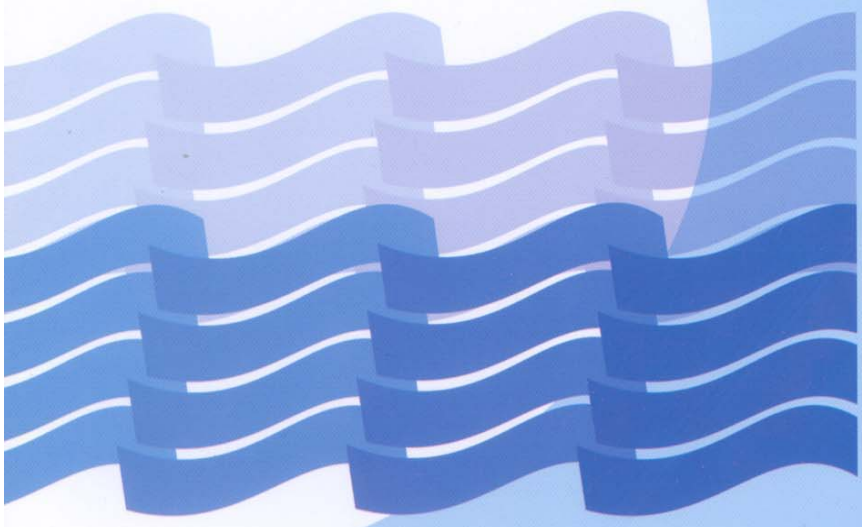
وزارت نیرو

شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران

پیش نویس

راهنمای کاربرد مدلهای ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها



نشریه شماره ۳۰۹- الف

پیش نویس

راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها

نشریه شماره ۳۰۹- الف

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی – تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه ضوابط ومعیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو با همکاری معاونت برنامه‌ریزی ونظارت راهبردی ریاست جمهوری به منظور تأمین اهداف زیر اقدام به تهیه استانداردهای صنعت آب نموده است :

- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور

تدوین استانداردهای صنعت آب با در نظر داشتن موارد زیر صورت می‌گیرد :

- استفاده از تخصص ها و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

استانداردها ابتدا به صورت پیش‌نویس برای نظرخواهی منتشر شده و نظرات دریافتی پس از بررسی تیم تهیه‌کننده و گروه نظارت در نسخه نهایی منظور خواهد شد.

امید است کارشناسان و صاحب‌نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از صنعت آب مرتبط می باشد، با توجهی که مبذول می‌فرمایند این پیش‌نویس را مورد بررسی دقیق قرار داده و با ارائه نظرات و راهنمایی‌های ارزنده خود، این دفتر را در تنظیم و تدوین متن نهایی یاری و راهنمایی فرمایند.

ترکیب اعضای گروه تهیه‌کننده، کمیته تخصصی و گروه نظارت:

این پیش‌نویس در مؤسسه تحقیقات آب، با مسئولیت آقای مهندس رضا کمالیان و با همکاری افراد زیر به ترتیب حروف الفبا تهیه شده است.

آقای مسعود انتظاری	مؤسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی آب
آقای خسرو حسینی	مهندسین مشاور لار	دکترای مهندسی هیدرولیک
آقای محمد رضازاده طباطبایی	مؤسسه تحقیقات آب و دانشکده صنعت آب و برق	دکترای مهندسی رودخانه
آقای شروین فقیهی‌راد	مؤسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی آب
آقای مرتضی کلاهدوزان	مؤسسه تحقیقات آب و دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی هیدرولیک
آقای بایرامعلی محمدنژاد	مؤسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی عمران
آقای امید نائینی	مؤسسه تحقیقات آب و دانشگاه تهران	دکترای هیدرولیک
آقای حسین یونسی	مؤسسه تحقیقات آب	لیسانس زمین‌شناسی گرایش آبشناسی

گروه نظارت که مسئولیت نظارت تخصصی بر تدوین این پیش‌نویس را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

آقای علیرضا دائمی	وزارت نیرو	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی
خانم نوشین رواندوست	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی	لیسانس مهندسی سازه
آقای حسن سیدسراجی	دانشگاه صنعت آب و برق	دکترای مکانیک سیالات
آقای عبدالعلی شرقی	دانشگاه شهید بهشتی – پژوهشکده علوم محیطی	دکترای عمران
آقای اسماعیل طلوعی	شرکت خدمات مهندسی برق ایران (مشانیر)	دکترای عمران

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
۱ – هدف و دامنه کار	۲
۲ – اهمیت شبیه سازی عددی رسوب در مخزن	۲
۳ – سابقه شبیه سازی عددی رسوب در مخزن	۶
۴ – فرآیندهای فیزیکی مؤثر	۸
۵ – روند انجام مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی عددی	۱۹
۵–۱ مشخص کردن اهداف مطالعه	۲۰
۵–۲ مطالعات اولیه و شناسایی تأثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف	۲۰
۵–۳ تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی	۲۳
۵–۴ انتخاب نرم‌افزارهای مناسب	۲۳
۵–۵ روند انتخاب مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند	۲۶
۵–۶ روند تهیه و تکمیل اطلاعات محیطی مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی	۳۱
۵–۷ روند برپاسازی (Setup)، برازش (Calibration) و واسنجی (Verification) مدل‌ها	۴۹
۵–۸ شبیه‌سازی مجموعه شرایط انتخاب شده و نتیجه‌گیری	۷۱
۶ – بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه رودخانه مخزن	۷۲
۶–۱ تأثیر متقابل رودخانه و مخزن سد	۷۳
۶–۲ روش‌های شبیه‌سازی رودخانه با دیدگاه رسوبگذاری در مخزن	۷۳
۶–۳ تفاوت روش‌های شبیه‌سازی رسوب در رودخانه و مخزن سد	۷۴
۶–۴ راه‌کارهای مطالعه تلفیقی سامانه رودخانه – مخزن	۷۶
۷ – بررسی راه‌های مطالعه توأم سامانه‌های رودخانه‌ای چند مخزنی	۷۷
۷–۱ سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه‌های یک‌پارچه چند مخزنی	۷۷
۷–۲ روش کار مدل بهینه‌سازی	۷۸
۷–۳ به کارگیری شبیه‌سازی هیدرولیکی در مدل بهینه‌سازی	۷۹
۷–۴ روش حل مدل بهینه‌سازی	۸۰
۸ – فهرست مراجع:	۸۳

مقدمه

ایجاد سدهای مخزنی جدید و توسعه مخازن سدهای در دست بهره‌برداری در دنیا در سده گذشته، توجه جدی به مدیریت رسوب و دیگر مسائل مربوط به آن را به صورت یک ضرورت اساسی مطرح کرده است. در سرزمین ایران احداث سدهای جدید همچنان در کانون توجه قرار داشته و بسیاری از سدهای موجود به طور نسبی جوان هستند.

مجموع ذخیره مخازن در سطح دنیا در حدود ۷۰۰۰ میلیارد متر مکعب می‌باشد (ICOLD–۱۹۹۸). برآوردها نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا به علت رسوبگذاری از دست می‌رود (Palmieri et al., 2003, Atkinson, 1996). این میزان در بعضی از کشورها بیش از ۱٪ است. میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز در ایران به دلایل مختلفی زیاد بوده و این نکته اهمیت پرداختن به مسائل رسوب در مخازن سدها را دو چندان می‌کند. در ایران نرخ کاهش حجم مخازن سدها در اثر رسوبگذاری به طور متوسط بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد تخمین زده می‌شود که به طور تقریبی معادل ۱۷۵ میلیون تا ۲۵۰ میلیون متر مکعب در سال است (طلوعی–۱۳۸۴). متوسط نرخ کاهش حجم محاسبه شده به وسیله‌ی دفتر بهره برداری و نگهداری از مخازن سدهای وزارت نیرو با استفاده از اطلاعات ۲۷ سد بزرگ کشور در سال ۱۳۸۶ نیز در همین محدوده قرار دارد.

برای مطالعه روند رسوبگذاری و فرسایش در مخزن، روش‌های مختلفی وجود دارد. شبیه‌سازی عددی یکی از این روش‌ها است که در سال‌های اخیر از استقبال رو به گسترشی برخوردار شده است. موضوع این راهنما به کارگیری شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی روند رسوبگذاری و رسوبزدایی در مخازن سدها می‌باشد.

امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای تخصصی به ابزاری قابل قبول برای شبیه سازی نحوه رسوبگذاری در مخازن سدها تبدیل شده‌اند. استفاده از شبیه‌سازی عددی برای بررسی روند رسوبزدایی مخزن نیز در سطح دنیا در حال گسترش می‌باشد. طی سال‌های اخیر، به کارگیری این ابزار در سطح کشور رشد قابل توجهی داشته است. هدف این پیش‌نویس استاندارد، ارائه یک راهنمای کاربردی برای تشریح نحوه به کارگیری صحیح مدل‌های عددی در مسائل رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها می‌باشد.

اگرچه مدل‌های عددی جدید برای انجام مطالعات مورد بحث این راهنما از توانایی‌های قابل توجهی برخوردار هستند، اما مهندسان طراح باید با پیش‌زمینه علمی مدل‌های مزبور آشنا بوده و کاربردها، حساسیت‌ها و محدودیت‌های آنها را بشناسند. توسعه ابزار گرافیکی و نحوه ارائه نتایج شبیه‌سازی در چارچوب سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در سال‌های اخیر، خطر اتکاء و اعتماد بیش از حد به مدل‌های عددی و به کارگیری آنها به صورت جعبه سیاه را افزایش داده است. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی می‌توانند مهندسان را در انجام مطالعات و طراحی‌ها یاری کنند، اما هرگز نمی‌توانند جای آگاهی‌های فنی عمیق، قضاوت‌های مهندسی خوب و تجربه را بگیرند. مهندسان با تجربه، روند انجام پروژه را هدایت کرده و برای شبیه‌سازی‌های عددی نقش متناسبی در کل مطالعات تعریف می‌کنند. آنها با به کارگیری ترکیبی از شبیه‌سازی عددی و روش‌های دیگر، باعث پوشش دادن و کامل کردن روش‌ها توسط یکدیگر شده و مناسب‌ترین راه‌کار برای دست‌یابی به نتایج مورد نیاز در یک پروژه را در پیش می‌گیرند.

۱- هدف و دامنه کار

یکی از اثرات مهم پس از ساخت سدها، مسئله رسوبگذاری درآنها می‌باشد. این پدیده بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره شده در دریاچه‌ی سد را با مشکل مواجه می‌سازد. از این رو شناخت مسئله رسوبگذاری در سدها و چگونگی مقابله با آن بسیار با اهمیت است. این پدیده در اثر فرسایش و انتقال خاک در سطح حوضه‌ی آبریز و بستر رودخانه‌های بالادست مخزن ایجاد می‌شود. در رابطه با رسوب مخزن سد، مسائل مختلفی مانند حجم مفید مخزن، محل رسوبگذاری، بالا آمدن سطح آب، جریان‌های غلیظ، گل‌آلودگی و کدورت آب، اثر رسوب بر کیفیت آب، فرسایش سواحل کناره مخزن، تأثیر بر موقعیت کانال‌ها، تأثیر بر پایین دست، آبشستگی موضعی پای سد، سرریزها و تأثیر بر نیروگاه نیاز به توجه دارند. رسوبات حمل شده توسط جریان و ته‌نشین شدن آنها در مخزن سد سبب بروز مشکلاتی می‌شود که به طور عمده در زمینه کم‌شدن ظرفیت ذخیره مخزن، کنترل سیلاب در بخش بالا دست مخزن و تحت‌تاثیر قراردادن عملکرد سامانه‌های خروجی سد می‌باشد.

برای بررسی روند کاهش حجم مفید مخزن، ممکن است نیازی به مطالعه جزئیات مربوط به محل نشست رسوب نباشد. اما در بسیاری از موارد، تأثیر محل نشست رسوب بر منحنی حجم – سطح مخزن یا بر رابطه‌ی تراز آب با حجم آن قابل صرف نظر نیست، زیرا به طور معمول رسوبگذاری در حجم مفید مخزن، پیش از پر شدن حجم غیر فعال آن آغاز می‌شود. محل نشست رسوب وارد شونده به مخزن، از جنبه‌های دیگری نیز می‌تواند باعث بروز اشکال شود. به عنوان مثال، نشست رسوب در محل دریچه‌های تخلیه می‌تواند باعث اختلال در عملکرد آنها شود. در مواردی می‌توان با روش‌های بهینه‌ی مدیریت رسوب مخزن، زمان رسیدن رسوب به دریچه‌های تخلیه را سال‌ها به تأخیر انداخت. با استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌توان چنین فرآیندهایی را با دقت پیش‌بینی و روش‌های مدیریت مخزن را بهینه کرد. همچنین می‌توان بازدهی عملیات رسوبزدایی را افزایش داد، میزان خسارت‌های سیل و آثار جریان غلیظ را پیش‌بینی کرد و بهترین روش‌های مقابله با آنها را یافت.

در پروژه‌های بزرگی مانند ساخت سدهای مخزنی که به طور وسیع با طبیعت در ارتباط می‌باشد، باید عوامل بسیاری را با دیدگاه‌ها و روش‌های مختلف مطالعه کرد. این نوشتار از میان تمامی موارد فوق به مطالعه موقعیت و روند رسوبگذاری و فرسایش در مخزن می‌پردازد. هدف این نوشتار آن است که ضمن تعیین جایگاه شبیه‌سازی عددی در میان روش‌های مختلف مطالعه‌ی رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها و مرور فرآیندهای مختلف مؤثر بر این دو پدیده، روند انجام مطالعات رسوب مخزن مبتنی بر شبیه‌سازی عددی را شرح دهد.

۲- اهمیت شبیه سازی عددی رسوب در مخزن

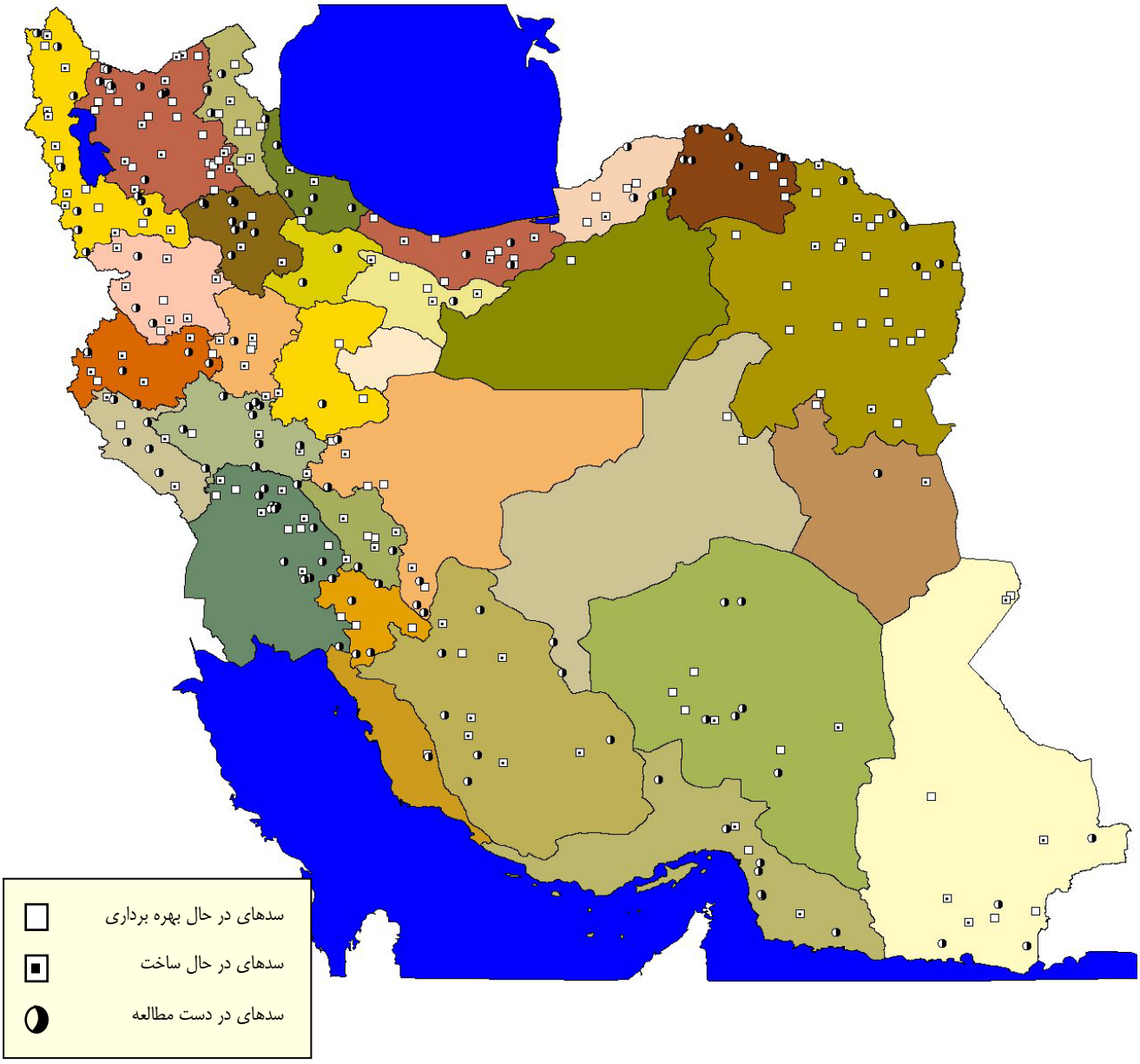
احداث سدهای مخزنی در دنیا از جنگ جهانی دوم به بعد رو به افزایش نهاده و در پی آن اثرات قابل توجهی در محیط زیست ایجاد شده است. تاثیر ایجاد مخازن سدها در چند دهه‌ی گذشته بارزتر شده است. در نیمه‌ی اول قرن بیستم، تعداد سدهای بزرگ (با ارتفاع بیش از ۱۵ متر) در دنیا از کمتر از ۵۰ سد به بیش از ۵۰۰۰ سد رسید. تعداد چنین سدهایی در دهه‌ی نود میلادی به حدود ۳۹۰۰۰ عدد افزایش یافت (ICOLD–۱۹۹۸). این روند توسعه در کشورهای در حال رشد چشمگیرتر بوده است. بزرگترین مخازن دنیا در طول ۲۵ سال اخیر احداث شده‌اند و بعضی در دست ساخت می‌باشند.

به علت ورود رسوب و تجمع آن در داخل مخزن سد، ظرفیت ذخیره موثر آب کاهش می‌یابد. این امر به نوبه خود باعث کاهش توان ذخیره‌ی آب و از دست رفتن ظرفیت تعدیل طغیان خواهد شد. اگر رسوب در کنار بدنه‌ی سد جمع شود، امکان مدفون کردن خروجی‌های عمقی و ایجاد اشکال برای دریچه‌های آبگیر را سبب می‌شود. به علاوه رسوبی که به خروجی‌های مربوط به آبگیرها می‌رسد، می‌تواند توربین‌ها و حفاظ دریچه‌های تحتانی مخازن را دچار فرسایش و خوردگی کند. همچنین بار وارده به بدنه سد نیز افزایش خواهد یافت.

شکل (۲-۱) موقعیت سدهای در حال بهره برداری، ساخت و مطالعه را بر اساس اطلاعات سال ۱۳۸۶ نشان می‌دهد. بیش از ۱۸۰ سد مخزنی در ایران در حال بهره‌برداری بوده و تعداد بیشتری در حال ساخت یا مطالعه می‌باشند. این در حالی است که فرسایش خاک در بسیاری از مناطق کشور، به نسبت زیاد است. جدول (۲-۱) وضعیت کلی رسوبگذاری در تعدادی از مخازن سدهای کشور را بر اساس اطلاعات سال ۱۳۸۶ نشان می‌دهد. بر اساس این اطلاعات، متوسط نرخ کاهش سالانه حجم در مخازن جدول مزبور، ۰/۵۴ درصد است. نرخ کاهش حجم سالانه در بعضی از مخازن بیشتر از ۱ و حتی بیشتر از ۲ درصد برآورد شده است. تعدادی از سدهایی که مشکل رسوب دارند، عبارتند از سد گلستان، سد وشمگیر، سد اکباتان، سد استقلال (میناب)، سد پیشین، سد سفید رود، سد بوکان، سد شهید عباسپور و سد دز. نرخ کاهش حجم مخزن به تنهایی معیار وجود یا عدم وجود مشکل رسوب در یک مخزن نیست، بلکه محل رسوبگذاری در مخزن نیز مهم است. مثلا در سد دز، نرخ کاهش سالانه‌ی حجم مخزن کمتر از ۰/۵ درصد است، با این حال به دلیل انتقال بخشی از این مقدار به نزدیک بدنه‌ی سد و افزایش سریع تراز بستر در آن محل، سد دز یکی از سدهای دارای مشکل رسوب شمرده می‌شود. هنوز بسیاری از سدهای مخزنی کشور جوان هستند و انتظار می‌رود که با گذشت زمان، اهمیت مشکل رسوبگذاری در مخازن سدهای کشور بیشتر شده و نیاز به مقابله با آن محسوس‌تر شود.

شبیه‌سازی عددی روند رسوبگذاری و رسوبزدایی مخزن، هم در مرحله طراحی و هم در مرحله بهره‌برداری، کمک بسیاری به طراحی اولیه و مدیریت بهره‌برداری خواهد کرد. این کمک می‌تواند شامل پیش‌بینی رفتار رسوبی مخزن، پیش‌بینی نیازهای سازه‌ای، کمک به تنظیم دستورالعمل‌های اجرایی مدیریت رسوب و بهینه‌سازی عملیات تخلیه رسوب در زمان بهره‌برداری باشد.

یکی از کاربردهای مهم مدل ریاضی، بررسی وضعیت‌های مختلف رسوبگذاری و رسوبزدایی مخزن می‌باشد. به عنوان مثال، یکی از راه حل‌های شناخته شده‌ی بین المللی برای کاهش راندمان تله‌اندازی رسوب در مخزن، پایین آوردن تراز آب مخزن در هنگام سیلاب و مانور دریچه‌های عمقی می‌باشد. این روش می‌تواند باعث خروج قسمت قابل توجهی از رسوب ورودی به صورت جریان غلیظ از دریچه‌های عمقی شود. اگر عملیات مانور دریچه‌ها به درستی انجام نشود، باعث افزایش بیشتر مشکلات رسوبی مخزن خواهد شد. اگر در طول فصل طغیان و سیلاب، سطح آب مخزن بالا نگاه داشته شود، به دلیل کاهش سرعت جریان‌های ورودی به مخزن، رسوبات وارده در نواحی بالا دست مخزن ته‌نشین می‌شوند. در این حال رسوب از سد و تأسیسات تخلیه دور خواهد ماند، اما رسوبگذاری در حجم مفید مخزن انجام می‌شود. از سوی دیگر اگر سطح آب مخزن قبل از فصل



شکل ۲-۱- موقعیت سدهای در حال بهره برداری، ساخت و مطالعه تا سال ۱۳۸٦.
منبع: دفتر بهره برداری و نگهداری از سدها، وزارت نیرو.

جدول ۲-۱- میزان رسوبات ورودی به مخازن سدهای بزرگ بر اساس آخرین آمار هیدروگرافی و اولویت بندی رسوبگذاری

منبع: دفتر بهره برداری و نگهداری از سدها، وزارت نیرو

ردیف	حوضه آبریز اصلی	حوضه آبریز فرعی	نام سد	نتایج						رتبه بندی رسوبگذاری مخازن	
				مدت رسوبگذاری (سال)	متوسط حجم رسوبات سالیانه (میلیون مترمکعب)	متوسط وزن رسوبات سالیانه (میلیون تن)	درصد کاهش سالانه مخزن بر اثر رسوب	سطح حوضه (کیلومتر مربع)	رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)	بر اساس حجم مخازن	بر اساس آورد رسوب به مخازن
۱	دریای خزر	گرگانرود	گلستان	۶	۴/۱	۵/۳	۴/۷۲	در سد وشمگیر محاسبه شده است		۱	۱
۲	خلیج فارس	کرخه	کرخه	_	۳۵/۳	۴۵/۹	۰/۴۸	۳۹۳۸۰	۱۱/۶۵	۱۴	۲
۳	خلیج فارس	کارون بزرگ	شهیدعباسپور	۲۸	۲۵/۰	۳۲/۵	۰/۸۰	۲۶۰۰۰	۱۲/۵۱	۹	۳
۴	دریای خزر	سفیدرود	سفیدرود	۳۱	۱۷/۳	۲۲/۴	۰/۹۸	۵۶۰۰۰	۴/۰۱	۷	۴
۵	خلیج فارس	کارون بزرگ	دز	۴۳	۱۴/۲	۱۸/۴	۰/۴۱	۱۷۵۲۳	۱۰/۵۰	۱۷	۵
۶	ارومیه	ارومیه	بوکان	۲۴	۷/۰	۹/۲	۰/۹۲	۶۸۹۰	۱۳/۲۹	۸	۶
۷	دریای خزر	ارس	ارس	۲۸	۴/۹	۶/۳	۰/۳۹	۴۱۸۰۰	۱/۵۱	۱۸	۷
۸	خلیج فارس	بندرعباس - سدیج	استقلال	۲۲	۳/۹	۵/۱	۱/۱۴	۱۰۳۲۵	۴/۹۴	۴	۸
۹	خلیج فارس	جراحی - زهره	مارون	۶	۲/۸	۳/۶	۰/۲۳	۳۶۳۴	۱۰/۰۲	۲۲	۹
۱۰	مرکزی	هامون - جازموریان	جیرفت	۱۴	۲/۴	۳/۱	۰/۶۴	۷۸۰۰	۳/۹۳	۱۰	۱۰
۱۱	دریای خزر	گرگانرود	وشمگیر	۳۱	۲/۳	۳/۰	۲/۳۸	۶۴۵۰	۴/۶۶	۲	۱۱
۱۲	مرکزی	دریاچه نمک	کرج	۱۳	۲/۲	۲/۸	۱/۰۶	۸۵۰	۳۳/۲۹	۵	۱۲
۱۳	خلیج فارس	دریاچه نمک	ساوه	۱۰	۱/۸	۲/۴	۰/۶۳	۱۷۰۴۳	۱/۴۱	۱۱	۱۳
۱۴	خلیج فارس	باهوکلات	پیشین	۴	۱/۸	۲/۴	۱/۰۴	۶۹۰۰	۳/۴۳	۶	۱۴
۱۵	مرکزی	گاوخونی	زاینده رود	۲۹	۱/۶	۲/۱	۰/۱۳	۴۶۰۰	۴/۵۳	۲۵	۱۵
۱۶	دریای خزر	سفیدرود	طالقان	_	۱/۳	۱/۶	۰/۳۰	۹۶۰	۱۶/۹۳	۲۰	۱۶
۱۷	ارومیه	ارومیه	مهاباد	۳۵	۱/۱	۱/۴	۰/۴۸	۶۵۲	۲۱/۹۵	۱۵	۱۷
۱۸	مرکزی	مهارلو-بختگان	درود زن	۳۰	۱/۱	۱/۴	۰/۱۱	۴۳۷۲	۳/۱۹	۲۶	۱۸
۱۹	دریای خزر	ارس	ماکو(بارون)	۳	۰/۸	۱/۰	۰/۵۲	۱۰۴۸	۹/۵۹	۱۳	۱۹
۲۰	مرکزی	دریاچه نمک	لتیان	۳۱	۰/۶	۰/۸	۰/۶۲	۶۹۱	۱۱/۰۵	۱۲	۲۰
۲۱	مرکزی	دریاچه نمک	پانزده خرداد	۱۱	۰/۴	۰/۵	۰/۲۱	۱۰۲۵۰	۰/۵۲	۲۳	۲۱
۲۲	خلیج فارس	مرزی غرب	فشلاق (وحدت	۲۶	۰/۴	۰/۵	۰/۱۶	۱۰۵۸	۴/۴۴	۲۴	۲۲
۲۳	ارومیه	ارومیه	علویان	۹	۰/۳	۰/۳	۰/۴۳	۳۱۳	۱۰/۷۳	۱۶	۲۳
۲۴	مرکزی	دریاچه نمک	اکباتان	۳۲	۰/۱	۰/۲	۱/۵۹	۲۱۳	۷/۷۷	۳	۲۴
۲۵	مرکزی	دریاچه نمک	گلپایگان	۴۴	۰/۱	۰/۲	۰/۲۷	۱۰۵۵	۱/۵۱	۲۱	۲۵
۲۶	سرخس	سرخس	کارده	۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۵۹۹	۱/۹	۱۹	۲۶
۲۷	سرخس	سرخس	طرق	۱۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۵۵	_	۲۷	۲۷
جمع کل					۱۳۲/۷	۱۷۲/۵	۰/۵۴	۲۶۶۵۶۲	۸/۳۷		

بازکردن کنترل شده‌ی دریچه‌های تخلیه‌ی عمقی، میدان جریان را به گونه‌ای سامان داد که هر چه بیشتر به تخلیه‌ی جریان‌های غلیظ کمک کند. حتی می‌توان به ایجاد جریان غلیظ کمک کرده و با استفاده از این فرآیند، رسوب را به صورت جریان‌های غلیظ از دریچه‌ها خارج کرد. از سوی دیگر، بروز اشتباه در این عملیات می‌تواند با انتقال رسوب به نزدیک دریچه‌ها و عدم خروج آنها مخاطراتی را برای تخلیه کننده‌های تحتانی به وجود آورد. همچنین ممکن است غلظت بیش از حد جریان رسوبی خارج شونده، از نظر عملکرد تونل تخلیه و یا استانداردهای زیست‌محیطی در پایین دست سد مشکل‌ساز شود. در چنین شرایطی شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی فرآیند رسوبگذاری و فرسایش در مخزن می‌تواند امکان یا عدم امکان چنین عملیاتی را

مشخص کرده و جزئیات مربوط به تعیین منحنی فرمان[1] و نحوه‌ی مدیریت مخزن مانند میزان پایین آوردن سطح آب مخزن قبل از فصل سیلابی را معلوم کند.

شبیه‌سازی عددی می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی نحوه‌ی مدیریت سد بر قسمت‌های مختلف مخزن را نیز مشخص کند. مخزن سد از دیدگاه زیست محیطی دارای اهمیت می‌باشد. به‌عنوان نمونه، محدوده‌ی دلتای رسوبی مخازن محل پرورش گونه‌هایی از آبزیان می‌باشد. سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن، می‌تواند مشخصات دلتای رسوبی را – هم از نظر هندسه و هم از نظر دانه‌بندی رسوب – تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در مواردی ممکن است نیاز به پیش‌بینی تأثیر روند مدیریت مخزن بر شاخص‌های زیست محیطی نیز لازم شود. این کار از راه شبیه سازی عددی ممکن است.

با مدیریت صحیح نحوه بهره‌برداری از مخزن، می‌توان تجمع رسوبات را در مسافتی ایمن و دور از آبگیرهای نیروگاه ساماندهی کرد. سنجش امکان‌پذیری و تنظیم جزئیات این گونه مدیریت در یک مخزن خاص با استفاده از شبیه‌سازی عددی قابل انجام می‌باشد.

۳- سابقه شبیه سازی عددی رسوب در مخزن

مطالعات رسوبگذاری در سدهای مخزنی، در بسیاری از کشورهای جهان از دیرباز آغاز شده است. باسابقه‌ترین نوع مطالعات در این رابطه مربوط به تخمین مقدار کلی رسوب جمع شده در مخزن بوده که برای آن روش‌های مختلفی ارائه داده شده است. مهمترین این روش‌ها عبارتند از: تعیین بار رسوبی ورودی به مخازن در ایستگاه‌های هیدرومتری، تعیین مقدار رسوب فرسایش یافته در حوضه آبریز، برداشت هندسه‌ی بستر مخزن و تعیین منحنی‌های سطح و حجم جدید آن در رقوم‌های مختلف، اندازه‌گیری مستقیم ضخامت رسوب در مخازن و استفاده از مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری مخزن. به جز دو روش اول، بقیه‌ی روش‌های نامبرده علاوه بر تعیین مقدار کل رسوب جمع شده در مخزن، توانایی تعیین نحوه تغییر هندسه‌ی بستر آن در طی زمان را نیز دارا هستند.

در روش اول، برآورد بار رسوب ورودی به مخزن سد از راه اندازه‌گیری رسوب در ایستگاه‌های رسوبسنجی صورت می‌گیرد. به این منظور از بار رسوب معلق نمونه‌برداری می‌شود و با توجه به مشکل بودن نمونه‌برداری بار کف، درصدی از بار معلق رودخانه به عنوان بارکف محسوب شده و در محاسبات مجموع بار رسوب درنظر گرفته می‌شود. با این روش نمی‌توان در باره نحوه‌ی ته‌نشین شدن رسوبات وارد شده به مخزن، اطلاعاتی به دست آورد.

در روش دوم، به منظور محاسبه میزان رسوب فرسایش یافته از حوضه آبریز، از عکس‌های هوایی یا ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های صحرایی استفاده می‌شود. با استفاده از این ابزار نحوه کاربری اراضی، میزان نزولات جوی و مقدار فرسایش خاک در حوضه بررسی می‌شود تا روابط منطقی آنها به وسیله‌ی فرمول‌های تجربی تعیین گردد. این روش نیز در باره نحوه ته‌نشین شدن رسوبات در مخزن، اطلاعاتی به دست نمی‌دهد.

1- Rule Curve

در روش سوم، از عمق‌سنجی مخزن سد به هنگام پرآبی آن استفاده می‌شود. این روش در سال‌های اخیر کاربرد بیشتری پیدا کرده است. در بسیاری از سدهای مخزنی ایران برای تعیین روند رسوبگذاری از این روش استفاده شده است. این به معنی در اختیار داشتن مجموعه ارزشمندی از داده‌های قابل استفاده برای برازش[1] و ارزیابی[2] مدل‌های عددی می‌باشد. برای تعیین هندسه‌ی بستر مخزن، می‌توان از نقشه‌برداری هوایی بعد از پایین رفتن سطح آب نیز استفاده کرد.

در مخازنی که برای تامین آب کشاورزی احداث شده‌اند و می‌توانند مدتی از سال را کاملاً تخلیه شوند، می‌توان از روش اندازه‌گیری مستقیم ضخامت لایه‌ی رسوب نیز استفاده کرد.

روش‌های نامبرده برای سدهایی قابل استفاده‌اند که قبلا ساخته شده و مقدار کافی از عمر آنها گذشته باشد. برای پیش‌بینی آنچه پس از ساخت یک سد جدید یا اعمال یک منحنی عملکرد جدید رخ خواهد داد، به کارگیری شبیه‌سازی عددی یا روابط تجربی معتبر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

استفاده از مدل‌های ریاضی، ابتدا برای شبیه‌سازی توان رودخانه در حمل رسوب به داخل مخزن توسعه یافت. در این دیدگاه مقدار کلی رسوب وارد شونده به مخزن مد نظر بوده و جزئیات نحوه ترسیب در قسمت‌های مختلف مخزن مورد توجه نمی‌باشد. در سال‌های اخیر، جزئیات مربوط به نحوه رسوبگذاری و فرسایش در مخزن نیز در بسیاری از پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا پیش‌بینی محل و میزان رسوبگذاری و فرسایش، روند شکل‌گیری و جابجایی دلتای رسوبی در طول سال‌های بهره‌برداری، نحوه تأثیر جریان غلیظ در شرایط سیلابی و تأثیر روش‌های مدیریت سد بر این فرآیندها از اهمیت کاربردی برخوردار شده است. برای انجام این گونه مطالعات، شبیه‌سازی عددی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها شناخته شده است. شبیه‌سازی عملیات رسوبزدایی از مخزن و تأثیر مدیریت مخزن بر مجموعه‌ی مخزن و رودخانه‌های بالا دست و پایین دست نیز در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته است.

بیشترین فعالیت‌ها در زمینه شبیه‌سازی عددی فرآیند رسوبگذاری در مخازن سدها از زمانی شکل گرفت که رایانه‌های شخصی فراگیر شدند. به این دلیل حجم عمده‌ی این گونه مطالعات به سال‌های بعد از ۱۹۹۰ مربوط می‌شود.

تقریباً تمامی مطالعات شبیه‌سازی عددی در سال‌های اولیه با استفاده از مدل یک‌بعدی انجام شده‌اند. مدل‌های یک‌بعدی هنوز هم نقش مهمی در مطالعات و مسائل کاربردی به عهده دارند. مطالعات مربوط به میدان رسوب در فرآیند جریان‌های غلیظ به وسیله‌ی مدل‌های دوبعدی افقی اصلاح شده، مدل‌های دو بعدی قائم و مدل‌های سه بعدی بررسی شده‌اند. کاربرد مدل‌های دو بعدی و سه بعدی برای مطالعه رسوب مخزن در سال‌های اخیر رشد یافته است. ارائه مدل‌های جدید که توانایی بررسی تغییرات دراز مدت هندسه‌ی بستر در شرایط مختلف را داشته باشند، در تمامی این سال‌ها به طور مستمر موضوع مطالعه و بررسی بوده است. محاسبه دقیق فرآیند تحکیم رسوبات ته‌نشین‌شده و تعلیق مجدد آنها و اثر این پدیده بر جابجایی رسوب، در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

کمتر مطالعه‌ای وجود دارد که بدون مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی در یک مخزن واقعی و یا نتایج آزمایشگاهی ارائه شده باشد. این امر نشانگر اهمیت اطلاعات اندازه‌گیری شده برای تضمین اعتبار عملکرد مدل‌ها و برازش آنها است. در پژوهش‌های

1- Calibration
2- Verification

انجام شده، مهمترین معیارهای سازگاری برای سنجش عملکرد مدل‌ها، مقایسه‌ی میدان سرعت، میدان غلظت رسوب معلق و تغییرات هندسه بستر بین نتایج شبیه‌سازی و واقعیت بوده است.

شبیه‌سازی رفتار جریان‌های غلیظ، سهم قابل توجهی در مطالعات انجام شده دارد. شبیه‌سازی روند شکل‌گیری و جابجایی دلتای رسوبی در طول زمان نیز قابل توجه – و به طور معمول موفقیت‌آمیز – بوده است. امکان شبیه‌سازی فرآیند رسوبزدایی در مخازن عریض و روند فرسایش کانال رسوبی در بستر مخزن در ضمن عملیات رسوبشویی، در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (به عنوان نمونه Scheuerlein, H., 2004; Chang, F. et al., 2003; Zhang, Y. et al., 2000). این گونه مطالعات، در مخازن نه‌چندان کم‌عرض به طور عمده با مدل‌های دو بعدی یا سه بعدی انجام شده‌اند.

نحوه تعامل مخزن سد با سامانه رودخانه بالا دست و پایین دست، با گذشت زمان اهمیت بیشتری یافته است. این موضوع در بیشتر موارد با مدل‌های یک بعدی مطالعه شده است.

در ایران مطالعات قابل توجهی در رابطه با مسائل رسوب مخازن سدها انجام شده است (به عنوان نمونه اسماعیل طلوعی، ۱۳۶۹؛ عبدالعلی شرقی، ۱۳۷۳؛ اسماعیل طلوعی، ۱۳۷۳؛ منوچهر راد، ۱۳۷۸؛ شعبانلو و همکاران، ۱۳۸۰؛ سراجی، ۱۳۸۱؛ کلاهدوزان و همکاران، ۱۳۸۱؛ بختیاری و نیلوفر، ۱۳۸۱؛ محمد نژاد و شمسایی، ۱۳۸۱؛ صمدی بروجنی و سامانی، ۱۳۸۱؛ فتحی‌مقدم و صادقی، ۱۳۸۱؛ مهرداد و همکاران، ۱۳۸۱؛ صالحی نیشابوری، ۱۳۸۱؛ پشابارمی، ۱۳۸۲؛ محمد نژاد و شمسایی ۱۳۸۶). به خصوص در رابطه با رسوبزدایی سد سفیدرود کارهای وسیعی انجام شده که مورد استناد محققان سایر کشورها نیز قرار دارد. بنابراین تجربه‌ی مهندسی ارزشمندی در رابطه با روش‌های رسوبزدایی در کشور وجود دارد. حجم مطالعات انجام شده برای مخزن سد دز نیز – به خصوص در سال‌های اخیر – قابل توجه می‌باشد. سابقه شبیه‌سازی عددی نحوه ته‌نشین شدن مواد رسوبی در مخازن سدها در ایران، کوتاه‌تر از سابقه چنین تحقیقاتی در کشورهای صنعتی است. با این وجود در سال‌های اخیر تلاش رو به تزایدی برای انجام این نوع مطالعات در کشور دیده می‌شود.

برای دیدن فهرست و خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در ایران و سایر کشورها به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه فرمائید. یک پایگاه داده‌ها شامل بیش از ۷۰۰ عنوان مقاله، کتاب، رساله‌ی دانشگاهی، گزارش و راهنما به صورت مجموعه‌ای با امکانات جستجو، سرند و دسترسی در محیط رایانه به همراه این پیش‌نویس استاندارد تهیه و بر روی لوح فشرده ارائه شده است. پیشنهاد می‌شود برای بررسی تفصیلی ادبیات فنی شبیه‌سازی رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها به این پایگاه اطلاعات مراجعه شود.

۴- فرآیندهای فیزیکی مؤثر

تشکیل مخزن سد سبب دگرگونی وسیعی در محیط اطراف می‌شود که تغییرات هیدرولیکی، رسوبی و ریخت‌شناسی در مخزن سد و رودخانه‌های بالا دست و پایین دست از آن جمله‌اند. رفتار میدان جریان و جابجایی رسوب در مخازن سدها تحت تأثیر عوامل فیزیکی مختلفی است که هریک از آنها پیچیدگی‌های خاص خود را دارند. برای انجام صحیح شبیه‌سازی رفتار جریان و رسوب به وسیله مدل‌های عددی، باید شناخت کافی از فیزیک این پدیده‌ها و میزان اهمیت هریک از عوامل مؤثر بر آنها در اختیار داشت. شناخت فیزیک مسئله، برای انتخاب صحیح مدل، انتخاب صحیح اطلاعات ورودی به آن، برازش مدل، تعیین حالت‌هایی که باید شبیه‌سازی شوند و بالاخره برای نتیجه‌گیری از شبیه‌سازی‌ها مورد نیاز می‌باشد. در این راستا باید پدیده‌های مختلف مرتبط با فرسایش، معلق شدن، جابجایی، ته‌نشینی و تحکیم رسوب را شناخت و به درستی مورد توجه قرار داد.

شبیه‌سازی دقیق میدان جریان، پیش‌شرط اساسی شبیه‌سازی دقیق میدان جابجایی رسوب می‌باشد. در صورتی که اثر جریان‌های ناشی از تفاوت غلظت رسوب (ناشی از تفاوت چگالی به خاطر تفاوت غلظت رسوب) در مخزن قابل توجه باشد، رفتار هیدرودینامیک مخزن به رفتار جریان‌های رسوبی وابسته خواهد بود. اختلاف حرارت قابل توجه آب مخزن با جریان ورودی به آن و یا لایه‌بندی حرارتی در مخزن نیز می‌تواند با ایجاد تفاوت چگالی بر رفتار میدان جریان تأثیر گذارد. در رابطه با جریان‌های غلیظ باید تفاوت دو اصطلاح Density Current و Dence Current را در متون فنی در نظر گرفت. اصطلاح اول به جریان ناشی از تفاوت چگالی – صرف نظر از میزان غلظت در توده غلیظتر – نسبت داده می‌شود، اما اصطلاح دوم به جریان توده‌ای با غلظت بسیار بالا گفته می‌شود که در هم کنش ذرات در داخل آن تحت تأثیر غلظت بسیار بالا قرار گرفته باشد.

تفاوت رفتار رسوبات مختلفی که توسط رودخانه حمل شده و به مخزن می‌رسند، باید مورد توجه قرار گیرد. رسوبات می‌توانند بار شسته شده از سطح حوضه‌ی آبریز[1]، بار معلق حاصل از فرسایش بستر رودخانه[2]، بار بستر رودخانه[3] و یا ترکیبی از آنها باشند.

روند ته‌نشینی همه رسوبات وارد شونده به مخزن یکسان نیست. رسوبات درشت‌دانه (بار بستر) در اوایل مخزن به شکل دلتا ته‌نشین می‌شوند. خیزآب[4] حاصل از شکل‌گیری دلتا، موجب رسوبگذاری در رودخانه‌ی بالا دست می‌شود. رسوبات ریزدانه‌تر به پائین دست منتقل شده و در گستره‌ی وسیع‌تری ته‌نشین می‌شوند. در شرایط خاص، انتقال رسوبات ریزدانه‌تر به داخل مخزن به صورت جریان غلیظ رخ می‌دهد. مقداری از رسوبات ریزدانه‌تر زمان زیادی به حالت معلق باقی می‌مانند و ممکن است از تاسیسات آبگیری خارج شوند. روند رسوبگذاری و تغییر مشخصات هندسی بستر، به صورت متقابل و به تدریج بر میدان جریان و انتشار رسوب تأثیر می‌گذارد.

اگر تغییرات تراز آب مخزن پس از آبگیری زیاد نباشد، روند ته‌نشین شدن رسوب در مخزن در بیشتر موارد به صورت شکل‌گیری دلتا می‌باشد. اگر تراز آب، متغیر و بالا باشد و رسوبات وارد شونده ریزدانه و کم‌غلظت باشند، آنگاه در طول مخزن به صورت تقریبی یکنواخت ته‌نشین می‌شوند. در این حال دلتای رسوبی مشخصی شکل نمی‌گیرد. ته‌نشینی رسوب در نزدیکی بدنه سد می‌تواند به صورت مخروط افکنه‌ای باشد.

اثر تراز آب مخزن بر روند رسوبگذاری، به خصوص در رابطه با محل شکل‌گیری دلتای رسوبی، شاخص می‌باشد. اگر تراز آب در هنگام سیلاب پائین باشد، دلتا در قسمت‌های پایین‌تر مخزن شکل می‌گیرد. اگر تراز آب بالا باشد، شکل‌گیری دلتا در اوایل مخزن رخ می‌دهد. اگر تراز آب پس از شکل‌گیری دلتا پایین آید، موادی که دلتا را تشکیل داده‌اند، شسته شده و در تراز پایین‌تری ته‌نشین می‌شوند.

