INSO
20316
1st.Edition
2016

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۰۳۱۶
چاپ اول
۱۳۹۴

تخمین ته‌نشینی رسوب در مخازن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک‌بعدی

Estimation of sediment deposition in reservoir using one dimensional simulation models

ICS: 17.120.20

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۱۲۹۴

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج - شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸- ۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.org.ir

وبگاه: http://www.isiri.org

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.1294 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.org.ir

Website: http://www.isiri.org

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفهٔ تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2- International Electrotechnical Commission
3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
4- Contact point
5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«تخمین ته‌نشینی رسوب در مخازن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک‌بعدی»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
جانی، رسول (دکتری مهندسی عمران)	دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
دبیر:	
رواء افشین (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	اداره کل استاندارد آذربایجان‌شرقی
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
احمدپور، احمد (کارشناسی معماری)	مهندسین مشاور معماری وشهرسازی هوراند طرح
اسگندرزاده، سعید (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	شرکت برج گستر
باقرزاده جناب، نسترن (کارشناسی مهندسی عمران)	شهرداری منطقه ۷ تبریز
بهکام راد، کاوه (کارشناسی مهندسی عمران)	شرکت سازه‌های نوین آذربایجان
پورابا، مسعود (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

تبریزی، آذر (کارشناسی مهندسی عمران)	شرکت کیفیت آفرینان آذر
زمانپور، اصغر (کارشناسی مهندسی عمران)	شرکت نقش سازان پارس
سجادی، علی (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلخچی
سفیدی، محمدرضا (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	شهرداری تبریز
طوسی، محمد (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی
فرشی حق‌رو، ساسان (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	اداره کل استاندارد آذربایجان‌شرقی
فولادپنجه، اکبر (کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)	اداره کل استاندارد استان آذربایجان‌شرقی
قدیمی، فریده (کارشناسی ارشد شیمی)	اداره کل استاندارد آذربایجان‌شرقی

ویراستار:

حنیفی‌نسب، محمد باقر (کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)	اداره کل استاندارد آذربایجان‌شرقی

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

	آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران	ب
	کمیسیون فنی تدوین استاندارد	ج
	پیش‌گفتار	و
۱	هدف و دامنه کاربرد	۱
۲	مراجع الزامی	۱
۳	اصطلاحات و تعاریف	۲
۴	واحدهای اندازه‌گیری	۲
۵	اصول مدل‌سازی رسوب نیمه غیردایمی	۲
۶	اصول مدل‌های جریان غیردایمی	۳
۷	الزامات داده‌ها	۱۳
۸	فرمولاسیون، واسنجی، آزمون و تصدیق مدل‌ها	۲۰
۹	عدم قطعیت داده‌ها	۲۹
	پیوست الف (الزامی) مدل‌ها و مطالعات موردی	۳۳
	پیوست ب (اطلاعاتی) کتاب‌نامه	۳۵

پیش‌گفتار

استاندارد «تخمین ته‌نشینی رسوب در مخازن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک‌بعدی» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده است، در دویست و هفتاد و ششمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد اوزان و مقیاس‌ها مورخ ۱۳۹۴/۱۲/۳ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینهٔ صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO/TR 11651:2015, Estimation of sediment deposition in reservoir using one dimensional simulation models

تخمین ته‌نشینی رسوب در مخازن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک‌بعدی

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش تخمین/پیش‌بینی رسوب در داخل و بالادست رودخانه‌ها با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی جریان یک بعدی و معادلات انتقال رسوب، است.
مدل‌های شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی توزیع رسوب برای رودخانه‌هایی که طول آن‌ها به طور قابل توجهی از عمق و عرض آن‌ها بیشتر است و رودخانه دارای جریان قابل توجهی است، کاربرد دارد.
این استاندارد شامل مبانی نظری و فرضیات پایه روش است و خلاصه‌ای از روش‌های عددی به کار رفته برای حل معادلات جریان غیر دایمی و انتقال رسوب ارایه می‌کند. همچنین جزییات کاربرد مدل، شامل الزامات داده‌ها، روش‌های واسنجی مدل، اعتبارسنجی، آزمون، کاربرد و شناسایی عدم قطعیت‌های روش را ارایه می‌کند. این استاندارد اطلاعات کافی برای توسعه برنامه رایانه‌ای حل معادلات ارایه نمی‌کند، بلکه فرض می‌کند که برنامه رایانه‌ای مستند در دسترس است.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین‌ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.
در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.
استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۲-۱ استاندارد ملی ایران شماره ۲۴۲۵، هیدرومتری- اندازه‌گیری شارش مایع در کانال‌های باز تحت شرایط جزر و مد

۲-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۹۶۷۹، هیدرومتری- جریان‌سنج‌های چرخشی

۲-۳ استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۶۱۱، اندازه‌گیری جریان مایع در مجاری روباز – روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های رسوبات معلق

۲-۴ استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۲۴۹، هیدرومتری-عمق‌سنجی مستقیم و تجهیزات تعلیق

۲-۵ استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۳۶۵، هیدرومتری- انتخاب، استقرار و راه‌اندازی یک ایستگاه پایش

۲-۶ استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۴۳۴، هیدرومتری- وسایل اندازه‌گیری سطح آب

2-7 ISO 748, Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats

2-8 ISO 772, Hydrometry — Vocabulary and symbols

2-9 ISO 1100-2, Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels — Part 2: Determination of the stage-discharge relationship

2-10 ISO 4363, Measurement of liquid flow in open channels — Methods for measurement of characteristics of suspended sediment

2-11 ISO 4364, Measurement of liquid flow in open channels — Bed material sampling

2-12 ISO 4365, Liquid flow in open channels — Sediment in streams and canals — Determination of concentration, particle size distribution and relative density

2-13 ISO 6416, Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method

2-14 ISO/TS 3716, Hydrometry — Functional requirements and characteristics of suspended-sediment samplers

2-15 ISO/TR 9212, Methods of measurement of bedload discharge

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف ارایه شده در استاندارد ISO 772 به کار می‌رود.

۴ واحدهای اندازه‌گیری

واحدهای اندازه‌گیری مورد استفاده در این استاندارد، واحدهای SI می‌باشند.

۵ اصول مدل‌سازی رسوب نیمه غیردایمی[1]

بسیاری از مدل‌های رسوب در گذشته و حال حاضر، هیدرودینامیک مدل‌های انتقال رسوب را با فرض جریان «نیمه غیردایمی» ساده می‌کنند. به جای حل معادلات سن و نانت[2] به طور صریح یا ضمنی، هیدرودینامیک‌ها با مجموعه‌ای از محاسبات آب برگشتی جریان دایمی همراه با مدت زمان‌های موقتی بیان می‌شوند. هنوز اکثر مدل‌های انتقال رسوب تعمیم یافته از این رویکرد استفاده می‌کنند. به علت این که فرآیندهای هیدرولیک و انتقال رسوب در مقیاس زمان و فاصله متفاوت پاسخ داده می‌شوند و چون عدم قطعیت‌های ذاتی همراه با شبیه‌سازی رسوب، ساده‌سازی ارایه شده با این تقریب، اغلب خطای معرفی شده را توجیه می‌کند. بنابراین چون رویکرد نیمه غیردایمی، مسیر آب را تعیین نمی‌کند، ممکن است پیاده‌سازی

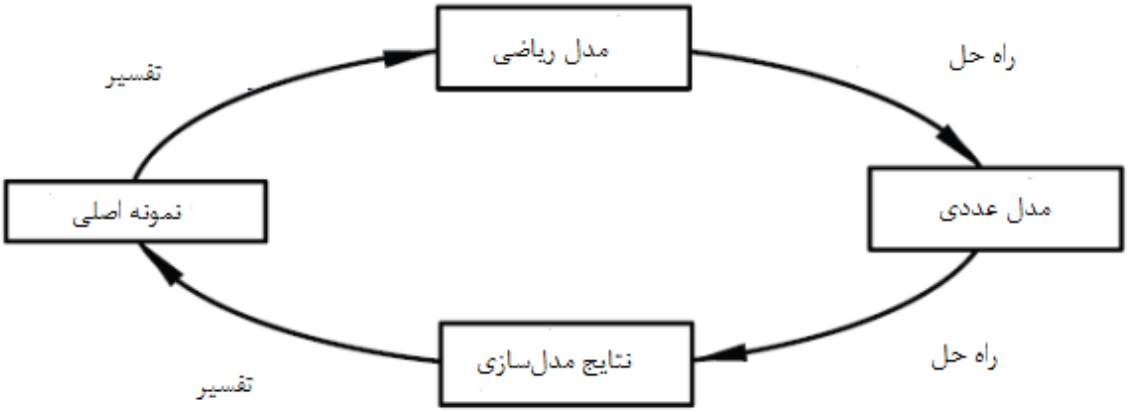
1- Quasi-unsteady
2-Saint-Venant

مدل‌سازی مخزن مشکل باشد. مدل‌های نیمه غیردایمی با موفقیت برای مدل رسوب مخزن به کار رفته‌اند اما نیازمند محاسبات مسیریابی هیدرولوژیک خارجی برای تعریف مرحله مخزن می‌باشند. چون پارامترهای مسیریابی هیدرولوژیک نسبت به زمان تغییر می‌کنند مانند ظرفیت مخزن که با ته نشینی رسوب تغییر می‌کند، این فرآیند اغلب تکرار شونده است. بنابراین ممکن است یک رویکرد غیردایمی مفید باشد.

۶ اصول مدل‌های جریان غیردایمی

۶ـ۱ کلیات

مدل‌های عددی برای حل مسایل ته‌نشینی رسوب در مهندسی رودخانه، به ویژه برای شبیه‌سازی درازمدت رودهای طولانی به کار می‌روند. چرخه مدل‌سازی به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه اصلی به طور واقعی مطالعه می‌شود و با داده‌ها و شناخت تعریف می‌شود. داده‌ها، معرف شرایط مرزی مانند عمق‌سنجی، دبی آب، توزیع دانه‌بندی ذرات رسوب، نوع گیاهان و غیره، می‌باشند. شناخت، شامل فرآیندهای فیزیکی است که برای تعیین رفتار سامانه مانند آشفتگی جریان، مکانیسم انتقال رسوب و فرآیندهای اختلاط مشخص شده‌اند. درک نمونه اصلی و داده‌های جایگزین، مرحله نخست چرخه است.



شکل۱- چرخه مدل‌سازی

در مرحله نخست تفسیر، تمام فرآیندهای فیزیکی مرتبط که در نمونه اصلی شناسایی شده‌اند به معادلات حاکمی که در مدل‌های ریاضی وارد شده‌اند، تبدیل می‌شوند.

بنابراین یک مدل ریاضی نخستین تقریب برای مساله را ایجاد می‌کند. این موضوع پیش‌نیاز یک مدل عددی است. در حال حاضر، بسیاری از مدل‌های ساده‌سازی از قبیل دایمی در مقابل غیردایمی و فرمول‌سازی یک بعدی در مقابل دوبعدی و سه بعدی، ساده‌سازی توصیف آشفتگی و غیره، به وجود آمده‌اند. در منابع آبی به

طور معمول (نه همیشه) فرد با مساله تنظیم مقدار مرزی مواجه می‌شود که در آن معادلات دیفرانسیل نسبی و ضوابط غیرخطی است، حاکم است.

سپس، مرحله‌ای برای حل مدل ریاضی لازم است. مدل عددی شامل روش‌های عددی به کار رفته برای حل مجموعه معادلات حاکم که مدل ریاضی را تشکیل می‌دهند، است. در این مرحله، انتخاب روش‌های گسسته‌سازی برای مثال، تفاضل محدود در مقابل المان محدود در مقابل حجم محدود و انتخاب رویکرد رفتار در برابر ضوابط غیر خطی، انجام می‌شود. این یک مرحله تقریب اضافی است چون معادلات دیفرانسیل نسبی به معادلات جبری که تقریبی (اما نه مشابه ایجاد کننده) هستند، تبدیل شده‌اند.

مرحله بعدی شامل حل مدل عددی در رایانه و فراهم کردن نتایج مدل‌سازی است. این مرحله شامل تقریب‌ها و ساده‌سازی بیشتر، مانند روابط مرتبط با شرایط مرزی نامعلوم، عمق‌سنجی مبهم، دبی رسوب و یا آب نامشخص و ضرایب اصطکاک است.

در پایان، داده‌ها نیازمند تفسیر و جاگذاری در زمینه نمونه اصلی مناسب است. این مرحله پایانی چرخه مدل‌سازی را متوقف کرده و در نهایت پاسخی برای مساله که تلاش‌های مدل‌سازی را هدایت می‌کند، ارایه می‌کند.

توصیه می‌شود انتخاب مدل برای هر مساله خاص با در نظر گرفتن الزامات مساله، شناخت سامانه و داده‌های موجود، انجام شود. از طرفی مدل باید تمام پدیده‌های مهم را که ممکن است در سامانه روی دهند و بر جنبه‌های مورد مطالعه تاثیر بگذارد مد نظر داشته باشد و از طرف دیگر، پیچیدگی مدل با داده‌های موجود محدود شود. یک مدل عمومی که برای تمام مسایل به کار رود، وجود ندارد. توصیه می‌شود الزامات ویژه برای هر مساله تحلیل شود و مدل واکنش این تحلیل در گزینه‌ها و پیچیدگی‌های آن را انتخاب کند.

۶ـ۲ معادلات حاکم

معادلات حاکم یک بعدی، میانگین‌گیری شده برای سطح مقطع، در معادله شماره (۱)، بقای جرم (یا معادله پیوستگی)، معادله شماره (۲) بقا یاندازه حرکت خطی و معادله شماره (۳) پیوستگی مواد بستر را بیان می‌کند.

معادلات جریان یک بعدی زیر برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی مانند شیب انرژی، سرعت و عمق جریان در هر سطح مقطع در هر مرحله زمانی، حل می‌شود. سپس ظرفیت‌های انتقال رسوب در هر سطح مقطع محاسبه و با جریان ورودی مقایسه می‌شود. در هر مقطع پاک شدن یا ته‌نشینی با استفاده از معادله پیوستگی رسوب محاسبه شده و در نتیجه سطوح بستر سطح مقطع جدید تعیین می‌شوند. سپس محاسبات برای مرحله زمانی بعدی انجام شده و چرخه بعدی با هندسه به روز شده[1] تکرار می‌شود.

1- Updated geometry

بقای جرم(یا معادله پیوستگی):

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \qquad (۱)$$

بقای اندازه حرکت خطی:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\frac{Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial y}{\partial x}+gA(S_f-S_0)=qu \qquad (۲)$$

معادله پیوستگی مواد بستر:

$$\frac{\partial G_b}{\partial x}+\frac{\partial G_s}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial t}(C_sA)+\rho_*\frac{\partial}{\partial t}(B_dz)=0 \qquad (۳)$$

که در آن‌ها:

A مساحت سطح مقطع کانال و متغیر نسبت به x، t و z ؛

t زمان؛

Q دبی و متغیر نسبت به x و t؛

u مولفه طولی سرعت جریان ورودی جانبی و متغیر نسبت به x و t؛

x موقعیت طولی در راستای محور کانال؛

y عمق جریان و متغیر نسبت به x و t؛

g شتاب گرانشی؛

β ضریب اندازه حرکت و متغیر نسبت به x، t و z ؛

q جریان ورودی جانبی در واحد طول کانال و متغیر نسبت به x و t؛

s_0 شیب بستر و متغیر نسبت به x؛

s_f شیب اصطکاک و متغیر نسبت به x، t و z ؛

G_b بار بستر؛

G_s بار معلق؛

Cs میانگین فضایی غلظت رسوب در سطح مقطع؛

ρ_* چگالی رسوب در بستر؛

B_d عرض بستر تغییر شکل‌پذیر و متغیر نسبت به t؛

z ارتفاع بستر و متغیر نسبت به t، هستند.

