جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها

ضابطه شماره ۸۳۴

آخرین ویرایش: ۲۶-۱۱-۹۹

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

nezamfanni.ir

وزارت نیرو

دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا

seso.moe.gov.ir

۱۳۹۹

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

همکار و سرور گرامی

در نظر است تا پس از مدتی چند ماهه، این نشریه که حاصل سال‌ها مطالعه و تجربه در سطح کشور و مراجع معتبر بین‌المللی است، به عنوان ضابطه لازم‌الاجرا ابلاغ شود. لذا خواهشمند است ضمن مطالعه دقیق و استفاده از آن، نظرات ارزشمند خود را به نشانی زیر ارسال فرمایید تا قبل از ابلاغ، اصلاحات مورد نیاز انجام پذیرد:

nezamfanni@mporg.ir

Nezamfanni.ir

omoorepeyman.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir

۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.

۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.

۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۵- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.

۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال کنید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

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

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

Email: nezamfanni @mporg.ir **web: nezamfanni.ir**

omoorepeyman.ir

تهیه و کنترل دستورالعمل «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها»

[ضابطه شماره ۸۳۴]

مجری: موسسه تحقیقات آب

مشاور پروژه: رضا کمالیان

اعضای گروه تهیه‌کننده:

مسعود انتظاری	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی آب
نیما توکلی شیرازی	کمیته ملی سدهای بزرگ	دکترای آبیاری و زهکشی
خسرو حسینی	مهندسین مشاور لار	دکترای مهندسی هیدرولیک
شروین فقیهی‌راد	موسسه تحقیقات آب	دکترای مهندسی عمران ـ سازه‌های هیدرولیکی
مرتضی کلاهدوزان	موسسه تحقیقات آب و دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی هیدرولیک
محمدرضا مجدزاده طباطبایی	موسسه تحقیقات آب و دانشگاه شهید بهشتی- پردیس شهید عباسپور	دکترای مهندسی رودخانه
بایرامعلی محمدنژاد	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس مهندسی عمران
امید نائینی	موسسه تحقیقات آب و دانشگاه تهران	دکترای هیدرولیک
حسین یونسی	موسسه تحقیقات آب	لیسانس زمین‌شناسی گرایش آبشناسی
مجید گلویی	دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)	دکترای هیدرولیک و مدیریت منابع آب
آرتمیس معتمدی	مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بویین زهرا	دکترای رودخانه و رسوب

اعضای گروه نظارت:

علیرضا دائمی	وزارت نیرو	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی
نوشین رواندوست	کارشناس آزاد	لیسانس مهندسی سازه
حسن سیدسراجی	دانشگاه شهید بهشتی- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور	دکترای مکانیک سیالات
عبدالعلی شرقی	دانشگاه شهید بهشتی - پژوهشکده علوم محیطی	دکترای عمران
اسماعیل طلوعی	شرکت مهندسین مشاور منابع آب و خاک	دکترای عمران

omoorepeyman.ir

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

احمد برخورداری	شرکت مهندسی پروژه‌های آب و نیروی ایران (پانیر)	فوق‌لیسانس مهندسی عمران – سازه‌های هیدرولیکی
مسعود حدیدی مود	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	فوق‌لیسانس مهندسی مکانیک
رضا راستی اردکانی	دانشگاه شهید بهشتی	دکترای مهندسی عمران
سیدمهدی زندیان	شرکت مدیریت منابع آب ایران	فوق‌لیسانس مدیریت ساخت
محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسین مشاور توان‌آب	فوق‌لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
تقی عبادی	وزارت نیرو- دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا	فوق‌لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
محمدرضا عسکری	شرکت مهندسین مشاور بندآب	دکترای مهندسی عمران
نجمه فولادی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور – وزارت نیرو	فوق‌لیسانس مهندسی عمران - آب
علی یوسفی	شرکت مهندسین مشاورزمین آب‌پی	فوق‌لیسانس مهندسی معدن (مهندسی زمین‌شناسی)

اعضای گروه هدایت و راهبری سازمان برنامه و بودجه کشور:

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
سیّد وحیدالدین رضوانی	کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

omoorepeyman.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**۱**
فصل اول - اهمیت و سابقه‌ی شبیه‌سازی عددی رسوب در مخزن و فرآیندهای فیزیکی موثر	**۳**
۱-۱- کلیات	۵
۱-۲- اهمیت شبیه‌سازی عددی رسوب در مخزن	۵
۱-۳- سابقه‌ی شبیه‌سازی عددی رسوب در مخزن	۱۰
۱-۳-۱- تعیین بار رسوبی ورودی به مخازن در ایستگاه‌های هیدرومتری	۱۰
۱-۳-۲- تعیین مقدار رسوب فرسایش یافته در حوضه آبریز	۱۰
۱-۳-۳- برداشت هندسه‌ی بستر مخزن و تعیین منحنی‌های سطح و حجم جدید آن در رقوم‌های مختلف	۱۰
۱-۳-۴- اندازه‌گیری مستقیم ضخامت رسوب در مخازن	۱۱
۱-۳-۵- استفاده از مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری مخزن	۱۱
۱-۴- فرآیندهای فیزیکی موثر	۱۲
۱-۴-۱- میدان جریان	۱۳
۱-۴-۲- الگوی رسوبگذاری	۱۳
۱-۴-۳- نوع سیلاب‌ها	۱۴
۱-۴-۴- مشخصات رسوب	۱۴
۱-۴-۵- شکل‌گیری جریان غلیظ	۱۵
۱-۴-۶- رسوب‌شویی به وسیله تخلیه‌کننده‌های تحتانی	۱۷
۱-۴-۷- بار معلق و بار بستر	۲۱
۱-۴-۸- نحوه تبادل رسوب بین بستر و جریان	۲۲
۱-۴-۹- سرعت سقوط ذرات	۲۳
۱-۴-۱۰- سایر عوامل موثر	۲۴
۱-۵- فرضیات اساسی جهت ساده‌سازی روند شبیه‌سازی	۲۵
فصل دوم - روند انجام مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی عددی	**۲۹**
۲-۱- کلیات	۳۱
۲-۲- مشخص کردن اهداف مطالعه	۳۱
۲-۳- مطالعات اولیه و شناسایی تاثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف	۳۲
۲-۴- تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی	۳۵

omoorepeyman.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۵- انتخاب نرم‌افزارهای مناسب	۳۵
۲-۶- روند انتخاب مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند	۳۸
۲-۶-۱- شرایطی که باید برای مطالعات درازمدت ریخت‌شناسی شبیه‌سازی شوند	۴۰
۲-۶-۲- شرایطی که باید برای انواع دیگر مطالعات شبیه‌سازی شوند	۴۱
۲-۶-۳- تعیین سهم بده‌های مختلف در آورد رسوب سالانه	۴۱
۲-۷- روند تهیه و تکمیل اطلاعات محیطی مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی	۴۴
۲-۷-۱- اطلاعات پایه	۴۷
۲-۷-۲- اطلاعات هیدرولوژیک	۴۸
۲-۷-۳- اطلاعات هندسه‌ی محیط	۴۹
۲-۷-۴- اطلاعات مربوط به بدنه‌ی آب	۵۲
۲-۷-۵- اطلاعات مربوط به بستر	۵۵
۲-۷-۶- شرایط مرزی	۵۸
۲-۸- روند برپاسازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها	۶۵
۲-۸-۱- برپاسازی مدل	۶۶
۲-۸-۲- واسنجی مدل	۷۳
۲-۸-۳- مشخصه‌های واسنجی مدل	۷۴
۲-۸-۴- مقایسه و سنجش سازگاری نتایج شبیه‌سازی مدل با اندازه‌گیری‌های محیطی	۸۱
۲-۸-۵- روند واسنجی	۸۴
۲-۸-۶- رفع اشکال	۸۸
۲-۸-۷- صحت‌سنجی	۹۱
۲-۹- شبیه‌سازی مجموعه شرایط انتخاب شده و نتیجه‌گیری	۹۲
فصل سوم - بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه رودخانه - مخزن	**۹۳**
۳-۱- کلیات	۹۵
۳-۲- تاثیر متقابل رودخانه و مخزن سد	۹۵
۳-۳- روش‌های شبیه‌سازی رودخانه با دیدگاه رسوب‌گذاری در مخزن	۹۶
۳-۴- تفاوت روش‌های شبیه‌سازی رسوب در رودخانه و مخزن سد	۹۷

omoorepeyman.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۵- راهکارهای مطالعه تلفیقی سامانه رودخانه - مخزن	۹۸
فصل چهارم - بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه‌های رودخانه‌ای چند مخزنی	**۱۰۱**
۴-۱- کلیات	۱۰۳
۴-۲- سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه‌های یکپارچه چند مخزنی	۱۰۳
۴-۳- روش انجام کار	۱۰۴
فصل پنجم – ارائه مدل‌های عددی منتخب و مناسب جهت شبیه‌سازی انتشار رسوب	**۱۰۷**
۵-۱- مقدمه	۱۰۹
۵-۲- مدل‌های یک بعدی انتقال رسوب	۱۱۲
۵-۳- مدل‌های دو بعدی انتقال رسوب	۱۱۲
۵-۴- مدل‌های سه بعدی انتقال رسوب	۱۱۲
۵-۵- مدل‌های هیدرولوژیک	۱۱۳
پیوست ۱- معادلات و روابط	**۱۲۱**
پیوست ۲- واژه‌نامه	**۱۴۳**
منابع و مراجع	**۱۵۱**

omoorepeyman.ir

فهرست جدول‌ها و فرم‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- میزان رسوبات ورودی به مخازن سدهای بزرگ براساس آمار هیدروگرافی سال ۱۳۸۶ و اولویت بندی رسوبگذاری ۸

جدول ۱-۲- تنش آستانه‌ی فرسایش در شرایط مختلف ۲۳

جدول ۲-۱- فهرست فرآیندهای فیزیکی که باید میزان اهمیت هر کدام از آن‌ها در مطالعه روشن شود ۳۴

جدول ۲-۲- تعدادی از معمول‌ترین ساده‌سازی‌ها که مجاز یا غیر مجاز بودن آن‌ها درشبیه‌سازی یک مساله باید مشخص شود. ۳۸

جدول ۲-۳- جدول راهنمای محاسبه‌ی سهم تجمعی بده‌های مختلف در آورد رسوب به مخزن ۴۴

فرم ۲-۱- فرم شناسایی مشخصات اصلی سد و مخزن ۴۶

جدول ۵-۱- خلاصه‌ای از خصوصیاتی که یک مدل بایستی جهت شبیه‌سازی یک مساله فرضی دارا باشد ۱۱۰

جدول ۵-۲- مدل‌های منتخب یک بعدی ۱۱۳

جدول ۵-۳- مدل‌های منتخب دو بعدی ۱۱۴

جدول ۵-۴- مدل‌های منتخب سه بعدی ۱۱۷

جدول پ.۱-۱- چند نمونه از روابط تجربی جابه‌جایی رسوب ۱۲۵

جدول پ.۱-۲- ضرایب رابطه رسوب Ackers & White ۱۲۷

omoorepeyman.ir

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- موقعیت سدهای در حال بهره‌برداری, ساخت و مطالعه تا سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲. ۷
شکل ۱-۲- الگوهای کلی و مختلف شکل‌گیری رسوبات در مخزن سد ۱۴
شکل ۱-۳- نمای فرآیند جریان غلیظ در مخزن سد ۱۵
شکل ۱-۴- تغییر شکل پروفیل سطح بستر مخزن به وسیله مدیریت سطح آب و دریچه‌های سد (عملیات فلاشینگ) ۱۸
شکل ۱-۵- مقطع اولیه‌ی یک کانال انحرافی فرسایشی ۲۱
شکل ۱-۶- تعریض کانال تحت اثر فرسایش در حین عملیات رسوبزدایی ۲۱
شکل ۱-۷- فرسایش پس‌رونده آبشاری در کانال فرسایشی در حین عملیات رسوبزدایی ۲۱
شکل ۱-۸- درهم کنش فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیک خاک در ضمن آزاد شدن تدریجی ۲۱
شکل ۱-۹- روند تغییر سرعت سقوط رسوب ریزدانه چسبنده بر حسب غلظت رسوب معلق ۲۴
شکل ۲-۱- نمودار سهم تجمعی آورد رسوب بر حسب بده جریان ۴۳
شکل ۲-۲- مقایسه‌ی تغییرات زمانی منحنی بده آب و بده رسوب در طی یک سیل ۶۲
شکل ۲-۳- سرعت سقوط ذرات بر حسب قطر ذرات و دمای آب ۷۷
نمودار ۴-۱- روش SALQR برای بهینه‌سازی در مسائل کنترل رسوب ۱۰۵
شکل ۵-۱- مثالی از انتخاب مدل چند بعدی با توجه به نوع مساله ۱۱۱

omoorepeyman.ir

مقدمه

جریان آب بر روی بستر زمین طبیعی باعث فرسایش خاک و حمل ذرات حاصل از آن توسط جریان به سمت پایین دست به صورت بار رسوبی معلق و بستر خواهد شد. به دلیل کاهش شدید سرعت در بالادست سد و تقریبا سکون جریان در مخزن سد، ته‌نشینی ذرات نامحلول و رسوبات موجود در آن در مخزن سد امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. برآوردها نشان می‌دهد که سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از مجموع حجم مخازن دنیا، که بیش از ۷۰۰۰ میلیارد مترمکعب می‌باشد، به علت رسوب‌گذاری از دست می‌رود [۲۶، ۵۴]. این میزان در بعضی از کشورها بیش از ۱٪ است. در ایران نرخ کاهش حجم مخازن سدها در اثر رسوب‌گذاری به‌طور متوسط بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد تخمین زده می‌شود که به‌طور تقریبی معادل ۱۷۵ میلیون تا ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال است [۱۱]. متوسط نرخ کاهش حجم محاسبه شده به‌وسیله‌ی دفتر بهره‌برداری و نگهداری از مخازن سدهای وزارت نیرو با استفاده از اطلاعات ۲۷ سد بزرگ کشور در سال ۱۳۸۶ نیز در همین محدوده قرار دارد. از آنجایی‌که میزان فرسایش خاک حوضه‌های آبریز در ایران به دلایل مختلفی زیاد است، پرداختن به مسایل رسوب در مخازن سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پدیده رسوبگذاری، بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره شده در دریاچه مخزن را با مشکل مواجه می‌سازد. عمده این مشکلات شامل کم شدن ظرفیت ذخیره مخزن، اختلال در کنترل سیلاب بالادست مخزن، اختلال در عملکرد سامانه‌های خروجی سد، نیروگاه و سرریزها، تاثیر بر کیفیت آب و غیره می‌باشد. جهت کاهش مشکلات ناشی از رسوبگذاری در مخزن سد، نیاز به برآورد پارامترهایی از روند رسوبگذاری مانند میزان و نحوه انتشار رسوب در مخزن، نوع و دانه‌بندی رسوبات می‌باشد.

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. امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای تخصصی به ابزاری قابل قبول برای شبیه‌سازی نحوه رسوب‌گذاری در مخازن سدها تبدیل شده‌اند. طی سال‌های اخیر، به‌کارگیری این ابزار در سطح کشور رشد قابل توجهی داشته است. با وجود اینکه نرم‌افزارهای جدید شبیه‌سازی عددی از توانایی‌های فراوانی برخوردار هستند و می‌توانند مهندسان را در انجام مطالعات و طراحی‌ها یاری کنند، اما هرگز نمی‌توانند جای آگاهی‌های فنی عمیق، قضاوت‌های مهندسی خوب و تجربه را بگیرند. جهت انجام یک طراحی دقیق، مهندسان طراح باید با پیش‌زمینه علمی مدل‌های مزبور آشنا بوده و کاربردها، حساسیت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها را بشناسند.

- هدف و دامنه کاربرد

هدف این راهنما، ارائه یک دستورالعمل کاربردی برای تشریح نحوه انتخاب مدل عددی مناسب از میان مدل‌های موجود در مسایل رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها می‌باشد. این راهنما به‌طور خاص برای شرح روش‌ها و فنون انجام مطالعات رسوب مخزن با استفاده از شبیه‌سازی عددی و برای تعیین جایگاه شبیه‌سازی عددی در میان روش‌های مختلف مطالعه‌ی رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها تهیه شده است. این مجموعه همچنین شامل مرور

omoorepeyman.ir

فرآیندهای مختلف مؤثر بر این پدیده‌ها و روابط ریاضی حاکم مربوطه می‌باشد. راهنمای حاضر برای متخصصینی که در مسیر طراحی یا بهره‌برداری از سدهایی که با مسایل رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخزن ارتباط دارند، مفید خواهد بود.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۱

اهمیت و سابقه‌ی شبیه‌سازی عددی رسوب در مخزن و فرآیندهای فیزیکی موثر

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۱-۱- کلیات

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 [۴۳]. این‌روند 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. به‌علاوه 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 (۱-۱) موقعیت سدهای در حال بهره‌برداری، ساخت و مطالعه را براساس اطلاعات سال ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ 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 (۱-۱) وضعیت کلی رسوب‌گذاری در تعدادی از مخازن سدهای کشور را براساس اطلاعات سال ۱۳۹۶ نشان می‌دهد. براساس این اطلاعات، متوسط نرخ کاهش سالانه حجم در مخازن جدول مزبور، ۰/۶ درصد است. نرخ کاهش حجم سالانه در بعضی از مخازن بیش‌تر از ۱ و حتی بیش‌تر از ۲ درصد برآورد شده است. برخی از سدها نظیر سد گلستان، سد وشمگیر، سد اکباتان، سد استقلال (میناب)، سد پیشین، سد سفیدرود، سد بوکان، سد شهید عباسپور و سد دز با مشکل رسوب مواجه هستند. 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 عمده 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.

۱-۲- اهمیت شبیه‌سازی عددی رسوب در مخزن

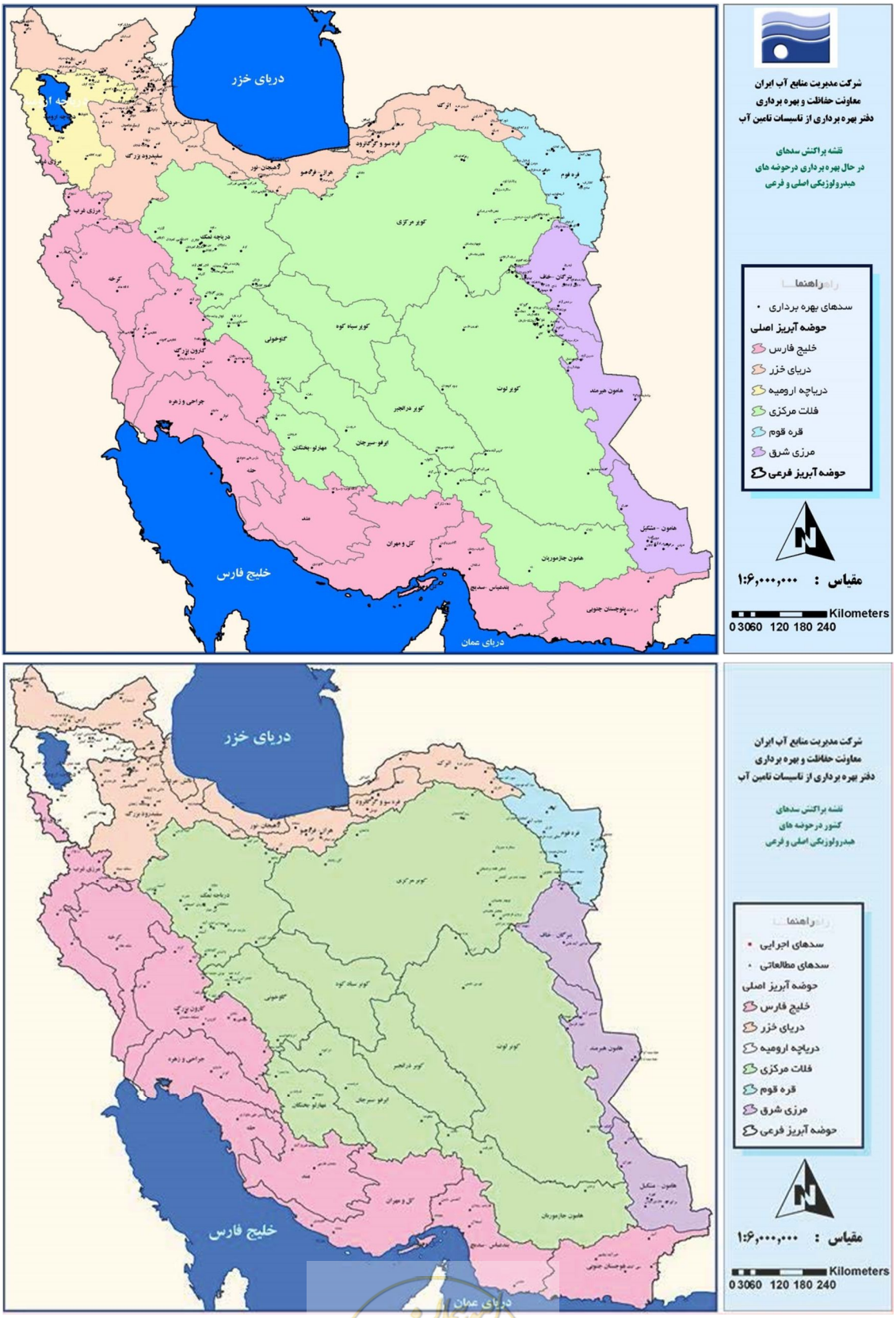
شبیه‌سازی عددی روند رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخزن، هم در مرحله طراحی و هم در مرحله بهره‌برداری، کمک بسیاری به طراحی اولیه و مدیریت بهره‌برداری خواهد کرد. این کمک می‌تواند شامل پیش‌بینی رفتار رسوبی مخزن،

omoorepeyman.ir

پیش‌بینی نیازهای سازه‌ای، کمک به تنظیم دستورالعمل‌های اجرایی مدیریت رسوب و بهینه‌سازی عملیات تخلیه رسوب در زمان بهره‌برداری باشد.

یکی از کاربردهای مهم مدل‌های ریاضی، بررسی وضعیت‌های مختلف رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخزن می‌باشد. به عنوان مثال، یکی از راه حل‌های شناخته شده‌ی بین‌المللی برای کاهش راندمان تله‌اندازی رسوب در مخزن، پایین آوردن تراز آب مخزن در هنگام سیلاب و مانور دریچه‌های عمقی می‌باشد (فلاشینگ). این روش می‌تواند باعث خروج قسمت قابل توجهی از رسوب ورودی به صورت جریان غلیظ از دریچه‌های عمقی شود. اگر عملیات مانور دریچه‌ها به‌درستی انجام نشود، باعث افزایش بیش‌تر مشکلات رسوبی مخزن خواهد شد (شکل ۱-۴). 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 بالادست مخزن ته‌نشین می‌شوند. در این حال رسوب از سد و تاسیسات تخلیه دور خواهد ماند، اما رسوب‌گذاری در حجم مفید مخزن انجام می‌شود. از سوی دیگر اگر سطح آب مخزن قبل از فصل طغیان پایین آورده شود، جریان‌های وارده در فصل سیلابی، موجب شسته شدن رسوب و انتقال آن به سمت بدنه سد می‌شود. اگر این روند باعث شود که رسوب در منطقه‌ی حجم مرده‌ی مخزن ته‌نشین شود، مفید خواهد بود. در مواردی می‌توان با بازکردن کنترل شده‌ی دریچه‌های تخلیه‌ی عمقی، میدان جریان را به‌گونه‌ای سامان داد که هرچه بیش‌تر به تخلیه‌ی جریان‌های غلیظ کمک کند. این عمل حتی می‌تواند به ایجاد جریان غلیظ کمک کرده و با استفاده از این فرآیند، رسوب را به صورت جریان‌های غلیظ از دریچه‌ها خارج نمود.

omoorepeyman.ir



شکل ۱-۱- موقعیت سدهای در حال بهره‌برداری، ساخت و مطالعه تا سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲.

منبع: دفتر بهره‌برداری از تاسیسات تامین آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران.

omoorepeyman.ir

جدول ۱-۱- میزان رسوبات ورودی به مخازن سدهای بزرگ براساس آمار هیدروگرافی سال ۱۳۸۶ و اولویت بندی رسوبگذاری

ردیف	نام سد	حوضه آبریز اصلی	مشخصات شناسنامه‌ای مخزن			نتایج جدیدترین هیدروگرافی به عمل آمده			تحلیل نتایج				
			سال شروع بهره‌برداری	حجم کل مخزن	مقدار حجم مرده مخزن	سال	حجم کل جدید مخزن	حجم رسوب انباشت شده در مخزن از ابتدای بهره‌برداری	مدت رسوبگذاری (سال)	متوسط حجم رسوبات سالیانه (میلیون متر مکعب)	درصد کاهش سالانه مخزن بر اثر رسوب	سطح حوضه تجمعی (کیلومتر مربع)	رسوب ویژه (متر مکعب در هکتار در سال)
۱	سد گلستان (گلستان۱)	دریای خزر	۱۳۷۹	۸۶/۵۰	۲۸/۰	۱۳۹۴	۵۲/۴۳	۳۴/۱	۱۵	۲/۳	۲/۶۳	۵۲۶۹	۴/۳
۲	سد بوستان (گلستان۲)	دریای خزر	۱۳۸۳	۵۱/۰۰	۷/۰	۱۳۹۰	۴۱/۷۰	۹/۳	۷	۱/۳	۲/۶۱	۱۵۹۶	۸/۳
۳	سد زنوز	دریای خزر	۱۳۸۳	۶/۱۶	۱/۲	۱۳۹۱	۴/۹۵	۱/۲	۸	۰/۲	۲/۴۶	۴۵	۳۳/۵
۴	سد وشمگیر (گرگان)	دریای خزر	۱۳۴۹	۹۶/۰۰	۵۱/۰	۱۳۷۴	۴۲/۰۰	۵۴/۰	۲۵	۲/۲	۲/۲۵	۷۷۳۷	۲/۸
۵	سد کارون۳	خلیج فارس	۱۳۸۳	۲۹۷۰/۰۰	۹۰/۰	۱۳۸۷	۲۷۱۹/۰۰	۲۵۱/۰	۴	۶۲/۸	۲/۱۱	۲۴۲۳۸	۲۵/۹
۶	سد حاجی آباد قائن	هامون	۱۳۸۳	۵/۳۱	۲/۰	۱۳۹۰	۴/۶۱	۰/۷	۷	۰/۱	۱/۸۷	۱۲۸۸	۰/۸
۷	سد ایلام (چم گردلان)	خلیج فارس	۱۳۸۰	۷۱/۰۰	۱۲/۲	۱۳۸۹	۶۱/۳۱	۹/۷	۹	۱/۱	۱/۵۲	۴۷۴	۲۲/۷
۸	سد بیدواز اسفراین	مرکزی	۱۳۸۳	۵۳/۰۰	۱/۰	۱۳۹۰	۴۸/۲۷	۴۷/۷	۷	۰/۷	۱/۲۷	۵۹۶۲	۱/۱
۹	سد کرخه	خلیج فارس	۱۳۸۰	۵۳۴۷/۰۰	۳۱۷/۷	۱۳۹۲	۵۲۷۳/۶۰	۷۳/۴	۱۲	۶/۱	۰/۱۱	۴۲۷۸۴	۱/۴
۱۰	سد مارون	خلیج فارس	۱۳۷۸	۱۲۷۴/۰۰	۲۷۴/۰	۱۳۸۴	۱۱۸۳/۷۰	۹۰/۳	۶	۱۵/۱	۱/۱۸	۳۸۳۲	۳۹/۳
۱۱	سد سنگرد	مرکزی	۱۳۸۳	۳۰/۰۰	۱۱/۰	۱۳۹۴	۲۶/۵۵	۳/۵	۱۱	۰/۳	۱/۰۵	۱۲۳۰	۲/۵
۱۲	سد پیشین	خلیج فارس	۱۳۷۲	۱۷۵/۰۰	۸/۰	۱۳۷۶	۱۶۷/۷۰	۷/۳	۴	۱/۸	۱/۰۴	۷۲۷۰	۲/۵
۱۳	سد میناب (استقلال)	خلیج فارس	۱۳۶۲	۳۴۵/۰۰	۷۵/۰	۱۳۹۲	۲۴۰/۱۶	۱۰۴/۸	۳۰	۳/۵	۱/۰۱	۴۹۲۷	۷/۱
۱۴	سد دره بید	مرکزی	۱۳۶۶	۴/۷۵	۱/۲	۱۳۸۹	۳/۷۲	۱/۰	۲۳	۰/۰	۰/۹۴	۱۲۶	۳/۶
۱۵	سد نهند	دریای خزر	۱۳۷۵	۲۴/۰۰	۲/۹	۱۳۸۸	۲۱/۵۰	۲/۵	۱۳	۰/۲	۲/۸۰	۲۴۳	۷/۹
۱۶	سد شهید عباسپور	خلیج فارس	۱۳۵۶	۳۱۳۹/۰۰	۱۶۹۳/۰	۱۳۸۴	۲۴۳۹/۰۰	۷۰۰/۰	۲۸	۲۵/۰	۰/۸۰	۲۶۸۰۴	۹/۳
۱۷	سد سفیدرود	دریای خزر	۱۳۴۱	۱۷۶۵/۰۰	۶۵۳/۰	۱۳۹۲	۱۰۵۰/۰۰	۷۱۵/۰	۵۱	۱۴/۰	۰/۷۹	۵۶۶۸۲	۲/۵
۱۸	سد ماکو (بارون)	دریای خزر	۱۳۷۴	۱۵۰/۰۰	۱۷/۰	۱۳۸۷	۱۳۷/۴۰	۱۲/۶	۱۳	۱/۰	۰/۶۵	۱۰۰۸	۹/۶

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۱-۱- میزان رسوبات ورودی به مخازن سدهای بزرگ براساس آمار هیدروگرافی سال ۱۳۸۶ و اولویت بندی رسوبگذاری

ردیف	نام سد	حوضه آبریز اصلی	مشخصات شناسنامه‌ای مخزن			نتایج جدیدترین هیدروگرافی به عمل آمده			تحلیل نتایج				
			سال شروع بهره‌برداری	حجم کل مخزن	مقدار حجم مرده مخزن	سال	حجم کل جدید مخزن	حجم رسوب انباشت شده در مخزن از ابتدای بهره‌برداری	مدت رسوبگذاری (سال)	متوسط حجم رسوبات سالیانه (میلیون مترمکعب)	درصد کاهش سالانه مخزن بر اثر رسوب	سطح حوضه تجمعی (کیلومتر مربع)	رسوب ویژه (مترمکعب در هکتار در سال)
۱۹	سد تهم	دریای خزر	۱۳۸۲	۸۷/۷۸	۵/۰	۱۳۸۸	۸۴/۴۱	۳/۴	۶	۰/۶	۰/۶۴	۱۶۱	۳۴/۹
۲۰	سد جیرفت	مرکزی	۱۳۷۰	۳۶۹/۰۰	۶۳/۰	۱۳۸۴	۳۳۶/۰۰	۳۳/۰	۱۴	۲/۴	۰/۶۴	۸۰۶۵	۲/۹
۲۱	سد چغاخور	خلیج فارس	۱۳۷۱	۴۲/۰۰	۲/۰	۱۳۹۱	۳۷/۰۰	۵/۰	۲۰	۰/۳	۰/۶۰	۱۱۴	۲۱/۹
۲۲	سد زریوار	خلیج فارس	۱۳۷۴	۵۸/۰۰	۲۳/۴	۱۳۸۹	۵۳/۴۰	۴/۶	۱۵	۰/۳	۰/۵۳	۹۳	۳۳/۰
۲۳	سد لتیان	مرکزی	۱۳۴۶	۹۵/۰۰	۲۸/۰	۱۳۸۵	۷۵/۶۰	۱۹/۴	۳۹	۰/۵	۰/۵۲	۷۰۳	۷/۱
۲۴	سد دز	خلیج فارس	۱۳۴۱	۳۴۶۵/۰۰	۸۶۵/۴	۱۳۸۹	۲۶۹۸/۵۰	۷۶۶/۵	۴۸	۱۶/۰	۰/۴۶	۱۷۳۱۶	۹/۲
۲۵	سد بانه	خلیج فارس	۱۳۸۲	۴/۲۶	۰/۵	۱۳۸۹	۴/۱۲	۰/۱	۷	۰/۰	۰/۴۶	۴۹	۴/۰
۲۶	سد علویان	ارومیه	۱۳۷۴	۶۰/۰۰	۳/۰	۱۳۸۳	۵۷/۷۰	۲/۳	۹	۰/۳	۰/۴۳	۳۱۳	۸/۲
۲۷	سد اکباتان	مرکزی	۱۳۴۲	۴۰/۰۰	۱۱/۸	۱۳۷۹	۳۳/۸۰	۶/۲	۳۷	۰/۲	۰/۴۲	۲۲۳	۷/۵
۲۸	سد زاینده‌رود	مرکزی	۱۳۴۹	۱۴۷۰/۰۰	۲۰/۰	۱۳۹۱	۱۲۳۹/۱۰	۲۳۰/۹	۴۲	۵/۵	۰/۳۷	۴۱۱۴	۱۳/۴
۲۹	سد کارده	سرخس	۱۳۶۷	۲۸/۰۰	۱/۳	۱۳۸۷	۲۶/۰۰	۲/۰	۲۰	۰/۱	۰/۳۶	۵۵۴	۱/۸

بروز اشتباه در عملیات تخلیه جریان غلیظ می‌تواند با انتقال رسوب به نزدیک دریچه‌ها و عدم خروج آن‌ها مخاطراتی را برای تخلیه‌کننده‌های تحتانی به‌وجود آورد. همچنین ممکن است غلظت بیش از حد جریان رسوبی خارج شونده، از نظر عملکرد تونل تخلیه و یا استانداردهای زیست‌محیطی در پایین‌دست 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 جزییات 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 تاثیرات زیست‌محیطی نحوه‌ی مدیریت سد بر قسمت‌های مختلف مخزن را نیز مشخص کند. مخزن سد از دیدگاه زیست‌محیطی 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

1- Rule Curve

omoorepeyman.ir

هم از نظر دانه‌بندی رسوب - تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین در مواردی ممکن است نیاز به پیش‌بینی تاثیر روند مدیریت مخزن بر شاخص‌های زیست‌محیطی نیز لازم شود. این کار از راه شبیه‌سازی 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 جزییات این‌گونه مدیریت در یک مخزن خاص با استفاده از شبیه‌سازی عددی قابل انجام می‌باشد.

۱-۳- سابقه‌ی شبیه‌سازی 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:

۱-۳-۱- تعیین بار رسوبی ورودی به مخازن در ایستگاه‌های هیدرومتری

در این روش 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 درباره نحوه‌ی ته‌نشین شدن رسوبات وارد شده به مخزن، اطلاعاتی به‌دست آورد.

۱-۳-۲- تعیین مقدار رسوب فرسایش یافته در حوضه آبریز

در این روش 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 درباره نحوه ته‌نشین شدن رسوبات در مخزن، اطلاعاتی به‌دست نمی‌دهد.

۱-۳-۳- برداشت هندسه‌ی بستر مخزن و تعیین منحنی‌های سطح و حجم جدید آن در رقوم‌های مختلف

در این روش 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 واسنجی[1] و صحت‌سنجی[2]

1- Calibration
2- Verification

omoorepeyman.ir

مدل‌های عددی می‌باشد. برای تعیین هندسه‌ی بستر مخزن، می‌توان از نقشه‌برداری هوایی بعد از پایین رفتن سطح آب نیز استفاده کرد. این روش توانایی تعیین نحوه تغییر هندسه‌ی بستر مخزن در طی زمان را نیز دارا می‌باشد.

۱-۳-۴- اندازه‌گیری مستقیم ضخامت رسوب در مخازن

در مخازنی که برای تامین آب کشاورزی احداث شده‌اند و می‌توانند مدتی از سال را کاملا تخلیه شوند، می‌توان از روش اندازه‌گیری مستقیم ضخامت لایه‌ی رسوب نیز استفاده کرد. در این روش امکان تعیین نحوه تغییر هندسه‌ی بستر مخزن در طی زمان وجود دارد.