سیلاب‌ها نقش شاخصی در آورد رسوب به مخزن و جابجایی در آن دارند. این موضوع باید در شبیه‌سازی‌ها مورد توجه قرار گیرد. سیلاب شدید می‌تواند باعث فرسایش در ابتدای مخزن و رسوبگذاری در انتهای آن شود؛ فرآیندی که می‌تواند باعث شسته شدن دلتا و انتقال آن به پایین دست شود. سیلاب ملایم می‌تواند باعث رسوبگذاری در بالا دست مخزن شود؛ فرآیندی که می‌تواند باعث شکل گیری دلتای جدید در بالا دست دلتای قبلی شود.

هندسه و شکل مخزن بر نحوه ته‌نشین شدن رسوب در آن مؤثر است. رسوب در مخزن متقارن به صورت یکنواخت و در

---

1 -Wash Load
2-Suspended Load
3 -Bed Load
4 -Backwater

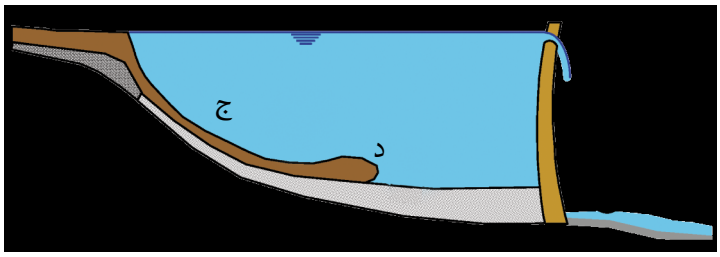
مخزن غیر متقارن به صورت غیر یکنواخت پخش و ته‌نشین می‌شود. نحوه‌ی پخش رسوب در مخازن باریک و مخازن پهن نیز متفاوت است.

مشخصات رسوب وارد شونده به مخزن و مشخصات رسوب موجود در آن نیز بر رفتار رسوبی مخزن تأثیر می‌گذارد. از جمله می‌توان به دانه‌بندی و شکل، وزن مخصوص و سرعت سقوط رسوبات معلق، میزان چسبندگی، تخلخل و وزن مخصوص رسوبات ته‌نشین شده، آستانه حرکت و روند تحکیم رسوبات ته‌نشین شده و تعلیق مجدد آنها اشاره کرد. اگر رسوبات بستر مخزن در مدتی از سال در معرض هوازدگی باشند، مشخصات آنها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

مهمترین عوامل مؤثر بر روند رسوبگذاری عبارتند از: مشخصات هندسی بستر مخزن، تغییرات بده رسوب بر حسب بده جریان، نحوه مدیریت مخزن، تغییرات تراز سطح آب و بده‌های ورودی و خروجی نسبت به زمان، ظرفیت مخزن، بده جریان و رسوب از سرشاخه‌ها به مخزن، جانمایی تخلیه‌کننده‌های جریان و رسوب، وجود مخزن بالا دست و تله‌اندازی رسوب در آن، مشخصات رسوبات وارد شونده و درجه تحکیم‌پذیری آنها، نسبت حجم مخزن به جریان ورودی سالانه (C/I)، شاخص‌های فرسایش‌پذیری حوضه بالا دست، مشخصات بستر و سواحل رودخانه بالا دست، مشخصات سیلاب‌ها و مشخصه‌های آبنگار[1] سیلاب‌های ورودی (طلوعی، ۱۳۸۴).

یکی از عوامل مؤثر بر روند فرسایش دلتای رسوبی، آن است که دلتا از لایه‌های مختلفی تشکیل می‌شود. در پایین‌ترین لایه، رسوبات کف قرار دارند؛ رسوباتی که قبل از احداث سد در رودخانه وجود داشته است. در بالای آن لایه‌ای قرار دارد که از رسوبات درشت‌دانه‌ی ته‌نشین شده تشکیل یافته است. رسوبات ریز نیز می‌توانند در شرایط مناسب فصلی بر لایه‌های قبلی ته‌نشین شوند.

اگر در شرایط سیلابی، غلظت رسوب معلق در جریان ورودی به اندازه کافی زیاد باشد، نوعی جریان غلیظ در مخزن سد به وجود می‌آید. این نوع جریان، تحت تأثیر وزن بیشتر خود نسبت به آب مخزن، به صورت ثقلی در زیر آب مخزن به طرف بدنه سد حرکت می‌کند و در مواردی می‌تواند پس از طی چند ده کیلومتر به بدنه سد برسد. شکل (٤-۱) نمایی از رفتار جریان غلیظ را نشان می‌دهد. اگر جریان غلیظ به بدنه‌ی سد برسد اما نتواند از دریچه‌های تحتانی خارج شود، باعث رسوبگذاری در نزدیک سد خواهد شد. ممکن است میزان رسوبی که به صورت جریان غلیظ وارد مخزن می‌شود در مقایسه با کل رسوب ورودی سالانه زیاد نباشد، اما خطر ته‌نشینی آن در نزدیک آبگیرهای سد، اهمیت بررسی آن را زیاد می‌کند. هر نوع اختلاف چگالی شدید آب ورودی با آب مخزن و یکسان یا متفاوت بودن چگالی آب مخزن در عمق‌های مختلف، می‌تواند حالت‌های مختلفی از درهم کنش آب وارده با آب مخزن را ایجاد کند. این پدیده باید در شبیه‌سازی عددی مد نظر قرار گیرد.



شکل ۴-۱- نمای فرآیند جریان غلیظ در مخزن سد. منبع: G. Cesare, 1998

در شکل (۴-۱) چند ناحیه مشخص قابل تشخیص هستند؛ الف) ناحیه غلبه اثر لَختی جریان سیل بر اثر ثقلی آن (در بالا دست).

1- Hydrograph

در این ناحیه جریان سیلابی و گل‌آلود رودخانه تمام بازه‌ی بستر تا سطح آب را فرا گرفته است. ب) محل ریزش[1]. در این ناحیه اثر ثقلی بر اثر لَختی غلبه کرده و توده‌ی غلیظ پر رسوب به زیر آب مخزن فرو می‌رود. ج) ناحیه‌ای که بدنه اصلی جریان غلیظ بر فراز بستر به پیشروی خود ادامه می‌دهد. در این ناحیه امکان ته‌نشین شدن مقداری از رسوبات وجود دارد. د) پیشانی جبهه توده غلیظ که آب مخزن را در عمق آن شکافته و جلو می‌رود. در این ناحیه فرسایش بستر می‌تواند رخ دهد.

شرایط مناسب برای وقوع جریان غلیظ در مخزن، شامل اختلاف چگالی قابل توجه، سرعت کم جریان و شیب تند مسیر ورودی به مخزن است. با تغییر تراز آب مخزن، می‌توان فاصله‌ی محل آغاز شکل‌گیری جریان غلیظ از بدنه‌ی سد را کنترل کرد. اگر حجم عمده آورد رسوب سالانه در سیلاب‌هایی رخ دهد که سهم آنها در تأمین آب سالانه زیاد نیست، می‌توان از خاصیت جریان غلیظ برای خارج کردن رسوبات چنان سیلاب‌هایی استفاده کرد. نوع جریان توده‌ی غلیظ بر شیب بستر می‌تواند زیر بحرانی، بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. از نظرتئوری حتی امکان وقوع پرش هیدرولیکی وجود دارد (Postma G. et al., 2005, Basson G., 1998).

طراحی تخلیه‌کننده‌های عمقی با ظرفیت بالا، نقش مهمی در امکان خارج کردن بهینه جریان غلیظ دارد. حفظ شیب طولی کف مخزن نیز در این رابطه مهم است. این مهم با مکان‌یابی دریچه‌های تخلیه‌ی عمقی در نزدیکی بستر طبیعی رودخانه امکان‌پذیر می‌شود.

چند گونه رفتار برای جریان غلیظ ممکن می‌باشد و یک توده‌ی غلیظ می‌تواند در طول حرکت خود در نواحی مختلف حالت‌های مختلفی به شرح زیر داشته باشد (Batuca, D. G.; Jordaan, J. M., 2000): الف) غلظت توده‌ی غلیظ و در نتیجه سرعت حرکت آن در ضمن پیشروی افزایش یافته و با فرسایش بستر در مسیر حرکت همراه باشد. ب) روند اختلاط با آب مخزن به گونه‌ای باشد که غلظت توده‌ی غلیظ و بنابراین سرعت حرکت آن در ضمن پیشروی کاهش یابد، اما هنوز سرعت جریان بیش از آن باشد که امکان رسوبگذاری فراهم شود. در این حال، هنوز فرسایش در مسیر حرکت ممکن است. ج) غلظت توده‌ی غلیظ و در نتیجه سرعت حرکت آن در ضمن پیشروی کاهش یافته و رسوبگذاری در مسیر حرکت رخ دهد. د) ذرات رسوب معلقی که با جریان غلیظ حمل می‌شوند، بسیار ریز (فقط بار شسته[2]) باشند و در قسمت عمده‌ای از مسیر حرکت، نه رسوبگذاری و نه فرسایش رخ دهد. این رسوبات پس از ساکن شدن توده‌ی غلیظ در انتهای مخزن، امکان ته‌نشین شدن تدریجی را خواهند داشت.

برای شبیه‌سازی عددی جریان غلیظ در مخزن، مدل‌های عددی باید بتوانند رفتار جریان غلیظ را با تمام پیچیدگی‌های مطرح شده شبیه‌سازی کنند. از نظر هیدرودینامیکی، آنها باید بتوانند اثر چگال‌تر بودن توده‌ی غلیظ نسبت به آب مخزن را بر ایجاد جریان ثقلی شبیه‌سازی کنند. همچنین باید بتوانند اثر این شرایط را بر کاهش آشفتگی جریان محاسبه کنند. از نظر رسوب نیز باید بتوانند پیچیدگی‌های حرکت جریان غلیظ و رسوب‌گذاری و روند فرسایش احتمالی و غلظت رسوبات معلق و ته‌نشینی آنها را لحاظ کنند.

بیشتر بودن چگالی توده‌ی غلیظ نسبت به آب صاف‌تر مخزن، باعث می‌شود که آشفتگی جریان در امتداد قائم، در محل تماس توده غلیظ با آب مخزن کاهش یابد. علت این امر، اثر نیروی شناوری بر میزان آشفتگی جریان است. هرگاه لایه‌های پایین‌تر دارای چگالی بیشتری باشند، تعادل پایدار وجود داشته و در جهت کاهش اغتشاش امتداد قائم اثر خواهد کرد. اگر لایه‌های بالاتر آب دارای چگالی بیشتری باشند، شرایط ناپایدار حاکم بوده و در جهت افزایش اغتشاش امتداد قائم اثر می‌کند. عدم توجه به این

1 – Plunge Point
2– Wash Load

پدیده در شبیه‌سازی جریان غلیظ، باعث خطای زیاد در نتایج می‌شود. برای مطالعه روش‌های لحاظ کردن این پدیده در مدل‌های عددی، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها"مراجعه شود.

روابط تجربی‌ای وجود دارند که می‌توانند پیش از انتخاب مدل عددی، برای بررسی امکان وقوع جریان غلیظ مورد استفاده قرار گیرند. برای این منظور عمق لازم برای شکل‌گیری این نوع جریان برآورد شده و با عمق مخزن در قسمت‌های مختلف مقایسه می‌شود. اطلاعات ورودی به این روابط شامل مشخصاتی از سیل و مخزن است. برای تخمین سرعت حرکت توده غلیظ نیز روابطی تجربی و نیمه‌تحلیلی‌ای وجود دارد. برای مطالعه روابط مزبور به نشریه آموزشی اشاره شده مراجعه شود.

مهمترین عواملی که محل جدا شدن جریان غلیظ از سطح آب (نقطه‌ی ریزش) را تعیین می‌کنند عبارتند از:

الف) بده ورودی سیلاب در واحد عرض جریان
ب) نسبت تفاوت چگالی آب گل‌آلود با آب مخزن
ج) شتاب جاذبه
د) زبری بستر
ه) شیب بستر
و) ضریب اختلاط آب گل‌آلود ورودی با آب مخزن

یکی از روش‌های مهم مقابله با مشکل رسوبگذاری در مخزن، شستشوی رسوب با جریان آب است که به نام عملیات رسوبشویی (شاس، فلاشینگ) شناخته می‌شود. این روش بر اساس تخلیه رسوب مخزن از راه تخلیه‌کننده‌های تحتانی با استفاده از پایین آوردن سطح آب مخزن عمل می‌کند. عملیات رسوبشویی می‌تواند با تخلیه کامل یا تخلیه ناقص آب مخزن انجام شود. میزان بازدهی عملیات رسوبشویی، علاوه بر مشخصات مخزن و سیلاب‌ها و رسوبات و دریچه‌های تخلیه، به نحوه مدیریت رسوب مخزن و روش مانور دریچه‌های تحتانی نیز بستگی دارد.

عملیات رسوبشویی، به دلیل غلظت زیاد رسوب در آب تخلیه شده، اثرات منفی بر محیط زیست پایین دست سد دارد. بنابراین ممکن است ملاحظات زیست‌محیطی، محدودیتی برای حداکثر غلظت رسوب خارج شونده از مخزن تعیین کرده باشد. گاهی می‌توان هم زمان با تخلیه آب پر رسوب از دریچه‌های تحتانی، از دریچه‌های بالاتر نیز مقداری آب صاف اضافی تخلیه کرد تا غلظت رسوب در مجموع آب خروجی کاهش یابد.

تقاضا برای پیش‌بینی بازدهی عملیات رسوبشویی در شرایط مختلف و کنترل غلظت رسوب ناشی از آن در رودخانه پایین دست سد از طریق شبیه‌سازی عددی، در سال‌های اخیر رو به افزایش می‌باشد. شناخت فرایندهای مؤثر بر رسوبزدایی در این رابطه از اهمیت زیادی برخوردار است.

فرسایش زمانی رخ می‌دهد که مقدار سرعت برشی جریان در مجاورت بستر از حد آستانه فرسایش بیشتر شود. مقدار فرسایش نیز تابع میزان تفاوت این دو مقدار است. به این دلیل فرسایش بسیار شدید تنها در حالتی ایجاد می‌شود که عمق آب بسیار کم شده باشد. در ضمن کاهش تراز آب مخزن، تبدیل شرایط از عدم فرسایش به فرسایش شدید، تقریباً به طور ناگهانی رخ می‌دهد. میزان فرسایش در نزدیکی دریچه‌های تخلیه، به دلیل نقش سرعت برشی جریان خروجی، متفاوت با نواحی دیگر می‌باشد.

در زمان عملیات رسوبشویی، فرسایش در طول مخزن به طور هم زمان رخ نمی‌دهد. علت این امر آن است که به دلیل شیب بستر، عمق تمام نواحی به طور یکسان کاهش نمی‌یابد. در ابتدا رسوب قسمت‌های بالا دست مخزن فرسایش یافته و به سد نزدیک‌تر می‌شود. در ادامه، محدوده‌ی فرسایش به بدنه‌ی سد نزدیک می‌شود و بخش قابل توجهی از رسوبات فرسایش یافته، از تخلیه‌کننده‌های عمقی خارج می‌شود. اگر کاهش تراز آب مخزن به شرایط تخلیه‌ی کامل نزدیک شود، خروج رسوب از سد به شدت افزایش می‌یابد. عملیات رسوبشویی می‌تواند شامل چندین مرتبه آبگیری ناقص و تخلیه مجدد باشد. پس از نخستین رسوبشویی، میزان فرسایش کاهش می‌یابد، زیرا پس از فرسایش لایه رویی بستر، لایه‌های تحکیم‌یافته‌تر زیرین در سطح قرار می‌گیرند.

فاصله زمانی بین عملیات رسوبشویی متوالی، بر بازدهی عملیات تأثیر می‌گذارد. اگر این عملیات هر ساله انجام شود، رسوب ته‌نشین شده بر بستر – نسبت به شرایط عدم تخلیه سالانه – کمتر دچار تحکیم شده و در طی عملیات رسوبشویی آتی سهل‌تر دچار فرسایش می‌شود. اثر تحکیم رسوبات نهشته شده بر بازدهی عملیات رسوبشویی، باید در شبیه‌سازی لحاظ شود.

در ضمن عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای، شیارها یا کانال‌های فرسایشی‌ای در بستر مخزن ایجاد می‌شود که آب و رسوب به طور عمده از طریق آنها به سمت دریچه‌های تخلیه رفته و خارج می‌شود. حجم عمده فرسایش رسوب مخزن توسط این فرآیند رخ می‌دهد. عملکرد این کانال‌ها – از جمله نحوه گسترش سطح مقطع آنها – در میزان تخلیه رسوب اثر قابل توجهی دارد. بنابراین روابط و مدل‌های مربوط باید بتوانند روند تغییر عرض و عمق آنها را لحاظ کنند. عرض کانال فرسایشی تابع بده جریان، شیب بستر و مشخصات رسوب می‌باشد. روابط تجربی‌ای برای تخمین عرض کانال‌های فرسایشی در مخازن کم‌عرض، تنها بر اساس بده تخلیه، ارائه شده است. در مخازن باریک، موقعیت کانال‌های فرسایشی با مسیر اولیه‌ی رودخانه‌های ورودی مطابقت دارد. در مخازن عریض، رفتار کانال‌های فرسایشی مانند تعداد و مسیر آنها، پیچیده‌تر از مخازن کم‌عرض می‌باشد. چسبندگی و میزان تحکیم رسوب نیز بر نحوه فرسایش دیواره کانال‌های فرسایشی تأثیر می‌گذارد.

در عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای، کانال‌های فرسایشی به طور معمول انحراف زیادی از مسیر اولیه پیدا نمی‌کنند. بنابراین تراس‌های رسوبی موجود در دو طرف آنها چندان دچار فرسایش نمی‌شوند. این در حالی است که میزان فرسایش در کانال اصلی نیز با ادامه یافتن عملیات رسوبشویی کاهش یافته و بازدهی عملیات کاهش محسوسی پیدا می‌کند. می‌توان در زمان خالی بودن مخزن، به طور مصنوعی شیارهایی در تراس رسوبی ایجاد کرد و با احداث بند انحرافی، جریان را از مسیر خط‌القعر – که دیگر فرسایش زیادی عرضه نمی‌کند – به شیارهای مصنوعی هدایت کرد. تجربه‌ی مهندسی ارزشمندی از به‌کارگیری این روش در رسوبزدایی مخزن سد سفیدرود در ایران وجود دارد (به عنوان نمونه رجوع کنید به "تجربه‌ی رسوبزدایی سد سفیدرود"، کمیته‌ی رسوبزدایی مخزن سد سفیدرود، ۱۳۸۱).

نحوه گسترش مقطع عرضی کانال فرسایشی، نقش مهمی در میزان رسوبزدایی از مخازن در عملیات رسوبشویی دارد. فرسایش دیواره‌ی این کانال‌ها و ریزش آن به داخل جریان، یکی از مهمترین عوامل تخلیه رسوب می‌باشد. امکان محاسبه و پیش‌بینی شکل مقطع این کانال‌ها از جمله شیب دیواره‌ی آنها دارای اهمیت است. شکل‌های (۴–۴) و (۴–۵) عرض اولیه‌ی یک کانال فرسایشی انحرافی و روند تعریض آن تحت اثر فرسایش را نشان می‌دهند.

در روش رسوبشویی رودخانه‌ای، فرسایش در طول کانال فرسایشی نیز نقش مهمی در میزان رسوب خروجی از مخزن دارد. برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، این فرایند به طور معمول به صورت فرسایش پس رونده‌ی پله‌ای رخ می‌دهد و باعث می‌شود که نیمرخ طولی کانال فرسایشی به صورت پله‌ای باشد. شکل (۴–۶) نمونه‌ای از فرآیند فرسایش آبشاری پس‌رونده را در کانال فرسایشی سد سفید رود در حین عملیات رسوبزدایی نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی روند تخلیه رسوب در عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای، پیچیده‌تر از عملیات رسوبشویی تحت فشار (بدون تخلیه‌ی کامل مخزن) است. البته نباید مشکلات شبیه‌سازی دقیق عملیات رسوبشویی تحت فشار را نیز دست کم گرفت. محاسبه دقیق فرآیندهای تحکیم‌پذیری و فرسایش رسوب بستر و معلق شدن مجدد رسوبات ته‌نشین شده، اهمیت زیادی در دقت مدل‌های تخلیه رسوب در رسوبشویی تحت فشار دارد. برای پیش‌بینی فرسایش رودخانه‌ای، اهمیت پیش‌بینی مناسب روند تعریض کانال و نقش آبشارهای پس‌رونده نیز به این فهرست اضافه می‌شود. شکل (۴–۷) لحظه‌ای از عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای در مخزن سد سفیدرود را نشان می‌دهد. این شکل گویای پیچیدگی ترکیب فرآیندهای هیدرولیکی با فرآیندهای مکانیک خاک می‌باشد.

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در ضمن عملیات رسوبشویی در مخازن موجود در دنیا، روابط تجربی‌ای برای برآورد رفتار کانال‌های فرسایشی و میزان فرسایش عرضی و طولی آنها ارائه شده است. در حال حاضر به کارگیری این گونه روابط در مدل‌های عددی تخلیه رسوب مخزن، منطقی‌تر از تلاش برای شبیه‌سازی عددی پدیده‌های مکانیک خاک ذیربط به نظر می‌رسد.

پدیده‌های فیزیکی جریان سیال و جابجایی رسوب می‌توانند توسط معادله‌های بقاء به صورت مدل ریاضی درآیند. با حل معادله‌های بقای جرم و اندازه حرکت[1]، می‌توان میدان جریان، میدان غلظت رسوب معلق و تغییرات هندسه بستر را شبیه‌سازی کرد. معادله‌های بقاء برای جریان، پس از اعمال بعضی فرضیه‌های ساده‌کننده، به نام معادله‌های ناویر – استوکس شناخته می‌شوند. این معادله‌ها شامل اثر لَختی[2] جریان ورودی به مخزن، نیروی حجمی وارد شده به سیال ناشی از جاذبه، تأثیر متقابل سرعت و فشار، تنش‌های برشی ناشی از اثر گردابه‌های جریان، اصطکاک در بستر و دیواره‌ها و عوامل دیگر هستند.

اثر وزش باد بر سطح آب و اثر گردش کره زمین بر میدان جریان، در مخازن سدها قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

شکل ۴-۴- مقطع اولیه‌ی یک کانال انحرافی فرسایشی.
منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

شکل ۴-۵- تعریض کانال تحت اثر فرسایش در حین عملیات رسوبزدایی. منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

شکل ۴-۶- فرسایش پس‌رونده آبشاری در کانال فرسایشی در حین عملیات رسوبزدایی. منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

شکل ۴-۷- در هم کنش فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیک خاک در ضمن آزاد شدن تدریجی دریچه‌ها با انرژی آب.
منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

1 – momentum
2 – inertia

اثر نیروی حجمی، نقش مهمی در شبیه‌سازی رفتار جریان غلیظ دارد. جریان یافتن توده آب پر رسوب غلیظ – صرف نظر از لَختی اولیه آن در زمان ورود به مخزن – به وسیله همین عامل تنظیم می‌شود.

هر چه عمق آب بیشتر باشد، تأثیر اصطکاک بستر بر کل جریان کمتر می‌شود. میزان تأثیر اصطکاک بستر بر نیمرخ قائم جریان، تابعی از زبری بستر و اغتشاش جریان می‌باشد. اگر رسوبات معلق چندان ریزدانه نباشند، بیشترین غلظت رسوب معلق در نزدیکی بستر رخ می‌دهد. در این شرایط، دقت مورد نیاز برای محاسبه سرعت جریان در نزدیکی بستر بیشتر می‌شود.

جابجایی رسوب از دو قسمت بار معلق و بار بستر تشکیل شده است، هرچند نمی‌توان مرز دقیقی برای تفکیک این دو تعریف کرد. بیشتر مدل‌های عددی بر مبنای تفکیک این دو از یکدیگر و به کارگیری روابط مناسب جداگانه برای هریک از آنها شکل گرفته‌اند. در مخزن سد برای محاسبه بار بستر از روابط تجربی استفاده می‌شود، اما بار معلق بر اساس حل معادله‌های مشتقاتی بقاء محاسبه می‌شود. در بسیاری از مدل‌ها، یک حد بالا برای غلظت رسوب ریزدانه‌ی معلق در آب تعریف می‌شود تا اگر محاسبات در هر مرحله‌ای منجر به مقادیر غلظت بیش از آن شد، از آن مقدار به جای نتیجه محاسبه استفاده شود. برای شبیه‌سازی مقدار انتقال رسوب به صورت بار معلق، میدان جریان و میدان غلظت رسوب معلق محاسبه شده و یکدیگر ترکیب می‌شوند.

روابط تجربی بار بستر به طور معمول برای شرایط رودخانه‌ای تهیه شده‌اند، بنابراین انتخاب و به کارگیری آنها برای مخزن باید با احتیاط و توجه به شرایط همراه باشد. هرکدام از روابط تجربی ارائه شده، برای شرایط محدودی از جریان و رسوب مناسب هستند. اهمیت بار بستر در مخزن سد، کمتر از نقش آن در رودخانه است. برای تعیین بار معلق نیز روابط تجربی‌ای وجود دارند که برای محیط رودخانه تهیه شده‌اند و در مخزن استفاده نمی‌شوند. روابط مزبور بر این فرض استوارند که رفتار جریان و رسوب در یک ناحیه، کاملاً تابع شرایط موضعی همان ناحیه بوده و از بالا دست یا پائین دست تأثیر نمی‌گیرد.

روش محاسبه تبادل رسوب بین بستر و جریان آب – شامل رسوبگذاری و فرسایش – برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده و رسوبات ماسه‌ای متفاوت است، زیرا رفتار رسوبات ریزدانه از نوع سیلت و خاک رس با رفتار رسوبات ماسه‌ای یا شنی تفاوت دارد. این تفاوت رفتار از چند دیدگاه قابل توجه می‌باشد؛ تخمین میزان غلظت رسوب معلق، نحوه کنده شدن رسوب از بستر و غیر تعادلی بودن نرخ جابجایی رسوب.

در بستر ریزدانه، وجود یا عدم وجود رسوبگذاری از راه مقایسه‌ی تنش برشی جریان با تنش آستانه‌ی رسوبگذاری کنترل می‌شود. وجود فرسایش در این نوع بستر با مقایسه‌ی تنش برشی جریان با تنش آستانه‌ی فرسایش کنترل می‌شود. مقدار تنش آستانه‌ی فرسایش با مقدار تنش آستانه‌ی رسوبگذاری یکسان نیست. تنش آستانه‌ی فرسایش در عمق‌های مختلف زیر سطح بستر نیز یکسان نیست. یک علت این امر پدیده‌ی تحکیم می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی، بستر فرسایش پذیر به چند لایه تفکیک شده و مشخصات هر لایه به طور جداگانه تعیین می‌شود. فرسایش رسوب از بالاترین لایه‌ی موجود – که به‌طور کامل حذف نشده باشد – صورت می‌گیرد. اگر لایه‌ی فعال به تازگی ته‌نشین شده باشد، هنوز نرم می‌باشد. رابطه نرخ فرسایش لایه نرم سطحی، با لایه‌های زیرین تفاوت دارد. وجود خاک رس (Clay) می‌تواند چسبندگی بین ذرات بستر را افزایش دهد. محدوده‌ی معمول برای مقدار تنش آستانه‌ی فرسایش برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.

مقدار تنش آستانه‌ی فرسایش رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، تحت تأثیر میزان تحکیم بستر می‌باشد. میزان تحکیم رسوب نشان‌دهنده‌ی میزان آب موجود در رسوب می‌باشد و می‌توان آن را با چگالی توده‌ی رسوب بیان کرد. میزان تحکیم و میزان آب

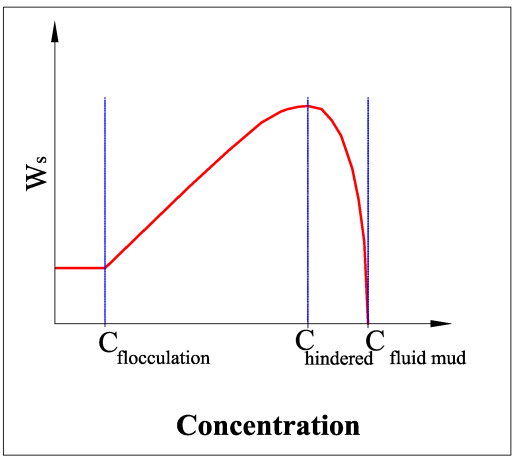
موجود در تودهی رسوبی تهنشین شده، در طول زمان ثابت باقی نمیماند. این موضوع باید در شبیهسازی مد نظر قرار گیرد.

جدول ۴-۱- تنش آستانهی فرسایش در شرایط مختلف

نوع بستر چسبنده	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	بازهی تنش آستانه (نیوتون بر متر مربع)
گل سست روان	۱۸۰	۰/۰۵ تا ۰/۱
بستر تا حدی تحکیم یافته	۴۵۰	۰/۲ تا ۰/۴
بستر تحکیم یافتهی سخت	۶۰۰ و بیشتر	۰/۶ تا ۲

نرخ رسوبگذاری و میزان رسوبات معلق، تابعی از سرعت سقوط ذرات هستند. اگر غلظت رسوب معلق خیلی زیاد نباشد، سرعت سقوط بیش از هر چیز تابع دانهبندی ذرات بوده و از مشخصههای دیگر تأثیر چندانی نمیگیرد. در این حال سرعت سقوط نزدیک به نتایج رابطهی استوکس است. سرعت سقوط آزاد رسوب ریزدانهی چسبنده در غلظتهای کم به وسیلهی آزمایش اندازهگیری میشود. فرآیند به هم پیوستن ذرات رسوب و تشکیل دانههای بزرگتر[1] میتواند باعث افزایش قطر و افزایش سرعت سقوط رسوبات ریزدانه چسبنده شود. شوری آب (بین صفر تا ۹ psu)، غلظت زیاد رسوب معلق و یا غلظت زیاد مواد آلی این فرآیند را فعال میکند (Mike Zero user manual, 2005). در این حالت، سرعت سقوط در زمانها و مکانهای مختلف محیط حل متفاوت خواهد بود. زیاد بودن آشفتگی جریان در جهت شکستن چنین پیوندهایی و کاهش سرعت سقوط تأثیر میگذارد.

اگر غلظت رسوب معلق خیلی زیاد شود، ذرات یا مجموعه ذرات به هم پیوستهی رسوبات معلق از نظر هیدرولیکی بر یکدیگر اثر میگذارند. در این شرایط، افزایش غلظت باعث کاهش سرعت سقوط میشود. علت این حالت آن است که سقوط ذرات معلق آزادانه صورت نمیگیرد، بلکه حرکت بعضی دانهها به سمت بستر باعث جابجایی آب به سمت بالا برای جا دادن به دانههای پرتعداد رسوب میشود. جریان آب به سمت بالا، روند تهنشین شدن ذرات دیگر را با کندی مواجه میکند. اگر غلظت رسوبات معلق باز هم بیشتر شود، ذرات معلق آنقدر به هم نزدیک میشوند که سرعت سقوط ناچیز خواهد شد. در این حال، مخلوط آب و رسوب به صورت گِلآب[2] عمل خواهد کرد. شکل (۴-۹) قسمتهای مختلف منحنی سرعت سقوط را، که تحت اثر فرآیندهای مختلف شکل میگیرد، نشان میدهد. یکی از ملاکهای بررسی توانایی یک نرمافزار برای شبیهسازی رفتار رسوب ریزدانه، مقایسهی فرضیات به کار رفته در آن برای سرعت سقوط رسوب با منحنی شکل (۴-۹) میباشد.



شکل ۴-۹- روند تغییرات سرعت سقوط رسوبات ریزدانهی چسبنده بر حسب غلظت رسوبات معلق

1 - Flocculation
2 - Fluid Mud

برای تعیین مقدار رسوبگذاری یا فرسایش طی مدت معین و یا تعیین نرخ تغییرات تراز بستر براساس شبیه‌سازی عددی سه بعدی، از محاسبه تفاوت میزان بلند شدن رسوب از بستر و میزان نشست بر آن استفاده می‌شود. اگر برای شبیه‌سازی جریان و رسوب معلق، از معادله‌های ساده شده‌ی یک بعدی یا دو بعدی در سطح (انتگرال‌گیری شده در عمق) استفاده شود، تغییر تراز بستر بر پایه تفاوت بار رسوبی کل ستون آب از بازه‌ای تا بازه‌ی دیگر تعیین می‌شود.

در رودخانه‌ها اثر انتشار رسوب در امتداد افقی نسبت به اثر انتقال آن در همین امتداد قابل توجه نیست، اما در مخازن سدها اثر انتشار افقی نیز در شبیه‌سازی‌ها لحاظ می‌شود.

انجام ساده‌سازی‌های منطقی، در پروژه‌های مطالعات کاربردی اهمیت زیادی دارد. با کمی صرف وقت و به کارگیری تجربه در هنگام انتخاب فرضیه‌های ساده‌کننده و مدل‌های متناسب با آن، می‌توان ضمن نزدیک شدن به واقعیت‌ها به مقدار زیادی از صرف غیر ضروری زمان و هزینه در مراحل بعدی مطالعه جلوگیری کرد. انتخاب نوع فرضیه‌های ساده کننده در یک مسئله کاربردی، بستگی به شرایط فیزیکی جریان و رسوب در مخزن، مشخصات مخزن، جریان‌ها و سیلاب‌های ورودی به آن و هدف شبیه‌سازی دارد.

مهمترین فرضیه‌های ساده کننده‌ی معمول، عبارتند از:

۱- انتگرال‌گیری معادله‌های جریان و/یا رسوب معلق در عمق و تنظیم معادله‌های دو بعدی در سطح

۲- انتگرال‌گیری معادله‌های جریان و/یا رسوب معلق در عرض و تنظیم معادله‌های دو بعدی در صفحه قائم

۳- انتگرال‌گیری معادله‌های جریان و/یا رسوب در سطح مقطع عمود بر جریان و تنظیم معادله‌های یک بعدی

۴- فرض شبه‌ماندگار بودن میدان جریان و/یا رسوب

۵- فرض هیدرواستاتیک بودن فشار

۶- ساده‌سازی در محاسبه سطح آزاد آب

۷- روش‌های محاسبه آشفتگی جریان

۸- حاکم بودن شرایط موضعی بر رفتار رسوب

۹- حل جریان دو بعدی افقی به صورت لوله‌های جریان یک‌بعدی

۱۰- حل جریان سه بعدی به صورت لایه‌های جریان دو بعدی

۱۱- فرضیه‌های ساده کننده در باره لایه‌بندی رسوبات بستر و هندسه‌ی بستر سخت

۱۲- فرض زیربحرانی بودن رژیم جریان در همه‌ی نواحی

ساده‌سازی‌های دیگری نیز وجود دارند که بر معادله‌ها اعمال نمی‌شوند، بلکه مربوط به نحوه‌ی معرفی شرایط مرزی و هندسه‌ی محیط به مدل هستند. ممکن است در یک پروژه، فرضیه‌های ساده‌کننده‌ی مناسب برای مدل جریان و مدل رسوب متفاوت باشند. برای توضیحات بیشتر در باره هر یک از فرضیه‌های ساده کننده و محدودیت‌ها و شرایط به کارگیری آنها، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

در صورتی که شتاب قابل توجهی در امتداد قائم وجود نداشته باشد (یعنی بتوان توزیع فشار در عمق را هیدرواستاتیک در نظر گرفت) و تغییر مقادیر مشخصه جریان در این امتداد زیاد نباشد، می‌توان معادله‌های اصلی جریان را در عمق انتگرال گرفت و به صورت معادله‌های دوبعدی افقی مورد استفاده قرار داد. کاربرد این حالت در مخازن سدهای کم عمق که ابعاد افقی آن بسیار بیشتر از عمق آب باشد، پیش می‌آید. اگر اختلاط در امتداد قائم به اندازه‌ای باشد که میزان غلظت رسوب معلق در این امتداد تغییر زیادی نداشته باشد، می‌توان معادله مربوط به غلظت رسوب معلق را نیز با انتگرال‌گیری در عمق ساده کرد. در

بسیاری از مسائل، ممکن است شرایط برای ساده‌سازی معادله‌های جریان به معادله‌های انتگرال‌گیری شده در عمق مناسب باشد، اما انجام این ساده سازی برای معادله غلظت رسوب معلق منطقی نباشد، به خصوص اگر رسوبات چندان ریزدانه نباشند. برای شبیه‌سازی جریان غلیظ، نمی‌توان از انتگرال‌گیری معادله‌ها در تمام امتداد قائم استفاده کرد، اما می‌توان روش لایه‌بندی در عمق را به کار گرفت.

اگر میزان تغییر شاخص‌های مؤثر جریان یا رسوب در امتداد قائم زیاد بوده اما میزان تغییر آنها در عرض مخزن شدید نباشد، می‌توان معادله‌ها را در عرض مخزن انتگرال‌گیری کرد و به صورت دو بعدی در صفحه قائم مورد استفاده قرار داد. چنین شرایطی بیشتر در مخازن کوهستانی عمیق با عرض اندک و شیب تند در دیواره‌های اطراف پیش می‌آید.

اگر سرعت جریان در کل مقطع به طور نسبی یکنواخت بوده و تغییر تراز سطح آب در عرض آن قابل صرف نظر باشد، می‌توان معادله‌های اصلی را در تمام سطح مقطع جریان انتگرال‌گیری کرد و به صورت معادله‌های یک بعدی مورد استفاده قرار داد. به کارگیری مدل‌های یک بعدی در مهندسی رودخانه معمول می‌باشد. برای دقیق بودن این ساده سازی، لازم است که توزیع فشار در عمق نیز به طور نسبی هیدرواستاتیک باشد و توزیع فشار تحت تأثیر انحنای مسیر جریان قرار نگیرد. برای بسیاری از مدل‌های یک بعدی موجود، لازم است که شیب بستر نیز اندک باشد.

اگر اثر تغییرات زمانی میدان جریان و/یا رسوب در مقایسه با وزن جمله‌های دیگر موجود در معادله‌های جریان و رسوب زیاد نباشد، می‌توان از جمله‌های مربوط به تغییرات زمانی در معادله‌ها صرف نظر کرد. در این حال معادله‌های حاکم به صورت ماندگار در زمان در می‌آیند. می‌توان برای مسائلی که دارای تغییرات زمانی ملایم هستند، به جای حل پیوسته معادله‌ها در زمان، معادله‌های ماندگار را در زمان‌هایی با فاصله زیاد از یکدیگر حل کرد و از محدودیت‌های مربوط به انتخاب گام زمانی حل آزاد شد. در این صورت، تعداد زمان‌هایی که باید شبیه‌سازی شوند به شدت کاهش خواهد یافت. این نوع ساده‌سازی، به طور معمول برای شبیه‌سازی شرایط عادی در طول سال به کار می‌رود. برای شبیه‌سازی شرایط سیلابی در بسیاری از موارد نمی‌توان از این ساده‌سازی استفاده کرد، زیرا تغییرات زمانی در چنین شرایطی می‌تواند شدید و مؤثر باشد.

روش‌های محاسبه‌ی آشفتگی جریان را می‌توان نوعی ساده‌سازی در نظر گرفت، زیرا برای اجتناب از به کارگیری گام‌های مکانی و زمانی بسیار کوچک در حل عددی ایجاد شده‌اند. این ساده‌سازی از نوع متوسط‌گیری معادله‌ها در زمان یا مکان می‌باشد. بسیاری از روش‌های محاسبه اغتشاش، بر اساس متوسط‌گیری زمانی استوار شده و تحت عنوان متوسط‌گیری رینولدز معروف می‌باشند. روش‌های دیگری نیز وجود دارند که بر اساس متوسط‌گیری مکانی استوار شده‌اند و تحت عنوان روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ – مقیاس شناخته می‌شوند. این نوع متوسط‌گیری زمانی یا مکانی، منجر به اضافه شدن مفهوم لزجت تلاطم به معادله‌ها می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب لزجت اغتشاش ابداع شده است تا شرایط مختلفی از رفتار جریان و دقت نتایج پوشش داده شود. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی، چند روش را در دسترس کاربران قرار می‌دهند تا او با توجه به شرایط خاص مسئله، مناسب‌ترین روش را انتخاب کند. اگر تأثیر آشفتگی بر میدان جریان قابل توجه باشد، انتخاب روش مناسب محاسبه اغتشاش و برازش و واسنجی آن دارای اهمیت خواهد بود. برای شبیه‌سازی رفتار جریان غلیظ، اثر نیروی شناوری بر کاهش آشفتگی نیز باید در شبیه‌سازی لحاظ شود.

برای شبیه‌سازی میدان جریان و رسوب در مخزن سد، مقیاس مکانی در صفحه‌ی افقی بسیار بیشتر از مقیاس مکانی در امتداد قائم می‌باشد. بر همین اساس، فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در امتداد افقی، بسیار بیشتر از فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در امتداد قائم است. این موضوع باعث می‌شود که میزان تأثیر اغتشاش در امتداد قائم، بسیار بیشتر از میزان تأثیر آن در صفحه‌ی افقی باشد. به همین دلیل در شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب مخازن سدها، روند محاسبه‌ی اغتشاش امتداد قائم

جدا از روند محاسبه‌ی اغتشاش در صفحه‌ی افقی است. اگر در محل‌های خاصی مانند اطراف دریچه‌های آبگیر، فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در امتداد قائم و افقی یکسان شود، می‌توان محاسبات آشفتگی را نیز به صورت یک‌پارچه انجام داد.

می‌توان ضریب لزجت آشفتگی در قسمت‌های مختلف را به عنوان یک ضریب برازش در نظر گرفت و یا یکی از روش‌های محاسبه‌کننده‌ی آن را برای مدل انتخاب کرد. معمول‌ترین روش‌های محاسبه اغتشاش، شامل روش صفر معادله‌ای طول اختلاط پرانتل، روش یک معادله‌ای محاسبه‌ی انرژی جنبشی اغتشاش (k)، و روش دو معادله‌ای محاسبه انرژی جنبشی اغتشاش و سرعت استهلاک آن (k-ε) می‌باشند. نگارش‌های مختلفی از روش‌های یک و دو معادله‌ای وجود دارند. برای کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با مدل‌های آشفتگی، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

در بسیاری از موارد، رفتار جریان و رسوب در قسمتی از یک رودخانه تابع شرایط موضعی همان محل بوده و از بازه‌های اطراف شکل نمی‌گیرد. در چنین شرایطی می‌توان غلظت رسوب معلق در آن ناحیه را فقط بر اساس مشخصات جریان و بستر در همان جا به دست آورد. در این حال مقدار غلظت رسوب معلق، رابطه‌ای با شرایط قسمت‌های بالا دست و پائین دست نخواهد داشت. در چنین شرایطی می‌توان فرض کرد که منبع تأمین کننده‌ی رسوب معلق در آن ناحیه از رودخانه، بستر همان محدوده می‌باشد. چرا که غلظت رسوب معلق در نواحی اطراف، بر این ناحیه بی‌تأثیر است. مفهوم "موضعی بودن رفتار رسوب" در این شرایط صادق می‌باشد. بسیاری از مدل‌های یک بعدی جریان و رسوب، برای تخمین میزان جابجایی رسوب و فرسایش و رسوبگذاری ناشی از آن، از روابطی استفاده می‌کنند که بر اساس مفهوم موضعی بودن رفتار رسوب تهیه شده‌اند. به کارگیری چنین روابطی در مخازن سدها باید با احتیاط همراه باشد.

برای کسب اطلاعات بیشتر در باره‌ی فرآیندهای فزیکی مؤثر بر رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها و روابط و معادله‌های حاکم بر آنها، به نشریه آموزشی "کابرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

۵- روند انجام مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی عددی

برای انجام صحیح یک پروژه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی عددی، باید مراحل مختلفی را رعایت کرد که نتایج هر یک از آنها بر مراحل بعدی تأثیر می‌گذارد. رعایت روند صحیح برخورد با مسئله، باعث پیش‌گیری از دوباره‌کاری‌های وقت‌گیر، صرف منابع مالی و انسانی در موارد غیر ضروری و عدم موفقیت در رسیدن به اهداف مطالعه می‌باشد.

مراحل مختلف انجام یک مطالعه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی عددی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- مشخص کردن اهداف مطالعه	۶- تکمیل اطلاعات محیطی مورد نیاز
۲- انجام مطالعات اولیه و شناسایی تأثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف	۷- برپاسازی، برازش و واسنجی مدل‌ها
۳- تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی	۸- شبیه‌سازی شرایط انتخاب شده
۴- انتخاب نرم‌افزار یا نرم‌افزارهای مناسب	۹- به‌کارگیری و تعمیم نتایج شبیه‌سازی
۵- انتخاب شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند	

در ادامه، در باره‌ی هر کدام از موارد فوق توضیحاتی ارائه می‌شود.

۵-۱ مشخص کردن اهداف مطالعه

اولین و مهمترین قدم در آغاز یک مطالعه، روشن کردن اهداف آن می‌باشد. این کار به معنی مشخص کردن سؤال‌هایی است که جواب آنها باید در طی مطالعه روشن شود. در آغاز هر پروژه، عقیده‌ها و برداشت‌های کلی‌ای نسبت به هدف‌ها وجود دارد که ممکن است بر اساس مشکل‌ها یا نگرانی‌های موجود شکل گرفته باشد، اما جزئیات و محدوده‌ی انتظارها به طور دقیق مشخص نیست. بنابراین انجام پاره‌ای مطالعات اولیه و به کارگیری تجربه‌ی مهندسی، برای تدقیق اهداف مطالعه ضروری است. این کار مسیر انجام مطالعه را مشخص کرده و از صرف منابع پروژه در موارد غیر ضروری جلوگیری خواهد کرد. انتخاب مدل نامناسب، شبیه‌سازی پدیده‌های کم اهمیت، عدم موفقیت در شبیه‌سازی پدیده‌های موثر، عدم تهیه‌ی اطلاعات محیطی مهم و یا صرف وقت و هزینه برای تهیه‌ی اطلاعاتی که در عمل نقشی در دست‌یابی به اهداف مطالعه نخواهند داشت، بعضی از عوامل اتلاف منابع در پروژه‌ها می‌باشند. تعامل بین مشاور و کارفرما نقش موثری در انجام هر چه بهتر این مرحله از مطالعات دارد.