ضریب اندازه حرکت را می‌توان با استفاده از فرمول ۴ محاسبه کرد:

$$\beta = \int \frac{u^2 dA}{U^2 A} \qquad (۴)$$

که در آن :

u سرعت در مساحت المانی dA؛

U سرعت متوسط در سطح مقطع یکسان با مساحت کل A، هستند.

شیب اصطکاک (s_f) برای در نظر گرفتن مقاومت ناشی از تنش‌های مرزی خارجی، است. شیب اصطکاک معمولا با معادلات شزی[1] یا مانینگ[2] محاسبه می‌شود.

برای معادله شزی، عبارت مقاومت بستر در فرمول اندازه حرکت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$s_f = \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} \qquad (۵)$$

که در آن:

Q دبی؛

A مساحت جریان؛

R مقاومت شعاع هیدرولیکی، است.

تعریف مانینگ به صورت زیر است:

$$s_f = \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}} \qquad (۶)$$

عدد مانینگ (M)، معادل ضریب استریکلر[3] است. معکوس آن (n) متداول‌تر از عدد مانینگ است. مقدار n معمولا در محدوده ۰٫۰۱ (کانال صاف) تا ۰٫۱۰ (کانال با پوشش گیاهی انبوه) است. مقادیر متناظر برای M از ۱۰۰ تا ۱۰ می‌باشند.

1- Chezy
2- Manning
3- Strickler

رابطه ضریب شزی و مانینگ (n) به صورت زیر است:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = MR^{1/6} \qquad (۷)$$

R و n به عنوان تابعی از x، z و t ممکن است نسبت به متغیرهای مذکور تغییر کنند. فرمول۶ بر مبنای این فرض که معادله مانینگ برای جریان یکنواخت دایمی، تقریب منطقی برای S_f در جریان غیر یکنواخت غیردایمی ارایه می‌کند، است.

فرمول ۲ را می‌توان برای در نظر گرفتن تغییر اندازه حرکت در آب با تغییر مکانی و موقتی باد، اصلاح کرد. فرمول‌های ۱ و ۲ را می‌توان با عمق و سرعت (۱) و مرحله و سرعت (۲) یا مرحله و دبی(۳)، به عنوان متغیرهای وابسته نیز نوشت.

فرمول‌های ۱ و۲ برای جریان با سطح آزاد آشفته، متغیر مکانی، غیردایمی یک سیال تراکم ناپذیر ویسکوز در کانال روباز با سطح مقطع و تراز دلخواه، به کار می‌روند. معادلات به طور هم‌زمان برای مجهولات z (عمق جریان) و Q (دبی) به عنوان تابعی از زمان (t) و موقعیت طولی (x) حل می‌شوند.

فرمول ۳، انتقال رسوب و در نتیجه تغییرات در سطوح بستر را محاسبه می‌کند. معادلات متفاوتی برای محاسبه مقدار انتقال رسوب و زبری رسوبی مانند توابع انتقال میر-پتر[۱]، مولر[۲] و دبوی[۳] برای محاسبه بار بستر، مدل انگلوند[۴] و هنسن[۵]، مدل اکرس[۶] و وایت[۷]، مدل یانگ[۸] و مدل اسمارت[۹] و جاگی[۱۰] برای تعیین بار بار کل و مدل‌های انگلوند و فردسو[۱۱] و وان ریجن[۱۲] برای محاسبه بار بستر و بار معلق به طور جداگانه، وجود دارند. تمام این معادلات/ مدل‌ها را می‌توان با استفاده از اندازه دانه نماینده یا با استفاده از عدد نمایان‌گر اندازه در مواد دانه‌بندی شده، به کار برد.

فرمول‌های ۱ و ۲ از اصل اول استنتاج شده و می‌توان آن‌ها را مستقیما از معادلات سه بعدی پیوستگی جرم و معادلات ناویر استوکس[۱۳] به دست آورد که به طور کلی، عبارات سه بعدی بقای اندازه حرکت برای هر جریان سیال می‌باشند. تعدادی از فرضیات برای استنتاج فرمول‌های ۱و۲ لازم هستند. توصیه می‌شود مدل

1 - Meyer-Peter
2-Muller
3 -DuBoy
4 -Engelund
5 -Hansen
6 -Ackers
7 -White
8 -Yang
9 -Smart
10 -Jaeggi
11 -Fredsoe
12 -van Rijn
13 -Navier-Stokes

جریان غیردایمی برای شرایطی که هیچ یک از فرضیات عمده به شدت نقض می‌شوند، به کار روند. فرضیات عبارتند از:

الف- جریان تقریبا یک بعدی است، به این معنی که تغییرات مکانی عمده در شرایط دینامیکی پارامترهای هیدرولیکی(دبی، سرعت و مرحله) در جهت طولی است؛

ب- چگالی سیال در کل رود مدل شده همگن است؛

پ- شتاب‌های قائم قابل صرفنظر هستند یعنی توزیع فشار هیدروستاتیک قابل کاربرد است؛

ت- در سطح مقطع ارایه شده، توزیع سرعت یکنواخت است. ورود ضریب اندازه حرکت در فرمول ۲ امکان می‌دهد این فرض تا حدی نقض شود، بنابراین توصیه می‌شود جداسازی جریان انجام نشود و خطوط جریان انحنا زیاد نداشته باشند؛

ث- هیچ افزایش یا کاهش بستر رودخانه طی مرحله زمانی محاسباتی روی نمی‌دهد؛

ج- آشفتگی و اتلاف انرژی را می‌توان با قوانین مقاومت فرموله شده برای جریان یکنواخت دایمی بیان کرد(الزامی برای فرمول۴)؛

چ- تغییرات ناگهانی در شکل یا تراز کانال وجود ندارد؛

ح- سرعت در مرز کانال صفر است؛

خ- در هیچ سطح مقطعی، ارتفاع فوق‌العاده‌ای در سطح آب وجود ندارد؛

د- کشش سطحی و چگالی هوا در سطح آزاد قابل صرفنظر هستند.

۶ـ۳ روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم

راه‌حل تحلیلی شناخته شده‌ای برای فرمول‌های ۱ و ۲ وجود ندارد. در نتیجه، روش‌های عددی برای تبدیل فرمول‌های ۱ و ۲ به معادلات جبری که ممکن است برای z و Q در مقادیر افزایشی محدود x و t حل شوند، به کار می‌روند. این راه‌حل‌ها به توصیف صحیح مساحت سطح مقطع به عنوان تابعی از x و t و موجود بودن داده‌های شرایط مرزی درست، بستگی دارد.

انواع روش‌های عددی برای حل معادلات جریان غیردایمی پیشنهاد شده و به کار رفته‌اند. روش‌های مورد علاقه بر مبنای بعضی انواع گسسته‌سازی شبکه‌بندی مساله (که متغیرهای پیوسته برای راه‌حل مطلوب فقط در محل‌های مجزای خاص حل می‌شوند) هستند. معادلات جبری که مدل‌های عددی را تشکیل می‌دهند تابعی از کمیت‌های مجزا هستند. برای مساله یکسان (یعنی مجموعه یکسانی از فرمول حاکم دیفرانسیلی و شرایط مرزی)، به دست آوردن مجموعه‌های کاملا متمایزی از معادلات عددی جبری، بسته به روش به‌کار رفته برای گسسته‌سازی معادلات، ممکن است. گروه‌های گسترده روش‌های عددی، روش مشخصات،

تفاضل‌های محدود، المان‌های محدود و حجم‌های محدود هستند. به طور کلی، روش‌های تفاضل محدود برای حل معادلات دیفرانسیلی جزیی یک بعدی بیان شده برای جریان کانال باز، ترجیح داده می‌شوند. روش تفاضل محدود شامل موارد زیر است:

الف - روش‌های تفاضل محدود صریح؛

ب – روش‌های تفاضل محدود غیرصریح.

برای هر یک از این روش‌های کلی، انواع مختلفی وجود دارد. روش‌ها برای ارایه کردن چشم‌اندازی از بعضی فواید و مضرات هر روش، به طور خلاصه بررسی شده‌اند.

۶-۳-۱ روش‌های تفاضل محدود صریح

احتمالا روش‌های تفاضل محدود، ساده‌ترین و متداول‌ترین روش به کار رفته در مدل‌های جریان سیال و همچنین در سایر زمینه‌هایی که نیازمند حل عددی معادلات دیفرانسیل جزیی می‌باشند، هستند. این روش‌ها بر مبنای تقریب عبارات مشتق منفرد در معادلات با تفاضلات گسسته و سپس تبدیل آن‌ها به مجموعه معادلات جبری شبیه‌سازی با مجهولات تعریف شده با نقاط گسسته در دامنه کامل مساله، می‌باشد. طرح‌های عددی صریح، معادلات حاکم را به یک سامانه معادلات جبری خطی از مجهولاتی که ممکن است مستقیما (به طور صریح) بدون محاسبات تکرار شونده حل شوند، تبدیل می‌کند. متغیرهای وابسته در مرحله زمانی پیش‌رودر یک نقطه زمانی از مقادیر معلوم و شرایط در مراحل زمانی حاضر یا گذشته، تعیین می‌شوند. طرح‌های صریح فقط تحت شرایطی پایدار هستند، یعنی خطاهایی ممکن است در روند حل رشد کنند، و خطاها تابعی از اندازه‌های گام‌های زمانی و مکانی هستند. وقتی شرایط کورانت[1] برآورده می‌شوند، که منجر به محدویت‌های گام مکانی و زمانی حداکثر (که می‌توان به‌کار برد) می‌شود، طرح‌های صریح عموما پایدارند. به منظور برآورده کردن الزامات پایداری عددی، گام زمانی محاسباتی باید به اندازه افزایش عمق هیدرولیکی، کاهش یابد. در نتیجه، ممکن است لازم باشد برای مدل‌های جریان غیر دایمی در رودخانه‌های بزرگ که مدل‌ها را تا حدی ناکارآمد می‌کنند، گام‌های زمانی محاسباتی به اندازه چند دقیقه، باشد. همچنین لازم است گام‌های فاصله‌ای محاسباتی در طرح‌های تفاضل محدود، مساوی با کل دامنه مدل باشد (که ممکن است برای بعضی سامانه‌ها مضر باشد).

۶-۳-۲ روش‌های تفاضل محدود غیر صریح

طرح‌های عددی غیر صریح، معادلات حاکم را به سامانه‌ای روی معادلات جبری غیرخطی که در آن مجهولات باید مکررا حل شوند، تبدیل می‌کنند. در نتیجه، برای مدلی با N سطح مقطع در طول محور x، سامانه‌ای متشکل از معادلات جبری ۲N معادله جبری، تشکیل می‌شود. تمام مجهولات در محدوده دامنه مدل به طور هم‌زمان تعیین می‌شوند (بر عکس روش‌های صریح که به صورت نقطه به نقطه تعیین می‌شوند).

1 - Courant

معمولا برای به کار بردن روش‌های غیر صریح، پارامترهای وزن‌دهی لازم هستند. این پارامترها زمانی بین مراحل زمانی تعیین می‌شوند که مشتقات مکانی و کمیت‌های تابع (مانند مساحت سطح مقطع، عرض فوقانی و شعاع هیدرولیکی، که همه آن‌ها تابعی از عمق محاسباتی جریان هستند) ارزیابی می‌شوند. در انتخاب این پارامترهای وزن‌دهی، بعضی قضاوت‌ها لازم هستند و پارامترهای وزن‌دهی اغلب به عنوان قسمتی از فرآیندهای واسنجی، تنظیم می‌شوند. در مواردی که عبارات معادلات حاکم به طور کامل با عبارات مراحل زمانی آینده بیان می‌شوند، معمولا درستی طرح عددی کاهش می‌یابد.

طرح‌های غیر صریح نسبت به طرح‌های صریح با مشکلات کمتری در مسایل پایداری عددی مواجه می‌شوند. در مواردی که مدل‌سازی جریان‌های متغیر سریع انجام می‌شود، در صورتی که مراحل زمانی بزرگ باشد و مشتقات مکانی به حد کافی نسبت به مراحل زمانی بعدی وزن‌دهی نشوند، ممکن است ناپایداری عددی روی دهد. غیر خطی بودن ناشی از سطح مقطع‌های نامنظم دارای عرض‌هایی که به سرعت در طول کانال یا عمق نیز ممکن است سبب ناپایداری عددی در مدل‌های غیر صریح شود.

۶-۳-۳ روش‌های المان محدود

روش‌های المان محدود از سال ۱۹۶۰ میلادی با موفقیت برای مسایل جریان سیال به کار رفته‌اند. این روش‌ها به ویژه برای حل مسایل هندسی پیچیده، که نیازمند سامانه شبکه‌بندی مورد نیاز در روش‌های تفاضل محدود نیستند، مفید هستند. در شبکه بدون ساختار، برعکس شبکه‌های ساختاردار که هر گره توسط یک جفت (i-j) مشخص می‌شوند، لازم نیست گره‌های محاسباتی مطابق روش دستوری، تعریف شوند.

دو رویکرد اصلی برای ایجاد روش‌های المان محدود وجود دارد: روش‌های تغییرات و روش‌های باقی‌مانده وزنی. در روش‌های تغییرات، اصل تغییرات برای معادله حاکم حداقل می‌شود. در مسایل مکانیک سیالات عمومی، پیدا کردن شکل‌های دقیق اصول تغییرات برای معادلات غیرخطی حاکم (برعکس معادلات خطی در مکانیک جامدات) مشکل است، بنابراین روش‌های باقی‌مانده وزنی متداول‌تر هستند. روش‌های باقی‌مانده بر مبنای حداقل‌سازی بعض از خطاها، یا باقی‌مانده، معادلات حاکم، می‌باشند.

۶-۳-۴ روش‌های حجم محدود

روش‌های حجم محدود قوانین پیوستگی یعنی شکل‌های انتگرالی معادلات حاکم را به کار می‌برند. دامنه محاسبه به تعداد دلخواهی از حجم‌های کنترل تقسیم می‌شوند و معادلات با در نظر گرفتن چندین شار عبوری از مرزهای حجم کنترل، گسسته‌سازی می‌شوند. دو روش برای تعریف شکل و موقعیت حجم‌های کنترل با در نظر گرفتن نقاط شبکه گسسته که متغیرهای وابسته محاسبه می‌شوند، وجود دارد: طرح گره مرکزی و طرح سل مرکزی. طرح گره مرکزی، گره‌های شبکه را با مشخص کردن حجم‌های کنترل نسبت به سل‌های شبکه در مرکز حجم کنترل قرار می‌دهد. در طرح‌های سل مرکزی، حجم‌های کنترل با اتصال گره‌های شبکه مجاور تشکیل می‌شود.

