $h(p)$ برحسب عمق نسبی P [۱۷]

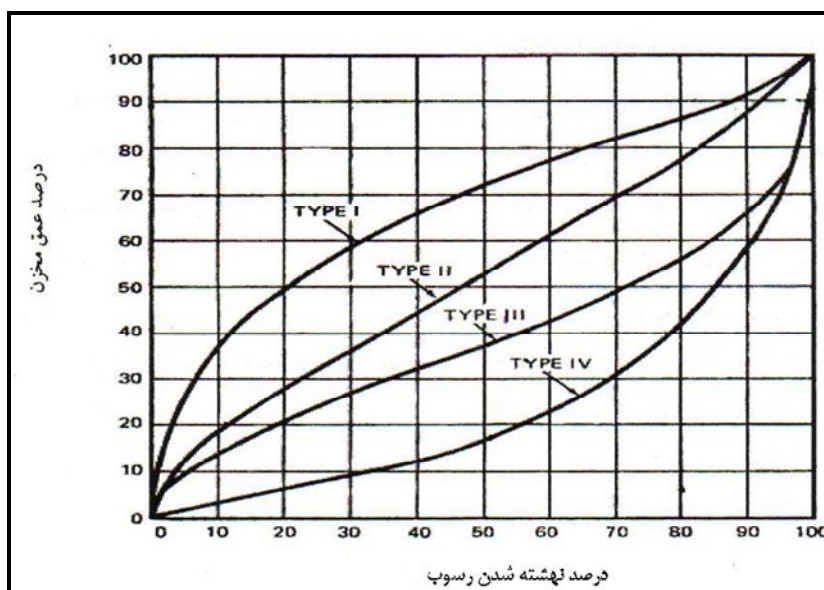
با توجه به معادله (۱۲-۴) ملاحظه می‌گردد که برای محاسبه عمق رسوبات در سدها باید معادلات (۱۳-۴) و (۱۴-۴) با یکدیگر مساوی شوند. این کار به صورت نموداری می‌تواند انجام گیرد. با رسم مقادیر $h'(p)$ از رابطه (۱۵-۴) بر روی شکل (۱۵-۴) و امتداد آن تا جایی که منحنی مربوط به معادله (۱۲-۴) را که برای انواع مختلف مخازن رسم شده قطع نماید. محل تلاقی خط رسم شده با منحنی مربوط به مخزن در دست مطالعه مقدار P یا عمق نسبی رسوبات است. مقدار Y_0 از ضرب P در H تعیین می‌شود.

منحنی‌های ظرفیت تحلیلی و طراحی مساحت که توسط مودی اصلاح شده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a(p) = p^m (1-p)^n / \beta(m+1, n+1) \quad (۱۶-۴)$$

$$V(p) = \int_0^p a(p).dp \quad (۱۷-۴)$$

مقادیر پارامترهای m و n به کمک تحلیل رگرسیون و روش کم‌ترین مجذور مربعات با منطبق نمودن منحنی ارایه شده در معادله (۱۷-۴) روی منحنی‌های توزیع موجود در شکل (۱۶-۴) برای انواع تیپ‌های مختلف مخازن به دست می‌آیند. این کار با حداقل نمودن مجموع مربعات اختلاف با مقادیر تحلیلی قابل انجام است. مودی نتیجه گرفت که منحنی ارایه شده در شکل (۱۶-۴) کاملاً منطبق بر منحنی برلند و میلر است. مقادیر m و n ارایه شده توسط مودی و برلند جهت مقایسه در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶- منحنی های برازش داده شده برای انواع مختلف مخازن [۱۴۷]

جدول ۴-۴- مقایسه مقادیر m و n ارایه شده توسط برلند و میلر و مودی [۱۴۷]

مودی		برلند و میلر		نوع مخزن
m	n	m	n	
۱/۸۵	۰/۳۶	۱/۵	۰/۲	I
۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۵	۰/۴	II
-۱/۱۵	۲/۳۲	۱/۱	۲/۳	III
-۲/۲۵	۱/۳۴	۰/۱	۲/۵	IV

در ایران اغلب محققین و طراحان جهت برآورد توزیع رسوب در مخزن از روش های کاهش سطح و افزایش سطح استفاده کرده اند. این کار در سدهای دز، سفید رود، درودزن، کرج و لتیان انجام شده است.

قمشی در سال ۱۳۶۷ نحوه رسوب گذاری در سد دز را مورد مطالعه قرار داده و در این رابطه از روش های تجربی کاهش سطح استفاده کرده است. منحنی های سطح - حجم - ارتفاع اولیه سد موجود بوده است. قمشی نتیجه گرفت که بعد از ۱۱۴ سال، رسوبات نیمی از ظرفیت اولیه مخزن را دربر می گیرد و بعد از ۱۹۴ سال ۸۰ درصد از ظرفیت اولیه مخزن، توسط رسوبات اشغال می شود. همچنین طبق نتایج روش کاهش سطح مشخص گردید که ۳۹ سال بعد از بهره برداری سد، رسوبات در پشت سد تا مرکز دریاچه های آبیاری سد می رسند و ۸۲ سال بعد از بهره برداری، رسوبات تا رقوم لبه دریاچه توربین ها خواهند رسید که ممکن است مسایلی را به همراه داشته باشد.

رهنمایی روش های افزایش سطح و کاهش سطح را برای تعیین توزیع رسوبات مخزن سد کرج به کار برده و نتایج حاصله را با اندازه گیری های انجام شده در سال ۱۳۷۰ مقایسه کرده است. در این مطالعه مقادیر سطح و حجم در ترازهای مختلف مخزن، از روش های کاهش سطح و افزایش سطح محاسبه شده و با مقادیر واقعی متناظر آن ها که با اندازه گیری صحرائی به دست آمده مقایسه گردیده است. حجم های حاصل از دو روش تجربی، در رقوم های بالایی تقریباً با هم برابر بودند و نسبت به مقادیر واقعی، خطای ناچیزی داشتند. در رقوم های متوسط، تفاوت مختصری بین سه روش مشاهده شد و در رقوم های پایین تفاوت دو روش کاهش سطح و افزایش سطح زیادتر می شود و اگر چه هر دو روش نسبت به مقادیر واقعی (اندازه گیری شده) خطای قابل توجهی دارند ولی نتایج حاصل از روش کاهش سطح به مقادیر واقعی نزدیک تر است. لذا روش کاهش سطح برای مخزن سد کرج نتایج بهتری داده است.

عابدینی و طالب بیدختی (۱۳۶۸) نحوه توزیع رسوب در مخزن سد درودزن را با استفاده از روش کاهش سطح مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مشخص گردید که روش پیشنهادی مودی علاوه بر این که باعث حذف آزمون و خطاهای متعدد می‌گردد، عمق رسوبات و توزیع آن‌ها را به طور مستقیم محاسبه می‌نماید که در سد درودزن بعد از گذشت ۵۰ سال رسوبات در پشت سد تا ارتفاع ۱۲/۲ متر بالا می‌آید. تقوی و طالب بیدختی (۱۳۷۴) توزیع رسوب در مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود را مورد بررسی قرار دادند. متوسط خطا برای روش کاهش سطح برای سد درودزن ۲۴ درصد و برای روش افزایش سطح ۳۳/۱۵ درصد به دست آمده است. برای سد دز متوسط خطا از روش کاهش سطح ۳/۸۹ درصد و از روش افزایش سطح ۳/۲۶ درصد، برای سد لتیان متوسط خطا از روش کاهش سطح ۱۴/۴۹ و از روش افزایش سطح ۲۳/۷۲ و برای سد کرج متوسط خطا از روش کاهش سطح ۴۲/۱۵ و از روش افزایش سطح ۵/۴۷ درصد محاسبه گردیده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش افزایش سطح دارای متوسط خطای کم‌تری نسبت به روش کاهش سطح می‌باشد و هر دو روش دارای دقت قابل قبولی است.

شعبانلو (۱۳۷۹) نیز در یک مطالعه جامع به بررسی نحوه رسوب‌گذاری در سدهای اکباتان، امیرکبیر، درودزن، دز، زاینده‌رود، طرق، قشلاق، کارده، لتیان و مغان با به‌کار بردن روش‌های کاهش سطح و افزایش سطح اقدام نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که مقادیر خطا در رقوم‌های پایین مخزن بسیار بالا است. زیرا در این رقوم تاثیر توپوگرافی به دلیل حجم کم بیش‌تر است. شعبانلو میزان متوسط خطا و انحراف معیار مقادیر محاسبه شده با داده‌های آبنگاری سدهای فوق را به شرح جدول (۴-۵) ارائه کرد. در این جدول E مقدار میانگین خطا و Se انحراف معیار می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان خطا در مواردی بسیار زیاد است و دلیل آن هم این است که این روش‌ها بر اساس تعداد اندکی متغیر مستقل بنا نهاده شده‌اند.

هم‌چنین طلوعی (۱۹۸۹) روش‌های تجربی را در مخزن سد سفید رود اعمال و نتیجه گرفت که روش کاهش سطح به داده‌های هیدروگرافی مخزن نزدیک‌تر است.

جدول ۴-۵- مقادیر خطا و انحراف معیار در تعدادی از سدهای ایران [۲۳]

مغان	لتیان	کارده	قشلاق	طرق	زاینده‌رود	دز	درودزن	امیرکبیر	اکباتان		
۵۰/۲۳	۱۶/۹	۳۷/۳۳	۹۴/۵۴	۵۰/۹۶	۴۷/۱۱	۶۶/۴۴	۵۳/۲۸	۱۲۹/۰۵	۱۶/۷۹	E	کاهش سطح به
۲/۴۶	۲/۷۱	۲/۶۳	۱۸/۳	۲/۲۴	۴۲/۰۸	۳۴۳/۲۸	۴۵/۲۲	۱۱/۲۶	۰/۲۲	Se	طریق برلند و میلر
۲۰/۲۶	۴۷/۲۲	۵۲/۰۳	۱۰۹/۵۱	۷۸/۶	۱۱۹/۶۳	۷۶/۶۳	۶۳/۸۸	۱۳۶/۱۴	۶۱/۰۱	E	افزایش سطح به
۰/۷۳	۴/۴۱	۳/۲۶	۲۴/۳۲	۳/۱۷	۱۰۷/۱۱	۳۹۰/۰۷	۵۸/۶۸	۱۲/۹۱	۰/۴۴	Se	طریق برلند و میلر
۶۴/۲۲	۱۶/۹۵	۵۳/۸۵	۱۲۹/۴۹	۳۶/۹۶	۸۴/۶۱	۷۲/۷۵	۵۷/۶۱	۸۶/۳۳	۲۱/۷۶	E	کاهش سطح به
۲/۵	۲/۷۶	۳/۶	۳۴/۰۹	۲/۲۵	۸۷/۱۸	۳۶۶/۶۱	۴۹/۸	۱۳/۲	۰/۳۴	Se	طریق مودی
۲۷/۱	۲۸/۲۳	۵۳/۸۶	۱۲۸/۵	۶۱/۷۸	۵۱/۶۲	۶۷/۵۶	۵۹/۶۱	۱۲۷/۰۲	۴۸/۹۷	E	افزایش سطح به
۱/۹۶	۷/۶۲	۳/۷	۳۶/۰۹	۲/۶۸	۱۲۳/۰۴	۳۸۳/۳۸	۵۲/۸۸	۱۱/۷۵	۱/۳	Se	طریق مودی

۴-۳- عمر مفید سد^۱

مخازن سدها به تدریج از رسوب پر می‌شود و مدت زمانی که حجم باقیمانده مخزن آنقدر کم باشد که اهداف مورد نظر اولیه ساخت مخزن یعنی کنترل سیل، تنظیم آب و تولید انرژی را تامین نکند، مخزن سد دیگر سودی نداشته باشد. این مدت زمان به عوامل زیادی از جمله به میزان رسوب نهشته شده در مخزن، وزن مخصوص رسوب نهشته شده و شرایط بهره‌برداری از مخزن بستگی دارد که در این قسمت توضیح داده می‌شوند.

۴-۳-۱- راندمان تله اندازی^۱

راندمان تله اندازی مخزن عبارت است از درصدی از میزان رسوب ورودی که در یک دوره مشخص در مخزن باقی می ماند. به عبارت ریاضی می توان نوشت:

$$T_e = \frac{Q_{SI} - Q_{S0}}{Q_{SI}} \times 100 \quad (4-18)$$

که در آن

T_e = راندمان تله اندازی بر حسب درصد

Q_{SI} = حجم رسوب ورودی به مخزن سد در سال

Q_{S0} = حجم رسوب خروجی از مخزن سد در سال

با توجه به این که مقدار رسوب ورودی یا رسوب خروجی و یا هر دو نسبت به زمان تغییر می کنند، راندمان تله اندازی نیز یک متغیر زمانی است و در طول عمر مخزن تغییر می کند به طوری که ممکن است میزان راندمان تله اندازی تا ۵۰ درصد نسبت به مقدار اولیه آن تغییر کند. تعیین راندمان تله اندازی از این نظر اهمیت دارد که با استفاده از آن می توان حجم از دست رفته مخزن را در هر سال بر آورد کرد. مقدار تلفات حجم مخزن که سالانه پر از رسوب می شود را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha = \frac{Q_{SI} - Q_{S0}}{C_t} \quad (4-19)$$

که در آن C_t حجم مخزن در ابتدای هر سال می باشد. با ضرب کردن سمت راست معادله فوق در $\frac{Q_{SI}}{Q_{SI}}$ می توان نوشت:

$$\alpha = \frac{Q_{SI} - Q_{S0}}{Q_{SI}} \times \frac{Q_{SI}}{C_t} = T_e \frac{Q_{SI}}{C_t} \quad (4-20)$$

که در آن:

T_e راندمان تله اندازی،

Q_{SI} وزن رسوب ورودی به مخزن سد می باشد.

بنابراین با داشتن مقدار T_e و Q_{SI} حجم رسوب ورودی سالانه و C_t و استفاده از رابطه (۴-۲۰)، می توان مقدار درصد تلفات حجم مخزن در هر سال را محاسبه کرد که در بند ۴-۳-۳ توضیح داده شده است.

۴-۳-۱-۱- عوامل موثر بر راندمان تله اندازی

خصوصیات هیدرولیکی مخزن و همچنین خصوصیات رسوب از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر راندمان تله اندازی می باشند. عوامل هیدرولیکی مخزن عبارتند از:

الف- نسبت حجم ذخیره مخزن به حجم جریان آب ورودی

ب- شکل مخزن

ج- مشخصات دریچه های تحتانی

د- شرایط بهره برداری از مخزن

نسبت حجم ذخیره مخزن به حجم جریان ورودی معرف مدت زمان انتقال جریان در مخزن می‌باشد. به طوری که هر چه این مدت افزایش یابد، سرعت متوسط انتقال جریان و همچنین شدت تلاطم جریان کاهش می‌یابد که در نتیجه میزان نهشته شدن مواد رسوبی افزایش می‌یابد، یا به عبارتی می‌توان گفت که مقدار راندمان تله‌اندازی افزایش می‌یابد.

شکل مخزن نیز معرف میزان تاثیر مدت زمان انتقال می‌باشد. در بعضی از مخازن به دلیل شکل خاص مخزن، جریان در بخشی از آن وجود ندارد در نتیجه در این مخازن هر چند مقدار نسبت حجم مخزن به جریان ورودی ممکن است زیاد باشد ولی مقدار رسوب نهشته شده کم و یا راندمان تله‌اندازی کم‌تر خواهد بود.

موقعیت دریچه‌های تحتانی به خصوص اگر از آنها برای خروج جریان‌های غلیظ (چگال) استفاده شود نیز ممکن است باعث کاهش راندمان تله‌اندازی مصالح ریزدانه رس گردد. پایین آوردن سطح آب مخزن نیز باعث خواهد شد مدت زمان انتقال جریان در مخزن افزایش و در نتیجه کاهش راندمان تله‌اندازی را سبب گردد. چنین شرایطی به خصوص در زمان سیلاب باعث نهشته شدن رسوب کم‌تری در مخزن می‌گردد.

خصوصیات رسوب که نقش موثری در میزان راندمان تله‌اندازی دارند عبارتند از:

الف- دانه‌بندی رسوب ورودی

ب- شکل ذره

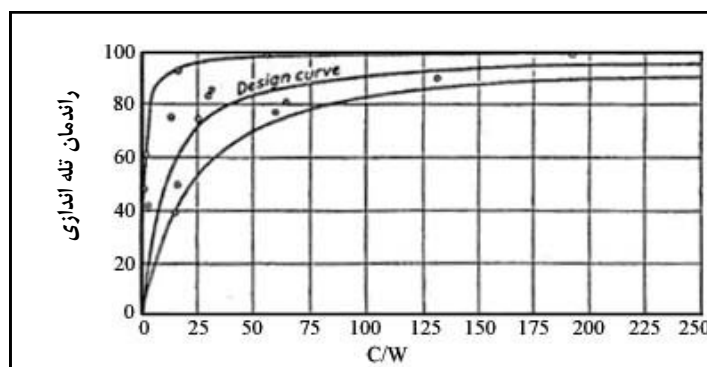
ج- رفتار رسوبات ریزدانه در شرایط مختلف درجه حرارت، غلظت، ترکیب مواد شیمیایی، جریان‌های ثانویه و شدت آشفتگی جریان. اندازه ذرات و شکل ذرات روی سرعت سقوط ذرات تاثیر دارند. رسوبات ریزدانه نظیر رس و لای معمولاً تا رسیدن به دریچه‌های تحتانی معلق هستند.

درجه حرارت، غلظت و ترکیب شیمیایی آب نیز روی سرعت سقوط ذرات و در نتیجه ترسیب آنها موثر هستند.

۴-۳-۱- روش‌های برآورد راندمان تله‌اندازی

۴-۳-۱-۱- روش ظرفیت حوضه یا روش براون

این روش توسط براون بر اساس مطالعات تجربی از سدهای آمریکا ارایه شده است. در این روش راندمان تله‌اندازی به صورت تابعی از نسبت حجم مخزن (C) به سطح حوضه (W) تعریف شده است. منحنی ارایه شده توسط براون در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است:



شکل ۴-۱۷- منحنی براون برای تعیین راندمان تله‌اندازی [۲۱]

در منحنی براون C بر حسب ایکر - فوت و W بر حسب مایل مربع می باشد. در شکل (۴-۱۷) سه منحنی رسم شده است که منحنی بالا و پایین حدود داده های تجربی را نشان می دهد. در بیش تر مواقع از منحنی وسطی استفاده می شود. معادله این منحنی به شرح زیر است:

$$T_e = 100 \left[1 - \frac{1}{1 + K \frac{C}{W}} \right] \quad (۴-۲۱)$$

مقدار ضریب K در این رابطه بین ۰/۴۶ تا ۱/۰ تغییر می کند و مقدار متوسط آن ۰/۱ است. منحنی براون تنها از حجم اولیه مخزن و مساحت حوضه برای تعیین راندمان تله اندازی استفاده می کند و از این رو در شرایطی استفاده می شود که تنها این دو متغیر مشخص باشند.

۴-۳-۱-۲- روش حجم - جریان یا روش برون

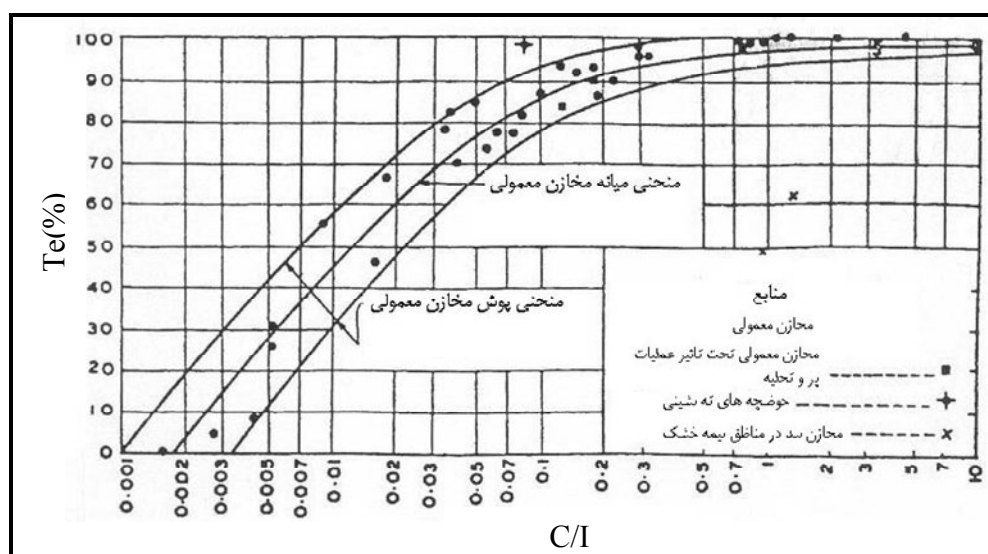
این روش توسط برون و بر اساس مطالعات انجام شده بر روی نزدیک به ۲۰۰ مخزن سد در آمریکا به وجود آمده است. در این روش مقدار راندمان تله اندازی به نسبت حجم اولیه مخزن به مقدار حجم جریان ورودی سالانه ارتباط داده شده است. شکل (۴-۱۸) منحنی های به وجود آمده توسط برون را نشان می دهد. از این منحنی ها نمی توان برای حوضچه های ترسیب یا مخازنی که معمولا خالی هستند استفاده کرد. در این شکل نیز سه منحنی ارایه شده است که منحنی های بالا و پایین تنها محدوده ی داده ها را نشان می دهند و منحنی میانی، برای اهداف طراحی استفاده می شود. معادله این منحنی به شرح زیر است:

$$T_e = 100 \left[0.97^{0.19 \log \left(\frac{C}{I} \right)} \right] \quad (۴-۲۲)$$

و یا

$$T_e = 100 \left[1 - \frac{1}{1 + 100(C/I)} \right]^{1.5} \quad (۴-۲۳)$$

بر اساس مطالعات اداره مهندسين ارتش آمریکا، رابطه برون دقیق تر از رابطه براون می باشد.



شکل ۴-۱۸- منحنی برون برای تعیین راندمان تله اندازی [۲۳]

۳-۴-۱-۲-۳- روش شاخص رسوب^۱ و یا روش چرچیل

چرچیل نیز در سال ۱۹۴۸ روش تجربی را برای محاسبه راندمان تله‌اندازی ارائه داد. در این روش درصد رسوبات خارج شده از مخزن سد به شاخص رسوب‌گذاری مرتبط شده است. این رابطه در شکل (۴-۱۹) ارائه شده است. شاخص رسوب‌گذاری مخزن عبارت است از نسبت طول مدت انتقال به سرعت متوسط جریان در مخزن و یا به عبارتی برابر است با:

$$S.I. = \frac{T_T}{V} \quad (4-24)$$

که در آن T_T مدت انتقال (ثانیه) و V سرعت متوسط جریان است. مقادیر T_T و V از روابط (۴-۲۵) و (۴-۲۶) محاسبه می‌شوند.

$$T_T = \frac{C_R}{I_D} \quad (4-25)$$

$$V = \frac{I_D}{A_M} \quad (4-26)$$

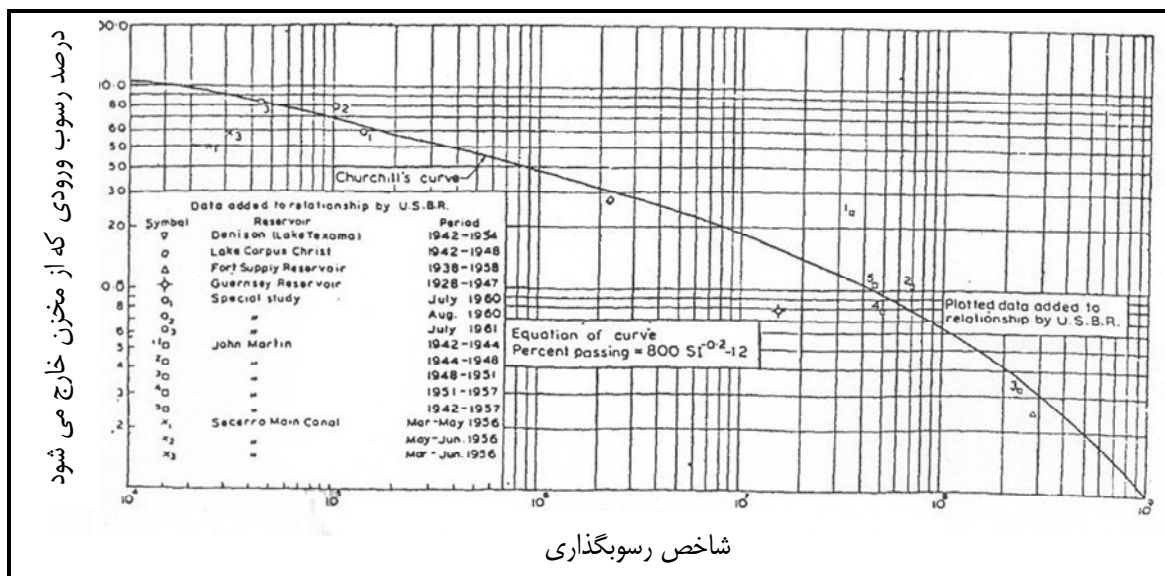
که در آن C_R حجم مخزن در تراز عادی سطح آب و I_D مقدار بده متوسط جریان ورودی روزانه و A_M هم سطح مقطع متوسط مخزن می‌باشد که برابر است با:

$$A_M = \frac{C_R}{L_R} \quad (4-27)$$

که در آن L_R طول مخزن در تراز عادی سطح آب می‌باشد.

با ترکیب روابط فوق می‌توان مقدار شاخص رسوب را از رابطه زیر هم به دست آورد:

$$S.I. = \frac{C_R A_M}{I_R^2} = \frac{(C_R)^2}{(I_D)^2 L_R} \quad (4-28)$$



شکل ۴-۱۹- منحنی چرچیل برای تعیین راندمان تله‌اندازی [۳۴]

برای محاسبه راندمان تله اندازی با روش چرچیل پس از تعیین شاخص رسوب گذاری از رابطه (۴-۲۸)، مقدار درصد رسوب خروجی از سد از شکل (۴-۱۹) تعیین می شود. سپس این مقدار از ۱۰۰ کسر می گردد تا راندمان تله اندازی محاسبه شود.

۴-۳-۱- روش تجربی محاسبه درصد تلفات حجم مخزن

براساس مطالعات انجام شده در مخازن واقع در حوضه های شمال و شمال غرب چین و برای مخازن کوچک و متوسط رابطه زیر برای محاسبه درصد تلفات سالانه حجم مخزن استخراج شده است [۱۶۱]:

$$\alpha = 0.0002 E_a^{0.95} \left(\frac{C}{A} \right)^{-0.8} \quad (۴-۲۹)$$

در این رابطه:

α = درصد تلفات سالانه حجم مخزن

E_a = نرخ فرسایش سالانه حوضه بالادست مخزن (تن در هر کیلومتر مربع)

C = حجم اولیه مخزن (m^3)

A = سطح حوضه بالادست مخزن (m^2)

۴-۳-۱- تغییرات راندمان تله اندازی با زمان

براساس مطالعات دانشگاه های سینگوای چین، مقدار راندمان تله اندازی با زمان مطابق رابطه زیر تغییر می کند [۱۶۱].

$$T_{et} = T_e \left[1 - \frac{W_t}{W_o} \right]^n \quad (۴-۳۰)$$

که در آن T_{et} راندمان تله اندازی در زمان t و T_e راندمان اولیه تله اندازی است. W_t برابر است با مقدار حجم رسوب نهشته شده در زمان t و W_o حجم رسوب نهشته شده نهایی است. مقدار n شاخص کاهش راندمان تله اندازی است که بستگی به مشخصات مخزن دارد و برای مخازن چین مقدار آن بین صفر و ۰/۹۵ متغیر است. مخازنی که به طور مرتب رسوب زدایی می شوند دارای n بزرگ تری هستند. برای تعیین مقدار n در یک مخزن بهتر است از نتایج حاصل از نقشه برداری های قبلی استفاده و مقدار راندمان تله اندازی در زمان های مختلف در مقابل $(1 - W_t/W_o)$ و بر روی کاغذ لگاریتمی رسم گردد. شیب منحنی مربوط برابر n خواهد بود.

۴-۳-۲- وزن مخصوص رسوبات مخزن

وزن خشک مواد رسوبی نهشته شده در واحد حجم را وزن مخصوص ظاهری، وزن واحد حجم و یا دانسیته ظاهری می گویند. مقدار وزن مخصوص رسوبات مخزن تحت تاثیر پدیده تراکم رسوبات، به مرور زمان افزایش یافته و در نتیجه حجم کمتری از مخزن را اشغال می کنند. از این رو به منظور برآورد حجم از دست رفته باید وزن مخصوص فعلی رسوبات را برآورد کرد. در این قسمت روش های برآورد وزن مخصوص رسوب نهشته شده ارایه شده است.

۴-۳-۲-۱- وزن مخصوص اولیه رسوبات

مقدار وزن مخصوص اولیه رسوب تابعی از اندازه ذرات می‌باشد. از روابط زیر می‌توان برای محاسبه مقدار وزن مخصوص اولیه رسوب استفاده کرد:

$$\gamma_0 = 1.41 \left(\frac{D_s}{D_s + 4\delta} \right)^3 \quad D_s \leq 1 \text{ mm} \quad (31-4)$$

$$\gamma_0 = 1.98 - 0.47 \exp \left(-0.095 \frac{D_s - D_{se}}{D_{se}} \right) \quad D_s > 1 \text{ mm} \quad (32-4)$$

که در این معادلات γ_0 وزن مخصوص اولیه بر حسب تن در مترمکعب، D_s اندازه رسوب (برحسب میلی‌متر) $\delta = 4 \times 10^{-4}$ و D_{se} برابر اندازه معرف ذره که برابر ۱ میلی‌متر است.

وزن مخصوص حقیقی ذرات رسوبی تقریباً ۲/۶۵ تن در هر متر مکعب می‌باشد. جدول (۴-۶) توسط اداره حفاظت منابع طبیعی آمریکا، محدوده‌ی وزن مخصوص ظاهری ذرات رسوبی نهشته شده در مخزن سدها را بر حسب تن در هر مترمکعب یا گرم در هر سانتی متر مکعب نشان می‌دهد.

مقدار وزن مخصوص ظاهری رسوبات نهشته شده را به طور تقریبی می‌توان از روابط کولرز و لارا به صورت زیر برآورد کرد:

$$\gamma_s = 51(p+2)^{0.13} \quad (33-4)$$

که در آن γ_s وزن مخصوص ظاهری رسوبات نهشته شده بر حسب پوند بر فوت مکعب و P درصد وزنی مصالح درشت‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۴-۶- وزن مخصوص ظاهری رسوب نهشته شده در مخازن بر حسب تن در هر متر مکعب [۱۰۵]

اندازه رسوب mm	همیشه مستغرق	در معرض هوا قرار گرفتن
رس	۰/۶۴ تا ۰/۹۶	۰/۹۶ تا ۱/۲۸
لای	۰/۸۸ تا ۱/۲۰	۱/۲۰ تا ۱/۳۶
مخلوط رس - لای	۰/۶۴ تا ۱/۰۴	۱/۰۴ تا ۱/۳۶
مخلوط ماسه - لای	۱/۲۰ تا ۱/۵۲	۱/۵۲ تا ۱/۷۶
ماسه	۱/۳۶ تا ۱/۶۰	۱/۳۶ تا ۱/۶۰
شن	۱/۳۶ تا ۲/۰	۱/۳۶ تا ۲/۰
شن و ماسه	۱/۵۲ تا ۲/۰۸	۱/۵۲ تا ۲/۰۸

مقدار رسوبات نهشته شده در بستر سد را پس از مدت زمان طولانی می‌توان از جدول (۴-۷) نیز به دست آورد.

جدول ۴-۷- وزن مخصوص ظاهری رسوب نهشته شده پس از زمان طولانی [۱۴۷]

نوع رسوب	اندازه (mm)	وزن مخصوص ظاهری (تن در هر مترمکعب)
رس	< ۰/۰۰۵	۰/۸ - ۱/۲
لای	۰/۰۰۵ - ۰/۰۵	۱/۰ - ۱/۳
ماسه ریز و متوسط	۰/۰۱ - ۰/۵	۱/۳ - ۱/۵
ماسه درشت و شن	۰/۵ - ۱۰	۱/۴ - ۱/۸
شن درشت	> ۱۰	۱/۷ - ۲/۱

۴-۳-۲- تراکم پذیری رسوبات

پدیده تراکم رسوبات، پدیده زمانی است و رسوبات به مرور زمان در اثر وزن خودشان و یا وزن ناشی از رسوب گذاری های جدید متراکم می شوند. از آن جا که خلل و فرج ذرات درشت دانه به اندازه کافی بزرگ می باشد که آب منفذی به راحتی خارج گردد، عمل تراکم در این رسوبات به وجود نمی آید و وزن مخصوص رسوبات درشت دانه نسبت به زمان تغییر نمی کند.

بر عکس ذرات لای و رس در ابتدای ترسیب به صورت رقیق ترسیب شده و ذرات همانند پل بین ذرات دیگر قرار گرفته که در نتیجه حجم زیادی از آب در درون خلل و فرج کوچک تشکیل شده ذخیره می گردد. با قرار گرفتن لایه های جدید رسوب بر روی رسوبات قبلی و ایجاد فشار اضافی، پل های ایجاد شده از بین رفته و باعث فشردگی بیش تر ذرات می گردد. چون لایه رسوبی جدید به صورت لایه غیر قابل نفوذ عمل کرده و اجازه فرار آب های منفذی لایه پایین را در جهت عمودی نمی دهد. از طرفی نفوذ پذیری بسیار کم ذرات رس هم کمک می کند تا آب منفذی با سرعت خارج نشود. از این رو عمل تراکم ممکن است زمان بسیار زیادی طول بکشد. در اثر تراکم، وزن مخصوص رسوبات لایه های پایین بیش تر از لایه های بالایی است. توزیع طولی وزن مخصوص در مخزن به این صورت است که در محل دلتا مقدار آن زیاد و با نزدیک شدن به سمت سد مقدار آن کاهش می یابد. به طور کلی دو حالت در تراکم پذیری رسوب حائز اهمیت است. حالت اول وزن مخصوص متراکم شده رسوب در انتهای دوره زمانی و حالت دوم متوسط وزن مخصوص متراکم شده در طول دوره زمانی. برای حالت اول روش لین و کلزر و برای حالت دوم روش میلر را می توان به کار برد.

۴-۳-۲- روش لین و کلزر

بر اساس این روش مقدار وزن مخصوص ظاهری رسوبات در زمان t پس از ترسیب برابر خواهد بود با [۸۵]:

$$\gamma_t = \gamma_0 + B \log t \quad (۴-۳۴)$$

وزن مخصوص ظاهری رسوبات پس از t سال، γ_0 وزن مخصوص ظاهری رسوبات اولیه و B نیز ضریبی است که به نوع رس و شرایط مخزن بستگی دارد و از جدول (۴-۸) قابل استخراج است.

جدول ۴-۸- مقادیر ضریب B (بر حسب Kg/m^3) [۸۵]

شرایط بهره برداری مخزن	ماسه	لای	رس
همیشه مستغرق	۰	۹۱	۲۵۶
به صورت دوره ای تخلیه می شود	۰	۲۹	۱۳۵
معمولا تخلیه است	۰	۰	۰

۴-۳-۲- روش میلر

میلر، مقدار متوسط وزن مخصوص ظاهری را پس از t سال که از ترسیب آن می گذرد محاسبه می کند. رابطه (۴-۳۵) بدین منظور توسط میلر ارائه شده است:

$$\gamma_t = \gamma_0 + 0.4343B \left[\frac{t}{t-1} \text{Lnt} - 1 \right] \quad (۴-۳۵)$$

که در آن γ_t متوسط وزن مخصوص ظاهری پس از t سال، γ_0 وزن مخصوص ظاهری اولیه و B ضریبی است که از جدول (۴-۸) به دست می آید.

برای تعیین وزن مخصوص ظاهری اولیه ابتدا باید شرایط مخزن را تعیین کرد. در این روش مخازن به چهار دسته تقسیم‌بندی شده‌اند.

- مخازنی که تغییرات سطح آب در آن زیاد نیست و رسوبات همیشه مستغرق هستند.
- مخازنی که تغییرات سطح آب زیاد و ممکن است مواقعی تخلیه می‌شوند.
- مخازنی که معمولاً خالی هستند.
- رسوبات واقع در بستر رودخانه

سپس درصد رس، لای و ماسه در بافت خاک (رسوب) مشخص گردد. آنگاه مقدار وزن مخصوص ظاهری اولیه نمونه رسوب از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_0 = \gamma_c P_c + \gamma_m P_m + \gamma_s P_s \quad (۳۶-۴)$$

که در آن γ وزن مخصوص ظاهری مواد ترسیب شده برحسب (kg/m^3) ، P درصد موجود در بافت خاک و اندیس‌های c و m و s به ترتیب مربوط به رس، لای و ماسه می‌باشد. γ_c و γ_m و γ_s نیز وزن مخصوص ظاهری اولیه رس، لای و ماسه می‌باشد که از جدول (۹-۴) قابل استخراج است.

جدول ۴-۹- مقادیر اولیه وزن مخصوص ظاهری اولیه رسوبات (Kg/m^3) [۱۰۱]

γ_s	γ_m	γ_c	نوع بهره‌برداری از مخزن
۱۱۵۰	۱۱۲۰	۴۱۶	تماماً در مستغرق
۱۱۵۰	۱۱۴۰	۵۶۱	به صورت دوره‌ای تخلیه می‌شود
۱۱۵۰	۱۱۵۰	۶۴۱	معمولاً تخلیه است
۱۱۵۰	۱۱۷۰	۹۶۱	رسوبات رودخانه‌ای

۴-۳-۵- روش کامورا

رابطه دیگری نیز برای محاسبه وزن مخصوص ظاهری رسوبات توسط کامورا ارائه شده است که عبارتند از:

$$\gamma_s = 125 - 7D_{50}^{0.21} \quad (۳۷-۴)$$

که در آن γ_s = وزن مخصوص ظاهری نهایی (پس از تحکیم کامل) برحسب پوند بر فوت مکعب و d_{50} اندازه متوسط ذرات بر حسب فوت است.

۴-۳-۶- رابطه توانی

$$\gamma_s = \gamma_0 t^n \quad (۳۸-۴)$$

$$n = 0.5 \log \left(1 + \frac{2B}{\gamma_0} \right) \quad (۳۹-۴)$$

در این رابطه γ_s وزن مخصوص ظاهری رسوب پس از t سال و γ_0 وزن مخصوص ظاهری اولیه و B نیز ضریبی است که از جدول (۸-۴) قابل استخراج است.

۴-۳-۳- برآورد عمر مفید سد

عمر مفید سد، مدت زمانی است که مخزن سد کاربرد دارد. عمر مفید سد بیش‌تر مربوط به از دست رفتن حجم مفید مخزن به دلیل نهشته‌شدن رسوب است تا به مسایل سازه‌ای. استراند (۱۹۸۷) تاکید دارد که درصدی از حجم تمام مخازن سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌های طبیعی در اثر ورود رسوب پر می‌شود و موضوع مهم در زمان طراحی و برنامه‌ریزی سد این است که بتوان مدت زمانی که مخزن سد چندان از رسوب پر خواهد شد تا نتوان از آن بهره‌برداری مفید کرد، را پیش‌بینی نمود. با توجه به مطالبی که در این بخش ارایه شد می‌توان سه مرحله رسوب‌گذاری را در طول عمر مفید مخزن بیان کرد که عبارتند از:

- مرحله یک: رسوب‌گذاری مداوم^۱

احداث سد باعث تغییر شرایط جریان از جریان رودخانه‌ای به جریان درون مخزن می‌گردد. این تغییر شرایط جریان همراه است با کاهش سرعت و افزایش رسوب‌گذاری به‌طوری که مصالح رسوبی درشت دانه بلافاصله ترسیب می‌گردند و دلتا را تشکیل می‌دهند. در حالی که رسوبات ریزدانه توسط جریان‌های چگال ممکن است تا نزدیک بدنه سد هم منتقل شوند. رسوبات ریزدانه که به درون مخزن نفوذ می‌کنند ابتدا خط‌القعر رودخانه را پر می‌کنند و پس از آن در منطقه سیلابی رودخانه نهشته می‌شوند.

- مرحله دو: رشد منطقه سیل‌گیر رودخانه^۲

در موقعیت‌های خاصی از مخزن تعادلی بین رسوب‌گذاری مداوم و فرسایش به وجود می‌آید که باعث کاهش درصد نهشته شدن رسوب نسبت به مرحله یک می‌گردد. این شرایط وقتی به وجود می‌آید که تراز رسوب به تراز لبه تاج سد رسیده باشد در چنین حالتی جریان رودخانه‌ای در بستر مخزن به وجود خواهد آمد به طوری که کانال اصلی در مخزن شکل می‌گیرد که تراز کف آن در محل تاج با تراز لبه تاج یکی خواهد بود. در چنین شرایطی رسوب ورودی در زمان‌های سیلابی در مسیر کانال اصلی نهشته شده به طوری که تراز منطقه سیل‌گیر به تدریج بیش‌تر از تراز لبه تاج سرریز خواهد شد. مشابه الگوی فوق یعنی تشکیل کانال اصلی و مسیرها در زمان رسوب‌زدایی مخازن سدها نیز به وجود می‌آید. در این شرایط تراز کف کانال اصلی با تراز لبه دریچه‌های تحتانی یکسان می‌شود. البته در زمانی که سطح آب مخزن بالا است (مخزن پر) کانال اصلی و مسیرها کاملاً مستغرق شده و رسوب‌گذاری مجدداً باعث پرشدن کانال اصلی خواهد شد.

- مرحله ۳: بیلان کامل رسوب^۳

این مرحله وقتی است که میزان رسوب ورودی با رسوب خروجی برابر باشد. در این مرحله دلتا به بدنه سد رسیده است و عملاً جریان رودخانه‌ای در مخزن برقرار می‌گردد. در این مرحله راندمان تله‌اندازی صفر می‌باشد. با توجه به مراحل فوق به نظر می‌رسد که مرحله دو پایان عمر مفید سد باشد. از آنجا که بیش‌تر سدها در سال‌های اخیر احداث شده‌اند. بنابراین عمدتاً در مرحله یک رسوب‌گذاری قرار دارند و یا به عبارتی هنوز عمر مفید آن‌ها تمام نشده است. در رابطه با عمر مفید مخزن تا کنون چندین تعریف ارایه شده است که عبارتند از:

1- Continuous sediment trapping
2- Floodplain growing
3- Full sediment balance

- عمر طرح^۱ عبارت است از دوره‌ای که برای برنامه‌ریزی مخزن در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی و مطالعات اقتصادی معمولاً بر پایه مدت زمانی است که از ۵۰ سال تجاوز نمی‌کند در حالی که در زمان مطالعات حجمی معادل رسوب صد ساله در نظر می‌گیرند.
- عمر پروژه^۲ در حقیقت دوره ای است که در آن مدت مخزن بتواند با توجه به اهداف اولیه ساخت آن عملکرد مناسبی داشته باشد. چنان‌چه مخزن سد پس از مدتی و در اثر نهشته‌شدن رسوبات نتواند اهداف اولیه را تأمین کند، در آن صورت عمر پروژه به اتمام رسیده است. هر چند که بهره‌برداری از سد برای اهداف دیگری ممکن است ادامه یابد.
- عمر اقتصادی^۳ دوره‌ای است که مزایای اقتصادی بهره‌برداری از سد بیش‌تر از هزینه‌های آن باشد.
- عمر مفید^۴ دوره‌ای است که در آن مدت مخزن سد مطابق اهداف اولیه و اهداف اصلاح شده مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بهره‌برداری مخزن پس از دوره عمر مفید مخزن اقتصادی نیست ولی به دلایل مختلفی چون اجتماعی، سیاسی، زیست‌محیطی و یا مسایل دیگر از آن بهره‌برداری می‌گردد. معمولاً سدها در پایان عمر مفید یا رها می‌شوند و یا این‌که تخریب می‌گردند.

رسوب‌گذاری در مخزن سد را می‌توان به وسیله تعریف «نیمه عمر مخزن»^۵ هم بیان کرد. نیمه عمر مخزن عبارت است مدت زمانی که لازم است تا ۵۰٪ حجم اولیه مخزن پر از رسوب شده باشد. توضیح این‌که نیمه عمر مخزن برابر نصف زمانی که مخزن پر از رسوب می‌شود نمی‌باشد زیرا راندمان تله‌اندازی ثابت نبوده و باگذشت زمان کاهش می‌یابد. از این رو مفهوم نیمه عمر نشانگر واقعی‌تری از عمر مخزن سد می‌باشد تا مدت زمانی که لازم است که کل حجم مخزن پر از رسوب گردد. طول عمر مفید سد را نیز می‌توان معادل مدت زمانی که ۸۰٪ حجم اولیه مخزن پر از رسوب شود تعریف کرد. در آن صورت می‌توان با داشتن داده‌های رسوب و جریان ورودی و خصوصیات رسوب مدت زمان فوق را پیش‌بینی کرد. با توجه به این‌که این مدت زمان تابعی از رسوب وارد شده، وزن واحد حجم رسوب نهشته شده و همچنین راندمان تله‌اندازی مخزن یعنی درصدی از رسوب وارده به مخزن که نهشته می‌شوند، می‌باشد، بنابراین پیش‌بینی دقیق عمر مفید سد پس از جمع‌آوری داده‌های صحرائی مورد نیاز امکان‌پذیر است.

در برآورد درصد حجم از دست رفته مخزن در هر سال می‌توان از رابطه‌ی (۴-۲۰) استفاده کرد.

بدین ترتیب که با داشتن حجم اولیه مخزن در ابتدای هر سال (C_t) و محاسبه درصد حجم از دست رفته از رابطه (۴-۲۰) می‌توان زمانی را که مثلاً ۵۰٪ و یا ۸۰٪ حجم اولیه مخزن پر از رسوب می‌شود محاسبه کرد که همان عمر مفید سد می‌باشد. از آنجا که معمولاً Q_s به صورت وزنی محاسبه می‌شود، لازم است ابتدا مقدار آن به صورت حجمی تبدیل گردد. برای این منظور مقدار وزنی رسوبات کل را باید به وزن مخصوص ظاهری رسوبات نهشته شده تقسیم کرد. وزن مخصوص ظاهری را می‌توان از یکی از روابط ارایه شده در قسمت ۴-۲-۲ تعیین کرد.

هم‌چنین راندمان تله‌اندازی را نیز می‌توان از روابطی که در قسمت ۴-۲-۱ ارایه شده است برآورد کرد.

نکته‌ی دیگری که اهمیت دارد این است که حتی اگر Q_s یا وزن رسوبات سالانه ورودی به مخزن در طول عمر مخزن سد ثابت باشد، رابطه (۴-۲۰) یک رابطه زمانی است زیرا متغیرهای ضریب تله‌اندازی، وزن مخصوص ظاهری مواد رسوبی مخزن و حجم مخزن نسبت به زمان تغییر می‌کنند.

بنابراین اگر α درصد حجم از دست رفته در هر سال باشد، مدت زمانی که مثلاً ۸۰٪ مخزن سد پر از رسوب شود برابر است با:

$$T = 0.8 \frac{C_i}{\alpha} \quad (4-40)$$

که در آن C_i حجم اولیه مخزن پس از احداث سد و T عمر مفید سد است. با قرار دادن α از رابطه (۴-۴۰) می توان نوشت:

$$T = 0.8 \frac{C_i C_t}{T_e Q_s} = 0.8 \frac{C_i}{Q_s} \int_0^T \frac{C_t}{T_e} dt \quad (4-41)$$

چون تغییرات C نسبت به زمان و همچنین T_e نسبت به زمان به صورت معادلات جبری پیوسته مشخص نمی باشند، از این رو معادله فوق را می توان به صورت عددی و با روش دوزنقه ای محاسبه کرد. روش دیگر هم این است که حجم اولیه مخزن به N (مثلاً ده) قسمت تقسیم شود و فرض گردد که در مدت زمانی که حجم هر قسمت پر می شود، مقادیر حجم مخزن، راندمان تله اندازی و وزن مخصوص رسوب از ابتدای آن دوره تا انتهای آن دوره ثابت در نظر گرفته می شود.

۴-۳-۴- برآورد حجم مخزن پس از بهره برداری

مقدار طول عمر مفید سد را می توان از طریق محاسبه میزان حجم باقیمانده مخزن پس از t سال بهره برداری نیز برآورد کرد. معادلاتی که برای این منظور ارائه شده است در جدول (۴-۱۰) ارائه شده اند.

در این جدول V_t حجم مخزن پس از t سال بهره برداری، C_0 حجم اولیه مخزن (m^3)، Q_s حجم سالانه رسوب ورودی (m^3)، t سال بهره برداری، W_0 حجم نهایی رسوب ترسیب شده (m^3)، W_t حجم رسوب پس از t سال (m^3)، T_e راندمان اولیه تله اندازی، T_{et} راندمان تله اندازی در زمان t و n شاخص مربوط به مخزن که بین صفر و ۰/۹۵ متغیر است و مطابق آنچه که در قسمت ۴-۱-۳-۴ گفته شد محاسبه می گردد.

جدول ۴-۱۰- روش های تجربی برآورد حجم مخزن پس از بهره برداری [۱۶۱]

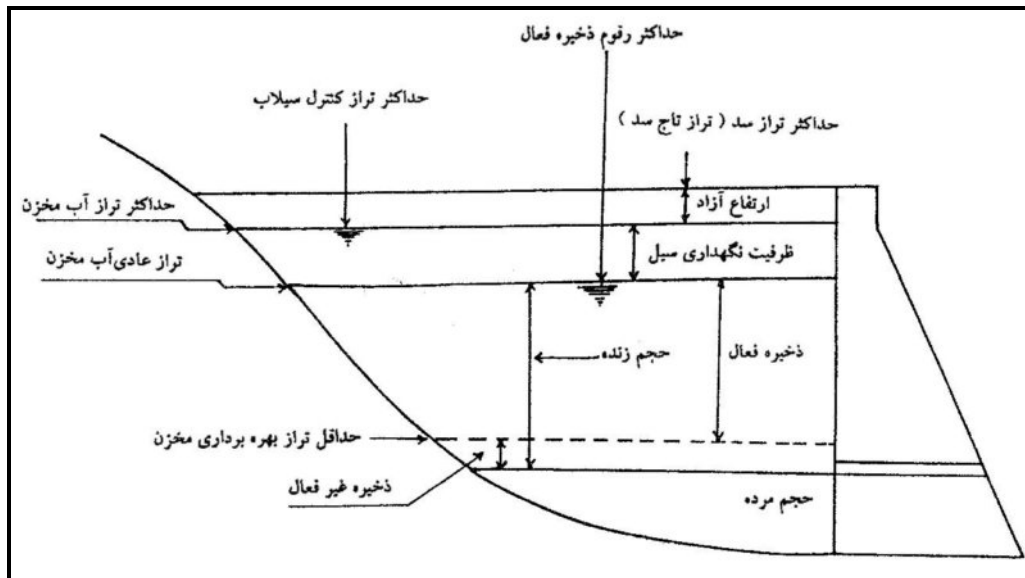
معادله	محقق
$V_t = C_0 \left(1 + \frac{Q_s}{C_0} t \right)$	Orlet (1930)
$V_t = W_0 \left(1 - T_e \frac{Q_s}{W_0} t \right)$	Shamov (1950)
$V_t = C_0 \left[1 - \left(1 - \frac{W_t}{W_0} \right) t \right]$	Gangchalov (1960)
$W_t = W_0 \left[1 - \left(1 - \frac{T_{et}(1-n)Q_s t}{W_0} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right]$	Tsing hua University (1979)

۴-۴- تخصیص بخشی از حجم مخزن به عنوان حجم مرده

در طراحی سد و مخزن، بخشی از حجم مخزن به عنوان حجم مرده^۱ منظور می گردد. این حجم برابر است با میزان حجم رسوب ورودی به مخزن در یک دوره پنجاه ساله. معمولاً در پیچه های عمقی بالاتر از تراز مربوط به حجم مرده قرار می گیرند. علاوه بر منظور کردن حجم مرده، در طراحی سدها ظرفیت مخزن به احجام مختلفی تخصیص می یابد. شکل (۴-۲۰) این تقسیم بندی را نشان

1- Dead storage

می‌دهد. مطابق این تقسیم‌بندی بخشی از ظرفیت مخزن که در حدفاصل تراز حجم مرده و تراز عادی سطح آب^۱ قرار دارد را حجم زنده^۲ گویند. بخشی از این حجم که بالای تراز دریاچه‌های عمقی قرار دارد، ظرفیت فعال^۳ و باقیمانده ظرفیت غیرفعال^۴ می‌باشد. منظور از غیرفعال یعنی حجم آب ذخیره شده در این بخش را نمی‌توان رها کرد مگر در شرایط خاص نظیر عملیات رسوب‌زدایی. ترازهای بالاتر از تراز عادی آب و تا تراز حداکثر سیل^۵ به ظرفیت نگهداری سیل و یا منطقه تسکین سیل^۶ معروف است. این بخش از مخزن تنها در زمان‌های سیلابی و به منظور تسکین سیل ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۳۰- تقسیم‌بندی ظرفیت مخزن به احجام مختلف

- 1- Normal water surface
- 2- Live storage
- 3- Useful storage
- 4- Inactive storage
- 5- Maximum water level
- 6- Flood retention (flood plain)

فصل ۵

کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی در

مخازن سدها

۵-۱- کلیات

در این فصل دو روش متفاوت برای مطالعه وضعیت رسوب در مخازن سد مورد بحث قرار می‌گیرند. ابتدا درخصوص مدل‌های فیزیکی و کاربرد آنها مطالبی ارائه و سپس مدل‌های ریاضی معرفی و در انتها در مورد داده‌های مورد نیاز و نحوه واسنجی و اجرای مدل‌ها و کاربرد آنها مطالبی ارائه شده است.

۵-۲- کاربرد مدل فیزیکی در مطالعات رسوب‌گذاری مخازن

مدل فیزیکی^۱، نمونه کوچک شبیه‌سازی شده از آنچه که قرار است در آینده ساخته شود می‌باشد و نسبتی را که با آن نمونه اصل کوچک می‌شود را مقیاس مدل می‌گویند. مدل فیزیکی باید طوری ساخته شود تا رفتار جریان و رسوب در آن شبیه رفتار نمونه اصلی باشد. مدل‌های فیزیکی به‌طور کلی به چهار دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- مدل‌های فیزیکی غیرکج^۲ با بستر صلب^۳ و منظور مدلی است که مقیاس در سه بعد یکسان باشد و بستر آن از مصالح غیرقابل فرسایش تشکیل شده باشد.
- مدل‌های فیزیکی غیرکج با بستر متحرک^۴ و منظور مدلی است که مقیاس در سه بعد یکسان باشد و بستر آن از مصالح آبرفتی قابل فرسایش تشکیل شده باشد.
- مدل‌های فیزیکی کج^۵ با بستر صلب و منظور مدلی است که مقیاس در جهت افقی و عمودی یکسان نمی‌باشد و بستر آن از مصالح غیرقابل فرسایش تشکیل شده باشد.
- مدل‌های فیزیکی کج با بستر متحرک و منظور مدلی است که مقیاس در جهت افقی و عمودی یکسان نمی‌باشد و بستر آن از مصالح آبرفتی قابل فرسایش تشکیل شده باشد.

مدل‌های فیزیکی باید از نظر هندسی^۶ و دینامیکی^۷ مشابه نمونه اصل باشند. تشابه هندسی یعنی این که تمام ابعاد به یک نسبت که همان مقیاس باشد کوچک شوند. ضمن این که کلیه نیروهای موثر بر حرکت جریان و رسوب در مدل فیزیکی به یک نسبت کوچک شده باشند. البته معمولاً نمی‌توان یک مدل فیزیکی کامل که کلیه شرایط فوق را ارضا کند، ساخت. زیرا نمی‌توان همه نیروها را به طور یکسان کوچک کرد از این رو در مدل فیزیکی سعی می‌شود که نیروهایی را که بیش‌تر موثر هستند به یک نسبت کوچک کرد. بدیهی است نیروهایی که در اصل ممکن است تاثیر ناچیزی داشته باشند چون به همان نسبت کوچک نمی‌شوند، در مدل فیزیکی و در مقایسه با نیروهای کوچک شده ممکن است بر شرایط جریان تاثیرگذارند که ضروری است تا کنترل‌های لازم اعمال شود. برای این منظور معمولاً معیارهای مختلفی ارائه شده‌اند. در مطالعات رودخانه معمولاً نیروی ثقل عمده‌ترین نیروی موثر بر حرکت جریان و رسوب می‌باشد. از این رو در مطالعات مدل فیزیکی رودخانه‌ها سعی می‌شود که نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل یا همان عدد فرود در مدل و اصل یکی باشد. مسلماً در این حالت نیروهای دیگر چون لزجت و کشش سطحی که در اصل، اثر

1- Physical modeling
 2- Non disturbed model
 3- Rigid boundary
 4- Movable bed
 5- Disturbed model
 6- Geometric similarity
 7- Dynamic similarity

ناچیزی بر شرایط جریان دارند، ممکن است در مدل و در مقایسه با نیروی ثقل آنقدر بزرگ باشند که شرایط جریان را تحت تاثیر قرار دهند. در این مطالعات برای کنترل معمولاً از معیار عدد رینولدز، عدد رینولدز مرزی و عدد وبر استفاده می‌شود. به‌طوری‌که این مقادیر در مدل نباید از مقدار مشخصی کوچک‌تر شوند. برخی از مدل‌های رودخانه‌ای را معمولاً به صورت کج شبیه‌سازی می‌کنند بدین معنی که مقیاس عمودی را کم‌تر از مقیاس افقی می‌گیرند تا این‌که از نظر طولی بتوان در فضای آزمایشگاه آن‌را پیاده و از نظر عمقی نیز بتوان متغیرهایی چون عمق جریان را اندازه‌گیری کرد.

در مدل‌های فیزیکی رودخانه‌ای تعیین مقدار مناسب زبری بسیار اهمیت دارد و ضروری است تا با انجام واسنجی در مدل، مقدار آن بهینه گردد. مدل‌های رودخانه‌ای با بستر زنده (متحرک) کمی پیچیده‌تر از مدل‌های فیزیکی با بستر صلب می‌باشند چرا که زبری در حین حرکت جریان ممکن است به خاطر تشکیل فرم بستر، تغییر کند.

مسلماً به منظور بررسی مسایلی که دارای شرایط مرزی پیچیده می‌باشد همچون جریان در رودخانه‌های مئاندری و یا مخازن سدها مدل‌های فیزیکی بسیار مفید می‌باشند. در مدل فیزیکی به راحتی می‌توان رفتار سه‌بعدی جریان و رسوب را مشاهده و اندازه‌گیری کرد، کاری که در مدل ریاضی در حال حاضر تقریباً غیرممکن است. از طرفی هزینه بالا، طولانی بودن زمان ساخت مدل و طولانی بودن زمان اجرای گزینه‌های مختلف و یا وقت گیر بودن مطالعه تاثیر متغیرها بر عملکرد پدیده در دست مطالعه از جمله مضرات مدل‌های فیزیکی می‌باشد. مدل فیزیکی معمولاً از نمونه‌ی اصل (مخزن خاصی) و در یک آزمایشگاه خاصی ساخته می‌شود و نمی‌توان از آن برای بررسی نمونه اصل دیگری استفاده کرد، ضمن این‌که امکان انتقال آن به آزمایشگاه دیگر نیز ممکن نیست. از این رو چنانچه برای بررسی مساله خاصی امکان مطالعه آن پدیده هم با مدل ریاضی و هم با مدل فیزیکی وجود داشته باشد، بهتر است از مدل ریاضی استفاده شود.

در مطالعه رسوب‌گذاری در مخازن سدها، مدل فیزیکی علاوه بر هزینه بر بودن و نیاز به فضای نسبتاً قابل توجه، امکان شبیه‌سازی رسوبات به خصوص رسوبات چسبنده با دقت قابل قبولی وجود ندارد. از این رو مطالعات انجام شده با مدل فیزیکی بسیار اندک بوده است و بیش‌تر مطالعات انجام شده معطوف به مطالعه رسوب‌زدایی از مخزن سد بوده است. در این مطالعات هدف بررسی الگو و میزان رسوب‌گذاری و یا بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر راندمان رسوب‌زدایی مخزن می‌باشد. به‌طور مثال می‌توان به نمونه‌ای از مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۵۰ اشاره کرد که در کشور چین احداث شده است و هدف آن مطالعه تاثیر دریاچه تحتانی به قطر ۸ متر بر میزان رسوبات خروجی می‌باشد. در مطالعه این مسایل معمولاً بخشی از طول مخزن و نزدیک به سد همچنین خود سد و سازه‌های خروجی به صورت غیرکج و با یک مقیاس مدل می‌شوند. بدنه مخزن معمولاً صلب است و بستر آن پوشیده از رسوبات شبیه‌سازی شده اصل می‌باشد. در این مطالعات می‌توان اثر قطر دریاچه‌های تحتانی، موقعیت این دریاچه‌ها، میزان ارتفاع آب مخزن روی دریاچه و بده دریاچه‌ها را بر میزان رسوبات تخلیه شده بررسی کرد. گسترش ایجاد کانال ایجاد شده در کف مخزن را نیز می‌توان به متغیرهای مختلف هیدرولیکی و هندسه دریاچه مرتبط کرد. علاوه بر این می‌توان تاثیر کانال‌های تصنعی ایجاد شده در بستر کانال را در میزان انتقال رسوب محاسبه کرد.

۵-۳- مدل‌های ریاضی^۱

با پیدایش رایانه‌ها و راهکارهای جدید برای حل معادلات دیفرانسیل جزیی حرکت آب و رسوبات، مدل‌های ریاضی متعدد با فرضیات ساده‌کننده و درجه‌های مختلف دقت به منظور شبیه‌سازی روند رسوب‌گذاری در مخزن سدها به‌وجود آمده‌اند. به دلیل دشواری عملیات اندازه‌گیری مستقیم رسوبات نهشته شده در مخازن و بالا بودن هزینه‌های آن، و همچنین عدم کارایی روش‌های تجربی برای کلیه سدها، مدل‌های ریاضی و رایانه‌ای به‌عنوان ابزارهایی بسیار مفید و کارآمد مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند. برنامه‌های رایانه‌ای را می‌توان بر اساس موارد زیر طبقه‌بندی نمود.

– متغیرهای محاسبه شده در مدل

– ابعاد محاسبات

– ویژگی روش‌های عددی به کار رفته شده در مدل

بسیاری از برنامه‌های کامپیوتری برای یک کاربرد ویژه نوشته شده‌اند. اما امروزه تعداد زیادی برنامه‌های پیشرفته وجود دارد به طوری که قادر به تحلیل مسایل مختلفی می‌باشند.

مدل شبیه‌سازی روند حرکت رسوبات در مخزن بر پایه معادلات اندازه حرکت و پیوستگی جریان، معادله پیوستگی رسوب و معادله انتقال رسوب تهیه می‌شود. یک مدل مناسب باید بتواند تمام پدیده‌های موثر در انتقال، توزیع، نهشته‌شدن و آب‌شستگی و جریانات غلیظ را در مخزن سد در نظر گرفته و شبیه‌سازی نماید. رسوب‌گذاری در مخازن یک پدیده حجمی و سه‌بعدی می‌باشد و یک مدل ایده‌آل، باید قابلیت حل همزمان معادلات را در سه بعد داشته باشد. هر چند که ایجاد چنین مدل‌هایی میسر می‌باشد، اما اجرای مدل برای دوره‌های زمانی طولانی در حد عمر مفید سدها با توجه به میزان پیشرفت علوم هیدرولیک محاسباتی و توسعه رایانه‌ها، بسیار وقت‌گیر بوده و مقرون به صرفه نخواهد بود.

به منظور کاربردی کردن مدل‌ها، محققین با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده، روش‌هایی را در جهت حل معادلات دیفرانسیل جزیی حرکت و پیوستگی آب و رسوب ارایه نموده‌اند. فرضیات اعمال شده در این روش‌ها از جهاتی شبیه به هم می‌باشند. اهم این فرضیات و ساده‌سازی‌ها به شرح زیر است:

الف- اهمیت بیش‌تر طول نسبت به دو بعد دیگر و یا به عبارتی فرض انتقال جریان و رسوب در یک بعد. از آن‌جا که طول در

مسیر رودخانه چندین برابر بزرگ‌تر از عرض و عمق است، تقریب یک‌بعدی جریان قابل توجیه خواهد بود.

ب- اختلاف زیاد تغییرات تراز سطح آب و بستر رودخانه یا مخزن و یا به عبارتی فرض می‌شود که تغییرات تراز سطح آب که

ناشی از تغییرات بده است، چندین برابر سریع‌تر از عکس‌العمل بستر نسبت به این تغییرات می‌باشد. این فرض حل مستقل

معادلات جریان آب و انتقال رسوب را ممکن می‌سازد.

ج- ثابت فرض کردن بده جریان و صرف‌نظر از عوامل اینرسی در معادلات حرکت در حل مسایل. معادلات یک‌بعدی جریان

آب به شکل معادلات معروف سنت - ونانت در نظر گرفته می‌شوند. چون تغییرات بده رودخانه نسبت به زمان آرام است لذا

عبارات مربوط به اینرسی معادله اندازه حرکت خیلی کوچک‌تر از دیگر عبارتها می‌باشد.

د- دانش ناقص انتقال رسوبات. استفاده از روابط تجربی انتقال رسوبات، علیرغم عدم انطباق شرایط برقراری معادلات مذکور با شرایط حاکم در مخزن.

ه- به دلیل وضعیت هندسی بسیار نامنظم مجرای رودخانه‌های طبیعی، فقط روش‌های عددی قابل توجیه بوده و محاسبات باید مرحله به مرحله از بازه‌ای به بازه دیگر دنبال شوند.

بنابراین ضمن اعمال فرضیات ساده‌کننده فوق‌الذکر، به ازاء یک سری بده‌های ثابت و معلوم، نیم رخ سطح آب از پایین‌دست به طرف بالادست مخزن با استفاده از روش‌های گام‌به‌گام انجام می‌گیرد. محاسبات انتقال و رسوب‌گذاری یا فرسایش نیز از طرف بالا دست بطرف پایین‌دست مخزن، بازه به بازه با استفاده از فرمول‌های متداول در هیدرولیک رسوب انجام می‌پذیرد. رسوب ورودی از بازه‌ای به بازه دیگر به حالت تعادل در آمده و سرانجام به تغییر شکل بستر رودخانه منجر می‌گردد.

در سال‌های اخیر، توسعه برنامه‌های چند بعدی قابل توجه می‌باشد. این برنامه‌ها اغلب دارای زیربرنامه‌هایی می‌باشند که فرآیندهای متفاوتی مانند محاسبات مربوط به کیفیت آب، انتقال رسوب و نیم رخ سطح آب را محاسبه می‌نمایند. مدل‌های چند بعدی ممکن است به صورت: دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق، دوبعدی متوسط‌گیری شده در سطح (این مدل‌ها اغلب برای اهداف تحقیقاتی استفاده می‌شوند)، سه‌بعدی با فرض فشار هیدرواستاتیک و کاملاً سه‌بعدی ارائه شوند.

۵-۴- مدل‌های شبه دوبعدی

در برخی از مدل‌ها با استفاده از روش‌های خاصی، مدل‌های یک‌بعدی را به مدل‌های شبه دوبعدی تبدیل می‌نمایند. مدل‌های یک‌بعدی واقعی، جابجایی جانبی متغیرهای هیدرولیک و رسوب را شبیه‌سازی نمی‌نمایند. برای تبدیل مدل‌های یک‌بعدی به مدل‌های شبه دوبعدی دو روش کلی وجود دارد که در ادامه مطرح شده است.

۵-۴-۱- نوارهای جریان

نوارهای جریان، کانال را به نوارهای طولی با عرض یکنواخت یا غیریکنواخت تقسیم می‌نمایند. بسیاری از این نوع مدل‌ها نوار مرکزی را به عنوان کانال اصلی و نوارهای طرفین را به عنوان پهنه سیلگیر در نظر می‌گیرند. جابجایی آب و رسوب بین نوارها بر اساس فرمول دیفیوژن انجام می‌شود.

۵-۴-۲- لوله‌های جریان

لوله‌های جریان لوله‌های فرضی می‌باشند که دیواره آن‌ها توسط خطوط جریان تعیین می‌شود. منطقه مورد مطالعه به لوله‌های جریان با بده برابر تقسیم می‌شود. آب و رسوب از مرز لوله جریان نمی‌تواند عبور نماید. توزیع غلظت رسوب در هر مقطع لوله جریان یکنواخت فرض می‌شود.

۵-۵- مدل‌های جفت^۱ و غیرجفت^۲

به‌طور کلی برای شبیه‌سازی حرکت جریان و رسوب در رودخانه و مخازن سدها بر اساس حل همزمان و یا غیرهمزمان معادلات پیوستگی جریان، ممتنم جریان و پیوستگی رسوب، به دو روش تقسیم می‌شود. که عبارتند از: مدل‌های جفت و مدل‌های غیر جفت. در مدل‌های غیر جفت به منظور ساده‌سازی در برنامه‌نویسی فرض بر این است که تغییرات زمانی مرفولوژی رودخانه یا مخزن در دوره زمانی محاسبات هیدرولیکی ناچیز می‌باشد. از این رو ابتدا محاسبات هیدرولیکی برای یک دوره زمانی مشخص محاسبه و سپس تغییرات بستر رودخانه یا مخزن با حل معادلات پیوستگی رسوب و معادله انتقال رسوب محاسبه می‌شود. دیوایز^۳ نشان داده است که مقیاس زمانی جریان سطحی با مقیاس زمانی تغییرات بستر کاملاً متفاوت است. از این رو برای شرایطی که تغییرات ناگهانی رسوب از بالادست وجود نداشته باشد می‌توان از مدل‌های غیر جفت استفاده کرد. لین^۴ نیز نشان داده است که اگر تغییرات ناگهانی جریان از بالادست وجود داشته باشد نمی‌توان از مدل‌های غیر جفت استفاده کرد چرا که مدل‌های غیر جفت نمی‌تواند به‌طور دقیق شرایط مرزی و یا اولیه را شبیه‌سازی کند. کاو و همکاران^۵ نیز با مقایسه مدل‌های جفت و غیر جفت تاکید کرده است که برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌ها و مخازن در شرایط آورد رسوب زیاد باید از مدل جفت استفاده کرد. با توجه به پیچیدگی مدل‌های جفت و با در نظر گرفتن این که آورد رسوب تنها در زمان‌های بسیار کوتاهی از سال ممکن است خیلی بالا باشد، لذا بیش‌تر مدل‌های ریاضی موجود از مدل‌های غیر جفت استفاده می‌کنند.

۵-۶- معادلات حاکم

معادلات اساسی مورد استفاده در مدل‌های ریاضی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

در مدل‌های یک‌بعدی معادلات سنت و نانت^۶ به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2-5)$$

که در آن h : عمق آب، Q : بده آب، β : ضریب توزیع سرعت، q_1 : ورودی یا خروجی جانبی، C : ضریب شری، R : شعاع هیدرولیکی معادله پیوستگی رسوب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial Q_t}{\partial x} = q_{LS} \quad (3-5)$$

و با در نظر گرفتن $\frac{\partial A_s}{\partial t} = \frac{\partial Z_b W'}{\partial t}$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)W'} \frac{\partial Q_t}{\partial x} = \frac{q_{LS}}{W'} \quad (4-5)$$

1- Couple

2- Uncouple

3- Devries(1965,73)

4- Lyn(1987)

5- Cao et al(2002)

6- Saint Venant Equations

که در رابطه فوق، A_s : سطح مقطع مربوط به کف کانال، Q_t : میزان کل رسوب انتقالی، که شامل بار بستر و بار معلق می‌باشد. p : تخلخل، Z_b : تراز کف، q_{LS} : میزان بده رسوبی جانبی در واحد طول و W' عرض متوسط جریان می‌باشد. در مدل‌های دوبعدی معادلات را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = q_l \quad (5-5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{g}{C^2 d} U \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) = q_l U_l \quad (6-5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{g}{C^2 d} V \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) = q_l V_l \quad (7-5)$$

S : تراز سطح آب، U, V : سرعت در جهت x, y ، K_{xx}, K_{yy} : لزجت ادی، U_l, V_l : سرعت در ورودی جانبی یا خروجی در جهت x, y . در جریان‌های سه‌بعدی معادلات ناویر استوکس برای مایع غیرقابل فشردگی با یک چگالی ثابت برای جریان آشفتنه به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (8-5)$$

در رابطه فوق U : سرعت جریان، P : فشار و δ_{ij} : دلتای کرونکر (در صورتی که $i = j$ مقدار آن ۱ و در صورتی که $i \neq j$ باشد مقدار آن صفر می‌باشد).

ترم اول سمت چپ ترم گذرا و ترم دوم ترم جابه‌جایی می‌باشد. ترم اول و دوم در سمت راست معادله به ترتیب ترم فشار و تنش رینولدزی می‌باشد. این ترم توسط مدل‌های آشفتگی با معلوم بودن مولفه‌های نوسانی یا اغتشاشی سرعت تعیین می‌گردد.

در مدل‌ها اغلب برای محاسبات مربوط به انتقال بار رسوب معلق و انتشار آلودگی از معادله انتقال-پخش استفاده می‌شود. شکل کلی معادله به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (9-5)$$

در رابطه فوق: c غلظت رسوب یا آلودگی، ω : سرعت سقوط، U : سرعت جریان، x : بعد فاصله و Γ_Γ : ضریب انتشار می‌باشد.

معادله انتقال پخش در حالت سه‌بعدی به صورت زیر می‌باشد:

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z}}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'c'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'c'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'c'}}_3 = \underbrace{\varphi_s + \varphi_d + \varphi_k}_4 \quad (10-5)$$

در معادله فوق ترم (۱) مربوط به تأثیر محلی، ترم (۲) انتشار بوسیله جابه‌جایی، ترم (۳) تأثیر تلاطم و یا انتشار در اثر پخشیدگی و

ترم (۴) مربوط به منبع، میزان کاهش یا افزایش آلاینده و میزان تغییر شکل نهایی آلاینده است. ترم‌هایی از قبیل $\overline{u'c'}$ نشان‌دهنده شار جرمی مربوط به نوسانات تلاطم جریان می‌باشند. φ_s ، φ_d و φ_k منبع ورودی و خروجی، میزان کاهش یا افزایش و میزان تغییر شکل نهایی آلاینده یا رسوب است.

معادله انتقال - پخش در حالت دوبعدی در نظر گرفته شده که آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial CH}{\partial t} + \frac{\partial CUH}{\partial x} + \frac{\partial CVH}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[HD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[HD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] = H[\varphi_s + \varphi_d + \varphi_k] \quad (11-5)$$

که در رابطه فوق D_{yx} و D_{yy} ، D_{xy} ، D_{xx} به ترتیب، ضریب انتشار طولی و ضریب دیفیوژن مربوط به تلاطم در جهات x و y است. C : میزان غلظت متوسط آلاینده می‌باشد. U و V سرعت متوسط در جهات x و y می‌باشند.

معادله انتقال پخش در حالت یک بعدی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(CH)}_1 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(CUH)}_2 - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[HD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right]}_3 = \underbrace{C_T}_4 + \underbrace{\frac{q_L C_L}{\delta x}}_5 \quad (12-5)$$

که در این رابطه، C : غلظت رسوبات معلق در مقطع، U : سرعت جریان، H : ارتفاع سطح آب و D_1 : ضریب پخشیدگی طولی، C_T و C_L به ترتیب غلظت منبع تغذیه و ورودی جانبی می‌باشد. در این رابطه ترم (۱): عبارت است از: تاثیر محلی، (۲): انتشار به وسیله جابجایی، (۳): انتشار به وسیله پخشیدگی، (۴): میزان فرسایش و یا رسوب گذاری خالص در واحد سطح بستر (زمان/غلظت) و (۵): مقدار آلاینده و یا رسوب ورودی و یا خروجی جانبی (زمان/غلظت) می‌باشد.

۵-۷- روش‌های حل معادلات

بهترین روش برای معادلات دیفرانسیل جزئی که با شرایط مرزی معین تعریف می‌شود، به‌دست آوردن حل تحلیلی آنهاست، ولی گاهی اوقات تحلیل مسایل در شکل بی‌قاعده و نامنظم با شرایط مرزی مختلف و ناحیه‌هایی با مشخصات متفاوت و یا غیرخطی بسیار مشکل و یا غیر ممکن می‌گردد. بنابراین باید در صورت بروز چنین مشکلاتی روش‌های تحلیل محاسباتی را برای به‌دست آوردن حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی به‌کار گرفت. بعضی از روش‌های عددی برای حل مسایل پیوسته عبارتند از:

- روش تفاضل‌های محدود^۱
- روش اجزاء محدود^۲
- روش حجم محدود^۳

روش‌های ریاضی رسوب گذاری مخازن بر پایه سه تئوری معروف یعنی تئوری جت، تئوری پخشیدگی و تئوری انتقال رسوب استوار هستند. از تئوری جت می‌توان برای ذرات درشت که در مصب رودخانه‌ها و مخازن ته‌نشین می‌شوند، استفاده نمود. از این تئوری اخیراً جهت مدل نمودن رسوب‌شویی مخازن نیز استفاده شده است. برعکس از تئوری پخشیدگی برای مدل نمودن ذرات خیلی ریز استفاده می‌گردد. روش‌های ریاضی مبتنی بر تئوری جت و پخشیدگی محدودیت‌های عمده‌ای را دارا هستند. لذا بیش‌تر مدل‌ها و روش‌های ارایه شده بر اساس تئوری انتقال رسوب که دارای قابلیت‌های بهتری برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب گذاری بوده، استوار می‌باشند. در ادامه تعدادی از مدل‌های ریاضی که در سال‌های قبل به‌وجود آمده‌اند ارایه می‌شوند.

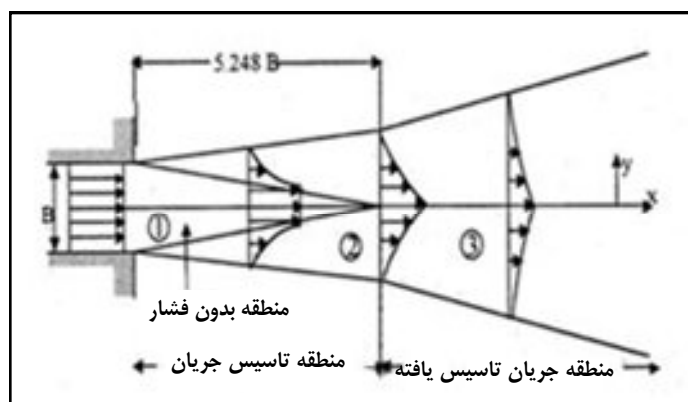
1- Finite difference method
2- Finite element method
3- Finite volume method

۵-۸- انواع مدل‌های ریاضی موجود

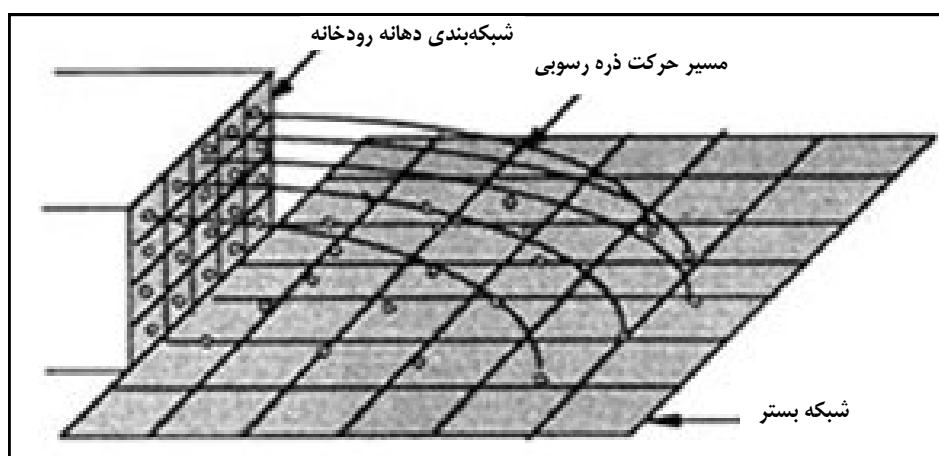
مدل‌های مختلف ارایه شده بر پایه تئوری انتقال رسوب، از لحاظ قابلیت شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به صورت تک‌بعدی یا چندبعدی و روش‌های حل در نظر گرفته شده در آن‌ها و شرایط مرزی و همچنین در نظر گرفتن پدیده‌هایی همانند تشکیل لایه محافظ، جریانات غلیظ، تغییرات هندسی مقطع و... دارای انواع مختلفی می‌باشند. در ادامه برخی از این مدل‌ها و روش‌های ریاضی مختصراً تشریح می‌گردند.

۵-۸-۱- روش بانهم - کارتر و ساترلند

این محققان در سال ۱۹۶۸ روش تئوری جت را برای تخمین دلتای ته‌نشین شده در مصب یک رودخانه که به دریا ریخته می‌شود، ارایه دادند. آنها از تئوری جهش جت‌ها برای ته‌نشینی رسوبات استفاده کردند. بدین منظور رودخانه را به شکل یک کانال مستطیلی با جریان آزاد فرض کردند و موقعیت آن با یک جت افقی^۱ جریان که از یک روزنه خارج می‌گردد، مقایسه شد. این سیستم همان‌طور که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، به سه بخش تقسیم شده است و توزیع سرعت در هر یک از این سه بخش با توجه به تفاوت معادلات حاکم در این بخش‌ها، برآورد شده‌اند.



شکل ۵-۱- نحوه توزیع سرعت در تئوری جت



شکل ۵-۲- نحوه شبکه‌بندی و حرکت ذرات در روش باله‌کام - کارتر و ساترلند

آن‌ها برای محاسبه میزان نهشته‌شدن رسوبات، مصب رودخانه را به چندین سلول عمودی مطابق با شکل (۵-۲) تقسیم‌بندی کردند. برای تمامی رسوباتی که از یک سلول واقع در شبکه‌بندی مصب رودخانه عبور می‌کنند، فرض می‌شود که همان مسیری را طی می‌کنند که ذره واقع در سلول مرکزی با مختصات $x = 0$ طی می‌کند.

این مدل را می‌توان در جایی که رودخانه با یک بازشدگی ناگهانی به مخزن متصل می‌شود، مورد استفاده قرار داد. همچنین این مدل را می‌توان برای زمانی که ذرات درشت‌دانه زیاد می‌باشند، مورد استفاده قرار داد ولی بالعکس وقتی که درصد قابل توجهی از ذرات، ریزدانه باشند، این مدل به هیچ وجه به کار گرفته نمی‌شود. لازم به ذکر است که تا به حال هیچ گزارشی مبنی بر استفاده از این مدل بمنظور برآورد ته‌نشینی رسوبات در مخازن واقعی منتشر نشده است.

۵-۸-۲- روش چانگ و ریچارد

این دو نفر در سال ۱۹۷۱ مدلی را به منظور تعیین حساسیت «روش خطوط مشخصه»^۱ ارایه دادند. سه معادله‌ی اساسی که جریان غیردایمی در کانال‌های رسوبی را توصیف می‌کنند عبارتند از: معادله پیوستگی جریان، معادله پیوستگی رسوب و معادله‌ی ممتنم.

مدل مذکور تنها برای یک مخزن فرضی مورد استفاده قرار گرفته است و تاکنون هیچ گزارشی مبنی بر استفاده از این مدل در مخازن واقعی ارایه نشده است.

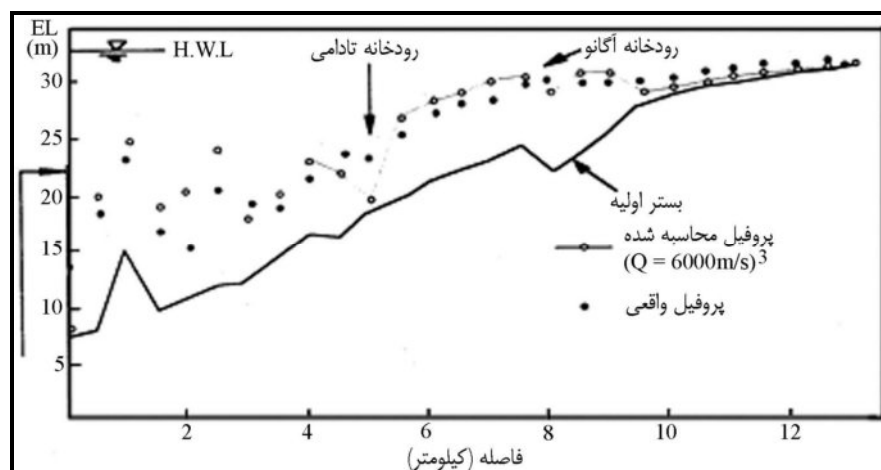
۵-۸-۳- روش یوسل و گراف

این دو محقق در سال ۱۹۷۳ یک مدل رایانه‌ای را برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب‌گذاری در یک مخزن مستطیلی با عرض واحد ارایه نمودند. این مدل ابتدا با محاسبه پروفیل سطح آب به روش گام به گام استاندارد و سپس با روندیابی رسوبات از بالادست، این پدیده را شبیه‌سازی می‌نماید. در این مدل از سه معادله بار کف شامل: شوکلیچ (۱۹۵۰)، میر - پیتر و مولر (۱۹۴۸) و اینشتین (۱۹۴۲) استفاده شده است. این مدل بیش‌تر برای مقایسه سه معادله بار بستر فوق‌الذکر ارایه گردیده و گزارشی از کاربرد این مدل در مخازن واقعی ارایه نشده است.