دقت مورد نیاز در جواب‌ها نیز باید در ابتدای مطالعه مشخص شود. تعیین حد وارد شدن به جزئیات و دقت و قابلیت اطمینان مورد نیاز برای نتایج مطالعه، یکی از موارد مهم در تعیین هدف می‌باشد. کلیات این موضوع در همین مرحله روشن شده و جزئیات آن به مرحله‌ی "تدقیق اهداف" سپرده می‌شود. به عنوان نمونه، اگر برآورد نرخ کلی آورد رسوب به داخل یک مخزن و نرخ تغییر حجم آن برای رفع نیازهای یک پروژه کافی باشد، در آن صورت ممکن است مطالعه‌ی نحوه‌ی توزیع رسوبات وارده در قسمت‌های مختلف مخزن لازم نباشد، اما برای تعیین این‌که چه مقدار از رسوب وارده در محل حجم مرده‌ی مخزن ته‌نشین می‌شود، ممکن است نتوان از شبیه‌سازی عددی توزیع رسوب در مخزن صرف نظر کرد.

گستردگی محدوده‌ی مورد مطالعه نیز در مرحله‌ی مشخص کردن اهداف، معلوم می‌شود. برای تعیین اهداف و دامنه‌ی کار، باید محدوده‌ی پروژه، محدوده‌ی موثر بر پروژه و محدوده‌ای که پروژه بر آن موثر است را تعیین کرد. برای تعیین محدوده مطالعه، باید مشخص کرد که آیا هدف مطالعه تنها بررسی خود مخزن است و یا تأثیر سد بر رودخانه‌ی بالا دست و یا پایین دست نیز لازم می‌باشد.

۵-۲ مطالعات اولیه و شناسایی تأثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف

پس از آنکه اهداف مطالعه مشخص شد، مطالعات اولیه‌ای در باره موضوع انجام می‌شود. یک گام مهم در مطالعات اولیه، آن است که میزان اهمیت مسئله‌ی رسوب در پروژه برآورد شود و خطوط قرمزی که در رابطه با رسوب می‌توانند طرح نهایی را با شکست مواجه کنند، مشخص شوند. شکست طرح نهایی می‌تواند ناشی از بازدهی اندک، هزینه غیر منطقی و یا عدم امکان نگهداری آن باشد.

فرآیندهای فیزیکی مختلفی وجود دارند که می‌توانند بر رفتار رسوب در یک مخزن تأثیر بگذارند. شناسایی این فرآیندها و تعیین نقش و اهمیت نسبی هر یک از آنها، تأثیر به‌سزایی در روند انجام مطالعه – از جمله در انتخاب مناسب مدل عددی، تعیین اطلاعات محیطی مورد نیاز و انجام شبیه‌سازی‌ها – دارد. مدل‌های مختلف، توانایی‌ها و محدودیت‌های متفاوتی در شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی گوناگون دارند و بر اساس فرضیه‌های ساده‌کننده‌ی متفاوتی عمل می‌کنند.

برای انتخاب مدل مناسب، باید فرآیندهای فیزیکی موثر در یک مطالعه‌ی موردی خاص را شناسایی و میزان نقش هر کدام را – حداقل به طور تقریبی – معلوم کرد. در این رابطه ملاک‌های مختلفی باید مد نظر قرار گیرند. یکی از این ملاک‌ها، تعیین نقش بار معلق، بار بستر و بار شسته در آورد رسوب و جابجایی آن می‌باشد. دانه‌بندی رسوبات و چسبنده یا غیر چسبنده بودن آنها نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. این معیارها در انتخاب رابطه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی جابجایی رسوب در رودخانه‌ی منتهی به مخزن نیز نقش

دارند. روابط و روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی حمل رسوب وجود دارند که تابع میزان اهمیت بار بستر، دانه‌بندی رسوب و چسبنده بودن یا نبودن آن است. نیاز به شبیه‌سازی دقیق‌تر بار معلق بر اساس حل عددی معادله‌ی غلظت رسوب معلق نیز با توجه به همین معیارها مشخص می‌شود. اگر مطالعات مربوط به سدی باشد که هنوز ساخته نشده است، تغییر جنس رسوب بستر پس از ساخته شدن سد باید در نظر گرفته شود.

جنس و دانه‌بندی رسوب بستر و رسوبات ورودی از مرزها نقش مهمی در تعیین فرآیندهای فیزیکی مؤثر دارد. بسیاری از نرم‌افزارها، برای شبیه‌سازی رفتار رسوب ماسه‌ای و رسوب ریزدانه‌ی چسبنده، از روش‌های متفاوتی استفاده می‌کنند. اگر دانه‌بندی رسوب کمتر از ۶۳ میکرون باشد، ریزدانه[1] محسوب می‌شود. رفتار این نوع رسوب، علاوه بر امتداد قائم، به شدت تحت تأثیر فرآیند پخش و انتقال غلظت رسوب معلق در صفحه‌ی افقی قرار دارد. رسوب ریزدانه می‌تواند سیلت یا لای باشد. رسوب ریزدانه با دانه‌بندی بین ۴ تا ۶۳ میکرون، سیلت نامیده می‌شود. اگر دانه‌بندی رسوب ریزدانه کمتر از ۴ میکرون باشد، چسبنده بوده ولای یا خاک رس[2] نامیده می‌شود. اگر سهم لای در رسوب ریزدانه بیش از حدود ۱۰٪ باشد، مجموعه‌ی توده‌ی رسوبی رفتار چسبنده از خود نشان خواهد داد. رفتار این نوع رسوب، تحت تأثیر فرآیندهای فیزیکی خاصی قرار می‌گیرد که شامل تأثیر چسبندگی بر سرعت سقوط، تأثیر بر روند فرسایش و رسوبگذاری و اهمیت یافتن فرآیند تحکیم رسوبات ته‌نشین شده خواهد بود. مدل‌های عددی در مواجهه با رسوب ریزدانه‌ی چسبنده، باید بتوانند اثر همه‌ی فرآیندهای مطرح شده را محاسبه کنند.

اگر اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ی کافی در دسترس باشد، باید در مرحله مطالعات اولیه، بار رسوبی کل را به بار ناشی از بستر رودخانه (بار معلق و بار بستر) و بار شسته شده از سطح حوضه تفکیک و سهم هر کدام را مشخص کرد.

نقش سیلاب‌ها در آورد رسوب به داخل مخزن نیز باید در همین مرحله شناسایی شود. اگر بیشترین رسوبات وارده به مخزن، در طی سیلاب‌های محدودی حادث شوند، شرایط این سیلاب‌ها باید با جزئیات کافی و با توجه به تغییرات زمانی پدیده‌ها در طول سیل مطالعه شود. در این حال ممکن است حتی برای قسمت رودخانه‌ای مسئله نتوان از شرایط شبه‌ماندگار استفاده کرد. یک راه مناسب برای برآورد اولیه‌ی میزان اهمیت سیلاب‌ها در یک مطالعه، استفاده از بده‌های روزانه و رابطه‌ی بده آب با نرخ آورد رسوب می‌باشد

در سیلاب‌های شدید، امکان وقوع جریان غلیظ در مخزن وجود دارد. این فرآیند روند انتقال، فرسایش و ته‌نشینی رسوب را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. امکان وقوع و اهمیت این پدیده باید در مطالعات اولیه مشخص شود. برای شبیه‌سازی جریان غلیظ، باید نرم‌افزاری انتخاب کرد که بتواند تأثیر غلظت رسوب بر چگالی مخلوط آب و رسوب را محاسبه کرده و جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی را منظور کند. به‌علاوه باید بتواند تأثیر تفاوت شدید چگالی و نیروی شناوری حاصل از آن را بر میزان آشفتگی جریان در نظر گیرد. وقوع جریان غلیظ در مخزن، در شرایطی رخ می‌دهد که غلظت رسوبات معلق ورودی زیاد، شیب طولی بستر کافی و عمق مخزن زیاد باشد. روابط تجربی‌ای وجود دارند که با استفاده از آنها می‌توان امکان و محل وقوع جریان غلیظ را پیش‌بینی کرد. برای کسب اطلاعات بیشتر در این مورد به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

مشخصه‌ی مهم دیگری که باید در مطالعات اولیه مد نظر قرار گیرد، اهمیت فرسایش یا رسوبگذاری در پروژه‌ی مورد بررسی است. اگر فرآیند فرسایش بستر، یکی از فرآیندهای اساسی حاکم بر مسئله باشد، توانایی مدل در محاسبه‌ی اثر تحکیم و درنظر گرفتن لایه‌های مختلف با درجه‌های تحکیم متفاوت برای بستر از اهمیت خاص برخوردار خواهد شد. علت این امر آن

1 – Mud
2– Clay

است که به طور معمول رسوب بستر در مخازن سدها از نوع چسبنده است. برای بسترهای غیر چسبنده نیز امکان منظور کردن تفاوت دانه‌بندی رسوب در لایه‌های مختلف بستر توسط نرم‌افزار، دارای اهمیت می‌باشد. جریان غلیظ نیز می‌تواند فرسایش ایجاد کند. یکی از نشانه‌های وجود فرسایش در مسیر جریان غلیظ، آن است که غلظت رسوب خروجی از دریچه‌های سد (ضمن خارج کردن جریان غلیظ از دریچه‌های تحتانی) بیش از بیشترین غلظت رسوب در سیل ورودی به مخزن باشد.

میزان اهمیت رسوبگذاری در مسئله، باید در مطالعات اولیه مشخص شود. اگر این فرآیند مهم باشد، توانایی منظور کردن طیف دانه‌بندی رسوب معلق توسط نرم افزار، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود.

ممکن است در یک مسئله‌ی خاص، در شرایط یا گزینه‌های مختلف مورد بررسی، اهمیت فرآیندهای رسوبگذاری و فرسایش متفاوت باشد. چند شبیه‌سازی اولیه و تقریبی می‌تواند به شناسایی میزان اهمیت این پدیده‌ها کمک کند. تعیین میزان اهمیت رسوبگذاری و میزان اهمیت فرسایش در یک مطالعه، نه تنها در انتخاب نرم‌افزار مناسب، بلکه در استفاده‌ی مناسب از توانایی‌های آن نیز دارای اهمیت است.

جدول (۵-۱) فهرست فشرده‌ای از فرآیندهای فیزیکی مختلف را نشان می‌دهد که کاربر باید برای هر کدام از آنها مشخص کند که آیا کلیدی، با اهمیت، قابل توجه، اندکی مؤثر و یا قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

توضیح کامل مهارت‌های مربوط به مطالعات اولیه، فراتر از موضوع این نوشتار است.

جدول ۵-۱- فهرست فرآیندهای فیزیکی که باید میزان اهمیت هر کدام از آنها در مطالعه روشن

نقش شرایط سیلابی در آورد یا جابجایی رسوب	ریزش شیب‌های خاکی مشرف به داخل مخزن
نقش شرایط غیر سیلابی در آورد یا جابجایی رسوب	جریان‌های ناشی از اختلاف چگالی
اهمیت توجه به جزئیات و روند تغییرات در مدت سیل	جریان غلیظ
نقش آثار و تغییرات دراز مدت چندین ساله در مطالعه	اهمیت تفاوت دما یا شوری آب ورودی با آب مخزن
اثرات زیست‌محیطی رفتار رسوب در محیط مخزن	اثر تغییر هندسه‌ی بستر بر میدان جریان و رسوب با گذشت زمان
اثرات زیست‌محیطی رسوب بر پایین دست مخزن	وجود یا شکل‌گیری و حرکت دلتای رسوبی
اثر سد بر هیدرودینامیک یا ریخت‌شناسی در پایین دست سد	اهمیت رسوبشویی تحت فشار در مطالعه
اهمیت محل نشست رسوب در طول مخزن	اهمیت رسوبشویی رودخانه‌ای در مطالعه
اهمیت محل نشست رسوب در عرض مخزن	فرسایش موضعی در اطراف تخلیه‌کننده‌ها (در عملیات رسوبشویی)
غیر یکنواختی رسوبگذاری در عرض مخزن	تعریض کانال فرسایش (در عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای)
اهمیت جانمایی عرضی تخلیه‌کننده‌ها	فرسایش آبشاری پسرونده (در عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای)
اهمیت فرسایش بستر	اهمیت تغییر سرعت سقوط رسوب به خاطر تغییر غلظت آن
اهمیت رسوبگذاری بر بستر	اهمیت پدیده‌ی تحکیم رسوب بستر در فرسایش
نقش رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده	اهمیت پدیده‌ی جوشنی شدن بستر (آرمورینگ) در فرسایش
نقش رسوبات درشت و غیر چسبنده	وجود بستر سخت در زیر بستر فرسایش‌پذیر
اهمیت بار معلق	وجود پوشش گیاهی دائمی یا فصلی بر قسمتی از بستر
اهمیت بار بستر	هوازدگی رسوبات تر و خشک شونده طی تغییر تراز آب
بار شسته‌شده از سطح حوضه	اثر تغییرات شدید تراز سطح آب مخزن
بار رسوبی سرچشمه گرفته از بستر رودخانه بالا دست	نقش مؤلفه‌ی هیدرودینامیک فشار

۵-۳ تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی

پس از انجام مطالعات مقدماتی و تعیین نقش فرآیندهای فیزیکی مختلف در مسئله، اهداف مطالعه باید دوباره مورد بررسی و تدقیق قرار گیرند. در این حال می‌توان جزئیات مربوط به خواسته‌ها، خط‌مشی‌ها و روند انجام مطالعه را مشخص کرد. سپس سهم مربوط به شبیه‌سازی عددی و انتظارهای موجود از آن – در میان مجموعه‌ی شرح وظایف – روشن می‌شود. هسته‌ی اصلی و مغز متفکر یک پروژه‌ی مطالعاتی، شبیه‌سازی عددی نیست. تجربه و قضاوت مهندسی است که همه‌ی مراحل مطالعه از جمله شبیه‌سازی‌های عددی را هدایت و از آنها نتیجه‌گیری می‌کند. محدودیت‌های مشترک بین مدل‌های عددی در رابطه با شبیه‌سازی فرآیندهای خاص فیزیکی، در ضمن تنظیم انتظارهای موجود از شبیه‌سازی عددی در یک پروژه در نظر گرفته می‌شود.

اهداف یک پروژه کاربردی به برآورد وضع موجود خلاصه نمی‌شود، بلکه ارائه و بررسی گزینه‌های مختلف طراحی یا مدیریت عملکرد سد برای کاهش مشکلات و بهینه‌سازی را نیز شامل می‌شود. تعیین گزینه‌های مختلفی که باید مورد بررسی قرار گیرند، بخش مهمی از یک پروژه است. اگرچه مطالعه گزینه‌ها به وسیله شبیه‌سازی انجام می‌گیرد، اما تعیین آنها به کمک تجربه‌ی مهندسی و بر اساس مطالعات اولیه و شناسایی فرآیندها فیزیکی حاکم انجام می‌شود. انتخاب گزینه‌های مورد بررسی، بخش مهمی از مرحله‌ی "روشن کردن اهداف مطالعه" را شکل می‌دهد. مهمترین جایگاه خلاقیت‌های مهندسی در یک پروژه، همین مرحله است.

۵-۴ انتخاب نرم‌افزارهای مناسب

انتخاب نرم‌افزار مناسب برای شبیه‌سازی، یکی از ضرورت‌های انجام موفق یک مطالعه‌ی کاربردی است. انتخاب نامناسب مدل، می‌تواند منجر به نادیده گرفتن بعضی از فرآیندهای فیزیکی مهم در مسئله و استخراج نتایج اشتباه شده و یا باعث صرف زمان و هزینه‌ی بیش از حد برای تهیه‌ی اطلاعات ورودی غیر ضروری و اجرای شبیه‌سازی‌ها شود. برای انتخاب مناسب، از یک سو باید توانایی‌ها و محدودیت‌های نرم‌افزارها را شناخت و از سوی دیگر اهداف شبیه‌سازی و فرآیندهای فیزیکی موثر بر مسئله را در نظر گرفت. مهمترین شاخص‌هایی که نرم‌افزارها را نسبت به یکدیگر متفاوت می‌کنند عبارتند از ساده‌سازی‌های استفاده شده، محدودیت‌های ناشی از روش‌های عددی به کار رفته، سادگی کاربرد و توانایی پیش‌پردازش و پس‌پردازش داده‌ها و نتایج.

ساده‌سازی‌های به کار رفته در معادله‌ها، نقش مهمی در مجزا کردن نرم‌افزارها از یکدیگر دارند. بعضی از نرم‌افزارهای موجود، یک بعدی، برخی دو بعدی افقی، برخی دوبعدی در صفحه‌ی قائم و برخی سه بعدی هستند. بعضی از نرم افزارهای یک بعدی بر اساس روش شبه‌ماندگار و برخی بر اساس معادله‌های دینامیکی کامل عمل می‌کنند. برخی از مدل‌ها، محاسبات رسوب را برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده و بسترهای تحت اثر فرآیند تحکیم نیز انجام می‌دهند. برخی از آنها تأثیر غلظت زیاد رسوب بر میدان جریان و بر سرعت سقوط را منظور کرده اما برخی دیگر از این پدیده‌ها صرف نظر می‌کنند. امکانات شبیه‌سازی اغتشاش، در مدل‌های مختلف یکسان نیست. تأثیر نیروی غوطه‌وری بر میزان اغتشاش، در بعضی از مدل‌ها منظور شده و در بعضی صرف نظر می‌شود. برخی از مدل‌ها، امکان اضافه کردن روال‌های محاسباتی جدید توسط کاربر را نیز در اختیار قرار می‌دهند.

با استفاده از معیارهای ارائه شده در این نوشتار و مراجعه به راهنمای نرم‌افزار مورد بررسی، می‌توان مشخص کرد که آیا به‌کارگیری آن مدل برای یک پروژه‌ی خاص مناسب است یا خیر. ارائه هر نوع فهرست و مشخصاتی از نرم‌افزارهای موجود، نیازمند تغییرات سریع و متوالی خواهد بود، زیرا همیشه نرم‌افزارها و نگارش‌های جدیدی در حال توسعه هستند. برای آشنایی با

تعدادی از نرم‌افزارهای معتبر قابل استفاده و مشخصات اصلی آنها، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

مقیاس زمانی و مکانی پدیده‌های مورد مطالعه نیز باید در این مرحله مورد توجه قرار گیرد. برای بررسی تغییرات دراز مدت هندسه‌ی بستر مخزن، مقیاس زمانی در حدود چندین سال خواهد بود. برای بررسی تأثیر یک سیلاب مشخص یا چند سیلاب نمونه، مقیاس زمانی در حدود چندین ساعت می‌باشد. اگر برای بررسی رفتار دراز مدت، نتوان به شبیه‌سازی سیل‌های خاص اکتفا کرد، آنگاه سرعت انجام محاسبات از اهمیت زیادی برخوردار خواهد شد و ممکن است برای نیل به آن از مدل‌های پیچیده و دستیابی به بعضی دقت‌های غیر اساسی صرف نظر شود. دقت مکانی مورد نیاز برای مطالعه‌ی میزان رسوب وارده از رودخانه به مخزن، متفاوت از دقت لازم برای مطالعه جزئیات محل نشست رسوب در نزدیکی دریچه‌های آبگیر است. این موضوع در انتخاب بین مدل یک بعدی طولی (یا دو بعدی در صفحه‌ی قائم) و مدل دو بعدی افقی مورد توجه قرار می‌گیرد.

اگر هدف یک مطالعه، بررسی روند پیشروی دلتای رسوبی در مخزن باشد، رسوبات مورد توجه، درشت‌دانه‌تر از حالتی است که ته‌نشینی رسوب در نزدیکی بدنه‌ی سد هدف اصلی است. در این دو مسئله، رفتار قسمت‌های متفاوتی از طیف دانه‌بندی رسوبات وارده به مخزن در مرکز توجه قرار می‌گیرد. اثر چسبندگی رسوبات ریزدانه نیز می‌تواند باعث تفاوت بیشتر این دو مسئله شود. بنابراین توانایی مدل انتخاب شده در شبیه‌سازی رفتار این نوع رسوب مهم خواهد بود. ممکن است محاسبه‌ی غلظت رسوب معلق در محل دریچه‌های آبگیر نیروگاه در شرایط مختلف، موضوع اصلی مطالعه باشد. در این حال، ویژگی‌های مربوط به محاسبه‌ی دقیق توزیع قائم غلظت، بیشترین اهمیت را خواهند یافت و مدل مناسب بر اساس چنین مزیت‌هایی جستجو خواهد شد.

اگر مطالعات اولیه نشان دهد که سیلاب‌های شدید منجر به ایجاد جریان غلیظ در مخزن شده و این پدیده نقش مهمی در مسئله‌ی مورد بررسی ایفا می‌کند، آنگاه توانایی شبیه‌سازی جریان غلیظ باید به طور ویژه در انتخاب مدل عددی منظور شود. همه‌ی مدل‌ها، توانایی شبیه‌سازی صحیح این نوع جریان را – که از تفاوت چگالی ناشی می‌شود – ندارند. در رویدادهای جریان غلیظ، به طور معمول رسوبگذاری و فرسایش بستر در مسیر حرکت توده‌ی غلیظ نیز تأثیرگذار و مهم می‌باشد. بنابراین با توجه به چسبنده بودن رسوبات بستر در مخازن، مدل مورد استفاده باید توانایی شبیه‌سازی این فرآیندها را نیز داشته باشد. علاوه بر اینها رفتار جریان غلیظ نیازمند شبیه‌سازی دقیق تفاوت میدان جریان و رسوب در امتداد قائم می‌باشد، در نتیجه برای شبیه‌سازی آن نمی‌توان از مدل یک بعدی طولی استفاده کرد. مدل دو بعدی افقی هم تنها در صورتی قابل استفاده است که تغییرات لازم در آن اعمال شده باشد. مناسب‌ترین انتخاب برای بسیاری از مسائل جریان غلیظ، مدل دو بعدی قائم می‌باشد. اگر تغییرات عرضی و رفتارهای سه بعدی جریان غلیظ قابل صرف نظر نباشند، استفاده از مدل‌های سه بعدی مورد نیاز خواهد بود.

اگر هدف اصلی مطالعه، روند فرسایش بستر و تخلیه‌ی رسوبات نهشته شده در مخزن به وسیله‌ی عملیات رسوبشویی باشد، در این صورت توانایی مدل در شبیه‌سازی فرسایش و لایه‌بندی بستر، نقش اساسی پیدا خواهد کرد. نوع عملیات رسوبشویی مورد مطالعه (رودخانه‌ای و یا تحت فشار) باید در مرحله‌ی تعیین اهداف مطالعه مشخص شود، چرا که توانایی مدل‌ها برای شبیه‌سازی این دو موضوع بسیار متفاوت می‌باشد. امکان شبیه‌سازی فرسایش در روش رسوبشویی تحت فشار به وسیله‌ی شبیه‌سازی عددی وجود دارد، اما هنوز امکان اتکاء به شبیه‌سازی عددی برای عملیات رسوبشویی رودخانه‌ای بسیار محدود و قابل تردید است. برای این نوع مطالعات، انتظارهای موجود از شبیه‌سازی، بر اساس توانایی‌های موجود در مدل‌ها تنظیم خواهد

شد. می‌توان بسیاری از محاسبات مربوط به فرسایش رسوب (مانند فرسایش پس‌رونده آبشاری) را از طریق روابط تجربی تعیین کرد، در حالیکه برای تعیین مشخصات جریان از شبیه‌سازی عددی به صورت حل معادلات بقاء استفاده می‌شود.

ممکن است برآورده کردن نیازهای یک پروژه‌ی خاص، نیازمند شبیه‌سازی سامانه رودخانه – مخزن و یا سامانه چند مخزنی باشد. این نیاز باید در مطالعات اولیه بررسی و روشن شود تا انتخاب مدل مناسب با منظور کردن توانایی‌های مربوط انجام شود.

اجتناب از پیچیدگی و احتراز از شبیه‌سازی جزئیات غیر لازم، نقش مهمی در روند انتخاب نرم‌افزار دارد. انتخاب حداکثر ساده‌سازی متناسب با مسئله در انتخاب مدل و انجام شبیه‌سازی، به موفقیت پروژه و تسریع در انجام مطالعات، کمک شایان خواهد کرد. این رویکرد، مبتنی بر دخالت دادن هر چه بیشتر قضاوت مهندسی در روند مطالعه می‌باشد. از سوی دیگر، به‌کارگیری مدلی که توانایی شبیه‌سازی بعضی از فرآیندهای مهم را نداشته باشد و تلاش برای جبران این نقیصه با روش‌های کمکی جنبی، باعث افزایش زمان مطالعه و کاهش اعتبار نتایج خواهد بود.

یک معیار مهم در انتخاب نرم‌افزار، توجه به میزان اطلاعات قابل دسترس از محیط مطالعه می‌باشد. مدل‌های مختلف از درجه‌ی پیچیدگی متفاوتی برخوردارند و به مقادیر مختلفی از اطلاعات ورودی نیاز دارند. در مطالعاتی که تنها اطلاعات محدودی از منطقه قابل دسترسی است، به‌کارگیری مدل‌هایی که نیازمند اطلاعات ورودی زیادی از محیط حل هستند، نه تنها کمکی به افزایش دقت نتایج نخواهد کرد، بلکه می‌تواند گمراه کننده باشد. در شرایطی که اطلاعات قابل دسترسی کمتر از حد مورد نیاز می‌باشد، انجام حساسیت‌سنجی نسبت به داده‌های محیطی نامشخص یا غیر قطعی لازم خواهد بود.

در مدل‌های عددی از روابط تجربی نیز استفاده می‌شود، روابطی که خود بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات محلی و یا مدل‌های فیزیکی به دست آمده‌اند. توجه به شرایط و محدوده‌ی قابل قبول برای هر رابطه‌ی تجربی، اهمیت زیادی در انتخاب مدل و انتخاب گزینه‌های مختلف موجود در آن دارد. به عنوان مثال نباید از روابط جابجایی رسوب مربوط به شن یا رسوبات ماسه‌ای، برای رسوبات ریزدانه‌ی رسی در یک مخزن استفاده کرد.

با توجه به توضیحات ارائه شده، انتخاب بین مدل‌های یک بعدی، دو بعدی در صفحه‌ی افقی، دو بعدی در صفحه‌ی قائم و یا سه بعدی، کاملا به فرآیندهای فیزیکی‌ای که باید شبیه‌سازی شوند بستگی دارد. کیفیت سؤال‌هایی که باید در طول مطالعه پاسخ داده شوند نیز بر انتخاب مدل تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال ممکن است بتوان در یک پروژه، مجموع ظرفیت مورد نیاز برای دریچه‌های تخلیه‌کننده را به وسیله‌ی شبیه‌سازی یک بعدی طولی مشخص کرد، اما تعیین مناسب‌ترین محل تعبیه و یا نحوه‌ی توزیع آنها در بدنه‌ی سد به وسیله‌ی مدل‌های یک بعدی ممکن نیست. همچنین برای تعیین بهینه‌ترین رقوم تراز دریچه‌های تخلیه، نمی‌توان به مدل‌های یک بعدی یا دو بعدی افقی اکتفا کرد.

تعدادی از مهمترین ساده‌سازی‌ها، که در باره مجاز بودن یا غیر مجاز بودن به کارگیری هر کدام از آنها در شبیه‌سازی یک مسئله خاص باید تصمیم‌گیری شود، در جدول (۵–۲) به صورت فشرده ارائه شده است.

برای مطالعه نمونه‌هایی از روند تصمیم‌گیری و انتخاب نرم‌افزار، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

جدول ۵-۲- تعدادی از معمول‌ترین ساده‌سازی‌ها که مجاز یا غیر مجاز بودن آنها درشبیه‌سازی یک مسئله باید مشخص شود.

حل جریان با مدل یک بعدی طولی	حل رسوب با مدل یک بعدی طولی
حل جریان با مدل دو بعدی در سطح	حل رسوب با مدل دوبعدی در سطح
حل جریان با مدل دوبعدی قائم	حل رسوب با مدل دو بعدی قائم
صرف نظر از اثر تفاوت چگالی بر آشفتگی	حل رسوب با مدل یک بعدی قائم
حل رسوب با روابط تجربی موضعی	هیدرواستاتیک دانستن میدان فشار
حل شبه‌ماندگار میدان جریان	حل شبه‌ماندگار میدان جریان
صرف نظر از فرسایش بستر	صرف نظر از تحکیم بستر
صرف‌نظر از اثر تفاوت چگالی ناشی از تفاوت دما و شوری بر میدان جریان	
صرف‌نظر از اثر تفاوت چگالی ناشی از تفاوت غلظت رسوب معلق بر جریان	

۵-۵ روند انتخاب مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند

تعیین حالت‌های مختلفی که باید پس از برازش مدل‌ها شبیه‌سازی شوند، مرحله‌ی مهمی از انجام یک پروژه‌ی کاربردی است. این کار به معنی تشخیص شرایط مرزی‌ای است که مدل عددی – پس از برازش یافتن – باید برای آنها اجرا شود تا پایه‌ی قضاوت‌های مهندسی و نتیجه‌گیری کاربردی از شبیه‌سازی‌ها را فراهم کند. انجام مناسب این مرحله، نیاز به قضاوت مهندسی، روشن بودن اهداف مطالعه و درک فرآیندهای فیزیکی موثر دارد. مطالعات اولیه، اطلاعات لازم برای تعیین این شرایط را فراهم می‌کند.

پیش از این مرحله، باید مشخص شده باشد که پروژه‌ی پیش رو در انتها باید به چه سؤال‌هایی پاسخ دهد و برای چه تصمیم‌گیری‌هایی اطلاعات آماده کند. مجموعه شرایطی که شبیه‌سازی می‌شوند، باید به گونه‌ای انتخاب شود که تکلیف معیارهای تصمیم‌گیری را به ازاء گزینه‌ها و شرایط مختلف معلوم کند. به عنوان مثال، ممکن است هدف پروژه بررسی روند پیشروی دلتای رسوبی و ارائه‌ی پیشنهاد اصلاحی در باره‌ی شیوه‌ی مدیریت سد به منظور کاهش سرعت پیشروی آن باشد. در این حال، باید بر اساس مطالعات اولیه مشخص کرد که چه شرایطی بیشترین نقش را در پیشروی دلتای رسوبی ایفا می‌کنند و تأثیر گزینه‌های مختلف مدیریت مخزن بر آنها چگونه خواهد بود. اگر هدف پروژه، جستجوی راه حل‌هایی باشد که بتوانند خطر افزایش غیر مجاز غلظت رسوب معلق در محل دریچه‌های آب‌گیر نیروگاه برق‌آبی را کاهش داده و یا مقدار فراوانی وقوع این خطر در طول سال را برآورد کنند، آنگاه در مطالعات اولیه باید شرایطی را جستجو کرد که بیشترین غلظت رسوب در مقابل دریچه‌های مزبور را باعث می‌شوند (احتمالا جریان‌های غلیظ) و تأثیر گزینه‌های مختلف مدیریت مخزن بر آنها را معلوم کرد.

مجموعه حالت‌هایی که باید شبیه‌سازی شوند، به وسیله شرایط مرزی شناخته می‌شوند و برای تنظیم آنها گزینه‌های مختلفی وجود دارد. در این رابطه می‌توان به شبیه‌سازی پیوسته‌ی یک دوره‌ی چند ده ساله، استخراج آبنگار[1] یک سال آماری نمونه و شبیه‌سازی آن، تفکیک رخدادهای سیل از آمار و شبیه‌سازی منقطع آنها و بالاخره شبیه‌سازی چند سیل معرف با دوره‌های بازگشت

1 – Hydrograph

مشخص و آبنگارهای محاسبه شده، اشاره کرد. ممکن است مهمترین سیل‌ها، شدیدترین آنها نباشند. فراوانی بسیار اندک شدیدترین سیل‌ها، اثرهای غیر سازه‌ای درازمدت آنها را کاهش می‌دهد. این‌که هدف شبیه‌سازی، بررسی تغییرات درازمدت ریخت‌شناسی بوده و یا رفتار سیل‌های خاصی مد نظر باشد، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب شبیه‌سازی‌های اصلی و شرایط مرزی آنها دارد.

برای تعیین گزینه‌های مورد بررسی، باید شرایط مرزی ورودی و خروجی مسئله را با دقت بررسی کرد و پردازش‌هایی بر اطلاعات بده آب و رسوب در بالا دست مخزن انجام داد. از جمله باید مشخص کرد که چه سیل‌هایی بیشترین سهم را در آورد رسوب به مخزن دارند. از جمله باید منحنی آورد تجمعی آب[1]، آبنگار سیل‌های طرح با دوره‌های بازگشت معین و بالاخره منحنی آورد سالانه‌ی آب و رسوب برای همه دوره‌ی آماری (جهت بررسی تغییرات درازمدت) را بررسی کرد. اطلاعات آورد رسوب باید به گروه‌های رس، سیلت، ماسه و شن تفکیک شوند. بررسی تاریخچه‌ی تغییرات احتمالی آورد جریان و رسوب و رابطه بین آن دو در محل مرزها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است.

۵-۵-۱ شرایطی که باید برای مطالعات درازمدت ریخت‌شناسی شبیه‌سازی شوند

اگر هدف یک مطالعه، برآورد تغییرات درازمدت ریخت‌شناسی (مورفولوژی) در مخزن و یا تأثیر گزینه‌های مختلف طراحی و مدیریت بر آن باشد، شرایط مرزی بر اساس سهم هر بده جریان – یا هر سیل – در آورد رسوب به مخزن تعیین می‌شود.

اگر شبیه‌سازی یک بعدی برای حل مسئله کافی تشخیص داده شده باشد، به دلیل سرعت زیاد محاسبات، می‌توان دوره‌ی زمانی طولانی‌ای در حد چند ده سال را به طور پیوسته شبیه‌سازی کرد. شرط مرزی بده آب برای چنین دوره‌ای را می‌توان بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در چند ده سال گذشته ایجاد و در صورت نیاز بر اساس پیش‌بینی تغییرات آینده اصلاح کرد. شرط مرزی رسوب برای چنین مسئله‌ای را می‌توان بر اساس روابط بده آب – بده رسوب به‌دست آورد. اثر تغییرات تدریجی شرایط جوی و میزان فرسایش حوضه در طول زمان، باید مد نظر قرار گیرد. در مواردی می‌توان شرط مرزی پیوسته‌ی چندین ساله را بر اساس تکرار آبنگار یک سال آماری نمونه ایجاد کرد.

در بسیاری از مطالعات، برای بررسی تغییرات بلندمدت ریخت‌شناسی، می‌توان از مدل‌های شبه‌ماندگار استفاده کرد تا حجم محاسبات به شدت کاهش یابد. در این حالت می‌توان در آبنگار شرط مرزی جریان ورودی، نوسان‌های جزئی و غیر موثر را حذف کرد. با این کار، تعداد بده‌های محدودی باقی می‌مانند که هر یک به طور مستقل شبیه‌سازی می‌شوند.

آمار مورد استفاده برای تنظیم اطلاعات شرط مرزی، باید دارای طول کافی باشد تا دقت مورد نیاز را تأمین کند. توصیه می‌شود که برای پیش‌بینی تغییرات درازمدت ریخت‌شناسی، طول دوره‌ی آماری مورد استفاده، برابر با طول دوره پیش‌بینی باشد. برای تعیین شرایط حدی با دوره بازگشت معین، طول آمار نباید کمتر از ۳۰٪ دوره بازگشت باشد. این نکته‌ها در مطالعات هیدرولوژیک در نظر گرفته می‌شود و در شبیه‌سازی رسوب مخزن، می‌توان از نتایج آن استفاده کرد.

در صورت شبیه‌سازی با مدل دو یا سه بعدی، به دلیل سرعت کم محاسبات، نمی‌توان یک دوره‌ی چندین ساله را به صورت پیوسته شبیه‌سازی کرد. در این حال می‌توان کل دوره را به قسمت‌های مختلف سیلابی و غیر سیلابی تقسیم کرد. برای دوره‌های

1 – Flow-Duration Curve

زمانی بین سیلاب‌ها می‌توان از مدل‌های شبه‌ماندگار بهره گرفت. شرایط سیلابی را می‌توان با مدل‌ها و شرایط مرزی دقیق‌تر – مانند اطلاعات دوساعته – شبیه‌سازی کرد.

گاهی می‌توان انجام شبیه‌سازی‌های دقیق را با مؤثرترین سیلاب‌ها محدود کرد. برای تشخیص مؤثرترین سیلاب‌ها، می‌توان ابتدا چند شبیه‌سازی یک‌بعدی ساده‌شده انجام داد و نتایج آنها را تحلیل کرد. برای شناسایی سیلاب‌های منجر به جریان غلیظ، می‌توان از روابط تجربی مربوط به آن استفاده کرد. ممکن است مؤثرترین سیلاب‌ها بر اساس فراوانی وقوع یا دوره‌ی بازگشتشان انتخاب شوند. در حالت اخیر، منحنی آبنگار سیل‌ها به عنوان شرط مرزی استفاده می‌شود.

پیش از انجام شبیه‌سازی، می‌توان مشخص کرد که چه سیلاب‌هایی بیشترین سهم را در آورد رسوب به مخزن دارند. روش این کار، استفاده از نمودار "درصد تجمعی آورد رسوب بر حسب بده جریان" می‌باشد (روش تهیه این نمودار، در ادامه ارائه شده است). به طور معمول، محدوده‌ای از نمودار مورد نظر که سهم رسوب را از حدود ۲۵٪ به حدود ۷۵٪ می‌رساند، بیشترین ارزش مطالعه را دارد. می‌توان برای این ناحیه از نمودار، یک یا چند سیل معرف در نظر گرفت. تند بودن شیب این ناحیه، بدان معنی است که گستره‌ی محدودی از سیل‌ها بیشترین نقش را در آورد رسوب به مخزن ایفا می‌کنند.

پس از تعیین سیل‌هایی که باید مورد مطالعه قرار گیرند، امکان ایجاد جریان غلیظ برای آنها بررسی می‌شود. با این کار مشخص می‌شود که آیا فرآیندهای فیزیکی خاص مربوط، باید در شبیه‌سازی‌ها مد نظر قرار گیرند یا خیر. برای این منظور، می‌توان از روابط تجربی مربوط استفاده کرد. برای مشاهده روابط تجربی مطرح شده، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

به دنبال تعیین مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند، روش تحلیل و استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز مشخص می‌شود.

۵-۵-۲ شرایطی که باید برای انواع دیگر مطالعات شبیه‌سازی شوند

در قسمت قبل، روند انتخاب شرایط مرزی معیار برای حالت‌هایی بررسی شد که ملاک انتخاب، سهم بیشتر سیل در آورد رسوب به داخل مخزن باشد. مسائل دیگری وجود دارند که ملاک‌های دیگری برای آنها جوابگو هستند. به عنوان مثال، ممکن است محدودیت غلظت رسوب معلق در دهانه‌ی آبگیر نیروگاه سد مورد نظر باشد. در این صورت، با دانستن حد غلظت و درصد فراوانی غیر مجاز در محل آبگیر، می‌توان رفتار سیلابی با همان فراوانی را مطالعه و شبیه‌سازی کرد. با این کار مشخص می‌شود که بدون تمهید خاص، غلظت رسوب معلق در مقابل دریچه‌ها در آن مدت از سال، نسبت به حد مجاز، بیشتر یا کمتر خواهد بود؟ یک مثال دیگر، کنترل غلظت رسوب در آب خروجی از سد در طی عملیات رسوبشویی – متناسب با محدودیت‌های زیست‌محیطی – است. محدودیت‌های زیست‌محیطی، شامل غلظت و سرعت آب رها شونده و تراز سطح آب رودخانه می‌باشند. در فصل تخم‌ریزی ماهی‌ها، این شاخص‌ها در خود مخزن نیز مهم بوده باید مورد توجه قرار گیرند.

شاخص‌های مربوط به نیازها و مصارف آب مخزن، عامل تأثیرگذار دیگر در تعیین شرایط مرزی محل سد هستند. این اطلاعات، محدوده‌ی آزادی عمل موجود برای بهینه کردن طراحی یا مدیریت مخزن را مشخص می‌کنند. به این جهت، نمودار مصرف آب در طول سال – به صورت منحنی‌های حد بالا و حد پایین – لازم خواهد بود. زمان رخداد سیل نیز بر انتخاب حالت‌هایی که باید شبیه‌سازی شوند، تأثیر می‌گذارد. سیل‌هایی که در ابتدای فصل بارش رخ می‌دهند، به دلیل شرایط سطح حوضه، حاوی رسوبات ریزدانه‌ی بیشتری هستند. منحنی تغییرات تراز سطح آب مخزن در طول سال نیز برای انتخاب دوره‌ی زمانی مطالعه‌ی سیل‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.

۵-۵-۳ تعیین سهم بده‌های مختلف در آورد رسوب سالانه

در طول عمر مخزن، سهم سیلابی با شدت مشخص در میزان آورد رسوب، تنها تابع توانایی آن سیل در جابجایی رسوب نیست. فراوانی وقوع سیل نیز بر سهم آن تأثیر می‌گذارد. به‌طور معمول، بیشترین سهم متعلق به سیل‌های متوسط با فراوانی وقوع متوسط می‌باشد. سیل‌های بسیار شدید، با وجود توانایی حمل رسوب خیلی زیاد، فراوانی وقوع بسیار کمی دارند. این موضوع، سهم آنها در کل آورد رسوب را کم می‌کند. از سوی دیگر، بده‌های خیلی کم، با وجود فراوانی وقوع بسیار زیاد، توانایی حمل رسوب قابل توجهی ندارند.

شناسایی سیلاب‌ها یا بده‌هایی که بیشترین سهم را در آورد رسوب به داخل مخزن سد دارند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در بسیاری از مسائل کاربردی، همین مشخصه تعیین کننده‌ی مجموعه شرایطی است که باید شبیه‌سازی شوند. یک راه مناسب برای شناسایی این سیلاب‌ها، آن است که سهم هر بده جریان در آورد رسوب به مخزن برآورد شود. این کار را می‌توان با ترکیب منحنی‌های "بار رسوب بر حسب بده جریان" و "فراوانی وقوع بده‌های جریان" بر اساس آمار منطقه‌ی مورد مطالعه انجام داد. ماحصل این ترکیب، نمودار جدیدی خواهد بود که بیانگر سهم تجمعی بده‌ها در آورد رسوب سالانه می‌باشد. در چنین نموداری، محور افقی بیانگر بده جریان و محور قائم بیانگر درصد تجمعی آورد رسوب می‌باشد. در این نمودار، هر بده جریان بیانگر یک رویداد کامل سیل نیست، اما می‌توان متوسط روزانه‌ی بده اوج و بده متوسط سیل‌ها را با بده‌های استنتاج شده از نمودار مقایسه کرد تا مؤثرترین سیل‌ها مشخص شوند.

برای تهیه‌ی نمودار سهم تجمعی بده‌ها در آورد رسوب سالانه، از دو نمودار "بده جریان برحسب درصد فراوانی" و "بده رسوب بر حسب بده جریان" استفاده می‌شود. برای انجام محاسبات، می‌توان از نرم‌افزارExcell استفاده کرد. به این منظور، ابتدا دو نمودار نامبرده به صورت جدول تنظیم می‌شوند. مراحل کار، به صورت گام به گام در زیر توضیح داده شده است. توجه به جدول (۵-۳)، پی‌گیری دستورالعمل زیر را ساده‌تر می‌کند.

۱- در ستون اول، دسته‌بندی مناسبی از بده‌های جریان را از کوچک به بزرگ وارد کنید. مقادیر ثبت شده، نشانگر متوسط روزانه‌ی بده آب بر حسب متر مکعب در ثانیه خواهد بود. به طور معمول انتخاب ۲۵ تا ۵۰ دسته کافی می‌باشد.

۲- در ستون دوم، مقدار میانه‌ی هر دسته‌ی ستون اول را ثبت کنید.

۳- درستون سوم، فراوانی متناظر با هر دسته از ستون اول را، بر حسب تعداد شبانه روز در سال، ثبت کنید. این اطلاعات از نمودار فراوانی وقوع جریان به‌دست می‌آید که حاصل پردازش آمار ایستگاه آبسنجی است (متوسط روزانه‌ی جریان). برای تبدیل درصد فراوانی به تعداد شبانه روز در سال، می‌توان مقدار آن را در ۳۶۵ ضرب و بر ۱۰۰ تقسیم کرد.

یادآوری: در ستون اول، دسته‌بندی بده‌ها باید به گونه‌ای باشد که نمودار حاصل از ستون‌های دوم و سوم، به خصوص دو انتهای آن، دقت کافی داشته باشد. انتخاب فواصل خیلی کم برای دسته‌های ستون اول، باعث نامنظم شدن نمودار می‌شود. انتخاب فواصل خیلی زیاد، بعضی از بده‌های اوج مهم را از نمودار حذف می‌کند.

۴- در ستون چهارم، نرخ بار رسوبی متناظر با هر بده جریان (ستون دوم) را ثبت کنید. این اطلاعات، از نمودار بار رسوبی بر حسب بده جریان و یا از رابطه‌ی تجربی متناظر با آن (چند رابطه‌ی $S = a\,Q^b$ برای بده‌های مختلف) به‌دست می‌آید. مقادیر ثبت شده، نشانگر متوسط روزانه‌ی آورد رسوب بر حسب تن در روز خواهد بود.