مزیت اصلی روش‌های حجم محدود این است که گسسته‌سازی مکانی مستقیما در فضای فیزیکی بدون نیاز به هیچ انتقالی بین سامانه‌های مختصات، انجام می‌شود. این روش بسیار منعطف است به طوری که می‌توان آن را برای سامانه‌های شبکه دارای ساختار و بدون ساختار انجام داد. با توجه به این که روش مستقیما بر اساس اصول پیوستگی فیزیکی است، جرم، اندازه حرکت و انرژی به طور خودکار با طرح عددی حفاظت می‌شوند.

در شرایط معین، روش حجم محدود معادل روش تفاضل محدود یا برای شکل‌های خاص سفارش کمتر، روش‌های المان محدود است.

۶-۴ انتقال رسوب

مقدار انتقال رسوب برای هر جریان در هیدروگراف برای هر اندازه دانه محاسبه می‌شود. پتانسیل انتقال رسوب برای هر اندازه دانه محاسبه شده و در سهم متناظر موجود در بستر در زمان به دست اوردن مولفه ظرفیت انتقال ضرب می‌شود. محاسبه انتقال رسوب با استفاده از مفهوم حجم کنترل انجام می‌شود.

مبنای تنظیم سطوح بستر برای شسته شدن یا ته‌نشینی، معادله پیوستگی رسوب (یعنی معادله اکسنر[1])، می‌باشد. معادله پیوستگی رسوب برای حجم کنترل برای هر سطح مقطع نوشته شده است. عرض حجم کنترل معمولا معادل عرض بستر متحرک و عمق آن از سطح آب تا بالای سنگ بستر یا سایر سطوح کنترل تحت فشار زمین‌شناسی، می‌باشد. در نواحی که سطح سنگی وجود ندارد، یک حد اختیاری پایین مدل اختصاص می‌یابد.

در حل پیوستگی معادله رسوب فرض می‌شود که غلظت اولیه مواد معلق بستر ناچیز است. بنابراین، مشخص کردن غلظت اولیه بار مواد بستر در حجم کنترل لازم نیست. فرض می‌شود پارامترهای هیدرولیکی، دانه-بندی مواد بستر و ظرفیت انتقال محاسبه شده در حجم کنترل یکنواخت باشد. فرض می‌شود بار رسوب جریان ورودی به طور یکنواخت با رسوب موجود در حجم کنترل مخلوط می‌شود. مدل برای دو منبع رسوب، رسوب در آب جریان ورودی و رسوب بستر در نظر گرفته می‌شود. بار رسوب جریان ورودی به عنوان شرایط مرزی بالادست مشخص می‌شود. حجم کنترل رسوب بستر مولفه ته‌نشینی منبع را ارایه می‌کند و در داده‌های ورودی مشخص می‌شود.

ظرفیت انتقال در هر سطح مقطع با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی حاصل از محاسبات پروفیل سطح آب و دانه‌بندی مواد بستر، محاسبه می‌شوند. تفاضل بار رسوب جریان ورودی و ظرفیت انتقال رودخانه به حجم شسته‌شدن/ته‌نشینی، تبدیل می‌شود. بعد از هر مرحله زمانی، مختصات سطح مقطع به مقداری که وقتی در عرض بستر متحرک و طول معرف رودخانه ضرب می‌شود مساوی حجم ته‌نشینی/ شسته شدن لازم می‌شود، پایین یا بالا برده می‌شود.

1 - Exner

فرآیند شسته‌شدن و ته‌نشینی برای الگوریتم‌های عددی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای تبدیل می‌شوند. مبنای شبیه‌سازی حرکت قائم بستر، معادله پیوستگی برای مواد بستر، معادله اکسنر، ویز است.

$$\frac{\partial G}{\partial X} + B_0 \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \qquad (۸)$$

که در آن:

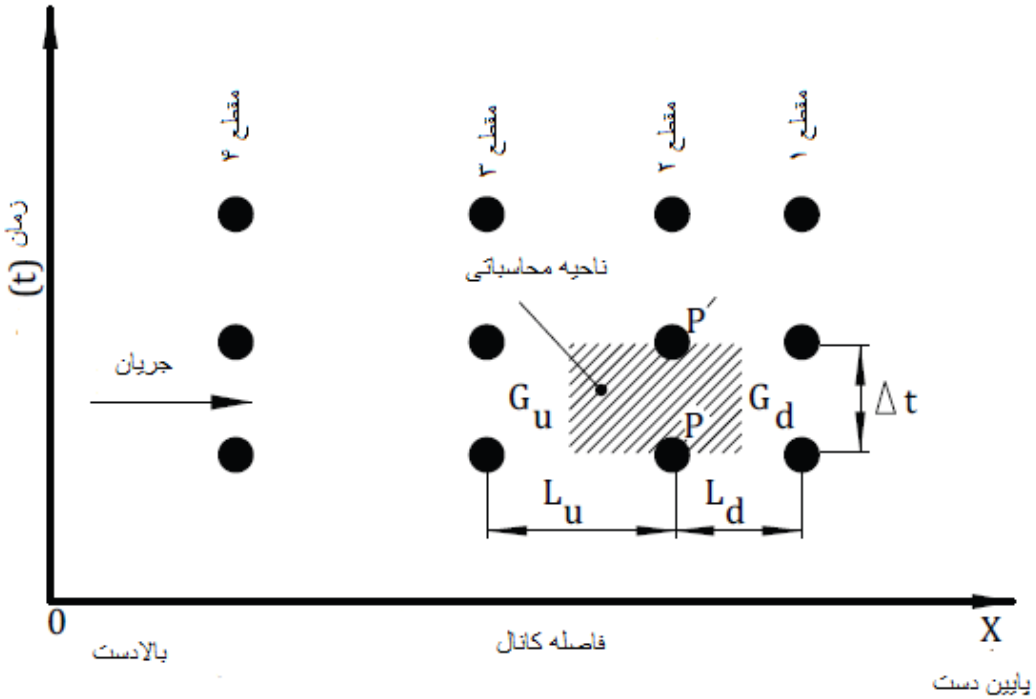
B_0 عرض بستر متحرک؛

t زمان؛

G میانگین مقدار دبی رسوب طی مرحله زمانی؛

X فاصله در طول کانال؛

Y_s عمق رسوب در حجم کنترل، می‌باشند.



شکل۲- شبکه محاسباتی

فرمول زیر معرف معادله اکسنر بیان شده به شکل تفاضل محدود برای نقطه P نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشد:

$$\frac{G_d - G_u}{0.5(L_d + L_u)} + \frac{B_{SP}(Y'_{SP} - Y_{SP})}{\Delta t} = 0 \qquad (۹)$$

$$Y_{SP}^{'} = Y_{SP} - \left[\frac{\Delta t}{0.5B_{SP}}\right]\left[\frac{G_d - G_u}{(L_d + L_u)}\right] \qquad (۱۰)$$

که در آن:

B_{SP} عرض بستر متحرک در نقطه P ؛

G_u و G_d به ترتیب بارهای رسوب در بالادست و پایین دست سطح مقطع؛

L_u و L_d به ترتیب طول رودخانه در بالادست و پایین دست بین سطح مقطع؛

Y_{SP} و $Y_{SP}^{'}$ به ترتیب عمق رسوب قبل و بعد از مرحله زمانی در نقطه P؛

۰٫۵ فاکتور شکل حجم، که به طول روخانه بالادست و پایین دست وزن می‌دهد؛

t مرحله زمانی محاسباتی، هستند.

عمق اولیه مواد بستر در نقطه P مقدار اولیه Y_{SP} را تعریف می‌کند. بار رسوب (G_u)، مقدار رسوب با اندازه دانه، وارد شده در حجم کنترل است. برای رود بالادست، این مقدار شرایط مرزی بار جریان ورودی است. رسوب خروجی از حجم کنترل G_d ، برای حجم کنترل پایین دست بعدی G_u می‌شود.

بار رسوب G_d، با در نظر گرفتن ظرفیت انتقال در نقطه P، رسوب جریان ورودی و دسترسی مواد در بستر محاسبه می‌شود. تفاضل بین G_u و G_d مقدار مواد ته‌نشین شده یا شسته شده در رودخانه است و به تغییر در سطح بستر تبدیل می‌شود.

پتانسیل انتقال هر اندازه دانه برای شرایط هیدرولیکی در آغاز فواصل زمانی محاسبه می‌شود و طی این فواصل مجددا محاسبه نمی‌شود. به هر حال، چون مقدار مواد منتقل شده به اندازه مواد بستر خیلی حساس است، دانه‌بندی مواد بستر طی فاصله زمانی مجددا محاسبه می‌شود.

۷ الزامات داده‌ها

به طور کلی، الزامات داده‌های پایه برای مدل‌های هیدرولیکی با مرز آزاد را می‌توان در سه دسته وسیع، گروه‌بندی کرد: داده‌های هندسی، داده‌های هیدرولیکی و داده‌های رسوب. این داده‌ها شرایط مرزی ضروری برای حل معادلات حاکم را برقرا می‌کنند و قسمت کامل مدل هستند. بنابراین عبارت مدل به جمع‌آوری مجموعه‌ای از معادلات حاکم، روش حل عددی آن‌ها، پیاده‌سازی آن‌ها در برنامه رایانه‌ای و داده‌هایی که نمونه اصلی را تعریف می‌کند، اشاره دارد. داده‌ها برای ساخت، واسنجی، آزمون، تصدیق و به کاربردن مدل‌های جریان غیردایمی و ته‌نشینی رسوب، لازم هستند. جمع‌آوری و آماده کردن داده‌ها اغلب نقش مهمی در تعیین درستی و قابلیت کاربرد راه‌حل‌های عددی نهایی ایجاد شده با رایانه دارند.

داده‌های هندسی توپوگرافی رودخانه‌ای که شبیه‌سازی می‌شود، یعنی بستر کانال، سواحل و مسیل‌ها را مشخص می‌کند. در مدل‌های دو یا سه بعدی، داده‌ها اغلب به صورت مجموعه‌ای از نقاط با مختصات x، y و z آن‌ها، نمایش داده می‌شوند. سپس داده‌ها برای محل‌هایی که گره‌های شبکه در گسسته‌سازی مساله به کار

می‌روند، درون‌یابی می‌شوند. در مدل‌های یک بعدی، معمولا هندسه با سطوح مقطع تعریف می‌شود. هر سطح مقطع خطی نشان دهنده مقطع خاصی از رودخانه مدل‌سازی شده و ارایه شده با مجموعه‌ای از نقاط است و هر کدام با یک فاصله جانبی و ارتفاع بستر در بالای سطح مبنا عمومی، تعریف می‌شوند. این خط اطلاعاتی درباره شکل مقطع و محل‌های کانال‌های فرعی ارایه می‌کند و بهتر است بین محل‌های بالای بیشترین سطوح ارتفاعی در نظر گرفته شود. توصیه می‌شود سطح مقطع عمود بر خطوط جریان باشد. به‌علاوه، باید فاصله بین سطوح مقطع مشخص شود و بهتر است این فاصله در طول خطوط جریان اندازه‌گیری شود. علاوه بر این، قسمت بستر متحرک هر سطح مقطع و عمق مواد رسوبی در بستر در بعضی مدل‌ها لازم هستند.

داده‌های هیدرولیکی شامل شرایط جریان بالادست و پایین دست ضروری، همچنین ضرایب اصطکاک و افت‌های فشار محلی است. جریان‌های زیربحرانی، نیازمند دبی جریان در مرز بالادست و ارتفاع در انتهای پایین دست هستند در حالی که جریان‌های فوق بحرانی نیازمند دبی و ارتفاع در مرز بالادست می‌باشند.

منحنی‌های رتبه‌بندی دبی-تراز، هیدروگراف ارتفاع، یا هیدروگراف شیب- سطح آب، روش‌های عمومی برای تعریف تراز هستند. در مواردی که مرز پایین‌دست، یک سد است، ممکن است برای تعیین تراز، طرح عملیاتی مخزن ارزیابی به کار رود. وقتی دریچه خروجی سد به کار می‌رود، ممکن است از روابط دریچه‌ها و سرریزها استفاده شود. این روابط تابع فشار در سد بوده و لازم است طرح‌های تکراری پیچیده‌تری به کار روند. بعضی از مدل‌ها شامل قابلیت‌هایی برای اجرای دریچه مشخص شده با عملکرد قبلی یا مشخص شده توسط کاربر پارامترهای هیدرولیکی شبیه‌سازی شده باشد (یعنی دریچه‌ها طی شبیه‌سازی در واکنش به تراز مخزن در مراحل زمانی قبلی باز و بسته می‌شوند).

ضرایب اصطکاک نقش مهمی در تعیین ترازها و سرعت‌های جریان دارند. آن‌ها ممکن است از نظر مکانی(جانبی یا طولی) و زمانی به عنوان تابعی از جریان، عمق هیدرولیکی، فصل، دما و تغییرات در شرایط انتقال رسوب، تغییر یابند. ضرایب اصطکاک باید به شکل مقادیر عددی همراه با ناحیه ویژه بستر یا به شکل روابطی که امکان نمایش آن‌ها به عنوان تابعی از سایر پارامترهایی معمول مورد استفاده در پارامترهای هیدرولیک و یا کمیت‌های رسوب را می‌دهد، ارایه شوند. همچنین بهتر است ضرایب افت انرژی محلی (مانند آن چه ناشی از خم‌های کانال، موانع طبیعی یا مصنوعی است) در جریان‌هایی مانند پایه‌های پل و زمین‌های مجاور، دوباره بیان یا محاسبه شوند و معمولا نیازمند روش‌های تکراری که بسیاری از نرم‌افزارها به طور خودکار انجام می‌دهند، می‌باشند. همچنین ثبت این که زبری بستر معمولا طی دوره شبیه‌سازی مخزن به عنوان ریزدانه‌های زیرلایه ناشی از ته‌نشینی رسوب ریزدانه و درشت‌دانه‌های ناشی از ایجاد و گسترش دلتا، تغییر می‌کند، مهم است. بنابراین، انتخاب روشی که پارامتر زبری را بر اساس زیرلایه طی شبیه‌سازی

محاسبه کند یا برای انتخاب پارامتر زبری که شرایط را طی بیشتر شبیه‌سازی (نه ضرورتا شرایط اولیه) نمایندگی می‌کند، مهم است.

داده‌های رسوب شامل تمام اطلاعات ضروری برای محاسبات انتقال رسوب می‌باشند. هیدروگراف جریان ورودی رسوب باید در مرزهای جریان ورودی تعیین شوند. همچنین مشخص کردن توزیع غلظت رسوب در طول این مرزها ضروری است. توزیع دانه‌بندی این جریان‌های ورودی رسوب نیز لازم هستند. توزیع دانه‌بندی شرایط مرزی رسوب اغلب به عنوان تابعی از بار متغیر است (یعنی بارهای بزرگتر ممکن است دارای درصد بیشتری از شن و ماسه باشند). به هر حال، این داده‌ها به ندرت در دسترس بوده و اغلب با قضاوت مهندسی ایجاد می‌شوند. بنابراین معمولا در میان پارامترهای کمتر معین، دانه‌بندی بار جریان ورودی اغلب موثرترین پارامتر واسنجی است.