۱-۳-۵- استفاده از مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری مخزن

روش‌های فوق 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، به‌کارگیری 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 جزییات الگوی رسوبگذاری در قسمت‌های مختلف مخزن مورد توجه نمی‌باشد. در سال‌های اخیر، جزییات 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 جابه‌جایی دلتای رسوبی در طول سال‌های بهره‌برداری، نحوه تاثیر جریان غلیظ در شرایط سیلابی و تاثیر روش‌های مدیریت سد بر این فرآیندها از اهمیت کاربردی برخوردار شده است. برای انجام این‌گونه مطالعات، شبیه‌سازی عددی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها شناخته شده است. شبیه‌سازی عملیات رسوب‌زدایی از مخزن و تاثیر مدیریت مخزن بر مجموعه‌ی مخزن و رودخانه‌های بالادست و پایین‌دست 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 این‌گونه مطالعات به سال‌های بعد از ۱۹۹۰ مربوط می‌شود.

تقریبا تمامی مطالعات شبیه‌سازی عددی در سال‌های اولیه با استفاده از مدل یک‌بعدی انجام شده‌اند. مدل‌های یک‌بعدی هنوز هم نقش مهمی در مطالعات و مسایل کاربردی به‌عهده دارند. مطالعات مربوط به میدان رسوب در فرآیند جریان‌های غلیظ به وسیله‌ی مدل‌های دوبعدی افقی اصلاح شده، مدل‌های دوبعدی قائم و مدل‌های سه‌بعدی بررسی شده‌اند. کاربرد مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی 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 جابه‌جایی رسوب، در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

omoorepeyman.ir

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 واسنجی آن‌ها است. در پژوهش‌های 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 جابه‌جایی 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 درضمن عملیات رسوب‌شویی، در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است (به عنوان نمونه [۵۹، ۳۱، ۵۶]). این‌گونه مطالعات، در مخازن نه‌چندان کم‌عرض به طور عمده با مدل‌های دوبعدی یا سه‌بعدی انجام شده‌اند.

نحوه تعامل مخزن سد با سامانه رودخانه بالادست و پایین‌دست، 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 مسایل رسوب مخازن سدها انجام شده است (به عنوان نمونه [۱ تا ۲۳]). به‌خصوص 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 - به‌خصوص 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 تلاش‌های رو به افزایشی برای انجام این نوع مطالعات در کشور دیده می‌شود.

۱-۴- فرآیندهای فیزیکی موثر

تشکیل مخزن سد سبب دگرگونی وسیعی در محیط اطراف می‌شود که تغییرات هیدرولیکی، رسوبی و ریخت‌شناسی در مخزن سد و رودخانه‌های بالادست و پایین‌دست از آن جمله‌اند. رفتار میدان جریان و جابه‌جایی رسوب در مخازن سدها تحت تاثیر 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 موثر بر آن‌ها در اختیار داشت. شناخت فیزیک مساله برای انتخاب صحیح مدل، انتخاب صحیح اطلاعات ورودی به آن، واسنجی 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، جابه‌جایی، ته‌نشینی و تحکیم رسوب را شناخت و به‌درستی مورد توجه قرار داد. عوامل فیزیکی موثر بر روند رسوبگذاری به صورت زیر خلاصه می‌گردند:

omoorepeyman.ir

۱-۴-۱- میدان جریان

شبیه‌سازی دقیق میدان جریان، پیش‌شرط اساسی شبیه‌سازی دقیق میدان جابه‌جایی رسوب می‌باشد. درصورتی‌که 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 تاثیرگذارد. در رابطه با جریان‌های غلیظ باید تفاوت دو اصطلاح Density Current و Dense Current را در متون فنی در نظر گرفت. اصطلاح اول به جریان ناشی از تفاوت چگالی - صرف‌نظر 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 تاثیر 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.

۱-۴-۲- الگوی رسوبگذاری

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 بالادست می‌شود. رسوبات ریزدانه‌تر به پایین‌دست 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 تاثیر می‌گذارد.

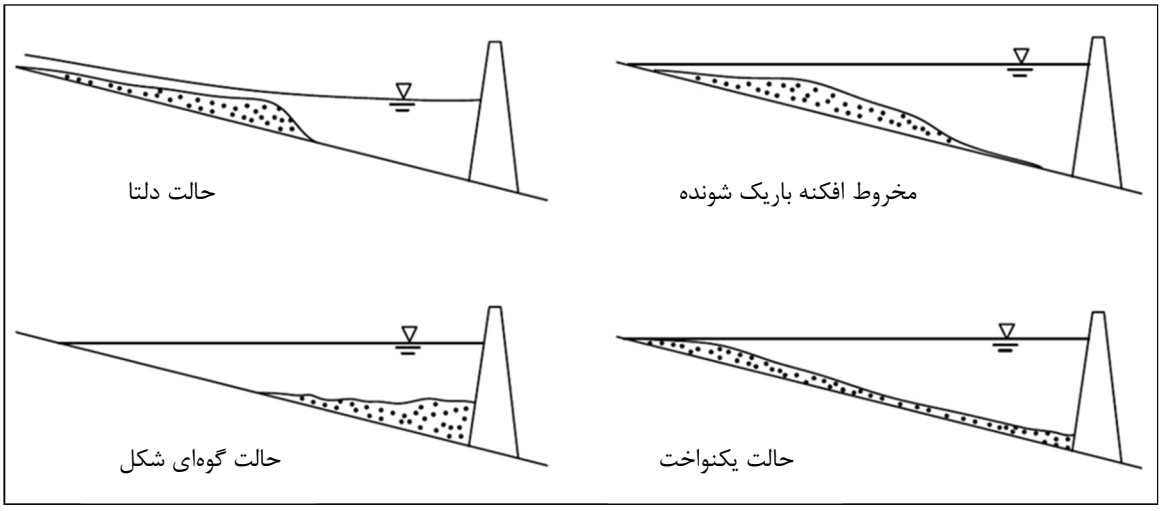
اگر تغییرات تراز آب مخزن پس از آبگیری زیاد نباشد، روند ته‌نشین شدن رسوب در مخزن در بیش‌تر موارد به صورت شکل‌گیری دلتا می‌باشد. اگر تراز آب، متغیر و بالا باشد و رسوبات وارد شونده ریزدانه و کم‌غلظت باشند، آنگاه در طول مخزن به صورت تقریبی یکنواخت ته‌نشین می‌شوند. در این حال دلتای رسوبی مشخصی شکل نمی‌گیرد.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

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

omoorepeyman.ir

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.

رسوب در مخزن متقارن به صورت یکنواخت و در مخزن غیرمتقارن به صورت غیریکنواخت پخش و ته‌نشین می‌شود. نحوه‌ی پخش رسوب در مخازن باریک و مخازن پهن نیز متفاوت است. شکل (۱-۲) حالت‌های کلی و مختلف الگوی رسوبگذاری را در مخزن سد نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲- الگوهای کلی و مختلف شکل‌گیری رسوبات در مخزن سد، Morris and Fan, 1997

۱-۴-۳- نوع سیلاب‌ها

سیلاب‌ها نقش شاخصی در آورد رسوب به مخزن و جابه‌جایی 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 پایین‌دست شود. سیلاب ملایم می‌تواند باعث رسوب‌گذاری در بالادست مخزن شود؛ فرآیندی که می‌تواند باعث شکل‌گیری دلتای جدید در بالادست دلتای قبلی شود. هندسه و شکل مخزن بر نحوه ته‌نشین شدن رسوب در آن موثر است.

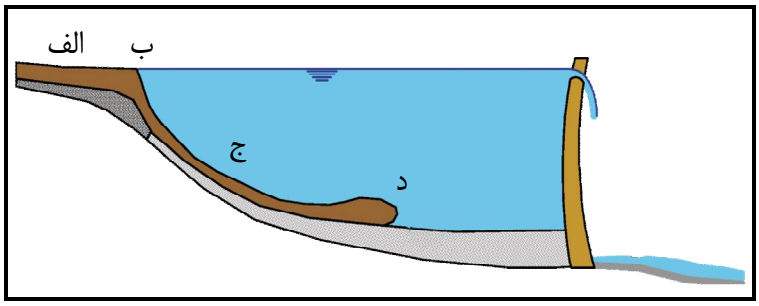
۱-۴-۴- مشخصات رسوب

مشخصات رسوب وارد شونده به مخزن و مشخصات رسوب موجود در آن نیز بر رفتار رسوبی مخزن تاثیر می‌گذارد. از جمله این مشخصات 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 تاثیر قرار می‌گیرد.

omoorepeyman.ir

۱-۴-۵- شکل‌گیری جریان غلیظ

اگر در شرایط سیلابی، غلظت رسوب معلق در جریان ورودی به اندازه کافی زیاد باشد، نوعی جریان غلیظ در مخزن سد به‌وجود می‌آید. این نوع جریان، تحت تاثیر 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 (۱-۳) 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 ۱-۳- نمای فرآیند جریان غلیظ در مخزن سد. منبع: G. Cesare, 1998

در شکل (۱-۳) چند ناحیه مشخص قابل تشخیص هستند؛

الف- ناحیه غلبه اثر لَختی جریان سیل بر اثر ثقلی آن (در بالادست). در این ناحیه جریان سیلابی و گل‌آلود رودخانه تمام بازه‌ی بستر تا سطح آب را فرا گرفته است.

ب- نقطه فرود[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

1- Plunge Point

omoorepeyman.ir

کنترل کرد. اگر حجم عمده آورد رسوب سالانه در سیلاب‌هایی رخ دهد که سهم آن‌ها در تامین 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 [۵۵، ۲۷].

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 [۲۸]:

الف- غلظت توده‌ی غلیظ و در نتیجه سرعت حرکت آن درضمن پیش‌روی افزایش یافته و با فرسایش بستر در مسیر حرکت همراه باشد.

ب- روند اختلاط با آب مخزن به‌گونه‌ای باشد که غلظت توده‌ی غلیظ و بنابراین سرعت حرکت آن درضمن 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 درضمن 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[1]) 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

1- Wash Load

omoorepeyman.ir

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 پدیده در شبیه‌سازی جریان غلیظ، باعث خطای زیاد در نتایج می‌شود. روش لحاظ کردن این پدیده در مدل‌های عددی، در پیوست همین ضابطه ارائه شده است.

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 این‌روابط شامل مشخصاتی از سیل و مخزن است. برای تخمین سرعت حرکت توده غلیظ نیز روابطی تجربی و نیمه‌تحلیلی‌ای وجود دارد. تعدادی از این روابط در پیوست همین ضابطه ارائه شده‌اند.

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

هـ- شیب بستر

و- ضریب اختلاط آب گل‌آلود ورودی با آب مخزن

۱-۴-۶- رسوب‌شویی به وسیله تخلیه‌کننده‌های تحتانی

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 (شکل ۱-۴). این روش براساس 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.

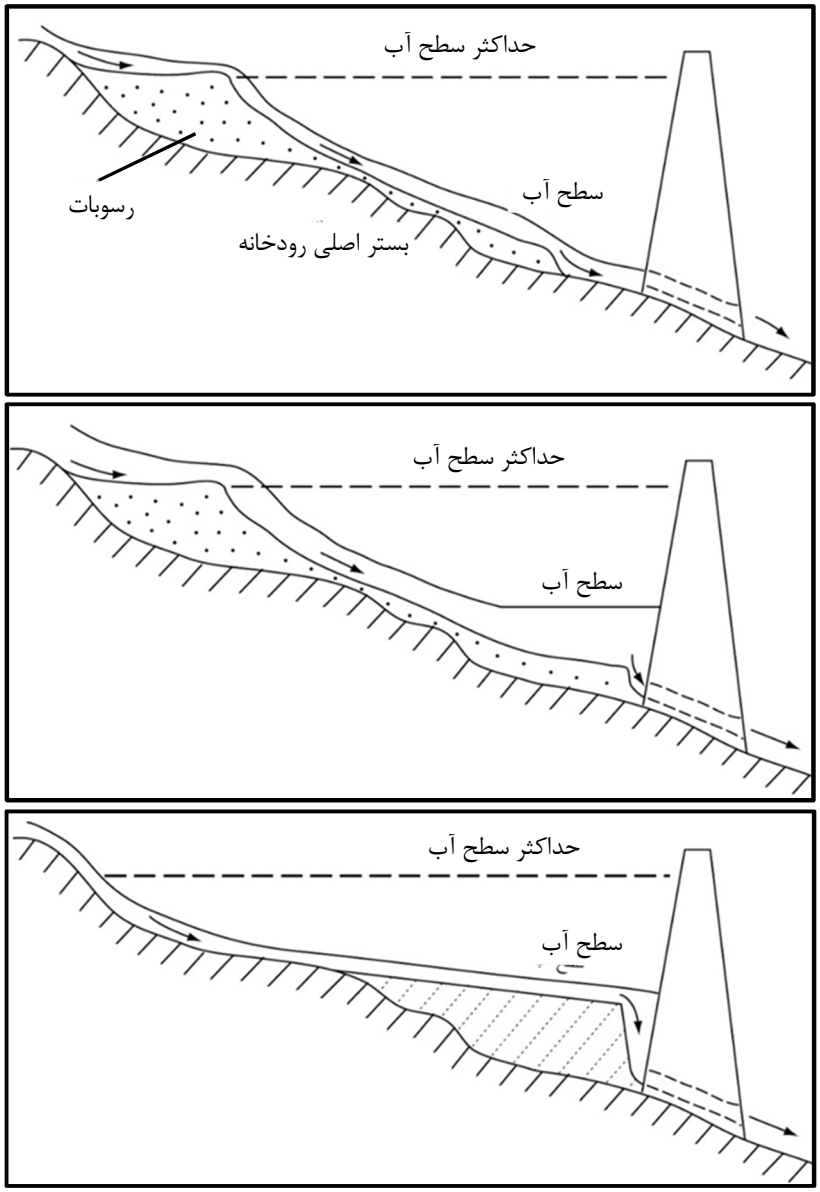
عملیات رسوب‌شویی، به دلیل غلظت زیاد رسوب در آب تخلیه شده، اثرات منفی بر محیط زیست پایین‌دست سد دارد. بنابراین ممکن است ملاحظات زیست‌محیطی، محدودیتی برای حداکثر غلظت رسوب خارج شونده از مخزن تعیین کرده باشد. گاهی می‌توان هم‌زمان با تخلیه آب پر رسوب از دریچه‌های تحتانی، از دریچه‌های بالاتر نیز مقداری آب 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 پایین‌دست سد از طریق شبیه‌سازی عددی، در سال‌های اخیر رو به افزایش می‌باشد. شناخت فرایندهای موثر 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. درضمن کاهش تراز آب مخزن، تبدیل شرایط از عدم فرسایش به فرسایش شدید،

omoorepeyman.ir

تقریبا به طور ناگهانی رخ می‌دهد. میزان فرسایش در نزدیکی دریچه‌های تخلیه، به دلیل نقش سرعت برشی جریان خروجی، متفاوت با نواحی دیگر می‌باشد.



شکل ۱-۴- تغییر شکل پروفیل سطح بستر مخزن به وسیله مدیریت سطح آب و دریچه‌های سد (عملیات فلاشینگ)

بالا: پایین نگه داشتن سطح تراز آب در پایین‌ترین سطح جهت افزایش سرعت آب در نزدیک بستر مخزن، وسط: پایین نگه داشتن سطح تراز آب در حد متوسط باعث تغییر روند ته‌نشینی رسوبات به سمت خروجی می‌گردد، پایین: پایین نگه داشتن طولانی مدت سطح تراز آب در حد متوسط باعث تجمع رسوبات در نزدیک خروجی می‌گردد. Ahn 2011

در زمان عملیات رسوب‌شویی، فرسایش در طول مخزن به طور هم‌زمان رخ نمی‌دهد. علت این امر آن است که به دلیل شیب بستر، عمق تمام نواحی به طور یکسان کاهش نمی‌یابد. در ابتدا رسوب قسمت‌های بالادست مخزن فرسایش یافته و به سد نزدیک‌تر می‌شود. در ادامه، محدوده‌ی فرسایش به بدنه‌ی سد نزدیک می‌شود و بخش قابل توجهی از

omoorepeyman.ir

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 تاثیر 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.

درضمن 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 براساس 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 تاثیر 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 [۱۰]).

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 (۱-۵) و (۱-۶) 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

omoorepeyman.ir

می‌دهد و باعث می‌شود که نیمرخ طولی کانال فرسایشی به صورت پله‌ای باشد. شکل (۱-۷) نمونه‌ای از فرآیند فرسایش آبشاری پس‌رونده را در کانال فرسایشی سد سفیدرود 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 (۱-۸) لحظه‌ای از عملیات رسوب‌شویی رودخانه‌ای در مخزن سد سفیدرود را نشان می‌دهد. این شکل گویای پیچیدگی ترکیب فرآیندهای هیدرولیکی با فرآیندهای مکانیک خاک می‌باشد.

براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده درضمن 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 به‌کارگیری این‌گونه روابط در مدل‌های عددی تخلیه رسوب مخزن، منطقی‌تر از تلاش برای شبیه‌سازی عددی پدیده‌های مکانیک خاک ذیربط به نظر می‌رسد.

omoorepeyman.ir

شکل ۱-۵- مقطع اولیه‌ی یک کانال انحرافی فرسایشی

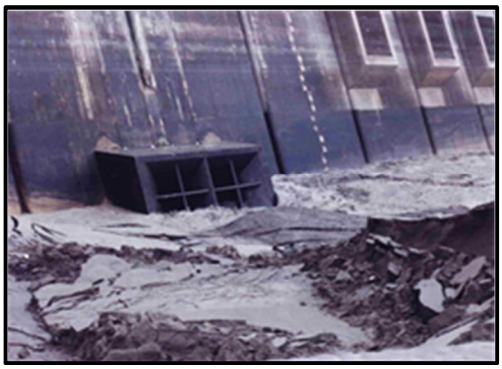
منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

شکل ۱-۶- تعریض کانال تحت اثر فرسایش در حین عملیات رسوبزدایی

منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

شکل ۱-۷- فرسایش پس‌رونده آبشاری در کانال فرسایشی در حین عملیات رسوبزدایی

منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود



شکل ۱-۸- درهم کنش فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیک خاک در ضمن آزاد شدن تدریجی

منبع: کمیته‌ی رسوب سد سفیدرود

۱-۴-۷- بار معلق و بار بستر

جابه‌جایی 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 به‌کارگیری روابط مناسب جداگانه برای هریک از آن‌ها شکل گرفته‌اند (رجوع شود به فصل ۵). در مخزن سد برای محاسبه بار بستر از روابط تجربی استفاده می‌شود، اما بار معلق براساس حل معادله‌های مشتقاتی بقا، 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 با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

روابط تجربی بار بستر به طور معمول برای شرایط رودخانه‌ای تهیه شده‌اند، بنابراین انتخاب و به‌کارگیری 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

omoorepeyman.ir

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، کاملا تابع شرایط موضعی همان ناحیه بوده و از بالادست یا پایین‌دست تاثیر نمی‌گیرد.

هرچه عمق آب بیش‌تر باشد، تاثیر اصطکاک بستر بر کل جریان کم‌تر می‌شود. میزان تاثیر 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.

۱-۴-۸- نحوه تبادل رسوب بین بستر و جریان

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 غیرتعادلی بودن نرخ جابه‌جایی رسوب.

یکی از عوامل موثر 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.

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 فرسایش‌پذیر به چند لایه تفکیک شده و مشخصات هر لایه به طور جداگانه تعیین می‌شود. فرسایش رسوب از بالاترین لایه‌ی موجود - که به طور 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 (۱-۲) نشان داده شده است.

مقدار تنش آستانه‌ی فرسایش رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، تحت تاثیر 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

omoorepeyman.ir

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 ۱-۲- تنش آستانه‌ی فرسایش در شرایط مختلف

نوع بستر چسبنده	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	بازه‌ی تنش آستانه (نیوتون بر مترمربع)
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

۱-۴-۹- سرعت سقوط ذرات

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 تاثیر 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 [۳۸]. 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 تاثیر می‌گذارد.

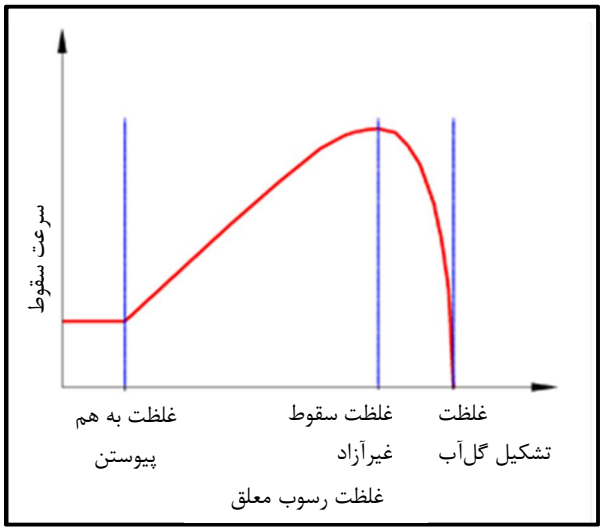
اگر غلظت رسوب معلق خیلی زیاد شود، ذرات یا مجموعه ذرات به هم پیوسته‌ی رسوبات معلق از نظر هیدرولیکی بر یکدیگر اثر می‌گذارند. در این شرایط، افزایش غلظت باعث کاهش سرعت سقوط می‌شود. علت این حالت آن است که سقوط ذرات معلق آزادانه صورت نمی‌گیرد، بلکه حرکت بعضی دانه‌ها به سمت بستر باعث جابه‌جایی آب به سمت بالا 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 (۱-۹) 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 به‌کار رفته در آن برای سرعت سقوط رسوب با منحنی شکل (۱-۹) می‌باشد.

1- Flocculation
2- Fluid Mud

omoorepeyman.ir

برای تعیین مقدار رسوب‌گذاری یا فرسایش طی مدت معین و یا تعیین نرخ تغییرات تراز بستر براساس شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، 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 دوبعدی 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.



شکل ۱-۹- روند تغییر سرعت سقوط رسوب ریزدانه چسبنده بر حسب غلظت رسوب معلق

۱-۴-۱۰- سایر عوامل موثر

دیگر عوامل مهم موثر بر روند رسوب‌گذاری عبارتند از: مشخصه‌های هندسی بستر مخزن، تغییرات بده رسوب برحسب 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 بالادست 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 بالادست، مشخصات بستر و سواحل رودخانه بالادست، مشخصات سیلاب‌ها و مشخصه‌های آبنگار[1] سیلاب‌های ورودی [۱۱].

1- Hydrograph

omoorepeyman.ir

۱-۵- فرضیات اساسی جهت ساده‌سازی روند شبیه‌سازی

پدیده‌های فیزیکی جریان سیال و جابه‌جایی رسوب می‌توانند توسط معادله‌های بقا، 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 بقای 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، تاثیر 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 صرف‌نظر کردن می‌باشد. اثر نیروی حجمی، نقش مهمی در شبیه‌سازی رفتار جریان غلیظ دارد. جریان یافتن توده آب پر رسوب غلیظ - صرف‌نظر از لَختی اولیه آن در زمان ورود به مخزن - به وسیله همین عامل تنظیم می‌شود.

انجام ساده‌سازی‌های منطقی، در پروژه‌های مطالعات کاربردی اهمیت زیادی دارد. با کمی صرف وقت و به‌کارگیری تجربه در هنگام انتخاب فرضیه‌های ساده‌کننده و مدل‌های متناسب با آن، می‌توان ضمن نزدیک شدن به واقعیت‌ها به مقدار زیادی از صرف غیرضروری زمان و هزینه در مراحل بعدی مطالعه جلوگیری کرد. انتخاب نوع فرضیه‌های ساده کننده در یک مساله 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 دوبعدی در سطح
۲- انتگرال‌گیری معادله‌های جریان و/یا رسوب معلق در عرض و تنظیم معادله‌های دوبعدی 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 دوبعدی افقی به صورت لوله‌های جریان یک‌بعدی
۱۰- حل جریان سه‌بعدی به صورت لایه‌های جریان دوبعدی

1- Momentum
2- Inertia

omoorepeyman.ir

۱۱- فرضیه‌های ساده کننده درباره 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. در پیوست همین راهنما توضیحات بیش‌تری درباره فرضیه‌های ساده کننده و محدودیت‌ها و شرایط به‌کارگیری آن‌ها ارائه شده است.

درصورتی‌که 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 مسایل، ممکن است شرایط برای ساده‌سازی معادله‌های جریان به معادله‌های انتگرال‌گیری شده در عمق مناسب باشد، اما انجام این ساده‌سازی برای معادله غلظت رسوب معلق منطقی نباشد، به‌خصوص 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 به‌کار گرفت.

اگر میزان تغییر شاخص‌های موثر 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 دوبعدی 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 صرف‌نظر باشد، می‌توان معادله‌های اصلی را در تمام سطح مقطع جریان انتگرال‌گیری کرد و به صورت معادله‌های یک بعدی مورد استفاده قرار داد. به‌کارگیری مدل‌های یک بعدی در مهندسی رودخانه معمول می‌باشد. برای دقیق بودن این ساده‌سازی، لازم است که توزیع فشار در عمق نیز به طور نسبی هیدرواستاتیک باشد و توزیع فشار تحت تاثیر انحنای مسیر جریان قرار نگیرد. برای بسیاری از مدل‌های یک‌بعدی 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 صرف‌نظر کرد. در این حال معادله‌های حاکم به صورت ماندگار در زمان در می‌آیند. می‌توان برای مسایلی 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 به‌کار می‌رود. برای شبیه‌سازی

omoorepeyman.ir

شرایط سیلابی در بسیاری از موارد نمی‌توان از این ساده‌سازی استفاده کرد، زیرا تغییرات زمانی در چنین شرایطی می‌تواند شدید و موثر باشد.

روش‌های محاسبه‌ی آشفتگی جریان را می‌توان نوعی ساده‌سازی در نظر گرفت، زیرا برای اجتناب از به‌کارگیری 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، براساس متوسط‌گیری زمانی استوار شده و تحت عنوان متوسط‌گیری رینولدز معروف می‌باشند. روش‌های دیگری نیز وجود دارند که براساس 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 مساله، مناسب‌ترین روش را انتخاب کند. اگر تاثیر آشفتگی بر میدان جریان قابل توجه باشد، انتخاب روش مناسب محاسبه اغتشاش و واسنجی و صحت‌سنجی 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 تاثیر اغتشاش در امتداد قائم، بسیار بیش‌تر از میزان تاثیر 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 واسنجی 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 ($k-\varepsilon$) می‌باشند. نگارش‌های مختلفی از روش‌های یک و دو معادله‌ای وجود دارند.

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 براساس مشخصات جریان و بستر در همان‌جا به‌دست آورد. در این حال مقدار غلظت رسوب معلق، رابطه‌ای با شرایط قسمت‌های بالادست و پایین‌دست نخواهد داشت. در چنین شرایطی می‌توان فرض کرد که منبع تامین‌کننده‌ی رسوب معلق در آن ناحیه از

omoorepeyman.ir

رودخانه، بستر همان محدوده می‌باشد. چرا که غلظت رسوب معلق در نواحی اطراف، بر این ناحیه بی‌تاثیر است. مفهوم «موضعی بودن رفتار رسوب» در این شرایط صادق می‌باشد. بسیاری از مدل‌های یک‌بعدی جریان و رسوب، برای تخمین میزان جابه‌جایی رسوب و فرسایش و رسوب‌گذاری ناشی از آن، از روابطی استفاده می‌کنند که براساس مفهوم موضعی بودن رفتار رسوب تهیه شده‌اند. به‌کارگیری چنین روابطی در مخازن سدها باید با احتیاط همراه باشد.

omoorepeyman.ir

فصل ۲

روند انجام مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی عددی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۲-۱- کلیات

برای انجام صحیح یک پروژه‌ی مبتنی بر شبیه‌سازی عددی، باید مراحل مختلفی را رعایت کرد که نتایج هر یک از آن‌ها بر مراحل بعدی تاثیر می‌گذارد. رعایت روند صحیح برخورد با مساله، باعث پیش‌گیری از دوباره کاری‌های وقت‌گیر، صرف منابع مالی و انسانی در موارد غیرضروری 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
۲- انجام مطالعات اولیه و شناسایی تاثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف
۳- تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی
۴- انتخاب نرم‌افزار یا نرم‌افزارهای مناسب
۵- انتخاب شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند
۶- تکمیل اطلاعات محیطی مورد نیاز
۷- برپاسازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها
۸- شبیه‌سازی شرایط انتخاب شده
۹- به‌کارگیری و تعمیم نتایج شبیه‌سازی

در ادامه، درباره‌ی هرکدام از موارد فوق توضیحاتی ارائه می‌شود.

۲-۲- مشخص کردن اهداف مطالعه

اولین و مهم‌ترین قدم در آغاز یک مطالعه، روشن کردن اهداف آن می‌باشد. این کار به معنی مشخص کردن سوال‌هایی 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 براساس مشکل‌ها یا نگرانی‌های موجود شکل گرفته باشد، اما جزییات و محدوده‌ی انتظارها به طور دقیق مشخص نیست. بنابراین انجام پاره‌ای مطالعات اولیه و به‌کارگیری تجربه‌ی مهندسی، برای تدقیق اهداف مطالعه ضروری است. این کار مسیر انجام مطالعه را مشخص کرده و از صرف منابع پروژه در موارد غیرضروری 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 هرچه بهتر این مرحله از مطالعات دارد.

دقت مورد نیاز در جواب‌ها نیز باید در ابتدای مطالعه مشخص شود. تعیین حد وارد شدن به‌جزییات 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

omoorepeyman.ir

شده و جزییات 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 صرف‌نظر 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 تاثیر سد بر رودخانه‌ی بالادست و یا پایین‌دست نیز لازم می‌باشد.

۲-۳- مطالعات اولیه و شناسایی تاثیر فرآیندهای فیزیکی مختلف

پس از آنکه اهداف مطالعه مشخص شد، مطالعات اولیه‌ای درباره موضوع انجام می‌شود. یک گام مهم در مطالعات اولیه، آن است که میزان اهمیت مساله‌ی 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 غیرمنطقی و یا عدم امکان نگهداری آن باشد.

فرآیندهای فیزیکی مختلفی وجود دارند که می‌توانند بر رفتار رسوب در یک مخزن تاثیر بگذارند. شناسایی این فرآیندها و تعیین نقش و اهمیت نسبی هر یک از آن‌ها، تاثیر 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 براساس فرضیه‌های ساده‌کننده‌ی متفاوتی عمل می‌کنند.

برای انتخاب مدل مناسب، باید فرآیندهای فیزیکی موثر در یک مطالعه‌ی موردی خاص را شناسایی و میزان نقش هرکدام 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 جابه‌جایی آن می‌باشد. دانه‌بندی رسوبات و چسبنده یا غیرچسبنده بودن آن‌ها نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. این معیارها در انتخاب رابطه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی جابه‌جایی 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 براساس 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 موثر دارد. بسیاری از نرم‌افزارها، برای شبیه‌سازی رفتار رسوب ماسه‌ای و رسوب ریزدانه‌ی چسبنده، از روش‌های متفاوتی استفاده

omoorepeyman.ir

می‌کنند. اگر دانه‌بندی رسوب کم‌تر از ۶۳ میکرون باشد، ریزدانه[1] محسوب می‌شود. رفتار این نوع رسوب، علاوه بر امتداد قائم، به شدت تحت تاثیر 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 تاثیر فرآیندهای فیزیکی خاصی قرار می‌گیرد که شامل تاثیر چسبندگی بر سرعت سقوط، تاثیر 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 هرکدام 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 جزییات کافی و با توجه به تغییرات زمانی پدیده‌ها در طول سیل مطالعه شود. در این حال ممکن است حتی برای قسمت رودخانه‌ای مساله 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 کاملا تحت تاثیر قرار می‌دهد. امکان وقوع و اهمیت این پدیده باید در مطالعات اولیه مشخص شود. برای شبیه‌سازی جریان غلیظ، باید نرم‌افزاری انتخاب کرد که بتواند تاثیر غلظت رسوب بر چگالی مخلوط آب و رسوب را محاسبه کرده و جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی را منظور کند. به‌علاوه باید بتواند تاثیر 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. پیوست همین نشریه حاوی اطلاعات بیش‌تری در این موضوع می‌باشد.

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 مساله 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 است که به طور معمول رسوب بستر در مخازن سدها از نوع چسبنده است. برای بسترهای غیرچسبنده

1- Mud
2- Clay

omoorepeyman.ir

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 مساله، باید در مطالعات اولیه مشخص شود. اگر این فرآیند مهم باشد، توانایی منظور کردن طیف دانه‌بندی رسوب معلق توسط نرم‌افزار، از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌شود.

ممکن است در یک مساله‌ی 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 (۲-۱) فهرست فشرده‌ای از فرآیندهای فیزیکی مختلف را نشان می‌دهد که کاربر باید برای هرکدام از آن‌ها مشخص کند که آیا کلیدی، با اهمیت، قابل توجه، اندکی موثر و یا قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. توضیح کامل مهارت‌های مربوط به مطالعات اولیه، فراتر از موضوع این راهنما است.

جدول ۲-۱- فهرست فرآیندهای فیزیکی که باید میزان اهمیت هر کدام از آن‌ها در مطالعه روشن شود

نقش شرایط سیلابی در آورد یا جابه‌جایی رسوب	ریزش شیب‌های خاکی مشرف به داخل مخزن
نقش شرایط غیرسیلابی در آورد یا جابه‌جایی رسوب	جریان‌های ناشی از اختلاف چگالی
اهمیت توجه به‌جزییات 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 پایین‌دست مخزن	وجود یا شکل‌گیری و حرکت دلتای رسوبی
اثر سد بر هیدرودینامیک یا ریخت‌شناسی در پایین‌دست 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)
غیریکنواختی 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 غیرچسبنده	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 بالادست	نقش مولفه‌ی هیدرودینامیک فشار

omoorepeyman.ir

۲-۴- تدقیق اهداف مطالعه و تعیین شرح وظایف شبیه‌سازی

پس از انجام مطالعات مقدماتی و تعیین نقش فرآیندهای فیزیکی مختلف در مساله، اهداف مطالعه باید دوباره مورد بررسی و تدقیق قرار گیرند. در این حال می‌توان جزییات 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، درضمن 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 براساس مطالعات اولیه و شناسایی فرآیندهای 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.

در مواردی که اطلاعات محیطی اندک یا غیر دقیق یا غیر قابل اعتماد باشد، ممکن است روش استفاده از شبیه‌سازی عددی بازنگری شده و به صورت بررسی سناریوها و حساسیت‌سنجی انجام گیرد. در این‌گونه موارد می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی عددی، طیفی از سناریوهای محتمل را بررسی کرده و نتایج مربوط به احتمالات مختلف را سنجید و در تصمیم‌گیری‌ها دخالت داد. در مواردی که اطلاعات محیطی لازم خیلی کم باشد، ممکن است حتی از شبیه‌سازی عددی صرف‌نظر کرده و تنها از روابط تجربی یا تحلیلی استفاده کرد.

۲-۵- 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 مساله و استخراج نتایج اشتباه شده و یا باعث صرف زمان و هزینه‌ی بیش از حد برای تهیه‌ی اطلاعات ورودی غیرضروری 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 مساله را در نظر گرفت. مهم‌ترین شاخص‌هایی که نرم‌افزارها را نسبت به یکدیگر متفاوت می‌کنند عبارتند از ساده‌سازی‌های استفاده شده، محدودیت‌های ناشی از روش‌های عددی به‌کار رفته، سادگی کاربرد و توانایی پیش‌پردازش و پس‌پردازش داده‌ها و نتایج.

omoorepeyman.ir

ساده‌سازی‌های به‌کار رفته در معادله‌ها، نقش مهمی در مجزا کردن نرم‌افزارها از یکدیگر دارند. بعضی از نرم‌افزارهای موجود، یک‌بعدی، برخی دوبعدی افقی، برخی دوبعدی در صفحه‌ی قائم و برخی سه‌بعدی هستند. بعضی از نرم‌افزارهای یک‌بعدی براساس روش شبه‌ماندگار و برخی براساس 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 تاثیر غلظت زیاد رسوب بر میدان جریان و سرعت سقوط را منظور کرده اما برخی دیگر، از این پدیده‌ها صرف‌نظر می‌کنند. امکانات شبیه‌سازی اغتشاش، در مدل‌های مختلف یکسان نیست. تاثیر نیروی غوطه‌وری بر میزان اغتشاش، در بعضی از مدل‌ها منظور شده و در بعضی صرف‌نظر 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 راهنما 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.