۵- در ستون پنجم، مجموع آورد رسوب ناشی از هر بده جریان در طی یک دوره‌ی یک ساله محاسبه می‌شود. به این

منظور، مقادیر ستون چهارم را در مقادیر ستون سوم ضرب کنید. ستون پنجم، حاوی مقادیر آورد رسوب ناشی از هر بده جریان در طول یک سال می‌باشد و بر حسب تن (در سال) بیان می‌شود.

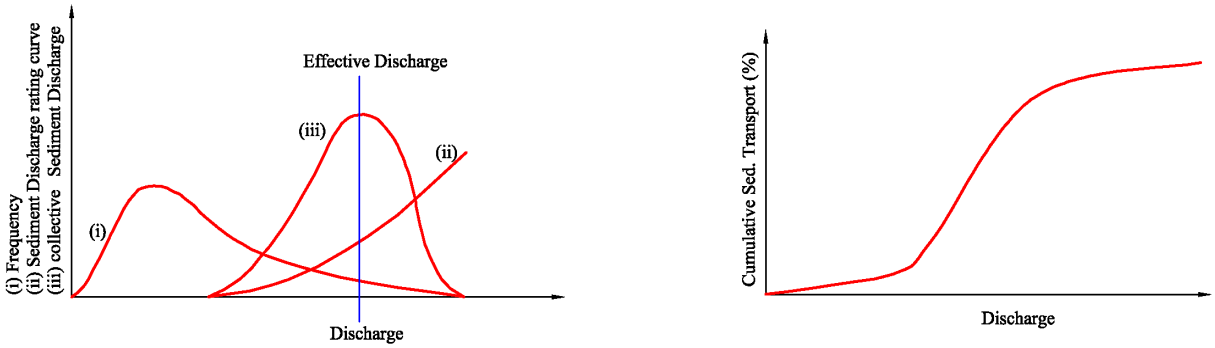
۶- در ستون ششم، مجموع آورد رسوب ناشی از هر بده و بده‌های کمتر از آن را ثبت کنید. به این منظور، در هر ردیف از ستون ششم، مجموع مقدار ثبت شده در همان ردیف و ردیف‌های بالاتر از آن از ستون پنجم را قرار دهید. مقادیر ستون ششم، بر حسب تن (در سال) خواهند بود.

۷- در ستون هفتم، سهم تجمعی هر بده جریان و بده‌های کمتر از آن در کل آورد رسوب سالانه محاسبه می‌شود. به این منظور، مقادیر ستون ششم را بر مقدار پایین‌ترین ردیف همان ستون (که کل آورد رسوب سالانه می‌باشد) تقسیم کنید. مقادیر ستون هفتم، بر حسب درصد خواهند بود.

در نهایت، ستون‌های دوم و هفتم از جدول حاصله، محورهای افقی و عمودی "نمودار تجمعی سهم بده‌ها در آورد رسوب سالانه" را تشکیل می‌دهند. می‌توان نمودار مربوط را در محیط Excell رسم کرد.

منحنی "سهم تجمعی بده‌ها در آورد رسوب سالانه" به طور معمول سه ناحیه‌ی مشخص دارد؛ دو ناحیه‌ی کم‌شیب ابتدایی و انتهایی و یک ناحیه پر شیب میانی (شکل ۵-۱-راست). علت این رفتار، سهم بیشتر بده‌ها و سیل‌های متوسط، در کل آورد رسوب سالانه می‌باشد.

شکل (۵-۱-چپ) یک روش تعیین بده مؤثر جریان رودخانه را نشان می‌دهد که از ترکیب منحنی فراوانی وقوع جریان (i) و منحنی بده رسوب بر حسب بده جریان (ii) به دست می‌آید. این منحنی (iii) نشان دهنده‌ی سهم هر بده جریان در میزان آورد رسوب بوده و مقدار بیشینه‌ی آن بیانگر مقدار بده جریانی است که بیشترین نقش را در آورد رسوب دارد (بده مؤثر).



شکل ۵-۱- نمودار سهم تجمعی آورد رسوب بر حسب بده جریان (ماخذ شکل سمت چپ: Biedenharn and

جدول ۵-۳- جدول راهنمای محاسبه‌ی سهم تجمعی بده‌های مختلف در آورد رسوب به مخزن

1	2	3	4	5	6	7
Range of Q_w	Mid Class	Frequency	Q_s	Qs	Cumulative Qs	Cumulative Qs
m3/s	m3/s	Days (24 hrs)	Tons/day	Ton (/year)	Ton (/year)	%
Daily mean flow	Daily mean flow		Daily mean	=Cul3*Cul4		
0-5	2.5					
5-10	7.5					
...	...					
...	...					

۵-۶ روند تهیه و تکمیل اطلاعات محیطی مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی

تهیه‌ی اطلاعات و پردازش آنها، یکی از مراحل مهم انجام یک پروژه‌ی شبیه‌سازی عددی است. دقت در تأمین و پردازش مناسب داده‌ها در این مرحله، نقش بسزائی در انجام هر چه بهتر مطالعات دارد. اگر اطلاعات مورد نیاز با دقت کافی تنظیم نشوند، نتایج شبیه‌سازی از دقت و ارزش بالایی برخوردار نخواهد بود و زمان لازم برای برازش مدل‌ها و تحلیل حساسیت افزایش خواهد یافت. تهیه و پردازش اطلاعات اضافی غیر مفید و یا تلاش برای رسیدن به اطلاعات با دقت بیش از حد لازم نیز هزینه و زمان انجام کار را بی‌دلیل افزایش خواهد داد.

جمع آوری اطلاعات در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا اطلاعاتی در حد مورد نیاز برای انجام مطالعات اولیه تهیه می‌شود. پس از انجام مطالعات اولیه، درک کامل‌تری از فرآیندها و نیازهای طرح ایجاد می‌شود. در این حال اهداف پروژه، دقت‌های مورد نیاز و انتظارهای موجود از شبیه‌سازی عددی با جزئیات کافی مشخص می‌شوند. در این مرحله، می‌توان فهرست به نسبت دقیق از اطلاعات مورد نیاز و مشخصات آنها را معلوم کرد. فهرست اطلاعات را می‌توان به دو قسمت تفکیک کرد؛ اطلاعات ضروری و اطلاعات مفید. انجام چند شبیه‌سازی اولیه، نقش ارزشمندی در تعیین مشخصات اطلاعات مورد نیاز خواهد داشت. این کار به طرح بهینه اندازه‌گیری‌های محلی نیز کمک می‌کند. با وجود همه گونه دقت در این مرحله، ممکن است در ضمن انجام پروژه نیز کسب اطلاعات اضافی دیگر و یا افزایش دقت بعضی از داده‌ها لازم شود.

اهداف مطالعه و شرایط حاکم بر منطقه، در تعیین اطلاعات محیطی مورد نیاز و مشخصات آنها نقش دارند. در این رابطه می‌توان به محور بودن مخزن یا رودخانه‌های منتهی به آن در مطالعات، چسبنده بودن یا نبودن رسوبات، درازمدت یا کوتاه‌مدت بودن فرآیندهای مورد بررسی، سیلابی یا غیر سیلابی بودن وضعیت مورد مطالعه، اهمیت یا عدم اهمیت جریان غلیظ و بالاخره نقش غالب فرسایش یا رسوبگذاری اشاره کرد.

اصلی‌ترین منابع تهیه‌ی اطلاعات عبارت از سازمان نقشه‌برداری، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، سازمان‌های آب منطقه‌ای، سازمان هواشناسی، شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو، حفاظت خاک وزارت کشاورزی، مقاله‌های کنفرانس‌ها و مجله‌های علمی، پروژه‌های دانشگاهی، مصاحبه با افراد محلی و بالاخره گزارش پروژه‌های دیگر منطقه هستند.

شکل (۵-۲)، یک فرم پیشنهادی برای ثبت مشخصات اولیه‌ی سد و مخزن آن را نشان می‌دهد.

مجموعه اطلاعات محیطی مورد نیاز، در چند گروه قرار می‌گیرند:

۱- اطلاعات پایه
۲- اطلاعات هیدرولوژیکی
۳- اطلاعات هندسه‌ی محیط
۴- اطلاعات مربوط به بدنه‌ی آب
۵- اطلاعات مربوط به بستر
۶- شرایط مرزی

هر یک از دسته‌های نامبرده، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

نام سد:	نام مخزن:	نوع سد:	تاریخ آبگیری:
نام رودخانه یا رودخانه‌های اصلی بالا دست:			عمر مفید (سال):
اهداف سد و سهم هر کدام از حجم مخزن:			

موقعیت جغرافیایی					
		ثانیه	دقیقه	درجه	UTM (WGS84) (Zone Number: .....)
طول:					X (m):
عرض:					Y (m):

طول تاج (متر):	عرض تاج (متر):	ارتفاع سد (متر):
تراز تاج (متر):	تراز اولیه بستر در محل سد (متر):	تغییر تراز رسوب (متر):
تراز نرمال سطح اب (متر):	حداکثر تراز مجاز ابگیری (متر):	حداقل تراز مجاز سطح اب (متر):

مشخصات سرریزها				
تعداد سرریزها:				
	نوع (و دریچه‌دار یا آزاد)	ظرفیت تخلیه (مترمکعب بر ثانیه)	تراز (متر)	موقعیت نسبت به سد
سرریز اول:				
سرریز دوم:				
سرریز سوم:				
سرریز چهارم:				

مشخصات تخلیه‌کننده‌ها و ابگیرها					
تعداد تخلیه‌کننده و آبگیر:					
	تراز (متر)	کاربرد	ظرفیت (مترمکعب بر ثانیه)	موقعیت	مشخصات مجرای اب‌بر (طول، قطر، خم‌ها)
تخلیه‌کننده یا ابگیر اول:					
تخلیه‌کننده یا آبگیر دوم:					
تخلیه‌کننده یا ابگیر سوم:					
تخلیه‌کننده یا ابگیر چهارم:					
تخلیه‌کننده یا ابگیر پنجم:					

مشخصات دریاچه (مخزن)		
حجم اولیه در حداکثر آبگیری (متر مکعب):		حجم مفید مخزن (متر مکعب):
طول مخزن در تراز حداکثر مجاز (کیلومتر):		طول مخزن در حداقل ابگیری معمول (کیلومتر):
بیشترین عرض مخزن (متر):		کمترین عرض مخزن (متر):
بیشترین عمق مخزن (متر):		شیب طولی قبل از ساخت (درصد):
تراز نرمال مخزن (متر):		سطح دریاچه در تراز معمول (کیلومتر مربع):
نسبت حجم مخزن به جریان ورودی سالانه (C/I):		ضریب تله‌اندازی رسوب:
دلتای رسوبی: دارد☐ ندارد☐	فاصله دلتا از سد (کیلومتر):	شیب پیشانی دلتا (درصد):

مشخصات اصلی شرایط حاکم در بالا دست	
متوسط بده سالانه اب (میلیون متر مکب در سال):	متوسط بده سالانه رسوب (میلیون تن در سال):
مساحت حوضه ابریز (کیلومتر مربع):	سهم رس، سیلت و ماسه در اورد رسوب (درصد): و و

شکل ۵-۲- فرم شناسایی مشخصات اصلی سد و مخزن

۵-۶-۱ اطلاعات پایه

اطلاعات پایه، نقش اساسی در درک نوع و ابعاد پروژه ایفا می‌کنند. بررسی دقیق این دسته از اطلاعات، کلید ورود به بقیه‌ی مراحل پروژه است. از جمله همین داده‌ها مشخص می‌کنند که چه میزان صرف هزینه برای مطالعات رسوب طرح، از نظر مهندسی و اقتصادی منطقی خواهد بود.

فهرستی از اطلاعات پایه‌ی مورد نیاز در زیر دیده می‌شوند:

- داده‌های اصلی مربوط به سد و مخزن مانند موقعیت جغرافیایی سد، محدوده‌ی جغرافیایی مخزن، ارتفاع از سطح دریا، ارتفاع بدنه‌ی سد و عرض تاج آن، حجم مفید و حجم مرده‌ی مخزن، تراز سرریز، تعداد آبگیرها، موقعیت و کاربرد و ظرفیت و نوع دریچه‌های هر آبگیر، منحنی حجم مخزن بر حسب تراز آب آن و مشخصات کلی حوضه‌ی آبریز،
- کاربردهای سد (اهداف پروژه)، عمر مفید آن و سهم هر کدام از اهداف در میزان ذخیره‌ی آب مخزن،
- ارزش اقتصادی و اجتماعی پروژه که می‌توان از گزارش‌های امکان‌سنجی استخراج کرد.
- فهرست و مشخصات کارهای قبلی شامل اندازه‌گیری‌ها، مطالعات و گزارش طرح‌های مرتبط دیگر در منطقه. این اطلاعات از طریق سازمان آب منطقه‌ای محل طرح، نهادهای وابسته به وزارت کشاورزی و تحقیقات علمی دانشگاهی قابل پی‌گیری است.
- نقشه‌های منطقه از جمله نقشه‌های پوششی ۱:۵۰۰۰۰ یا ۱:۲۵۰۰۰. لازم است که حوضه‌ی آبریز، محل بدنه‌ی سد، محدوده‌ی مخزن، رودخانه‌ی بالا دست و پایین دست به همراه سیلاب‌دشت‌ها و شاخه‌های فرعی، ایستگاه‌های آبسنجی و رسوبسنجی، مرزهای ورود و خروج آب و رسوب و هرگونه عوارض مؤثر دیگر بر روی نقشه‌های مناسب مشخص شوند. در مراحل بعد، محدوده‌ی شبیه‌سازی عددی، محدوده‌ای از شاخه‌های فرعی که باید بررسی شوند، مرزهای ورودی و خروجی و نقاط برازش نیز بر روی نقشه‌ها مشخص خواهند شد. نرم‌افزارهای مبتنی بر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در این مرحله قابل استفاده‌اند. تصاویر ماهواره‌ای و هوایی منطقه در سال‌های مختلف، برای درک بهتر شرایط منطقه در مقیاس‌های عمومی و محلی، مفید خواهند بود.
- نیمرخ طولی مخزن و رودخانه‌ی منتهی به آن (حداقل با طولی معادل طول مخزن) و نیمرخ عرضی مخزن در قسمت‌های مختلف،
- فهرست ایستگاه‌های آبسنجی و رسوبسنجی موجود در منطقه و مشخصات هر ایستگاه از جمله موقعیت جغرافیایی، عمر، درجه‌بندی و تجهیزات. نتایج پردازش‌های قبلی اطلاعات، مانند رابطه‌ی بار و غلظت رسوب با بده جریان، تهیه شود.
- فهرست ایستگاه‌های هواشناسی منطقه و مشخصات آنها مانند موقعیت جغرافیایی، عمر، درجه‌بندی، تجهیزات، نحوه‌ی برداشت اطلاعات، و تاریخچه،
- نقشه‌های خاک‌شناسی منطقه با تعیین محل سد و محدوده‌ی مخزن. احتمال ریزش خاک به داخل مخزن بررسی شود.
- اطلاعات پایه‌ی زیست‌محیطی منطقه، نیازها و آسیب‌پذیری‌های آن (از جمله میزان تحمل گونه‌های مختلف در مقابل غلظت رسوب و مشخصه‌های کیفی آب) و وجود مناطق حفاظت‌شده‌ی احتمالی،
- وجود سازه‌ها یا طرح‌های تأثیر گذار یا تأثیر پذیر خاص در بالا دست یا پایین دست سد،
- بازدید میدانی از محدوده‌ی مورد مطالعه و رودخانه‌ی بالا دست و پایین دست آن با دقت به ریخت‌شناسی، سازه‌های موثر، مشخصات رسوب در نواحی مختلف، شاخه‌های فرعی و نشانه‌های فرسایش یا رسوبگذاری مداوم کلی یا محلی،

- کسب اطلاعات توصیفی از افراد خبره محلی مانند کارشناسان مقیم و افراد سالخورده، شامل مشاهدات مربوط به سیلاب‌های خاص، فاصله‌ی شروع بارندگی تا رسیدن سیل و تاریخچه فرسایش و رسوبگذاری محسوس،
- کسب اطلاعات از پایگاه‌های جغرافیایی رایانه‌ای اینترنت.

۵-۶-۲ اطلاعات هیدرولوژیکی

مرجع اصلی اطلاعات هیدرولوژیکی، مؤسسه‌های وابسته به وزارت جهاد کشاورزی از جمله موسسه‌ی حفاظت خاک و مرکز تحقیقات آبخیزداری هستند. مطالعات هیدرولوژیکی سد، پیش از مطالعات دقیق رسوب مخزن انجام می‌شود. بنابراین اطلاعات لازم از گزارش‌های مربوط قابل استخراج است.

در ادامه، فهرستی از اطلاعات هیدرولوژیکی مورد نیاز برای یک پروژه‌ی رسوب مخزن ارائه می‌شود.

- نسبت ظرفیت مخزن به کل آورد سالانه‌ی آب و بازده تله‌اندازی رسوب توسط مخزن،
- مشخصات اصلی حوضه، شامل مساحت، شیب، طول و زمان تأخیر،
- آورد سالانه‌ی آب و رسوب، میزان فرسایش حوضه و منحنی تغییرات جریان در طول دوره‌ی آماری گذشته،
- کل رسوب وارد شونده به مخزن در طول عمر مفید آن به تفکیک جنس رسوبات،
- روند کاهش حجم مخزن و رابطه‌ی کاهش ظرفیت مخزن بر حسب تراز بستر،
- منحنی عملکرد تراز سطح آب مخزن در طی سال تغییرات آتی با توجه به بالا آمدن تراز بستر،
- منحنی‌های آبنگار سیل‌ها و سهم برف و باران در آنها،
- نمودارهای فراوانی بده جریان در ایستگاه‌های آبسنجی و منحنی‌های بده – اشل،
- نتایج مطالعات فرسایش حوضه هم در مقیاس دراز مدت و هم برای بارش‌ها و سیل‌های خاص،
- انواع فرسایش حوضه، تیپ خاک و سهم جنس‌های مختلف رسوب در فرسایش،
- کنترل وجود فرسایش مداوم یا تغییرات تدریجی درازمدت در آورد آب و/یا رسوب، دانه‌بندی رسوب بستر و یا غلظت رسوب معلق در بده‌های مشابه (جهت تشخیص وجود شرایط انتقالی در رودخانه بالا دست)،
- کنترل وجود برنامه‌های مؤثر بر آورد آب یا رسوب در آینده، مانند تغییر کاربری اراضی یا احداث سد یا آبگیر جدید،
- خلاصه و نتیجه‌ی مطالعات هیدرولوژی در رابطه با سابقه کاربری اراضی در حوضه و تغییر احتمالی سهم انواع مختلف فرسایش در طول زمان،
- اطلاعات هواشناسی منطقه مانند وضعیت بارش، دمای هوا و روند تغییرات این دو در طول سال،
- اطلاعات جوی تفصیلی شامل دما، تبخیر، باد و تابش برای دوره زمانی کافی در صورت لایه‌بندی چگالی در مخزن،
- مشخصات تغییرات جوی دوره‌ای (چند ساله) و اثر تغییرات جدید ناشی از گرم‌تر شدن جو زمین،
- سابقه طوفان‌های بسیار شدید که می‌تواند رفتار هیدرولوژیکی حوضه را تا چند سال تحت تأثیر قرار دهد (به کارگیری و تعمیم اطلاعات محیطی سال‌های انتقالی بعد از طوفان‌های نادر، باید با احتیاط همراه باشد.)،

- نمودار سابقه آورد سالانه‌ی رسوب، حدودا به اندازه عمر مفید سد (اگر این نمودار روند افزایشی یا کاهشی پیوسته‌ای را نشان ندهد، رودخانه از نظر رسوبی در شرایط پایدار قرار دارد.)،
- کنترل نشانه‌های خاص در رودخانه‌ی بالا دست، مانند افزایش یا کاهش تدریجی تراز بستر، متوسط سطح آب در بده پایه طی چند سال، فرسایش یا شکل‌گیری سیلاب‌دشت، تغییر مقاطع رودخانه و علائم فرسایش مداوم.

۳-۶-۵ اطلاعات هندسه‌ی محیط

اطلاعات هندسه‌ی بستر یا مقاطع عرضی مسیر (برای رودخانه یا مخزن باریک) در یک یا چند تاریخ، برای شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب و برای قضاوت‌های مهندسی لازم می‌باشد. اگر سال‌های زیادی از عمر سد گذشته باشد، می‌توان اطلاعات بسیار با ارزشی از بررسی و مقایسه تغییرات این گونه داده‌ها به دست آورد. مشخصات هندسی لازم عبارتند از:

- هندسه‌ی مرزها،
- مشخصات هندسی بستر مخزن[1] یا ناحیه‌ای که زیر آب خواهد رفت[2]،
- مقاطع عرضی و نیمرخ طولی در رودخانه‌ی بالا دست و پایین دست و محل مخزن.

در صورت کفایت شبیه‌سازی یک بعدی در مطالعات، می‌توان در محدوده‌ی مخزن نیز به نیمرخ‌های عرضی و طولی اکتفا کرد. برای کنترل صحت و دقت اطلاعات وارد شده به مدل، منحنی حجم – تراز بر حسب تراز بستر در شبکه‌ی محاسباتی رسم شده و با محاسبات قبلی مقایسه می‌شود. خطوط همتراز نقشه‌ها نیز با اطلاعات عمق در شبکه محاسباتی مقایسه می‌شود.

محدوده شبیه‌سازی، متناسب با بالاترین تراز سطح آب، تعیین می‌شود. طول ناحیه انتخاب شده از رودخانه‌ی بالا دست، حد اقل باید معادل طول مخزن باشد، مگر این که شرایط خاص پروژه ابعاد دیگری را ایجاب کند (مثلا محل ایستگاه رسوبسنجی). اگر مطالعه رودخانه‌ی پایین دست مد نظر باشد، اهداف مطالعه تعیین کننده خواهد بود (مانند بررسی تأثیر سد بر یک آبگیر کشاورزی، سد تنظیمی یا زیست‌گاه خاص). در غیر این صورت، تمام طولی که از سد تأثیر می‌گیرد، لازم خواهد بود.

توصیه می‌شود برای مخازن قدیمی، تغییرات هندسه بستر در سال‌های مختلف و پیش از آبگیری بررسی شود. از این راه می‌توان رسوبگذاری در قسمت‌های مختلف، تغییر سرعت رسوبگذاری یا فرسایش در ضمن افزایش عمر مخزن و بالاخره مقدار کل رسوب ورودی به مخزن (با در نظر گرفتن خروجی‌های احتمالی) را مطالعه کرد. چنین مقایسه‌ای، هم برای قضاوت مهندسی و هم برای برازش و واسنجی مدل، مفید خواهد بود. مقایسه‌ی نیمرخ‌های طولی سال‌های مختلف نیز می‌تواند روند شکل‌گیری و پیشروی دلتای رسوبی را مشخص کند. سابقه عملیات رسوبزدایی احتمالی نیز باید در تحلیل تفاوت‌ها مورد توجه قرار گیرد.

توصیه می‌شود نیمرخ‌های طولی و عرضی در رودخانه‌های بالا دست و پایین دست سد نیز در سال‌های مختلف مقایسه شود. این کار محدوده تأثیر سد را مشخص می‌کند. تغییر مداوم تراز بستر در رودخانه‌ی بالا دست و فرسایش یا توسعه‌ی مداوم سیلاب‌دشت‌ها، نشانگر عدم رسیدن به شرایط تعادلی است.

---

1 – Hydrography
2– Topography

در باره‌ی روش‌های برداشت هندسه‌ی بستر رودخانه و مخزن سد و دقت‌ها و مقیاس‌های مناسب، به راهنماهای مربوط مانند "راهنمای نقشه‌برداری و هیدروگرافی در کارهای مهندسی رودخانه" و "راهنمای عمق‌یابی مخازن سدها" از دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو مراجعه شود.

دقت عملیات عمق‌سنجی در مخازن سدها، به طور معمول متناسب با مقیاس ۱:۲۰۰۰ انجام می‌شود. این مقیاس، معادل یک پرونده‌ی رقومی از نوع نمایش (DEM) با سلول‌های ۵۰ متری است. دقت چنین نقشه‌هایی به طور معمول برای شبیه سازی عددی کافی است. برای مخازن خیلی بزرگ، در مواردی مقیاس ۱:۵۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰ نیز می‌تواند راهگشا باشد. برای شبیه‌سازی جزئیات رفتار جریان و رسوب در اطراف دریچه‌های آبگیر، می‌توان نقشه‌های اجرایی یا نقشه‌های "چونساخت" این سازه‌ها را استفاده کرد. آنها مقیاسی دقیق‌تر از ۱:۵۰۰ دارند. محدوده‌ی فرسایشی اطراف دریچه‌های تخلیه، با دقتی بیش از محدوده‌ی کلی مخزن برداشت می‌شود. در نواحی باریک و کشیده‌ی مخزن – جایی که مخزن به رودخانه می‌رسد – برداشت به صورت مقاطع عرضی انجام می‌شود. در این ناحیه، نیمرخ طولی خط القعر مسیر نیز باید برداشت شود.

برای مطالعه یک سد جدید و یا افزایش تراز سد موجود، از نقشه‌های هندسه‌ی زمین[1] نیز استفاده می‌شود. مرجع اصلی این اطلاعات، سازمان نقشه‌برداری ایران است. این نقشه‌ها قسمت‌های زیر آب را پوشش نمی‌دهند، بنابراین اطلاعات نقشه‌های هندسه‌ی زمین با اطلاعات نقشه‌های هندسه‌ی بستر ترکیب می‌شود. دقت نقشه‌های پوششی ایران ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ است که برای مطالعات اولیه کافی می‌باشد، اما برای شبیه‌سازی عددی کافی نیست. نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ به ترتیب برای تأمین پرونده‌های رقومی از نوع نمایش (DEM) با سلول‌های ۱ کیلومتری و ۵۰۰ متری قابل استفاده هستند. نقشه‌های پوششی ۱:۵۰۰۰۰ با استفاده از عکس‌های هوایی پوششی دهه‌ی ۱۳۴۰ تهیه شده‌اند که خود مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ دارند. نقشه‌های پوششی ۱:۲۵۰۰۰ براساس عکس‌های هوایی پوششی دهه‌ی ۱۳۷۰ تهیه می‌شوند که مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ دارند.

اگر دریاچه‌ی سد کشیدگی زیادی نداشته باشد، نقشه‌هایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰ برای تأمین نیازهای شبیه‌سازی کافی هستند. در هر حال، پستی و بلندی‌های مؤثر بستر باید در برداشت‌ها دیده شوند. در قسمت‌های باریک و کشیده و در رودخانه‌های بالا دست و پایین دست، ارائه‌ی یک مقیاس برای هر دو امتداد طولی و عرضی منطقی نیست. برای نیمرخ طولی، از مقیاس ۱:۱۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰ و برای نیمرخ عرضی، از مقیاس ۱:۵۰۰ تا ۱:۲۰۰۰ استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، ماهواره‌های تصویری (با سامانه برداشت Stereo) و ماهواره‌های راداری[2] مختلفی به فضا پرتاب شده‌اند که اطلاعات هندسی نواحی خارج از آب را با دقت کافی در اختیار می‌گذارند. به عنوان نمونه، ماهواره‌های IKONOS و AIRSAR به طور مداوم این داده‌ها را در قالب نمایش (DEM) با اندازه‌های پیکسل به ترتیب ۶ و ۵ متری برداشت کرده و در سامانه مختصات جغرافیایی WGS84 ارائه می‌کنند. سازمان سنجش از راه دور، مرجع مناسبی برای پی‌گیری این گونه اطلاعات است. در نواحی باریک مخزن، برداشت مقاطع عرضی اجتناب ناپذیر می‌باشد.

برداشت هندسه‌ی بستر دریاچه، به طور معمول با سامانه‌های مبتنی بر ارسال و انعکاس امواج صوتی در آب انجام می‌شود. خطای برداشت این دستگاه‌ها، کمتر از آن است که بتواند برای مطالعات مخزن مشکلی ایجاد کند. البته معرفی دمای آب به

1- Topography

2- Radar Altimetry

دستگاه باید با دقت انجام شود، زیرا ممکن است مقدار دما در عمق‌های مختلف، تفاوت داشته باشد. این نوع خطا در عمق‌های زیاد تأثیر چندانی بر نتایج شبیه‌سازی ندارد، اما می‌تواند برای مقایسه‌ی هندسه‌ی بستر در سال‌های مختلف اشکال ایجاد کند.

ممکن است در ضمن عملیات عمق‌سنجی، بتوان با به کارگیری سامانه‌های دارای چند فرکانس، اطلاعاتی در باره‌ی ضخامت لایه‌ی رسوبی نهشته شده بر کف مخزن به‌دست آورد. این امکان باید در زمان سفارش عملیات عمق‌سنجی بررسی شود. مشخصات جنس بستر و ضخامت لایه‌ی رسوبی، در امکان یا عدم امکان انجام چنین سنجش‌هایی مؤثر است.

برای شبیه‌سازی یک دوره‌ی چندین ساله، اثر متقابل تغییر هندسه‌ی بستر بر میدان جریان و رسوب در طی عمر مخزن باید منظور شود. محل و شیب دلتای رسوبی، شدت تغییر شیب در پای دلتا و فاصله آبگیرهای سد از بستر بر میدان جریان و رسوب تأثیر می‌گذارند. به دلیل تغییر این مشخصات در طول عمر سد، تأثیر یک سیل مشابه بر مخزن، در طول عمر سد یکسان باقی نمی‌ماند. بنابراین تأثیر سیل در هر دوره از عمر مخزن، باید با توجه به شرایط هندسی بستر در همان زمان مطالعه شود.

تاریخ عمق‌سنجی مورد استفاده در برازش مدل، باید تا حد امکان نزدیک به زمان انجام اندازه‌گیری‌های محیطی باشد (در مقیاس سال). در غیر این صورت ممکن است نتایج شبیه‌سازی‌ها گمراه کننده باشند. اگر چند دوره عمق‌سنجی از سال‌های گذشته در دست باشد، می‌توان یک تخمین اولیه از سرعت تغییر هندسه‌ی بستر از جمله سرعت پیشروی دلتای رسوبی به دست آورد. با این کار مشخص می‌شود که حداکثر چه میزان فاصله‌ی زمانی بین عمق‌سنجی و اندازه‌گیری‌های محیطی دیگر، قابل قبول است.

اطلاعات هندسه بستر، از طریق سازمان آب منطقه‌ای محل سد قابل تهیه است.

۵-۶-۴ اطلاعات مربوط به بدنه‌ی آب

کاربرد اصلی این دسته از اطلاعات محیطی، برازش و واسنجی مدل عددی است. آنها برای تنظیم شرایط اولیه نیز استفاده می‌شوند. این اطلاعات برای قضاوت مهندسی نیز لازم است.

مهمترین اطلاعات محیطی مربوط به بدنه‌ی آب مخزن (و رودخانه متصل به آن در صورت مطالعه)، عبارتند از:

- سرعت جریان
- غلظت رسوبات معلق
- طیف دانه‌بندی رسوبات معلق
- سرعت سقوط ذرات
- کدورت
- دما
- شوری
- هدایت الکتریکی

در فهرست فوق، غلظت و دانه‌بندی رسوبات معلق و کدورت آب، برای برازش و واسنجی مدل‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سرعت سقوط یا ضرایب آن، جزء اطلاعات ورودی به مدل می‌باشد که می‌تواند به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده و یا بر اساس کمیت‌های دیگر، مانند غلظت و طیف دانه‌بندی رسوبات، محاسبه شود. سرعت سقوط رسوبات بسیار ریز، تنها با اندازه‌گیری مستقیم تأمین می‌شود (در واقع دانه‌بندی این نوع رسوبات از سرعت سقوط به دست می‌آید). دما و شوری آب به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی می‌شوند و در صورت تأثیر بر میدان جریان یا رسوب، برای ادامه‌ی کار شبیه‌سازی می‌شوند. سنجش هدایت الکتریکی در کنار اندازه‌گیری دما برای محاسبه‌ی شوری به‌کار می‌رود، زیرا شوری به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود.

دقت سنجش دستگاه‌هایی که امروزه برای اندازه‌گیری مشخصه‌های مطرح شده استفاده می‌شود، بیش از دقت مورد نیاز برای مطالعات است. نام و دقت دستگاه‌ها، باید به همراه اطلاعات برداشت شده قید شود.

سنجش مستقیم غلظت رسوب معلق در همه مکان‌ها و زمان‌های مفید، مشکل است. برای حل این مشکل، از سنجش کدورت آب استفاده می‌شود. برای تعیین رابطه‌ی بین این دو، در کنار تعداد زیادی کدورت سنجی، تعداد کمی نمونه‌برداری آب و سنجش مستقیم غلظت انجام می‌شود. در بیشتر موارد نمی‌توان رابطه‌ی دقیقی بین کدورت آب و غلظت رسوب معلق به دست آورد. توصیه می‌شود که تعداد سنجش‌های مستقیم غلظت رسوب معلق – به‌خصوص در مهمترین نقاط و شرایط – تا حد ممکن افزایش یابد.

هزینه بالای عملیات اندازه‌گیری محلی، تعداد سنجش‌ها را محدود می‌کند. بنابراین طراحی بهینه توزیع مکانی و زمانی سنجش‌ها مهم است. چنین طرحی تحت تأثیر شرایط مورد مطالعه (عادی، سیلابی یا جریان غلیظ) نیز قرار دارد.

شرایط و زمان برداشت اطلاعات، بر اساس شرایط مسئله و نیازهای شبیه‌سازی تنظیم می‌شود. برای شبیه‌سازی رفتار سیل یا جریان غلیظ، عملیات اندازه‌گیری باید در شرایط وقوع همان پدیده انجام شود. برای شبیه‌سازی درازمدت میدان جریان و رسوب، ترکیبی از نتایج اندازه‌گیری در شرایط مختلف مناسب است. برای برازش و واسنجی مدل‌های ریخت‌شناسی، باید علاوه بر توجه به شاخص‌های سنجش شده در بدنه آب، به بررسی میزان سازگاری تغییر هندسه بستر بین نتایج شبیه‌سازی و واقعیت در سال‌های مختلف پرداخت. تغییر واقعی هندسه بستر، از راه مقایسه نقشه‌های هندسه‌ی بستر در سال‌های مختلف به دست می‌آید.

در شرایط سیلابی، به دلیل تغییر سریع مقدار مشخصه‌ها، فاصله‌ی زمانی سنجش‌ها کمتر از شرایط عادی است. در این حال تراکم سنجش‌ها بر اساس طول دوره‌ی آبنگار سیل و امکانات اندازه‌گیری موجود تنظیم می‌شود. معیار انتخاب، آن است که بتوان بر اساس سنجش‌های انجام شده، آبنگار سیل را با دقت کافی رسم کرد. حداقل ۷ تا ۱۰ بار سنجش در طول مدت سیل لازم می‌باشد. برای تعیین سرعت پیشروی توده‌ی غلیظ، باید در چند نقطه از مسیر پیشروی آن، حداقل یکی از کمیت‌های آشکار ساز (مانند کدورت یا سرعت در نزدیکی بستر) را به صورت پیوسته (در زمان) اندازه‌گیری کرد.

موقعیت نقاط اندازه‌گیری در طول مخزن، بر اساس شرایط مسئله و نیازهای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. حساسیت میدان جریان و رسوب نسبت به اطلاعات ورودی، در نقاط مختلف یکسان نیست. اندازه‌گیری‌ها باید مناطق حساس و مورد توجه را پوشش داده و فرآیندهای مهم را آشکار کند. انجام چند شبیه‌سازی مقدماتی و تحلیل حساسیت، برای انتخاب بهترین نقاط اندازه‌گیری مفید است. تعدادی از نقاط مهم عبارتند از: مرز بالا دست محدوده شبیه‌سازی، محل ریزش جریان غلیظ به عمق آب، محل دلتای رسوبی، محل تغییر ناگهانی عرض یا عمق، نزدیک بدنه‌ی سد و دریچه‌های تخلیه.

توزیع عرضی نقاط اندازه‌گیری نیز مهم است. در شرایط نزدیک به رفتار یک‌بعدی، معیارهای توزیع عرضی (و قائم) سنجش در رودخانه قابل استفاده هستند، اما در مسائل دوبعدی افقی، شناخت شکل عمومی جریان اجتناب ناپذیر است. در نزدیک دریچه‌های تخلیه و سرریزها، به ازاء بده‌های مختلف، طرح‌های متنوعی از گردابه‌ها و نواحی ساکن به وجود می‌آیند. به علاوه ممکن است شکل جریان سطحی و جریان عمقی یکسان نباشد، به خصوص در نزدیکی سرریزها. رفتار جریان در شرایط سیلابی و عادی نیز یکسان نیست.

اطلاعات محیطی در عمق‌های مختلفی برداشت می‌شوند تا نیمرخ قائم تغییرات آنها نیز مشخص شود. چگونگی توزیع

اطلاعات در عمق، تابع مسئله‌ی مورد بررسی و فرآیندهای فیزیکی مؤثر می‌باشد. اگر تغییرات قائم در مخزن شدید نباشد، برای بررسی رفتار جریان، انجام سنجش در پنج یا شش عمق با توزیع به طور نسبی یکنواخت کافی است. در شرایط عادی می‌توان اندازه‌گیری‌های سرعت جریان را در فاصله ۲ متر زیر سطح آب و عمق‌های ۰/۲، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۹۵ از ستون آب انجام داد. توصیه می‌شود که فاصله‌ی نقاط برداشت در امتداد قائم از ۱۰ متر بیشتر نشود. برای سنجش غلظت رسوبات معلق، انجام چند برداشت بیشتر در نزدیکی بستر لازم است. در شرایطی که جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی قابل توجه باشند، تراکم سنجش‌ها در عمقی که احتمالا مرز بین دو لایه است، بیشتر انتخاب می‌شود. در این حال، فاصله‌ی نقاط سنجش متوالی، به اندازه‌ای کم در نظر گرفته می‌شود که در دقت آشکارسازی محل مرز دو لایه، تردیدی وجود نداشته باشد. برای سنجش رفتار جریان غلیظ، باید حدود نیمی از سنجش‌های سرعت و غلظت را در یک‌سوم زیرین ستون آب متمرکز کرد. حداکثر فاصله‌ی بین نقاط در امتداد قائم، تابع دقت مورد نیاز برای سنجش ضخامت لایه‌ی غلیظ خواهد بود. یک توصیه‌ی کلی برای سنجش سرعت در شرایط وقوع جریان غلیظ، اندازه‌گیری در ده نقطه با فواصل یک تا دو متری در نزدیک بستر، به همراه سنجش در عمق‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ از ستون آب می‌باشد.

توصیه می‌شود برای سنجش توزیع سرعت در عمق، از دستگاه ADCP[1] استفاده شود. انواعی از این دستگاه را می‌توان به قایق نصب و با حرکت در سطح مخزن، نیمرخ قائم سرعت را با دقت و تراکم کافی در مسیر حرکت، برداشت کرد. برای این منظور انواع دیگری از دستگاه‌های کارآمد جدید نیز وجود دارند.

برای سنجش مستقیم غلظت رسوب معلق، باید نمونه‌هایی از آب برداشت کرد. روش نمونه‌برداری از آب، استانداردهای خاص خود را دارد. در این رابطه، مراجعه به نشریه‌های دیگر دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی توصیه می‌شود. با استفاده از نمونه‌های آب برداشت شده، علاوه بر غلظت کلی رسوبات معلق، دانه‌بندی آنها و توزیع غلظت بر حسب دانه‌بندی نیز سنجش می‌شود. این نوع داده‌ها برای همه نوع شرایط (عادی، سیلابی و جریان غلیظ) مهم هستند. در شرایط جریان غلیظ، از چنین داده‌هایی علاوه بر برازش و صحت‌سنجی مدل‌ها، به طور مستقیم نیز در شناسایی وقوع فرسایش در مسیر حرکت استفاده می‌شود. در شرایط وقوع جریان غلیظ، سنجش نیمرخ قائم کدورت آب، کمک زیادی به تشخیص ضخامت توده‌ی غلیظ در هر محل در طول مدت سیل می‌کند.

در هنگام انجام اندازه‌گیری، نباید به سنجش لحظه‌ای سرعت یا غلظت اکتفا کرد، بلکه باید دستگاه را به مدت کافی نگاه داشت و متوسط داده‌ها را سنجید تا اثر نوسان‌های غیر مهم و گردابه‌های احتمالی کوچک‌مقیاس گذرا که به عنوان آشفتگی قلمداد می‌شوند، حذف شود. با استفاده از اندازه گیری سرعت‌های لحظه‌ای می‌توان تنش‌های رینولدز مربوط به اغتشاش جریان را در مخزن محاسبه کرد. این اطلاعات را می‌توان برای برازش شبیه‌سازی اغتشاش در مدل عددی استفاده کرد. همگن بودن یا غیر همگن بودن رفتار اغتشاش در مکان‌های خاص مخزن نیز با استفاده از این داده‌ها قابل بررسی است.

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در هر گره محاسباتی و در هر لحظه، نماینده‌ی رفتار در تمام یک سلول محاسباتی بوده و محدوده‌ای از اطراف آن نقطه را نیز دربر می‌گیرد. از نظر زمانی هم – با توجه به روش به‌کار رفته برای حل اثر آشفتگی جریان در مدل‌های عددی و فاصله‌ی گره‌های محاسباتی و طول گام‌های زمانی – نتایج به‌دست آمده لحظه‌ای نیست، بلکه متوسط

1 – Acoustic Doppler Current Profiler

مدتی از زمان را نشان می‌دهد که می‌تواند بین چندین ثانیه تا چندین دقیقه باشد. این موضوع را باید در هنگام مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری، در نظر گرفت. اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای، بر خلاف نتایج شبیه‌سازی، تنها به یک نقطه از مکان محدود می‌باشند.

۵-۶-۵ اطلاعات مربوط به بستر

اطلاعات مربوط به بستر محیط حل، نحوه‌ی تعامل بستر مخزن و رودخانه با جریان آب را مشخص می‌سازند. محاسبات فرسایش بستر، کاملا وابسته به چنین داده‌هایی است. بیشتر اطلاعات مربوط به بستر، به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری محیطی مشخص شده و جزء اطلاعات ورودی به مدل محسوب می‌شوند. در عین حال از آنها برای برازش مدل به‌کار گرفته می‌شوند.

مهمترین اطلاعات محیطی مربوط به بستر، عبارتند از:

- دانه‌بندی رسوبات بستر
- وزن مخصوص رسوبات
- جنس
- چسبنده بودن یا نبودن
- لایه‌بندی بستر چسبنده
- درجه‌ی تحکیم هر لایه
- تنش آستانه‌ی فرسایش
- تنش آستانه‌ی رسوبگذاری
- جوشنی شدگی بستر (آرمورینگ)
- زبری
- وجود پوشش گیاهی

بیشتر داده‌های فهرست فوق، به‌وسیله‌ی برداشت نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده از بستر و بررسی آنها در آزمایشگاه تهیه می‌شود. وجود بیش از ۱۰٪ رس در رسوب، باعث چسبندگی آن خواهد بود. در بستر با رسوب چسبنده، مشخصات رسوب در عمق‌های مختلف زیر سطح بستر – حتی در حد چند ده سانتیمتر – می‌تواند تغییرات زیادی داشته باشد. بنابراین مشخصات بستر چسبنده باید بر اساس لایه‌بندی آن تنظیم شود. تعداد لایه‌ها و ضخامت هر لایه، جزء اطلاعات ورودی به مدل است و با بررسی ستون نمونه رسوب دست نخورده تعیین می‌شود.

سنجش دانه‌بندی رسوبات بستر و وزن مخصوص آن، باید در قسمت‌های مختلف مخزن و رودخانه‌ی بالا دست و پایین دست آن انجام شود. اطلاعات دانه‌بندی بستر در هر محل، باید نماینده‌ی ناحیه‌ای از آن محل و اطراف آن (در حد فاصله گره‌ها) باشد. دانه‌بندی رسوب در نزدیکی سواحل دریاچه‌ی سد، نماینده‌ی مناسبی از قسمت‌های میانی مخزن نیست. می‌توان در قسمتی از رودخانه‌ی بالا دست که تحت تأثیر مخزن قرار نمی‌گیرد، فاصله‌ی نمونه‌برداری‌ها را بین یک تا پنج کیلومتر انتخاب کرد (با حداقل سه برداشت در عرض هر مقطع). در قسمت‌هایی از مخزن که فعالیت رسوبگذاری و فرسایش یا تغییرات جنس بستر زیاد باشد، این فاصله به ۱۰ تا ۱۰۰ متر کاهش می‌یابد.

دانه‌بندی بستر، پس از شروع بهره‌برداری از مخازن جدید، تغییر می‌کند. اگر نمونه‌برداری از رسوبات بستر، پیش از احداث مخزن یا در اوایل عمر آن انجام شده باشد، نمی‌توان مشخصه‌های آن را نماینده‌ی وضعیت بستر در طی تمام سال‌های بهره‌برداری دانست. جنس رسوب بیشتر مخازن، از نوع چسبنده است.

تنش‌های آستانه فرسایش و رسوبگذاری (برای رسوبات چسبنده)، نقش کلیدی در تعیین میزان رسوبگذاری و فرسایش ایفا می‌کنند. این دو مشخصه، در عمق‌های مختلف زیر سطح بستر، مقادیر متفاوتی دارند. جریان آب پس از شستن لایه‌ی چند

سانتیمتری فوقانی، با لایه‌های سخت‌تری مواجه می‌شود. مقدار این دو شاخص بیش از هر چیز تابع میزان آب موجود در توده‌ی رسوب است. پس از ته‌نشین شدن رسوبات، آب موجود در توده‌ی رسوبی، تحت اثر وزن آن و وزن لایه‌های فوقانی، به تدریج خارج می‌شود. این فرآیند را تحکیم می‌نامند. مقدار تحکیم در لایه‌های مختلف زیر سطح بستر، یکسان نیست. برای تعیین میزان تحکیم رسوب، وزن مخصوص تر و خشک رسوب با هم مقایسه می‌شود.