همچنین لازم است دانه‌بندی مواد بستر برای هر گره شبکه محاسباتی (یا برای هر سطح مقطع، در مورد مدل‌های یک بعدی) تعیین شوند. به هر حال، این یک روش مشترک برای نمونه‌های دانه‌بندی بستر با گره‌ها یا سطح مقطع‌های متعدد یا برای درون‌یابی دانه‌بندی‌ها بین آن‌هایی که دارای داده هستند، می‌باشد. به علاوه، این کار به ویژه در مورد محاسبات شسته شدن و توسعه ذخایر، برای ارایه توزیع اندازه مواد بستر، ضروری است. رسوبات آبرفتی اغلب لایه‌لایه هستند بنابراین بهتر است فرآیند نمونه‌برداری با موضوعات مدل‌سازی، اطلاع رسانی شوند. به هر حال با توجه به این که مدل‌های رسوب مخزن متمایل به مدل‌های ته‌نشینی هستند، آن‌ها اغلب کمتر از سایر مدل‌های بستر نسبت به دانه‌بندی بستر لایه‌ای و دینامیک اختلاط بستر، حساس هستند. اغلب تخمین ساده دانه‌بندی بستر اصلی در داخل ناحیه برگشت آب مخزن، کافی است.

تعیین بعضی اولویت‌های پارامترهای هیدرولیکی ضروری برای شبیه‌سازی موفق، در عمل مشکل است. به همین دلیل، معمولا یک مرحله واسنجی مدل که در آن مشاهدات دبی و تراز در طول مطالعه رودخانه برای تنظیم مقادیر پارامترها مانند زبری بستر، ضرایب دبی یا سایر پارامترهای خاص مورد استفاده در مدل، به کار می‌روند، وجود دارد. به همین ترتیب، توصیه می‌شود یک مرحله واسنجی برای محاسبات انتقال رسوب در نظر گرفته شود. مشاهدات کمیت‌های جریان خروجی رسوب، تغییرات در عرض کانال و ارتفاع بستر و تغییرات توزیع دانه‌بندی رسوب را می‌توان برای تنظیم صحیح پارامترهای مدل به کار برد.

توصیه می‌شود از استاندارد ISO 748 برای اندازه‌گیری سرعت، استاندارد ISO 6416 برای اندازه‌گیری دبی، استاندارد ملی ایران به شماره ۱۹۴۳۴، برای جمع‌آوری سوابق دبی و سطح آب و استانداردهای ISO/TS 3716 ، ISO 4363، ISO 4365 و ISO/TR 9212 برای اندازه‌گیری انتقال بار بستر و بار معلق، منحنی دانه‌بندی، بار معلق و بار رسوب، پیروی شود.

به طور کلی، داده‌ها در مرزهای مدل برای دوره کاملی که جریان و ته‌نشینی رسوب با استفاده از مدل شبیه‌سازی محاسبه می‌شود، لازم هستند. سوابق کوتاه‌مدت و اندازه‌گیری‌های مجزا در محل‌های داخل دامنه مدل برای دوره مورد نیاز هستند که برای واسنجی، آزمون و تصدیق مدل به کار می‌روند.

۷-۱ انتخاب مرزهای مدل

داده‌های قابلیت اطمینان، درستی و شرایط مرزی مناسب برای محاسبه موفق جریان و ته‌نشینی رسوب مورد استفاده در مدل، لازم هستند. در سامانه رودخانه، سه نوع مرز، بالادست، پایین دست و داخلی وجود دارد. مرزهای بالادست و پایین‌دست به ترتیب در سطح مقطع‌هایی که در بالادست‌ترین و پایین‌دست‌ترین هستند، واقع هستند. سه نوع مرز داخلی، نقطه جریان ورودی محلی، نقطه تقاطع فرعی و نقطه کنترل هیدرولیکی، وجود دارد. توصیه می‌شود مرزهای مدل قبل از نصب ابزارهای جمع‌آوری داده‌ها، انتخاب شوند. توصیه می‌شود مرزها در محل‌هایی باشند که حداقل آشفتگی‌های جریان مانند خم‌های تیز، تغییرات سریع در هندسه سطح‌مقطع و جریان‌های ورودی زیاد وجود دارد. توصیه می‌شود طول رودخانه مدل‌سازی شده، برای امکان تعیین درست شیب طولی سطح آب، به حد کافی طویل باشد تا تاثیرات معکوس خطاهای اندازه-گیری، حداقل شود. به‌علاوه، سوابق دبی ترجیحا به عنوان شرایط مرزی بالادست تا حد امکان توسعه داده شوند. بنابراین، گسترش دامنه مدل خارج از رودخانه برای محاسبات جریان به منظور به دست آوردن داده-های ضروری برای شرایط مرزی مدل، مفید می‌باشد.

دو روش عمومی مدل‌سازی سد وجود دارد. عملکرد سد را می‌توان نسبت به شرایط مرزی تراز پایین دست، تعیین کرد. در این مورد، سری‌های زمانی تراز مخزن بالادست سازه، شرایط مرزی پایین‌دست مدل می‌باشد. به هر حال، اگر تاثیرات پایین‌دست سد مورد نیاز باشند، سد را می‌توان به عنوان شرایط مرزی داخلی، اغلب با استفاده از روال‌های متداول عملیات شبیه‌سازی سد، مدل‌سازی کرد.

یک خطای عمومی در مدل‌سازی رسوب مخزن، انتخاب شرایط مرزی بالادست که خیلی به مخزن نزدیک می‌باشد، است. بسیاری از مخازن تاثیرات آب برگشتی دور از بالادست روی قسمت آب مسطح نیمرخ هیدرولیکی، ایجاد می‌کنند. تاثیر آب برگشتی ملایم ممکن است ایجاد ته‌نشینی قابل توجه ، به ویژه شن و ماسه، دور از بالادست مخزن باشد.

۷-۲ داده‌های سطح مقطع

۷-۲-۱ کلیات

توصیف توپوگرافیک ناحیه مدل‌سازی از طریق ویژگی‌های سطح مقطع کانال (و سطح سیل) که تقریبا عمود بر جهت جریان است، حاصل می‌شود. سطح‌مقطع‌ها با تعدای مختصات x-z که x فاصله عرضی از یک نقطه ثابت (اغلب راست یا چپ بالای ذخیره) و z ارتفاع بستر متناظر هستند، مشخص می‌شوند. گسترش عرضی هر سطح مقطع بستگی به الزامات شبیه‌سازی سیل و روش شبیه‌سازی دارد. تعداد سطح‌مقطع‌های لازم از الزامات فیزیکی و محاسباتی تعیین می‌شود. معمولا یک سطح مقطع اندازه‌گیری شده در هر گره محاسباتی

داخل رودخانه مدل لازم است. فاصله دقیق از گره‌های محاسباتی، بستگی به معیار طرح عددی آزمون همگرایی و پایداری دارد.

توصیه می‌شود، برای تعریف تغییرات در شکل کانال در طول هر شاخه مدل به طور مناسب، سطح مقطع تعداد کافی وجود داشته باشد. راه‌حل‌های عددی معادلات حاکم، معمولا میانگین سطح‌مقطع‌های اندازه‌گیری شده در انتهای بالادست و پایین‌دست رودخانه را برای نمایندگی هندسه سطح‌مقطع رودخانه کامل مرزبندی شده با دو مقطع اندازه‌گیری شده، به کار می‌برند. به علاوه، توصیه می‌شود سطح‌مقطع‌های اندازه‌گیری شده نشانگر شرایط بالادست و پایین‌دست اندازه‌گیری باشند. همچنین بهتر است مقاطع اندازه‌گیری شده به حد کافی نزدیک باشند تا تغییرات زیاد در هندسه کانال بین دو مقطع روی ندهد.

توصیه می‌شود فاصله طولی در طول خط مرکزی کانال، اندازه‌گیری شود.

توصیه می‌شود سطح‌مقطع‌ها مطابق استاندارد ISO 748 اندازه‌گیری شود. بهتر است سطح‌مقطع‌ها به داده یکسانی به عنوان سوابق تراز ارجاع داده شود.

۷-۲-۲ مقادیر ضریب n مانینگ

مقادیر ضریب n مانینگ برای هر مقطع فرعی مشخص می‌شود. تغییرات مقادیر n با دبی یا ارتفاع سطح آب در کانال اصلی و نواحی سطح سیل/حواشی رودخانه‌ها را می‌توان مشخص کرد. همچنین در بعضی مدل‌ها، مقاومت نسبی را می‌توان برای هر مختصات (دوتایی) مشخص کرد.

۷-۲-۳ بستر متحرک و لایروبی

حدود بستر متحرک، ارتفاع کف و حدود جانبی کانال لایروبی شده، همچنین عمق لایروبی انجام شده را می‌توان در سوابق ورودی مشخص کرد.

۷-۳ داده‌های تراز

داده‌های تراز در تمام مرزهای خارجی سامانه مدل‌سازی شده به منظور مشخص کردن شرایط مرزی لازم هستند. داده‌های تراز در تقاطع داخلی که کانال‌ها در دامنه مدل متصل می‌شوند، لازم نیستند. در مورد نقاط کنترل هیدرولیکی، سه گزینه برای مشخص کردن تراز به عنوان شرایط مرزی داخلی در دسترس هستند. گزینه اول مشخص کردن منحنی ضابطه برای ایجاد ارتفاع عملکردی ثابت استخر مخزن/جهت‌یابی در محدوده دامنه مدل است. این کار همراه با مشخص کردن ارتفاع سطح آب و افت فشار است. گزینه دوم به کاربران امکان می‌دهد تا منحنی رتبه‌بندی را به عنوان مرز داخلی مشخص کنند. گزینه سوم که در اغلب مدل‌های ایجاد شده وجود دارد، به کار بردن روش‌های متداول برای شبیه‌سازی عملکرد سازه‌های هیدرولیکی است. این گزینه برای مدل‌سازی سرریزها، سرریزهای دریچه‌دار و سازه‌های شیب‌شکن به کار می‌رود. همچنین توصیه می‌شود برای فراهم کردن داده‌هایی برای واسنجی و تصدیق مدل، در حداقل یک و ترجیحا چند محل داخل دامنه مدل، تراز اندازه‌گیری شود.

ارجاع دادن همه اندازه‌گیری‌های تراز به یک سطح مبنای مشترک، خیلی مهم است. خطاها در داده به خطاهای شیب سطح آب که به مقدار زیادی بر جریان محاسبه شده از عبارت سوم فرمول ۲، تاثیر می‌گذارد، تفسیر می‌شوند. کاربرد دبی به عنوان شرایط مرزی بالادست، بسیاری از عدم‌قطعیت‌های همراه با پتانسیل خطاهای سنجه مبنا را از رفع می‌کند.

جز در رودخانه‌های بزرگ (با عرض چند صد متر یا بیشتر)، توصیه می‌شود تراز در فواصل یک ساعت یا کمتر برای مدل‌سازی قابل اطمینان جریان ناپایدار اندازه‌گیری شود. در صورت امکان، توصیه می‌شود فواصل اندازه‌گیری تراز، مضرب کاملی از فواصل محاسباتی باشد و بیشتر از پنج برابر فواصل محاسباتی نباشد.

همچنین اندازه‌گیری هم‌زمان تراز در همه سوابق برای کاربرد مدل‌های جریان غیردایمی برای محاسبه جریان، لازم است. اندازه‌گیری‌های غیر هم‌زمان، مانند خطای سطح مبنا، به خطاها در شیب سطح آب و خطاها در جریان محاسبه شده، تفسیر می‌شوند.

توصیه می‌شود تراز با استفاده از روش بیان شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۱۸۳۶۵ و تجهیزات بیان شده در استاندارد کلی ایران به شماره ۱۹۴۳۴ ، اندازه‌گیری شود.

۷-۴ داده‌های سرعت

اندازه‌گیری‌های سرعت در مطالعه رودخانه برای (۱) ارزیابی فرض جریان یک‌بعدی (۲) محاسبه ضریب اندازه حرکت (فرمول شماره۳)، لازم هستند. معمولا سرعت‌های جریان به دست آمده طی اندازه‌گیری‌های دبی برای این منظور کافی هستند.

توصیه می‌شود سرعت‌ها با روش‌های بیان شده در استانداردهای ISO 748 یا استاندارد ملی ایران به شماره ۲۴۲۵ و تجهیزات بیان شده در استانداردهای ملی ایران به شماره ۹۶۷۹ و ۱۷۲۴۹، اندازه‌گیری شود.

۷-۵ داده‌های دبی

داده‌های دبی برای واسنجی مدل و همچنین به عنوان داده‌های مرزی لازم هستند. داده‌های دبی ممکن است (۱) سری زمانی پیوسته حاصل از رتبه‌بندی دبی- تراز یا به دست آمده از به کار بردن سرعت‌سنج‌های درجا مانند سرعت‌سنج‌های التراسونیک یا (۲) اندازه‌گیری‌های مستقیم باشند. سری‌های زمانی دبی معمولا فقط در مرزهای بالادست لازم هستند. اندازه‌گیری‌های مجزا در داخل دامنه مدل به منظور واسنجی و آزمون مدل، انجام می‌شوند.

توصیه می‌شود دبی با روش‌های بیان شده در استانداردهای ISO 748، ISO 1100-2، ISO 6416 و استانداردهای ملی ایران به شماره ۲۴۲۵ و ۱۸۳۶۵، اندازه‌گیری شود.

۷-۶ جریان‌های ورودی و برداشت‌های جانبی

سوابق تغییر زمانی جریان‌های ورودی اصلی به داخل و برداشت‌ها از رودخانه مدل‌سازی شده باید برای حفظ تعادل جرمی، در مدل لحاظ شوند. جریان‌های ورودی یا کاهش‌ها از رودخانه مدل‌سازی شده مانند جریان ورودی یا کاهش آب زیرزمینی، که نسبتا ثابت هستند، را می‌توان در چند نقطه مجزا در رودخانه متمرکز

کرد یا در هر گره محاسباتی لحاظ کرد. توصیه می‌شود جریان‌های ورودی از جریان‌های بزرگ، اندازه‌گیری شود. جریان‌های ورودی از جریان‌های کوچک و نواحی محلی در طول کانال را می‌توان با استفاده از جریان‌های اندازه‌گیری شده مجاور و نسبت‌های نواحی زهکشی، تخمین زد. در نبود داده‌های جریان، اگر سابقه بارش وجود داشته باشد، می‌توان از مدل‌سازی هیدرولوژیکی یا حوضه بهره‌برداری کرد.

۷-۷ داده‌های رسوب

داده‌های رسوب برای مدل شبیه‌سازی شامل داده‌های بار رسوب ورودی، خواص رسوب و توزیع دانه‌بندی، لازم هستند. همچنین لازم است روابط ظرفیت انتقال و وزن‌های واحد مواد ته‌نشین شده در بعضی مدل‌ها، وارد شود.