۵-۸-۴- روش آسادا

آسادا مدلی را برای رودخانه‌های کوهستانی و مخازن ارایه داد که اساس آن مدل معادله خودش در انتقال رسوب بود. طرز عمل این مدل شبیه به روش‌های قبل می‌باشد. بدین ترتیب که ابتدا پروفیل‌های برگشت آب برای شیب اولیه بستر بوسیله‌ی معادلات دایمی و غیریک‌نواخت محاسبه می‌شوند، آنگاه میزان تغییر شکل کف در یک محدوده‌ی زمانی با استفاده از معادله‌ی حمل رسوب و معادله‌ی پیوستگی رسوب محاسبه می‌گردد. در نهایت منحنی‌های دانه‌بندی مواد کف پس از مدت زمانی در هر بازه طولی، بر اساس تفاوت بده‌های رسوب برای هر اندازه ذره و میزان اندازه‌ی ذره‌ای که در لایه‌ی زیر سطحی توزیع می‌شود، محاسبه می‌گردد. این روند را برای هر مدت زمان دلخواه بمنظور محاسبه‌ی تغییر ارتفاع کف می‌توان تکرار کرد. او این مدل را برای مخزن شینگو بر روی رودخانه اگانو در ژاپن مورد استفاده قرار داد، که نتایج پیش‌بینی شده، به مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ارتفاعات کف بستر بسیار نزدیک

بود. در شکل (۵-۳) نتایج مربوط به محاسبه پروفیل کف نشان داده شده است. مشکل اصلی در استفاده از این مدل، منحصر به فرد بودن معادله‌ی انتقال رسوب استفاده شده برای رودخانه‌های کوهستانی، در این مدل است. این معادله دارای ضرایب تجربی می‌باشد که باید برای هر اندازه ذره بر اساس اطلاعات مربوط به رسوبات ته‌نشین شده در یک مخزن و یا تغییرات کف رودخانه تعیین شوند. در این مدل هم‌چنین فرآیند مربوط به ذرات چسبنده در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۵-۳- مقایسه نیم رخ بستر محاسبه شده و مشاهده شده [۶۰]

۵-۸-۵- مدل سگره^۱

این مدل در سال ۱۹۷۳ توسط کونج و پردرو ارایه شده است. در این مدل از معادلات شبه ماندگار و یک‌بعدی استفاده گردیده که معادلات جریان آب و رسوب را به صورت همزمان به کمک روش چهارنقطه‌ای صریح حل می‌نماید. در این مدل پدیده روسازی بستر در نظر گرفته نشده است.

۵-۸-۶- روش مریل^۲

مریل در سال ۱۹۷۴ به منظور برآورد میزان ته‌نشینی رسوبات در مخازن از تئوری پخشیدگی استفاده کرد. او این فرآیند را به‌وسیله‌ی معادله‌ی دوبعدی پخشیدگی مدل کرد.

به منظور حل معادله پخشیدگی بوسیله‌ی روش تفاضل‌های محدود، مخزن به یک سری سلوله‌ای دوبعدی تقسیم می‌شود. آن‌گاه یک حجم خاص برای دوره‌ی آنالیز مورد نظر در سطح مخزن پخش می‌شود و راندمان تله‌اندازی محاسبه می‌گردد. این محاسبات آنقدر تکرار می‌شود که راندمان تله‌اندازی در هر مرحله با مرحله قبل برابر گردد. در این زمان فرض می‌شود که تمام رسوبات معلق در زیر موقعیت فعلی‌شان ته‌نشین می‌شوند و ضخامت افزوده شده به ارتفاع قبلی سلول اضافه می‌شود.

مساله مهم در این مدل این است که مقادیر مربوط به ضرایب پخشیدگی نامعلوم می‌باشند، درحالی‌که این ضرایب در جواب‌های خروجی مدل بسیار تاثیر می‌گذارند. به هر حال در مورد ذرات درشت (ماسه و سیلت درشت) به‌طور مشهود پخشیدگی وجود ندارد و نمی‌توان از معادله پخشیدگی استفاده کرد.

1- Sogreh

2- Meril

مقادیر ضرایب پخشیدگی که در این مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند در تمام قسمت‌ها یکسان می‌باشند. در این روش، تحکیم ذرات در نظر گرفته نمی‌شود و همچنین فرض می‌شود که ارتفاع سد برای یک دوره‌ی طولانی (حداقل ۱۰ سال) ثابت باشد.

۵-۸-۷- مدل HEC-6

اداره مهندسی ارتش آمریکا یک مدل رایانه‌ای بنام HEC-6 را در نسخه‌های مختلف (نسخه ۱ در سال ۱۹۷۷ و نسخه ۴/۱ در سال ۱۹۹۳) برای شبیه‌سازی رسوب‌گذاری و فرسایش در رودخانه‌ها و مخازن آرایه داده است. این مدل یک مدل، ریاضی یک‌بعدی می‌باشد و از محبوبیت نسبتاً زیادی بین محققان برخوردار است و به منظور پیش‌بینی حمل رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. گفتنی است که آخرین نسخه‌های این مدل قابلیت مدل کردن تمامی ذرات از جمله ماسه، سیلت و رس را دارد. در نسخه اخیر، ذرات درشت تا اندازه ۲/۴۸ میلی‌متر را در محاسبات انتقال رسوب دخالت می‌دهد.

در مدل HEC-6 جریان آب و رسوب در دو فاز مختلف روندیابی می‌شوند. ابتدا جریان آب از پایین‌دست به سمت بالادست، با استفاده از روش گام‌به‌گام استاندارد روندیابی می‌گردد و آنگاه فرآیندهای مربوط به رسوب از بالادست به سمت پایین‌دست در پنج مرحله زیر صورت می‌پذیرد:

- محاسبه ظرفیت حمل رسوبات غیرچسبنده با استفاده از فرمول‌های مختلف برای شرایط طبیعی مقطع.
- تعیین بده رسوب واقعی با در نظر گرفتن تصحیحاتی برای قابلیت دسترسی به هر ذره بر اساس محاسبات مربوط به لایه فعال و زیرسطحی و همچنین وجود ذرات رس و تأثیرات روسازی بستر.
- حل معادله پیوستگی برای رسوب با بده رسوب بالادست.
- به کار بردن یک سری مراحل مشابه برای فرآیندهای مربوط به رسوبات چسبنده به وسیله استفاده از معادله کرون (۱۹۶۲) برای ته‌نشینی و معادله پاردنایز (۱۹۶۵) برای فرسایش و سپس محاسبه شدت ته‌نشینی و یا فرسایش رسوبات چسبنده (فقط در نسخه ۴/۱).
- محاسبه تغییرات کف بر اساس کل رسوبات انباشته شده و یا برداشته شده، حجم واحد وزن رسوبات و هندسه مقطع.
- نهشته شدن و یا رسوب‌برداری به‌طور یکنواخت در بخش فعال عرض کانال، توزیع می‌شود. لازم به ذکر است که این بخش بوسیله کاربر مشخص می‌شود. در این راستا یک عمق تعادلی با ترکیب معادلات مانینگ، یکی از اشکال معادله استریکلر و معادله بار بستر اینشتین تعریف می‌شود. عمق تعادلی طبق تعریف برای اندازه ذره خاص، عمقی است که در بده واحد، هیچ ذره‌ای با آن اندازه، در بستر منتقل نشود. مشکلات مربوط به استفاده از این مدل عبارتند از:
- این مدل به منظور پیش‌بینی توزیع رسوبات در رودخانه‌ها و مخازن کوچک که می‌توان از اثرات پدیده‌ی جریان‌ات غلیظ در آنها صرف‌نظر کرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- کاربر باید بستر فعال را در هر سطح مقطع مشخص کند. با توجه به این که الگوی ته‌نشینی و فرسایش نسبت به این متغیر حساسیت زیادی دارند و با توجه به این که تعیین دقیق این بخش خیلی مشکل می‌باشد، احتمال بروز خطا در نتایج برنامه وجود دارد.

مدل مذکور در تعدادی از سدهای ایران از جمله سد دز، سد شهید عباس‌پور و سد کرخه در استان خوزستان در حد پایان‌نامه‌های دانشجویی به کار گرفته است.

۵-۸-۸- مدل لویز^۱

این مدل در سال ۱۹۷۸ توسط لویز ارایه گردید که در آن از تئوری جت و تئوری انتقال رسوب به‌طور همزمان استفاده شده است. در این مدل مخزن به سه ناحیه مجزای رودخانه، منطقه انتقالی و مخزن تقسیم شده است [۹۴]. جریان در بخش رودخانه به‌صورت یک‌بعدی در نظر گرفته شده و در منطقه انتقالی یعنی محل اتصال رودخانه به مخزن سد، از تئوری پخشیدگی جت دوبعدی مستغرق استفاده می‌شود. جریان در قسمت مخزن به چند کانال فرضی تقسیم می‌گردد که جریان در هر یک از این کانال‌ها یک‌بعدی می‌باشد. برای شبیه‌سازی رودخانه - مخزن، از معادلات هیدرودینامیکی جریان‌های غیردایمی متغیر تدریجی در کانال‌های باز شامل معادله پیوستگی جریان، معادله ممتنم و معادله پیوستگی رسوب استفاده می‌شود. معادلات کمکی که در حل معادلات فوق در این روش مورد استفاده قرار گرفته شده، شامل موارد زیر است:

- معادله مانینگ برای تعیین شیب خط انرژی.

- یک تابع انتقال رسوب که در آن بده رسوبات (Q_s) به شکل توانی از سرعت متوسط (V) محاسبه می‌شود. $Q_s = mv^n$ که مقادیر m و n ضرایبی هستند که از طریق کالیبراسیون تعیین می‌شوند.

مرزهای فیزیکی مدل شامل مقطع بالادست رودخانه و مقطع پایین‌دست مخزن می‌باشند که در مرز بالادست از بده آب - بده رسوب و در مرز پایین‌دست از تراز آب و یا بده‌های خروجی استفاده می‌گردد. سیستم معادلات جریان و رسوب به‌صورت مجزا حل می‌شوند. بدین طریق که ابتدای به ازاء یک کف ثابت برای رودخانه و مخزن، معادلات ممتنم و پیوستگی با استفاده از مدل ضمنی چهارنقطه‌ای پرایسمن حل شده و از آن‌جا مقادیر بده و تراز آب به دست می‌آید. سپس با فرض تراز ثابت و تقسیم بده در زیرکانال‌ها و یا به عبارتی دیگر با به‌کار بردن مدل رودخانه‌ای مرکب، بده و سرعت در زیرکانال‌های هر مقطع تعیین شده و در صورت نیاز، تصحیح جت نیز بر سرعت‌های هر زیر کانال انجام می‌پذیرد. پس از مشخص شدن بده در تمامی زیرکانال‌ها معادله پیوستگی رسوب به شکل صریح حل می‌گردد و میزان رسوب‌گذاری و ترازهای جدید برای کف به‌دست می‌آید.

از معایب این مدل، عدم لحاظ جریانات غلیظ و در نظر گرفتن فرآیند رسوب‌گذاری مربوط به ذرات چسبنده می‌باشد. از طرفی در مدل نیاز به تعداد زیادی ضرایب و پارامتر می‌باشد که این امر باعث مشکل شدن کالیبراسیون مدل می‌شود. در ایران از این مدل برای بررسی روند رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کارده و سفیدرود استفاده شده است.

۵-۸-۹- مدل HRS

مدل HRS WALLINGFORD توسط بتس و وایت در ایستگاه تحقیقاتی هیدرولیک والینگفورد انگلستان در سال ۱۹۷۹ ارایه شده است. مدل ارایه شده یک‌بعدی بوده و از معادلات انتقال رسوب ایکرز - وایت و انگلوند - هانسن در آن استفاده شده است که معادلات جریان آب و رسوب را به‌صورت جداگانه با استفاده از روش صریح حل می‌نماید. در این مدل اثر روسازی بستر لحاظ گردیده است.

- روش حداقل توان جریان^۱

روش حداقل توان جریان بر اساس نظریه حداقل توان واحد جریان توسط یانگ (۱۹۷۱) ارایه شد. این نظریه بر اساس اصول اساسی ترمودینامیک ارایه گردیده است. در بیش تر آبراهه‌های طبیعی و مخازن، فرم عمومی تری از نظریه حداقل مقدار توان جریان به کار می‌رود، که طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$Q.S...or...VS = \text{minimum} = \text{constant} \quad (۱۳-۵)$$

که در رابطه اخیر Q و V به ترتیب سرعت و بده جریان آب، QS توان جریان و VS توان واحد جریان نامیده می‌شوند. طبق نظر چانگ (۱۹۸۲) و آناندل (۱۹۸۷) هنگامی که توان جریان به سمت حداقل مقدار خود میل می‌کند، رابطه‌ای بین مساحت مقطع عرضی جریان و محیط خیس شده مقطع به وجود می‌آید. این رابطه را می‌توان به منظور بیان مقدار مواد رسوبی نهشته شده در مخزن به کار برد. آناندل بر اساس این روش، تحقیقات و آزمایش‌هایی را بر روی ۱۱ سد در آفریقای جنوبی انجام داده است. هم‌چنین تحقیقاتی بمنظور بهینه‌سازی مخزن سد سانمنشیا واقع بر رودخانه زرد در کشور چین و تعادل بین جریان رسوب ورودی به مخزن و خروجی از آن با استفاده از این روش صورت گرفته است. این روش هر چند که مبنای تئوری داشته، اما بدلیل سادگی و عدم در نظر گرفتن متغیرهای مربوط به ذرات رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه و جریانات غلیظ، به روش‌های تجربی شباهت زیادی دارد.

۵-۸-۱۰- مدل فلووئال^۲

این مدل بمنظور روندیابی جریان آب و رسوب در رودخانه‌ها توسط چانگ در سال ۸۸-۱۹۸۲ ارایه شده است. این مدل قادر است فرسایش دیواره‌های رودخانه را لحاظ کند. در این مدل از معادلات غیرماندگار جریان آب استفاده شده است و بجای قانون بقا ممنتیم از قانون بقا انرژی استفاده شده است. این مدل دارای پنج جزء اصلی می‌باشد، که عبارتند از:

- روندیابی جریان آب
 - روندیابی رسوب
 - محاسبه تغییرات در عرض کانال
 - محاسبه تغییرات در پروفیل کف کانال
 - محاسبه تغییرات در هندسه کانال در اثر وجود خم
- در این مدل از گرادیان انرژی و متوسط جریان در انحناء که باعث ایجاد یک جریان ثانویه در انحناء کانال می‌شود، استفاده شده است. روندیابی رسوب در این مدل چهار مرحله دارد:
- محاسبات ظرفیت حمل رسوب با فرمول‌های بار معلق انجام می‌شود.
 - تعیین بده رسوب واقعی
 - شرایط بالادست برای جریان ورودی

1- Minimum stream power

2- FLUVIAL

– حل عددی معادله پیوستگی برای رسوب

این چهار مرحله در هر گام زمانی ارزیابی می‌شوند و تغییرات محاسبه شده در مساحت هر سطح مقطع برای مشخص کردن میزان تغییرات در وضعیت کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین تغییرات در عرض نیز محاسبه خواهد شد. مدل مذکور قادر نیست که فرآیند مربوط به رسوبات چسبنده و جریان غلیظ را شبیه‌سازی نماید.

۵-۸-۱۱- مدل کاریچار

رائول و همکارانش (۱۹۸۹)، با شبیه‌سازی جریان غیردایمی و حرکت رسوبات در رودخانه‌های رسوبی با بستر متحرک مدل مذکور را ارایه دادند. در آن، معادلات اساسی جریان غیردایمی با استفاده از تکنیک تفاضل‌های محدود به روش صریح حل شده‌اند. در این مدل از دو معادله بار کف میر-پیتر و مولر و معادله بل وساترلند استفاده شده است. در این مدل از یک مفهوم ویژه برای لایه فعال و پدیده روسازی استفاده شده است. از نواقص این مدل عدم لحاظ بار معلق و رسوبات چسبنده و پدیده جریان‌ات غلیظ، در برآورد و انتقال رسوبات می‌باشد که این امر باعث محدودیت کاربرد مدل فقط برای مخازن کوچک می‌باشد.

۵-۸-۱۲- مدل چاریما

این مدل توسط هالی و همکارانش در سال ۱۹۹۰ برای شبیه‌سازی جریان غیردایمی و حرکت رسوبات در شبکه کانال‌های مرکب با بستر متحرک ارایه شده است. معادلات جریان غیرماندگار و حرکت رسوبات به کمک تکنیک عددی تفاضل محدود به روش پرایسمن حل شدند. در این مدل چهار رابطه برای پیش‌بینی بار کل رسوبات موجود می‌باشد. هم‌چنین روندیابی هیدرولیکی و فرآیند روسازی بستر نیز در نظر گرفته شده است. مدل مذکور در سه رودخانه آمریکا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی را مطابق داده‌های اندازه‌گیری شده ارایه داده است. در این مدل نیز از فرآیند رسوبات چسبنده و اثرات جریان‌های غلیظ صرف‌نظر شده است.

۵-۸-۱۳- مدل MOBED2

این مدل که یک مدل دوبعدی می‌باشد توسط اسپاسوجویک و هالی (۱۹۹۰) برای شبیه‌سازی بسترهای متحرک ارایه شده است. در این مدل از معادلات حجم کنترل برای جریان سیال، انتقال رسوب و تغییر شکل کف بستر استفاده شده است. چندین راه حل عددی برای حل این معادلات، استفاده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی یک دوره‌ی ۸ روزه برای مخزن کراویل واقع در رودخانه ایوا نزدیک شهر ایوا اجرا شده است. نتایج خروجی مدل ارایه شده‌اند، اما هیچگونه گزارشی مبنی بر مقایسه نتایج خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده ارایه نشده است. فرضیات متعددی برای حل معادلات استفاده شده در MOBED2 در نظر گرفته شده‌اند. مدل مذکور برای آبراهه‌های کم عمق قابل اجرا می‌باشد. در حال حاضر به منظور تعمیم و تکمیل روش‌های به‌کار برده شده، کار بر روی این مدل ادامه دارد [۱۳۳].

۵-۸-۱۴- مدل FCM

کوری و همکارانش (۱۹۹۲) این مدل را که یک مدل یک‌بعدی برای رودخانه‌ها است ارائه دادند. در این مدل، از معادلات کنترل برای توازن جرم و ممنتوم مخلوط آب و رسوب تحت شرایط جریان غیرماندگار در رودخانه‌های طبیعی، برای مقاطع نامنظم استفاده شد. این معادلات در یک‌بعد با استفاده از روش چهارنقطه‌ای خطی پرایسمن با در نظر گرفتن فاکتورهای وزنی برای مختصات فضایی و زمان حل شده‌اند. معادلات بار کف ایکرز - وایت (۱۹۷۳)، برونلی (۱۹۸۳)، فان راین (۱۹۸۴)، گراف (۱۹۷۱)، شوکلیچ (۱۹۳۴)، اسهارت و جاگی (۱۹۸۳)، میر - پیتر و مولر (۱۹۸۴) در این مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همچنین فرآیند روسازی بستر نیز شبیه‌سازی شده است. این مدل در یک مخزن فرعی برای نشان دادن کارایی آن تست شده است. گفتنی است که مدل مذکور قادر به دخالت دادن فرآیند رسوبات چسبنده و جریان‌های غلیظ نمی‌باشد.

۵-۸-۱۵- مدل DEPO

مدل دپو توسط قمشی (۱۹۹۵) در دانشگاه ولنگونگ استرالیا ارائه گردیده است. این مدل فرآیند رسوب‌گذاری در مخازن سدها را در یک بعد شبیه‌سازی می‌نماید. این مدل بمنظور وارد نمودن اثر جریانات غلیظ بر رسوب‌گذاری طولانی‌مدت مخازن بزرگ طراحی شده است. علاوه بر این، مدل دپو می‌تواند برای تحلیل یک‌بعدی مجاری روباز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این مدل قادر است به صورت یک ابزار برای بررسی چگونگی تشکیل و حرکت جریانات غلیظ در کف مخازن سدها مورد استفاده قرار گیرد و می‌تواند نمایی از وضعیت رسوب‌گذاری ناشی از این جریانات را نشان دهد. این مدل مخصوصاً برای پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری در مخازن سدهای بزرگ با بار رسوبات معلق ورودی زیاد توصیه می‌شود. در این مدل جریان آب ورودی و جریانات غلیظ به‌صورت زیر بحرانی و در حالت پایدار در نظر گرفته شده که به‌طور کلی با وضعیت جریان در مخازن سدهای بزرگ مطابقت دارد [۶۰].

۵-۸-۱۶- مدل DCURL

نسخه اول این مدل توسط سیموئز (۱۹۹۹) در موسسه USBR آمریکا جهت شبیه‌سازی جریانات غلیظ در مخازن سدها و دریاچه‌ها در حالت جریان دایمی و یکنواخت، تهیه شده است.

از جمله مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- استفاده از چهار روش مختلف جهت محاسبه عمق غوطه‌وری جریان غلیظ.
 - تشخیص نوع جریان غلیظ از نوع روگذر، میان‌گذر یا زیرگذر و انجام محاسبات در مورد هر کدام.
- از معایب این مدل نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- عدم توانایی آن در مدل نمودن جریان در حالت غیرماندگار.
- عدم امکان مدل نمودن جریانات غلیظ ناشی از مواد معلق یا جامد نامحلول.
- محدودیت مدل در شبیه‌سازی هندسی مخزن یا دریاچه.
- مهم‌ترین محدودیت این مدل عدم امکان بررسی تاثیر جریانات غلیظ بر روند رسوب‌گذاری می‌باشد.

این مدل بیش‌تر برای تشخیص نوع جریان غلیظ و بررسی شرایط وقوع این جریان تهیه شده است و امکان کاربرد عملی آن بدلیل عدم امکان شبیه‌سازی رسوب‌گذاری ذرات درشت‌دانه در مخزن و محدودیت‌های ژئومتری، میسر نمی‌باشد.

۵-۸-۱۷- مدل BRI-STARS

این مدل توسط آلبرت مولیناس (۲۰۰۰) برای اداره حمل و نقل بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA) ارائه گردید. مدل BRI-STARS شرایط جریان و فرآیند رسوب‌گذاری در مخازن و تغییرات ژئومتری رودخانه را به صورت شبه دویچه‌سازی می‌نماید. در این مدل از مفهوم لوله‌های جریان و تقسیم رودخانه به چندین لوله جریان استفاده شده است که روندیابی رسوبات در هر لوله جریان به‌طور جداگانه انجام می‌گیرد. این مدل قادر است سرشاخه‌های رودخانه را در بالادست مخزن به همراه هیدروگراف ورودی جریان و رسوب سرشاخه‌ها در نظر بگیرد و اثرات رسوبی و تغییرات سطح آب ناشی از وجود سرشاخه‌ها را بررسی نماید. مدل از سه قسمت مهم و کاربردی تشکیل شده است که با فعال کردن هر قسمت در برنامه می‌توان از قابلیت‌های برنامه در حل مسایل مهندسی رودخانه استفاده کرد.

برای شبیه‌سازی تغییرات بستر رودخانه در رودخانه‌هایی که به داده‌های هیدرولیکی و رسوب محدود می‌شوند از مدل لوله‌ای جریان با عرض ثابت استفاده می‌شود.

این مدل ظرفیت حمل رسوبات را براساس محدوده‌های دسته بندی شده مواد بستر که توسط کاربر تعریف شده‌اند محاسبه می‌کند. در نتیجه ذرات با اندازه‌های مختلف قادر به انتقال با میزان حمل متفاوتی می‌باشند. از داده‌های مهم مورد نیاز برای اجرای مدل مذکور دانه‌بندی مواد بستر می‌باشد [۱۴۸].

۵-۸-۱۸- مدل MIKE 11

نرم‌افزار MIKE 11 یک سیستم عددی یک‌بعدی (1D) است که در انستیتو هیدرولیک دانمارک در سال ۱۹۹۲ طراحی شد. این برنامه شامل یک سری مدل‌های مرتبط است که باعث عملکردهای دینامیکی مختلفی می‌شود. این عملکردها شامل عملیات هیدرودینامیک، پخش و انتشار و سایر فرایندهای کیفیت آب است و در رودخانه، کانال‌ها، آب‌راه‌ها و خورها کاربرد دارد [۴۱ و ۴۰]. برنامه MIKE 11 برنامه توسعه یافته DHISYSTEM 11 است که یک مدل هیدرولیکی بود که در سیستم‌های رایانه‌ای Main Frame کارایی داشت اما برخلاف DHISYSTEM 11 سیستم MIKE 11 با هدف کاربردی برای کامپیوترهای PC طراحی شده است. علاوه بر آن سیستم مذکور دارای توانایی‌های مرتب‌سازی و مدل‌سازی گسترده است و در زمینه‌های کیفیت آب و حمل رسوب کارایی بالایی دارد.

هیدرودینامیک رودخانه در MIKE11 به سه روش شبیه‌سازی می‌شود: روش موج کینماتیک، روش موج انتشار و روش هیدرودینامیک کامل. معادلات مورد استفاده این گونه شبیه‌سازی‌ها، معادلات سنت و نانت می‌باشد.

نرم‌افزار MIKE11 از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

- مدل‌سازی جریان رودخانه
- مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش - رواناب
- مدل پیش‌بینی سیلاب
- در مدل جریان رودخانه ۴ مدل فرعی وجود دارد که عبارتند از:
- مدل هیدرودینامیک
- مدل جابجایی - انتشار

– مدل انتقال رسوب

– مدل کیفیت آب

چنانچه مورد نیاز باشد می‌توان مدل‌های مذکور را به یکدیگر وصل کرد تا مدلی جامع‌تر ساخته شود. مدل هیدرودینامیکی در واقع عنصر زیربنایی تمام سیستم مذکور است و پایه‌ای برای سایر برنامه‌ها نظیر پخش و انتشار، کیفیت آب و حمل رسوبات به شمار می‌رود.

مدل هیدرودینامیک MIKE 11 قادر به به‌وجود آوردن شرایط جریان یک‌بعدی در رودخانه‌ها و خورها می‌باشد. این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را دارد. این مدل به گونه‌ای نوشته شده است که توانایی در نظر گرفتن سازه‌های هیدرولیکی جریان و آبراهه‌های فرعی را دارد. مدل هیدرودینامیک براساس روش تفاضل محدود و معادلات یک‌بعدی سنت و نانت برای دینامیک جریان تشکیل یافته است.

خروجی مدل هیدرودینامیک یک سری ارتفاع سطح آب و بده آن و سرعت در طول رودخانه است.

• توصیف شرایط جریان

مدل هیدرودینامیک جریان دینامیکی را براساس معادلات یک بعدی سنت و نانت توصیف می‌نماید. این معادلات در واقع توصیف ریاضی بقا جرم و مومنتم در حالت جریان یک بعدی در رودخانه و کانال‌های آب است. معادلات سنت و نانت به کار رفته در مدل مذکور فرضیات زیر را در نظر می‌گیرند:

- آب غیرقابل تراکم است.
- شتاب قائم ناچیز و توزیع فشار هیدرواستاتیک است.
- شیب کف کانال ناچیز است به‌طوری‌که عمق کانال عمود بر کف کانال اندازه‌گیری می‌شود.
- توزیع سرعت در مقطع کانال یکنواخت است.
- جریان زیر بحرانی است.
- بستر کانال پایدار است و رقوم آن با زمان تغییر نمی‌کند.

۵-۸-۱۹- مدل SED2WES

مدل SED2WES در سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۲ توسعه داده شده است. مدل SED2WES بازنوشته مدل STUDH می‌باشد. کدهای اولیه توسط دکتر رانجان اریا سورای برای دریافت درجه دکتری از دانشگاه دیویس کالیفرنیا در سال ۱۹۷۴ نوشته شد. SED2WES قابل استفاده برای رسوبات بستر رس یا ماسه می‌باشد. این مدل را می‌توان برای مکان‌هایی که سرعت جریان به‌صورت دوبعدی می‌باشد، استفاده کرد. این مدل برای مطالعات رسوب‌گذاری و آب‌شستگی مفید می‌باشد. در این مدل رسوبات به دو دسته تقسیم می‌شوند: رسوبات غیرچسبنده و رسوبات چسبنده.

یکی از محدودیت‌های این مدل شبیه‌سازی رسوبات چسبنده و غیرچسبنده به‌صورت جداگانه می‌باشد. یعنی مدل باید دو بار اجرا گردد. سرعت سقوط، تنش برشی برای فرسایش، ثابت میزان فرسایش و تنش برشی بحرانی برای رسوب‌گذاری باید برای مدل تعریف گردد. مدل قادر به محاسبه تراز سطح آب و سرعت‌ها نمی‌باشد بلکه این اطلاعات باید توسط یک برنامه دیگر محاسبه گردد. برای محاسبات هیدرودینامیکی می‌توان از برنامه RAM2WES استفاده نمود. معادلات اساسی که به‌صورت المان محدود

فرمول‌بندی شده‌اند شامل: معادله پخشیدگی، محاسبه تنش برشی بستر، ترم تغذیه/تخلیه بستر و لایه‌بندی بستر می‌باشد. سایر محدودیت‌های این مدل را می‌توان شامل:

- الف- ثابت در نظر گرفتن لزجت مایع برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد که باعث می‌شود تا مقادیر غلظت رسوب در دماهای بیش‌تر را بیش از حد برآورد و در دماهای کم‌تر، کم‌تر از حد برآورد نماید،
- ب- تغییرات بستر تنها در حد ۲۵٪ عمق آب امکان پذیر است
- ج- تنها از یک معادله انتقال رسوب آیکرز و وایت برای بار کل رسوب استفاده می‌کند.

۵-۸-۲۰ مدل CCHE1D

از سال ۱۹۹۸ یک مدل عددی یک‌بعدی جدید برای انتقال رسوب در شبکه‌های آبراهه در NCCHE توسعه داده شد که جایگزین دو مدل DWAVNET و BEAMS گردید. مدل جدید CCHE1D نام‌گذاری شد که مدل‌های موج دیفیوژیو و دینامیک را در بر دارد و معادلات سنت و نانت را به‌صورت کامل حل می‌کند.

CCHE1D یک مدل هیدرودینامیک و انتقال رسوب در شبکه‌های آبراهه می‌باشد. CCHE1D شامل جنبه‌های متفاوتی از مدل‌سازی سیستم حوضه آبریز می‌باشد اما تأکید آن مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی آبراهه‌ها مانند هیدرولیک جریان، رسوب‌گذاری و فرسایش جریان و آنالیز پایداری شیب‌های جانبی آبراهه‌ها می‌باشد. مدل CCHE1D در مرکز ملی محاسبات مهندسی و علوم هیدرولیکی (NCCHE) دانشگاه می‌سی‌سی‌پی توسعه داده شده است. در یک پروژه آزمایشی COE و NRCS یک سیستم سازه‌های کنترل شامل سازه‌های شیب‌شکن کوتاه و بلند، فعالیت‌های مربوط به پایداری شیب‌های جانبی، خاکریزها، سازه‌های کنترل سیلاب و سازه‌های لوله‌ای نصب نمودند تا فرسایش آبراهه و حوضه آبریز را کاهش دهند و جریان رسوب و بده - اشل را اندازه‌گیری نمایند.

این مدل با روش انتقال غیرمتعادل، حل همزمان معادلات رسوب و جریان، انتقال رسوبات غیریکنواخت، تغییر بستر و مرتب‌شدگی بستر هماهنگ می‌باشد. چندین ویژگی جدید به مدل افزوده شده است تا مدل را برای دامنه وسیعی از مسایل مهندسی عملی قابل استفاده نماید. همچنین این مدل دارای قدرت گرافیکی بالایی می‌باشد.

CCHE1D انتقال رسوبات غیریکنواخت در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها را با استفاده از مدل انتقال غیریکنواخت محاسبه می‌نماید. این مدل، رسوب‌گذاری و فرسایش را همزمان با تغییرات ژئومتری مقاطع عرضی آبراهه‌ها، اندازه مواد بستر (شامل مرتب‌شدگی و تسلیج بستر) و فرسایش کناره‌ها و فرآیند عریض‌شدگی محاسبه می‌نماید. CCHE1D چندین گزینه برای محاسبات فرآیندهای مربوط به رسوب ایجاد می‌نماید. به عنوان مثال میزان انتقال رسوبات با استفاده از چهار فرمول (SEDTRA، ایکر وایت اصلاح شده، انگلوند هانسن اصلاح شده و فرمول وو و همکاران) قابل محاسبه می‌باشد. متغیرهای دیگر مانند تخلخل مواد بستر، دامنه اندازه بار شسته و ضخامت لایه ترکیب شده به خوبی توسط فرمول‌های متفاوتی قابل محاسبه می‌باشد. وجود این گزینه‌های چندگانه به کاربر اجازه می‌دهد تا فرمول‌های مناسب را انتخاب نماید تا مدل برای دامنه وسیعی از مکان‌ها قابل استفاده گردد. مدل CCHE1D جریان غیرماندگار را در شبکه‌های آبراهه با استفاده از مدل موج دیفیوژیو و دینامیک شبیه‌سازی می‌نماید. در این فرآیند مدل قادر می‌باشد ویژگی‌های جداگانه‌ای برای آبراهه اصلی و پهنه سیل‌گیر در نظر بگیرد. این مدل همچنین تأثیر سازه‌های هیدرولیکی شامل آب‌گذر، فلوم‌های اندازه‌گیری، پل‌ها و سازه‌های شیب‌شکن بررسی می‌نماید. مدل را می‌توان همراه یا بدون محاسبات انتقال رسوب اجرا نمود.

قدرت بالای CCHE1D در روندیابی انتقال رسوب باعث می‌شود این مدل برای مطالعات بلندمدت و کوتاه‌مدت قابل استفاده گردد. بخش هیدرودینامیک دقیق و جامع می‌باشد و برای مطالعات جریان غیرماندگار در یک بازه متنوع، از شبیه‌سازی یک آبراهه منفرد و یک سیل تا شبکه کانال‌های پیچیده با هزاران هیدروگراف قابل استفاده می‌باشد. این برنامه از سامانه مربوطه^۱ قابل ذخیره می‌باشد. به مدل‌های پیشرفته CCHE2D و CCHE3D نیز که به صورت دوبعدی و سه‌بعدی ارائه شده‌اند از همین سامانه می‌توان دسترسی داشت.

۵-۸-۲۱- مدل FLOW-3D

FLOW-3D یک مدل سه‌بعدی می‌باشد که در شرکت Flow Science توسعه داده شده است. FLOW-3D یک مدل اختلاف محدود غیر هیدرواستاتیکی می‌باشد که معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی و پیوستگی را به صورت همزمان حل می‌نماید. FLOW-3D برای کاربردهای متفاوت هیدرولیکی شامل موج‌های بریده شده، جریان اطراف استوانه‌های عمودی و جریان اطراف لوله‌های افقی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل گزینه‌ای برای انتخاب روش محاسبه توربولانس شامل دو گزینه $k-\epsilon$ و روش LES در اختیار کاربر قرار می‌دهد. FLOW-3D از روش حجم جریان برای رهگیری سطح مشترک مایع - مایع و هوا - استفاده می‌نماید. روش FAVOR جریان اطراف موانع غیرمستطیلی که در شبکه مستطیلی قرار دارند را حل می‌نماید. در این نرم‌افزار معادلات حاکم بر سیال با استفاده از تقریبات تفاضل (یا حجم) محدود حل می‌شود. همچنین محیط جریان به شبکه‌ای با سلولهای مستطیلی ثابت تقسیم شده که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول در نظر گرفته می‌شود، همه متغیرها در مرکز سلول قرار دارند. بخش آبشستگی FLOW-3D از بقا جرم و معادله انتقال - پخش استفاده می‌نماید تا انتقال رسوب را پیش‌بینی نماید. برای اطلاع بیش‌تر درخصوص مشخصات این مدل می‌توان به سامانه مربوطه^۲ مراجعه کرد [۵۶].

۵-۸-۲۲- مدل SSIIM

برنامه SSIIM در سال‌های ۹۱-۱۹۹۰ نوشته شده است. SSIIM برای حل سه‌بعدی معادلات کانوکشن - دیفیوژن، به منظور روندیابی محاسبات رسوب نوشته شده است. این مدل رسوبات ریزدانه را که در مسایل مربوط به توربین‌ها دارای اهمیت می‌باشند به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین برتری دیگر این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها توانایی آن برای شبیه‌سازی مشکلاتی مانند پر شدن مخازن و آبراهه‌ها می‌باشد. نسخه‌های مختلف SSIIM از سال ۱۹۹۳ بر روی اینترنت قرار داده شده‌اند. نسخه‌های ابتدایی تحت DOS، UNIX و OS/2 می‌باشد. در سال ۱۹۹۲ SSIIM تحت ویندوز نوشته شد. در سال ۲۰۰۱ نسخه‌ی تحت ویندوز SSIIM توسط زیربرنامه‌های DLL نوشته شد که حاوی الگوریتم‌هایی برای انتقال رسوب و مقاومت جریان در برابر گیاهان می‌باشد. SSIIM مختصر شده جمله «شبیه‌سازی رسوب در آبگیرها همراه با گزینه چند بلوکه» می‌باشد. این برنامه برای مهندسی رسوب، هیدرولیک، محیط زیست و رودخانه نوشته شده است. در ابتدا این برنامه برای شبیه‌سازی انتقال رسوب در کانال و رودخانه نوشته شده، سپس استفاده از این برنامه برای موضوعات دیگر مهندسی هیدرولیک مانند مدل‌سازی سرریز، افت ارتفاع در تونل‌ها، روابط بده-اشل در رودخانه‌ها، جریانات غلیظ و... توسعه داده شده است. اصلی‌ترین ویژگی SSIIM در مقایسه با دیگر برنامه‌های محاسبه دینامیک

1- <http://www.ncche.olemiss.edu/content/software>

2- <http://www.osc.edu/supercomputing/software/apps/flow3d.shtml>

سیال (CFD)، توانایی مدل‌سازی انتقال رسوب در بستر متحرک همراه با ژئومتری پیچیده می‌باشد. این برنامه فرآیند روسازی، بار بستر، بار معلق، فرم بستر و تاثیر بسترهای شیبدار را در نظر می‌گیرد. SSIIM سال‌ها برای مطالعات زیستگاه‌ها در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر مدل‌سازی جلبک به عنوان قسمتی از مهندسی کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته است. در جریان آشفته معادلات ناویراستوکس برای تعیین سرعت جریان در یک ژئومتری سه‌بعدی حل می‌شوند. مدل $K - \epsilon$ برای محاسبه تنش برشی آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. کیفیت آب با استفاده از معادله کانوکشن - دیفیوژن برای هر یک از متغیرهای کیفیت آب انجام می‌شود. SSIIM انتقال رسوب را بر اساس بازه‌های اندازه ذرات محاسبه می‌نماید. توزیع غلظت رسوبات در راستای عمودی بر اساس فرمول هانتز - راس محاسبه می‌گردد. انتقال رسوب معمولاً به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم می‌گردد. بار معلق توسط معادله کانوکشن - دیفیوژن محاسبه می‌گردد. برای محاسبه بار بستر از فرمول فان راین استفاده می‌گردد. اطلاعات ورودی مدل در دو فایل اصلی unstruc و control قرار می‌گیرد. در فایل unstruc اطلاعات مربوط به شبکه‌بندی و بده آب و در فایل کنترل دیگر متغیرها به مدل معرفی می‌گردند. متغیرهایی مانند سرعت جریان، تنش برشی و عمق آب، درصد تله‌اندازی و توزیع اندازه ذرات رسوب در فایل boogi نوشته می‌شود. همچنین مدل قادر است سرعت و پروفیل محاسبه شده را با مقادیر برداشت‌شده مقایسه نماید. قابلیت‌های گرافیکی مدل عبارتند از: ترسیم خطوط کنتور، پروفیل طولی، پروفیل مقاطع، نقشه سه‌بعدی و مقایسه پروفیل و نقشه محاسبه‌شده با مقادیر برداشت‌شده. این برنامه قابل برداشت به صورت رایگان از سامانه مربوط^۱ قابل برداشت می‌باشد.

۵-۸-۲۳- مدل GSTARS3

Gstars3^۲ مدل انتقال رسوب عمومی برای شبیه‌سازی رودخانه‌های رسوبی، آخرین نسخه سری مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌های رسوبی می‌باشد که در گروه هیدرولیک رودخانه و رسوب مرکز USBR (اداره احیا ایالات متحده) ایجاد شده است. این نرم‌افزار توسط یانگ^۳ و سیموز^۴ نگارش شده است. این نسخه، بهتر از مدل‌های Gstars 2.0 و Gstars 2.1 (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ یانگ و سیموز، ۲۰۰۰) می‌باشد. این مدل با وجود یک بعدی بودن، قادر به شبیه‌سازی شبه دویعدی جریان و شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی تغییرات هندسه آبراهه می‌باشد. محاسبات فرآب در این مدل، با استفاده از روش گام به گام استاندارد و بر اساس معادلات انرژی و مومنتم انجام می‌شود.

مدل‌های Gstars دارای توانایی‌هایی به شرح زیر می‌باشند:

- متغیرهای هیدرولیکی را برای کانال‌های باز چه با مرزهای ثابت و چه با مرزهای متحرک محاسبه می‌کند.
- پروفیل سطح آب را در رژیم‌های جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی از این دو، یعنی ترکیب جریان‌های زیربحرانی و فوق بحرانی محاسبه می‌کند.
- متغیرهای هیدرولیکی و رسوب را در جهت‌های طولی و عرضی شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌کند.
- تغییرات پروفیل کانال‌های رسوبی و هندسه مقطع را چه عرض کانال ثابت باشد یا متغیر، شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌کند.
- شرایط خاصی نظیر مانند پایداری کناره‌های کانال و محدودیت‌های فرسایش را بتواند ایجاد کند.

1- <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim>

2- Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation

3- Chih Ted Yang

4- Francisco J.M. Simoes

Gstars نسخه 3.0 بر پایه Gstars نسخه 2.1 ایجاد شده است و دارای چهار قسمت اصلی می‌باشد. قسمت اول از هر دو معادله انرژی و مومنتم برای محاسبات فراآب استفاده می‌کند. این خصوصیت به برنامه اجازه می‌دهد تا بتواند پروفیل سطح آب را از طریق ترکیب جریان‌های زیربحرانی و فوق بحرانی محاسبه کند. در این محاسبات، GSTARS3 می‌تواند سطح مقطع‌های نامنظم را صرف‌نظر از این که کانال یکی باشد یا از چند کانال جدا شده با جزایر کوچک تشکیل شده باشد، استفاده کند.

قسمت دوم استفاده از مفهوم لوله‌های جریان می‌باشد که در محاسبات روندیابی رسوب استفاده می‌شود. متغیرهای هیدرولیکی و روندیابی رسوب برای هر لوله جریان محاسبه می‌شوند؛ در نتیجه تغییرات جانبی در مقطع به صورت شبه دوبعدی ایجاد می‌شود. اگرچه هیچ جریانی نمی‌تواند از مرزهای لوله‌های جریان عبور کند، شیب جانبی بستر و جریان‌های ثانویه در GSTARS3 محاسبه می‌شود که باعث تبادل رسوب بین لوله‌های جریان خواهد شد. موقعیت و عرض هر لوله جریان ممکن است در هر گام از محاسبات تغییر کند. فرسایش یا ته‌نشینی محاسبه شده در هر لوله جریان تغییرات هندسه کانال را در جهت قائم (یا جانبی) به ما می‌دهد. ابتدا پروفیل سطح آب محاسبه می‌شود. سپس کانال به تعداد مشخصی با مشخصات زیر تقسیم می‌شود:

- بده کل عبوری در کانال به طور مساوی بین لوله‌های جریان تقسیم می‌شود.
- مرزهای لوله‌های جریان عبارتند از مرزهای کانال و دیوارهای قائم فرضی بین آنها.
- بده در طول هر لوله جریان ثابت است (یعنی هیچ آبی از مرزهای لوله جریان عبور نمی‌کند).
- سورتینگ و آرمورینگ بستر در هر لوله جریان بر اساس روشی که به وسیله بنت (Bennett) و نردین (Nordin) در سال ۱۹۹۷
- ارایه شد، محاسبه می‌شود و میزان انتقال رسوب می‌تواند با استفاده از هر کدام از روش‌های زیر انجام شود:

- روش دوبوی^۱ (۱۸۷۹)
- روش میر - پتر و مولر^۲ (۱۹۴۸)
- روش لارسن^۳ (۱۹۵۸)
- روش اصلاح شده لارسن به وسیله مدن^۴ (۱۹۹۳)
- روش توفالتی^۵ (۱۹۶۹)
- روش انگلاند و هانسن^۶ (۱۹۷۳)
- روش ایکرز و وایت^۷ (۱۹۷۳)
- روش تجدیدنظر شده ایکرز و وایت (۱۹۹۰)
- روش انتقال شن (۱۹۸۴) و ماسه (۱۹۷۳) یانگ
- روش انتقال شن (۱۹۸۴) و ماسه (۱۹۷۹) یانگ
- روش پارکر^۸ (۱۹۹۰)
- روش تصحیح شده یانگ برای غلظت‌های بالای بار شستشو (۱۹۹۶)

1- DuBoys
2- Meyer-Peter and Müller
3- Laursen
4- Madden
5- Toffaleti
6- Engelund and Hansen
7- Ackers and White
8- Parker

- روش آشیدا و میچیو^۱ (۱۹۷۲)
- روش دانشگاه سینقوا^۲ (IRTCS, 1985)
- روش‌های کرون^۳ (۱۹۶۲) و کرون و آریاتورای^۴ (۱۹۷۶) برای رسوبات چسبنده بعضی از توانایی‌های بالقوه و یا خصوصیات GSTARS3 به شرح زیر است:
- GSTARS3 می‌تواند برای محاسبات سطح آب با یا بدون انتقال رسوب به کار رود.
- GSTARS3 می‌تواند برای محاسبات سطح آب در حین تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی که شامل پرش هیدرولیکی می‌باشد استفاده شود.
- GSTARS3 می‌تواند تغییرات طولی و جانبی شرایط جریان و رسوب را در حالت شبه دوبعدی بر پایه مفهوم لوله‌های جریان محاسبه کند. اگر تنها یک لوله جریان انتخاب شود، مدل یک‌بعدی خواهد شد. اگر چند لوله جریان انتخاب شود، در هر دو جهت قائم و جانبی تغییرات تراز بستر می‌تواند شبیه‌سازی شود.
- الگوریتم سورتنینگ و آرمورینگ بستر بر پایه درصد دانه‌های رسوب می‌باشد و می‌تواند یک شبیه‌سازی واقع گرایانه از فرآیند آرمورینگ بستر را فراهم کند.
- GSTARS3 می‌تواند تغییرات هندسه کانال را همزمان در جهت عرض و عمق بر پایه حداقل توان کل جریان شبیه‌سازی کند.
- گزینه پایداری کناره‌های کانال اجازه شبیه‌سازی تغییرات هندسه کانال را بر پایه زاویه پاسخ مواد کناره کانال و قانون پیوستگی به ما می‌دهد.
- در طول هر گام زمانی که بده ثابت در نظر گرفته می‌شود، معادلات جریان دایمی برای محاسبات فراآب حل می‌شود. وقتی که رژیم جریان عوض نمی‌شود، Gstars 3.0 معادله انرژی را بر اساس روش گام به گام استاندارد حل می‌کند و در جایی که جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی یا بالعکس تبدیل می‌شود، از معادله اندازه حرکت استفاده می‌کند.
- Gstars 3.0 برای اکثر محاسبات پروفیل سطح آب، از معادله انرژی استفاده می‌کند.
- برای بازه‌هایی که در آنها رژیم جریان تغییر می‌کند، مثلاً در پرش هیدرولیکی، از معادله مومنتم استفاده می‌شود. روندیابی رسوب به طور مستقل در طول هر لوله جریان با فرض این‌که هیچ تبادل جرمی در عرض لوله‌های جریان وجود ندارد، انجام می‌شود. محاسبات روندیابی رسوب با استفاده از معادله پیوستگی رسوب انجام می‌شود.
- Gstars 3.0 میزان انتقال رسوب را برای هر گروه اندازه محاسبه می‌کند. در نتیجه، ذرات با اندازه‌های متفاوت دارای نرخ انتقال متفاوتی خواهد بود. بسته به متغیرهای هیدرولیکی، توزیع رسوب ورودی و ترکیب مواد بستر، بعضی از ذرات انتقال می‌یابند و بعضی دیگر ممکن است ته‌نشین شوند یا این‌که بدون حرکت در بستر باقی بمانند. Gstars 3.0 ظرفیت حمل را برای هر جزء اندازه موجود در بستر محاسبه می‌کند. متعاقباً فرآیندهای متفاوتی ممکن است اتفاق بیفتد. به عنوان مثال، ممکن است کلیه ذرات ریز فرسایش یابند و یک لایه از ذرات درشت باقی بماند که اصطلاحاً مسلح گفته می‌شود. این لایه مسلح، از فرسایش مواد زیرین جلوگیری می‌کند و مقدار رسوبات موجود برای انتقال، به میزان رسوب ورودی به بازه محدود می‌شود. با این وجود، شرایط هیدرولیکی آینده از

1- Ashida and Michiue

2- Tsinghua

3- Krone

4- Ariathurai

قبیل افزایش سرعت جریان ممکن است ظرفیت حمل جریان را افزایش دهد که در نتیجه باعث شکستن لایه مسلح شده و فرآیند فرسایش در بازه از سر گرفته شود.

در Gstars 3.0 انتقال سیلت و رس، جدا از مصالح غیرچسبنده محاسبه می‌شود. وقوع فرسایش یا رسوب‌گذاری توسط مقدار تنش برشی بستر، τ_b ، کنترل می‌شود. وقتی که τ_b کوچک‌تر از تنش برشی بحرانی بستر برای رسوب‌گذاری، τ_{cd} ، باشد ته‌نشینی رس و سیلت اتفاق می‌افتد. در این حالت روش Korne مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از طرف دیگر، وقتی که τ_b بزرگ‌تر از تنش برشی بحرانی بستر برای فرسایش ذره‌ای^۱، τ_{cs} ، می‌شود فرسایش سیلت و رس اتفاق می‌افتد. در این حالت، دو فرآیند توسط Gstars 3.0 مدل می‌شود: فرسایش ذره‌ای و فرسایش توده‌ای^۲. فرسایش ذره‌ای همان‌طوری که گفته شد، زمانی اتفاق می‌افتد که $\tau_b > \tau_{cs}$. فرسایش توده‌ای نیز زمانی اتفاق می‌افتد که τ_b بزرگ‌تر از تنش برشی بحرانی بستر برای فرسایش توده‌ای، τ_{cm} ، شود.

در رودخانه‌های متعادل معمولاً این فرض قابل قبول است که بده بار بستر با ظرفیت حمل رسوب جریان برابر است. با این وجود، شرایطی وجود دارد که اثرات تاخیر مکانی یا زمانی مهم است. به‌عنوان مثال، فرآیندهای رسوب‌گذاری مخزن و ته‌نشینی رسوب در دهانه رودها فرآیندهای نامتعادل هستند. در این مدل می‌توان حالت انتقال رسوب غیر متعادل را به نرم‌افزار معرفی کرد.

Gstars 3.0 می‌تواند علاوه بر تغییرات عمودی بستر، تغییرات عرض آبراهه را نیز محاسبه کند. تئوری اصلی برای تعیین تنظیمات عرض، بر اساس تئوری حداقل نرخ مصرف انرژی و حالت خاص این تئوری، یعنی تئوری قدرت جریان حداقل می‌باشد. تئوری حداقل نرخ مصرف انرژی بیان می‌کند که وقتی یک سیستم بسته، با مصرف انرژی به تعادل دینامیکی می‌رسد، نرخ مصرف انرژی آن باید به مقدار حداقل برسد. نشان داده شده است وقتی که فرسایش وجود داشته باشد، تنظیم آبراهه می‌تواند با عمیق‌تر شدن و یا با عریض‌تر شدن مقطع عرضی انجام شود. هم عریض‌تر شدن و هم عمیق‌تر شدن آبراهه می‌تواند قدرت جریان کل برای بازه را کاهش دهد؛ اما Gstars 3.0 تنظیمی را انتخاب می‌کند که باعث حداقل شدن قدرت جریان کل برای بازه می‌شود. از طرف دیگر، اگر به وسیله محاسبات روندیابی رسوب، رسوب‌گذاری پیش‌بینی شود، پس یا بستر بالاتر می‌آید یا سطح مقطع کم‌عرض‌تر می‌شود. از این دو، انتخابی که باعث حداقل شدن قدرت جریان کل برای بازه می‌شود مورد نظر است.

۵-۸-۲۴- مدل TABS

مدل TABS-2 یک مدل دوبعدی است که قادر است تا شرایط هیدرولیکی، رسوب و آلودگی را در رودخانه‌ها، مخازن و خورها شبیه‌سازی کند. این مدل دارای سه برنامه می‌باشد که عبارتند از RMA-2 برای تعیین شرایط هیدرولیکی در دوبعدی، STUDH برای انتقال رسوب و RMA-4 برای شبیه‌سازی کیفی. در مدل RMA-2 معادلات ناویراستوکس در دو بعد و با روش المان‌های محدود حل می‌شود. مقدار ضریب اصطکاک با استفاده از معادله مانینگ و ضرایب لزجت ادی نیز برای تعیین خصوصیات جریان‌های درهم به کار رفته است. این مدل به صورت خودکار المان‌های خشک (بدون آب) را تشخیص داده و شبکه را منطبق با آن اصلاح می‌کند. برنامه STUDH نیز معادلات انتقال - پخشیدگی را برای بررسی انتقال رسوب حل می‌کند. این برنامه قادر است تا هم رسوبات چسبنده و هم رسوبات غیرچسبنده را بر آورد نماید. برای تخمین میزان فرسایش و ترسیب رسوبات چسبنده از معادلات

تجربی بهره گرفته است. این برنامه رسوبات نهشته شده را به صورت لایه‌لایه محاسبه و در هر گره تا ده‌لایه متفاوت، از نظر خصوصیات رسوب و ضخامت، می‌تواند در نظر گیرد. برنامه RMA-4 نیز برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفی آب که از معادله انتقال - پخشیدگی و در دو بعد استفاده می‌کند. برای اطلاع بیشتر به سامانه مربوط^۱ مراجعه شود.

۵-۸-۲۵ مدل Delft3D

مدل دو و سه‌بعدی توسط موسسه دلفت هلند و برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک، انتقال رسوب، مرفولوژی و کیفیت آب در رودخانه، خورها و سواحل ارایه شده است. اطلاعات بیش‌تر در رابطه با این مدل را می‌توان از سامانه مربوط^۲ به‌دست آورد.

۵-۸-۲۶ مدل HSCTM2D

نرم‌افزار HSCTM2D با استفاده از روش المان‌های محدود برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان آب سطحی (رودخانه‌ها و دریاچه‌ها) انتقال رسوبات و آلودگی طراحی شده است. مدل از دو بخش، یکی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان (با نام HYDRO2D) و دیگری برای شبیه‌سازی انتقال رسوب و آلودگی (با نام CS2D) تشکیل شده است. مدل HSCTM2D قادر به شبیه‌سازی نرخ رسوب‌گذاری یا آبستگ رسوب در دوره‌های کوتاه مدت (کم‌تر از یک سال) و بلندمدت و انتقال آلودگی نیز می‌باشد.

HYDRO2D معادلات سنت و نانت را برای مولفه‌های سرعت متوسط افقی حل می‌کند. در این معادلات اثرات کف، تنش‌های برشی سطحی و داخلی در نظر گرفته می‌شود. CS2D معادلات انتقال - انتشار را برای توزیع غلظت عمودی رسوبات معلق، آلودگی‌های محلول و غیر محلول حل می‌کند و فرآیندهای پخش، تراکم، فرسایش و رسوب‌گذاری را شبیه‌سازی می‌کند. HSCTM2D تحلیل برنامه را در دو حالت غیرجفت و نیمه‌جفت انجام می‌دهد. در سیستم غیر جفت HYDRO2D به صورت جدا از مدل CS2D اجرا می‌شود. اما در حالت نیمه‌جفت HYDRO2D و CS2D به صورت پشت سر هم اجرا می‌شوند. در ابتدا مدل HYDRO2D محاسبات مربوط به جریان را در گام‌های زمانی مشخص انجام می‌دهد سپس مشخصات جریان پیش‌بینی شده در مدل CS2D به کار می‌رود تا انتقال رسوبات و آلودگی در طول همان زمان محاسبه شود. پس از اجرای CS2D مدل هیدرودینامیک دوباره اجرا می‌شود تا مشخصات جریان را برای بستر جدید به‌دست آورد.

۵-۹- مقایسه روش‌های ریاضی

همان‌طور که توضیح داده شد روش‌های ریاضی بسیاری برای پیش‌بینی نحوه رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و مخازن ارایه شده است. با توجه به تئوری هر مدل، فرضیات معادلات و شرایط جریان و دقت هر روش متفاوت می‌باشد. باید توجه داشت که مبنای تئوری هر مدل با شرایط مکان مورد مطالعه تطابق داشته باشد. به عنوان مثال تئوری جت برای ذرات خیلی بزرگ که در مصب رودخانه‌ها و مخازن ته‌نشین می‌شوند، کاربرد دارد. این مدل قابلیت در نظر گرفتن ذرات رسوبی کوچک و حتی محاسبه میزان انتقال ذرات درشت را ندارد. تئوری پخشیدگی ممکن است برای ذرات خیلی ریز استفاده شود ولی قابلیت آنالیز ذرات رسوبی درشت را ندارد.

1- <http://chl.erdc.usace.army.mil/chl.aspx?p=s&a=Software!10>

2- <http://delftsoftware.wldelft.nl>

روش‌هایی که اساس آنها تئوری انتقال رسوب می‌باشد از اطمینان بیش‌تری برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب‌گذاری برخوردار می‌باشند و این بدان علت می‌باشد که در دو دهه اخیر تحقیقات با ارزش زیادی برای توسعه و تکمیل این نوع از روش‌های ریاضی صورت گرفته است. در سال‌های اخیر بیش‌تر تحقیقات در جهت به‌هم‌آمیختن فازهای جریان آب و رسوب و هم‌چنین ایجاد مدل‌هایی که قادر به شبیه‌سازی جریان و رسوب در دو و سه بعد باشند، صورت گرفته است.

۵-۱۰- داده‌های مورد نیاز مدل‌های ریاضی

برای حل معادلات ریاضی حاکم بر جریان و رسوب در رودخانه‌ها و مخازن سدها، باید شرایط مرزی مدل مشخص شوند. این شرایط داده‌های جریان و رسوب در مرزهای بالا و یا پایین دست و وضعیت توپوگرافی یا هندسه مدل می‌باشد. مسلماً هر چه دقت داده‌های ورودی بیش‌تر باشد نتایج حاصل از مدل نیز دقیق‌تر خواهد بود. در این بخش داده‌های مورد نیاز در چهار قسمت شامل داده‌های هیدرولوژی، داده‌های هندسی، داده‌های هیدرولیکی و داده‌های رسوب ارایه می‌گردد.

۵-۱۰-۱- داده‌های هیدرولوژی

در بیش‌تر مدل‌های ریاضی، آبنگار جریان ورودی در مرز بالادست نیاز می‌باشد. معمولاً آبنگار به کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود و برای هر بده فرض می‌شود که در یک مدت زمان مشخص، ثابت است. از آن‌جا که رسوب بیش‌تر تابع بده‌های زیاد می‌باشد، این مدت زمان را در بده‌های کم‌تر طولانی انتخاب می‌کنند. شکل (۴-۵) هیدروگراف واقعی و هیدروگراف ساخته شده برای اجرای مدل ریاضی را نشان می‌دهد. آبنگار ورودی ممکن است برای بده‌های با دوره بازگشت‌های مختلف ساخته و سپس استفاده شود. در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در جریان‌های ماندگار تنها از یک بده استفاده می‌شود که همان بده سیل با دوره بازگشت مشخص می‌باشد.



شکل ۴-۵- آبنگار واقعی و آبنگار ساخته شده برای اجرای مدل ریاضی

۵-۱۰-۲- داده‌های هندسی

داده‌های هندسی، وضعیت توپوگرافی بستر، سواحل و مسیل رودخانه و مخزن را مشخص می‌کند. داده‌های هندسی مورد نیاز مدل‌های دو و سه بعدی به صورت سری مختصات نقاط در سه بعد x ، y و z در موقعیت‌های خاصی می‌باشند. بدیهی است وضعیت توپوگرافی بین موقعیت‌هایی که مختصات آنها اندازه‌گیری نشده است، با روش‌های درون‌یابی تعیین خواهند شد. برای این منظور در

این خصوص می‌توان از روش‌های درون‌یابی ساده خطی تا روش‌های درون‌یابی پیچیده نظیر کریجینگ^۱ استفاده کرد. برای رودخانه‌ها بهتر است از روش‌های خاصی استفاده شود تا وضعیت توپوگرافی تولید شده منطبق بر خصوصیات فیزیکی خطوط جریان باشد.

در مدل‌های یک‌بعدی، معمولاً شرایط هندسی رودخانه تنها با وارد کردن مقاطع عرضی رودخانه در موقعیت‌های خاصی تعریف می‌شود.

هر مقطع عرضی با یک خط عمود بر خط جریان به‌عنوان خط مبنا مشخص خواهد شد. این خط با یک سری نقاط در دو طرف خط تعریف می‌شود. فاصله عرضی نقاط و تراز نقاط نسبت به سطح مبنا این خط اطلاعاتی در رابطه با شکل مقطع در موقعیت کانال‌های فرعی را نشان می‌دهد و باید در بالاترین تراز ممکن برداشت شوند. فاصله بین مقاطع عرضی در طول خطوط جریان و در دو طرف و مرکز خط مبنا باید برداشت گردند. در شرایط بده لبریز، فاصله مرکز دو خط را می‌توان در طول خط‌القدر رودخانه برداشت کرد که البته در شرایط سیلابی طول آن تغییر خواهد کرد.

مقاطع عرضی، از مهم‌ترین داده‌های هندسی رودخانه و مخازن هستند و دقت نتایج به اطلاعات جمع‌آوری شده از مقاطع عرضی بستگی دارد. مقاطع عرضی باید آن‌چنان انتخاب شوند که شرایط هیدرولیکی به‌طور کامل شبیه‌سازی گردد. هر چه فاصله بین مقاطع عرضی کوتاه‌تر باشد، نیاز به درون‌یابی کمتر و هندسه مدل به واقعیت نزدیکتر خواهد بود ولی از طرفی برداشت آنها پرهزینه و زمان اجرای مدل نیز طولانی‌تر می‌شود. ساموئل معیارهای زیر را برای انتخاب موقعیت مقاطع عرضی ارائه نموده است:

- تمام موقعیت‌های کلیدی که نیاز به اطلاعات خروجی مدل در آن موقعیت‌ها می‌باشند.
- موقعیت‌هایی که در آن سازه‌های بزرگ یا نقاط کنترل قرار دارند.
- در اولین تخمین، فاصله بین مقاطع عرضی حدود ۲۰ برابر عرض بالای مقطع عرضی انتخاب شوند.
- حداکثر فاصله بین مقاطع عرضی نباید از نسبت دو دهم عمق به شیب سطح آب $(0.2d/S_w)$ تجاوز کند.
- برای مدل‌های غیرماندگار، حداکثر فاصله بین مقاطع عرضی $L/30$ است که L برابر طول موج‌های مهم اتفاق افتاده است.
- حداقل فاصله بین مقاطع عرضی برابر است با:

$$10^{\text{INT}(\log Z) - \varepsilon} / (\delta S - S_w) \quad (5-14)$$

که در آن Z تراز سطح آب، $\text{INT}(\log z)$ یعنی عدد صحیح (پس از حذف اعشار) است که از محاسبه $\log(z)$ به‌دست می‌آید. به‌طور مثال $Z = 112$ باشد در آن صورت $\text{INT}(\log Z) = 2$ می‌باشد.

δS میزان نسبی خطای اندازه‌گیری شیب می‌باشد.

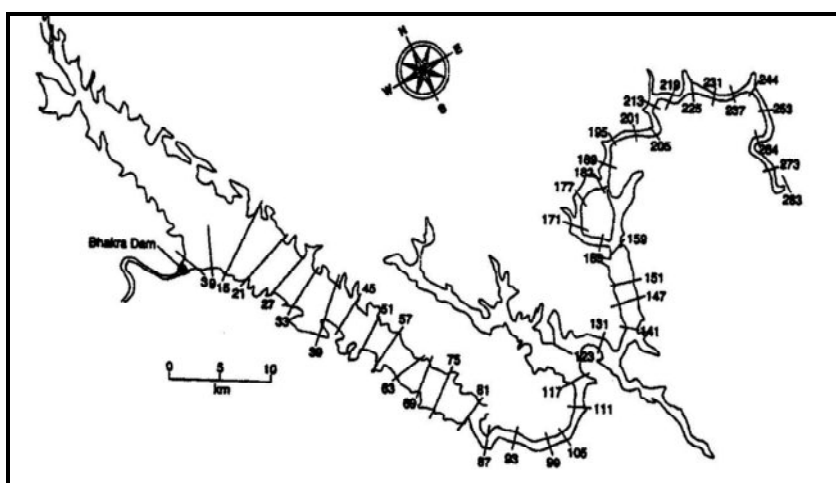
- نسبت مساحت بین دو سطح مقطع عرضی متوالی بهتر است بین $\frac{2}{3}$ تا $\frac{3}{4}$ باشد.

به‌طور کلی انتخاب موقعیت مقاطع عرضی و برداشت آنها باید با دقت کافی انجام گیرد تا همان‌طور که قبلاً هم گفته شد وضعیت توپوگرافی به‌وجود آمده بتواند شرایط هیدرولیکی را شبیه‌سازی نماید. بدیهی است مکان‌هایی که از نظر هیدرولیکی هیچ تاثیری روی شرایط هیدرولیکی ندارند، باید حذف شوند. به‌طور مثال شکل (5-5) مقاطع عرضی برداشت شده سد باکارا در کشور

هندوستان را نشان می‌دهد. بعضی از مناطق که بر روی جریان اصلی تاثیری ندارند برداشت نشده‌اند ولی در عوض فواصل بین مقاطع کوچک‌تر انتخاب شده است. علاوه بر مقاطع عرضی، ضروری است که عرض و عمق بستر متحرک نیز برداشت شود. عمق لایه غیرقابل فرسایش نظیر سنگ مادر و یا لایه رس سخت هم نیز مشخص گردد. رقوم این لایه به عنوان حد مرزی فرسایش یا آب‌شستگی در مدل‌ها منظور خواهد شد.

۵-۱-۳- داده‌های هیدرولیکی

بیش‌تر مدل‌های ریاضی ابتدا شرایط هیدرولیکی جریان را در طول مخزن محاسبه می‌کنند. از این رو داشتن شرایط مرزی ضروری است. در جریان‌های زیربحرانی معمولاً مقدار بده یا هیدروگراف بده در مرز بالادست و مقدار اشل برای آن بده در بازه‌ی پایین‌دست مورد نیاز است. در صورتی که برای شبیه‌سازی جریان‌های فوق بحرانی هم مقدار اشل و هم بده در بالادست باید معلوم باشند. در مدل‌های دو و سه‌بعدی، بردارهای سرعت در مرز بالادست نیاز است که معمولاً در اختیار نیست، از این رو باید براساس بده معلوم، بردارهای سرعت در آن مقطع به صورت تصنعی طوری ساخته شوند که رابطه توزیع قائم لگاریتمی سرعت برقرار باشد.



شکل ۵-۵- مقاطع عرضی برداشت شده سد با کارا در کشور هندوستان

بدین ترتیب که ابتدا مقطع عرضی را به مقاطع کوچک‌تر تقسیم و برای هر مقطع کوچک درصدی از بده را به آن اختصاص و از تقسیم بده بر مساحت آن زیرمقطع سرعت متوسط آن زیرمقطع به دست می‌آید که سپس با به کار بردن توزیع لگاریتمی قائم سرعت، بردارهای سرعت در نقاط مشخص از مقطع به دست می‌آیند. در مرز پایین‌دست مقدار اشل یا تراز سطح آب برای بده مورد نظر باید مشخص باشد. بهتر است که رابطه بده - اشل در مرز پایین‌دست وارد گردد. چنان‌چه این رابطه موجود نباشد می‌توان در رودخانه‌های آبرفتی و با استفاده از روش‌های برآورد منحنی بده - اشل نظیر روش انیشتین - براون [رجوع شود به فصل ۵ کتاب هیدرولیک رسوب دکتر شفاعی بجنستان] استفاده کرد. در مخازن سدها، مقدار تراز سطح آب پایین‌دست یا همان اشل در محل سد معلوم است البته چون این مقدار به شرایط بهره‌برداری از مخزن سد بستگی دارد در رودخانه‌های جزر و مدی از تغییرات زمانی اشل استفاده می‌شود. از جمله متغیرهای دیگری که نیاز می‌باشد ضریب زبری مانینگ یا ضریب شزی است که انتخاب مقدار قابل قبول آن بستگی به شرایط توپوگرافی، وضعیت پوشش گیاهی و پستی و بلندی‌های بستر دارد و انتخاب مقدار مناسبی برای آن نیاز به تجربه

کافی دارد. مقدار ضریب زبری را باید برای هر بازه‌ای از رودخانه یا مخزن تعریف کرد. مقدار ضریب زبری را نیز می‌توان با آزمون و خطا به دست آورد. بدین ترتیب که ابتدا مدل با پیش‌فرض مقادیری برای زبری اجرا می‌گردد و سپس اجرای مدل با تغییر زبری آنقدر تکرار می‌شود تا این که تراز سطح آب در مقطع خاصی از رودخانه برابر تراز سطح آب معلوم باشد. برای این عمل لازم است تا تراز سطح آب در مقطعی و برای یک بده مشخصی قبلاً اندازه‌گیری شده باشد. رابطه بده - اشل سرریز خروجی نیز لازم است. محاسبات هیدرولیکی معمولاً تا مقطعی در فاصله دور دست ادامه دارد که مرز بالادست خواهد بود. مرز بالادست مقطعی است پایدار که تحت شرایط مختلف جریان تغییر نخواهد کرد (نه رسوب‌گذاری و نه فرسایش اتفاق می‌افتد).

۵-۱۰-۴- داده‌های رسوب

اطلاعات دیگری که مدل‌های ریاضی رسوب نیاز دارند، خصوصیات رسوب بستر و معلق به‌خصوص دانه‌بندی و وزن مخصوص اولیه می‌باشد. ضریب شکل ذرات و زاویه ایستایی نیز از متغیرهایی است که بهتر است قبلاً اندازه‌گیری و به مدل وارد شود. معمولاً در برنامه مدل‌های ریاضی تعداد زیادی از روابط تجربی برآورد میزان رسوب کل وجود دارد که کاربر می‌تواند یکی از آن‌ها را انتخاب کند. نتایج به دست آمده بر اساس یک معادله انتقال رسوب با نتایج حاصل از کاربرد معادله انتقال رسوب دیگری متفاوت می‌باشد و حتی ممکن است مقدار حجم رسوب نهشته شده را تا دو برابر و یا بیش‌تر هم محاسبه کند. از این رو بهتر است ابتدا با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده رسوب در ایستگاه آب‌سنجی، مناسب‌ترین رابطه انتقال رسوب مشخص شود. حتی در چنین شرایطی باز هم نتایج ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشند. روش دیگر برای انتخاب مناسب‌ترین معادله انتقال رسوب استفاده از نتایج نقشه‌برداری مخزن می‌باشد. البته این وقتی کاربرد دارد که از مخزن سد پس از مدتی بهره‌برداری، نقشه‌برداری به عمل آمده باشد و با مقایسه با نقشه‌برداری‌های اولیه قبل از احداث سد، حجم رسوب‌گذاری یا وزن رسوب‌گذاری مشخص شده باشد. چنانچه این اطلاعات موجود باشد، مدل ریاضی را می‌توان با معادلات انتقال رسوب متفاوت اجرا و وزن رسوب محاسبه شده توسط مدل را با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کرد و معادله‌ای را انتخاب کرد که اختلاف مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کمینه باشد. بیش‌تر مدل‌های ریاضی به کاربر این اجازه را می‌دهند که علاوه بر معادلات انتقال رسوب استاندارد که در مدل قرار دارد، معادله بده - سنج رسوب را نیز وارد کنند.

برای مخازن جدید که اطلاعات نقشه‌برداری پس از بهره‌برداری وجود ندارد، انتخاب مناسب معادله انتقال رسوب باید بر اساس قضاوت کارشناس و یا مقایسه با دیگر مخازن مشابه باشد و توصیه می‌گردد که از معادله بده - سنج رسوب استفاده شود و یا این که قبلاً معادلات گوناگون انتقال رسوب با معادله بده - سنج رسوب مقایسه و بهترین معادله انتخاب و در مدل از آن استفاده می‌شود.

۵-۱۰-۵- واسنجی^۱، دقت‌سنجی^۲ و حساسیت‌سنجی^۳ مدل‌های ریاضی

معادلات به کار رفته در مدل‌های ریاضی دارای ضرایب متعددی هستند که انتخاب ناصحیح آنها ممکن است منجر به جواب‌های دور از واقعیت گردد. یکی از روش‌هایی که به انتخاب مناسب ضرایب می‌تواند کمک کند واسنجی مدل از نظر هیدرولیکی است. از این رو بهتر است ابتدا مدل به صورت بستر صلب (بدون انتقال رسوب) و با وارد کردن تدریجی مقاطع عرضی اجرا گردد. پس از

1- Calibration

2- Verification

3- Sensitive Analysis

تکمیل داده‌های هندسی رودخانه و مخزن، مدل با شرایط بده کم، بده لبریز، و بده‌های سیلابی اجرا و واسنجی می‌گردد. روش واسنجی نیز به همان ترتیبی است که در قسمت قبلی اشاره شد. پس از این مرحله مدل به صورت بستر متحرک در نظر گرفته شود. توجه شود که ضرایب زبری که در مقاطع مختلف با بازه‌های مختلف به دست آمده تنها برای شرایط هیدرولیکی مناسب است، چرا که پس از منظور نمودن انتقال رسوب، زبری ممکن است تغییر کند.

پس از واسنجی هیدرولیکی مدل، بخش انتقال رسوب مدل اجرا می‌گردد. در این مرحله انتخاب معادله انتقال رسوب مناسب جز کار واسنجی مدل خواهد بود. از این رو اطلاعات هیدروگرافی مخزن می‌تواند به عنوان مبنا کار واسنجی قرار گیرد. بدین ترتیب که مقدار حجم اندازه‌گیری رسوب نهشته شده با مقدار محاسبه شده از مدل مقایسه می‌شود. روش دقیق‌تر این است که پروفیل طولی تالوگ یا خط القعر مخزن را که قبلاً اندازه‌گیری شده است با آنچه که مدل پیش‌بینی کرده است مقایسه کرد. مسلماً نمی‌توان انتظار داشت که این دو پروفیل بر هم منطبق باشند ولی می‌توان با اجرای مدل با معادلات متفاوت انتقال رسوب، معادله‌ای را که سطح محصور بین این دو منحنی کمینه باشد به عنوان مناسبترین معادله انتخاب کرد.

چنانچه از مخزن سد موجود در چند دوره هیدروگرافی صورت گرفته باشد، می‌توان داده‌های آبنگاری یک دوره را برای واسنجی مدل انتقال رسوب استفاده کرد و سپس مدل را با این شرایط اجرا و میزان دقت پیش‌بینی مدل را با داده‌های آبنگاری دوره دیگر بررسی کرد. این عمل را دقت‌سنجی مدل می‌گویند و کاربر از میزان خطای مدل مطلع خواهد شد. حتی اگر تنها داده‌های یک دوره آبنگاری پس از بهره‌برداری از مخزن در اختیار باشند می‌توان بخشی از داده‌ها را از واسنجی مدل حذف و به منظور دقت سنجی مدل استفاده کرد.

بدیهی است عمل واسنجی و دقت‌سنجی بر اساس توانایی‌های مدل باید انجام گیرد. به طور مثال بیش‌تر مدل‌ها تنها رسوب ورودی از رودخانه اصلی را در نظر می‌گیرند در حالی که ممکن است رسوبات از شاخه‌های فرعی و یا ریزش‌های توده‌ای سواحل و یا حتی از رودخانه اصلی ولی در جریان یک طوفان عظیمی که ثبت نشده باشد وارد مخزن شده باشند.

پس از واسنجی و دقت‌سنجی مدل، ضروری است که مدل نسبت به مقادیر ورودی و یا مقادیر پیش‌فرض مدل‌ها، حساسیت‌سنجی به عمل آید. به طور مثال می‌توان حساسیت مدل را نسبت به مقادیر ضریب زبری، ضریب پخشیدگی طولی، ضریب پخشیدگی عرضی، اندازه مش‌ها، درجه حرارت آب و نظایر آن انجام داد. برای این منظور معمولاً مقادیر ضرایب تغییر داده می‌شوند و نتایج مدل، مثلاً عمق آب و یا میزان انتقال رسوب و یا عمق فرسایش و یا رسوب‌گذاری، با نتایج مدل ولی بدون تغییر ضریب مقایسه می‌گردد. به طور مثال در یک مدل با پنج برابر کردن ضریب عرضی پخشیدگی، مقدار غلظت رسوب تنها پنج صدم درصد تغییر کرد که نشان می‌دهد نتایج در این مساله خاص به مقادیر ضریب پخش عرضی حساس نمی‌باشد.

البته پیچیدگی مساله و ساده‌انگاری مدل‌ها نباید باعث گردد که از توانایی‌های مدل‌های ریاضی غافل بود. مدل‌های ریاضی می‌توانند وضعیت رسوب‌گذاری آبی را در صورتی که شرایط بهره‌برداری ثابت بماند پیش‌بینی و کاربر را از مشکلاتی که ممکن است در آینده اتفاق افتد، حتی با تقریب، آگاه سازند. در چنین شرایطی کاربر می‌تواند شرایط بهره‌برداری از مخزن و حوضه را تغییر و نتایج را با مدل ریاضی بررسی نماید و در جهت اصلاح شرایط بهره‌برداری از حوضه و مخزن اقدام نماید.

۵-۱۰-۶- میزان اهمیت داده‌های ورودی

مدل‌های ریاضی از معادلات تجربی متعددی استفاده می‌کنند که این معادلات به بعضی از داده‌ها و ضرایب بسیار حساس می‌باشند به طوری که در صورت اشتباه در هر یک از این داده‌ها، نتایج ممکن است خیلی تغییر کند. از طرفی این روابط نیاز به یک سری داده‌هایی دارند که ممکن است اندازه‌گیری نشده باشند و در نتیجه کاربر ممکن است مقادیر استاندارد را که در منابع اشاره شده‌اند اختیار کند. از این رو نیاز است تا بررسی شود که حساسیت مدل به این مقادیر چقدر می‌باشد. جدول (۵-۱) به عنوان مبنا می‌تواند استفاده شود. مطابق این جدول زبری، هیدروگراف ورودی، رسوب ورودی، مقاطع عرضی، نوع معادله انتقال رسوب و معادله مقاومت در مقابل جریان از اهمیت زیادی برخوردار هستند. از این رو این اطلاعات باید با دقت تهیه و وارد مدل شوند.

۵-۱۱- کاربرد مدل‌های ریاضی

از مهم‌ترین کاربردهای مدل ریاضی، اجرای گزینه‌های مختلف و مقایسه آن گزینه‌ها با شرایط پایه است. شرایط پایه در حقیقت شبیه‌سازی شرایطی است که هنوز هیچ اقدامی در آن مکان صورت نگرفته است. به‌طور مثال درمورد سدهای مخزنی شرایط پایه رودخانه‌ای است که هنوز سدی در آن احداث نشده باشد. در چنین شرایطی میزان رسوب‌گذاری و فرسایش حاصل از نتایج مدل ناچیز است. زیرا رودخانه قبل از احداث سد در شرایط رژیم یا تعادل بوده است. شرایط پایه دیگری که می‌توان در نظر گرفت سد مخزنی است که جدیداً احداث می‌باشد. در این صورت مدل را ابتدا تنها برای شبیه‌سازی هیدرولیکی اجرا و واسنجی می‌شود. پس از آن نوبت به اجرای مدل برای گزینه‌های مختلف می‌رسد. در مورد مثال اولی می‌توان سد را اضافه و مدل را بر اساس منحنی فرمان سد اجرا نمود. در رابطه با مثال دوم می‌توان علاوه بر منحنی فرمان داده‌های ورودی و خروجی را تغییر و شرایط جدید توسط مدل شبیه‌سازی شود. البته توصیه می‌شود که فقط یک متغیر در هر بار اجرای مدل تغییر کند.

۵-۱۲- نکاتی در خصوص شبیه‌سازی عددی جریان آب و رسوب در مخازن سدها

مکانیزم غالب انتقال رسوب غیرچسبنده و چسبنده در مخزن سد به ترتیب پدیده‌های فرارفت^۱ و پخش^۲ می‌باشد. در مناطق بالادستی مخازن معمولاً پدیده غالب فرارفت و در مناطق مرکزی مخزن به پایین دست بیش‌تر پدیده پخش می‌باشد که در اثر آن رسوبات چسبنده تا نزدیک سد نیز حمل می‌شوند. لذا بهتر است در مناطق بالادستی از مدل‌هایی استفاده شود که بر مبنای معادلات فرارفت استوار بوده و در مناطق مرکزی از مدل‌های مبتنی بر حل معادلات بر مبنای پدیده پخشیدگی استفاده شود. در قسمت‌های بالا دستی جریان رودخانه‌ای حاکم بوده ولی در مناطق مرکزی به پایین دست جریان مخزنی است. از این رو برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مناسب خواهد بود تا در بالا دست از مدل‌های یک‌بعدی و در مناطق پایین دست از مدل‌های سه بعدی استفاده شود. مزیت مدل‌های سه بعدی این است که همزمان قادر به شبیه‌سازی انتقال رسوب به صورت فرارفت-پخش می‌باشند. از معایب این مدل‌ها در حال حاضر این است که باید بر مبنای داده‌های یک‌بعدی واسنجی شوند و ضرورت دارد تا با توجه به توسعه سریع این مدل‌ها، بهره‌برداران سدها به فکر تهیه داده‌های سه‌بعدی نیز باشند.

جدول ۵-۱- میزان تاثیر هر یک از داده‌ها در مدل‌های ریاضی [۱۰۳]

درجه اهمیت			نوع داده
کم	متوسط	زیاد	
		×	متغیرهای فیزیکی...
		×	- زبری
		×	- آبنگار ورودی
		×	- رسوب ورودی
	×		- دانه‌بندی مواد رسوبی
	×		- درجه حرارت آب
	×		- شیب (سطح آب، بستر)
	×	×	- مقاطع عرضی
		×	- ضخامت لایه بستر فعال
×			- ضرایب افت جزیبی
		×	- متغیرهای مربوط به اجرای مدل
		×	- نوع معادله انتقال رسوب
		×	- زمان محاسبات
	×		- تعداد لوله‌های جریان (در مدل‌های شبه‌دوبعدی)
×			- تعداد تکرار
		×	- نوع معادله تعیین زبری

در خصوص رسوب مخازن سدها اصلاحاتی را که می‌توان انجام داد، بیش‌تر در داده‌های ورودی و خروجی و منحنی فرمان سد می‌باشد. از بین داده‌های ورودی تنها داده‌های مربوط به رسوب را می‌توان تغییر داد. مثلاً بررسی تاثیر عملیات کنترل فرسایش حوضه بر وضعیت رسوب‌گذاری مخزن، ولی اگر قرار باشد در بالادست سد موجود، سد دیگری احداث شود، در آن صورت علاوه بر داده‌های ورودی رسوب داده‌های ورودی مربوط به مقدار جریان نیز می‌تواند تغییر کند. در این مساله، هدف بررسی تاثیر احداث سدهای مخزنی بر رسوب‌گذاری مخزن سد پایین‌دست است.

داده‌های خروجی غالباً بده خروجی از دریچه‌های تحتانی و یا عبور سیلاب از سرریز می‌باشد. می‌توان گزینه‌های متفاوتی را اجرا نمود و تاثیر هر گزینه (منظور بده‌های خروجی) را بر رسوب‌گذاری بررسی نمود. حتی می‌توان مدل ریاضی رسوب مخزن را با مدل بهینه‌سازی، ترکیب و بهترین گزینه را برای این که حجم رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن به حداقل برسد به‌دست آورد.

۵-۱۳- توصیه‌های کلی برای اجرای مدل ریاضی

- مرز بالادست در دورترین موقعیت ممکن و جایی که رسوب‌گذاری یا فرسایش ندارد، انتخاب شود.
- مرز پایین‌دست در محل سد انتخاب شود.
- جهت محاسبات هیدرولیکی از پایین دست به بالادست می‌باشد.
- جهت محاسبات رسوب از بالادست به پایین دست است.
- از پایدار بودن مدل باید مطمئن بود.
- نگرانی از بابت این که مدل در مرز پایین‌دست، رسوب‌گذاری یا فرسایش زیادی را نشان دهد، نداشته باشید، مگر این که این وضعیت بر مرز بالادست تاثیر گذار شود.