برای تعیین تنش آستانه فرسایش رسوب چسبنده، دو روش اندازه‌گیری وجود دارد که هر دو بر اساس بررسی ستون نمونه‌ی دست‌نخورده‌ی رسوب بستر عمل می‌کنند. توصیه می‌شود که سنجش اطلاعات از ستون نمونه‌ی دست‌نخورده، در فاصله‌های ۵ تا ۱۵ سانتیمتری تکرار شود تا ضخامت و مشخصه‌های هر لایه با دقت کافی مشخص شود. مشاهده تغییر غیر عادی شاخص‌ها در عمقی مشخص، می‌تواند علامت برخورد به بستر اولیه – مربوط به قبل از رسوبگذاری – باشد.

دو روش محاسبه‌ی تنش آستانه فرسایش عبارتند از:

الف) روش ارائه شده در گزارش HR Wallingford تحت عنوان "Estuarine Mud Manual 1992" و گزارش "The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs 1996" از همان مرجع. در این روش، تنش آستانه فرسایش بر حسب میزان تحکیم برآورد می‌شود.

ب) روش ارائه شده توسط "Kamphuis & Hall 1983" که در آن تنش آستانه فرسایش بر اساس تست‌های آزمایشگاهی خاص بر نمونه‌ی رسوب، تحت عنوان "vane shear stress" تخمین زده می‌شود.

مراجعه به منابع مربوط برای کسب اطلاعات بیشتر توصیه می‌شود.

بر اساس نتایج مطالعات مختلف، در مراجع تخصصی جدول‌هایی برای تعیین محدوده‌ی معمول تنش آستانه فرسایش بر حسب جنس رسوب و میزان تحکیم آن ارائه شده است. برای تنش آستانه رسوبگذاری نیز چنین جدول‌هایی وجود دارد.

مقادیر نهایی تنش‌های آستانه‌ی فرسایش و رسوبگذاری، در مرحله‌ی برازش و صحت‌سنجی مدل تدقیق می‌شوند. دقت این کار، با افزایش اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب و کاهش فواصل زمانی بین آنها تضمین می‌شود. در هر صورت برای تنظیم اولیه‌ی این اطلاعات و جلوگیری از خطای فاحش، انجام اندازه‌گیری محلی لازم است.

دقت مورد نیاز برای تنظیم تنش آستانه‌ی فرسایش و رسوبگذاری، تابع عوامل مختلفی است که به ماهیت مسئله‌ی مورد مطالعه بستگی دارند. بهترین راه برای تعیین دقت مورد نیاز در یک مطالعه‌ی کاربردی، تحلیل حساسیت به وسیله چند شبیه‌سازی اولیه است. به عنوان نمونه، در یک سد بزرگ مانند دز با پدیده‌ی جریان غلیظ، دقتی از مرتبه‌ی ۰/۱ نیوتون بر مترمربع منطقی است.

مشخصات بستر چسبنده، از جمله تنش آستانه فرسایش و تعداد و ضخامت لایه‌های آن، در طول زمان ثابت نیستند. عبور هر سیل جدید که فرسایش یا رسوبگذاری قابل ملاحظه‌ای ایجاد کند، طولانی شدن دوره‌ی آرامش و پیشرفت روند تحکیم بستر و همچنین انجام عملیات رسوبشویی از مخزن یا عدم انجام آن طی چند سال، می‌توانند مشخصات بستر را تغییر دهند. شرایط اولیه‌ی انتخاب شده برای شبیه‌سازی، باید با شرایط بستر در زمان اندازه‌گیری این مشخصه‌ها هماهنگ باشد تا مدل‌های عددی بتوانند این تغییرات را به درستی در طول مدت حل شبیه‌سازی کنند.

برای شبیه‌سازی رودخانه متصل به مخزن، امکان وجود لایه‌ی سخت و غیر قابل فرسایش در زیر بستر باید در نظر گرفته شود.

گاهی ممکن است رسوبات ماسه‌ای بستر رودخانه‌ی متصل به مخزن، به وسیله‌ی رسوبات درشت‌تری پوشیده شده و در مقابل فرسایش حفاظت شوند. این پدیده را جوشنی شدن بستر (آرمورینگ) می‌نامند. اگر میزان فرسایش واقعی در جایی، خیلی کمتر از

مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل باشد، احتمال وقوع این حالت باید بررسی شود. مدل انتخاب شده برای چنین شرایطی، باید توانایی محاسبه این پدیده را داشته باشد. به علاوه، احتمال وقوع این حالت باید توسط کاربر به مدل اعلام شود. وقوع این حالت در نواحی انتهایی مخزن محتمل نیست.

زبری بستر، یکی از مشخصه‌های مهم در کنترل سرعت جریان در رودخانه و قسمت‌های نه‌چندان عمیق مخزن می‌باشد. برای شرایط جریان غلیظ، حتی در قسمت‌های عمیق مخزن نیز تأثیر این عامل قابل توجه است. زبری بستر، بر سرعت برشی جریان نزدیک بستر نیز تأثیر می‌گذارد. این بدان معنی است که توانایی جریان در ایجاد فرسایش و یا ممانعت از رسوبگذاری، تحت تأثیر زبری بستر قرار دارد. زبری بستر با توجه به مشخصات کلی آن، مانند جنس، چین‌خوردگی‌ها و پوشش گیاهی تخمین زده می‌شود و در مرحله برازش مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های محیطی تدقیق می‌شود. برای تخمین زبری بستر در مقاطع رودخانه‌ای و سیلاب‌دشت‌ها، راهنماهای مستقلی وجود دارد.

وجود پوشش گیاهی بر بستر، مقاومت آن در مقابل جریان و فرسایش را به شدت افزایش می‌دهد. این پدیده در صورت وجود باید گزارش شده و مورد توجه قرار گیرد. در این حالت، ارائه‌ی توصیف در باره‌ی نوع پوشش و تراکم آن نیز لازم خواهد بود. تغییر احتمالی محدوده و تراکم پوشش گیاهی در فصل‌های مختلف سال و سال‌های مختلف، باید در شبیه‌سازی‌ها مورد توجه قرار گیرد. در صورت امکان، عکس‌برداری از پوشش گیاهی موجود نیز توصیه می‌شود.

برای شبیه‌سازی رودخانه متصل به مخزن، برداشت مشخصه‌های بستر نه تنها در مسیر اصلی بلکه در سیلاب‌دشت‌ها نیز لازم است. در طول سال‌های اولیه پس از احداث سد، دانه‌بندی رسوب بستر و ضریب زبری هیدرولیکی در رودخانه‌ی پایین دست تغییر می‌کند. دانه‌بندی رسوب بستر، نه تنها در سطح بلکه در عمق بستر نیز باید مشخص شود. در صورت وجود لایه‌ی سنگ یا رس در زیر بستر، نیمرخ طولی تراز آن نیز مورد نیاز خواهد بود.

اگر فرسایش سواحل دریاچه‌ی مخزن قابل توجه تشخیص داده شده باشد، نقشه‌های جنس خاک به همراه نقشه‌های هندسه‌ی بستر و مرزها می‌توانند نشان دهند که در هر تراز سطح آب مخزن در طول سال، خط ساحلی دریاچه با چه جنسی از خاک مواجه خواهد بود. در صورت سستی خاک، باید مشخص شود که آیا طرح حفاظتی پیش‌بینی شده است یا خیر. احتمال ریزش شیب‌های خاکی مشرف به دریاچه نیز در همین رابطه مورد توجه قرار می‌گیرد.

برای مطالعه عملیات رسوبشویی، انجام آزمایش‌های اضافی برای تعیین مواد آلی و شیمیایی موجود در رسوب نیز لازم است. این کار برای کسب اطمینان از عدم بروز مشکلات زیست‌محیطی در پایین دست انجام می‌شود. این مواد می‌تواند ناشی از کاربرد سموم دفع آفات و کودهای شیمیایی در حوضه‌ی بالا دست مخزن باشد.

برای بررسی و تحلیل تاریخچه‌ی رسوبگذاری در سیل‌های گذشته، می‌توان از برداشت و بررسی ستون نمونه‌ی رسوب دست‌نخورده از بستر مخزن نیز استفاده کرد.

مشخصه‌های بستر که در هر گره محاسباتی به مدل معرفی می‌شوند، نماینده‌ی یک سلول محاسباتی بوده و تنها به همان نقطه محدود نمی‌باشد.

۵-۶-۶ شرایط مرزی

شرایط مرزی، وجه تمایز شرایط و گزینه‌های مختلف شبیه‌سازی در یک پروژه هستند. پس از برازش یافتن مدل، تفاوت شرایط مرزی تنها عامل مهمی است که منجر به نتایج گوناگون می‌شود. رعایت دقت کافی در تنظیم اطلاعات مرزی، نقشی اساسی در اعتبار نتایج دارد.

توصیه می‌شود که برای مدل جریان، انتخاب شرط مرزی بالا دست از نوع بده جریان ورودی و شرط مرزی پایین دست از نوع تراز سطح آب باشد. انتخاب بده جریان در مرز خروجی، تنها در صورتی مجاز است که اطلاعات هر دو مرز از دقت زیادی برخوردار باشند. در غیر این صورت، تراز مخزن در ضمن پیشروی محاسبات از واقعیت فاصله خواهد گرفت.

برای مدل رسوب، می‌توان شرط مرزی بالا دست را از نوع نرخ آورد رسوب یا غلظت آن بر حسب جریان انتخاب کرد. بار رسوب ورودی ازمرز بالا دست، شامل بار معلق و بار بستر می‌باشد. شرط مرزی پایین دست را، بسته به مسئله‌ی مورد مطالعه، می‌توان از نوع غلظت خروجی رسوب معلق از دریچه‌ها و یا – در مسائل ساده – یکنواخت بودن تغییرات غلظت رسوب معلق در امتداد جریان انتخاب کرد. دقت شرط مرزی خروجی در مطالعات فرسایش و رسوبشویی از اهمیت کلیدی برخوردار است.

فهرست مهمترین اطلاعات مرزی مورد نیاز در مطالعات جریان و رسوب مخزن – مبتنی بر شبیه‌سازی عددی – در زیر ارائه شده است:

۱. تعیین محل همه‌ی مرزهای ورودی و خروجی آب و رسوب
۲. آبنگار جریان در مرزهای ورودی
۳. سری زمانی تراز سطح آب یا آبنگار جریان در مرزهای خروجی به همراه نمودار تراز آب مخزن در طول سال
۴. سری زمانی نرخ رسوب ورودی از مرزها یا غلظت رسوب معلق بر حسب بده جریان
۵. اطلاعات جریان خروجی به تفکیک دریچه‌های مختلف
۶. تراز و ابعاد و ظرفیت دریچه‌های تخلیه
۷. اطلاعات غلظت رسوب خروجی از تخلیه کننده‌های مختلف
۸. دانه‌بندی رسوب معلق و رسوب بستر در محل مرزهای ورودی
۹. مشخصات رسوب معلق و رسوب بستر در محل مرزها به تفکیک دانه‌بندی (سرعت سقوط، وزن مخصوص، ...)
۱۰. تفکیک سهم هر دانه بندی از مقدار کل رسوب ورودی در مرزها
۱۱. سهم بار معلق و بار بستر در رسوب ورودی و خروجی از مرزها
۱۲. منحنی رها سازی آب و رسوب از سد یا سدهای احتمالی واقع در بالا دست
۱۳. اطلاعات بده – اشل در ایستگاه‌های سنجش رودخانه‌های بالا دست و پایین دست

با داشتن اطلاعات فوق، می‌توان شرایط مرزی جریان و رسوب را به طور کامل به مدل عددی معرفی کرد.

در بیشتر پروژه‌ها، آبنگار (سری زمانی بده جریان) ورودی در دو مقیاس مورد نیاز می‌باشد؛ آبنگار دراز مدت مربوط به طول دوره‌ی آماری و آبنگار سیل‌های خاص. آبنگار سیل می‌تواند واقعی و یا محاسبه شده باشد.

توصیه می‌شود که محل مرز بالا دست در رودخانه‌ی منتهی به مخزن، نزدیک یک ایستگاه رسوبسنجی و یا در جایی که مخزن، باریک و کم عمق شده باشد، انتخاب شود. در این صورت، تنظیم شرط مرزی به صورت یک آبنگار برای تمام مقطع ورودی مناسب است. تا حد امکان باید از انتخاب محل مرز بالا دست در جایی که تغییرات عرضی سرعت، قابل توجه و مؤثر باشد، اجتناب کرد. در صورتی که چنین انتخابی غیر قابل اجتناب باشد، نمی‌توان به آبنگار کلی مقطع جریان اکتفا کرد. اگر محل مرز و رفتار جریان به گونه‌ای باشد که نتوان از تغییرات قائم میدان جریان و رسوب (به خصوص غلظت رسوب معلق) صرف‌نظر کرد، آنگاه روند سنجش توزیع قائم داده‌ها در مرز، باید مشابه روند ارائه شده در قسمت "اطلاعات مربوط به بدنه‌ی آب" باشد.

دقت شرایط مرزی رسوب در یک پروژه‌ی واقعی بسیار کمتر از دقت شرایط مرزی جریان است، زیرا سنجش بار رسوب در ایستگاه‌ها، بسیار کمتر از سنجش جریان انجام می‌شود. برای تنظیم شرایط مرزی رسوب، رابطه یا رابطه‌هایی بین اطلاعات غلظت رسوب و اطلاعات بده جریان، در نزدیک‌ترین ایستگاه سنجش مناسب از رودخانه‌ی منتهی به مخزن، برازش داده می‌شود تا بتوان بار معلق رسوب را برای هر بده جریان محاسبه کرد. رعایت دقت در تنظیم رابطه‌ی غلظت (یا نرخ حمل رسوب) با بده جریان در شرایط سیلابی از اهمیت ویژه برخوردار است، زیرا بیشترین حجم رسوب در مواقع سیلابی وارد مخزن می‌شود.

بار بستر نیز می‌تواند بر مقدار آورد رسوب تأثیر بگذارد. اگر بستر رودخانه از جنس ریزدانه‌ی چسبنده نباشد، بار معلق غالبا شامل رس و سیلت بوده و بار بستر شامل ماسه و شن می‌باشد. اندازه‌گیری و محاسبه بار بستر، مشکل‌تر از اندازه‌گیری و محاسبه بار معلق است. سهم بار بستر از کل بار رسوبی، با حرکت از قسمت‌های مرتفع کوهستانی به نواحی پست دشت، کاهش می‌یابد. به طور معمول، برای تکمیل شرط مرزی رسوب ورودی، سهم بار بستر معادل درصدی از بار معلق فرض می‌شود. در صورت نیاز، می‌توان آن را بر اساس یکی از روابط تجربی بار بستر رودخانه (به صورت تابعی از بده جریان و مشخصه‌های بستر) نیز تخمین زد.

گاهی برای تعیین شرط مرزی رسوب ورودی، آن قسمت از بار معلق را که از بستر رودخانه سرچشمه گرفته (به جز بار شسته شده از سطح حوضه) نیز با استفاده از روابط تجربی تعیین می‌کنند. در این حالت، باید سازگاری نتایج رابطه مورد استفاده با برداشت‌های انجام شده در ایستگاه رسوبسنجی را کنترل کرد.

سهم شاخه‌های فرعی در آورد جریان و/یا رسوب به محدوده‌ی حل، باید کنترل شود. حتی اگر رسوب زیادی از آبراهه‌های فرعی وارد نشود، جریان ناشی از آنها می‌تواند باعث افزایش جابجایی رسوب در مسیر رودخانه شود (Griffin, 1995). به دلیل کمبود اطلاعات، ممکن است تأمین اطلاعات مرزی در شاخه‌ها، مشکل‌تر از آبراهه‌ی اصلی باشد. میزان اهمیت آبراهه‌ها در مطالعات هیدرولوژی مشخص می‌شود و برای شبیه‌سازی رسوب مخزن می‌توان از نتایج آن استفاده کرد. وجود و عملکرد سازه‌های کنترل کننده‌ی جریان یا رسوب در مسیر شاخه‌ها، می‌تواند اطلاعاتی هرچند کیفی در باره‌ی عملکرد آنها به‌دست دهد.

مشخصات رسوب شامل چگالی، قطر متوسط، دانه‌بندی، شکل و مشخصات شیمیایی آن می‌باشد. قطر متوسط ذرات رسوب، پس از غلظت رسوب معلق، مهمترین شاخص تعیین کننده در محاسبه‌ی روند کاهش حجم یک مخزن است.

بار رسوب ورودی از مرزها، باید به دسته‌های مختلف دانه‌بندی تفکیک شده و سهم هر دسته در کل بار رسوبی مشخص شود. مدل‌های عددی، محاسبات دسته‌های مختلف طیف دانه‌بندی را به تفکیک انجام می‌دهند. آنها برای هر دسته، شرط

مرزی جداگانه‌ای لازم دارند. بنابراین رابطه رسوب با بده جریان، برای هر دسته از طیف دانه‌بندی جداگانه تنظیم می‌شود. منحنی بار رسوب بر حسب بده جریان، نه تنها برای کل بار رسوب، بلکه برای هر دسته نیز به تفکیک محاسبه و رسم می‌شود.

وجود سازه‌های آبی یا پروژه‌های دیگر در بالا دست مخزن و تأثیر آنها بر آورد آب و رسوب و دانه‌بندی آن، باید کنترل شود.

دسترسی به منحنی تراز سطح آب مخزن در طول سال، اهمیت زیادی دارد. اهمیت این نمودار، تنها به خاطر تنظیم شرط مرزی خروجی نیست. مقدار عمق آب مخزن در زمان وقوع سیل شدید، می‌تواند بر احتمال وقوع جریان غلیظ هم تأثیر بگذارد.

بازه‌ی زمانی داده‌های مرزی جریان و رسوب و دقت و تراکم آنها، به همراه انتخاب شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند مشخص می‌شود. فاصله‌ی زمانی بین داده‌ها و اینکه اطلاعات ساعتی یا روزانه یا غیر پیوسته (برای شبیه‌سازی شبه‌ماندگار) مورد نیاز هستند نیز بر اساس همین شرایط تعیین می‌شود.

می‌توان محل مرز بالادست را در جایی انتخاب کرد که یک ایستگاه اندازه‌گیری جریان و رسوب با طول دوره‌ی ثبت کافی، بر رودخانه مستقر باشد. در این صورت می‌توان شرط مرزی ورودی بالا دست را از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه استخراج کرد.

اطلاعاتی از بده جریان که به طور معمول در دسترس مهندسان قرار می‌گیرد، پردازش شده بوده و نماینده‌ی بده‌های متوسط روزانه می‌باشد. این داده‌ها برای بسیاری از شبیه‌سازی‌های درازمدت ریخت‌شناسی – که از گام‌های زمانی محاسباتی یک تا چند روز – استفاده می‌کنند و همچنین برای شبیه‌سازی‌های شبه‌ماندگار مناسب است. اما برای شبیه‌سازی رفتار جریان و رسوب در طی یک سیل منفرد، باید سنجش‌های دوساعته را از سازمان آب منطقه‌ای محل دریافت کرد. چنین سنجش‌هایی به طور خاص در زمان سیل انجام می‌شود. اطلاعات سیل‌ها را باید به‌طور مستقل از شرایط عادی نیز تنظیم و بررسی کرد. اگر اطلاعات دوساعته‌ی بده جریان در دسترس نباشد، می‌توان از آبنگارهای محاسبه شده برای سیل در مطالعات هیدرولوژی و یا ترکیب بده‌های روزانه با آبنگارهای محاسباتی استفاده کرد.

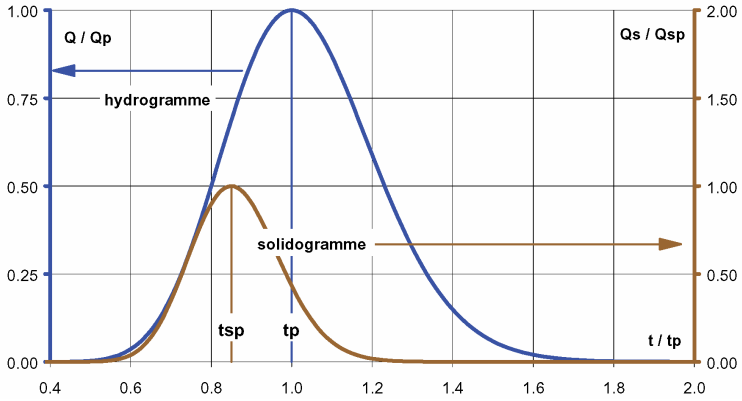
برای تنظیم شرط مرزی ورودی برای رودخانه‌ی پایین دست مخزن، باید نقش احداث سد در تغییر منحنی زمان تداوم جریان و تراز آب و تأثیر آن بر کاهش فرسایش را منظور کرد. اطلاعات مربوط به مقدار تخلیه رسوب از دریچه‌های سد و دانه‌بندی آن نیز مورد نیاز خواهد بود. برای این مرز می‌توان از متوسط‌های هفتگی یا ماهانه استفاده کرد، زیرا آورد جریان به‌وسیله‌ی عملکرد سد کنترل شده و تغییرات شدیدی در آن دیده نمی‌شود. در زمان عملیات رسوبشویی مخزن و یا رها سازی نامتعارف آب و رسوب، فاصله‌های زمانی بین داده‌های مرزی باید از مرتبه‌ی ساعت باشد.

برای تنظیم شرط مرزی خروجی برای رودخانه‌ی پایین دست، منحنی بده – اشل در محل مرز خروجی مورد نیاز می‌باشد. در صورت عدم وجود اطلاعات بده – اشل، می‌توان فرض کرد که در آنجا زبری بستر تنها عامل کنترل جریان است. بر این اساس، می‌توان از عمق نرمال جریان به عنوان شرط مرزی خروجی استفاده کرد.

برای تنظیم شرط مرزی جریان ورودی در شبیه‌سازی‌های درازمدت ریخت‌شناسی، از اوج لحظه‌ای سیلاب‌ها استفاده نمی‌شود. علت این امر آن است که زمان تداوم بده اوج سیل‌ها اندک می‌باشد، اما تغییرات درازمدت هندسه بستر، تابع رفتارهای لحظه‌ای فرسایش و رسوبگذاری نیست. در این نوع مسائل، می‌توان از متوسط‌های روزانه جریان و متوسط‌های روزانه‌ی غلظت رسوب استفاده کرد. متوسط روزانه غلظت یا آورد رسوب در شرایط سیلابی، باید بر اساس اندازه‌گیری‌های کافی (مثلا دوساعته) به دست آمده باشد.

اگر شبیه‌سازی یک سیل منفرد مد نظر باشد، تأمین شرط مرزی رسوب ورودی به مدل از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. ممکن است اطلاعات ایستگاه‌های رسوبسنجی کافی نباشد، زیرا غلظت رسوب در زمان عبور سیل با تراکم زمانی کافی برداشت نمی‌شود. در طول سیل، برداشت‌های ساعتی یا دو ساعته از غلظت رسوب معلق لازم است، حال آنکه در بهترین حالت، یک برداشت در روز انجام می‌شود. این کمبود، در برآورد مقدار کل آورد رسوب در طول سیل، در تعیین مقدار بیشینه‌ی غلظت در طول سیل و بالاخره در تعیین منحنی تغییرات زمانی آورد رسوب در طی ساعات سیل تأثیر منفی می‌گذارد.

با برداشت‌های روزانه غلظت، نمی‌توان تغییرات زمانی آورد یا غلظت رسوب در قسمت‌های مختلف آبنگار سیل را با دقت کافی تعیین کرد. زمان اوج غلظت و زمان اوج آورد رسوب در طول سیل، با زمان اوج جریان منطبق نیستند. شکل (۵-۳)، نمایی از رابطه‌ی آبنگار جریان و منحنی بار رسوبی در طول یک سیل را نشان می‌دهد. رابطه بین این دو منحنی، تحت تأثیر شرایط حوضه‌ی آبریز، سرچشمه‌های رسوب، مشخصات بارش فعلی و سابقه بارش‌های قبلی قرار دارد. رابطه بین این دو منحنی، ضمن متفاوت بودن برای ایستگاه‌های مختلف، در یک محل معین نیز در طول سال ثابت نیست. این موضوع، اهمیت زیادی در شبیه‌سازی دقیق رفتار رسوب در طی یک سیل منفرد (به خصوص رفتار جریان غلیظ) دارد و بر برازش مدل به اندازه‌گیری‌های محلی در طی ساعت‌های سیل نیز تأثیر جدی می‌گذارد.



شکل ۵-۳- مقایسه‌ی تغییرات زمانی منحنی بده آب و بده رسوب در طی یک سیل. مرجع: Cesare, 1998

اطلاعات سنجش رسوب در زمان سیلاب‌های شدید به ندرت در اختیار می‌باشد، زیرا فراوانی این گونه سیل‌ها اندک و سنجش رسوب در آن شرایط مشکل است. برای تخمین غلظت رسوب متناظر با بده‌های بسیار زیاد، از برون‌یابی آماری استفاده می‌شود. شیب منحنی بده رسوب بر حسب بده جریان، با افزایش شدت جریان کاهش می‌یابد (به‌خصوص برای رسوباتی که ریزدانه‌تر هستند). بنابراین محاسبات برون‌یابی با همه‌ی سنجش‌ها انجام نمی‌شود، بلکه تنها سنجش‌های مربوط به جریان‌های سیلابی برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورت ناکافی بودن اطلاعات اندازه‌گیری، گاهی می‌توان از روش‌های محاسباتی نیز کمک گرفت. به این منظور بار رسوب، با توجه به طیف دانه‌بندی رسوب بستر، برای چند دانه‌بندی محاسبه می‌شود. شیب و شکل منحنی حاصله، برای تخمین شیب و شکل منحنی برون‌یابی شونده‌ی اصلی استفاده می‌شود.

رسوبات ورودی از مرز را به دو قسمت تفکیک می‌کنند؛ سهم سرچشمه گرفته از مسیر رودخانه و سهم شسته شده از سطح حوضه. نحوه‌ی تبعیت این دو بخش از شدت جریان ورودی و مشخصه‌های دیگر یکسان نیست. بار رسوبی شسته شده از سطح حوضه، به فصول مختلف سال و سابقه بارش‌های قبلی نیز بستگی دارد. به خصوص نقش اولین بارش قابل توجه فصل بارندگی، زیرا رسوب بسیار بیشتری از سطح حوضه شسته خواهد شد. رسوبات مسیر رودخانه، تنها بار بستر را شکل نمی‌دهند، بلکه قسمتی از بار معلق نیز مربوط به آنها است. بار شسته شده از سطح حوضه، هرگز نمی‌تواند بار بستر شود. این نوع رسوب، حتی در صورت ته‌نشینی، به صورت لایه‌ی کلوئیدی خواهد بود.

گاهی رسوبات کوچکتر از ۰/۰۶۲۵ میلیمتر را بار شسته و رسوبات درشت‌تر از آن را بار ناشی از بستر رودخانه فرض می‌کنند. این فرض همیشه صحیح نیست. برای تعیین مرز بین بار شسته و بار رسوب ناشی از بستر رودخانه، باید به دانه‌بندی رسوب بستر رودخانه در محل ایستگاه اندازه‌گیری (جایی که شرایط رودخانه‌ای حاکم بوده و هنوز به مخزن سد نرسیده یا مخزن هنوز ساخته نشده است) نیز توجه کرد. فراوانی دانه‌بندی‌های مختلف در نمونه‌ی رسوب بستر، در مقطعی با شرایط مطرح شده، می‌تواند نشان دهد که چه قسمت از فراوانی‌های دانه‌بندی‌های مختلف موجود در بار معلق، از بستر ناشی نشده است. در این روش، دانه‌بندی بستر انتخاب شده باید نماینده‌ی مناسبی از مسیر بالا دست باشد

در مدل‌های عددی، روش‌های محاسبه جابجایی رسوب برای بار ناشی از بستر رودخانه و بار شسته شده از سطح حوضه یکسان نیستند. بنابراین منحنی‌های بار رسوبی ناشی از این دو – در مرز ورودی – باید به تفکیک مشخص شوند. بار شسته در مطالعات مهندسی رودخانه از اهمیت کمتری برخوردار است، زیرا بدون تعامل قابل توجه با بستر، از منطقه عبور می‌کند. در مسائل مخزن سد، نمی‌توان وجود بار شسته را نادیده گرفت، زیرا در مخزن ته‌نشین می‌شوند.

در مناطقی که سهم عمده‌ی آورد رسوب از بستر رودخانه سرچشمه می‌گیرد، تنظیم شرط مرزی رسوب ورودی آسان است. این نوع بار رسوب، رابطه‌ی نزدیکی با بده جریان رودخانه دارد. در این شرایط می‌توان از ایجاد رابطه بین سنجش‌های جریان و غلظت و یا از روابط تجربی مناسب استفاده کرد. رابطه بین جریان و غلظت در یک ایستگاه، برای شرایط عادی و سیلابی یکسان نیست. اگر غلظت رسوبات معلق ریزدانه بیش از ۱۰ گرم در لیتر شود، ظرفیت حمل افزایش خواهد یافت. اگر غلظت آنها از ۱۰۰ گرم بر لیتر بیشتر شود، ظرفیت حمل رسوب می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۰ برابر ظرفیت حمل عادی رودخانه باشد.

در صورت به‌کارگیری روابط تجربی، دسته‌بندی و انتخاب مناسب دانه‌بندی‌ها نقش مهمی در نتایج محاسبات دارد و باید با توجه به دانه‌بندی رسوب بستر انجام شود. اگر سهم رسوبات ریزدانه‌تر بستر بیش از مقدار واقعی در نظر گرفته شود، بار رسوبی محاسبه شده بسیار بیشتر از بار واقعی خواهد بود. در بعضی از روش‌ها، ۱۰٪ از ریزترین رسوبات بستر را از روند محاسبه حذف کرده و تنظیم متغیرهای رابطه برای برازش به سنجش‌ها را بر اساس بقیه طیف دانه‌بندی انجام می‌دهند (Einstein 1950).

در مناطقی که بار شسته سهم قابل توجهی از رسوبات وارده را تشکیل می‌دهد یا به هر دلیل مهم تشخیص داده شده است، رابطه آورد رسوب با آورد آب در مرز ورودی، تابع شرایط فصلی کشاورزی و آب و هوایی است. در این حالت توصیه می‌شود که نمودارها به تفکیک فصل‌ها و زمان وقوع در فصل بارش، تهیه و استفاده شوند. با این روش، اثر عوامل فصلی بر میزان فرسایش پذیری حوضه لحاظ می‌شود. در اقلیم‌های خشک مانند بسیاری از نقاط ایران، رابطه‌ی بار رسوب با بده جریان برای اولین سیل بزرگ ماه‌های پر باران، بسیار متفاوت با سیل‌های بعدی است. علت این امر آن است که در طی ماه‌های خشک، رسوبات سطح حوضه دچار فرسایش و آماده‌ی شسته شدن با اولین رواناب می‌شوند. تفکیک رابطه‌ی بده جریان – رسوب برای اولین سیل، به افزایش دقت محاسبات – به‌خصوص برای شبیه‌سازی همان سیل – کمک خواهد کرد.

توصیه می‌شود که در صورت اهمیت بار شسته، برای تنظیم رابطه‌ی آورد رسوب بر حسب بده جریان، سهم بارش رواناب از کل بده رودخانه تفکیک شود و عوامل دیگر مانند ذوب برف نیز کنار گذاشته شوند. این کار به افزایش دقت کمک می‌کند. می‌توان بده پایه‌ی رودخانه در ماه وقوع سیل را ناشی از عوامل غیر بارش رواناب در نظر گرفت. اگر رابطه‌ی رسوب – جریان به تفکیک دانه‌بندی تنظیم شود، بار شسته در کلاس ریزترین رسوبات قرار گرفته و رسوبات بستر مسیر در دسته‌های دیگر قرار

می‌گیرند. بنابراین می‌توان رابطه‌ی مزبور را برای ریزترین دسته به صورت فصلی و برای بقیه دسته‌ها به صورت کلی و یا با اتکا به روابط تجربی تهیه کرد.

در صورت اهمیت بار شسته، نمودار بار رسوب در زمان سیل به طور دقیق از آبنگار جریان تبعیت نمی‌کند. در این حالت، بار رسوب شسته شده در قسمت صعودی آبنگار جریان، بیش از قسمت نزولی آن است. به احتمال زیاد، زمان اوج رسوب و اوج جریان نیز یکسان نخواهد بود. به طور معمول، سیلاب در ساعت‌های آخر وقوع، رسوب زیادی به همراه نمی‌آورد. اگر رابطه بار رسوب بر حسب آورد جریان، اختلاف مطرح شده را در نظر نگیرد، نمی‌تواند برای تأمین شرط مرزی رسوب در مطالعه یک سیل منفرد استفاده شود.

وزارت نیرو شبکه‌ی وسیعی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری (آبسنجی و رسوبسنجی) در رودخانه‌های مختلف کشور در اختیار دارد. فهرست تجهیزات موجود در هر ایستگاه، تابع اهمیت رودخانه است. این ایستگاه‌ها به انواع درجه‌ی یک، درجه‌ی دو و درجه‌ی سه تقسیم شده‌اند. برای دریافت اطلاعات پردازش شده‌ی جریان و رسوب در هر ایستگاه، می‌توان به شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو و یا به مؤسسه‌ی تحقیقات آب این وزارت مراجعه کرد. اطلاعات خام مانند سنجش‌های دوساعته‌ی اشل در شرایط سیلابی، از طریق سازمان‌های آب منطقه‌ای قابل دسترسی هستند.

روابط غلظت رسوب بر حسب بده جریان، آنگونه که به طور معمول توسط شرکت مدیریت منابع آب ارائه می‌شوند، حاصل ایجاد ارتباط مستقیم بین بده جریان و غلظت اندازه‌گیری شده نیستند. برای تنظیم این روابط، روند زیر طی می‌شود: الف) متوسط روزانه بده جریان از خواندن اشل محاسبه می‌شود. ب) برای روزهایی که غلظت رسوب سنجش شده است، با فرض ثابت بودن غلظت رسوب در طول روز و داشتن متوسط روزانه بده جریان، آورد رسوب در یک روز کامل به دست می‌آید. ج) با استفاده از نتایج بند "ب"، رابطه‌ی متوسط روزانه‌ی بده جریان و آورد رسوب روزانه تعیین می‌شود. د) با استفاده از رابطه بند "ج"، رابطه‌ی بده جریان با غلظت رسوب محاسبه می‌شود.

روش مطرح شده برای تأمین شرط مرزی ورودی رسوب در شرایط غیر سیلابی مناسب است، اما برای شرایط سیلابی مناسب نیست. اگر رابطه‌ی بده جریان و غلظت رسوب، به‌طور مستقیم از سنجش‌ها استخراج شود، بیشتر قابل پذیرش است. توصیه می‌شود برون‌یابی آماری برای سیلاب‌های شدید، برای غلظت رسوب، نه برای آورد رسوب، انجام شود.

در ایستگاه‌های رودخانه‌ای کشور، به طور معمول غلظت رسوب را بیش از یک بار در روز اندازه‌گیری نمی‌کنند. این امر باعث کاهش دقت اطلاعات در شرایط سیلابی می‌باشد. بهتر است در شرایط سیلابی، غلظت رسوب معلق به صورت ساعتی یا دوساعته برداشت شود. متوسط روزانه‌ی غلظت در زمان سیل، باید بر اساس متوسط گیری از اطلاعات دوساعته انجام شود. روابط جریان – رسوبی که بر اساس متوسط روزانه‌ی داده‌ها تنظیم می‌شوند، از دقت کافی برای تأمین شرط مرزی ورودی رسوب در شبیه‌سازی رفتار سیل‌های منفرد، برخوردار نیستند.

پراکندگی نقاط داده در نمودارهای بده رسوب بر حسب بده‌آب، کمتر از پراکندگی آنها در نمودارهای غلظت رسوب بر حسب بده جریان می‌باشد، اما این به معنی دقت بیشتر نمودارهای نوع اول نیست. علت این تفاوت آن است که در نمودار اول، بده جریان در هر دو محور افقی و عمودی نقش دارد. به‌کارگیری نمودارهای بده رسوب به جای نمودارهای غلظت رسوب برای شرط مرزی بالا دست، باعث افزایش دقت محاسبات نخواهد شد. راه صحیح افزایش دقت، تفکیک نمودارهای فصل‌های مختلف است.

اگر آبنگار جریان سیل در دسترس بوده اما اطلاعات رسوب در اختیار نباشد، حداقل کار ممکن برای تأمین شرط مرزی رسوب ورودی، آن است از ترکیب یک تابع محاسبه‌کننده‌ی بار رسوبی رودخانه و یک رابطه‌ی فرسایش حوضه‌ی آبریز استفاده شود. در این صورت اعتبار و دقت نتایج شبیه‌سازی را باید با احتیاط زیاد سنجید. عدم دقت اطلاعات مرزی رسوب، می‌تواند اصل مفید بودن شبیه‌سازی عددی در پروژه را مخدوش و پذیرش قضاوت مهندسی و روش‌های مهندسی غیر شبیه‌سازی را منطقی کند، مگر آنکه بتوان با تحلیل حساسیت به شرط مرزی به بعضی از اهداف پروژه رسید.

برای تأمین شرط مرزی رسوب ورودی در شبیه‌سازی یک سیل منفرد، نمی‌توان به مدل‌های عددی هیدرولوژی تکیه کرد. اطلاعات موجود از سطح حوضه‌های آبریز به اندازه‌ای نیست که چنان مدل‌هایی بتوانند جزئیات رفتار رسوب در طول یک سیل را با دقت کافی محاسبه کنند.

توصیه می‌شود که در هنگام انجام اندازه‌گیری‌های میدانی در مخزن سد در شرایط سیلابی، شرایط مرزی جریان و رسوب در محل مرز بالا دست مخزن به صورت پیوسته برداشت شود. برای برازش مدل، نمی‌توان به برداشت‌های معمول ایستگاه رسوبسنجی بالا دست اکتفا کرد. در عین حال باید دقت کرد که تفاوت اندازه‌گیری‌های مرزی – که برای برازش استفاده می‌شوند – با اطلاعات ایستگاه رسوبسنجی – که برای شبیه‌سازی‌های اصلی استفاده می‌شوند – گمراه کننده نباشد.

تفاوت شرایط مرزی مورد استفاده برای برازش و واسنجی مدل و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های اصلی، باید از نظر مرجع تأمین داده‌ها و دقت آنها مورد توجه قرار گیرد. اگر بنا باشد برازش مدل با سنجش‌های هم زمان تفصیلی در مرز ورودی انجام شود، ولی شبیه‌سازی‌های اصلی با استفاده از اطلاعات ایستگاه رسوبسنجی انجام شوند، باید این دو دسته اطلاعات را مقایسه و با اعمال ضرایبی با یکدیگر هماهنگ کرد. اینکه ضرایب اصلاحی به کدام داده‌ها اعمال می‌شود، بستگی به مقایسه‌ی اعتبار و میزان پوشش آنها برای شرایط مختلف دارد.

اگر محل مرز ورودی، در رودخانه‌ی بالا دست و به اندازه‌ی کافی دور از مخزن انتخاب شود، می‌توان غلظت رسوب معلق را در کل مقطع یکسان فرض کرد.

۵-۷ روند برپاسازی[1]، برازش و واسنجی مدل‌ها

مدل‌های عددی، برای مطالعه رسوب مخازن سدها از توانایی‌های قابل توجهی برخوردار هستند، اما برای کسب نتایج قابل اعتماد باید آنها را به درستی مورد استفاده قرار داد. اگر روند صحیح استفاده از نرم‌افزار به درستی تعیین نشده باشد، توانایی مدل‌های جدید در ارائه‌ی زیبای نتایج و به‌کارگیری سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، می‌تواند اغوا کننده باشد. برای کنترل کیفیت شبیه‌سازی‌ها، علاوه بر بررسی منطقی بودن نتایج خروجی، رعایت معیارهای لازم در روش به کارگیری آنها نیز کنترل می‌شود.

روش صحیح به‌کارگیری یک نرم‌افزار برای انجام شبیه‌سازی، شامل سه مرحله است؛ برپاسازی مدل، برازش آن، و واسنجی آن. برپاسازی مدل به معنی شناساندن مشخصات اصلی منطقه‌ی مورد مطالعه به مدل و آماده کردن آن برای انجام شبیه‌سازی‌های اولیه می‌باشد. برازش مدل به معنی تنظیم تعدادی از ضرایب ورودی قابل تغییر، به گونه‌ای است که نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های

1 – Setup

انجام شده در محیط هماهنگ شود. واسنجی مدل به معنی مقایسه‌ی نتایج مدل برازش یافته با تعداد دیگری از اندازه‌گیری‌های محیطی است که در مرحله‌ی برازش مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

۵-۷-۱ برپاسازی مدل

برپاسازی یک نرم‌افزار برای یک پروژه‌ی معین عبارت است از: الف) معرفی محدوده‌ی حل و هندسه بستر، شرایط مرزی و اطلاعات محیطی دیگر به مدل شامل حدس اولیه‌ی داده‌هایی که برای برازش به کار می‌روند. ب) آماده‌سازی اطلاعات اندازه‌گیری محیطی در قالب رقومی مناسب برای تحلیل و مقایسه با نتایج مدل. ج) تعیین مشخصات خروجی‌هایی که نرم‌افزار باید ایجاد کند. با انجام این مراحل، امکان شبیه‌سازی‌های آزمایشی اولیه و مقایسه‌ی نتایج با اندازه‌گیری‌ها فراهم خواهد شد. معرفی اطلاعات محیطی به مدل، باید با ساده‌سازی مناسب اطلاعات در طبیعت همراه باشد.

در مرحله‌ی برپاسازی مدل، اطلاعات اصلی منطقه‌ی مورد مطالعه به مدل شناسانده می‌شوند. این اطلاعات عبارتند از: سامانه جغرافیایی مورد استفاده، هندسه‌ی مرزها، نوع مرز در قسمت‌های مختلف، هندسه‌ی بستر، شبکه‌ی محاسباتی، روش‌های حل، فرآیندها، گام‌های زمانی، بازه‌ی زمانی حل و تعداد گام‌های محاسباتی، شرایط همگرایی، روش محاسبه‌ی اغتشاش جریان، دمای آب (و یا شرایط اولیه‌ی آن)، انتخاب روش محاسبه‌ی زبری بستر (شزی یا مانینگ یا ارتفاع مشخصه‌ی زبری)، درنظر گرفتن اثر غوطه‌وری بر آشفتگی، منظور کردن امکان تر و خشک شدن قسمت‌هایی از محیط حل و مقادیر عمق متناظر با آن، منظور کردن اثر باد بر جریان سطحی، معرفی سازه‌های مؤثر خاص و یا سه‌شاخه‌های احتمالی در مسیر مدل‌های یک بعدی، نحوه‌ی ذخیره‌سازی نتایج محاسبات و امثال آن.

۵-۷-۱-۱ معرفی موقعیت مرزها

محدوده‌ی شبیه‌سازی، در مرحله‌ی " تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی" انتخاب و تعیین شده و در این مرحله به همراه هندسه بستر به صورت رقومی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. در مدل‌های دو بعدی افقی و سه بعدی، مرزها با شبکه محاسباتی مشخص می‌شوند؛ در شبکه‌های نامنظم به‌وسیله‌ی هندسه‌ی اطراف شبکه و در شبکه‌های منظم به‌وسیله‌ی یک کد مشخصه برای هر گره. در مدل‌های یک بعدی و مدل‌های دو بعدی قائم، موقعیت جغرافیایی و پیچ و خم‌های مسیر محیط حل مهم نیست. در این حال، محدوده‌ی شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی طول مسیر و مشخصات مقاطع جریان و فاصله‌ی بین آنها مشخص می‌شود.

وسعت محدوده شبیه‌سازی باید به اندازه‌ای باشد که مرزها به اندازه کافی از محدوده‌ی اصلی مورد نظر دور باشند، زیرا نتایج شبیه‌سازی در نزدیک مرزها دقت کمتری دارد و خالی از ناهنجاری نیست. توصیه می‌شود که فاصله‌ی مرز با محدوده‌ی اصلی از ده گره محاسباتی کمتر نباشد. اگر توزیع اطلاعات شرط مرزی در امتداد مرز دقیق نیست، فاصله باید بیشتر از این باشد. پیشنهاد می‌شود که در مسائل یک بعدی، قسمتی از رودخانه‌ی بالا دست مخزن نیز به همراه مخزن شبیه‌سازی شود، به طوری که طول محدوده‌ی رودخانه در حدود طول مخزن باشد.

در مسائل دو بعدی و سه بعدی، مرزها باید در جایی قرار گیرند که رفتار جریان در طول مرز و محدوده‌ی نزدیک آن (تا ده گره در داخل محیط) دارای تغییرات زیادی نباشد. برای این منظور، هندسه‌ی بستر در محل مرز و نزدیک آن باید به طور نسبی

یکنواخت باشد. محل مرز تا حد امکان نباید در جایی باشد که مقطع جریان در نزدیکی آن تغییرات شدیدی دارد و یا خیلی کم‌عمق بوده و یا در طی روند حل دچار تر و خشکی می‌شود. اگر تغییر تراز آب مخزن قابل توجه باشد، امکان تر و خشک شدن همه یا قسمتی از مقطع مرز ورودی بالا دست، باید مورد دقت قرار گیرد. مدل‌های یک بعدی و دو بعدی قائم، در این رابطه مشکلی ندارند. اگر عمکرد مدل سه بعدی در این محدوده با مشکل همراه باشد، می‌توان قسمت‌های بالا دست را با مدل‌های یک یا دو بعدی قائم شبیه‌سازی کرد تا از نتایج آن برای تأمین شرایط مرزی مدل سه بعدی استفاده شود.

۵-۷-۱-۲ معرفی شبکه‌ی محاسباتی

معرفی شبکه‌ی محاسباتی در مدل‌های یک بعدی و دو بعدی قائم، به صورت معرفی محل مقاطع محاسباتی انجام می‌شود. این کار در مدل‌های دو بعدی افقی و سه بعدی به صورت معرفی شبکه‌ی گره‌های محاسباتی در صفحه‌ی افقی و قائم (برای سه بعدی) انجام می‌شود.