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 تاثیر 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 صرف‌نظر شود. دقت مکانی مورد نیاز برای مطالعه‌ی میزان رسوب وارده از رودخانه به مخزن، متفاوت از دقت لازم برای مطالعه جزییات محل نشست رسوب در نزدیکی دریچه‌های آبگیر است. این موضوع در انتخاب بین مدل یک‌بعدی طولی (یا دوبعدی در صفحه‌ی قائم) و مدل دوبعدی 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 مساله، 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 مساله 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 براساس 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 مساله‌ی 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 -

omoorepeyman.ir

ندارند. در رویدادهای جریان غلیظ، به طور معمول رسوب‌گذاری و فرسایش بستر در مسیر حرکت توده‌ی غلیظ نیز تاثیرگذار 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 یک‌بعدی طولی استفاده کرد. مدل دوبعدی افقی هم تنها در صورتی قابل استفاده است که تغییرات لازم در آن اعمال شده باشد. مناسب‌ترین انتخاب برای بسیاری از مسایل جریان غلیظ، مدل دوبعدی قائم می‌باشد. اگر تغییرات عرضی و رفتارهای سه‌بعدی جریان غلیظ قابل صرف‌نظر نباشند، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی 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، براساس 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 بقا، 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 جزییات غیر لازم، نقش مهمی در روند انتخاب نرم‌افزار دارد. انتخاب حداکثر ساده‌سازی متناسب با مساله در انتخاب مدل و انجام شبیه‌سازی، به موفقیت پروژه و تسریع در انجام مطالعات، کمک شایان خواهد کرد. این‌رویکرد، مبتنی بر دخالت دادن هرچه 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

omoorepeyman.ir

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 براساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات محلی و یا مدل‌های فیزیکی به‌دست 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 جابه‌جایی 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 یک‌بعدی، دوبعدی در صفحه‌ی افقی، دوبعدی در صفحه‌ی قائم و یا سه‌بعدی، کاملا به فرآیندهای فیزیکی که باید شبیه‌سازی شوند بستگی دارد. کیفیت سوال‌هایی که باید در طول مطالعه پاسخ داده شوند نیز بر انتخاب مدل تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال ممکن است بتوان در یک پروژه، مجموع ظرفیت مورد نیاز برای دریچه‌های تخلیه‌کننده را به وسیله‌ی شبیه‌سازی یک‌بعدی طولی مشخص کرد، اما تعیین مناسب‌ترین محل تعبیه و یا نحوه‌ی توزیع آن‌ها در بدنه‌ی سد به وسیله‌ی مدل‌های یک‌بعدی ممکن نیست. همچنین برای تعیین بهینه‌ترین رقوم تراز دریچه‌های تخلیه، نمی‌توان به مدل‌های یک‌بعدی یا دوبعدی افقی اکتفا کرد.

تعدادی از مهم‌ترین ساده‌سازی‌ها، که درباره مجاز بودن یا غیرمجاز بودن به‌کارگیری هرکدام از آن‌ها در شبیه‌سازی یک مساله خاص باید تصمیم‌گیری شود، در جدول (۲-۲) به صورت فشرده ارائه شده است.

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

حل جریان با مدل یک‌بعدی طولی	حل رسوب با مدل یک‌بعدی طولی
حل جریان با مدل دوبعدی در سطح	حل رسوب با مدل دوبعدی در سطح
حل جریان با مدل دوبعدی قائم	حل رسوب با مدل دوبعدی قائم
صرف‌نظر از اثر تفاوت چگالی بر آشفتگی	حل رسوب با مدل یک‌بعدی قائم
حل رسوب با روابط تجربی موضعی	هیدرواستاتیک دانستن میدان فشار
حل شبه‌ماندگار میدان جریان	حل شبه‌ماندگار میدان جریان
صرف‌نظر از فرسایش بستر	صرف‌نظر 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	

۲-۶- روند انتخاب مجموعه شرایطی که باید شبیه‌سازی شوند

تعیین حالت‌های مختلفی که باید پس از واسنجی مدل‌ها شبیه‌سازی شوند، مرحله‌ی مهمی از انجام یک پروژه‌ی کاربردی است. این کار به معنی تشخیص شرایط مرزی است که مدل عددی - پس از انجام واسنجی - باید برای آن‌ها اجرا شود تا پایه‌ی قضاوت‌های مهندسی و نتیجه‌گیری کاربردی از شبیه‌سازی‌ها را فراهم کند. انجام

omoorepeyman.ir

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 سوال‌هایی پاسخ دهد و برای چه تصمیم‌گیری‌هایی اطلاعات آماده کند. مجموعه شرایطی که شبیه‌سازی می‌شوند، باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که تکلیف معیارهای تصمیم‌گیری را به ازای گزینه‌ها و شرایط مختلف معلوم کند. به عنوان مثال، ممکن است هدف پروژه بررسی روند پیش‌روی دلتای رسوبی و ارائه‌ی پیشنهاد اصلاحی درباره‌ی شیوه‌ی مدیریت سد به منظور کاهش سرعت پیش‌روی آن باشد. در این حال، باید براساس مطالعات اولیه مشخص کرد که چه شرایطی بیش‌ترین نقش را در پیش‌روی دلتای رسوبی ایفا می‌کنند و تاثیر گزینه‌های مختلف مدیریت مخزن بر آن‌ها چگونه خواهد بود. اگر هدف پروژه، جستجوی راه حل‌هایی باشد که بتوانند خطر افزایش غیرمجاز 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 تاثیر 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 مشخص و آبنگارهای محاسبه شده، اشاره کرد. ممکن است مهم‌ترین سیل‌ها، شدیدترین آن‌ها نباشند. فراوانی بسیار اندک شدیدترین سیل‌ها، اثرهای غیرسازه‌ای 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 مساله را با دقت بررسی کرد و پردازش‌هایی بر اطلاعات بده آب و رسوب در بالادست مخزن انجام داد. از جمله باید مشخص کرد که چه سیل‌هایی بیش‌ترین سهم را در آورد رسوب به مخزن دارند. از جمله باید منحنی تداوم جریان[2]، 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.

1- Hydrograph
2- Flow-Duration Curve

omoorepeyman.ir

۲-۶-۱- شرایطی که باید برای مطالعات درازمدت ریخت‌شناسی شبیه‌سازی شوند

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

اگر شبیه‌سازی یک‌بعدی برای حل مساله کافی تشخیص داده شده باشد، به دلیل سرعت زیاد محاسبات، می‌توان دوره‌ی زمانی طولانی در حد چند ده سال را به طور پیوسته شبیه‌سازی کرد. شرط مرزی بده آب برای چنین دوره‌ای را می‌توان براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در چند ده سال گذشته ایجاد و در صورت نیاز براساس پیش‌بینی تغییرات آینده اصلاح کرد. شرط مرزی رسوب برای چنین مساله‌ای را می‌توان براساس 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 براساس 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 جزیی و غیرموثر 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 تامین 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 سه‌بعدی، 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 غیرسیلابی تقسیم کرد. برای دوره‌های زمانی بین سیلاب‌ها می‌توان از مدل‌های شبه‌ماندگار بهره گرفت. شرایط سیلابی را می‌توان با مدل‌ها و شرایط مرزی دقیق‌تر - مانند اطلاعات دو ساعته - شبیه‌سازی کرد.

گاهی می‌توان انجام شبیه‌سازی‌های دقیق را با موثرترین سیلاب‌ها محدود کرد. برای تشخیص موثرترین 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 موثرترین سیلاب‌ها براساس 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 برحسب 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،

omoorepeyman.ir

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. روابط مورد نظر در پیوست همین نشریه ارائه شده‌اند.

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

۲-۶-۲- 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. مسایل 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 غیرمجاز 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 تاثیرگذار 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، تاثیر 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.

۲-۶-۳- 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 جابه‌جایی رسوب نیست. فراوانی وقوع سیل نیز بر سهم آن تاثیر می‌گذارد. به طور معمول، بیش‌ترین سهم متعلق به سیل‌های متوسط با فراوانی وقوع متوسط می‌باشد. سیل‌های بسیار شدید، با وجود توانایی حمل رسوب خیلی زیاد، فراوانی وقوع

omoorepeyman.ir

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 مسایل 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 برحسب بده جریان» و «فراوانی وقوع بده‌های جریان» براساس 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 موثرترین سیل‌ها مشخص شوند.

برای تهیه‌ی نمودار سهم تجمعی بده‌ها در آورد رسوب سالانه، از دو نمودار «بده جریان برحسب درصد فراوانی» و «بده رسوب برحسب بده جریان» استفاده می‌شود. برای انجام محاسبات، می‌توان از نرم‌افزار Excel 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 (۲-۳)، 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 برحسب مترمکعب 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- در ستون سوم، فراوانی متناظر با هر دسته از ستون اول را، برحسب 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 شبانه‌روز در سال، می‌توان مقدار آن را در ۳۶۵ ضرب و بر ۱۰۰ تقسیم کرد.

یادآوری: در ستون اول، دسته‌بندی بده‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که نمودار حاصل از ستون‌های دوم و سوم، به‌خصوص 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 برحسب بده جریان و یا از رابطه‌ی تجربی متناظر با آن (چند رابطه‌ی $S = aQ^b$ برای بده‌های مختلف) به‌دست می‌آید. مقادیر ثبت شده، نشان‌گر متوسط روزانه‌ی آورد رسوب برحسب تن در روز خواهد بود.

omoorepeyman.ir

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 برحسب تن (در سال) بیان می‌شود.

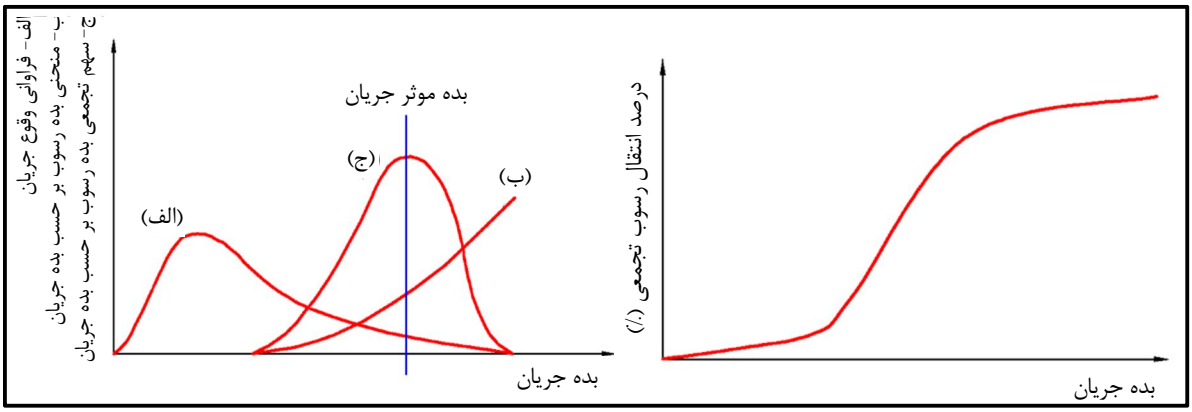
۶- در ستون ششم، مجموع آورد رسوب ناشی از هر بده و بده‌های کم‌تر از آن را ثبت کنید. به این منظور، در هر ردیف از ستون ششم، مجموع مقدار ثبت شده در همان ردیف و ردیف‌های بالاتر از آن از ستون پنجم را قرار دهید. مقادیر ستون ششم، برحسب تن (در سال) خواهند بود.

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، برحسب درصد خواهند بود.

درنهایت، 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 Excel 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 ۲-۱- راست). علت این رفتار، سهم بیش‌تر بده‌ها و سیل‌های متوسط، در کل آورد رسوب سالانه می‌باشد.

شکل (۲-۱- چپ) یک روش تعیین بده موثر جریان رودخانه را نشان می‌دهد که از ترکیب منحنی فراوانی وقوع جریان (الف) و منحنی بده رسوب برحسب بده جریان (ب) به‌دست می‌آید. این منحنی (ج) 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 موثر).



شکل ۲-۱- نمودار سهم تجمعی آورد رسوب بر حسب بده جریان. ماخذ شکل سمت چپ: (Biedenharn and Copeland, 2000).

omoorepeyman.ir

جدول ۲-۳- جدول راهنمای محاسبه‌ی سهم تجمعی بده‌های مختلف در آورد رسوب به مخزن

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
بازه بده جریان	متوسط بازه	فراوانی هر بازه	نرخ بده رسوب متناظر با بده جریان	بده سالانه رسوب ناشی از هر بده جریان	بده تجمعی رسوب ناشی از هر بده جریان و بده‌های کم‌تر از آن	سهم تجمعی هر بده جریان و بده‌های کم‌تر از آن در کل آورد رسوب سال
مترمکعب بر ثانیه	مترمکعب بر ثانیه	شبانه‌روز در سال	تن در شبانه‌روز	تن (در سال)	تن (در سال)	%
متوسط روزانه	متوسط روزانه		متوسط روزانه	حاصلضرب ستون سوم در ستون چهارم		
۵ -۰	۲٫۵					
۱۰-۵	۷٫۵					
...	...					
...	...					

۲-۷- 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 تامین و پردازش مناسب داده‌ها در این مرحله، نقش به‌سزایی در انجام هرچه 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 غیرمفید و یا تلاش برای رسیدن به اطلاعات با دقت بیش از حد لازم نیز هزینه و زمان انجام کار را بی‌دلیل افزایش خواهد داد.

جمع‌آوری 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 جزییات 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 اطلاعات ضروری و اطلاعات مفید تفکیک کرد. 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 درضمن 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 غیرسیلابی بودن وضعیت مورد مطالعه، اهمیت یا عدم اهمیت جریان غلیظ و بالاخره نقش غالب فرسایش یا رسوب‌گذاری اشاره کرد.

omoorepeyman.ir

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

فرم (۲-۱)، 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 هیدرولوژیک
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.

تهیه اطلاعات محیطی در رابطه با سدهایی که در دست مطالعه هستند از پیچیدگی بیش‌تری برخوردار است، زیرا مطالعات و شبیه‌سازی‌ها باید علاوه بر شرایط اولیه مخزن جدید، شرایط حاکم در طول عمر آن را نیز پوشش دهند. این در حالی است که قسمتی از اطلاعات لازم برای سال‌های میانی عمر مخزن، براساس پیش‌بینی‌ها، محاسبات و شبیه‌سازی‌های مربوط به سال‌های قبل از آن به‌دست می‌آید. ممکن است شدت تغییر بعضی از مشخصات یاد شده از قبیل جنس بستر در سال‌های اولیه بسیار شدید بوده و پیش‌بینی آن با سختی و عدم اطمینان همراه باشد. قضاوت مهندسی خوب، توجه به شاخص‌های محیطی محل پروژه، بررسی روند تغییرات در سدهای دیگر منطقه و بالاخره بررسی سناریوهای مختلف راه‌گشای قسمتی از این مشکلات خواهند بود.

omoorepeyman.ir

فرم ۲-۱- فرم شناسایی مشخصات اصلی سد و مخزن

نام سد:	نام مخزن:	نوع سد:	تاریخ آبگیری:
نام رودخانه یا رودخانه‌های اصلی بالادست:			عمر مفید (سال):
اهداف سد و سهم هرکدام 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 آب (متر):	حداکثر تراز مجاز آبگیری (متر):	حداقل تراز مجاز سطح آب (متر):

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

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

مشخصات دریاچه (مخزن)		
حجم اولیه در حداکثر آبگیری (مترمکعب):		حجم مفید مخزن (مترمکعب):
طول مخزن در تراز حداکثر مجاز (کیلومتر):		طول مخزن در حداقل آبگیری 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 (کیلومترمربع):
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 بالادست	
متوسط بده سالانه آب (میلیون متر مکب در سال):	متوسط بده سالانه رسوب (میلیون تن در سال):
مساحت حوضه آبریز (کیلومترمربع):	سهم رس، سیلت و ماسه در آورد رسوب (درصد): ... و ... و ...

omoorepeyman.ir

۲-۷-۱- 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 برحسب تراز آب آن و مشخصات کلی حوضه‌ی آبریز،
- کاربردهای سد (اهداف پروژه)، عمر مفید آن و سهم هرکدام 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 جهاد 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 بالادست و پایین‌دست به همراه سیلاب‌دشت‌ها و شاخه‌های فرعی، ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی، مرزهای ورود و خروج آب و رسوب و هرگونه عوارض موثر 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،

omoorepeyman.ir

- 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 تاثیرگذار یا تاثیرپذیر خاص در بالادست یا پایین‌دست سد،
- بازدید میدانی از محدوده‌ی مورد مطالعه و رودخانه‌ی بالادست و پایین‌دست 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.

۲-۷-۲- اطلاعات هیدرولوژیک

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

در ادامه، فهرستی از اطلاعات هیدرولوژیک 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 تاخیر،
- 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 برحسب 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 بالادست)،

omoorepeyman.ir

- کنترل وجود برنامه‌های موثر 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 تاثیر قرار دهد (به‌کارگیری 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 بالادست، مانند افزایش یا کاهش تدریجی تراز بستر، متوسط سطح آب در بده پایه طی چند سال، فرسایش یا شکل‌گیری سیلاب‌دشت، تغییر مقاطع رودخانه و علایم فرسایش مداوم.

۲-۷-۳- 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 این‌گونه داده‌ها به‌دست 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 بالادست و پایین‌دست و محل مخزن.

در صورت کفایت شبیه‌سازی یک‌بعدی 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 برحسب 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 بالادست، حداقل باید معادل طول مخزن باشد، مگر این که شرایط خاص پروژه ابعاد دیگری را ایجاب کند (مثلا محل ایستگاه رسوب‌سنجی). اگر مطالعه رودخانه‌ی پایین‌دست مد نظر باشد، اهداف مطالعه تعیین کننده خواهد بود (مانند

1- Hydrography
2- Topography

omoorepeyman.ir

بررسی تاثیر سد بر یک آبگیر کشاورزی، سد تنظیمی یا زیست‌گاه خاص). در غیراین‌صورت، تمام طولی که از سد تاثیر 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 درضمن 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 واسنجی و صحت‌سنجی 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 بالادست و پایین‌دست سد نیز در سال‌های مختلف مقایسه شود. این کار محدوده تاثیر سد را مشخص می‌کند. تغییر مداوم تراز بستر در رودخانه‌ی بالادست و فرسایش یا توسعه‌ی مداوم سیلاب‌دشت‌ها، نشان‌گر عدم رسیدن به شرایط تعادلی است.

درباره‌ی روش‌های برداشت هندسه‌ی بستر رودخانه و مخزن سد و دقت‌ها و مقیاس‌های مناسب، به راهنماهای مربوطه مانند «راهنمای نقشه‌برداری و هیدروگرافی در کارهای مهندسی رودخانه» و «راهنمای عمق‌یابی مخازن سدها» از دفتر طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور 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 شبیه‌سازی عددی کافی است. برای مخازن خیلی بزرگ، در مواردی مقیاس ۱:۵۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰ نیز می‌تواند راهگشا باشد. برای شبیه‌سازی جزییات رفتار جریان و رسوب در اطراف دریچه‌های آبگیر، می‌توان نقشه‌های اجرایی یا نقشه‌های «چونساخت» این سازه‌ها را استفاده کرد. چنین نقشه‌هایی 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 - جایی‌که مخزن به رودخانه می‌رسد - برداشت به صورت مقاطع عرضی انجام می‌شود. در این ناحیه، نیمرخ طولی خط‌القعر 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 تامین پرونده‌های رقومی از نوع نمایش (DEM) با سلول‌های ۱ کیلومتری و ۵۰۰

1- Topography

omoorepeyman.ir

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 تامین نیازهای شبیه‌سازی کافی هستند. در هر حال، پستی و بلندی‌های موثر بستر باید در برداشت‌ها دیده شوند. در قسمت‌های باریک و کشیده و در رودخانه‌های بالادست و پایین‌دست، 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[1] 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 این‌گونه اطلاعات است. در نواحی باریک مخزن، برداشت مقاطع عرضی اجتناب‌ناپذیر 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 به‌دستگاه باید با دقت انجام شود، زیرا ممکن است مقدار دما در عمق‌های مختلف، تفاوت داشته باشد. این نوع خطا در عمق‌های زیاد تاثیر چندانی بر نتایج شبیه‌سازی ندارد، اما می‌تواند برای مقایسه‌ی هندسه‌ی بستر در سال‌های مختلف اشکال ایجاد کند.

ممکن است درضمن عملیات عمق‌سنجی، بتوان با به‌کارگیری سامانه‌های دارای چند فرکانس، اطلاعاتی درباره‌ی 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 موثر 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 تاثیر می‌گذارند. به دلیل تغییر این مشخصات در طول عمر سد، تاثیر یک سیل مشابه بر مخزن، در طول عمر سد یکسان باقی نمی‌ماند. بنابراین تاثیر سیل در هر دوره از عمر مخزن، باید با توجه به شرایط هندسی بستر در همان زمان مطالعه شود.

تاریخ عمق‌سنجی مورد استفاده در واسنجی مدل، باید تا حد امکان نزدیک به زمان انجام اندازه‌گیری‌های محیطی باشد (در مقیاس سال). در غیراین‌صورت ممکن است نتایج شبیه‌سازی‌ها گمراه کننده باشند. اگر چند دوره عمق‌سنجی از سال‌های

1- Radar Altimetry

omoorepeyman.ir

گذشته در دست باشد، می‌توان یک تخمین اولیه از سرعت تغییر هندسه‌ی بستر از جمله سرعت پیش‌روی دلتای رسوبی به‌دست آورد. با این کار مشخص می‌شود که حداکثر چه میزان فاصله‌ی زمانی بین عمق‌سنجی و اندازه‌گیری‌های محیطی دیگر، قابل‌قبول است. اطلاعات هندسه بستر، از طریق سازمان آب منطقه‌ای محل سد قابل تهیه است.

۲-۷-۴- اطلاعات مربوط به بدنه‌ی آب

کاربرد اصلی این دسته از اطلاعات محیطی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی است. چنین اطلاعاتی برای تنظیم شرایط اولیه نیز استفاده شده و 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
- کدورت
- غلظت رسوبات معلق
- دما
- طیف دانه‌بندی رسوبات معلق
- شوری
- سرعت سقوط ذرات
- هدایت الکتریکی

در فهرست فوق، غلظت و دانه‌بندی رسوبات معلق و کدورت آب، برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سرعت سقوط یا ضرایب آن، جزء اطلاعات ورودی به مدل می‌باشد که می‌تواند به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده و یا براساس کمیت‌های دیگر، مانند غلظت و طیف دانه‌بندی رسوبات، محاسبه شود. سرعت سقوط رسوبات بسیار ریز، تنها با اندازه‌گیری مستقیم تامین می‌شود (در واقع دانه‌بندی این نوع رسوبات از سرعت سقوط به‌دست می‌آید). دما و شوری آب به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی می‌شوند و در صورت تاثیر 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 به‌دست 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 تاثیر شرایط مورد مطالعه (عادی، سیلابی یا جریان غلیظ) نیز قرار دارد.

omoorepeyman.ir

شرایط و زمان برداشت اطلاعات، براساس شرایط مساله 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 واسنجی و صحت‌سنجی 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 به‌دست می‌آید.

در شرایط سیلابی، به دلیل تغییر سریع مقدار مشخصه‌ها، فاصله‌ی زمانی سنجش‌ها کم‌تر از شرایط عادی است. در این حال تراکم سنجش‌ها براساس طول دوره‌ی آبنگار سیل و امکانات اندازه‌گیری موجود تنظیم می‌شود. معیار انتخاب، آن است که بتوان براساس 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 آشکارساز (مانند کدورت یا سرعت در نزدیکی بستر) را به صورت پیوسته (در زمان) اندازه‌گیری کرد.

موقعیت نقاط اندازه‌گیری در طول مخزن، براساس شرایط مساله 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 بالادست محدوده شبیه‌سازی، نقطه فرود جریان غلیظ، 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 مسایل دوبعدی افقی، شناخت شکل عمومی جریان اجتناب‌ناپذیر است. در نزدیک دریچه‌های تخلیه و سرریزها، به ازای بده‌های مختلف، طرح‌های متنوعی از گردابه‌ها و نواحی ساکن به‌وجود می‌آیند. به‌علاوه ممکن است شکل جریان سطحی و جریان عمقی، به‌خصوص در نزدیکی سرریزها، یکسان نباشد. همچنین 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 مساله‌ی مورد بررسی و فرآیندهای فیزیکی موثر 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،

omoorepeyman.ir

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 ضابطه‌های 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 برحسب 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 واسنجی 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 اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای می‌توان تنش‌های رینولدز مربوط به اغتشاش جریان را در مخزن محاسبه کرد. این اطلاعات را می‌توان برای واسنجی شبیه‌سازی اغتشاش در مدل عددی استفاده کرد. همگن بودن یا غیرهمگن 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 در بر 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 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، برخلاف نتایج شبیه‌سازی، تنها به یک نقطه از مکان محدود می‌باشند.

1- Acoustic Doppler Current Profiler

omoorepeyman.ir

۲-۷-۵- 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، به وسیله‌ی اندازه‌گیری محیطی مشخص شده و جزء اطلاعات ورودی به مدل محسوب می‌شوند. در عین حال از آن‌ها برای واسنجی مدل استفاده می‌شود.

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، به وسیله‌ی 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 براساس 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 بالادست و پایین‌دست 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 بالادست که تحت تاثیر 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

omoorepeyman.ir

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 براساس 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 غیرعادی 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 برحسب میزان تحکیم برآورد می‌شود.

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

مراجعه به منابع مربوط برای کسب اطلاعات بیش‌تر توصیه می‌شود.

براساس نتایج مطالعات مختلف، در مراجع تخصصی جدول‌هایی برای تعیین محدوده‌ی معمول تنش آستانه فرسایش برحسب 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 واسنجی 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 مساله‌ی 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 به‌درستی در طول مدت حل شبیه‌سازی کنند.

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

omoorepeyman.ir

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. به‌علاوه، 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 تاثیر این عامل قابل توجه است. زبری بستر، بر سرعت برشی جریان نزدیک بستر نیز تاثیر می‌گذارد. این بدان معنی است که توانایی جریان در ایجاد فرسایش و یا ممانعت از رسوب‌گذاری، تحت تاثیر 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 درباره‌ی 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 پایین‌دست 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 پایین‌دست انجام می‌شود. این مواد می‌تواند ناشی از کاربرد سموم دفع آفات و کودهای شیمیایی در حوضه‌ی بالادست 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.

omoorepeyman.ir

۲-۷-۶- شرایط مرزی

شرایط مرزی، وجه تمایز شرایط و گزینه‌های مختلف شبیه‌سازی در یک پروژه هستند. پس از انجام واسنجی 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 بالادست از نوع بده جریان ورودی و شرط مرزی پایین‌دست 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 غیراین‌صورت، تراز مخزن درضمن پیش‌روی محاسبات از واقعیت فاصله خواهد گرفت.

برای مدل رسوب، می‌توان شرط مرزی بالادست را از نوع نرخ آورد رسوب یا غلظت آن برحسب جریان انتخاب کرد. بار رسوب ورودی از مرز بالادست، شامل بار معلق و بار بستر می‌باشد. شرط مرزی پایین‌دست را، بسته به مساله‌ی مورد مطالعه، می‌توان از نوع غلظت خروجی رسوب معلق از دریچه‌ها و یا - در مسایل 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 برحسب 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 دانه‌بندی از مقدار کل رسوب ورودی در مرزها
۱۱- سهم بار معلق و بار بستر در رسوب ورودی و خروجی از مرزها
۱۲- منحنی رهاسازی آب و رسوب از سد یا سدهای احتمالی واقع در بالادست
۱۳- اطلاعات بده - اشل در ایستگاه‌های سنجش رودخانه‌های بالادست و پایین‌دست

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

omoorepeyman.ir

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 بالادست در رودخانه‌ی منتهی به مخزن، نزدیک یک ایستگاه رسوب‌سنجی و یا در جایی‌که 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 بالادست در جایی‌که تغییرات عرضی سرعت، قابل توجه و موثر باشد، اجتناب کرد. درصورتی‌که چنین انتخابی غیرقابل اجتناب باشد، نمی‌توان به آبنگار کلی مقطع جریان اکتفا کرد. اگر محل مرز و رفتار جریان به‌گونه‌ای باشد که نتوان از تغییرات قائم میدان جریان و رسوب (به‌خصوص 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 تاثیر 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 براساس 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، که از بستر رودخانه سرچشمه گرفته را (به‌جز 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 جابه‌جایی رسوب در مسیر رودخانه شود [۴۰]. به دلیل کمبود اطلاعات، ممکن است تامین 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.

omoorepeyman.ir

وجود و عملکرد سازه‌های کنترل کننده‌ی جریان یا رسوب در مسیر شاخه‌ها، می‌تواند اطلاعاتی هرچند کیفی درباره‌ی 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 به‌دسته‌های 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 و 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 برحسب 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 بالادست مخزن و تاثیر 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 تاثیر 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 غیرپیوسته (برای شبیه‌سازی شبه‌ماندگار) مورد نیاز هستند نیز براساس 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 بالادست 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 دو ساعته را از سازمان آب منطقه‌ای محل دریافت کرد. چنین سنجش‌هایی به طور خاص در زمان سیل انجام می‌شود. اطلاعات سیل‌ها را باید به طور مستقل از شرایط عادی نیز تنظیم و بررسی کرد. اگر اطلاعات دو ساعته‌ی 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 پایین‌دست مخزن، باید نقش احداث سد در تغییر منحنی زمان تداوم جریان و تراز آب و تاثیر آن بر کاهش فرسایش را منظور کرد. اطلاعات مربوط به مقدار تخلیه رسوب از دریچه‌های سد و

omoorepeyman.ir

دانه‌بندی آن نیز مورد نیاز خواهد بود. برای این مرز می‌توان از متوسط‌های هفتگی یا ماهانه استفاده کرد، زیرا آورد جریان به وسیله‌ی عملکرد سد کنترل شده و تغییرات شدیدی در آن دیده نمی‌شود. در زمان عملیات رسوب‌شویی مخزن و یا رهاسازی نامتعارف آب و رسوب، فاصله‌های زمانی بین داده‌های مرزی باید از مرتبه‌ی ساعت باشد.

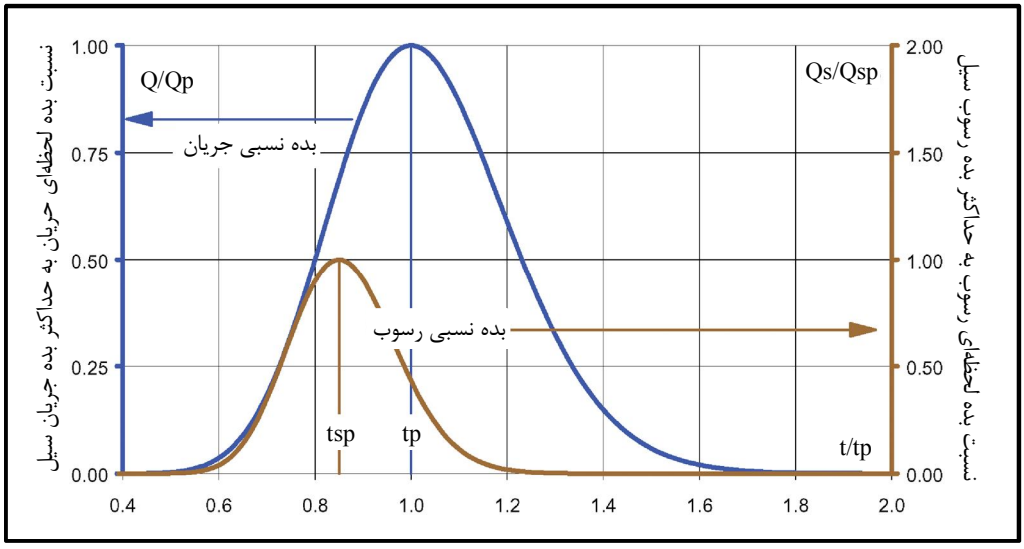
برای تنظیم شرط مرزی خروجی برای رودخانه‌ی پایین‌دست، منحنی بده - اشل در محل مرز خروجی مورد نیاز می‌باشد. در صورت عدم وجود اطلاعات بده - اشل، می‌توان فرض کرد که در آنجا زبری بستر تنها عامل کنترل جریان است. بر این اساس، می‌توان از عمق نرمال جریان به عنوان شرط مرزی خروجی استفاده کرد.

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 مسایل، می‌توان از متوسط‌های روزانه جریان و متوسط‌های روزانه‌ی غلظت رسوب استفاده کرد. متوسط روزانه غلظت یا آورد رسوب در شرایط سیلابی، باید براساس اندازه‌گیری‌های کافی (مثلا دو ساعته) به‌دست آمده باشد.

اگر شبیه‌سازی یک سیل منفرد مد نظر باشد، تامین 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 تاثیر 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 (۲-۲)، نمایی از رابطه‌ی آبنگار جریان و منحنی بار رسوبی در طول یک سیل را نشان می‌دهد. رابطه بین این دو منحنی، تحت تاثیر 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 (به‌خصوص رفتار جریان غلیظ) دارد و بر واسنجی مدل به اندازه‌گیری‌های محلی در طی ساعت‌های سیل نیز تاثیر جدی می‌گذارد.

omoorepeyman.ir



شکل ۲-۲- 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 این‌گونه 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 برحسب 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. به‌خصوص 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

omoorepeyman.ir

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 بالادست باشد.

در مدل‌های عددی، روش‌های محاسبه جابه‌جایی 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 مسایل 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 روش پیشنهادی اینشتین مربوط به سال ۱۹۹۵، ۱۰٪ از ریزترین رسوبات بستر از روند محاسبه حذف شده و تنظیم متغیرهای رابطه برای برازش به سنجش‌ها براساس بقیه طیف دانه‌بندی انجام می‌شود.

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 فرسایش‌پذیری حوضه لحاظ می‌شود. در اقلیم‌های خشک مانند بسیاری از نقاط ایران، رابطه‌ی بار رسوب با بده جریان برای اولین سیل بزرگ ماه‌های پرباران، 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 برحسب 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 غیربارش 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

omoorepeyman.ir

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 برحسب آورد جریان، اختلاف مطرح شده را در نظر نگیرد، نمی‌تواند برای تامین 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 موسسه‌ی تحقیقات آب این وزارت مراجعه کرد. اطلاعات خام مانند سنجش‌های دو ساعته‌ی اشل در شرایط سیلابی، از طریق سازمان‌های آب منطقه‌ای قابل دسترسی هستند.

روابط غلظت رسوب برحسب 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 این‌روابط، 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 به‌دست 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 تامین شرط مرزی ورودی رسوب در شرایط غیرسیلابی مناسب است، اما برای شرایط سیلابی مناسب نیست. اگر رابطه‌ی بده جریان و غلظت رسوب، به طور 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 دو ساعته برداشت شود. متوسط روزانه‌ی غلظت در زمان سیل، باید براساس متوسط‌گیری از اطلاعات دو ساعته انجام شود. روابط جریان - رسوبی که براساس متوسط روزانه‌ی داده‌ها تنظیم می‌شوند، از دقت کافی برای تامین شرط مرزی ورودی رسوب در شبیه‌سازی رفتار سیل‌های منفرد، برخوردار نیستند.