- به کارایی کلی مدل توجه شود.
- شرایط مرزی و توزیع دانه‌بندی رسوبات ورودی کنترل شود.
- عمق و دانه‌بندی مواد بستر مخزن در مدل استفاده شود و با اصل مقایسه گردد.
- در زمان‌های مختلف، توزیع دانه‌بندی رسوب حاصل از مدل باید رسم شود، زیرا معمولاً دانه‌بندی با رسوب ورودی تغییر می‌کند. در صورت لزوم دانه‌بندی رسوب ورودی را تغییر دهید و اگر هنوز این مساله وجود دارد، داده‌های صحرائی را کنترل کنید.
- چنان‌چه میزان انتقال رسوب مدل بسیار بیش‌تر از «اصل» است، در آن صورت، بهتر است از وجود «لایه‌ی محافظ» در اصل مطمئن شوید.
- چنان‌چه نتایج مدل نرخ رسوب‌گذاری را بسیار زیاد و نرخ فرسایش را بسیار کم نشان می‌دهد، بهتر است تراز بالای ساحل را کنترل کنید و مطمئن شوید جریان لبریز نشده است.
- در صورتی که از هیچ‌کدام از روش‌های فوق نتیجه نگرفتید، بهتر است میزان رسوب ورودی را در محدوده‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده، تغییر دهید.
- تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری باید کم باشد.
- قبل از این که الگوی رسوب بررسی شود، بهتر است شرایط هیدرولیکی بررسی گردد تا مطمئن شوید زبری مناسب انتخاب شده است.
- مدل‌های ریاضی در زمان‌های اولیه انتقال رسوب را بیش‌تر نشان می‌دهند، زیرا درصد ریزدانه مواد بیش‌تر است.
- مدل ریاضی بهتر است در ابتدا با جریان ماندگار و بده دو ساله اجرا شود.
- مدل ریاضی ابتدا بر روی بستر صلب بدون در نظر گرفتن حرکت بار بستر اجرا شود.
- مدل ابتدا با بده ثابت دوساله اجرا شود. زیرا معمولاً بده رودخانه در حالت تعادل حدود بده دوساله است (و یا بده رژیم). در این بده فرض بر این است که نه رسوب‌گذاری به‌وجود می‌آید نه فرسایش.
- نتایج مدل بررسی شوند و مطمئن شوید نیم‌رخ سطح آب، سرعت، عمق جریان، عرض و شیب نیم‌رخ به‌دست آمده، قابل قبول است.
- در صورتی که عمق جریان محاسبه شده بیش‌تر از رقوم سواحل شد، یعنی لبریز شدن جریان، بررسی کنید آیا در رودخانه یا مخزن واقعی چنین مساله‌ای اتفاق افتاده است یا خیر.
- بهتر است شرایط بستر صلب با حداکثر بده هم اجرا شود. تراز سطح آب، توزیع جریان در رودخانه و یا لبریز شدن و سرعت جریان از جمله متغیرهایی است که با اجرای این بده باید بررسی و کنترل شوند.

۵-۱۴ - مطالعات انجام شده در ایران

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در خصوص کاربرد مدل‌های ریاضی در مخازن سدهای ایران انجام شده است. بخش عمده این مطالعات صرفاً در غالب پایان‌نامه‌های دانشجویی بوده است و تعدادی از مطالعات توسط متخصصین و با حمایت مالی دانشگاه‌ها،

سازمان‌های تحقیقاتی، وزارت نیرو و یا مهندسين مشاور انجام شده است. در این قسمت از راهنما چکیده آن مطالعاتی که تاکنون انجام و نتایج آنها در مجلات و یا کنفرانس‌های ایران برای عموم گزارش شده است، ارایه می‌گردد.

عبدالعلى شرقى در سال ۱۳۷۳ با بهره‌مندی از یک مدل ریاضی، فرآیند رسوبات ورودی به مخزن را در حالت جریان غیرماندگار مورد مطالعه قرار داد. در این مدل مخزن سد به صورت یک مجموعه کانال مدل گردید و از یک معادله‌ی توانی سرعت برای برآورد رسوبات استفاده شد. توانایی‌های مدل با استفاده از داده‌های سد سفیدرود مورد ارزیابی قرار گرفت. نیمرخ بستر مخزن محاسبه شده با نیمرخ اندازه‌گیری شده مقایسه شده و تطابق خوبی، هم برای حالت رسوب‌زدایی و هم رسوب‌گذاری، گزارش شده است. در این تحقیق بهره‌گیری از تئوری جت در حالت دوبعدی برای شبیه‌سازی توزیع جانبی رسوبات در مخزن سودمند تشخیص داده شده است.

طالب بیدختی و معین تقوی در سال ۱۳۷۴ با استفاده از مدل ریاضی HEC-6 به مطالعه در مورد رسوبات سد درودزن اقدام نمودند. آنها نتایج حاصل را با نتایج عمق‌یابی به عمل آمده در سال ۱۳۶۱ از مخزن سد مقایسه نمودند. مقایسه نشان داد که متوسط خطای مدل HEC-6 حدود ۶/۲۵ درصد بوده است و در مقایسه با روش‌های افزایش و کاهش سطح دارای خطای کم‌تری می‌باشد.

صدق‌آمیز در سال ۱۳۷۶ با هدف پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه‌صفر از مدل‌های HEC-6 و DEPO استفاده نموده است. او ضریب کاهش حجم سالانه مخزن را تعیین نموده و همچنین در پایان دوره ۱۰۰ ساله، حجم مخزن و فاصله پیشانی رسوب در دلتا از بدنه را پیش‌بینی نموده است.

قمشی و حمادی در سال ۱۳۷۸ با بهره‌گیری از مدل HEC-6 ابتدا کارایی و کالیبراسیون مدل را مورد توجه قرار داده و سپس نتایج مورد نظر را استخراج نموده‌اند. تابع انتقال رسوب یانگ (۱۹۷۳) به عنوان بهترین معادله انتخاب شده است. وضعیت تغییرات حجم تجمع رسوبات در فاصله زمانی حدود ۹۰ سال از بهره‌برداری سد کارون مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه حاصل شده است که به‌طور متوسط سالانه ۰/۵۸ درصد از حجم اولیه مخزن کاسته می‌شود.

منوچهر راد در سال (۱۳۷۸-۷۹) در ارتباط با «بررسی تجربی و عددی جریان غلیظ و کاربرد آن در رسوب‌زدایی مخازن سدها» تحقیقاتی را انجام داد. در این تحقیق با هدایت جریان چگالی در کانالی با پهنای کم (عرض ۱/۱۰ کانال اصلی) تغییر مشخصه بررسی و با حالت عدم هدایت آن مقایسه شده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر عوامل متعدد در مشخصه‌های جریان چگالی دوبعدی حاوی ذرات، به صورت تجربی بوده است. علاوه بر بررسی‌های فوق، در این تحقیق یک مدل رایانه‌ای پیش‌بینی توزیع رسوب نیز آماده شد. این مدل که از نتایج حل معادلات در حالت جریان چگالی لایه‌ای و توزیع خطی دانستیه استفاده کرده، توانسته است توزیع رسوب را در جریان چگالی دوبعدی و حاوی ذرات ریز پیش‌بینی کند.

زرانی و اطاعت (۱۳۸۰) مدل‌های FLUVIAL12 , GSTARS2 را در رودخانه با هم مقایسه کردند. هدف از این تحقیق شناسایی مدل‌هایی برای شبیه‌سازی این تغییرات در رودخانه‌ها بود. هر دو مدل قادر به شبیه‌سازی تغییرات تراز و همچنین عرض آبراهه‌ها بوده با این که معادلات آنها یک‌بعدی می‌باشد به کمک روابط اضافی قادر به شبیه‌سازی شبه سه‌بعدی رودخانه‌ها هستند. در این مقاله عملکرد دو مدل مذکور در محدوده وسیعی از شرایط جریان با بستر صلب و فرسایش‌پذیر مقایسه شده و تا حد ممکن امتیازات و محدودیت‌های آنها مشخص گردیده است.

کلاهدوزان و همکاران در سال ۱۳۸۱ با بهره‌گیری از مدل‌های عددی یک‌بعدی غیرجفت^۱ HEMMAT و دوبعدی GDIVASI^۲، رسوب‌گذاری در مخزن سد چم‌گردلان (ایلام) را شبیه‌سازی کردند. مدل HEMMAT توسط مرکز تحقیقات آب تهیه شده است. در این مدل معادلات سنت و نانت با استفاده از عبارات‌های ضمنی^۳ حل می‌شود. از معادله پخش و انتقال برای شبیه‌سازی انتقال رسوب بهره گرفته شده است. مدل دو بعدی GDIVASI توسط کلاهدوزان توسعه داده شده است. در این تحقیق معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب و تغییرات بستر در مخزن سد، توسط روش تقاضل‌های محدود در حجم کنترل حل شد. سپس فرآیندهای مربوط به یک دوره پنجاه ساله از آمار بده جریان و بده جریان - رسوب ورودی به مخزن با استفاده از مدل‌های فوق شبیه‌سازی گردید. در حالت مدل‌سازی دوبعدی، با توجه به طولانی بودن مدت اجرا و صرف زمان زیاد، ابتدا دوره‌های زمانی شاخص انتخاب شده و شبیه‌سازی گردیدند. آنگاه نتایج حاصل از رسوب‌گذاری در مخزن سد، به کل دوره مورد مطالعه تعمیم داده شد. حذف دوره‌های کم اثر با توجه به نتایج مدل یک‌بعدی صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که فرضیات ساده‌کننده در مدل یک‌بعدی HEMMAT باعث ایجاد خطاهای قابل توجهی در شبیه‌سازی مخزن (که شرایط دوبعدی دارد) شده است. همچنین مشخص شد که مدل‌سازی طولانی مدت ریخت‌شناسی (مورفولوژی) در مخازن را می‌توان با فرضیات مناسب عملی کرد و در این راستا می‌توان از نتایج مدل یک‌بعدی که اجرای آن نیاز به زمان زیادی ندارد برای انتخاب دوره‌های موثر رسوب‌گذاری در مخزن سد استفاده کرد. به طور کلی استفاده از مدل‌های یک‌بعدی در کنار مدل‌های دوبعدی در کاهش مدت اجرای شبیه‌سازی و سرعت در رسیدن به نتایج مناسب، مفید تشخیص داده شد.

بختیاری و نیلوفر در سال ۱۳۸۱ با استفاده از تحلیل عددی دوبعدی، رسوب‌گذاری در مخزن سد بوکان (شهرک کاظمی) را مورد مطالعه قرار دادند. رفتار هیدرودینامیک و رسوب مخزن در شرایط مختلف برای مدت ۵۰ روز شبیه‌سازی شده و نتایج آن بررسی شد. در این مطالعه تایید گردید که در محاسبه نیم‌رخ طولی بستر، نیاز به محاسبه در کل سال نمی‌باشد و فقط در نظر گرفتن فصل بارندگی کافی است. چرا که رسوب‌گذاری در مخزن عمدتاً زمانی رخ می‌دهد که جریان ورودی به مخزن سیلابی باشد و این عمل تنها در فصول بارندگی امکان‌پذیر است.

محمد نژاد و شمسایی در سال ۱۳۸۱ مشخصه‌های جریان غلیظ و نقش آن در رسوب‌گذاری دریاچه پشت سدها را مورد بررسی قرار دادند. جهت حل معادلات حاکم بر جریان غلیظ، یک مدل عددی توسعه داده شد و نتایج آن با مدل عددی دیگری مقایسه شد. تاثیر شاخص‌های موثر بر جریان گل‌آلود در مخزن - شامل شیب کف، اندازه ذرات رسوب، غلظت و بده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق تایید کرد که جریان غلیظ ایجاد شده در مخزن به شاخص‌های متعددی بستگی دارد که می‌تواند میزان اختلاط، طول حمل مواد جامد و میزان رسوب‌گذاری و فرسایش بستر را تغییر دهند. همچنین نحوه تاثیر عوامل مختلف بر رفتار جریان غلیظ بررسی شد. از جمله مشخص گردید که افزایش شیب کف مخزن باعث کاهش ضخامت لایه‌ی جریان غلیظ از یک سو و افزایش سرعت و غلظت آن از سوی دیگر می‌شود و حتی می‌تواند رژیم جریان را نیز تغییر دهد. همچنین دیده شد که افزایش غلظت جریان ورودی به مخزن به دلیل ایجاد نیروی رانشی بیش‌تر سبب افزایش سرعت و کاهش ضخامت لایه‌ی جریان غلیظ می‌شود.

1- Hydro Environmental Modeling and analysis Tools

2- Geomorphological Depth Integrated Velocities and Solute Transport

3- Implicit finite difference scheme

صمدی بروجنی و سامانی در سال ۱۳۸۱ با استفاده از مدل عددی Mike-II تاثیر رسوب‌شویی سد دز بر کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، با استفاده از مدل Mike-II رفتار جریان و رسوب رودخانه دز در زمان انجام عملیات رسوب‌شویی سد دز شبیه‌سازی گردید تا تاثیر سد تنظیمی دزفول در تله‌اندازی رسوبات ارزیابی شود. براساس این تحقیق توصیه‌هایی برای مدیریت بهینه سد تنظیمی در مواقع رسوب‌شویی سد دز ارائه شد.

مهرداد و همکاران در سال ۱۳۸۱ تحقیقی را بر عملکرد عملیات رسوب‌زدایی مخزن سد سفیدرود انجام دادند. آنها در ضمن این تحقیق به‌کارگیری روش کنارگذر (روش انحراف آب بر روی تراس رسوبی) را جهت تکمیل عملیات رسوب‌زدایی^۱ برای سد سفیدرود مفید تشخیص دادند. این طرح شامل احداث یک بند خاکی در بالادست سد در سرشاخه ورودی رودخانه قزل‌اوزن جهت بالا آوردن سطح آب و هدایت آن توسط یک کانال فرسایشی با مقطع دوزنقه به طول ۵ کیلومتر و با قابلیت انتقال بده حدود ۱۰۰ متر مکعب در ثانیه به پایین‌دست سد از طریق تخلیه‌کننده‌های سد بود.

شمسایی و امامی در سال ۱۳۸۱ مدل GSTARS 2 را با روش حداقل توان واحد جریان برای ارزیابی و پیش‌بینی نحوه توزیع رسوبات در مخازن سدها مقایسه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که روش حداقل توان جریان به منظور تعیین تراز سوب در مجاورت سد از دقت بهتری برخوردار می‌باشد و با ارقام هیدروگرافی مطابقت بیش‌تری دارد.

پشابارمی در سال ۱۳۸۲ با استفاده از روش کراندل، تراز رسوب پشت سد کارده را پس از انجام عملیات آب‌شویی برآورد کرد. نتایج مطالعه نشان داد که پس از عملیات آب‌شویی ۳۵٪ از رسوبات مخزن شسته خواهد شد. حجم رسوبات شسته شده در ۳۰ ساعت اولیه ۱۴۳۰۰۰ متر مکعب و در ۳۰ ساعت دوم ۳۳۸۰۰۰ متر مکعب برآورد گردید. مدل مزبور با استفاده از نتایج یک مدل آزمایشگاهی و یک نمونه واقعی مربوط به سدی در روسیه ارزیابی شده بود.

شاکری و احمدی در سال ۱۳۸۴ روش مناسب و مراحل کالیبراسیون مدل‌های ریاضی به‌صورت موردی بر روی مدل GSTARS 2.1، در برآورد پیش‌بینی رسوب سد مخزنی میناب ارائه نمودند و نتایج آن نشان می‌دهد که می‌توان با این روش به تخمین مناسب رسوب مخازن دست یافت.

تقدیسی و فعال در سال ۱۳۸۵ با استفاده از نرم‌افزار SSIIM تاثیر جریان‌های گردابی بالادست سد انحرافی دز را بر کناره‌گیری و ته‌نشینی رسوبات مورد بررسی قرار داده و نتایج با عملیات میدانی مقایسه شده و حاصل از تطابق خوبی برخوردار بوده است.

مرادلو و همکاران در سال ۱۳۸۵ با استفاده از مدل GSTARS 3 مدل‌سازی عددی رسوب‌گذاری در مخزن سد میل و مغان و تاثیر رسوب‌زدایی و ساماندهی بالادست بر وضعیت رسوب‌گذاری را ارائه نمودند. مطالعات نشان می‌دهد که انجام رسوب‌زدایی به صورت متقارن از نظر فرسایش موضعی بستر کانال در مجاورت دایک^۲ هدایت بالادست تاثیر مخربی بر پایداری دایک ندارد.

سپهری منش و ایزدپناه در سال ۱۳۸۵ با توجه به اهمیت کاهش حجم مخزن به عنوان مبنایی در تجزیه و تحلیل سیستم منابع آب، با استفاده از مدل HEC-6 حجم رسوبات ترسیبی و توزیع آن را در سد تنظیمی کرخه پیش‌بینی نمودند.

زارع و شمسایی در سال ۱۳۸۵ به کمک داده‌های سد سفید رود با توجه به خصوصیات سد، تغییرات مورفولوژی مخزن را در اثر رسوب‌گذاری، با استفاده از مدل GSTARS 3 و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS بررسی نمودند. روند رسوب‌گذاری مخزن سد

1- Flushing

2- Dike

مورد نظر در دراز مدت با مدل مذکور شبیه‌سازی شده، محل‌ها و میزان رسوب‌گذاری شناسایی و روند شکل‌گیری دلتای رسوبی پیش‌بینی شده است.

سیدیان و شفاعی بجستان در سال ۱۳۸۵ با استفاده از مدل GSTARS 3 روند رسوب‌گذاری سد وشمگیر در استان گلستان را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به درصد زیاد رسوبات ریزدانه ورودی به مخزن، ابتدا متغیرهای مربوط به رسوبات چسبنده مدل را واسنجی نمودند و سپس حجم مخزن را برای سال‌های آتی بهره‌برداری پیش‌بینی کردند.

صادق‌زاده و اعلمی (۱۳۸۵) به بررسی تاثیر رهاسازی رسوبات سدهای مخزنی بر مورفولوژی رودخانه پایین دست با استفاده از مدل GSTARS 3.0 در رودخانه سفیدرود پرداختند. در این مطالعه تغییرات مورفولوژیک رودخانه سفیدرود تحت تاثیر عملیات شاس سال ۱۳۶۷، با استفاده از مدل مذکور شبیه‌سازی گردید و با مورفولوژی پیش‌بینی شده تئوریک در اثر رسوب‌زدایی مقایسه گردیده است.

وفایی منش و حسینی در سال ۱۳۸۶ با استفاده از مدل HEC-6 رسوب‌گذاری در مخازن ذخیره‌ای و مطالعه موردی سد امیرکبیر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از اجرای مدل با هیدروگرافی انجام یافته در سال ۱۳۸۰ روی مخزن سد مزبور مقایسه گردید است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود نقاط ضعف مدل به نتایج آن می‌توان اعتماد نمود. همچنین آنها پیش‌بینی نمودند اگر روند رسوب‌گذاری در سد تغییری ننماید، طی شصت سال از بهره‌برداری سد در حدود ۱۹٪ حجم مخزن از رسوبات پر می‌شود.

اعلمی و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از دبی ویژه دراز مدت رسوب رودخانه در تحلیل رسوب‌گذاری مخازن سدها مورد بررسی قرار دادند و با شبیه‌سازی رسوب‌گذاری مخزن سد کارده توسط مدل GSTARS 3 و با مقایسه نتایج حاصل از مطالعات رسوب‌سنجی و رسوب‌شناسی مخزن سد مزبور در سال ۱۳۷۵ با نتایج مدل، به صحت‌سنجی مدل پرداختند.

حسن‌زاده و فیضی (۱۳۸۷) پس از واسنجی مدل Gstars3.0 به کمک داده‌های آبنگاری مخزن سد علویان مراغه در یک دوره‌ی ۹ ساله، پدیده رسوب‌گذاری را در این سد برای یک دوره ۵۰ ساله ترسیم و مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. همچنین در این مطالعه عمر مفید مخزن برآورد شده است.

فصل ۶

رسوب زدایی مخازن سدها

۶-۱- کلیات

روش‌های مدیریت رسوب در مخازن سدها به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که با انجام آنها بتوان مخزن سد را در سال‌های بیش‌تر و در حد بهینه استفاده کرد. اهم این فعالیت‌ها به شرح زیر است:

الف- روش‌های کنترل فرسایش و رسوب:

- مدیریت حوضه‌های آبریز
- سازه‌های رسوب‌گیر در بالا دست مخزن
- مخازن رسوب‌گیر خارج از رودخانه
- کانال‌های ذخیره‌ای خارج از رودخانه

ب- مدیریت رسوب در مخزن که عمدتاً شامل مورد زیر است:

- بهره‌برداری صحیح از مخزن

ج- روش‌های هیدرولیکی تخلیه رسوب از مخزن نظیر روش‌های زیر است:

- رسوب‌زدایی (شویی) هیدرولیکی^۱
- سیفون کردن
- عبوردهی جریان غلیظ

د- روش‌های مکانیکی تخلیه رسوب از مخزن نظیر روش‌های زیر است:

- خروج رسوب توسط لایروب مکانیکی
- در ادامه هر کدام از روش‌های فوق مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۶-۲- رسوب‌زدایی هیدرولیکی

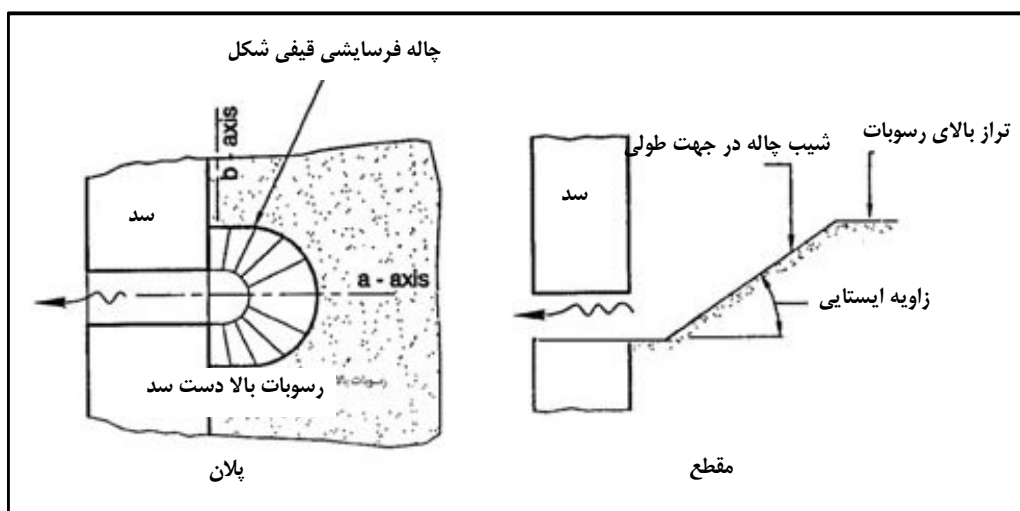
رسوب‌زدایی هیدرولیکی و یا عملیات شاس (به زبان فرانسه) به عملیاتی اطلاق می‌شود که با باز کردن تخلیه‌کننده‌های تحتانی (درکف یا رقوم پایین‌تر) رسوبات نهشته شده در بستر مخزن در اثر فرسایش کنده شده و به همراه جریان آب از مخزن خارج شود. در ابتدای بازکردن دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی به منظور رسوب‌زدایی، رسوبات تجمع‌یافته تحت فشار آب از مخزن تخلیه می‌گردد ولی چنان‌چه سطح آب مخزن تا حد دریچه‌ها پایین آورده شود، رسوبات در اثر فرسایش پس‌رونده به دلیل جریان‌های رودخانه‌ای کنده شده و به بیرون هدایت می‌شوند. در این روش که از انرژی جریان آب برای تخلیه رسوبات استفاده می‌گردد می‌توان بخشی از حجم ذخیره مخزن را که در اثر انباشت رسوبات از دست رفته است احیا نمود و ظرفیت ذخیره جدیدی را ایجاد کرد. این روش از دیرباز معمول بوده است. قدیمی‌ترین روش رسوب‌زدایی در کشور اسپانیا در قرن شانزدهم میلادی تجربه شده است. بسته به این‌که

رقوم سطح آب مخزن سد در زمان انجام عملیات رسوب‌زدایی چگونه باشد، دو روش متفاوت رسوب‌زدایی به‌وجود می‌آید که عبارتند از:

- رسوب‌زدایی آزاد^۱
- رسوب‌زدایی تحت فشار^۲

۶-۲-۱- رسوب‌زدایی هیدرولیکی تحت فشار

در این روش رسوب‌زدایی، بخشی از رسوبات نهشته شده در داخل مخزن از طریق دریاچه‌های عمقی به خارج از سد تخلیه می‌شود و سطح آب مخزن در زمان عملیات رسوب‌زدایی در تراز بالاتر از دریاچه‌ها قرار دارد. در این روش رسوب‌زدایی، رسوبات نزدیک به دریاچه تخلیه و پس از گذشت مدت زمان معینی یک مخروط رسوب‌شویی^۳ به شکل یک قیف^۴ در جلوی تخلیه‌کننده تحتانی تشکیل شده و به سمت بالادست گسترش می‌یابد. شکل (۶-۱) شمای کلی از چاله فرسایشی قیفی شکل را که در بالادست سد تشکیل شده نشان می‌دهد. پیشروی چاله به سمت بالادست تا زمانی ادامه دارد که مخروط تشکیل شده به تعادل برسد. مدت زمان به تعادل رسیدن آن بستگی به بده جریان آب خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی، ارتفاع آب داخل مخزن و جنس رسوبات نهشته شده دارد. شیب چاله تشکیل شده در محور رودخانه بیش‌تر از شیب عرضی چاله می‌باشد. مقدار شیب به جنس مصالح رسوبی نیز بستگی دارد به‌طوری‌که در رسوبات چسبنده شیب بسیار تندتر از رسوبات غیرچسبنده است. مطالعات انجام شده در تعدادی از سدهای چین نشان داده است که شیب در جهت محور a بین چهار درصد تا یازده درصد و در جهت محور b بین نه تا پانزده درصد متغیر بوده است [۵۴].



شکل ۶-۱- نمایش چاله فرسایش یافته در بالادست سد در اثر رسوب‌زدایی تحت فشار [۵۴]

در ارتباط با رسوب‌زدایی تحت فشار مطالعاتی در سایر مناطق جهان نیز انجام گرفته است. برای مثال جین^۵ (۱۹۹۲) خاطر نشان ساخت ماکزیمم عمق آب‌شستگی به‌طور مستقیم متناسب با عدد فرود ذره بوده و شیب بستر مخروط آب‌شستگی در امتداد محور

1- Free flushing
2- Pressure flushing
3- Flushing Cone
4- Funnel Shape
5- Jin, 1992

طولی در مقایسه با شیب عرضی رسوب در جهت عمود بر محور خروجی تخلیه‌کننده کوچک‌تر می‌باشد. دکزار^۱ (۱۹۹۵) به نقل از Brandt, 2000) با مطالعه بر روی مخازن سدهای سوئیس نشان داد شیب پایدار حفره آبستگي برای رسوبات چسبنده به مراتب تندتر از شیب پایدار رسوبات غیرچسبنده می‌باشد.

مقدار حداکثر عمق چاله ایجاد شده بیانگر میزان رسوب تخلیه‌شده می‌باشد. از این رو مطالعاتی برای پیش‌بینی این عمق انجام شده است. از جمله می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی شن و همکاران [۱۳۱] اشاره کرد. در این مطالعه رابطه زیر ارایه شده است:

$$d_s = 0.0133h_o \left[\frac{V_C}{\xi g D_{50} (G_S - 1)} \right]^{0.549} \left[\frac{H - h_d}{h_o} \right]^{0.10} \left[\frac{H}{h_o} \right]^{0.415} \quad (1-6)$$

که در این معادله:

$$\xi = 1 + 0.00000496 \left[\frac{0.001}{D_{50}} \right]^{0.72} \left[\frac{10 + H}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \right] \quad (2-6)$$

در روابط (۱-۶) و (۲-۶) متغیرها عبارتند از:

d_s = حداکثر عمق چاله فرسایشی (متر)

h_o = ارتفاع باز شدگی درپچه‌های لجن‌کش (متر)

V_C = سرعت آستانه حرکت رسوبات (متر در ثانیه)

H = عمق آب بالای بازشدگی درپچه‌ها (متر)

h_d = عمق رسوب نهشته شده بالادست درپچه (متر)

g = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)

G_S = چگالی ویژه رسوبات

D_{50} = اندازه متوسط ذرات رسوبی (متر)

در روش رسوب‌زدایی تحت فشار معمولاً حجم کمی از رسوبات تخلیه می‌شوند و اثر این روش در دفع رسوبات موضعی می‌باشد. معمولاً در ابتدای عمل رسوب‌زدایی، رسوبات به صورت خمیری، سپس مخلوطی از رسوب و آب و در نهایت آب زلال خارج می‌شود. در ایران روش رسوب‌زدایی تحت فشار در سد دز چند بار استفاده شده است که خلاصه‌ای از این عملیات ارایه می‌گردد.

۶-۲-۱-۱- کاربرد روش رسوب‌زدایی تحت فشار در سد دز

سد دز از جمله سدهای مهم کشور می‌باشد که متأسفانه با مشکل تجمع رسوب مواجه می‌باشد. رسوب‌گذاری بیش از ۱۵ میلیون متر مکعب در سال موجب شده است که رسوبات درشت‌دانه در ابتدای مخزن ته‌نشین شده و با تشکیل دلتا به سمت سد پیشروی کنند. به‌طوری‌که عملیات آبنگاری انجام شده در سال‌های مختلف نشان می‌دهد رسوب‌گذاری در مخزن سد دز موجب پیشروی دلتا به اندازه ۵۰۰-۱۰۰۰ متر در سال شده است. شکل (۲-۶) نیم‌رخ طولی رسوب‌گذاری سد دز در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل (۳-۶) نیز تغییرات تراز بستر و قله دلتا را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

رسوبات ریزدانه همراه جریان آب حمل شده و در صورتی‌که شرایط تشکیل جریان غلیظ در سد وجود داشته باشد به شکل جریان غلیظ خود را به بدنه سد می‌رسانند. اندازه‌گیری صحرایی انجام شده در سد دز نشان می‌دهد بیش از ۱۱ درصد رسوب ورودی به سد

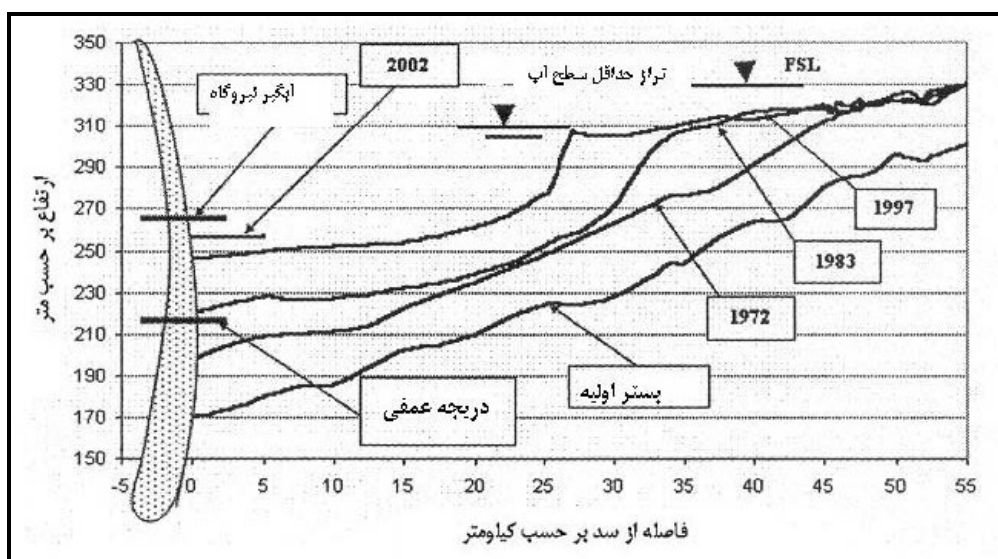
با تشکیل جریان غلیظ خود را به بدنه سد می‌رسانند و در آن‌جا تجمع می‌یابند. این رسوبات علاوه بر این که موجب کاهش ظرفیت مخزن سد می‌گردند موجب می‌شوند رقوم سطح رسوبات در نزدیکی نیروگاه افزایش یابد، لذا خطر ورود رسوبات به داخل آبگیر نیروگاه افزایش یافته که در حال حاضر رقوم رسوبات در فاصله تقریبی ۱۲ متری رقوم آبگیرهای نیروگاه قرار گرفته است [۳].

همان‌طوری که قبلاً نیز ذکر شد هدف از انجام رسوب‌زدایی، دفع رسوبات نهشته شده به منظور احیای حجم مخزن از دست رفته مخزن می‌باشد. رسوب‌زدایی می‌تواند به صورت آزاد یا تحت فشار صورت گیرد. فرایند رسوب‌زدایی آزاد در برگرنده فرسایش پس‌رونده در داخل کانال رودخانه در میان رسوبات نهشته شده می‌باشد. در این روش سطح آب مخزن قبل از فصل سیلاب پایین آورده می‌شود. در نتیجه انجام رسوب‌زدایی در مدت زمان سیلابی بودن، موجب فرسایش حجم زیادی از رسوبات و انتقال آنها می‌گردد. برای بیش‌تر موثر بودن این روش لازم است دلتای تشکیل شده در مخزن در نزدیکی بدنه سد باشد [۱۶۰].

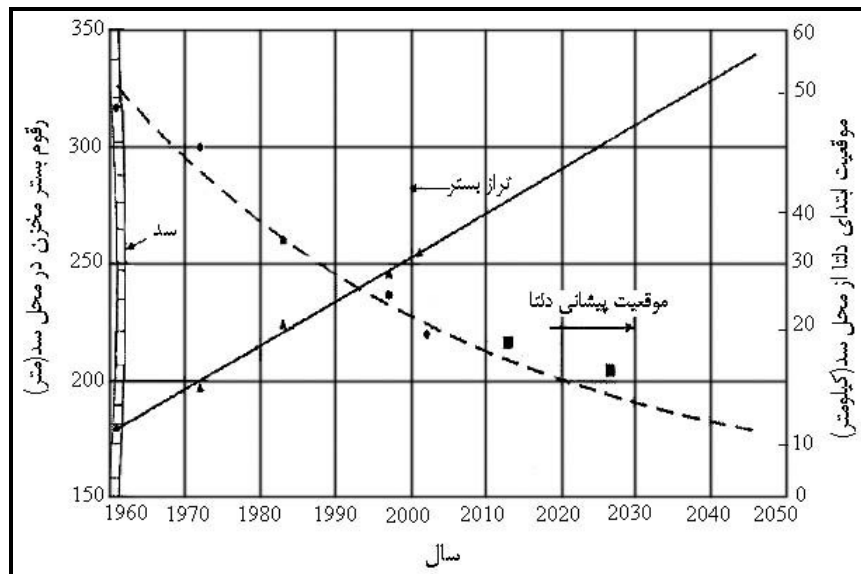
در سد دز دلتای تشکیل شده از بدنه سد خیلی دور می‌باشد (تقریباً ۲۷ کیلومتر)، لذا با این روش نمی‌توان رسوبات زیادی را از مخزن برطرف نمود. زمانیکه سطح آب مخزن در رقوم ۳۱۰ متر (کمینه بهره‌برداری) باشد، پدیده فرسایش پس‌رونده کمی در میان دلتا تشکیل گردد که این رسوبات مجدداً در میان مخزن تجمع می‌یابند [۳].

محدودیت دیگر استفاده از رسوب‌زدایی آزاد در سد دز به خاطر شرایط خاص این سد می‌باشد. چرا که این سد، تنظیم فرکانس برق کشور را انجام می‌دهد، لذا امکان پایین آوردن سطح آب مخزن به منظور رسوب‌زدایی آزاد در آن وجود ندارد. علاوه بر آن محدودیت‌های دیگری مانند عدم وجود تخلیه‌کننده عمقی با ظرفیت کافی و همچنین مسایل زیست‌محیطی مانع از انجام عملیات رسوب‌زدایی آزاد می‌شود. تنها دریاچه‌های عمقی سد دز، دریاچه‌های آبیاری است که شامل سه مجرا هر یک با ظرفیت ۶۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد و حدود ۴۷ متر پائین‌تر از لبه آبگیر نیروگاه قرار دارد. گزینه‌های دیگر استفاده از رسوب‌زدایی تحت فشار و خروج رسوب توسط جریان غلیظ می‌باشد.

در سد دز انجام رسوب‌زدائی تحت فشار از زمان بهره‌برداری (۱۳۴۲) تا سال ۱۳۸۲ هفت مرتبه در سال‌های ۱۳۷۳، ۱۳۷۴، ۱۳۷۶، ۱۳۷۷، ۱۳۷۰ و ۱۳۸۲ انجام گرفته است. جدول (۶-۱) شرایط هیدرولیکی جریان در زمان بازکردن دریاچه‌های آبیاری را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲- نتایج آبنگاری سد دز در سال‌های مختلف [۳]

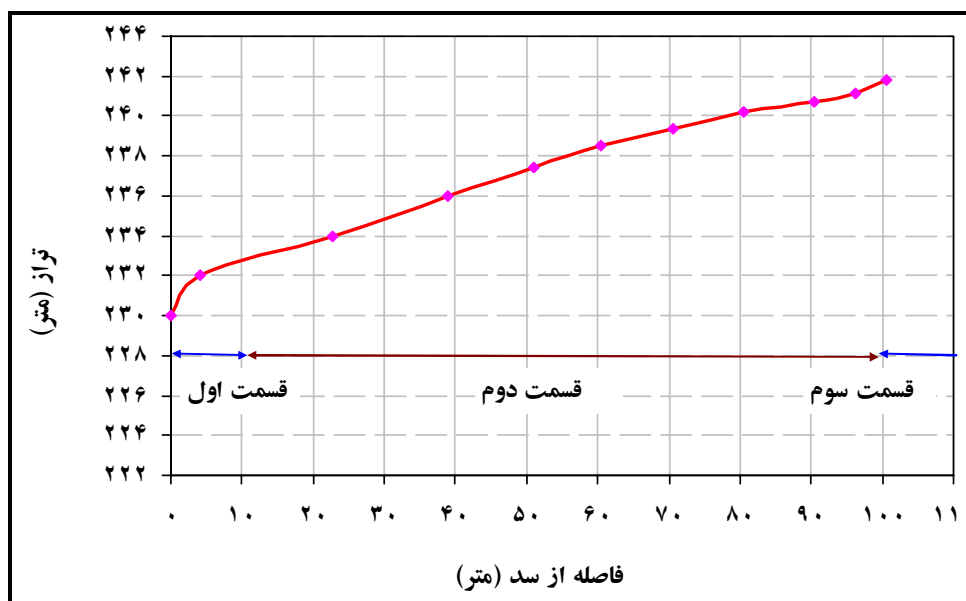


شکل ۶-۳- تغییرات تراز بستر و قله دلتا نسبت به زمان در سد دز [۳]

جدول ۶-۱- شرایط هیدرولیکی جریان در زمان رسوب‌زدایی سد دز [۳]

تراز آب مخزن (متر)		بده جریان از سرریزها (m ³ / sec)		بده جریان از توربین‌ها (m ³ / sec)		بده جریان از دریچه‌ها (m ³ / sec)		زمان (روز)	خاتمه عملیات	شروع عملیات
Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min			
۳۴۸/۲	۳۳۴/۹	۲۶۳۷	۰	۳۰۲	۱۶۵	۱۴۷	۱۰/۴	۶۵	۷۳/۱۱/۸	۷۳/۹/۴
۳۰۵/۶	۳۰۴/۶	۰	۰	۲۴۱	۱۳۰	۴۲	۱۹	۴	۷۴/۱۱/۸	۷۴/۱۱/۱۵
۳۵۱/۸	۳۵۰/۹	۱۲۱	۰	۴۲۴	۲۷۳	۵۱	۲/۱	۴	۷۶/۲/۱۷	۷۶/۲/۱۴
۳۵۲/۲	۲۵۲/۲	۱۹/۶	۰	۳۰۵	۲۷۲	۵۱	۱۷	۴	۷۶/۳/۳	۷۶/۲/۳۱
۳۴۷	۳۳۹	۱۸۰۶	۴۹۷	۲۶۱	۹۰/۵	۱۴۸	۲۴	۱۶	۷۷/۱/۲۵	۷۷/۱/۱۰
۳۴۲/۱	۳۴۰/۷	۴۵۹	۰	۲۱۹	۹۲	۹۹	۱۶	۶	۷۹/۱۲/۲۲	۷۹/۱۲/۱۰
۲۵۱/۶	۳۵۲	۲۹۱	۲۲۶	۳۱۳	۱۱۴	۵۱	۲۵	۲	۸۲/۳/۳۰	۸۲/۳/۲۹

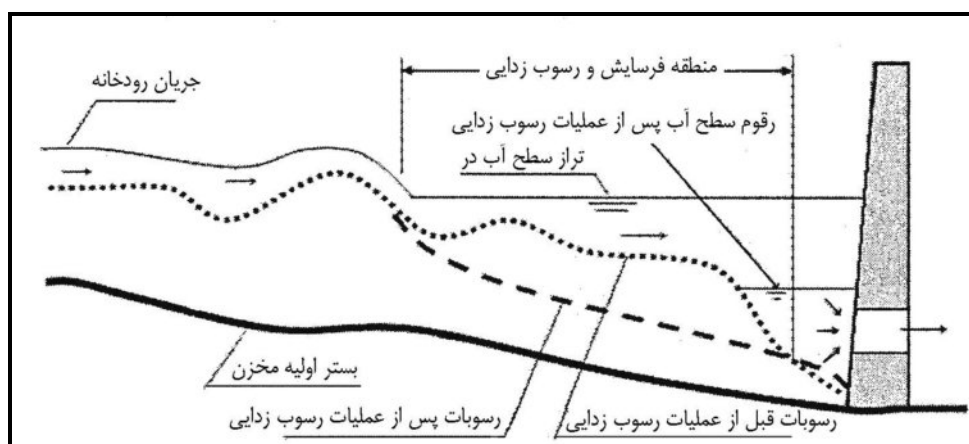
مقدار حجم رسوبات تخلیه‌شده در اثر رسوب‌زدایی در سد دز در سال‌های مختلف به جز سال ۱۳۸۲ بدرستی مشخص نمی‌باشد. دلیل عمده آن عدم انجام اندازه‌گیری ممتد و کامل غلظت خروجی از دریچه‌ها و یا عدم انجام عملیات آبنگاری قبل و پس از رسوب‌زدایی بوده است. در رسوب‌زدایی سال ۱۳۸۲، عملیات آبنگاری قبل و پس از رسوب‌زدایی برداشت گردید. رقوم سطح رسوبات قبل از انجام رسوب‌زدایی برابر با ۲۵۶ متر بوده است. رسوب‌زدایی تحت فشار در این سد موجب خروج تقریباً ۳۰۰ هزار متر مکعب رسوب گردید. همچنین گسترش طولی مخروط رسوب‌زدایی حدوداً ۳۰۰ متر بوده است [۳]. آبنگاری انجام شده پس از انجام رسوب‌زدایی در سد دز در سال ۱۳۸۲ نشان داد که شیب حفره آبستگي در قسمت جلوی تخلیه‌کننده از سه قسمت تشکیل شده است (شکل ۶-۴). قسمت اول تا فاصله ۱۰ متری برابر با ۴۵ درصد قسمت دوم از فاصله ۱۰ متری تا ۱۰۰ متری برابر با ۱۲ درصد و قسمت سوم از فاصله بیش‌تر از ۱۰۰ متری برابر با ۶ درصد می‌باشد [۴۸].



شکل ۴-۶- نیم رخ طولی بستر مخزن پس از عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی تحت فشار سد دز در سال ۱۳۸۲ [۳]

۲-۲-۶- رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد

چنان‌چه سطح آب مخزن سد در زمان عملیات رسوب‌زدایی به پایین‌ترین حد خود برسد به‌طوری‌که جریان رودخانه‌ای در داخل مخزن سد، تشکیل گردد آنرا رسوب‌زدایی آزاد نامند. در رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد پایین آوردن سطح آب مخزن در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول سطح آب مخزن به آهستگی پایین آورده می‌شود (برای مثال ۱ متر در هر روز سطح آب مخزن تا ترازدهانه ورودی نیروگاه). در مرحله دوم سطح آب مخزن خیلی سریع کاهش داده می‌شود. برای مثال در مخزن سد کاجی^۱ در کشور کاستاریکا، سطح مخزن در مرحله دوم ۴۵ متر در مدت پنج ساعت کاهش داده شد و در نهایت مرحله سوم حرکت جریان رودخانه‌ای یا سطح آزاد در مخزن برای مدت چند ساعت می‌باشد. رسوب‌زدایی آزاد راندمان بیش‌تری نسبت به رسوب‌زدایی تحت فشار دارد. شکل (۵-۶) به‌طور شماتیک نحوه عمل رسوب‌زدایی آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶- نحوه عمل رسوب‌زدایی آزاد

۳-۶- عوامل موثر بر رسوب‌زدایی هیدرولیکی

انجام عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی در هر شرایطی ممکن است با موفقیت انجام نگردد. این بدان معنی است که ممکن است حجم زیادی از آب مخزن تخلیه ولی میزان رسوب خارج شده ناچیز باشد، از این رو قبل از اتخاذ تصمیم در رابطه با انجام عمل رسوب‌زدایی باید متغیرهای مهم تاثیرگذار را که حاصل تجربیات عمل رسوب‌زدایی در کشورهای مختلف می‌باشد در نظر داشت. عوامل مهمی را که در این خصوص می‌توان نام برد در ادامه مطرح شده‌اند.

۳-۶-۱- هیدرولوژی حوضه آبریز مخزن

- الگوی رواناب در طول سال
- تغییرات رواناب از سالی به سال دیگر
- پراکندگی خوب ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری
- ثبت داده‌های دقیق در سال‌های مختلف
- حجم رواناب سالانه ورودی (I)

۳-۶-۲- رسوب ورودی به مخزن

- الگوی توزیع رسوب در شاخه‌های مختلف رودخانه
- نحوه‌ی تغییرات رسوب در سال‌های مختلف
- نوع رسوبات و خصوصیات فیزیکی آنها
- سهم آورد رسوب توسط سیلاب‌ها
- داشتن داده‌های دقیق رسوب و برآورد توزیع فصلی آنها

۳-۶-۳- ظرفیت اولیه مخزن (C)

نحوه‌ی ترسیب رسوب در مخازن سدها به نسبت $\frac{C}{I}$ بستگی دارد. این نسبت در مخازن مختلف ممکن است بیش از ۰/۱ درصد تا ۲۰۰ درصد هم تغییر کند. معمولاً مرز بین مخازن کوچک و بزرگ در نسبت $\frac{C}{I}$ برابر ۳۰٪ قرار دارد. مخازن کوچک مخازنی هستند که در آنها این نسبت کوچک‌تر از ۳۰٪ می‌باشد و عمل لایروبی و تخلیه رسوب می‌تواند هر ساله و با موفقیت در آنها انجام گیرد. مخازنی که در آنها $\frac{C}{I} < 5\%$ باشد، امکان تخلیه کامل در کوتاه‌مدت و پر کردن مجدد آن با بارندگی‌های بعدی وجود دارد. در این مخازن با انجام عمل رسوب‌زدایی بخش عمده‌ای از حجم از دست‌رفته را می‌توان مجدداً احیا نمود. برای مخازنی که در آنها $\frac{C}{I} > 30\%$ باشد، موفقیت عمل رسوب‌زدایی بستگی به انتخاب زمان رسوب‌زدایی دارد که تعیین آن در هر منطقه‌ای متفاوت و از پیچیدگی‌های کار می‌باشد. معمولاً عمل رسوب‌زدایی در این مخازن از راندمان بسیار پایینی برخوردار می‌باشد. برای مخازنی که

$\frac{C}{I} 100\% >$ می‌باشد، معمولاً امکان تخلیه سالانه مخزن وجود ندارد در نتیجه عمل رسوب‌زدایی ممکن است تنها به صورت تحت فشار و البته با راندمان کم صورت گیرد. عمل تخلیه کامل تنها هر چندین سال یک بار ممکن است انجام شود. در این مخازن بهتر است از روش خروج رسوبات ریزدانه توسط پدیده‌ی جریان‌های دانسیته استفاده شود.

۴-۳-۶- پتانسیل ترسیب رسوب

اگر نسبت آورد سالانه رسوب (Q_s) بر حسب تن به حجم آورد رواناب سالانه (I) بر حسب m^3 تقسیم گردد، نسبت پتانسیل ترسیب رسوب در مخازن به دست می‌آید که با P_A نشان داده می‌شود:

$$P_A = \frac{Q_s}{I} \quad (۳-۶)$$

برای مخازنی که P_A آنها بین یک تا دو درصد در سال می‌باشد، عمل رسوب‌زدایی باید هر چه سریع‌تر انجام گیرد. برای مخازنی که P_A برابر پنج درصد یا بیش‌تر، حتماً در زمان طراحی باید تمهیداتی برای رسوب‌زدایی منظور گردیده باشد. مخازنی که دارای حجم مخزن بسیار بالایی هستند، معمولاً P_A آنها ناچیز بوده و نیازی به عمل رسوب‌زدایی در کوتاه‌مدت ندارند و باید از روش‌های کنترل فرسایش در سطح حوضه استفاده گردد. همچنین استفاده از پدیده‌ی جریان‌های غلیظ برای خروج رسوبات ریزدانه از دریچه‌های تحتانی در این سدها نیز مفید است.

۵-۳-۶- شکل حوضه

از دیگر عوامل موثر در موفقیت آمیز بودن عملیات رسوب‌زدایی، شکل حوضه است. معمولاً حوضه‌های V شکل بسیار موفقیت آمیزتر عمل می‌کنند. در حوضه‌های پهن بیش‌تر رسوبات در مسیل‌ها ترسیب می‌کنند که به مرور تحکیم یافته و تخلیه آن توسط شرایط هیدرولیکی مشکل و یا غیرممکن است.

۶-۳-۶- دریچه‌های عمقی (آبیاری)

موقعیت قرارگیری دریچه‌ها، شکل و ظرفیت بده آنها از جمله عوامل تاثیرگذار بر میزان رسوب‌زدایی می‌باشد. به‌طور کلی در زمان طراحی باید دریچه‌ها در پایین‌ترین تراز ممکن نصب گردند و طوری طراحی شوند که بتوانند حداقل دو برابر متوسط بده سالانه ورودی را در شرایطی که سطح آب مخزن تا ۵۰ درصد تراز عادی پایین آورده می‌شود، تخلیه کنند. البته در مخازنی که قرار است با انجام عمل رسوب‌زدایی، مخزن به‌طور کامل در زمان سیلاب تخلیه گردید، ظرفیت باید به همان میزان آورد سیلاب مورد نظر باشد و معمولاً ظرفیت دریچه‌ها براساس آبنگاری‌های فصل رسوب‌زدایی طراحی می‌شوند.

ظرفیت دریچه‌های عمقی عامل مهمی در موفقیت آمیز بودن عملیات رسوب‌زدایی دارد. تجربیات به‌عمل آمده در کشور هندوستان نشان می‌دهد که ظرفیت دریچه‌ها باید برابر دبی لبریز^۱ رودخانه بالادست باشد [۲۱ و ۲۲]. در کشور چین از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۳۷]:

$$\frac{Q_m S_n}{Q_d S_o} \geq 0.5 \quad (۴-۶)$$

در رابطه فوق S_o شیب اصلی رودخانه

S_n شیب خطی که حداکثر تراز سطح آب مخزن در منتهی‌الیه بالادست را به رقوم کف دریاچه متصل می‌کند.

Q_d دبی غالب^۱ رودخانه ورودی به مخزن

Q_m حداکثر دبی خروجی دریاچه بدون تسکین سیل در مخزن

ابعاد دریاچه نیز از عوامل موثر در افزایش راندمان رسوب‌زدایی می‌باشد. دریاچه‌ها باید عریض باشند، ارتفاع دریاچه‌ها بین ۱/۵ تا ۲/۵ متر انتخاب گردد و عرض دریاچه با توجه به ظرفیت تخلیه دریاچه تعیین شود.

در خصوص تاثیر بده خروجی بر راندمان رسوب‌زدایی البته اختلاف نظرانی هم وجود دارد. به‌طوری‌که مطالعات نشان می‌دهد که هر چند با افزایش بده، راندمان رسوب‌زدایی افزایش می‌یابد ولی پس از مدتی مقدار راندمان به دلیل تاثیر پس‌زدگی آب کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که در هر مخزنی، بده رسوب‌زدایی دارای حد بهینه‌ای می‌باشد. هم‌چنین رسوب‌زدایی زمانی که جریان رودخانه کم‌تر از سه برابر بده متوسط سالانه باشد تقریباً بی‌تاثیر است [۱۰۳].

۶-۳-۷- شرایط رودخانه پایین‌دست

خروج رسوب از مخزن سد در مدت کوتاهی تنها از طریق افزایش غلظت رسوب امکان‌پذیر است که این امر تبعات منفی را در پایین‌دست خواهد داشت. از جمله می‌توان به مشکلاتی که برای آبریان به‌وجود می‌آورد اشاره کرد. هم‌چنین ورود حجم زیاد رسوب به شبکه‌های آبرسانی و آبیاری باعث گرفتگی کانال‌های آبیاری می‌گردد. مشکلات دیگری نیز برای تفریحات سالم به‌وجود خواهد آورد. برای به حداقل رساندن این تبعات ضروری است تا زمان مناسب برای عمل رسوب‌زدایی تعیین گردد و حداکثر ظرفیت غلظت رسوب در پایین‌دست با توجه به شرایط هیدرولیکی رودخانه و گونه‌های مختلف آبریان یا گیاهان مشخص گردد.

۶-۴- زمان رسوب‌زدایی

زمان انجام عملیات رسوب‌زدایی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زیست‌محیطی مهم است. تجربه کشور روسیه نشان داده است که برای مخازن کوهستانی، زمان رسوب‌زدایی قبل از سیلاب‌های سالانه است. معمولاً این‌گونه مخازن سدها به علت آورد رسوب زیاد رودخانه‌های کوهستانی مجدداً ترسیب در آنها صورت می‌گیرد، از این رو عملیات رسوب‌زدایی هر چند سال یک بار باید انجام شود. در کشور ونزوئلا، زمان رسوب‌زدایی معمولاً در فصول سیلابی انتخاب می‌شود تا تاثیر کمی روی تولید برق داشته باشد. در کشورهایی چون تایوان، الجزیره و ایران (سد سفیدرود)، عملیات رسوب‌زدایی در انتهای فصل آبیاری و قبل از شروع فصل بارندگی انجام می‌گیرد. در کشورهایی چون ژاپن فصل زمستان به منظور به حداقل رساندن اثر جریان‌های غلیظ، اثر رسوبات ریزدانه بر آبریان، بر آب آبیاری و به‌خصوص بر گردشگری به‌عنوان زمان رسوب‌زدایی انتخاب می‌شود. به‌رحال آنچه که اهمیت دارد این است که عملیات رسوب‌زدایی زمانی انجام شود که در عین حالی که راندمان رسوب‌زدایی به حداکثر برسد، از تاثیرات منفی آن به‌خصوصی در پایین‌دست جلوگیری و ضمناً بتوان پس از مدت کوتاهی آب به اندازه‌ی کافی ذخیره نمود. توصیه می‌شود در مخازن سدهایی که

نرخ رسوب‌گذاری بالایی دارند، دوره‌ی رسوب‌زدایی کوتاه‌تر باشد چرا که طولانی کردن دوره رسوب‌زدایی و تراکم رسوبات اولاً راندمان تخلیه رسوب را کاهش داده و ثانیاً اثرات سوپاین دست را نیز شدت می‌دهد. این نکته به‌خصوص در سدهای خیلی بزرگ اهمیت دارد چرا که معمولاً رسوبات آنها در نزدیک دریچه‌های تحتانی از نوع رسوبات چسبنده می‌باشند. بهتر است عملیات رسوب‌زدایی پس از مدت کوتاهی از احداث سد شروع گردد تا راندمان عملیات، بالا باشد.

۶-۵- راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی

تعاریف متعددی توسط محققین مختلف برای راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی به‌کار برده شده است که در جدول (۶-۲) ارائه شده است. متغیرهای متعددی بر راندمان رسوب‌زدایی تاثیر دارند. به‌طور کلی راندمان رسوب‌زدایی را می‌توان افزایش داد اگر:

- عمق آب در مخزن کاهش یابد.
- مقدار بده رسوب‌زدایی افزایش یابد.
- ابعاد دریچه آبیاری افزایش یابد.
- موقعیت نصب دریچه تحتانی کاهش یابد.
- مدت زمان رسوب‌زدایی افزایش یابد.
- هر چه دره‌ی ساختگاه سد باریک‌تر باشد.
- هر چه شیب رودخانه اصلی تندتر باشد.
- هر چه طول مخزن کوتاه‌تر باشد.
- هر چه مسیرمخزن در راستای جریان اصلی مستقیم‌تر باشد.
- هر چه محل ترسیب رسوبات به دریچه‌های عمقی نزدیک‌تر باشند.
- هر چه اندازه رسوبات ریزتر باشند.
- هر چه شکل رسوبات کروی‌تر باشند.
- هر چه تناوب زمان رسوب‌زدایی کوتاه‌تر باشد.
- هر چه رسوبات نهشته شده جوان و تحکیم‌نیافته‌تر باشند.

جدول ۶-۲- تعریف‌های مختلف راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی

نام محقق	رابطه	توضیحات
Qian (1982)	$E = V_o / V_d$	حجم کل آب خروجی به حجم رسوب خروجی در زمان رسوب‌زدایی
Ackers and Thompson (1987)	$E = W_o / W_i$	وزن رسوب خروجی به وزن رسوب سالانه ورودی
Mahmood (1987)	$E = (V_2 - V_1) / V_o$	نسبت اختلاف حجم مخزن پس و قبل از رسوب‌زدایی به حجم آب خروجی در طول زمان رسوب‌زدایی
Tolouie (1989)	$E = W_o / W_i$	وزن رسوب خروجی سالانه به وزن متوسط درازمدت سالانه ورودی
Atkinson (1996)	$E = W_o / W_d$	وزن رسوب خروجی به وزن رسوب سالانه نهشته
Lai and Shen (1996)	$E = (V_{so} - V_{si}) / V_o$	نسبت اختلاف حجم رسوب خروجی و ورودی در زمان رسوب‌زدایی به حجم آب خروجی
	$E = V_o$	V_i = حجم آب خروجی
	$E = C_o$	C_i = غلظت رسوب خروجی
Morris and Fan (1997)	$E = (V_o C_o - V_i C_i) / \rho_s V_o$	C_o = غلظت رسوب ورودی
		ρ_s = جرم مخصوص ظاهری رسوبات نهشته شده

هم‌چنین می‌توان به نکات زیر توجه نمود:

- برای موثر بودن رسوب‌زدایی، حرکت عمومی آب و رسوب در مخزن باید رخ دهد.
- در سدهایی که جدیداً ساخته می‌شوند بهتر است دریچه آبیاری در پایین‌ترین نقطه ممکن باشد.
- در مخازن سدهایی که هم رسوبات ریزدانه و هم رسوب درشت‌دانه وجود دارند، معمولاً تخلیه رسوبات ریزدانه در مدت زمان کم‌تری صورت می‌گیرد درحالی‌که برای تخلیه رسوبات درشت‌دانه، به مدت زمان طولانی‌تری نیاز می‌باشد.
- رسوب‌زدایی زمانی موثر است که تراز رسوبات ترسیب شده بالاتر از رقوم تخلیه‌کننده تحتانی قرار گرفته باشند.
- مطالعات نشان می‌دهد که شیب تا ۰/۰۰۱ تأثیری روی راندمان رسوب‌زدایی ندارد ولی شیب‌های بیش‌تر از ۰/۰۰۱ تأثیر دارد [۱۱۴].

- در خلال رسوب‌زدایی در بستر رودخانه کانالی ایجاد می‌شود که شیب بدنه آن ممکن است از ۱/۴ درجه برای مصالح بسیار شل تا ۹۰ درجه برای مصالح بسیار ریزدانه تغییر کند. با پیش‌بینی این زاویه می‌توان راندمان رسوب‌زدایی را مشخص کرد. مسلماً مقدار این زاویه به عواملی چون خصوصیات رسوب، درصد تحکیم، عمق لایه ترسیب شده و تغییرات بده در خلال رسوب‌زدایی بستگی دارد. رابطه زیر بر اساس اطلاعات اخذ شده از مخازن کشور آفریقای جنوبی توسط اتکینسون [۱۰ و ۱۱] ارایه شده است:

$$\tan(\alpha) = 6.30(\gamma_d)^{4.7} \quad (۵-۶)$$

که γ_d وزن مخصوص خشک رسوب بر حسب ton/m^3 است.

۶-۶- برآورد رسوب خروجی در اثر انجام عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی

مطالعات متعددی در خصوص برآورد میزان رسوب خروجی در زمان رسوب‌زدایی انجام گرفته است. نتایج تعدادی از این مطالعات منجر به ارایه رابطه‌ای برای محاسبه رسوب خروجی گردیده است که به‌طور خلاصه در جداول (۳-۶) و (۴-۶) ارایه شده‌اند. رابطه Xia (1983) از جدول (۳-۶) در تعدادی از سدهای مخزنی به‌کار گرفته شده است و نشان داده شده است که مقدار رسوب خروجی اندازه‌گیری شده بیش‌تر از مقدار محاسبه شده توسط این فرمول می‌باشد. از این رو پیشنهاد شده است تا مقدار برآورد شده در ضریب سه ضرب گردد [۱۱]. کاربرد روابط رسوب‌زدایی آزاد بستگی به شرایط تالوگ و دامنه‌ها دارد و کاربرد این روابط باید متناسب با شرایط محیطی مخزن باشد، در غیر این صورت ممکن است جوابهای حاصله برای مخزن مورد مطالعه گمراه‌کننده باشد. لذا بهتر است این روابط صرفاً به منظور تخمین اولیه استفاده گردند.

۶-۷- معیارهای رسوب‌زدایی هیدرولیکی

عمل رسوب‌زدایی پرهزینه و دارای اثرات سو زیست‌محیطی بوده، ولی در تعدادی از سدها ضروری است. برای بررسی موفقیت‌آمیز بودن عمل رسوب‌زدایی، معیارهای مختلفی ارایه شده‌اند که عبارتند از:

الف- معیار اندازه مخزن

این معیار برابر است با نسبت ظرفیت مخزن سد (C) به مقدار متوسط رواناب سالانه ورودی به سد (I). بر اساس این معیار رسوب‌زدایی وقتی مفید است که این نسبت کمتر از ۰/۰۲ باشد. این مقدار توسط باسوم و روزبوم (۱۹۹۷) [۱۳] کمتر از ۰/۰۵ و توسط موریس و فان (۱۹۷۷) [۱۰۳] کمتر از ۰/۳ ذکر شده است. البته برای مخازنی با عمر مفید کمتر از نصف، باید این نسبت برابر یا بیش‌تر از ۰/۵ باشد. منظور از عمر مفید، نصف مدت زمانی است که نصف ذخیره مفید مخزن پر از رسوب شود.

ب- معیار تراز سطح آب

یکی دیگر از معیارهای ارایه شده، ارتفاع سطح آب مخزن در زمان رسوب‌زدایی است، به‌طوری‌که اگر این ارتفاع کمتر از نصف ارتفاع سد باشد، رسوب‌زدایی موثر است.

ج- معیار بده رسوب‌زدایی

مطابق این معیار، مقدار بده خروجی در زمان رسوب‌زدایی اگر بیش‌تر از دو برابر بده متوسط سالانه باشد، رسوب‌زدایی موثر است.

د- معیار تعادل رسوب^۱

معیار تعادل رسوب عبارت است از نسبت مقدار رسوب خارج شده سالانه در اثر رسوب‌زدایی به مقدار رسوب ترسیب شده سالانه در مخزن سد. بدیهی است اگر این معیار بیش‌تر از یک باشد، رسوب‌زدایی نقش موثری در بازیافت حجم مخزن خواهد داشت. چنان‌چه عدد نزدیک به یک باشد می‌توان با افزایش دوره رسوب‌زدایی و یا افزایش بده خروجی به راندمان مطلوب رسید.

جدول ۶-۳- روابط مختلف برآورد میزان رسوب خروجی در رسوب‌زدانی آزاد براساس مطالعات میدانی

نام محقق	فرمول	توضیحات
Fan & Jiang (1980) (رسوب‌زدایی آزاد)	$W_o = KQ_o^{1.2} (S \times 10^4)^{1.8}$	W_o = وزن رسوب خروجی kg/sec Q_o = بده خروجی m ³ /sec S = شیب بستر قبل از رسوب‌زدایی K = ضریبی است که مقدار آن ۰/۰۰۳۵ می‌باشد.
Xia (1983) مطالعات انجام شده در کشور چین (رسوب‌زدایی آزاد)	$Q_s = \frac{EQ^{1.6}S^{1.2}}{B^{0.6}}$	Q_s = بده رسوب خروجی ton/sec Q = بده جریان m ³ /sec E = برابر ۳۰۰ برای ذرات بزرگ‌تر از ۰/۱ میلی‌متر و برابر ۶۵۰ برای ذرات کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر B = برابر ۱۸۰ برای رسوب‌زدایی با بده کم عرض رودخانه
Wu (1983) (رسوب‌زدایی آزاد)	$\ln(C_v) = 0.578 + 0.019 \ln\left(\frac{u}{\omega_s}\right) S + 0.041 \ln\left(\frac{ud}{v}\right)$	C_v = درصد حجمی رسوبات خروجی d = عمق آب در گالری تخلیه رسوب (متر) S_f = شیب خط انرژی گالری u = سرعت در گالری (متر در ثانیه) ω_s = سرعت سقوط ذرات رسوبی (متر در ثانیه) v = لزجت کینماتیک آب

ادامه جدول ۶-۳- روابط مختلف برآورد میزان رسوب خروجی در رسوب‌زدایی آزاد براساس مطالعات میدانی

نام محقق	فرمول	توضیحات
Wu (1989) (رسوب‌زدایی آزاد)	$C_o = 369.3 \left[\frac{u s_f}{\omega_s} \right]^{-0.69}$	C_o = غلظت وزنی رسوب خروجی Kg/m^3 u = سرعت آب در تونل (متر در ثانیه) ω_s = سرعت سقوط ذرات m/sec s_f = شیب خط انرژی تونل
Wu (1989) (رسوب‌زدایی تحت فشار)	$C_o = 51.4 \left[\frac{u s_f}{\omega_s} \right]^{-0.64}$ $C_o = 64.9 \left[\frac{u^3}{g d \omega_s} \right]^{-0.45}$	C_w = غلظت رسوب خروجی Kg/m^3 u = سرعت آب در تونل (متر در ثانیه) ω_s = سرعت سقوط ذرات m/sec d = عمق آب در تونل تخلیه رسوب (متر)
Sen and Srivastdla (1995)	$W_o = \frac{\rho_s u R S^2 Q_o}{82666 D_{50}^{1.5}}$	W_o = وزن رسوب خارج شده در واحد زمان (Kg/sec) R = شعاع هیدرولیکی جریان (متر) D_{50} = اندازه متوسط ذرات رسوبی (متر) S = شیب بستر مخزن Q_o = بده آب خروجی m^3/sec ρ_s = جرم واحد حجم رسوب نهشته شده Kg/m^3
Rooseboom(1975)	$\text{Log} C_t = 5.3 + 0.283 \text{Log}(V_m S_f)$ $V_m S_f = \frac{P Q^3}{C^2 A^4}$ $C_t = 2 \times 10^5 (V_m S_f)^{0.283}$	C_t = غلظت وزنی رسوب خروجی Kg/m^3 V_m = سرعت متوسط جریان (متر در ثانیه) P = محیط خیس شده (متر) S_f = شیب خط انرژی C = ضریب سزی A = سطح مقطع جریان (متر مربع) Q = دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)

جدول ۶-۴- روابط مختلف برآورد رسوب خروجی در رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد براساس مطالعات آزمایشگاهی

نام محقق	رابطه	توضیحات
Wu (1989)	$C_o = 0.30 \left[\frac{u^3}{g d \omega_s} \right]$	C_o = غلظت وزنی رسوب خروجی (kg/m^3) d = عمق جریان (m) g = شتاب ثقل m/sec^2 u = سرعت جریان (m/sec) ω_s = سرعت سقوط ذرات (m/sec)
Lin and Wu (1991) مطالعات انجام شده در مخزن Tien- Lun واقع در کشور تایوان (رسوب‌زدایی آزاد)	$C_o = 0.024 \left[\frac{u^3}{g d \omega_s} \right]^{2.66}$ $C_o = 181.4 \left[\frac{u s}{\omega_s} \right]^{2.54}$	C_o = غلظت وزنی رسوب خروجی (kg/m^3) d = عمق جریان (m) g = شتاب ثقل m/sec^2 u = سرعت جریان (m/sec) ω_s = سرعت سقوط ذرات (m/sec)
Di Silvio (1990)	$C_A = 0.1 \frac{u_A^3}{Q^2} = 0.1 \frac{Q}{A^3}$	A = سطح مقطع جریان در تونل (m^2) C_A = نسبت حجم رسوب به حجم آب در خروجی تونل u_A = متوسط سرعت جریان در زمان رسوب‌زدایی (m/sec) Q = بده خروجی (m^3/sec)
Lin and Wu (1991) خروج رسوب از دریچه‌های لجن کش	$C_o = 1170 \frac{W^{0.4} L^{0.4}}{Q^{0.4}} \times (0.56 S^{1.5} - 0.0003)$	C_o = غلظت رسوب kg/m^3 W = عرض جریان (متر) S = شیب L = طول کانال تخلیه رسوب (متر) Q = بده جریان (مترمکعب در ثانیه)

جدول ۴-۶- روابط مختلف برآورد رسوب خروجی در رسوب‌زدایی هیدرولیکی آزاد براساس مطالعات آزمایشگاهی

نام محقق	رابطه	توضیحات
Wang et al - (1997) جریان آزاد	$S_r = 0.218 \frac{\gamma}{(\gamma_s - \gamma)} \frac{nu}{d^{0.67} D_s^{0.25}}$ $\left[\frac{\gamma n^2 u^3}{d^{0.33}} - 0.1 \frac{\gamma}{g} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D_s \right)^{1.5} \right]$	D_s = اندازه ذرات رسوبی (m) d = عمق جریان (m) g = شتاب ثقل (m/sec^2) n = ضریب زبری مانینگ S_r = نرخ فرسایش ($kg/m^2/sec$) u = سرعت جریان (m/sec) γ = وزن مخصوص آب γ_s = وزن مخصوص رسوب
Westrich and Juraschek (1985) جریان آزاد	$C_v = \frac{0.0018 \tau_b V}{(G_s - 1) \rho g d \omega_s}$	C_v = ظرفیت غلظت رسوب (حجمی) τ_b = تنش برشی بستر g = شتاب ثقل (m/sec^2) G_s = چگالی ویژه ω_s = سرعت سقوط ذرات رسوب V = سرعت جریان (m/sec) ρ = جرم مخصوص آب

ه- معیار ظرفیت پایدار مخزن^۱

نسبت ظرفیت پایدار مخزن به ظرفیت اولیه مخزن را معیار ظرفیت پایدار مخزن می‌گویند. در صورتی که مخزن و هم‌چنین کانال ایجادشده در اثر عمل رسوب‌زدایی در بستر مخزن به صورت دوزنقه‌ای فرض شوند، مقدار معیار ظرفیت پایدار مخزن برابر خواهد بود با مساحت مقطع کانال به کل مساحت مقطع مخزن. در صورتی که مقدار معیار پایدار مخزن بیش‌تر از ۰/۵ باشد، عمل رسوب‌زدایی موفقیت‌آمیز خواهد بود.

و- معیار تخلیه مخزن^۲

برابر است با نسبت عمق آب مخزن در زمان رسوب‌زدایی به عمق آب مخزن در هنگام آبیگری معمولی. این نسبت باید بیش‌تر از ۰/۷ باشد و چنان‌چه کم‌تر از ۰/۷ بود، عمل رسوب‌زدایی ناقص صورت خواهد گرفت.

ز- معیار نسبت عرض رسوب‌زدایی

این معیار برابر است با نسبت عرض کف کانال ایجاد شده در اثر رسوب‌زدایی به عرض کف مخزن. چنان‌چه این نسبت کم‌تر از یک باشد، در آن صورت رسوب‌زدایی موفقیت‌آمیز نیست. مقدار عرض کانال ایجاد شده در اثر رسوب‌زدایی برابر است با [۱۱]:

$$B = 12.8 Q_0^{0.5} \quad (۴-۶)$$

که در آن: B = عرض کانال ایجادشده در اثر رسوب‌زدایی (متر)

Q_0 = مقدار بده خروجی از سد.

1- Long Term Capacity Ratio(LTCR)

2- Draw Down Ratio(DDR)

تعیین عرض کانال را می‌توان از روابط کانال‌های پایدار و یا روابط نظریه رژیم که در کتب هیدرولیک رسوب^۱ ارایه شده‌اند استفاده کرد. در صورت استفاده از روش طراحی کانال پایدار، طولی^۲ روش زیر را برای تعیین عرض رودخانه شاهرود پس از خاتمه رسوب‌زدایی سد سفیدرود پیشنهاد کرده است:

- داده‌های مورد نیاز عبارتند از: Q دبی رودخانه، S شیب رودخانه، ρ جرم واحد حجم آب، ρ_s جرم واحد حجم ذرات رسوبی، T مدت زمان از عملیات رسوب‌زدایی قبلی، P_{sc} درصد لای و رس رسوبات، I_p شاخص خمیری رسوبات نهشته شده، L_i حد روانی رسوبات نهشته شده، v لزجت سینماتیک، D_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی.
- مقدار تنش برشی در آستانه حرکت رسوبات نهشته شده را می‌توان از یکی از روابط زیر که برای رسوبات سد سفیدرود توسط طولی [۱۳۹ و ۱۳۸] ارایه شده است تعیین کرد.

$$\tau_c = 0.052(\rho_s - \rho)gD_{50} \left[1 + (I_p^{0.9} + P_{sc}^{0.84} \text{Log}(9 + T)) \right] \quad (7-6)$$

$$\tau_c = 4L_i^{-1.25} [\text{Log}(9 + T)]^{0.5} \quad (8-6)$$

- رابطه اولی مناسب رسوبات مخلوط چسبنده و غیرچسبنده و رابطه دومی برای رسوبات نزدیک سد (چسبنده)، توصیه شده است.
- حداکثر ابعاد کانال زمانی شکل می‌گیرد که ذرات رسوبی کانال در شرایط آستانه حرکت قرار گیرند. بنابراین می‌توان مقدار تنش برشی را برابر تنش برشی سواحل قرار داد. در این صورت:

$$\tau_c = \tau_s \quad (9-6)$$

- مقدار تنش برشی سواحل در شرایط کانال‌های عریض حدود 0.7 تنش برشی بستر است، در نتیجه مقدار عمق آب در کانالی که در آستانه حرکت قرار دارد برابر است با:

$$d = \frac{\tau_c}{0.7\rho gS} \quad (10-6)$$

- مقدار سرعت در این کانال را می‌توان از روابط توزیع سرعت و یا روابط حاکم بر جریان‌های یکنواخت نظیر رابطه مانینگ تعیین کرد، در این صورت:

$$V = \frac{1}{n} d^{2/3} S^{1/2} \quad (11-6)$$

- در نتیجه مقدار عرض کانال حفر شده برابر است با:

$$B = \frac{Q}{Vd} \quad (12-6)$$

محاسبات فوق را نیز می‌توان با استفاده از روابط سرعت بحرانی نیز انجام داد. توجه شود که بیش‌تر روابط مورد استفاده تجربی هستند لذا ممکن است عرض کانال محاسبه‌شده با آنچه که مشاهده‌شده متفاوت باشد. لذا بهتر است این روابط در هر منطقه‌ای واسنجی گردد.

۱- به‌طور مثال کتاب اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، از انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز تالیف شفاعی بجستان.

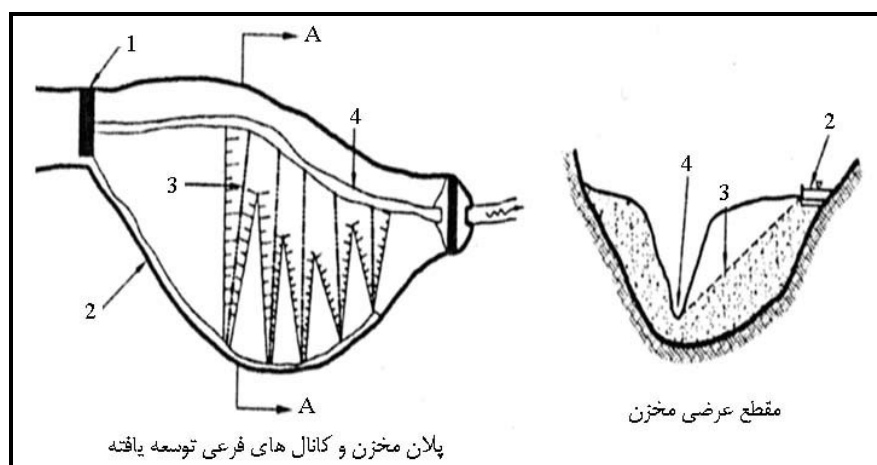
ح- معیار شیب بدنه کانال

نسبت عرض بالای کف کانال ایجاد شده در اثر رسوب‌زدایی به عرض بالای مخزن در رقوم حداکثر را، معیار شیب بدنه کانال می‌گویند. چنان‌چه معیار (ز) در مخزنی برقرار بود، در آن صورت مقدار معیار شیب بدنه کانال باید بزرگ‌تر از ۴ باشد و چنان‌چه معیار (ز) برقرار نبود، در آن صورت مقدار معیار شیب بدنه کانال باید نزدیک به واحد باشد.

به منظور ارزیابی عملیات رسوب‌زدایی هیدرولیکی و نیز به منظور تحلیل اقتصادی این عملیات، اخیراً برنامه رایانه‌ای با نام RESCON در محیط نرم‌افزار Excel به سفارش بانک جهانی تهیه و در دسترس عموم قرار گرفته است. داده‌های ورودی این نرم‌افزار عبارت است از: حجم اولیه مخزن، حجم فعلی مخزن، عرض رودخانه در محل سد، تراز نرمال سطح آب، تراز دریچه‌های تخلیه‌کننده، متوسط دبی سالانه رودخانه، میزان رسوب ورودی، خصوصیات رسوب مخزن، مدت عملیات رسوب‌زدایی و تناوب آن. این برنامه معیارهایی را که قبلاً تعریف شدند محاسبه می‌کند. برای اطلاع بیش‌تر به منبع [۱۱۱] مراجعه شود.

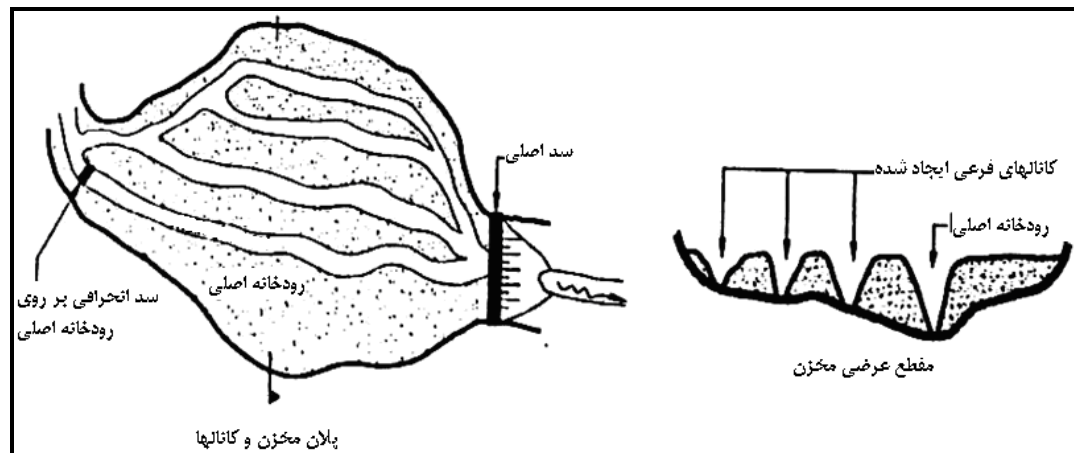
۶-۸- روش‌های کمکی برای افزایش راندمان روش رسوب‌زدایی آزاد

همان‌طور که اشاره شد، روش رسوب‌زدایی آزاد باعث می‌شود تا کانال طولانی در مرکز مخزن و در جهت رودخانه اصلی ایجاد گردد و عملاً رسوب انهار فرعی به سمت مخزن تخلیه نشوند. یکی از روش‌های افزایش راندمان رسوب‌شویی و توسعه حفره فرسایش در جهت عرضی، ایجاد کانال‌های عرضی در مسیر نه‌رهای فرعی ورودی به مخزن و اتصال آن به کانال اصلی می‌باشد. البته این عمل را تنها می‌توان در مخازن خاصی که چنین موقعیت‌هایی داشته باشد انجام داد. عمل حفر کانال‌های عرضی نیز در تراس‌های مخزن که در اثر پایین‌رفتن سطح آب مخزن خشک شده‌اند می‌توان انجام داد. عرض کانال حفر شده نیز در ابتدا کوچک و در حد چند متر می‌باشد. پس از برقراری جریان، فرسایش پس‌رونده باعث انتقال حجم زیادی از رسوب به کانال اصلی می‌گردد که ممکن است در نهایت عرض کانال فرعی به چند صد متر هم برسد. شکل (۶-۶) شمایی از احداث کانال‌های کمکی برای توسعه فرسایش‌های عرضی را نشان می‌دهد. روش دیگر احداث کانال‌های طولی موازی با کانال اصلی بستر مخزن می‌باشد. در این حالت در تراس‌های ظاهر شده مخزن سد می‌توان کانال‌های طولی احداث و در انتها مجدداً وارد کانال اصلی کرد. شکل (۶-۷) شمایی از احداث کانال‌های انحرافی برای گسترش فرسایش‌های طولی را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۶- کانال‌های کمکی برای توسعه فرسایش عرضی

(۱) سد انحرافی، (۲) کانال انحرافی، (۳) خط القعر کانال عرضی، (۴) کانال رسوب‌زدایی اصلی



شکل ۶-۷- نمایی از کانال‌های انحرافی برای توسعه فرسایش طولی [۱۰۳]

فرسایش طولی این مزیت را دارا می‌باشد که تنها با یک کانال می‌توان حجم زیادی از مواد رسوبی را فرسایش داد. طراحی و اجرای این سیستم باید طوری باشد که کانال‌های کمکی به وجود آمده موازی یکدیگر باقی بمانند و همچنین در اثر تخریب کناره‌ها کانال‌های طولی تخریب نشوند. بخشی از جریان آب کانال اصلی را نیز می‌توان با احداث سدهای موقتی به سمت این کانال‌ها هدایت کرد (شکل ۶-۷). جریان آب در این کانال‌ها باعث فرسایش‌های پس‌رونده و انتقال حجم زیادی از رسوب خواهند شد.

۶-۹- ملاحظات در زمان رسوب‌زدایی

عمل رسوب‌زدایی یا تخلیه رسوب از مخزن توسط سیستم هیدرولیکی به منظور بازیافت بخشی از حجم مخزن انجام می‌گیرد. معمولاً چنانچه بتوان با عمل مداوم رسوب‌زدایی حجم مخزن مفید را معادل ۵۰ درصد حجم مخزن اولیه نگه داشت، عملیات رسوب‌زدایی موفقیت‌آمیز می‌باشد. در زمان رسوب‌زدایی، ملاحظات باید مدنظر قرار گیرد که عبارتند از:

- کمبود شدید حجم آب مخزن

کاهش حجم مخزن می‌تواند اثرات منفی بر تامین آب پایین‌دست و تولید انرژی بگذارد ولی این عوامل نباید مانع رسوب‌زدایی گردند بلکه تخلیه برای رسوب‌زدایی باید با برنامه‌ریزی کامل منابع آب انجام گیرد.

- تخلیه سریع و کامل

تخلیه سریع همیشه از جنبه رسوب‌زدایی حائز اهمیت است ولی محدودیت‌های نظیر ظرفیت دریچه‌های تحتانی و یا موقعیت قرارگیری آنها اجازه تخلیه سریع و کامل را ممکن است ندهند. باید دقت شود که نرخ افت سطح آب مخزن نباید هیچ‌وقت بیش‌تر از حدی باشد که ممکن است مخاطراتی را برای پایداری سطوح شیبدار (در سدهای خاکی) ایجاد کند یا باعث ریزش سواحل مخزن شوند.