در نرم‌افزارهایی که از شبکه‌ی حل منظم استفاده می‌کنند، معرفی شبکه‌ی حل محدود به تعیین زاویه شبکه و تعداد و فاصله‌ی گره‌ها در دو (یا سه) امتداد است. در نرم‌افزارهایی که با شبکه‌های حل نامنظم کار می‌کنند، ایجاد شبکه‌ی محاسباتی، مستلزم به‌کارگیری یک برنامه‌ی پیش‌پردازنده است. در شبکه‌های نامنظم، باید از تغییرات ناگهانی در فاصله‌ی گره‌ها اجتناب کرد.

انتخاب فاصله‌ی گره‌ها یا مقاطع محاسباتی در قسمت‌های مختلف محیط حل، تابع هندسه‌ی محیط، روند و شدت تغییرات جریان و رسوب، اهمیت دقت نتایج در نواحی مختلف و محدودیت‌های حاکم بر نرم‌افزار است. تراکم گره‌ها باید به اندازه‌ای باشد که بتواند هندسه بستر را، در حدی که بر رفتار جریان و رسوب با دقت مورد نیاز مؤثر است، نشان دهد. محدودیت روش محاسباتی نرم‌افزار نیز باید بر اساس حداکثر عدد کورانت مجاز، مشخص شود.

چند شبیه‌سازی اولیه، کمک زیادی به شناخت رفتار جریان و رسوب، تعیین مناطق حساس و انتخاب بهینه تراکم شبکه محاسباتی در قسمت‌های مختلف محیط حل می‌کند. توضیحات ارائه شده برای توزیع مکانی اندازه‌گیری‌های محیطی، در رابطه با انتخاب تراکم گره‌های محاسباتی در نواحی مختلف نیز قابل استفاده هستند.

در مدل‌های یک بعدی، فاصله‌ی بین مقاطع محاسباتی به گونه‌ای تعیین می‌شود که نسبت سطح مقطع بین دو مقطع متوالی بیش از ۳۰٪ تغییر نکند. انتخاب فاصله‌ی ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر برای این گونه مسائل معمول است. در مدل‌های دو بعدی افقی، فاصله‌ی ۲۰ تا ۵۰ متر در نزدیکی بدنه‌ی سد و ۵۰ تا ۲۵۰ متر در قسمت‌های دورتر، برای تراکم نقاط محاسباتی معمول است. در جایی که تغییر سرعت یا جهت جریان یا غلظت رسوب زیاد باشد، شبکه‌ی محاسباتی باید ریزتر از مناطقی با تغییر ملایم باشد.

در صورت استفاده از مدل دو بعدی افقی یا سه بعدی در قسمت‌های باریک و کم‌عرض، باید حداقل ۶ گره محاسباتی در عرض مقطع لحاظ کرد. بعضی از نرم‌افزارها، برای شناسایی مرز بسته‌ی جانبی از گره مجازی در داخل خشکی استفاده می‌کنند. برای این مدل‌ها باید دو گره عرضی دیگر اضافه شود. اگر بررسی جزئیات رفتار جریان و رسوب در عرض مقطع مورد نظر باشد، یا عوارض موضعی یا اتصال دوشاخه آبراه باعث پیچیدگی شده باشد، تعداد گره‌های بیشتری در عرض مقطع لازم خواهد بود. برای شبیه‌سازی صحیح گردابه‌های افقی جریان، حداقل ۷ تا ۱۰ گره محاسباتی در عرض گردابه لازم است.

تراکم گره‌ها یا مقاطع در محل دلتای رسوبی، باید به اندازه کافی زیاد باشد تا بتواند شکل دقیق دلتای رسوبی، تغییرات شدید میدان جریان و رسوب، تغییرات شدید فرسایش و رسوبگذاری و بالاخره تغییرات ریخت‌شناسی دلتا را با دقت کافی منظور کند. توصیه می‌شود که تعداد گره‌ها یا مقاطع در پیشانی دلتای رسوبی، از ۱۰ گره در امتداد جریان کمتر نباشد. حساسیت این موضوع، در شبیه‌سازی جریان غلیظ بیشتر است. در این نوع مسائل، فاصله‌ی گره‌ها هم در محل شیرجه زدن توده‌ی غلیظ به عمق[1] و هم در پیشانی دلتای رسوبی باید کم باشد، در غیر این صورت ضخامت لایه‌ی جریان غلیظ در پایین دست دلتا، بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌شود. در مدل‌های با شبکه از نوع (Sigma Coordinate) که تعداد گره‌های محاسباتی در ستون آب ثابت بوده و مستقل از عمق آب می‌باشد، کم بودن گره‌ها در عمق باعث محاسبه‌ی نادرست انتشار غلظت رسوب در امتداد قائم در محل دلتا خواهد شد. تراکم گره‌ها یا مقاطع باید بتواند محل تماس دلتا با بستر پایین دست را با دقت نشان دهد. تغییر شیب شدید در این محل، می‌تواند منجر به ایجاد پرش هیدرولیکی در جریان غلیظ شود که خود بر میزان تداخل با آب مخزن و غلظت و ضخامت توده تأثیر خواهد گذاشت.

در مسائل جریان غلیظ، شبکه‌بندی قائم از دو دیدگاه قابل بررسی است؛ تعداد گره‌ها در عمق و توزیع آنها. فاصله‌ی گره‌ها در مرز توده‌ی غلیظ با آب صاف، باید اندک باشد تا ضخامت توده‌ی غلیظ با دقت محاسبه شود. اگر تعداد لایه‌ها کم یا فاصله آنها در این محل زیاد باشد، ضخامت توده غلیظ بیشتر از مقدار واقعی محاسبه خواهد شد. استفاده از ۱۵ تا ۲۰ گره در امتداد قائم، به شرط فشرده‌تر بودن آنها در ناحیه‌ی زیرین – تا عمقی که انتظار رشد لایه غلیظ وجود دارد – کافی است. اگر جریان ناشی از وزش باد مورد مطالعه باشد، فاصله‌ی گره‌ها در نزدیکی سطح آب نیز باید در امتداد قائم به اندازه کافی کم شود.

۵-۷-۱-۳ معرفی هندسه‌ی بستر

در مدل‌های دو بعدی افقی و مدل‌های سه بعدی، هندسه‌ی بستر با نسبت دادن تراز بستر به هر گره از شبکه‌ی محاسباتی انجام می‌شود. در مدل‌های یک بعدی و مدل‌های دو بعدی قائم، معرفی مقاطع عرضی مسیر و فاصله‌ی بین آنها برای این منظور کافی است. نرم‌افزارهای معتبر برای این کارها ابزار مخصوص به خود را دارند.

دقت در معرفی هندسه‌ی بستر به مدل، نقش کلیدی در برپاسازی مدل برای یک پروژه دارد. صرف مقدار کمی وقت و دقت بیشتر در این مرحله، می‌تواند باعث صرفه‌جویی زمانی قابل توجهی در مرحله‌ی برازش مدل شود. وجود خطا در تراز بستر، در نواحی عمیق تأثیر شدیدی ندارد، اما در قسمت‌های کم‌عمق مؤثر خواهد بود. ناهمواری شدید بستر یا مرزها در نواحی کم‌عمق، پایداری محاسبات را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. علت بیشتر ناپایداری‌هایی که در اجراهای اولیه رخ می‌دهد، ناهماهنگی یا تغییرات شدید هندسه‌ی بستر در نواحی مرزی یا کم‌عمق می‌باشد. این اشکال با تصحیح یا هموارسازی هندسه بستر بر طرف خواهد شد.

معرفی هندسه بستر یا مقطع به مدل‌های ساده شده، نیاز به مهارت بیشتری دارد. تراز نسبت داده شده به یک گره، تنها نماینده‌ی همان نقطه نیست. همچنین نیمرخ عرضی نسبت داده شده به یک مقطع، تنها نماینده‌ی همان مقطع نیست. در مدل‌های یک بعدی و دو بعدی قائم، باید مقاطعی را انتخاب کرد که نماینده‌ی مناسبی از اطراف خود نیز باشند (تا نیمه‌راه

1- Plunge Point

مقاطع اطراف). در غیر این صورت، جریان و رسوب محاسبه شده در یک مقطع، نماینده‌ی آن قسمت از آبراهه مورد مطالعه نخواهد بود. در مدل‌های دو بعدی افقی و سه بعدی نیز مقدار تراز در یک گره، نماینده‌ی متوسط عمق آن نقطه و اطراف آن – تا نیمه‌راه گره‌های اطراف – شناخته می‌شود. عمق یا تراز معرفی شده به هر گره، باید با توجه به این نکته تنظیم شود.

۵-۷-۱-۴ معرفی شرایط اولیه

معرفی شرایط اولیه به مدل‌های جریان و رسوب، یکی از مراحل برپاسازی آنها تلقی می‌شود. معرفی مقدار اولیه‌ی هریک از مشخصه‌هایی که شبیه‌سازی می‌شوند، یک شرط اولیه محسوب می‌شود. در مدل جریان، اطلاعات تراز سطح آب در گره‌های مختلف و میدان سرعت جریان باید معرفی شود. در صورت استفاده از روش‌های پیشرفته محاسبه آشفتگی، شرایط اولیه آشفتگی نیز باید مشخص شود. در صورت وجود جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی، مشخصه‌ی عامل این حالت نیز یک شرط اولیه محسوب می‌شود. در صورتی که نیمرخ قائم دما تغییرات زیادی را نشان دهد، برای شبیه‌سازی سه بعدی یا دو بعدی قائم، باید میدان دما در آغاز شبیه‌سازی را به مدل معرفی کرد. در صورتی که میدان دما نیاز به شبیه‌سازی نداشته باشد، باز هم مقدار دما به مدل معرفی می‌شود، اما نمی‌توان آن را یکی از شرایط اولیه نامید. شرایط اولیه مدل رسوب، محدود به میدان غلظت رسوب معلق در آغاز شبیه‌سازی است.

شرایط اولیه باید با شرایط مرزی مربوط به آغاز شبیه‌سازی متناسب باشد. در غیر این صورت، امکان ناپایدار شدن مدل وجود دارد. می‌توان میدان غلظت و سرعت اولیه را صفر منظور کرد تا در ضمن شبیه‌سازی به شرایط واقعی نزدیک شود. در این صورت نباید به نتایج چند ساعت اول شبیه‌سازی اعتماد کرد. اگر شرایط اولیه سرعت یا غلظت، صفر انتخاب شده‌اند، شرایط مرزی آغاز شبیه‌سازی نیز نباید تفاوت زیادی با این مقدار داشته باشند. می‌توان از گزینه‌ی شروع نرم[1] در مدل‌ها نیز استفاده کرد که شرایط مرزی را به تدریج به مقدار واقعی خود می‌رسانند.

۵-۷-۱-۵ معرفی داده‌های ورودی برای برپاسازی مدل جریان

مدل‌های یک بعدی و دو بعدی افقی جریان، به طور معمول از ضریب مانینگ یا شزی برای تعیین زبری بستر یا مقطع استفاده می‌کنند. اگر تغییرات عمق آب در محیط زیاد باشد، استفاده از ضریب مانینگ توصیه می‌شود.

روش محاسبه‌ی آشفتگی جریان نیز بر رفتار جریان و غلظت رسوب معلق تأثیر می‌گذارد. هیچ‌یک از روش‌های محاسبه‌ی آشفتگی را نمی‌توان بهترین انتخاب برای تمام شرایط دانست. نرم‌افزارهای پیشرفته در این رابطه چند گزینه دارند تا کاربر بر اساس شرایط حاکم، یکی از آنها را انتخاب کند. در شبیه‌سازی یک بعدی جریان، تأثیر آشفتگی طولی به طور معمول قابل صرف نظر است. در مدل‌های دو بعدی افقی، دو بعدی قائم و سه بعدی جریان، نمی‌توان از این پدیده صرف نظر کرد.

برای محاسبه اثر آشفتگی در مدل‌های دو بعدی افقی جریان، می‌توان از مقدار ثابت ضریب لزجت جریان در مکان و زمان، مقدار متغیر ضریب لزجت جریان در مکان و یا یکی از روش‌های شبیه‌سازی لزجت استفاده کرد. توصیه می‌شود که اگر توزیع مکانی مناسبی از

1- Warm Up

اندازه‌گیری‌های محیطی جریان در دست نیست، از روش‌های محاسباتی دومعادله‌ای مانند k-ε استفاده شود، زیرا ضرایب آن برازش داده نمی‌شوند. اگر سرعت، پایداری یا نتایج این روش راضی کننده نبود، به شرط زیاد نبودن عمق نسبت به فاصله‌ی گره‌ها، می‌توان از روش‌های یک معادله‌ای یا طول اختلاط استفاده کرد که تنها یک ضریب برای برازش دارند. اگر ابعاد گردابه‌های جریان در مسئله مهم بوده و توزیع مکانی مناسبی از اندازه‌گیری‌های محیطی در اختیار باشد، می‌توان از یک روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ[1] مانند روش Smagorinsky استفاده کرد و آن را بر اساس اندازه‌گیری‌ها برازش داد. روش k-ε استاندارد دوبعدی افقی طول گردابه‌ها را با دقت شبیه‌سازی نمی‌کند، اما نگارش‌های دیگری از آن برای این منظور وجود دارند. اگر آشفتگی جریان تأثیر شدیدی بر میدان جریان و رسوب نداشته باشد، می‌توان به معرفی یک ضریب آشفتگی ثابت برای کل محدوده اکتفا کرد.

در مدل‌های سه بعدی جریان، اثر آشفتگی علاوه بر صفحه‌ی افقی در امتداد قائم نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. در مسائل کاربردی، فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در امتداد قائم بسیار کمتر از فاصله‌ی گره‌ها در صفحه‌ی افقی است، بنابراین چگونگی و مقیاس تأثیر لزجت آشفتگی جریان در این دو امتداد متفاوت می‌باشد. به این دلیل در بسیاری از مدل‌ها، محاسبات آشفتگی امتداد قائم و آشفتگی صفحه‌ی افقی می‌تواند و باید به طور مجزا از هم انجام گیرد. ممکن است روش محاسبه یا مقدار ضریب پخش آشفتگی جریان در امتداد قائم، همانند صفحه‌ی افقی و یا متفاوت با آن انتخاب شود. امکان چنین تفکیکی در نرم‌افزارهای سه بعدی رشته‌ی عمران آب، معمول و لازم است (در نرم‌افزارهای رشته‌ی مکانیک سیالات معمول نیست).

شبیه‌سازی دقیق آشفتگی جریان در امتداد قائم، علاوه بر میدان جریان، میدان غلظت رسوبات معلق را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. حتی در مسائلی که آشفتگی افقی مهم نیست، آشفتگی قائم باید با دقت محاسبه شود. توصیه می‌شود برای امتداد قائم از روش k-ε استفاده شود. اگر اثر تفاوت چگالی و نیروهای غوطه‌وری ناشی از آن قابل توجه باشد، مقدار آشفتگی قائم تحت تأثیر نیروی غوطه‌وری مثبت یا منفی نیز قرار می‌گیرد. در مسائلی مانند جریان غلیظ، گزینه‌ی محاسبه‌ی این فرآیند باید در نرم‌افزار انتخاب شود. در مدل‌های سه‌بعدی، انتخاب روش مناسب حل آشفتگی در صفحه‌های افقی، بر اساس همان توصیه‌هایی انجام می‌شود که برای مدل‌های دو بعدی افقی ارائه شد.

۵-۷-۱-۶ معرفی داده‌های برپاسازی مدل رسوب

نرم‌افزارها، روابط مختلفی را برای محاسبه بار بستر و جابجایی رسوبات غیر چسبنده در دسترس قرار می‌دهند. گزینه مناسب باید با توجه به شرایط منطقه و محدودیت‌های هر رابطه انتخاب شود (برای توضیح بیشتر، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود).

برای شبیه‌سازی جابجایی رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده و تعامل آنها با بستر، باید داده‌های مختلفی به مدل معرفی کرد. از جمله می‌توان به تعداد لایه‌های محاسباتی بستر، تعداد دسته‌های طیف دانه‌بندی رسوب، امکان لغزش لایه‌های رسوب بستر با شیب تند، شاخص‌های سرعت ته‌نشینی ذرات معلق و تناوب تصحیح هندسه بستر در شبیه‌سازی جریان و رسوب اشاره کرد.

تعداد لایه‌های بستر و تعداد دسته‌های طیف دانه‌بندی رسوب، با توجه به اندازه‌گیری‌های محلی تعیین می‌شود. توصیه می‌شود که از افزایش غیر معقول این دو عدد پرهیز شود. با زیاد شدن تعداد لایه‌ها و تعداد دسته‌ها، تعداد متغیرهایی که باید

1- Large Eddy Simulation

برازش داده شوند، به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این امر روند برازش را بسیار مشکل خواهد کرد. انتخاب تعداد سه لایه برای محاسبات بستر، در بسیاری از مسائل کاربردی کافی است. دسته‌بندی مناسب و متناسب طیف رسوبات بستر و رسوبات ورودی از مرز، نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی ایفا می‌کند.

متغیرهای متنوعی وجود دارند که برای شبیه‌سازی جابجایی رسوب، باید به مدل معرفی شوند. بعضی از آنها در مرحله‌ی برازش مدل تدقیق می‌شوند، اما تعدادی نیز ثابت می‌مانند. از جمله می‌توان به چگالی رسوبات غیر چسبنده (به طور معمول بین ۲/۵ تا ۲/۷)، جرم مخصوص خشک رسوب در لایه‌های مختلف بستر چسبنده، ضخامت اولیه‌ی هر لایه، وزن مخصوص آب، تخلخل رسوبات غیر چسبنده (به طور معمول بین ۰/۳ تا ۰/۷) و طیف دانه‌بندی رسوبات بستر اشاره کرد. این مشخصه‌ها در مرحله‌ی برپاسازی مدل بر اساس اندازه‌گیری‌ها تنظیم می‌شوند.

جرم مخصوص خشک رسوب در هر لایه‌ی بستر چسبنده، بستگی به میزان تحکیم آن لایه دارد و با اندازه‌گیری مشخص می‌شود. برای لایه‌هایی از رسوب ریزدانه که بیش از چند ساعت از ته‌نشین شدنشان نگذشته باشد، جرم مخصوص خشک بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و گِل‌آب متحرک محسوب می‌شوند. برای لایه‌هایی که تنها چند روز از ته‌نشین شدن آنها گذشته باشد، جرم مخصوص خشک در حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و گِل‌آب ثابت محسوب می‌شوند. اگر حدود یک ماه از ته‌نشینی گذشته باشد، این مقدار به ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌رسد و گِل چسبنده‌ی تغییر شکل پذیر محسوب می‌شوند. جرم مخصوص خشک رسوباتی که بین یک تا ده سال از ته‌نشینی آنها گذشته باشد، حدود ۴۰۰ تا ۶۵۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده و لایه‌ی ثابت تا بستر سخت محسوب می‌شوند. مقادیر بالا را نمی‌توان یک معیار قطعی و جایگزین اندازه‌گیری محلی دانست. انجام اندازه‌گیری برای هر پروژه لازم است، زیرا عوامل محیطی مختلفی بر این اعداد تأثیر می‌گذارند. به عنوان نمونه وزن رسوبات ته‌نشین‌شده‌ی بعدی بر بالای یک لایه‌ی رسوب، بر روند تحکیم تأثیر می‌گذارد.

۵-۷-۲ برازش مدل

برازش[1] مدل برای یک مسئله‌ی کاربردی، عبارت است از تنظیم ضرایب و مشخصه‌های موجود در معادله‌ها، به گونه‌ای که نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات اندازه‌گیری شده در شرایط مشخص در بازه‌ی مناسب سازگار باشد.

برازش مدل در دو مرحله انجام می‌شود: برازش کلی و برازش دقیق. مرحله‌ی اول، شامل تنظیم ضرایب و مشخصه‌ها در حدی است که بتواند رفتار عمومی فرآیندها را به درستی شبیه‌سازی کند و مقادیر غیر ممکن در نتایج آن نباشد. در پایان این مرحله، اطمینان حاصل می‌شود که مدل کلی تغییرات محاسبه شده مطابق با واقعیت و مشاهدات است، اگرچه سازگاری در حد مقادیر و جزئیات نباشد. مرحله‌ی دوم (برازش دقیق)، عبارت است از تدقیق نهایی ضرایب ورودی به گونه‌ای که نتایج شبیه‌سازی در حد دقت کافی با اندازه‌گیری‌ها منطبق شود.

پس از برازش کلی، مدل باید بتواند شکل عمومی رسوبگذاری و فرسایش را به درستی محاسبه کند و اصل ایجاد پدیده‌های خاصی مانند جریان غلیظ را – در صورت وجود – نشان دهد. تلاش برای برازش دقیق مدل، پیش از تکمیل برازش کلی آن، بی‌نتیجه است.

1- Calibration

حتی پس برازش دقیق، هنوز خطا در شرایط مرزی می‌تواند باعث خطا در نتایج شود. دقت در شرایط مرزی، هم در مرحله برازش و هم در هنگام انجام شبیه‌سازی‌های اصلی، امری کلیدی است. شرایط مرزی انتخاب شده برای برازش مدل، باید انواع حالت‌های موجود در مجموعه شرایط انتخاب شده برای شبیه‌سازی‌های اصلی را پوشش دهند.

برازش مدل‌ها از راه سعی و خطا و حدس و آزمون هوشمندانه انجام می‌گیرد. ابتدا مقادیری برای شاخص‌ها انتخاب و شبیه‌سازی انجام می‌شود. نتایج با درک مهندسی و اندازه‌گیری‌ها مقایسه و بر اساس آن تغییراتی در شاخص‌ها داده می‌شود. شبیه‌سازی بعدی با مقادیر جدید اجرا و نتایج مجددا بررسی می‌شود. روند حدس و آزمون تا جایی ادامه می‌یابد که سازگاری – با دقت لازم – تحقق یابد. به دلیل تعامل فرآیندها و تعدد مشخصه‌ها، تغییر دادن تصادفی آنها بی‌نتیجه است. برای هدایت هوشمندانه‌ی روند حدس و آزمون، وجود قضاوت مهندسی خوب و درک پدیده‌های حاکم و نقش هر مشخصه لازم است.

توصیه می‌شود تعداد مشخصه‌هایی که از یک اجرا به اجرای دیگر تغییر داده می‌شوند، محدود نگاه داشته شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که در هر آزمون جدید، تنها مقدار یک مشخصه تغییر یابد. تغییر مقدار هر مشخصه، تنها در محدوده‌ی مجاز برای آن مشخصه قابل قبول است. محدوده‌ی مجاز، بر اساس طبیعت هر مشخصه و عدم قطعیت مربوط به آن تعیین می‌شود. گاهی برای رسیدن به شرایط مطلوب، ایجاد تغییراتی در شرایط مرزی گریزناپذیر خواهد بود.

۳-۷-۵ مشخصه‌های برازش[1] مدل

در یک مدل رسوب مخزن، مشخصه‌های اصلی برازش جریان و رسوب عبارتند از:

۱. زبری بستر
۲. لزجت آشفتگی جریان، شامل تأثیر نیروی غوطه‌وری
۳. سرعت سقوط و ضریب‌های آن
۴. ضریب پخش رسوب معلق
۵. تنش آستانه‌ی فرسایش
۶. تنش آستانه‌ی رسوبگذاری
۷. ضرایب مربوط به میزان فرسایش بستر
۸. ضرایب مربوط به روند تحکیم بستر
۹. ضرایب مربوط به بار بستر برای رسوبات غیر ریزدانه (در صورت اهمیت)

اگر تفاوت چگالی ناشی از تفاوت غلظت رسوبات معلق باعث ایجاد جریان قابل توجهی نباشد، برای برازش میدان جریان تنها دو مشخصه اول (به اضافه‌ی شرایط مرزی در صورت لزوم) نیاز به تنظیم دارند. در این حالت، بقیه‌ی مشخصه‌ها تأثیری در رفتار جریان نداشته و تنها برای برازش مدل رسوب تنظیم می‌شوند. اگر جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی تحت اثر تفاوت غلظت رسوبات معلق قابل توجه باشند، مقادیر مشخصه‌ی به کار رفته برای برازش رسوب، بر میدان جریان نیز تأثیر خواهند داشت.

مشخصه‌های فهرست فوق، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

1- Calibration Parameters

۵-۷-۳-۱ زبری بستر

مقدار زبری، نماینده‌ی مقاومت بستر در مقابل عبور جریان است. با تنظیم این مشخصه، می‌توان سرعت جریان و افت انرژی در طول مسیر را تنظیم کرد. اگر جریان غلیظ در نزدیک بستر شکل نگرفته باشد، تأثیر زبری بر میدان عمومی جریان در قسمت‌های عمیق مخزن زیاد نیست. وجود پوشش گیاهی می‌تواند زبری مؤثر و مقاومت در مقابل عبور جریان را به شدت افزایش دهد.

زبری بستر در محاسبه‌ی تنش برشی جریان نیز مؤثر است و از این طریق بر روند تعامل جریان با رسوبات بستر تأثیر می‌گذارد. در مدل‌های عددی برای شبیه سازی تعامل جریان با رسوب بستر، از مقایسه‌ی تنش برشی جریان با تنش‌های آستانه‌ی فرسایش و آستانه‌ی رسوبگذاری استفاده می‌شود. زبری بستر، در محاسبه‌ی تنش برشی جریان از سرعت آن نیز نقش مهمی ایفا می‌کند، بنابراین تنظیم مقدار زبری بر روند فرسایش و رسوبگذاری نیز تأثیر دارد.

اگرچه از نظر تئوری، زبری بستر در معادله‌های جریان و رسوب یکسان می‌باشد، اما بیشتر نرم‌افزارها دو ضریب زبری مختلف برای این دو بخش دریافت می‌کنند تا در صورت نیاز بتوان مقادیر متفاوتی به آنها نسبت داد. تفاوت اثر این دو ضریب و حدود مقادیر معمول هر کدام از آنها باید مورد توجه باشد. گاهی امکان برازش توأم مدل جریان و مدل رسوب، بدون معرفی مقادیر متفاوت زبری در این دو مدل، میسر نیست. در بعضی مراجع، زبری بستر در معادله‌های جریان با نام مقاومت بستر[1] و علامت اختصاری k_s و زبری بستر در معادله رسوب با نام زبری بستر[2] و علامت k_n مشخص می‌شوند.

در صورت تغییر تعداد گره‌های محاسباتی در امتداد قائم، ضریب زبری بستر باید مجددا بررسی شود. علت این امر آن است که در تعدادی از مدل‌های دو بعدی قائم یا سه بعدی جریان، مقدار زبری بستر تا حدی به نحوه‌ی گره‌بندی امتداد قائم در مجاورت بستر نیز وابسته می‌باشد.

مدل‌های یک بعدی و مدل‌های دو بعدی افقی، از ضریب مانینگ یا ضریب شزی برای تعیین مقاومت بستر یا مقطع در مقابل جریان استفاده می‌کنند. به طور معمول، در مسائل دو بعدی مقادیری بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۵ $s/ m^{1/3}$ برای ضریب مانینگ (یا ۳۰ تا ۵۰ برای ضریب شزی) برای هر گره، و در مسائل یک بعدی رودخانه‌ای مقادیر ۰/۰۱ تا ۰/۱ $s/ m^{1/3}$ برای ضریب مانینگ مقطع مناسب هستند. در تعریف فوق، افزایش عدد مانینگ یا کاهش عددی شزی به معنی افزایش مقاومت بستراست. در بعضی از نرم‌افزارها، عکس ضریب مانینگ به عنوان داده ورودی دریافت می‌شود (با واحد $m^{1/3}/s$). مقادیر قابل توصیه برای عکس ضریب مانینگ، معادل با معکوس مقادیر بیان شده برای ضریب مانینگ هستند.

در مدل‌های سه بعدی و دو بعدی قائم، مقدار مقاومت بستر در مقابل جریان – که بیشتر با عدد مشخصه‌ی زبری (k_s) مشخص می‌شود – به طور معمول بین ۰/۰۱ تا ۰/۳ متر است. وجود پوشش گیاهی بر بستر، می‌تواند زبری مؤثر در مقابل جریان را به شدت افزایش دهد. در صورت عدم وجود یک تخمین اولیه، برازش را می‌توان با حدس اولیه‌ی ۰/۰۵ متر شروع کرد.

مقدار زبری بستر در مدل‌های رسوب را – که بیشتر با نماد (k_n) نشان داده می‌شود – در بستر ماسه‌ای هموار می‌توان ۲/۵ برابر قطر متوسط ذرات در نظر گرفت. برای بستر ریزدانه، چین‌خوردگی و ناهمواری بستر تعیین کننده‌ی مقدار زبری خواهد بود. حدود مقدار این مشخصه برای بستر با رسوب ریزدانه به طور معمول از مرتبه‌ی ۰/۰۰۱ متر است.

1- Bed Resistance

2- Bed Roughness

مقدار زبری بستر در مدل رسوب، نقش مهمی در کنترل روند ته‌نشین شدن رسوب معلق دارد. این مشخصه، در کنار تنش آستانه‌ی رسوبگذاری و تنش برشی مجاور بستر، تعیین کننده‌ی امکان یا عدم امکان نشست رسوب می‌باشد. تنظیم دقیق این مشخصه در مسائل مرتبط با جابجایی رسوب اهمیت زیادی دارد.

۵-۷-۳-۲ ضریب لزجت آشفتگی جریان

وجود لزجت آشفتگی جریان در معادله‌ها، ناشی از عدم حل جریان‌های با مقیاس ریز زمانی و مکانی – نسبت به شبکه‌ی محاسباتی مورد استفاده – می‌باشد. به این دلیل فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در مقدار لزجت آشفتگی تأثیر دارد. در مدل‌های دو بعدی قائم و سه بعدی مخزن سد، فاصله‌ی گره‌ها در امتداد قائم بسیار کمتر از فاصله‌ی گره‌ها در صفحه‌ی افقی است، بنابراین مقدار لزجت در امتداد قائم با مقدار آن در صفحه‌ی افقی تفاوت زیادی دارد. روش محاسبه و ضرایب مربوط به لزجت در مدل‌ها برای امتداد قائم و صفحه‌ی افقی به طور جداگانه تنظیم می‌شود. مفهوم و مقدار شاخص لزجت، بستگی به روش انتخاب شده برای محاسبه‌ی آشفتگی جریان دارد.

اگر روش k-ε انتخاب شود، ضریبی برای برازش وجود نخواهد داشت (تغییر ثابت‌های روش مزبور جز برای کاربران بسیار ماهر توصیه نمی‌شود)، اما حداقل مقادیر مجاز برای k و ε باید مشخص شوند. توصیه می‌شود برای k مقدار 10^{-7} m^2/s^2 و برای ε مقدار $5 \cdot 10^{-10}$ m^2/s^3 به عنوان حداقل‌های مجاز معرفی شوند تا کمترین مقدار لزجت جریان نزدیک به مقدار لزجت آب باشد.

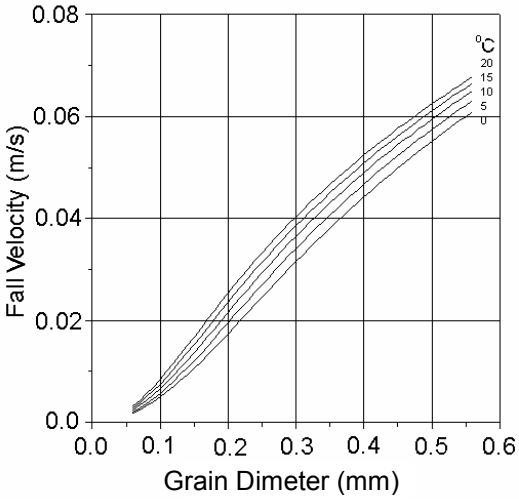
اگر یکی از روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ – مقیاس (Large Eddy Simulation) مانند روش Smagorinski برای محاسبه‌ی اغتشاش انتخاب شده باشد، ضریبی دارد که باید برازش شود. این ضریب برای روش Smagorinski در مدل‌های دوبعدی افقی به طور معمول بین ۰/۲۵ تا ۱/۰ قرار دارد. ضریب برازش روش‌های مزبور به فاصله‌ی گره‌ها نیز بستگی دارد، بنابراین با ریز یا درشت کردن شبکه‌ی محاسباتی، مقدار این ضریب نیز باید تغییر داده شود تا تأثیر آشفتگی جریان یکسان باقی بماند. استفاده از این نوع روش برای امتداد قائم، در بیشتر مدل‌های عددی توصیه نمی‌شود. اگر به هر دلیل برای امتداد قائم نیز به‌کارگیری همین روش انتخاب شود، ضریب برازش مربوط به امتداد قائم باید بزرگتر از ضریب مربوط در امتداد افقی باشد تا بیشتر بودن اثر لزجت در امتداد قائم در محاسبات منعکس شود. اگر فاصله‌ی گره‌ها در امتداد قائم، تابع عمق آب بوده و یا توزیع غیر یکنواختی داشته باشد، مقدار معینی از ضریب برازش منجر به مقادیر متفاوتی از لزجت در امتداد قائم خواهد شد. به دلیل مشکل نامبرده، مدل‌هایی که از شبکه‌ی محاسباتی با فواصل گره غیر ثابت در امتداد قائم استفاده می‌کنند، گزینه‌ی به‌کارگیری این روش را در دسترس کاربران قرار نمی‌دهند.

اگر اثر تفاوت چگالی بر میدان جریان قابل توجه باشد، گزینه‌ی محاسبه‌ی اثر غوطه‌وری بر آشفتگی امتداد قائم نیز باید فعال و روش و ضرایب مربوط به آن تنظیم شوند. مفهوم و مقدار مناسب این ضریب‌ها تابع روش محاسبه است. معیار سازگاری مدل با طبیعت دراین رابطه، ضخامت لایه‌ی غلیظ و میزان اختلاط آن با آب اطراف است. برای توضیح بیشتر در این مورد به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

در مسائل دو بعدی قائم و سه بعدی، اثر ضریب لزجت جریان در امتداد قائم، بیشتر از اثر ضریب لزجت جریان در صفحه‌ی افقی است. به دلیل تفاوت نامبرده، ضریب لزجت امتداد قائم باید با دقت بیشتری – نسبت به صفحه افقی – تنظیم شود.

۵-۷-۳-۳ سرعت سقوط و مشخصه‌های آن

مقدار سرعت سقوط در بسیاری از نرم‌افزارها از کاربر دریافت می‌شود تا به عنوان ابزار برازش استفاده شود. می‌توان سرعت سقوط رسوبات غیر ریزدانه را بر اساس رابطه استوکس (Stokes)، بر حسب جرم مخصوص آب و رسوب و قطر ذرات و لزجت مولکولی آب، محاسبه کرد. لزجت آب تابع دمای آن می‌باشد، بنابراین سرعت سقوط به دمای آب نیز بستگی دارد. شکل (۵-۴) نمودار رابطه‌ی سرعت سقوط رسوبات ماسه‌ای با دانه‌بندی و دمای آب را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که برای رسوبات غیر چسبنده، حدس اولیه بر اساس رابطه‌ی نامبرده تعیین شود.



شکل ۵-۴- سرعت سقوط ذرات بر حسب قطر ذرات و دمای آب

سرعت سقوط رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، علاوه بر دانه‌بندی و دمای آب، تحت تأثیر عوامل دیگری مانند به هم پیوستن ذرات تحت اثر غلظت رسوب و تأثیر هیدرولیکی متقابل ذرات رسوب معلق بر یکدیگر نیز قرار می‌گیرد. این موضوع، در ادامه توضیح داده شده است.

یکی از مشخصه‌های سرعت سقوط رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، سرعت سقوط آزاد در محیط با غلظت رسوب کم می‌باشد. تنظیم این مشخصه نیاز به دقت و حساسیت دارد و مقدار آن از مرتبه‌ی ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۱ متر بر ثانیه است. یک شاخص دیگر، مقدار آستانه‌ای است که اگر غلظت رسوبات معلق از آن بیشتر شود، پدیده‌ی به‌هم پیوستن ذرات فعال می‌شود. این مقدار بین ۰/۰۱ تا ۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. در این شرایط، افزایش غلظت باعث افزایش سرعت سقوط می‌شود. ممکن است غلظت به اندازه‌ای افزایش یابد که تأثیر هیدرولیکی ذرات رسوب معلق بر یکدیگر – به عنوان یک عامل بازدارنده – به اندازه‌ی کافی شدید شده و بر عوامل دیگر غلبه کند. بنابراین یک مشخصه مهم دیگر، مقدار آستانه‌ای است که اگر غلظت رسوب معلق از آن هم بیشتر شود، افزایش غلظت باعث کاهش سرعت سقوط خواهد شد. این مقدار بین ۱۰ تا ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. دو مشخصه‌ی برازش دیگر، حداکثر سرعت سقوط و غلظت آستانه‌ای است که بعد از آن ته‌نشینی اتفاق نخواهد افتاد.

اگر شوری آب در جایی بین ۱ تا ۱۰ psu باشد، باعث به هم پیوستن تدریجی ذرات معلق و تشکیل ذرات بزرگتر می‌شود. در شرایط مزبور، سرعت سقوط تحت تأثیر شوری نیز قرار خواهد داشت. تأثیر شوری بر سرعت سقوط در محل تماس رودخانه با دریا رخ می‌دهد، اما در مخزن سد معمول نیست.

مقدار سرعت سقوط، بر سرعت رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد. برازش سرعت سقوط، از راه مقایسه نرخ رسوب‌گذاری و فرسایش بین مدل و واقعیت امکان‌پذیر است. مشخصه یا مشخصه‌های تعیین کننده‌ی سرعت سقوط، در مسائل رسوب مخزن سد نقش حساسی در میزان پیشروی رسوبات معلق پیش از ته‌نشین شدن دارند. این مشخصه‌ها بر محل شکل‌گیری و پیشروی دلتای رسوبی تأثیر زیادی دارند. در شبیه‌سازی جریان‌های غلیظ، مقایسه نیمرخ قائم غلظت در داخل توده‌ی غلیظ با اندازه‌گیری‌ها، ملاک خوبی برای برازش سرعت سقوط است. تأثیر سرعت سقوط بر ضخامت توده‌ی غلیظ، کمتر از تأثیر آن بر نیمرخ یاد شده است. مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریان غلیظ به دلیل ته‌نشینی مضمحل شود، تابع سرعت سقوط می‌باشد.

۵-۷-۳-۴ ضریب پخش رسوب معلق

همان طور که در معادله‌های جریان، اثر آشفتگی و عوامل محاسبه نشده کوچک‌مقیاس بر پخش اندازه‌ی حرکت، به‌وسیله‌ی ضریب پخش یا لزجت جریان منظور می‌شود، در معادله غلظت رسوب معلق نیز اثر آشفتگی و عوامل محاسبه‌نشده‌ی کوچک‌مقیاس دیگر بر پخش غلظت، به‌وسیله‌ی ضریب پخش رسوب[1] در نظر گرفته می‌شود. دلیلی ندارد که مقدار این ضریب با لزجت آشفتگی جریان برابر باشد. ضریب پخش رسوب را می‌توان به صورت مستقیم و یا به صورت ضریبی از لزجت آشفتگی جریان به مدل معرفی کرد. به طور معمول مقدار این ضریب برای آبراهه‌های کوچک بین ۱ تا ۵ m^2/s و برای رودخانه‌ها بین ۵ تا ۲۰ m^2/s است. تنظیم ضریب پخش رسوب، یکی از مراحل مهم و مشکل برازش مدل است. برای تنظیم ضریب نامبرده، اندازه‌گیری‌های محیطی کافی از غلظت رسوب معلق در شرایط و نقاط مختلف لازم است.

در مسائل یک بعدی، اثر پخش غلظت رسوب در امتداد جریان مؤثر و مهم می‌باشد (بر خلاف لزجت جریان). ضریب پخش طولی می‌تواند سرعت پیشروی جریان غلیظ در مخزن سد را تحت تأثیر قرار دهد. در مدل‌های دو بعدی افقی به سختی می‌توان محدوده معینی را برای مقدار ضریب پخش رسوبات معلق ریزدانه توصیه کرد. شاخص نامبرده تابع سرعت جریان، آشفتگی جریان، عمق آب و فاصله گره‌های محاسباتی است. به عنوان یک حدس اولیه، در مخزن سد ضریب پخش رسوب مدل دوبعدی‌افقی برای فواصل گره کمتر از ۵۰ متر، کمتر از ۵ متر مربع بر ثانیه است. در همان محیط، ضریب مزبور برای فواصل گره ۵۰۰ متری، می‌تواند تا حدود ۵۰ متر مربع بر ثانیه افزایش یابد. در مدل‌های سه‌بعدی و دو بعدی قائم، مقدار ضریب نامبرده در دو امتداد افقی و قائم جداگانه تنظیم می‌شود.

به دلیل تبعیت ضریب پخش از فاصله‌ی گره‌ها، معرفی مستقیم آن به طور ثابت برای تمام یک شبکه‌ی حل نامنظم، منجر به مقادیر متفاوت و کنترل نشده‌ای از شدت اثر پخش رسوب معلق در قسمت‌های مختلف محیط می‌شود.

توصیه می‌شود برای برازش مدل غیر یک‌بعدی؛ الف) در مدل هیدرودینامیک، برای محاسبه‌ی آشفتگی جریان از یک روش توانمند (مانند k-ε در امتداد قائم و k-ε یا Smagorinski برای صفحه‌ی افقی) استفاده شود. ب) در مدل رسوب، به جای معرفی مستقیم ضریب پخش، مقدار آن به صورت ضریبی از آشفتگی جریان معرفی شود (زیرا ساده‌تر برازش می‌شود).

نسبت بین ضریب پخش غلظت و لزجت جریان، به نام عدد اشمیت شناخته می‌شود و عکس عدد پرانتل است. با توجه به پیش‌فرض ۰/۸۵ تا ۰/۹ برای عدد پرانتل در معادله‌ها، برای عدد اشمیت مقدار ۱/۱ به عنوان حدس اول پیشنهاد می‌شود. کمتر شدن عدد اشمیت نسبت به یک نیز امری ممکن است. در تعدادی از مسائل کاربردی، عدد اشمیت در امتداد قائم حتی ۰/۱ نیز برآورد شده است. در شبیه‌سازی‌های سه بعدی یا دو بعدی قائم با لایه‌بندی چگالی در مقیاس واقعی، برای اجتناب از ناپایداری می‌توان عدد اشمیت را در امتداد افقی در حدود ۱/۰ و در امتداد قائم در حدود ۰/۱ انتخاب کرد. اثر پخش غلظت رسوب معلق در امتداد قائم، مهمتر و بیشتر از اثر آن در امتداد افقی است.

۵-۷-۳-۵ تنش آستانه‌ی فرسایش

تنش آستانه‌ی فرسایش یکی از مهمترین شاخص‌های برازش در مسائلی است که فرسایش بستر چسبنده در آنها مهم تشخیص

1- Dispersion

داده شده باشد (مانند عملیات رسوبشویی و جریان غلیظ). برای وقوع فرسایش، تنش مؤثر جریان باید بیش از تنش آستانه‌ی فرسایش باشد. بستر چسبنده به طور معمول در چند لایه تعریف می‌شود و تنش آستانه‌ی فرسایش باید برای هر لایه تنظیم شود. مقدار آن را می‌توان بر اساس میزان تحکیم یا جرم مخصوص خشک توده‌ی رسوب ته‌نشین شده تخمین زد.

پیشنهاد می‌شود از مدل زیر برای حدس اولیه تنش آستانه فرسایش استفاده شود: رسوباتی که به تازگی ته‌نشین شده‌اند با جرم مخصوص خشک حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش آستانه فرسایش بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ نیوتون بر متر مربع دارند و به سرعت شسته می‌شوند (برای لایه‌ی اول). رسوباتی که تا حدی تحکیم یافته‌اند با جرم مخصوص خشک بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش آستانه‌ای بین ۰/۲ تا ۰/۴ نیوتون بر متر مربع دارند (برای لایه‌ی دوم و سوم). رسوبات سخت و تحکیم‌یافته با جرم مخصوص خشک بیش از ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش آستانه فرسایش بین ۰/۶ تا ۲ نیوتون بر متر مربع دارند. این اعداد معیارهای قطعی نیست، زیرا رسوبات مناطق مختلف شرایط بسیار متفاوتی دارند. به همین دلیل مقادیر ارائه شده در مراجع مختلف یکسان نیست.

۵-۷-۳-۶ تنش آستانه‌ی رسوبگذاری

تنش آستانه‌ی رسوبگذاری یکی از مهمترین شاخص‌ها در مسائلی است که ته‌نشینی رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده در آنها مهم است. برای وقوع رسوبگذاری، لازم است که تنش مؤثر جریان، کمتر از تنش آستانه‌ی رسوبگذاری باشد.

مقدار تنش آستانه رسوبگذاری به طور معمول بین ۰/۰۳ تا ۱ نیوتون بر متر مربع است. در اکثر موارد مقدار این شاخص کمتر از ۰/۱ نیوتون بر متر مربع می‌باشد. اگر طیف دانه‌بندی رسوبات معلق به چند دسته تفکیک شود، تنش آستانه‌ی رسوبگذاری باید برای هر دسته مشخص شود. می‌توان برای شروع برازش، مقدار آن را برای همه دسته‌های رسوب ریزدانه یکسان در نظر گرفت. مقدار تنش آستانه رسوبگذاری برای رسوبات درشت‌تر، با مقدار آن برای رسوبات ریزدانه یکسان نیست.

مقدار تنش آستانه‌ی رسوبگذاری نقش مهمی در کنترل روند ته‌نشین شدن رسوبات دارد، زیرا در کنار زبری بستر (در مدل رسوب) و تنش برشی مجاور بستر، تعیین کننده‌ی امکان یا عدم امکان نشست رسوب می‌باشد. مقدار این شاخص، در مسائل شکل‌گیری و جابجایی دلتای رسوبی و در مسائل جریان غلیظ از اهمیت زیادی برخوردار است. مقدار شاخص مزبور به طور معمول کمتر از تنش آستانه فرسایش است، بنابراین ممکن است در شرایطی نه رسوبگذاری و نه فرسایش رخ دهد.