پراکندگی نقاط داده در نمودارهای بده رسوب برحسب بده آب، کم‌تر از پراکندگی آن‌ها در نمودارهای غلظت رسوب برحسب بده جریان می‌باشد، اما این به معنی دقت بیش‌تر نمودارهای نوع اول نیست. علت این تفاوت آن است که در

omoorepeyman.ir

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 بالادست، 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 تامین 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 غیرشبیه‌سازی را منطقی کند، مگر آنکه بتوان با تحلیل حساسیت به شرط مرزی به بعضی از اهداف پروژه رسید.

برای تامین 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 جزییات 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 بالادست مخزن به صورت پیوسته برداشت شود. برای واسنجی مدل، نمی‌توان به برداشت‌های معمول ایستگاه رسوب‌سنجی بالادست اکتفا کرد. در عین حال باید دقت کرد که تفاوت اندازه‌گیری‌های مرزی - که برای واسنجی استفاده می‌شوند - با اطلاعات ایستگاه رسوب‌سنجی - که برای شبیه‌سازی‌های اصلی استفاده می‌شوند - گمراه کننده نباشد.

تفاوت شرایط مرزی مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های اصلی، باید از نظر مرجع تامین داده‌ها و دقت آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. اگر بنا باشد واسنجی مدل با سنجش‌های هم‌زمان 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 بالادست و به اندازه‌ی کافی دور از مخزن انتخاب شود، می‌توان غلظت رسوب معلق را در کل مقطع یکسان فرض کرد.

۲-۸- روند برپاسازی[1]، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

مدل‌های عددی، برای مطالعه رسوب مخازن سدها از توانایی‌های قابل توجهی برخوردار هستند، اما برای کسب نتایج قابل اعتماد باید آن‌ها را به‌درستی مورد استفاده قرار داد. اگر روند صحیح استفاده از نرم‌افزار به‌درستی تعیین نشده باشد، توانایی مدل‌های جدید در ارائه‌ی زیبای نتایج و به‌کارگیری سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، می‌تواند اغوا کننده باشد.

1- Setup

omoorepeyman.ir

برای کنترل کیفیت شبیه‌سازی‌ها، علاوه بر بررسی منطقی بودن نتایج خروجی، رعایت معیارهای لازم در روش به‌کارگیری آن‌ها نیز کنترل می‌شود.

روش صحیح به‌کارگیری یک نرم‌افزار برای انجام شبیه‌سازی، شامل سه مرحله است؛ برپاسازی مدل، واسنجی آن، و صحت‌سنجی آن. برپاسازی مدل به معنی شناساندن مشخصات اصلی منطقه‌ی مورد مطالعه به مدل و آماده کردن آن برای انجام شبیه‌سازی‌های اولیه می‌باشد. واسنجی مدل به معنی تنظیم تعدادی از ضرایب ورودی قابل تغییر، به‌گونه‌ای است که نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های انجام شده در محیط هماهنگ شود. صحت‌سنجی مدل به معنی مقایسه‌ی نتایج مدل واسنجی شده با تعداد دیگری از اندازه‌گیری‌های محیطی است که در مرحله‌ی واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. هریک از مراحل یاد شده در ادامه توضیح داده می‌شوند. بررسی حساسیت نتایج شبیه‌سازی به اطلاعات ورودی، تراکم شبکه محاسباتی و شاخص‌های برازش دهنده در مراحل مختلف راه‌اندازی مدل لازم می‌باشد. حساسیت‌سنجی نسبت به یک شاخص معین از طریق ایجاد تغییر اندک در آن شاخص، اجرای مجدد مدل و مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شود.

انجام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی برای سدهایی که هنوز ساخته نشده‌اند با اشکال همراه است. هر چند شرایط پیش از احداث سد نیز شبیه‌سازی شده و قابل واسنجی و صحت‌سنجی است، اما اکثر مدل‌ها و شرایط مربوط به پس از احداث مخزن را نمی‌توان با هیچ اندازه‌گیری محیطی صحت‌سنجی کرد. تحلیل حساسیت نتایج شبیه‌سازی به تغییرات منطقی شاخص‌های برازش دهنده و بررسی سناریوهای مختلفی که براساس قضاوت مهندسی انتخاب شده باشند در این‌گونه موارد لازم است. در همین رابطه یادآوری می‌شود که بعضی از پارامترهای برازش یابنده در طول عمر مخزن تغییر می‌کنند. اگر سد نسبتا مشابهی در منطقه وجود داشته باشد، امکان برپاسازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها برای آن مخزن نیز می‌تواند به روند مورد بحث کمک کند.

۲-۸-۱- 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 واسنجی به‌کار 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،

omoorepeyman.ir

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 موثر خاص و یا سه‌شاخه‌های احتمالی در مسیر مدل‌های یک‌بعدی، نحوه‌ی ذخیره‌سازی نتایج محاسبات و امثال آن.

۲-۸-۱-۱- 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 دوبعدی افقی و سه‌بعدی، مرزها با شبکه محاسباتی مشخص می‌شوند؛ در شبکه‌های نامنظم به وسیله‌ی هندسه‌ی اطراف شبکه و در شبکه‌های منظم به وسیله‌ی یک کد مشخصه برای هر گره. در مدل‌های یک‌بعدی و مدل‌های دوبعدی قائم، موقعیت جغرافیایی و پیچ و خم‌های مسیر محیط حل مهم نیست. در این حال، محدوده‌ی شبیه‌سازی به وسیله‌ی 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 مسایل یک‌بعدی، قسمتی از رودخانه‌ی بالادست مخزن نیز به همراه مخزن شبیه‌سازی شود، به طوری که طول محدوده‌ی رودخانه در حدود طول مخزن باشد.

در مسایل دوبعدی و سه‌بعدی، 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 بالادست، باید مورد دقت قرار گیرد. مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی قائم، در این رابطه مشکلی ندارند. اگر عمکرد مدل سه‌بعدی در این محدوده با مشکل همراه باشد، می‌توان قسمت‌های بالادست را با مدل‌های یک یا دوبعدی قائم شبیه‌سازی کرد تا از نتایج آن برای تامین شرایط مرزی مدل سه‌بعدی استفاده شود.

omoorepeyman.ir

۲-۸-۱-۲- معرفی شبکه‌ی محاسباتی

معرفی شبکه‌ی محاسباتی در مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی قائم، به صورت معرفی محل مقاطع محاسباتی انجام می‌شود. این کار در مدل‌های دوبعدی افقی و سه‌بعدی به صورت معرفی شبکه‌ی گره‌های محاسباتی در صفحه‌ی افقی و قائم (برای سه‌بعدی) 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 موثر است، نشان دهد. محدودیت روش محاسباتی نرم‌افزار نیز باید براساس 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 یک‌بعدی، فاصله‌ی بین مقاطع محاسباتی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که نسبت سطح مقطع بین دو مقطع متوالی بیش از ۳۰٪ تغییر نکند. انتخاب فاصله‌ی ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر برای این‌گونه مسایل معمول است. در مدل‌های دوبعدی 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 جایی‌که 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 دوبعدی افقی یا سه‌بعدی 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 جزییات 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

omoorepeyman.ir

کم‌تر نباشد. حساسیت این موضوع، در شبیه‌سازی جریان غلیظ بیش‌تر است. در این نوع مسایل، فاصله‌ی گره‌ها هم در نقطه فرود[1] و هم در پیشانی دلتای رسوبی باید کم باشد، در غیراین‌صورت ضخامت لایه‌ی جریان غلیظ در پایین‌دست 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 پایین‌دست 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 تاثیر خواهد گذاشت.

در مسایل 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.

۲-۸-۱-۳- معرفی هندسه‌ی بستر

در مدل‌های دوبعدی افقی و مدل‌های سه‌بعدی، هندسه‌ی بستر با نسبت دادن تراز بستر به هر گره از شبکه‌ی محاسباتی انجام می‌شود. در مدل‌های یک‌بعدی و مدل‌های دوبعدی 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 واسنجی مدل شود. وجود خطا در تراز بستر، در نواحی عمیق تاثیر شدیدی ندارد، اما در قسمت‌های کم‌عمق موثر خواهد بود. ناهمواری شدید بستر یا مرزها در نواحی کم‌عمق، پایداری محاسبات را نیز تحت تاثیر 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 یک‌بعدی و دوبعدی قائم، باید مقاطعی را انتخاب کرد که نماینده‌ی مناسبی از اطراف خود نیز باشند

1- Plunge Point

omoorepeyman.ir

(تا نیمه راه مقاطع اطراف). در غیراین‌صورت، جریان و رسوب محاسبه شده در یک مقطع، نماینده‌ی آن قسمت از آبراهه مورد مطالعه نخواهد بود. در مدل‌های دوبعدی افقی و سه‌بعدی نیز مقدار تراز در یک گره، نماینده‌ی متوسط عمق آن نقطه و اطراف آن - تا نیمه راه گره‌های اطراف - شناخته می‌شود. عمق یا تراز معرفی شده به هر گره، باید با توجه به این نکته تنظیم شود.

۲-۸-۱-۴- معرفی شرایط اولیه

معرفی شرایط اولیه به مدل‌های جریان و رسوب، یکی از مراحل برپاسازی آن‌ها تلقی می‌شود. معرفی مقدار اولیه‌ی هر یک 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. درصورتی‌که نیمرخ قائم دما تغییرات زیادی را نشان دهد، برای شبیه‌سازی سه‌بعدی یا دوبعدی قائم، باید میدان دما در آغاز شبیه‌سازی را به مدل معرفی کرد. درصورتی‌که 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 غیراین‌صورت، امکان ناپایدار شدن مدل وجود دارد. می‌توان میدان غلظت و سرعت اولیه را صفر منظور کرد تا درضمن شیبه‌سازی 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 دست گرمی[1] در مدل‌ها نیز استفاده کرد که شرایط مرزی را به تدریج به مقدار واقعی خود می‌رسانند.

۲-۸-۱-۵- معرفی داده‌های ورودی برای برپاسازی مدل جریان

مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی 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 تاثیر می‌گذارد. هیچ‌یک از روش‌های محاسبه‌ی آشفتگی را نمی‌توان بهترین انتخاب برای تمام شرایط دانست. نرم‌افزارهای پیشرفته در این رابطه چند گزینه دارند تا کاربر براساس شرایط حاکم، یکی از آن‌ها را انتخاب کند. در شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان، تاثیر آشفتگی طولی به طور معمول قابل صرف‌نظر است. در مدل‌های دوبعدی افقی، دوبعدی قائم و سه‌بعدی جریان، نمی‌توان از این پدیده صرف‌نظر کرد.

1- Warm Up

omoorepeyman.ir

برای محاسبه اثر آشفتگی در مدل‌های دوبعدی 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 اندازه‌گیری‌های محیطی جریان در دست نیست، از روش‌های محاسباتی دو معادله‌ای مانند $k-\varepsilon$ 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 مساله مهم بوده و توزیع مکانی مناسبی از اندازه‌گیری‌های محیطی در اختیار باشد، می‌توان از یک روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[1] مانند روش Smagorinsky استفاده کرد و آن را براساس اندازه‌گیری‌ها برازش داد. روش $k-\varepsilon$ استاندارد دوبعدی افقی طول گردابه‌ها را با دقت شبیه‌سازی نمی‌کند، اما نگارش‌های دیگری از آن برای این منظور وجود دارند. اگر آشفتگی جریان تاثیر شدیدی بر میدان جریان و رسوب نداشته باشد، می‌توان به معرفی یک ضریب آشفتگی ثابت برای کل محدوده اکتفا کرد.

در مدل‌های سه‌بعدی جریان، اثر آشفتگی علاوه بر صفحه‌ی افقی در امتداد قائم نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. در مسایل کاربردی، فاصله‌ی گره‌های محاسباتی در امتداد قائم بسیار کم‌تر از فاصله‌ی گره‌ها در صفحه‌ی افقی است، بنابراین چگونگی و مقیاس تاثیر 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 سه‌بعدی 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 تاثیر قرار می‌دهد. حتی در مسایلی که آشفتگی افقی مهم نیست، آشفتگی قائم باید با دقت محاسبه شود. توصیه می‌شود برای امتداد قائم از روش $k-\varepsilon$ استفاده شود. اگر اثر تفاوت چگالی و نیروهای غوطه‌وری ناشی از آن قابل توجه باشد، مقدار آشفتگی قائم تحت تاثیر نیروی غوطه‌وری مثبت یا منفی نیز قرار می‌گیرد. در مسایلی مانند جریان غلیظ، گزینه‌ی محاسبه‌ی این فرآیند باید در نرم‌افزار انتخاب شود. در مدل‌های سه‌بعدی، انتخاب روش مناسب حل آشفتگی در صفحه‌های افقی، براساس همان توصیه‌هایی انجام می‌شود که برای مدل‌های دوبعدی افقی ارائه شد.

1- Large Eddy Simulation

omoorepeyman.ir

۲-۸-۱-۶- معرفی داده‌های برپاسازی مدل رسوب

نرم‌افزارها، روابط مختلفی را برای محاسبه بار بستر و جابه‌جایی رسوبات غیرچسبنده در دسترس قرار می‌دهند. گزینه مناسب باید با توجه به شرایط منطقه و محدودیت‌های هر رابطه انتخاب شود. معروف‌ترین روابط حمل رسوب و شرایط و محدودیت‌های آن‌ها در پیوست همین نشریه ارائه شده‌اند.

برای شبیه‌سازی جابه‌جایی 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 غیرمعقول این دو عدد پرهیز شود. با زیاد شدن تعداد لایه‌ها و تعداد دسته‌ها، تعداد متغیرهایی که باید برازش داده شوند، به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این امر روند واسنجی را بسیار مشکل خواهد کرد. انتخاب تعداد سه لایه برای محاسبات بستر، در بسیاری از مسایل 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 جابه‌جایی رسوب، باید به مدل معرفی شوند. بعضی از آن‌ها در مرحله‌ی واسنجی مدل تدقیق می‌شوند، اما تعدادی نیز ثابت می‌مانند. از جمله می‌توان به چگالی رسوبات غیرچسبنده (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 غیرچسبنده (به طور معمول بین ۰/۳ تا ۰/۷) و طیف دانه‌بندی رسوبات بستر اشاره کرد. این مشخصه‌ها در مرحله‌ی برپاسازی مدل براساس 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 مترمکعب 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 مترمکعب بوده و گِل‌آب ثابت محسوب می‌شوند. اگر حدود یک ماه از ته‌نشینی گذشته باشد، این مقدار به ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌رسد و گِل چسبنده‌ی تغییرشکل‌پذیر محسوب می‌شوند. جرم مخصوص خشک رسوباتی که بین یک تا ده سال از ته‌نشینی آن‌ها گذشته باشد، حدود ۴۰۰ تا ۶۵۰ کیلوگرم در مترمکعب 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 تاثیر می‌گذارند. به عنوان نمونه وزن رسوبات ته‌نشین‌شده‌ی بعدی بر بالای یک لایه‌ی رسوب، بر روند تحکیم تاثیر می‌گذارد.

omoorepeyman.ir

۲-۸-۲- واسنجی مدل

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

واسنجی مدل در دو مرحله انجام می‌شود: واسنجی کلی و واسنجی دقیق. مرحله‌ی اول، شامل تنظیم ضرایب و مشخصه‌ها در حدی است که بتواند رفتار عمومی فرآیندها را به‌درستی شبیه‌سازی کند و مقادیر غیرممکن 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 جزییات نباشد. مرحله‌ی دوم (واسنجی دقیق)، عبارت است از تدقیق نهایی ضرایب ورودی به‌گونه‌ای که نتایج شبیه‌سازی در حد دقت کافی با اندازه‌گیری‌ها منطبق شود.

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

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

واسنجی 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 براساس 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 قابل‌قبول است. محدوده‌ی مجاز، براساس 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.

1- Calibration

omoorepeyman.ir

۲-۸-۳- مشخصه‌های واسنجی[1] مدل

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

۱- زبری بستر
۲- لزجت آشفتگی جریان، شامل تاثیر 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 غیرریزدانه (در صورت اهمیت)

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

مشخصه‌های فهرست فوق، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۸-۳-۱- 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، تاثیر زبری بر میدان عمومی جریان در قسمت‌های عمیق مخزن زیاد نیست. وجود پوشش گیاهی می‌تواند زبری موثر و مقاومت در مقابل عبور جریان را به شدت افزایش دهد.

زبری بستر در محاسبه‌ی تنش برشی جریان نیز موثر است و از این طریق بر روند تعامل جریان با رسوبات بستر تاثیر می‌گذارد. در مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی 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 تاثیر دارد.

1- Calibration Parameters

omoorepeyman.ir

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 هرکدام از آن‌ها باید مورد توجه باشد. گاهی امکان واسنجی توام 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 دوبعدی قائم یا سه‌بعدی جریان، مقدار زبری بستر تا حدی به نحوه‌ی گره‌بندی امتداد قائم در مجاورت بستر نیز وابسته می‌باشد.

مدل‌های یک‌بعدی و مدل‌های دوبعدی افقی، از ضریب مانینگ یا ضریب شزی برای تعیین مقاومت بستر یا مقطع در مقابل جریان استفاده می‌کنند. به طور معمول، در مسایل دوبعدی 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 مسایل یک‌بعدی 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 سه‌بعدی و دوبعدی 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 موثر در مقابل جریان را به شدت افزایش دهد. در صورت عدم وجود یک تخمین اولیه، واسنجی 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.

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 مسایل مرتبط با جابه‌جایی رسوب اهمیت زیادی دارد.

۲-۸-۳-۲- 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 تاثیر دارد. در

1- Bed Resistance
2- Bed Roughness

omoorepeyman.ir

مدل‌های دوبعدی قائم و سه‌بعدی 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 $k-\varepsilon$ 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 $5.10^{-10}\ m^2/s^3$ 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 واسنجی شود. این ضریب برای روش Smagorinski در مدل‌های دوبعدی افقی به طور معمول بین ۰/۲۵ تا ۱/۰ قرار دارد. ضریب واسنجی 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 تاثیر 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 واسنجی 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 غیریکنواختی داشته باشد، مقدار معینی از ضریب واسنجی منجر به مقادیر متفاوتی از لزجت در امتداد قائم خواهد شد. به دلیل مشکل نام‌برده، مدل‌هایی که از شبکه‌ی محاسباتی با فواصل گره غیرثابت 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. پیوست همین نشریه حاوی توضیحات بیش‌تری در این موضوع می‌باشد.

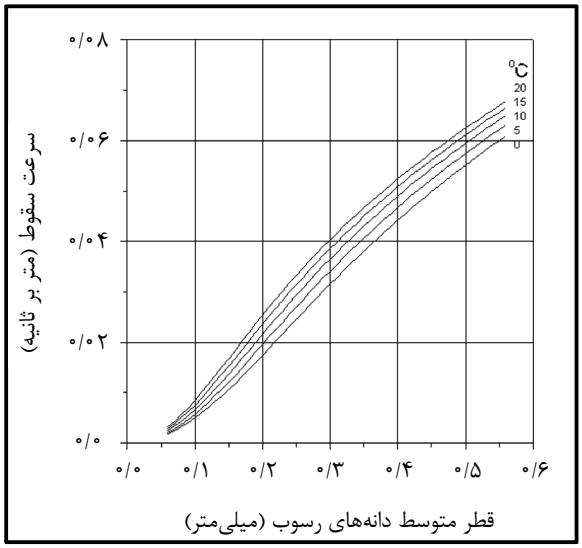
در مسایل دوبعدی قائم و سه‌بعدی، اثر ضریب لزجت جریان در امتداد قائم، بیش‌تر از اثر ضریب لزجت جریان در صفحه‌ی افقی است. به دلیل تفاوت نام‌برده، ضریب لزجت امتداد قائم باید با دقت بیش‌تری - نسبت به صفحه افقی - تنظیم شود.

۲-۸-۳-۳- سرعت سقوط و مشخصه‌های آن

مقدار سرعت سقوط در بسیاری از نرم‌افزارها از کاربر دریافت می‌شود تا به عنوان ابزار واسنجی استفاده شود. روابط مختلفی برای تخمین سرعت سقوط پیشنهاد شده‌اند. مثلا می‌توان سرعت سقوط رسوبات غیرریزدانه را براساس رابطه

omoorepeyman.ir

استوکس (Stokes)، برحسب 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 (۲-۳) نمودار رابطه‌ی سرعت سقوط رسوبات ماسه‌ای با دانه‌بندی و دمای آب را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که برای رسوبات غیرچسبنده، حدس اولیه براساس رابطه‌ی نام‌برده تعیین شود. روابط دیگری نیز برای تخمین سرعت سقوط وجود دارند، مثل رابطه اینشتین یا رابطه فن راین که طیف وسیعی از دانه‌بندی را در بر می‌گیرد.



شکل ۲-۳- سرعت سقوط ذرات بر حسب قطر ذرات و دمای آب

سرعت سقوط رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، علاوه بر دانه‌بندی و دمای آب، تحت تاثیر عوامل دیگری مانند به هم پیوستن ذرات تحت اثر غلظت رسوب و تاثیر 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 مترمکعب است. در این شرایط، افزایش غلظت باعث افزایش سرعت سقوط می‌شود. ممکن است غلظت به اندازه‌ای افزایش یابد که تاثیر 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 واسنجی دیگر، حداکثر سرعت سقوط و غلظت آستانه‌ای است که بعد از آن ته‌نشینی اتفاق نخواهد افتاد.

omoorepeyman.ir

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 تاثیر شوری نیز قرار خواهد داشت. تاثیر شوری بر سرعت سقوط در محل تماس رودخانه با دریا رخ می‌دهد، اما در مخزن سد معمول نیست.

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

۲-۸-۳-۴- ضریب پخش رسوب معلق

همان‌طور که در معادله‌های جریان، اثر آشفتگی و عوامل محاسبه نشده کوچک‌مقیاس بر پخش اندازه‌ی حرکت، به وسیله‌ی ضریب پخش یا لزجت جریان منظور می‌شود، در معادله غلظت رسوب معلق نیز اثر آشفتگی و عوامل محاسبه‌نشده‌ی کوچک‌مقیاس دیگر بر پخش غلظت، به وسیله‌ی 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 واسنجی مدل است. برای تنظیم ضریب نام‌برده، اندازه‌گیری‌های محیطی کافی از غلظت رسوب معلق در شرایط و نقاط مختلف لازم است.

در مسایل یک‌بعدی، اثر پخش غلظت رسوب در امتداد جریان موثر و مهم می‌باشد (برخلاف لزجت جریان). ضریب پخش طولی می‌تواند سرعت پیش‌روی جریان غلیظ در مخزن سد را تحت تاثیر قرار دهد. در مدل‌های دوبعدی 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 دو بعدی افقی برای فواصل گره کم‌تر از ۵۰ متر، کم‌تر از ۵ مترمربع بر ثانیه است. در همان محیط، ضریب مزبور برای فواصل گره ۵۰۰ متری، می‌تواند تا حدود ۵۰ مترمربع بر ثانیه افزایش یابد. در مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی قائم، مقدار ضریب نام‌برده در دو امتداد افقی و قائم جداگانه تنظیم می‌شود.

1- Dispersion

omoorepeyman.ir

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 واسنجی مدل غیر یک‌بعدی؛

الف- در مدل هیدرودینامیک، برای محاسبه‌ی آشفتگی جریان از یک روش توانمند (مانند $k-\varepsilon$ در امتداد قائم و $k-\varepsilon$ 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 واسنجی 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 مسایل کاربردی، عدد اشمیت در امتداد قائم حتی ۰/۱ نیز برآورد شده است. در شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی یا دوبعدی 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.

۲-۸-۳-۵- تنش آستانه‌ی فرسایش

تنش آستانه‌ی فرسایش یکی از مهم‌ترین شاخص‌های واسنجی در مسایلی است که فرسایش بستر چسبنده در آن‌ها مهم تشخیص داده شده باشد (مانند عملیات رسوب‌شویی و جریان غلیظ). برای وقوع فرسایش، تنش موثر 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 براساس 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 مترمکعب، تنش آستانه فرسایش بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ نیوتون بر مترمربع 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 مترمکعب، تنش آستانه‌ای بین ۰/۲ تا ۰/۴ نیوتون بر مترمربع دارند (برای لایه‌ی دوم و سوم). رسوبات سخت و تحکیم‌یافته با جرم مخصوص خشک بیش از ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، تنش آستانه فرسایش بین ۰/۶ تا ۲ نیوتون بر مترمربع 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.

omoorepeyman.ir

۲-۸-۳-۶- تنش آستانه‌ی رسوب‌گذاری

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

مقدار تنش آستانه رسوب‌گذاری به طور معمول بین ۰/۰۳ تا ۱ نیوتون بر مترمربع است. در اکثر موارد مقدار این شاخص کم‌تر از ۰/۱ نیوتون بر مترمربع می‌باشد. اگر طیف دانه‌بندی رسوبات معلق به چند دسته تفکیک شود، تنش آستانه‌ی رسوب‌گذاری باید برای هر دسته مشخص شود. می‌توان برای شروع واسنجی، 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 مسایل شکل‌گیری و جابه‌جایی دلتای رسوبی و در مسایل 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 مسایل جریان غلیظ، تنش آستانه رسوب‌گذاری نقش حساسی دارد. تغییر آن به اندازه‌ی تنها ۰/۰۵ نیوتون بر مترمربع، می‌تواند مدت زمان لازم برای مضمحل شدن توده‌ی غلیظ در یک مقطع از مخزن را به دو برابر یا نصف تغییر دهد.

۲-۸-۳-۷- 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 غیرخطی دارای ضریب و توان بیان می‌شود که شکل آن برای لایه‌های سخت و نرم متفاوت است. ضریب و توان یاد شده، دو مشخصه‌ی واسنجی محسوب می‌شوند و باید برای هرکدام ازلایه‌های بستر به طور جداگانه معرفی شوند.

۲-۸-۳-۸- 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.

omoorepeyman.ir

۲-۸-۴- مقایسه و سنجش سازگاری نتایج شبیه‌سازی مدل با اندازه‌گیری‌های محیطی

برای واسنجی یک نرم‌افزار، باید مقدار مشخصه‌ها را به گونه‌ای تنظیم کرد که نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات محیطی - به‌خصوص 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 مساله‌ی مورد نظر و سوال‌هایی است که پاسخ آن‌ها از شبیه‌سازی درخواست شده است. روند مقایسه باید هماهنگ با اهمیت فرآیندها و تاثیرشان بر تصمیم‌گیری‌های نهایی پروژه باشد.

واسنجی 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 واسنجی مدل در مسایل رودخانه و دریا، برای واسنجی مدل در مخزن سد کافی نیست. در مسایل 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 مسایل 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 بالادست مخزن، مهم‌ترین ملاک‌های سازگاری عبارت‌اند از: نیمرخ طولی سطح آب، نحوه تقسیم جریان بین مجرای اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، تغییرات سطح مقطع در اثر جابه‌جایی رسوب و مقدار جابه‌جایی رسوب کلی و تفکیک شده برحسب دانه‌بندی. در داخل مخزن سد ملاک‌های دیگری وجود دارند، مانند: میدان سرعت در فضای دو یا سه‌بعدی، 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 برحسب دانه‌بندی.

در شبیه‌سازی تغییرات طولانی مدت ریخت‌شناسی مخزن، مهم‌ترین ملاک‌های سنجش سازگاری عبارتند از: تغییرات تراز بستر در نواحی مختلف، میزان جابه‌جایی 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.

omoorepeyman.ir

برای شبیه‌سازی کوتاه‌مدت رفتار جریان غلیظ، مهم‌ترین ملاک‌های سنجش سازگاری عبارتند از: نقطه فرود[1]، سرعت پیش‌روی توده‌ی غلیظ، ضخامت توده‌ی غلیظ در قسمت‌های مختلف، نواحی فرسایش و رسوب‌گذاری و بالاخره میدان کلی سرعت و غلظت در فضای دوبعدی قائم یا سه‌بعدی.

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 موثر 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 واسنجی مدل جریان قابل استفاده نیست. برای واسنجی مدل جریان باید از مقایسه سرعت‌ها (بده‌ها برای مدل یک‌بعدی) 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 یک‌بعدی 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 دوبعدی قائم نیز به جای مقایسه تراز خط‌القعر، باید منحنی سطح مقطع برحسب تراز آب را ملاک مقایسه شبیه‌سازی با واقعیت قرار داد. در شبیه‌سازی یک‌بعدی، 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 دوبعدی افقی و دوبعدی 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.

1- Plunging Point

omoorepeyman.ir

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 موثر بر آن متمرکز شود و از سوی دیگر یکتا بودن مجموعه مقادیر انتخاب شده برای مشخصه‌های واسنجی را تضمین کند. مطالب ارائه شده درباره‌ی توزیع اندازه‌گیری‌های محیطی و روند واسنجی، 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.

توصیه می‌شود که ترکیبی از هردو روش فوق برای واسنجی مدل استفاده شود. روش دوم نیازمند وجود داده‌های اندازه‌گیری زیاد در طول زمان در هر محل می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که درضمن 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 برحسب تراز آب مثل رابطه‌ی بده - اشل

ب- رسم منحنی تغییرات یک کمیت برحسب طول یا فاصله مثل نیمرخ طولی بستر

ج- رسم تغییرات اطلاعات مربوط به یک نقطه یا یک مقطع برحسب 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 دوبعدی افقی، نیمرخ قائم محاسبه نمی‌کنند.

حداکثر خطای قابل‌قبول برای هر مشخصه - همانند حساسیت نتایج نسبت به تغییر مقدار مشخصه‌ها - از مساله‌ای به مساله‌ی 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 موثری بر میدان جریان و رسوب ندارند، وقت و انرژی صرف شود.

omoorepeyman.ir

معمول‌ترین معیارهای مقایسه آماری عبارتند از:

الف- متوسط خطا:

$$\text{Average Error} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\text{Observed}_i - \text{Simulated}_i\right)$$

ب- ریشه‌ی مجموع مربعات خطا

$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\text{Observed}_i - \text{Simulated}_i\right)^2}$$

ج- درصد ریشه‌ی مجموع مربعات خطا

$$\text{Percent Of RMSE} = \frac{\text{Root Mean Square Error}}{\text{Maximum} - \text{Minimum Measured Values}} \times 100$$

د- انحراف معیار خطاها

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\text{Observed}_i - \text{Simulated}_i - \text{AverageError}\right)^2}$$

هـ- اختلاف مقادیر بیشینه

$$\text{Error Of Max} = \text{Max}\left\{\text{Observed}_i\right\} - \text{Max}\left\{\text{Simulated}_i\right\}$$

و- اختلاف مقادیر کمینه

$$\text{Error Of Min} = \text{Min}\left\{\text{Observed}_i\right\} - \text{Min}\left\{\text{Simulated}_i\right\}$$

خطای مجاز در هر یک از معیارهای فوق، بستگی به مساله‌ی مورد بررسی و حساسیت شاخص‌های مختلف در آن دارد. ممکن است خطای قابل‌قبول در قسمت‌های مختلف محیط حل نیز یکسان نباشد. به عنوان یک معیار عمومی، در بسیاری از مسایل 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» قابل‌قبول تلقی کرد.

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

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

۲-۸-۵- روند واسنجی[2]

واسنجی مدل به شرایط طبیعی یک منطقه، براساس روش حدس و آزمون انجام می‌شود. این‌روند شامل حدس اولیه‌ی مقدار مشخصه‌های واسنجی، انجام شبیه‌سازی، مقایسه‌ی نتایج با واقعیت و اندازه‌گیری‌ها، حدس جدید براساس نوع و میزان تفاوت و تکرار چندباره‌ی این مراحل استوار است. روند حدس و آزمون، تا رسیدن به سازگاری قابل‌قبول بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها ادامه می‌یابد. با توجه به تعدد مشخصه‌ها و تعامل بین آن‌ها، تغییر تصادفی مقدار آن‌ها

1- Sources & Sinks
2- Calibration

omoorepeyman.ir

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 واسنجی 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.

واسنجی 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 واسنجی در سرعت‌های زیاد، با بهترین ضرایب واسنجی در سرعت‌های کم، یکسان نباشد. مدل باید به‌گونه‌ای واسنجی گردد 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 تاثیر دارند را فدای بالا بودن سازگاری در شرایط معمول یا موثرتر کرد.

توصیه می‌شود که در صورت امکان، روش واسنجی 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، تاثیر قابل توجه بر میدان جریان نداشته باشد. ب- تغییر مشخصات هندسی بستر به خاطر فرسایش و رسوب‌گذاری، تاثیر قابل توجه بر میدان جریان نداشته باشد.

برای شبیه‌سازی رفتار جریان غلیظ و یا عملیات رسوب‌شویی، نمی‌توان مدل جریان را به طور مستقل از مدل رسوب واسنجی نمود. اگر جریان‌های چگالی، ناشی از عوامل غیررسوبی مانند دما یا شوری باشند، می‌توان روند فوق را به‌کار بست.

معیارهای سازگاری مدل جریان با طبیعت، عبارتند از: میدان سرعت، تراز سطح آب و رفتار آشفتگی. مشخصه‌هایی که در این رابطه واسنجی می‌گردند 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 موثر 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 واسنجی 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، تاثیر 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.

omoorepeyman.ir

برای واسنجی زبری بستر در رودخانه‌ی بالادست یا پایین‌دست 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 واسنجی می‌کند. ممکن است واسنجی 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 تاثیر اندکی بر میدان جریان دارد، مگر آنکه جریان غلیظ رخ دهد.

در مسایلی که تفاوت غلظت رسوب تاثیری بر میدان جریان ندارد، پس از واسنجی نمودن مدل جریان، نوبت به واسنجی 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 واسنجی می‌گردند، برای مسایل 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 واسنجی مدل هیدرودینامیک تدقیق شده‌اند، در این مرحله تغییر داده نمی‌شوند.

توصیه می‌شود که واسنجی 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.

واسنجی مدل رسوب با جستجوی ضرایب سرعت سقوط و ضریب پخش رسوبات معلق در حد واسنجی 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 واسنجی دارد، پیشنهاد می‌شود که در روند حدس و آزمون، هر بار تنها یک مشخصه تغییر داده شود تا تاثیر تغییر هر ضریب بر نتایج، بهتر قابل ردگیری باشد.

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

اگر تاثیر میدان غلظت رسوب برمیدان جریان قابل توجه باشد، هر دو مدل جریان و رسوب باید به طور هم‌زمان واسنجی گردند. اگر تاثیر این عامل خیلی شدید نباشد، می‌توان واسنجی اولیه‌ی مدل جریان را بدون توجه به رسوب انجام داده و سپس

omoorepeyman.ir

هر دو مدل را با هم به صورت دقیق واسنجی نمود. در مسایل جریان غلیظ، نمی‌توان واسنجی مدل‌های جریان و رسوب را از یکدیگر تفکیک کرد. رعایت ترتیب زیر برای واسنجی توأم هر دو مدل در چنین مسایلی توصیه می‌شود:

الف- تنظیم مدل‌های جریان و رسوب به‌گونه‌ای که اصل وجود نقطه فرود یعنی پدیده جدا شدن توده‌ی غلیظ از سطح آب و حرکت به سمت عمق شبیه‌سازی شود و محل آن با شرایط واقعی سازگار باشد.

ب- نیمرخ‌های قائم غلظت و سرعت پس از نقطه‌ی فرود در بالادست 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 واسنجی می‌یابد.

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

هـ- نیمرخ‌های قائم غلظت و سرعت و ضخامت توده‌ی غلیظ و غلظت متوسط آن در مقاطع مختلف پایین‌دست 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 پایین‌دست دلتا نیز در همین مرحله واسنجی 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.

براساس روند فوق، واسنجی 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 واسنجی می‌گردند. 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»، واسنجی 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) واسنجی می‌یابند. در این مرحله، تاثیر 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 واسنجی کلی می‌یابد. در مرحله‌ی «هـ»، 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 جزیی نهایی را دارند. مرحله‌ی «ز»، وظیفه‌ی کنترل زمان فروکش کردن غلظت رسوب در سیل و اختلاف زمانی بین

omoorepeyman.ir

منحنی غلظت با منحنی بده جریان، به‌خصوص در اواخر سیل، را نیز بر عهده دارد. تدقیق و کنترل مقدار اوج غلظت رسوب در طی مدت سیل در شرط مرزی بالادست، در مراحل «ب» و «ج» انجام می‌شود.