بار رسوب (بار کلی) وارد شده در مرز بالادست مدل و در نقاط جریان ورودی محلی را می‌توان به عنوان تابعی از دبی آب در برابر بار رسوب یا به عنوان سری زمانی داده‌های دبی رسوب و آب، بیان کرد. وقتی به عنوان تابعی از دبی آب در برابر بار رسوب بیان می‌شود، این داده‌ها به عنوان جدول بار رسوب با رده اندازه دانه برای یک محدوده دبی آب، مشخص می‌شوند. توصیه می‌شود دبی محدوده کامل هیدروگراف جریان ورودی را پوشش دهد. وقتی به عنوان داده‌های سری‌های زمانی بیان می‌شود، اندازه‌های دانه معرف نسبت اندازه دانه به صورت مجزا مشخص می‌شوند. بعضی مدل‌ها یک مجموعه بار را مشخص می‌کنند و سپس دانه‌بندی، از کلید منحنی رتبه‌بندی برای بار، برداشت می‌شود.

خواص رسوب پایه مشخص شده در داده‌های ورودی، اندازه دانه، گرانش ئیژه، ضریب شکل دانه، وزن واحد ته‌نشینی و سرعت سقوط، هستند.

بسته به نرم‌افزار به کار رفته برای شبیه‌سازی، روش‌های مختلفی برای محاسبه مقدار انتقال رسوب رس‌ها، لای‌ها، شن و ماسه‌ها وجود دارند. بعض از روابط موجود برای انتقال شن و ماسه در مدل‌های مختلف در زیر فهرست شده‌اند.

الف- انگلوند و فردوسه[1](۱۹۷۶)؛

ب- توابع وان ریجن[2](۱۹۸۴)؛

پ-تابع انتقال تافالتی[3](۱۹۶۸)؛

ت- روابط لارسن (۱۹۵۸)، اصلاحات مادن(۱۹۶۳)[4]؛

ث- قدرت جریان برای ماسه‌ها، یانگ (۱۹۷۳)[5]؛

ج- تابع انتقال دابوی(وانونی۱۹۷۵)[6]؛

---

1 - Engelund and Fredsoe
2 -van Rijn functions
3 -Toffaleti’s transport function
4 -Madden’s (1963) modification of Laursen’s (1958) relationships
5 -Yang’s (1973) stream power for sands
6 -DuBoys’ transport function (Vanoni 1975)

چ- تابع انتقال اکر- وایت(۱۹۷۳)[۱]؛
ح- تابع انتقال کالبی(۱۹۶۴)[۲]؛
خ- فرمول هنسن و انگلوند(۱۹۶۷)[۳]؛
د- مدل ژاگی و اسمارت(۱۹۸۳)[۴]؛
ذ- ترکیب تافالتی(۱۹۶۸) و اسکالیچ(۱۹۳۰)[۵]؛
ر- مولر و میر-پتر(۱۹۴۸)[۶]؛
ز- ترکیب تافالتی و میر-پتر و مولر[۷]؛
ژ- کوپلند(۱۹۹۰) اصلاحات روابط لارنس(کوپلند و توماس۱۹۸۹)[۸]؛ و
س- ویژگی‌های ضرایب انتقال مشخص شده توسط کاربر بر مبنای داده‌های مشاهداتی.

به هر حال، توصیه می‌شود این موضوع که اغلب این روابط برای محاسبه انتقال شن و ماسه در موارد جریان رودخانه بدون مانع، ایجاد شده است، مد نظر قرار گیرد. برای مخازن کوچک و حوضه‌های با مواد زاید، ممکن است نتایج نسبت به انتخاب معادله انتقال حساس باشند (گیست[۹] ۱۹۹۶). به هر حال، ته‌نشینی در رودخانه‌های بزرگ اغلب شامل نشست رس و لای در عمق‌های جریان و سرعت‌های خارج از دامنه این توابع انتقال است، آن‌ها برای هر رودخانه بالادست مخزن کاربرد دارد، اما تمایل به قابلیت کاربرد در استخرهای مخزن بزرگ وجود ندارد. دینامیک رسوب در مخازن بزرگ با انباشت‌های چسبنده تمایل به راندن با سرعت‌های سقوط بیشتر از ظرفیت انتقال دارند. بنابراین، دینامیک رسوب ریزدانه را می‌توان با استفاده از روش چسبندگی دیکته شده مانند روش زوج کرون[۱۰] (۱۹۶۲) و پارتنیدس[۱۱] (۱۹۶۵) (که ضرورتا سرعت سقوط برای محاسبه ته‌نشینی به کار می‌رود) یا سرعت سقوط محدودتری که توصیه می‌شود در محاسبه ظرفیت اضافه شود، شبیه‌سازی شود.

۸ فرمولاسیون، واسنجی، آزمون و تصدیق مدل‌ها

مدل‌سازی بر مبنای تفکیک سامانه فیزیکی در قالب ریاضی و همانندسازی سامانه با استفاده از این عبارات و داده‌های صحرایی مناسب، می‌باشند. توصیه می‌شود تحلیلگر گزینه‌های مهم سامانه جریان را مشخص کند و

1 -Ackers-White (1973) transport function
2 -Colby (1964) transport function
3 -Engelund and Hansen Formula (1967)
4 -Smart and Jaeggi model (1983)
5 -Toffaleti (1968) and Schoklitsch (1930) combination
6 -Meyer-Peter and Muller (1948)
7 -Toffaleti and Meyer-Peter and Muller combination
8 -Copeland's (1990) modification of Laursen's relationship(Copeland and Thomas 1989)
9 -Gist
10 -coupled Krone
11 -Parthenaides

مطمئن شود که این گزینه‌ها در مدل انتخاب شده برای به کار بردن در مطالعه رودخانه، پاسخ داده می‌شوند. ویژگی‌های مدل عمومی شامل موارد زیر است:

الف- قابلیت شبیه‌سازی دامنه وسیع شرایط جریان؛

ب- قابلیت نمایندگی دامنه شرایط و هندسه کانال؛

پ- طرح محاسباتی موثر، همگرایی عددی، پایدار؛

ت- سامانه برای داده‌های ورودی مدل فرآیندسازی شده و نتایج شبیه‌سازی خروجی.

توصیه می‌شود همه مدل‌های عددی به صورت عددی نخست با راه‌حل خطی یا غیرخطی تایید شود. زمانی که به صورت ریاضی صحت مدل ثابت شد، بهتر است با مجموعه‌ای از فرآیندهای عددی معتبر که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی تجربی، برای تعیین قابلیت مدل برای باز تولید فرآیندهای فیزیکی پایه مربوط به مطالعه مسایل زندگی واقعی با مدل انتخابی ارزیابی شود. قبل از این که یک مدل با صحت ریاضی و قابلیت فیزیکی برای تحقیق یک مساله جهان واقعی به کار رود، یک مرحله بیشتر، مورد کاربرد و تصدیق ویژه محل لازم است.

۸-۱ فرمولاسیون مدل‌های عددی

رفتار رسوب‌ها در مخزن با انواع شکل‌های سه بعدی گردش آب و مشخصات مخلوط آب و رسوب (یعنی رژیم‌های شیمیایی[1]، توزیع دانه‌بندی، لایه‌بندی و چگالی سه‌بعدی جریان‌ها، لخته شدن و تحکیم رس، هوازدگی مجدد ریزدانه‌ها) تعیین می‌شوند. بسیاری نیروهای دینامیکی متغیر و مکانیک‌ها دخیل هستند و بسیاری از پدیده‌ها هنوز به خوبی تعریف نشده‌اند. کاربرد مدل‌های ریاضی برای زمان و مکان تحلیل فرآیندهای وابسته و رفتار مکانی جریان و رسوبات را ممکن می‌کند.

تعداد زیادی از مدل‌های ریاضی برای زمان و مکان وابسته به توزیع رسوب در دسترس هستند. تقریبا همه مدل‌ها که برای اهداف عملی ایجاد شده‌اند، یک‌بعدی (یعنی سطح مقطع متوسط) هستند. جنبه‌های اصلی آماده‌سازی و واسنجی مدل‌های یک بعدی در ادامه بیان شده‌اند.

۸-۱-۱ هیدرولوژی

در اغلب مدل‌های یک‌بعدی، هیدروگراف جریان یک‌بعدی به عنوان مجموعه‌ای از فواصل با دبی ثابت مشخص شده‌اند. با توجه به این که انتقال رسوب در دوره‌های با دبی بیشترمتمرکز شده‌اند، ممکن است جریان‌های کم با یک دوره طولانی از دبی‌های ثابت شبیه‌سازی شود.

۸-۱-۲ هندسه

توصیه می‌شود برای نمایش رفتار سامانه رودخانه‌ای در مدل یک‌بعدی، هندسه سامانه مشخص شود به طوری که رفتار هیدرولیکی اساسی نمونه اصلی، باز تولید شود. توصیه می‌شود هندسه مدل برای شبیه‌سازی

1 -chemical regimes

مسیر جریان یک‌بعدی طی شده با رسوب و آب جاری به سمت سد، پیکربندی شود و توصیه می‌شود محل-های سطح مقطع برای انعکاس رفتار هیدرولیکی متوسط رودخانه انتخاب شود.

توصیه می‌شود فاصله بین سطوح مقطع برای باز تولید مشخصات هیدرولیکی رودخانه انتخاب شود. هندسه سطح مقطع در نقطه مشخص ممکن است تنظیماتی برای شبیه‌سازی بهتر مشخصات هیدرولیکی رودخانه، لازم داشته باشد. توصیه می‌شود نواحی غیر موثر هیدرولیکی رودخانه قرار گرفته در بیرون مسیر جریان اصلی، مشخص شود و به عنوان نواحی جریان صفر نشانه‌گذاری شود. اغلب مدل‌ها دارای قابلیت مشخص کردن قسمت‌های سطح‌مقطع‌های غیر موثر هستند. اگر مدل‌ها دارای این قابلیت نباشند، سطح مقطع را می‌توان کوتاه کرد، اما این کار خطای ناشی از کاهش ذخیره در قسمتی از سطح مقطع، ایجاد خواهد کرد.

علاوه بر تعریف هندسه هیدرولیکی اولیه سطح مقطع، تعریف عرض و عمق بستر متحرک ضروری است. توصیه می‌شود بر مبنای بازرسی کارگاهی این تعریف، انجام شود.

۸-۱-۳ انتخاب معادله انتقال

استفاده از معادلات انتقال مواد بستر مختلف در مدل‌های عددی ممکن است اختلافات مهمی در نتایج شبیه‌سازی ایجاد کند. وقتی داده‌های بار مواد بستر اندازه‌گیری شده در دسترس هستند، بهتر است برای انتخاب معادله قابل کاربرد، معادلات انتقال برای مقادیر اندازه‌گیری شده ، مقایسه شوند. اگر الگوهای ته-نشینی تاریخی در دسترس باشند، بهتر است رابطه انتقالی که بهترین الگوهای تاریخی مشاهده شده را بازتولید می‌کند، انتخاب شود. بعضی مدل‌ها، پارامترهایی از معادلات انتقال کلاسیک، مانند برش مرجع، که به کاربر امکان می‌دهد رفتار بهترین معادله موجود طی مرحله واسنجی پروژه را اصلاح کند، به کار می‌برند.

اگر هیچ یک از معادلات برازش مناسبی ارایه نکند، معادلات انتقال رسوب سفارشی را می‌توان به کار برد. با به کار بردن داده‌های موجود جمع‌آوری شده از ایستگاه رودخانه، بار یا غلظت رسوب را می‌توان به عنوان تابعی از دبی آب، سرعت، شیب، عمق، تنش‌های برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد، رسم کرد.

در مواردی که داده‌های کارگاهی یا الگوهای ته‌نشینی تاریخی وجود ندارد، ممکن است معادلات انتقال بر اساس مقایسه شرایط در نواحی مورد مطالع با مجموعه داده‌های به کار رفته در ایجاد هر معادله، انتخاب شوند. زمانی که انتخاب معادله انتقال صحیح برای نمایش دینامیک رسوب بالادست مخزن، حیاتی است، اغلب مدل‌های رسوب به طور نسبی به معادلات انتقال انتخاب شده در خود مخزن، غیر حساس هستند. با توجه به این که سرعت آب در اغلب مخازن خیلی کم است، ظرفیت محاسبه شده با تمام معادلات نزدیک به صفر است. بنابراین، دینامیک‌های رسوب در مخزن بیشتر به شبیه‌سازی این که سرعت سقوط چگونه ته-نشینی را در این سطح مقطع‌های با ظرفیت کم محدود می‌کند وابسته است.

۸-۱-۴ الگوریتم اختلاط و حفاظت بستر[1]

اغلب مدل‌ها رسوبات بستر را به منظور محاسبه ظرفیت انتقال بر مبنای بیشترین رسوبی که منتقل می‌شود، به لایه‌هایی (یعنی لایه‌های فعال و غیر فعال) تقسیم می‌کنند. این موضوع برای مدل‌های فرسایش اهمیت بیشتری دارند، بنابراین ته‌نشینی مخزن به الگوریتم اختلاط انتخاب شده، خیلی حساس نیست. به هر حال، فرسایش پایین‌دست سد به شدت با فرآیندهای حفاظت و اختلاط بستر تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. اگر این فرآیندها مورد نظر باشد، توصیه می‌شود الگوریتم اختلاط بستری که قابلیت شبیه‌سازی آن‌ها را داشته باشد، انتخاب شود.

۸-۲ آزمون‌های مقدماتی

در بسیاری از موارد، انجام آزمون‌های مقدماتی با استفاده از هندسه کانال و شرایط مرزی ساده شده، مناسب است.

توصیه می‌شود آزمون‌ها با به کار بردن کانالی که دارای سطح مقطع مستطیلی یکنواخت و با مدل پیکر بندی شده برای مطالعه رودخانه، انجام شود. آزمون‌ها با به کار بردن مدل سطح مقطع مستطیلی ممکن است شامل موارد زیر باشد:

الف- توصیه می‌شود جریان ورودی و شیب بستر و جریان در داخل دامنه مدل ایجاد نشود.

ب- جریان‌های ورودی دایمی و غیردایمی، توصیه می‌شود جرم حفاظت شده باشد.

پ- هیدروگراف جریان ورودی مثلثی شکل در کانال بدون شیب بستر، توصیه می‌شود جریان پیک به طور قابل توجهی ضعیف شود.

بعد از این که مدل برای مطالعه رودخانه با استفاده از داده‌های سطح مقطعی اندازه‌گیری شده فرموله شد، آزمون‌ها به صورت زیر انجام می‌شود:

الف- بدون جریان ورودی یا شیب سطح آب، توصیه می‌شود جریانی در دامنه مدل ایجاد نشود، اگر بازشوهای غیر عمدی در مرزها وجود داشته باشد، نیز این آزمون‌ها مشخص می‌کنند.

ب- جریان دایمی و غیردایمی، توصیه می‌شود جرم حفاظت شود.

پ- تغییرات زیاد در شرایط مرزی جریان ورودی، توصیه می‌شود ناچایداری عددی ایجاد نشود.

ت- آزمون استحکام برای یافتن نوسانات عددی یا مصنوعات محاسباتی به کار می‌رود. توصیه می‌شود شبیه‌سازی درازمدت رسوب با هندسه پروژه (بدون سد) و جریان و بار رسوب ثابت انجام شود. به طور کلی کانال ایجاد کننده دبی و بار رسوب متناظر، به کار می‌رود. در صورتی که کانال ایجاد کننده دبی صحیح باشد و کانال اصلی در تعادل باشند، این شبیه‌سازی باید به راه‌حل پایدار همگرا شود.