در مسائل جریان غلیظ، تنش آستانه رسوبگذاری نقش حساسی دارد. تغییر آن به اندازه‌ی تنها ۰/۰۵ نیوتون بر متر مربع، می‌تواند مدت زمان لازم برای مضمحل شدن توده‌ی غلیظ در یک مقطع از مخزن را به دوبرابر یا نصف تغییر دهد.

۵-۷-۳-۷ ضرایب مربوط به میزان فرسایش بستر

شدت فرسایش بستر چسبنده، با افزایش تنش برشی جریان افزایش می‌یابد. مقدار فرسایش در بیشتر مدل‌ها، به صورت یک تابع غیر خطی دارای ضریب و توان بیان می‌شود که شکل آن برای لایه‌های سخت و نرم متفاوت است. ضریب و توان یاد شده، دو مشخصه‌ی برازش محسوب می‌شوند و باید برای هر کدام ازلایه‌های بستر به طور جداگانه معرفی شوند.

۵-۷-۳-۸ ضرایب مربوط به روند تحکیم بستر

در مدل‌ها، روند تحکیم رسوبات ته‌نشین شده، از راه انتقال جرم از یک لایه به لایه‌ی زیرین و تغییر ضخامت لایه‌ها در نظر گرفته می‌شود. نرخ انتقال جرم بین لایه‌ها، به طور معمول بین 10E-8 $kg/m^2/s$ تا 10E-5 $kg/m^2/s$ است. نرخ انتقال جرم در لایه‌های زیرین، باید کمتر از نرخ انتقال در لایه‌های بالا تنظیم شود. تغییر مقدار تحکیم در شبیه‌سازی‌هایی که تنها چند روز را در بر می‌گیرند، قابل توجه نیست. در شبیه‌سازی یک سیل یا جریان غلیظ، شاخص فوق از حساسیت برخوردار نخواهد بود.

۵-۷-۴ مقایسه و سنجش سازگاری نتایج شبیه‌سازی مدل با اندازه‌گیری‌های محیطی

برای برازش یک نرم‌افزار، باید مقدار مشخصه‌ها را به گونه‌ای تنظیم کرد که نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات محیطی – به خصوص اندازه‌گیری‌ها – سازگار شود. سنجش سازگاری، از راه مقایسه‌ی سرعت جریان، غلظت رسوب معلق، عمق فرسایش، ضخامت رسوبگذاری و تغییر دانه‌بندی رسوبات انجام می‌گیرد. نوع انتخاب کمیت‌های مورد مقایسه، روش مقایسه و میزان اختلاف مجاز برای هر یک، تابع مسئله‌ی مورد نظر و سؤال‌هایی است که پاسخ آنها از شبیه‌سازی درخواست شده است. روند مقایسه باید هماهنگ با اهمیت فرآیندها و تأثیرشان بر تصمیم‌گیری‌های نهایی پروژه باشد.

برازش و صحت‌سنجی برای مخازنی که هنوز احداث نشده‌اند مشکل‌تر از سدهای موجود است، زیرا تنها شرایط قبل از احداث قابل اندازه‌گیری می‌باشد. حتی بعضی از اطلاعات محیطی لازم برای برپاسازی مدل، مانند دانه‌بندی رسوب بستر، پس از احداث سد تغییر می‌کنند. امکان انجام اندازه‌گیری در سدهای موجود را باید مغتنم شمرد و همانند یک مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱، حداکثر استفاده را از آن کرد.

تجربه برازش مدل در مسائل رودخانه و دریا، برای برازش مدل در مخزن سد کافی نیست. در مسائل رودخانه، امکان مقایسه نیمرخ طولی سطح آب در زمان‌های مختلف، ملاک مناسب و ساده‌ای برای کنترل سازگاری مدل با واقعیت به‌دست می‌دهد (هرچند کافی نیست). در بسیاری از مسائل دریایی نیز تغییرات زمانی سطح آب – ناشی از جزر و مد – چنین نقشی دارد. در مخزن سد، به دلیل عمق زیاد و حجم وسیع، چنین ملاک‌های ساده‌ای در دسترس نیست. روش‌های سنجش سازگاری مدل با واقعیت، در محیط مخزن و در رودخانه‌های منتهی به آن یکسان نیست. نیازهای شبیه‌سازی طولانی‌مدت تغییرات ریخت‌شناسی نیز با شبیه‌سازی کوتاه‌مدت سیلاب یا جریان غلیظ تفاوت دارد.

در رودخانه بالا دست مخزن، مهمترین ملاک‌های سازگاری عبارت‌اند از: نیمرخ طولی سطح آب، نحوه تقسیم جریان بین مجرای اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، تغییرات سطح مقطع در اثر جابجایی رسوب و مقدار جابجایی رسوب کلی و تفکیک شده بر حسب دانه‌بندی. در داخل مخزن سد ملاک‌های دیگری وجود دارند، مانند: میدان سرعت در فضای دو یا سه بعدی، نحوه‌ی توزیع غلظت رسوبات معلق در طول و عمق مخزن، تغییر تراز سطح آب و میزان فرسایش و رسوبگذاری به صورت کلی و تفکیک شده بر حسب دانه‌بندی.

در شبیه‌سازی تغییرات طولانی مدت ریخت‌شناسی مخزن، مهمترین ملاک‌های سنجش سازگاری عبارتند از: تغییرات تراز بستر در نواحی مختلف، میزان جابجایی دلتای رسوبی، روند تغییر ظرفیت مخزن با گذشت زمان، روند تغییر دانه‌بندی رسوب بستر در هر محل و دانه‌بندی رسوبات بستر که باید پس از اجرای طولانی‌مدت بین نتایج مدل و واقعیت مقایسه شود.

برای شبیه‌سازی کوتاه‌مدت رفتار جریان غلیظ، مهمترین ملاک‌های سنجش سازگاری عبارتند از: محل ریزش جریان غلیظ به سمت عمق آب[1]، سرعت پیشروی توده‌ی غلیظ، ضخامت توده‌ی غلیظ در قسمت‌های مختلف، نواحی فرسایش و رسوبگذاری و بالاخره میدان کلی سرعت و غلظت در فضای دو بعدی قائم یا سه بعدی.

برای شبیه‌سازی فرسایش در عملیات رسوبشویی تحت فشار، مقایسه مقدار تغییر تراز بستر در محل فرسایش، معیار مناسبی برای سنجش سازگاری است. مقایسه غلظت رسوب معلق در آب خروجی از دریچه‌ها – از راه اندازه‌گیری سری زمانی بده آب و غلظت رسوب آب خروجی – نیز روش خوبی برای سنجش سازگاری مدل با واقعیت است.

در صورت مؤثر بودن جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی، برای سنجش سازگاری نمی‌توان به مقایسه میدان جریان متکی بود. در این حالت باید نیمرخ قائم عامل ایجاد کننده‌ی جریان (مثلا دما یا غلظت رسوب) را نیز در طول زمان مقایسه کرد.

مقایسه تراز سطح آب مخزن بین مدل و واقعیت، هر چند برای کنترل دقت شرایط مرزی جریان لازم است، اما برای برازش مدل جریان قابل استفاده نیست. برای برازش مدل جریان باید از مقایسه سرعت‌ها (بده‌ها برای مدل یک بعدی) استفاده کرد. علت این امر آن است که: الف) تغییرات مکانی تراز سطح آب در مخزن اندک است. ب) حساسیت نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان نسبت به شیب سطح آب زیاد است. ج) دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری و دقت نتایج شبیه‌سازی جوابگوی حساسیت مورد نیاز نیست.

مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با شرایط محیطی باید با توجه به ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل انجام شود. در شبیه‌سازی یک بعدی رسوب نباید مقایسه تراز خط‌القعر را ملاک سنجش سازگاری قرار داد، بلکه باید مقدار کل سطح هر مقطع را در نظر گرفت. در شبیه‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی با مدل دو بعدی قائم نیز به جای مقایسه تراز خط‌القعر، باید منحنی سطح مقطع بر حسب تراز آب را ملاک مقایسه شبیه‌سازی با واقعیت قرار داد. در شبیه‌سازی یک بعدی، برای مقایسه‌ی جریان باید بده آب عبوری از کل مقطع را ملاک قرار داد، نه سرعت اندازه‌گیری شده در یک نقطه خاص از مقطع را. در مدل‌های دو بعدی افقی و دو بعدی قائم نیز ابتدا باید نتایج اندازه‌گیری را به سرعت متوسط در عمق یا عرض تبدیل و سپس با نتایج شبیه‌سازی مقایسه کرد.

برای هر نوع سنجش سازگاری، باید توجه داشت که مقادیر شبیه‌سازی شده فقط مربوط به یک نقطه نیست، بلکه نماینده‌ی کامل یک سلول محاسباتی است. از سوی دیگر، اندازه‌گیری محلی نقطه‌ای، تنها شرایط موضعی یک نقطه را نشان می‌دهد. این تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، در بُعد زمانی هم وجود دارد. انجام اندازه‌گیری در هر نقطه را باید برای حداقل زمان مشخصی ادامه داد و متوسط زمانی حاصله را در نظر گرفت تا اثر نوسان‌های ناشی از آشفتگی حذف شوند.

در مطالعه تغییرات درازمدت ریخت‌شناسی، سازگار بودن مقدار کل رسوبات ورودی در دوره‌ی زمانی معین بین شبیه‌سازی و واقعیت، معیار مهمی است که باید کنترل شود.

تعداد و توزیع مکانی و زمانی نقاط برازش و فراوانی آنها در شرایط مختلف مرزی، از یک سو باید بر نواحی و شرایط مشکل‌ساز محیط حل و نواحی مؤثر بر آن متمرکز شود و از سوی دیگر یکتا بودن مجموعه مقادیر انتخاب شده برای مشخصه‌های برازش را تضمین کند. مطالب ارائه شده در باره‌ی توزیع اندازه‌گیری‌های محیطی و روند برازش، در این رابطه نیز قابل استفاده است.

دو راه‌کار متفاوت، اما مکمل برای مقایسه و سنجش سازگاری نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های محیطی وجود دارد: الف) مقایسه‌ی مستقیم نتایج و اندازه‌گیری‌ها در فضای زمان. ب) پردازش آماری نتایج و اندازه‌گیری‌ها و مقایسه مشخصه‌های آماری.

1- Plunging Point

توصیه می‌شود که ترکیبی از هردو روش فوق برای برازش مدل استفاده شود. روش دوم نیازمند وجود داده‌های اندازه‌گیری زیاد در طول زمان در هر محل می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در ضمن عملیات اندازه‌گیری محیطی، حداقل برای بعضی از نقاط و کمیت‌ها، از دستگاه‌های سنجش خودکار استفاده شود. برای مقایسه‌ی مستقیم نتایج و اندازه‌گیری‌ها در فضای زمان، سه نوع روش نمایش و مقایسه وجود دارد؛ الف) رسم منحنی تغییرات یک کمیت بر حسب تراز آب مثل رابطه‌ی بده – اشل، ب) رسم منحنی تغییرات یک کمیت بر حسب طول یا فاصله مثل نیمرخ طولی بستر، ج) رسم تغییرات اطلاعات مربوط به یک نقطه یا یک مقطع بر حسب زمان (مثل سری زمانی سرعت یا غلظت).

یک روش سنجش سازگاری سرعت، آن است که سری‌های زمانی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در یک نقطه مقایسه شوند. یک روش دیگر آن است که تمامی نیمرخ قائم سرعت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در چند زمان مشابه مقایسه شود. روش دیگر آن است که مدل کلی، مانند خطوط جریان، گردابه‌های بزرگ‌مقیاس افقی و تغییرات عرضی سرعت، مقایسه شوند. برای جریان غلیظ، می‌توان سرعت پیشروی توده و زمان رسیدن به قسمت‌های معین مخزن را نیز مقایسه کرد. توصیه می‌شود که تنها به یکی از روش‌های فوق اکتفا نشود، بلکه چند روش مختلف برای سنجش سازگاری استفاده شوند. همه روش‌های فوق برای همه مدل‌ها قابل استفاده نیستند، مثلا مدل‌های دو بعدی افقی، نیمرخ قائم محاسبه نمی‌کنند.

حداکثر خطای قابل قبول برای هر مشخصه – همانند حساسیت نتایج نسبت به تغییر مقدار مشخصه‌ها – از مسئله‌ای به مسئله‌ی دیگر و حتی در قسمت‌های مختلف یک محیط حل تفاوت می‌کند. به عنوان یک توصیه عمومی، حداکثر ۱۵٪ خطا در اندازه و ۲۰ درجه خطا در زاویه، برای سرعت جریان‌های شدید مجاز تلقی می‌شود. برای سرعت‌های اندک، تا ۴۵ درجه خطا در زاویه قابل تحمل است. اگر نسبت بین سرعت یا بده محاسبه شده و سرعت یا بده سنجش شده برای شرایط مختلف شدت جریان، بین ۰/۸ تا ۱/۲ باشد، سازگاری مدل با واقعیت مناسب تلقی می‌شود. لازم نیست برای سازگار کردن سرعت‌های اندک که نقش مؤثری بر میدان جریان و رسوب ندارند، وقت و انرژی صرف شود.

معمول‌ترین معیارهای مقایسه آماری عبارتند از:

الف) متوسط خطا:
$$Average\ Error = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Observed_i - Simulated_i\right)$$

ب) ریشه‌ی مجموع مربعات خطا
$$Root\ Mean\ Square\ Error = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Observed_i - Simulated_i\right)^2}$$

ج) درصد ریشه‌ی مجموع مربعات خطا
$$Percent\ Of\ RMSE = \frac{Root\ Mean\ Square\ Error}{Maximum - Minimum\ Measured\ Values} \times 100$$

د) انحراف معیار خطاها
$$STD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Observed_i - Simulated_i - AverageError\right)^2}$$

ه) اختلاف مقادیر بیشینه
$$Error\ Of\ Max = Max\{Observed_i\} - Max\{Simulated_i\}$$

و) اختلاف مقادیر کمینه
$$Error\ Of\ Min = Min\{Observed_i\} - Min\{Simulated_i\}$$

خطای مجاز در هر یک از معیارهای فوق، بستگی به مسئله‌ی مورد بررسی و حساسیت شاخص‌های مختلف در آن دارد. ممکن است خطای قابل قبول در قسمت‌های مختلف محیط حل نیز یکسان نباشد. به عنوان یک معیار عمومی، در بسیاری از مسائل می‌توان تا ۱۰٪ خطا برای تراز سطح آب، ۱۰٪ الی ۲۰٪ خطا برای سرعت جریان و ۲۰٪ خطا برای غلظت رسوب معلق و شوری و دما را برای "درصد ریشه‌ی مجموع مربعات خطا" قابل قبول تلقی کرد.

می‌توان روش‌های آماری را در نرم‌افزارها گنجانید و قسمتی از روند حدس و آزمون جهت برازش را به نرم‌افزار سپرد. روش‌های نیمه‌خودکار برازش مشخصه‌ها در نرم‌افزارهای جدید، بر همین اساس متکی هستند. روش‌های آماری می‌توانند برخورد کامل‌تری با عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌ها داشته باشند و تأثیر آن بر عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی را مشخص کنند. در عین حال روش‌های نامبرده نیز جای قضاوت مهندسی را در برازش مدل نمی‌گیرند.

در طی روند برازش، باید عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها، شرایط مرزی، شرایط اولیه و مشخصات چاه و چشمه‌ها[1] را مورد توجه قرار داد. برازش دقیق مدل به اندازه‌گیری‌های غیر دقیق، دقت و اعتبار نتایج را افزایش نخواهد داد.

۵-۷-۵ روند برازش[2]

برازش مدل به شرایط طبیعی یک منطقه، بر اساس روش حدس و آزمون انجام می‌شود. این روند شامل حدس اولیه‌ی مقدار مشخصه‌های برازش، انجام شبیه‌سازی، مقایسه‌ی نتایج با واقعیت و اندازه‌گیری‌ها، حدس جدید بر اساس نوع و میزان تفاوت و تکرار چندباره‌ی این مراحل استوار است. روند حدس و آزمون، تا رسیدن به سازگاری قابل قبول بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها ادامه می‌یابد. با توجه به تعدد مشخصه‌ها و تعامل بین آنها، تغییر تصادفی مقدار آنها منجر به نتیجه‌ی دلخواه نخواهد شد. قضاوت مهندسی و شناخت نسبت به نقش هر یک از مشخصه‌ها، برای هدایت هوشمندانه‌ی روند حدس و آزمون لازم است.

در سال‌های اخیر، نرم‌افزارها در جهت نیمه‌خودکار کردن روند حدس و آزمون و برازش مشخصه‌ها در حال توسعه هستند، اما این امکانات هنوز محدود بوده و پس از تکمیل نیز به صورت مرحله‌ای و با هدایت کاربران قابل استفاده خواهد بود.

برازش مدل (و انجام اندازه‌گیری‌ها) باید برای سرعت‌ها و شرایط مختلفی انجام شود تا نتایج شبیه‌سازی، نه تنها برای یک حالت خاص، بلکه برای دسته‌ای از شرایط مختلف بده آب و سرعت و غلظت، به اطلاعات محیطی سازگار شود. ممکن است بهترین ضرایب برازش در سرعت‌های زیاد، با بهترین ضرایب برازش در سرعت‌های کم، یکسان نباشد. مدل باید به‌گونه‌ای برازش یابد که در همه‌ی شرایط، حداقل دقت‌های لازم را برآورده کند. در صورت اجبار می‌توان بالا بودن دقت سازگاری در شرایطی که کمتر اتفاق می‌افتند یا کمتر تأثیر دارند را فدای بالا بودن سازگاری در شرایط معمول یا مؤثرتر کرد.

توصیه می‌شود که در صورت امکان، روش برازش به دو مرحله "میدان جریان" و سپس "میدان رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی" تقسیم شود. این روش در صورتی قابل اجرا است که: الف) تفاوت غلظت رسوبات معلق، تأثیر قابل توجه بر میدان جریان نداشته باشد. ب) تغییر مشخصات هندسی بستر به‌خاطر فرسایش و رسوبگذاری، تأثیر قابل توجه بر میدان جریان نداشته باشد.

1- Sources & Sinks

2- Calibration

برای شبیه‌سازی رفتار جریان غلیظ و یا عملیات رسوبشویی، نمی‌توان مدل جریان را به طور مستقل از مدل رسوب برازش داد. اگر جریان‌های چگالی، ناشی از عوامل غیر رسوبی مانند دما یا شوری باشند، می‌توان روند فوق را به کار بست.

معیارهای سازگاری مدل جریان با طبیعت، عبارتند از: میدان سرعت، تراز سطح آب و رفتار آشفتگی. مشخصه‌هایی که در این رابطه برازش می‌یابند عبارتند از: میدان مقاومت، زبری بستر در مقابل جریان و لزجت آشفتگی جریان. اصلاحات احتمالی مورد نیاز در هندسه بستر (یا مقاطع) و شرایط مرزی جریان، در همین مرحله اعمال می‌شود. در تمام این مراحل، هندسه‌ی بستر ثابت فرض می‌شود. اگر تفاوت دما یا شوری در میدان جریان مؤثر باشد، مقایسه‌ی سری زمانی و نیمرخ‌های قائم عامل ایجاد کننده‌ی جریان (دما یا شوری) نیز از جمله معیارهای سازگاری هستند و ضریب پخش آنها یکی دیگر از مشخصه‌های برازش خواهد بود.

اگر در قسمتی از محیط حل، سرعت جریان شبیه‌سازی شده بیش از مقدار واقعی باشد، می‌توان مقدار آن را با افزایش زبری بستر کاهش داد. اگر عمق آب زیاد باشد، تأثیر زبری بستر بر سرعت جریان، زیاد نخواهد بود. اگر تغییرات مکانی میدان جریان بیش از حد شدید باشد، می‌توان ضریب لزجت جریان را افزایش داد تا تغییرات مکانی هموارتر شوند. اگر طول گردابه‌ی افقی شبیه‌سازی شده، کمتر از مقدار واقعی باشد، باید ضریب لزجت افقی را کاهش داد. اگر تغییرات سرعت در نیمرخ قائم، بیش از حد شدید باشد، می‌توان با تنظیم ضریب لزجت در امتداد قائم، آن را هموارتر کرد.

برای برازش زبری بستر در رودخانه‌ی بالا دست یا پایین دست مخزن، می‌توان سازگاری نیمرخ طولی سطح آب، سری زمانی سطح آب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه آبسنجی و سازگاری منحنی بده – اشل محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه را ملاک عمل قرار داد. ثبت داغ‌آب در طول مسیر رودخانه پس از هر سیل خاص، کمک زیادی به برازش می‌کند. ممکن است برازش کمیت‌های دیگری مانند ضرایب افت انرژی ناشی از تغییر ناگهانی مقطع، نیز مورد نیاز باشد. ضریب زبری در محل مخزن سد، به دلیل عمق زیاد تأثیر اندکی بر میدان جریان دارد، مگر آنکه جریان غلیظ رخ دهد.

در مسائلی که تفاوت غلظت رسوب تأثیری بر میدان جریان ندارد، پس از برازش یافتن مدل جریان، نوبت به برازش مدل رسوب می‌رسد. معیارهای سازگاری مدل رسوب با طبیعت عبارتند از: میدان غلظت رسوب معلق و طیف دانه‌بندی آن، میزان رسوبگذاری یا فرسایش، تغییرات تراز بستر و روند تغییر طیف دانه‌بندی بستر. مشخصه‌هایی که در این مرحله برازش می‌یابند، برای مسائل حاوی رسوب ریزدانه‌ی چسبنده عبارتند از: سرعت سقوط، ضریب پخش رسوب معلق، تعداد لایه‌های بستر، ضریب زبری بستر در مدل رسوب (k_n)، تنش آستانه‌ی فرسایش به تفکیک لایه‌ها، تنش آستانه‌ی رسوبگذاری به تفکیک دانه‌بندی، ضرایب مربوط به میزان فرسایش بستر به تفکیک لایه‌ها و ضرایب مربوط به روند تحکیم بستر به تفکیک لایه‌ها. مشخصه‌هایی که در مرحله‌ی برازش مدل هیدرودینامیک تدقیق شده‌اند، در این مرحله تغییر داده نمی‌شوند.

توصیه می‌شود که برازش مدل رسوب، ابتدا با فرض ثابت بودن بستر برای بده‌های مختلف ورودی انجام شود. پس از کسب نتایج مناسب از این مرحله (به‌خصوص برای بده‌های زیاد)، محاسبات مربوط به تغییر تراز بستر می‌تواند فعال شود.

برازش مدل رسوب با جستجوی ضرایب سرعت سقوط و ضریب پخش رسوبات معلق در حد برازش کلی آغاز می‌شود. در این مرحله، میدان غلظت رسوبات معلق و دانه‌بندی آن مهمترین معیارهای سازگاری هستند. در مرحله بعد و برای سازگاری دقیق، میدان فرسایش یا رسوبگذاری و تغییر تراز بستر نیز مورد توجه قرار می‌گیرند. با توجه به این که مدل رسوب چسبنده

مشخصه‌های زیادی برای برازش دارد، پیشنهاد می‌شود که در روند حدس و آزمون، هر بار تنها یک مشخصه تغییر داده شود تا تأثیر تغییر هر ضریب بر نتایج، بهتر قابل ردگیری باشد.

مؤثرترین مشخصه‌های بستر چسبنده، تنش آستانه‌ی رسوبگذاری و تنش آستانه‌ی فرسایش هستند که پیش از همه تنظیم می‌شوند. بقیه‌ی مشخصه‌های بستر چسبنده، در مرحله‌ی برازش دقیق تدقیق می‌شوند. توصیه می‌شود که سرعت سقوط رسوبات ریزدانه‌ی معلق، در مراحل ابتدایی برازش، ثابت (مستقل از غلظت رسوبات معلق) فرض شود. اگر اثر رسوبات غیر ریزدانه قابل توجه باشد، مشخصه‌های مربوط به بار بستر حائز اهمیت خواهند بود. درمسائل با رسوب ریزدانه چسبنده، بار بستر نقش مهمی ندارد.

اگر تأثیر میدان غلظت رسوب برمیدان جریان قابل توجه باشد، هر دو مدل جریان و رسوب باید به‌طور هم زمان برازش داده شوند. اگر تأثیر این عامل خیلی شدید نباشد، می‌توان برازش اولیه‌ی مدل جریان را بدون توجه به رسوب انجام داده و سپس هر دو مدل را با هم به صورت دقیق برازش داد. در مسائل جریان غلیظ، نمی‌توان برازش مدل‌های جریان و رسوب را از یکدیگر تفکیک کرد. رعایت ترتیب زیر برای برازش توأم هر دو مدل در چنین مسائلی توصیه می‌شود:

الف) تنظیم مدل‌های جریان و رسوب به گونه‌ای که اصل وقوع پدیده‌ی ریزش توده‌ی غلیظ به سمت عمق شبیه‌سازی شود و محل آن (Plunging Point) با شرایط واقعی سازگار باشد.

ب) نیمرخ‌های قائم غلظت و سرعت پس از نقطه‌ی ریزش در بالا دست شیب دلتای رسوبی، در زمان‌های مختلف با اندازه‌گیری‌ها سازگار شوند.

ج) نیمرخ‌های قائم غلظت و سرعت و ضخامت توده‌ی غلیظ و غلظت متوسط آن در پایین دلتای رسوبی، در زمان‌های مختلف با اندازه‌گیری‌ها سازگار شوند. روند فرسایش بستر در محل دلتای رسوبی نیز در همین مرحله برازش می‌یابد.

د) سرعت عمومی پیشروی توده‌ی غلیظ به سمت بدنه‌ی سد، با شرایط واقعی سازگار شود.

ه) نیمرخ‌های قائم غلظت و سرعت و ضخامت توده‌ی غلیظ و غلظت متوسط آن در مقاطع مختلف پایین دست دلتا تا انتهای مسیر، در زمان‌های مختلف با اندازه‌گیری‌ها سازگار شوند. روند تغییر ضخامت توده‌ی غلیظ در پایین دلتای رسوبی و روند فرسایش احتمالی و ته‌نشینی قسمتی از رسوبات توده‌ی غلیظ در پایین دست دلتا نیز در همین مرحله برازش می‌یابد.

و) در صورت خروج جریان غلیظ از دریچه‌های تخلیه، غلظت رسوب محاسبه شده در خروجی، با واقعیت سازگار شود. اگر جریان غلیظ به پای سد نمی‌رسد، مقدار پیشرفت آن در طول مخزن باید با واقعیت سازگار شود.

ز) زمان تمام شدن فرآیند جریان غلیظ در هر قسمت از طول مخزن، با واقعیت سازگار شود.

بر اساس روند فوق، برازش مدل‌های جریان و رسوب، نه به تفکیک مدل بلکه به ترتیب فرآیند و محل وقوع، انجام می‌گیرد. در هر مرحله، تعدادی از مشخصه‌های جریان و رسوب برازش می‌یابند. در مرحله‌ی "الف"، صحت انتخاب مدل و شرایط مرزی جریان و رسوب ورودی و تراز آب مخزن کنترل می‌شوند و مشخصه‌های سرعت سقوط و لزجت جریان و/یا ضرایب ریچاردسون (اثر غوطه‌وری بر آشفتگی) و ضریب پخش در امتداد قائم در حد تخمینی برازش می‌یابند. در مرحله‌ی "ب"، برازش همین مشخصه‌ها تدقیق می‌شود. در مرحله‌ی "ج"، تنش آستانه‌ی فرسایش و مشخصه‌های فرسایش در محل دلتای رسوبی و زبری بستر در مدل رسوب (k_n) برازش می‌یابند. در این مرحله، تأثیر غلظت بر سرعت سقوط در حد تخمینی و

ضریب پخش در امتداد افقی نیز مشخص می‌شوند. در مرحله‌ی "د"، مقاومت بستر یا زبری آن در مدل جریان تدقیق می‌شود و تنش آستانه‌ی فرسایش برازش کلی می‌یابد. در مرحله‌ی "ه"، ضرایب پخش جریان و رسوب در امتداد قائم، سرعت سقوط با اثر غلظت، اثر غوطه‌وری بر آشفتگی جریان و بالاخره تنش آستانه‌ی رسوبگذاری تدقیق می‌شوند. مراحل "و" و "ز"، وظیفه‌ی کنترل سازگاری در برازش ایجاد شده و تغییرات جزئی نهایی را دارند. مرحله‌ی "ز"، وظیفه‌ی کنترل زمان فروکش کردن غلظت رسوب در سیل و اختلاف زمانی بین منحنی غلظت با منحنی بده جریان، به خصوص در اواخر سیل، را نیز بر عهده دارد. تدقیق و کنترل مقدار اوج غلظت رسوب در طی مدت سیل در شرط مرزی بالا دست، در مراحل "ب" و "ج" انجام می‌شود.

گاهی در هنگام برازش مدل، مشخص می‌شود که باید تغییراتی در هندسه‌ی بستر ایجاد کرد. این گزینه، نباید اولین انتخاب جهت افزایش سازگاری باشد. گاهی رسیدن به مناسب‌ترین هندسه بستر (یا مقاطع عرضی)، مستلزم چند شبیه‌سازی و کنترل می‌باشد. توصیه می‌شود که این شبیه‌سازی‌های اولیه، بر اساس فرض ثابت بودن بستر انجام شود.

۵-۷-۶ رفع اشکال

در ضمن برازش مدل به شرایط طبیعی یک منطقه، اشکالات مختلفی می‌تواند نمایان شود. مهمترین اشکالات عبارتند از: الف) ناپایدار شدن مدل در اولین گام‌های زمانی حل، ب) ناپایدار شدن مدل پس از طی مدتی از روند شبیه‌سازی و ج) برازش نیافتن مدل پس از تلاش‌های مکرر. برای رفع هر نوع اشکال، باید حدس‌های مناسبی در باره‌ی علل احتمالی بروز آن در اختیار داشت. توصیه می‌شود که پیش از برازش مدل، نسبت به پایدار ماندن آن اطمینان حاصل شود. در ادامه، تعدادی از دلایل معمول که باعث بروز اشکال می‌شوند، به تفکیک دسته‌بندی فوق، ارائه می‌شوند:

- اگر مدل عددی، در اولین گام‌های زمانی حل، به سرعت ناپایدار می‌شود:

الف) ممکن است شرایط مرزی با شرایط اولیه سازگار نباشند. مثلا ممکن است شرایط اولیه‌ی تراز سطح آب در محل مرز، با شرط مرزی مربوط به لحظه‌ی شروع شبیه‌سازی، هماهنگ نباشد. مشکل مزبور با ایجاد هماهنگی برطرف خواهد شد. استفاده از گزینه "شروع نرم [1]" در نرم‌افزار نیز به رفع ناپایداری در گام‌های محاسباتی اولیه کمک می‌کند. توصیه می‌شود که زمان آغاز شبیه‌سازی، مربوط به حالتی باشد که جریان و رسوب ورودی به محیط، اندک هستند. در این حالت، میدان سرعت و غلظت در محیط حل می‌توانند به تدریج با شرایط مرزی هماهنگ شوند.

ب) ممکن است مشخصات هندسی بستر در نواحی کم‌عمق یا مرزی، دارای اشکال یا تغییرات شدید باشد. هموارسازی در هندسه بستر یا شکل مرز در محل بروز اشکال، می‌تواند مشکل را حل کند.

ج) ممکن است تر و خشک شدن گره‌های مرزی یا هر جای کم‌عمق از محیط (ناشی از تغییر سطح آب) باعث بروز ناپایداری باشد. فعال کردن گزینه‌ی محاسبه‌ی تر و خشک شدن گره‌ها، این مشکل را برطرف خواهد کرد.

1- Soft Start

بسیاری از نرم‌افزارهای معتبر، در ضمن شبیه‌سازی اطلاعات مربوط به روند حل و محل ناپایدار شدن را برای بررسی کاربران ذخیره می‌کنند. با بررسی این اطلاعات، می‌توان محل بروز اشکال را شناسایی کرده و در جهت رفع آن اقدام کرد.

- اگر مدل عددی، مدتی پس از شروع و ادامه‌ی شبیه‌سازی، ناپایدار می‌شود:

الف) ممکن است ناپایداری در زمانی ایجاد شود که بده جریان یا رسوب ورودی از مرز یا خروجی از آن، افزایش زیادی پیدا کرده باشد. در این صورت، باید فاصله‌ی زمانی بین گام‌های محاسباتی و یا فاصله‌ی مکانی بین گره‌ها در محل بروز اشکال را کاهش داد. در بعضی از مدل‌ها، می‌توان روش مشتق‌گیری عددی را نیز به نوع پایدارتری تغییر داد.

ب) ممکن است سطح آب در زمان بروز اشکال، کاهش زیادی پیدا کرده و محاسبات مربوط به تر و خشک شدن در جایی که هندسه‌ی بستر پیچیدگی دارد، با اشکال مواجه شده باشد. برای حل این مشکل، مقداری هموارسازی یا افزایش عمق یا اصلاح شیب بستر به سمت نواحی عمیق‌تر در محل بروز اشکال لازم خواهد بود.

ج) ممکن است تراز بستر در محل خاصی، به صورت غیر منطقی افزایش یا کاهش یافته و سبب بروز ناهمواری غیر منطقی در بستر شده باشد. اگر فرض ثابت بودن بستر بتواند ناپایداری را برطرف کند، به احتمال زیاد مشکل از همین نوع است. ایجاد تغییرات غیر منطقی در بستر، در بیشتر موارد نشانگر آن است که مدل از حالت برازش یافتگی فاصله‌ی زیادی دارد. این مشکل با اصلاح برازش مدل برطرف خواهد شد. توصیه می‌شود که در صورت مواجه با فرسایش یا رسوبگذاری شدیدتر از حد منطقی، اشتباه در معرفی تنش‌های آستانه‌ی فرسایش یا رسوبگذاری و تمرکز غیر واقعی میدان سرعت در محل بروز اشکال کنترل شود. این نوع اشکال می‌تواند دلایل دیگری نیز داشته باشد که در قسمت بعد توضیح داده شده‌اند.

د) اگر ناپایداری در مدل رسوب چسبنده رخ می‌دهد، در صورتی که گره‌های تر و خشک شونده محل شروع مشکل باشند، ممکن است فرسایش یا رسوبگذاری بیش از حد، باعث ایجاد تغییرات شدید در نیمرخ غلظت رسوب شده باشد. در این حال احتمالا مشکل از برازش نیافتن مناسب مدل جریان در نواحی کم‌عمق می‌باشد. ممکن است فاصله‌گره‌های محاسباتی در محل ناپایداری بیش از حد زیاد باشد، به گونه‌ای که باعث نقض محدودیت نرم‌افزار در رابطه با عدد کورانت جریان شده باشد. ممکن است فاصله گره‌ها در محل ناپایداری بیش از حد کم باشد، به گونه‌ای که باعث نقض محدودیت نرم‌افزار در رابطه با نسبت ضریب پخش رسوب به فاصله گره‌ها شده باشد (می‌توان در چنین موضعی فاصله گره‌ها را زیاد یا ضریب پخش را کم کرد). بعضی از مدل‌ها جریان، در اطراف نواحی کم‌عمق یا خشک داخلی، سرعت جریان موضعی در یک یا چند گره را بسیار بیش از حد واقعی محاسبه می‌کنند. این حالت نیز می‌تواند باعث فرسایش یا رسوبگذاری غیر منطقی و ناپایداری مدل رسوب شود.

ه) ممکن است علت ناپایداری، یکی از دلایل ذکر شده در قسمت قبل "ناپایداری در اولین گام‌های محاسباتی" باشد که به دلیل عدم شدت، به تدریج رشد یافته و پس از مدتی باعث ناپایداری می‌شود. رفع این قبیل ناپایداری‌ها مشکل‌تر از انواع دیگر است. ممکن است محلی که ناپایداری در نهایت در آنجا رخ داده، همان جایی نباشد که بروز اشکال از آنجا آغاز شده است. ایجاد و بررسی تصویر متحرک از نتایج محاسبات میدان سرعت و تراز و غلظت، از چندین گام زمانی پیش از ناپایداری تا لحظه‌ی ناپایدار شدن، کمک زیادی به تشخیص صحیح محل و نوع مشکل خواهد کرد. می‌توان

در اجرای مجدد، پایان شبیه‌سازی را یک گام قبل از ناپایداری معرفی کرد. بروز هر نوع تغییر غیر منطقی و شدید در میدان سرعت، تراز سطح آب، غلظت رسوب و فرسایش و رسوبگذاری، می‌تواند سرنخ خوبی باشد. نواحی کم‌عمق کنار مرزها، اطراف مرزهای باز ورودی و خروجی، مناطقی با ناهمواری شدید بستر یا مرز، اطراف دریچه‌های آبگیر و اطراف هر نوع چاه یا چشمه‌ی محاسباتی به طور خاص نیاز به بررسی دارند. اگر روش‌های معمول اصلاح سازگاری برای رفع این نوع ناپایداری جوابگو نباشد، می‌توان برای کمک به پایداری مدل، ضریب زبری بستر یا ضریب پخش جریان یا رسوب (قائم یا افقی) را در محل بروز اشکال به صورت موضعی تا بیش از حد طبیعی افزایش داد. در این حالت نتایج مدل در محدوده‌ی تأثیر این اغراق موضعی قابل اعتماد نخواهد بود. اگر ناپایداری با شیب شدید موضعی سطح آب در محل همراه باشد، افزایش موضعی زبری بستر بیش از افزایش لزجت به رفع مشکل کمک می‌کند. اگر عدم دقت بعضی از شرایط مرزی باعث ناپایداری بوده و به هیچ وجه امکان تدقیق آن فراهم نباشد، به عنوان آخرین راه حل می‌توان زبری بستر را در نوار باریکی در مقابل آن مرز به شدت و به میزان غیر واقعی افزایش داد. به طور معمول، عدد مانینگ ۰/۱ تا ۰/۲ $s/m^{1/3}$ یا عدد مشخصه‌ی زبری در مدل جریان (k_s) در حدود ۱ متر، برای این منظور مناسب خواهد بود (Mike FM HD User Manual).

- اگر مدل عددی پایدار است، اما با تنظیم ضرایب در محدوده‌ی منطقی، نمی‌توان آن را با اطلاعات محیطی سازگار کرد:

الف) ممکن است تأثیر بعضی از فرآیندهای فیزیکی لحاظ نشده باشد و یا مدل مورد استفاده برای محاسبه‌ی همه‌ی فرآیندهای فیزیکی موثر در مسئله، مناسب نباشد. در این حالت، تناسب فرضیه‌های ساده‌کننده‌ی استفاده شده در مدل با نیازهای مسئله باید بازنگری شده و نسبت به انتخاب گزینه‌های عملکرد مناسب یا مدل عددی، دیگر تصمیم‌گیری شود. مثلا ممکن است انتخاب چند دسته از طیف دانه‌بندی رسوب به جای اکتفا به یک دسته و یا انتخاب چند لایه‌ی بستر به جای فرض یک لایه، باعث حل اشکال شود.

ب) ممکن است اطلاعات میدان عمق یا نیمرخ‌های مقاطع عرضی یا سیلاب‌دشت‌ها نیاز به اصلاح داشته باشند.

ج) ممکن است شرایط مرزی جریان یا رسوب یا محل آنها نیاز به اصلاح داشته باشند. برای مسائل رسوبگذاری درازمدت در مخزن، می‌توان کل منحنی آورد رسوب را در ضریب ثابتی ضرب کرد تا میزان رسوب ورودی به مدل با اطلاعات محیطی سازگار شود. اگر این روش جوابگو نباشد، می‌توان منحنی شرط مرزی رسوب در شرایط سیلابی یا شرایط عادی را به طور جداگانه تغییر داد. ممکن است اطلاعات مدل در باره‌ی تراز آب مخزن با واقعیت سازگار نباشد. برای شبیه‌سازی جریان غلیظ، علاوه بر مقدار اوج منحنی آورد رسوب ورودی، تنظیم دقیق اختلاف بین زمان سقوط منحنی رسوب و زمان سقوط منحنی جریان، نقش مهمی در برازش مدل ایفا می‌کند. منحنی دانه‌بندی رسوب در مرز ورودی نیز باید با طبیعت سازگار باشد. پیشنهاد می‌شود مرز بالا دست در جایی قرار گیرد که تراز بستر پایدار است. در این حال لازم است اطمینان حاصل شود که محاسبات مدل نیز مقطع بالا دست یا تراز بستر در آن محل را ثابت نشان می‌دهد.

د) ممکن است قسمتی از بستر، دارای پوشش گیاهی یا ناحیه‌ی صخره‌ای بوده یا تحت تأثیر جوشنی شدن (آرمورینگ) قرار داشته و یا لایه فرسایش ناپذیر در زیر داشته باشد، بدون اینکه اثر آن در اطلاعات ورودی به مدل منظور شده

باشد. اگر جابجایی رسوب شبیه‌سازی شده خیلی بیشتر از واقعیت می‌باشد، وجود رسوب درشت دانه مانند شن و وجود پوشش گیاهی را در طبیعت کنترل کنید. این عوامل می‌توانند لایه‌ی محافظ در برابر فرسایش بستر ایجاد کنند.

ه) ممکن است اطلاعات ورودی غیر برازش دادنی، مانند دمای ثابت محیط آب، نیاز به اصلاح داشته باشد.

و) ممکن است قسمتی از اطلاعات اندازه‌گیری شده از منطقه، غیر صحیح یا غیر دقیق بوده و بنابراین تلاش برای سازگار کردن مدل با آنها در کنار اطلاعات صحیح دیگر، بیهوده و بی‌نتیجه باشد. در صورتی که احتمالات قبلی بررسی شده و غیر مؤثر تشخیص داده شده باشند، کنترل مجدد اطلاعات اندازه‌گیری غیر قابل اجتناب خواهد بود.

۵-۷-۷ واسنجی

واسنجی مدل، عبارت است از مقایسه‌ی نتایج مدل برازش‌یافته با اندازه‌گیری‌هایی که در مرحله‌ی برازش استفاده نشده‌اند. این کار باید بدون تغییر مشخصه‌های برازش یافته انجام شود. پیش از برازش مدل، باید تعدادی از اندازه‌گیری‌ها را جدا کرد تا در روند برازش دخالت داده نشوند. روند انجام واسنجی و نکاتی که به این منظور باید رعایت شوند، مشابه مواردی است که در قسمت "مقایسه و سنجش سازگاری نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های محیطی" در قسمت مربوط به برازش نرم‌افزار ارائه شده است.

توصیه می‌شود که واسنجی مدل، با استفاده از شرایط مرزی‌ای غیر از شرایط مرزی برازش انجام شود. نباید به واسنجی مدل در یکی از همان شرایط مرزی برازش، اما در نقطه‌ای متفاوت، اکتفا کرد. پیشنهاد می‌شود که شرایط مرزی انتخاب شده برای مرحله‌ی واسنجی مدل، نزدیک به شرایطی باشد که بیشترین تأثیر را بر رفتار رسوب در مخزن می‌گذارند. انتخاب شرایط خیلی خاص که بسیار به ندرت اتفاق می‌افتند و نقش قابل توجهی بر مسئله‌ی واقعی نمی‌گذارند، کمکی به افزایش اعتبار نتایج در کل پروژه‌ی مورد بررسی نخواهد کرد.

اگر واسنجی مدل با موفقیت همراه نباشد، مرحله‌ی برازش آن باید مورد بازنگری و تجدید قرار گیرد. عدم موفقیت مرحله‌ی واسنجی، در بیشتر موارد نشان دهنده‌ی آن است که در مرحله‌ی برازش مدل، طیف مناسب یا کاملی از شرایط مرزی موثر و مهم استفاده نشده‌اند. انجام موفقیت آمیز مرحله واسنجی، به معنی تضمین صحت نتایج مدل به ازاء هر شرط مرزی محتمل نخواهد بود، اما قابلیت اعتماد به نتایج را افزایش خواهد داد.

۵-۸ شبیه‌سازی مجموعه شرایط انتخاب شده و نتیجه‌گیری

پس از آنکه مدل عددی به شرایط منطقه برازش یافت و آزمون‌های واسنجی را با موفقیت پشت سر گذاشت، می‌توان از آن برای شبیه‌سازی مجموعه شرایط انتخاب شده برای مطالعه استفاده کرد. در صورت عدم استفاده از قضاوت و تجربه‌ی مهندسی برای انتخاب هوشمندانه‌ی شرایطی که شبیه‌سازی می‌شوند و یا عدم شبیه‌سازی و مطالعه کامل آنها، نیرو و زمان صرف شده برای مراحل قبلی بدون استفاده باقی خواهد ماند.

مهمترین خطری که این مرحله از هر پروژه با آن روبروست، کمبود وقت می‌باشد. توصیه می‌شود که در ابتدای پروژه، پیش‌بینی زمان لازم برای انجام مراحل مختلف پروژه، با احتیاط کامل انجام شود. عوامل پیش‌بینی نشده مختلفی وجود دارند که می‌توانند مانع تکمیل مراحل تأمین اطلاعات و برازش مدل در زمان مقرر شوند؛ امری که باعث می‌شود فرصت کافی برای شبیه‌سازی کامل و جامع همه‌ی حالت‌های مورد نیاز باقی نماند. برای کمک به برازش مدل‌ها در زمان مقرر، می‌توان از امکانات برازش‌یابی خودکار نرم‌افزارها و تجربه‌ی کارشناسان خبره برای هدایت روند برازش استفاده کرد.

روش انتخاب مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند، در جای خود توضیح داده شده است. برای انجام شبیه‌سازی‌های این مرحله، نظارت کلی کارشناسان ارشد خبره بر کارشناسان جوان‌تر کافی است. در صورت امکان، می‌توان از وجود رایانه‌های متعدد برای تسریع این مرحله بهره‌مند شد.