گاهی در هنگام واسنجی 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، براساس فرض ثابت بودن بستر انجام شود.

۲-۸-۶- رفع اشکال

درضمن واسنجی 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

ج- عدم واسنجی مدل پس از تلاش‌های مکرر. برای رفع هر نوع اشکال، باید حدس‌های مناسبی درباره‌ی علل احتمالی بروز آن در اختیار داشت. توصیه می‌شود که پیش از واسنجی 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

omoorepeyman.ir

بسیاری از نرم‌افزارهای معتبر، درضمن 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 جایی‌که 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 غیرمنطقی افزایش یا کاهش یافته و سبب بروز ناهمواری غیرمنطقی در بستر شده باشد. اگر فرض ثابت بودن بستر بتواند ناپایداری را برطرف کند، به احتمال زیاد مشکل از همین نوع است. ایجاد تغییرات غیرمنطقی 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 غیرواقعی 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، درصورتی‌که 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، به‌گونه‌ای 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، به‌گونه‌ای 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 غیرمنطقی و ناپایداری مدل رسوب شود.

هـ- 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 درنهایت در آنجا رخ داده، همان‌جایی

omoorepeyman.ir

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 غیرمنطقی 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 تاثیر 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 غیرواقعی 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 [۳۸].

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

الف- ممکن است تاثیر بعضی از فرآیندهای فیزیکی لحاظ نشده باشد و یا مدل مورد استفاده برای محاسبه‌ی همه‌ی فرآیندهای فیزیکی موثر در مساله، مناسب نباشد. در این حالت، تناسب فرضیه‌های ساده‌کننده‌ی استفاده شده در مدل با نیازهای مساله 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 مسایل 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 درباره‌ی 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 واسنجی مدل ایفا می‌کند. منحنی دانه‌بندی رسوب در مرز ورودی نیز باید با طبیعت سازگار باشد. پیشنهاد می‌شود مرز بالادست

omoorepeyman.ir

در جایی قرار گیرد که تراز بستر پایدار است. در این حال لازم است اطمینان حاصل شود که محاسبات مدل نیز مقطع بالادست 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 تاثیر 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 جابه‌جایی 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.

هـ- ممکن است اطلاعات ورودی غیر قابل واسنجی، مانند دمای ثابت محیط آب، نیاز به اصلاح داشته باشد.

و- ممکن است قسمتی از اطلاعات اندازه‌گیری شده از منطقه، غیرصحیح یا غیردقیق بوده و بنابراین تلاش برای سازگار کردن مدل با آن‌ها در کنار اطلاعات صحیح دیگر، بیهوده و بی‌نتیجه باشد. درصورتی‌که احتمالات قبلی بررسی شده و غیرموثر تشخیص داده شده باشند، کنترل مجدد اطلاعات اندازه‌گیری غیرقابل اجتناب خواهد بود.

۲-۸-۷- صحت‌سنجی

صحت‌سنجی مدل، عبارت است از مقایسه‌ی نتایج مدل واسنجی شده با اندازه‌گیری‌هایی که در مرحله‌ی واسنجی استفاده نشده‌اند. این کار باید بدون تغییر مشخصه‌های واسنجی شده انجام شود. پیش از واسنجی مدل، باید تعدادی از اندازه‌گیری‌ها را جدا کرد تا در روند واسنجی دخالت داده نشوند. روند انجام صحت‌سنجی 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 واسنجی نرم‌افزار ارائه شده است.

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

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

omoorepeyman.ir

۲-۹- شبیه‌سازی مجموعه شرایط انتخاب شده و نتیجه‌گیری

پس از آنکه مدل عددی به شرایط منطقه برازش یافت و آزمون‌های صحت‌سنجی 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 تامین اطلاعات و واسنجی 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 واسنجی مدل‌ها در زمان مقرر، می‌توان از امکانات واسنجی خودکار نرم‌افزارها و تجربه‌ی کارشناسان خبره برای هدایت روند واسنجی 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 سوال‌های 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 سوال‌هایی است که در ابتدای پروژه مشخص شده‌اند. در این رابطه حالت‌های بسیار متنوعی وجود دارند: ممکن است درباره‌ی گزینه‌های مختلف مدیریت مخزن و یا مناسب‌ترین روند مانور دریچه درضمن عملیات رسوب‌شویی و یا خارج کردن جریان غلیظ تصمیم‌گیری 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 تاثیر سیل‌های مختلف بر قسمت‌های مختلف مخزن برآورد شود، ممکن است تصمیم‌هایی درباره‌ی طرح دریچه‌های آبگیر برای سد در دست طراحی گرفته شود، ممکن است طرح‌های سازه‌ای یا غیرسازه‌ای جدیدی برای کنترل و مدیریت بهتر مشکل رسوب در سد یا پایین‌دست آن بررسی و مقایسه شوند و یا به سوال‌های مشخص دیگری در رابطه با راندمان تله‌اندازی سد، روند تغییر هندسه‌ی بستر به ازای گزینه‌های مختلف و یا فواصل زمانی بهینه برای رسوب‌شویی پاسخ داده شود.

omoorepeyman.ir

فصل ۳

بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه رودخانه – مخزن

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۳-۱- کلیات

با بسنده کردن به مطالعه طول اندکی از یک رودخانه، نمی‌توان به شناخت کافی برای مدیریت بهینه آن و تاثیرش بر محیط زیست اطراف - حتی در همان بازه کوتاه - دست یافت. اگر یک یا چند سد در مسیر رودخانه واقع باشند، مطالعه‌ی توام سامانه‌ی رودخانه - مخزن اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این موارد، هم تاثیر عملکرد مخزن سد بر رودخانه پایین‌دست و هم تاثیر رودخانه بالادست بر مخزن نیازمند بررسی است.

۳-۲- تاثیر متقابل رودخانه و مخزن سد

پس از ساخته شدن سد بر رودخانه، قسمتی از رود که در پایین‌دست سد می‌باشد، در شرایط غیرتعادلی 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 پایین‌دست 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 پایین‌دست به سمت تعادل جدیدی خواهد رفت. عوامل دیگری نیز در این فرآیند زنجیره‌ای موثر 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. این‌روند 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 پایین‌دست 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 پایین‌دست، تاثیر می‌گذارد.

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

مخزن سد، علاوه بر رودخانه پایین‌دست، بر ناحیه‌ای از رودخانه بالادست نیز تاثیر می‌گذارد. بالا آمدن آب ناشی از ساخت سد، باعث می‌شود که طول قابل توجهی از رودخانه‌ی بالادست به زیر آب رفته و قسمتی از مخزن سد شود.

omoorepeyman.ir

شکل‌گیری دلتای رسوبی نیز باعث بالا آمدن تراز بستر و تاثیر آن بر رودخانه‌ی بالادست می‌شود. مدتی پس از احداث سد، تراز آب در قسمتی از رودخانه‌ی بالادست، به ازاء بده جریان معین، بیش‌تر از گذشته بالا خواهد رفت. علت این امر آن است که هم تراز بستر در محل دلتا و بالادست آن بالا می‌رود و هم پوشش گیاهی جدیدی بر این بستر رسوبی جدید شکل می‌گیرد که زبری مقطع را افزایش می‌دهد. اینکه تاثیر سد بر رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ی بالادست تا چه مسافتی قابل توجه خواهد بود، می‌تواند به وسیله‌ی شبیه‌سازی عددی یک‌بعدی برآورد شود.

۳-۳- روش‌های شبیه‌سازی رودخانه با دیدگاه رسوب‌گذاری در مخزن

رفتار هر رودخانه، تحت تاثیر 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 بالادست 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 هیدرولوژیک و یا روش‌های هیدرولیک استفاده کرد. در روش‌های هیدرولوژیک، می‌توان اثر مخزن سد را به طور کلی و به صورت یکپارچه منظور کرد. با این روش‌ها، نمی‌توان درباره جزییات 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 یک‌بعدی شبیه‌سازی شود. در این حال ترجیح بر آن است که مخزن سد نیز در صورت امکان به صورت یک‌بعدی مدل شود. اگر هدف از ترکیب شبیه‌سازی رودخانه و مخزن، مطالعه طول قابل توجهی از رودخانه با لحاظ کردن تاثیر مخزن در میان آن باشد، اولین گزینه‌ی مورد بررسی، شبیه‌سازی مخزن با مدل هیدرولوژیک یا مدل یک‌بعدی خواهد بود.

برای شبیه‌سازی بازه زمانی یا مکانی طولانی از یک رودخانه، ممکن است به‌کارگیری مدل یک‌بعدی 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.

omoorepeyman.ir

۳-۴- 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 مسایل 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 تاثیر شرایط سیلابی رخ می‌دهند. این مساله باعث ایجاد محدودیت در استفاده از مدل‌های جریان ماندگار در مخازن می‌شود. در بسیاری از موارد، برای بررسی اثر شرایط غیرسیلابی در مخازن، می‌توان از مدل‌های شبه‌ماندگار استفاده کرد. این روش در مسایل 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 غیرسیلابی 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 به‌کار 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. به‌کارگیری 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

omoorepeyman.ir

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 غیرماندگار، 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 تاثیر 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.

۳-۵- 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 یک‌بعدی 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 تامین می‌کند.

در روش‌های روندیابی هیدرولوژیک نیز می‌توان سامانه رودخانه و مخزن را به صورت توام 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 هیدرولوژیک، 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 هیدرولوژیک استفاده کرد.

omoorepeyman.ir

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

در مطالعات چندمنظوره، زمانی که هم اهداف کوتاه‌مدت و هم اهداف بلندمدت مدنظر باشد، بهتر است که کل سامانه به سه قسمت «رودخانه بالادست»، «مخزن» و «رودخانه پایین‌دست» 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 تاثیر سد مخزنی بر رودخانه پایین‌دست مد نظر باشد، تلفیق شبیه‌سازی مخزن سد و رودخانه‌ی پایین‌دست آن وجود ندارد. در چنین حالتی می‌توان اثر مخزن را در قالب شرایط یا گزینه‌های بهره‌برداری مختلف به صورت شرایط مرزی در شبیه‌سازی رودخانه پایین‌دست منظور کرد.

در بعضی از مدل‌های دوبعدی قدیمی که براساس مدل‌های یک‌بعدی و روش Stream Tube توسعه یافته‌اند، باید برای ناحیه انتقالی بین رودخانه و مخزن از یک تئوری مناسب پخش جت استفاده کرد. در مدل‌های دوبعدی 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 مسایلی از نوع مطرح شده راه‌گشا می‌باشد.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۴

بررسی راه‌های مطالعه توام سامانه‌های رودخانه‌ای چند مخزنی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۴-۱- کلیات

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 و شاخص‌های اقتصادی - فنی وابسته 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 بالادست و پایین‌دست عمل خواهد کرد.

توصیه می‌شود که برای شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در سامانه‌های چند مخزنی، در صورت امکان از یک مدل یکپارچه - ترجیحا یک‌بعدی - استفاده شود. اگر ترکیب دو مدل - مثلا یک‌بعدی و دوبعدی قائم - اجتناب‌ناپذیر باشد، بهتر است که مدل‌ها با هم متصل بوده و به طور خودکار با یکدیگر تبادل اطلاعات کنند. توام 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.

۴-۲- سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه‌های یکپارچه چند مخزنی

در سامانه‌های چند مخزنی، ممکن است رسیدن به حداکثر تخلیه رسوب از مخازن بالادست بهترین اندیشه نباشد، بلکه باید بهترین عملکرد کل مجموعه را هدف‌گیری کرد. برای این کار از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های بهینه‌سازی براساس هدف‌ها و قیدها تنظیم می‌شوند. هدف‌ها براساس مشکلات رسوب‌گذاری و فرسایش در کل شبکه و لحاظ کردن عوامل اقتصادی 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. شاخص‌های اقتصادی - فنی هر قسمت از سامانه در قالب اهداف و قیدها مورد توجه قرار می‌گیرند.

omoorepeyman.ir

۴-۳- روش انجام کار

برای کنترل رسوبگذاری و فرسایش در سامانه‌های چند مخزنی، متغیرهای تصمیم براساس 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، شامل تابع هدف برای حداقل 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. می‌توان بسته به شرایط، اهداف متفاوتی را به عنوان تابع هدف در نظر گرفت. معادله‌های انتقالی شامل معادله‌های پیوستگی رسوب و جریان، معادله‌های انرژی و مانینگ و معادله انتقال رسوب می‌باشد.

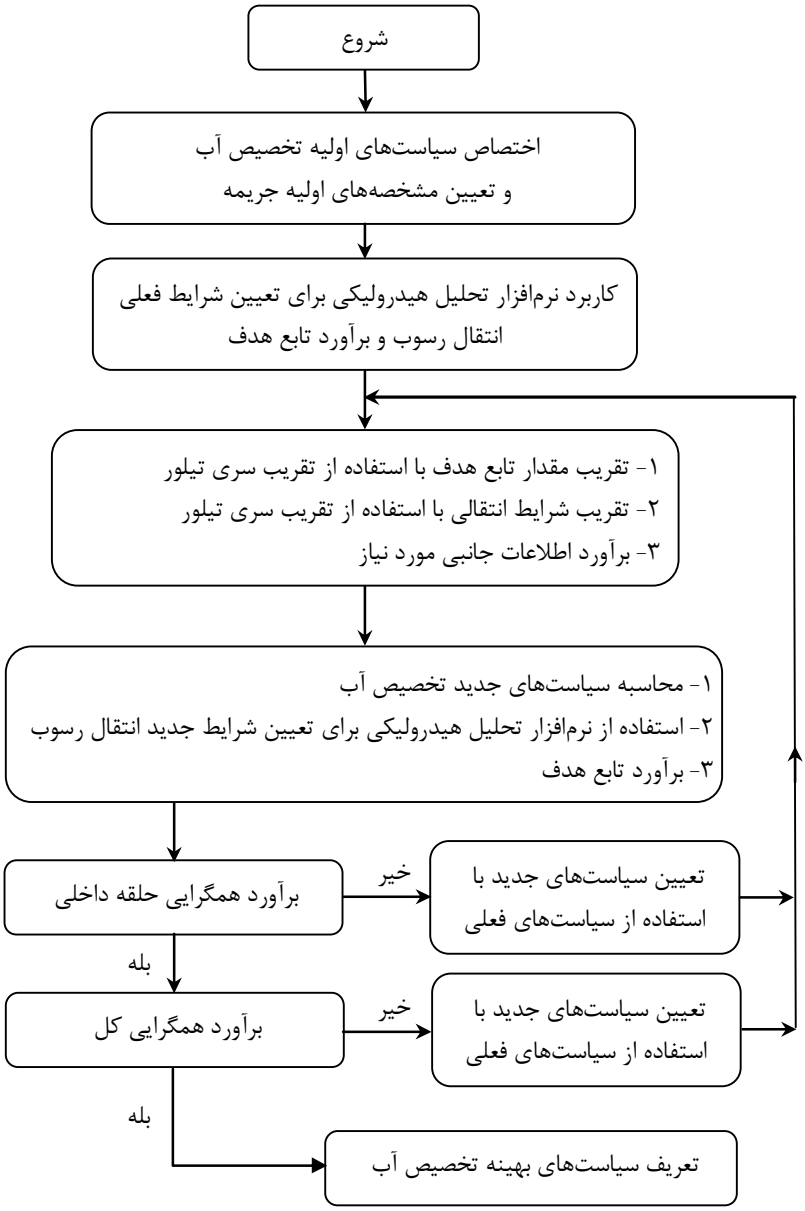
برای استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی در مدل‌های بهینه‌سازی سامانه‌های چند مخزنی، لازم است که چند تئوری به این مدل‌ها اضافه شود. اولین مورد، اضافه کردن اطلاعات تکمیلی ورودی برای توصیف شکل شبکه و شرایط مرزی داخلی مانند رابطه بین میزان حجم ذخیره و سطح آب مخزن، سیاست‌های اولیه تخصیص آب، حجم ذخیره اولیه و نرخ تلفات مخزن می‌باشد [۵۳]. بیش‌تر مدل‌های هیدرولیکی، رفتار مخزن را با توجه به ارتفاع سطح آب آن کنترل می‌کنند. بنابراین یک زیربرنامه برای روندیابی حجم ذخیره مخزن براساس ارتفاع آب آن، به مدل بهینه‌سازی اضافه می‌شود. روندیابی تغییرات حجم ذخیره مخزن، براساس پیوستگی جرم در مخزن انجام می‌شود. رابطه‌ی مربوط شامل ماتریسی است که ارتباط یا عدم ارتباط مستقیم بین مخازن مختلف با یکدیگر را بیان می‌کند. براساس این رابطه، می‌توان حجم ذخیره مخزن را محاسبه و از آن برای تعیین شرایط مرزی داخلی - به صورت ارتفاع جدید سطح آب مخزن - استفاده کرد.

منحنی حجم ذخیره برحسب 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 خط‌القعر (تالوگ) و حجم ذخیره مخزن نیز بعد از هر بازه زمانی محاسبه و ذخیره می‌شوند.

برای حل مساله کنترل رسوب، از یک تابع جریمه[1] برای ادغام قیدها استفاده می‌شود. با استفاده از این تابع، در شرایطی که یک یا چند قید رعایت نمی‌شود، یک هزینه بالا به تابع هدف اضافه می‌شود. انواع مختلف تابع جریمه با پیچیدگی و مشخصه‌های متفاوت وجود دارند. برای حل این مجموعه می‌توان از روش بهینه‌سازی SALQR مطابق نمودار (۴-۱) استفاده کرد. پیوست همین نشریه حاوی توضیحات بیش‌تری در رابطه با روابط مورد استفاده برای بهینه‌سازی می‌باشد.

1- Penalty Function

omoorepeyman.ir



نمودار ۴-۱- روش SALQR برای بهینه‌سازی در مسائل کنترل رسوب

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۵

ارائه مدل‌های عددی منتخب و مناسب جهت شبیه‌سازی انتشار رسوب

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۵-۱- مقدمه

در این بخش بحث کوتاهی در مورد نحوه انتخاب مدل مناسب با توجه به شرایط مساله ارائه می‌گردد. جهت شبیه‌سازی انتقال رسوب از مدل‌های فیزیکی، عددی و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌گردد. صرف‌نظر از مقرون به صرفه بودن زمانی و اقتصادی فراوان مدل‌های عددی نسبت به فیزیکی، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های فیزیکی در این است که در مدل‌های عددی نیاز به استفاده از مقیاس کج و اثرات ناشی از آن در شبیه‌سازی نیست و مقیاس در هر سه بعد یکسان در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های عددی حمل رسوب معمولا طبق معیارهای زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- بر اساس نوع کاربرد آن‌ها و نحوه ارتباط مولفه‌های هیدرودینامیک سیال و رسوب با یکدیگر از قبیل شبیه‌سازی بار معلق و یا بستر، انتقال فیزیکی و یا شیمیایی و غیره
۲- نوع فرمول‌بندی در زمان و مکان مانند یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی
۳- بر اساس ماهیت زمانی مدل مانند دائمی یا غیردائمی بودن
۴- قابلیت پیشگویی مدل
۵- نوع شبکه مورد استفاده در مدل و روش مدل‌سازی روابط حاکم (اختلاف‌های محدود[1]، اجزا محدود[2] و احجام محدود[3])
۶- شبیه‌سازی رفتار رسوب از قبیل چسبنده و یا غیرچسبنده بودن

انتخاب یک مدل خاص براساس برآورد معیارهای فوق و با توجه به طبیعت و پیچیدگی مساله، داده‌های لازم و در دسترس جهت ورودی به مدل و صحت‌سنجی آن و همچنین اهمیت زمان تحلیل عددی، انجام می‌گیرد. جدول (۵-۱) به صورت خلاصه خصوصیات لازم جهت انتخاب یک مدل را با توجه به شرایط مساله، ارائه می‌دهد.

همچنین در این فصل به صورت خلاصه، خصوصیات تعدادی از مدل‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی حمل رسوب به تفکیک یک، دو و سه‌بعدی به ترتیب در جدول‌های (۵-۲) تا (۵-۴) ارائه شده‌اند. انتخاب مدل مناسب از هر یک از این جداول منوط به این است که قبلا نوع مساله از نظر یک، دو و یا سه‌بعدی بودن مشخص شده باشد. اگرچه معیارهای این انتخاب قبلا توضیح داده شده‌اند اما در شکل (۵-۱)، یک مثال ساده جهت روشن شدن نحوه انتخاب ابعاد مدل مناسب برای حل مساله انتقال رسوب نمایش داده شده است.

انتخاب مدل علاوه بر موارد ذکر شده قبلی (به طور خاص مطالب بخش ۵-۱ و ۵-۲)، به مقیاس زمانی و مکانی مساله نیز مرتبط است. مثلا تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه معمولا بایستی مقیاسی در حد یک حوضه آبریز (با طول بزرگ‌تر از ۱۰ کیلومتر) و دوره زمانی بیش از ۱ سال داشته باشند. در چنین شرایطی معمولا یک مدل یک بعدی یا

1- Finite Difference
2- Finite Element
3- Finite Volume

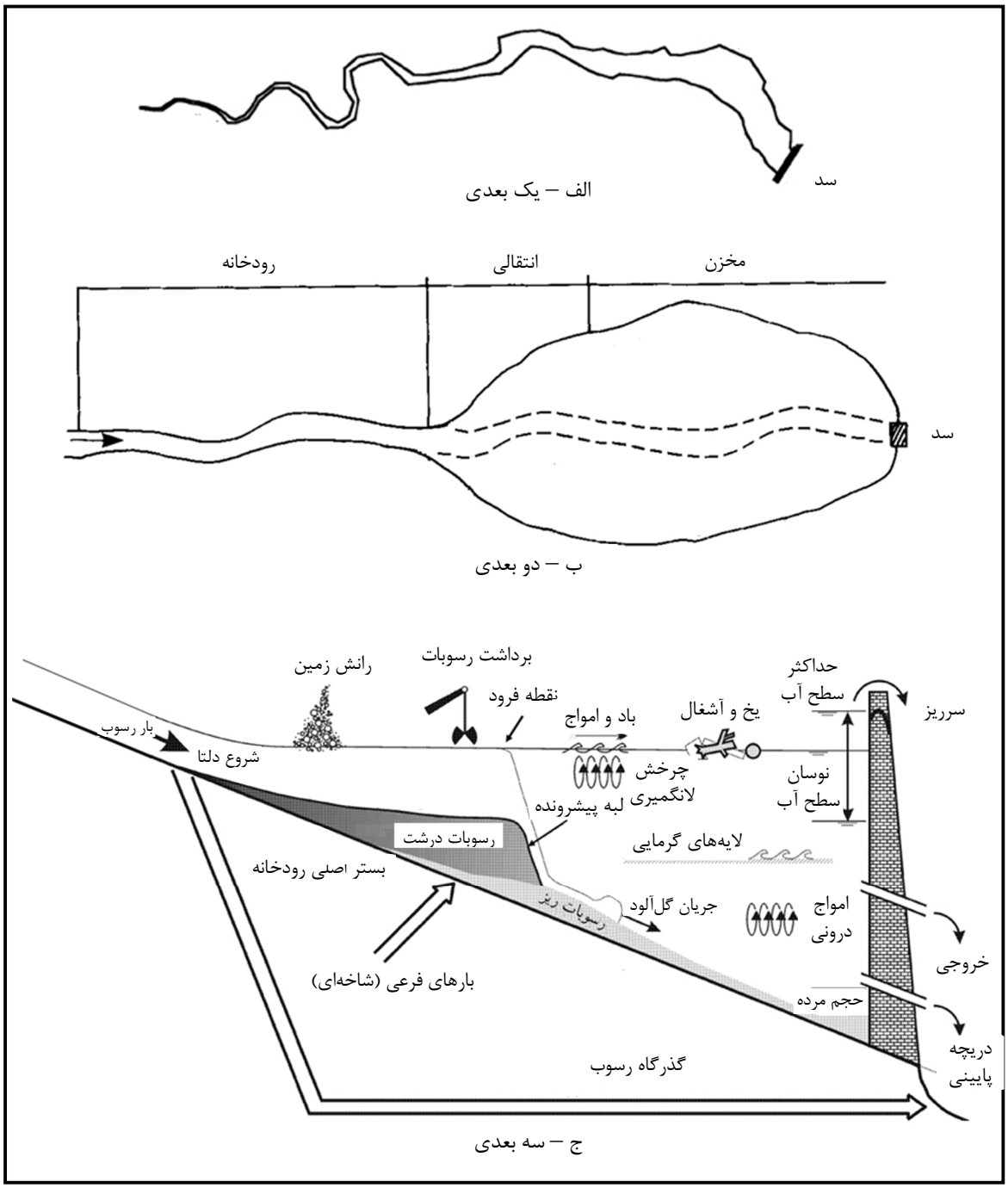
omoorepeyman.ir

دو بعدی مناسب است. اما برای شبیه‌سازی خم رودخانه، اطراف یک سازه هیدرولیکی، جزییات جریان در مقیاس کوچک و غیره که زمانی در حد چند ثانیه یا چند ساعت دارند معمولا استفاده از مدل سه بعدی مناسب‌تر است.

جدول ۵-۱- خلاصه‌ای از خصوصیاتی که یک مدل بایستی جهت شبیه‌سازی یک مساله فرضی دارا باشد (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸)

نوع مساله	مدل دو بعدی (میانگین‌گیری شده در عمق)	مدل سه بعدی	فرض هیدرواستاتیک در حالت سه بعدی مناسب است؟	به کارگیری جریان غیردائمی لازم است؟	توانایی شبیه‌سازی رسوب مختلط در مدل نیاز است؟	تمایز بار بستر و بار معلق نیاز است؟
رسوبگذاری در مخزن	اغلب مواقع کافی است.	در مواقعی که مطالعه انتقال رسوب در اطراف سازه‌ای خاص انجام می‌گردد، لازم است.	در مواقعی که مطالعه انتقال رسوب در اطراف سازه‌ای خاص انجام نمی‌گردد، بلامانع است.	متعاقب جریان‌های دائمی معمولاً بلامانع است.	بلی	بلی، مگر اینکه جریان ورودی کاملا از نوع بار بستر باشد.
ته نشینی در حوضه و مخازن	در حالت کلی مرتبط نیست.	برای نمایش اندرکنش بین هندسه و الگوی رسوبگذاری، لازم است.	اگر جریان ساکن است، بلامانع است.	در حالت کلی لازم نیست.	بلی، مگر اینکه بار رسوب همگن باشد.	در حالت کلی لازم نیست.
دینامیک جریان در خم رودخانه‌ها و سازه‌های موضعی موجود در خم	درصورت عدم وجود اثرات جریان ثانویه خاص، کاربرد ندارد.	جهت بدست آوردن اثرات جریان ثانویه، لازم است.	اگر جزئیات جریان در اطراف سازه‌ها مهم نباشد، بلامانع است.	برای مطالعات مربوط به اثرات هیدروگراف، مناسب است.	بلی، مگر اینکه بار رسوب کاملا یکنواخت باشد.	در اکثر رودخانه‌های آبرفتی نیاز است.
دینامیک بستر متحرک در اطراف سازه‌های هیدرولیکی	کاربرد ندارد.	نیاز است.	در حالت کلی مناسب نیست زیرا شتاب‌های عمودی مهم هستند.	در حالت کلی لازم نیست.	بلی، مگر اینکه بار رسوب کاملا یکنواخت باشد.	در اکثر رودخانه‌های آبرفتی نیاز است.
تغییرات دراز مدت بستر	در حالت کلی مرتبط نیست.	در صورتی‌که مطالعه موضعی بخشی از یک مدل یک بعدی بزرگ مد نظر باشد، نیاز است.	ممکن است برای شبیه‌سازی طولانی مدت لازم باشد.	جهت بررسی سری هیدروگراف‌های سالانه لازم است.	بلی درصورتی‌که در سرتاسر مدل یک بعدی لازم باشد.	بلی درصورتی‌که در سرتاسر مدل یک بعدی لازم باشد.
جذب آلودگی و انتقال آن	ممکن است مناسب باشد.	ممکن است نیاز باشد.	اگر اندرکنش ساختار جریان و رسوب مدنظر نیست، بلامانع است.	برای مطالعات مربوط به معلق شدن دوباره رسوبات در حین سیلاب‌ها، لازم است.	اگر تمرکز به طور کلی بر روی رسوبات ریزدانه آلوده است، ممکن است نیاز نباشد.	انتقال-پخش بار معلق نیاز است.

omoorepeyman.ir



شکل ۵-۱- مثالی از انتخاب مدل چند بعدی با توجه به نوع مساله

(الف): شبیه‌سازی انتقال رسوب در مقیاس حوضه آبریز (طول بیش از ۱۰ کیلومتر) و برای دوره زمانی طولانی (بیش از یک سال) مورد نظر است، (ب): شبیه‌سازی انتقال رسوبات در پلان مخزن و ریخت‌شناسی رودخانه به صورت متوسط عمقی مورد نظر است، (ج): شبیه‌سازی هندسه رسوبات در اطراف خروجی سد و یا سازه‌های موضعی (اطراف پایه پل‌ها و غیره) و جاهایی که پراکندگی مولفه‌های سرعت در عمق مهم می‌باشد (و معمولا برای یک دوره زمانی کوتاه)، مورد نظر است. (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸)

omoorepeyman.ir

۵-۲- مدل‌های یک بعدی انتقال رسوب

با اینکه این مدل‌ها از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی به وجود آمدند اما با توجه به سرعت بالا در اجرا، داده‌های اندک مورد نیاز برای ورودی مدل و سادگی در استفاده، مدل‌های یک بعدی همچنان به صورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولا مدل یک بعدی برای تخمین تغییرات کلی در طول کانال و در شرایطی که اتفاقات در پیرامون یک سازه خاص (دریچه‌ها، پایه پل و غیره) مورد نیاز نیست، کاربرد موثری خواهند داشت. جدول (۵-۲)، تعدادی از مدل‌های پر کاربرد یک بعدی را به همراه مشخصات هریک نمایش می‌دهد.

۵-۳- مدل‌های دو بعدی انتقال رسوب

مدل‌های دو بعدی که از ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی بوجود آمدند در واقع مدل‌های متوسط گرفته شده در عمق و دو بعدی در پلان می‌باشند که قابلیت تغییرات مکانی در پارامترهای عمق آب و تراز بستر در پلان رودخانه، آبگیر و مخازن را مهیا نموده و امکان محاسبه مولفه‌های سرعت جریان را به صورت متوسط‌گیری شده در عمق، فراهم می‌سازد. اکثر مدل‌های دوبعدی، معادلات پیوستگی متوسط گرفته شده در عمق و ناویراستوکس را به همراه معادله تعادل جرم رسوب به روش‌های اختلاف‌های محدود، اجزا محدود و احجام محدود شبیه‌سازی می‌نمایند. جدول (۵-۳)، تعدادی از مدل‌های پر کاربرد دو بعدی را به همراه مشخصات هریک نمایش می‌دهد.

۵-۴- مدل‌های سه بعدی انتقال رسوب

در مواقعی که جزییات جریان و انتقال رسوب به صورت موضعی مانند اطراف پایه پل، نزدیک سازه‌های هیدرولیکی خاص نظیر دریچه‌ها و غیره و جاهایی که پراکندگی مولفه‌های سرعت در عمق مهم می‌باشند، بایستی از مدل‌سازی سه بعدی استفاده نمود. اکثر مدل‌های سه بعدی معادلات پیوستگی و ناویر استوکس را به همراه معادله تعادل جرم رسوب به روش‌های اجزا محدود، اختلاف‌های محدود و یا احجام محدود شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین، در این‌گونه مدل‌ها از روش میانگین رینولدز ناویراستوکس (RANS) جهت حل معادلات حاکم استفاده می‌شود. مدل‌های RANS به دو صورت هیدرواستاتیکی و غیر هیدرواستاتیکی تقسیم می‌شوند. مدل‌های هیدرواستاتیکی جهت پیشگویی جریان و انتقال رسوب در ناحیه‌هایی که جریان شدیدا سه بعدی بوده و جاهایی که گرادیان معکوس فشار یا جدایی جریان شدید وجود دارد (مانند خم رودخانه به همراه سازه هیدرولیکی) مناسب نیستند. از طرفی دیگر، مدل‌های RANS غیرهیدرواستاتیک قابلیت تحلیل جریانات ثانویه در نواحی پیچیده را دارند. جدول (۵-۴)، تعدادی از مدل‌های پرکاربرد سه بعدی را نمایش می‌دهد.

omoorepeyman.ir

۵-۵- مدل‌های هیدرولوژیک

در بسیاری از شبیه‌سازی‌های جریان و حمل رسوب نیاز به انجام مطالعات هیدرولوژیک و یا شبیه‌سازی عددی پروسه رواناب است.

جدول ۵-۲- مدل‌های منتخب یک بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
HEC6 (Hydraulic Engineering Center)	دائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Thomas and Prashum (1977)
	توضیحات: - قابلیت تجزیه افت‌های انرژی را به افت شکل (form loss) و افت اصطکاک سطح را دارد. - در این مدل معادله دیفرانسیل بقا انرژی و جرم به همراه معادله پیوستگی جرم رسوب (معادله Exner) مورد استفاده قرار گرفته است.									
MOBED (Mobiled Bed)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Krishnappan (1981)
	توضیحات: - قابلیت پیشگویی مشخصات رسوب بستر جریان را به صورت تابعی از زمان و مکان برای جریان‌های مختلف هیدروگراف را دارد.									
IALLUVIAL (Iowa Alluvial)	شبه دائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن۴	راست خط	اختلاف محدود	Karim and Kennedy (1982)
	توضیحات: - برای جریان‌های غیردائمی قابل کاربرد نیست.									
Fluvial 11	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن۴	منحنی الخط	اختلاف محدود	Chang (1984)
	توضیحات: - قابلیت در نظرگرفتن جریان‌های ثانویه در یک کانال منحنی را بوسیله تنظیم سرعت جریان در راستای کانال را دارد. - تغییرات در پروفیل بستر کانال، عرض و تغییرات کناره‌ها را در خم کانال دارد.									
GSTARS (Generalized sediment transport models for alluvial River simulation)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰ و ۹۵	راست خط	اختلاف محدود	Molinas and Yang, 1986
	توضیحات: - از تئوری حداقل توان رودخانه (minimum stream power) جهت تعیین عرض بهینه کانال و هندسه آن بر اساس شرایط هیدرولیکی داده شده استفاده می‌کند.									
CHARIMA	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Holly et al. 1990
	توضیحات: - قابلیت شبیه‌سازی انتقال و انتشار آلودگی و گرما را دارد.									
SEDICOUP (Sediment Coupled)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Holly and Rahuel 1990
	توضیحات:									

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۵-۲- مدل‌های منتخب یک بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
OTIS (One-Dimensional Transport with Inflow and Storage)	غیردائمی	خیر	بلی	خیر	خیر	انتقال - پخش	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Runkel and Broshears 1991
	توضیحات: - قابلیت پیشگویی بار رسوب کل و توزیع سایزبندی رسوبات غیریکنواخت را ندارد. - معادله انتقال – پخش را با افزودن عبارت‌هایی در آن به صورتی اصلاح نموده‌اند که مدل قادر است جریان ورودی جانبی، تنزیل (decay) مرتبه اول، جذب غیر محافظه کارانه مواد محلول و ذخیره گذرا این مواد محلول را در نظر بگیرد. - قابلیت شبیه‌سازی انتقال و انتشار آلودگی و گرما را دارد.									
EFDCID (Environmental Fluid Dynamics Code)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Hamrick 2001
	توضیحات: - قابلیت کاربرد در شبکه رودخانه‌ها را دارد									
3STD1 (Steep Stream Sediment Transport 1D Model)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Papanicolaou et al. 2004
	توضیحات: - قادر به تفکیک بار رسوب کل به بار بستر و بار معلق نیست. - قابلیت پیشگویی پرش هیدرولیکی و شبیه‌سازی جریانات فوق بحرانی را دارد.									