- ایجاد تلاطم

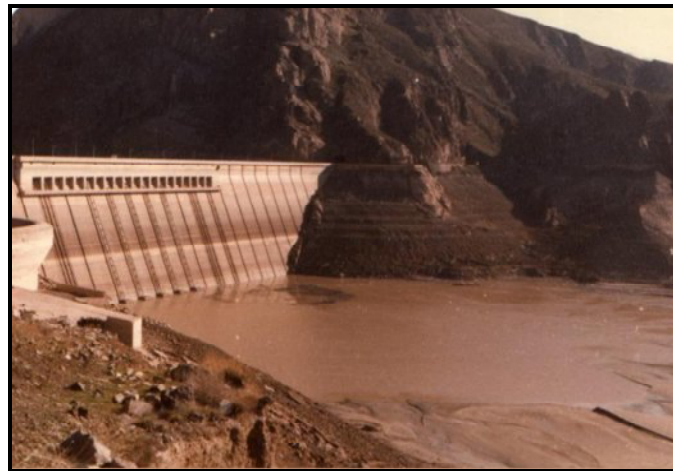
تلاطم جریان زمان انجام عملیات رسوب‌زدایی برای به حرکت درآوردن رسوبات نهشته شده در داخل مخزن بسیار موثر می‌باشد. از این رو تخلیه سریع و پایین‌آوردن سریع سطح مخزن می‌تواند در ایجاد تلاطم موثر باشد.

۶-۱۰- کاربرد رسوب‌زدایی آزاد در سد سفیدرود

سد سفیدرود از نوع بتنی پشت‌بنددار^۱ می‌باشد و در نزدیکی شهرستان منجیل استان گیلان قرار دارد. این سد دارای ارتفاع ۱۰۶ متر است و با هدف کشاورزی، شرب و تولید انرژی احداث و در سال ۱۳۴۱ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. رودخانه های قزل‌اوزن و شاه‌رود به مخزن سد وارد می‌شوند. ظرفیت اولیه ۱۷۶۰ میلیون مترمکعب با حجم آب قابل تنظیم اسمی ۱۶۵۰ میلیون مترمکعب که عمدتاً برای تامین آب مورد نیاز ۱۸۸۰۰ هکتار اراضی باید مورد بهره‌برداری قرار گیرد. تراز و طول تاج سد ۹۶۰۲۷۶ و ۴۲۵ متر است. ظرفیت سرریز آن ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه است. جریان متوسط سالانه ورودی به سد ۴۸۳۵ میلیون مترمکعب و متوسط درازمدت جریان خروجی ۴۶۰۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. متوسط دراز مدت آورد رسوب سالانه ۴۸ میلیون تن در سال است. بدین ترتیب نسبت ظرفیت مخزن C به آورد جریان I برابر ۰/۳۶ می‌باشد. متأسفانه به دلیل آورد بالای رسوب رودخانه‌های منتهی به مخزن سد، سالانه حجم زیادی از رسوب در مخزن آن نهشته می‌شود به طوری که درصد تلفات حجم مخزن به دلیل نهشته شدن رسوب برابر ۲/۰۸ درصد یعنی دو برابر نرخ متوسط در ایران و چهار برابر نرخ متوسط جهانی است. راندمان تله‌اندازی در این سد در طول دوره بهره‌برداری حدود ۷۹٪ می‌باشد. یکی از اقدامات بسیار موثر برای احیاء بخشی از ظرفیت سد در چهار دهه گذشته انجام عملیات رسوب‌زدایی آزاد موسوم به عملیات شاس بوده است. متخصصین کشور در این زمینه تجربیات ذی‌قیمتی کسب کرده‌اند. در این بخش از راهنما با توجه به محدودیت فضا چکیده‌ای از این اقدامات ارائه می‌گردد. شکل (۶-۸) نمایی از پایین دست سد سفیدرود و شکل (۶-۹) نمایی از بالا دست سد سفیدرود را که انباشته از رسوب است نشان می‌دهد.



شکل ۶-۸- نمایی از پایین دست سد سفیدرود

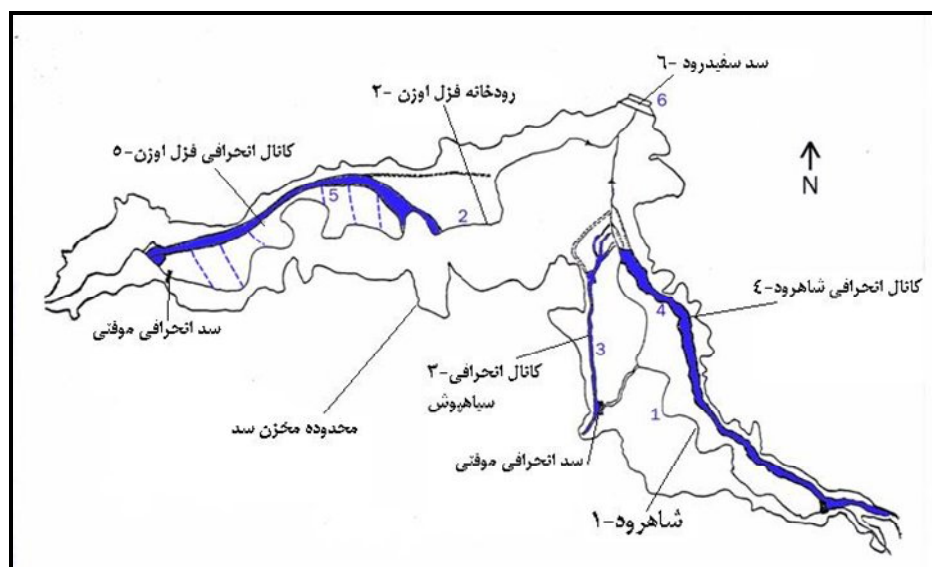


شکل ۶-۹- نمایی از بالادست سد سفیدرود که انباشته شده از رسوب

در ابتدا تنها رسوب‌زدایی آزاد اعمال شده است ولی در سال‌های بعد با اقدامات تکمیلی راندمان رسوب‌زدایی چندین برابر شده است. طلوعی (۱۳۶۸) اقدامات تکمیلی برای افزایش راندمان عملیات شاس در سد سفیدرود را که بر مبنای ملاحظات اقتصادی و اجرایی بودن انجام شده است را شامل انحراف رودخانه‌های کوچک وارده از حوزه میانی بر روی تراس رسوبی، حذف میاندرها در مسیر تالوگ‌ها در شاخه‌های قزل‌اوزن و شاهرود، پمپاژ آب در لایه‌های ماسه‌ای، ایجاد شوک هیدرولیکی با بستن موقت خط‌القعر و رها سازی موج هیدرولیکی، کاهش ارتفاع و تثبیت فرازبند و احداث تونل در تکیه‌گاه سمت راست در تراز بستر رودخانه به‌عنوان مجرای کمکی بر روی تراس رسوبی مخزن سفیدرود عنوان می‌کند. به‌طور کلی اقدامات تکمیلی عبارتند از:

- انحراف آب از رودخانه اصلی شاهرود در بالادست سد انحرافی
- ساخت بند انحرافی از مصالح محلی بر روی تالوگ اصلی و خشک شده شاهرود.
- ساخت کانال هدایت آب بر روی تراس رسوبی از بالا دست بند انحرافی

شکل (۶-۱۰) نمایی از این اقدامات را در مخزن سد نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۰- نمایی از اقدامات تکمیلی در مخزن سد به منظور افزایش راندمان رسوب‌زدایی [۲۹]

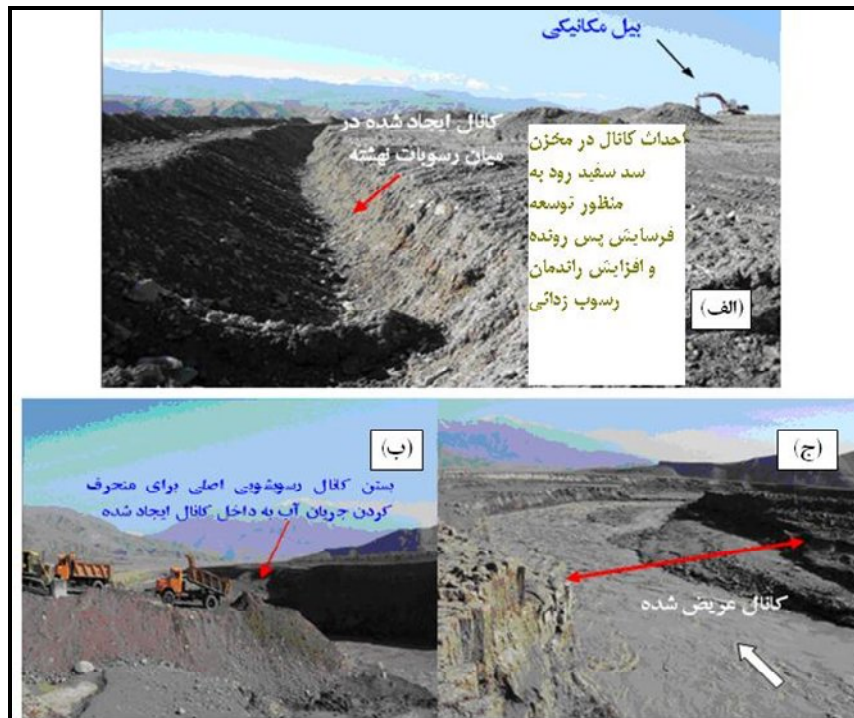
در سد سفیدرود بوسیله بیل مکانیکی در میان رسوبات نهشته شده، کانالی به عرض بستر ۲ تا ۳ متر در طول ۴ الی ۵ کیلومتر ایجاد می‌گردد. سپس با بستن کانال رسوب‌زدایی اصلی، آب آن به داخل کانال ایجادشده منحرف می‌گردد. مشاهدات نشان می‌دهد وقتی آب در داخل کانال ایجادشده جریان می‌یابد عرض کانال دوزنقه‌ای از ۲ تا ۳ متر به ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر افزایش می‌یابد. رسوبات در این کانال‌ها در ابتدا در اثر فرسایش عمومی و البته در ادامه در اثر فرسایش پس‌رونده کنده شده و به پایین‌دست منتقل می‌شوند. در نتیجه کانال به سرعت عمیق می‌شود که این مساله باعث ناپایداری دیواره‌ها و گسترش عرضی کانال نیز می‌گردد. شکل (۶-۱۱) تصویری از فرسایش پس‌رونده در یکی از کانال‌های حفر شده را نشان می‌دهد. شکل (۶-۱۲) تصویری از کانال‌های احداثی در مخزن سد سفیدرود را نشان می‌دهد. شکل (۶-۱۳) نیز تغییرات زمانی رسوب ورودی به سد و رسوب خروجی از سد را با انجام و بدون انجام عملیات رسوب‌زدایی نشان می‌دهد.

نتایج عملکرد مخزن سد سفیدرود طی ۴۰ سال بهره‌برداری بر اساس اجرای عملیات شاس (۱۳۴۲ لغایت ۱۳۸۴) به شرح زیر است:

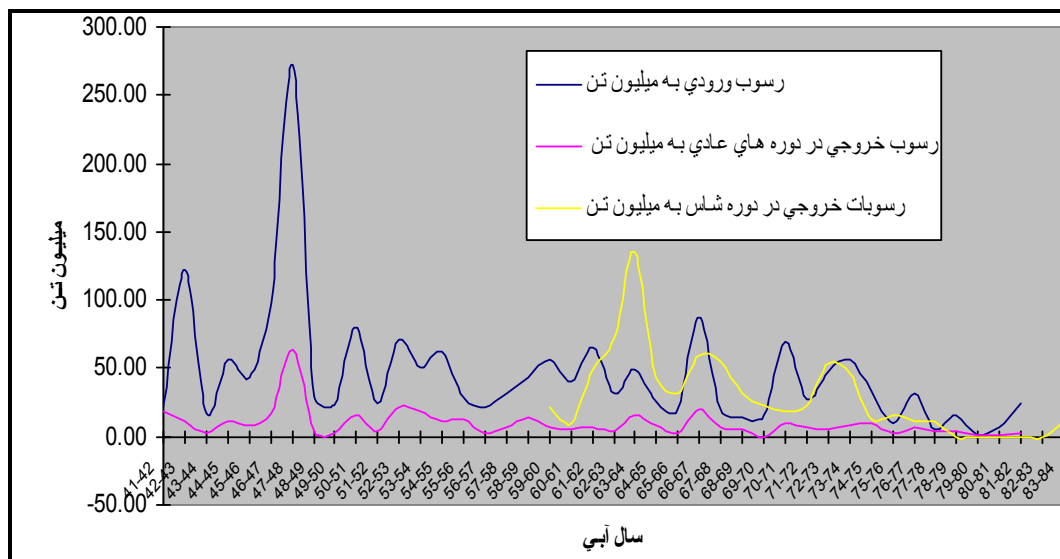
کل رسوبات ورودی طی ۴۰ سال بهره‌برداری	۱۸۷۰ میلیون تن
کل رسوبات خروجی طی ۴۰ سال بهره‌برداری	۱۱۳۰ میلیون تن
میزان رسوبات خروجی در دوره شاس	۷۲۳ میلیون تن
میزان رسوبات خروجی در صورت عدم شاس	۴۰۷ میلیون تن
حجم اولیه مخزن	۱۷۶۰ میلیون متر مکعب
حجم مخزن بدون انجام عملیات شاس	۵۰۰ میلیون متر مکعب
حجم مخزن در سال ۱۳۸۴	۱۱۱۲ میلیون متر مکعب



شکل ۶-۱۱- تصویری از فرسایش پس‌رونده در یکی از کانال‌های حفر شده در سد سفیدرود در حین عملیات رسوب‌زدایی [۳]



شکل ۶-۱۲ اقدامات تکمیلی رسوب‌زدایی سد سفیدرود: الف- کانال ایجاد شده در میان رسوبات نهشته شده با استفاده از بیل مکانیکی، ب- بستن کانال رسوب‌زدایی اصلی به منظور منحرف کردن جریان به داخل کانال ایجاد شده، ج- کانال عریض‌شده بعد از منحرف کردن جریان به داخل کانال ایجادشده در مخزن سفیدرود [۳].



شکل ۶-۱۳ تاثیر عملیات رسوب‌زدایی در سال‌های مختلف بر احیای حجم از دست رفته سد سفیدرود [۲۹]

با انجام اقدامات تکمیلی میزان رسوب خروجی از ۱۴ به ۴۴ میلیون تن در سال افزایش یافته است به‌طوری‌که میزان راندمان تله‌اندازی در طول ۷ سال عملیات شاس با اقدامات تکمیلی ۹۶٪- بوده است. در سد سفیدرود عملیات شاس در حدود ۱۵ روز طول می‌کشد و پس از باز شدن دریاچه‌ها حدود پنج روز طول می‌کشد که رسوبات کنده شده به دریاچه سد برسند و البته در این مدت حجم قابل ملاحظه‌ای آب هدر می‌رود. همچنین پایین آوردن سطح آب محدودیت‌هایی دارد از جمله می‌توان به:

الف- فرسایش بیش از حد دریچه‌ها بدلیل غلظت بالای رسوب همراه آب،

ب- امکان انسداد دریچه‌ها در خلال عملیات و

ج- افزایش بیش از حد غلظت رسوب در رودخانه پایین دست، اشاره کرد. متأسفانه در کنار بازیافت حجم قابل ملاحظه‌ای از مخزن سد، عملیات شاس در سد سفیدرود اثرات زیست محیطی مخربی داشته است که از جمله می‌توان به ترسیب رسوب در رودخانه پایین دست، ترسیب رسوب در کانال‌های آبیاری، ترسیب رسوب در دلتای سفیدرود، مرگ ماهیان و طوفان‌های شن ناشی از رسوبات بالادست سد در زمان تخلیه مخزن را نام برد. در این زمینه مطالعاتی برای کاهش اثرات زیست محیطی ضروری بنظر می‌رسد [۱۲۱].

۶-۱۱- سایر روش‌های رسوب‌زدایی

۶-۱۱-۱- رسوب‌زدایی با استفاده از سیفون^۱

استفاده از سیستم سیفون، از جمله روش‌های اقتصادی لایروبی مخازن سدهای کوچک و متوسط می‌باشد که امروزه در سطح گسترده‌ای استفاده می‌شود. یکی از اولین مخازنی که در آن از سیستم سیفون برای تخلیه رسوب استفاده شده است مخزن تیانجیان^۲ در کشور چین می‌باشد. این مخزن در سال ۱۹۶۰ با حجم ذخیره ۹/۴۲۵ میلیون مترمکعب ساخته شده است. در شانزده سال اول بهره‌برداری نزدیک به ۴/۰ میلیون مترمکعب رسوب ریزدانه در این سد ذخیره شده است. از سال ۱۹۷۵ به بعد سیستم سیفون شامل لوله غوطه‌ور به طول ۲۲۹ متر و قطر ۵۵۰ میلی‌متر همان‌طور که در شکل (۶-۱۴) نشان داده شده است تعبیه گردیده است. تنها در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۷ مقدار ۳۲۰۰۰ مترمکعب رسوب با این سیستم تخلیه شده است. میزان غلظت متوسط رسوب لایروبی تقریباً برابر ۱۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب آب بوده است. روش سیفون ممکن است به صورت روگذر یعنی لوله انتقال از روی سد عبور کند یا به صورت زیرگذر یعنی عبور از لوله از محل دریچه‌های تحتانی باشد. شکل (۶-۱۴) این روش‌ها را به صورت نمایش نشان می‌دهد. استفاده از سیفون برای مخازن کوچک‌تر از صد میلیون مترمکعب مناسب است [۱۰۳].

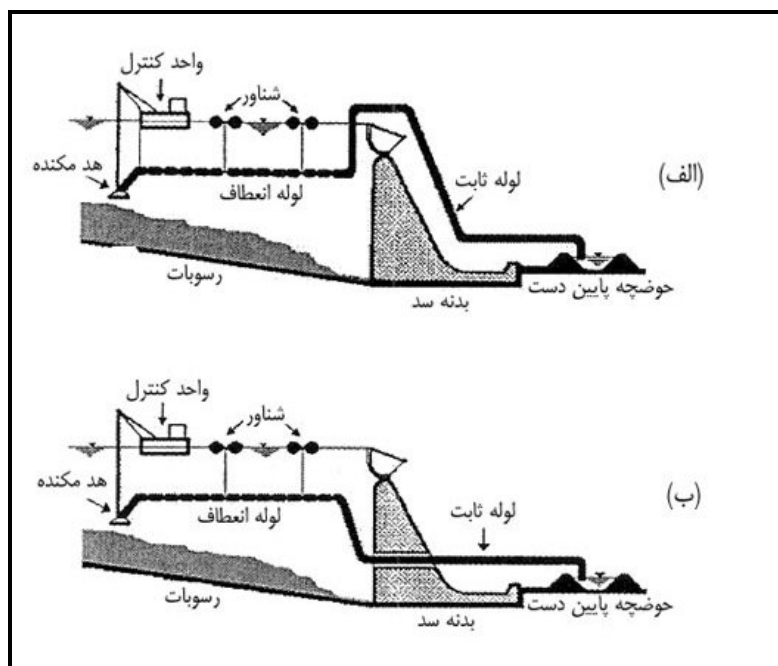
طرح لایروبی سیفونی در ایران و در سد انحرافی تاریک در سال ۱۳۵۱ آزمایش شده است که به دلیل نوع خصوصیات رسوبی نهشته شده و تحکیم این رسوبات و بار آبی نسبتاً کم نتیجه مطلوبی نداشته است [۲۹].

۶-۱۱-۲- رسوب‌زدایی با استفاده از تونل کنارگذر

از جمله روش‌هایی که در تعدادی از مخازن سدها استفاده شده است، قرار دادن دهانه تونل در محل ورودی رودخانه به مخزن و احداث آن تا پایین دست سد می‌باشد. بدین ترتیب در زمان‌های سیلابی که رودخانه بخش عمده‌ای از رسوبات را به همراه دارد، رسوب می‌تواند از این مجرا به پایین دست سد منتقل گردد. با این روش از تاثیر منفی عملیات رسوب‌زدایی در پایین دست جلوگیری می‌شود و تقریباً شرایط انتقال رسوب به شرایط قبل از احداث سد برمی‌گردد. البته موفقیت این سیستم بستگی به شرایط هیدرولیکی، هندسه مخزن، مسایل زیست محیطی، شرایط پایین دست و مسایل بهره‌برداری دارد. این سیستم در انتقال ذرات ریزدانه غیرچسبنده بسیار موثر می‌باشد. یکی دیگر از روش‌ها می‌تواند نصب لوله شکاف‌دار در بستر مخزن باشد. شکاف به صورت طولی بوده و رسوبات از این شکاف وارد لوله و نهایتاً به خارج هدایت می‌شوند.

1- Siphoning

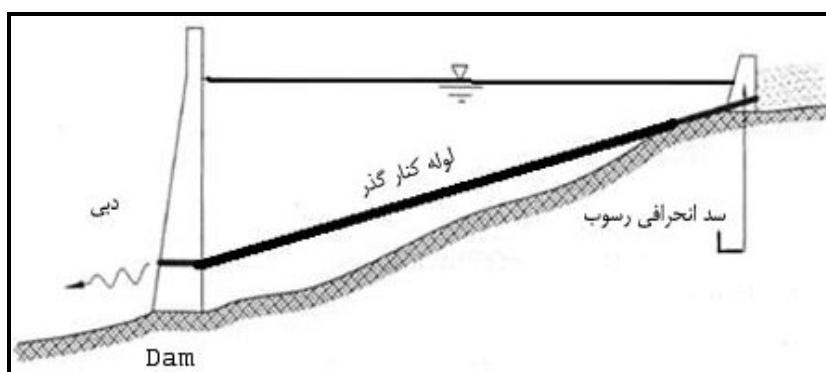
2- Tianjiawan



شکل ۶-۱۴- نمایش روش سیفون کردن الف- روگذر ب- زیر گذر

۶-۱۱-۳- احداث کنارگذر لوله‌ای^۱

کنار گذر لوله‌ای روش دیگری برای خروج رسوبات نهشته شده در داخل مخزن می‌باشد. در این روش رسوبات نهشته شده در مخازن بالا دست مخزن اصلی را می‌توان از طریق لوله‌ای که از میان درپچه‌های تحتانی سد به طرف پایین دست سد هدایت می‌شود، تخلیه نمود. در این روش لوله به صورت دائمی قرار می‌گیرد و استفاده از آن برای خروج مواد رسوبی (حداکثر به اندازه ماسه) به صورت ثقلی مناسب است. این روش در سد اسپنسر^۲ در رودخانه نیوبرارا^۳ استفاده شده است. برای راندمان بیش‌تر در این روش، لوله در قسمت مکش باید قابلیت جابه‌جا شدن را داشته باشد و ضمناً برای شرایطی که امکان ورود شن وجود داشته باشد، برای تامین سرعت جریان بیش‌تر نصب پمپ ضروری است. شکل (۶-۱۵) کنار گذر لوله‌ای را نشان می‌دهد.

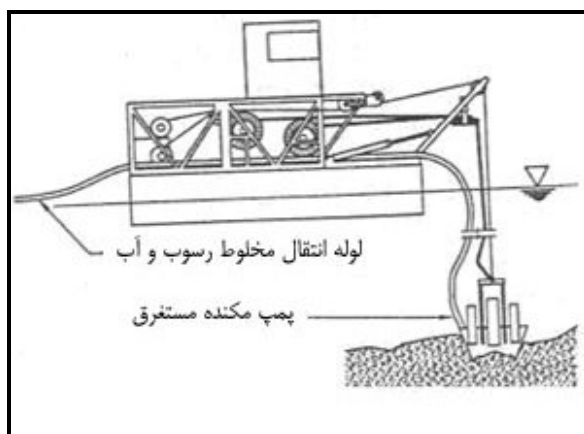


شکل ۶-۱۵- نمایش روش کنارگذر لوله‌ای [۱۰۳]

1- Bypass pipe
2- Spencer Dam
3- Niobrara River

۶-۱۱-۴- استفاده پمپ لایروبی^۱

یکی دیگر از روش‌های لایروبی استفاده از پمپ مستغرق است که توسط کابلی از بالا نگهداری می‌شود. از این روش در عمق ۲۰۰ متر مخزن لوزون^۲ کشور سوئیس با موفقیت برای خروج رسوبات نهشته شده در محل ورودی نیروگاه استفاده شده است. از مزایای این روش این است که رسوب کم‌تر با آب مخزن مخلوط می‌شود و نیازی هم به پایین آوردن سطح آب مخزن نیست. در این سیستم از پمپ‌های مخصوصی استفاده می‌شود تا با ایجاد گرداب مکنده نظیر آنچه که در گرداب‌ها دیده می‌شود، رسوب بستر را به سمت دهانه پمپ مکش می‌کند در نتیجه نیازی به تیغه برای کندن رسوب نمی‌باشد. این سیستم قادر است تا قطعات چوب و سنگ را نیز منتقل کند. البته از معایب این سیستم هزینه زیاد آن در مقایسه با رسوب‌زدایی هیدرولیکی می‌باشد. شکل (۶-۱۶) پمپ لایروبی را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۶- نمایش استفاده از پمپ لایروبی [۱۰۳]

۶-۱۱-۵- تخلیه بخشی از رسوب در زمان سیلاب

یکی از روش‌های کاهش رسوب‌زدایی رهاسازی بخشی از جریان سیلابی می‌باشد. در این شرایط با بازکردن دریچه‌های تحتانی و یا سرریز، بخشی از جریان خارج ولی از آن‌جا که میزان جریان ورودی بیش‌تر از جریان خروجی است حجم عمده‌ای از جریان در مخزن ذخیره می‌شود که به تدریج خارج خواهد شد. لذا نمی‌توان با این روش کل رسوب ورودی همراه سیل را خارج کرد. مقدار راندمان تله اندازی در چنین حالتی برابر خواهد بود با:

$$T_e = 1 - D_e \quad (۱۳-۶)$$

که در آن D_e به راندمان بده معروف است و مطابق مطالعات انجام شده در کشور چین، به نسبت بده خروجی Q_0 به بده ورودی Q_i سرعت سقوط ذرات رسوب ورودی، حجم مخزن و عرض مخزن بستگی دارد. برای مخازن متوسط رابطه زیر را ارائه داده‌اند.

$$D_e = \left(\frac{Q_0}{Q_i}\right)^{1.5} \quad (۱۴-۶)$$

1- Submerged dredge pump

2- Luzzone Reservoir

مطابق این رابطه در صورتی که بده خروجی پنجاه درصد بده ورودی باشد، میزان رسوب تخلیه شده تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. توجه شود که معمولاً روش عبور دهی رسوب همراه با سیل در مقایسه با روش رسوب‌زدایی هیدرولیکی دارای اثرات زیانبار کمتری است چرا که غلظت رسوب رها شده از سد تقریباً برابر غلظت رسوب ورودی است. به‌طور کلی مقدار رسوبات تخلیه‌شونده در این روش بستگی به بده، شیب، و مدت زمان سیلاب دارد [۹۵]. به‌طور کلی، روش عبوردهی رسوبات در زمان سیلاب زمانی موثر واقع می‌شود که پایین افتادن ارتفاع آب مخزن حدوداً نصف ارتفاع سد بوده و ظرفیت دریچه‌ها بیش‌تر از حداقل دو برابر متوسط جریان سالانه ورودی به سد باشد [۹۵].

۶-۱۱-۶- لایروبی مکانیکی

یکی دیگر از روش‌های رسوب‌زدایی مخزن سد، استفاده از روش لایروبی می‌باشد. البته این روش در مقایسه با روش رسوب‌زدایی هیدرولیکی هزینه بالایی دارد و لذا در شرایطی باید از آن استفاده شود که توجیه فنی و اقتصادی داشته باشد. از این روش می‌توان در بخش‌های مهمی از مخزن که امکان استفاده از سایر روش‌های رسوب‌زدایی نمی‌باشد نیز بهره گرفت. به‌طور کلی انتخاب روش لایروبی منوط به موارد ذیل می‌باشد:

- راندمان رسوب‌زدایی هیدرولیکی بسیار پایین باشد
- روش‌های کمکی دیگر برای افزایش راندمان رسوب‌زدایی نیز توجیه فنی و اقتصادی نداشته باشد (مثلاً در مخازن بزرگ با جریان سیلاب‌های بسیار بزرگ)
- تخلیه ناقص و یا کامل مخزن به دلیل تامین انرژی و یا نیازهای آبی پایین‌دست فراهم نباشد.
- استفاده از روش‌های جایگزین امکان‌پذیر یا توجیه فنی و اقتصادی نداشته باشد.

۶-۱۱-۶-۱ اقدامات قبل از عمل لایروبی مکانیکی

قبل از اقدام لایروبی مواد رسوبی ضروری است تا اقدامات زیر انجام گیرد:

- بررسی موقعیت و مقدار مواد رسوبی که باید تخلیه شوند.
- تعیین خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مواد رسوبی
- روش‌های تخلیه مصالح رسوبی
- تعیین محل تخلیه مواد رسوبی
- بررسی تاثیر اجتماعی و زیست‌محیطی مواد رسوبی

الف- موقعیت و میزان مواد رسوبی

موقعیت و میزان مواد رسوبی از مهم‌ترین متغیرهای تاثیرگذار برای برنامه‌ریزی عملیات لایروبی می‌باشد. در مخازن سدهای کوچک ممکن است بخش عمده‌ای از مخزن سد را بتوان با لایروبی تخلیه کرد ولی در مخازن سدهای بزرگ، به دلیل حجم زیاد مواد رسوبی تنها تخلیه درصد کمی از مصالح که در موقعیت‌های خاص بحرانی نهشته شده‌اند باید مد نظر قرار گیرد. به‌طور مثال ممکن است توسعه دلتای تشکیل شده در قسمت ورودی رودخانه به مخزن، مخاطراتی را به‌وجود آورده باشد که نیازمند تخلیه بخشی از مصالح آن باشد و تخلیه این مصالح با روش‌های رسوب‌زدایی که قبلاً توضیح داده شد ممکن نباشد و یا تجمع رسوب در نزدیکی‌های ورودی نیروگاه یا در محل اسکله‌های احداث شده برای تفریحات سالم مخاطراتی را در بر داشته باشد. پس از شناسایی

موقعیت رسوب، حجم مصالح رسوبی که باید تخلیه شوند باید برآورد شود. با به‌کاربردن نتایج آبنگاری مخزن و روش‌های محاسبه حجم رسوب که در قسمت‌های قبلی این راهنما ارائه شده می‌توان میزان رسوب نهشته شده را برآورد کرد. تعیین نرخ رسوب‌گذاری در چنین موقعیت‌هایی نیز می‌تواند کمک کند تا بر اساس آن بتواند دوره زمانی بین لایروبی‌ها را مشخص کرد. در صورتی که نرخ رسوب‌گذاری بالا و تقریباً برابر سرعت لایروبی باشد، در آن صورت نیاز به یک برنامه‌ریزی طولانی‌مدت می‌باشد.

ب- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوب

انتخاب روش لایروبی، تعیین نوع لایروب، انتخاب محل و حجم مکانی که باید مواد رسوبی تخلیه گردد بستگی به خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی دارد. بررسی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیازمند اطلاعاتی نظیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوب می‌باشد. برای تعیین خصوصیات رسوبی باید نمونه‌های رسوبی تا عمقی که باید لایروبی شوند برداشت گردند که نمونه‌برداری به روش‌های مختلفی که در قسمت بعد توضیح داده شده صورت می‌گیرد. خصوصیات رسوب نیز در آزمایشگاه تعیین می‌گردد. خصوصیات فیزیکی رسوب که باید تعیین شوند عبارتند از دانه‌بندی، وزن مخصوص، (ظاهری و حقیقی)، زاویه ایستایی، درصد رطوبت، حدود اتربرگ، و میزان فشردگی درجا مصالح رسوبی. مقدار فشردگی مصالح رسوبی ماسه‌ای را می‌توان بر اساس آزمایش SPT و به کمک جدول (۵-۶) تعیین کرد.

جدول ۵-۶- فشردگی تقریبی رسوب ماسه‌ای بر اساس آزمایش SPT

تعداد ضربه در فوت	میزان فشردگی تقریبی
۴-	خیلی شل
۴-۱۰	شل
۱۰-۳۰	متوسط
۳۰-۵۰	سفت
بیش‌تر از ۵۰	خیلی سفت

ج- روش‌های تخلیه رسوب

روش تخلیه رسوب بستگی به نوع روش لایروبی دارد. در صورت استفاده از روش‌های هیدرولیکی، مخلوط آب و رسوب را می‌توان به محل تخلیه پمپ و در آن‌جا با احداث استخرهایی با حجم مورد نیاز، آب آن را در اثر عمل زهکشی خارج کرد. در روش‌های مکانیکی معمولاً رسوبات لایروبی شده توسط بارج و یا لوله دهش پمپ لایروب به محل مورد نظر منتقل می‌شوند. به‌طور کلی روش‌های تخلیه رسوب عبارتند از تخلیه در فضای باز و یا تخلیه در فضاهای بسته.

د- محل تخلیه رسوب

موقعیت تخلیه رسوب نیز در درجه اول به موقعیت رسوب نهشته شده و روش لایروبی دارد. بدیهی است فاصله انتقال رسوبات نباید زیاد باشد چرا که این فاصله از مهم‌ترین متغیرهای فنی و اقتصادی عملیات لایروبی می‌باشد. دسترسی به مکان‌های تخلیه رسوب نیز باید از طریق خشکی فراهم باشد تا بتوان رسوبات جمع شده را به تدریج به مناطق دیگری منتقل کرد.

ه- تاثیر اجتماعی - اقتصادی مواد لایروبی‌شده

مواد رسوبی لایروبی شده از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌تواند آثار مثبت و منفی داشته باشند. با توجه به اهمیت مساله این موارد در بخش هفتم راهنما جداگانه ارایه شده است.

۶-۱۱-۲ انتخاب نوع لایروب

انتخاب لایروب به شرایط متعددی بستگی دارد که اهم آنها عبارتند از:

- خصوصیات فیزیکی رسوب
- مقدار رسوب که باید تخلیه شود
- عمق مواد رسوبی که باید لایروبی شوند
- فاصله موقعیت رسوب تا محل تخلیه
- میزان آلودگی رسوبات نهشته شده
- روش جمع‌آوری رسوبات تخلیه‌شده
- نوع لایروبی و تجهیزاتی که در اختیار می‌باشد.

به‌طور کلی لایروب‌های استفاده شده در مخازن سدها را می‌توان به دو دسته کلی لایروب‌های هیدرولیکی و لایروب‌های مکانیکی تقسیم کرد. لایروب‌های هیدرولیکی شامل پمپ سانتریفیوژ نصب‌شده بر روی لایروب به منظور مکش رسوبات و لوله‌های انتقال برای حمل رسوبات به محل مورد نظر می‌باشد.

بدیهی است پمپ نمی‌تواند مواد رسوبی جامد را مکش نماید، از این رو ضروری است که رسوبات قبل از مکش توسط ابزارهای مخصوص کنده و همراه با جریان آب به بیرون حمل شوند. نوع تجهیزات برای کندن رسوبات بستگی به میزان تراکم رسوبات نهشته شده دارد. بعضی از انواع لایروب‌های هیدرولیکی که بر اساس نوع مکنده آنها طبقه‌بندی می‌شود عبارتند از:

- لایروب مکنده تیغه‌ای^۱
- لایروب سطل‌دار^۲
- لایروب مکنده^۳
- لایروب مخزنی^۴
- لایروب خاکروبه‌ای^۵

نوع دیگر لایروب‌ها، لایروب‌های مکانیکی هستند. در این لایروب‌ها مواد رسوبی به صورت جامد از جا کنده شده و توسط تسمه نقاله به بیرون و یا در مخزن لایروب ذخیره می‌گردد. بعضی از انواع لایروب‌های مکانیکی عبارتند از:

- لایروب سطلی^۶
- لایروب بیل مکانیکی^۷
- لایروب قاشقی^۸

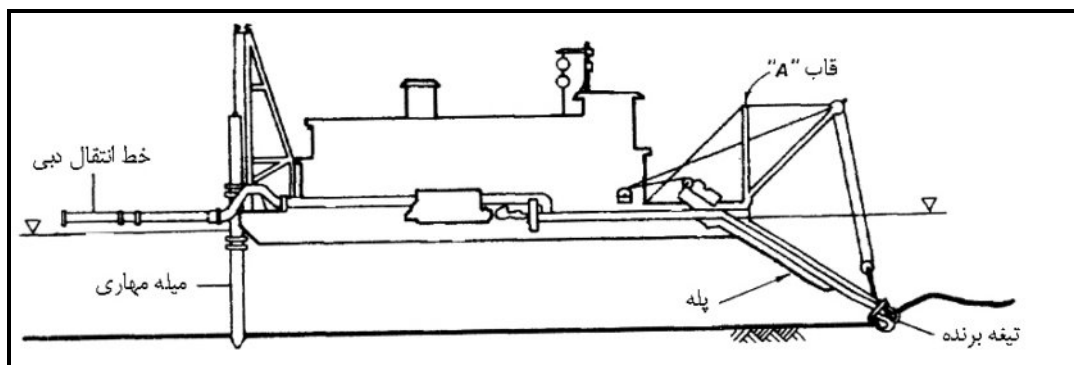
1- Cutter suction dredger
 2- Bucket wheel dredger
 3- Suction dredger
 4- Trailing suction Hopper dredger
 5- Dustpan dredger
 6- Bucket chain dredger
 7- Backhaul dredger
 8- Dipper dredger

– لایروب چنگک‌دار^۱

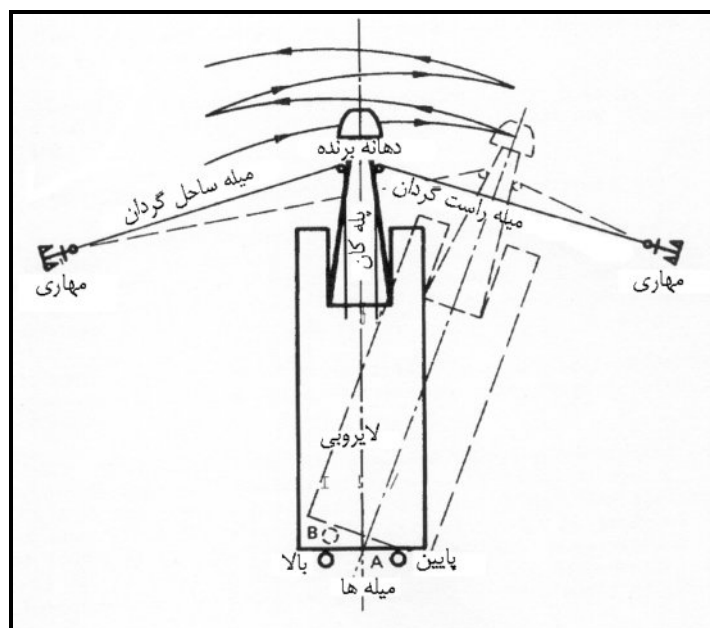
البته برای حمل مصالح رسوبی کنده‌شده معمولاً نیاز به بارج لجن‌کش نیز می‌باشد.

– لایروب مکنده تیغه‌ای

بیش‌ترین نوع لایروب که مورد استفاده قرار می‌گیرد لایروب مکنده هیدرولیکی است که دارای بالاترین راندمان می‌باشد. شکل (۶-۱۷) این نوع لایروب را نشان می‌دهد. شکل (۶-۱۸) نحوه کارکرد این لایروب را نشان می‌دهد.



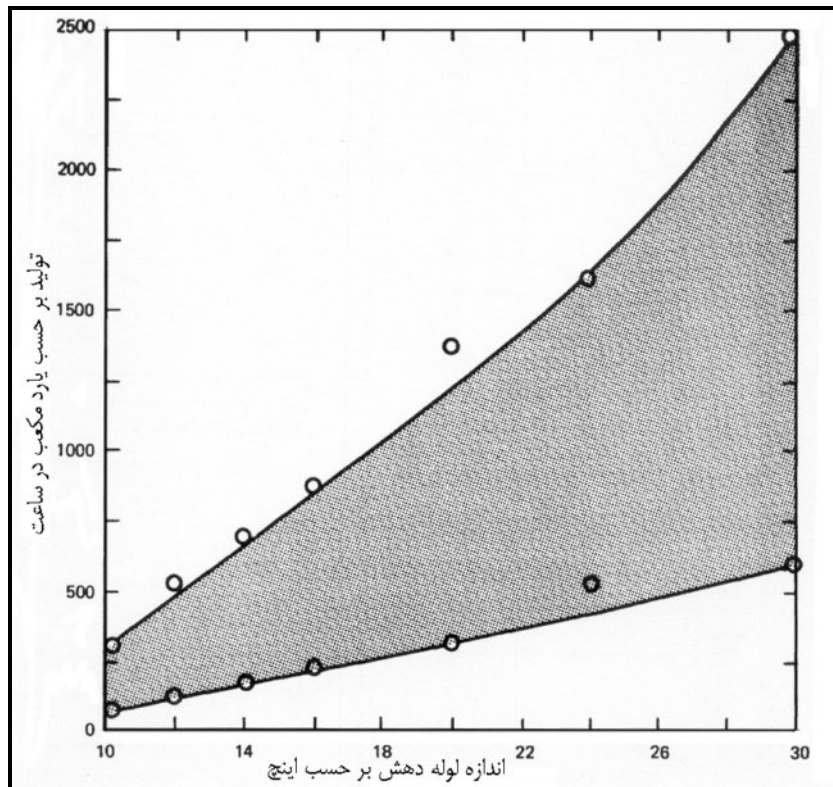
شکل ۶-۱۷- نمایش لایروب مکنده [۱۴۴]



شکل ۶-۱۸- دامنه عملکرد لایروب مکنده تیغه‌ای [۱۴۴]

تیغه دورانی آن قادر است که به‌طور موثر در رسوبات سفت (سخت) ماسه و رس را کنده و توسط لوله‌های طولانی آن به محل تخلیه که ممکن است چندین کیلومتر فاصله داشته باشد منتقل کند. غلظت مواد جامد در لوله انتقال معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی می‌باشد که بستگی به قدرت پمپ، مواد رسوبی و عمق رسوب دارد که در طراحی معمولاً ۱۳ درصد را در نظر می‌گیرند. سرعت مصالح در لوله بین ۱۵ تا ۲۰ فوت در ثانیه و قطر لوله‌های مورد استفاده بین ۸ تا ۳۰ اینچ می‌باشند. مقدار حجم مصالح لایروبی در

واحد زمان که به نرخ تولید معروف است در این لایروب‌ها متفاوت می‌باشد. شکل (۶-۱۹) به طور تقریبی نرخ تولید را به صورت تابعی از قطر لوله نشان می‌دهد. البته این شکل را برای طراحی اولیه می‌توان استفاده کرد چرا که نرخ واقعی تولید رسوب بستگی به اطلاعات دقیقی از مشخصات لایروب و رسوب و فاصله محل لایروب تا تخلیه دارد.



شکل ۶-۱۹- تغییرات حجم لایروبی تابعی از قطر لوله مکش [۱۴۴]

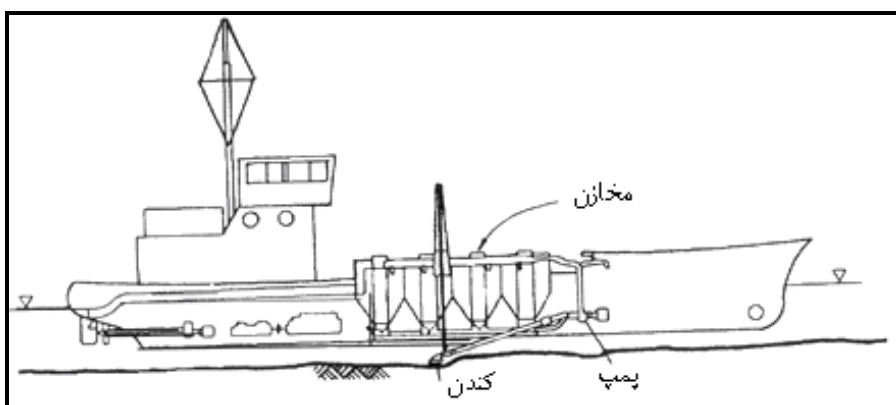
از مزایای مهم لایروب تیغه‌ای این است که برای لایروبی مکان‌هایی که جدیداً باید لایروبی شوند مورد کاربرد دارد. این نوع لایروب قادر است انواع مصالح رسوبی حتی سنگ‌های رسوبی را لایروبی نماید و این مصالح را به فواصل نسبتاً طولانی منتقل کند. عمل لایروبی در این نوع لایروب تقریباً ممتد می‌باشد که در نتیجه راندمان لایروبی را بالا می‌برد. محدودیت این نوع لایروب، تعمیر و نگهداری آن به خصوص تیغه آن در محل‌هایی است که امواج سطحی زیادی دارند. بعضی از انواع لایروب‌های تیغه‌ای خودکشی نیستند و از این رو برای انتقال به محل‌های لایروبی نیاز به یدک کش می‌باشد. در رودخانه‌ها و زمانی که جریان آب نسبتاً تند باشد عملیات لایروبی را نمی‌توان در جهت بالادست ادامه داد چرا که بخش عمده‌ای از مواد کنده‌شده توسط تیغه در اثر جریان آب حمل و به پایین دست و یا محل‌هایی که قبلاً لایروبی شده‌اند منتقل می‌گردد. لوله انتقال نیز ممکن است برای رودخانه‌هایی که در آن کشتیرانی می‌شود مشکلاتی را ایجاد کند.

۶-۱۱-۳- لایروب مخزنی

این لایروب خودکششی دارای طول ۴۰ تا ۴۶ متر (۱۳۰ تا ۱۵۰ فوت) می‌باشد. این کشتی‌ها دارای سیستم مکنده رسوب، لوله انتقال و مخزن نگهدارنده رسوب می‌باشد. این نوع لایروب‌ها، هم در اقیانوس و هم در رودخانه‌ها قابل استفاده هستند. لایروب‌های مخزن‌دار بر حسب ظرفیت مخزن نگهدارنده رسوب به صورت زیر تقسیم می‌شوند.

- لایروب‌های بزرگ با ظرفیت ۴۵۸۷ مترمکعب (۶۰۰۰ یارد مکعب) یا بزرگ‌تر
- لایروب‌های متوسط با ظرفیت ۱۵۲۹ تا ۴۵۸۷ متر مکعب (۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ یارد مکعب)
- لایروب‌های کوچک با ظرفیت ۳۸۲ تا ۱۵۲۹ متر مکعب (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ یارد مکعب)

سرعت زمینی این لایروب در زمان لایروبی ۳/۲ تا ۴/۸ کیلومتر در ساعت (۲ تا ۳ مایل در ساعت) می‌باشد و قادر است از عمق‌های ۳ تا ۲۴ متری (ده فوت تا ۸۰ فوت) لایروبی کند. عملیات لایروبی در صورتی که مخزن این لایروب پر شود متوقف و لایروب به محلی که باید تخلیه کند حرکت می‌کند. تخلیه مواد رسوبی مجدداً توسط پمپ صورت می‌گیرد. شکل (۶-۲۰) نوع لایروب مخزن‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۰- نمایش لایروب مخزن‌دار [۱۴۴]

مزایای این نوع لایروب عبارت است از:

- تنها نوع لایروب است که می‌تواند به صورت موثر، ایمن و اقتصادی در مجاری باز و متلاطم کار کند.
- با نیروی خود به هر موقعیتی می‌تواند حرکت کند.
- در حین کار مانع حرکت سایر کشتی‌ها یا قایق‌ها نمی‌باشد.
- در حین لایروبی مسیر عمیقی را ایجاد می‌کند.
- در صورتی که فاصله محل رسوب تا محل تخلیه طولانی باشد که توسط لوله نتوان انتقال داد، این نوع لایروب بی‌شک اقتصادی‌ترین خواهد بود.
- البته خاک‌های ماسه‌ای و یا رس متراکم را نمی‌توان با این لایروب تخلیه کرد. ضمن این که در صورتی که فاصله محل تخلیه تا محل لایروب زیاد باشد، عملیات لایروبی متوالی ادامه نمی‌یابد و منقطع خواهد بود.

۶-۱۱-۴ کاربرد روش لایروبی در جهان

طلوعی (۱۳۶۸) [۲۸] در رابطه با کاربرد روش لایروبی در دنیا، مواردی را ذکر کرده است. در کشور الجزایر به منظور احیای ظرفیت مخازن کوچک از نوع لایروب مکنده تیغه‌دار با راندمان اسمی ۱:۵ (۵ متر مکعب آب برای لایروبی یک متر مکعب رسوب) و ظرفیت لایروبی ۲۴۰ هزار متر مکعب در ماه استفاده می‌شود. در صورت انسداد لوله‌های انتقال راندمان این لایروب به ۱:۹ کاهش می‌یابد. در ژاپن عملیات لایروبی به منظور کاربرد رسوبات به عنوان مصالح ساختمانی در بعضی از مخازن سدها استفاده شده است. در کشور سوئیس نیز تخلیه رسوبات ریزدانه تجمع‌یافته در محدوده دریاچه‌های آبگیر مخزن پلاک ندرا توسط عملیات لایروبی انجام و رسوبات توسط خط لوله و از روی سد به پایین‌دست منتقل گردید. در سد سفیدرود نیز مطالعات تخلیه رسوب با روش لایروبی توسط گروه مشاورین مجارستانی انجام گرفت. مطابق این مطالعات در صورت استفاده از دوازده واحد لایروب و ظرفیت ۷۰ میلیون تن در سال، در مدت ده سال بخش مهمی از حجم تخلیه می‌گردید که البته این روش بعداً توسط کارشناسان ایرانی به دلیل اقتصادی و توجیه فنی رد گردید. استفاده از سیستم لایروبی در سد دز با توجه به حجم زیاد رسوبات نهشته شده و هزینه‌بر بودن این روش توصیه نمی‌شود و ضروری است تا از روش‌های دیگر استفاده گردد.

۶-۱۱-۷ تخلیه رسوب ریزدانه با جریان‌های چگال

۶-۱۱-۷-۱ کلیات

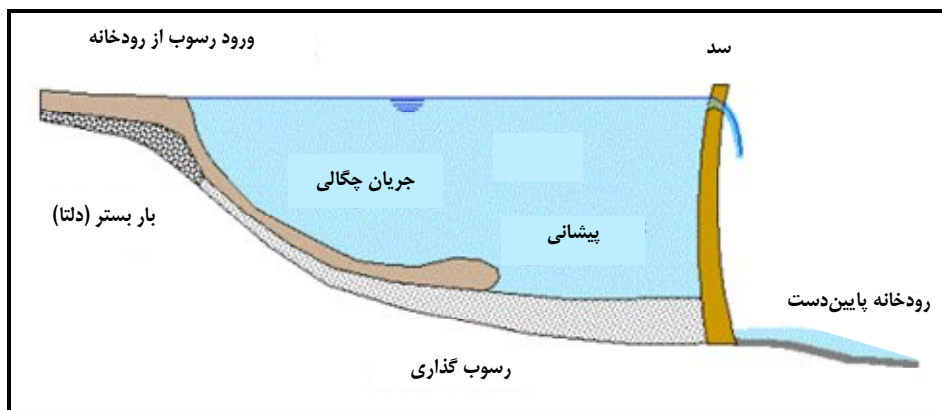
در فصول سیلابی که با بارش شدید باران در حوضه‌های بالادست سد توأم است حوضه آبخیز دارای سطح خشک و پوشش گیاهی اندکی است و به همین دلیل حجم بسیار زیادی از رسوبات حوضه به صورت معلق همراه با رواناب ناشی از بارندگی وارد رودخانه می‌شود. جریان ورودی به مخزن دارای غلظت بالایی از مواد رسوبی بوده و با کاهش سرعت در مخزن سد، مواد معلق در کف مخزن به شکل جریان گلی به سمت بدنه سد جریان می‌یابد که به آن جریان غلیظ می‌گویند. این جریان حتی می‌تواند تا ۱۰۰ کیلومتر طول دریاچه سد را طی کند. شکل (۶-۲۱) این پدیده را نشان می‌دهد.

در مخازن عمیق و با شیب طولی زیاد، جریان غلیظ اهمیت بیش‌تری دارد. در این مخازن، دریاچه‌های تخلیه تحتانی تحت فشار بالایی قرار داشته و با سرعت زیادی می‌توانند رسوبات را منتقل کنند. شیب تند مخزن نیز باعث سرعت زیاد رسوبات می‌شود.

جریان غلیظ در مخازن مختلف در بده‌های متفاوتی اتفاق می‌افتد. شیب کف مخزن، طول دریاچه سد، دانه‌بندی رسوبات ورودی و درصد مقدار رس موجود در آن از مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر آستانه تشکیل و غلظت جریانات غلیظ می‌باشند. هر چه شیب کف مخزن تندتر و درصد مقدار رس موجود در دانه‌بندی رسوبات معلق بیش‌تر باشد اهمیت و میزان جریان غلیظ بیش‌تر است.

جریان غلیظ به گونه‌ای از جریانات ثقیلی یا چگال گفته می‌شود که افزایش چگالی آنها نسبت به سیال پیرامون، ناشی از غلظت رسوبات معلق می‌باشد. جریانات چگال، گونه‌ای از جریانات لایه‌ای هستند که مکانیسم حرکت و انتقال آنها تحت تاثیر اختلاف نسبتاً اندک در چگالی یا واحد وزن دو سیال قرار می‌گیرد. معمولاً جریان رودخانه به عنوان یک جریان چگال تلقی نمی‌شود چرا که چگالی آب چندین هزار برابر بیش‌تر از چگالی هواست اما جریان هوای سرد در پایین هوای گرم یک جریان ثقیلی یا چگال می‌باشد. وجود یکی از عوامل زیر به عنوان عامل اختلاف چگالی ذکر شده است که موارد اول و دوم را جریان دانسیته یا چگال و مورد سوم را جریان تیره یا غلیظ می‌نامند:

- اختلاف دمای دو سیال
- اختلاف در غلظت مواد محلول
- اختلاف در غلظت مواد معلق



شکل ۶-۲۱- چگونگی تشکیل جریان غلیظ و حرکت آن به درون مخزن

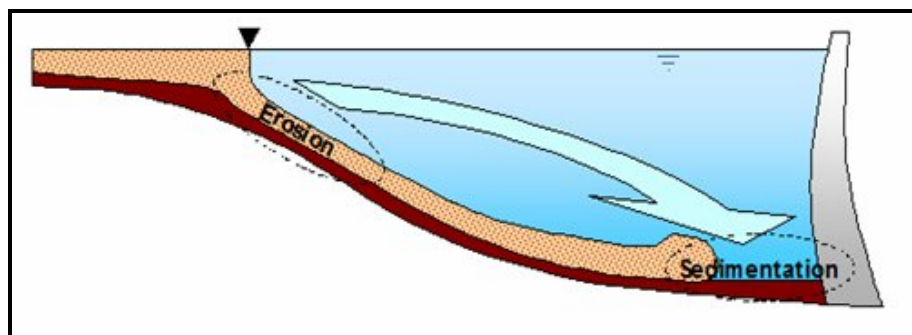
جریان‌ات غلیظ با توجه به میزان بزرگی چگالی رسوبات معلق ورودی (به ویژه در هنگام سیلاب) نسبت به آب زلال مخزن، به صورت توده‌ای از جریان گل در کف مخزن به سمت بدنه سد حرکت خواهد کرد. این توده گلی در نقطه تلاقی جریان رودخانه به مخزن (نقطه غوطه‌وری) به درون مخزن کشیده می‌شود. محل نقطه غوطه‌وری در نزدیک دلتا می‌باشد و این محدوده را می‌توان با بازدیدهای میدانی در هنگام سیلاب مشاهده کرد. در محل نقطه غوطه‌وری جریان غلیظ به دلیل آشفتگی سرعت و همچنین بالا بودن غلظت، بخشی از رسوبات کف مخزن را نیز به همراه خود منتقل و به درون مخزن سد هدایت می‌کند. در انتهای مخزن، انرژی جریان غلیظ مستهلک شده و در برخورد با بدنه سد، حجم زیادی از رسوبات نهشته می‌شوند. این پدیده در شکل (۶-۲۲) نشان داده شده است. بنابراین اگر چگونگی تشکیل جریان غلیظ، زمان تشکیل آن، حجم و غلظت آن و نیز سرعت حرکت و روندیابی آن در مخزن یک سد را بتوان پیش‌بینی کرد، در آن صورت می‌توان از این اطلاعات برای مدیریت رسوب مخزن و انتقال جریان غلیظ از دریچه‌های تحتانی به پایین دست سد به نحو مناسبی استفاده کرد. بدین ترتیب بخش مهمی از رسوب ریزدانه در زمان‌های سیلابی به خارج مخزن هدایت خواهد شد.

مشاهدات و اندازه‌گیری‌های جریان غلیظ در شرایط طبیعی نشان داده است که این جریان‌ها دارای غلظتی حدود ۰/۰۱ درصد تا ۹ درصد وزنی و ارتفاعی از چند سانتی‌متر تا ۳۰ متر می‌باشند. در ضمن سرعت‌های تا ۳ کیلومتر در ساعت برای جریان‌های غلیظی که عمق مسافتی بیش از ۱۰۰ کیلومتر را طی می‌کنند اندازه‌گیری شده است.

این روش برای مخازن بزرگ که دارای ظرفیت ذخیره چندین ساله می‌باشند و همچنین پایین آوردن رقوم سطح آب در آنها صورت نمی‌گیرد، روش مناسبی برای رسوب‌زدایی می‌باشد. از آنجایی که در مدت زمان تخلیه جریان غلیظ ممکن است آبگیری نیز صورت گیرد، این روش بیش‌تر در مناطق خشک که کمبود آب وجود دارد به طور گسترده نیز می‌تواند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بهترین زمان برای عبوردهی جریان غلیظ، زمانی است که جریان به بدنه سد رسیده باشد. چن و ژائو فرآیند عبوردهی جریان غلیظ سد نانگین واقع در کشور چین را مورد بررسی قرار دادند. آنها اظهار داشتند که زمان دقیق باز و بسته کردن دریچه‌ها بسیار مهم می‌باشد، زیرا که هر یک از دو عامل تأخیر در باز کردن دریچه‌ها (حتی اگر خیلی ناچیز باشد) و ناکافی بودن مقدار بازشدگی

آنها، منجر به تخلیه مقدار بسیار کمی از رسوبات خواهد شد. همچنین اگر دریچه‌ها خیلی زودتر از زمان مناسب باز شوند و یا این‌که مقدار بازشدگی آنها خیلی زیاد باشد، در آن صورت آب ذخیره شده که در مناطق خشک دارای ارزش زیادی است از دست خواهد رفت.

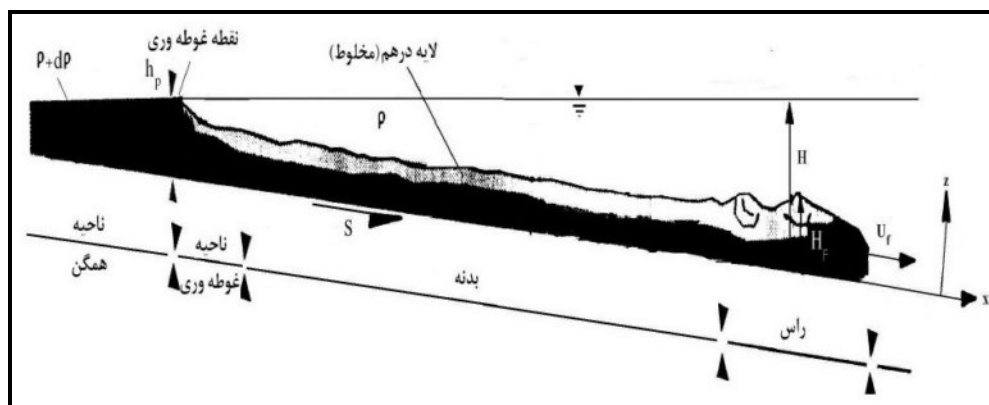


شکل ۶-۲۲- نمایش مناطق فرسایشی و رسوب‌گذاری در پدیده جریان غلیظ

۶-۱۱-۷-۲- مشخصات جریان غلیظ

همانگونه که در شکل (۶-۲۳) نشان داده شده است، توده جریان غلیظ که روی بستر مخزن جریان می‌یابد دارای چهار منطقه می‌باشد:

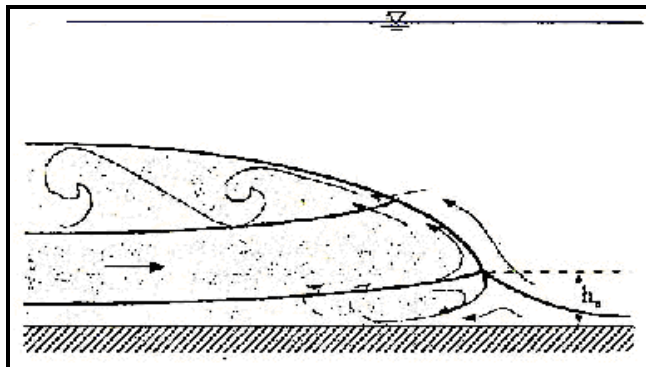
- منطقه اول، قسمت ورودی جریان با چگالی یکسان نامیده شده که منطقه قبل از تداخل با آب مخزن می‌باشد.
- منطقه دوم ناحیه غوطه‌وری است. در این نقطه از جریان، اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب درون مخزن به تعادل رسیده و جریان غلیظ در یکی از حالت‌های سه‌گانه (روگذر، میان‌گذر و زیرگذر) به حرکت خود ادامه می‌دهد.
- منطقه سوم، بدنه جریان می‌باشد که به فاصله بین نقطه غوطه‌وری و راس جریان اطلاق می‌گردد.
- منطقه چهارم، مهم‌ترین قسمت جریان غلیظ است که راس جریان غلیظ نامیده شده.



شکل ۶-۲۳- نمایش اجزاء جریان غلیظ زیرگذر

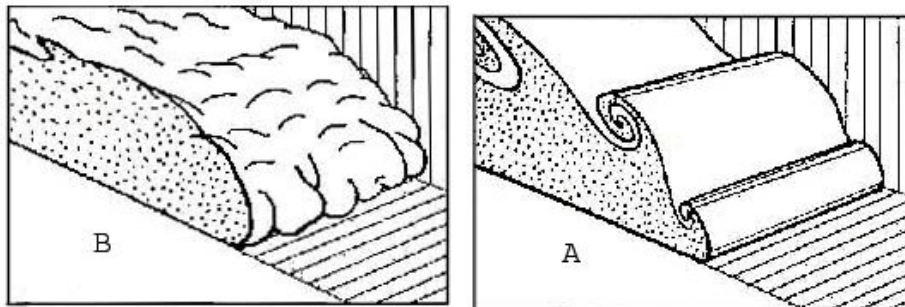
جریان غلیظ توسط راس خود در درون مایع ساکن جریان می‌یابد. راس جریان دارای خصوصیات ویژه‌ای است که آن را از سایر قسمت‌های جریان تفکیک می‌نماید. مدل نمودن مکانیسم انتقال رسوبات در راس جریان‌ات غلیظ کار بسیار پیچیده‌ای است

که این مساله به دلیل وجود جریان‌ات ثانویه در راس می‌باشد. در شکل (۶-۲۴) شماتیک الگوی حرکت جریان در راس نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۴ الگوی حرکت جریان‌ات در راس پدیده جریان غلیظ

هرچند که سرعت متوسط راس جریان نسبت به بدنه، به دلیل بیش‌تر بودن ارتفاع آن، کم‌تر می‌باشد اما وجود جریان‌های گردابی در راس جریان قدرت حمل رسوب این قسمت را افزایش می‌دهد. جریان‌های گردابی یا اغتشاش ایجاد شده در راس جریان غلیظ به میزان غلظت رسوبات معلق بستگی دارد. در شکل (۶-۲۵) در قسمت A موج‌های واقع در سیال سنگین‌تر و شکل B الگویی از خفرات، بریدگی‌ها و آشفستگی‌های به وجود آمده در اثر تماس با کف را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۵ انواع اغتشاش در راس جریان (A: حالت خیزآب، B: حالت آشفته)

۶-۱۱-۳ راندمان تخلیه رسوب با استفاده از جریان غلیظ

میزان انتقال رسوب بستگی به ظرفیت انتقال جریان‌های چگال دارد که این ظرفیت انتقال، خود تابعی از شیب بستر می‌باشد. مقدار شیب مخازن سدها در سال‌های اولیه بهره‌برداری معادل شیب طولی رودخانه می‌باشد ولی بتدریج با نهشته شدن رسوبات شیب طولی نیز کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت انتقال جریان‌های غلیظ کاهش می‌یابد. تجربیات بین‌المللی در این زمینه نشان می‌دهد که جریان‌های چگال در مخازنی که شیب طولی آنها کم‌تر از ۰/۰۰۰۲ می‌باشد تشکیل نمی‌گردد.

مشخصه‌های تخلیه‌کننده‌های عمقی از نظر رقوم آستانه ورودی و ظرفیت تخلیه، از جمله عوامل مهم دیگر در حرکت جریان‌های چگال می‌باشد. بدیهی است که هر اندازه رقوم آستانه ورودی تخلیه‌کننده‌های عمیق از بستر طبیعی رودخانه بالاتر انتخاب شود، به همان میزان شیب طولی مخزن کاهش می‌یابد و در نتیجه موجب کاهش انرژی جریان‌های چگال و عدم تعادل شرایط مرزی آن می‌گردد. این مساله علاوه بر کاهش میزان تخلیه رسوبات موجب می‌شود که مرز فوقانی جریان غلیظ شکسته شده و رسوبات معلق

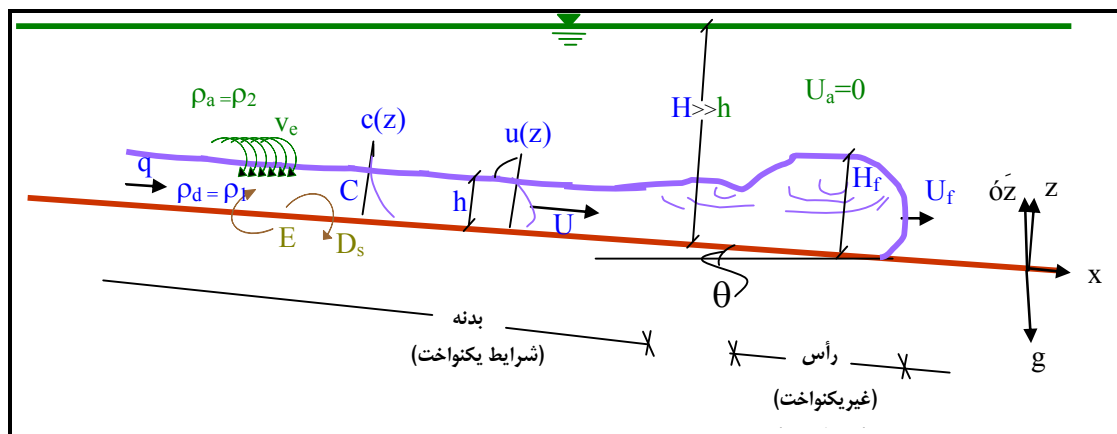
در حوالی سد وارد آبگیرهای نیروگاه شود که خود با خساراتی همراه می‌باشد. بنابراین تا آن‌جا که به حفظ ظرفیت مخزن و احیای آن مربوط می‌شود، رقوم آستانه ورودی دریاچه‌های عمقی باید نزدیک به بستر طبیعی رودخانه تثبیت گردد.

کانالیزه کردن جریان غلیظ، سرعت آن را افزایش می‌دهد و این جریان می‌تواند سریع‌تر به انتهای مخزن برسد. کانالیزه کردن را می‌توان به صورت مصنوعی با ایجاد کانالی در قسمت میانی و عمیق مخزن به‌وجود آورد و یا می‌توان از مسیر اصلی رودخانه و یا قسمتی که در اثر شستشوی سیلاب در بستر (در مواقع پایین‌بودن آب) به‌وجود آمده استفاده کرد. وقتی جریان غلیظ از مسیر کانالیزه به انتها برسد، آن وقت می‌توان این جریان پر از ذرات لای و رس را از دریاچه‌های تحتانی و یا بوسیله سیفون از راه‌های خروجی تخلیه کرد. بدین ترتیب درصد بالایی از ذرات معلق قبل از این‌که رسوب کنند از مخزن سد خارج خواهند شد.

راندمان تخلیه جریان غلیظ از مخازن سدها بین ۲۳ تا ۶۵ درصد متغیر است. همچنین مطالعات انجام شده در کشور چین نشان می‌دهد که بده جریان غلیظ بیش‌تر از نصف بده ورودی است و میزان رسوب حمل شده توسط جریان غلیظ تقریباً یک چهارم رسوب ورودی می‌باشد، چرا که بقیه رسوبات در ابتدا و در نقطه غوطه‌وری ترسیب می‌شوند و فقط ذرات بسیار ریزدانه به صورت جریان غلیظ به پایین‌دست منتقل می‌شوند. راندمان خروج جریان غلیظ بستگی به مشخصات مخزن دارد. مطالعات انجام شده در کشور چین نشان می‌دهد که وقتی طول مخزن از ده کیلومتر بیش‌تر می‌شود، مقدار راندمان خروج رسوب از طریق جریان غلیظ به ۲۵ درصد می‌رسد.

۶-۱۱-۷-۴ معادلات حاکم

شکل شماره (۶-۲۶) شماتیک یک جریان غلیظ دوبعدی را که با جرم $\rho_d = \rho_1$ و با سرعت متوسط U در جهت x روی یک سطح شیب‌دار، از زیر یک توده‌ی سیال ساکن عمیق‌تر با جرم $\rho_a = \rho_2$ حرکت می‌کند نشان می‌دهد. چنین جریانی باید تلاطم کافی جهت حمل رسوبات معلق غیرچسبنده را داشته باشد. نیروی ثقل از اختلاط جریان غلیظ با لایه‌های عمیق جلوگیری کرده و جریان غلیظ در امتداد شیب حرکت می‌کند. در جریان‌های غلیظ، چهار ناحیه قابل تشخیص است: نقطه‌ی غوطه‌وری، ناحیه‌ی غوطه‌وری، راس و بدنه.



شکل ۶-۲۶ نمایش متغیرهای روابط جریان غلیظ

جرم متوسط جریان غلیظ با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\rho_t = C_s \rho_s + (1 - C_s) \rho_a = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) C_s \quad (۱۵-۶)$$

C_s : غلظت متوسط ارتفاعی رسوبات غیرچسبنده

ρ_a : جرم سیال پیرامون

ρ_s : جرم رسوبات غیرچسبنده

ρ_t : جرم متوسط جریان غلیظ

متغیر کاربردی مهم در جریان غلیظ، عدد فرود جرمی می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (۱۶-۶)$$

شکل دیگری از عدد فرود جرمی در جریان‌های غلیظ بیش‌تر استفاده می‌شود که به عدد ریچاردسون معروف است:

$$\frac{1}{Fr_D^2} = \frac{g'h \cos \theta}{U^2} = Ri \quad (۱۷-۶)$$

هم‌چنین عدد بی‌بعد دیگری نیز بنام عدد ریچاردسون موضعی استفاده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود.

(Turner , 1973):

$$Ri_z = -g \frac{\partial \rho}{\partial z} / \rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (۱۸-۶)$$

که در اینجا $\partial \rho \equiv d\rho$ اختلاف جرم در طرفین dz می‌باشد. هم‌چنین حرکت جریان غلیظ باعث کشش و حمل مایع تمیز پیرامون خود می‌شود که توسط پارامتر حمل E_w بیان می‌گردد و خود تابعی از عدد ریچاردسون می‌باشد یعنی:

$$E_w = f(Ri) \quad (۱۹-۶)$$

جریان رسوب موثر در واحد عرض نیز به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$B = g'hU = gR(C_s Uh) = g'q \quad (۲۰-۶)$$

حال با انتگرال‌گیری از رابطه بالا جریان غلیظ یکنواخت و غیریکنواخت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

جریان غلیظ یکنواخت:

$$\frac{dB}{dx} = 0 \quad (۲۱-۶)$$

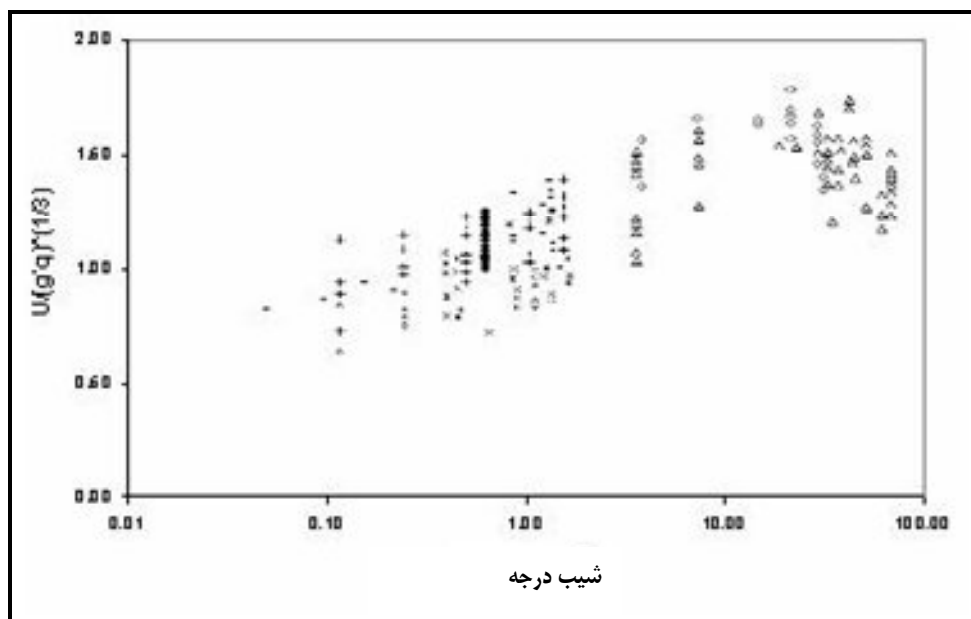
جریان غلیظ غیر یکنواخت:

$$\frac{dB}{dx} \neq 0 \quad (۲۲-۶)$$

جریان‌های غلیظ اغلب جریان‌های یکنواخت می‌باشند. در جریان‌های غلیظ باید تلاطم کافی جهت نگهداری ذرات به حالت معلق وجود داشته باشد، به همین دلیل اینگونه جریان‌ها، جریان‌های متلاطم می‌باشند. جریان غلیظ دارای یک پیشانی در داخل سیال پیرامون می‌باشد و در ادامه آن بدنه جریان قرار دارد. جریان در پیشانی غیریکنواخت بوده و نیروی محرک آن گرادیان فشار ناشی از اختلاف دانسیته بین پیشانی و سیال پیرامون می‌باشد. اما جریان در بدنه معمولاً یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرک بدنه، نیروی ثقل موثر بر سیال سنگین‌تر می‌باشد.

سرعت پیشانی جریان غلیظ تابعی از شدت جریان مستغرق اولیه و شیب بستر می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد: مشاهدات آلتیناکار و همکاران و مقایسه آن با مشاهدات دیگر محققین در شکل شماره (۲۷-۶) نشان داده شده است.

$$U_f = f(S) \times (g'q)^{1/3} \Rightarrow U_f / (g'q)^{1/3} = f(S) \quad (۲۳-۶)$$



شکل ۶-۲۷- سرعت بی‌بعد پیشانی جریان به صورت تابعی از شیب [۴]

– سرعت پیشانی چگال

روابط متعددی برای محاسبه سرعت پیشانی جریان چگال به‌وجود آمده است که عمده این روابط به صورت رابطه شزی در کانال‌های باز می‌باشد:

$$V = c\sqrt{g'h} \quad (۶-۲۴)$$

که در آن V سرعت پیشانی جریان چگال $g' = g(G_s - 1)$ ، G_s چگالی ذرات رسوبی است. h نیز ارتفاع پیشانی جریان چگال می‌باشد. ضریب C نیز توسط محققین مختلف بر اساس داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده است که مقدار آن بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۵ می‌باشد.

– عمق آب در نقطه غوطه‌وری

مقدار عمق آب در محل نقطه غوطه‌وری را می‌توان از روی عدد جرمی فرود که به صورت زیر تعریف می‌شود تشخیص داد:

$$F_p = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}gh}} \quad (۶-۲۵)$$

و یا:

$$h = \left(\frac{Q}{F_p B}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}g\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (۶-۲۶)$$

که در آن Q بده جریان، B عرض پایین مقطع عرضی، $\Delta\rho$ اختلاف دانسیته ذره رسوبی و آب، ρ دانسیته آب و g شتاب ثقل می‌باشد. F_p عدد جرمی فرود می‌باشد که مقدار آن در محل نقطه غوطه‌وری در جدول (۶-۶) ارائه شده است.

جدول ۶-۶- مقادیر عدد فرود جرمی (F_p) در محل نقطه غوطه‌وری

محقق	نوع مطالعه	F_p
Bu et al (1980)	مخزن لیوجیا شیا (چین)	۰/۷۸
Fan (1991)	مخزن گانتینگ	۰/۵ → ۰/۷۸
Fan (1960)	مطالعات آزمایشگاهی	۰/۷۸
Cao et al (1984)	مطالعات آزمایشگاهی	۰/۵۵ → ۰/۷۵
Farrel and Stephan (1986)	مطالعات آزمایشگاهی با آب سرد	۰/۶۷

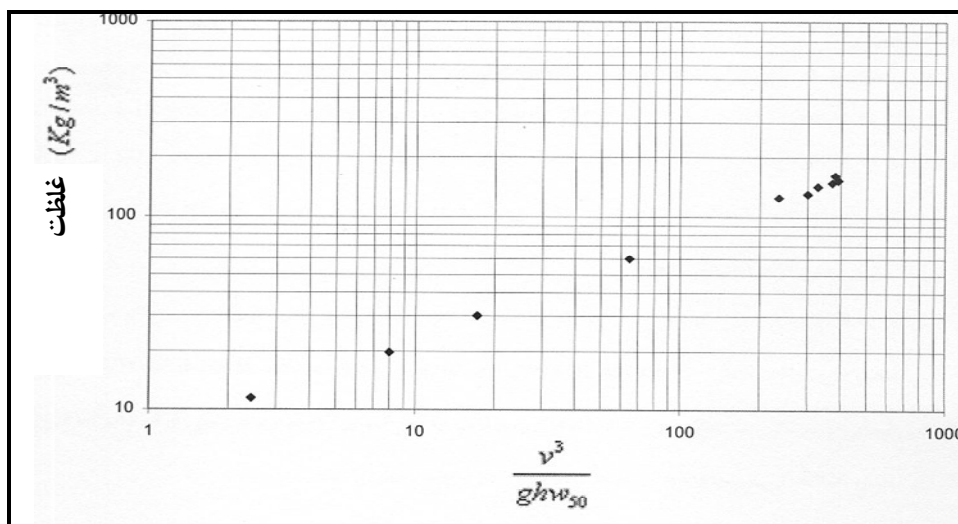
- انتقال رسوب در اثر جریان چگال

مطالعات در خصوص میزان رسوب منتقل شده توسط جریان چگال بسیار محدود می‌باشد و عمده مطالعاتی هم که وجود دارد، در فلوم‌های آزمایشگاهی می‌باشد. از روابطی که با استفاده از داده‌های صحرایی به‌وجود آمده‌اند می‌توان به مطالعات ویو^۱ اشاره کرد که رابطه زیر را استخراج کرده است:

$$C = 12.75 \left(\frac{V^3}{gh\omega_{50}} \right)^{0.285} \quad (۶-۲۷)$$

در این رابطه C غلظت رسوب بر حسب $V, \text{kg/m}^3$ سرعت جریان چگال بر حسب $h, \text{m/sec}$ ارتفاع جریان چگال و ω_{50} سرعت سقوط ذرات رسوبی حمل شده توسط جریان چگال می‌باشد.

مشابه رابطه فوق نیز در یکی از سدهای آفریقایی جنوبی استخراج شده است که شکل (۶-۲۸) این رابطه را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۸- میزان انتقال غلظت رسوب در اثر جریان غلیظ [۴]

۶-۱۱-۵- بر آورد انتقال رسوب توسط جریان غلیظ در مخزن سد دز

سد دز در ۲۰ کیلومتری شمال شهرستان اندیمشک و ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان دزفول بر روی رودخانه دز قرار دارد. محل احداث سازه سد در قسمت فوقانی سازند کنگلومرای بختیاری است. ساختمان این سد در سال ۱۳۳۸ شروع و در سال ۱۳۴۱ و با

آبگیری مخزن سد خاتمه یافت. ساخت سد و نیروگاه آن با سه هدف مهم صورت گرفت: تأمین آب مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی به میزان ۱۲۰۰۰۰ هکتار زمین زراعی در پایین دست، تولید انرژی برقایی مطمئن به میزان ۵۲۰ مگاوات ساعت و کنترل سیلابها و جلوگیری از طغیان فصلی رودخانه دز. ماکزیمم آب قابل کنترل تا تراز ۳۵۲ متر از سطح دریا و حداقل آن ۲۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد. سطح اساس رودخانه برابر ۱۷۵ متر از سطح دریا است در نتیجه حداکثر رقوم موثر آب ۱۷۵ متر و حداقل آن ۱۱۵ متر می‌باشد. در جدول (۶-۷) مشخصات این سد ذکر شده است. در شکل (۶-۲۹) نیز موقعیت محدوده مطالعات پروژه اندازه‌گیری جریان غلیظ مخزن این سد ارائه شده است.

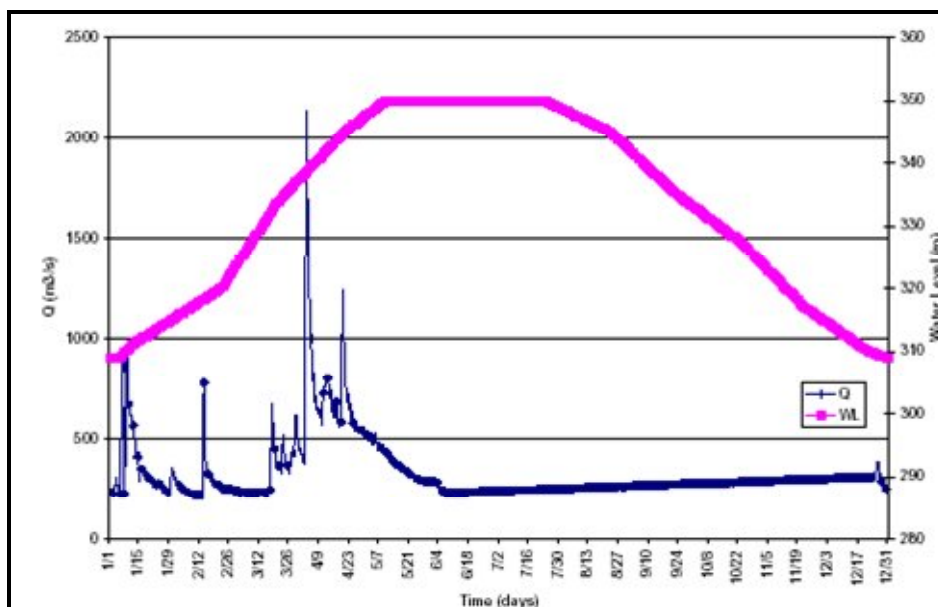


شکل ۶-۲۹- موقعیت مطالعاتی اندازه‌گیری مشخصات جریان غلیظ سد دز [۱۷]

جدول ۶-۷- مشخصات سد دز

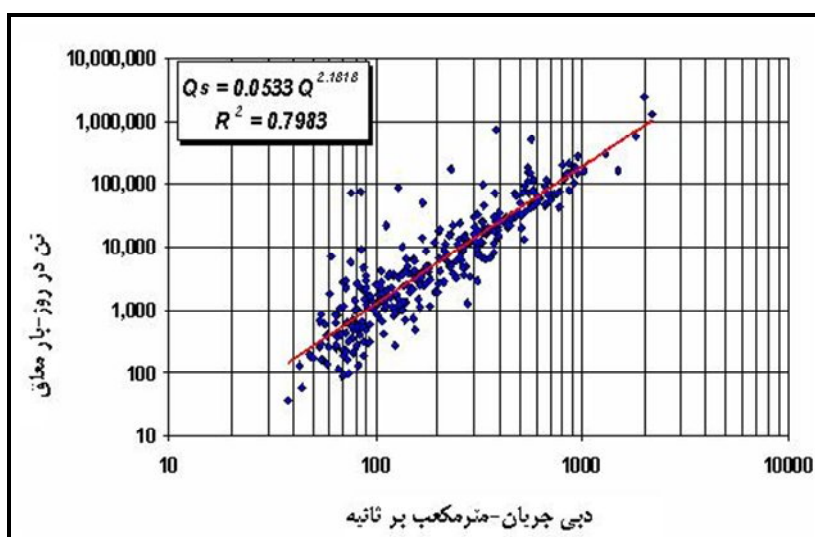
نوع سد	بتنی دوقوسی جدار نازک
ارتفاع سد از پی	۲۰۳ متر
ارتفاع تاج سد از سطح دریا	۳۵۴ متر
ارتفاع سد از کف رودخانه	۱۹۰ متر
ارتفاع عمیق ترین بخش پی	۱۵۱ متر
عرض سد در کف رودخانه روی پایه زین اسبی	۲۷ متر
ضخامت بدنه سد در بالادست (ارتفاع ۳۵۴ متر)	۴/۵ متر
طول تاج سد	۲۱۲ متر
گنجایش کل مخزن	۳۴۶۰ میلیون مترمکعب
حجم مفید مخزن	۲۶۰۰ میلیون مترمکعب
مقدار آب قابل تنظیم سالانه	۸۰۰۰ میلیون مترمکعب
عرض و ارتفاع دریچه‌های قطاعی سرریز	۱۰/۵ متر - ۱۸ متر
حداکثر میزان تخلیه سرریزها (در تراز ۳۵۰ متر)	۶۰۰۰ مترمکعب در ثانیه
تعداد دریچه‌های کشاورزی	۳ عدد
تعداد سرریز ها و نوع سرریز	۲ عدد قطاعی (رادیال)
تراز آستانه سرریز	۳۴۴/۰۵ متر
مساحت و طول دریاچه	۱۷۰۰۰ کیلومتر مربع - ۶۵ کیلومتر
میزان متوسط سالانه رسوبات وارده به مخزن	۱۷ میلیون مترمکعب

از آنجایی که برای بررسی جریان غلیظ، بده ورودی به مخزن سد به‌خصوص در زمان سیلابی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، اطلاعات مربوط به بده ورودی و خروجی سد، همچنین ارتفاع تراز آب در مخزن، در دو سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ در شکل (۶-۳۰) ارائه شده است. بیش‌ترین بده ورودی به مخزن در سال ۲۰۰۲ حدود ۲۱۰۰ و در سال ۲۰۰۶ حدود ۸۸۷ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۶-۳۰ نمودارهای بده ورودی به سد و خروجی از آن و تراز آب مخزن سد در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ [۳]

مهم‌ترین و نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری به مخزن سد دز، ایستگاه تله‌زنگ است. مقادیر بار رسوب معلق این ایستگاه نسبت به دبی جریان در شکل (۶-۳۱) ارائه شده است. معادله دبی سنج رسوب این ایستگاه نیز نشان داده شده است.