---

[1] -Bed mixing and armoring algorithm

ث- تغییر در شرایط مرزی از یک جریان پایدار به جریان دیگر، مقدار زمان لازم برای این که تمام جریان‌های داخل دامنه مدل به شرایط پایدار جدید برسند، نشانه مدت زمان مقاومت شرایط اولیه در دامنه مدل است. معمولا نتایج مدل تا زمانی که تاثیرات شرایط اولیه به بیرون دامنه مدل انتقال یابد به طوری که مدل فقط به شرایط مرزی واکنش نشان دهد، پذیرفته نمی‌شوند.

۸-۳ شبکه محاسباتی و مرحله زمانی

شبکه محاسباتی برای نمایش سامانه فیزیکی در مدل شبیه‌سازی به کار می‌رود. تقاطع‌ها، سازه‌های هیدرولیکی، جریان‌های ورودی و خروجی باید با شبکه محاسباتی نمایش داده شود.

انتخاب شبکه محاسباتی یک کار مهم در فرآیند مدل‌سازی است. انتخاب با دقت شبکه محاسباتی از بسیاری از مشکلات طی مرحله واسنجی و کاربرد جلوگیری می‌کند. توصیه می‌شود طراحی شبکه محاسباتی بر مبنای درک کامل هیدرولیک نواحی که مدل‌سازی می‌شود و دانستن نحوه کارهای مدل باشد. بعضی رهنمودهای کلی برای انتخاب شبکه محاسباتی در زیر ارایه شده‌اند:

الف- توصیه می‌شود داده‌های عمق‌سنجی/توپوگرافی برای کل ناحیه مورد مطالعه در دسترس باشند؛

ب- توصیه می‌شود در سری‌های زمانی مرزی مدل سطح آب یا دبی یا منحنی رتبه‌بندی در دسترس باشند؛

پ- برای اطمینان از این که تغییرات در ناحیه مورد مطالعه بر مرز تاثیر نمی‌گذارد توصیه می‌شود مرز در فاصله کافی از ناحیه مورد نظر باشد.

برای حل تخمین عددی معادلات حاکم سامانه کانال به تعدادی از قسمت‌های محدود تقسیم می‌شود. نقاط حل در انتها یا وسط قسمت هستند. توصیه می‌شود شبکه محاسباتی به نحوی ایجاد شود که محاسبات تراز و دبی منطبق بر محل‌های جمع‌آوری داده‌ها یا محل‌هایی که داده‌های محاسباتی لازم هستند، باشند. توصیه می‌شود داده‌های سطح مقطع در انتهای هر سل شبکه محاسباتی وجود داشته باشد.

بعضی مدل‌ها اجازه بخش‌هایی با طول یکنواخت را می‌دهند، اما در مدل‌های دیگر لازم است تا همه بخش‌ها دارای طول یکسانی باشند. توصیه می‌شود طول بخش‌ها حداقل سه برابر بزرگتر از عرض کانال و غالبا ۵ تا ۱۰ برابر عرض کانال باشد. طول دقیق بخش طی آزمون همگرایی تعیین می‌شود.

توصیه می‌شود مرحله زمانی آزمون برای نمایندگی درست ناپایداری جریان که در سامانه مدل‌سازی شده روی می‌دهد، به مقدار کافی کم باشد. معمولا، برای برآورده کردن معیار پایداری به جای تنظیم فواصل گسسته‌سازی مکانی، مرحله زمان محاسباتی کاهش می‌یابد. به هر حال، در بعضی موارد، درون‌یابی سطح مقطع برای اصلاح گسسته‌سازی مکانی وقتی هر دو نیاز به کاهش دارند، به کار می‌رود. در شبکه محاسباتی، آزمون همگرایی به تعیین حداکثر مرحله زمانی که به کار می‌رود، کمک می‌کند.

۸-۴ آزمون همگرایی

اگر حل عددی به راه حل صحیح معادله دیفرانسیل برسد به طوری که گسسته‌سازی مکانی تفاضل محدود صفر شود، راه‌حل تفاضل محدود همگرای مکانی است. همگرایی مکانی را می‌توان با به کار بردن مکرر مدل با مجموعه ثابتی از شرایط مرزی برای گسسته‌سازی، آزمایش کرد. اگر تغییر دیگری در نتایج مدل مشاهده نشود، به طوری که مرحله مکانی تصحیح شود، مدل از نظر مکانی همگرا است. همچنین اگر نتایج مدل به اساسا بدون تغییر باقی بمانند به طوری که مرحله زمانی محاسبات کاهش یابد، مدل به طور موقت همگرا است. توصیه می‌شود آزمون همگرایی قبل از واسنجی مدل برای تعیین تاثیر گسسته‌سازی مکانی و مرحله زمانی بر نتایج مدل، انجام شود.

۸-۵ شرایط اولیه و مرزی

دو شرط اولیه (Q و z برای فرمولاسیون معادلات جریان غیردایمی به کار رفته در این استاندارد) در هر گره محاسباتی در دامنه مدل، لازم است. برای هر کاربرد اولیه مدل برای مطالعه رودخانه، شرایط اولیه عمومی، جریان دایمی مساوی با شرایط مرزی اولیه جریان و سطح آب که شیب‌های خطی از تراز بالادست اندازه‌گیری شده، هستند. این موضوع در اغلب مدل‌های ایجاد شده برای محاسبه ساده‌تر آب برگشتی جریان دایمی بر مبنای شرایط مرزی در نخستین مرحله زمانی نخست، متداول است. این کار در هر گره مقادیر Q و z ارایه می‌کند و این معمولا تقریب بهتری برای Q و z برای مرحله زمانی نخست می‌باشد. همچنین ممکن است خروجی کاربرد مدل جریان غیردایمی قبلی برای تعیین شرایط اول برای شبیه‌سازی برای مراحل بعدی زمانی، به کار رود.

ممکن است مدل فقط برای دوره‌هایی که شرایط مرزی اندازه‌گیری شده به کار رود. شرایط مرزی شامل سری‌های زمانی تراز اندازه‌گیری شده در مرزهای پایین‌دست، تراز یا دبی اندازه‌گیری شده در مرزهای بالادست، جریان‌های ورودی جانبی اندازه‌گیری شده و دبی رسوب اندازه‌گیری شده در مرزهای بالادست و نقاط جریان ورودی می‌باشد.

۸-۶ واسنجی

کاربردهای مدل‌های عددی برای بررسی مسایل ته‌نشینی، به شدت متکی به واسنجی پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل مورد بررسی است. بنابراین، قبل از کاربرد مدل برای بررسی مسایل واقعی در طبیعت، باید با داده‌های کارگاهی، آزمون شود. کاربرد مدل برای هر مساله واقعی باید دارای پارامترهای معرف مشخصات منحصر محل مورد مطالعه تعیین شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل باشد. این کار، واسنجی ویژه محل نامیده می‌شود. توصیه می‌شود کاربر تمام داده‌های اندازه‌گیری شده در واسنجی را به کار نبرد. در عوض، حداقل نصف یا بیشتر داده‌ها برای تصدیق انطباق و نحوه نزدیکی یا کفایت مدل برای پدیده‌های طبیعی، حفظ شود. به علت عدم‌قطعیت ذاتی در فرآیندهای انتقال رسوب، داده‌ها و معادلات، اگر پیش‌بینی مفید آینده مورد انتظار باشد، واسنجی مدل رسوب ضروری است.

واسنجی با تنظیم پارامترهای مدل توام است تا نتایج مدل با مشاهدات در محدوده رواداری‌های معین، موافق باشد. ضرورتا، همه مولفه‌های مدل در معرض تنظیم طی واسنجی مدل می‌باشند. مولفه‌هایی که مستقیما قابل اندازه‌گیری هستند و از نظر فیزیکی به خوبی تعریف شده‌اند، نسبت به پارامترهایی که امکان اندازه‌گیری مستقیم ندارند، کمتر در معرض تنظیم هستند. این موضوع منجر به راه‌حل غیر منحصر می‌شود. بنابراین، توصیه می‌شود هدف فرآیند واسنجی تنظیم پارامترهای حساس‌تر و نامطمئن برای تنظیم باشد. اغلب پارامترهای واسنجی مشترک برای مدل رسوب منبع ضرایب (m و b در $Q_s=mQ^b$) منحنی بار جریان، دانه‌بندی رسوب جریان ورودی و دما، می‌باشند. اندازه‌ها برای تعیین کمیت واسنجی در بند ۸-۷ بیان شده است.

قبل از مبادرت به واسنجی رسوب، توصیه می‌شود واسنجی هیدرولیکی مناسبی تکمیل شود. مدل بستر ثابت برای اجرای واسنجی هیدرولیکی برای جریان‌های کم، زیاد و پر قبل از واسنجی برای رسوب، به کار برید. در ابتدا، ضریب مقاومت، ضریب تکانه[1] و ضرایب وزن‌دهی برای طرح عددی به علت این که این پارامترها قابل اندازه‌گیری نیستد، تغییر یابد. به منظور حصول واسنجی قابل قبول در جریان‌های کم و زیاد، اغلب تغییر قائم (یا وابستگی جریان) در ضریب مقاومت لازم است. اگر بعضی عدم‌قطعیت‌ها درباره درستی سطح مبنا وجود داشته باشد، سطح مبنای سنجه مرزی ممکن است کمی تنظیم شود. هندسه سطح مقطع ممکن است طی فرآیند واسنجی، تنظیم شود. با توجه به این که سطح‌مقطع‌های تنظیم شده برای نشان دادن شرایط میانگین در بخش محاسباتی، به جای شرایط واقعی در سطح مقطع اندازه‌گیری شده به کار می‌رود، اصلاح هندسه کانال توجیه می‌شود. توصیه می‌شود اصلاحات واسنجی با روندی در جهت یکسان با ترتیب محاسباتی انجام شود. بنابراین، برای مرحله استاندارد زیربحرانی محاسبات هیدرولیکی، می‌توان اصلاحات در حد پایین‌دست مدل شروع و در بالادست ادامه داد. موقع واسنجی برای رسوب، اصلاحات را می‌توان در انتهای بالادست مدل شروع و در پایین‌دست ادامه داد. توصیه می‌شود حد بالادست مدل شامل رودخانه‌ای دارای مشخصات پایدار در تمام شبیه‌سازی تحت شرایط موجود و پیشنهادی باشد.

در مخازن موجود، ممکن است واسنجی با استفاده از داده‌های موجود، اندازه دانه‌ها و تغییر هندسه، بعد از وقت تعیین شده انجام شود. در رودخانه‌های فاقد داده‌های انتقال و در محل منابع پیشنهادی، بهتر است مدل با شبیه‌سازی شرایط موجود واسنجی شود. برای محل مخزن پیشنهادی، ممکن است مدل عددی برای شبیه‌سازی مخزن موجود مشابه در منطقه به کار رود. این کار ممکن است قابلیت مدل در شبیه‌سازی فرآیند مربوط و کمک به انتخاب معادلات انتقال و مقادیر پارامترها نشان دهد.

اغلب رویکرد مشترک برای واسنجی مدل مخزن، جمع‌آوری سطح مقطع‌های تکراری و تلاش برای شبیه‌سازی تغییر در جرم یا حجم رسوب هراه با هر گره محاسباتی است. اغلب واسنجی رسوب در مراحل

1 -momentum

تکراری، دنبال می‌شود. نخست، منحنی بار جریان برای تکرار تغییر جرم یا حجم کلی در مخزن اصلاح می‌شود. دوم، توزیع دانه‌بندی بار جریان ورودی برای مطابقت با توزیع طولی رسوبات ته‌نشین شده اصلاح شود. رسوبات درشت‌تر در بالادست و رسوبات ریزتر نزدیک سد، ته‌نشین می‌شوند، بنابراین توزیع نسبی رسوب را می‌توان برای مطابقت با الگوی ته‌نشینی مکانی در مخزن، اصلاح کرد. این کار اغلب برای تکرار بین این دو مرحله برای تصحیح واسنجی ضروری است. در پایان، اگر داده‌های دانه‌بندی انباشت‌های رسوب در دسترس باشد، توزیع دانه‌بندی انباشت‌های محاسبه شده را می‌توان برای کنترل و تصحیح دانه‌بندی انتخاب شده بار جریان ورودی، به کار برد. مد نظر قرار دادن این موضوع موقع جمع‌آوری داده‌های دانه‌بندی مخزن مهم است، چون رسوبات مخزن نتیجه دانه‌بندی است که درشت‌دانه‌ها در بالا و ریزدانه‌ها در کف قرار می‌گیرند. بنابراین این رسوبات تمایل به لایه‌ای شدن و تغییر دانه‌بندی سطحی بعد از اتمام زمان (درشت شدن در محل ارایه شده) دارند.

۸-۷ صحه‌گذاری

یک قسمت مناسب از داده‌های صحرایی جمع‌آوری شده در محل مورد مطالعه برای واسنجی مقادیر ویژه محل پارامترهای مدل، به کار می‌روند. سپس، مدل واسنجی شده برای پیش‌بینی مشخصات صحرایی و فرآیندهای تحمیلی بیان شده، به کار می‌رود. سپس نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در محلی یکسان تحت شرایط تحمیل شده یکسان، مقایسه می‌شوند. اگر مطابقت منطقی بین شبیه‌سازی‌های مدل و اندازه‌گیری‌های صحرایی حاصل شود، مدل عددی برای کاربرد مورد مطالع در محل مورد نظر، تصدیق می‌شود. طی آزمون‌های تصدیق، این که پارامترهای مدل واسنجی شده را نتوان تغییر داد یا تنظیم کرد، خیلی مهم است.

برای انجام موفق تصدیق مورد کاربرد و ویژه محل، بهتر است مقدار کافی از داده‌های صحرایی با کیفیت زیاد جمع‌آوری شده در محل‌های با طراحی مناسب با توزیع مکانی مناسب، وجود داشته باشد. با توجه به این حقیقت که مدل عددی، یک سامانه ایده‌آل سازی و ساده‌سازی شده مساله واقعی را نمایش می‌دهد، انتظار نمی‌رود نتایج شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های صحرایی در مطابقت کامل باشند. نتایج مفیدتر و مهم‌تر، روند متغیرهای موقتی و مکانی سامانه‌های طبیعی می‌باشد. بنابراین، توصیه می‌شود از روند متغیرهای سامانه پیش‌بینی شده با مدل محاسباتی، به طور منطقی درست و قابل اطمینان، اطمینان حاصل شود.

مقایسه گرافیکی اطلاعات اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده اغلب برای تصدیق مدل‌های عددی به کار می‌رود، اما ممکن است اشتباه باشد. اندازه‌گیری‌های انحراف بین نتایج مدل و داده‌ها شامل، خطاهای نسبی و ریشه میانگین مربع است.

آزمون‌های آماری مهم برای تعیین این که انحرافات معنی‌دار هستند یا این که به سادگی متناسب با قابلیت تغییر داده‌ها می‌باشند، ضروری است. بنابراین داده‌های غیر مستقل آماری برای آزمون معنی‌دار، لازم هستند.