همه مدل‌های ارائه شده در جدول (۵-۲) دارای قابلیت‌های زیر هستند:

- در همه این مدل‌ها به جز HEC-6، معادله دیفرانسیلی بقا جرم و مومنتم (معادلات سنت ونانت) به همراه معادله پیوستگی جرم رسوب (معادله Exner) مورد استفاده قرار گرفته است.
- قابلیت پیشگویی پارامترهای اساسی کانال مانند سرعت حجمی (Bulk Velocity)، تراز سطح آب، تغییرات تراز بستر و انتقال بار رسوب را دارند.
- همه مدل‌های بجز مدل OTIS، قابلیت پیشگویی بار رسوب کل، توزیع سایز دانه‌بندی رسوبات غیر یکنواخت را دارند.

جدول ۵-۳- مدل‌های منتخب دو بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
SERATRA (Sediment and Radionuclide Transport)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال - پخش	فرترن ۴	راست خط	اجزا محدود	Onishi and Wise 1982
	توضیحات: - یک مدل حمل رسوب و آلودگی می‌باشد. - شامل معادلات کلی انتقال- پخش بوده و عبارات چاه و چشمه را شامل می‌باشد. - قابلیت پیشگویی جریان سطحی و آلودگی و پخش آن در داخل کانال را داراست که جهت ارزیابی کوتاه مدت و بلند مدت تغییرات بیولوژیکی کانال‌ها مناسب است.									
SUTRENCH -2D (Suspended Sediment Transport in Trenches)	شبه دائمی	بلی	بلی	خیر	خیر	انتقال - پخش	فرترن ۹۰	راست خط	حجم محدود	Van Rijn and Tan 1985
	توضیحات: - جهت شبیه‌سازی انتقال رسوب و تغییرات متناظر سطح بستر آن و تحت شرایط ترکیبی جریانات شبه دائمی و موجی تولید شده توسط باد روی بستر رسوبی، مناسب می‌باشد. - معادلات کلی انتقال- پخش را به وسیله در نظر گرفتن یک ضریب تاخیر جهت محاسبه ته نشینی رسوبات، تحلیل می‌نماید. - برای شرایط جریان غیردائمی مناسب نیست.									

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۵-۳- مدل‌های منتخب دو بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
TABS-2	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اجزا محدود	Thomas and McAnally 1985
	توضیحات: یک گروه از برنامه‌های کامپیوتری هستند که بر پایه شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوبات در رودخانه‌ها، مخازن و خورها طراحی شده‌اند و شامل اجزا زیر است: - RMA2: شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان - SED2D (STUDH): شبیه‌سازی انتقال رسوب - RMA4: شبیه‌سازی کیفیت آب									
MOBED2 (Mobile Bed)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	منحنی - الخط	اختلاف محدود	Spasojevic and Holly 1990
	توضیحات: - قابلیت‌های مدل عبارتند از شبیه‌سازی جریان آب، انتقال رسوب و تغییرات سطح بستر در مسیرهای طبیعی انتقال جریان از قبیل مخازن، خورها و سواحل که میانگین عمق مناسب است. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد.									
ADCIRC (Advanced Circulation)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال - پخش	فرترن ۹۰	راست خط	اجزا محدود	Luettich et al. 1992
	توضیحات: - برای شبیه‌سازی ناحیه محاسباتی‌های بزرگ مقیاس (مثلا طول کل ساحل یک کشور) می‌باشد. - در این مدل از فرمول‌بندی پیوستگی معادلات جریان کم عمق جهت حل روندهای وابسته زمانی، چرخش سطح آزاد و انتقال استفاده شده است.									
MIKE 21	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Danish Hydraulic Institute 1993
	توضیحات: - جهت شبیه‌سازی انتقال و انتشار بارهای معلق و غیر محلول که در جریان وجود داشته و یا به صورت تصادفی در یک محل وارد آبگیرها، خورها، سواحل و یا دریاها می‌گردند. - این مدل شامل ۴ گروه اصلی (مدول) می‌باشد که عبارتند از: • مدل هیدرودینامیک جریان و مدل موج: جهت شبیه‌سازی پهنه‌بندی سیل • مدل پروسه انتقال رسوب: جهت شبیه‌سازی تغییرات بستر و انتقال رسوب • گروه مدل‌های هیدرودینامیک زیست محیطی: جهت شبیه‌سازی کیفیت آب									
UNIBEST-TC (Uniform Beach Sediment Transport – Transport Cross Shore)	شبه دائمی	بلی	بلی	خیر	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Bosboom et al. 1997
	توضیحات: - در این مدل انتقال بار بستر و بار معلق بوسیله فرض شرایط تعادل محلی و بدون در نظر گرفتن اثرات تاخیر بین جریان و رسوب، شبیه‌سازی می‌گردد. - برای شرایط جریان غیردائمی مناسب نیست.									
USTARS (Unsteady Sediment Transport Models for Alluvial Rivers Simulations)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Lee et al. 1997
	توضیحات: - یک فرم اصلاح شده از GSTARS است که مانند آن بر پایه مفهوم لوله جریان می‌باشد. - مانند مدل GSTARS، در این مدل نیز از تئوری حداقل توان جریان جهت تعیین عرض و هندسه کانال با توجه به شرایط هیدرولیکی، ژئومورفولوژیکی و رسوب استفاده می‌شود. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد.									

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۵-۳- مدل‌های منتخب دو بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
FAST2D (Flow Analysis Simulation Tool)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	منحنی الخط	حجم محدود	Minh Duc et al. 1998
	توضیحات: - یک مدل با سیستم مختصات منحنی‌الخط و با شبکه مرزی هم اندازه شده (Boundary-Fitted grid) می‌باشد. - این مدل جهت شبیه‌سازی انتقال رسوب و مسایل ریخت‌شناسی در کانال‌های آبرفتی مناسب می‌باشد. - در این مدل اثرات ثانویه ناشی از پیچیدگی ناحیه محاسباتی به صورت غیرمستقیم در نظر گرفته شده است. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد اما محدود به استفاده از سایز رسوب یکنواخت می‌باشد.									
FLUVIAL 12 (Steep Stream Sediment Transport 1D Model)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	منحنی الخط	اختلاف محدود	Chang 1998
	توضیحات: - ترکیبی از اثرات هیدرولیک جریان، انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه بوسیله جریان توسط این مدل قابل شبیه‌سازی هستند. - یک مدل بستر متحرک می‌باشد که قابلیت شبیه‌سازی تغییرات پروفیل بستر رودخانه و عرض آن و همچنین رسوبات در انحنای رودخانه را مهیا می‌سازد. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد.									
Delft 2D	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال - پخش	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Walstra et al. 1998
	توضیحات: - این مدل قابلیت شبیه‌سازی بار بستر و معلق انتقالی را به وسیله هر دو روش تعادل محلی و غیرتعادلی (اثرات تاخیر بین جریان و رسوب) دارد. - محاسبات تغییرات ریخت‌شناسی بستر را با زمان انجام می‌دهد. - این مدل همچنین می‌تواند اثرات حرکت موج بر روی انتقال رسوب و جهت آن، شبیه‌سازی کند. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد اما محدود به استفاده از سایز رسوب یکنواخت می‌باشد.									
CCHD2D (The National Center for Computational Hydroscience and Engineering)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال - پخش	فرترن ۹۰ و ۷۷	راست خط	اجزا محدود	Jia and Wang 1999
	توضیحات: - این مدل رسوب معلق را به وسیله حل معادله انتقال- پخش و انتقال بار بستر را بوسیله معادلات تجربی مثل یالین (۱۹۷۲) و ون راین (۱۹۹۳) شبیه‌سازی می‌کند. - این مدل اثرات جریان ثانویه در کانال‌های منحنی را در نظر می‌گیرد. - قابلیت تجزیه کل بار رسوب به بار بستر و بار معلق را دارد.									

همه مدل‌های موجود در جدول (۵-۳)، قابلیت شبیه‌سازی کل بار رسوب انتقالی را دارند.

omoorepeyman.ir

جدول ۵-۴- مدل‌های منتخب سه بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
ECOMSED (Estuarine, Coastal and Ocean Model – Sediment Transport)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	منحنی‌الخط متعامد	اختلاف محدود	Blumberg and Mellor 1987
	توضیحات: - یک مدل کاملا یکپارچه سه بعدی از هیدرودینامیک جریان، موج و انتقال رسوب به روش اختلاف محدود است که از سیستم مختصات منحنی‌الخط متعامد (راست‌گوشه) استفاده می‌نماید. - این مدل از فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک استفاده نموده و قابلیت پیشگویی پروسه انتقال رسوب را در نواحی محاسباتی بسیار بزرگ مثل آبگیرها و اقیانوس‌ها دارد. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد. - قادر به تفکیک بار کل رسوب به بار بستر و معلق نیست.									
RMA-10 (Resource Management Associates)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اجزا محدود	King 1988
	توضیحات: - قابلیت شبیه‌سازی تراز سطح آزاد آب و مولفه‌های افقی سرعت را برای جریان سطح آزاد ورقه ورقه‌ای دارد. - این مدل برای جریاناتی توسعه داده شده است که می‌توان در آن‌ها از مولفه شتاب قایم صرف‌نظر کرد (فرض فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است). - این مدل معادله انتقال را برای شوری، دما و رسوبات معلق شبیه‌سازی کرده و اثر این پارامترها را بر چگالی در نظر می‌گیرند. - این مدل مناسب شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در جذر و مدهای هموار (flat) می‌باشد. - این مدل یکی از اجزا مدل TABS-MD می‌باشد. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد. - قادر به تفکیک بار کل رسوب به بار بستر و معلق نیست.									
GBTOXe (Green Bay Toxie Enhancement)	غیردائمی	خیر	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست خط	اختلاف محدود	Bierman et al. 1992
	توضیحات: - برای پیشگویی پروسه انتقال رسوب در محیط‌های رودخانه‌ای طراحی شده است. - جز هیدرودینامیکی این مدل یعنی GBHYDRO فشار را هیدرواستاتیک فرض کرده و برای چرخش ستون آب و روندهای درهم به کار می‌رود. - جز انتقال رسوب آن یعنی GBSED برای انتقال رسوبات چسبنده در نظر گرفته شده است. - قابلیت پیشگویی بار رسوب کل را ندارد. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد.									
EFDC3D (Environmental Fluid Dynamics Code)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	راست یا منحنی‌الخط	اختلاف محدود	Hamrick 1992
	توضیحات: - یک مدل در یک سیستم مختصات راست‌خط یا منحنی‌الخط متعامد با تقریب سیگما یا کشیده شده (stretched) در راستای قائم می‌باشد. - این مدل معادلات میانگین‌گیری شده سه بعدی، هیدرواستاتیک عمودی، سطح آزاد و آشفته را برای یک سیال با چگالی متغیر شبیه‌سازی می‌نماید. - مدل قابلیت شبیه‌سازی محیط‌های آبی پیچیده مانند جریان‌های درهم عمودی و کم عمق خورها، آبگیرها و سواحل دارد. - این مدل حتی قابلیت پیشگویی انتشار آلودگی و شبیه‌سازی کیفیت آب را نیز دارد. - قابلیت در نظرگرفتن دانه‌بندی رسوبات مخلوط را دارد.									

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۵-۴- مدل‌های منتخب سه بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
ROMS (Regional Ocean Modeling System)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	منحنی الخط	اختلاف محدود	Song and Haidvogel 1994
	توضیحات: - یک مدل با سیستم مختصات منحنی‌الخط متعامد است که از تقریب سیگما یا کشیده شده در راستای عمودی برخوردار است. - این مدل قابلیت شبیه‌سازی چرخش هیدرواستاتیک سطح آزاد اقیانوس را دارد. - این مدل اثر موج‌های سطحی را بر تنش کف و زبری در نظر می‌گیرد. - قابلیت در نظرگرفتن دانه‌بندی رسوبات مخلوط را دارد.									
CH3D-SED (Computational Hydraulics 3D-Sediment)	غیردائمی	بلی	بلی	بلی	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Spasojevic and holly 1994
	توضیحات: - یک مدل که دارای مرزهای هم اندازه شده (fitted) می‌باشد که از سیستم مختصات غیرمتعامد و تقریب سیگما یا کشیده شده در راستای عمودی برخوردار است. - در این مدل از حل معادله تعادل جرم رسوب جهت شبیه‌سازی بار بستر و از معادله انتقال- پخش جهت شبیه‌سازی انتقال بار معلق استفاده می‌شود. - قابلیت در نظرگرفتن دانه‌بندی رسوبات مخلوط را دارد.									
SSIIM (Sediment Simulation in Intakes with Multiblock option)	دائمی	بلی	بلی	بلی	خیر	انتقال - پخش	C	توضیحات	احجام محدود	Olsen 1994
	توضیحات: - یک مدل هیدرودینامیکی جریان و انتقال رسوب به روش احجام محدود است که از یک سیستم غیر سازمان یافته (unstructured) برخوردار است. - این مدل قابلیت شبیه‌سازی انتقال رسوب در یک بستر متحرک رودخانه و با هندسه پیچیده را داراست. - این مدل همچنین قابلیت شبیه‌سازی پیچ و خم (Meandering) و شکل بستر رودخانه را دارد. - قابلیت شبیه‌سازی انتقال بار بستر و بار معلق رسوبات غیریکنواخت و پروسه دانه‌بندی و آرمورینگ را دارد. - این مدل را می‌توان در شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی دیگری از قبیل شبیه‌سازی سرریز، افت در تونل‌ها، پیچ و خم در کانال‌ها جریانات گل‌آلود و کیفیت آب مورد استفاده قرار داد. - برای جریان غیردائمی کاربرد ندارد. - قابلیت در نظرگرفتن دانه‌بندی رسوبات مخلوط را دارد.									
MIKE 3	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اختلاف محدود	Jacobsen and Rasmussen 1997
	توضیحات: - یک مدل از نوع اختلاف‌های محدود با سیستم شبکه متعامد می‌باشد که برای جریانات سطح آزاد طراحی شده است. - این مدل شامل شبیه‌سازی مولفه‌های انتقال- پخش، کیفیت آب، تبادل گرما با اتمسفر، فلزات سنگین، مناطق خشک و سیلابی جذر و مدی و پروسه حمل رسوب می‌باشد. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد. - قادر به تفکیک بار کل رسوب به بار بستر و معلق نیست.									

omoorepeyman.ir

ادامه جدول ۵-۴- مدل‌های منتخب سه بعدی (راهنمای شماره ۱۱۰ مهندسی رسوب ASCE چاپ ۲۰۰۸، راهنمای مدل‌سازی رسوب مخازن USSD چاپ ۲۰۱۵ و پاپانیکولو و همکاران ۲۰۰۸)

عنوان مدل	نوع جریان	انتقال رسوب بار بستر	انتقال رسوب بار معلق	رسوب مختلط	رسوب چسبنده	پروسه تبادل رسوب	زبان برنامه	نوع سیستم مختصاتی	روش مدل‌سازی	توسعه دهنده مدل و یا منبع
FAST3D (Flow Analysis Simulation Tool)	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	منحنی الخط	احجام محدود	Landsberg et al. 1998
	توضیحات: - یک مدل کاملا غیر هیدرواستاتیکی سه بعدی با روش احجام محدود است. - در این مدل از الگوریتم دینامیک سیالاتی انتقال شار- تصحیح شده که یک الگوریتم مرتبه بالا و دقت بالاست استفاده شده است. - این مدل قابلیت تحلیل نواحی با هندسه پیچیده را داراست که علت آن اضافه شدن یک قابلیت به آن است که بوسیله الگوریتم جاسازی سلول مجازی (VCE) فراهم شده است. - نرخ بار بستر به صورت غیرتعادلی و نرخ بار معلق به صورت انتقال- پخش در نظر گرفته شده است. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد.									
Delft 3D	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۷۷	منحنی الخط	اختلاف محدود	Delft hydraulics 1999
	توضیحات: - یک سیستم شبیه‌سازی یکپارچه است که دارای شبکه منحنی‌الخط با مرز هم اندازه شده (fitted) می‌باشد. - این مدل شامل هفت بخش بوده که شبیه‌سازی زمانی و مکانی پروسه‌های جریان، موج، کیفیت آب، ریخت‌شناسی، انتقال رسوب و اکولوژی را انجام می‌دهند. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد.									
TELEMAC-3D	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	بلی	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	راست خط	اجزا محدود	Hervouet and Bates 2000
	توضیحات: - قابلیت استفاده در نواحی ساحلی را دارد. - برای تحلیل کیفیت آب، این مدل از معادله انتقال- پخش به همراه عبارتهای اضافی جهت در نظر گرفتن ذخیره گذرا، جریان ورودی جانبی، تنزیل (decay) مرتبه اول و جذب سطحی، بهره می‌گیرد. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد. - قادر به تفکیک بار کل رسوب به بار بستر و معلق نیست.									
Zeng و همکاران	غیردائمی	بلی	بلی	خیر	خیر	انتقال و انباشتگی	فرترن ۹۰	منحنی الخط	اختلاف محدود	Zeng et al. 2005
	توضیحات: - یک مدل سه بعدی کاملا غیر هیدرواستاتیک با سیستم مختصات منحنی‌الخط تعمیم یافته (Generalized) می‌باشد. - در این مدل جهت در نظر گرفتن تغییرات در تراز سطح آزاد آب از شبکه متحرک در راستای عمودی استفاده شده است. - در این مدل از شرایط مناسب سینماتیکی و دینامیکی جهت در نظر گرفتن تغییرات هندسه کف در فرسایش و رسوبگذاری استفاده شده است. - برای شبیه‌سازی رسوبات معلق از معادله انتقال- پخش به همراه عبارت سرعت ته نشینی بهره گرفته شده است. - فقط برای رسوب یکنواخت کاربرد دارد.									

با توجه به اینکه مدل‌های عددی همواره در حال پیشرفت و قدرتمند شدن هستند و بسیاری از مدل‌های هیدرولیکی جدید قادر به شبیه‌سازی انتقال رسوب می‌باشند (مانند مدل HEC-RAS 5 که این ویژگی به آن افزوده شده است)، بایستی در شبیه‌سازی عددی رسوب دقت لازم در انتخاب مدل مناسب را با توجه به ویژگی‌های مدل‌های مختلف، مبذول داشت.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

پیوست ۱

معادلات و روابط

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

پ.۱-۱- معادله‌های حاکم بر جریان و رسوب معلق

پدیده‌های فیزیکی جریان سیال و جابه‌جایی رسوب می‌توانند به وسیله معادلات بقای جرم و اندازه حرکت بـه صـورت مدل ریاضی درآیند. معادله‌های کلی هیدرودینامیک عبارتند از معادله بقای جرم و معادله بقـای مومنتـوم. معادلـه بقـای جرم در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\vec{\nabla}\cdot(\rho\,\vec{v})=0 \qquad (۱)$$

که در آن ρ جرم مخصوص سیال، $\vec{v}$ بردار سرعت سیال و t زمان می‌باشد. اگر سیال غیرقابل تراکم باشد، معادلـه بـالا به شکل زیر در می‌آید:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{v}=0 \qquad (۲)$$

در مختصات دکارتی اگر بردار سرعت با مولفه‌های u، v و w در سه راستای x، y و z معرفی شود، معادله پیوسـتگی عبـارت است از:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۳)$$

اکثر جریان‌های موجود در طبیعت، از نوع جریانات متلاطم می‌باشد. حل عددی مسـتقیم تلاطـم‌هـای بسـیار جزیـی موجود در جریان برای مسایل مخزن سد نه عملی و نه مفید است. برای اجتناب از لزوم حل مستقیم تلاطـم‌هـای جزیـی، هر مولفه سرعت به دو بخش سرعت متوسط و نوسانات جزیی سرعت تقسیم می‌شود. به دلیل اینکه سـرعت متوسـط بـه وسیله انتگرال‌گیری در محدوده زمانی بسیار بزرگ‌تر از زمان ایجاد تلاطم به‌دست می آید، معادله پیوستگی برای متوسط سرعت باز هم به شکل رابطه بالا خواهد بود، اما در حالت جدید مولفه‌های u، v و w نه بیانگر سـرعت لحظـه‌ای نوسـانی، بلکه بیانگر سرعت متوسط هستند.

معادله بقای اندازه حرکت سیال براساس اصل دوم نیوتون درباره رابطه نیرو، شـتاب و جـرم بوجـود آمـده اسـت و در حالت سه‌بعدی برای مسایل مورد نظر این نوشتار مطابق با معادلات ناویر - استوکس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\rho\cdot\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\cdot f_x-\frac{\partial P}{\partial x}+\left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right]\\
&\rho\cdot\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\rho\cdot f_y-\frac{\partial P}{\partial y}+\left[\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right]\\
&\rho\cdot\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=\rho\cdot f_z-\frac{\partial P}{\partial z}+\left[\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right]
\end{aligned} \qquad (۴)$$

این معادلات هم برای جریان آرام و هم برای جریان متلاطم صادق هسـتند، بـا ایـن دو تفـاوت کـه الـف- در جریـان متلاطم متوسط سرعت‌ها جستجو و استفاده می‌شود و ب- توزیع مومنتوم حاصل از لزجـت، محـدود بـه لزجـت ملکـولی نبوده بلکه اثر اغتشاش جریان را نیز در بر می‌گیرد. در مسایل کاربردی رفتار جریان متلاطم می‌باشد.

omoorepeyman.ir

در سمت چپ معادله‌های بالا، جملات اول بیانگر تغییرات زمانی سرعت (شتاب محلی) و جملات بعدی بیانگر تغییرات مکانی سرعت (انتقال) هستند. جملات سمت راست به ترتیب از چپ به راست مربوط به اثر نیروهای حجمی، گرادیان فشار، و توزیع مومنتوم بخاطر تنش برشی و آشفتگی جریان می‌باشند. مهم‌ترین نیروی حجمی وارد بر سیال اثر جاذبه است. در بدنه‌های آبی بسیار بزرگ، اثر گردش کره زمین بر جریان (Coriolis Effect) نیز قابل توجه شده و در قالب نیروهای حجمی به معادله‌ها وارد می‌شود. اثر لزجت آشفتگی، تنش بستر و تنش ناشی از وزش باد بر سطح آب، همگی در قالب آخرین جملات سمت راست به معادلات اندازه حرکت وارد می‌شوند.

برای محاسبه میدان غلظت رسوب معلق از معادله بقای جرم ذرات معلق - پس از متوسط‌گیری زمانی به منظور کنار گذاشتن نوسانات بسیار جزیی مربوط به آشفتگی - به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\partial cu}{\partial x}+\frac{\partial cv}{\partial y}+\frac{\partial cw}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{s,x}\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_{s,y}\frac{\partial c}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_{s,z}\frac{\partial c}{\partial x}-cw_s\right)=S \qquad (۵)$$

که در آن c متوسط غلظت لحظه‌ای ذرات معلق، u، v و w سرعت متوسط در جهات x، y و z محورهای مختصات، $\varepsilon_{s,x}$، $\varepsilon_{s,x}$ و $\varepsilon_{s,x}$ مجموع ضریب‌های پخش‌شدگی ملکولی و تلاطم است. ضریب پخش مربوط به تلاطم بسیار بیش‌تر از ضریب پخش ملکولی است و می‌توان از ضریب پخش ملکولی در مقابل آن صرف‌نظر کرد. w_s سرعت سقوط ذرات در سیال و t زمان است.

برای محاسبه بار معلق می‌توان میدان غلظت رسوب معلق را با میدان سرعت ترکیب کرد. در شرایط ساده یک بعدی و درصورتی‌که رفتار جریان و رسوب در یک ناحیه به طور کامل تابع شرایط موضعی همان ناحیه باشد و از بالادست یا پایین‌دست تاثیر نگیرد، می‌توان از بعضی رابطه‌های تجربی ساده نیز برای تخمین بار رسوب معلق یا مجموع بار رسوب معلق و بار بستر استفاده کرد.

پ.۱-۲- روابط تجربی حمل رسوب

برای تعیین نرخ انتقال رسوب به صورت بار بستر، از روابط تجربی استفاده می‌شود. بعضی از روابط تجربی مجموع بار معلق و بار بستر را تخمین می‌زنند. هر رابطه برای محدوده‌ای خاص از رفتار جریان و مشخصات رسوب (به‌خصوص دانه‌بندی) پیشنهاد شده‌اند. بیش‌تر روابط تجربی - به‌جز آن‌هایی که Yang ارائه کرده - برای شرایط جریان زیر بحرانی تهیه شده‌اند. تفاوت نرخ حمل رسوب محاسبه شده توسط دو روش مختلف می‌تواند زیاد باشد. انتخاب رابطه مناسب برای برآورد نرخ حمل رسوب در هر منطقه باید با دقت انجام گیرد. بیش‌تر روابط تجربی برای شرایط رودخانه‌ای به‌دست آمده‌اند و به‌کارگیری آن‌ها در محیط مخزن باید با احتیاط همراه باشد.

omoorepeyman.ir

متداول‌ترین رابطه‌های تجربی محاسبه نرخ حمل رسوب به شرح زیر هستند:

جدول پ.۱-۱- چند نمونه از روابط تجربی جابه‌جایی رسوب

۱- معادله Laursen	۶- معادله Acker & White	۱۱- معادله Schoklitsch
۲- معادله Engelund	۷- معادله Yang (Sand)	۱۲- معادله Kalinsk
۳- معادله Colby	۸- معادله Yang (Gravel)	۱۳- معادله Rottner
۴- معادله Einstein	۹- معادله Yang (High Concentration)	۱۴- معادله Einstein (bed load only)
۵- معادله Toffaleti	۱۰- معادله Meyer-Peter-Muller	۱۵- معادله Toffaleti (bed load only)

معادله‌های ۱ تا ۹ از جدول بالا مخصوص محاسبه بار کل یعنی مجموع بار معلق و بار بستر هستند. معادله‌های ۱۰ تا ۱۵ به محاسبه بار بستر اختصاص دارند. توضیح این‌روابط در ادامه ارائه شده است.

رابطه تجربی Laursen (1958) در شکل همگن شده‌ی ابعادی‌اش به صورت زیر می‌باشد:

$$C_t = 0.01 \cdot \gamma \cdot \sum_i p_i \cdot \left(\frac{d_i}{D}\right)^{7/6} \cdot \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right) \cdot f \cdot \left(\frac{U_*}{\omega_i}\right) \qquad (۶)$$

که در آن C_t مقدار متوسط غلظت معادل کلی رسوب برحسب وزن بر واحد حجم، U_* برابر با $(gDS)^{1/2}$، p_i درصد وزنی دسته‌ی i ام از دسته‌بندی رسوب برحسب اندازه ذرات، ω_i سرعت سقوط ذرات رسوب با قطر d_i، D عمق آب و τ_{ci} تنش بحرانی برای رسوبات با دانه‌بندی d_i براساس دیاگرام شیلد است. با داشتن سرعت متوسط جریان در مقطع و معلوم بودن سطح مقطع، می‌توان بده رسوب را برحسب غلظت حاصل از این رابطه محاسبه کرد. در رابطه بالا تنش بحرانی براساس مقاومت دانه‌های رسوبی و از رابطه مانینگ به‌دست می‌آید و به شکل زیر است:

$$\tau' = \frac{\rho \cdot V^2}{58} \cdot \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1/3} \qquad (۷)$$

اگرچه رابطه Laursen برحسب غلظت رسوب نوشته شده است، اما هم بار بستر و هم بار معلق را در بر می‌گیرد. بنابراین می‌توان C_t را غلظت معادل نامید. ضریب $\left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right)$ در رابطه مورد بحث برای محاسبه بار بستر مهم بوده و ضریب $\left(\frac{U_*}{\omega_i}\right)$ مربوط به محاسبه بار معلق می‌باشد.

رابطه تجربی Engelund-Hansen(1972) مقدار جابه‌جایی رسوب بی‌بعد شده را به صورت زیر در محاسبه می‌کند:

$$f' \cdot \phi = 0.1 \cdot \theta^{5/2} \qquad (۸)$$

که در آن:

$$f' = \frac{2 \cdot g \cdot S \cdot D}{V^2}$$
$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} \qquad (۹)$$

omoorepeyman.ir

در رابطه بالا f' ضریب اصطکاک، ϕ نرخ جابه‌جایی رسوب بی‌بعد شده، S شیب انرژی، V سرعت متوسط جریان، τ تنش بحرانی در نزدیک بستر، γ_s و γ به ترتیب وزن مخصوص رسوب و آب، D عمق آب و d قطر متوسط دانه‌های رسوب هستند.

رابطه بین نرخ جابه‌جایی رسوب بی‌بعد شده و نرخ جابه‌جایی رسوب واقعی به صورت زیر است:

$$\phi = \frac{q_t}{\gamma_s} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \cdot g \cdot d^3 \right]^{-1/2} \qquad (۱۰)$$

که در آن q_t مقدار جابه‌جایی رسوب برحسب وزن در واحد عرض و بقیه سمبل‌ها مطابق تعریف‌های بیان شده در بالا هستند.

در سال ۱۹۶۴ Colby براساس نتایج آزمایشگاهی و روابط ریاضی منحنی‌هایی ارائه کرد که بار بستر در واحد عرض را به صورت تابعی از سرعت متوسط جریان، عمق آب، قطر متوسط رسوب، دمای آب و غلظت رسوب معلق ریزدانه (سیلت و رس) تخمین می‌زند. این تابع در قالب یک رابطه ریاضی ارائه نشده است، بلکه مجموعه‌ای از نمودارهاست که می‌توان با کمک آن‌ها مقدار پایه‌ی نرخ حمل رسوب را محاسبه کرده و سپس تصحیح‌های لازم مربوط به اثر دمای آب و غلظت رسوب معلق ریزدانه را به وسیله رابطه ریاضی به مقدار پایه اعمال کرد. این منحنی‌ها حاصل تعداد زیادی نتایج آزمایشگاهی و به‌کارگیری رابطه‌های تجربی پیشین برای پر کردن محدوده‌های بدون داده اندازه‌گیری شده هستند.

رابطه Toffaleti(1969) برای برآورد نرخ جابه‌جایی رسوب از روابط Einstein(1950) و Einstein-Chen(1953) استفاده می‌کند، با این تفاوت که عمق جریان به چهار ناحیه تقسیم شده و نرخ جابه‌جایی رسوب در هر قسمت به طور جداگانه محاسبه می‌شود. سپس مقادیر محاسبه شده با هم ترکیب می‌شوند. عرض مقطع در عمق‌های مختلف یکسان فرض می‌شود. به عبارت دیگر مقطع کانال به شکل مستطیل در نظر گرفته می‌شود. رابطه یاد شده برای رسوب با دانه‌بندی دسته‌ی i به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q_{ti} = B \cdot \left(q_{bi} + q_{sui} + q_{smi} + q_{sli} \right) \qquad (۱۱)$$

که در آن B عرض کانال بوده و q_b و q_{su} و q_{sm} و q_{sl} به ترتیب بار رسوبی در عرض واحد در لایه بستر، لایه‌ی فوقان آب، لایه میانی و لایه پایینی آب هستند.

رابطه Ackers-White(1973-1990) براساس آنالیز ابعادی فرسایش‌پذیری و نرخ جابه‌جایی رسوب براساس تعدادی پارامتر بی‌بعد تنظیم شده است. این رابطه به صورت زیر است:

$$X = C \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma} \cdot \frac{d}{D} \cdot \left(\frac{V}{U_*} \right)^n \cdot \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \qquad (۱۲)$$

که در آن V سرعت متوسط جریان، U_* سرعت برشی، γ_s و γ به ترتیب وزن مخصوص رسوب و آب، D عمق آب، d قطر دانه‌های رسوب، n و m و C و A مقادیر ثابت می‌باشند. ضریب F_{gr} در رابطه بالا ضریب جابجا شوندگی رسوب بستر است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

omoorepeyman.ir

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{g \cdot d \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \cdot \left(\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log(\alpha \cdot D/d)}\right)^{1-n} \qquad (۱۳)$$

که در آن α برای جریان‌های آشفته برابر با ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.

برای انتخاب ضریب‌ها و ثابت‌های به‌کار رفته در دو رابطه بالا از نتایج آزمایشگاهی و سنجش‌های زیادی استفاده شده و براساس آن‌ها اعدادی پیشنهاد شده‌اند. برآوردهای انجام شده بر پایه ضریب‌های پیشنهاد شده در سال ۱۹۷۳ نرخ حمل رسوب را برای رسوب ریز با دانه‌بندی کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر و همچنین برای رسوب درشت، بیش از حد دست بالا برآورد می‌کند. موسسه HR Wallingford در سال ۱۹۹۰ برای دقیق‌تر کردن روش مورد بحث، ضریب‌های جدیدی را پیشنهاد کرد. جدول (پ.۱-۲) ضریب‌های پیشنهاد شده در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۹۰ را نشان می‌دهد. پیشنهاد ضریب‌ها براساس وضعیت رسوب بستر به دو بازه تفکیک شده است. برای این کار از شاخصی به نام اندازه‌ی بی‌بعد شده‌ی دانه‌های رسوب استفاده شده است که به شکل زیر تعریف می‌شود

$$d_{gr} = d \cdot \left(\frac{g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}{\upsilon^2}\right)^{1/3} \qquad (۱۴)$$

که در آن υ ویسکوزیته‌ی سینماتیک است.

جدول پ.۱-۲- ضرایب رابطه رسوب Ackers & White

	1973	**1990**
$1 < d_{gr} \le 60$	$A = 0.23\, d_{gr}^{-1/2} + 0.14$	$A = 0.23\, d_{gr}^{-1/2} + 0.14$
	$\log C = -3.53 + 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2$	$\log C = -3.46 + 2.79 \log d_{gr} - 0.98(\log d_{gr})^2$
	$m = 9.66\, d_{gr}^{-1} + 1.34$	$m = 6.83\, d_{gr}^{-1} + 1.67$
	$n = 1.00 - 0.56 \log d_{gr}$	$n = 1.00 - 0.56 \log d_{gr}$
$d_{gr} > 60$	$A = 0.17$	$A = 0.17$
	$C = 0.025$	$C = 0.025$
	$m = 1.5$	$m = 1.78$
	$n = 0$	$n = 0$

omoorepeyman.ir

آقای Yang برای برآورد بار رسوب کل از جنس ماسه دو رابطه در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹ ارائه کرده است. رابطه‌ی Yang1973 به صورت زیر می‌باشد:

$$\log(C_{ts}) = 5.435 - 0.286\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 0.457\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right) + \left(1.799 - 0.409\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 0.314\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right)\right)\cdot\log\left(\frac{V\cdot S}{\omega} - \frac{V_{cr}\cdot S}{\omega}\right) \quad (۱۵)$$

که در آن C_{ts} غلظت معادل ماسه (مربوط به جمع بار معلق و بار بستر) برحسب تعداد در میلیون برحسب وزن، ω سرعت سقوط دانه‌های رسوب، d قطر دانه‌های رسوب، υ ویسکوزیته‌ی سینماتیک آب، U_* سرعت برشی، V سرعت متوسط جریان، S شیب سطح آب یا شیب انرژی و V_{cr} سرعت متوسط بحرانی در شرایط جریان توسعه نیافته (Incipiant) هستند.

ضریب‌های ارائه شده در رابطه‌ی بالا از بیش از ۴۵۰ گروه اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند. این رابطه برای محاسبه‌ی جابه‌جایی رسوب ماسه‌ای با دانه‌بندی کم‌تر از ۲ میلی‌متر قابل استفاده است.

در رابطه‌ی فوق، V_{cr}/ω از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = \begin{cases} \dfrac{2.5}{\log(U_*\cdot d/\upsilon) - 0.06} + 0.66 & \text{for} \quad 1.2 < \dfrac{U_*\cdot d}{\upsilon} < 70 \\ 2.05 & \text{for} \quad 70 \le \dfrac{U_*\cdot d}{\upsilon} \end{cases} \quad (۱۶)$$

تعریف شاخص‌های رابطه‌ی بالا مطابق با رابطه‌ی قبل است.