پس از شبیه‌سازی همه‌ی شرایطی که باید مطالعه شوند، نوبت به بررسی نتایج، نتیجه‌گیری مهندسی و دریافت جواب سؤال‌های مشخصی خواهد بود که بر عهده‌ی شبیه‌سازی گذاشته شده‌اند. انجام این مرحله، کاملا بر پایه‌ی قضاوت مهندسی و داشتن علم و تجربه‌ی کافی از موضوع استوار است. مهارت‌های مربوط به نحوه‌ی استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، نقش قابل توجهی در این قسمت ندارند. توصیه می‌شود که انجام این مرحله، بر عهده‌ی کارشناسان خبره‌ای گذاشته شود که قضاوت مهندسی عمیقی در رابطه با جریان و رسوب در سدها و رودخانه‌ها دارند، هرچند در رابطه با نرم‌افزارهای محاسباتی تخصص نداشته باشند.

روش بررسی شبیه‌سازی‌ها و نتیجه‌گیری از آنها، تابع سؤال‌هایی است که در ابتدای پروژه مشخص شده‌اند. در این رابطه حالت‌های بسیار متنوعی وجود دارند: ممکن است در باره‌ی گزینه‌های مختلف مدیریت مخزن و یا مناسب‌ترین روند مانور دریچه در ضمن عملیات رسوبشویی و یا خارج کردن جریان غلیظ تصمیم گیری شود، ممکن است نسبت به اصل کارآمد بودن روش‌های تخلیه‌ی رسوب از مخزن تصمیم‌گیری شود، ممکن است دستورالعمل‌هایی برای مقابله با شرایط خاص پیشنهاد شوند، ممکن است میزان تأثیر سیل‌های مختلف بر قسمت‌های مختلف مخزن برآورد شود، ممکن است تصمیم‌هایی در باره‌ی طرح دریچه‌های آبگیر برای سد در دست طراحی گرفته شود، ممکن است طرح‌های سازه‌ای یا غیر سازه‌ای جدیدی برای کنترل و مدیریت بهتر مشکل رسوب در سد یا پایین دست آن بررسی و مقایسه شوند و یا به سؤال‌های مشخص دیگری در رابطه با راندمان تله‌اندازی سد، روند تغییر هندسه‌ی بستر به ازاء گزینه‌های مختلف و یا فواصل زمانی بهینه برای رسوبشویی پاسخ داده شود.

٦- بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه رودخانه مخزن

با بسنده کردن به مطالعه طول اندکی از یک رودخانه، نمی‌توان به شناخت کافی برای مدیریت بهینه آن و تأثیرش بر محیط زیست اطراف – حتی در همان بازه کوتاه – دست یافت. اگر یک یا چند سد در مسیر رودخانه واقع باشند، مطالعه‌ی توأم سامانه‌ی رودخانه – مخزن اجتناب ناپذیر خواهد بود. در این موارد، هم تأثیر عملکرد مخزن سد بر رودخانه پایین دست و هم تأثیر رودخانه بالا دست بر مخزن نیازمند بررسی است.

٦-١ تأثیر متقابل رودخانه و مخزن سد

پس از ساخته شدن سد بر رودخانه، قسمتی از رود که در پایین دست سد می‌باشد، در شرایط غیر تعادلی قرار می‌گیرد. به دلیل قطع قسمت قابل توجهی از تغذیه‌ی رسوبی، تراز بستر در قسمت نامبرده به مرور زمان پایین‌تر می‌رود (مگر آنکه عملیات رسوبشویی مخزن و نحوه‌ی کنترل جریان شرایط خاصی را پدید آورد). کاهش تدریجی تراز بستر رودخانه، از نزدیک سد آغاز شده و به سمت پایین دست گسترش می‌یابد. به دنبال آن، شیب طولی کاهش می‌یابد و باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. کاهش سرعت، باعث کاهش فرسایش بستر خواهد شد. به این ترتیب رودخانه‌ی پایین دست به سمت تعادل جدیدی خواهد رفت. عوامل دیگری نیز در این فرآیند زنجیره‌ای مؤثر هستند؛ الف) بافت رسوبات سطح بستر درشت‌تر می‌شود، زیرا رسوبات ریزدانه‌ی سطح بستر زودتر شسته می‌شوند. این امر باعث محافظت بیشتر از رسوبات لایه‌های پایین‌تر و کاهش فرسایش می‌شود. این روند تا جایی پیش می‌رود که بده‌های عادی تخلیه‌شونده از سد، دیگر نتوانند فرسایش قابل توجهی ایجاد کنند. ب) به دلیل عملکرد کنترل شده‌ی سد، اوج بده آب مربوط در سیلاب‌های فرساینده‌ی شدید، کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. ج) کاهش تراز بستر رودخانه در پایین دست سد، باعث افزایش اختلاف تراز بین آبراهه‌ی اصلی و شاخه‌های فرعی متصل به آن می‌شود. این پدیده به ورود بیشتر رسوب از شاخه‌های فرعی به مسیر اصلی می‌انجامد و مقداری از کاهش تغذیه رسوب از محل سد را جبران می‌کند.

تغییر آبنگار جریان پس از ساخت سد، تابع نحوه‌ی مدیریت سد است. رابطه‌ی بین آبنگار خروجی از سد و آبنگار جریان‌های ورودی از شاخه‌های فرعی نیز بر روند تغییر شرایط در رودخانه‌ی پایین دست، تأثیر می‌گذارد.

مدت زمانی که طول می‌کشد تا اثرات ناشی از کاهش تراز بستر رودخانه‌ی پایین دست آشکار شود، بستگی به دانه‌بندی رسوب دارد. در رودخانه‌هایی که بستر غیر چسبنده دارند، هر چه دانه‌بندی رسوبات بستر ریزتر باشد، فرآیند فرسایش سریع‌تر بوده و آثار آن زودتر آشکار می‌شود.

مخزن سد، علاوه بر رودخانه پایین دست، بر ناحیه‌ای از رودخانه بالا دست نیز تأثیر می‌گذارد. بالا آمدن آب ناشی از ساخت سد، باعث می‌شود که طول قابل توجهی از رودخانه‌ی بالا دست به زیر آب رفته و قسمتی از مخزن سد شود. شکل گیری دلتای رسوبی نیز باعث بالا آمدن تراز بستر و تأثیر آن بر رودخانه‌ی بالا دست می‌شود. مدتی پس از احداث سد، تراز آب در قسمتی از رودخانه‌ی بالا دست، به ازاء بده جریان معین، بیشتر از گذشته بالا خواهد رفت. علت این امر آن است که هم تراز بستر در محل دلتا و بالا دست آن بالا می‌رود و هم پوشش گیاهی جدیدی بر این بستر رسوبی جدید شکل می‌گیرد که زبری مقطع را افزایش می‌دهد. اینکه تأثیر سد بر رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ی بالا دست تا چه مسافتی قابل توجه خواهد بود، می‌تواند به وسیله‌ی شبیه‌سازی عددی یک بعدی برآورد شود.

٦-٢ روش‌های شبیه‌سازی رودخانه با دیدگاه رسوبگذاری در مخزن

رفتار هر رودخانه، تحت تأثیر شاخص‌هایی مانند طول، عرض، عمق، بده و مشخصات رسوبی و زیست‌محیطی همان رودخانه شکل می‌گیرد. تغییرپذیری شرایط هیدرولیکی و انتقال رسوب در هر رودخانه، توسط حوضه‌ی آبریز بالا دست آن کنترل می‌شود. تفاوت‌های بین حوضه‌ها و رودخانه‌های مختلف، باعث می‌شود که روند بهینه‌ی شبیه‌سازی همه‌ی رودخانه‌ها یکسان نباشد.

هنگامی که نیاز به شبیه‌سازی رودخانه و شبیه‌سازی مخزن سد با یکدیگر همراه می‌شوند، برای یافتن مناسب‌ترین روش، باید از یک سو نیازهای مربوط به شبیه‌سازی مخزن را و از سوی دیگر نیازهای مربوط به شبیه‌سازی رودخانه را در نظر گرفت.

برای مطالعه رفتار رودخانه‌ها، می‌توان از روش‌های هیدرولوژیکی و یا روش‌های هیدرولیکی استفاده کرد. در روش‌های هیدرولوژیکی، می‌توان اثر مخزن سد را به طور کلی و به صورت یکپارچه منظور کرد. با این روش‌ها، نمی‌توان در باره جزئیات روند فرسایش و رسوبگذاری در قسمت‌های مختلف مخزن مطالعه کرد.

روش‌های هیدرولیکی، انواع مختلفی دارند که برای کاربردهای متفاوتی مناسب هستند. اگر هدف از شبیه‌سازی رودخانه، ترکیب کردن مطالعات رودخانه با مخزن سد باشد، سعی بر آن است که رودخانه با مدل یک بعدی شبیه‌سازی شود. در این حال ترجیح بر آن است که مخزن سد نیز در صورت امکان به صورت یک بعدی مدل شود. اگر هدف از ترکیب شبیه‌سازی رودخانه و مخزن، مطالعه طول قابل توجهی از رودخانه با لحاظ کردن تأثیر مخزن در میان آن باشد، اولین گزینه‌ی مورد بررسی، شبیه‌سازی مخزن با مدل هیدرولوژیکی یا مدل یک بعدی خواهد بود.

برای شبیه‌سازی بازه زمانی یا مکانی طولانی از یک رودخانه، ممکن است به کارگیری مدل یک بعدی تنها انتخاب منطقی باشد. مدل‌های چند بعدی به گره‌های محاسباتی نزدیک‌تر و گام‌های زمانی کوچکتر نیاز دارند و شبیه‌سازی طول یا زمان زیادی از یک رودخانه، وقت بسیار زیادی از آنها خواهد گرفت. اگر لازم باشد که رودخانه و مخزن با فرضیه‌های ساده کننده متفاوتی شبیه‌سازی شوند، در اختیار داشتن مدل‌هایی که بتوانند با یکدیگر تلفیق شوند، از اهمیت خاص برخوردار خواهد بود.

٦-٣ تفاوت روش‌های شبیه‌سازی رسوب در رودخانه و مخزن سد

در شرایط مختلف، تفاوت‌ها و شباهت‌هایی بین مدل‌سازی رسوب در رودخانه و مخزن سد وجود دارد. به عنوان نمونه، روند انتخاب گام‌های زمانی و مکانی حل در این دو محیط متفاوت است. طول بازه‌ی مورد مطالعه در مسائل مهندسی رودخانه، به طور معمول بسیار بیشتر از طول مخزن سد می‌باشد. تغییرات طولی مشخصه‌های جریان و رسوب نیز در بسیاری از قسمت‌های رودخانه، کمتر یا کم‌اهمیت‌تر از مخزن است. به دلیل نامبرده، فاصله گره‌ها در مخزن سد، کمتر از رودخانه انتخاب می‌شود.

برای مدل‌سازی رسوب و جریان در رودخانه‌ها، ممکن است از مدل‌های جریان شبه‌ماندگار یا غیرماندگار استفاده شود. در مدل‌های شبه‌ماندگار محدودیت محاسباتی برای انتخاب گام زمانی حل وجود ندارد. در این مدل‌ها میدان جریان و رسوب شبیه‌سازی شده، مستقل از زمان است. از سوی دیگر، در مطالعات رسوب و جریان در مخازن سدها، در بسیاری از موارد شرایط غیرماندگار حاکم است. تنها موارد خاصی از مطالعه تغییرات طولانی مدت ریخت‌شناسی پیش می‌آید که بتوان از تغییرات زودگذر و کوتاه مدت صرف‌نظر کرد، چرا که به طور معمول بیشترین تغییرات حاصله تحت تأثیر شرایط سیلابی رخ می‌دهند. این مسئله باعث ایجاد محدودیت در استفاده از مدل‌های جریان ماندگار در مخازن می‌شود. در بسیاری از موارد، برای بررسی اثر شرایط غیر سیلابی در مخازن، می‌توان از مدل‌های شبه‌ماندگار استفاده کرد. این روش در مسائل بهینه‌سازی مخازن نیز کاربرد دارد.

بازه‌ی زمانی مدل‌سازی در مخازن – مثل رودخانه‌ها – وابسته به اهداف مطالعه است. این بازه برای روندیابی جریان و رسوب حاصل از یک سیلاب، مطالعات فصلی و سالانه رسوب و یا مطالعه تغییرات طولانی مدت ریخت‌شناسی یکسان نیست.

در مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، در بیشتر موارد، تعیین تغییرات طولانی‌مدت تراز بستر و مشخصه‌های رسوب مدنظر می‌باشد. در این شرایط ترجیح بر آن است که در صورت امکان، میدان جریان با روش شبه ماندگار حل شود. تعداد تکرار حل جریان، هم تابع شرایط مرزی جریان و هم تابع تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه می‌باشد. با توجه به شرایط ناپایدار زمان سیلاب، ممکن است بازه‌های زمانی مربوط به سیلاب‌ها از کل دوره تفکیک شوند تا شبیه‌سازی شبه ماندگار تنها برای شرایط غیر سیلابی استفاده شود. برای روندیابی جریان و رسوب در سیلاب‌ها، گام‌های زمانی حل باید در حدی انتخاب شود که تغییرات مشخصه‌های جریان و رسوب، با دقت کافی شبیه‌سازی شوند. محدودیت‌های مربوط به روش محاسباتی به کار رفته در مدل‌های عددی نیز برای انتخاب اندازه گام‌های زمانی، تعیین کننده هستند. گاهی می‌توان سیلاب‌های ناشی از ذوب برف را – اگر آبنگار ملایمی داشته باشند – با روش‌های شبه‌ماندگار شبیه‌سازی کرد.

اگر هدف مطالعه، روندیابی جریان و رسوب حاصل از یک سیل در مخزن یا برآورد میزان تخلیه رسوب در اثر عملیات رسوبشویی باشد، باید از گام‌های زمانی کوچک استفاده کرد تا تغییرات با دقت کافی شبیه‌سازی شوند. به کارگیری روش‌های شبه‌ماندگار در چنین شرایطی می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجه در نتایج شود.

دوره شبیه‌سازی در بسیاری از مطالعات، هم شامل شرایط عادی با تغییرات اندک و هم شرایط سیلابی با تغییرات شدید می‌باشد. در این شرایط نمی‌توان برای تمامی دوره، مقدار ثابتی به عنوان گام زمانی بهینه انتخاب کرد. می‌توان کل دوره را به بازه‌های کوچکتر تقسیم کرد و بعضی را با گام زمانی کوچک، بعضی را با گام زمانی بزرگتر و بعضی را با روش شبه‌ماندگار شبیه‌سازی کرد. بسیاری از مدل‌های عددی غیر ماندگار، توانایی انجام شبیه‌سازی به صورت شبه‌ماندگار و ماندگار را هم دارا هستند. برای شبیه‌سازی دوره‌های طولانی جریان و رسوب، می‌توان با انتخاب چنین مدلی، در هر شرایطی از بهینه‌ترین روش حل استفاده کرد.

معیار انتخاب فاصله‌ی گره‌ها در رودخانه و مخزن متفاوت است. این مقدار در قسمت‌های مختلف رودخانه تحت تأثیر شدت تغییرات مقطع یا شیب، وجود جریان‌های جانبی، تغییر در جنس مصالح بستر و وجود سازه‌های کنترلی خاص در طول مسیر می‌باشد. معیار کلی انتخاب گام مکانی در امتداد محور طولی رودخانه، مقایسه‌ی نسبت سطح مقطع جریان بین دو مقطع متوالی است؛ این نسبت باید مقداری بین ۰/۷ تا ۱ داشته باشد. در یک بازه‌ی مستقیم و به طور نسبی یکنواخت از رودخانه، ممکن است فاصله‌ی بین گره‌ها بسیار زیاد باشد. برای انتخاب فاصله‌ی گره‌ها در محیط مخزن، ابعاد و هندسه‌ی مخزن، میزان پیچیدگی آن و وضعیت کلی میدان جریان و رسوب مورد توجه قرار می‌گیرد. در مدل‌های چند بعدی، برای نسبت فاصله‌ی گره‌ها در امتدادهای مختلف نیز محدودیت‌هایی وجود دارد.

فاصله بین مقاطع محاسباتی در رودخانه‌ها، به طور معمول بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود. در داخل مخازن، ابعاد ۲۰ تا ۵۰ متر برای شبکه‌های طولی و عرضی در نزدیکی بدنه‌ی سد و ابعاد ۵۰ تا ۲۵۰ متر در قسمت‌های دورتر (بسته به ابعاد مخزن) می‌تواند مناسب باشد. برای شبکه‌بندی قائم در مخازن سدها، فاصله‌های ۲ تا ۲۰ متر بین گره‌ها می‌تواند مناسب باشد. در بسیاری از مدل‌ها، کاربر تنها تعداد گره‌ها در امتداد قائم را تعیین می‌کند و فاصله‌ی آنها تابع عمق آب است.

٤-٦ راه‌کارهای مطالعه تلفیقی سامانه رودخانه - مخزن

راه‌کارهای متفاوتی برای مطالعه تلفیقی رودخانه و مخزن سد وجود دارد. انتخاب بهترین روش وابسته به اهداف مطالعه، مشخصات هندسی و وضعیت جریان و رسوب می‌باشد.

برای مدل‌سازی سامانه رودخانه - مخزن در رودخانه‌های منتهی به مخازن طویل و کم‌عمق، می‌توان رودخانه و مخزن را در قالب یک سامانه منفرد با استفاده از مدل یک بعدی شبیه‌سازی کرد. گاهی لازم است که رودخانه، به طور مجزا از مخزن مدل‌سازی شود. در این حالت، اطلاعات حاصل از مدل‌سازی رودخانه، شرایط مرزی مدل مخزن را تأمین می‌کند.

در روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی نیز می‌توان سامانه رودخانه و مخزن را به صورت توأم بررسی کرد. در این شرایط، مقادیر ورودی و خروجی جریان و رسوب در رودخانه و مخزن، با استفاده از معادله پیوستگی کنترل می‌شود. مزیت اصلی این نوع مدل‌ها، سرعت بالای انجام محاسبات می‌باشد. همچنین افزودن شاخص‌های مدیریتی در مدل‌های هیدرولوژیکی، به سادگی میسر است. مهمترین محدودیت این نوع مدل‌ها آن است که شرایط داخلی سامانه مانند نحوه توزیع رسوبات در مخزن، توسط این مدل‌ها محاسبه نمی‌شود. اگر مدل‌سازی شرایط داخلی سامانه مدنظر باشد، نمی‌توان به تنهایی از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد.

یک عامل محدود کننده در مطالعه‌ی تلفیقی رودخانه و مخزن، مدت زمان لازم برای اجرای مدل می‌باشد. زمان اجرای مدل‌های دو بعدی‌ای که در مخازن کاربرد دارند، بسیار بیشتر از مدل‌های یک بعدی است. برای مطالعات کوتاه‌مدت و فصلی، می‌توان سامانه رودخانه و مخزن را با استفاده از یک مدل دو بعدی به صورت توأم شبیه‌سازی کرد. به کارگیری روش مزبور برای شبیه‌سازی طولانی مدت، انتخاب بهینه‌ای نیست، چرا که زمان انجام شبیه‌سازی‌ها بسیار طولانی خواهد شد.

در مطالعات چند منظوره، زمانی که هم اهداف کوتاه‌مدت و هم اهداف بلندمدت مدنظر باشد، بهتر است که کل سامانه به سه قسمت "رودخانه بالا دست"، "مخزن" و "رودخانه پایین دست" تقسیم شود. برای هر یک از سه ناحیه می‌توان مدلی مناسب با شرایط همان قسمت انتخاب کرد و شرایط مرزی هر یک را از شبیه‌سازی قسمت بالادست آن استخراج کرد. در سال‌های اخیر، امکان تلفیق مدل‌های عددی مستقل با یکدیگر رو به گسترش است.

در مواردی که تأثیر سد مخزنی بر رودخانه پایین دست مد نظر باشد، تلفیق شبیه‌سازی مخزن سد و رودخانه‌ی پایین دست آن وجود ندارد. در چنین حالتی می‌توان اثر مخزن را در قالب شرایط یا گزینه‌های بهره‌برداری مختلف به صورت شرایط مرزی در شبیه‌سازی رودخانه پایین دست منظور کرد.

در بعضی از مدل‌های دوبعدی قدیمی که بر اساس مدل‌های یک بعدی و روش Stream Tube توسعه یافته‌اند، باید برای ناحیه انتقالی بین رودخانه و مخزن از یک تئوری مناسب پخش جت استفاده کرد. در مدل‌های دو بعدی جدید، معادله‌های دوبعدی به طور مستقیم حل می‌شوند، بنابراین نیازی به تمهید فوق وجود ندارد.

اگر هدف مدل‌سازی، بهینه کردن رسوبگذاری و فرسایش در مجموعه‌ی رودخانه و مخزن باشد، توصیه می‌شود که تا حد امکان از مدل ساده و سریع استفاده کنید. در مدل‌های بهینه‌سازی، باید نتایج هیدرولیکی و رسوبی سیاست‌های مختلف رهاسازی آب از مخزن را در کل سامانه رودخانه مخزن مورد بررسی قرار داد و بارها شبیه‌سازی را تکرار کرد تا سیاست‌های

بهینه تعیین شوند. در این شرایط، انتقال دستی اطلاعات بین مدل‌های مختلف بسیار وقت‌گیر خواهد بود. وجود نرم‌افزاری که اجرای مدل‌ها و انتقال اطلاعات بین آنها را به صورت خودکار انجام دهد، برای مسائلی از نوع مطرح شده راه‌گشا می‌باشد.

۷- بررسی راه‌های مطالعه توأم سامانه‌های رودخانه‌ای چند مخزنی

در سامانه‌های رودخانه‌ای چند مخزنی، نمی‌توان مشکلات ناشی از فرسایش یا رسوبگذاری در یک بازه از رودخانه یا یک مخزن را به تنهایی مورد بررسی قرار داد، زیرا ممکن است حل کامل مشکل در یک منطقه، باعث بروز خسارت‌های پرهزینه‌تر در قسمت‌های پایین‌دست شود. برای اجتناب از این امر، باید سیاست‌های بهره‌برداری هدفمند و جامعی برای تمامی سامانه را جستجو کرد. مطالعات سامانه‌های چند مخزنی شامل شبیه‌سازی جریان و رسوب در کل سامانه و بهینه‌سازی رسوبگذاری و فرسایش در تمامی آن است. بدیهی است که در چنین مطالعاتی نمی‌توان محدودیت‌های مربوط به منابع و مصارف آب در قسمت‌های مختلف سامانه را نادیده گرفت.

اصول شبیه‌سازی سامانه‌های سری و موازی چند مخزنی مانند روش‌های بیان شده برای سامانه‌های رودخانه – مخزن است، جز آنکه به دلیل پیچیدگی بیشتر مجموعه، باید ملاحظات بیشتری برای انتخاب مدل‌های مناسب در نظر گرفت.

برای مدل‌سازی سامانه‌های چند مخزنی، در محل هر یک از مخازن موجود در سامانه، شرایط مرزی داخلی تعریف می‌شود. با این روش، مدل قادر خواهد بود آثار ناشی از وجود هر مخزن را در کل مجموعه ارزیابی کند. شرایط مرزی داخلی، با استفاده از روابط پیوستگی جریان و رسوب و توجه به شرایط سطح آب در هر مخزن تعریف می‌شود. در روش مزبور، هر مخزن به عنوان یک سازه‌ی کنترل کننده برای جریان بالا دست و پایین دست عمل خواهد کرد.

توصیه می‌شود که برای شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در سامانه‌های چند مخزنی، در صورت امکان از یک مدل یکپارچه – ترجیحا یک بعدی – استفاده شود. اگر ترکیب دو مدل – مثلا یک بعدی و دو بعدی قائم – اجتناب ناپذیر باشد، بهتر است که مدل‌ها با هم متصل بوده و به طور خودکار با یکدیگر تبادل اطلاعات کنند. توأم بودن شبیه‌سازی تمام سامانه نقش مهمی دارد، چرا که شاخص‌های زیادی در رابطه با سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن باید بهینه شوند. در مواردی می‌توان بازه زمانی مورد مطالعه را به زیر بازه‌هایی با جریان ماندگار تبدیل کرده و شرایط بهینه در هر بازه زمانی را جداگانه جستجو کرد.

۷-۱ سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه‌های یک‌پارچه چند مخزنی

در سامانه‌های چند مخزنی، ممکن است رسیدن به حداکثر تخلیه رسوب از مخازن بالا دست بهترین اندیشه نباشد، بلکه باید بهترین عملکرد کل مجموعه را هدف‌گیری کرد. برای این کار از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس هدف‌ها و قیدها تنظیم می‌شوند. هدف‌ها بر اساس مشکلات رسوبگذاری و فرسایش در کل شبکه تعریف می‌شوند و شامل بیشینه یا کمینه کردن شاخص‌های معینی هستند. قیدها عبارتند از قوانین فیزیکی حاکم بر جریان و انتقال رسوب و محدودیت‌های تخصیص آب از مخازن و میزان حجم ذخیره‌ی هر یک.

۲-۷ روش کار مدل بهینه‌سازی

برای کنترل رسوبگذاری و فرسایش در سامانه‌های چند مخزنی، متغیرهای تصمیم بر اساس میزان بهره‌وری از کل سامانه بیان می‌شوند. متغیرهای حالت نیز شامل میزان حجم ذخیره مخزن و تغییرات ارتفاع بستر در مقاطع عرضی رودخانه و مخزن می‌باشد. یک مدل مدیریت سامانه‌های چند مخزنی جهت کاهش رسوبگذاری و فرسایش، به صورت زیر بیان می‌شود:

Goal:

$$\min \quad F = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{I} \left| E_{i,t+1} - E_{i,t} \right| \qquad (۱--۷)$$

Subject to:

$$E_{i,t+1} = T_E(E_t, S_t, R_t, t) \qquad for \qquad 1 \le i \le I \qquad (۲--۷)$$

$$S_{j,t+1} = T_S(E_t, S_t, R_t, t) \qquad for \qquad 1 \le j \le J \qquad (۳--۷)$$

$$\underline{R_{j,t}} \le R_{j,t} \le \overline{R_{j,t}} \qquad (۴--۷)$$

$$\underline{S_{j,t+1}} \le S_{j,t+1} \le \overline{S_{j,t+1}} \qquad (۵--۷)$$

$$\underline{S_{j,T}} = S_{j,\text{target}} \qquad (۶--۷)$$

مشخصه‌های به کار رفته در روابط فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$E_{i,t}$ و $E_{i,t+1}$: ارتفاع بستر در مقاطع عرضی رودخانه و مخزن به ترتیب در زمان‌های t و $t+1$

$S_{j,t}$ و $S_{j,t+1}$: میزان حجم ذخیره مخزن به ترتیب در زمان‌های t و $t+1$

$R_{j,t}$: میزان رهاسازی آب از مخزن

$\overline{R_{j,t}}$ و $\underline{R_{j,t}}$: حد بالا و پایین مجاز رهاسازی آب از مخزن

$\overline{S_{j,t+1}}$ و $\underline{S_{j,t+1}}$: حد بالا و پایین مجاز حجم ذخیره مخزن

$S_{j,\text{target}}$: سطح ذخیره هدف برای شرایط ذخیره نهایی $\underline{S_{j,T}}$

T : تعداد بازه‌های زمانی

I : تعداد مقاطع عرضی در کل سامانه

J : تعداد مخازن در کل سامانه

معادله (۷--۱)، تابع هدف برای مینیمم کردن مجموع فرسایش و رسوبگذاری در مخازن و رودخانه‌ها است. این تابع وابسته به سیاست‌های ویژه بهره‌برداری حول فرایندهای دینامیکی حاکم بر جریان و انتقال رسوب می‌باشد. در معادله (۷--۱)، می‌توان بسته به شرایط، اهداف متفاوتی را به عنوان تابع هدف در نظر گرفت. به عنوان مثال، گزینه ماکزیمم کردن فرایند رسوبگذاری و فرسایش با معکوس کردن علامت در سمت راست معادله (۷--۱) به دست می‌آید. ترم‌های T_E و T_S در معادله‌های (۷--۲) و

(۷--۳) توابعی انتقالی هستند که شرایط هیدرولیکی به وجود آمده در اثر سیاست‌های بهره‌برداری اعمال شده را نشان می‌هند. معادله‌های انتقالی شامل معادله‌های پیوستگی رسوب و جریان، معادله‌های انرژی و مانینگ و معادله انتقال رسوب می‌باشد.

۷-۳ به کارگیری شبیه‌سازی هیدرولیکی در مدل بهینه‌سازی

برای استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی در مدل‌های بهینه‌سازی سامانه‌های چند مخزنی، لازم است که چند تئوری به این مدل‌ها اضافه شود. اولین مورد، اضافه کردن اطلاعات تکمیلی ورودی برای توصیف شکل شبکه و شرایط مرزی داخلی مانند رابطه بین میزان حجم ذخیره و سطح آب مخزن، سیاست‌های اولیه تخصیص آب، حجم ذخیره اولیه و نرخ تلفات مخزن می‌باشد (Niklow و همکاران ۲۰۰۰).

بیشتر مدل‌های هیدرولیکی، رفتار مخزن را با توجه به ارتفاع سطح آب آن کنترل می‌کنند. بنابراین یک زیر برنامه برای روندیابی حجم ذخیره مخزن بر اساس ارتفاع آب آن، باید به مدل بهینه‌سازی اضافه شود. روندیابی تغییرات حجم ذخیره مخزن، بر اساس پیوستگی جرم در مخزن انجام می‌شود. رابطه‌ی مورد نیاز به صورت زیر بیان می‌شود (Niklow و همکاران ۲۰۰۰):

$$\begin{bmatrix} S_{1,t+1} \\ S_{2,t+1} \\ \vdots \\ S_{J,t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,t} \\ S_{2,t} \\ \vdots \\ S_{J,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{1,t} \\ Q_{2,t} \\ \vdots \\ Q_{J,t} \end{bmatrix} \Delta T_t + \mathbf{M} \begin{bmatrix} R_{1,t} \\ R_{2,t} \\ \vdots \\ R_{J,t} \end{bmatrix} \Delta T_t - \begin{bmatrix} LS_{1,t} \\ LS_{2,t} \\ \vdots \\ LS_{J,t} \end{bmatrix} \qquad (۷--۷)$$

که در آن:

$Q_{j,t}$: جریان ماندگار ورودی به مخزن j

ΔT_t : طول بازه زمانی t

$LS_{j,t}$: برآیند تلفات مخزن، مانند تبخیر، نفوذ و بارندگی

در رابطه (۷--۷)، $\mathbf{M}$ یک ماتریس از مرتبه J است که مقدار آرایه‌های قطر اصلی آن (۱-) می‌باشد. چنانچه مخزن jام به جریان ورودی مخزن kام کمک کند، آنگاه مقدار آرایه (j,k) برابر (۱+) خواهد بود، در غیر این صورت مقدار آرایه‌ها برابر صفر است.

رابطه (۷--۷) یک حالت مشخص از رابطه‌ی کلی (۷--۳) است. بر اساس این رابطه، می‌توان حجم ذخیره مخزن را محاسبه کرد و از آن برای تعریف شرایط مرزی داخلی - به صورت ارتفاع جدید سطح آب مخزن - استفاده کرد. منحنی حجم ذخیره بر حسب سطح آب مخزن، در اثر رسوبگذاری یا فرسایش دچار تغییر می‌شود. اگر تغییرات مطرح شده قابل توجه باشد، باید منحنی حجم - سطح را برای شرایط جدید ارتقا داد. اطلاعات مربوط به خطاالقعر (تالوگ) و حجم ذخیره مخزن نیز بعد از هر بازه زمانی محاسبه و ذخیره می‌شود.

۷-٤ روش حل مدل بهینه‌سازی

برای حل مسئله کنترل رسوب، ابتدا باید مسئله را از حالت مقید به حالت بدون قید انتقال داد. برای این منظور، از یک تابع جریمه[1] برای ادغام قیدهای (۷-۴) تا (۷--۶) در معادله (۷--۱) استفاده می‌شود. با استفاده از این تابع، در شرایطی که یک یا چند قید رعایت نمی‌شود، یک هزینه بالا به تابع هدف اضافه می‌شود. در این حالت تابع هدف به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$\min \quad F = \sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{I}\left|E_{i,t+1} - E_{i,t}\right| + \sum_{n=1}^{N} P_n \qquad (۷--۸)$$

در این رابطه، P_n مربوط به جریمه است که با استفاده از یک تابع جریمه وابسته به تخلف $L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t)$ روی قید nام، ارزیابی می‌شود. انواع مختلف تابع جریمه با پیچیدگی و مشخصه‌های متفاوت برای استفاده وجود دارد.

یکی از انواع ساده تابع جریمه به صورت زیر بیان می‌شود (Reklaitis و همکاران ۱۹۸۳، Li و همکاران ۱۹۹۵):

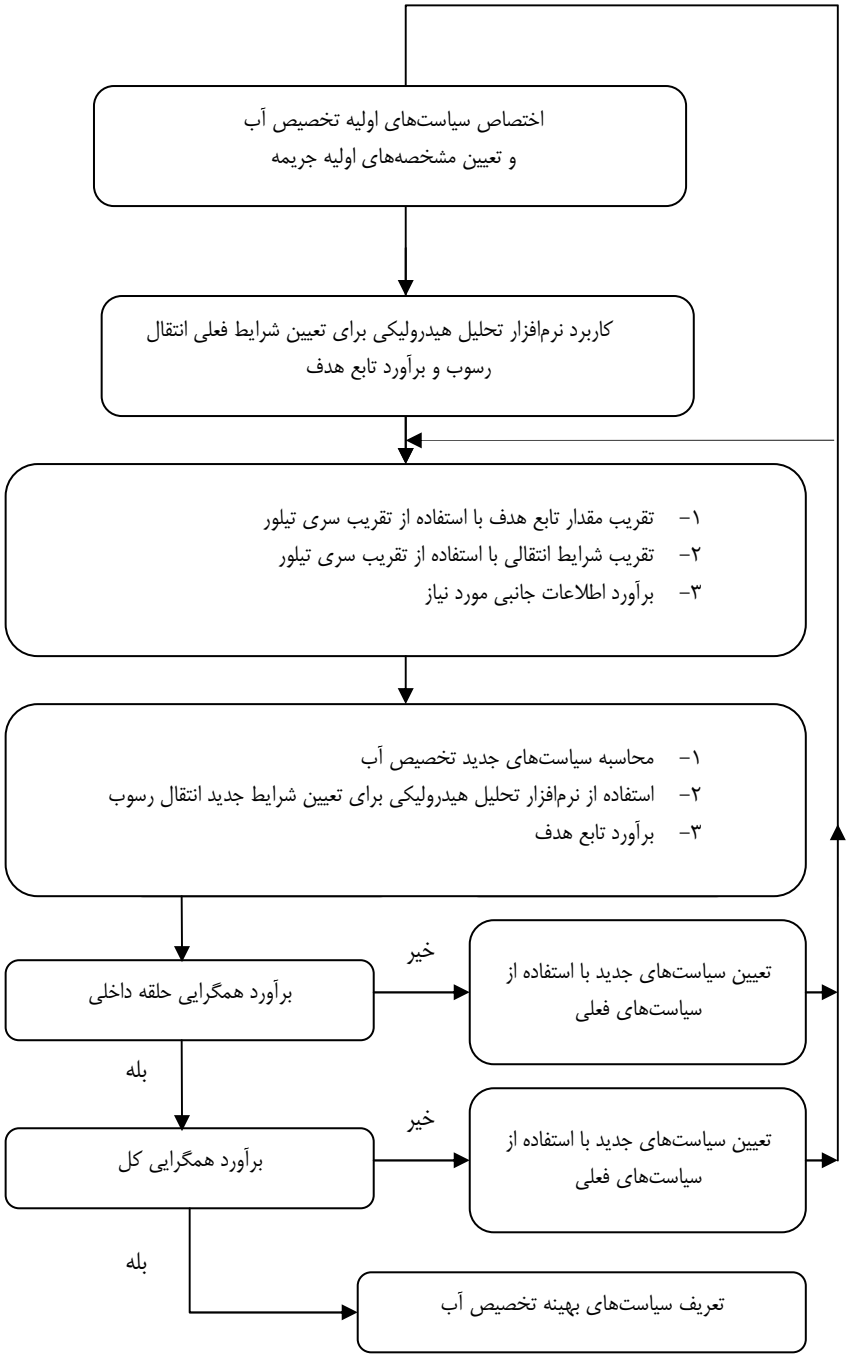
$$\begin{aligned} P_n &= 0 && if \quad L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t) \le 0 \\ P_n &= \sum\sum R_{p,n}\left[L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t)\right]^2 && if \quad L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t) > 0 \end{aligned} \qquad (۷--۹)$$

در این رابطه $R_{p,n}$ وزن مربوط به تخلف صورت گرفته می‌باشد.

مسئله بهینه‌سازی رسوب که با معادله‌های (۷--۲) تا (۷--۶) و (۷--۸) نشان داده شد، با استفاده از یک مدل هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب قابل حل است. برای حل این مجموعه، از روش بهینه‌سازی SALQR مطابق شکل (۷-۱) استفاده می‌شود.

برای مطالعه بیشتر در رابطه با روش بهینه‌سازی SALQR و مشاهده سابقه‌ی کاربردی این گونه مدل‌ها، به نشریه آموزشی "کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوبگذاری و رسوبزدایی مخازن سدها" مراجعه شود.

1- Penalty Function



شکل ۷-۱- روش SALQR برای مسائل کنترل رسوب

۸- فهرست مراجع[۱]:

۱- امامقلی زاده، صمد؛ بینا، محمود؛ نوری امام زاده‌ای، محمد رضا، "بررسی روش‌های رسوبزدایی در مخازن سدها با تأکید بر روش فلاشینگ"،نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

۲- بختیاری نوبخت؛ نیکوفر باقر، "بررسی رسوبگذاری در مخزن سدها با استفاده از تحلیل عددی دو بعدی"،ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه- اهواز، ۱۳۸۱.

۳- ژوهانس یان، "حفاظت مخازن"، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ۱۳۸۳.

۴- شعبانلو- موسوی حیدرپور، "چگونگی توزیع رسوب در تعدادی از مخازن سدهای ایران"، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۸۱.

۵- صادقی کلشتری محمد تقی، "عملیات تکمیل فلاشینگ (شاس) مخزن سد سفیدرود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید عباسپور، تهران، ۱۳۸۲.

۶- صادقی کلشتری محمد تقی، "بررسی رسوبزدایی سد سفیدرود بر سد تاریک"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید عباسپور، تهران.

۷- صفاریان محمد رضا، راد منوچهر، فیروز آبادی بهادر، "بررسی علل عدم موفقیت رسوب زدایی مخزن سد سفیدرود به وسیله آبشویی"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران - اردیبهشت ۱۳۸۲ - دانشگاه صنعتی اصفهان.

۸- صمدی بروجنی حسین، محمد ولی سامانی حسین، "ارزیابی تأثیر رسوب‌شوئی سد دز بر کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول با مدل Mike 11 "، ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه- اهواز، ۱۳۸۱.

۹- طلوعی اسماعیل و همکاران، "تجربه رسوب زدایی سد سفیدرود"، کمیته‌ی رسوبزدایی مخزن سد سفیدرود، ۱۳۸۱.

۱۰- طلوعی اسماعیل، "طراحی و بهره برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب"، نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

۱۱- کلاهدوزان مرتضی، بهلولی اصغر، محمدیان عبدالمجید، "شبیه سازی یک بعدی و دو بعدی رسوبگذاری مخزن سد چم گردلان(ایلام)"، سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، بهمن ۱۳۸۱.

۱۲- محمد نژاد و شمسایی، "بررسی نقش جریان‌های غلیظ در رسوبگذاری دریاچه‌ی سدها"، ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۱.

۱۳- محمد نژاد و شمسایی، "مدل‌سازی رسوب در مخزن سد ناشی از جریان غلیظ"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، ۱۳۸۲.

۱۴- محمد نژاد و شمسایی، "شبیه سازی عددی غلظت رسوب جریان غلیظ در مخازن"، هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۵.

۱ - به دلیل زیاد بودن تعداد منابع مورد استفاده، این فهرست تنها شامل منتخبی از آنها می‌باشد. فهرست کامل منابع به همراه متن بسیاری از آنها و تعداد زیادی مراجع مرتبط دیگر در قالب پایگاه اطلاعات ادبیات فنی در محیط MS-Access، به همراه همین پیش نویس استاندارد در لوح فشرده ارائه شده است.

۱۵- محمدی اهری محمد علی، "مکانیزم فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه کرج و انباشتگی آن در مخزن سد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ۱۳۷۱.
۱۶- مهرداد میر عبدالحمید، لشته‌نشائی میر احمد، فیروزفر علیرضا، "بررسی عملکرد عملیات تکمیلی شاس در رسوب‌زدائی از مخزن سد سفید رود"، ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه- اهواز، ۲۰۰۱.
۱۷- مرکز تحقیقات آب، "مسائل رسوب در سدهای بزرگ"، کارگاه آموزشی کمیته تخصصی هیدرولیک، تهران، ۱۳۷۸.
۱۸- مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۱.
۱۹-مجموعه مقالات سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ۱۳۸۰.
۲۰- مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، ۱۳۶۸.
۲۱- مجموعه مقالات نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

22- Annandale G. W. (1987), "Reservoir Sedimentation", Elsevier.
23- Atkinson E. (1995), "A Numerical Model for Predicting Sediment Exclusion at Intakes", HR Wallingford.
24-Atkinson E. (1996), "The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs", HR Wallingford.
25- Basson G. (1998), "Prediction of Sediment Induced Density Current Formation in Reservoirs", Sediment Transport in Reservoirs, ICHE (Cottbus 1998).
26- Batuca D. G. ,Jordan J. M. (2000), "Silting & Desilting of Reservoirs", Balkema.
27- Biedenharn, D. S. and Copeland, R. R. (2000), "Effective Discharge Calculation", ERDC/CHL CHETN-VIII-4 (December 2000), UA Army Corps of Engineers.
28- Brandt S. A. (2000), "Reservoir Desiltation by Means of Hydraulic Flushing", Ph.D. Thesis Report, Institute of Geography, University of Copenhagen.
29- Chang, F. J., Lai, J. S. and Kao, L. S. (2003), "Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir", Hydrological Processes, 17, 1623–1640 (2003).
30- Cesare G., Portner N. A. B., Boillat J.L., Schleiss A. (1998)," Modelling of erosion and sedimentation based on field investigations in Alpine reservoirs of hydropower schemes", Sediment Transport in Reservoirs.
31- Cesare G., Schleiss A. (1999), "Physical and Numerical Modelling of Turbidity Currents", Laboratory of Hydraulic Constructions, LCH, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
32- Cesare, G., Schleiss, A. and Hermann, F. (2001), "Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", Journal of Hydraulic Engineering, January 2001.
33- Cesare, G., Schleiss, A. and Hermann, F. (2002), "Discussion of Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", Journal of Hydraulic Engineering, June 2002.
34- Chanson H., James P. (1998), "Teaching Case Studies in Reservoir Siltation and Catchment Erosion" Int. J. Eng. Ed. Vol 14, No. 4, p. 265-275.
35- Chanson H.,.James P. (1999), "Siltation Of Australian Reservoirs Some Observations And Dam Safety Implications", IAHR 99.
36- Graf W. H.(1998), "Fluvial Hydraulics".
37- Griffin R.H. (1995, 1989), "Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs", U.S. Army Corps of Engineers.
38- Halcrow (2001), "Sedimentation in Storage Reservoirs", Report, Halcrow.
39- Huffaker R., Hotchkiss R, "Slow-Manifold Dynamics of Optimal Reservoir Sedimentation Management".

40- Kamphuis W. and Hall K. R. (1983), “Cohesive material Erosion by Unidirectional Current”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109, 49-61.
41- Kawashima Sh, Johndrow T. B., Annandale G. W., Shah F. (2003), “Reservoir Conservation, Volume II, RESCON Model and User Manual”, The World Bank.
42- Klingeman P. (2005), “Flow Analysis Technical Note”, Oregon State University Website, http://water.oregonstate.edu/streamflow.
43- Klingeman P. (2005), “Flood Frequency Analysis Technical Note”, Oregon State University Website, http://water.oregonstate.edu/streamflow.
44- Kostic H. , Parker G. (2003), “Progradational Sand-Mud Deltas in Lakes and reservoirs. Part 1. Theory and Numerical Modelling”, Journal of Hydraulic Research Vol. 41, No. 2, pp. 127–140
45- Kostic H. , Parker G. (2003), “Progradational Sand-Mud Deltas in Lakes and Reservoirs. Part 2. Experiment and Numerical Simulation” Journal of Hydraulic Research Vol 41 , No. 2 , pp. 141–152
46- Mohammadnezhad B. A. and Shamsai A. (2007), “Effects of Density Current on Sedimentation in Reservoirs”, Journal of Scientia Iranica.
47- Morris, G. & Fan, J. (1997), “Reservoir Sedimentation Handbook”, U.S. Army Corps of Engineers.
48- Nicklow, J. W., Mays, L. W., (2000), “Optimization of Multiple Reservoir Networks for Sedimentation Control,” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126(4), 232-242.
49- Nicklow J. W., Mays L. W. (2001), ” Optimal Control Of Reservoir Releases To Minimize Sedimentation In Rivers And Reservoirs”, Journal of the American Water Resources Association 37 (1), 197–211.
50- Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G. W., Dinar, A. (2003), “Reservoir Conservation, Vol1, the RESCON Approach”, The World Bank.
51- Postma, G., Van den Berg, J. H., Mastbergen, D. R., Kleverlaan, K. (2005), “Erosion and sedimentation by high-energy density turbidity flows on steep slopes”.
52- Scheuerlein, H., Tiritthart, M. and Gonzalez, F.N. (2004), “Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs”, Proceedings of the international conference on hydraulics of dams and river structures (April 2004).
53- Seraji, M. H. S. (2002), ”Etude du Transport Sedimentaire Associe au Phenomene de Chasse Dun Barrage”, Ph. D. Thesis Report, Universite de Caen, Normandie.
54- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2006), ” Erosion and Sedimentation Manual”, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.
55- Zhang, Yanjing; Hu, Chunhong; Dai, Qing (2000), “New model of reservoir for desilting and storage”, Journal of Sediment Research, n 2, Apr, 2000, p 35-38.