در نتیجه، توصیه می‌شود داده‌ها و نتایج مدل در فواصل بزرگتر از مقیاس زمان همبستگی قبل از اعمال آزمون‌های آماری حتمی مانند آزمون t، جمع‌آوری شوند.

در صورت امکان، بهتر است مدل روی محدوده‌ای از شرایط جریان که به مدل اعمال می‌شود، تصدیق شود. ممکن است مدل برای جریان‌هایی خارج از محدوده‌ای که مدل آزمون شده و شرایطی که زیاد تغییر نکرده است، به کار رود.

با توجه به این که مدل انتقال رسوب دارای پارامترهای فیزیکی (مانند ظرفیت انتقال رسوب) بیشتری نسبت به مدل جریان است، و این پارامترها در رودخانه‌ها و در فصل‌های مختلف بیشتر در معرض تغییر هستند، توصیه می‌شود مدل جریان ابتدا از آزمون‌های تایید و تصدیق قرار گرفته و سپس مدل انتقال رسوب رویه مشابهی را طی کند.

۸-۸ شبیه‌سازی پیش‌بینی

زمانی که مدل واسنجی و صحه‌گذاری شد، می‌توان آن را برای پیش‌بینی با مقداری اطمینان به کار برد. معمولا مدل‌سازی پیش‌بینی رسوب سوالات مدیریتی درباره مقدار رسوب مخزن دربر خواهد داشت. این مدل‌ها معولا شبیه‌سازی‌های درازمدت (معمولا ۳۰ تا ۵۰ ساله) هستند که ارتفاع رسوب را در مدخل آبگیر یا تغییرات در ظرفیت هیدرولوژیک (یعنی منحنی‌های حجم- ذخیره) را بعد از مدت زمانی، پیش‌بینی می‌کند. این موضوع نیازمند انتخاب سری‌های زمانی هیدرولوژیکی نشان دهنده آینده که اغلب بزرگترین منبع عدم قطعیت در مطالعه رسوبات مخزن می‌باشند، هستند. تکرار جریان قبلی به سادگی برای نشان دادن هیدرولوژی آینده، متداول است. به هر حال، اگر سابقه تاریخی نشان دهنده هیدرولوژی سامانه نباشد، این رویکرد ممکن است زیر یا روی ته‌نشینی رسوب پیش‌بینی شده باشد. بنابراین، معمولا انجام تحلیل هیدرولوژی آماری و همچنین تحلیل‌های تاریخی و منطقه‌ای برای ارزیابی چگونگی سوابق جریان، مفید است. سری‌های زمانی تصادفی را می‌توان برای تخمین ته‌نشینی رسوب مورد انتظار در آینده و تعیین کمیت عدم قطعیت نتایج مربوط به عدم قطعیت هیدرولوژی آینده، ایجاد کرد.

۸-۹ آزمون حساسیت

آزمون حساسیت شامل ارزیابی تغییر در نتایج مدل برای تغییرات در پارامترهای مدل انتخابی می‌باشد. توصیه می‌شود پارامترها یا شرایط لحاظ شده در آزمون حساسیت، شامل ضریب مقاومت، ضرایب وزن‌دهی، به کار رفته در طرح عددی، ضریب تکانه، تابع انتقال رسوب و هندسه کانال باشد. رویه معمول افزایش تدریجی پارامترها با مقادیر کم، به کار بردن مدل و مقایسه نتایج با نتایج واسنجی مدل است. مدلی که حساسیت بیشتری به تغییرات کم در یک یا چند پارامتر دارند، ممکن است برای شرایط خارج از آن چه برای واسنجی مدل به کار رفته، ناپایدار شوند و باید موقع به کارگیری مدل، دقت بیشتری شود. حساسیت ایجاد شده در مدل‌های انتقال رسوب یک بعدی برای پارامترهای ورودی در جدول ۱ ارایه شده است.

۸-۱۰ مدل‌های ویژه

بعضی مدل‌های ویژه و مطالعات موردی کاربرد آن‌ها که با موفقیت برای رسوب‌سازی مخزن به کار رفته‌اند به همراه مراجع آن‌ها، در پیوست الف ارایه شده است.

جدول۱- تاثیر نسبی پارامترهای ورودی بر مدل‌های شبیه‌سازی رسوب

توصیف داده‌ها	اهمیت نسبی داده‌ها		
	زیاد	متوسط	کم
پارامترهای فیزیکی			
ضریب زبری		X	
جریان ورودی رسوب	X		
جریان ورودی آب	X		
تغییرات ارتفاع رسوب		X	
توزیع اندازه رسوب(بستر)			X
توزیع اندازه رسوب(بار جریان	X		
دمای آب		X	
هندسه سطح مقطع	X		
ضخامت لایه فعال			X
ضریب کاهش			X
پارامترهای عملکردی			
معادله انتقال رسوب		X	
مدت مرحله زمانی	X		
تعداد تکرارهای زمانی			X
معادله زبری			X

۹ عدم قطعیت‌ها

۹-۱ پارامترهای مدل

تعدادی از فرآیندهای فیزیکی که به طور صریح در معادله اندازه حرکت (فرمول۲) بیان نشده‌اند در ضریب زبری کانال (در این مورد ضریب n مانینگ) لحاظ شده‌اند. ضریب مانینگ n ضریبی تجربی است که زبری

کانال را در جریان یکنواخت دایمی تقریب می‌زند. به هر حال، پارامترهای فرمول ۲ برای جریان غیردایمی نیز به کار می‌رود و از نظر فیزیکی شامل تاثیرات اتلاف آشفتگی انرژی در چندین فرآیند، می‌باشد.

ضریب مانینگ n، همچنین ضرایب وزن‌دهی که در طرح‌های عددی معین به کار می‌روند، را نمی‌توان اندازه گیری کرد و این پارامترها طی واسنجی مدل برای به دست آوردن توافق بین نتایج مدل و اندازه‌گیری‌های نمونه اصلی، تنظیم می‌شوند. در نتیجه، این پارامترهای مدل ممکن است شامل (۱) انحراف سامانه مدل‌سازی شده از فرضیات مدل، (۲) تاثیرات تقریب‌های عددی از معادلات حاکم، و (۳) خطاها در اندازه‌گیری‌های کارگاهی باشد. تعیین کمیت عدم‌قطعیت‌های همراه با ترکیب این فرآیندها با پارامترهای کم مدل، اگر غیر ممکن نباشد، مشکل است. بنابراین توصیه می‌شود پارامترهای مدل انتخاب شده طی واسنجی و آزمون مرحله ایجاد مدل در محدوده مقادیری که قبلا منتشر شده، باشد. به عبارت دیگر ، مقادیر پارامتر مدل غیرواقعی ممکن است بعضی خطاهای جدی را پنهان کند ، خطاهای مدلی که ممکن است منجر به شبیه‌سازی ضعیف شرایط شود که طی آزمون مدل ارزیابی نشده‌اند.

۹-۲ داده‌ها برای ایجاد، آزمون و کاربرد

جمع‌آوری داده‌های صحرایی رسوب و هیدرولیکی در معرض تعدادی از عدم‌قطعیت‌ها هستند. تعیین کمیت عدم‌قطعیت‌های اندازه‌گیری تراز، سرعت، دبی، دبی بار بستر و بار معلق، توزیع دانه‌بندی مواد بستر و داده-های سطح مقطع در استانداردهای مربوط بیان می‌شوند.

توصیه می‌شود عدم‌قطعیت‌های تخمین جریان‌های ورودی جانبی و برداشت‌ها با اندازه‌گیری درست بسیاری از ورودی‌ها و کاهش‌ها، تا حد ممکن حداقل شود.

تاثیرات عدم‌قطعیت‌های تابع انتقال رسوب را می‌توان با انتخاب تابع انتقال ایجاد شده با استفاده از پارامترهای مناسب برای سامانه مخزن، حداقل کرد.

۹-۳ معادلات حاکم

فرمول‌های ۲،۱ و ۳ در یک لحظه زمانی به حجم بسیار کوچک اعمال می‌شوند. برای ایجاد و به کار بردن مدل‌های جریان غیردایمی، فرض می‌شود معادلات برای بعضی حجم‌های محدود اعمال شوند که ممکن است دارای طولی چند صد متری و عرضی چند ده متری و عمقی چندین متری باشند، همچنین فرض می‌شود معادلات برای بعضی مدت‌های محدود به کار روند که ممکن است یک ساعت باشند. عدم‌قطعیت‌هایی همراه با برون‌یابی معادلات دیفرانسیلی برای این حجم‌های محدود و زمان‌های موجود، هستند و تعیین دقیق مقدار آن‌ها مشکل است. به هر حال، آزمون همگرایی که قبلا بیان شده است، نشانه‌ای از برآورده شدن معیارهای پایدار عددی که زمان و فاصله مناسب گسسته‌سازی را انتخاب می‌کند، ارایه می‌کند.

جریان در کانال‌های باز در طبیعت، سه بعدی است، اما در معادلات حاکم تخمین زده شده است که فقط دارای متغیرهایی در جهت طولی است. بعلاوه، برای فرض جریان یک بعدی، تعدادی از فرض‌های دیگر در

ایجاد معادلات جریان حاکم غیردایمی، به کار رفته است. بعضی از این فرضیات محدود کننده هستند و انحرافات از فرضیات (مانند عدم تغییر در هندسه کانال و گرادیان‌های چگالی) ایجاد شبیه‌سازی پرخطایی را محتمل می‌کند. نقض سایر فرضیات مانند صرفنظر از تنش‌های کششی سطحی، در جریان کانال‌های باز، ممکن نیست. توصیه می‌شود تمام انحرافات از فرضیات مدل به وضوح، مستند شود و آزمون مدل برای کمک به تعیین کمی تاثیرات انحرافات از محاسبات جریان، به کار رود. به‌علاوه، پارامتر انتقال رسوب در فرمول (۳) دارای عدم قطعیت ذاتی ناشی از فرضیات انجام گرفته در طی ایجاد معادله انتقال مورد استفاده در مدل، می‌باشد. عقیده کلی در محدوده پارامترهای به کار رفته برای ایجاد بعضی از توابع انتقال رسوب در جدول ۲ ارایه شده است.

۹-۴ تقریب‌های عددی برای معادلات حاکم

فرمول‌های ۱ و ۲، عبارات ریاضی ساده شده‌ای برای جریان آشفته سه بعدی پیچیده در کانال‌های باز هستند. عبارات با ایجاد تقریب‌های عددی معادلات دیفرانسیل نسبی، ساده‌تر می‌شوند. این تقریب‌ها، عدم‌قطعیت بیشتری در محاسبات وارد می‌کنند. عدم قطعیت، که تعیین کمیت آن برای هر کاربردی مشکل است، را می‌توان با آزمون و مستندسازی طرح عددی، ارزیابی کرد.

توصیه می‌شود مستندسازی روشن طرح عددی، شامل معادلات، گسسته‌سازی و نتایج آزمون‌های طرح، در دسترس باشد. طرح‌های عددی معین، شامل تغییرات روش مشخصات، طرح‌های ضمنی و صریح برای مدل‌سازی جریان غیردایمی یک بعدی، دارای آزمون و مستندسازی عمومی است که به طور گسترده در دسترس است. به هر حال، طرح‌های زیادی که برای مسایل ویژه طراحی شده‌اند، ممکن است نیازمند ارزیابی گسترده توسط کاربران مدل باشد.

توصیه می‌شود مستندسازی مدل شامل مبحث رابطه بین اندازه دانه، مرحله زمانی و پایداری و درستی طرح باشد. بهتر است پراکندگی عددی معرفی شده با طرح، که ممکن است منجر به میرایی جبهه موج تند شود، از نظر کمی تعیین شود. عدم قطعیت در معادلات حاکم و تقریب‌های عددی به طور کلی در مقایسه با عدم قطعیت‌های ذاتی الگوریتم‌ها و پارامترهای رسوب، کوچک هستند.

جدول۲- محدوده پارامترهای به کار رفته در ایجاد توابع انتقال رسوب

تابع انتقال	محدوده قطر ذرات mm	میانه قطر ذرات mm	وزن مخصوص رسوب	سرعت متوسط کانال m/s	عمق کانال m	شیب اصطکاک	عرض کانال m	دمای آب ^{o} c
Ackers-White (1973) (flume	۰٫۰۴ تا ۰٫۷	N/A	۱ -۲٫۷	۰٫۰۲ تا ۲٫۱۶	۰٫۰۰۳تا ۰٫۴۲۷	۰٫۰۰۰۰۶تا ۰٫۰۳۷	۰٫۰۷تا ۱٫۲۲	۷٫۸ تا ۳۱٫۷
Englund-Hansen (1967) (flume)	N/A	۰٫۱۹ تا ۰٫۹۳	N/A	۰٫۲۰ تا ۱٫۹۳	۰٫۰۵۸تا ۰٫۴۰۵	۰٫۰۰۰۰۵۵ تا ۰٫۰۱۹	۲٫۴۴	۷٫۲ تا ۳۳٫۹
Laursen (1958) (field)	N/A	۰٫۰۸ تا ۰٫۷	N/A	۰٫۰۲ تا ۲٫۳۸	۰٫۲۰۴تا ۱۶٫۴۶	۰٫۰۰۰۰۲۱تا ۰٫۰۰۱۸	۱۹٫۲۰تا ۱۰۹	۰ تا ۳۳٫۹
Laursen (1958) (flume)	N/A	۰٫۰۱۱ تا ۰٫۲۹	N/A	۰٫۲۱ تا ۲٫۸۷	۰٫۰۰۹تا ۱٫۰۹۷	۰٫۰۰۰۲۵ تا ۰٫۰۲۵	۰٫۰۸تا ۲٫۰۱	۷٫۸ تا ۲۸٫۳
Meyer-Peter-Müller (1948) (flume)	۰٫۴ تا ۲۹	N/A	۴ -۱٫۲۵	۰٫۳۷ تا ۲٫۸۷	۰٫۰۰۹تا ۱٫۰۹۷	۰٫۰۰۰۴ تا ۰٫۰۲	۰٫۱۵تا ۲٫۰۱	N/A
Toffaleti (1968) (field)	۰٫۰۶۲ تا ۴	۰٫۰۹۳ تا ۰٫۷۶	N/A	۰٫۲۱ تا ۱٫۹۳	۰٫۰۲۱تا ۱۷٫۲۸۸	۰٫۰۰۰۰۰۲ تا ۰٫۰۰۱۱	۱۹٫۲۰تا ۱۰۹	۰ تا ۳۳٫۹
Toffaleti (1968) (flume)	۰٫۰۶۲ تا ۴	۰٫۴۵ تا ۰٫۹۱	N/A	۰٫۲۱ تا ۱٫۹۲	۰٫۰۲۱تا ۰/۳۳۵	۰٫۰۰۰۰۱۴ تا ۰٫۰۱۹	۰٫۲۴تا ۲٫۴۴	۴٫۴ تا ۳۳٫۹
Yang (1973) (field-sand)	۰٫۱۵تا ۱٫۷	N/A	N/A	۱٫۹۵ تا ۰/۲۴	۰٫۰۱۲تا ۱۵٫۲۴	۰٫۰۰۰۰۴۳تا ۰٫۰۲۸	۰٫۱۳تا ۵۳۳٫۴۰	۰ تا ۳۴٫۴
Yang (1973) (field-gravel)	۲٫۵ تا ۷	N/A	N/A	۰٫۴۳ تا ۱٫۹۳	۰٫۰۱۲تا ۰٫۰۲۴	۰٫۰۰۰۰۶ تا ۰٫۰۲۹	۰٫۰۷تا ۱٫۲۲	۰ تا ۳۴٫۴
یادآوری- N/A به معنی عدم وجود داده می‌باشد.								