رابطه‌ی Yang1979 براساس ساده‌سازی رابطه‌ی Yang1973 برای شرایطی است که جریان کاملا توسعه یافته باشد. در این حال سرعت متوسط بحرانی مربوط به جریان توسعه نیافته نقش موثری نداشته و با حذف آن از معادله، می‌توان غلظت رسوب را به کمک رابطه‌ی زیر تخمین زد:

$$\log(C_{ts}) = 5.165 - 0.153\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 0.297\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right) + \left(1.780 - 0.360\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 0.480\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right)\right)\cdot\log\left(\frac{V\cdot S}{\omega}\right) \quad (۱۷)$$

تعریف شاخص‌های رابطه‌ی بالا مشابه با رابطه‌ی Yang1973 می‌باشد.

ضریب‌های ارائه شده در رابطه‌ی بالا از بیش از ۴۵۰ گروه اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند. این رابطه هم برای دانه‌بندی کم‌تر از ۲ میلی‌متر قابل استفاده است.

برای رسوب با دانه‌بندی درشت‌تر از ۲ میلی‌متر، رابطه‌ی Yang1984 به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$\log(C_{tg}) = 6.681 - 0.633\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 4.816\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right) + \left(2.784 - 0.305\cdot\log\left(\frac{\omega\cdot d}{\upsilon}\right) - 0.282\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega}\right)\right)\cdot\log\left(\frac{V\cdot S}{\omega} - \frac{V_{cr}\cdot S}{\omega}\right) \quad (۱۸)$$

omoorepeyman.ir

ضریب‌های ارائه شده در رابطه‌ی بالا از بیش از ۱۶۰ گروه اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند. براساس محدوده‌ی آزمایش‌های انجام شده، این رابطه برای رسوب با دانه‌بندی ۲ تا ۱۰ میلی‌متر قابل استفاده است. به‌کارگیری رابطه یاد شده برای رسوب درشت‌دانه‌تر نیز در موارد مختلفی موفقیت‌آمیز بوده است.

اگر رسوب از ترکیب ماسه و شن تشکیل شده باشد، می‌توان از ترکیب یکی از روابط مخصوص ماسه و رابطه‌ی مخصوص شن بهره گرفت.

برای شرایطی که به دلیل وجود بار شسته شده، غلظت رسوب معلق از بالادست زیاد بوده و شرایط غیرتعادلی بر حمل رسوب حاکم باشد، رابطه‌ی دیگری به وسیله‌ی Yang ارائه شده است (۱۹۹۶). این رابطه مخصوص برآورد حمل رسوب براساس غلظت بوده و به شکل زیر می‌باشد:

$$\log\left(C_{ts}\right)=5.165-0.153\cdot\log\left(\frac{\omega_m\cdot d}{\upsilon_m}\right)-0.297\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega_m}\right)+\left(1.780-0.360\cdot\log\left(\frac{\omega_m\cdot d}{\upsilon_m}\right)-0.480\cdot\log\left(\frac{U_*}{\omega_m}\right)\right)\cdot\log\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s-\gamma_m}\cdot\frac{V\cdot S}{\omega_m}\right) \qquad (۱۹)$$

در رابطه‌ی بالا پانویس m نشان‌گر جریان پر رسوب است. پارامترهای ω_m، υ_m، γ_m و γ_s به ترتیب سرعت سقوط دانه‌های رسوب در آب با غلظت رسوب زیاد، ویسکوزیته‌ی آب با غلظت رسوب زیاد، چگالی آب با غلظت رسوب زیاد و چگالی رسوب هستند. ضریب‌های رابطه‌ی فوق با ضریب‌های رابطه‌ی غلظت رسوب یانگ مربوط به جریان عادی یکسان هستند، اما سرعت سقوط، ویسکوزیته و جرم مخصوص آب پر از رسوب معلق در این رابطه با مقدار همین شاخص‌ها در آب صاف تفاوت دارد. رابطه‌ی فوق براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در رودخانه‌ی زرد چین به‌دست آمده است. این‌رودخانه از نظر زیاد بودن غلظت رسوب معلق و قابل توجه بودن بار بسترش معروف است. به‌کارگیری رابطه‌ی بالا در روش‌های حل غیرتعادلی امکان تخمین تاثیر تغییر غلظت بر مقدار حمل رسوب را فراهم می‌کند.

رابطه‌ی تجربی Meyer-Peter-Muller (1948) برای محاسبه بار بستر در شرایطی ارائه شده است که رسوب بستر درشت‌دانه و از نوع Gravel باشد. این رابطه به شکل زیر است:

$$\gamma\cdot\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2}\cdot R\cdot S=0.047\cdot\left(\gamma_s-\gamma\right)\cdot d+0.25\cdot\rho^{\frac{1}{3}}\cdot q_b^{2/3} \qquad (۲۰)$$

که در آن γ و γ_s وزن مخصوص آب و رسوب برحسب تن بر مترمربع، R شعاع هیدرولیکی، S شیب انرژی، d قطر متوسط دانه‌های رسوب برحسب متر، ρ جرم مخصوص آب ($Ton-s/m^4$)، q_b بار بستر برحسب وزن زیر آبی رسوب در واحد زمان در واحد عرض رودخانه و (K_s/K_r) ضریبی است که به شیب انرژی (S) اعمال می‌شود و باعث می‌شود که تنها قسمتی از شیب انرژی در محاسبه بار بستر استفاده شود (سهمی از شیب انرژی که مربوط به مقاومت رسوب بستر در مقابل جریان است). انتخاب ضریب یاد شده با توجه به میزان ناهمواری انجام می‌شود و می‌توان آن را بین ۰/۵ تا ۱ در نظر گرفت. مقدار ۱ برای شرایطی است که ناهمواری وجود ندارد و مقدار ۰/۵ برای حالت‌هایی است که بستر به شدت ناهموار باشد. در بسترهای با رسوب درشت دانه، به طور معمول ناهمواری‌هایی نظیر dune و یا ripple شکل نمی‌گیرند و

omoorepeyman.ir

به طور تقریب تمام مقاومت بستر در مقابل جریان بخاطر زبری ناشی از دانه‌های رسوب بستر می‌باشد. ضریب یاد شده نشان‌گر سهمی از شیب انرژی است که بخاطر مقاومت ناشی از رسوب بستر - نه ناهمواری‌های آن - در مقابل جریان ایجاد می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده برای استخراج این رابطه، می‌توان آن‌را مربوط به رسوبات درشت دانه با بار معلق اندک و غالب بودن بار بستر دانست.

پ.۱-۳- روابط مربوط به رسوب و بستر چسبنده

رفتار رسوبات ریزدانه از نوع سیلت و خاک رس با رفتار رسوبات ماسه‌ای یا شنی تفاوت دارد. در بسیاری از کاربردها، بهترین انتخاب برای تخمین میزان حمل رسوب ریزدانه، به‌کارگیری مدل‌های عددی است که معادلات دیفرانسیلی مربوط به غلظت رسوب معلق را به صورت عددی حل می‌کنند. در عین حال مدل‌های تجربی ساده‌تری نیز وجود دارند که برای تخمین حمل رسوب ریزدانه مفیدند و در بعضی از نرم‌افزارها هم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یک رابطه برای برآورد میزان رسوب‌گذاری رسوب از جنس رس و تعیین غلظت رسوب ته‌نشین شونده بربستر به صورت زیر می‌باشد (Krone1962):

$$\frac{C}{C_0} = e^{-k\cdot\Delta t} \qquad (۲۱)$$

که در آن C میزان غلظت در انتهای یک بازه‌ی زمانی مورد محاسبه، C_0 میزان غلظت در ابتدای بازه‌ی زمانی، Δt زمان عبور رسوب در مسیر جریان برابر با L/V، L طول بازه‌ی مکانی طی شده و V سرعت متوسط جریان می‌باشد.

ضریب k در رابطه‌ی بالا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{\omega_s}{D}\cdot\left(1-\frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \qquad (۲۲)$$

که در آن ω_s سرعت سقوط دانه‌های رسوب، D عمق آب، τ_b تنش جریان بر سطح بستر و τ_{cd} تنش بحرانی آستانه‌ی رسوب‌گذاری می‌باشد. با محاسبه‌ی میزان تغییر غلظت رسوب از رابطه‌ی فوق، می‌توان میزان تغییر حجم رسوب در حجم آب واقع در بالای سطح مشخصی از بستر را محاسبه کرد. با کمک این عدد می‌توان نرخ ته‌نشین شدن رسوب بر بستر را تخمین زد.

یک روش برای تعیین میزان فرسایش رسوب چسبنده از بستر، به‌کارگیری روابط Partheniades 1965 و Ariathurai & Krone 1976 می‌باشد. در این روش فرآیند فرسایش به دو قسمت تفکیک می‌شود؛ فرسایش دانه‌ای (Particle Erosion) و فرسایش گروهی (Mass Erosion). هر یک از دو نوع فرسایش یاد شده، تنش بحرانی مخصوص به خود را دارند. در این حال برای محاسبه‌ی نرخ فرسایش از دو رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$E_1 \equiv \frac{1}{A}\cdot\frac{dm}{dt} = M_1\cdot\left(\frac{\tau_b}{\tau_{cs}}-1\right) \quad \text{if} \quad \tau_{cs} < \tau_b \le \tau_{cm}$$
$$E_2 \equiv \frac{1}{A}\cdot\frac{dm}{dt} = M_2\cdot\left(\frac{T_e}{\Delta t}\right) \quad \text{if} \quad \tau_{cm} < \tau_b \qquad (۲۳)$$

omoorepeyman.ir

که در آن‌ها m جرم، t زمان، M_1 ثابت مربوط به جنس بستر، M_2 ثابت دوم مربوط به جنس بستر، A سطح مقطع بستر، Δt گام زمانی، t_e زمان مشخصه‌ی فرسایش، E_1 ضریب فرسایش دانه‌ای در واحد سطح بستر و E_2 ضریب فرسایش گروهی در واحد سطح بستر می‌باشد. ثابت M_1 تابعی از شوری، میزان فلزات، مواد ارگانیک و غیره می‌باشد. واحد ثابت‌های M_1 و M_2 از جنس جرم بر واحد سطح بستر در واحد زمان هستند.

اگر جنس بستر ترکیبی از رس چسبنده و ماسه یا شن باشد روش برخورد دیگری برای محاسبه نرخ فرسایش لازم است، زیرا وجود خاک رس (Clay) در لایه‌ی فعال بستر، چسبندگی بین ذرات بستر را افزایش می‌دهد. در این حالت تنش برشی لازم برای حرکت دادن ذرات چسبنده، بیش‌تر از تنش برشی لازم برای حرکت دادن ذرات جداگانه خواهد بود. یک روش برخورد با این مساله آن است که اگر میزان رسوب چسبنده‌ی موجود در بستر بیش از مقدار حدی معینی بود، نرخ فرسایش رسوب چسبنده به عنوان یک حد بالا برای نرخ فرسایش ماسه و شن استفاده شود. در این حالت نرخ‌های فرسایش ماسه و فرسایش شن (که روابط جداگانه‌ای دارند) محاسبه شده و هر یک به طور جداگانه با نرخ فرسایش رسوب چسبنده مقایسه می‌شوند، اگر یکی از این دو بیش از نرخ فرسایش رسوب چسبنده بود، نرخ فرسایش رسوب چسبنده به جای آن استفاده خواهد شد. می‌توان یک حد بالا برای میزان غلظت رسوبات ریزدانه‌ی معلق در آب هم تعریف کرد تا اگر محاسبات در هر مرحله منجر به مقادیر غلظت بیش از آن گردید، آن مقدار حدی به جای مقادیر محاسبه شده استفاده شود.

اگر سرعت برشی جریان از حد معینی بیش‌تر باشد، امکان ته‌نشین شدن رسوبات ریزدانه وجود نخواهد داشت. ته‌نشینی رسوب ریزدانه بر بستر، زمانی صورت می‌گیرد که تنش برشی بین جریان آب و بستر (τ_b) کم‌تر از تنش بحرانی آستانه‌ی نشست (τ_{cd}) باشد. با توجه به این‌که محاسبات رسوب معلق به طور معمول به تفکیک دانه‌بندی انجام می‌شود، می‌توان نرخ ته‌نشین شدن هر دسته از طیف دانه‌بندی رسوب معلق را به کمک رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$D_i = W_s^i . c_b^i . p_D^i \qquad (۲۴)$$

که در آن p_D^i تابع احتمال ته‌نشینی مربوط به‌دسته‌ی i ام از طیف دانه‌بندی، c_b^i غلظت رسوب معلق نزدیک بستر مربوط به‌دسته‌ی i ام از طیف دانه‌بندی، و W_s^i سرعت سقوط همین دسته می‌باشد. تابع احتمال ته‌نشینی هر دسته از رسوب را می‌توان به کمک رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$p_D^i = \max(0, \min(1, 1 - (\tau_b / \tau_{cd}^i))) \qquad (۲۵)$$

این‌که تنش برشی جریان تا چه اندازه کم‌تر از تنش بحرانی آستانه‌ی رسوب‌گذاری باشد، تاثیری در میزان ته‌نشین شدن رسوب معلق نخواهد داشت.

برای شبیه‌سازی عددی روند فرسایش بستر، به طور معمول بستر فرسایش‌پذیر به چند لایه تفکیک شده و مشخصات هر لایه به طور مجزا تعیین می‌شود. فرسایش رسوب از بالاترین لایه‌ی موجود - که به طور کامل حذف نشده باشد - صورت می‌گیرد. اگر لایه‌ی j ام بستر، لایه‌ی فعال باشد (یعنی بالاترین لایه بوده و بنابراین در معرض فرسایش باشد)،

omoorepeyman.ir

نرخ فرسایش رسوب از آن مطابق با رابطه‌ی زیر می‌باشد (Mehta et al, 1989)، به شرط آن که لایه‌ی مزبور از نوع تحکیم یافته و سخت باشد یعنی تازه ته‌نشین نشده باشد:

$$E^j = E_o^j \cdot (p_E^j)^{E_m} \qquad (۲۶)$$

که در آن p_E^j تابع احتمال فرسایش، E_o ضریب فرسایش و E_m توان فرسایش می‌باشد. تابع احتمال فرسایش از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$p_E^j = \max(0, (\frac{\tau_b}{\tau_{ce}^i} - 1)) \qquad (۲۷)$$

اگر لایه‌ی فعال به تازگی ته‌نشین شده باشد، نرم بوده و تنها اندکی تحکیم یافته است. نرخ فرسایش برای این نوع لایه براساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E = E_o^j \cdot \exp(\alpha(\tau_b - \tau_{ce}^i)) \qquad (۲۸)$$

ضریب فرسایش که با E_o نشان داده می‌شود، برای لایه‌ی نرم معمولا در بازه‌ی 5×10^{-6} تا 2×10^{-5} کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه می‌باشد. برای لایه‌ی سخت مقدار این ضریب در حدود 1×10^{-4} کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه است. توان فرسایش در لایه‌ی سخت که با α نشان داده می‌شود، معمولا در بازه‌ی ۴/۲ تا ۲۵/۶ قرار دارد. تنش بحرانی آستانه‌ی فرسایش برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده در بازه‌ی جدول (۴-۱) قرار می‌گیرد. میزان تحکیم و میزان آب موجود در توده‌ی رسوبی ته‌نشین شده، در طول زمان ثابت باقی نمی‌ماند. یک رابطه ساده برای بیان روند افزایش چگالی رسوب بستر در زیر ارائه شده است:

$$\gamma_{dc} = \gamma_{di} + (B \cdot \log_{10} T) \qquad (۲۹)$$

که در آن γ_{di} مقدار اولیه‌ی چگالی، γ_{dc} مقدار چگالی پس از گذشت زمان T و B یک ضریب ثابت می‌باشند.

پ.۱-۴- معادله‌های ساده شده جریان و رسوب

اهمیت استفاده از ساده‌سازی‌های مهندسی منطقی و معیارهای انتخاب آن‌ها در فصل ۴ مورد توجه قرار گرفت. معادله‌های مربوط به مهم‌ترین ساده‌سازی‌های معمول، در این قسمت ارائه می‌شوند.

پ.۱-۴-۱- معادله‌های دوبعدی انتگرال‌گیری شده در عمق

با انتگرال‌گیری از معادله‌های سه‌بعدی پیوستگی، اندازه حرکت و غلظت رسوب معلق، معادله‌های دوبعدی افقی به‌دست می‌آیند. دراین راستا معادله ساده شده پیوستگی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \qquad (۳۰)$$

که در آن U و V متوسط سرعت در عمق بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$U = \frac{1}{H}\int_{z_a}^{h+\xi} u dz \quad , \quad V = \frac{1}{H}\int_{z_a}^{h+\xi} v dz \qquad (۳۱)$$

omoorepeyman.ir

که در آن Z_a تراز بستر، h تراز اولیه سطح آب و ξ تغییر تراز سطح آب نسبت به تراز اولیه می‌باشد. ξ تابعی از زمان و مکان است.

معادله‌های ساده شده‌ی اندازه حرکت به شکل زیر هستند:

$$\frac{\partial (UH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) = fVH - gH\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + \overline{\nu}^t H\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right]$$
$$\frac{\partial (VH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta V^2 H) = -fUH - gH\frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + \overline{\nu}^t H\left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right] \quad (۳۲)$$

که در آن‌ها β ضریب اصلاح مربوط به غیریکنواخت بودن توزیع قائم سرعت در عمق است. برای بیش‌تر جریان‌هایی که به‌کارگیری معادلات انتگرال‌گیری شده در عمق در آن‌ها مجاز می‌باشد، می‌توان ضریب اصلاح یاد شده را با دقت کافی برابر با یک در نظر گرفت. اگر وزش باد بر سطح آب عامل اصلی ایجاد جریان باشد، ضریب اصلاح یاد شده نزدیک به یک نخواهد بود.

اگر اختلاط در راستای قائم به اندازه‌ای باشد که غلظت رسوب معلق در راستای عمق تغییر زیادی نداشته باشد، می‌توان معادله سه‌بعدی غلظت رسوب معلق را نیز با انتگرال‌گیری در عمق ساده کرد. معادله ساده شده به شکل زیر است:

$$\frac{\partial SH}{\partial t} + \frac{\partial HUS}{\partial x} + \frac{\partial HVS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(H(\varepsilon_{s,x} + \varepsilon_{D,x})\frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H(\varepsilon_{s,y} + \varepsilon_{D,y})\frac{\partial S}{\partial y}\right) + E \quad (۳۳)$$

که در آن $\varepsilon_{D,x}$ و $\varepsilon_{D,y}$ ضریب‌های پراکندگی طولی انتقال رسوبات وابسته به غلظت متوسط رسوب معلق در ستون آب می‌باشد. E نماینده‌ی تعامل رسوبی بین بدنه‌ی آب با بستر و یا هر نوع چشمه و چاه دیگر است. U، V و S به ترتیب مولفه‌های سرعت متوسط جریان و غلظت متوسط رسوب معلق هستند.

این‌طور نیست که هرگاه شرایط برای ساده‌سازی معادلات سه‌بعدی جریان به معادلات دوبعدی انتگرال‌گیری شده در عمق مناسب باشد، انجام این ساده‌سازی برای معادله غلظت رسوب معلق نیز منطقی باشد.

برای شبیه‌سازی جریان غلیظ نمی‌توان از انتگرال‌گیری معادله‌های جریان و رسوب در تمامی راستای قائم استفاده کرد. برای شبیه‌سازی جریان غلیظ با کمک مدل‌های دوبعدی افقی می‌توان از لایه‌بندی در عمق استفاده کرد. به‌علاوه می‌توان جریان غلیظ را به تنهایی، به عنوان یک لایه‌ی مستقل در میان آب صاف، با استفاده از معادله‌های دوبعدی انتگرال گیری شده در عمق حل کرد. در این حال عمق جریان همان ضخامت لایه‌ی غلیظ می‌باشد. برای استفاده از معادله‌های دوبعدی افقی برای حل جریان غلیظ، باید تغییرات اندکی در معادله‌های اصلی اندازه حرکت ایجاد کرد که شامل کم کردن نیروی شناوری (شناوری آب گل‌آلود در آب صاف) از نیروی جاذبه و لحاظ کردن تبادل اندازه حرکت و

omoorepeyman.ir

جرم بین آب صاف و جریان غلیظ در مرز بین این دو لایه می‌باشد. اکثر مدل‌های دوبعدی افقی شناخته شده برای شبیه‌سازی جریان غلیظ به روش یاد شده مناسب نیستند.

پ.۱-۴-۳- معادله دوبعدی قائم انتگرال‌گیری شده در عرض

معادله بقای جرم ساده شده در فضای دو بعدی قائم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(b_c U)}{\partial x}+\frac{\partial(b_c W)}{\partial z}=0 \qquad (۳۴)$$

معادله بقای اندازه حرکت در امتداد مسیر جریان پس از انجام این نوع ساده‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(b_c\cdot U)+\frac{\partial}{\partial x}(b_c\cdot U^2)+\frac{\partial}{\partial z}(b_c\cdot U\cdot W)=-\frac{b_c}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(b_c\cdot v_h\cdot\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(b_c\cdot v_t\cdot\frac{\partial U}{\partial z}\right) \qquad (۳۵)$$

که در آن b_c عرض مخزن و پارامترهای U و W متوسط سرعت‌های افقی و قائم در عرض می‌باشند.

اگر توزیع فشار هیدرواستاتیک فرض شود، معادله بقای اندازه حرکت در امتداد قائم به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}=0 \quad\Rightarrow\quad p(z)=\rho g(\eta-z_b)+p_a \qquad (۳۶)$$

که در آن η تراز سطح آب، $p(z)$ فشار در عمق z و p_a فشار هوا بر سطح آب می‌باشد.

معادله‌ی ساده شده‌ی غلظت رسوب معلق در فضای دوبعدی قائم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$b\frac{\partial C}{\partial t}+bU\frac{\partial C}{\partial x}+b(W-w_s)\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(bD_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(bD_z\frac{\partial C}{\partial z}\right) \qquad (۳۷)$$

که در آن C متوسط غلظت در عرض و w_s سرعت سقوط رسوب معلق می‌باشد.

پ.۱-۴-۴- معادله‌های یک‌بعدی جریان و رسوب

معادله یک بعدی پیوستگی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q_{lat} \qquad (۳۸)$$

که در آن A سطح مقطع، Q بده لحظه‌ای جریان و q_{lat} بده جانبی می‌باشد.

معادله یک بعدی بقای اندازه حرکت به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(Q^2/A\right)}{\partial x}+g\cdot A\cdot\frac{\partial y}{\partial x}+g\cdot A\cdot S_f=0 \qquad (۳۹)$$

که در آن x در راستای جریان بوده و $\partial y/\partial x$ بیانگر شیب بستر می‌باشد. g شتاب ثقل و S_f شیب اصطکاکی است. شیب اصطکاکی نماینده‌ی تمام انواع تلفات انرژی است.

یک شکل معمول از رابطه‌ی یک‌بعدی اندازه حرکت که در رودخانه‌ها و کانال‌ها استفاده می‌شود به صورت زیر است:

omoorepeyman.ir

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}=-g\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{gn^2}{\delta^2 R^{g/3}}u^2 \qquad (۴۰)$$

که در آن، u سرعت طولی متوسط متوسط‌گیری شده در مقطع، t زمان، x راستای افقی در امتداد طولی، g شتاب ثقل، n ضریب مانتیگ نماینده‌ی اثر مقاومت ناشی از زبری بستر و کناره‌ها در مقابل جریان، h ارتفاع سطح آب نسبت به تراز مبنای مقایسه و R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان هستند. در این رابطه فرض بر آن است که شیب آبراهه اندک می‌باشد.

معادله یک بعدی غلظت رسوب معلق به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(A\cdot c)}{\partial t}+\frac{\partial(Q\cdot c)}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left((\upsilon+\upsilon_t)\cdot A\cdot\frac{\partial c}{\partial x}\right)+S_u\cdot A+S_p\cdot A\cdot c \qquad (۴۱)$$

که در آن c غلظت رسوب معلق، υ لزجت سیال، υ_t لزجت گردابه‌ای و S_u و S_p ضرایب مربوط به جملات منبع می‌باشند.

از نظر تئوری تهیه مدل یک بعدی که بتواند برای شبیه‌سازی جریان غلیظ در حالت‌های خاص مناسب باشد غیرممکن نیست، اما در زمان تهیه این راهنما هیچ یک از مدل‌های شناخته شده‌ی یک‌بعدی چنین قابلیتی ندارند. چنین مدلی تنها لایه‌ی جریان غلیظ را به عنوان محیط سیال خواهد شناخت و تمام تمهیداتی که در رابطه با استفاده از معادله‌های دوبعدی افقی در حل جریان غلیظ گفته شد برای چنین مدلی هم لازم خواهد بود.

پ.۱-۴-۵- فرض هیدرواستاتیک بودن فشار

اگر شتاب حرکت در راستای قائم قابل صرف‌نظر کردن باشد می‌توان با دقت کافی میدان فشار را هیدرواستاتیک فرض کرد؛ یعنی فشار در هر نقطه از بدنه آب را تنها تابع فاصله آن محل از سطح آزاد آب دانست. در این حال نیازی به محاسبه مستقل میدان فشار - که از نظر عددی عملیات وقت‌گیری بوده و از نظر پایداری مدل به تمهیدات خاصی احتیاج دارد - نخواهد بود. فرض هیدرواستاتیک بودن فشار در معادله‌های جریان دوبعدی افقی انتگرال‌گیری شده در عمق و همچنین در معادله‌های یک بعدی نیز نهفته است. اگر ناهمواری بستر شدید باشد، اگر جریان‌های ناشی از تفاوت چگالی آب مورد مطالعه باشد، اگر گردابه‌های قائم نقش کلیدی داشته باشند، اگر چاه و چشمه‌های موثری با توزیع قائم غیریکنواخت موجود باشد و یا اگر تعیین رفتار سه‌بعدی جریان در اطراف دریچه‌های خروجی و سرریزهای سد مد نظر باشد، باید از به‌کارگیری این نوع ساده‌سازی اجتناب کرد. اگر بستر دارای شیب یا شیب‌هایی تندتر از ۱:۱۰ در امتداد جریان باشد نباید میدان فشار در نزدیکی بستر را هیدرواستاتیک فرض کرد. زیاد بودن عمق آب اثر ناهمواری بستر و اهمیت اثر غیرهیدرواستاتیک بودن فشار در نزدیک بستر بر کل جریان را کاهش می‌دهد. عوامل دیگری نیز در این رابطه تاثیر دارند. از جمله می‌توان به میزان دور بودن عدد فرود یا عدد ریچاردسون از مقدار واحد در جریان‌های چگالی اشاره کرد.

omoorepeyman.ir

پ.۱-۴-۶- ساده‌سازی در محاسبه سطح آزاد آب

بسیاری از نرم‌افزارها برای محاسبه سطح آزاد آب از فرضیات ساده کننده‌ای استفاده می‌کنند تا روش حل را ساده‌تر، سریع‌تر و پایدارتر نمایند. یک روش معمول در مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی قائم آن است که برای تعیین سطح آب از معادله‌های انتگرال‌گیری شده در عمق استفاده شود. در مدل‌های دوبعدی افقی و یک بعدی نیازی به ساده‌سازی محاسبه سطح آب نیست، چراکه سطح آب به عنوان یک مجهول اصلی در کنار سرعت یا بده جریان محاسبه خواهد شد.

پ.۱- ۵- روابط مربوط به رفتار جریان غلیظ

مدل‌های عددی مناسب می‌توانند رفتار جریان غلیظ را با دقت کافی شبیه‌سازی کنند، اما روش‌های تجربی نیز وجود دارند که می‌توانند در هنگام تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل مناسب و پیش از انجام شبیه‌سازی‌های وقت‌گیر، وقوع یا عدم وقوع جریان غلیظ و مشخصه‌های عمومی آن را نشان دهند. این قسمت به چنین روابط می‌پردازد.

مشخصه‌های اصلی حرکت جریان غلیظ در مخزن سد با استفاده از دو عدد بدون بعد فرود و ریچاردسون قابل توصیف است.

عدد فرود جریان غلیظ عبارت است از:

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g^1 h_d}} \qquad (۴۲)$$

در این رابطه U سرعت متوسط جریان، $g^1 = g\Delta\rho/\rho$ شتاب ثقلی موثر و $h_d =$ عمق جریان غلیظ است.

عدد ریچاردسون عبارت است از:

$$Ri = \frac{\cos\theta}{Fr_d^2} = \frac{g^1 \cdot h_d \cdot \cos\theta}{U^2} \qquad (۴۳)$$

که در آن θ شیب بستر جریان می‌باشد.

رابطه‌های مختلفی برای تخمین عمق آب در نقطه فرود (عمق لازم برای وقوع فرآیند جدا شدن جریان غلیظ از سطح آب مخزن و حرکت آن به سمت بستر) توسط محققان پیشنهاد شده است. اگر بیش‌ترین عمق آب مخزن، کم‌تر از عمق محاسبه شده مورد نیاز برای نقطه فرود باشد، پدیده‌ی جدا شدن جریان چگال از سطح آب و فرآیند جریان غلیظ ایجاد نخواهد شد. تعدادی از رابطه‌های یاد شده در زیر ارائه شده‌اند:

Singh and Shah (1971):

$$h_p = 1.85 + 1.3\left(\frac{q_0^2}{\varepsilon_0 g}\right)^{1/3} \qquad (۴۴)$$

Savage and Brimberg (1975):

$$h_p = \left(\frac{q_0^2}{\varepsilon_0 g F_p^2}\right)^{1/3} \quad \text{with } F_p = \frac{2.05}{1+\alpha}\left(\frac{S}{C_d}\right)^{0.478} \quad \text{and } 0.01 < C_D < 0.09;\ 0.2 < \alpha < 0.8 \qquad (۴۵)$$

Akiyama and Stefan (1984):

omoorepeyman.ir

برای شیب ملایم

$$h_p = \frac{1}{2}\cdot\left\{(2+\gamma)/2+(S_2S/C_D)+\sqrt{[(2+\gamma)/2+(S_2S/C_D)]^2-4(S_2S/C_D)/(1+\gamma)}\right\}\times (S_2S/C_D)^{1/3}\left(\frac{q_0^2}{\varepsilon_0 g}\right)^{1/3} \quad (۴۶)$$

برای شیب تند

$$h_p = 1/2\left\{[(2+\gamma)/2+S_1]+\sqrt{[(2+\gamma)/2+S_1]^2-4(S_1)/(1+\gamma)}\right\}(1/S_1)^{1/3}\left(\frac{q_0^2}{\varepsilon_0 g}\right)^{1/3} \quad (۴۷)$$

که در آن، $S_2 h_d \overline{\varepsilon_d} = \int_0^\infty \varepsilon_d dz$ and $S_1 h_d^2 \overline{\varepsilon_d} = \int_0^\infty \varepsilon_d z dz$ و $\overline{\varepsilon_d}$ and ε_d = mean and local density excess هستند.

Stefan et al. (1988):

$$h_p = \left(\frac{1}{F_p^2}\right)^{1/3}\left(\frac{q_0^2}{\varepsilon_0 g}\right)^{1/3} \quad \text{با} \quad 0.5 < F_p < 1 \quad (۴۸)$$

در روابط بالا q_o بده جریان ورودی در واحد عرض، ρ چگالی آب صاف، ρ_s چگالی جریان ورودی، g شتاب ثقل، C_D ضریب زبری جریان زیر سطحی، S شیب طولی بستر، γ ضریب اختلاط، h_p عمق آب در نقطه فرود برحسب متر، F_p عدد فرود در نقطه فرود جریان غلیظ، ε_o نسبت اختلاف چگالی آب صاف و آب ورودی به چگالی آب صاف ($\varepsilon_0 = \Delta\rho/\rho$) هستند. برای کانال‌های با عرض ثابت و شیب بستر در محدوده‌ی $10^{-3} < S < 0.25$، عدد فرود جریان غلیظ در نقطه فرود در بازه‌ی $0.1 < F_p < 0.9$ قرار دارد و مقدار متوسط آن $F_p = 0.57$ است.

نوع رفتار جریان توده‌ی غلیظ بر روی شیب بستر مخزن می‌تواند از نوع زیر بحرانی، بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. حتی امکان وقوع پرش هیدرولیکی در جریان توده‌ی غلیظ در زیر آب مخزن - در محل تغییر شرایط از فوق بحرانی به زیر بحرانی - وجود دارد. اگر عدد فرود جریان غلیظ در جایی کم‌تر از یک و یا عدد ریچاردسون بیش‌تر از یک باشد، جریان در آنجا زیر بحرانی خواهد بود. اگر عدد فرود جریان غلیظ در جایی بیش‌تر از یک و یا عدد ریچاردسون کم‌تر از یک باشد، جریان توده‌ی غلیظ در آنجا فوق بحرانی خواهد بود. اگر عدد فرود جریان غلیظ بین ۰/۴ تا ۰/۶ باشد، سطح جریان غلیظ (مرز جریان غلیظ و آب صاف) به لحاظ هیدرولیکی ناپایدار خواهد بود.

برای تخمین سرعت حرکت و غلظت رسوب در جبهه‌ی جریان غلیظ روابط محدودی وجود دارند. به عنوان یک تخمین اولیه می‌توان سرعت پیش‌روی جریان غلیظ را پایدار دانست و آن را به عنوان یک جریان مجزا از آب مخزن در نظر گرفت و تابع شرایط موضعی مقاومت بستر در همان محل فرض کرد. در این حال رابطه زیر برای سرعت جریان توده‌ی غلیظ صادق خواهد بود:

$$U = C\sqrt{g^1 h S_0} \quad (۴۹)$$

omoorepeyman.ir

که در آن U سرعت حرکت توده‌ی غلیظ، C ضریب شزی نماینده‌ی مقاومت بستر در مقابل حرکت توده‌ی غلیظ، $g^1 = g\Delta\rho/\rho$ و S_o شیب متوسط بستر می‌باشد. ضریب شزی در بازه‌ی ۲۸ تا ۵۶ ($m^{1/2}/s$) تغییر می‌کند. h ضخامت توده‌ی غلیظ و به عبارت دیگر عمق جریان غلیظ می‌باشد.

رابطه‌ی زیر نیز برای سرعت حرکت توده‌ی غلیظ ارائه شده‌است:

$$U = \sqrt{\frac{8}{f(1+\alpha)} \cdot g^1 \cdot h \cdot S_0} \qquad (۵۰)$$

در این رابطه f ضریب زبری و در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ می‌باشد. α شاخصی است که براساس مشاهدات تنظیم می‌شود، Harleman در سال ۱۹۶۱ برای این شاخص مقدار ۰/۴۳ و Mahmood در سال ۱۹۸۷ برای آن مقدار صفر را پیشنهاد کرده‌اند. تعریف بقیه‌ی شاخص‌ها مشابه رابطه‌ی قبل است.

یک مانع در راه استفاده از روابط بالا آن است که ضخامت یا ارتفاع توده‌ی غلیظ (h) و روند تغییرات آن در طول مسیر از ابتدا مشخص نیست. در این باره تحقیقاتی انجام شده و پیشنهادهایی وجود دارد، اما قابل تعمیم به هر مساله‌ی کاربردی نیست. اگر در مخزن مورد مطالعه در یک پروژه‌ی مشخص اندازه‌گیری‌ها یا محاسبات قبلی درباره‌ی ضخامت توده‌ی غلیظ وجود داشته باشد، روابط بالا به خوبی قابل استفاده خواهند بود. اگر رفتار هیدرولیکی جریان غلیظ مشخص باشد می‌توان ظرفیت حمل رسوب توسط آن را محاسبه کرد. چرا که رابطه‌ی (۴۶) سرعت حرکت توده‌ی غلیظ و میزان غلظت رسوب معلق در آن را - از طریق اختلاف چگالی بین توده‌ی غلیظ با آب مخزن - به هم مربوط می‌کند.