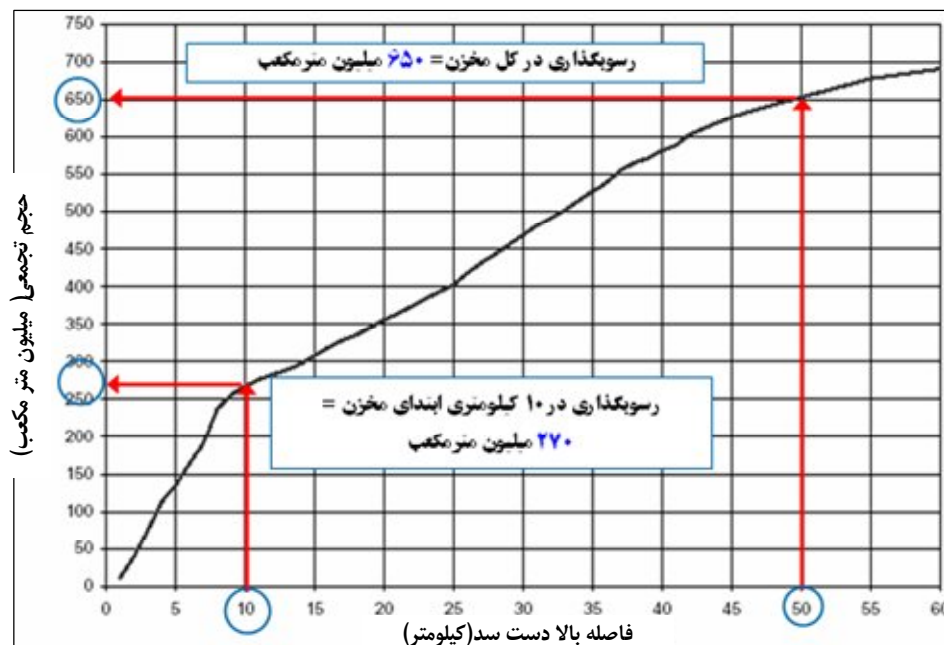


شکل ۶-۳۱ منحنی بده سنج رسوب معلق ایستگاه تله زنگ در بالادست سد دز [۳]

– ضرورت اندازه‌گیری مشخصات جریان غلیظ در مخزن سد دز

طبق آبنگاری انجام شده در مخزن سد دز، تجمع رسوب در جلوی دریچه‌های تحتانی سد و نیز در مجاورت دهانه آبگیر نیروگاه به حدی است که کارایی این تاسیسات را با خطر جدی مواجه کرده است. در سال ۱۳۸۱ رقوم کف مخزن در جلوی دهانه نیروگاه از ۱۸۰ متر در ابتدای بهره‌برداری از سد به ۲۶۰ متر رسیده است که تا محور مرکزی دهانه آبگیر نیروگاه (رقوم ۲۷۰ متر) فاصله بسیار کمی دارد (شکل ۶-۲۸). این امر باعث گردیده که در هنگام وقوع بارندگی و تشکیل جریان غلیظ در مخزن سد، جریان آب ورودی به نیروگاه گل‌آلود باشد. پیش‌بینی می‌شود با این شرایط در آینده نزدیک، احتمال ورود رسوبات به دهانه آبگیر بالا بوده و در این صورت صدمات قابل توجهی به تاسیسات و توربین نیروگاه وارد خواهد شد. شکل ۶-۳۲ تغییرات نیم‌رخ طولی کف مخزن را از زمان احداث سد تا سال ۱۳۸۲ را نشان می‌دهد.

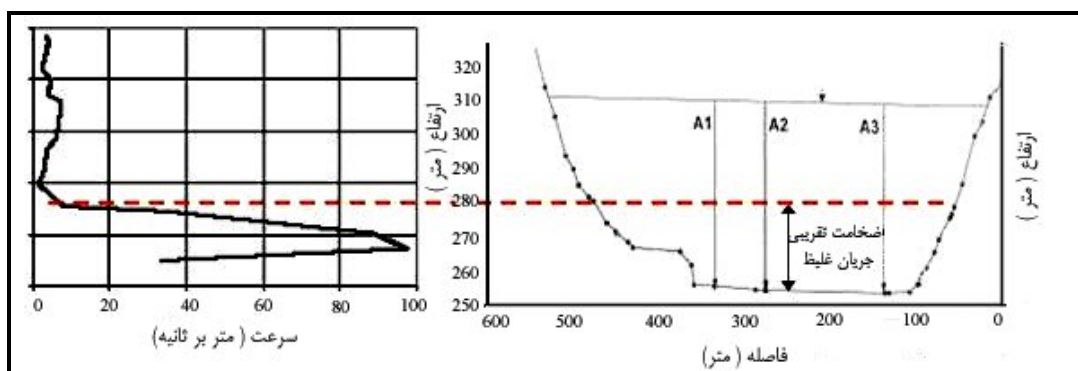
برای کنترل رسوب این سد، اقدامات مختلفی پیش‌بینی شده است که یکی از مهم‌ترین این اقدامات، ثبت داده‌های جریان‌ات غلیظ ورودی به مخزن سد و برنامه عملی تخلیه این رسوبات از طریق تخلیه‌کننده تحتانی می‌باشد. طبق آبنگاری‌های انجام شده در سال ۱۳۸۱ حجم رسوب‌گذاری در طول ۴۸ کیلومتر از مخزن سد دز حدود ۶۳۰ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. نکته قابل توجه این است که ۲۶۰ میلیون مترمکعب (حدود ۳۸ درصد) از این حجم رسوب‌گذاری، فقط در ۱۰ کیلومتری انتهایی مخزن اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه نواحی متأثر از نیم‌رخ برگشتی سطح آب مخزن در محدوده دلتا، موقعیت بهتری برای رسوب‌گذاری دارند، تجمع قابل توجه رسوب در محدوده انتهایی مخزن، می‌تواند دلیلی بر وجود جریان‌ات غلیظ در مخزن این سد باشد.



شکل ۶-۳۲- تغییرات حجم رسوب‌گذاری در طول دریاچه مخزن سد دز [۳]

محاسبه حجم رسوبات ناشی از جریانات غلیظ ورودی به مخزن سد

با استفاده از نتایج اندازه‌گیری جریان غلیظ، می‌توان حجم رسوبات ورودی را در نقاط مختلف مخزن برآورد کرد. برای این کار، کافی است سطح مقطع لایه جریان غلیظ در سرعت جریان و غلظت رسوب آن ضرب شود. شکل (۶-۳۳) به صورت شماتیک نحوه محاسبه ضخامت و عرض لایه جریان غلیظ را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۳۳- ضخامت و عرض لایه جریان غلیظ در سد دز با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی [۱۷]

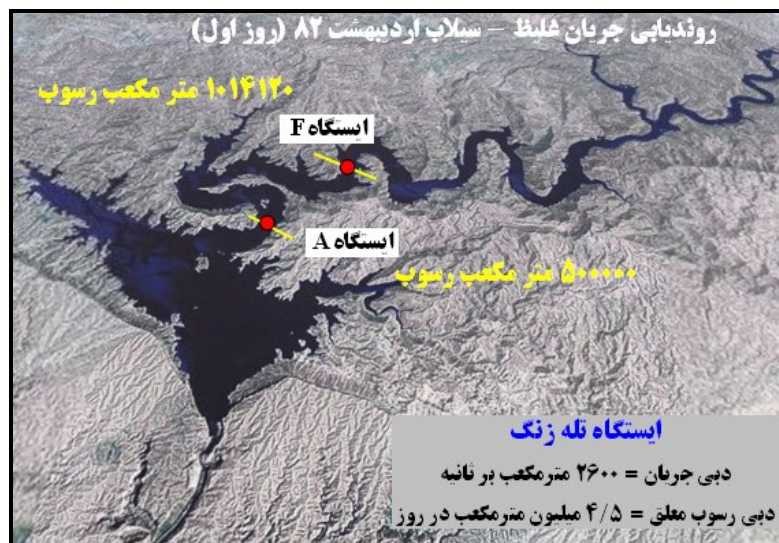
یک نمونه از جریانات غلیظ اتفاق افتاده در مخزن سد دز در ۲۳ و ۲۴ آوریل ۲۰۰۳ (۳ و ۴ اردیبهشت ماه ۱۳۸۲) توسط دستگاه‌های نصب شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثبت شده است. در جدول (۶-۸) خلاصه‌ای از نتایج این واقعه و نیز حجم تقریبی رسوب منتقل شده از ایستگاه‌های مختلف ارایه شده است.

جدول ۶-۸- داده‌های حاصل از یک واقعه از جریانات غلیظ مخزن سد دز [۱۷]

تاریخ	ایستگاه	عرض لایه جریان غلیظ (m)	ضخامت جریان غلیظ (m)	سرعت متوسط (m/s)	غلظت متوسط رسوب (mg/l)	حجم رسوب منتقل شده (m ³ /day)
۲۰۰۳/۴/۲۳	F	۲۰۰	۲۵	۰/۷۵	۳۱۳۰	۱۰۱۴۱۲۰
	A	۳۵۰	۲۰	۰/۶	۱۵۰۰	۵۰۰۰۰۰
	متوسط					
۲۰۰۳/۴/۲۴	F	۲۰۰	۱۸	۰/۴	۲۳۰۰	۲۸۶۱۵۶
	A	۳۰۰	۱۰	۰/۳	۴۵۰۰	۵۲۴۸۸۰
	B	۷۰۰	۱۲	۰/۱	۲۰۰۰	۱۴۵۱۵۰
	C	۱۰۰۰	۲۰	۰/۱	۳۸۰۰	۵۲۵۳۱۲
	متوسط					
						۳۷۰۰۰۰

دبی جریان ورودی به مخزن سد دز در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ در این زمان حدود ۲۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه و غلظت رسوبات معلق حدود ۵ میلیون تن در روز (۴/۵ میلیون مترمکعب) گزارش شده است. سرعت متوسط جریان و ضخامت لایه جریان غلیظ از تغییرات پروفیل قائم سرعت و غلظت رسوبات معلق (کدورت) قابل تخمین است. همچنین عرض جریان غلیظ برابر عرض متوسط مقطع ایستگاه اندازه‌گیری در رقوم قرارگیری جریان غلیظ می‌باشد. اگرچه داده‌های ثبت شده دارای پراکندگی زیادی بوده و تحلیل آنها مشکل است اما به صورت تقریبی ضخامت جریان غلیظ در ایستگاه A حدود ۲۰ متر برآورد شده است. سرعت جریان در این ایستگاه نیز حداکثر ۱ متر بر ثانیه و به طور متوسط حدود ۰/۶ متر بر ثانیه می‌باشد. کدورت متوسط جریان حدود ۵۰۰ NTU

می‌باشد که بر اساس رابطه کدورت - غلظت این ایستگاه، معادل غلظت رسوب معلق حدود ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر می‌باشد. با توجه به عرض مقطع در محل ایستگاه A که حدود ۳۵۰ متر می‌باشد حجم رسوب منتقل شده از این ایستگاه در طی یک روز حدود ۵۰۰۰۰۰ مترمکعب محاسبه شده است. همین محاسبات برای ایستگاه F، حجم رسوبات انتقالی را حدود ۱ میلیون مترمکعب نشان می‌دهد. اگرچه به طور همزمان اطلاعاتی از رسوب انتقالی از ایستگاه‌های پایین دست ایستگاه A ثبت نشده است اما با توجه به روند فوق، به طور متوسط در این روز حدود ۷۵۰۰۰۰ مترمکعب رسوب به بدنه سد رسیده است. این نتایج در شکل (۶-۳۴) نشان داده شده است.

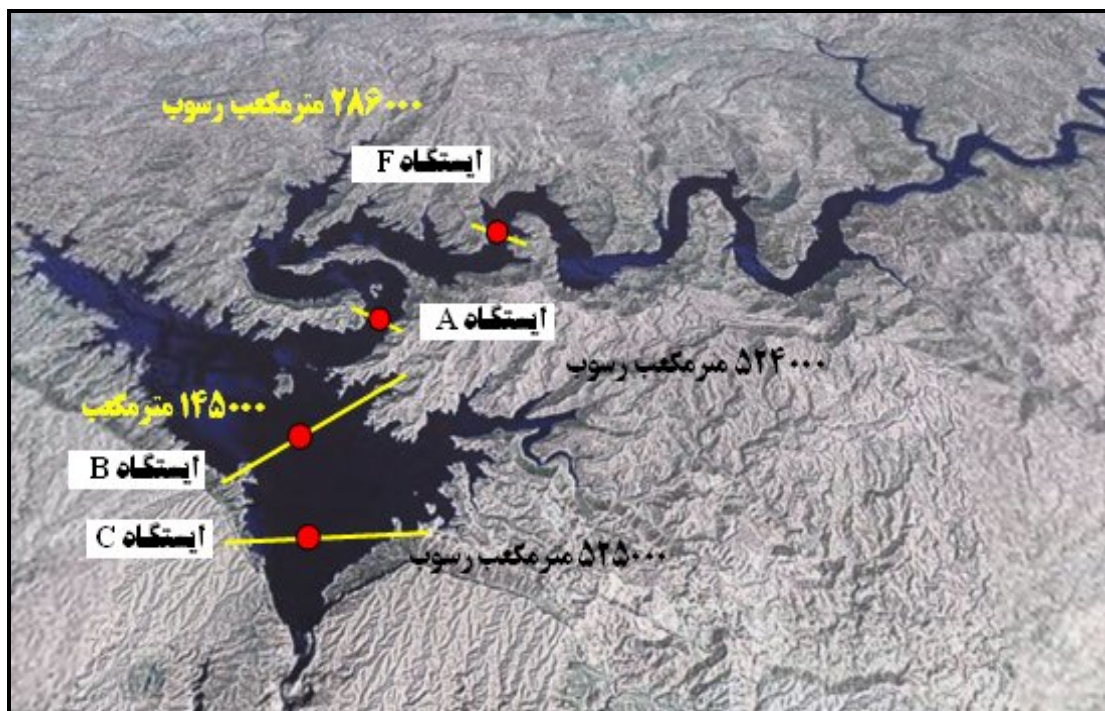


شکل ۶-۳۴- روندبایی جریان غلیظ در طول مخزن سد دز (۳ اردیبهشت ۸۲) [۱۷]

در روز بعد (۲۴ آوریل - ۴ اردیبهشت) نیز کماکان جریان غلیظ با غلظت کمتری ادامه داشته است. در این روز به طور میانگین حدود ۳۷۰۰۰۰ مترمکعب رسوب معلق از مخزن سد عبور کرده و به بدنه سد رسیده است. شکل (۶-۳۵) نتایج این واقعه را نشان می‌دهد. بنابراین، به طور تقریبی حجم متوسط رسوبات منتقل شده از ایستگاه‌ها در این دو روز حدود ۱۱۲۰۰۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود. نتایج محاسبات در جدول (۶-۸) ارائه شده است.

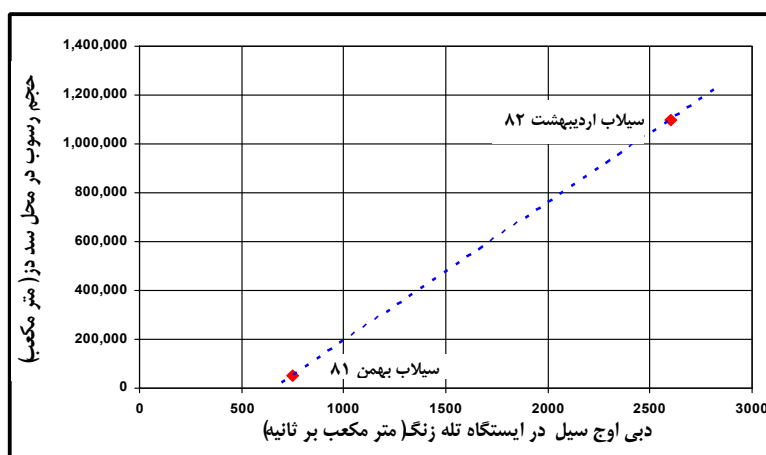
در سیلاب دیگری که در بهمن ماه ۱۳۸۱ اتفاق افتاده است نتایج محاسبات نشان می‌دهد که حدود ۴۵۰۰۰ مترمکعب رسوب وارد مخزن سد دز شده است. در این زمان دبی جریان در ایستگاه تله‌زنگ حدود ۷۵۰ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است.

با توجه به این که در این مرحله از عملیات میدانی، تنها دو واقعه جریان غلیظ در مخزن سد دز (۲۸-۲۹ ژانویه و ۲۳-۲۴ آوریل ۲۰۰۳) ثبت شده و مهم‌تر از آن اندازه‌گیری‌ها به صورت همزمان در همه ایستگاه‌ها انجام نشده است، محاسبه حجم دقیق رسوبات منتقل شده به بدنه سد در طول دوره سیلابی مورد بررسی امکان‌پذیر نیست اما مجموع حجم رسوب ورودی به مخزن سد دز در این دو سیلاب حدود ۱۲۰۰۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است.



شکل ۶-۳۵. روندیابی انتقال رسوبات معلق (جریان غلیظ) در طول مخزن سد دز (۴ اردیبهشت ۸۲) [۱۷]

با استفاده از اطلاعات محدود فوق (به عنوان یک راه‌حل تقریبی)، می‌توان از رابطه رگرسیون خطی بر مبنای دبی حداکثر جریان ورودی به ایستگاه هیدرومتری بالادست (تله‌زنگ) و میزان رسوب ورودی ناشی از جریان غلیظ، حجم رسوبات ورودی به مخزن سد دز در زمان هر واقعه سیلابی را برآورد کرد. این نمودار در شکل (۶-۳۶) نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۶. تغییرات حجم جریان غلیظ ورودی به مخزن سد دز تابعی از دبی حداکثر لحظه‌ای [۱۷]

فصل ۷

بررسی‌های زیست‌محیطی

رسوب‌زدایی مخزن

۷-۱- کلیات

شرایط هیدرولوژیکی رودخانه در اثر ساخت سد تحت تاثیر عوامل فراوانی قرار می گیرد. سدها بر شرایط جریان آب، حرکت رسوب، کیفیت آب و آبیان رودخانه تاثیر می گذارند و باعث ایجاد تغییرات مورفولوژیکی رودخانه شده و در حقیقت روی تمام متغیرهای اکولوژیکی سیستم رودخانه اثرگذار می باشد. این تاثیرات منحصر به محل احداث سد نبوده بلکه ممکن است تا کیلومترها بالادست و پایین دست سد را نیز شامل شود. در این فصل ابتدا تاثیر احداث سدها به خصوص از نظر نهشته شدن رسوب بیان می شوند. بدیهی است مخازن سدها اثرات زیست محیطی دیگری نظیر لایه بندی حرارتی و یا مشکلات کیفی ایجاد می کنند که در این راهنما به آن پرداخته نشده است.

۷-۲- اثرات نهشته شدن رسوب

تمام رودخانه ها رسوب و آب حمل می کنند و احداث سد باعث تغییر شرایط انتقال آب و رسوب می شود. از آن جا که حجم آب منتقل شده توسط رودخانه بسیار بیش تر از میزان رسوب منتقل شده می باشد. مخزن سد خیلی دیرتر از رسوب پر می شود. معمولا به دلیل این که نهشته شدن رسوب در مخزن سد تدریجی می باشد، در دوره بهره برداری چندان به آن توجه نمی شود و یا به عبارتی نادیده گرفته می شود تا این که مشکلی از نظر بهره برداری به وجود آید. دلیل آن هم این است که تغییرات بالا آمدن سطح رسوب از دید عموم پنهان می باشد. از طرفی وقتی مخزن پر از آب شد براحتی می توان آب اضافی را از طریق سرریز و یا دریچه ها به خارج هدایت کرد ولی رسوبات نهشته شده را نمی توان به این راحتی تخلیه کرد. با در نظر گرفتن موارد فوق و با توجه به این که تجمع رسوب در مخزن سد اثرات کوتاه مدت و بلندمدتی را هم در بالادست سد و هم در پایین دست سد ایجاد می کند، ضروری است که قبل از بروز هرگونه مشکلی پتانسیل آن مشکل بررسی و با پیش بینی های به موقع نسبت به اصلاح آن اقدام کرد. هر چند که در طول این راهنما و در فصول مختلف اثرات احداث سد بیان گردیده است ولی در این فصل این موارد مجددا از جنبه های زیست محیطی مورد تاکید قرار می گیرند. به طور کلی پیامدهای احداث سد به شرح زیراند.

۷-۲-۱- اثرات بالادست سد (شامل مخزن و بالادست آن)

۷-۲-۱-۱- کاهش حجم ذخیره مخزن

در اثر نهشته شدن تدریجی رسوب، حجم مفید مخزن به تدریج کاهش یافته و زمانی خواهد رسید که مخزن از نقطه نظر ذخیره و یا کنترل سیل موثر نمی باشد. هم چنین از آن جا که طراحی سرریز سدها به منظور پر کردن حجم مفید مخزن برای کاهش پیک سیلاب می باشد، پس از پر شدن حجم مخزن از رسوب و در صورت وقوع سیلاب، امکان ذخیره آب و تسکین سیل فراهم نبوده و می تواند باعث خسارات جبران ناپذیری در پایین دست گردد.

۷-۲-۱-۲- ترسیب دلتا

بخش درشت دانه رسوب ورودی به مخزن در محل ورود رودخانه به مخزن نهشته می شود و دلتا را تشکیل می دهد. توسعه دلتا در جهت پایین دست باعث از دست رفتن حجم مفید مخزن و گسترش آن تا کیلومترها بالادست باعث گسترده شدن مناطق سیل گیر

می‌گردد. این مساله ممکن است شهرها، اراضی کشاورزی و نواحی صنعتی بالادست را به مخاطره اندازد. همچنین باعث افزایش تراز سطح آب زیرزمینی اراضی بالادست و شور شدن و قلیایی شدن اراضی آن نواحی گردد. علاوه بر این مشکلاتی را در کشتیرانی رودخانه‌ها و ابنیه‌های فنی احداث شده درون یا مجاور رودخانه به‌وجود می‌آورد.

مناطق دلتا بسیار مستعد رشد درختان و گیاهان می‌باشند که در این صورت باعث افزایش زبری رودخانه و کاهش بیش‌تر سرعت جریان و رسوب‌گذاری بیش‌تر می‌گردد. ضمن این‌که افزایش عمق آب و توسعه مناطق سیل‌گیر را تشدید می‌کند. توسعه روزافزون پوشش گیاهی در مناطق دلتا باعث خواهد شد تا بخش مهمی از آب در فصول کم‌آبی به مصرف گیاهان برسد که در مناطق خشک و نیمه خشک بسیار حائز اهمیت است. به طور مثال میزان هدررفت آب در سال در یکی از سدهای کشور مکزیک بالغ بر ۱۷۶ کیلومتر مکعب در سال تنها در اثر تبخیر و تعرق گیاهان منطقه دلتا برآورده شده است [۶۱].

۷-۲-۱-۳- کوچ اجباری ساکنین بالادست

به دلیل توسعه دلتا و نیز به زیر آب رفتن بخش مهمی از اراضی بالادست، کشاورزان و روستاییان ساکن در این مناطق اجباراً باید منطقه را ترک کنند.

۷-۲-۱-۴- مشکل تردد آبزیان

به دلیل انباشت رسوب در بستر رودخانه و پس از فروکش کردن تراز سطح آب مخزن، تردد آبزیان به‌خصوص ماهیان به مناطق بالادست به منظور تخم‌ریزی مشکل خواهد بود.

۷-۲-۱-۵- کشتیرانی

از دیگر فعالیت‌های اجتماعی که به شدت تحت تاثیر رسوب‌گذاری قرار می‌گیرد موضوع کشتیرانی تجاری و یا تفریحی در درون مخزن و بالادست آن می‌باشد.

۷-۲-۱-۶- آلودگی هوا

در مناطق خشک و نیمه خشک و در فصول خشک که سطح آب مخزن بسیار پایین می‌باشد، سطح زیادی از مخزن در تماس با هوا قرار می‌گیرد که در نتیجه مقدار زیادی از رسوبات ریزدانه در اثر وزش بادهای شدید این فصول به مناطق شهری و کشاورزی و یا نواحی صنعتی منتقل می‌شوند. انتقال این رسوبات می‌تواند مشکلاتی را برای کشاورزان، واحدهای صنعتی و مردم شهرها ایجاد کند.

۷-۲-۱-۷- خطر بیش‌تر در صورت وقوع زلزله

از آن‌جا که رسوب دارای وزن واحد حجم بیش‌تری نسبت به آب می‌باشد، در زمان زلزله رسوب پشت سد می‌تواند نیروی بیش‌تری نسبت به آب وارد کند. علاوه بر این رسوب تجمع یافته در نزدیک سد می‌تواند در اثر زلزله به حالت روانگرایی درآمده به سمت دریچه‌های تحتانی حرکت کرده و آن‌ها را غیر قابل استفاده کنند.

۷-۲-۱-۸- ساییدگی

ذرات رسوب بزرگ‌تر از $0/1$ میلی‌متر باعث تشدید ساییدگی پره‌های توربین نیروگاه‌ها می‌شود. ذرات رسوبی تیز گوش حتی با اندازه‌های کوچک‌تر نیز می‌توانند خسارات جبران‌ناپذیری را به توربین‌ها وارد کنند. ادامه این روند باعث کوتاه شدن دوره تعمیرات نیروگاه می‌گردد که منجر به کاهش تولید انرژی سالانه نیروگاه می‌گردد. ذرات درشت دانه نیز که با سرعت از دریچه‌های تحتانی خارج می‌شوند می‌توانند باعث سایش شدید دریچه‌ها، جداره دریچه‌ها و سرریزها گردند.

۷-۲-۱-۹- کاهش انرژی

افزایش تدریجی حجم رسوبات نهشته شده باعث کاهش حجم مفید مخزن می‌شود که در نتیجه آن، مخزن نمی‌تواند حجم زیادی از سیلاب‌های بزرگ را برای آینده ذخیره کند و انرژی تولیدی نیز کاهش می‌یابد. در مناطقی که سدهای متوالی ساخته شده‌اند، توسعه دلتاهای سدهای پایین‌دست باعث افزایش عمق آب پایاب در سدهای بالادست می‌گردد که منجر به کاهش اختلاف بار آبی و در نتیجه کاهش انرژی تولیدی می‌شود.

۷-۲-۱-۱۰- بسته شدن دریچه‌های آبگیر و تحتانی

در صورت ادامه روند رسوب‌گذاری، رسوب می‌تواند باعث بسته شدن دریچه‌های تحتانی گردد. گزارش‌های زیادی از نهشته شدن حجم زیادی از رسوب در سیلاب‌های بزرگ در بعضی از مخازن وجود دارد که باعث بسته شدن دریچه‌های ورودی به نیروگاه یا تحتانی گردیده‌اند. باز کردن مجدد آنها به زمان زیاد و هزینه‌های زیاد نیاز خواهد داشت.

۷-۲-۱-۱۱- فرسایش سواحل و لغزش دیواره‌ها

مخازنی که عرض کم ولی طول زیادی دارند، دارای طول سواحل بیش‌تری هستند، از این رو در معرض فرسایش‌های ناشی از امواج سطحی آب می‌باشند به‌خصوص در مناطقی که مستعد وزش بادهای تند می‌باشد. میزان فرسایش سواحل در بعضی از مخازن ممکن است به $2/5$ متر در سال هم برسد. این میزان فرسایش البته ممکن است در مقایسه با رسوب ورودی به مخزن از طریق رودخانه‌ها قابل ملاحظه نباشد ولی باعث خساراتی به ابنیه فنی مجاور سواحل می‌گردد. ضمن این‌که فرسایش سواحل باعث می‌شود تا شیب سواحل به تدریج ناپایدار گردد و لغزش‌های توده‌ای را به دنبال داشته باشد. رسوب ورودی به مخزن در اثر لغزش‌های توده‌ای برعکس فرسایش سواحل ممکن است آنقدر زیاد باشد که باعث پر شدن مخزن سد گردد. به طور مثال در مخزن سانمنسیا^۱ در کشور چین تنها در ۱۶ ماه اول بهره‌برداری نزدیک به ۱۷۷ میلیون مترمکعب رسوب در اثر لغزش دیواره‌ها وارد مخزن گردید [۷۱].

۷-۲-۱-۱۲- تغییر اکولوژی

رسوب‌گذاری در مخزن باعث تغییر نوع رسوب می‌شود که می‌تواند تغییر اکولوژی مخزن را به همراه داشته باشد و در نتیجه آن گونه‌های جانوری و آبزیان تحت تاثیر قرار گیرند.

۷-۲-۲- اثرات پایین‌دست سد

اثرات زیست‌محیطی در بازه‌های رودخانه پایین‌دست سد به دلایل متعددی بسیار بیش‌تر از مناطق بالادستی آن است، چرا که معمولاً در پایین‌دست سد بده جریان و میزان رسوب رها شده کاهش می‌یابد. تغییر در نوع رسوب رها شده باعث تغییر در مواد غذایی همراه جریان می‌گردد. ضمن این‌که به دلیل افزایش رسوب ریزدانه نظیر رس، انتقال مواد آلی، سموم دفع آفات و آلودگی‌های ناشی از عناصر سنگین نسبت به قبل از احداث سد بیش‌تر می‌گردد. جریان رها شده در بیش‌تر مواقع سال از رقوم‌های پایین مخزن خارج می‌گردد که نسبت به قبل از احداث سد درجه حرارت آب رها شده بسیار پایین‌تر است. جریان آب خنک و زلال پایین‌دست باعث خواهد شد تا جانوران جدیدی در این نواحی رشد نمایند.

مورفولوژی رودخانه‌ی پایین‌دست به دلیل تغییر در میزان و کیفیت رسوبات و هم‌چنین کاهش بده اوج سیل تحت تاثیر قرار می‌گیرد. جریان آب صاف رها شده باعث فرسایش بستر رودخانه و گود شدن آن می‌گردد. به طور کلی، بستر رودخانه تا کیلومترها پایین‌دست فرسایش یافته و به تدریج لایه‌ی درشت‌دانه یا لایه‌ی محافظ بر روی بستر رودخانه تشکیل می‌شود. درشت شدن مصالح بستر رودخانه مشکلاتی را برای آبزیان به‌خصوص از منظر تخم‌گذاری گونه‌های محلی و یا گونه‌های جدید فراهم می‌کند. گود شدن بستر نیز باعث تشدید فرسایش سواحل، آبشستگی پایه‌های پل و کاهش سطح آب زیرزمینی می‌گردد که همه این عوامل اثرات سو بر محیط‌زیست رودخانه و اطراف آن بجا می‌گذارد. آب شستگی پایین‌دست خروجی دریاچه‌های تحتانی و سرریز سد ممکن است تا بستر سنگی نیز به وجود آید.

عرض رودخانه‌ی پایین‌دست ممکن است افزایش یا کاهش یافته و یا ثابت بماند. براساس گزارش‌های منتشر شده مقاطع عرضی رودخانه می‌توانند تا ۹۰ درصد کاهش و در بعضی دیگر تا صددرصد هم افزایش یابند و این بستگی به شرایط رودخانه در پایین‌دست دارد. معمولاً پس از احداث سد، بده‌های اوج مربوط به سیلاب‌ها کاهش یافته و دوره‌ی بازگشت آنها تغییر می‌کند ولی رسوبات ورودی از شاخه‌های فرعی تغییر نمی‌کند. در نتیجه، رسوب‌گذاری در پایین‌دست اتفاق می‌افتد که نتیجه‌ی آن ایجاد جزایر و رشد گیاهان در این جزایر و تثبیت آنها می‌شود. این مساله باعث می‌شود که در صورت وقوع سیلاب با بده اوج بالا، رودخانه ظرفیت عبور آن را نداشته باشد که این مساله افزایش خسارات ناشی از سیل و تعریض رودخانه را به همراه دارد. بدیهی است چنان‌چه در پایین‌دست شاخه‌ای با آورد رسوب بالا وجود نداشته باشد عرض رودخانه به تدریج کاهش می‌یابد.

۷-۲-۳- اثرات درون مخزن سد

تغییرات هیدرولوژیکی به وجود آمده در اثر احداث سدهای بزرگ، آثار بزرگی نظیر جلوگیری از مهاجرت آبزیان، ترسیب بار رسوبی، لایه‌بندی حرارتی را به همراه دارد. در صورتی که تعادلی بین رسوب ورودی و خروجی از مخزن حاصل شود، شرایط مناسبی از نظر زیست‌محیطی در درون مخزن فراهم می‌شود. مخصوصاً برای حفظ مورفولوژی و آبزیان بهتر است سد طوری طراحی شود تا بتوان رسوبات را به صورت دوره‌ای به خارج هدایت کرد. متأسفانه، به دلایل متعددی امکان فراهم کردن این شرایط در مخازن بزرگ میسر نیست، چرا که این رسوبات در فواصل بسیار دورتری از دریاچه‌ها ترسیب می‌شوند. احداث سدها باعث به زیر آب رفتن روستاها، زیستگاه‌های حیات‌وحش و جانوران بومی و هم‌چنین آثار باستانی می‌گردد. به عنوان مثال، سد آسوان در مصر نمونه‌ی بارزی از اثرات زیست‌محیطی را پس از ساخت شاهد بوده است. مخزن این سد بخشی از آثار تاریخی را به زیر آب برده، باعث ترسیب مواد غذایی همراه رسوب شده که قبل از آن این مواد به حاصل‌خیزی اراضی پایین‌دست و یا تامین مواد غذایی آبزیان کمک می‌کرده‌اند، باعث

فرسایش شدید سواحل دریا در محل مصب گردیده و کف کنی زیادی در پایین‌دست آن به وجود آمده، ضمن این که باعث ترسیب کانال‌های آبیاری شده است.

مطالعات لیچ و همکاران (۲۰۰۷) بر روی دریاچه هارتول^۱ نشان داده است که در شرایطی که شرایط لایه‌بندی حرارتی در دریاچه ایجاد می‌شود، ضخامت لایه رسوبی به میزان کمی (حدود ۶ درصد) نسبت به حالت غیر لایه‌بندی کاهش می‌یابد، همچنین مشخص شده است که در شرایط لایه‌بندی شده سرعت لایه آب که در جهت وزش باد حرکت می‌کند، بیش‌تر می‌باشد و در نتیجه رسوبات فاصله طولانی‌تری را نسبت به حالت لایه‌بندی شده طی می‌کنند. جدول (۷-۱) آثار زیست‌محیطی ناشی از ساخت سد را که اشاره شد به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۷-۱- اثرات زیست محیطی ناشی از رسوبات سد [۱۰۳]

نوع تاثیر	توضیح
در محدوده‌ی مخزن	
از دست رفتن حجم مخزن	مزایای استفاده از سد به عنوان کنترل سیل و تولید انرژی کاهش خواهد یافت
رسوبات آلوده	نهشته شدن رسوبات آلوده باعث کاهش کیفیت آب مخزن می‌گردد
ترسیب رسوبات آلی	رسوبات آلی با مصرف اکسیژن محلول باعث کاهش کیفیت آب مخزن می‌گردد
کدورت (تیرگی)	تیرگی آب باعث کاهش عمق منطقه نورانی می‌گردد. کاهش دید ایجاد مشکل برای تغذیه‌ی ماهی‌ها می‌کند. کاهش وضوح (روشنی) آب نیز شرایط نامساعدی را برای تفريحات سالم فراهم می‌کند.
قایقرانی	رسوبات باعث پرشدن مسیر قایقرانی و آب‌بند کشتیرانی می‌شوند.
جانوران وحشی	در صورت رشد گیاه در جزایر ایجاد شده در اثر رسوب‌گذاری، شرایط مساعدی برای زندگی جانوران وحشی فراهم می‌شود. از طرفی نهشته شدن رسوبات ریزدانه باعث کاهش ازدیاد ماهی‌ها می‌گردد.
آلودگی هوا	در صورت پایین رفتن سطح آب مخزن، رسوبات ریزدانه در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند.
بالادست مخزن	
برآمدگی کف و تشکیل دلتا	نهشته شدن مواد رسوبی در بالادست مخزن باعث بالا آمدن بستر رودخانه و در نتیجه، افزایش تراز سطح آب در زمان سیلاب می‌شود و یا به عبارتی مناطق بیش‌تری در معرض سیل قرار می‌گیرند. افزایش تبخیر و تعرق نیز از آثار بالا آمدن بستر رودخانه است. البته نهشته شدن رسوب در بالادست رودخانه، باعث کاهش تلفات حجم مخزن می‌شود چرا که رسوب قبل از رسیدن به مخزن ترسیب می‌شود. رشد درختان در منطقه دلتا منطقه مناسبی برای جانوران وحشی ایجاد می‌کند.
پایین‌دست مخزن	
کف کنی، فرسایش سواحل و تغییر شکل رودخانه به ماندیری	کف کنی رودخانه باعث تشدید تخریب سواحل شده، پایین آمدن کف رودخانه‌ی اصلی باعث شروع فرسایش کف رودخانه‌های فرعی و شروع فرسایش پس‌رونده می‌شود. بستر رودخانه به تدریج خیلی درشت دانه شده و برای تخم‌ریزی آبزیان مکان مناسبی نخواهد بود. این‌پیه‌ی فنی نظیر پل‌ها، آبگیرها و ایستگاه‌های پمپاژ تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در بیش‌تر بازه‌های رودخانه علیرغم کاهش بده طغیانی، تشدید فرسایش ساحل و افزایش قوس ماندرها به دلیل کف‌کنی و کاهش شدید سطح آب به‌خصوص در فصول خشک است. در نتیجه حجم رسوب زیادی وارد رودخانه می‌گردد که در بازه‌های پایین‌دست بخش عمده آن نهشته شده و جزایر متعدد را به‌وجود می‌آورد
کاهش بده غالب سیلاب	کاهش بده غالب رودخانه باعث کاهش ابعاد رودخانه و رشد پوشش گیاهی می‌گردد. این عوامل باعث کاهش ظرفیت انتقال می‌گردد و یا به عبارتی اثر مخزن در کنترل سیلاب کاهش می‌یابد.
کاهش رسوب ریزدانه	موجب کاهش رسوب‌گذاری و نیاز به لایروبی کم در آبراهه کشتیرانی می‌گردد. باعث افزایش فرسایش در طول سواحل، کاهش مواد غذایی و ورود رسوب به اراضی و کاهش تشکیل دلتا در مصب رودخانه می‌شود. شفافیت آب رها شده مزایایی برای استفاده کنندگان و آبزیان دارد.
رسوب‌زدایی	زمان و مقدار رسوب‌زدایی باعث تاثیرات منفی زیست‌محیطی، اجتماعی و فعالیت‌های اقتصادی می‌گردد.

۷-۳- تاثیر اجتماعی - زیست‌محیطی مواد لایروبی شده

یکی از راهکارهای احیای بخشی از حجم مفید مخزن رسوب‌زدایی می‌باشد که به‌طور مفصل در فصل ۶ روش‌های مختلفی ارائه گردید. هر چند که خارج کردن مواد رسوبی می‌تواند فوایدی از منظر استفاده از مخزن را داشته باشد ولی باید توجه داشت که این مواد می‌توانند مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز باعث گردند. اطلاع از این مشکلات کمک می‌کند تا آن راهکارهایی که کم‌ترین خسارات را خواهند داشت مورد استفاده قرار گیرند.

مواد رسوبی که در اثر عملیات لایروبی یا رسوب‌زدایی در مکانی تخلیه می‌شوند باید از نظر فایده و یا آسیبی که ممکن است به محیط‌زیست وارد کنند مورد بررسی قرار گیرند. اندازه مواد رسوبی لایروبی شده از مخازن سدها تاثیر مهمی در این بررسی‌ها دارد. در صورتی که لایروبی از محل‌های بالادست مخزن نظیر دلتاها انجام شود، معمولاً بیش‌تر ذرات درشت‌دانه و در محدوده شن و ماسه هستند که از نظر زیست‌محیطی مشکلی ندارند ضمن این‌که می‌توان با احداث معادن شن و ماسه از این مصالح به نحو مطلوبی بهره‌برداری کرد. لایروبی مصالح ریزدانه سیلت و سطحی البته نیازمند بررسی بیش‌تر می‌باشد. این ذرات ممکن است حاوی عناصر مضر باشند، مثلاً عناصر سنگین، که از نظر زیست‌محیطی مشکل داشته باشند. آب همراه مواد لایروبی ممکن است از نظر ترکیب شیمیایی و یا pH مشکل داشته باشد. علاوه بر این محل تخلیه این رسوبات بخاطر این‌که عمل زهکشی به کندی صورت می‌گیرد، ممکن است با تلاقی شود و یا این مکان، محل مناسبی برای رویش گیاهان خودرویش نظیر گز و غیره گردد. در صورتی که در آن منطقه بادهای تند و طولانی‌مدتی وزش می‌کنند و مواد لایروبی شده ریزدانه در فضای آزاد ریخته می‌شوند، باید تمهیدات لازم به منظور جلوگیری از انتقال این رسوبات توسط جریان‌های بادی در نظر گرفته شود. به‌طور مثال مالچ پاشی، پوشش گیاهی، استفاده از دیواره‌های بادشکن و غیره می‌تواند در تثبیت مصالح لایروبی کمک کند. مهم‌تر از همه عملیات لایروبی باید در فصولی انجام گیرد که خسارات وارده به آبزیان به حداقل برسد، به‌طور مثال این عملیات نباید در فصل تخم‌ریزی تا رشد بچه‌ماهی‌ها انجام گیرد.

۷-۴- تاثیر اجتماعی - زیست‌محیطی عملیات رسوب‌زدایی مخازن

از جمله روش‌های معمول احیا بخشی از حجم مفید مخزن، رهاسازی رسوب توسط جریان آب می‌باشد که در فصل ۶ ارائه گردید. از آن‌جا که در این روش‌ها در مدت نسبتاً کوتاهی حجم زیادی رسوب به همراه جریان آب از مخزن سد خارج می‌گردد، اثرات بسیار زیان‌بارتری نسبت به عملیات لایروبی به روش مکانیکی دارد. رسوب رها شده عمدتاً ریزدانه بوده که باعث تغییراتی در خصوصیات آب رها شده می‌گذارد. از جمله می‌توان به کدورت بالا، کاهش زیاد اکسیژن محلول، تغییر در دانسیته و لزجت آب و کاهش شدید درجه حرارت آب اشاره کرد. تغییر هر یک از این خصوصیات باعث می‌گردد تا مسایل دیگری را به همراه داشته باشد. از این رو در ادامه بخش اثرات رهاسدن رسوب در اثر عملیات شاس توضیح داده می‌شود.

۷-۴-۱- تاثیر بر کیفیت آب

شرایط آب پایین‌دست در چهار مرحله‌ی رسوب‌زدایی سدها را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- مرحله‌ی بازشدن دریچه‌های تحتانی

در این مرحله جریان آب رهاشده باعث آب‌شستگی در پایین‌دست دریچه‌ی تحتانی شده و رسوبات به صورت بار شسته به پایین‌دست منتقل می‌شوند. افزایش ناگهانی غلظت رسوب عامل اصلی آب‌شستگی در کف رودخانه است.

- مرحله‌ی تداوم جریان

در این مرحله کیفیت آب پایدار می‌باشد. رسوبات نهشته در مخزن به تدریج کنده شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. ولی زمانی که سطح آب مخزن بالاتر از دریچه‌های تخلیه است، رسوب خروجی زیاد نمی‌باشد.

- مرحله‌ی تخلیه‌ی مخزن

در این مرحله شرایط رودخانه‌ای در مخزن ایجاد می‌شود و جریان آب با غلظت رسوب بسیار بالا به پایین دست منتقل می‌شود که باعث تغییر شدید کیفیت آب می‌گردد. با خروج رسوبات آلی به تدریج میزان اکسیژن محلول کاهش یافته و به صفر می‌رسد. غلظت رسوبات خروجی ممکن است تا ۱۰۰ گرم در لیتر نیز برسد، البته میزان غلظت و زمان تداوم رسوب‌زدایی بستگی به عوامل متعددی دارد.

- مرحله‌ی نهایی

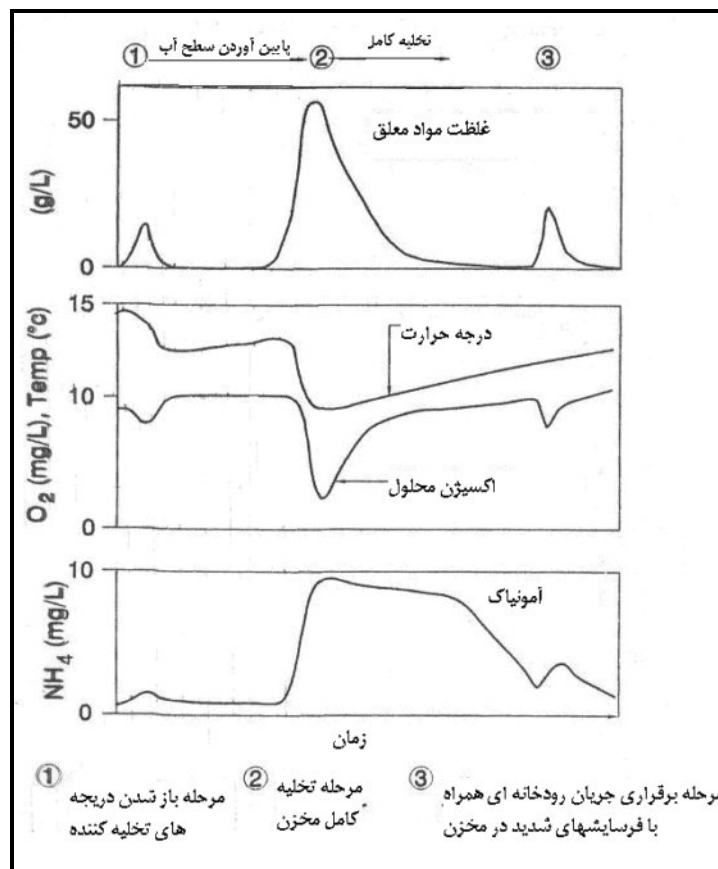
پس از مدتی که از خروج گل از مخزن گذشت، کیفیت آب خروجی بهتر می‌شود. شکل (۷-۱) تغییرات غلظت رسوب، اکسیژن محلول، درجه‌ی حرارت آب و آمونیاک را در مراحل مختلف فوق نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زمانی که غلظت رسوب به حداکثر خود می‌رسد، درجه حرارت، اکسیژن محلول به حداقل و میزان آمونیاک به حداکثر خود می‌رسد.

۷-۴-۲- تاثیر بر آبریزان

به طور کلی در زمان رسوب‌زدایی، تمام آبریزان توسط جریان آب به پایین دست منتقل و یا از بین خواهند رفت. معمولاً آبریزان در اثر عوامل زیر تحت تاثیر قرار می‌گیرند:

- بسته شدن راه‌های تنفسی در اثر غلظت زیاد رسوب معلق.
- کاهش شدید اکسیژن محلول.
- شسته شدن تخم آبریزان، به‌خصوص اگر در زمان رسوب‌زدایی جریان با بده زیادی رها شود.
- کاهش میزان پلانکتون‌ها به علت رسوب‌گذاری در رودخانه پایین دست.
- تغییر ساختار جمعیت آبریزان
- تغییر در زنجیره‌ی غذایی آبریزان و حذف منبع غذایی به‌خصوص پلانکتون
- ورود مواد آلاینده‌ی سمی به زنجیره‌ی غذایی در صورتی که رسوبات رها شده آلاینده باشند.

این عوامل می‌توانند باعث از بین رفتن ماهی‌ها، کاهش مقاومت آن‌ها در مقابل امراض، کاهش نرخ جمعیت و تغییرات ژنتیکی شوند. رها کردن رسوب با غلظت بالا به طوری که میزان اکسیژن محلول را به صفر برساند باعث از بین رفتن تمام آبریزان می‌شود. براساس مطالعات انجام شده توسط گاریک و همکاران [۵۷]. مهم‌ترین عامل مرگ و میر ماهیان، کاهش شدید میزان اکسیژن محلول می‌باشد و عواملی چون درجه‌ی حرارت، pH آب و میزان آمونیاک تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای ندارند.



شکل ۷-۱ - تغییرات زمانی غلظت رسوب، درجه حرارت، اکسیژن محلول و آمونیاک در دوره رسوب‌زدایی [۱۰۳]

۷-۴-۳- انتقال مواد رسوبی به شبکه‌های آبیاری و اراضی

در خلال رسوب‌زدایی حجم زیادی از مواد رسوبی در دهانه آبرگیرها، درون کانال‌های اصلی و فرعی شبکه‌های آبیاری و اراضی کشاورزان رسوب می‌کند. تخلیه این رسوبات به صورت لایروبی مکانیکی پس از اتمام عملیات شاس باید بلافاصله انجام گیرد. دیوی این مصالح در کناره‌های کانال‌ها خود مشکلاتی را که در قسمت ۷-۳ بیان گردید به همراه خواهد داشت.

۷-۴-۴- انتقال مواد رسوبی به وسیله باد

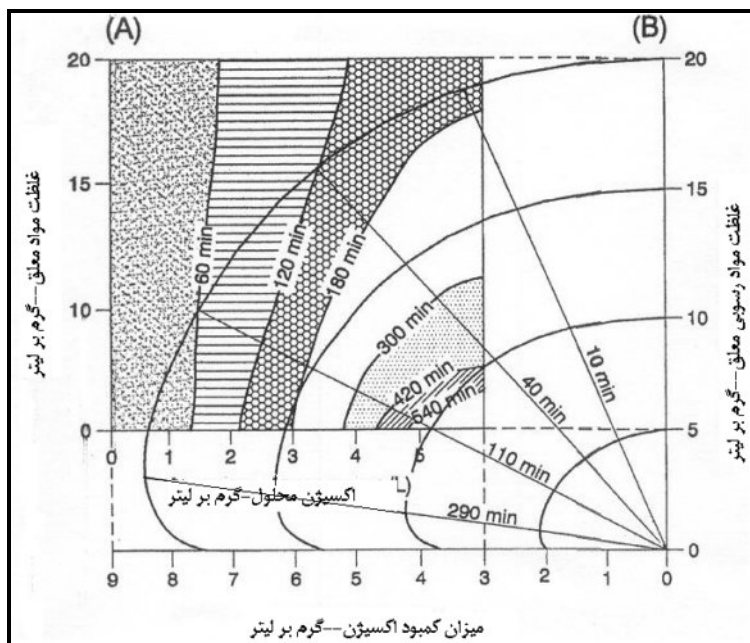
پایین آوردن سطح آب مخزن به دلیل عملیات رسوب‌زدایی باعث می‌شود تا بخشی از رسوبات در نقاط بالادست که عمدتاً ماسه می‌باشند، در هوای آزاد قرار گرفته و بتدریج رطوبت خود را ازدست بدهند. در نتیجه با وزش بادهای محلی براحتی جابجا می‌شوند. حجم انتقال این مواد رسوبی در بعضی مواقع بحدی است که باعث تیرگی آسمان در روز می‌شود. مصالح حمل‌شده به مناطق مسکونی، اراضی و باغات کشاورزی و نواحی صنعتی منتقل و مشکلات دیگری را سبب می‌شوند.

۷-۵- پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه پایین‌دست

از آن‌جا که مهم‌ترین عامل مرگ و میر آبزیان کاهش اکسیژن محلول در اثر غلظت رسوب زیاد می‌باشد، لازم است تا قبل از انجام عمل رسوب‌زدایی مقادیر اکسیژن محلول و غلظت رسوب در رودخانه‌ی پایین‌دست پیش‌بینی گردد.

مرگ و میر ماهی در اثر کاهش اکسیژن محلول، افزایش غلظت رسوب و افزایش زمانی که تحت تاثیر این شرایط قرار دارد، افزایش می‌یابد. شکل (۷-۲) این شرایط را نشان می‌دهد.

برای این که تاثیر منفی رسوب‌زدایی به حداقل برسد، بهتر است تا مدل ریاضی برای پایین دست تهیه گردد. البته در حال حاضر چنین مدلی که بتواند به طور قابل قبولی شرایط را پیش‌بینی کند، وجود ندارد. پیش‌بینی تاثیر رسوب بر میزان پلانکتون نیز تقریباً غیر ممکن است. از این رو، اندازه‌گیری‌های صحرایی در اولین دوره‌های رسوب‌شویی می‌تواند به پیش‌بینی‌های بعدی کمک نماید.



شکل ۷-۲- رابطه بین اکسیژن محلول، غلظت رسوب و مدت زمان رسوب‌زدایی [۵۹]

۷-۶- نکاتی در خصوص بهبود کیفی آب در خلال رسوب‌زدایی

چنانچه بتوان در زمان عمل رسوب‌زدایی میزان اکسیژن محلول را اضافه کرد، ماهی‌های کم‌تری تلف خواهند شد. نتایج مطالعات محققین فرانسوی نشان داده است که با تزریق هوای آزاد می‌توان میزان اکسیژن محلول را به ۲ تا ۳ میلی‌گرم در لیتر هم افزایش داد و در صورت تزریق اکسیژن خالص، این میزان تا ۸ میلی‌گرم در لیتر هم می‌رسد.

از دیگر روش‌ها می‌توان به هدایت جریان‌های غلیظ رهاشده به مخازن موقت و طبیعی که خارج از مسیر رودخانه وجود دارد، اشاره کرد. رسوبات نهشته در این مخازن را سپس می‌توان به صورت مکانیکی تخلیه کرد.

روش دیگری که در فرانسه استفاده شده است، اضافه کردن جریان آب زلال به جریان غلیظ رها شده از مخزن در زمان رسوب‌زدایی می‌باشد. آب زلال را می‌توان از مخزن فرعی تامین کرد.

در خلال برنامه‌ی رسوب‌زدایی، مصالح ریزدانه رسوبی روی بستر و ساحل رودخانه ترسیب می‌گردد و محیط نامناسبی را برای تخم‌ریزی ماهیان ایجاد می‌کنند. از این رو بهتر است مدتی پس از رسوب‌زدایی، جریان زیادی از آب زلال مخزن رهاسازی شود تا این رسوبات ریزدانه نیز شسته شوند. در مخزن سد سفیدرود در پایان فصل رسوب‌زدایی، جریان آب زلال با دبی ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه، معادل دبی لبریز^۱ رودخانه، رهاسازی می‌شود تا رسوبات ریزدانه که در بستر رودخانه ترسیب شده‌اند شسته شوند.

- قبل از رسوب‌زدایی در مقاطع مختلف رودخانه باید ایستگاه‌های اندازه‌گیری نصب، تا در خلال رسوب‌زدایی میزان غلظت رسوب، اکسیژن محلول و سایر پارامترهای کیفی آب به طور مرتب اندازه‌گیری شود.
- به طور کلی، داده‌های جمع‌آوری شده باید شامل موارد ذیل باشند:
- کلیه متغیرهای کیفی آب (به‌خصوص آمونیاک، pH، اکسیژن محلول و غیره)
 - کلیه متغیرهای کمی آب و رسوب (بده، درجه‌ی حرارت، غلظت رسوب، دانه‌بندی رسوب)
 - سایر داده‌هایی که ممکن است برای مدل‌سازی مورد نیاز باشد.

۷-۷- اقدامات لازم برای کاهش اثر احداث سد

احداث سد هرچند مزایای متعددی برای بشر دارد ولی مسایل متفاوتی را از نظر زیست‌محیطی ایجاد می‌کند که در قسمت‌های قبلی به آن‌ها اشاره گردید. به منظور کاهش این اثرات، ضروری است تا ضمن پیش‌بینی‌های لازم، اقداماتی متناسب نیز انجام گیرد که در این قسمت اهم این اقدامات ارایه می‌گردند. به‌طور کلی اقدامات به دو دسته اقدامات بالادستی و اقدامات پایین‌دستی طبقه‌بندی می‌شوند. نوع اقدامی که در ارتباط با مشکل زیست‌محیطی در بالادست و پایین‌دست در جدول (۷-۲) و جدول (۷-۳) ارایه شده است.

جدول ۷-۲- اقدامات بالادستی سد به منظور کاهش اثرات زیست محیطی [۱۰۳]

نوع اقدامات	برای مقابله با
- تغییر در تراز آبگیری - تداخل تصنعی لایه‌های آب با روش‌های مکانیکی یا هوای فشرده - رهاسازی جریان برای کاهش زمان ماند	لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد
- مدیریت حوضه آبریز به‌خصوص از نظر استفاده از سم و کودهای شیمیایی در اراضی - هوادهی مخزن - تصفیه آب ورودی به مخزن - رهاسازی جریان برای کاهش زمان ماند - احداث مخازن کوچک بالادستی	آلودگی آب مخزن
- مدیریت حوضه آبریز به منظور کاهش فرسایش اراضی - احداث حوضچه‌های ترسیب و سدهای رسوب‌گر - احداث کنار گذر برای عبور سیلاب‌های با رسوب زیاد - رسوب‌زدایی مخازن با روش‌های مختلفی که در فصل ۱۴ ارایه شده است. - مدیریت مخزن با جریان غلیظ - مدیریت بهره‌برداری از مخزن - سازه‌های کنترل فرسایش سواحل و تثبیت سواحل	رسوب‌گذاری تشکیل دلتا و نهشته شدن رسوب در مخزن
- برداشت مکانیکی علف‌ها - استفاده از مواد شیمیایی - روش‌های بیولوژیکی	رشد علف‌های هرز و جلبک‌ها در مصب رودخانه و مخزن
- احداث نواحی خاصی برای تخم‌گذاری - لایروبی مکانیکی تپه‌های ماسه‌ای که به صورت دلتا در مصب رودخانه‌های ورودی ایجاد می‌شود. - استفاده از گونه‌های خاص ماهی و آبزیان دریاچه‌ای	مشکلی که برای ماهیها و آبزیان در مخزن به‌وجود می‌آید
- احداث نواحی خاص برای حیات وحش و جابجا کردن حیات وحش به آن منطقه نظیر ایجاد جزایر خاص	مشکلاتی که برای حیات وحش در اثر ساخت سد به‌وجود می‌آید

جدول ۷-۳- اقدامات پایین دستی سد به منظور کاهش اثرات زیست محیطی [۱۰۳]

نوع اقدامات	برای مقابله با
- مدیریت رهاسازی جریان و اصلاح آن	تغییر ناگهانی در رژیم جریان به خصوص کاهش بده غالب
- احداث دریچه های خروجی در ارتفاعات مختلف - رهاسازی از دریچه های نیروگاه	تغییر درجه حرارت آب رها شده
- اضافه کردن رسوب درشت دانه در پایین دست سد. روشی که از سال ۱۹۷۷ در رودخانه های اروپا انجام می گردد. - مدیریت رها سازی - احداث سازه های تثبیت کننده بستر	فرسایش بستر و سواحل
- قطع مکانیکی درختان - کنترل شیمیایی - کنترل بیولوژیکی - برداشت جزایر با روش لایروبی مکانیکی	رشد گیاهان و درختان هرز در رودخانه و کاهش ظرفیت آن
- احداث راه ماهی - اصلاح پره های توربین ها به نحوی که به ماهی های مهاجر صدمه ای وارد نسازد - احداث مناطق خاصی برای تخم گذاری - احداث مراکز پرورش ماهی و رهاسازی آن ها در رودخانه	عدم مهاجرت ماهی ها پس از احداث سد

پیوست ۱

روش‌های اندازه‌گیری، نمونه‌برداری
و تعیین خصوصیات جریان و رسوب

پ. ۱-۱- کلیات

در این فصل ابتدا روش‌های اندازه‌گیری شرایط جریان، رسوب بستر و رسوب معلق در رودخانه‌ها ارائه می‌شود سپس در خصوص نحوه نمونه‌برداری از حرکت جریان و رسوب و همچنین نمونه‌برداری از رسوب نهشته شده در مخزن سد مطالبی ارائه خواهد شد و در انتها نیز در رابطه با نحوه اندازه‌گیری خصوصیات رسوب در آزمایشگاه مطالبی ارائه خواهد شد.

پ. ۱-۲- اندازه‌گیری بده جریان

به منظور ثبت مداوم خصوصیت‌های جریان رودخانه‌ها نیاز است تا ابتدا در مقطعی از رودخانه ایستگاه آب‌سنجی احداث گردد. سپس در یک دوره زمانی مقادیر بده جریان اندازه‌گیری و منحنی بده اشل ایستگاه رسم گردد. بدیهی است پس از آن تنها با اندازه‌گیری اشل یا رقوم سطح آب می‌توان به کمک منحنی ایجاد شده مقادیر بده مربوطه را تعیین کرد. در این قسمت ایستگاه آب‌سنجی و روش اندازه‌گیری بده ارائه می‌شود.

پ. ۱-۲-۱- ایستگاه آب‌سنجی

هر ایستگاه آب‌سنجی مشتمل بر سازه‌ها و تجهیزاتی است که به منظور اندازه‌گیری و ثبت اشل و بده جریان به‌صورت تابعی از زمان در محل مشخصی از رودخانه احداث می‌شود. ارتفاع اشل همان تراز سطح آب نسبت به سطح مبنا دلخواه است که معادل تراز صفر می‌باشد. تراز صفر معمولاً نسبت به تراز سطح دریا اندازه‌گیری می‌شود. در اشکال (پ. ۱-۱)، (پ. ۱-۲) و (پ. ۱-۳) نماهایی از ایستگاه‌های آب‌سنجی معمولی نشان داده شده است. در تعدادی از ایستگاه‌ها اشل اندازه‌گیری شده از طریق خطوط تلفن یا ماهواره به بخش مرکزی یا مرکز دیسپاچینگ مخابره و در آن‌جا ضمن ثبت در بانک اطلاعاتی پردازش نیز می‌شوند. در ایستگاه‌های آب‌سنجی علاوه بر اندازه‌گیری شرایط جریان، خصوصیات کیفی آب و میزان رسوب نیز اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد.

پ. ۱-۲-۲- محاسبه بده جریان

اگر سرعت متوسط جریان رودخانه $\bar{V}$ ، و سطح مقطع جریان نیز A باشد مقدار بده (Q) برابر است با:

$$Q = A \cdot \bar{V} \quad (\text{پ. ۱-۱})$$

بنابراین برای محاسبه بده باید سطح مقطع جریان و سرعت متوسط رودخانه اندازه‌گیری شوند. مقدار A با استفاده از مقطع عرضی رودخانه و اشل قابل محاسبه است. مقدار $\bar{V}$ نیز با استفاده از یک سرعت‌سنج (مولینه) با رفتن به داخل آب در جریان‌های کم‌عمق و یا با استفاده از پل فلزی تلفریک و یا قایق در جریان‌های عمیق اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس توصیه USGS برای اندازه‌گیری بده، مقطع عرضی رودخانه به ۲۵ قسمت عمودی تقسیم می‌شود و در هر عمود، عمق و متوسط سرعت با استفاده از یکی از روش‌های پنج‌گانه‌ای که توضیح داده خواهد شد، اندازه‌گیری می‌گردد. متوسط سرعت مربوط به هر قسمت در مساحت مربوط به همان قسمت ضرب می‌گردد تا بده عبوری از آن قسمت به‌دست آید. در نهایت با جمع نمودن بده‌های هر قسمت، بده کل عبوری از مقطع رودخانه محاسبه می‌گردد (شکل پ. ۱-۳). بر اساس مطالعه ساور و میر^۱ در صورت انتخاب تعداد عمود کم‌تر خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد و مثلاً با ۱۷ عمود میزان خطا ۰/۷ درصد می‌باشد.

پ. ۱-۲-۳- محاسبه سرعت متوسط

تعیین سرعت متوسط در یک آبراهه به چند طریق امکان‌پذیر است:

الف- روش یک‌نقطه‌ای

در این روش اندازه‌گیری سرعت آب فقط در یک عمق اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب که بر روی هر خط قائم در نقطه‌ای که فاصله آن از سطح آب حدود ۰/۵ تا ۰/۷ عمق، معمولاً در ۰/۶ عمق از سطح آب، سرعت اندازه‌گیری و به‌عنوان سرعت متوسط در آن عمود در نظر گرفته می‌شود. این روش در مواقعی کاربرد دارد که عمق آب از ۷۰ سانتی‌متر کمتر باشد.

ب- روش دو نقطه‌ای

روش دو نقطه‌ای در شرایطی کاربرد دارد که در آن عمق آب رودخانه زیاد و از ۷۰ سانتی‌متر بیش‌تر باشد. در این حالت سرعت آب در هر عمود در دو نقطه یکی در ۰/۲ و دیگری در ۰/۸ عمق از سطح آب اندازه‌گیری و سرعت متوسط از رابطه (پ. ۱-۲) محاسبه می‌شود:

$$\bar{V} = \frac{1}{2}(V_{0.2d} + V_{0.8d}) \quad (\text{پ. ۱-۲})$$

ج- روش سه نقطه‌ای

در این روش در هر عمود سرعت آب در ۰/۱۵، ۰/۵ و ۰/۸۵ عمق از سطح آب اندازه‌گیری و میانگین ریاضی آنها متوسط سرعت آب خواهد بود.

$$\bar{V} = \frac{1}{3}(V_{0.15d} + V_{0.5d} + V_{0.85d}) \quad (\text{پ. ۱-۳})$$

د- روش پنج نقطه‌ای

در این روش سرعت آب در سطح (V_s)، در نزدیکی‌های کف (V_b) و همچنین در ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق از سطح آب اندازه‌گیری و سپس سرعت متوسط از رابطه (پ. ۱-۴) محاسبه می‌شود:

$$\bar{V} = \frac{1}{10}(V_s + 3V_{0.2d} + 2V_{0.6d} + 3V_{0.8d} + V_b) \quad (\text{پ. ۱-۴})$$

برای آنکه سرعت آب در یک مقطع از رودخانه به‌طور دقیق‌تر محاسبه شود می‌توان مقطع رودخانه را مطابق شکل شبکه‌بندی کرده و سرعت آب در محل هر یک از نقاط را اندازه‌گیری کرد.

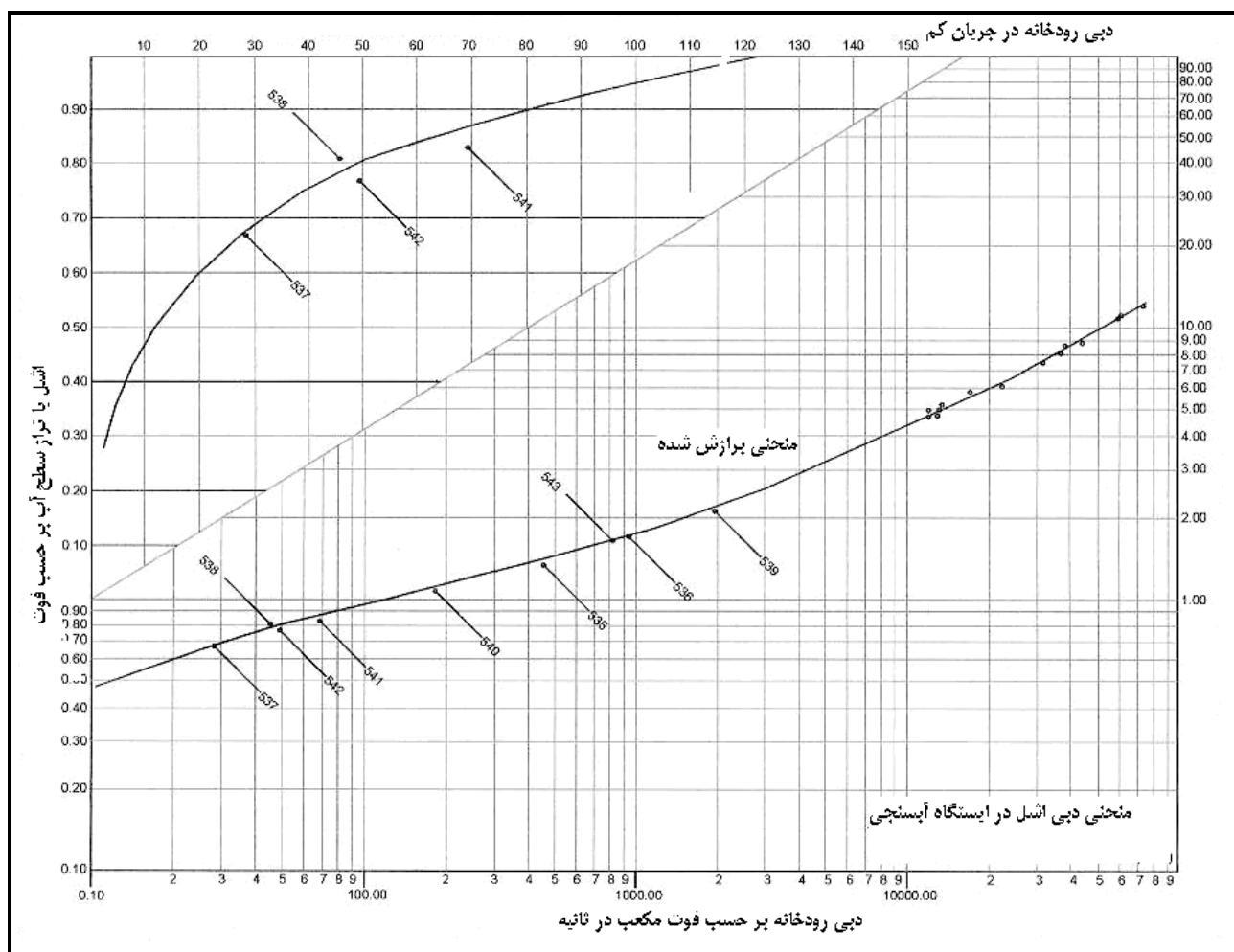
با داشتن سرعت در این نقاط خطوط هم‌سرعت مطابق آنچه در رسم نقشه‌های توپوگرافی مرسوم است رسم می‌شود. سرعت متوسط در مقطع نیز همانند پیدا کردن ارتفاع متوسط یک منطقه از روی خطوط هم‌سرعت محاسبه می‌شود.

با توجه به این که رسم خطوط هم‌سرعت وقت‌گیر است برای محاسبه سرعت متوسط در یک مقطع تعدادی نقاط در سطح آب در آن مقطع انتخاب و سرعت متوسط آب در امتداد هر یک از خطوط عمودی از این نقاط به داخل آب رسم و سپس با یکی از روش‌های پنج‌گانه که در بالا به آنها اشاره شد، اندازه‌گیری می‌شود.

پس از آنکه سرعت متوسط در امتداد هر یک از خطوط عمودی به دست آمد با میانگین‌گیری آنها می‌توان سرعت متوسط را به دست آورد. بر طبق استاندارد تعداد این خطوط عمودی نباید از ۲۰ کم‌تر باشد و هر چه بیشتر باشد بهتر و نتایج دقیق‌تر است. برای این منظور نخی را در عرض رودخانه بسته و نقاط مورد اندازه‌گیری روی نخ با علامت مشخص می‌شوند. سپس در محل هر علامت سرعت متوسط جریان اندازه‌گیری می‌شود و از روی آنها سرعت متوسط در مقطع به دست می‌آید.

پ. ۱-۲-۴- رابطه بده - اشل

با استفاده از اشل ثبت شده و بده معادل آن که از اندازه‌گیری‌های طولانی مدت به دست آمده‌اند، رابطه بده - اشل را می‌توان ایجاد کرد. شکل (پ. ۱-۴) مثالی از یک رابطه بده - اشل برای یک ایستگاه با کنترل مناسب را نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های اشل - زمان و رابطه بده - اشل، حداکثر بده روزانه و سالانه و حداقل بده جریان در ایستگاه تعیین می‌شود. در صورتی که در یک روز مشخص، اشل تغییر زیادی نکند، بده روزانه با استفاده از میانگین اشل در آن روز تعیین می‌شود. اما اگر تغییر سریع در اشل مشاهده شود، بده میانگین روزانه با استفاده از تبدیل منحنی اشل - زمان به بده - زمان و از طریق انتگرال‌گیری روی محدوده ۲۴ ساعت تعیین می‌گردد.



شکل پ. ۱-۴- رابطه بده - اشل در ایستگاه آب‌سنجی

پ. ۱-۳- اندازه‌گیری رسوب در رودخانه

پ. ۱-۳-۱- کلیات

مواد رسوبی که توسط جریان آب رودخانه‌ها منتقل می‌شوند به دو بخش کلی بار بستر و بار معلق تقسیم می‌شوند. بار بستر به مواد رسوبی اطلاق می‌شود که در نزدیک بستر و به صورت حرکت‌های لغزشی، چرخشی و یا جهشی در حرکت هستند. بار معلق از نظر اندازه ذرات ریزدانه‌تر از مصالح بار بستر می‌باشند. این ذرات از نزدیک بستر تا سطح آب ممکن است به صورت معلق پراکنده باشد. آگاهی از میزان انتقال مواد رسوبی در زمان‌های مختلف می‌تواند کمک کند که بتوان روابط ریاضی مورد نیاز را استخراج تا براساس آنها بتوان پیش‌بینی‌های لازم را انجام داد. هر چند که در حال حاضر روابط متعدد ریاضی بسیاری برای برآورد میزان حرکت مواد رسوبی ارایه شده‌اند ولی به دلیل پیچیدگی نحوه انتقال رسوب، هنوز رابطه مشخصی که برای تمام رودخانه‌ها بتواند کاربرد داشته باشد، ارایه نشده است. از این رو در تعیین میزان آورد رسوب رودخانه نیاز مبرم به داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد. ابزار متعدد اندازه‌گیری بار رسوبی در گذشته به وجود آمده‌اند که هر کدام برای شرایط خاصی مناسب می‌باشند. در این فصل این ابزار و روش‌ها ارایه می‌شوند.

پ. ۱-۳-۲- روش‌های اندازه‌گیری بار بستر

بار بستر معمولاً به صورت نرخ بار بستر بر حسب وزن در واحد زمان در واحد عرض اندازه‌گیری می‌شود. برای برای به‌دست آوردن بار بستر، وزن مواد بار بستری که از یک مقطع معین و در یک زمان مشخص عبور می‌کند باید اندازه‌گیری گردد. اطلاعات مربوط به بار بستر را می‌توان از طریق دو روش به‌دست آورد:

– روش اندازه‌گیری مستقیم

– روش اندازه‌گیری غیرمستقیم

به منظور اندازه‌گیری بار بستر، باید بخشی از تجهیزات دقیقاً به همان لایه‌ای وارد شود که بار بستر در آن حرکت می‌کند. البته معمولاً وسایل اندازه‌گیری الگوی جریان را به گونه‌ای بر هم می‌زند که رفتار و شدت بار بستر تغییر کند. همچنین تنظیم صحیح افقی و عمودی دستگاه با جهت حرکت بار بستر اغلب مشکل است. علاوه بر این، ابزار قادر نیستند کلیه اندازه‌های بار بستر از درشت‌ترین تا ریزترین را جمع‌آوری کنند.

برای اندازه‌گیری صحیح بار بستر باید به نکات زیر توجه داشت:

الف- وسایل اندازه‌گیری بار بستر باید واسنجی شده و بازده آنها یعنی نسبت بار بستر نمونه‌برداری شده به مقدار واقعی آن تعیین گردد. بازده نمونه‌بردارهای بار بستر در فلووم‌های آزمایشگاهی با بسترهای ثابت و متحرک و از طریق آزمودن مدل‌های مقیاسی تعیین می‌شود.

ب- میزان بار بستر در هر مقطع جریان نسبت به زمان و مکان در معرض نوسان قرار دارد، که نوسانات آن نسبت به زمان به دلیل تغییرات توزیع تنش برشی در هر مقطع می‌باشد. بنابراین بهتر است در نقاط مختلفی از مقطع اندازه‌گیری‌های بلندمدت صورت گیرد. بهتر است در انتخاب وسیله زمان‌سنج قابل اطمینان نیز دقت شود.

ج- عملکرد ناصحیح وسایل اندازه‌گیری، منجر به نتایج اشتباهی می‌شود. در چنین شرایطی ممکن است نمونه‌برداری، مواد بستر را از بستر رودخانه بکند و یا مواد بار معلق را جمع‌آوری کند.

د- فرم بستر بر چگونگی نمونه‌برداری تأثیر می‌گذارد. از این رو در رودخانه‌هایی که امکان تشکیل فرم بستر می‌باشد باید دقت کافی به عمل آید.

ه- هنوز پاسخ قانع‌کننده‌ای به این سؤال که «ضخامت بار بستر واقعا چقدر است؟» داده نشده است. به‌خصوص اگر لازم باشد براساس داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه‌ای به‌دست آید باید در جمع‌آوری داده‌ها دقت بیش‌تری شود. ضخامت لایه‌ای که در آن بار بستر حرکت می‌کند برای هر بازه رودخانه متفاوت است و مقدار آن حداقل دو برابر قطر D_{65} مصالح رسوبی کف می‌باشد.

پ. ۱-۲-۳-۱- اندازه‌گیری بار بستر به صورت مستقیم

نمونه‌بردارهایی که بار بستر را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند در این قسمت ارائه می‌شوند و عبارتند از:

- نمونه‌بردارهایی از نوع جعبه و توری^۱

این نوع نمونه‌بردارها از یک محفظه که بار بستر را جمع‌آوری می‌کند، یک قاب کمکی، کابل‌هایی که جهت انتقال نمونه‌بردار استفاده می‌شوند و یک پره که نمونه‌بردار را در جهت مناسب قرار می‌دهد، تشکیل شده است. عملیات نمونه‌برداری شامل پایین‌آوردن نمونه‌بردار تا محلی که با بستر تماس پیدا کند، باز کردن دریچه جلویی نمونه‌بردار و تعیین مدت نمونه‌برداری توسط زمان‌سنج است. آب و بار بستر وارد جعبه یا تور می‌شوند و سرعتشان به وسیله دیواره کاهش می‌یابد در نتیجه بار بستر در توری باقی می‌ماند. در پایان اندازه‌گیری دریچه بسته شده و مدت زمان اندازه‌گیری ثبت می‌گردد. آنگاه نمونه‌بردار بالا کشیده می‌شود و مواد رسوبی درون توری توزین می‌گردد.

منابع خطای متعددی در استفاده از این وسایل وجود دارند؛ وجود جعبه یا توری که گاهی با مانع همراه می‌باشند باعث افزایش مقاومت جریان می‌شود، به همین دلیل در محل دهانه ورودی نمونه‌بردار افزایش فشار توأم با کاهش سرعت جریان رخ می‌دهد. این مساله خصوصاً لایه آب-رسوب نزدیک بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه مصالح بستر در جلوی نمونه‌بردار انباشته شده که منجر به خطای اندازه‌گیری می‌گردد. به منظور رفع این معایب تغییراتی در طراحی تعدادی از ابزار انجام شده است.

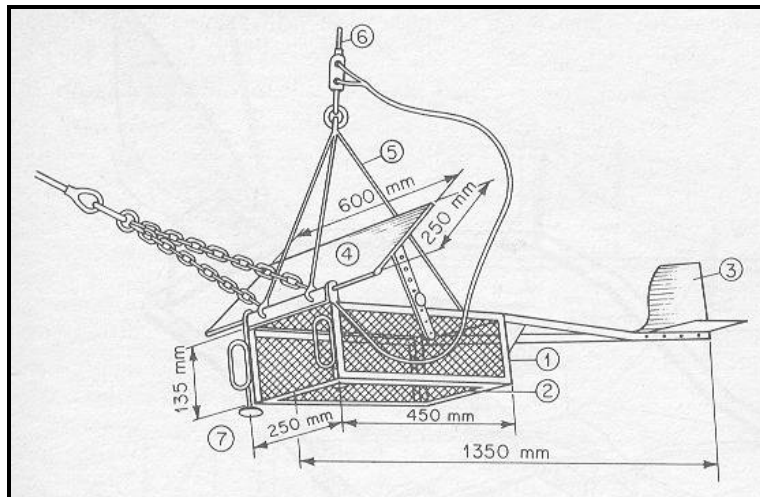
منبع خطای بعدی ممکن است در نتیجه این که نمونه‌بردار دقیقاً روی بستر قرار نگرفته باشد به وجود آید. در چنین شرایطی، این احتمال وجود دارد که در زیر نمونه‌بردار یک نوع فرسایش موضعی رخ دهد. جنس کف نمونه‌بردار باید به گونه‌ای باشد که به آسانی با فرم بستر موجود تطبیق پیدا کند. پیشنهاد شده است که از صفحاتی از جنس لاستیک یا توری سیمی استفاده شود. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد این است که کل حجم نمونه‌بردار نباید پر شود. معمولاً در زمان واسنجی نمونه‌بردار دامنه صحیح این مقدار مشخص می‌گردد، اما به‌طور کلی از پر کردن بیش از ۶۰ درصد حجم کل نمونه‌بردار باید خودداری نمود.

نمونه‌بردارهای بار بستر از نوع جعبه - توری طی سال‌ها و در طراحی‌های متعددی ساخته و توسعه داده شده‌اند. نمونه‌بردار موهل هوفر^۲ از این نوع نمونه‌بردارها است که توسط موهل هوفر (۱۹۳۳) طراحی و ساخته شد. شکل (پ. ۱-۵) طرح اولیه این نمونه‌بردار

1- Box and Basket type

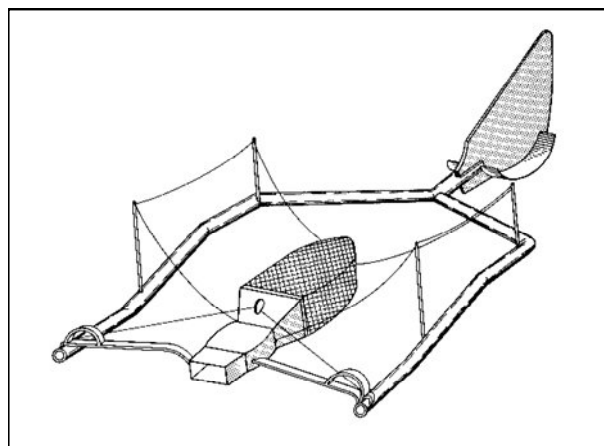
2- Mühlhofer

دارای یک کف صلب بود که بعدها حلقه‌های آهنی به هم بافته‌شده‌ای که قابلیت بیش‌تری در تطابق با فرم بستر داشتند، جایگزین آن شد.



شکل پ. ۱-۵- نمونه‌بردار بار بستر Mühlhofer

تازه‌ترین طرح‌های نمونه‌بردار بار بستر از نوع اختلاف - فشار هستند. شاید یکی از بهترین و شناخته‌شده‌ترین این نوع نمونه‌بردارها، نمونه‌بردار معروف به آرنهم^۱ یا دستگاه سنجش بار بستر^۲ باشد، که در شکل (پ. ۱-۶) نشان داده شده است. هدف این نمونه‌بردار اندازه‌گیری بار بستر حاوی ماسه درشت و شن‌ریز است. نمونه‌بردار بر روی یک قاب سوار شده است و یک فنر شاخه‌ای آن را به بستر فشار می‌دهد. این وسیله دارای وزنی معادل ۵۷ کیلوگرم است که توسط یک جرثقیل مهار می‌شود.