پیوست الف
(الزامی)
مدل‌ها و مطالعات موردی

جدول الف۱- فهرست بعضی مدل‌ها و مطالعات موردی

مدل	منبع/ ایجاد کننده	مطالعات موردی رسوب مخزن	مراجع
HEC-RAS [58, 68]	US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center	Argandab Reservoir, Afghanistan Cochiti Reservoir, Rio Grande, USA Paute-Cardenillo, Ecuador Lewis and Clark Reservoir, Missouri River, USA Tenryu River and Sakuma Reservoir, Japan Chamera II, Himachal Pradesh, India Loharinag Pala, Uttarakhand, India Tapovan Vishnugad, Uttarakhand, India Lata Tapovan, Uttarakhand, India Lower Siang, Arunachal Pradesh, India Punatsangchhu I, Bhutan	Gibson and Pridal, 2015[60] Davis et al., 2014[57] Castillo et al., 2014[56] Gibson and Boyd, 2014[59] Beebo and Bilal, 2012[52] Bhave et al., 2001[53] and Isaac et al., 2013[64] Bhave et al., 2005[54] Bhave et al., 2008[55] Isaac et al., 2006[63] Tiwari et al., 2014[67] Isaac et al., 2014[65]
SRH 1D	US Bureau of Reclamation	Middle Rio Grande, USA Rio Grande, Cochiti Dam to Isleta Diversion Dam, USA	Holmquist-Johnson, 2006[61] Huang and Greimann, 2006[62]
SOBEK	Deltares Systems, Delft, The Netherlands	Sakuma Reservoir, Japan	Sloff, Kobayashi and Kitamura, 2007[66]
MIKE 11	DHI Water and Environment, Denmark	Welbedacht Dam, South Africa Roxburgh Dam, New Zeland	Basson, 2007[51]
GSTARS	USBR, Denver	Tarbela Dam, Pakistan Xiaolangdi Reservoir, China	Basson, 2007[51] Ahn and Yang, 2010[50]
RESSASS	HR Walligford, UK	Tarbela Dam, Pakistan	Basson, 2007[51]

پیوست ب

(اطلاعاتی)

کتاب‌نامه

[1] ISO 9195:1992, Liquid flow measurement in open channels — Sampling and analysis of gravel-bed material

[2] ISO/TR 11330, Determination of volume of water and water level in lakes and reservoirs (under revision/development)

[3] Ackers P., & White W .R. S ediment T ransport: A N ew A pproach a nd A nalysis. Journal of Hydraulic Division, ASCE. 1973, **99** pp. 2041–2060

[4] Colby B.R. 1964), "Practical computations of bed-material discharge," Proceedings, ASCE, Vol. 90, No. HY2,1964.

[5] Copeland Ronald R and Thomas, W.A., (1989), Corte Madera Creek Sedimentation Study, Technical Report HL 89-6, USACE, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, April 1989.

[6] Copeland, Ronald R, (1990), Waimea Sedimentation Study, Kauai, Hawaii, Numerical Model Investigation, Technical R eport H L 9 0-3, U SACE, W aterways E xperiment S tation, V icksburg, MS, May 1990.

[7] Danish Hydraulic Institute. MIKE-11 - A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual and User's Manual, Denmark, 2002

[8] Engelund F., & Fredsoe J. A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. Nord. Hydrol. 1976, **7** pp. 293–306

[9] Engelund F., & Hansen E. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Technisk Vorlag, Copenhagen, Denmark, 1967

[10] Garde R.J., & Ranga Raju K.G. Mechanics of Sediment Transport and Alluvial Stream Problems", Wiley Eastern Ltd., New Delhi, II Edition, Reprint 1990.

[11] Gist W.S., Stonestreet S.E., Copeland R.R. (1996), In-channel sediment basins: An alternative to dam-style debris basins, Proceedings of the 6th Federal Interagency Sedimentation Conference; 2; V-99-V106.

[12] Graf W.H. Hydraulics of Sediment Transport. McGraw-Hill Book Co, New York, N.Y., 1971

[13] Holly F.M. Manual of Model 'CHARIMA' for Numerical simulation of Water and Sediment Flows in Multiply Connected Channels. Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa, 1990

[14] Toniolo H., & Parker G. 1D Numerical Modeling of Reservoir Sedimentation", Proceedings, IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, 2003, 457-468

[15] Inglis C.C. Discussion of "Systematic Evaluation of River Regime", by Neill, C.R., AND Galey, V.J. J. Wtrwy. and Harb. Div. 1968, **94** pp. 109–114

[16] Zhou J., & Lin B (1998) " One-Dimensional Mathematical Model for Suspended Sediment by Lateral Integration", Journal of Hydraulic Engineering-ASCE - J HYDRAUL ENG-ASCE 01/1998; 124(7). DOI:

[17] Jianchun H.U.A.N.G., Blair G.R.E.I.M.A.N.N., Chih Ted Y.A.N.G. Numerical Simulation of Sediment Transport in Alluvial River with Floodplains. Int. J. Sediment Res. 2003, **18** pp. 50–59

[18] Karim F .M., & K ennedy J.F. Menu of Coupled Velocity and Sediment Discharge Relations for Rivers. J. Hydraul. Eng. 1990, 116 pp. 978–996
[19] Krone R.B. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes. Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, CA, 1962
[20] Laursen E.M (1958) "The total sediment load of streams" Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.84, No. HY1, p. 1530-1 to 1530-36, February 1958.
[21] Madden E.B. Channel Design for Modified Sediment Regime Conditions on the Arkansas River, "Paper No. 39, Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference, Miscellaneous Publication No. 970. Agricultural Research Service, U.S. Government Printing Office, 1963, pp. 335352.
[22] Meyer-Peter E., & Muller R (1948), "Formulas for Bed Load Transport", Report on Second Meeting of IAHR, Stockhelm, Sweden, 39-64.
[23] Molinas A., & Yang C.T (1986). Computer program user's manual for GSTARS (generalized stream tube model for alluvial river simulation),U.S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation, Engrg. and Res. Ctr.,Denver, Colo
[24] Morris G.L., & Fan J. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. McGraw- Hill Professional, 1998
[25] Nakato T. Tests of Selected Sediment Transport Formulas. J. Hydraul. Eng. 1990, 116 pp. 362– 379
[26] Parthenaides E . E rosion a nd d eposition o f c ohesive s oils. J . H ydraul. D iv. 1 965, (March) pp. 755–771
[27] Guo Q., Hu C., Chen J (2006) " Application of Numerical Simulation in Solving Key sediment Problems of the Yellow River", US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience & Engineering, September 19-21, 2005, Oxford, Mississippi, USA.
[28] Raudkivi A.J. Loose Boundary Hydraulics. Balkema, The Netherlands, 1998, p. [ISBN 90-5410- 447-3]
[29] Van Rijn L .C. S ediment Transport, Part I: Bed L oad Transport. J. Hydraul. Eng. 1 984 a, 110 pp. 1431–1456
[30] Van Rijn L.C. Sediment Transport, Part-II: Suspended Load Transport. J. Hydraul. Eng. 1984 b, 110 pp. 1613–1641
[31] Sam S.Y. WANG and Weiming WU, "River Sedimentation and Morphology Modeling – The state of Art and Future Development", Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18 – 21, 2004, Yichang, China
[32] Schoklitsch A. Handbuch des Wasserbaues (1930), Springer, Vienna (2nd ed.), English Translation (1937) by S. Shulits
[33] Sloff C.J. (1997) Modelling reservoir sedimentation processes for sediment management studies. Proc. conf. "Hydropower into the next century", Portoroz, Slovenia, 15-17 sept. 1997, p. 513-524, Aqua Media Int., UK.
[34] Smart G.M. Sediment transport formulae for steep channels. J. Hydraul. Eng. 1984 March, 110 p. •••
[35] Smart G.M., & Jaeggi M.N.R. . In: Mitteilung nr. 64 of the Laboratory for Hydraulics. Hydrology and Glaciology at the Federal Technical University, Zurich, 1983
[36] Tanveer Abbas S. and Dr. Ishar-ui-Haq, " sedimentation of Tarbela and Mangla reservoirs", Paper no 659, Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings 2007, p. 23-46, Lahore, Pakistan.

[37] Toffaleti F. B. (1968), "A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface, " Technical report No. 5, Committee on channel stabilization, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

[38] U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (1993), "Scour and Deposition in River and Reservoirs: HEC 6 - User's Manual", 690 Second Street, Davis, CA 95616-4687.

[39] U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2007), "HEC-RAS River Analysis System –Hydraulic Reference Manual and User's Manual", 690 Second Street, Davis, CA 95616.

[40] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2006), "Erosion and Sedimentation Manual",, November 2006.

[41] Van Rijn L.C. Sediment transport: Part 1. J. Hydraul. Div. 1984, 110 pp. 1431–1456

[42] Van Rijn L.C. Bed load transport: Part 2. J. Hydraul. Div. 1984, 110 pp. 1613–1641

[43] Van Rijn L.C. Suspended load transport: Part 3. J. Hydraul. Div. 1984, 110 pp. 1733–1754

[44] Van Rijn L.C (1993), Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publication, 1993. The Netherlands, Amsterdam

[45] Vanoni V.A. (1975), "Sedimentation Engineering", ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, ASCE, 54, New York, N.Y.

[46] Yang C.T. Incipient Motion and Sediment Transport. Journal of Hydraulic Division, ASCE. 1973, 99 pp. 1679–1704

[47] Zhang Y., Hu C., Wang Y (2006) "1-D Mathematical Model for Heavily sediment laden rivers and its applications", US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience &Engineering, September 19-21, 2005, Oxford, Mississippi, USA

[48] Tan Y. 2006) " Applications of Mathematical Modeling to sediment research in the Three gorges Project", US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience & Engineering, September 19-21, 2005, Oxford, Mississippi, USA

[49] Huang Y., & Huang Y. (2006) " One-Dimensional steady flow sediment mathematic models HELIUS and their application in the Three Gorges Project", US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience & Engineering, September 19-21, 2005, Oxford, Mississippi, USA

[50] Ahn Jungkyu, Yang Chih Ted, (2010). Simulation of Xiaolangdi Reservoir Sedimentation and Flushing Processes, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1.

[51] Basson, G. (2007). Mathematical Modelling of Sediment Transport and deposition in Reservoirs, Guidelines and Case Studies. ICOLD Bulletin No.140. International Commission on Large dams, 61,avnue Kleber, 75116, Paris.

[52] Beebo, Q. and Bilal, R. A., (2012), Simulating bathymetric changes in reservoirs due to sedimentation – Application to Sakura dam, Japan: Division of Water Resources Engineering,
Department of Building and Environmental Technology, Lund University, ISSN-1101-9824, 57 p.

[53] Bhave, V.G., Isaac Neena, and Shitole, M.S. (2001). "Sedimentation profile for a reservoir across Himalayan River." Int. Semin. 'Reservoir Sedimentation', Ooty, Tamil Nadu, 06–08 June.

[54] Bhave, V.G., Isaac Neena and Shitole M.S.,(2005) "Sedimentation Studies for Loharinag Pala Project", Conference on 'Development of Hydro Power Projects – A Prospective Challenge', Shimla, 20-22 April 2005.

[55] Bhave, V.G., Isaac Neena and Deolalikar P.B., (2008) "Assessment of Sedimentation Pattern and Frequency of Flushing for a Small Reservoir — A Case Study", 3rd International Conference on 'Silting Problems in Hydropower Projects', New Delhi, 27-28 February 2008.

[56] Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Alvarez, M.A., (2014). Simulation of the flushing into the damreservoir Paute-Cardenillo. Edited by Anton J. Schleiss, Giovanni de Cesare, Mario J. Franca, and Michael Pfister, p. 203-210.

[57] Davis, C.M., Bahner, C., Eidson, D., and Gibson, S. (2014). Understanding Reservoir Sedimentation along the Rio Grande: A Case Study from Cochiti Dam. World Environmental and Water Resources Congress 2014: p. 2347-2357, doi: 10.1061/9780784413548.234.

[58] Gibson, S., Brunner, G., Piper, S., and Jensen, M. (2006) "Sediment Transport Computations in HEC-RAS." Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), Reno, NV, 57-64.

[59] Gibson, S. and Boyd P., (2014). Modelling long term alternatives for sustainable sediment management using operational sediment transport rules. Reservoir Sedimentation. Edited by Anton J. Schleiss, Giovanni de Cesare, Mario J. Franca, and Michael Pfister, p. 229–236.

[60] Gibson, S. and Pridal, D. (2015). Negotiating Hydrologic Uncertainty in Long Term Reservoir Sediment Models: Simulating Arghandab Reservoir Deposition with HEC-RAS. 10th Federal Interagency Sediment Conference, SedHyd, Reno, NV.

[61] Holmquist-Johnson, C. L., (2006), Application of GSTAR-ID Sediment transport model on the Middle Rio Grande, NM – San Acacia Diversion Dam to Elephant Butte Reservoir: Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference, April 2-6, 2006, Reno, NV, USA, p. 8-14.

[62] Huang, J. and Greimann, B.P.,(2006), Development and application of GSTAR −1D: Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference, April 2-6, 2006, Reno, NV, USA, p. 1-7.

[63] Isaac Neena, Bhave V.G., and Deolalikar P.B. (2006) "Reservoir Sedimentation Studies for Lata Tapovan Hydro Electric Project" Presented at International Conference on Hydrology and Watershed Management", Hyderabad, 05-08 December 2006.

[64] Isaac Neena, Eldho, T. I., Gupta, I. D. (2013). Numerical and physical model studies for hydraulic flushing of sediment from Chamera-II reservoir, Himachal Pradesh, India, ISH Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1080/09715010.2013.821788.

[65] Isaac Neena, Eldho T.I., Tayade S.B. (2014), Sediment Management in Reservoir of Hydroelectric Power Projects – Numerical Simulation Studies for Punatsangchhu – I, Bhutan. International Journal of Engineering Research, Special Issue 3, HYDRO 2014 International proceedings, pp. 107 – 111.

[66] Sloff, C. J., Kobayashi, E. and Kitamura, Y., (2007), Modelling sedimentation mitigation strategies in Sakuma Reservoir: Proceedings, Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics, December 4-7, 2007, Phoenix, AZ USA.

[67] Tiwari Kaoustubh, Dr. Yadav S.M, Dr Porey P.D, Mrs. Isaac Neena (2014) . Simulation of onedimensional modelling of sedimentation processes on Lower Siang H.E project,

Arunachal Pradesh, India, National conference on "TRENDS & CHALLENGES OF CIVIL ENGINEERING IN TODAY'S TRANSFORMING WORLD", 29th March, 2014, S. N. Patel Institute of Technology and Research Centre. Umrakh, Gujarat, India, ISBN: 978-81-929339-0-0.

[68] USACE, 2010. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, p.417