روابط دیگری نیز برای تعیین غلظت رسوب معلق در توده‌ی غلیظ وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان به رابطه‌ی تجربی زیر اشاره کرد (Wu 1994):

$$C = 12.75\left(\frac{U^3}{ghw_{50}}\right)^{0.285} \qquad (۵۱)$$

که در آن C غلظت متوسط رسوب در توده غلیظ، U سرعت پیش‌روی توده‌ی غلیظ، h ارتفاع جریان غلیظ و w_{50} سرعت سقوط مربوط به قطر متوسط دانه‌های رسوب معلق در توده‌ی غلیظ هستند.

تعمیم رابطه‌های تجربی حاصل از مطالعه‌ی جریان غلیظ در یک یا چند مخزن خاص به یک مخزن مورد مطالعه باید با احتیاط و پس از مقایسه‌ی شرایط مخازن با هم انجام شود.

پ.۱-۶- تاثیر جریان غلیظ بر کاهش آشفتگی

بیش‌تر بودن چگالی توده‌ی غلیظ نسبت به آب صاف‌تر مخزن، باعث می‌شود که آشفتگی جریان در راستای قائم، در مرز جریان غلیظ و آب صاف مخزن کاهش یابد. این امر به دلیل اثر نیروی شناوری بر میزان آشفتگی جریان می‌باشد. اگر لایه‌های پایین‌تر دارای چگالی بیش‌تری باشند (مثل وضع جریان غلیظ)، تعادل پایدار وجود داشته و این نوع لایه‌بندی در جهت کاهش اغتشاش راستای قائم اثر خواهد کرد. اگر لایه‌های بالاتر آب دارای چگالی بیش‌تر باشند،

omoorepeyman.ir

شرایط ناپایدار حاکم بوده و در جهت افزایش اغتشاش راستای قائم اثر می‌کند. تفاوت چگالی می‌تواند به دلیل تفاوت غلظت رسوبات معلق، تفاوت دما و یا تفاوت شوری آب باشد.

برای لحاظ کردن تاثیر تفاوت چگالی بر میزان آشفتگی، دو روش برخورد وجود دارد:

الف- اگر محاسبه‌ی آشفتگی براساس حل عددی معادلات $k-\varepsilon$ انجام می‌گیرد، می‌توان اثر نیروهای شناوری را مستقیما در روابط مزبور وارد کرد.

ب- اگر لزجت قائم با کمک روابط ساده شده محاسبه می‌شود و یا اثر شناوری در شبیه‌سازی عددی آشفتگی لحاظ نشده است، می‌توان از روابط تجربی و نیمه‌تجربی برای اصلاح مقدار لزجت آشفتگی راستای قائم استفاده کرد. اصلاح یاد شده در هر گام زمانی انجام خواهد شد.

روابط مختلفی برای تصحیح ضریب لزجت آشفتگی راستای قائم به خاطر اثر نیروی شناوری ارائه شده‌اند که همگی آن‌ها از عدد بدون بعد ریچاردسون استفاده می‌کنند. روابط مزبور را می‌توان در دو دسته‌ی کلی قرار داد:

$$\begin{cases} \nu = \nu_0(1+\beta \mathrm{Ri})^{\alpha} \\ \nu = \nu_0 e^{C\mathrm{Ri}} \end{cases}, \quad \mathrm{Ri} \equiv \text{Richrdson Number} = -\frac{g}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{-2} \qquad (۵۲)$$

در این‌روابط، ν_0 ضریب آشفتگی تصحیح نشده‌ی جریان در امتداد قائم (که بدون لحاظ کردن اثر شناوری محاسبه شده)، ν ضریب آشفتگی جریان تصحیح شده در امتداد قائم و Ri عدد ریچاردسون هستند. α، β و C ضرایب ثابتی هستند که در مرحله واسنجی مدل ریاضی تعیین می‌شوند. مقادیر پیشنهادی متنوعی برای این ضرایب در ادبیات فنی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها در زیر قید شده‌اند. ضرایب پخش ناشی از آشفتگی در معادله‌های اندازه حرکت و معادله‌ی غلظت یکسان نیستند. به این دلیل محققان برای تصحیح هر یک از این دو ضریب پیشنهاد جداگانه‌ای داده‌اند. هر یک از پیشنهادهای زیر شامل دو رابطه هستند که رابطه اول مربوط به تصحیح لزجت جریان و رابطه دوم مربوط به تصحیح ضریب پخش غلظت (یا شوری یا دما) هستند.

Thompson (1980):

$$\begin{cases} \nu = \nu_0(1+\beta \mathrm{Ri})^{\alpha} \\ \nu = \nu_0 e^{C\mathrm{Ri}} \end{cases}, \quad \mathrm{Ri} \equiv \text{Richrdson Number} = -\frac{g}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{-2} \qquad (۵۲)$$

$$\begin{cases} \nu = D = 0.06 & \mathrm{Ri} < 0.25 \\ \nu = D = 0 & \mathrm{Ri} \geq 0.25 \end{cases} \qquad (۵۳)$$

Munk and Anderson (1948):

$$\begin{cases} \nu = \nu_o(1+10\mathrm{Ri})^{-1/2} \\ D = \nu_o(1+3.33\mathrm{Ri})^{-3/2} \end{cases} \qquad (۵۴)$$

omoorepeyman.ir

Pacanowski and Philander (1981):

$$\begin{cases} \nu = \nu_o (1+5\mathrm{Ri})^{-2} + 10^{-4} \\ D = \nu (1+5\mathrm{Ri})^{-1} + 10^{-5} \end{cases} \quad (۵۵)$$

Lehfeldt and Bloss (1988):

$$\begin{cases} \nu = \nu_o (1+3\mathrm{Ri})^{-1} \\ D = \nu_o (1+3\mathrm{Ri})^{-3} \end{cases} \quad (۵۶)$$

Park and Kuo (1993):

$$\begin{cases} \nu = \nu_o (1+0.75\mathrm{Ri})^{-1/2} \\ D = \nu_o (1+0.75\mathrm{Ri})^{-3/2} \end{cases} \quad (۵۷)$$

Perrels and Karelse (1981):

$$\begin{cases} \nu = \nu_o \cdot e^{-4\mathrm{Ri}} \\ D = \nu_o \cdot e^{-15\mathrm{Ri}} \end{cases} \quad (۵۸)$$

Rodi (1993):

$$\nu = \nu_o e^{-C\mathrm{Ri}} \quad (۵۹)$$

در روابط بالا ν ضریب لزجت آشفتگی در راستای قائم برای معادله‌ی اندازه حرکت، D ضریب پخش ناشی از آشفتگی در راستای قائم برای معادله انتقال و پخش، و ν_o ضریب لزجت آشفتگی در راستای قائم برای معادله‌ی اندازه حرکت بدون در نظر گرفتن اثر نیروی شناوری می‌باشند. محققان پیشنهاد دهنده برای واسنجی اکثر روابط بالا از روش‌های مبتنی بر تئوری طول اختلاط برای محاسبه‌ی آشفتگی بدون لحاظ کردن اثر نیروی شناوری (ν_o) استفاده کرده‌اند.

هیچ یک از روابط بالا را نمی‌توان در تمام شرایط بهترین انتخاب دانست. آن‌ها به طور خاص برای جریان غلیظ تهیه نشده‌اند. لایه‌بندی می‌تواند به دلیل اثر تفاوت شوری، دما و یا غلظت رسوب معلق ایجاد شده باشد. از نظر تئوری تفاوتی بین اثر نیروی شناوری ناشی از غلظت رسوب با نیروی شناوری ناشی از شوری و دما بر میزان آشفتگی وجود ندارد. اما به‌هرحال هر یک از روابط نام برده برای شرایط خاصی واسنجی شده‌اند و نتایج آن‌ها یکسان نیست.

به عنوان معیاری برای انتخاب رابطه‌ی مناسب، به انتخاب انجام شده توسط چند نرم‌افزار معتبر اشاره می‌شود. در زمان تهیه‌ی این متن، نرم‌افزارهای Mike3 و SIIMM از رابطه‌ی Munk and Anderson (1948) استفاده کرده‌اند (Mike3 در صورت استفاده از معادلات $k-\varepsilon$ برای آشفتگی راستای قائم، اثر شناوری بر آشفتگی را به طور مستقیم شبیه‌سازی می‌کند). نرم‌افزار C-Qual-W2 از رابطه‌ی Perrels and Karelse (1981) بهره گرفته است. نرم‌افزار اخیر به

omoorepeyman.ir

طور خاص برای شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن و لایه‌بندی ناشی از دما و شوری به‌کار می‌رود. نرم‌افزار SIIMM برای محاسبه‌ی جریان غلیظ هم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای اضافه کردن اثر تفاوت چگالی در معادله‌های آشفتگی راستای قائم از نوع $k-\varepsilon$ جمله‌های زیر به ترتیب به سمت راست معادله‌ی k (انرژی جنبشی آشفتگی) و سمت راست معادله‌ی ε (نرخ اتلاف انرژی آشفتگی) اضافه خواهند شد.

جمله‌ی اضافه شونده به سمت راست معادله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\nu_t}{\sigma_t}.\frac{g}{\rho}.\frac{\partial\rho}{\partial z} \qquad (۶۰)$$

جمله‌ی اضافه شونده به سمت راست معادله‌ی نرخ اتلاف انرژی آشفتگی:

$$\frac{\varepsilon}{k}.c_{3\varepsilon}.\frac{\nu_t}{\sigma_t}.\frac{g}{\rho}.\frac{\partial\rho}{\partial z} \qquad (۶۱)$$

پ.۱-۷- روابط مربوط به بهینه‌سازی رسوب در سامانه‌های چند مخزنی

یک مدل مدیریت سامانه‌های چند مخزنی برای کاهش رسوب‌گذاری و فرسایش، به صورت زیر بیان می‌شود:

Goal:

$$\min \quad F=\sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{I}\left|E_{i,t+1}-E_{i,t}\right| \qquad (۶۲)$$

که در آن:

$$E_{i,\,t+1}=T_E(E_t,S_t,R_t,t) \qquad \text{for} \qquad 1\le i\le I \qquad (۶۳)$$

$$S_{j,\,t+1}=T_S(E_t,S_t,R_t,t) \qquad \text{for} \qquad 1\le j\le J \qquad (۶۴)$$

$$\underline{R_{j,\,t}}\le R_{j,\,t}\le\overline{R_{j,\,t}} \qquad (۶۵)$$

$$\underline{S_{j,t+1}}\le S_{j,t+1}\le\overline{S_{j,t+1}} \qquad (۶۶)$$

$$\underline{S_{j,T}}=S_{j,\text{target}} \qquad (۶۷)$$

مشخصه‌های به‌کار رفته در روابط بالا 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 $S_{j,t+1}$: 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 برای رهاسازی آب از مخزن

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

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

T: تعداد بازه‌های زمانی

omoorepeyman.ir

I: تعداد مقاطع عرضی در کل سامانه

J: تعداد مخازن در کل سامانه

معادله (۶۲)، تابع هدف برای کمینه کردن مجموع فرسایش و رسوب‌گذاری در مخازن و رودخانه‌های مورد مطالعه است. شاخص‌های T_E و T_S توابعی انتقالی هستند که شرایط هیدرولیکی به‌وجود آمده در اثر سیاست‌های بهره‌برداری اعمال شده را نشان می‌دهند. معادله‌های انتقالی شامل معادله‌های پیوستگی رسوب و جریان، معادله‌های انرژی و مانینگ و معادله انتقال رسوب هستند.

رابطه‌ی مربوط به روندیابی تغییرات حجم ذخیره مخزن، براساس پیوستگی جرم در مخزن، به صورت زیر بیان می‌شود [۵۳]:

$$\begin{bmatrix} S_{1,t+1} \\ S_{2,t+1} \\ \vdots \\ S_{J,t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,t} \\ S_{2,t} \\ \vdots \\ S_{J,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{1,t} \\ Q_{2,t} \\ \vdots \\ Q_{J,t} \end{bmatrix} \Delta T_t + M \begin{bmatrix} R_{1,t} \\ R_{2,t} \\ \vdots \\ R_{J,t} \end{bmatrix} \Delta T_t - \begin{bmatrix} LS_{1,t} \\ LS_{2,t} \\ \vdots \\ LS_{J,t} \end{bmatrix} \qquad (۶۸)$$

که در آن $Q_{j,t}$ جریان ماندگار ورودی به مخزن j، ΔT_t طول بازه زمانی t، و $LS_{j,t}$ برآیند تلفات مخزن مانند تبخیر و نفوذ و بارندگی هستند. M یک ماتریس از مرتبه J است که مقدار عضوهای قطر اصلی آن برابر با (۱-) است. اگر مخزن jام به جریان ورودی مخزن kام کمک کند، آنگاه مقدار عضو (j,k) برابر با (۱+) خواهد بود، در غیراین‌صورت مقدار هر عضو برابر با صفر است.

رابطه (۶۸) یک حالت مشخص از رابطه‌ی کلی (۶۴) است.

یک تابع هدف که برای ادغام قیدها در مساله کنترل رسوب دارای تابع جریمه باشد، می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$\min \quad F = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{I} \left| E_{i,t+1} - E_{i,t} \right| + \sum_{n=1}^{N} P_n \qquad (۶۹)$$

که در آن 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. رابطه شرطی زیر یکی از انواع ساده تابع جریمه را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} P_n &= 0 && \text{if} \quad L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t) \le 0 \\ P_n &= \sum\sum R_{p,n} \left[L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t) \right]^2 && \text{if} \quad L_n(R_{j,t}, S_{j,t+1}, t) > 0 \end{aligned} \qquad (۷۰)$$

که در آن $R_{p,n}$ وزن مربوط به تخلف می‌باشد.

مساله بهینه‌سازی رسوب که با معادله‌های پیش‌گفته نشان داده شد، با استفاده از یک مدل هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب قابل حل است. برای حل این مجموعه می‌توان از روش بهینه‌سازی SALQR مطابق شکل (۵-۱) استفاده کرد.

omoorepeyman.ir

پیوست ۲

واژه‌نامه

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

A to Z:

Armoring	جوشنی شدن بستر
built map-As	نقشه‌ی همچون ساخت
Backwater	خیزآب
Bathymetric survey	آبنگاری مخزن
Bathymetry	هندسه بستر
Bed load	بار بستر
Bed resistance	مقاومت بستر در مقابل جریان
Bed roughness	زبری بستر
Buoyancy force	نیروی غوطه‌وری
Calibration	واسنجی مدل
Chart	نمودار
Clay	خاک رس - لای
Closed boundary	مرز بسته
Cohesive sediment	رسوب چسبنده
Cross section	مقطع عرضی
Dam reservoir	مخزن سد
Dead storage	حجم غیر مفید مخزن، حجم مرده
De-siltation	رسوبزدایی
Diffusion coefficient	ضریب پخش آشفتگی
Digital	رقومی
Dispersion coefficient	ضریب پخش (رسوب معلق)
Domain scale	مقیاس مکانی
Eddy	گردابه جریان
Erosion	فرسایش
Extrapolation	برون‌یابی
Field measurement	اندازه‌گیری محلی – محیطی - صحرایی
Finite difference method	روش تفاضل‌های محدود

omoorepeyman.ir

Finite element method	روش المان‌های محدود
Finite volume method	روش احجام محدود
Flocculation	به هم پیوستن ذرات رسوب
Flood plain	سیلاب دشت
Flow - duration curve	منحنی تداوم جریان
Flow turbulence	آشفتگی جریان
Fluid mud	گل آب
Free flushing	رسوبشویی آزاد
Homogeneity	همگن بودن
Hydraulic flushing	رسوبشویی
Hydrograph	آبنگار
Hydrographic survey	نقشه‌برداری مخزن - عمق‌سنجی
Inertia	لختی (جریان)
Initial conditions	شرایط اولیه
simulation In-stationary	شبیه‌سازی با حالت غیر ماندگار
Lateral boundary	مرز جانبی
Momentum	اندازه حرکت (جریان)
Mud	رسوب ریزدانه
Numerical simulation	شبیه‌سازی عددی
Parameter	مشخصه
Penalty function	تابع جریمه
Plunge point	محل ریزش (فرو رفتن) جریان غلیظ، نقطه فرود جریان غلیظ (محل فرورفتن به زیر آب)
Porosity	تخلخل
Pressure flushing	رسوبشویی تحت فشار
Profile	نیمرخ
simulation Quasi-stationary	شبیه‌سازی با حالت شبه ماندگار
Retrogressive	فرسایش پسرونده
Rule curve	منحنی فرمان
Sedimentation	رسوبگذاری

omoorepeyman.ir

Sensitivity analysis	حساسیت سنجی (در شبیه‌سازی عددی)
Setup	برپاسازی (مدل)
Silting	رسوبگذاری
Simplification	ساده سازی
Smoothing	هموارسازی
Source and sink	چشمه و چاه
Stationary simulation	شبیه‌سازی حالت ماندگار
Steady state simulation	شبیه‌سازی حالت ماندگار
Suspended load	بار معلق
Suspended sediment	رسوب معلق
System	سامانه
Talweg	خط القعر – تالوگ (یک واژهٔ قدیمی آلمانی‌الاصل به معنی دره)
Time scale	مقیاس زمانی
Time steps	گام‌های زمانی محاسباتی
Topography	هندسه زمین - پستی و بلندی‌های زمین
Topography map	نقشه‌ی هندسه زمین
Validation	اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی
Verification	صحت‌سنجی میزان برازش‌یافتگی مدل به واقعیت
Warm up	شروع نرم – هموار (در شبیه‌سازی عددی)
Wash load	بار شسته رسوب از سطح حوضه آبریز

omoorepeyman.ir

الف تا ی

آبنگار	Hydrograph
آبنگاری مخزن	Bathymetric survey
آشفتگی جریان	Flow turbulence
اندازه حرکت (جریان)	Momentum
اندازه‌گیری محلی – محیطی - صحرایی	Field measurement
بار بستر	Bed load
بار شسته (از سطح حوضه آبریز)	Wash load
بار معلق	Suspended load
واسنجی مدل	Calibration
برپاسازی (مدل)	Setup
برون‌یابی	Extrapolation
به هم پیوستن ذرات رسوب	Flocculation
پستی و بلندی‌های زمین	Topography
تابع جریمه	Penalty function
تالوگ (یک واژهٔ قدیمی آلمانی‌الاصل به معنی دره)	Thalweg
تحلیل حساسیت	Sensitivity analysis
تخلخل	Porosity
جوشنی شدن بستر	Armoring
چشمه و چاه	Source and sink
حجم غیر مفید مخزن، حجم مرده مخزن	Dead storage
حساسیت سنجی (در شبیه‌سازی عددی)	Sensitivity analysis
خط القعر	Thalweg
خیزآب	Backwater
رسوب چسبنده	Cohesive sediment
رسوب خاک رس	Clay
رسوب ریزدانه	Mud
رسوب معلق	Suspended sediment

omoorepeyman.ir

رسوبزدایی	De-siltation
رسوبشویی	Hydraulic flushing
رسوبشویی آزاد	Free flushing
رسوبشویی تحت فشار	Pressure flushing
رسوبگذاری	Sedimentation, silting
رقومی	Digital
روش احجام محدود	Finite volume method
روش تفاضل‌های محدود	Finite difference method
روش المان‌های محدود	Finite element method
زبری بستر	Bed roughness
ساده سازی	Simplification
سامانه	System
سیلاب دشت	Flood plain
شبیه‌سازی عددی	Numerical simulation
شبیه‌سازی با فرض حالت شبه ماندگار	simulation Quasi-stationary
شبیه‌سازی با فرض حالت غیر ماندگار	simulation In-stationary
شبیه‌سازی با فرض حالت ماندگار	Stationary simulation - steady state simulation
شرایط اولیه	Initial conditions
شروع نرم (در شبیه‌سازی عددی)	Soft start - Warm up
شروع هموار (در شبیه‌سازی عددی)	Warm up
اعتبارسنجی	Validation
ضریب پخش آشفتگی	Diffusion coefficient
ضریب پخش رسوب معلق	Dispersion coefficient
عمق‌سنجی	Hydrography
فرسایش	Erosion
فرسایش پسرونده	Retrogressive
گام‌های زمانی محاسباتی	Time steps
گردابه جریان	Eddy
گل آب	Fluid mud

omoorepeyman.ir

لای	Clay
لختی (جریان)	Inertia
محل ریزش (فرو رفتن) جریان غلیظ	Plunge point
مخزن سد	Dam reservoir
مرز بسته	Closed boundary
مرز جانبی	Lateral boundary
مشخصه	Parameter
مقاومت بستر (در مقابل جریان)	Bed resistance
مقطع عرضی	Cross section
مقیاس زمانی	Time scale
مقیاس مکانی	Domain scale
منحنی تداوم جریان	Flow-duration curve
منحنی فرمان	Rule curve
نقشه‌برداری مخزن	Hydrographic survey
نقشه‌ی همچون ساخت	As-built map
نقشه‌ی هندسه زمین	Topography map
نقطه فرود (جریان غلیظ)	Plunge point
نمودار	Chart
نیروی غوطه‌وری	Buoyancy force
نیمرخ	Profile
همگن بودن	Homogeneity
هموارسازی	Smoothing
هندسه بستر	Bathymetry
هندسه زمین	Topography
صحت‌سنجی	Verification

omoorepeyman.ir

منابع و مراجع[۱]

۱- امامقلی زاده، صمد؛ بینا، محمود؛ نوری امامزاده‌ای، محمدرضا، «بررسی روش‌های رسوب‌زدایی در مخازن سدها با تاکید بر روش فلاشینگ»، نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

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

۳- دولتشاهی، شهراد؛ شرقی، عبدالعلی، «مدل ریاضی پخش رسوب در مخازن سدها»، چهارمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۷۵.

۴- ژوهانس یان، «حفاظت مخازن»، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ۱۳۸۳.

۵- شعبانلو- موسوی حیدرپور، «چگونگی توزیع رسوب در تعدادی از مخازن سدهای ایران»، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۸۱.

۶- صادقی کلشتری، محمدتقی، «عملیات تکمیل فلاشینگ (شاس) مخزن سد سفیدرود»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید عباسپور، تهران، ۱۳۸۲.

۷- صادقی کلشتری محمدتقی، «بررسی رسوب‌زدایی سد سفیدرود بر سد تاریک»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدعباسپور، تهران.

۸- صفاریان، محمدرضا؛ راد، منوچهر؛ فیروزآبادی، بهادر، «بررسی علل عدم موفقیت رسوب زدایی مخزن سد سفیدرود به وسیله آبشویی»، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران - اردیبهشت ۱۳۸۲ - دانشگاه صنعتی اصفهان.

۹- صمدی بروجنی، حسین؛ محمد ولی سامانی، حسین، «ارزیابی تاثیر رسوب‌شویی سد دز بر کاهش ظرفیت مخزن سد تنظیمی دزفول با مدل Mike 11»، ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه- اهواز، ۱۳۸۱.

۱۰- طلوعی، اسماعیل و همکاران، «تجربه رسوب زدایی سد سفیدرود»، کمیته‌ی رسوب‌زدایی مخزن سد سفیدرود، ۱۳۸۱.

۱۱- طلوعی، اسماعیل، «طراحی و بهره‌برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب»، نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

۱۲- فیروزآبادی، بهاره؛ راد، منوچهر، «بهبود ساختار جریان چگالی و تاخیر در رسوب ذرات در جریان درون مخازن سدها»، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۶.

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 مورد رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن در محیط MS-Access، به همراه همین پیش نویس استاندارد در لوح فشرده ارائه شده است.

omoorepeyman.ir

۱۳- کلاهدوزان، مرتضی؛ بهلولی، اصغر؛ محمدیان، عبدالمجید، «شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی رسوب‌گذاری مخزن سد چم گردلان(ایلام)»، سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، بهمن ۱۳۸۱.

۱۴- محمدنژاد و شمسایی، «بررسی نقش جریان‌های غلیظ در رسوب‌گذاری دریاچه‌ی سدها»، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۱.

۱۵- محمدنژاد و شمسایی، «مدل‌سازی رسوب در مخزن سد ناشی از جریان غلیظ»، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، ۱۳۸۲.

۱۶- محمدنژاد و شمسایی، «شبیه‌سازی عددی غلظت رسوب جریان غلیظ در مخازن»، هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۵.

۱۷- محمدی اهری، محمدعلی، «مکانیزم فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه کرج و انباشتگی آن در مخزن سد»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ۱۳۷۱.

۱۸- مهرداد، میرعبدالحمید؛ لشته‌نشایی، میراحمد؛ فیروزفر، علیرضا، «بررسی عملکرد عملیات تکمیلی شاس در رسوب‌زدایی از مخزن سد سفیدرود»، ششمین سمینار بین‌المللی رودخانه- اهواز، ۲۰۰۱.

۱۹- مرکز تحقیقات آب، «مسایل رسوب در سدهای بزرگ»، کارگاه آموزشی کمیته تخصصی هیدرولیک، تهران، ۱۳۷۸.

۲۰- مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۱.

۲۱- مجموعه مقالات سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ۱۳۸۰.

۲۲- مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، ۱۳۶۸.

۲۳- مجموعه مقالات نخستین همایش مدیریت رسوب، اهواز، ۱۳۸۴.

24- Annandale G. W. (1987), “Reservoir Sedimentation”, Elsevier.

25- Atkinson E. (1995), “A Numerical Model for Predicting Sediment Exclusion at Intakes”, HR Wallingford.

26- Atkinson E. (1996), “The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs”, HR Wallingford.

27- Basson G. (1998), “Prediction of Sediment Induced Density Current Formation in Reservoirs”, Sediment Transport in Reservoirs, ICHE (Cottbus 1998).

28- Batuca D. G. ,Jordan J. M. (2000), “Silting & Desilting of Reservoirs”, Balkema.

29- Biedenharn, D. S. and Copeland, R. R. (2000), “Effective Discharge Calculation”, ERDC/CHL CHETN-VIII-4 (December 2000), UA Army Corps of Engineers.

30- Brandt S. A. (2000), “Reservoir Desiltation by Means of Hydraulic Flushing”, Ph.D. Thesis Report, Institute of Geography, University of Copenhagen.

31- 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).

32- 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.

omoorepeyman.ir

33- Cesare G., Schleiss A. (1999), "Physical and Numerical Modelling of Turbidity Currents", Laboratory of Hydraulic Constructions, LCH, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
34- Cesare, G., Schleiss, A. and Hermann, F. (2001), "Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", Journal of Hydraulic Engineering, January 2001.
35- Cesare, G., Schleiss, A. and Hermann, F. (2002), "Discussion of Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", Journal of Hydraulic Engineering, June 2002.
36- 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.
37- Chanson H.,.James P. (1999), "Siltation Of Australian Reservoirs Some Observations And Dam Safety Implications", IAHR 99.
38- DHI (2005), "MIKE-Zero user manuals", Danish Hydraulic Institute.
39- Graf W. H.(1998), "Fluvial Hydraulics".
40- Griffin R.H. (1995, 1989), "Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs", U.S. Army Corps of Engineers.
41- Halcrow (2001), "Sedimentation in Storage Reservoirs", Report, Halcrow.
42- Huffaker R., Hotchkiss R, "Slow-Manifold Dynamics of Optimal Reservoir Sedimentation Management".
43- ICOLD Report, 1998.
44- Kamphuis W. and Hall K. R. (1983), "Cohesive material Erosion by Unidirectional Current", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109, 49-61.
45- Kawashima Sh, Johndrow T. B., Annandale G. W., Shah F. (2003), "Reservoir Conservation, Volume II, RESCON Model and User Manual", The World Bank.
46- Klingeman P. (2005), "Flow Analysis Technical Note", Oregon State University Website, http://water.oregonstate.edu/streamflow.
47- Klingeman P. (2005), "Flood Frequency Analysis Technical Note", Oregon State University Website, http://water.oregonstate.edu/streamflow.
48- 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
49- 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
50- Mohammadnezhad B. A. and Shamsai A. (2007), "Effects of Density Current on Sedimentation in Reservoirs", Journal of Scientia Iranica.
51- Morris, G. & Fan, J. (1997), "Reservoir Sedimentation Handbook", U.S. Army Corps of Engineers.
52- Nicklow, J. W., Mays, L. W., (2000), "Optimization of Multiple Reservoir Networks for Sedimentation Control", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126(4), 232-242.
53- 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.
54- Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G. W., Dinar, A. (2003), "Reservoir Conservation, Vol1, the RESCON Approach", The World Bank.
55- 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".

omoorepeyman.ir

56- 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).
57- Seraji, M. H. S. (2002), "Etude du Transport Sedimentaire Associe au Phenomene de Chasse Dun Barrage", Ph. D. Thesis Report, Universite de Caen, Normandie.
58- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2006), " Erosion and Sedimentation Manual", Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.
59- 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.
60- Ahn, J., 2011. Numerical modeling of reservoir sedimentation and flushing processes (Doctoral dissertation, Colorado State University Libraries).
61- Annandale, G.W., 1987. Development in water science, reservoir sedimentation. ELSEVIER Science Publishing Company INC.
62- Garcia, M.H., 2008. Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling and practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110
63- Morris, G.L. and Fan, J., 1998. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. Reservoir Sedimentation Handbook.
64- Motamedi, A., Afzalimehr, H. and Singh, V.P., 2010. Evaluation of a Novel Approach to Determine the Critical Shields Stress. Journal of Hydrologic Engineering, 15(11), pp.892-900.
65- Papanicolaou, A.T.N., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S. and Edinger, J., 2008. Sediment transport modeling review—current and future developments. Journal of Hydraulic Engineering, 134(1), pp.1-14.
66- Tigrek, S. and Aras, T., 2012. Reservoir sediment management. CRC Press/Balkema.
67- USSD, 2015. Modeling Sediment Movement in Reservoirs, Training Document on Hydraulics of Dams, United States of America.

omoorepeyman.ir

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

Guideline for Application of Mathematical Models in Sedimentation and Removal of Deposited Sediment from Dams Reservoirs [No. 834]

Executive Body:	Water Research Institute
Project Adviser:	Reza Kamalian

Authors & Contributors Committee:

Masoud Entezari	Water Research Institute	M.Sc. in Water Engineering
Nima Tavakoli Shirazi	Iranian National Committe on Large Dams (IRCOLD)	PhD in Irrigation and Drainage
Khosro Hosseini	Lar Consulting Engineers	PhD in Hydraulic Engineering
Shervin Faghihi rad	Water Research Institute	PhD. in Civil Engineering
Morteza Kolahdouzan	Water Research Institute and Amirkabir University of Technology	PhD in Hydraulic Engineering
Mohammad reza Majdzadeh Tabatabaei	Water Research Institute and Shahid Beheshti University	PhD in River Engineering
Bayramali Mohammad nejad	Water Research Institute	M.Sc. in Civil Engineering
Omid Naeini	Water Research Institute and University of Tehran	PhD in Hydraulic Engineering
Hossein Younesi	Water Research Institute	B.S. in geology-Hydrology
Majid Galoie	Imam Khomeini International University	PhD in Water Resources (Hydraulic) Engineering
Artemis Motamedi	Buein Zahra Technical University	PhD in River Engineeirng

Supervisory Committee:

Alireza Daemi	Ministry of Energy	M.Sc. in Hydraulic Structures
Nooshin Ravandoust	Free expert	B.S. in Civil Engineering
Mir Hassan Seyed Seraji	Shahid Beheshti University- shahid Abbaspour Technical and Engineering Campus	PhD in Fluid Mechanics
Abdolali Sharghi	Shahid Beheshti University-Institute of Environmental Sciences	PhD in Civil Engineering
Esmail Tolouei	Soil and Water Resources Engineering Company (SWREC)	PhD in Civil Engineering

Confirmation Committee:

Ahmad Barkhourdari	Iranian Water & Power Projects Engineering Company (PANIR)	M.Sc. in Civil Engineering-Hydraulic Structures
Masoud Hadidi Moud	Mahab-E Ghods Consulting Engineers	M. Sc. in Mechanical Engineering
Reza Rasti Ardakani	Shahid Beheshti University	Ph D in Civil Engineering
Seyyed Mahdi Zandian	Iran Water Resources Management	Construction Engineering and Management

omoorepeyman.ir

Mohammad Taher Taheri Behbahani	Tavan-Ab Consulting Engineers	M. Sc. in Water Resources (Hydraulic) Engineering
Taghi Ebadi	Ministry of Energy- Water and Wastewater Standards and Projects Bureau	M. Sc. in Hydraulic Strcture Engineering
Mohammad Reza Askari	Bandab Consulting Engineers	PhD in Civil Engineering
Najmeh Fooladi	Ministry of Energy-Water and Wastewater Standards and Projects Bureau	M. Sc. in Civil Engineering (Water Engineering)
Ali Yousefi	ZAPCE (Zamin Ab Pey Consulting Engineers)	M. Sc. in Mining Engineering (Geological Engineering)

Steering Committee:

Alireza Toutounchi	Deputy of Technical and Executive Affairs Department
Farzaneh Agharamezanali	Head of Water & Agriculture Group, Technical and Executive Affairs Department
Seyed Vahidedin Rezvani	Expert in Irrigation and Drainage Engineering, Technical and Executive Affairs Department

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

Abstract

Water flow over natural soil surfaces can cause soil erosion and consequently soil particles can be transported downstream as suspended and bed sediment loads. Because of intense decline in flow velocity at upstream of a dam and formation of a large still body of water in reservoir, accumulation of dissolved materials and sediment loads in reservoir is inevitable. Due to erosion and deposition of sediments in reservoirs, it is estimated that the annual loss of reservoir storage capacity of all dams around the world, which is totally more than 7000 billion cubic meter, ranges between 0.5 and 1 percent. In some countries this storage loss is more than 1 percent. In Iran, the mean rate of reservoir storage loss is estimated between 0.5 and 0.75 percent which is equal to 175-200 million cubic meter per year. The analysis of observed data of 27 dams, which performed by "Operation and Maintenance Dam Reservoir Office – Ministry of Energy" in 2009, confirmed the same mean storage loss rate in Iran as above. Since, due to various reasons, the rate of soil erosion in Iran is almost high, hence, understanding of sedimentation process in reservoirs and knowing how to deal with them is important.

The effective utilization of water storage might not be achieved due to the consequences of sedimentation in reservoir. The most common problems which may cause by sedimentation in reservoir are as follow: reduction of water storage capacity, flood control failure at upstream areas, failure in operation of bottom outlet works, power plant and spillway; and adverse effects on water quality. In order to minimize the consequences of sediment transport and deposition in reservoir, sedimentation parameters such as type, amount, grain size distribution and propagation procedure of sediment loads in reservoir should be precisely evaluated.

There are various methods to study erosion and sedimentation process in a reservoir. One of these methods is numerical modeling which has been welcomed increasingly during recent years. Nowadays, professional soft-wares are become as acceptable tools for practitioners to simulate sedimentation process in reservoirs. During recent years, application of this effective tools has been developed significantly. Although new numerical soft-wares with their great capabilities can assist engineers in designing processes, but they should not be considered as replacement for engineering knowledge and judgements of practitioners. For a successful design, engineers should be familiar with all software capabilities, limitations and sensitivities.

The main objective of this manual is to provide a technical instruction which helps engineers to make a satisfactory choice among the various numerical models available in sedimentation process modeling. This guideline has been prepared specially to describe available numerical methods and techniques in reservoir sedimentation studies and to evaluate numerical methods position among all other methods as well. Furthermore, this context consists of both comprehensive review and governing equations of sedimentation process in reservoir. The current manual is mainly useful for those practitioners who work on design and operation of dams which involve reservoir sedimentation issues.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Guideline for

Application of Mathematical Models in Sedimentation and Removal of Deposited Sediment from Dams Reservoirs

No. 834

Last Edition: 2-14-2021

Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs
Department of Technical & Executive affairs, Consultants and Contractors

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Water and Wastewater Standards and Projects Bureau

seso.moe.org.ir

2021

omoorepeyman.ir

این ضابطه

با عنوان «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی در رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها» ضمن مرور فرآیندهای مختلف موثر بر پدیده رسوب‌گذاری در مخازن سدها و روابط ریاضی حاکم بر آن، به تشریح نحوه انتخاب مدل عددی مناسب از میان مدل‌های موجود و ویژگی‌های آن می‌پردازد.

omoorepeyman.ir