شکل پ. ۱-۶- نمونه‌بردار بار بستر (BTMA) Arnhem

نمونه‌بردار بار بستر دیگر در هلند، توسط وینکرز و همکاران در سال ۱۹۵۳ طراحی و ساخته شده است، که تحت نام اسفینکس^۳ شناخته می‌شود. جریان از طریق یک دهانه نسبتاً کوچک وارد می‌شود و به صورت مارپیچی حرکت می‌کند، در نتیجه بار بستر در

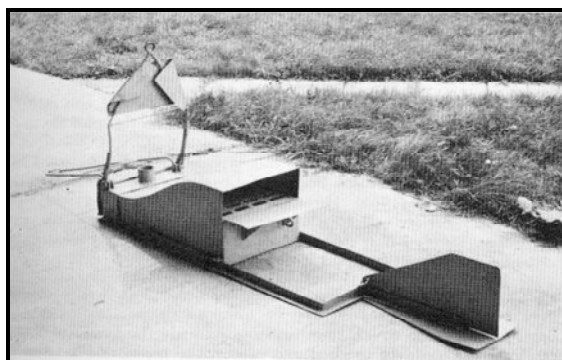
1- Arnhem

2- Bedload transport Meter

3- Sphinx

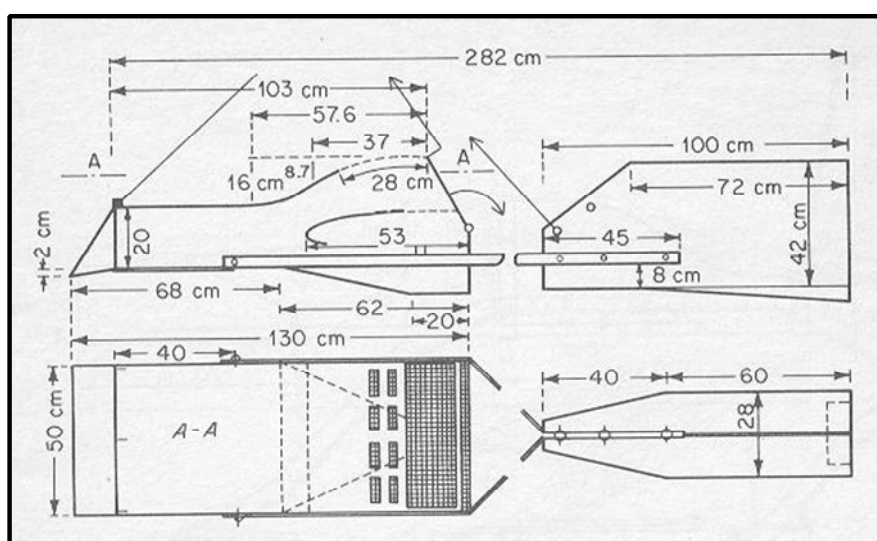
نمونه‌بردار جمع می‌شود و در نهایت از طریق یک دهانه بزرگ‌تر نمونه‌بردار را ترک می‌کند. بر اساس نظر نواک (۱۹۵۹) نمونه‌بردارهای آن‌هم و اسفینکس از راندمان خوبی برخوردارند.

نمونه‌بردار نوع جعبه‌ای که ارتفاعش به طرف عقب افزایش می‌یابد، توسط کارولی (۱۹۴۷) طراحی شد. طرح کلی آن در شکل (پ. ۱-۷) آمده است. وزن کل دستگاه حدود ۹۰ کیلوگرم و جنس جعبه از صفحات فولادی است. مخلوط آب و رسوب وارد نمونه‌بردار می‌شود. قسمت عقب جعبه دارای یک دیواره مشبک جداکننده است. بار بستر در زیر این دیواره به دام می‌افتد. آب صاف به طرف بالا حرکت کرده و از قسمت خروجی خارج می‌شود.



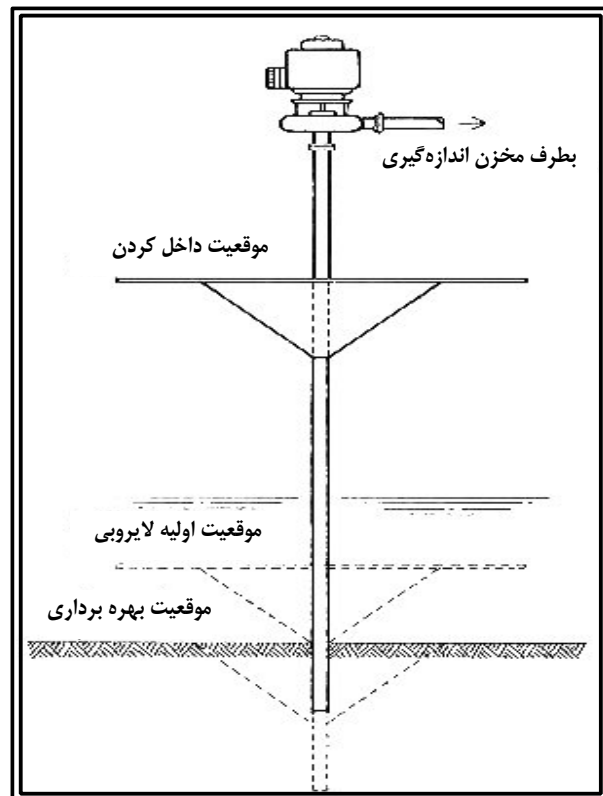
شکل پ. ۱-۷- نمونه‌بردار بار بستر کارولی

نمونه‌بردار کارولی توسط نواک (۱۹۵۹) مورد بررسی قرار گرفت و اصلاحاتی در آن به‌وجود آمد. الگوی جریان در داخل این نمونه‌بردار به طور دقیق مورد آزمایش قرار گرفت و منجر به طراحی مجدد هندسه نمونه‌بردار کارولی گردید که به نمونه‌بردار VUV معروف است و در شکل (پ. ۱-۸) نشان داده شده است. از میان کلیه نمونه‌بردارهایی که توسط نواک (۱۹۵۹) مورد آزمایش قرار گرفتند و تعدادشان نسبتاً کم است، راندمان نمونه‌برداری VUV از همه بهتر و حدود ۷۰ درصد بود.



شکل پ. ۱-۸- نمونه‌بردار بار بستر VUV

- نمونه بردارهای Pit-type



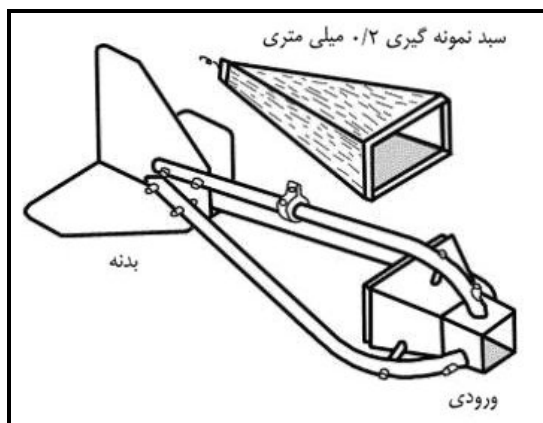
شکل پ. ۱-۹- نمونه بردار دستی پیت

ممکن است برای به تله اندازی و جمع آوری بار بستر در کف آبراهه گودال هایی تعبیه شود، در این حالت با نصب یک وسیله مکانیکی که به صورت مداوم رسوبات جمع شده را خارج می کند، می توان بده بار بستر را در محل اندازه گیری مرتباً ثبت کرد. راندمان این نمونه بردار نسبتاً بالا گزارش شده است. شکل (پ. ۱-۹) نمونه ای از این نمونه بردار را که توسط هابل پیشنهاد شد، نشان می دهد.

- نمونه بردار بار کف هلی واسمیت

نمونه بردار بار کف هلی واسمیت در سال ۱۹۷۱ توسط هلی واسمیت ساخته شد و در واقع از نظر ساختاری نوع اصلاح شده نمونه بردار آرnhem است. این نمونه بردار که امروزه در سطح وسیعی در تمام دنیا از آن استفاده می شود، متشکل از یک چهارچوب با قاب لوله ای، با دهانه ورودی نسبتاً بزرگ چهار گوشه ای از فلز زنگ نزن می باشد که دیواره های گسترش یافته در قسمت عقب، آن را در برمی گیرد. به انتهای این دیواره کیسه نمونه گیری رسوب با ابعاد و سوراخهای مشخص وصل می گردد (شکل پ. ۱-۱۰).

در اندازه گیری به روش نمونه برداری که یکی از روش های مستقیم اندازه گیری می باشد، با تعیین میزان بار رسوب عبور کرده در واحد زمان در یک بخش رودخانه و گسترش آن برای عرض رودخانه می توان بار بستر را تعیین کرد. لذا به منظور نمونه برداری از بار بستر پس از آماده سازی و تنظیم دستگاه نمونه بردار و تهیه لوازم مورد نیاز از قبیل زمان سنج، کیسه های پلاستیک جهت نمونه و برچسب ها جهت تعیین مشخصات و سایر لوازم مورد نیاز، به صورت زیر اقدام می گردد:



شکل پ. ۱-۱۰- نمونه بردار بار بستر هلی و اسمیت

- ابتدا عرض بستر رودخانه متناسب با اندازه آن به چند قسمت مساوی از نظر بده تقسیم می‌شود.
- از میان هر قسمت پس از تعیین فاصله آن نسبت به منبع شاخص در ساحل سه بار نمونه بار کف گرفته می‌شود.
- در صورت وجود اختلاف زیاد بین نمونه‌ها، نمونه‌برداری برای یک یا چند بار دیگر تکرار می‌شود.
- زمان پایین بردن نمونه بردار در آب و بیرون کشیدن آن تا حد امکان کوتاه باشد.
- مدت زمان قرار گرفتن نمونه بردار در بستر رودخانه به میزان بار بستر بستگی دارد و این مدت به صورت تجربی به دست می‌آید، اما باید توجه نمود که بیش از ۶۰ درصد حجم کیسه نمونه بردار پر نشود.
- دستگاه نمونه بردار باید به صورت افقی در بستر رودخانه قرار گیرد، در صورتی که بدلیل سرعت و بده زیاد دستگاه در کف بستر ثابت نگردد، باید از وزنه‌های اضافی و یا نمونه بردار سنگین‌تر استفاده کرد.
- پس از برداشت هر نمونه باید کیسه نمونه بردار را کاملاً تخلیه کرد و مشخصات مقطع و مدت زمان و غیره را بر روی آن ثبت نمود.
- بدیهی است همزمان با نمونه برداری بار کف در ابتدا اندازه‌گیری بده و نمونه برداری از بار معلق و مواد کف بستر رودخانه همزمان انجام می‌گیرد و همچنین نسبت به یادداشت اشل در ابتدا و انتهای نمونه اقدام می‌گردد.

پ. ۱-۳-۲-۲- اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم

زمانی که بار بستر بر روی بستر حرکت می‌کنند، امواج صوتی تولید شود که در صورت ضبط امواج می‌توان به‌طور غیرمستقیم میزان بار بستر را به دست آورد. دستگاه مذکور از یک میکروفون زیر آبی که در فاصله مشخصی از بستر قرار داده می‌شود، یک آمپلی‌فایر و یک ثبات تشکیل شده است. یک نمونه از این نمونه‌بردارها دارای میکروفونی است که بر روی یک پایه صفحه‌ای شکل سوار می‌شود، این صفحه به نوبه خود بر روی بستر قرار می‌گیرد. به این ترتیب صداهای تولید شده در اثر برخورد ذره به ذره به دستگاه، ثبت می‌گردد.

وسیله دیگری وجود دارد که هر چند بر اساس امواج فراصوتی کار می‌کند اما روش کار آن کاملاً متفاوت است. مبنای کار این وسیله امواج فراصوتی است. در این وسیله فرستنده و گیرنده به گونه‌ای قرار داده می‌شوند که مخلوط آب - رسوب از میان آن دو

می‌گذرد. در غلظت‌های مختلف مقادیر متفاوتی از انرژی جذب می‌گردد. یک نمونه از این نمونه‌بردارها که برای اندازه‌گیری بده بار بستر در مواقعی که میزان ماسه ریز زیاد است به کار می‌رود.

پ. ۱-۳-۳- اندازه‌گیری بار معلق

بار معلق رودخانه از حاصل ضرب غلظت رسوب معلق در مقدار بده به دست می‌آید. چون غلظت رسوب معلق هم نسبت به عمق و هم نسبت به عرض متفاوت است می‌توان از رابطه (پ.۱-۵) مقدار بار معلق در هر مقطع از رودخانه را محاسبه کرد:

$$Q_s = \sum_{i=1}^n C_i Q_i \quad (\text{پ.۱-۵})$$

که در آن C_i عبارت است از متوسط غلظت رسوب در عمق و i نشان‌دهنده شماره بخشی از مقطع می‌باشد که در آن بخش غلظت اندازه‌گیری شده است و n تعداد زیربخش‌های هر مقطع عرضی را نشان می‌دهد. Q_i نیز عبارت است از مقدار بده مربوط به هر زیربخش مقطع عرضی.

برای تقسیم مقطع عرضی به زیربخش‌ها دو روش استفاده می‌شود. یکی روش تقسیم به زیربخش‌هایی با بده یکسان، روش EDI و دیگری تقسیم به زیربخش‌هایی با عرض یکسان، روش EWI^۱. در روش EDI، تمام مقطع عرضی به حداقل ۴ و حداکثر ۹ زیربخش با بده مساوی ولی با عرض‌های متفاوت تقسیم می‌شود. آنگاه مقدار غلظت متوسط عمقی رسوب معلق (C_i) در هر خط قائم در مرکز هر زیربخش با یکی از روش‌هایی که در ادامه این قسمت ارایه شده‌اند، اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه به یکسان بودن مقدار بده در هر زیربخش رابطه (پ.۱-۵) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q_s = Q_n \sum_{i=1}^n C_i \quad (\text{پ.۱-۶})$$

که در آن Q_n عبارت است:

$$Q_n = \frac{Q}{n} \quad (\text{پ.۱-۷})$$

در روش EDI تعداد خطوط قائم که در آنها C_i اندازه‌گیری می‌شود کمتر از روش EWI است ولی برای استفاده از این روش ضروری است که ابتدا توزیع عرضی بده در مقطع عرضی مشخص باشد تا بتوان آن را به زیربخش‌هایی با بده مساوی تقسیم کرد. در روش EWI لازم است تا عرض مقطع به حداقل ده و حداکثر ۲۰ زیربخش تقسیم و مقدار C_i در هر خط قائم در مرکز هر زیربخش اندازه‌گیری گردد. با توجه به این که مقدار بده در هر زیربخش با دیگر زیربخش‌ها متفاوت است ضروری است تا مقدار بده هر زیربخش با روش‌هایی که قبلاً ارایه شد، اندازه‌گیری گردد. در آن صورت مقدار بده بار معلق از رابطه (پ.۱-۵) به دست خواهد آمد.

برای اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق نمونه‌بردارهای مختلفی برای شرایط مختلف طراحی شده است که در ادامه ارایه می‌شوند. هدف این نمونه‌بردارها برداشت نمونه‌ای است که معرف مخلوط آب و رسوب در حال حرکت در مجاورت نمونه‌بردار باشد. ضوابطی که برای طراحی و ساخت نمونه‌بردارهای غلظت مواد معلق باید لحاظ گردد عبارتند از:

- امکان ورود آب به نازل به صورت ایزوسیتتیک باشد (در نمونه‌بردارهای ایزوسیتتیک، در حین ورود آب به روزنه هیچ تغییری در سرعت و جهت آن رخ نمی‌دهد).
 - نازل نمونه‌بردار باید تا حدی که از نظر فیزیکی ممکن است به بستر جریان نزدیک باشد.
 - آشفتگی الگوی جریان به‌خصوص در نزدیکی نازل باید به حداقل ممکن برسد.
 - دارای قابلیت سازگاری با وسایل اندازه‌گیری موجود باشد
 - تا حد ممکن ساده و نگهداری آن آسان باشد.
 - لازم است تا اندازه بطری که نمونه آب و رسوب درون آن قرار می‌گیرد استاندارد در نظر گرفته شود.
- نمونه‌بردار غلظت مواد معلق دارای نازلی است که در جهت جریان قرار می‌گیرد. بخشی از جریان از طریق نازل وارد محفظه نمونه‌بردار می‌شود و در این زمان هوای داخل محفظه تحت تاثیر ترکیبی از سه نیروی زیر تخلیه می‌گردد:
- بار دینامیکی در قسمت ورودی نازل
 - بار منفی در انتهای لوله تخلیه هوا در اثر جدایی جریان
 - فشار مثبت ناشی از اختلاف ارتفاع بین ورودی نازل و لوله تخلیه هوا

پ. ۱-۳-۳-۱- نمونه‌بردارهای عمقی یا تجمعی

نمونه‌بردار عمقی به منظور جمع‌آوری یک نمونه از راستای عمودی جریان به صورت پیوسته و ایزوسیتتیک طراحی شده است. نمونه‌بردار عمقی ساده، در حالیکه که به طرف بستر پایین آورده و سپس به سطح آب برمی‌گردد نمونه‌ای از آب و رسوب را جمع‌آوری می‌کند.

نمونه‌بردار عمقی، متصدی را قادر می‌سازد که از نقاط یا قسمت‌هایی از یک عمود مشخص به طور ایزوسیتتیک نمونه‌برداری کند. در مقاطعی که عمق جریان از ده متر کمتر باشد، از تمام عمق جریان می‌توان در یک جهت و در یک زمان از طریق بازکردن شیر و حرکت از سطح به کف و بالعکس نمونه‌برداری کرد. مقاطعی که عمق آنها بیش از ده متر است بهتر است به بازه‌های ده متری یا کوچک‌تر تقسیم شوند و نمونه‌بردار نمونه‌هایی را که در هر مقطع از بالا به پایین و برعکس برداشت شده‌اند، در محفظه‌های جداگانه‌ای به صورت جفت‌جفت برداشت کند. نمونه‌برداری‌های عمقی زیادی تاکنون ارایه شده‌اند که ذیلاً تعدادی از آنها ارایه می‌گردد:

- نمونه‌بردارهای دستی - US DH-76 و US DH-59، US DH-48، US DH-75، US DH-81

در صورتی که مسئول نمونه‌بردار بتواند به درون رودخانه وارد شود یا دسترسی به آن از طریق یک کابل نقاله یا پل امکان‌پذیر باشد، می‌توان یکی از پنج نمونه‌بردار کم‌وزن دستی را جهت نمونه‌برداری غلظت مواد معلق به‌کار برد. نمونه‌بردار DH-81 (شکل پ. ۱-۱۱) از یک آداپتور DH-81A و کلاهک D-77 و نازل تشکیل شده است. این نوع ساختمان، نمونه‌بردار را قادر می‌سازد

که نمونه‌های عمقی را جهت تحلیل‌های میکروبی نیز جمع‌آوری کند. DH-81 را می‌توان همراه با نازل‌های $\frac{1}{8}$ ، $\frac{3}{16}$ و $\frac{1}{4}$ اینچ به‌کار

برد. ارتفاع ناحیه نمونه‌برداری شده بستگی به نازل مورد استفاده دارد. این نمونه‌بردار به دلیل طراحی خاصی که دارد، برای نمونه‌برداری در شرایط آب و هوایی سرد مناسب است.



شکل پ. ۱-۱۱ - نمونه‌بردار بار معلق DH-81

DH-75 دارای وزنی معادل ۰/۴۰۸ کیلو گرم (۰/۹ پوند) است و در دو نمونه موجود است: DH-75P و DH-75Q، که به ترتیب محفظه‌های پلاستیکی با حجم یک پاینت و یک کوارت را می‌پذیرند.

مشخصه نمونه‌بردار DH-48 (شکل پ. ۱-۱۲) یک بدنه آلومینیومی، به شکل آیرودینامیک و با طول حدود ۳۳ سانتی‌متر (۱۳ اینچ) است که محفظه نمونه‌بردار را در خود جای داده است.

دو نمونه‌بردار کم‌وزن DH-59 و DH-76 (اشکال پ. ۱-۱۳ و پ. ۱-۱۴) برای جریان‌های کم‌عمق و سرعت جریان‌های بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) طراحی شده‌اند، که اولی قادر است نمونه رسوبات معلق را تا فاصله ۸ سانتی‌متری (۳/۲۵ اینچ) و دومی تا فاصله ۷/۵ سانتی‌متری (۳ اینچ) از بستر جمع‌آوری کند.



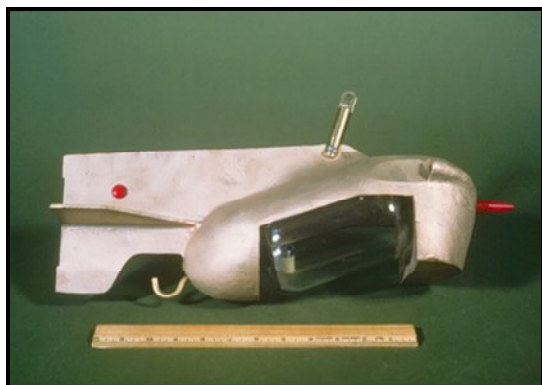
شکل پ. ۱-۱۲ - نمونه‌بردار بار معلق DH-48

- نمونه‌بردارهای US P-61، US D-77، US D-74، US P-63 و US P-72

در شرایطی که رودخانه به گونه‌ای باشد که امکان عبور از آن وجود نداشته باشد و در عین حال عمق آن کم‌تر از ۳ متر (۱۵ فوت) باشد، نمونه‌بردارهای عمقی D-74 و D-77 را می‌توان جهت برداشت نمونه‌های غلظت رسوب معلق به کار برد. شکل (پ. ۱-۱۵)، یک نمونه‌بردار ۶۲ پوندی را نشان می‌دهد. طراحی آن به گونه‌ای است که از یک جرثقیل بوسیله یک میله استاندارد آویزان می‌شود. این نمونه‌بردار دارای بدنه‌ای از جنس برنز (یا آلومینیوم)، به شکل آیرودینامیک و به طول ۶۰ سانتی‌متر (۲۴ اینچ) می‌باشد.

که محفظه نمونه‌بردار را در برگرفته است. این بدنه دارای یک پروانه است که نمونه‌بردار و نازل ورودی را در راستای جریان قرار می‌دهد.

نازل‌ها در قطرهای $\frac{1}{8}$ ، $\frac{3}{16}$ و $\frac{1}{4}$ اینچ موجود هستند که در صورت تغییر شرایط جریان قابل تعویض با یکدیگر هستند.



شکل پ. ۱-۱۴ - نمونه‌بردار بار معلق DH-76



شکل پ. ۱-۱۳ - نمونه‌بردار بار معلق DH-59



شکل پ. ۱-۱۶ - نمونه‌بردار بار معلق D-77



شکل پ. ۱-۱۵ - نمونه‌بردار بار معلق D-74

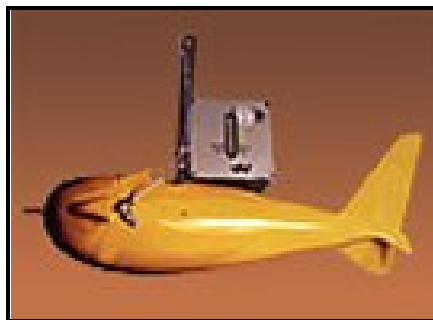
همزمان با ورود آب از نازل، هوا نیز از طریق دریچه تخلیه به بیرون خارج می‌شود و محفظه نمونه‌بردار پر می‌شود. نازل ورودی را می‌توان در حین نمونه‌برداری تا حدود فاصله ده سانتی‌متری (۴ اینچی) از بستر جریان پایین آورد (این مقدار برای نمونه‌های آلومینیومی ۱۱ سانتی‌متر $(\frac{1}{3}$ اینچ) است.

طراحی و پیکربندی D-77 شکل (پ. ۱-۱۶)، در مقایسه با D-74 و نمونه‌های پیش از آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است. طول نمونه‌بردار $\frac{73}{66}$ سانتی‌متر (۲۹ اینچ) و وزن آن $\frac{34}{0.2}$ کیلوگرم (۷۵ پوند) است. این نمونه‌بردار جمع‌آوری نمونه‌های شیمیایی و بیولوژیکی به روش انتگرالسیون عمقی در حجم بالا (۲۷۰۰ میلی‌لیتر) و در دماهای نزدیک به انجماد و زیر انجماد را امکان‌پذیر می‌سازد. اگرچه نازل‌های $\frac{1}{8}$ ، $\frac{3}{16}$ و $\frac{1}{4}$ اینچی موجود هستند، اما فقط نازل‌های $\frac{5}{16}$ اینچی برای این نمونه‌بردار توصیه می‌شود. فاصله بین نازل و کف نمونه‌بردار $\frac{17}{5}$ سانتی‌متر (۷ اینچ) است.

پ. ۱-۳-۲- نمونه‌بردارهای نقطه‌ای

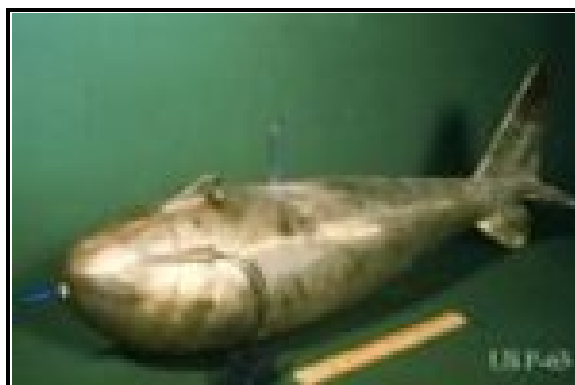
نمونه‌بردارهای نقطه‌ای در مقایسه با انواع ساده نمونه‌بردارهای عمقی دارای قابلیت‌های بیش‌تری هستند. این نمونه‌بردارها را می‌توان به منظور جمع‌آوری نمونه رسوب معلق در هر عمقی از سطح جریان تا فاصله چند سانتی‌متری بستر، به کار برد. این نمونه‌بردارها به منظور محاسبه تجمعی رسوب در جریان‌های بسیار عمیق (یا بسیار سریع) طراحی شده‌اند. در نمونه‌برداری به روش نقطه‌ای می‌توان نمونه‌برداری را از هر عمقی شروع کرد و آن را به طرف بالا یا پایین به‌طوری که حداکثر فاصله عمودی از نقطه ابتدایی ده‌متر (۳۰ فوت) باشد، ادامه داد. در نمونه‌بردار نقطه‌ای یک نازل $\frac{3}{16}$ اینچی به کار رفته است که موازی جهت جریان قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که سطح مقطع آن به سمت ذراتی است که به آن نزدیک می‌شوند. همزمان با وارد شدن نمونه، هوا از داخل محفظه به طرف پایین دست تخلیه می‌گردد. دخول آب و خروج هوا توسط یک شیر از بالا کنترل می‌شود. نمونه‌بردارهای نقطه‌ای که در حال حاضر ساخته می‌شوند و در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: P-61، P-63 و P-72، که نمونه‌های اولیه این نمونه‌بردارها P-46 و P-50 بودند.

روش‌های نمونه‌برداری با استفاده از این نمونه‌بردارهای قدیمی شبیه به انواع جدید آنهاست. تفاوت‌های اصلی آنها در نحوه قرارگیری و باز و بسته شدن شیر و قیمت آنها می‌باشد. نمونه‌های جدید شیر ساده‌تری دارند و ارزان‌ترند. نمونه‌بردار P-61 با وزن ۴۷/۶۳ کیلوگرم (۱۰۵ پوندی) را می‌توان هم در روش تجمعی و هم نقطه‌ای حد اکثر تا عمق جریان ۶۵ متر (۱۸۰ فوت) به کار برد (شکل پ. ۱-۱۷). شیر نمونه‌بردار P-61 دو حالت دارد: وقتی که به سیم‌پیچ استوانه‌ای انرژی داده نمی‌شود، شیر در حالت قفل قرار دارد که در این حالت مسیرهای ورود آب و خروج هوا بسته می‌شوند. وقتی که به سیم‌پیچ انرژی داده می‌شود، شیر در حالت نمونه‌برداری قرار می‌گیرد که در این حالت مجاری خروج هوا و ورود آب باز هستند و ارتباط محفظه نمونه با حفره کلاhek قطع می‌شود.



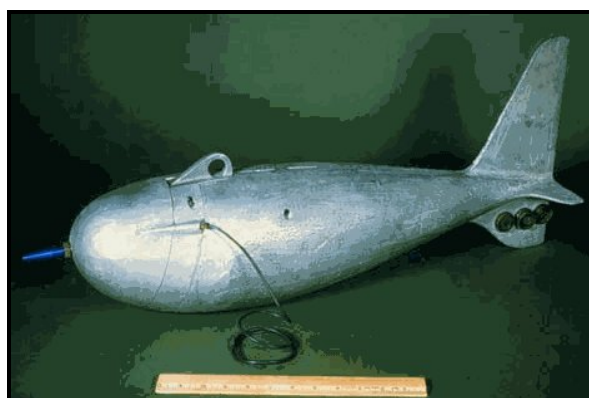
شکل پ. ۱-۱۷- نمونه‌بردار بار معلق P-61

P-63 (شکل پ. ۱-۱۸) نمونه‌بردار رسوبات معلق نقطه‌ای به وزن ۹۰/۷۲ کیلوگرم (۲۰۰ پوند) است که برای سرعت‌های بالا مناسب‌تر است و از نظر درپوش اساساً شبیه P-63 است.



شکل پ. ۱-۱۸ - نمونه بردار بار معلق P-63

تفاوت‌های اساسی P-63 با P-61 در اندازه و وزنشان است. نمونه بردار P-63 از جنس برنز قالب‌گیری شده است، طول آن ۸۶/۳۶ سانتی‌متر (۳۴ اینچ) است و ظرفیت یک بطری مایونز استوانه‌ای با ظرفیت یک کوارت را دارد. حداکثر عمق نمونه‌برداری آن مشابه P-61 است، یعنی در حدود ۴۰ تا ۵۰ متر می‌باشد. نمونه بردار P-72 با وزن ۱۸/۶ کیلوگرم (۴۱ پوند) یک نمونه سبک وزن P-61 است (شکل پ. ۱-۱۹). مشخصه آن یک پوسته آیرودینامیکی است که بیش‌تر از جنس آلومینیوم است تا برنز، که برای P-61 به کار می‌رود. نمونه بردار P-72 از نظر نمای خارجی، نازل ورودی $\frac{3}{16}$ اینچی، درپوش سلنویید و تجهیزات مربوط به محفظه‌ها مشابه P-61 است. هرچند حداکثر سرعت جریان در حین کار با P-72، ۲/۷ متر بر ثانیه توصیه شده است در مقابل، این رقم برای P-61، ۳۳/۲ متر بر ثانیه است. هم‌چنین عمق کارایی این نمونه بردار (P-72) بین ۱۷ تا ۲۴ متر، کم‌تر از نصف حداکثر عمق کارایی P-61، می‌باشد.



شکل پ. ۱-۱۹ - نمونه بردار بار معلق P-72

کلیه نمونه بردارهای نقطه‌ای که برای اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق طراحی شده‌اند، دارای یک کابل فولادی با هسته رسانای داخلی و عایق‌بندی شده می‌باشند. جریان از طریق کابل به سیم‌پیچ موجود در درپوش نمونه بردار هدایت می‌شود و معمولاً از طریق باتری‌های ۲۴ تا ۴۸ ولتی که به‌طور سری به هم متصل شده‌اند، تامین می‌شود. در صورتیکه طول کابل تعلیق بیش از ۳۰ متر باشد، ترجیحاً از ولتاژ بالاتر استفاده می‌شود.

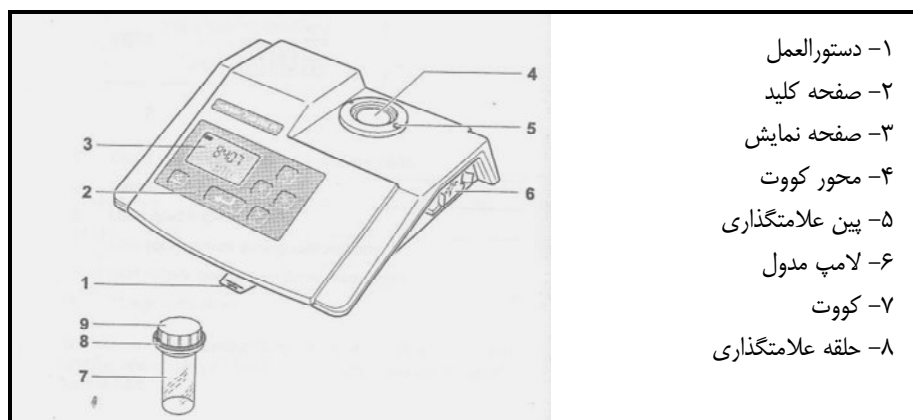
پ. ۱-۳-۴- اندازه‌گیری کدورت

کدورت یا تیرگی عبارت است از میزان یا شدت نوری که توسط ذرات جامد پراکنده می‌شود. مقدار کدورت به عوامل متعددی از قبیل غلظت رسوب، اندازه ذرات رسوب، شکل رسوب، نوع مواد معدنی تشکیل‌دهنده رسوب، مواد آلی درون آب و رنگ رسوب بستگی دارد. میزان کدورت در ابتدا توسط کدورت‌سنج شمعی جکسون^۱ که شامل سیلندر شیشه‌ای مدرج بلندی بود و شمع استاندارد زیر آن قرار می‌گرفت، اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری کدورت، آب حاوی رسوب به درون سیلندر ریخته می‌شد تا در یک ارتفاعی قرار گیرد که دیگر نور شمع از بالا قابل رویت نباشد. امروزه از این وسیله دیگر استفاده نمی‌شود و در حال حاضر از کدورت‌سنج‌هایی که اساس آنها بر اندازه‌گیری مقدار کاهش شدت نور عبور کرده از یک فاصله مشخصی استوار می‌باشد، استفاده می‌گردد. در حال حاضر کدورت‌سنج‌های گوناگونی با دقت‌های متفاوت توسط شرکت‌های تجاری به بازار عرضه شده‌اند. وسایلی نیز که قادر هستند تا همزمان چندین خصوصیت سیال و جریان را اندازه‌گیری کنند نیز در اختیار می‌باشند. به عنوان نمونه، دستگاه RBR را می‌توان نام برد که در بند ۳-۶-۴ توضیح داده شده است.

به دلیل راحتی اندازه‌گیری کدورت در مقایسه با اندازه‌گیری غلظت مواد معلق، تلاش محققین بر این بوده است که بتوان با اندازه‌گیری کدورت مقدار بار معلق رودخانه‌ها را تعیین کرد. در این صورت مقدار بار معلق را می‌توان به صورت زنده اندازه‌گیری کرد. از این رو اخیراً کاربرد وسایل اندازه‌گیری کدورت مورد توجه قرار گرفته است.



شکل پ. ۱-۲۰- نمایش از کدورت سنج مدل 555IR



شکل پ. ۱-۲۱- اجزای تشکیل‌دهنده یک کدورت‌سنج

- ۱- دستورالعمل
- ۲- صفحه کلید
- ۳- صفحه نمایش
- ۴- محور کووت
- ۵- پین علامتگذاری
- ۶- لامپ مدول
- ۷- کووت
- ۸- حلقه علامتگذاری

– روش اندازه‌گیری کدورت توسط دستگاه کدورت‌سنج

به منظور اندازه‌گیری کدورت توسط کدورت‌سنج به اندازه ۲۰ میلی‌لیتر نمونه در داخل یک کووت تمیز ریخته و چندین مرتبه قبل از بیرون ریختن نمونه از کووت، کاملاً تکان داده می‌شود تا از تمیز شدن آن اطمینان حاصل گردد. سپس کووت با نمونه مجهول پر شده (تقریباً ۳۰ میلی‌لیتر) و درپوش لبه‌دار سیاه روی آن قرار داده می‌شود. پس از اطمینان از تمیزی دیوار بیرونی شیشه کووت، آن را در داخل محور کووت قرار داده و علامت محور کووت به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که حداقل جواب را نشان دهد. پس از چند لحظه مقدار نشان داده شده ثابت می‌شود. اولین جوابی که نمایش داده می‌شود جواب اصلی می‌باشد. باید به این نکته توجه نمود که چون حباب‌های هوا بر نتیجه اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد می‌توان برای رفع این خطا و افزایش دقت از روش‌های شستشوی ماورا صوت، گرم کردن و یا اضافه کردن یک ماده فعال سطحی برای کاهش تنش سطحی استفاده نمود.

– رابطه بین کدورت و غلظت مواد معلق

مطالعات نشان داده است که بین کدورت و غلظت مواد معلق می‌توان رابطه‌ای با درجه برازش بالا پیدا کرد. چنین رابطه‌ای برای رودخانه‌هایی که اندازه ذرات مواد معلق تغییر چندانی ندارند به صورت خطی می‌باشد.

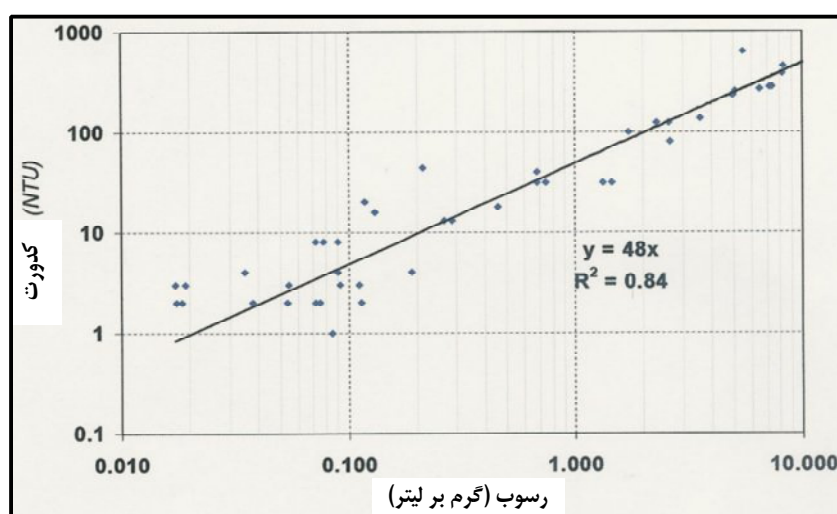
$$T = kc + b \quad (\text{پ. ۱-۸})$$

که در آن c = غلظت مواد معلق، T = کدورت و k = ضریب کدورت است مقدار b نیز بستگی به مواد آلی دارد. در صورتی که اندازه ذرات مواد معلق با تغییر کدورت تغییر کند در آن صورت رابطه به صورت غیرخطی است.

$$T = ac^n + b \quad (\text{پ. ۱-۹})$$

چنین روابطی برای هر ایستگاه آب‌سنجی از رودخانه باید ایجاد گردد. ممکن است حتی برای هر ایستگاه این رابطه در فصول مختلف متفاوت باشد. هر چه مشخصات رسوب ثابت باشد ارتباط بهتری بین غلظت و کدورت برقرار می‌شود.

شکل (پ. ۱-۲۲) رابطه بین کدورت و غلظت رسوب معلق در مخزن سد دز را نشان می‌دهد.



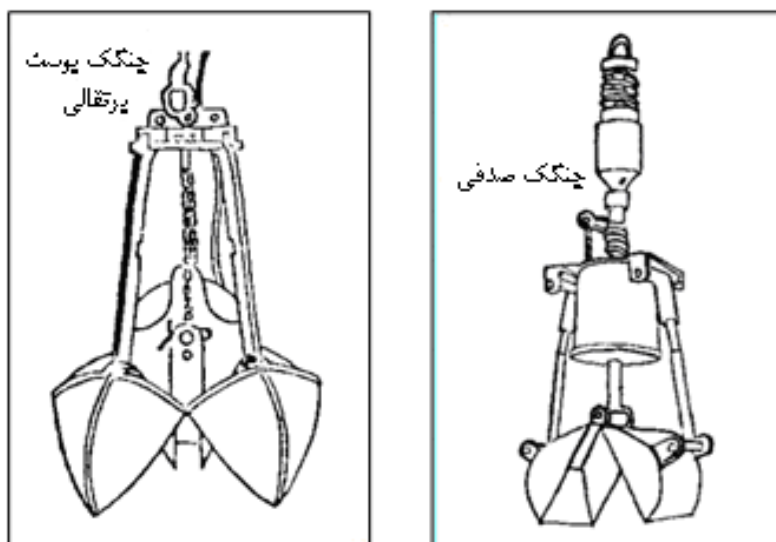
شکل پ. ۱-۲۲ - رابطه کدورت - غلظت رسوب معلق در مخزن سد دز [۱۷]

پ. ۱-۳-۵- نمونه‌برداری از مواد رسوبی بستر

نمونه‌برداری از مصالح بستر به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی رسوب نظر دانه‌بندی، وزن مخصوص حقیقی و ظاهری به صورت دوره‌ای هم در رودخانه‌ها، در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی و در مخازن سدها به منظور تعیین ضخامت رسوب نهشته شده انجام می‌گیرد. نمونه‌برداری مصالح بستر رودخانه‌ها معمولاً به صورت نمونه‌های دست‌خورده انجام می‌گیرد و در بسیاری موارد نیازی به تهیه نمونه‌های دست‌نخورده نمی‌باشد. در مخازن سدها برعکس چون نمونه‌برداری بیش‌تر برای تعیین خصوصیات رسوب نهشته شده در اعماق مختلف می‌باشد، ضروری است تا حتی‌الامکان نمونه‌برداری به صورت دست‌نخورده تهیه شود. در این قسمت ابزار مختلف نمونه‌برداری از مصالح بستر رودخانه و مخزن ارایه می‌شود.

پ. ۱-۳-۵-۱- نمونه‌بردارهای رودخانه‌ای

نمونه‌بردارهای رودخانه‌ای مصالح بستر را از لایه بستر به ضخامت چند سانتی‌متر تهیه می‌کنند. این نمونه‌بردارهای چنگکی در شکل (پ. ۱-۲۳) دیده می‌شود. تفاوت آنها در تعداد پره‌های چنگک و نحوه باز و بسته کردن آنها می‌باشد. این نمونه‌بردارها توسط جرثقیل به کف رودخانه منتقل و پس از برخورد با بستر از بالا به صورت دستی و یا به صورت خودکار، پرها بسته و مصالح بستر درون آن قرار می‌گیرند. نوع دیگر نمونه‌برداری مواد بستر که در آمریکا توسعه داده شد، به شکل آیرودینامیک و از جنس فولاد است و مطابق شکل (پ. ۱-۲۴) یک فنجانک خاکبردار را در خود جای داده است. به محض این‌که دستگاه با بستر تماس پیدا می‌کند، یک فنر حلقوی فنجانک را به بیرون پرتاب کرده و نمونه از فاصله ۲ اینچی بالای بستر گرفته می‌شود. دو نمونه از این نوع نمونه‌بردار ساخته شده است که برای مصارف صحرایی توصیه می‌گردند. نمونه سنگین‌تر آن تقریباً ۴۵/۳۶ کیلوگرم (۱۰۰ پوند)، US BM-54 و نمونه سبک‌تر آن در حدود ۱۳/۶ کیلوگرم (۳۰ پوند) US BM-60 است که هر دوی آنها وقتی که فنجانک بسته می‌شود، توسط یک واشر لاستیکی آب‌بندی می‌شوند، در نتیجه این نمونه‌بردارها قادرند ذرات کوچک‌تر موجود در مخلوط بستر را حفظ کنند.



شکل پ. ۱-۲۳- انواع مختلف نمونه‌بردار چنگکی



شکل پ. ۱-۲۴- نمونه بردار بار بستر US BM-60

پ. ۱-۳-۵-۲- نمونه برداری رسوب در مخزن سد

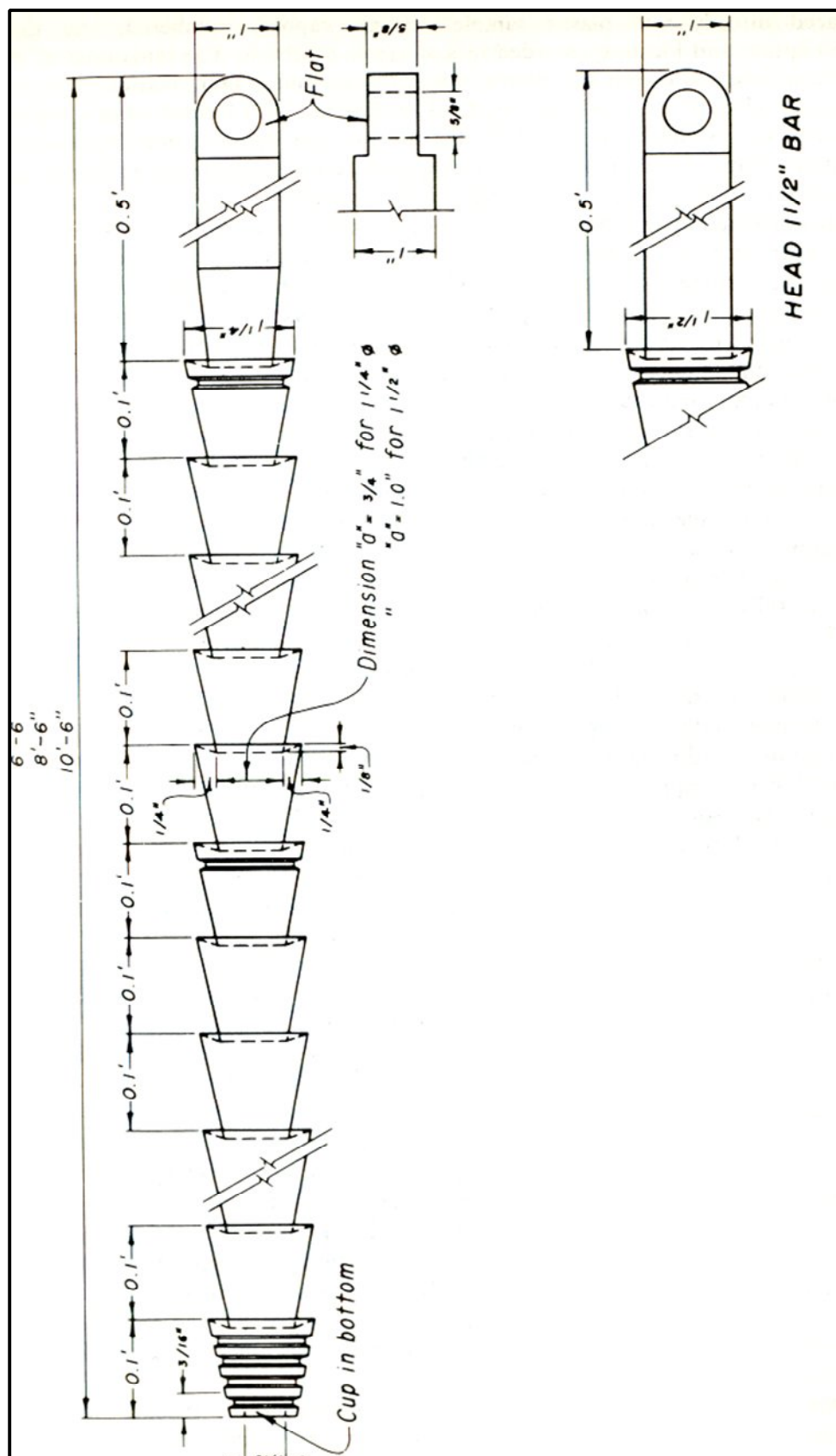
یکی از برنامه‌های دوره‌ای هر مخزن سدی باید نمونه‌برداری از رسوبات نهشته شده مخزن باشد. نمونه‌برداری ممکن است برای اهداف مختلفی انجام شود. محل نمونه‌برداری و تعداد نمونه‌ها نیز بستگی به اهداف مطالعه مورد نظر دارد. به‌طور کلی مجموعه‌ای از عوامل علاوه بر هزینه‌های نمونه‌برداری می‌توانند محدودیت‌هایی را برای دوره نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌ها و موقعیت نمونه‌ها تعیین کنند. به‌طور مثال برای اندازه‌گیری عنصر رادیواکتیو سزیوم ۱۳۷ که برای تعیین ضخامت رسوبات استفاده می‌شود، تعداد نمونه‌های زیادی با نمونه‌گیری استوانه‌ای به قطر ۸ سانتی‌متر باید برداشت شوند و یا برای تعیین میزان آلاینده‌های رسوبات ریزدانه، نیازی به ابزاری که قادر به برداشت مواد ماسه‌ای باشد نیست، زیرا مواد آلاینده همراه ذرات ماسه‌ای نمی‌باشند. به‌رحال آنچه که اهمیت دارد. قبل از اقدام به نمونه‌برداری و با توجه به اهداف مطالعه باید نقشه پراکندگی نمونه‌های مورد نیاز، تعداد نمونه‌ها، عمقی که باید نمونه‌گیری شود، ابزار مورد استفاده و چگونگی انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و بالاخره روش انجام آزمایش بر روی هر نمونه مشخص گردد.

- نمونه بردار میله‌ای (Spud)

این نمونه‌بردار، روش ساده‌ای برای اندازه‌گیری عمق رسوبات تجمع یافته است. این روش در سال ۱۹۳۴ ارایه شده است. Spud یک میله فولادی به طول ۲ تا ۳ متر (حداکثر ۵ متر) می‌باشد که در شکل (پ. ۱-۲۵) نشان داده شده است. با این روش موقعیت اولیه بستر مخزن را نیز بدون این‌که از قبل اطلاعاتی راجع به این لایه وجود داشته باشد می‌توان به دست آورد. در مخازنی که به علت وجود لایه گاز - آب امکان استفاده از روش عمق‌سنج صوتی نمی‌باشد، از این روش استفاده می‌شود. البته محدودیت این روش این است که تنها در رسوبات نرم که از نظر دانه‌بندی ریزدانه می‌باشند قابل کاربرد می‌باشد. ضمن این‌که رسوبات همیشه باید مستغرق باشند و ضخامت آنها از ۴ متر تجاوز نکند.

روش نمونه‌برداری بدین صورت است که ابتدا این وسیله به داخل رسوبات فرو برده می‌شود. سپس طوری به آهستگی بیرون آورده می‌شود که رسوبات جمع شده در ظروف، به بیرون ریخته نشوند. با بررسی رسوبات جمع‌آوری شده از طریق نوع رسوب، رنگ، ترکیبات آن و این‌که آیا ریشه گیاه حضور دارد یا خیر موقعیت لایه‌های رسوب مشخص می‌شود. البته همزمان عمق آب بالای سطح رسوب نیز اندازه‌گیری می‌شود و عمق لایه‌های رسوب با کسر کردن دو عمق اندازه‌گیری شده به دست می‌آید.

در شرایط ایده‌آل نمونه‌بردار میله‌ای می‌تواند یک متر و یا کمی بیش‌تر از طول خودش در رسوبات نفوذ کند. این روش بیش‌تر برای مخازنی که عمق آب کم‌تر از ۳۰ متر دارند استفاده می‌شود ولی در صورتی‌که میله توسط گریس سنگین پوشش داده شود در مخازن تا عمق آب ۶۵ متر هم استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری بیش‌تر تابع مهارت و تجربه کاربران می‌باشد. در مخازن خشک این وسیله کاربرد ندارد و نمونه‌برداری معمولاً توسط اگر انجام می‌شود.



شکل پ ۱-۲۵- نمونه بردار JSPUD [۱۵۳]

– نمونه‌گیر لوله‌ای^۱

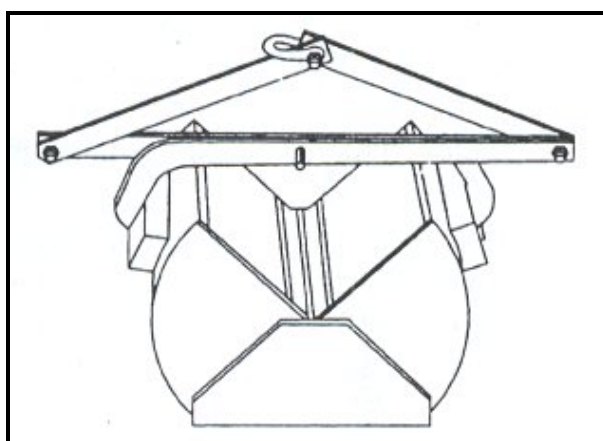
لوله‌ای با یک سر باز می‌باشد که به صورت عمودی درون رسوبات نهشته شده قرار می‌گیرد و سپس لوله به همراه نمونه رسوب بالا کشیده می‌شود. نمونه‌گیرهای لوله‌ای ممکن است از نظر قطر لوله، ضخامت لوله، شکل لبه لوله برای نفوذ در رسوب و نوع وسیله‌ای که بتوان رسوب را خارج کرد دارای انواع مختلفی باشند. نمونه‌گیرهای لوله‌ای وزنی با وزن ثابت بیش از ۴۰/۸۲ کیلوگرم (۹۰ پوند) و وزن اضافی قابل تنظیم بین ۸ تا ۳۵ کیلوگرم (۱۷ تا ۷۷ پوند) معروف به نمونه‌گیرهای هارپون^۲ نیز برای نمونه‌گیری از رسوبات سفت‌تر موجود می‌باشند.

– نمونه‌گیر چنگکی^۳

این نمونه دارای وسیله‌ای به شکل قاشق یا جام می‌باشد که می‌تواند در درون نمونه‌های رسوبی نسبتاً شل فرو رود و نمونه رسوب را به داخل نمونه‌گیر هدایت کند. این نمونه‌گیر برای نمونه‌های رسوبی سطحی، تا عمق ۳۰ سانتی‌متر و یا کم‌تر، استفاده می‌شوند.

– نمونه‌برداری چنگکی

نمونه‌های سطحی را ممکن است بوسیله لایروب پونار^۴ و یا نمونه‌بردار چنگکی که در شکل (پ. ۱-۲۶) نشان داده شده است، برداشت نمود. ضخامت نمونه‌هایی که بدین صورت تهیه می‌شوند تنها در حد چند سانتی‌متر می‌باشد و در نتیجه نمونه‌های تهیه شده نمی‌تواند نماینده مواد رسوبی نهشته شده باشد. امتیاز این نمونه‌گیر، راحتی کار با آن می‌باشد. برای نمونه‌برداری‌های کم، انجام آن بدون نیاز به ابزار خاصی ممکن است ولی برای تهیه نمونه‌های بزرگ نیاز به استفاده از جراثقال می‌باشد. با این نمونه‌گیر هم رسوبات ماسه و هم رسوبات ریزدانه را می‌توان برداشت کرد. لذا از نمونه‌های تهیه شده می‌توان برای تعیین دانه‌بندی رسوبات استفاده کرد. برای تعیین وزن مخصوص ظاهری رسوبات لازم است که از نمونه‌گیرهای جعبه‌ای شکل و یا استوانه‌ای شکل استفاده کرد.



شکل پ. ۱-۲۶- نمونه‌بردار چنگکی

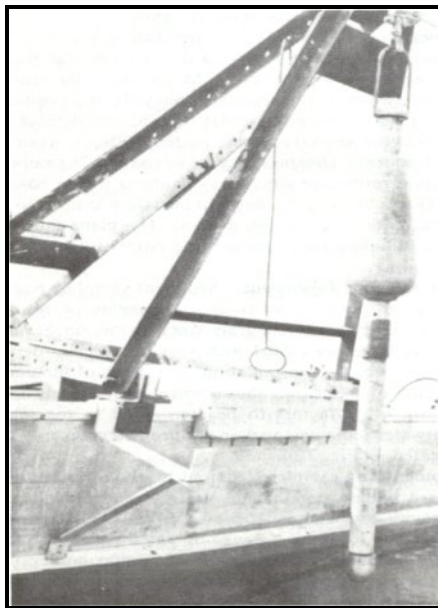
-
- 1- Tube sampler
 - 2- Harpoon sampler
 - 3- Grab sampler
 - 4- Ponar dredger

– نمونه‌گیرهای استوانه‌ای وزنی و پیستونی

این نمونه‌گیر در شکل (پ. ۱-۲۷) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انتهای استوانه نوک تیز می‌باشد. اجزای نمونه‌گیر وزنی از پایین به بالا عبارتند از: قطعه بُر نده، لوله استوانه‌ای، اتصالات، وزنه تعادلی، حلقه و ابزار مخصوص برای توقف نمونه‌گیر. در بالای نمونه‌گیر، شیر تخلیه آب وجود دارد. در زمان نمونه‌گیری این شیر باز است تا آب‌هایی که در محفظه و بالای نمونه قرار دارند بتوانند تخلیه و فضا برای نمونه‌برداری فراهم باشد. پس از آن شیر بسته می‌شود و نمونه‌گیر بالا آورده می‌شود. معمولاً مکش ایجاد شده در درون لوله نمونه‌گیری از خروج نمونه‌ها جلوگیری می‌کنند. نوع دیگر نمونه‌گیر وزنی است که به صورت پیستونی عمل می‌کند. با نفوذ لوله نمونه‌گیر به درون رسوبات، پیستون نیز جابجا می‌شود. سپس پیستون در موقعیتی که قرار دارد قفل می‌شود و وسیله از درون رسوبات بیرون کشیده می‌شود. خروج رسوبات از نمونه‌گیر پیستونی راحت‌تر از نمونه‌گیر شیردار می‌باشد.

پس از اتمام عمل نمونه‌گیری، نمونه‌گیر بالا آورده و روی قایق قرار می‌گیرد. سپس لوله استوانه‌ای شکل حاوی نمونه از آن جدا و دو سر آن بسته و آنگاه روی آن نیز بسته می‌شود. طرز کار نمونه‌گیر وزنی بدین صورت است که ابتدا نمونه‌گیر توسط کابلی که یک سر آن متصل به نمونه‌گیر و سر دیگر آن به قرقره موتوری وصل می‌باشد، از درون قایق خارج و به صورت عمودی قرار می‌گیرد. شکل (پ. ۱-۲۷). سپس اجازه داده می‌شود که به صورت آزاد سقوط کند و به درون رسوبات نهشته شده نفوذ کند و آنگاه نمونه‌گیر خارج می‌گردد.

سپس قسمت بُر نده از انتهای نمونه‌گیر جدا و لوله پلاستیکی درون سیلندر لوله‌ای که حاوی نمونه می‌باشد خارج می‌شود. آنگاه دو سر لوله پلاستیکی با در پوش بسته و پس از برچسب زدن به آزمایشگاه منتقل می‌شود. برچسب شناسنامه نمونه است که بر اساس شماره مشخص می‌شود. تاریخ نمونه‌برداری، ساعت نمونه‌برداری و مسئول نمونه‌برداری نیز روی آن مشخص است. تجربیات نشان داده است که با این نوع نمونه‌گیری در مخازن با عمق ۳۵ متر و ۳ تا ۳/۵ متر نفوذ درون رسوبات می‌توان نمونه‌گیری نمود.



شکل پ. ۱-۲۷- نمونه‌بردارهای پیستونی [۱۵۳]

– نمونه‌گیرهای دولایه‌ای

دو نوع نمونه‌گیر دولایه‌ای با نام‌های دنیسون و دنور توسط سازمان اجیا اراضی آمریکا به‌وجود آمده‌اند. در هر دو نمونه، استوانه حاوی نمونه را می‌توان براحتی جدا و به آزمایشگاه منتقل کرد. نمونه‌بردار دنور، نوع پیشرفته‌تر دنیسون می‌باشد و کوچک‌تر و سبک‌تر می‌باشد و قیمت نوک تیز آن نیز کم‌تر است. نمونه‌دنیسون دارای قطر داخلی ۱۴/۹۲ سانتی‌متر ($5\frac{7}{8}$ اینچ) و طول ۶۰/۹۶ سانتی‌متر (۲۴ اینچ) می‌باشد. البته جدا کردن طول نمونه ۵۰/۸ سانتی‌متر (۲۰ اینچ) توصیه شده است. قطر داخلی نمونه‌گیر دنور ۱۴/۹۲ سانتی‌متر ($5\frac{7}{8}$ اینچ) و طول آن ۷۱/۱۲ سانتی‌متر (۲۸ اینچ) است و حداکثر طول نمونه‌ای که توصیه شده است با آن گرفته شود ۶۰/۹۶ سانتی‌متر (۲۴ اینچ) می‌باشد شکل (پ. ۱-۲۸).



شکل پ. ۱-۲۸- نمونه‌بردارهای مختلف [۱۵۳]

یکی دیگر از انواع نمونه‌بردارها که در مخازن کوچک می‌توان استفاده کرد در شکل (پ. ۱-۲۹) نشان داده شده است. این نمونه‌گیر از لوله‌های استیل به طول‌های ۱، ۲ و ۳ متری تهیه شده‌اند. درون لوله پیستون قرار دارد که می‌توان نمونه‌گیری کرد. این نمونه‌گیر توسط پایه A شکل نگهداری می‌شود. نمونه‌های دست‌نخورده با این وسیله می‌توان تهیه کرد. نمونه‌های با قطر ۱۰ سانتیمتر را در هر فوت طولی می‌توان از نمونه‌گیر استخراج کرد. طول نمونه و عمق نفوذ کرده درون رسوبات را از روی طنابی که نمونه‌گیر به آن متصل می‌باشد می‌توان قرائت کرد.



شکل پ. ۱-۲۹- نمونه‌بردارهای دولایه‌ای [۱۵۳]

پ. ۱-۳-۶- اندازه‌گیری جریان و رسوب در مخازن سدها

پ. ۱-۳-۶-۱- ضرورت و اهداف اندازه‌گیری‌ها

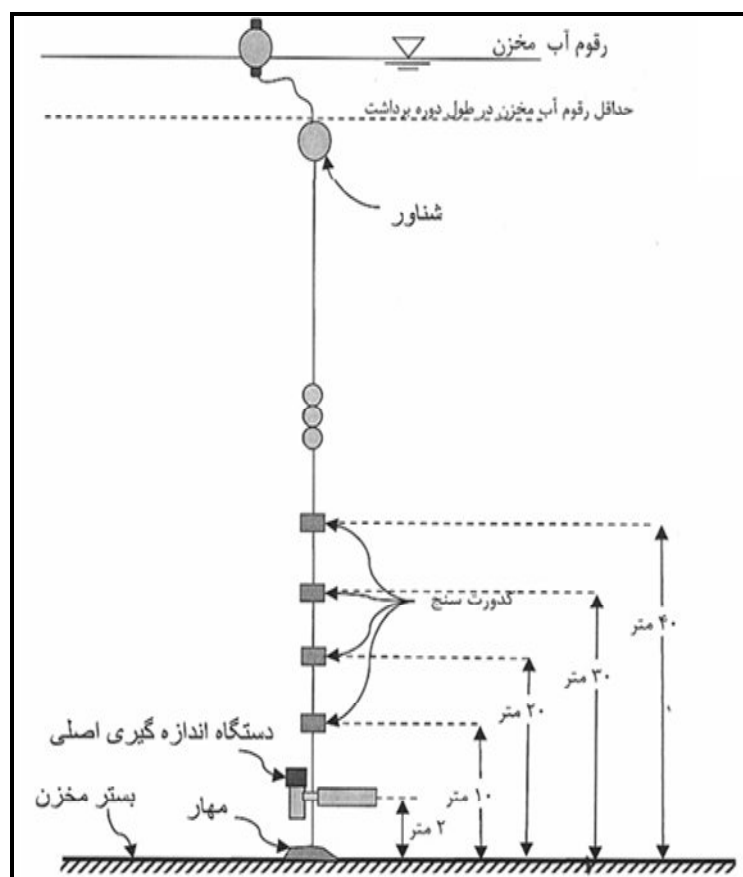
با توجه به ماهیت بسیار متغیر انتقال رسوب به همراه جریان‌های سیلابی، اندازه‌گیری‌های میدانی به همراه نمونه‌برداری از آب و رسوب به‌خصوص در شرایط وقوع سیلاب ضروری است. اندازه‌گیری خصوصیات جریان و رسوب در مخازن سدها برای اهداف خاصی انجام می‌گیرد. از آن‌جا که به دلیل وسعت سطح و عمیق بودن مخزن، اندازه‌گیری‌ها بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد، نوع داده‌ها و تراکم اندازه‌گیری‌ها باید متناسب با اهداف طرح باشد. در سال‌های اخیر، به کمک جریان‌های غلیظ می‌توان بخش مهمی از رسوب ریزدانه را همراه با جریان‌های سیلابی به خارج از مخزن هدایت کرد و این امر فقط با پیش‌بینی صحیح از وقوع جریان غلیظ و ردیابی آن میسر خواهد بود. در نتیجه تجهیزات مورد استفاده باید در موقعیت‌های خاصی نصب و اطلاعاتی همچون سرعت جریان، کدورت، غلظت، دما و پارامترهای کیفی آب را به صورت دوبعدی و زنده به مراکز پردازش داده‌ها منتقل نمایند. این مراکز با تحلیل داده‌ها می‌توانند وقوع جریان غلیظ و سایر مشخصات آن را پیش‌بینی نمایند. در این صورت تصمیم‌گیران می‌توانند نسبت به خروج جریان غلیظ از دریچه‌های تحتانی اقدام نمایند.

از دیگر اهداف اندازه‌گیری‌های جریان و رسوب در مخزن سد، برداشت اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی مدل‌های ریاضی می‌باشد. در چنین شرایطی برداشت داده‌های سرعت، غلظت و دما به صورت دوبعدی برای حداقل یک واقعه خاص کافی خواهد بود. اندازه‌گیری متغیرهای کیفی به همراه خصوصیات جریان و رسوب برای واسنجی مدل‌های کیفی مخزن و مدیریت صحیح بهره‌برداری از آب در مخازنی که کیفیت آب آنها برای بهره‌برداران در فصولی از سال مناسب نیست نیز از دیگر اهداف می‌باشد.

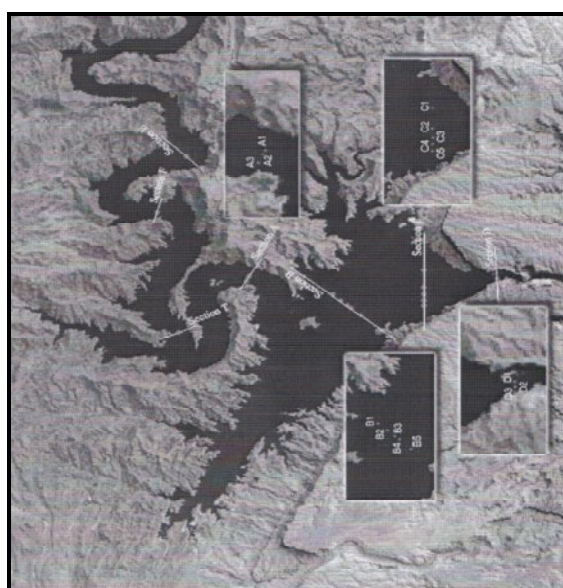
پ. ۱-۳-۶-۲- موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری

برای ثبت وقوع جریان غلیظ و همچنین استخراج نتایج کاربردی از آن، باید از اندازه‌گیری‌های ثابت و مستمر استفاده نمود. برای این منظور با توجه به هندسه، شکل و توپوگرافی مخزن، طول دریاچه، شاخه‌های فرعی ورودی به دریاچه سد و میزان اهمیت سازه‌های مهم در مخزن سد باید چند مقطع یا ایستگاه مناسب برای اندازه‌گیری انتخاب شود. در عرض هر مقطع باید در چند امتداد قائم (که یکی از آنها باید عمیق‌ترین نقطه مقطع عرضی یا تالوگ باشد) با نصب دستگاه‌های ثابت، اقدام به ثبت متغیرهای جریان شامل سرعت، عمق، جهت جریان و کدورت شود. نحوه نصب دستگاه‌ها به صورت شماتیک در شکل (پ. ۱-۳۰) نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی نیز باید توسط افراد مستقر در محل پروژه به صورت نیم‌رخ‌های قائم سرعت و غلظت جمع‌آوری شود.

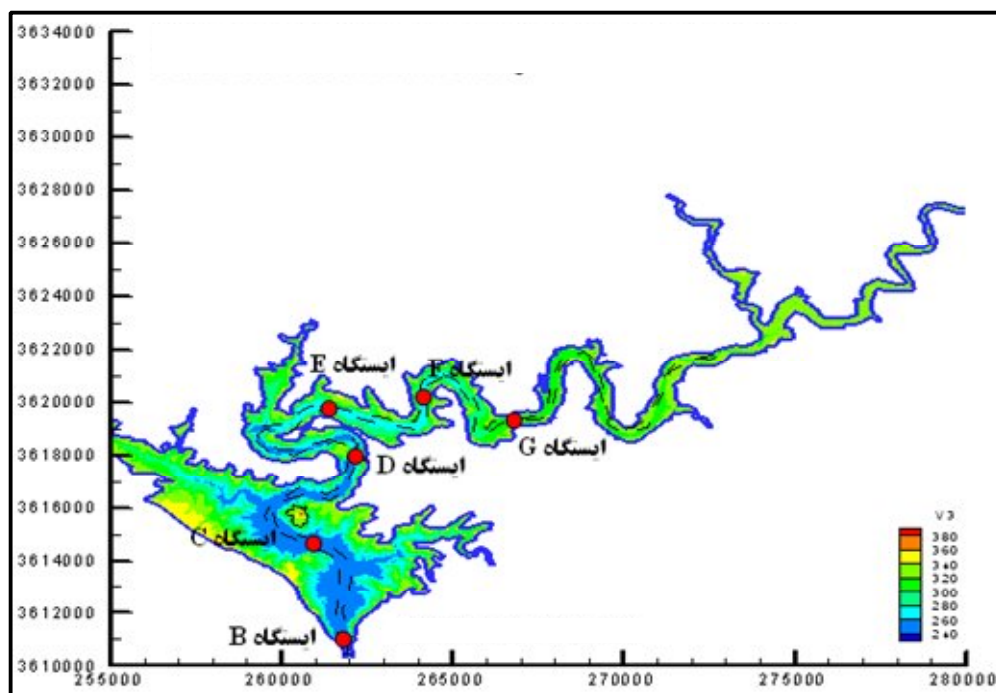
به عنوان یک نمونه، شکل‌های (پ. ۱-۳۱) و (پ. ۱-۳۲) به ترتیب نمایی از موقعیت و تعداد ایستگاه‌های انتخاب شده برای عملیات میدانی اندازه‌گیری پارامترهای سرعت و غلظت جریانات غلیظ در مخزن سد در مراحل اول و دوم اندازه‌گیری نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که موقعیت ایستگاه‌های D (شکل پ. ۱-۳۱) و B (شکل پ. ۱-۳۲) نزدیک به دریچه‌های تحتانی بوده و مقادیر آن ممکن است تحت تاثیر خروجی از دریچه‌ها قرار گیرد. به دلیل این‌که دریچه‌های تحتانی سد در صرفاً به منظور رسوب‌زدایی مخزن به کار می‌روند در این حالت انتخاب این ایستگاه‌ها در مجاورت بدنه سد مشکلی را ایجاد نخواهد کرد اما ممکن است به دلیل برخورد جریان غلیظ عبوری از این ایستگاه‌ها به بدنه سد و برگشت آن، نتایج اندازه‌گیری این دو ایستگاه تحت تاثیر این جریان برگشتی قرار گیرد.



شکل پ. ۱-۳۰- نحوه نصب دستگاه‌های سرعت‌سنج و کدورت‌سنج در فواصل مختلف از بستر مخزن سد [۱۷]

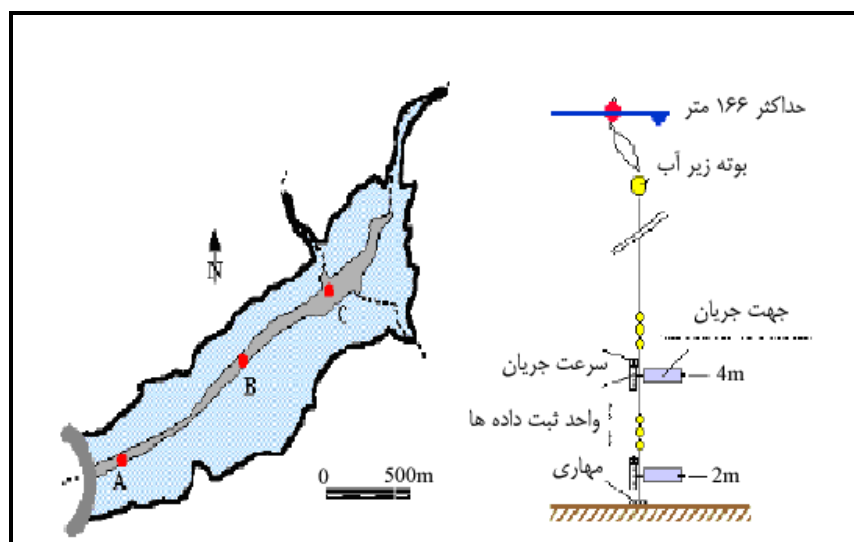


شکل پ. ۱-۳۱- موقعیت مقاطع عرضی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد دز در مرحله اول [۱۷]



شکل پ. ۱-۳۲- موقعیت مقاطع عرضی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد دز در مرحله دوم [۱۷]

در شکل (پ. ۱-۳۳) موقعیت ایستگاه‌های انتخاب شده برای ردیابی جریان غلیظ سد لوزان در کشور سوئیس و نحوه قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری سرعت و جهت جریان در هر ایستگاه نشان داده شده است. ایستگاه C در محل تلاقی سه شاخه اصلی و مهم ورودی به این سد در نظر گرفته شده است. تجهیزات مورد استفاده توسط یک بویه مستغرق محکم شده‌اند.



شکل پ. ۱-۳۳- موقعیت ایستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد لوزان (سوئیس) [۱۷]

پس از تعیین موقعیت این ایستگاه‌ها، از تعدادی بویه شناور به عنوان نشانه‌گذاری ایستگاه (در محل نصب تجهیزات اندازه‌گیری) استفاده می‌شود تا امکان دسترسی سریع‌تر به آنها فراهم شود. شکل (پ. ۱-۳۴) بویه مربوط به ایستگاه B را نشان می‌دهد.



شکل پ. ۱-۳۴- بوپه نشانه در ایستگاه B [۱۷]

پ. ۱-۳-۶-۳- اطلاعات اولیه مورد نیاز

برای تحلیل مناسب داده‌های عملیات میدانی اندازه‌گیری جریان غلیظ، باید نمونه‌برداری‌های آب و رسوب در اولین ایستگاه هیدرومتری بالادست سد به صورت منظم و با دقت مناسب انجام شود. در حقیقت، شروع سیلاب و ظاهر شدن اولین علایم افزایش بده و کدورت جریان را می‌توان در این ایستگاه مشاهده کرد. از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری بالادست به عنوان شرایط مرزی ورودی برای واسنجی و اجرای مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها (با توجه به وجود جریان‌ات غلیظ) استفاده خواهد شد. همچنین باید آمار بارندگی‌های حوضه و ذوب برف به صورت مستمر در اختیار گروه مستقر در محل پروژه قرار داده شود. زمان و میزان بارندگی در حوضه به همراه بده جریان ایستگاه هیدرومتری بالادست، شاخص‌های مناسبی برای تعیین زمان وقوع جریان‌ات غلیظ می‌باشد. قبل از شروع عملیات میدانی و پس از انتخاب و تعیین موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری، باید اقدام به برداشت مقاطع عرضی ایستگاه‌ها نمود. در صورت امکان اگر کل مخزن سد و به ویژه ناحیه مجاور بدنه سد و نیز تاسیسات مهم (مثل نیروگاه) نقشه‌برداری و هیدروگرافی شود مناسبتر است (معمولاً این کار در سدهای مخزنی به صورت سالانه و قبل از فصل سیلابی انجام می‌شود). در این صورت، موقعیت تالوگ مقاطع عرضی برای نصب دستگاه‌های ثبات مشخص خواهند شد. بعد از فصل سیلابی و اتمام عملیات میدانی اندازه‌گیری جریان غلیظ، همان مقاطع عرضی باید مجدداً برداشت شوند تا شرایط و روند رسوب‌گذاری بستر در طول دریاچه سد ارزیابی شود. از این نتایج می‌توان برای کنترل و مقایسه بهتر داده‌های اخذ شده از دستگاه‌های ثبات استفاده نمود.

پ. ۱-۳-۶-۴- ابزار اندازه‌گیری

عملیات میدانی اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخازن سدها به دستورالعمل مناسب و تجهیزات دقیق، پیشرفته و گران‌قیمت نیاز دارد. به دلیل طولانی بودن و عمیق بودن مخازن سدها، باید تجهیزاتی مورد استفاده قرار گیرند که قابلیت اندازه‌گیری و ثبت خصوصیات مختلف جریان نظیر سرعت و جهت آن، کدورت، درجه حرارت و نیز خصوصیات کیفی آب را به صورت مداوم و پیوسته و

در مدت زمان طولانی (مثلاً یک ماه) را داشته باشند. این عمل به منظور رفع مشکلاتی از قبیل خطای انسانی در برداشت اطلاعات و نیز اطمینان از انجام اندازه‌گیری‌ها در شرایط جوی نامناسب ضروری است. از همه مهم‌تر اینکه جریان‌ات غلیظ در بستر مخزن و در مدت زمان محدودی اتفاق افتاده و به کمک اندازه‌گیری‌های پراکنده و دستی قابل ردیابی نیستند. به همین دلیل باید با کمک دستگاه‌های ثابت، روند حرکت و تغییرات سرعت و غلظت این جریان‌ات برداشت شود تا امکان استفاده کاربردی از این نتایج فراهم شود. همچنین برای برآورد ضخامت جریان غلیظ و اطلاع از نیم‌رخ قائم سرعت، از ابزار خاصی استفاده شود. این ابزار لازم است تا قبل از نصب در محل، به صورت دقیقی واسنجی شوند. جدول (پ.۱-۱) خصوصیتی که باید اندازه‌گیری گردند و نیز ابزار مورد نیاز برای عملیات میدانی اندازه‌گیری جریان غلیظ در سد دز و در محل ایستگاه‌های مشخص شده در شکل (پ.۱-۳۲) را نشان می‌دهد.

جدول پ.۱-۱- ابزار مورد نیاز برای اندازه‌گیری و ردیابی جریان غلیظ [۱۷]

ایستگاه	تجهیزات مورد استفاده	پارامترهای اندازه‌گیری
B	RBR	کدورت، درجه حرارت آب، پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب
C	RCM9- RBR	کدورت، درجه حرارت، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب
D	-	پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب
E	-	پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب
F	ADCP- RBR	کدورت، درجه حرارت، سرعت و جهت جریان در لایه‌های مختلف، پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب
G	RCM9- RBR	کدورت، درجه حرارت، سرعت و جهت جریان، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، پارامترهای کیفی آب و نمونه‌برداری رسوب

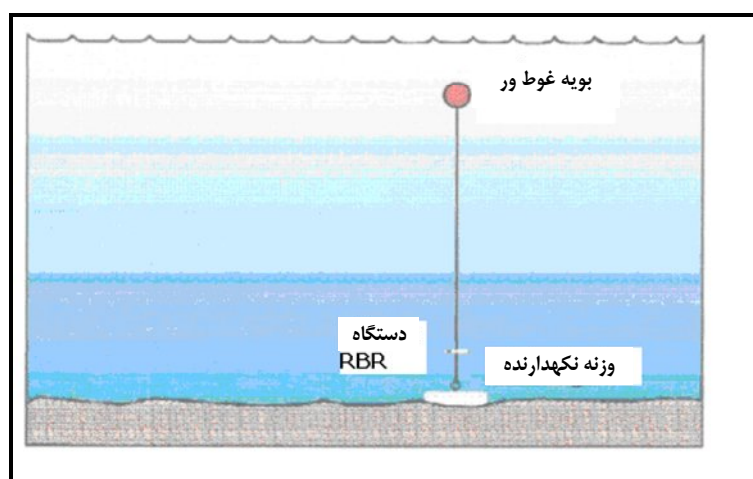
پ. ۱-۳-۶-۴-۱- دستگاه ثابت نقطه‌ای خصوصیات فیزیکی آب (دستگاه RBR)

دستگاه‌های کوچک RBR قابلیت نصب در زیر آب را داشته و بسته به جنس بدنه، تا عمق ۲۰۰ متری آب نیز قابلیت ثبت پارامترهای درجه حرارت، هدایت الکتریکی، کدورت و عمق آب را دارند. شکل (پ.۱-۳۵) انواع مدل‌های این دستگاه را نشان می‌دهد. حسگرهای متفاوت موجود در این دستگاه می‌توانند نوسانات جزر و مد دریا، امواج و شوری را نیز اندازه‌گیری کنند. در شکل (پ.۱-۳۶) نیز نحوه نصب RBR در ایستگاه اندازه‌گیری و در کف مخزن سد نشان داده شده است. معمولاً این دستگاه به صورت میله‌ای و به فواصل مختلف (تابعی از عمق آب در مخزن و نیز ضخامت پیش‌بینی شده برای جریان غلیظ) نصب می‌شود. برای جلوگیری از سقوط و واژگونی RBRهای نصب شده، بویه‌های کروی با شعاع مناسب (تا ۲۰ سانتی‌متر) به کار می‌رود. استفاده از ۳ تا ۵ عدد از این دستگاه‌ها در هر ایستگاه مناسب است. نمونه‌ای از اطلاعات اندازه‌گیری کدورت توسط دستگاه RBR در یکی از ایستگاه‌های مخزن سد دز در شکل (پ.۱-۳۷) ارایه شده است.

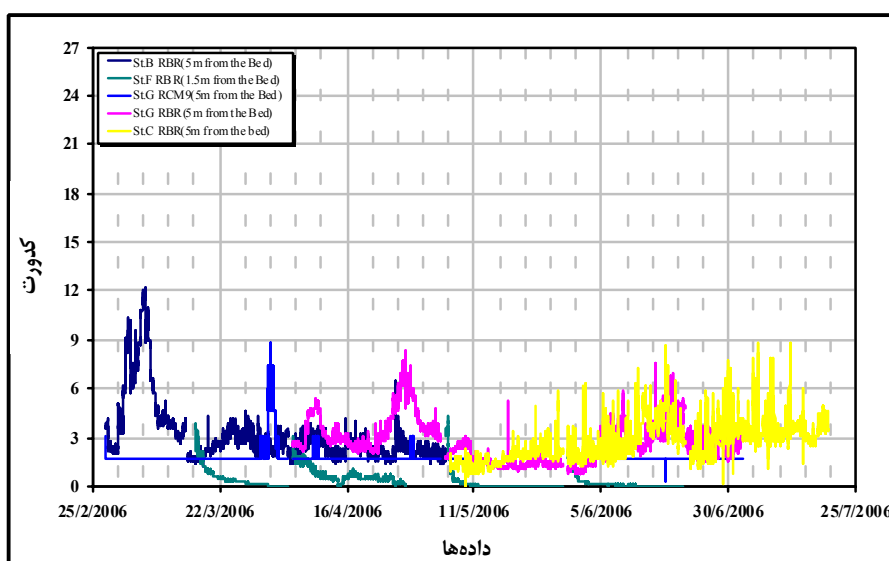
حسگر TR1050 قابلیت ثبت درجه حرارت در محدوده ۵- تا ۳۵ درجه سانتیگراد و با دقت ۰/۰۰۲ درجه را دارد. حسگر XR420TTU علاوه بر ثبت درجه حرارت، قابلیت اندازه‌گیری کدورت در محدوده صفر تا ۲۰۰۰ NTU و با دقت ۲ درصد را دارد.



شکل پ. ۱-۳۵- انواع نمونه‌های دستگاه RBR [۱۷]



شکل پ. ۱-۳۶- روش نصب دستگاه RBR در نزدیکی کف بستر [۱۷]



شکل پ. ۱-۳۷- نمونه‌ای از اطلاعات کدورت ثبت شده توسط دستگاه RBR در مخزن سد دز [۱۷]

نکته بسیار مهم در انتخاب حسگرهای دستگاه RBR و به ویژه برای ثبت کدورت جریان، این است که کدورت قابل ثبت باید با کدورت‌های ورودی به مخزن سد سازگاری داشته باشد. با توجه به این‌که در بده‌های سیلابی، مقدار متوسط غلظت ذرات معلق زیاد است بهتر است از دستگاه‌های با قابلیت ثبت کدورت‌های بالا استفاده کرد. به طور مثال در ایستگاه تله‌زنگ (بالادست سد مخزنی دز)، غلظت رسوبات معلق حدود ۱۰ گرم در لیتر (تقریباً برابر ۱۰۰۰ NTU در شرایط مخزن دز) دور از واقعیت نخواهد بود. به همین دلیل و ثبت غلظت‌های بیش از ۱۰ گرم در لیتر (تقریباً برابر ۱۰۰۰ NTU در شرایط مخزن دز) دور از واقعیت نخواهد بود. به همین دلیل در پروژه سد دز، از دستگاه‌های RBR با محدوده کارکرد حداکثر ۲۰۰۰ NTU استفاده شده است (NTU یا FTU واحد اندازه‌گیری کدورت جریان می‌باشد). نحوه استخراج رابطه کدورت- غلظت رسوبات معلق در بخش الف-۳-۴ ارایه شده است.

پ. ۱-۳-۶-۵- دستگاه جریان‌سنج نقطه‌ای (Aanderaa RCM 9)

این دستگاه به کمک پدیده داپلر، توانایی ثبت سرعت و جهت جریان را در همان عمق نصب دارد. همچنین حسگرهای اضافی این دستگاه، توانایی اندازه‌گیری پارامترهای درجه حرارت، هدایت الکتریکی، کدورت و اکسیژن محلول در آب را دارا می‌باشند. این اطلاعات درون حافظه داخلی دستگاه ذخیره می‌شوند.

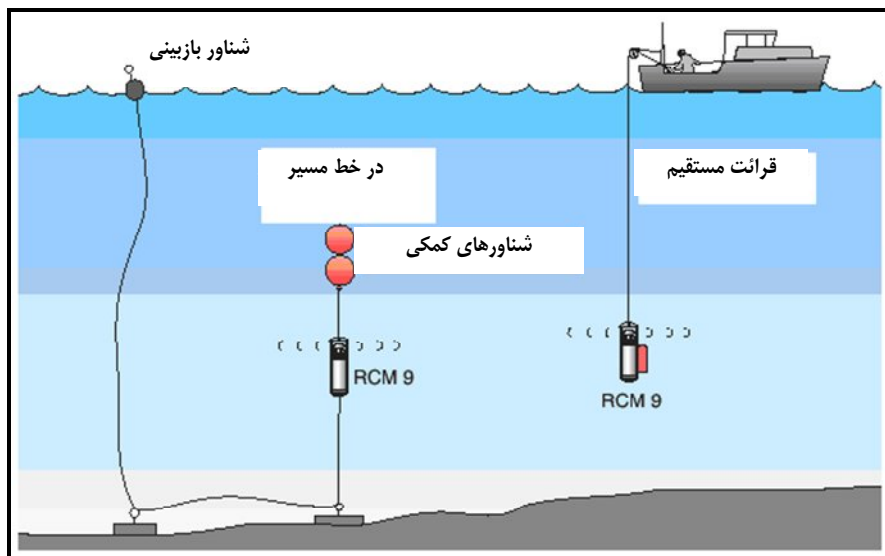
حداکثر عمق قابل استفاده برای این دستگاه ۲۰۰۰ متر بوده و فضای مورد نیاز اندازه‌گیری برای آن ۰/۵ تا ۲ متر می‌باشد. این دستگاه توسط یک محفظه ضد آب محافظت می‌گردد که به همین جهت می‌تواند برای مدت‌های طولانی درون دریاها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها قرار گیرد. شکل (پ. ۱-۳۸) نمونه‌ای از این دستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به عمق زیاد آب در مخزن سد، موقعیت دقیق این دستگاه در نزدیکی‌های کف بستر توسط دستگاه موقعیت‌یاب ماهواره‌ای و با خطای حداکثر ۵ متر تعیین می‌شود.



شکل پ. ۱-۳۸- دستگاه جریان‌سنج نقطه‌ای RCM 9 [۱۷]

شکل (پ. ۱-۳۹) به صورت شماتیک نحوه نصب دستگاه را به دو صورت قرائت زنده و غیرزنده نشان داده است. در شرایطی که دستگاه RCM 9 باید برای مدت زمان زیادی درون آب قرار داشته باشد از روش نصب غیرزنده استفاده می‌شود. در این روش، دستگاه توسط یک جسم شناور و یک لنگر U شکل در آب معلق می‌ماند. در روش مستقیم، دستگاه توسط یک قایق کوچک و به

وسیله یک جرثقیل کابلی ساده در داخل آب شناور خواهد ماند. در این شرایط متغیرهای موردنظر همزمان با اندازه‌گیری، ثبت می‌شوند. در این شرایط یک صفحه پره‌دار به دستگاه متصل می‌گردد تا از تابیدن و پیچ خوردن آن جلوگیری نماید.



شکل پ. ۱-۳۹- طریقه نصب دستگاه جریان‌سنج نقطه‌ای RCM 9 در کف مخزن سد [۱۷]

بازه‌های زمانی ثبت اطلاعات در این دستگاه توسط کاربر تعیین می‌شود. اگر ثبت اطلاعات در فواصل زمانی ۶۰ دقیقه انتخاب شود در این صورت زمان کار دستگاه بیش از دو سال خواهد بود. برای استخراج و تخلیه اطلاعات نیز معمولاً هر سه هفته یا هر ماه یکبار از آب خارج شده و اطلاعات ثبت شده توسط نرم‌افزار خود دستگاه، مرتب شده و به رایانه منتقل می‌شوند. این اطلاعات در ابتدا به صورت داده‌های خام بوده و باید بر حسب نوع سنسور و ضریب واسنجی آن، اصلاح شوند.

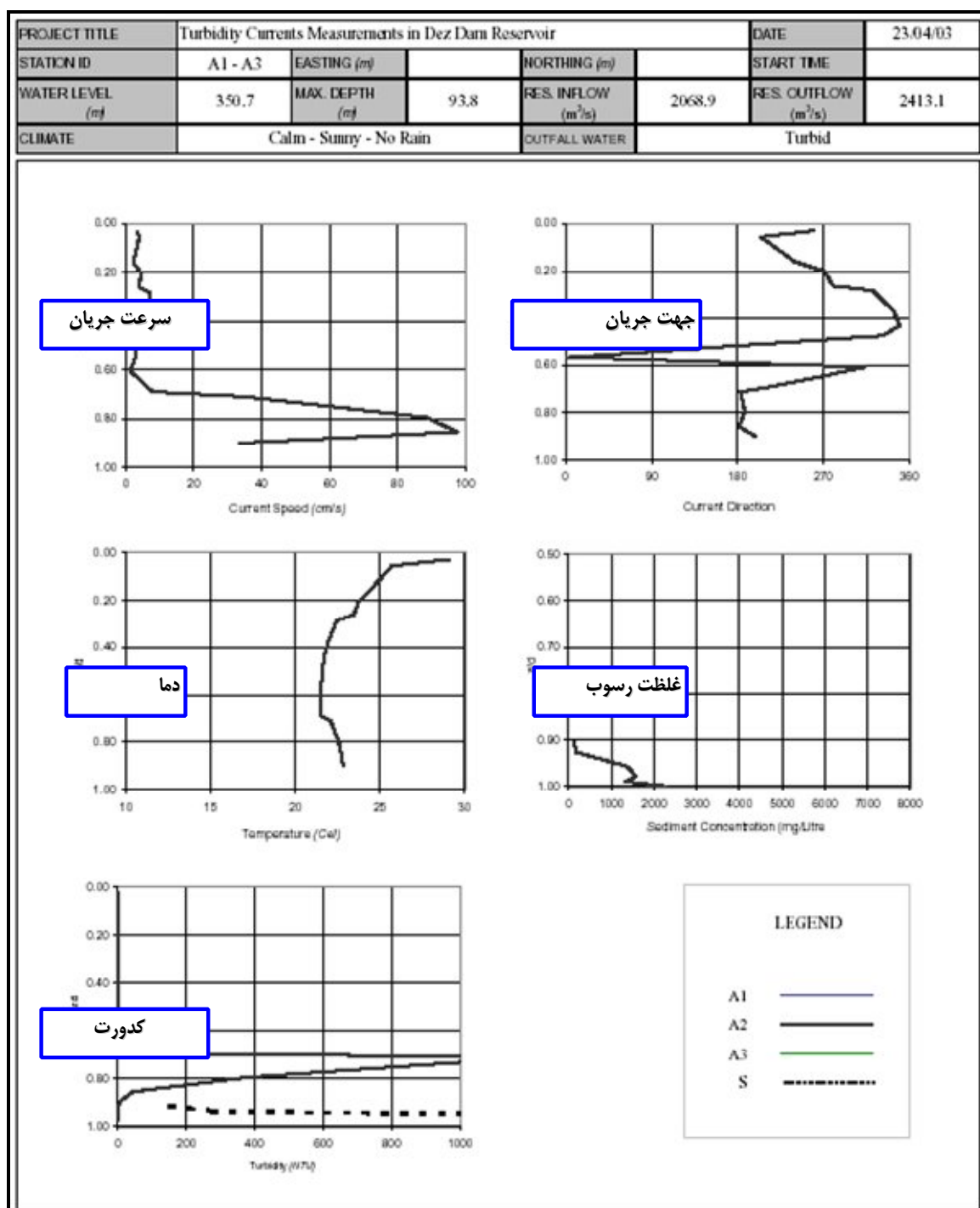
مشخصات فنی دستگاه RCM 9 برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در جدول (پ. ۱-۲) ارایه شده است.

جدول پ. ۱-۲- مشخصات فنی (محدوده اندازه‌گیری و دقت) دستگاه RCM 9 [۱۷]

پارامتر	محدوده اندازه‌گیری	دقت
سرعت (cm/s)	۰ - ۳۰۰	۰/۳
جهت جریان (درجه)	۰ - ۳۶۰	۵-۷/۵
هدایت الکتریکی (mS/cm)	۰ - ۷۴	۰/۲ درصد
کدورت (NTU)	۰ - ۲۰۰۰	۲ درصد
درجه حرارت (سانتیگراد)	-۰/۶۴ - ۳۳	۰/۰۵
فشار (Kpa)	۰ - ۳۵۰۰	۰/۲۵ درصد
اکسیژن محلول در آب (mg/l)	۰ - ۲۰	۰ - ۰/۰۲۵

در شکل (پ. ۱-۴۰) نمونه‌ای از نتایج اندازه‌گیری متغیرهای مختلف جریان توسط دستگاه RCM 9 در مخزن سد در به هنگام وقوع جریان غلیظ در تاریخ ۳ اردیبهشت ۱۳۸۴ نشان داده شده است. این نتایج به صورت پروفیل قائم بدون بعد نشان داده شده است. نکته مهم و قابل توجه در این شکل‌ها، افزایش ناگهانی و بسیار زیاد کدورت جریان در لایه پایین جریان و در نزدیکی‌های کف بستر مخزن می‌باشد به طوری که کدورت جریان حتی از ۱۰۰۰ NTU که فراتر از حداکثر محدوده کارکرد دستگاه RCM 9 می‌باشد تجاوز کرده است. این مساله احتمال بروز خطا در ثبت مقادیر کدورت را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. به همین دلیل در

مرحله دوم عملیات اندازه‌گیری جریان‌ات غلیظ این سد، از دستگاه RBR با محدوده کارکرد حداکثر ۲۰۰ NTU برای ثبت کدورت جریان در مخزن استفاده شده است. عمق یا ضخامت جریان غلیظ در این شکل‌ها به صورت تخمینی قابل محاسبه است.



شکل پ. ۱-۴۰- نتایج اندازه‌گیری روزانه پارامترهای مختلف جریان در مخزن سد دز به صورت

پروفیل قائم در ایستگاه‌های منتخب توسط دستگاه RCM 9 (۲۳ آوریل ۲۰۰۳) [۱۷]

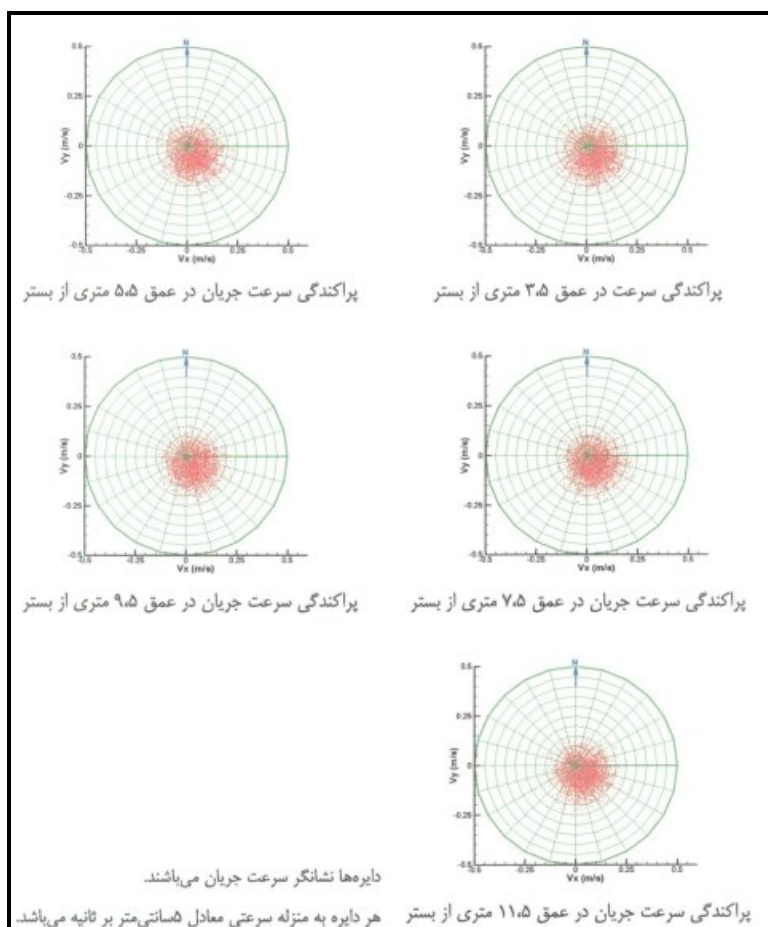
موقعیت قرارگیری دستگاه ADCP وابسته به فرکانس آن می تواند تا عمق ۲۰۰ متر نیز باشد. این دستگاه اطلاعات جریان در لایه های مختلف از بستر تا سطح آب را به صورت پروفیل های قایم در فواصل ۲۰ دقیقه ای ثبت می کند. همچنین می تواند اطلاعات را به صورت بلندمدت ثبت و ذخیره نماید. با خارج نمودن دستگاه از آب، این اطلاعات معمولاً هر ماه یکبار از حافظه داخلی دستگاه تخلیه شده و توسط نرم افزار خود دستگاه پردازش می شوند.

این دستگاه سرعت های جریان را در محدوده ± 10 متر بر ثانیه و با دقت 0.5 سانتیمتر بر ثانیه اندازه گیری می کند. در جدول (پ.۱-۳) مشخصات فنی دستگاه ADCP از نظر محدوده و دقت اندازه گیری پارامترهای جریان ارایه شده است.

جدول پ.۱-۳- مشخصات فنی (محدوده اندازه گیری و دقت) دستگاه ADCP [۱۷]

پارامتر	محدوده اندازه گیری (40 تا -4)	دقت
سرعت (m/s)	10 تا -10	1 درصد
جهت جریان (درجه)	360 -	2
درجه حرارت (سانتیگراد)	40 تا -4	0.1
فشار (m)	500 -	0.25 درصد

در شکل (پ.۱-۴۴) نمونه ای از اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه ADCP در مخزن سد دز نشان داده شده است. در این شکل پراکنش سرعت جریان در عمق های مختلف قرارگیری دستگاه ارایه شده است.



شکل پ.۱-۴۴- پراکنش سرعت جریان در لایه های مختلف ثبت شده

توسط دستگاه ADCP در مخزن سد دز [۱۷]

پ. ۱-۳-۶-۷- دستگاه Sension برای برداشت پارامترهای کیفی آب مخزن

معمولاً در پروژه‌های اندازه‌گیری مشخصات جریان غلیظ، پارامترهای کیفی از قبیل درجه حرارت، هدایت الکتریکی، pH و TDS نیز مورد سنجش و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. برای این کار از دستگاه Sension استفاده می‌شود. جهت اندازه‌گیری این اطلاعات نمونه‌های آب از عمق‌های ۲ متری از سطح آب، ۲ متری از کف مخزن به‌عنوان عمق‌های ثابت در هر ایستگاه و یک سوم عمق و دو سوم عمق به‌عنوان عمق‌های متغیر با استفاده از نمونه‌گیر نقطه‌ای گرفته می‌شود و سپس اطلاعات مورد نظر با استفاده از دستگاه Sension (شکل پ. ۱-۴۵) اندازه‌گیری می‌گردد.



شکل پ. ۱-۴۵- دستگاه Sension جهت اندازه‌گیری متغیرهای کیفی آب [۱۷]

پ. ۱-۳-۶-۸- سایر تجهیزات

برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان و رسوب علاوه بر ابزار ارایه شده، نیاز به یک سری تجهیزات کمکی به شرح زیر است: قایق به همراه تجهیزات مربوط، GPS جهت قرارگیری در محل اندازه‌گیری، دستگاه نمونه‌گیر آب، دستگاه اندازه‌گیری عمق (Diver)، کامپیوتر جهت تخلیه اطلاعات دستگاه‌ها و انجام واسنجی و تنظیمات مربوط، طناب، قرقره، وزنه سنگین، ظرف پلی‌اتیلن با حجم یک لیتر برای نمونه‌گیری آب.

پ. ۱-۳-۷- نحوه اندازه‌گیری و استخراج داده‌ها

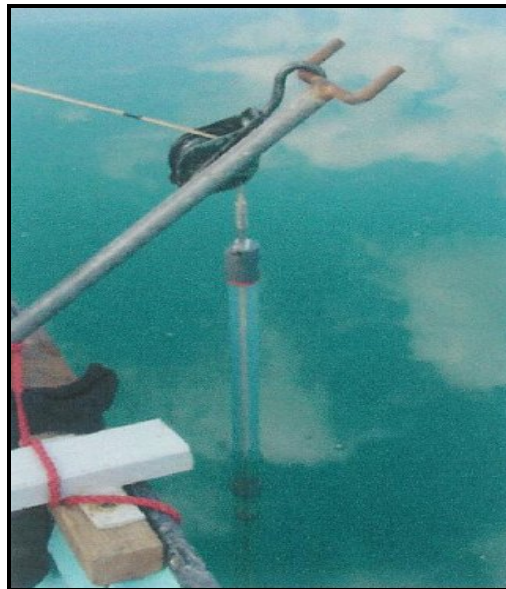
پ. ۱-۳-۷-۱- زمان اندازه‌گیری

با توجه به لزوم در نظر گرفتن تراکم مناسب برای داده‌های اندازه‌گیری میدانی جریان غلیظ در مخازن سدها از یک طرف و سختی و صعوبت و نیز هزینه بالای این کار از طرف دیگر، تعیین زمان شروع انجام این عملیات به صورت مناسب امری اجتناب‌ناپذیر است. در شرایط سیلابی، کدورت آب در نمونه‌های گرفته شده از نزدیکی بستر مخزن در محدوده دلتا به میزان معنی‌داری نسبت به شرایط عادی بیش‌تر است. با نمونه‌برداری روزانه در بالاترین ایستگاه اندازه‌گیری، غلظت رسوب به طور مرتب کنترل می‌شود. به محض مشاهده افزایش قابل توجه در غلظت رسوب، شرایط موجود به عنوان شرایط سیلابی تلقی شده و عملیات اندازه‌گیری غلظت در کلیه ایستگاه‌ها انجام خواهد گرفت. با توجه به نصب دستگاه‌های سرعت‌سنج و کدورت‌سنج در

ایستگاه‌های اندازه‌گیری، برداشت پیوسته پروفیل قائم سرعت و جهت جریان، کدورت و دیگر پارامترها در تمام مدت زمان پروژه انجام شده و مستقل از زمان شروع عملیات اندازه‌گیری غلظت رسوب می‌باشد.

پ. ۱-۳-۷-۲- نمونه‌برداری رسوب معلق

با اعلام شرایط سیلابی در محدوده مورد مطالعه و مشاهده علایم افزایش غلظت رسوب، عملیات اندازه‌گیری غلظت در کلیه ایستگاه‌ها به صورت منظم در طی دوره سیلاب انجام خواهد شد. این نمونه‌برداری‌ها با استفاده از نمونه‌بردار نقطه‌ای و به فاصله ۲ متری از کف مخزن و سپس با فواصل ۴ متری تا جاییکه آب زلال دیده شود انجام می‌شود. این نمونه‌برداری‌ها در محدوده‌ای معادل ضخامت تقریبی جریان غلیظ و مطابق با استانداردهای تهیه شده در وزارت نیرو صورت خواهد گرفت. در مخزن سد دز، محدوده‌ای معادل ۳۰ متر به این منظور در نظر گرفته شده است. شکل (پ. ۱-۴۶) دستگاه نمونه‌برداری از آب را نشان می‌دهد. وزن تقریبی این نمونه‌بردار ۶۰ کیلوگرم می‌باشد. در ابتدا و انتهای لوله یک متری نمونه‌بردار، ۲ سوپاپ وجود دارد که ورود و خروج رسوب را کنترل می‌کند. ابتدا یک لوله پلی‌اتیلن به طول ۶۰ سانتی‌متر درون لوله بیرونی نمونه‌بردار قرار گرفته و به درون مخزن رها می‌شود. با رسیدن دستگاه به سطح رسوب، لوله پلی‌اتیلن شروع به پر شدن با رسوب شده و با نفوذ بیش‌تر در رسوبات بستر، رسوب ابتدایی که غلظت کم‌تری دارد از طریق سوپاپ بالایی تخلیه می‌شود. این عمل تا هنگامی که نمونه‌بردار در رسوب سخت متوقف شود ادامه پیدا خواهد کرد. با توجه به شکل نوک نمونه‌بردار، رسوب در درون آن گیر کرده و به این ترتیب از خروج رسوب جلوگیری می‌شود. سوپاپ بالایی نیز از ورود آب و اختلاط آن با نمونه رسوب جلوگیری می‌کند.

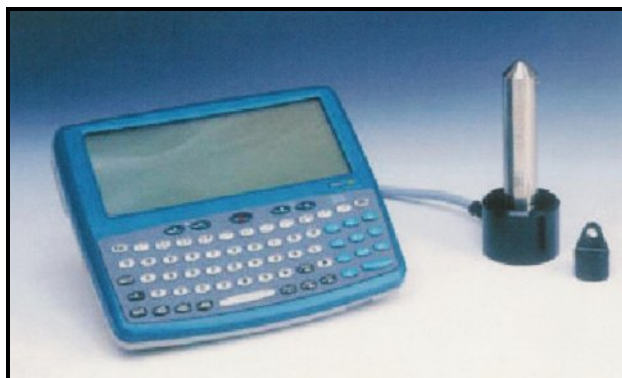


شکل پ. ۱-۴۶- دستگاه نمونه‌برداری از آب [۱۷]

برای تعیین عمق نمونه‌برداری رسوب در لایه‌های مختلف مخزن، به همراه نمونه‌گیر آب از یک دستگاه خودثبات استفاده می‌شود. پس از رمزگذاری نمونه‌ها، اطلاعات ذخیره شده در این دستگاه توسط رایانه تخلیه شده و مقدار دقیق عمق بر روی ظروف نمونه‌گیری یادداشت می‌گردد. شکل (پ. ۱-۴۷) این دستگاه را نشان می‌دهد.

پ. ۱-۳-۷-۳- برداشت پروفیل قائم سرعت

پروفیل‌های قائم سرعت در شرایط سیلاب و وقوع جریانات غلیظ در مخزن سد از اطلاعات بسیار مهم محسوب می‌شوند. از این اطلاعات می‌توان برای محاسبه حجم جریان غلیظ عبوری از هر ایستگاه و به طور کلی حرکت جریان غلیظ و زمان رسیدن آن به بدنه سد یا سازه‌های مهم استفاده کرد. این اطلاعات باید در تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری و نیز در چند مقطع از هر ایستگاه برداشت شوند تا توسعه طولی و عرضی جریانات غلیظ به صورت مناسب قابل ارزیابی باشد.



شکل پ. ۱-۴۷- دستگاه Diver برای تعیین عمق نمونه‌برداری رسوبات [۱۷]

پ. ۱-۴- کار در آزمایشگاه‌های رسوب

آزمایشگاه‌های رسوب به مفهوم استاندارد آن، وظایف معین و برنامه کاری مشخصی دارند که اهم آنها عبارتند از: تعیین غلظت نمونه‌های رسوب معلق، نمونه‌های بار بستر رودخانه‌ها، رسوبات مخازن و تعیین دانه‌بندی آنها و وزن مخصوص ذرات رسوب. اصولاً هر نمونه رسوب که به آزمایشگاه وارد شد، به تناسب اهداف مورد نظر ممکن است تحت آزمایش‌های ذیل قرار گیرد:

- تعیین غلظت مواد معلق

- تعیین دانه‌بندی

- تعیین وزن مخصوص ذرات رسوبی

به منظور تعیین غلظت نمونه‌های بار معلق رودخانه‌ها و تعیین دانه‌بندی نمونه‌های بار معلق، بار بستر و مواد کف رودخانه و رسوبات نهشته شده در مخازن سدها، باید برنامه‌ریزی خاصی روی نمونه‌ها انجام گیرد.

پ. ۱-۴-۱- تعیین غلظت رسوبات معلق در آزمایشگاه

تعیین غلظت نمونه‌های آب حاوی رسوبات معلق ارسال شده به آزمایشگاه، یکی از وظایف اصلی آزمایشگاه رسوب است. برای تعیین غلظت نمونه‌های بار معلق، باید مناسبترین روش از بین روش‌های مختلف با توجه به شرایط موجود، انتخاب شود. ممکن است نمونه دارای مقدار ناچیزی رسوبات بسیار ریزدانه و یا مقدار زیادی رسوبات با محدوده وسیعی از ذرات در اندازه‌های متفاوت باشد. نمونه‌هایی از این نوع که در واقع دو حد کرانه‌ای طیف نمونه‌های معمولی هستند، باید با روش خاصی تجزیه شوند. بدیهی است نمونه‌های متعارف بین دو حد فوق قرار می‌گیرند. برای تجزیه این نمونه‌ها، اگر اقدامات لازم برای آماده‌سازی نمونه صورت گیرد، فقط یک بار خشک کردن برای تعیین غلظت کافی است.

هر یک از روش‌های مختلف تعیین غلظت بار معلق، مزایا و معایب خاص خود را داراست. متداولترین آنها روش تبخیر، روش صافی و یا فیلتر و روش سانتیفریوژ است. برای نمونه‌هایی با غلظت کم، روش فیلتر تا حدودی سریع‌تر از روش تبخیر است. نمونه‌هایی با غلظت زیاد، به علت انسداد فیلتر، بهتر است با روش تبخیر آنالیز شوند. در آنالیز با روش تبخیر باید نتیجه به‌دست آمده، بعثت وجود املاح محلول، تصحیح گردد. این تصحیح بویژه اگر نمونه دارای مقدار کمی رسوبات باشد، ضروری است. به‌طور کلی روش فیلتر برای نمونه‌های با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر مناسب است، به شرطی که قسمت اعظم رسوبات متشکله از ذرات ماسه باشد. در صورتی که قسمت اعظم رسوبات را ذرات رس تشکیل دهد، این روش برای نمونه‌های با غلظت تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مناسب‌تر است. روش تبخیر برای غلظت‌های بیش‌تر از مقادیر فوق به‌کار می‌رود. از روش سانتیفریوژ برای نمونه با هر غلظتی می‌توان استفاده کرد. ذیلاً روش‌های فوق ارایه می‌گردند:

الف- روش تبخیر

در روش تبخیر، بعد از ته‌نشینی رسوبات در داخل بطری نمونه آب اضافی روی رسوبات برداشته می‌شود و رسوبات با شستشوی بطری به داخل ظرف تبخیر منتقل می‌گردد. سپس ظرف تبخیر در آون قرار داده می‌شود تا رطوبت آن گرفته شده و بعد از خشک‌شدن، توزین گردد. شرط اصلی برای سرعت آزمایش این است که رسوبات درون بطری کاملاً ته‌نشین گردند. رسوبات درشت‌دانه خاصیت ته‌نشینی خوبی دارند و رسوبات ریزدانه (رس) در صورت تجمع ذرات و چسبیدن آنها به یکدیگر می‌توانند بخوبی ته‌نشین شوند. در صورتی که تجمع طبیعی ذرات رس ایجاد نگردد، ممکن است زمان ته‌نشینی به حدی طولانی شود که عملاً استفاده از روش تبخیر ناممکن گردد، مگر آنکه به طریقی به ته‌نشینی ذرات سرعت لازم داده شود. برخی از این طرق به شرح زیر است:

- لوله صافی: با استفاده از لوله صافی می‌توان ذرات ریزدانه‌ای را که به کندی ته‌نشین می‌شوند، جدا نمود. البته وقت و انرژی صرف شده برای این روش تقریباً معادل وقت و انرژی صرف شده در آنالیز فیلتر است و می‌توان اصولاً به جای روش تبخیر از روش فیلتر برای تعیین غلظت استفاده نمود. مراحل استفاده از لوله صافی عبارتند از:
 - رسوبات نمونه تا مدتی که وقت اجازه می‌دهد ته‌نشین گردند.
 - با استفاده از فیلتر لوله برگردد یا فیلتر لوله‌ای مشابه و یک دستگاه مکنده، آب روی رسوبات بطری تا حد ممکن که رسوبات ته‌نشین شده منقلب نشوند، مکیده شود. در نتیجه ذرات ریز به سطح خارجی فیلتر می‌چسبند و آب از روی فیلتر عبور می‌کند.
 - ذرات چسبنده به جداره فیلتر با آب به‌طور معکوس شسته می‌شود و مخلوط حاصل شده که مقدار اندکی آب دارد، با روش تبخیر آنالیز می‌شود تا غلظت ذرات ریز آن تعیین گردد. نتیجه حاصل شده به‌صورت تصحیحی روی نتیجه آزمایش تعیین غلظت نمونه اصلی، اعمال می‌گردد.

- ماده منعقدکننده: در این روش یک ماده شیمیایی به بطری اضافه می‌شود تا خاصیت تجمع ذرات رسوب افزایش یابد و این ذرات به سهولت ته‌نشین گردند. واضح است که قسمتی از ماده شیمیایی منعقدکننده، به همراه رسوبات، تا مرحله توزین باقی می‌ماند و باید تصحیح مربوط به آن در نظر گرفته شود. این تصحیح بسیار تقریبی است زیرا تعیین این که چه درصدی از وزن کل ماده شیمیایی به رسوبات اضافه شده و چه درصدی به همراه آب از رسوبات جدا گردیده، مشکل است. لذا لازم است ماده شیمیایی منعقدکننده فقط در صورت نیاز و آن هم در حداقل لازم به آن افزوده شود. هرچه غلظت

رسوبات نمونه کم‌تر باشد، خطای نسبی حاصله از تصحیح وزن ماده مزبور بیش‌تر خواهد بود. اسیدکلریدریک (HCl) رقیق یا کلریدکلسیم (CaCl_2) منعقدکننده‌های متداول هستند. تعیین موثرترین ماده منعقدکننده، در حالت کلی ممکن نیست زیرا میزان تاثیر بستگی به نوع ذرات رس و سایر مواد محلول آب رودخانه دارد. در استفاده از HCl یا CaCl_2 باید نهایت دقت به عمل آید. به‌طور کلی استفاده از HCl رقیق توصیه نمی‌شود زیرا کربنات‌ها در محلول اسیدکلریدریک کاملاً و سایر کانی‌ها تا حدودی در آن حل می‌شوند. از طرف دیگر، CaCl_2 نیز خاصیت نمگیری دارد، لذا در صورت استفاده از آن به جای ظروف روباز تبخیر باید از بطری‌های دربسته توزین استفاده گردد.

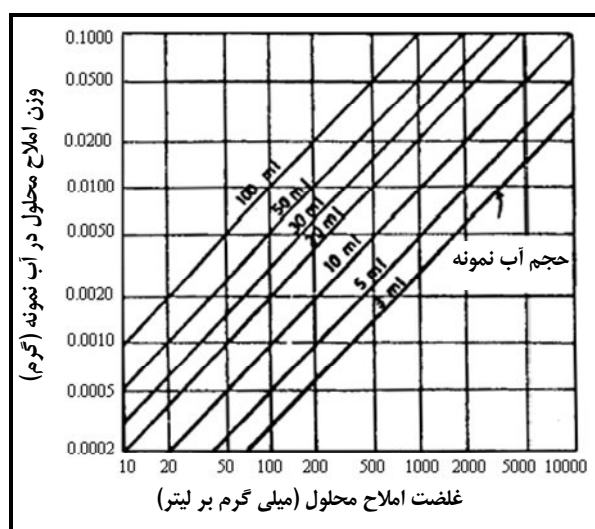
پس از اطمینان از نهشته شدن رسوب درون بطری، آب اضافی روی رسوبات با احتیاط از بطری خارج گردد، به قسمی که رسوبات نهشته شده مجدداً معلق نشده و همراه آب از بطری خارج نشوند. بدین ترتیب مقدار اندکی آب روی رسوبات باقی خواهد ماند. این مقدار باید در حدود ۲۰ تا ۷۰ میلی‌لیتر باشد. در نظر گرفتن این رقم، بویژه در تصحیح مربوط به املاح مهم است. بعد از خارج کردن آب اضافی، رسوبات به ظرف تبخیر منتقل می‌گردد. برای این منظور باید رسوبات چسبیده به بطری را بعد از شستشو با آب مقطر، به ظرف تبخیر انتقال داد. آنگاه ظرف تبخیر در آون قرار داده می‌شود تا رطوبت آن بخار شود. دمای آون باید اندکی کم‌تر از دمای جوش آب باشد، تا ذرات به همراه قطرات آب به بیرون نپزد. بعد از آنکه رطوبت ظاهری تبخیر گردید، دمای آون به 110°C بالا رود و حداقل یکساعت در این درجه حرارت نگهداری شود.

در بعضی موارد باید وزن مواد محلول از وزن کل رسوبات به‌دست آمده از روش تبخیر کاسته شود. در صورتی که وزن کل رسوبات و آب رودخانه در بطری نمونه برابر ۴۰۰ گرم و ۲۰ میلی‌لیتر آب رودخانه به همراه رسوبات در ابتدای تبخیر در ظرف موجود باشد:

– اگر غلظت املاح محلول آب رودخانه برابر یا بیش‌تر از غلظت رسوبات باشد، تصحیح املاح محلول به مقدار ۵ درصد یا بیش‌تر روی نتیجه آزمایش تاثیر دارد.

– اگر غلظت املاح محلول آب رودخانه برابر ۴۰ درصد یا بیش‌تر از غلظت رسوبات باشد، تصحیح املاح محلول به مقدار ۲ تا ۵ درصد روی نتیجه آزمایش تاثیر دارد.

برای محاسبه وزن املاح محلول می‌توان از شکل (پ. ۱-۴۸) استفاده نمود.



شکل پ. ۱-۴۸ - رابطه بین وزن و غلظت املاح محلول [۱]

ب- روش صافی

روش صافی، نسبت به روش تبخیر، مزایای آشکاری دارد و لذا در صورتیکه شرایط اجازه دهد، باید از آن استفاده کرد. در این روش معمولاً از یک کروزه گوجه با صافی‌های از جنسهای مختلف استفاده می‌گردد. کروزه گوجه عبارت است از یک فنجان چینی نسوز به ظرفیت ۲۵ میلی‌لیتر که ته آن مجوف است. شکل کروزه گوجه به قسمی است که به راحتی می‌توان آن را به سیستم پمپ مکش وصل نمود و در نتیجه آزمایش صافی خلاء را انجام داد. کروزه گوجه از ظرف تبخیر سبکتر است و فضای کم‌تری را در دیسکاتور اشغال می‌کند. وزن خالص کروزه گوجه کم‌تر در معرض تغییرات قرار می‌گیرد، زیرا نسبت به ظرف تبخیر دارای سطح کم‌تری در مجاورت رطوبت است. به علت نفوذ کند رطوبت، مواد محلول کم‌تری نیز به جداره آن نفوذ می‌کند و نیاز به تصحیح املاح محلول ندارد.

در اغلب آزمایشگاه‌های رسوب از کروزه بلوری (مانند: corning#32960 یا مشابه آن) با دیسک‌های صافی از جنس فیبر شیشه (corning # 934-AN) یا مشابه آن استفاده می‌شود. وزن این نوع صافی‌ها در حین فیلتراسیون کاهش پیدا نمی‌کند و زمان کم‌تری برای آزمایش لازم دارد، در نتیجه عمل فیلتراسیون یکنواخت‌تر است و تمیز کردن کروزه راحت‌تر صورت می‌گیرد. ایراد اساسی این صافی‌ها این است که در اثر عبور رسوبات ریزدانه منافذ آنها سریع گرفته می‌شود. بهترین نوع صافی برای رسوبات ریزدانه دیسک‌های صافی فیبر شیشه همراه با توری آریست است. در این حالت قسمت اعظم ذراتی که در منافذ صافی فیبر شیشه گیر می‌کند، از توری آریست عبور نمی‌کنند و در نتیجه خطر انسداد صافی فیبر شیشه که زیر توری آریست است به میزان زیادی کاهش می‌یابد. استفاده از دو صافی فوق وقتی توصیه می‌شود که صافی فیبر شیشه، به تنهایی نتیجه دقیق نمی‌دهد. باید توجه کرد که بهر حال استفاده از این روش به زمان بیش‌تری نیاز دارد.

اگر صافی فیبر شیشه در دسترس نباشد، صافی آریست به علت مقاومت آن در مقابل حرارت و خاصیت نمگیری کم آن مناسب‌تر است. توری‌های صافی آریست را می‌توان به دو روش داخل کروزه قرار داد. راحت‌ترین روش این است که مخلوطی از آب مقطر و قطعات باریک بریده شده از آریست تهیه و به داخل کروزه ریخته شود و در همان وضعیت، مکش به کروزه اعمال گردد. بدین ترتیب یک توری آریست یکنواخت در ته کروزه ایجاد می‌شود. این توری باید مجدداً با آب مقطر شسته شود (در عین حال که مکش نیز کار می‌کند). آنگاه کروزه در آون خشک و در دیسکاتور خنک می‌شود. بعد از خنک شدن، وزن خالص کروزه با صافی تعیین می‌گردد. روش دیگر، قرار دادن یک تکه آریست یکنواخت بریده شده در ته کروزه و شستشوی آن با آب مقطر با اعمال مکش است. اگر رسوبات محتوی دانه‌های خیلی ریز باشد، برای فیلتراسیون سریع، و نیز ممانعت از عبور ذرات خیلی ریز از فیلتر، سه روش موجود است:

– با اضافه کردن مقداری معمولی ماده جاذب مانند: کربن فعال که باعث به هم پیوستن ذرات کلوئیدی در اثر اختلاف بار الکتریکی می‌گردد.

– اشباع کردن صافی از مقدار معینی رسوب و دوباره فیلتر کردن آب و ذرات کلوئیدی عبور نموده از فیلتراسیون اول.

– به کار بردن یک ماده منعقدکننده از نوع اسید یا نمک قبل از فیلتراسیون.

استفاده از ماده جاذب نسبت به ماده منعقدکننده ارجحیت دارد زیرا در حالت اول میزان تصحیح نتایج کاملاً دقیق است، در صورتی که در دو روش دوم تصحیح نتایج به صورت تقریبی امکان‌پذیر است، چون دقیقاً معلوم نیست که چه درصدی از ماده منعقدکننده در رسوبات و چه درصدی در آب باقی می‌ماند. علاوه بر آن استفاده از اسید یا نمک ممکن است باعث ایجاد واکنش‌های نامعین و نامطلوب گردد.

ج- روش سانتریفیوژ

نمونه کاملاً بهم زده شده سپس حدود ۵۰ سی‌سی از آن در داخل تست تیوب ریخته می‌شود و در دستگاه سانتریفیوژ (جداساز) با دور ۲۵۰۰-۳۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده می‌شود و در اثر نیروی گریز از مرکز رسوب موجود در نمونه ته‌نشین شده و آب شفاف در بالا قرار می‌گیرد. در پایان سانتریفیوژ آب شفاف از آن جدا شده و بیرون ریخته می‌شود. سپس رسوب باقی مانده در کف تست تیوب در آون ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌گیرد و پس از خشک شدن مجدداً وزن می‌گردد. از تفاضل وزن تست تیوب از این مقدار، وزن رسوب خشک در ۵۰ سی‌سی نمونه به دست می‌آید و با استفاده از یک تناسب ساده غلظت نمونه بر حسب میلی‌گرم در لیتر به دست می‌آید.

پ. ۱-۴-۲- تعیین دانه‌بندی مصالح رسوبی

دانه‌بندی مصالح رسوبی با روش‌های مختلف امکان‌پذیر است که در اینجا روش‌های مرسوم ارایه می‌گردند:

الف- روش الک

در این روش از یک سری الک استاندارد استفاده می‌شود. جدول (پ. ۱-۴)، شماره و اندازه سوراخ‌های سری الک‌های استاندارد آمریکا، فرانسه، بریتانیا و آلمان را نشان می‌دهد. این الک‌ها معمولاً در سه اندازه به قطرهای ۲۰، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر ساخته می‌شوند. الک‌های بزرگ برای خاک‌هایی که حاوی ذرات درشت نظیر شن، سنگ‌ریزه و قلوه‌سنگ است مناسب می‌باشند.

— روش کار:

- مقداری خاک را، که نمونه‌ای از خاک مورد نظر است، در گرمخانه الکتریکی کاملاً خشک نمایید (۱۸ ساعت در درجه حرارت 110°C - 105°C). با استفاده از هاون با دسته چوبی، چکش لاستیکی و یا چوبی و یا پودرکننده‌های مکانیکی، کلوخه‌ها و خاکدانه‌ها را خرد نمایید تا ذرات بهم چسبیده خاک از یکدیگر جدا شوند.
- مقداری از این خاک را وزن کرده و در الک شماره ۲۰۰ (اندازه سوراخ 0.075 mm) قرار داده زیر شیر آب بشویید تا تمامی ذرات کوچک‌تر از 0.075 میلی‌متر از آن عبور کنند. در موقع شستن دقت کنید خاک به بیرون نپاشد و الک نیز صدمه نبیند. اگر خاک به مقدار زیادی سنگ‌ریزه دارد، این مرحله را حذف کنید و از مرحله ۵ به بعد کار را ادامه دهید.
- خاک مانده در الک را در یک ظرف بریزید. با برگرداندن الک روی ظرف و ریختن کمی آب از پشت آن، خاک چسبیده به الک را نیز به مدت کوتاهی در کناری بگذارید تا خاک ته‌نشین شود. سپس، آب صاف روی آن را خارج کرده و ظرف محتوی خاک مرطوب را برای خشک شدن در اجاق الکتریکی قرار دهید (حدود ۱۸ ساعت).
- خاک خشک شده را وزن کنید. وزن ذرات کوچک‌تر از 0.075 میلی‌متر را، که در اثر آبشویی از الک شماره ۲۰۰ رد شده، حساب کنید.
- تعدادی الک، متناسب با درشت و ریزی ذرات خاک، به ترتیبی که نقاط کافی برای سراسر منحنی به دست دهد، انتخاب کنید. به عنوان مثال برای یک خاک نسبتاً ریزدانه، که قسمت عمده‌ای از آن از ماسه و لای تشکیل شده، از بالا به پایین به یکی از ترتیب‌های جدول (پ. ۱-۵) می‌تواند باشد.

- خاک خشک تهیه شده در مرحله ۴ را در الک بالایی ریخته در آن را بگذارید. در زیر پایین‌ترین الک نیز یک ظرف که شکل و اندازه‌اش مانند الک‌ها می‌باشد، قرار دهید. مجموعه الک‌ها را به مدت ۱۰-۵ دقیقه بوسیله تکان‌دهنده الکتریکی، ورز دهید.
 - خاک مانده در هر الک را وزن کنید. به این ترتیب می‌توانید درصد وزنی ذرات کوچک‌تر از اندازه هر الک را محاسبه و منحنی دانه‌بندی خاک را رسم کنید.
- نکات قابل توجه:
- مقدار خاک لازم برای آزمایش، تابع ریزی و درشتی ذرات خاک می‌باشد. برای خاکی که حاوی سنگریزه‌هایی به اندازه حداکثر ۹/۵ mm است، حدود ۵۰۰ گرم، برای خاکی که حاوی شن‌هایی به اندازه‌ی حداکثر ۱۹ mm است. حدود یک و نیم کیلوگرم و برای خاکی که حاوی قلوه سنگ‌هایی به اندازه‌ی حداکثر ۷۵ mm است، حدود ۵ کیلوگرم خاک لازم می‌باشد. در دو مورد اخیر از الک‌های بزرگ (قطر الک ۳۰ یا ۴۵ سانتی‌متر) استفاده می‌شود.
 - در موقع الک کردن، امکان چسبیدن ذرات کوچک به ذرات بزرگ‌تر و در نتیجه رد نشدن تمام ذرات کوچک‌تر از اندازه سوراخ یک الک، از آن، وجود دارد. علاوه بر این، عبور ذرات خاک از یک الک، تابع آرایش یا طرز قرار گرفتن ذرات در الک نیز می‌باشد. ممکن است بعضی از ذرات، در تمام مدتی که الک تکان داده می‌شود، در موقعیتی قرار نگیرند که از سوراخ‌های الک عبور کنند، بنابراین نمی‌توان اطمینان کامل داشت که تمام ذرات کوچک‌تر از سوراخ یک الک از آن عبور می‌کنند. آبشویی، خطای ناشی از چسبیدن ذرات به یکدیگر را به میزان قابل توجهی تقلیل می‌دهد.
 - حاصل جمع خاک مانده در الک‌ها و ظرف زیر آنها را می‌شود محاسبه کرد. علی‌الاصول حاصل جمع باید با وزن خاک در شروع آزمایش برابر باشد. چنان‌چه تفاوت بیش از ۲ درصد گردد، دقت انجام آزمایش کافی نبوده و باید با دقت بیشتری آن را تکرار کرد.
 - در موقع خرد کردن کلوخه‌ها و خاکدانه‌ها (برای جدا کردن ذرات خاک از یکدیگر) امکان شکسته شدن ذرات خاک وجود دارد. چنان‌چه مرحله و ذرات از یکدیگر جدا می‌شوند، برای کسب دقت بیش‌تر، خرد کردن را می‌توان از مراحل کار حذف کرد.
 - آزمایش الک اطلاعاتی راجع به شکل دانه‌های خاک (گرد، گوشه دار، نیمه گوشه‌دار) به دست نمی‌دهد.
- اگر بیش از ۱۰ درصد ذرات از الک شماره ۲۰۰ رد شود، لازم است آزمایش هیدرومتر نیز، برای به‌دست آوردن نقاط کافی جهت رسم قسمت ریزدانه منحنی، انجام شود.

جدول پ. ۱-۴- شماره و اندازه سوراخ الک‌ها در استانداردهای مختلف [۱]

ASTM E11 (Vol 14.02)			الک‌های استاندارد آمریکایی		
اندازه سوراخ mm	شماره الک	اندازه سوراخ mm	شماره الک	اندازه سوراخ mm	شماره الک
۰/۴۲۵	۴ ^b	۴/۷۵	۴ ^a	۱۰۰/۰	
۰/۳۵۵	۴۵	۴/۰۰	۵	۷۵/۰	
۰/۳۰۰	۵۰	۳/۳۵	۶	۶۳/۰	
۰/۲۵۰	۶۰	۲/۸۰	۷	۵۰/۰	
۰/۲۱۲	۷۰	۲/۳۶	۸	۴۵/۰	
۰/۱۸۰	۸۰	۲/۰۰	۱۰	۳۷/۵	
۰/۱۵۰	۱۰۰	۱/۷۰	۱۲	۳۱/۵	
۰/۱۲۵	۱۲۰	۱/۴۰	۱۴	۲۵/۰	
۰/۱۰۶	۱۴۰	۱/۱۸	۱۶	۱۹/۰	
۰/۰۹۰	۱۷۰	۱/۰۰	۱۸	۱۶/۰	
۰/۰۷۵	۲۰۰	۰/۸۵۰	۲۰	۱۲/۵	
۰/۰۶۳	۲۳۰	۰/۷۱۰	۲۵	۹/۵	
۰/۰۵۳	۲۷۰	۰/۶۰۰	۳۰	۸/۰	
۰/۰۴۵	۳۲۵	۰/۵۰۰	۳۵	۶/۳	
(AFNOR X-11-501)			الک‌های استاندارد فرانسوی		
۰/۱۲۵	۲۲	۰/۸۰۰	۳۰	۵/۰۰۰	۲۸ ^a
۰/۱۰۰	۲۱	۰/۶۳۰	۲۹	۴/۰۰۰	۳۷
۰/۰۸۰	۲۰	۰/۵۰۰	۲۸	۳/۱۵۰	۳۶
۰/۰۶۳	۱۹	۰/۴۰۰	۲۷b	۲/۵۰۰	۳۵
۰/۰۵۰	۱۸	۰/۳۱۵	۲۶	۲/۰۰۰	۳۴
۰/۰۴۰	۱۷	۰/۲۵۰	۲۵	۱/۶۰۰	۳۳
		۰/۲۰۰	۲۴	۱/۲۵۰	۳۲
		۰/۱۶۰	۲۳	۱/۰۰۰	۳۱
(British Standard Institution) London BS-410			الک‌های استاندارد بریتانیایی		
اندازه سوراخ mm	شماره الک	اندازه سوراخ mm	شماره الک	اندازه سوراخ mm	شماره الک
۰/۱۵۲	۱۰۰	۰/۶۹۹	۲۲	۳/۳۵۳	۵ ^a
۰/۱۲۴	۱۲۰	۰/۵۹۹	۲۵	۲/۸۱۲	۶
۰/۱۰۴	۱۵۰	۰/۵۰۰	۳۰	۲/۴۱۱	۷
۰/۰۸۹	۱۷۰	۰/۴۲۲	۳۶ ^{a*}	۲/۰۵۷	۸
۰/۰۷۶	۲۰۰	۰/۳۵۳	۴۴	۱/۶۷۶	۱۰
۰/۰۶۶	۲۴۰	۰/۲۹۵	۵۲	۱/۴۰۵	۱۲
۰/۰۵۳	۳۰۰	۰/۲۵۱	۶۰	۱/۲۰۴	۱۴
		۰/۲۱۱	۷۲	۱/۰۰۳	۱۶
		۰/۱۷۸	۸۵	۰/۸۵۳	۱۸
(German Standard Specification) DIN 4188			الک‌های استاندارد آلمانی		
۰/۲۰۰	۲۰۰	۲۵/۰۰		۲۵/۰	
۰/۱۶۰	۱۶۰	۲/۰۰۰		۲۰/۰	
۰/۱۲۵	۱۲۵	۱/۶۰۰		۱۸/۰	
۰/۱۰۰	۱۰۰	۱/۲۵۰		۱۶/۰	
۰/۰۹۰	۹۰	۱/۰۰۰		۱۲/۵	
۰/۰۸۰	۸۰	۰/۸۰۰	۸۰۰	۱۰/۰	
۰/۰۷۱	۷۱	۰/۶۳۰	۶۳۰	۸/۰	
۰/۰۶۳	۶۳	۰/۵۰۰	۵۰۰	۶/۳	
۰/۰۵۶	۵۶	۰/۴۰۰	۴۰۰	۵/۰	
۰/۰۵۰	۵۰	۰/۳۱۵	۳۱۵	۴/۰	
۰/۰۴۵	۴۵	۰/۲۵۰	۲۵۰	۳/۱۵۰	
(a) مخصوص آزمایش استاندارد تراکم (b) مخصوص آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ					

جدول پ.۱-۵- ترتیب قرارگیری الک ها [۱]

ترتیب اول		ترتیب دوم	
شماره الک	اندازه سوراخ mm	شماره الک	اندازه سوراخ mm
درب الک	-	درب الک	-
۴	۴/۷۵	۴	۴/۷۵
۱۰	۲/۰۰	۱۰	۲/۰۰
۲۰	۰/۸۵۰	۲۰	۰/۸۵۰
۴۰	۰/۴۲۵	۳۰	۰/۶۰۰
۶۰	۰/۲۵۰	۵۰	۰/۳۰۰
۱۴۰	۰/۱۰۶	۱۰۰	۰/۱۵۰
۲۰۰	۰/۰۷۵	۲۰۰	۰/۰۷۵
ظرف زیر الک ها	-	ظرف زیر الک ها	-

ب- روش هیدرومتر

هیدرومتر وسیله ای است که اساسا برای سنجش چگالی مایعات ساخته شده است. در مورد مخلوط آب و خاک، از آن جا که عمل ته نشینی صورت می گیرد، چگالی مخلوط در هر عمق نسبت به زمان تغییر می کند. هیدرومتر چگالی مخلوط را در عمقی که مرکز حجم حباب هیدرومتر قرار دارد، برای یک لحظه معین از زمان، نشان می دهد. اندازه بزرگ ترین ذره موجود را در این عمق، برای یک لحظه معین، می شود با استفاده از قانون استوکس به دست آورد. فرض کنیم این اندازه برابر با D میلی متر باشد. از آن جا که تراکم ذرات کوچک تر از D با تراکم اولیه آن، یعنی موقعی که مخلوط به صورت یکنواخت بوده، تفاوتی ندارد، با استفاده از قرائت هیدرومتر می شود وزن ذرات کوچک تر از D را در کل مخلوط و در نتیجه، با توجه به معلوم بودن وزن کل خاکی که با آب مخلوط شده، درصد وزنی ذرات کوچک تر از D را در خاک محاسبه کرد. فرمول کلی به شرح زیر است:

$$\%W_D = \frac{100G_s}{W_s(G_s - 1)} R_c \quad (\text{پ.۱-۱۰})$$

در این رابطه:

$\%W_D$ - درصد وزنی ذرات کوچک تر از D در نمونه خاک،

W_s - وزن خشک خاکی است که با آب مخلوط شده،

G_s - چگالی ذرات جامد خاک و

R_c - قرائت تصحیح شده ی هیدرومتر می باشد.

R_c - از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_c = R_a + C_t - C_d \quad (\text{پ.۱-۱۱})$$

R_a - عددی است که روی هیدرومتر قرائت می شود. به عنوان مثال، در هیدرومتر، 151 H، اگر عددی که هیدرومتر نشان

می دهد ۱/۰۲۳ باشد قرائت هیدرومتر، R_a ، ۲۳ در نظر گرفته می شود.

C_t - تصحیح مربوط به درجه حرارت می باشد که از جدول (پ.۱-۶) به دست می آید.

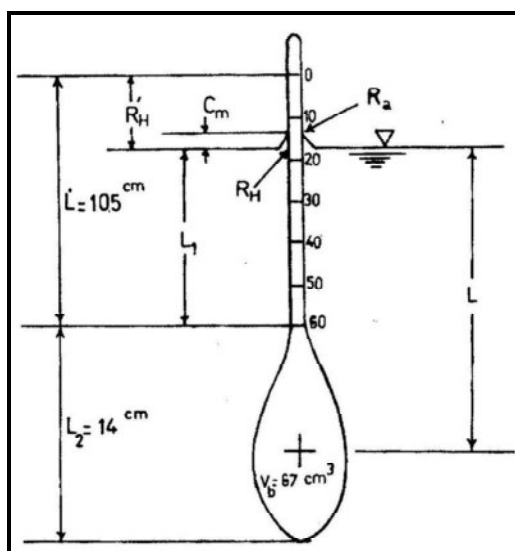
C_d - تصحیح مربوط به ماده پراکنده ساز می باشد.

در اثر بارهای مثبت و منفی ممکن است چند ذره به یکدیگر چسبیده دانه‌ی بزرگی به وجود آورند که با سرعت بیش‌تری، مطابق قانون استوکس، سقوط کند. لذا، در شروع کار به مخلوط آب و خاک یک ماده پراکنده ساز اضافه می‌کنند. واضح است که در اثر وجود این ماده، هیدرومتر بالاتر از محل واقعی قرار می‌گیرد و در نتیجه قرائت آن بیش از واقع خواهد بود. بنابراین، به اندازه C_d باید از قرائت هیدرومتر کم کرد تا قرائت آن تصحیح گردد. C_d به کمک یک ظرف شاهد، که حاوی آب و همان مقدار ماده پراکنده‌ساز است که در مخلوط آب و خاک ریخته شده، به‌دست می‌آید.

بر اثر نیروهای دگردوسی بین شیشه و آب، سطح آب در محل تماس با ساقه هیدرومتر به صورت یک قوس است که به آن هلال یا منیسک می‌گویند. از آن‌جا که در مخلوط آب و خاک فقط قسمت بالای هلال قابل قرائت است، عدد خوانده شده به اندازه C_m (تصحیح هلال) کم‌تر از قرائت واقعی (R_H) می‌باشد شکل (پ. ۱-۴۹). گر چه با استفاده از ظرف شاهد، که آب آن شفاف است، می‌شود تصحیح هلال را اندازه‌گیری کرد، ولی به علت آن‌که در فرمول (پ. ۱-۱۱)، C_d و R_a مختلف‌العلامه می‌باشند، قرائت C_d در ظرف شاهد نیز، مانند R_a در مخلوط آب و خاک، نسبت به بالای هلال انجام می‌شود تا نیازی به تصحیح قرائت‌ها نباشد.

جدول پ. ۱-۶- تصحیح درجه حرارت (فرمول پ. ۱-۱۱) [۱]

C_t	درجه حرارت °C	C_t	درجه حرارت °C	C_t	درجه حرارت °C
+۲/۰۰	۲۷	+۰/۲۰	۲۱	-۱/۱۰	۱۵
+۲/۵۰	۲۸	+۰/۴۰	۲۲	-۰/۹۰	۱۶
+۳/۰۵	۲۹	+۰/۷۰	۲۳	-۰/۷۰	۱۷
+۳/۸۰	۳۰	+۱/۰۰	۲۴	-۰/۵۰	۱۸
		+۱/۳۰	۲۵	-۰/۳۰	۱۹
		+۱/۶۵	۲۶	-۰/۰۰	۲۰



شکل پ. ۱-۴۹- هیدرومتر [۱]

نحوه واسنجی هیدرومترها متفاوت است. متداول‌ترین نوع هیدرومتر که، در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد، هیدرومترهای ASTM مدل H 152 و مدل H 151 می‌باشد. در هیدرومتر H 152، عدد قرائت شده مستقیماً وزن ذراتی را که هنوز به حالت معلق در مخلوط آب و خاک قرار دارد، به‌دست می‌دهد مشروط بر آن‌که: چگالی ذرات خاک ۲/۶۵، جرم واحد حجم آب $1/000 \text{ g/cm}^3$ ،

حجم کل مخلوط (آب + خاک + ماده پراکنده ساز) ۱۰۰۰ cc و وزن خاک مخلوط شده با آب کم‌تر از ۶۰ گرم باشد. به این ترتیب، درصد وزنی ذرات کوچک‌تر از D، برای خاکی که چگالی آن ۲/۶۵ است، به وسیله هیدرومتر 152 H، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\%W_D = \frac{100R_c}{W_s} \quad (\text{پ. ۱-۱۲})$$

از مقایسه این رابطه با رابطه کلی (پ. ۱-۱۰)، رابطه زیر برای خاک‌هایی که چگالی آنها عددی غیر از ۲/۶۵ است، به دست می‌آید.

$$\%W_D = \frac{100R_c}{W_s} \times \frac{G_s}{G_s - 1} \times \frac{1.65}{2.65} \quad (\text{پ. ۱-۱۳})$$

رابطه بالا فقط برای هیدرومتر 152 H اعتبار دارد. در مورد هیدرومتر 151 H، که درجه‌بندی‌های آن چگالی مخلوط آب و خاک را نشان می‌دهد، می‌توان مستقیماً از رابطه (پ. ۱-۱۲)، $\%W_D$ را به دست آورد.

برای آن که ذرات خاک به یکدیگر نچسبند و تشکیل دانه درشت‌تری ندهد، از مواد پراکنده‌ساز نظیر هگزا متافسفات سدیم (NaPO_3) با نام تجاری کالگن و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نام تجاری آب‌شیشه استفاده می‌شود مقدار لازم ۱۲۵ cc محلول ۴ درصد کالگن است. این محلول باید تازه درست شده باشد. چنانچه بیش از یک ماه از حل کردن پودر خالص آن در آب گذشته باشد، قابل استفاده نخواهد بود. در مورد آب‌شیشه، حدود ۱-۰/۵ سانتی‌متر مکعب از محلول غلیظ آن را باید در ۱۲۵ cc آب حل نموده و به مخلوط آب و خاک اضافه کرد. نهایتاً، حجم کل (آب، خاک و ماده پراکنده‌ساز) باید ۱۰۰۰ cc شود.

– نکات قابل توجه:

زمان مناسب، برای قرائت هیدرومتر از لحظه‌ی شروع به شرح زیر می‌باشد:

- ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴ و ۹۶ ساعت. زمان‌های توصیه شده پس از ۲ ساعت اول تقریبی است.
- بهتر است قرائت‌های اول و دوم (یعنی قرائت‌های مربوط به ۲ و ۴ دقیقه)، آنقدر تکرار شود تا حداکثر تفاوت بین دو سری از قرائت‌ها از یک (برای هر دو قرائت) تجاوز نکند.
- با توجه به مدت طولانی آزمایش، همراه با قرائت هیدرومتر، درجه حرارت نیز باید قرائت گردد.
- هیدرومتر را باید به آرامی درون مخلوط قرار داد؛ آنقدر آرام که حدود ۱۰ ثانیه طول بکشد.

اندازه‌گیری L به وسیله هیدرومتر:

گفته شد با استفاده از قرائت هیدرومتر می‌توان فاصله سطح آب تا مرکز حجم حباب هیدرومتر را محاسبه کرد (L در شکل پ. ۱-۴۹). برای این کار:

- طول L_2 و تعدادی طول L_1 را اندازه‌گیری کنید. L_1 فاصله بالای حباب (درجه ۶۰) تا درجه بندی‌های روی ساقه هیدرومتر است. بنابراین، برای هر یک از این درجه‌بندی‌ها یک عدد برای L_1 به دست می‌آید.
- سطح مقطع شیشه استوانه‌ای شکل را که مخلوط آب و خاک در آن ریخته می‌شود، اندازه‌گیری نمایید. سطح مقطع ظرف استوانه‌ای که با هیدرومتر 152 H مورد استفاده قرار می‌گیرد $A = 27/8$ سانتی‌متر مربع است.
- حباب هیدرومتر را در یک ظرف مدرج پر از آب فرو برده، حجم حباب را اندازه‌گیری کنید (V_b). به این ترتیب:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_b}{A} \right) \quad (\text{پ. ۱-۱۴})$$

وجود عبارت $-\frac{V_b}{A}$ در رابطه بالا به این علت است، که در نتیجه فرو رفتن هیدرومتر در مخلوط آب و خاک، سطح مخلوط به اندازه $\frac{V_b}{A}$ بالا می‌آید. بنابراین، مرکز حجم هیدرومتر باندازه $\frac{1}{2} \frac{V_b}{A}$ بالاتر قرار می‌گیرد. رابطه (پ.۱-۱۴) را، مطابق شکل (پ.۱-۵۰) به صورت زیر نیز می‌شود نوشت:

$$L = L' - R'_H + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_b}{A} \right) \quad (\text{پ.۱-۱۵})$$

R'_H فاصله بین صفر هیدرومتر و سطح افقی آب می‌باشد. این فاصله تابع قرائت هیدرومتر (R_H) است. از آن‌جا که تمام اجزای سمت راست فرمول (پ.۱-۱۵)، به جز R'_H ، برای یک هیدرومتر و ظرف استوانه‌ای که مخلوط آب و خاک در آن ریخته می‌شود، مقادیر ثابتی می‌باشند، می‌توان مقدار L را بر حسب مقادیر مختلف R'_H و یا بهتر از آن R_H ، یک بار برای همیشه، محاسبه و در جدولی یادداشت کرد. جدول (پ.۱-۷)، مقادیر L را بر حسب قرائت هیدرومتر، R_H ، برای هیدرومتر 152 H و شیشه استوانه‌ای آن نشان می‌دهد.

تغییرات R'_H نسبت به R_H تقریباً خطی است. برای هیدرومتر 152 H می‌توان نوشت:

$$R'_H = 0.1641 R_H \quad (\text{پ.۱-۱۶})$$

بنابراین برای این هیدرومتر رابطه (پ.۱-۱۵) به شرح زیر می‌باشد:

$$L = 10.5 - 0.1641 R_H + \frac{1}{2} \left(14 - \frac{67}{27.8} \right) \quad (\text{پ.۱-۱۷})$$

و یا:

$$L = 16.3 - 0.1641 R_H \quad (\text{پ.۱-۱۸})$$

چنان‌چه محاسبات با کامپیوتر انجام شود، از رابطه (پ.۱-۱۸) می‌توان L را بر حسب R_H به‌دست آورد.

با توجه به رابطه (پ.۱-۱۵)، با معلوم بودن ابعاد هیدرومتر و ظرف استوانه‌ای آن برای هر هیدرومتری می‌توان رابطه‌ای مانند رابطه (پ.۱-۱۸) به‌دست آورد.

از آن‌جا که رنگ مخلوط آب و خاک کدر است، پایین هلال (منیسک) قابل قرائت نیست لذا عملاً بالای آن قرائت می‌شود (R_a) در شکل پ.۱-۵۰ که مقداری کمتر از قرائت واقعی (R_H در همان شکل) می‌باشد. این مقدار را، که به آن تصحیح هلال (C_m) گویند، با قرار دادن هیدرومتر در ظرف شاهد، که حاوی آب و ماده پراکنده‌ساز است، به‌دست آورده و به قرائت هیدرومتر، در مخلوط آب و خاک، اضافه می‌کنند تا قرائت تصحیح شده (R_H) به‌دست آید. برای به‌دست آوردن عمق موثر (L) از قرائت تصحیح شده استفاده می‌شود.

ج- دستگاه تفکیک لیزری دانه‌بندی مواد معلق

لیزر اشعه‌ای است که به‌صورت خطی و مستقیم متصاعد می‌گردد و در برخورد با موانع از مسیر خود منحرف می‌شود. میزان انحراف بستگی به اندازه و حجم مانع دارد و هرچه مانع بزرگ‌تر باشد زاویه انحراف بیش‌تر خواهد شد. استفاده از این اصل معیار عملکرد دستگاه دانه‌بندی لیزری می‌باشد.

قابلیت‌ها و امکانات اندازه‌گیری بوسیله دستگاه لیزری فوق‌الذکر عبارتند از:

- نیاز به حجم بسیار کم نمونه جهت انجام آزمایش
 - امکان انجام آزمایش با نمونه های تر و خشک
 - پوشش دامنه وسیعی از اندازه ذرات (از ۰/۰۵ میکرومتر تا ۳۴۸۰ میکرومتر)
 - سرعت عمل دستگاه و قابلیت تکرار به تعداد مورد لزوم
 - عدم تاثیر شرایط محیطی همانند دما بر روند آزمایش و حذف خطاهای مشاهداتی
 - امکان اندازه گیری ذرات شناور و هم چنین مواد معلق در هوا
 - جداسازی ذرات فلوکوله شده و به هم چسبیده در هنگام آزمایش به دو روش صوتی و مکانیکی (هم زدن نمونه به کمک پره)
 - عدم نفوذ اشعه در ذرات و تخریب آنها.
 - تنوع نتایج خروجی و ارایه آنها به صورت منحنی، جدول و پردازش آنها.
- به طوری که علاوه بر ارایه دانه بندی مواد معلق به صورت جدول، منحنی ذرات ریزتر، منحنی ذرات درشت تر، منحنی فراوانی اندازه ذرات و هیستوگرام درصد حجمی، اطلاعات جنبی دیگری به شرح زیر ارایه می شود:
- اندازه ذرات برای درصدهای مختلف ریزتر همانند: $D(V, 0.9)$, $D(V, 0.1)$, $D(V, 0.5)$ است که عبارتند از اندازه ای از ذرات رسوب که به ترتیب ۹۰، ۱۰، ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک تر باشند. هم چنین اندازه میانگین حجمی $D[4,3]$ ، اندازه میانگین سطحی $D[3,2]$ ، پهنای توزیع ذرات (Span) انحراف معیار مطلق از میانگین (Uniformity) و هم چنین سطح بیرونی مخصوص ذره یا SSA. شکل های (پ. ۱-۵۰)، (پ. ۱-۵۱) و (پ. ۱-۵۲) قسمت های مختلف دستگاه لیزری دانه بندی مواد معلق نشان داده شده است.



شکل پ. ۱-۵۰- نمای کلی دستگاه تفکیک لیزری



شکل پ. ۱-۵۱- دستگاه آزمایش نمونه خشک



شکل پ.۱-۵۲- دستگاه مربوط به آزمایش مربوط

پیوست ۲

بر آورد رسوب ورودی به مخزن و

روش های آن

پ. ۱-۲- کلیات

یکی از اجزا مهم که در مطالعات طرح‌های مرتبط با مخازن سدها باید در اولویت قرار گیرد، برآورد میزان فرسایش تولیدی حوضه آبریز و انتقال آن توسط رودخانه می‌باشد. با شسته شدن اراضی از یک سو موجبات تقلیل ضخامت لایه سطحی مستعد کشاورزی فراهم می‌گردد و از سوی دیگر با انتقال مواد فرسایش یافته توسط جریان آب، مواد رسوبی به تدریج در پایین‌دست و درون مخزن سد نهشته شده و سبب کاهش عمر مفید مخزن می‌گردد. میزان رسوب ورودی به مخزن را می‌توان با روش‌های مختلفی محاسبه کرد که در این بخش ابتدا این روش‌ها ارایه می‌شوند. همچنین ضروری است تا با روش‌های مختلف سازه‌ای و غیرسازه‌ای از میزان رسوب تولید شده کاست و یا میزان انتقال آنها را به مخزن سد کمینه کرد، از این رو روش‌های کنترل فرسایش و رسوب نیز در ادامه بخش ارایه شده‌اند.

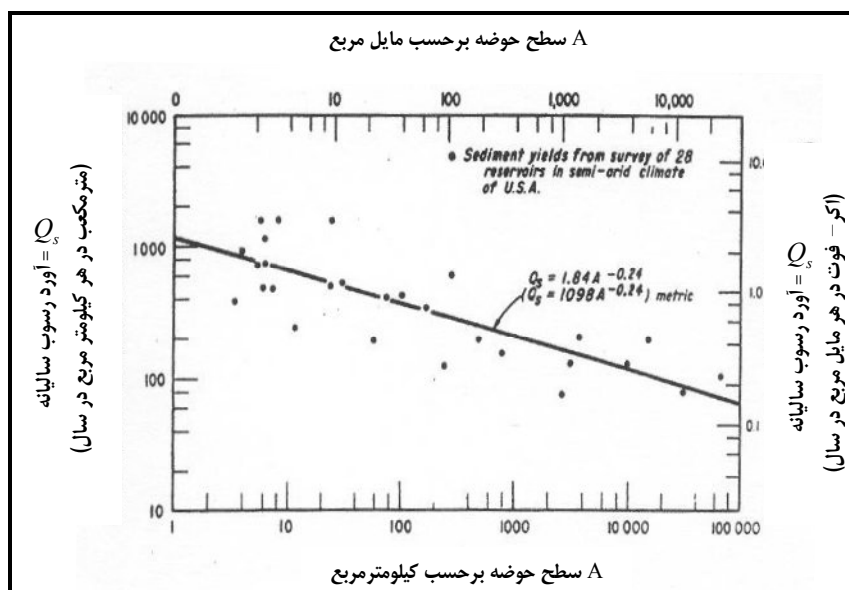
پ. ۲-۲- روش‌های برآورد رسوب ورودی

پ. ۱-۲-۲- استفاده از روابط تجربی

چنانچه رسوب تولیدی از حوضه‌های مختلف را بتوان با دقت قابل قبولی اندازه‌گیری کرد، در آن صورت، می‌توان رابطه‌ای بین مقدار رسوب تولیدی یا رسوب ویژه و سایر مشخصات قابل اندازه‌گیری حوضه، نظیر سطح حوضه، شیب حوضه، مدیریت بهره‌برداری از مزرعه، شدت بارش، میزان پوشش گیاهی و غیره به وجود آورد.

به‌طور مثال یکی از روش‌های معمول اندازه‌گیری رسوب استفاده از داده‌های نقشه‌برداری مخازن سدهای موجود در آن منطقه و تعیین میزان آورد رسوب در طول دوره‌ی زمانی مشخص است. مقدار این رسوب پس از آبنگاری مخزن سد در یک دوره‌ی زمانی مشخص تعیین می‌گردد. از تقسیم میزان رسوب به‌دست آمده بر سطح حوضه، مقدار رسوب ویژه برحسب تن در کیلومتر مربع در هر سال به دست می‌آید. چنانچه این محاسبات برای سدهای مختلف در آن منطقه انجام شود، می‌توان رابطه‌ای بین رسوب ویژه و سطح حوضه برقرار کرد. به‌طور مثال، شکل (پ. ۱-۲) چنین رابطه‌ای را برای سدهای واقع در مناطق نیمه خشک آمریکا نشان می‌دهد.

پس از رسم داده‌ها بهترین معادله از بین آنها برازش داده می‌شود. از این رابطه می‌توان در برآورد رسوب ورودی به سدهای جدیدی که قرار است در منطقه‌ی مشابه ایجاد شوند، استفاده کرد.



شکل پ.۲-۱- متوسط رسوب ویژه تابعی از سطح حوزه در مناطق نیمه‌خشک آمریکا [۱۳۶]

روابط دیگری نیز زیر بر اساس مطالعه‌ی رسوب نزدیک به ۸۰۰ مخزن سد در ایالات متحده‌ی آمریکا که سطح حوزه‌ای از ۲/۵ کیلومتر مربع تا ۷۸۰۰۰ کیلومتر مربع و رواناب سطحی تا ۳۳۰ میلی‌متر در سال داشته‌اند، به‌وجود آمده است که عبارتند از: [۳۶]

$$\frac{S_y}{S_{yR}} = \left(\frac{A}{A_R} \right)^{-0.16} \quad (\text{پ.۲-۱})$$

$$\frac{S_y}{S_{yR}} = C_1 \left(\frac{Q}{Q_R} \right)^{0.46} \left[1.43 - 0.26 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right] \quad (\text{پ.۲-۲})$$

$$\frac{S_y}{S_{yR}} = C_2 e^{\left(-0.11 \frac{Q}{Q_R} \right)} \left[1.43 - 0.26 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right] \quad (\text{پ.۲-۳})$$

رابطه‌ی (پ.۲-۲) برای عمق رواناب سطحی کمتر از ۵۰۸ میلی‌متر در سال و رابطه‌ی (پ.۲-۳) برای حوزه‌هایی که عمق رواناب سطحی در آنها بیش‌تر از ۵۰۸ میلی‌متر در سال بوده است، صادق می‌باشد. ضریب همبستگی این روابط $R^2 = 0.75$ بوده است. در این روابط، A سطح حوزه بر حسب Km^2 ، A_R سطح حوزه معرف برابر ۲/۵۹، $C_1 = \text{ضریبی برابر } 0.375$ ، $C_2 = \text{ضریبی برابر } 0.417$ ، $Q = \text{عمق رواناب برحسب } \text{mm/yr}$ ، $Q_R = \text{عمق رواناب معرف که برابر } 508 \text{ میلی‌متر در سال است}$ ، $S_y = \text{مقدار رسوب ویژه بر حسب تن در هر کیلومتر مربع در سال}$ و $S_{yR} = \text{رسوب ویژه معرف که برابر } 576 \text{ تن در کیلومتر مربع در سال می‌باشد}$.

یکی دیگر از روابطی که در آن مقدار آورد رسوب به مشخصات حوزه و رواناب سطحی مرتبط شده است، رابطه اندرسن به شرح زیر می‌باشد:

$$\log S_y = 1.041 + 0.866 \log Q_{\max} + 0.370 \log A - 1.236 \log C \quad (\text{پ.۲-۴})$$

که در آن S_y آورد رسوب بر حسب اکر- فوت در مایل مربع، $Q_{\max} = \text{حداکثر بده سالانه بر حسب فوت مکعب در ثانیه}$ ، A سطح حوزه برحسب اکر در مایل مربع و $C = \text{درصد پوشش گیاهی بر حسب درصد می‌باشد}$.
رابطه زیر نیز توسط استراند [۱۳۴] برای مناطق نیمه خشک آمریکا ارایه شده است:

$$S_y = 2.4 A^{-0.229} \quad (\text{پ. ۲-۵})$$

که در آن S_y مقدار رسوب تولیدی حوضه برحسب اکر - فوت بر مایل مربع در سال و A نیز سطح حوضه برحسب مایل مربع می‌باشد.

روابط تجربی متعدد دیگری نیز تاکنون و توسط محققین مختلف ارائه شده‌اند که تعدادی از این روابط در جدول (پ. ۲-۱) گنجانده شده است.

پ. ۲-۲-۲- روش پتانسیل فرسایش (EPM)

این روش پس از ۴۰ سال تجربه و تحقیقات در کشور یوگسلاوی ارائه گردیده است. چهار مشخصه شامل ضریب فرسایش حوضه آبریز (ψ)، ضریب استفاده از زمین (X_a)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوضه (I) در واحدهای مختلف اراضی یا در شبکه‌های ایجاد شده در نقشه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر و محدوده عامل‌های فوق در جدول (پ. ۲-۲) ارائه شده است و ضریب شدت فرسایش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = Y \times X_a (\psi + I^{0.5}) \quad (\text{پ. ۲-۶})$$

مقدار Z با استفاده از جدول (پ. ۲-۳) برای تعیین کیفی مقدار و حدود فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای تخمین متوسط سالانه رسوب ویژه در حوضه آبریز از رابطه (پ. ۲-۷) استفاده می‌شود:

$$Q_s = 3.1415T \times P \times Z^{1.5} \quad (\text{پ. ۲-۷})$$

$$T: \text{ضریب درجه حرارت که از رابطه } T = \left(\frac{t}{10} + 0.1\right)^{0.5} \text{ به دست می‌آید.}$$

t : درجه حرارت متوسط سالانه بر حسب درجه سلسیوس

P : ارتفاع بارندگی سالانه حوضه آبریز بر حسب میلی متر

Q_s : مقدار متوسط سالانه رسوب ویژه بر حسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع

جدول پ. ۲-۱- معادلات تجربی برآورد تولید رسوب در یک حوضه [۱۶۱]

عنوان معادله	معادله	توضیحات
YRCC (China)	$E_R = \frac{51.1}{V_e^{0.15}} P^{1.2} I^{1.5} S^{0.26} W_o^{0.48}$	E_R = میزان رسوب در واحد سطح ton/km^2 V_e = درصد مساحت پوشش گیاهی P = مقدار بارش در یک طوفان (mm) I = شدت بارش در طوفان (mm/Min) S = شیب W_o = درصد رطوبت قبل از بارش
NWISWC (China)	$E_R = 3.27 \times 10^{-5} (EI_{30})^{1.57} S^{1.06}$	E = انرژی جنبشی بارش Kg-m/m^2 I_{30} = شدت بارش 30 دقیقه (mm/Min)
Kolnev (Russia)	$R = a_i n_{CT} S^{0.75} L^{1.5} I^{1.5}$	R = تلفات خاک در یک شیب در واحد عرض S = شیب L = طول شیب I = شدت بارش n_{CT} و a_i = ضرایب

ادامه جدول پ.۲-۱- معادلات تجربی برآورد تولید رسوب در یک حوضه [۱۶۱]

عنوان معادله	معادله	توضیحات
Wang (1977) برای حوضه‌های کوچک	$\ln Y = -2.65 + 0.962 S_s + 0.00218 L^2$ $+ 8.414 L^{0.5} - 4.162 L^{2/3} + 3.252 B^{0.5}$ $- 1.459 B^{2/3} - 2.227 T + 2.456 T^2$ $- 1.392 F^2$	Y = متوسط تلفات خاک در حوضه برحسب تن L = طول حوضه (مضربی از ۱۰۰ متر) S_s = شاخص خاک برای خاک لای $S_s = 1/0$ و برای خاک قهوه‌ای جنگلی $S_s = 0.0$ B = عرض حوضه (مضربی از ۱۰۰ متر) T = نسبت سطوح تراس به کل سطح حوضه F = نسبت سطح جنگلی به کل سطح حوضه
Langbein & Schumm برای حوضه‌های متوسط و بزرگ	$S_Y = \frac{20.57 \times 10^{-4} P^{2.3}}{1 + 1.47 \times 10^{-8} P^{3.33}}$ $S_Y = \frac{4.41 \times 10^{-4} P^{2.3}}{1 + 1.47 \times 10^{-8} P^{3.33}}$	S_Y = میزان تولید سالیانه رسوب در حوضه تن در هر کیلومتر مربع P = باران موثر بر حسب mm
Fourier	$S_Y = -49.78 + 6.14 \frac{P_m^2}{P}$ برای حوضه‌هایی که $8.1 < \frac{P_m^2}{P} < 20$	S_Y = رسوب سالیانه تولیدی حاصل از بار معلق برحسب تن در کیلومتر مربع P_m = حداکثر بارش P = متوسط بارش

جدول پ.۲-۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش E.P.M [۱۵۱]

ردیف	نام پارامتر	علامت	محدوده تغییرات
۱	ضریب فرسایش منطقه	ψ	۰/۱ -
۲	ضریب استفاده از زمین	X_a	۰/۱ -
۳	حساسیت خاک و سنگ	Y	۰/۲۵ - ۳

پ.۲-۲-۳- معادله‌ی جهانی فرسایش (USLE)

هر چند که میزان آورد رسوب با میزان فرسایش حوضه متفاوت می‌باشد، ولی با تقریب قابل قبولی می‌توان مقدار آورد رسوب در یک دوره‌ی طولانی را برابر میزان فرسایش حوضه قلمداد کرد. با این مقدمه، یکی از روش‌های برآورد فرسایش، معادله‌ی جهانی فرسایش است که از سال ۱۹۴۰ تاکنون در آمریکا استفاده شده است. این معادله بر اساس داده‌های حاصل از حوضه‌های کوچک به‌وجود آمده است.

جدول پ.۲-۳- محدوده و مقادیر پارامتر فرسایش در روش E.P.M [۱۵۱]

طبقه فرسایش	شدت فرسایش	مقادیر حد	مقادیر متوسط Z
I	خیلی شدید	$Z > 1$	۱/۲۵
II	شدید	$0.71 < Z < 1$	۰/۸۵
III	متوسط	$0.41 < Z < 0.70$	۰/۵۵
IV	کم	$0.20 < Z < 0.40$	۰/۳
V	خیلی کم	$Z < 0.19$	۰/۱

رابطه کلی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$A = 2.24 K R L S C P \quad (\text{پ. ۲-۸})$$

که در این رابطه،

A = مقدار فرسایش سطحی خاک (تن در هکتار در سال)، K = ضریب فرسایش، R = شاخص فرسایش باران

L = ضریب فرسایش شیب - طول، S = ضریب فرسایش درصد شیب، C = ضریب مربوط به پوشش گیاهی و نحوه‌ی استفاده از

اراضی، P = ضریب مربوط به اقدامات حفاظت خاک در حوضه ضریب K برای خاک‌های مختلف به شرح جدول (پ. ۲-۴) است.

جدول پ. ۲-۴- ضریب K در معادله جهانی فرسایش [۱۵۱]

نوع پوشش	K
سنگی	۰/۵
مقاوم به فرسایش	۰/۱۰
ماسه ای نرم	۰/۱۶
ماسه ای بسیار نرم	۰/۴۲
لومی شنی	۰/۱۲
لومی با شن بسیار نرم	۰/۴۴
سیلیت لوم	۰/۴۸
لومی رسی	۰/۳۷
سیلیتی رسی	۰/۲۵

مقدار ضریب R یا شاخص فرسایش از رابطه‌ی تجربی زیر تعیین می‌شود:

$$R = K_1 a b c + K_2 \quad (\text{پ. ۲-۹})$$

که K_1 ضریب ثابت (بین ۰/۵ تا ۱/۵) و به‌طور متوسط ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود.

K_2 ضریب مربوط به نوع اقلیم (بین ۲۵ تا ۵۰) و ۳۵ منظور می‌شود. a متوسط بارندگی سالانه در حوضه (سانتی‌متر)، b بارندگی

۲۴ ساعته حوضه با دوره‌ی بازگشت ۲ سال (سانتی‌متر)، c بارندگی یک ساعته حوضه با دوره‌ی بازگشت ۲ سال (سانتی‌متر).

در حوضه‌های آبریز دو پارامتر L و S تواما در نظر گرفته می‌شوند و از رابطه‌ی زیر حساب می‌شوند:

$$LS = \left(\frac{X}{22.13} \right)^n (0.65 + 0.045S + 0.0065S^2) \quad (\text{پ. ۲-۱۰})$$

که در آن: X = متوسط طول شیب (متر)

S = متوسط شیب حوضه (درصد)

m = ضریبی که به شیب حوضه بستگی دارد و مقدار آن ۰/۲ برای شیب‌های کمتر از ۱ درصد و ۰/۵ برای شیب‌های بیش‌تر از

۵ درصد است.

C = ضریب پوشش گیاهی که از جدول (پ. ۲-۵) به‌دست می‌آید.

P = ضریبی که تابع عملیات حفاظتی خاک است و از ۵۰۱ تا ۵۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول پ.۲-۵- ضریب C در معادله جهانی فرسایش [۱۵۱]

پوشش گیاهی	C
خیلی خوب	۰/۰۴
خوب	۰/۰۹
نسبتاً خوب	۰/۱۵
نسبتاً فقیر	۰/۲۰
فقیر	۰/۲۵
بسیار فقیر	۰/۳۳
فاقد پوشش گیاهی	۰/۴۵

پ. ۲-۲-۴- کاربرد GIS

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بانک اطلاعاتی است که می‌توان لایه‌های مختلف مشتمل بر اطلاعات متفاوت را مدیریت کرد. این لایه‌ها را می‌توان ترکیب کرد تا لایه مورد نظر حاصل شود. GIS معمولاً داده‌های جدیدی توسط خودش تولید نمی‌کند ولی کاربر را قادر می‌سازد تا روابط جدیدی را به وجود آورد. دو نوع سیستم GIS وجود دارد که یکی محور مختصات دارد و دیگری به صورت بردار است. هر دو ابزار قوی و برای کاربردهای خاص می‌باشند. از این روش می‌توان در مدیریت آبخیزداری استفاده کرد و آنها را با مدل‌های فرسایش و مدل‌های هیدرولوژیکی مرتبط کرد.

تمام مدل‌های فرسایش را می‌توان با نوشتن برنامه به هر یک از زبان‌های رایج رایانه به GIS مرتبط نمود. در این صورت کاربر به راحتی قادر خواهد بود که با استفاده از نرم‌افزار GIS داده‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار را تعیین و به نرم‌افزار وارد کند. از جمله‌ی این داده‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سطح حوضه مورد مطالعه
- انتخاب نوع عملیات کشاورزی، آیش و آبیاری
- انتخاب شرایط حفاظت خاک و آب نظیر ترانس‌بندی و غیره
- انتخاب سایر عامل‌ها نظیر درصد پوشش گیاهی، میزان، شیب و غیره
- اجرای مدل و استخراج نتایج
- تحلیل نتایج و بررسی تاثیر هر یک از پارامترها بر میزان مقدار نتایج

یکی از اولین برنامه‌های به وجود آمده در این رابطه AEGIS می‌باشد که رابطی است بین مدل زراعی DSSATI و GIS. از این مدل در حال حاضر در پورتوریکو به منظور بررسی کمی فرسایش خاک در اثر تغییر نوع محصول کشاورزی از نیشکر به گیاهان دیگر، استفاده می‌شود.

مدل LISEM نیز مدل دیگری است که به راحتی با GIS مرتبط است. در این مدل، انواع فرسایش، اعم از فرسایش توسط قطرات باران تا فرسایش خندقی برآورد می‌شود. نتایج مدل به صورت نقشه‌های GIS فرسایش خاک و ترسیب خاک در یک دوره‌ی زمانی مشخص در خلال یک بارش معین ارایه می‌شود.

پ. ۲-۲-۵- روش PSIAC

این روش برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک و نیمه خشک غرب ایالات متحده آمریکا ارایه شده است و در حال حاضر برای بررسی فرسایش خاک و تولید رسوب در طرح‌های جامع آب و خاک کشور نیز استفاده می‌شود. در روش PSIAC تاثیر و نقش ۹ عامل مهم و موثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز ارزیابی می‌گردد و بسته به شدت و ضعف هر عامل، عددی به آن نسبت داده می‌شود و با در نظر گرفتن مجموع اعداد به دست آمده برای عوامل مختلف، میزان رسوبدهی حوضه برآورد می‌شود. در جدول (پ.۲-۶) عوامل موثر و نمرات و روابط مربوطه به روش PSIAC به طور خلاصه ارایه شده است. نظر به این که برای محاسبه هر کدام از پارامترهای نه گانه از اطلاعات مختلفی استفاده شده است در اینجا تنها به ارایه اطلاعات مورد استفاده و نتایج آن قناعت شده است. برای استفاده و بیان مجموع اعداد به دست آمده به صورت فرسایش ویژه از رابطه به شرح زیر استفاده شده است:

$$Q_s = 38.8e^{(0.0353R)} \quad (\text{پ. ۲-۱۱})$$

که در آن:

R: مجموع نمرات به دست آمده برای عوامل مختلف فرسایش

Q_s: پتانسیل فرسایش بر حسب متر مکعب در سال در کیلومتر مربع

جدول پ.۲-۶- عوامل مربوط به روش PSIAC و نمرات آن برای تخمین فرسایش حوضه [۱۱۰]

ردیف	پارامتر مربوط	علامت و رابطه	توضیحات	محدوده نمره
۱	زمین‌شناسی سطحی	X ₁	-	۰-۱۰
۲	خاک	X ₂	X ₂ =16.7K (K ضریب فرسایش پذیری خاک)	۰-۱۰
۳	آب و هوا	X ₃	X ₃ =0.2P ₂ (P ₂ بارندگی ۶ ساعته ۲ ساله)	۰-۱۰
۴	رواناب	X ₄	X ₄ =0.006R+10Q _p (R ارتفاع رواناب و Q _p بده ویژه سیل سالانه)	۰-۲۰
۵	پستی و بلندی	X ₅	X ₅ =0.33I (I درصد شیب حوضه)	۱۰ تا -۱۰
۶	پوشش زمین	X ₆	X ₆ =0.2P _b (P _b درصد زمین لخت)	۲۰ تا -۱۰
۷	استفاده از زمین	X ₇	X ₇ =20-0.2P _c (P _c درصد پوشیده از گیاه)	۱۰ تا -۱۰
۸	وضع فعلی فرسایش	X ₈	X ₈ =0.25 SSF (SSF ضریب فرسایش سطحی)	۰-۲۵
۹	فرسایش رودخانه‌ای	X ₉	X ₉ =1.67SSFg (SSFg ضریب فرسایش گالی)	۰-۲۵

پ. ۲-۲-۶- روش استفاده از عنصر رادیواکتیو سزیوم ۱۳۷

یکی از روش‌هایی که به منظور برآورد میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود استفاده از عنصر رادیواکتیو سزیوم ۱۳۷ می‌باشد. سزیوم یک فلز قلیایی با خصوصیات شیمیایی مشابه سدیم، پتاسیم و دیگر عناصر گروه I جدول تناوبی است. سزیوم ۱۳۷ منشاء طبیعی ندارد و حاصل آزمایش‌های هسته‌ای است که از سال ۱۹۵۲ تا ۱۹۶۴ انجام شده است. این عنصر ابتدا در استراتوسفیر موجود در اطراف کره زمین پراکنده و به تدریج به تراتوسفیر منتقل و همراه با ریزش‌های جوی به زمین بازگشت. نیمه عمر این عنصر رادیواکتیو ۳۰/۲ سال می‌باشد. این عنصر با ذرات رس ترکیب غیرتبادلی را ایجاد نموده است. حرکت آن به صورت شیمیایی و یا بیولوژیکی بسیار ناچیز و تنها از طریق جابجایی ذرات خاک رس توسط فرسایش‌های آبی و بادی امکان‌پذیر است.

اساس این روش بر مبنای مقدار سزیوم ۱۳۷ (برحسب بکرل بر مترمربع) در خاک در معرض فرسایش در مقایسه با سطح مرجع می‌باشد. با این روش می‌توان فرسایش خالص یعنی فرسایش خاک منهای رسوب وارد شده را به دست آورد.

به منظور تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده سزیوم خاک به مقدار فرسایش و رسوب روابط متفاوتی تاکنون توسط محققان پیشنهاد شده است که جدول (پ. ۲-۷) تعدادی از این روابط تجربی را نشان می‌دهد. کاربرد روش سزیوم ۱۳۷ مستلزم اندازه‌گیری مقدار عنصر اولیه خاک قبل از پدیده فرسایش (لایه مرجع)، اندازه‌گیری مقدار عنصر باقیمانده در خاک پس از فرسایش و اندازه‌گیری مساحت محدوده مورد نظر می‌باشد. از حاصلضرب مقدار عنصر اولیه در مساحت، مقدار عنصر ورودی به دست می‌آید که با مقایسه با مقدار عنصر باقیمانده مقدار فرسایش یا رسوب‌گذاری تعیین خواهد شد.

مقدار عنصر سزیوم ۱۳۷ را می‌توان با استفاده از آشکارساز نیمه‌هادی ژرمانیومی با خلوص بالا (موجود در سازمان انرژی اتمی ایران) اندازه‌گیری کرد. واحد آن بکرل بر کیلوگرم خاک که با دانستن وزن مخصوص خاک می‌توان به بکرل بر مترمربع تبدیل کرد.

در ایران برای اولین بار کلافی (۱۳۷۳) با استفاده از روش سزیوم ۱۳۷ فرسایش سطحی را در مراتع اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از فرمول جهانی فرسایش خاک مقایسه کرد. کلافی نتیجه‌گیری کرد که استفاده از روش سزیوم ۱۳۷ به سهولت و دقت قابل قبولی می‌تواند فرسایش سطحی را محاسبه نماید.

پ. ۲-۷-۲- با استفاده از منحنی بده - سنج رسوب

در رودخانه‌های دارای ایستگاه آبنجی استفاده از روش ترسیمی منحنی تداوم جریان و منحنی سنج رسوب عملی‌ترین روشی است که می‌توان از آن برای برآورد بار رسوب استفاده نمود. در این روش با رسم منحنی تداوم جریان در کاغذ لوگ - احتمال و تشکیل جدول فراوانی و نیز به دست آوردن منحنی بده - سنج رسوب، رابطه $Q_s - Q_w$ (بده رسوب معلق و Q_w بده جریان آب)، رسوب معلق سالانه و دراز مدت رودخانه برآورد می‌گردد. از آن‌جا که در ایستگاه‌های آبنجی تنها بار معلق اندازه‌گیری می‌شود، برای برآورد بار کل باید بار بستر به آن اضافه گردد. بار بستر معمولاً به صورت درصدی از بار معلق می‌باشد که این درصد بین ۲ تا ۱۵۰ درصد تغییر می‌کند. برای این منظور از جدول (۲-۱) که توسط مادوک تهیه شده است می‌توان استفاده کرد.

جدول پ. ۲-۷- روابط تجربی برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از روش عنصر سزیوم ۱۳۷

توضیحات	رابطه	محقق
$Y =$ مقدار خاک فرسایش یافته برحسب تن در هکتار در سال $X =$ مقدار سزیوم ۱۳۷ جایجا شده در نمونه خاک برحسب درصد	$Y = 0.87 X^{1.18}$	Ritchie. et. al. (1990)
$Y =$ با علامت - خاک فرسایش یافته و با علامت + خاک اضافه شده (تن در هکتار) $C_{ss} =$ مقدار سزیوم موجود در نمونه خاک موجود $C_{sr} =$ مقدار سزیوم موجود در خاک مرجع	$Y = (2640/28) \frac{C_{ss} - C_{sr}}{C_{sr}}$	DeJong et. al. (1988)
$Y =$ مقدار خاک فرسایش یافته $X =$ مقدار سزیوم جایجا شده	$Y = 5.15 X^{1.05}$	Porto et. al. (2003)
$E_r =$ فرسایش خاک (gr/m^2) $C_s =$ سزیوم از دست رفته $d =$ ضخامت لایه خاک که در آن سزیوم وجود دارد $\gamma_s =$ وزن مخصوص ظاهری خاک $C_{sc} =$ میانگین سزیوم موجود در خاک مرجع $C_{se} =$ میانگین سزیوم موجود در خاک موجود مقادیر سزیوم برحسب بکرل بر مترمربع می‌باشد.	$E_r = C_s d \gamma_s$ $C_s = \frac{[0.95C_{sc} - C_{se}]}{0.95 C_{sc}}$	Pennock and Dejong (1987)

پ. ۲-۲-۸- برآورد رسوب در اثر فرسایش سواحل مخزن

در اثر وزش بادهای شدید، امواج سطحی تولید شده در مخازن سدها به سواحل منتقل و به خاطر انرژی جنبشی زیادی که دارند می‌توانند فرسایشهای سطحی و توده‌ای زیادی را سبب شوند. امواج پس از برخورد به ساحل، تا فاصله مشخص بر روی ساحل حرکت کرده و در برگشت می‌توانند رسوب زیادی را از ساحل شسته و وارد مخزن کنند که به آن فرسایش سطحی اطلاق می‌گردد. این عمل ممکن است آنقدر ادامه یابد که شیب سواحل به حالت ناپایدار درآید. در صورتی که سواحل شیب تندی داشته باشند، انرژی امواج در برخورد با ساحل نسبتاً عمودی مستهلک می‌شود که در اثر این عمل، لایه‌هایی از ساحل فرسایش یافته و به تدریج حفره‌هایی در ساحل به وجود می‌آید. هر دو عامل ایجاد شیب ناپایدار کرده و با تشکیل حفره باعث فرسایش‌های توده‌ای می‌شوند که در اثر آن حجم زیادی از رسوب وارد مخزن سد می‌گردد. علاوه بر امواج سطحی، عوامل دیگری نیز می‌توانند باعث فرسایشهای توده‌ای شوند که از جمله می‌توان به کاهش ناگهانی سطح آب مخزن اشاره کرد. در اثر این پدیده فشار آب منفذی اضافی باعث کاهش مقاومت برشی خاک ساحل می‌شود که منجر به ریزش‌های توده‌ای می‌شود.

هر چند پدیده‌های فرسایش سطحی و یا توده‌ای در اثر امواج سطحی آب در تمام مخازن اتفاق نمی‌افتد و یا اگر هم اتفاق افتد در مقایسه با میزان رسوب ورودی از رودخانه اصلی و شاخه‌های وارده به مخزن ناچیز است ولی ممکن است در بعضی از مخازن، معادل و یا بیش‌تر از آورد رسوب رودخانه‌های ورودی باشد به‌طور مثال فرسایش‌های ناشی از امواج سطحی در مخزن هارتول^۱ آمریکا به حدی است که برای کاهش آن بیش از ۱۵۰۰ سازه کنترل فرسایش در سواحل دریاچه ایجاد شده است. بنابراین ضروری است که این پتانسیل ابتدا در مطالعات زمین‌شناسی مورد بررسی دقیق قرار گیرد و مکان‌هایی که احتمال فرسایش‌های ساحلی وجود دارد شناسایی گردد و با احداث سازه‌های مختلف نظیر موج‌شکن یا حفاظت پوششی ساحل از فرسایش‌های سطحی و توده‌ای جلوگیری کرد.

از این رو در مطالعات رسوب مخازن، ضروری است تا پتانسیل فرسایش‌های سطحی و توده‌ای ناشی از امواج سطحی و میزان رسوباتی که بدین نحو وارد مخزن می‌شوند، برآورد گردد. برای این منظور ابتدا باید مشخصات موج ایجاد شده در جهت ساحل با استفاده از روابط زیر محاسبه گردد:

$$H = 4.13 \times 10^{-2} u_x \left(\frac{x}{g} \right)^{1/2} \quad (\text{پ. ۲-۱۲})$$

$$T = 2.727 \times (x u_x / g^2)^{1/3} \quad (\text{پ. ۲-۱۳})$$

در این روابط H = ارتفاع موج (متر)، x = فاصله طولانی‌ترین نقطه دریاچه عمود بر ساحل، u سرعت اصطکاکی باد در سطح آب می‌باشد که تابعی از سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع ده متر می‌باشد.

میزان ضخامت فرسایش یافته در اثر امواج توسط روابط زیر برآورده می‌شود:

برای سواحل با شیب کوچک‌تر از 1:15

$$R = c \lambda H^2 T S_1 \quad (\text{پ. ۲-۱۴})$$

برای سواحل با شیب بزرگ‌تر از 1:15

$$R = c\lambda H^2 T S_1 S_2 \quad (\text{پ. ۳-۱۵})$$

در این روابط R ضخامت ساحل که فرسایش می‌یابد (m/sec)، c ضریب و اسنجی که نیاز است در هر منطقه با توجه به نوع خاک به‌دست آید و مقدار آن بین ۰ تا ۱/۰ است، H و T به ترتیب ارتفاع طول موج، امواج ایجاد شده، S_1 و S_2 به ترتیب شیب ساحل و شیب پرتگاه می‌باشد.

پ. ۲-۲-۹- لغزش توده‌ای

از پدیده‌هایی که ممکن است در بعضی از مخازن سدها رخ دهد، می‌توان به لغزش سواحل مخزن اشاره کرد که عامل آن نفوذ آب مخزن به لایه‌های اطراف می‌باشد. لایه‌بندی نامناسب سازندهای مختلف از قبیل لایه‌های مارن و کنگلومرا با سنگ آهک و داشتن شیب تند از جمله عوامل اصلی به‌وجود آمدن این پدیده می‌باشد. عوامل دیگری چون قطع درختان و یا خاکبرداری‌ها نیز ممکن است این مساله را تشدید کند.

لغزش و تخریب ممکن است در چند حالت مختلف اتفاق افتد.

- لغزش لایه‌های سنگی - خاکی از ترازهای بالاتر از سطح آب. در این پدیده تراوش آب مخزن نمی‌تواند عامل لغزش باشد و دلیل آن خصوصیات زمین‌شناسی است.
- لغزش دیواره‌های مخزن در اثر کاهش مقاومت برشی به دلیل تراوش آب مخزن می‌باشد. تغییرات ناگهانی سطح آب مخزن باعث تشدید این پدیده می‌گردد.
- فرو ریختن توده‌های حجیمی که قبل از احداث سد و در شرایط طبیعی در حالت تعادل بوده ولی با احداث سد و بالا آمدن سطح آب و شسته شدن خاک اطراف این توده باعث به‌وجود آمدن شیب تند و در نهایت ریزش توده خواهد شد.

پ. ۲-۳- روش‌های کنترل فرسایش و رسوب

مهم‌ترین اقدام برای جلوگیری از نهشته‌شدن رسوب در مخازن، روش‌های کنترل فرسایش و رسوب ورودی به مخزن می‌باشد. به‌طور کلی این امر با دو روش امکان‌پذیر است، یکی جلوگیری از عمل فرسایش و دیگری ترسیب رسوبات فرسایش‌شده قبل از رسیدن به مخزن. گاهی وقت‌ها روش‌های کنترل فرسایش را عملیات آبخیزداری نیز می‌گویند ولی باید توجه شود که عملیات آبخیزداری بسیار گسترده‌تر از روش‌های کنترل فرسایش می‌باشد، زیرا آبخیزداری اهداف دیگری مانند تغذیه مصنوعی آبخوان، کاهش بده اوج سیل، بهبود کیفیت آب را نیز شامل می‌شود. در این قسمت ابتدا روش‌های کنترل فرسایش و سپس روش‌های کنترل رسوب ارائه می‌شود.

پ. ۲-۳-۱- روش‌های کنترل فرسایش

به‌طور کلی روش‌های مختلف کنترل فرسایش مبتنی بر ده استراتژی زیر می‌باشند:

- انتخاب روش باید متناسب با خاک، آب و هوا و خصوصیات حوضه باشد.
- سطح و زمان تخریب خاک به حداقل رسانده شود.
- خاک‌های لخت (بدون پوشش) باید حفاظت شوند.

- پوشش گیاهی به حداکثر سطح افزایش داده شود.
 - نفوذپذیری خاک به حداکثر ممکن افزایش داده شود.
 - مدیریت شیب اراضی اجرا شود به طوری که از تمرکز جریان جلوگیری نماید.
 - زهکشها به منظور هدایت زه آب‌ها احداث شوند.
 - تله اندازی رسوب در نقاط مختلف سطح حوضه امکان‌پذیر شود.
 - در حفظ و نگهداری از گیاهان طبیعی اهتمام کافی مبذول گردد.
 - روش‌های کنترل فرسایش با برنامه ریزی مدون اجرا و از آنها مراقبت و نگهداری گردد.
- همچنین روش‌های کنترل فرسایش به‌طور کلی به سه دسته تقسیم بندی کرد:
- روش‌های سازه‌ای که با هدف کنترل و کاهش سرعت رواناب سطحی احداث می‌شوند و شامل روش‌های زیر می‌شوند:
 - تمام سازه‌هایی که برای کنترل شیب بستر به کار می‌روند.
 - کانال‌های انحرافی، آبراهه‌های با پوشش گیاهی و آبراهه‌های دیگر.
 - سازه‌های حفاظت کننده آبراهه‌ها نظیر خشکه‌چین^۱، گابیون^۲ و سدهای اصلاحی^۳.
 - حوضچه‌های ترسیب^۴.
- معمولاً روش‌های سازه‌ای در مقایسه با سایر روش‌ها به هزینه‌ی بیش‌تری نیاز دارند، ضمن این که به مراقبت و نگهداری مداوم و نامحدود نیز نیاز دارند.
- روش‌های بیولوژیکی مبتنی بر توسعه پوشش گیاهی می‌باشند. این روش‌ها معمولاً کم‌هزینه بوده و به مراقبت و نگهداری کم‌تری نیاز دارند. این روش‌ها به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، در سال‌های اولیه، به مراقبت خیلی زیادی نیاز دارند.
 - روش‌های بهره‌برداری یا روش‌های مدیریتی، به آن دسته از روش‌هایی اطلاق می‌شود که با برنامه‌ریزی و نظارت، اقداماتی را در سطح حوضه به اجرا در می‌آورند که مقدار فرسایش کاهش یابد. به‌طور مثال، نظارت بر عملیات کشاورزی و یا ساختمانی در سطح حوضه برای جلوگیری از دست‌خوردگی سطح خاک.
- معمولاً روش‌های بیولوژیکی و روش‌های مدیریتی را روش‌های غیرسازه‌ای نیز می‌گویند.

پ. ۲-۳-۱-۱- کنترل فرسایش در حوضه

روش‌های مختلفی برای کاهش میزان فرسایش اراضی در سطح مزرعه استفاده می‌شود که عبارتند از:

- کاشت گیاهان در جهت خطوط تراز^۵
- کشت نواری^۶
- حفظ منابع طبیعی

1- Riprap

2- Gabion basket

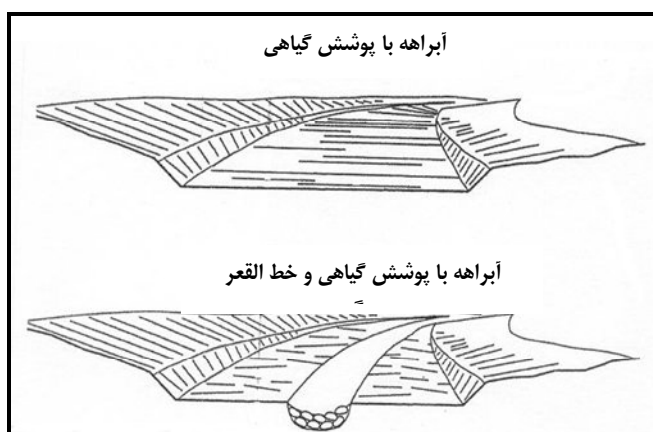
3- Check dams

4- Settling basins

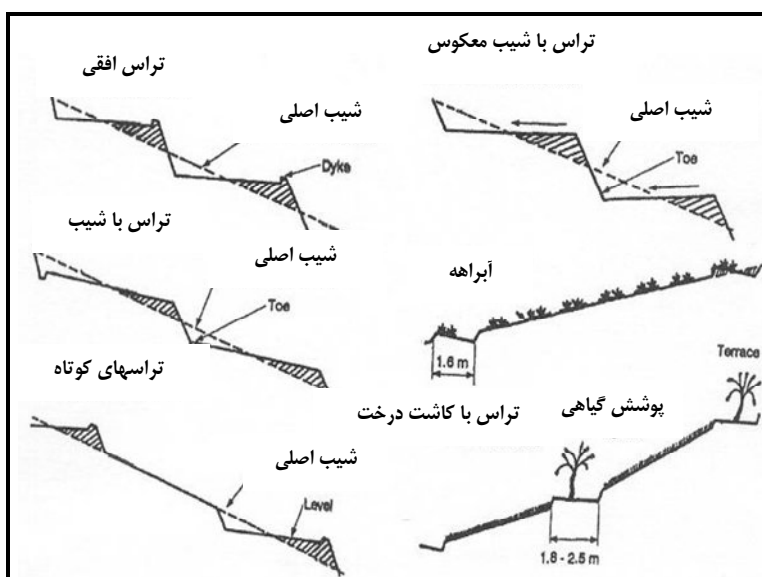
5- Contour-grassed hedge

6- Stiff grass hedge

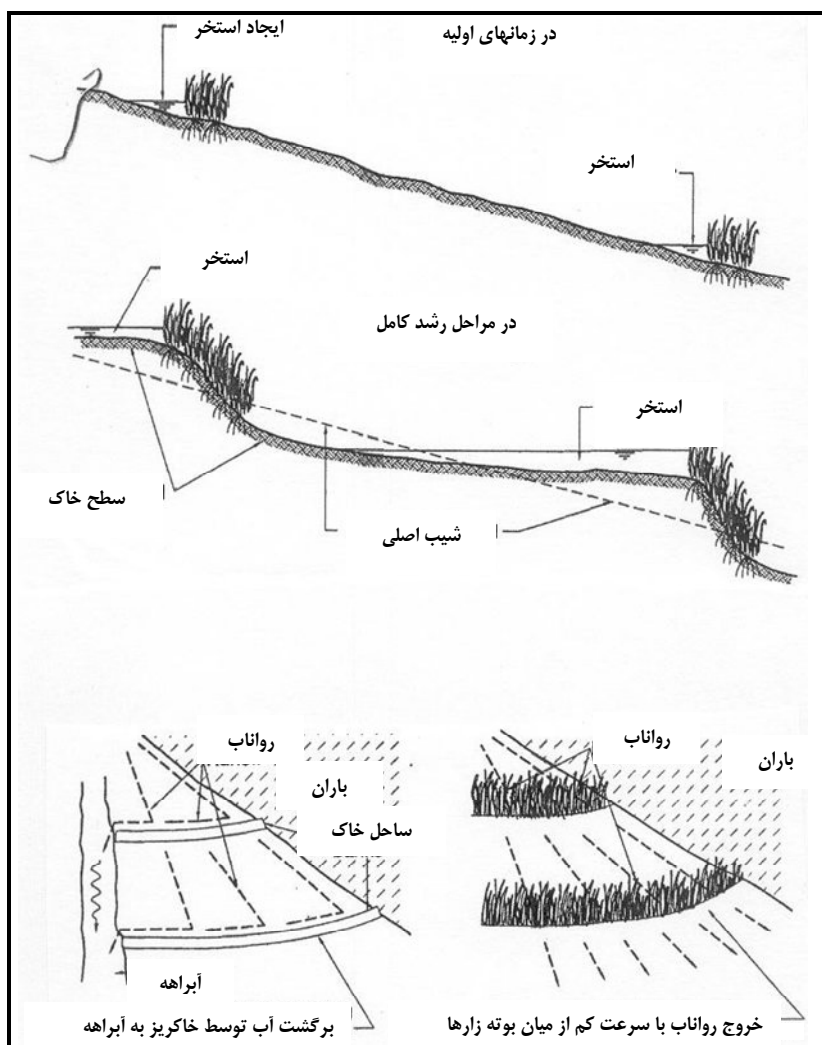
- آبراهه با پوشش گیاهی^۱ به طوری که سرعت جریان در آن از ۱/۲۰ متر در ثانیه بیش‌تر نگردد شکل (پ.۲-۲).
- تراس‌بندی، ایجاد تراس در شیب‌های تند باعث کاهش سرعت رواناب و نفوذ آب به اراضی خواهد شد شکل (پ.۲-۳).
- ایجاد تراس با درخت کاری. در این روش درخت به صورت ردیفی و در فواصل معین کشت می‌شود. در اثر فرسایش و ترسیب مواد فرسایش در پشت درختها، به تدریج شیب اراضی کاهش می‌یابد شکل (پ.۲-۴).



شکل پ.۲-۲- کانال پوششی برای کنترل فرسایش بستر [۱۰۳]



شکل پ.۲-۳- روش‌های تراس‌بندی [۱۰۳]



شکل پ.۲-۴- ایجاد تراس‌بندی با کاشت درختچه و درخت [۱۰۳]

پ. ۲-۳-۱-۲- معیارهای لازم برای موفقیت روش‌های کنترل فرسایش در حوضه

- برنامه‌ی کنترل فرسایش باید طولانی مدت باشد، چرا که معمولاً اعمال روش‌های کنترل فرسایش باعث تغییر در کشت و کار زارعین می‌شود که این امر معمولاً به صورت تدریجی و طولانی مدت امکان‌پذیر است.
- مشارکت زارعین در برنامه‌های کنترل فرسایش باید به صورت جدی مدنظر باشد. از این رو، معمولاً روش‌هایی موفقیت‌آمیز خواهند بود که با مخالفت شدید زارعین مواجه نگردند.
- روش از نظر فناوری ساده و از نظر اقتصادی مناسب باشد.
- آموزش زارعین و بهره‌برداران باید به صورت مداوم انجام گیرد.
- روش‌های اعمال شده تا اندازه‌ای انعطاف‌پذیر باشند تا در زمان مناسب بتوان تغییرات مناسب برای اصلاح روش اجرا کرد.
- روش‌ها با انتظار موفقیت کم شروع شوند. معمولاً همیشه موفقیت کم بهتر از شکست بزرگ است.
- روش‌ها باید مقبولیت اجتماعی داشته باشند. روش‌هایی موفقیت‌آمیزتر هستند که به همان اندازه که معیارهای فنی در آنها رعایت شده، معیارهای اجتماعی نیز مدنظر باشند.

پ. ۲-۳-۱-۳- کنترل فرسایش در رودخانه

سه نوع فرسایش در رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد که عبارتند از: تغییر مسیر رودخانه و تمایل آن به صورت مارپیچی^۱، کف‌کنی^۲ در رودخانه و فرسایش خندقی^۳. برای کنترل این فرسایش‌ها که عامل اصلی آن شیب تند رودخانه می‌باشد، روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

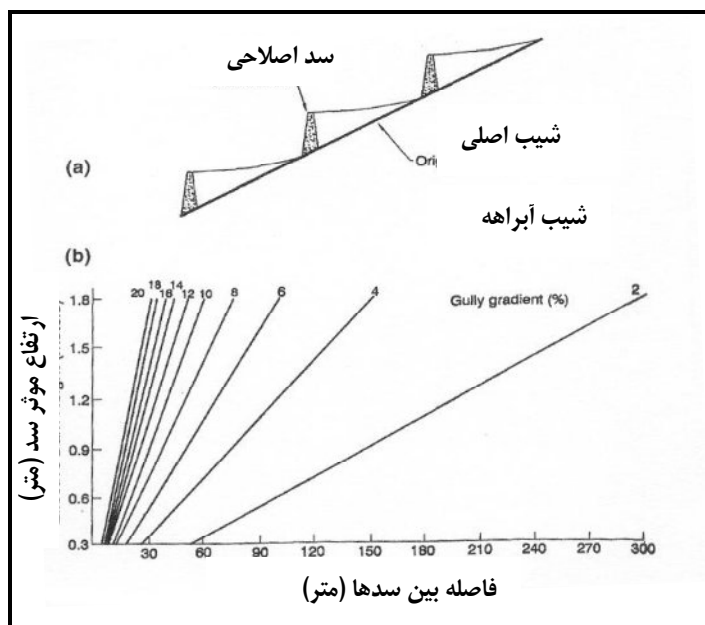
- سدهای اصلاحی

این سدها بیش‌تر از مصالح محلی (سنگ‌چین، سنگ و سیمان، سنگ و گابیون) احداث می‌شوند و معمولاً ارتفاع آنها از ۲/۰ متر کوتاه‌تر است. این سدها دارای سرریز و دریچه‌ی تحتانی (از طریق لوله) می‌باشند. فواصل این سدها ممکن است تا ۱۰۰ متر هم برسد و بیش‌تر برای کنترل شیب رودخانه احداث می‌شوند. شکل (پ. ۲-۵) می‌تواند مبنایی برای طراحی سدهای تاخیری کوتاه باشد. شکل (پ. ۲-۶) نیز مشخصات کلی یک سد اصلاحی سنگی را نشان می‌دهد.

ارتفاع سدهای اصلاحی خشکه‌چین حداکثر ۲/۰ متر می‌باشد. ارتفاع بیش‌تر از این نیاز به سنگ‌های با اندازه بیش‌تر دارند که ممکن است اقتصادی نباشد و یا نیاز به استفاده از مصالح دیگر نظیر گابیون، سنگ با ملات سیمان و یا بتنی باشد. فاصله بین سدهای اصلاحی بستگی به شیب آبراهه و ارتفاع سد دارد. مطالعات لنیز [۹۰] نشان داده است که برای استهلاک انرژی مناسب، رابطه زیر باید بین H (ارتفاع سد)، L (فاصله بین سدها) و S_0 (شیب طبیعی آبراهه) برقرار باشد:

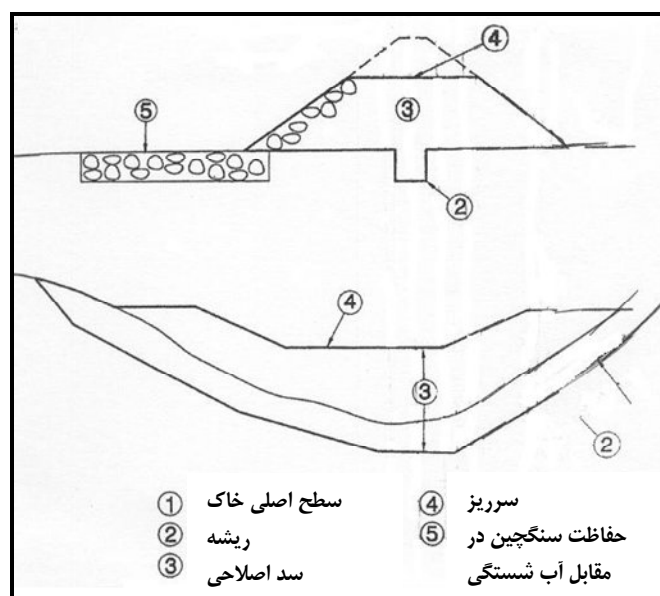
$$\frac{H}{L} = 1.4$$

(پ. ۲-۱۶)



شکل پ. ۲-۵- فاصله بین سدهای تاخیری [۱۰۳]

- 1- Meandering
- 2- Degradation
- 3- Gully erosion



شکل پ.۲-۶- مقطع سدهای تأخیری [۱۰۳]

پوشش گیاهی برای کنترل فرسایش خندقی

در شرایطی نیز می‌توان از کاشت درختان به عنوان تنها روش کنترل فرسایش خندقی استفاده کرد. درختان باید به اندازه‌ی کافی خشبی باشند تا مقاومت لازم در مقابل جریان ایجاد نموده و باعث کاهش سرعت جریان گردند. گیاه و تیوار از جمله گیاهانی است که به طور گسترده در مناطق مختلفی از جهان برای این منظور به کار رفته است. این گیاه دارای ریشه‌ی عمیق تا ۴ متر بوده و شاخ و برگ آن به اندازه‌ی کافی خشبی می‌باشند. استفاده از پوشش گیاهی این مزایا را دارد که به مرور زمان و نهشته شدن بیش‌تر رسوب در پشت آنها باعث می‌شود تا این گیاهان بیش‌تر رشد کنند و در نهایت کانالی با شیب ملایم تشکیل گردد. مطالعات انجام شده در کشور چین نشان داده است که پوشش گیاهی می‌تواند مقدار رسوب ویژه را به اندازه‌ی ۹۲ درصد کاهش دهد.

روش‌های پوششی دیگر

پوشش نهرهای طبیعی توسط گیاهان علفی، سنگ، گابیون، لیاف مصنوعی و غیره نیز ممکن است برای کنترل فرسایش رودخانه‌ها به کار رود. استفاده از لیاف مصنوعی امروزه رواج بیش‌تری پیدا کرده است، زیرا دوام آنها بیش‌تر است. البته روش‌های پوششی به دلیل هزینه‌ی بالایی که دارند تنها در حوضه‌های شهری استفاده می‌شود.

پ. ۲-۳-۲- روش‌های کنترل رسوب

سدهای اصلاحی و یا سازه‌های کنترل شیب: سازه‌های کوچکی (معمولاً تا ۲/۰ متر) هستند که در سر شاخه‌های با شیب تند طراحی و احداث می‌شوند. این سازه‌ها به صورت متوالی طوری طراحی می‌شوند که شیب تند رودخانه را به شیب ملایمی تبدیل کنند تا با کاهش سرعت جریان، میزان حرکت بار بستر کاهش یابد و از کف‌کنی رودخانه جلوگیری شود.

- حوضچه‌های ترسیب بار بستر: این حوضچه‌ها به منظور کاهش سرعت جریان و ترسیب بار بستر احداث می‌شوند.
 - حوضچه‌های ترسیب بار معلق: که بیش‌تر در مناطق شهری و به منظور ترسیب بار معلق احداث می‌شوند.
- به‌طور کلی سازه‌های تله‌انداز رسوب بسیار موثرتر از روش‌های دیگر کنترل فرسایش می‌باشند، ضمن این که معایبی چون هزینه بالا را نیز دارند.

پ.۲-۳-۱- سازه‌های تله‌اندازی رسوب^۱

حوضچه‌های تأخیری^۲ از سازه‌هایی هستند که به منظور ترسیب بخشی از مواد فرسایشی پایین‌دست مناطق نفوذناپذیر و در بالادست مخازن سدها ممکن است احداث شوند. از آن‌جاکه حجم این حوضچه‌ها به تدریج از رسوب پر می‌شود، تمهیدات لازم برای تخلیه‌ی آنها باید در زمان طراحی دیده شود. رسوب تولیدشده از مناطق غیرقابل نفوذ (مناطق کوهستانی پوشیده از سنگ و یا مناطق شهری) متفاوت از رسوب تولیدشده از خاک است. معمولاً، غلظت رسوب در این مناطق و در مراحل اولیه‌ی رواناب سطحی زیاد می‌باشد و سپس به تدریج از غلظت رسوب کاسته می‌شود. از این رو، حجم حوضچه باید طوری طراحی شود تا آن حجم رواناب اولیه را که دارای غلظت رسوب زیادی است، ذخیره نماید. شکل (پ.۲-۷) وضعیت قرارگیری رقوم دریچه‌ی تحتانی و هم‌چنین سرریز اضطراری^۳ را نشان می‌دهد. معمولاً، تراز دریچه‌ی تحتانی براساس طوفانی با دوره‌ی بازگشت ۲ تا ۱۰ ساله و رقوم سرریز اضطراری براساس بده با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ ساله طراحی می‌شوند. دریچه‌ی تحتانی باید طوری طراحی شود که آب ذخیره شده در اثر سیلاب به مدت ۲۴ ساعت تخلیه گردد تا در صورت وقوع سیلاب دیگری فضا برای ذخیره وجود داشته باشد. شکل (پ.۲-۸) انواع حوضچه‌های تأخیری را نشان می‌دهد.

نسبت طول به عرض این حوضچه‌ها باید بیش‌تر از ۲/۰ باشد. در صورتی که فضای کافی وجود ندارد، بهتر است از دیواره‌ی جداکننده برای افزایش طول استفاده شود شکل (پ.۲-۷).

مقدار بده ورودی به حوضچه را می‌توان از رابطه‌ی زیر:

$$Q_i = C I A_w \quad (\text{پ.۲-۱۷})$$

پیدا کرد.

سطح حوضچه در پلان (A) باید طوری طراحی شود که سرعت رو به پایین که از رابطه:

$$V = \frac{Q_i}{A} \quad (\text{پ.۲-۱۸})$$

به‌دست می‌آید برابر سرعت سقوط کوچک‌ترین ذراتی باشد که همراه آب وارد حوضچه می‌شوند.

بده عبوری از دریچه نیز از رابطه‌ی روزه‌ها:

$$Q_0 = C_0 A_0 \sqrt{2gh} \quad (\text{پ.۲-۱۹})$$

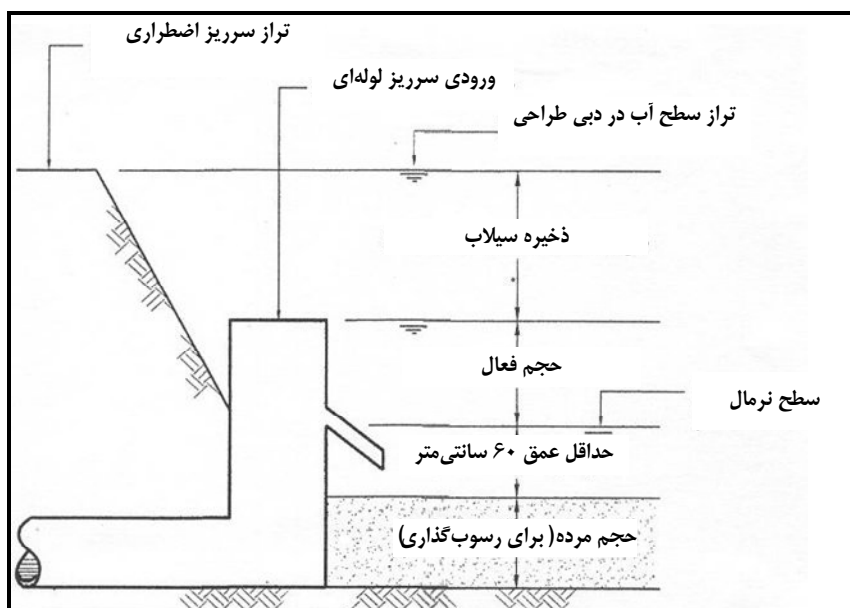
که در این رابط C_0 ضریب بده تقریباً برابر ۰/۶ و A_0 سطح مقطع روزه و یا لوله و h نیز برابر ارتفاع سطح آب از لبه روزه می‌باشد. و زمان تخلیه از رابطه‌ی:

$$T = \frac{B\sqrt{2h}}{3600A_oC_o\sqrt{g}} \quad (\text{پ. ۲-۲۰})$$

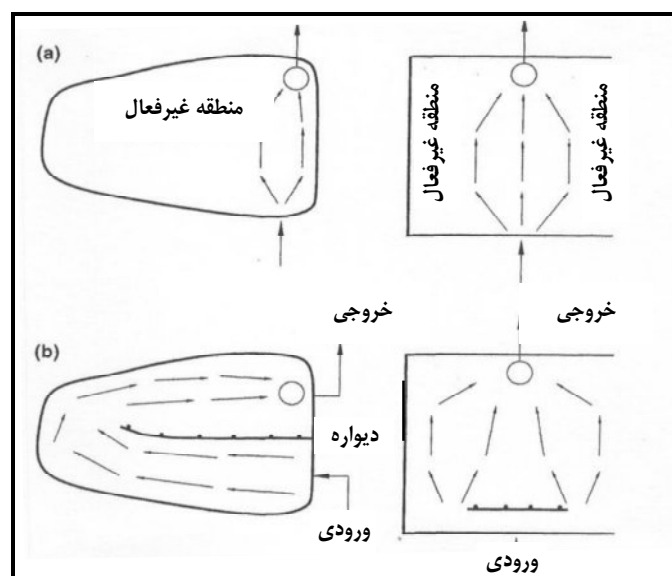
که در این رابطه B عرض حوضچه، T زمان تخلیه بر حسب ثانیه است. و مقدار بده سرریز از رابطه‌ی:

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}} \quad (\text{پ. ۲-۲۱})$$

به دست می‌آید. در این رابطه C ضریب بده سرریز و L طول سرریز و H ارتفاع سطح آب در بده سیلاب ۱۰۰ ساله تا لبه‌ی تاج سرریز می‌باشد.



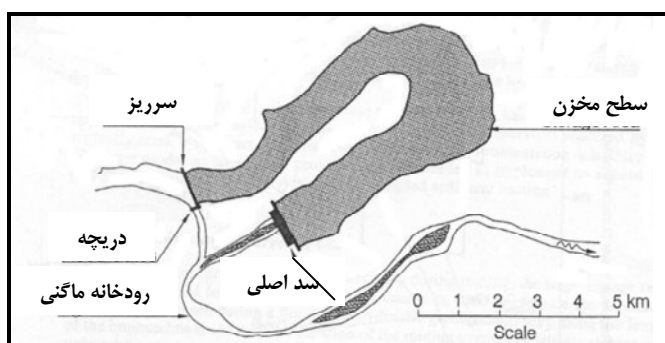
شکل پ. ۲-۷- موقعیت دهانه خروجی سرریز لوله‌ای [۱۰۳]



شکل پ. ۲-۸- انواع حوضچه‌های تاخیری [۱۰۳]

پ.۲-۳-۳- احداث گذرگاه فرعی (مجرای انحرافی)

چنان‌چه پستی و بلندی منطقه ایجاب کند، می‌توان با احداث کانال یا تونل انحرافی^۱ با ظرفیت زیاد، حجم زیادی از جریان سیلابی رودخانه را که میزان زیادی رسوب حمل می‌کند، از مسیر اصلی رودخانه منحرف نمود. این روش در سد ناگل کشور آفریقای جنوبی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که در شکل (پ.۲-۹) نشان داده شده است.



شکل پ.۲-۹- احداث گذر انحرافی [۱۰۳]

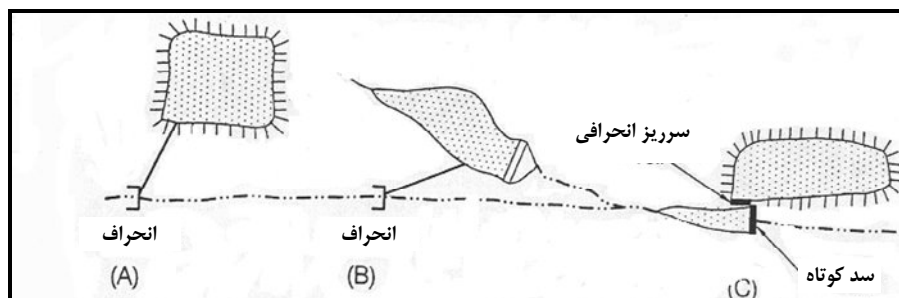
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سد مخزنی در انتهای قوس طولانی و تند یک رودخانه قرار دارد. برای کنترل رسوب و جلوگیری از ورود آن به مخزن سد در بالادست رودخانه و ابتدای قوس با ایجاد سازه‌ی آبگیر و راه انحرافی، جریان‌های سیلابی با آورد رسوب بسیار بالا، از این مسیر و بدون این که وارد مخزن شوند، به پایین‌دست منتقل می‌شوند. مشابه این روش برای مهار رسوب در مخزن سد نان‌هوا در کشور تایوان نیز استفاده شده است.

پ.۲-۳-۴- ایجاد مخزن فرعی خارج از مسیر رودخانه^۲

یکی دیگر از روش‌های مهار رسوب ورودی به مخازن سدها، انحراف بخشی از جریان پر از رسوب رودخانه‌ی اصلی و ذخیره‌ی آن در مخزن فرعی که خارج از مسیر اصلی رودخانه در نظر گرفته شده است. البته این روش تنها در موقعیت‌هایی امکان‌پذیر می‌باشد که بتوان در مجاورت رودخانه یا به موازات مخزن اصلی، گودال طبیعی یا یک حوزه‌ی کوچک در مجاورت رودخانه‌ی اصلی باشد که با احداث دایک بتوان حجم مشخصی را ذخیره کرد. ابعاد سرریز مخزن فرعی بزرگ نیست، چرا که میزان ورود آب به این مخزن از طریق سازه‌ی آبگیر کنترل می‌شود. رسوبات نهشته در مخزن فرعی را می‌توان به روش‌های مختلف تخلیه کرد زیرا این مخزن در بیش‌تر مواقع سال خشک می‌باشد. شکل (پ.۲-۱۰) سه روش احداث مخزن فرعی را نشان می‌دهد. برای افزایش راندمان انتقال رسوب به مخزن فرعی، ضروری است که تاسیسات آبگیری در محل قوس داخلی رودخانه‌ی اصلی احداث گردد.

1- Bypass tunnel

2- Off-stream reservoir



شکل پ. ۲-۱۰- سه روش احداث مخزن فرعی [۱۰۳]

پ. ۲-۳-۴-۱- مقاوم‌سازی شیب‌های تند

ریزش شیب‌های تند یکی از عوامل ورود بخش عمده‌ای از رسوب به تعدادی از مخازن سدها می‌باشد. از این رو ضروری است تا با انجام تمهیدات لازم شیب‌های تند شناسایی و سپس مقاوم‌سازی گردد. اهم اقداماتی که می‌توان انجام داد به شرح زیر است:

- ترانس‌بندی مناسب
- کشت گیاه
- ایجاد دیواره‌های حایل پایدار بوسیله سنگ، گابیون و غیره
- ایجاد سیستم زهکش مناسب
- مهار نمودن توده‌های سنگ
- استفاده از توری یا ژئوتکستایل برای حفاظت شیب‌ها
- جلوگیری از پُر کردن یا تخلیه سریع مخزن (بهره‌برداری مناسب از مخزن سد)
- ایجاد گوره‌های ساحلی به منظور جلوگیری از باتلاقی شدن بخش‌هایی از ساحل

پیوست ۳

سایر منابع قابل استفاده

پ.۳-۱- راهنماهای موجود

راهنماهای تهیه شده توسط دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور مرتبط با موضوع این راهنما عبارتند از:

- ۱- برنامه‌ریزی آزمایش‌های رسوب (تجدیدنظر شده): ۱۳۸۰، نشریه S-۲۲۲.
- ۲- تعیین بار بستر به روش مایر - پیتر و مولر (در مطالعات رسوب)، نشریه شماره S-۲۲۰.
- ۳- تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها: ۱۳۸۰، نشریه شماره S-۲۲۱.
- ۴- راهنمای آزمایش‌های دانه‌بندی رسوب: ۱۳۸۲، نشریه شماره S-۲۶۹.
- ۵- راهنمای تعیین بار کل رسوب رودخانه‌ها به روش اینشتین و کلبی، نشریه شماره S-۲۷۳.
- ۶- راهنمای تعیین غلظت نمونه‌های رسوبات معلق رودخانه‌ها: ۱۳۷۹، نشریه S-۲۰۵.
- ۷- راهنمای تعیین منحنی بده - اشل رودخانه با استفاده از روش انیشین - بارباروسا نشریه S-۱۵۶.
- ۸- راهنمای مطالعات پایه زمین‌شناسی مهندسی در پروژه‌های مهندسی آب: ۱۳۷۹، نشریه شماره S-۱۸۰.
- ۹- فهرست خدمات مرحله توجیهی سدسازی: ۱۳۷۰، نشریه شماره S-۵۷.
- ۱۰- فهرست جزییات مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مرحله‌های شناسایی و توجیهی در طرح‌های سازه‌های آبی (سدسازی) نشریه شماره S-۲۲۵.
- ۱۱- فهرست خدمات مرحله شناسایی سدسازی: ۱۳۷۰، نشریه شماره S-۵۶.
- ۱۲- راهنمای عملیات صحرایی، نمونه‌برداری مواد رسوبی رودخانه‌ها و مخازن سدها، نشریه ۲۶۵.
- ۱۳- راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در ساماندهی رودخانه‌ها، نشریه شماره ۲۸۸.
- ۱۴- راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها، نشریه شماره ۳۰۹.

منابع و مراجع

- ۱- ابن جلال. ر. و شفاعی بجستان م: ۱۳۸۸، اصول نظری و عملی مکانیک خاک، انتشارات دانشگاه شهید چمران.
- ۲- اعلمی م. ت.، ر. مرسولی و اسدیانی یکتا. ج: ۱۳۸۷: کاربرد و ارزیابی مدل GSTARS3 در شبیه‌سازی نحوه رسوب‌گذاری مخازن (مطالعه موردی مخزن سد کارده)، چهارمین کنگره ملی عمران، دانشگاه تهران.
- ۳- امام قلی‌زاده، ص: ۱۳۸۶، بررسی و ارزیابی انجام فلاشینگ تحت فشار در سدهای مخزنی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- تقدیسی، ب. و فعال، ز: ۱۳۸۵، بررسی اثر جریان‌های گردابی بر ذرات رسوبی بالادست سد انحرافی دز با استفاده از نرم‌افزار SSIIM. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۵- تقوی، م. و طالب بیدختی، ن: ۱۳۷۴، بررسی و کاربرد روش‌های معمول و متداول رسوب‌گذاری مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ش ۱۳۶، ص ۴۷-۵۹.
- ۶- ترابی پوده، ج: ۱۳۸۶، بررسی و ارزیابی رفتار جریان غلیظ در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۷- رهنمایی، د: ۱۳۷۴، رسوب‌گذاری در مخازن سدها، آب و توسعه، وزارت نیرو، س ۳، ش ۱، ص ۵۰-۵۸.
- ۸- زارع، س. و شمسایی، ا: ۱۳۸۵، بررسی عددی تغییرات مورفولوژیک مخازن سدها در اثر رسوب‌گذاری با استفاده از مدل GSTARS 3 و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۹- زراتی، ا. و اطاعت، ع: ۱۳۸۰، مقایسه عملکرد مدل‌های ریاضی 12 Fluvial و 2 Gsters در شبیه‌سازی رفتار رودخانه‌ها، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- ۱۰- حسن‌زاده، ی. و فیضی‌خانکندی، ا: ۱۳۸۷، پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد علویان با استفاده از مدل Gstars3.0، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۱۱- عابدینی، م. طالب بیدختی، ن: ۱۳۶۸، چگونگی توزیع و کنترل رسوب در مخازن سدها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، مه‌آب قدس، ص ۷۹۱-۸۲۰.
- ۱۲- قمشی، م: ۱۳۶۷، نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران.
- ۱۳- قمشی، م و حمادی، ک: ۱۳۷۸، بررسی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل HEC-6، دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران.
- ۱۴- سید سراجی، ح: ۱۳۸۷، مطالبی در خصوص رسوب‌گذاری و تخصیص احجام مخزن به مصارف مختلف، مذاکره حضوری.
- ۱۵- سپهری منش، ا. و ایزدپناه، ز: ۱۳۸۵، تجزیه و تحلیل رسوب در سد تنظیمی کرخه با استفاده از مدل HEC-6، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

- ۱۶- شاکری داریان، ع. و احمدی، ح.: ۱۳۸۴، نحوه کالیبراسیون مدل‌های ریاضی در برآورد پیش‌بینی رسوب‌گذاری مخازن. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری، تهران.
- ۱۷- سازمان آب و برق خوزستان، مطالعات صحرایی به منظور تهیه دستورالعمل راهنمای رسوب‌زدایی سد دز، گزارش‌های نهائی مراحل اول، دوم، و سوم اندازه‌گیری خصوصیات جریان غلیظ.
- ۱۸- سیدیان، م. و شفاعی بجستان، م.: ۱۳۸۵، بررسی وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد وشمگیر با استفاده از مدل ریاضی GSTARS 3، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۱۹- شرقی، ع.: ۱۳۷۵، مدل ریاضی پخش رسوب در مخازن سدها، چهارمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۲۰- شفاعی بجستان، م.: ۱۳۸۴، اصول کاربرد مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲۱- شفاعی بجستان، م.: ۱۳۸۷، اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲۲- شفاعی بجستان، م.: ۱۳۸۶، جریان در کانال‌های باز، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم.
- ۲۳- شعبانلو، س.: ۱۳۷۹، بررسی نحوه رسوب‌گذاری در تعدادی از سدهای مخزنی ایران با حجم‌های متفاوت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲۴- شمسایی، ا. و امامی، ا.: ۱۳۸۱، بررسی روش مینیمم توان واحد جریان در پیش‌بینی توزیع رسوب مخازن سدها، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۲۵- صادق زاده اصفهانی، م.م. و اعلمی، م.ت. ۱۳۸۵، بررسی تاثیر رهاسازی رسوبات سدهای مخزنی بر مورفولوژی رودخانه پایین دست با استفاده از مدل GSTARS 3.0 (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۲۶- صدق آمیز، ع.: ۱۳۷۶، پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه صفر، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه شهید چمران.
- ۲۷- صمدی بروجنی، ح.: ۱۳۸۱، پیش‌بینی غلظت رسوبات ناشی از رسوبشویی سد دز در رودخانه پایین‌دست و بررسی اثرات زیست محیطی آن، گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، دفتر تحقیقات و استانداردهای سازمان آب و برق خوزستان.
- ۲۸- طالب بیدختی، ن. و معین تقوی، م.: ۱۳۷۴، بررسی و کاربرد مدل‌های کامپیوتری HEC-2 و HEC-6 در برآورد رسوب مخزن سد درودزن. سمینار ملی فرسایش و رسوب، تهران.
- ۲۹- طلوعی، ا.: ۱۳۶۸، روش‌های حفظ و احیای ظرفیت مخازن سدها، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران.
- ۳۰- طلوعی، ا.: ۱۳۷۶، راه‌حلهای علاج‌بخشی در زمینه رسوب‌گذاری در مخازن سدها، سومین همایش بزرگ سدسازی، تهران.
- ۳۱- طلوعی، ا.: ۱۳۸۴، طراحی و بهره‌برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب، نخستین همایش مدیریت رسوب، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز.
- ۳۲- کلافی، ی.: ۱۳۷۳، استفاده از سزیم - ۱۳۷ در اندازه‌گیری فرسایش سطحی پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس،

- ۳۳- کلاهدوزان، م.، بهلولی، ۱. و محمدیان، ع.: ۱۳۸۱، شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی رسوب‌گذاری مخزن چم‌گردان (ایلام)، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۳۴- مرادلو، ج.، شفاعی بجستان، م.، تربن، ع. و غفوریان، م.: ۱۳۸۵، مدل‌سازی فلاشینگ رسوب در سد انحرافی میل و مغان، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۳۵- مهندسین مشاور محیط تحلیل گستر: ۱۳۸۵، تهیه مدل ریاضی برآورد حجم مخزن با استفاده از مقایسه داده‌های هیدروگرافی (مطالعه موردی: سد دز)، مدیریت مطالعات رسوب، سازمان آب و برق خوزستان.
- ۳۶- میر عبدالحمید، م.، لشته‌نشایی، م. و فیروزفر، ع.: ۱۳۸۱، بررسی عملکرد عملیات تکمیلی شاس در رسوب‌زدایی از مخزن سد سفیدرود، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۳۷- نجمائی، م.: ۱۳۸۲، سد و محیط‌زیست، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریه شماره ۵۵، ص ۳۸۳.
- ۳۸- وفایی‌منش، م. و حسینی، خ.: ۱۳۸۶، بررسی روند رسوب‌گذاری مخازن سدهای ذخیره‌ای با استفاده از مدل HEC-6، مطالعه موردی مخزن سد امیرکبیر. ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- 39- Ackers, P., and Thompson G.:1987, Reservoir Sedimentation and Influence of Flushing. Sediment Transport in Gravel-bed Rivers, C.R. Thorne, R.J. Grade, ed., University of Roorkee, India. PP. 97-102.
- 40- Ackers, P., and W.R. White: 1973, "Sediment Transport: New Approach and Analysis," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 99, no. HY I I , pp. 2041 -2060.
- 41- ACRES Consulting Engineers: 2004, Dez Dam Rehabilitation Project, Task 1, Reservoir Operation Review and Sediment Study, Khuzestan Water and Power Authority.
- 42- Altinakar,M.S. W.H. Graf and E.J. Hopfinger: 1990, Weakly Depositing Turbidity Current on a Small Slope, Journal of Hydraulic Research, vol.28,No.1.
- 43- American Society of Civil Engineers (ASCE), Task Committee on Relations Between Morphology of Small Stream and Sediment Yield: 1982, "Relationships Between Morphology of Small Streams and Sediment Yield," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 108, no. HY II , pp. 1328-2365.
- 44- Annandale, G. W.:1987, Réservoir Sédimentation, Elsevier Science Publisher, Amsterdam.
- 45- Annandale, G. W: 2001, Reservoir Conservation and Sediment Management, World Bank, Washington,
- 46- Asada, H.:1973, "Prediction of Sediment Bed Profile in Reservoir and River Bed Deformation: A Practical Method and Some Example of Calculation", Transaction of the Eleventh International Congress on Large Dams, Q40-R26 Paper, pp.381-402.
- 47- ASCE:1975 and 2005, Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineering Manual No. 54, V.A. Vanoni, editor.
- 48- Atkinson, E. 1996a: Flushing Sediment from Reservoirs: REFLUSH User Manual, ReportOd/ITM 54, HR Wallingford, Wallingford.
- 49- Atkinson, E.:1996b: The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs, Report OD 137, HR Wallingford Ltd., Wallingford, United Kingdom, 21pp.
- 50- Basson, G. R. and A. Rooseboom: 1997, Dealing with Reservoir Sedimentation, Water Research Commission Report No. TT 91/97.

- 51- Basson, G. R. and A. Rooseboom: 1999, Dealing with Reservoir Sedimentation-Dredging, Water Research Commission Report No. TT 110/99.
- 52- Batuca, D. and J. M. Jordan: 2000, Silting and Desilting of Reservoirs, Published by A.A. Balkema.
- 53- Blanton, J.O.:1982, "Procedures for Monitoring Reservoir Sedimentation," Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 54- Bonham-Carter, G.F., and Sutherland, A.J.:1968, "Mathematical Model and Fortran IV program for computer simulation of Deltaic sedimentation". Kansas Geological survey computer program, the University of Kansas, Lawrence.
- 55- Borland, W.M., and C.R. Miller:1960, "Distribution of Sediment in Large Reservoirs," Transactions of the ASCE, vol. 125, pp. 166-180.
- 56- Brabben, T.E.: 1988, Reservoir Desilting Methods, HR Wallingford Technical note OD/TN32.
- 57- Brandt, S. A.: 2000, "A review of Reservoir Desiltation", International Journal of Sediment Research, Vol. 15, pp:321-342.
- 58- Brandt S.A. and Swenning J.: 1999, Sediment logical and Geomorphologic Effects of Reservoir Flushing: the Cach Reservoir, Costa Rica, Geografiska Annaler, Vol. 81A(3), pp. 391-407.
- 59- Brown, C.B.: 1944, The Control of Reservoir Silting, United States Department of Agriculture, Miscellaneous Publication No. 521.
- 60- Brown C. B.:1943, The control of Reservoir Silting, United States Department of Agriculture, Miscellaneous publication No.521, Washington, D. C., 166pp.
- 61- Brune, G.M.:1953, "Trap Efficiency of Reservoirs," Transactions of American Geophysical Union, vol. 34, no. 3 pp. 407-418.
- 62- Bu, N., Su, F. and R. Shang.: 1980, Sediment Problems in Liuji Xia and Yangouxia Reservoirs. Int. Symp. River Sedimentation, Gunghua Press, Beijing, pp.737-752.
- 63- Bureau of Reclamation:1987, Design of Small Dams, 3rd Edition, Denver, Colorado.
- 64- Cao, Z. R. Day. and Egashira, S. :2002, Couples and Decoupled Numerical Modeling of Flow and Morphological Evolution in Alluvial Rivers," Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol.128 No.3, PP:306-321.
- 65- Chang, F. F. M., and Richards, D. L.:1971, "Deposition of Sediment in Transient Flow", Journal of the Hydraulics Division, Vol. 97, No. HY6, pp.837-849.
- 66- Chang, H.H.:1982, "Fluvial Hydraulics of Delta and Alluvial Fans," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 108, no. HY 1 1.
- 67- Chang, H.H.:1990, Generalized Computer Program FLUVIAL-1 2, Mathematical Model for Erodable Channels, User's Manual.
- 68- Chang, H.H.: 1991, Test and Calibrations on Fluvial-12 Model Using Data from Stony Creek, Report prepared for the California Department of Transportation.
- 69- Chanson, H.:1999, The Hydraulics of Open Channel Flow, An Introduction, Arnold publisher, 1st edition, 495 p.
- 70- Chien, N. and Z. Wang: 1999, Mechanics of Sediment Transport, American Society of Civil Engineering, 913 p.
- 71- Chow, V.T.:1959, Open Channel Flow, McCraw-Hill Publishing Company, New York.
- 72- Churchill, M.A.:1948, Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data," by L.C. Gottschalk, Proceedings, Federal Interagency Sedimentation Conference, Denver, Colorado, pp. 139-140.
- 73- CIRIA: 1996, Guidance on the Disposal of Dredged Material to Land, Report 157.

- 74- Dendy, F.E. and Bolton G.C.: 1976, Sediment Yield-Runoff-Drainage Area Relationships in the United States, Soil and Water Conservation, 31(6): 264-266.
- 75- Dejong, E. and Kachanoski: 1988, The Importance of Erosion in the Carbon Balance of Prairie Soils, Canadian Journal of Soil Science, 68: 111-119.
- 76- Devries, M.:1965, Considerations about Non-Steady Bed Load Transport in Open Channels, Proc. 11th Congress IAHR Netherland, pp:3.8.1-3.8.11.
- 77- Devris, M.:1973, River Bed Variations – Aggradation and Degradation, Proc. Int. Seminars of Hydraulic of Alluvial Streams, IAHR, Netherlands, pp 1-10.
- 78- DHI:2007, User and Reference Manual, <http://www.dhisoftware.com/MIKE11/>
- 79- Di Silvio G.:1990, Modeling Desiltation of reservoirs by Bottom-outlet Flushing. Movable Bed Physical Models, H.W. Shen, ed., NATO ASI Series C, Kluwer Academic Publishers, pp.159-171.
- 80- Donnel, B.P(editor):2006, Users Guide To SED2D WES Version 4.5, US Army, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory, <http://chl.wes.army.mil/software/tabs>
- 81- Du, G., and Zhang, Z.:1989, The Erosion of Cohesive Sediment in Retrogressive Erosion in Reservoirs. Proceedings of Technical Session B: Fluvial Hydraulics, XXIII Congress of the IAHR, Ottawa, pp: B399-B406.
- 82- Egiazaroff, I.:1965, "Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations," Journal of the Hydraulic Division of the ASCE, vol. 91 , no. HY4, pp. 225-247.
- 83- Einstein, H.A.:1950, The Bedload Function for Sediment Transport in Open Channel Flow, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation, Technical Bulletin No. 1026.
- 84- Elich,S. Work,P.A., Hayte E. J., 2007, Influence of Stratification and Shoreline Erosion on Reservoir Sedimentation Patterns., Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, vol. 133, No.3, pp: 255-266.
- 85- Emamgholizadeh, S., Samadi H., and Bina,M.: 2005, The Flushing of the Sediment near the Power Intakes in Dez Reservoir, River Basin Management, Italy
- 86- Fan, S.S. (ed.):1988, Twelve Selected Computer Stream Sedimentation Models Developed in the United States, Proceedings of the Interagency Symposium on Computer Streams Sedimentation Model, Denver, Colorado, Published by the Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC.
- 87- Fan J.:1991, Density Currents in Reservoirs, Workshop on Management of Reservoir Sedimentation, New Delhi, India.
- 88- Fan J. and Morris G. L.: 1992 a, Reservoir Sedimentation I: Delta and Density Current Deposits, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.118, No. 3 PP: 335-364.
- 89- Fan J. and. Morris G. L.: 11992 b, Reservoir sedimentation, II: Reservoir Desiltation and Long Term Storage Capacity, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.118, No. 3, pp:370-383.
- 90- Fan J. and Jiang R.:1980, On Methods for the Desiltation of Reservoirs, International Seminar of Experts on Reservoir Desiltation, Tunis, 1980, Com 14, p.17.
- 91- Fang, D. and Cao S.: 1996, An Experimental Study on Scour Funnel in Front of a Sediment Flushing Outlet of a Reservoir, proceeding of 6th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, pp.I.78-I.84.
- 92- Ferrari, R.L.:2006, Reconnaissance Technique for Reservoir Surveys, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

- 93- FLOW-3D user's manual, 2002, Flow Science, Inc., Sante Fe, NM.
- 94- Garcia, M.H.: 2008, "Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice", ASCE Manual and Reports on Engineering practice No.110.
- 95- Garric, J., Migeom B. and Vindimian E.: 1990, Lethal Effects of Draining on Brown Trout, A predictive Model Based on Field and Laboratory Studies, Water Resources Research, 24(1):29-65.
- 96- Gee, M.: 1992, Guidelines for the Calibration and Application of Computer Program HEC- 6, Training Document No. 13, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis California, USA.
- 97- Gester, S. and Rey, R.:1994, Consequence ecologiques des Currage de Bassins de Renetenue, Cahier, de l'Environnement No.219, Office Federal de l'Environnement, des Forets et du Paysage, Bene, Switzerland.
- 98- Ghomeshi, M.:1995, "Reservoir sedimentation modeling", PHD Thesis, university of Wollongong, Australia.
- 99- Gorbach, C. A. and Baired, D. C.:1991, Case History, Channel Aggradations above a Reservoir, 5th Federal Interagency Sedimentation Conf., Las Vegas, Nevada, pp.4.115-4.122.
- 100- Graf W.H.:1983, Hydraulics of Reservoir sedimentation, International Water Power and Dam Construction. Vol. 35, No.4
- 101- Graf, W.H.:1984, Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, New York.
- 102- Halcrow Water: 2001, Sedimentation in Storage Reservoirs, Final Report, <http://www.halcrow.com>
- 103- Holly, F. M., and Rahuel J.L.,:1990, "New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modeling", Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, No. 4, pp. 401-416.
- 104- Henderson, F.: 1966, Open Channel Flow, MacMillan Book Company, New York, NY.
- 105- Hotchkiss, R.H. and. Huang: 1995, Hydro suction sediment – Removal System (HSRS), Principles and Field Test, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 121. No. 6, PP: 479-489.
- 106- HR Wallingford: 1996, the Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs, Report OD 137.
- 107- HR Wallingford: 2000, Guidelines for the Flushing of Sediment from Reservoirs, Report SR 566.
- 108- HYPACK, Inc.: 2005, HYPACK for Windows, <http://www.hypack.com>
- 109- International Commission on Large Dams (ICOLD) 1997, Position paper on dams and the environment <http://genepi.louis-jean.com/cigb/chartean.html>.
- 110- International Hydrographic Organization (IHO): 2005, Standards, for Hydrographic Surveys, Special Publication No. 44, Fourth Edition, Monaco.
- 111- Jia, Y. and. Wang S.S.Y.: 2001, CCHE2D, Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, School of Engineering The University of Mississippi.
- 112- Jian, I.:1992, Local scour upstream of bottom sluice gate in reservoir, Pp.791-798, proc. 5th Intl. symp. River sedimentation, Karlsruhe.
- 113- Jin L.:1992, Local Scour Upstream of a Bottom Sluice Gate in Reservoirs, Sediment Management, Proc. Of the 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, University of Karlsruhe, Institute of Hydraulic Structures and Agricultural Engineering, vol.2, pp.791-798.
- 114- Julien, P.Y.:1995, Erosion and Sedimentation, Cambridge, University Press, Cambridge, UK.
- 115- Qian, N.:1982, Reservoirs sedimentation and slope stability, technical and environmental effects. PP.639-690, In Proc. 14th ICOLD congress.
- 116- Karolyi, Z.: 1947, Kiserleter a Hordalekfogoval, Vizügyi Közlemenyek, C. 1-4.

- 117- Kawashima, S. T., Johndrow, B., Annandale G. W. and Shah F.: 2003, Reservoir conservation, Volume II: Rescon Model and user Manual, The World Bank, Washington, USA, 52p.
- 118- Khan, A.A. and Wang S.S.Y,: 2002 CCHE2D Flow and Sediment Transport Model with Graphical User Interface, Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada.
- 119- King, I.:1997, Users guide to RMA2 WES version 4.3. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, 240 p.
- 120- Kron, R.B.:1962, Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, CA.
- 121- Lai, J.S. and Shen.H.W.: 1996, Flushing Sediment Through Reservoirs, Journal of Hydraulic Research, vol. 34, no.2, pp: 237-255.
- 122- Lane, E.W.:1955, "The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering," Journal of the Hydraulic Division, Proceedings, American Society of Civil Engineers, vol. 81, paper 745, pp. 1-17.
- 123- Lane, E.W., and Koelzer V.A.: 1943, "Density of Sediments Deposited in Reservoirs," in A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams, Report no. 9, Interagency Committee on Water Resources.
- 124- Lara, J.M.:1962, The Revision of the Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 125- Lara, J.M., and Pemberton E.L.:1965, Initial Unit Weight of Deposited Sediments, Proceedings, Federal Interagency Sedimentation Conference, 1963, U.S. Agriculture Research Service Miscellaneous Publication, no. 970, pp. 8 18-845.
- 126- Lara, J.M., and Sanders H.I.: 1970, The 1963-64 Lake Mead Survey, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 127- Leibenthal, A.: 1997, The World Banks Experience with Large Dams: A Preliminary Review of Impacts, The World Bank, Washington DC.
- 128- Leniz, M.Am:2002, Stream Bed Stabilization Using Boulder Check Dams, Geomorphology, 45/243-260.
- 129- Lin J.J. and Wu C. M.: 1991, Hydraulic Model Studies of Tien-lun Reservoir Desiltation, Proceedings of the 5th Federal Interagency Sedimentation Conf, S.-S. Fan and Y.-H.. Kuo,eds., pp.7.9-7.14.
- 130- Linsley, R.K., and Franzini J.B.:1979, Water-Resources Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York.
- 131- Linsley, R.K., Kohler Jr. M.A., and Paulhus J.L.H.: 1975, Hydrology for Engineers, McGraw- Hill Book Company, New York.
- 132- Lopez, J.L.: 1978, Mathematical Modeling of sediment deposition in reservoir, Hydrology papers, Colorado State University No. 95.
- 133- Long Y. and Zhang Q.:1981, Sediment Regulation Problems in Sanmenxia Reservoir, Water Supply and Management, 5(4/5): 351-360.
- 134- Lyn:1987, Unsteady Sediment- Transport Modeling, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 110, No.4, PP:450-466.
- 135- Mahmood, K.: 1987, Reservoir Sedimentation Impact, Extent and Mitigation, World Bank Technical paper No.71.

- 136- Merrill, W. M.:1974, "Reservoir sedimentation: A computer simulation", The Kansas water resources institute, university of Kansas.
- 137- Mc Cartney, P. and Sally H.: 2005, Managing the Environmental Impact of Dams, International Water Management Institute, <http://www.iwmi.cgiar.org/africa/East/documents>.
- 138- Meyer-Peter, E., and Miiller R.: 1948, "Formulas for Bedload Transport," Proceedings, the Second Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm.
- 139- Miller, C.R.:1953, "Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations," U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 140- Molinas, A., and Yang C.T.:1986, Computer Program User's Manual for GSTARS (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation), U.S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado, USA.
- 141- Morris, G.L., and Fan J.:1997, Reservoir Sedimentation Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York, 758 pp.
- 142- Mühlhofer, L.:(1933), Untersuchungen über Schwebstoff-und Geschiebeführung des Inss nächst Kirchbichl, Wasserwirtschaft, Heft 1-6.
- 143- Murthy, B.N.:1980, Life of Reservoir," Technical Report No. 19, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi.
- 144- Novak, P. and Cabelka J.: 1981, Models in Hydraulic Engineering, Pitman Advanced Publishing Program.
- 145- Ogden, F.L., and Julien P.Y.:2002, "CASC2D: A Two-Dimensional, Physically-Based, Hortonian, Hydrologic Model," in Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications, V.J. Singh, and D. Freverts, eds., Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- 146- Olesen, K. W. and Basson G.: 2004, 1D and 2 D Modeling of Sedimentation and Flushing in Shallow Reservoirs, Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, I AHR, Tehran, Iran.
- 147- Pacific Southwest Inter-Agency Committee(PSIAC), Water Management Subcommittee: 1968, "Factors Affecting Sediment Yield in the Pacific Southwest Area and Selection and Evaluation of Measures for Reduction of Erosion and Sediment Yield."
- 148- Palmieri, A. F. Annandale Shah, G. W. and Dinar A.: 2003, Reservoir Conservation, volume I: The Rescon Approach, The World Bank, Washington, USA, 101P.
- 149- Parhami, F: 1996, Sediment Control Methods in Sefid – Rud Reservoir Dam (Iran), 3rd Int. Symposium on River Sedimentation, University of Mississippi. 112- International Hydrographic Organization (IHO): 1998, IHO Standards for Hydrographic Surveys, Special Publication No.44, Monaco.
- 150- Paul T. C. and Dhillon G. S.:1988, Sluice Dimensioning for Desilting Reservoirs, Int. Water Power and Dam Construction, May, pp.40-44.
- 151- Pemberton E. L. and Orvis C. J.: 1991, Modeling Settling Basin Deposition and Sluicing., Proceedings of the 5th Federal Interagency Sedimentation Conf. 1, S.-S. Fan and Y.-H. Kuo,eds., pp.4.123-4.130.
- 152- Pennock, D.J. and Dejong E.: 1987, The Influence of Slope Curvature on Soil Erosion and Deposition in Hmmmock Train, J. of Soil science, 144, 209-217.
- 153- Pitt J.D. and Thompson G.: 1984, The Impact of Sediment on Reservoir Life, Challenges in African Hydrology and Water Resources, Proceedings of the Harare Symposium, July 1984, D. E. Mallng, S.S.D. Foster, and P. Wurzel, eds, IAHS Publication No. 144, pp.541-548.

- 154- Porto, P. , Walling D. E., Tamburinob V., and Callegaric G.: 2003, Relating Caesim 137 and Soil Loss from Cultivated land, Catena, 53, 303-326.
- 155- Qian N.:1982, Reservoir Sedimentation and Slope Stability, Technical and Environmental Effects, 14th Int. Congress on Large Dams, Transactions, Rio de Janeiro, Brazil, Vol III, pp.639-690.
- 156- Rahuel , J. L., Holly, F. M., Chollet, J. P., Belleudy , O. J., and Yang, G.: 1989, "Modeling of Riverbed Evolution for Bedload Sediment Mixtures", Journal of hydraulic Engineering, Vol. 115, No. 11, pp. 1521-1524
- 157- Randle, T.J.:1998, "Predicting Sediment Yield From Arid Drainage Areas" in Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Interagency Advisory Committee on Water Data, Subcommittee on Hydrology, Las Vegas, Nevada, April 19-23.
- 158- Ranjbar Taklimy M. H. and Tolouei E.: 2005, Sefidrud Dam Desiltation Operation, Sefidrud reservoir desiltation committee, Gilan, Iran (downloaded from internet).
- 159- Reeve, C.E.: 1992, Trapping Efficiency of Reservoirs in Water Resources and Reservoir Engineering, Thomas Telford, London, PP 241-251.
- 160- Ritchie, J.C. and Mc Henry J.R.: 1975, Fallout Cs-137: A Tool in Conservation Research, J. of soil water Conservation, 30, pp.283-288.
- 161- Rooseboom, A.: 1975, A Sediment Production Map for South Africa, Report 61, Dept. of Water Affairs, Pretoria, South Africa.
- 162- Rubey, W.W.:1933, "Settling Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles," American Journal of Science, vol. 25, pp. 325-338.
- 163- Samuels P.G.: 1990, Cross-Section Location in I-D Models, Int. Conf. on River Hydraulics, W. White (ed), John Wiley and Sons, pp.339-350.
- 164- Sauer, V. B., and Meyer, R.W.: 1992, Determination of Error in Individual Discharge Measurements. Open-File, Report No.92-144, U.S. Geological Survey, Norcross, Ga.
- 165- Sharghi, A.:1994, Reservoir Sedimentation, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Leuven, Belgium.
- 166- Sharghi, A.:1994, Mathematical Modeling of Reservoir Sedimentation: Application to Sefid-Rud Reservoir in Iran, article, 10th International Conference on Computational Methods in Water Resources, Heidelberg, Germany.
- 167- Sen S.P. and Srivastava A.:1995, Flushing of Sediment from Small Reservoir, 6th Int. Symp. on River Sedimentation, Management of Sediment: Philosophy, Aims, and Techniques, New Delhi, 7-11 November, 1995, Balkema, Rotterdam, pp.885-901.
- 168- Shen H. W. and Lai J. S.:1993, Hydraulic Desiltation for Noncohesive Sediment, Proc. Of the 1993 Annual ASCE Hydraulic Engineering Conf., San Francisco, H.W. Shen, S.T. Su and F. Wen, eds, pp.119-124. Shown, L.M. 1970: Evaluation of a Method for Estimating Sediment Yield. USGS Prof. Paper 700-B, pp. 242-249.
- 169- Spasojevic, M., and Holly, F. M.:1990, "MOBED2-Numerical simulation of two dimensional mobile bed processes", IIHR Report No.344, IOWA Institute of hydraulic Research, The University of IOWA.
- 170- Strand, R.I.:1975, "Bureau of Reclamation Procedures for Predicting Sediment Yield," in Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, November 28-30, 1972.

- 171- Strand, R.I., and Pemberton E.L.:1982, Reservoir Sedimentation Technical Guidelines for Bureau of Reclamation, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 48 pp.
- 172- Strand, R.I. and Pemberton E.L.:1987, "Reservoir Sedimentation," Design of Small Dams, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 173- Tan Y.:1996, Reservoir Design and Management to Control Sediment, Reservoir Sedimentation, Proc. Of the St Petersburg Workshop, S. Bruk and H. Zebidid, eds, IHP-V, Technical Documents in Hydrology No.2, UNESCO, Paris, pp.149-194
- 174- Tolouei, E.: 1989, Reservoir Sedimentation and Desiltation, MPhil thesis, University of Birmingham, UK, pp.137.
- 175- Tolouei, E.: 1993, Reservoir Sedimentation and Desiltation, Ph.D. thesis, University of Birmingham, UK.
- 176- Turner, T. M: 1996, Fundamentals of Hydraulic Dredging, 2nd ed. New York, ASCE.
- 177- U.S. Army Corps of Engineers: Laboratory soils Testing, EM 1110-2-1906.
- 178- U.S. Army Corps of Engineers: Soil Sampling, Engineering Manual EM 1110-2-1907.
- 179- U.S. Army Corps of Engineers: 1977and 1993, Generalized Computer Program, HEC-6, Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs, Users' Manual, the Hydrologic Engineering Center, Davis, California (March 1977; revised August 1993).
- 180- U.S.Army Corps Eng: 1983: Dredging and Dredged Material Disposal, Engineering Manual EM1110-2-5025.
- 181- U.S. Army Corps of Engineers: 1989, Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs, EM11 10-2-4000, Washington, DC.
- 182- U.S. Army Corps of Engineers: 2004, Engineering and Design Hydrographic Surveying, Department of Army, Washington DC. www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-Manuals/EM1110-2-1003/toc.htm
- 183- USBR: 2006, Erosion and Sedimentation Manual, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulic Group, Denver Colorado USA.
- 184- U. S. Department of Transport, Federal Highway Administration.:2000, BRI-STARS, Bridge Stream Tube model for Alluvial River Simulation. User's manual.
- 185- U.S. Interagency Committee on Water Resources: 1957, Subcommittee on Sedimentation, "Some Fundamentals of Particle Size Analysis," Report no. 12.
- 186- U.S. Interagency Sedimentation Project, "A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams," Reports No. 1 through 14 and A through W, Subcommittee on Sedimentation, 1940 to 1981.
- 187- U.S. Soil Conservation Service: 1983, National Engineering Handbook. Section 3 Sedimentation, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- 188- Novak, P.:1959, Vyzkum Funkce a Ucinnosti Pristroju na Mereni Splavenin, Vyzkum Ustav Vodohospodarsky, Praha, Sesist 99.
- 189- Vanoni, V.A.:1975 (reprint 2006, Sedimentation Engineering, ASCE Manual 54, ASCE, New York.
- 190- Vieira, D.A., Wu.W.M.:2002, Users Manual for One-Dimensional Channel Network Model CCHE1D version 3.0, (Computer program manual). University of Mississippi, University, MS, <http://www.ncche.olemiss.edu/cche1d/index.html>
- 191- Vinckers, J. B., Bijker E. W., and. Schijf J.B.:1953, Bedload transport meter for fine sand "Sphinx," Intern. Assoc. Hydr. Res., 5th Congr., Minneapolis.

- 192- Wang Z.Y., Huang J. and Su D.:1997, Source Rate Formula, International Journal of Sediment Research, Vol. 12(3), pp.11-20.
- 193- Wang Z. and Wang Z.: 1994, Hyperconcentrated flow, IAHR Monograph, A. A. Balkema, Rotterdam.
- 194- White, W. R.:2000, Flushing of Sediments from Reservoirs, Thematic Review IV.S, World Commission on Dams.
- 195- Westrich B. and Turaschek M., 1985, Flow Transport Capacity for Suspended Sediment, 21th Congress of IAHR, Vol. 3, Melbourne, Australia, pp.590-594.
- 196- White, W. R.:2001, Evacuation of Sediments from Reservoirs, London, Thomas Tefford.160-
USACE: 1985, Beneficial Uses of Dredged Material, Engineering and Design, Department of the Army Corps of Engineers, EM 1110- 2- 5026.
- 197- Xiaqing, Y.:2003, Manual on Sediment Management and Measurement, World Meteorological Organization, Report No. 47, 158p.
- 198- Wu C.M.: 1983, Desilting Experience of the Reservoir, ROC –Japan, Seminar on Soil and Water Conservation and its Control on Slope land, National Science Council, R.O.C., Interchange Association, Japan, p. 26.
- 199- Wu C.M.:1989, Hydraulic Properties of Reservoir Desilting. Proceedings of XXIII Congress of the IAHR, Hydraulics and the Environment, Technical Session B: Fluvial Hydraulics, Ottawa, pp.B587-B593.
- 200- Wu, W.M., Vieira D.A.: 2002, One-Dimensional Channel Network Model CCHE1D version 3.0, Technical Manual, University of Mississippi, University, MS
- 201- Xia M., ed.: 1983, Sediment Problems in Design and Operation of Medium and Small Size Reservoirs, Science Press, Beijing (in Chinese).
- 202- Yalin, M.S. [Ed.]:1977, The Mechanics of Sediment Transport, Pergamon, Toronto.
- 203- Yang, C.T.:1973, "Incipient Motion and Sediment Transport," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 99, no. HY 10, pp. 1679-1 704.
- 204- Yang, C.T.:1976, Minimum Unit Stream Power and Fluvial Hydraulics, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 102, No. HY7, pp. 919-934.
- 205- Yang, C.T.:1996, Sediment Transport Theory and Practice, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 396 p. (reprint by Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 2003).
- 206- Yang, C.T., and F.J.M. Simoes:2000, User's Manual For GSTARS 2.1 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 2. 1) , Technical Service Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 207- Yang, C.T., and Simoes F.J.M.:2002, User's Manual for GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0), Technical Service Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 208- Yoon, Y.N.:1992, The State and the Perspective of the Direct Sediment Removal Methods from Reservoirs, International Journal of Sediment Research, Vol. 7(2), pp: 99-116.
- 209- Yucel, o. and Graf, W.H.:1993, "Bed load deposition and delta Formation: A Mathematical Model", Lehigh University, Fritz engineering Laboratory, Report No. 384.1
- 210- Zhang, H., Xia, M.D., Chen, S.-J., Li Z.-W., Xia H.-B., Jiang N.-S. and Lin, B.-W.:1976, Regulation of sediments in some medium- and small-sized reservoirs on heavily silt-laden streams in China, Twelfth International Congress on Large Dams, Transactions, Mexico City, Mexico, March 29 - April 2, Vol.3, pp: 1223-1244.

- 211- Zhang, Y. and Jia Y.:2005, CCHE2D Mesh Generator User's Manual, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, School of Engineering, University of Mississippi.

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی nezamfanni.ir قابل دستیابی می‌باشد.

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision

Guideline for Dams Reservoirs Sedimentation and Desiltation Studies

No. 589

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy
Bureau of Engineering and Technical
Criteria for Water and Wastewater

<http://seso.moe.org.ir>

2012

این نشریه

با عنوان «راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها» می‌باشد. مطالب این نشریه با استفاده از منابع معتبر و تجربیات بین‌المللی و ملی در زمینه‌ی رسوب‌مخازن تدوین شده است. هدف این نشریه، ارائه معیارهای فنی برای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها است که به شناخت عوامل نهشته شدن، روش‌های برآورد و روش‌های کنترل رسوب در مخازن و نیز روش‌های رسوب‌زدایی با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی و مدیریت موضوع رسوب در مخازن موجود کشور پرداخته است.