

جمهوری اسلامی ایران
ریاست جمهوری
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه

نشریه شماره ۵۸۴

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

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



omoorepeyman.ir

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

nezamfanni.ir



omoorepeyman.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

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

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر

گزارش فرمایید:

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

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

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

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: info@nezamfanni.ir

web: nezamfanni.ir



omoorepeyman.ir



omoorepeyman.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

شماره : ۲۰/۲۰۵۷۱	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ : ۱۳۹۱/۳/۲۱	
موضوع : راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه	
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ.، مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۸۴ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۶/۱ اجباری است.</p>	

محمد مهدی رحمتی
معاون نظارت راهبردی



پیشگفتار

رودخانه یکی از عواملی است که همواره در پیدایش، تکامل و توسعه جوامع بشری نقش قابل توجهی داشته است. مسایل مرتبط با رودخانه شامل مواردی نظیر: مهار سیلاب، اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه، هدایت و انحراف جریان، کنترل فرسایش و رسوب گذاری، فراهم نمودن شرایط کشتیرانی، مسایل زیست محیطی و کیفیت آب می باشد که در قالب مهندسی رودخانه به آنها پرداخته می شود. در واقع مهندسی رودخانه مجموعه اقداماتی است که در زمینه مطالعات (شناخت، برنامه ریزی و طراحی)، ساخت سازه ها و بهره برداری به منظور مهار، کاهش خطرات و به حداقل رساندن تبعات منفی و همچنین بهسازی وضعیت آن در جهت تامین نیازهای بشری و حفظ محیط زیست صورت می گیرد. با توجه به ضرورت روز افزون استفاده بهینه از رودخانه های کشور و کاهش خطرات مرتبط، نیاز به بهره گیری از ابزارهای مناسب بديهی می نماید.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای کاربرد مدل های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه» را با هماهنگی امور نظام فنی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور در دستور کار قرارداد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به این معاونت ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم نیا و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه ی این بزرگواران را آرزومند می باشد.

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

معاون نظارت راهبردی

بهار ۱۳۹۱



تهیه و کنترل

مجری: پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس

دکترای عمران - هیدرولیک

مؤلف اصلی: سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری دانشگاه تربیت مدرس

اعضای گروه تهیه کننده:

محمد رضا سعیدی نژاد	دانشگاه تربیت مدرس	فوق لیسانس مهندسی آب
سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای عمران - هیدرولیک
اکبر صفرزاده	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای عمران - مهندسی آب
سید محمد هادی مشکاتی	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای عمران - سازه‌های هیدرولیکی
علی نصراللهی	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای عمران - مهندسی آب
نرگس نظری	دانشگاه تربیت مدرس	فوق لیسانس مهندسی آب

اعضای گروه نظارت:

محمدابراهیم بنی حبیب	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی عمران - آب
علی اکبر عباسی	مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی	دکترای عمران - هیدرولیک
کیاندرخت کباری	کارشناس آزاد	لیسانس مهندسی راه و ساختمان
مسعود منتظری نمین	دانشگاه تهران	دکترای عمران - هیدرولیک

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی مهندسی رودخانه و سواحل طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

محمود افسوس	شرکت مهندسين مشاور سازه‌پردازي ايران	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
محمدابراهیم بنی حبیب	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی عمران - آب
محمدحسن چیتی	شرکت مهندسين مشاور ساز آب‌پردازان	فوق لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
فریدون خزاعی	انجمن شرکتهای ساختمانی	فوق لیسانس مهندسی راه و ساختمان
نرگس دشتی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو	لیسانس مهندسی آبیاری
شکور سلطانی	شرکت مدیریت منابع آب	دکترای مهندسی آب
حسن سید سراجی	دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور	دکترای مکانیک سیالات
حسام فولادفر	موسسه تحقیقات آب	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
سید کمال الدین نوری	وزارت کشور	لیسانس مهندسی کشاورزی
جبار وطن‌فدا	وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی

اعضای گروه هدایت و راهبردی پروژه:



رییس گروه امور نظام فنی

رییس گروه امور نظام فنی

کارشناس منابع آب امور نظام فنی

خشایار اسفندیاری

فرزانه آقارمضانعلی

ساناز سرافراز

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۳	فصل اول - کلیات
۵	۱-۱- کلیات
۵	۲-۱- مسایل مطرح در مهندسی رودخانه
۵	۱-۲-۱- حفاظت سواحل
۶	۲-۲-۱- مهار سیلاب
۶	۳-۲-۱- اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه
۶	۴-۲-۱- هدایت و انحراف جریان
۷	۵-۲-۱- کنترل فرسایش و رسوب گذاری
۷	۶-۲-۱- فراهم نمودن شرایط کشتیرانی
۷	۷-۲-۱- مسایل زیست محیطی و کیفیت آب
۷	۳-۱- ضرورت مدل سازی و انواع مدل ها
۸	۴-۱- مزایا و معایب انواع مدل سازی
۱۱	فصل دوم - مدل های فیزیکی و میکرومدل ها
۱۳	۱-۲- کلیات
۱۳	۲-۲- اهداف مدل سازی فیزیکی
۱۳	۱-۲-۲- بررسی کیفی
۱۳	۲-۲-۲- بررسی کمی
۱۳	۳-۲- مدل های فیزیکی
۱۳	۱-۳-۲- روابط پایه
۱۶	۲-۳-۲- انواع مدل های فیزیکی و موارد کاربرد و محدودیت های آنها
۲۸	۳-۳-۲- مسایل مطرح در انواع مدل های فیزیکی
۳۱	۴-۳-۲- طراحی و کاربرد مدل های فیزیکی
۳۹	۵-۳-۲- مدل های فیزیکی انواع سازه ها
۴۳	۶-۳-۲- مدل های فیزیکی رودخانه ای
۵۰	۴-۲- میکرومدل ها
۵۱	۱-۴-۲- مقیاس میکرومدل ها



فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵۲	۲-۴-۲- واسنجی میکرومدل‌ها
۵۲	۲-۴-۳- طراحی میکرومدل‌ها
۵۳	۲-۴-۴- وسایل اندازه‌گیری در میکرومدل‌ها
۵۳	۲-۴-۵- نحوه ساخت میکرومدل
۵۵	فصل سوم - مدل‌سازی ریاضی
۵۷	۳-۱- کلیات
۵۷	۳-۲- اهداف مدل‌سازی ریاضی در مهندسی رودخانه
۵۷	۳-۲-۱- بررسی پدیده‌های عمومی
۵۷	۳-۲-۲- بررسی پدیده‌های موضعی
۵۸	۳-۲-۳- روندیابی سیلاب
۵۸	۳-۲-۴- بررسی اثر الگوی جریان رودخانه بر محیط پیرامون در شرایط مختلف جریان
۵۸	۳-۲-۵- بررسی الگوی جریان، آبستنگی و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و اطراف سازه‌های هیدرولیکی
۵۹	۳-۲-۶- بررسی اثر الگوی جریان رودخانه و سازه‌های هیدرولیکی بر روی ریخت‌شناسی رودخانه
۵۹	۳-۲-۷- بررسی مسایل زیست‌محیطی و کیفیت آب در رودخانه
۶۰	۳-۳- انواع مدل‌های ریاضی
۶۰	۳-۳-۱- تقسیم‌بندی براساس ابعاد مکانی
۶۱	۳-۳-۲- تقسیم‌بندی براساس شرایط جریان
۶۱	۳-۳-۳- تقسیم‌بندی براساس شرایط بستر و دیواره
۶۱	۳-۳-۴- تقسیم‌بندی براساس تعداد کلاس‌های اندازه رسوب
۶۱	۳-۳-۵- تقسیم‌بندی براساس مدل‌های انتقال رسوب
۶۱	۳-۳-۶- تقسیم‌بندی براساس شرایط انتقال رسوب
۶۳	۳-۳-۷- تقسیم‌بندی براساس روش محاسبه
۶۳	۳-۴- مبانی مدل‌سازی ریاضی
۶۴	۳-۴-۱- شبکه‌بندی میدان حل
۷۱	۳-۴-۲- انتخاب گام زمانی
۷۱	۳-۴-۳- معادلات حاکم بر میدان جریان
۷۶	۳-۴-۴- مدل‌های آشفتگی



فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷۹	۳-۴-۵- معادلات انتقال رسوب
۸۵	۳-۴-۶- نحوه در نظرگیری شرایط مرزی در حل میدان جریان و انتقال رسوب
۸۹	۳-۴-۷- روش‌های مختلف حل معادلات حاکم
۹۰	۳-۴-۸- بهینه‌سازی مدل ریاضی
۹۱	۳-۴-۹- تحلیل حساسیت مدل
۹۱	۳-۴-۱۰- واسنجی و صحت‌سنجی
۹۵	۳-۵-۵- مدل‌های ارائه شده موجود
۹۵	۳-۵-۱- برخی از مدل‌های ریاضی توسعه یافته برای مطالعات هیدرودینامیک و رسوب
۹۶	۳-۵-۲- برخی از مدل‌های ریاضی موجود برای شبیه‌سازی کیفیت آب
۹۷	۳-۶-۶- معیارهای انتخاب مدل ریاضی
۹۷	۳-۶-۱- کلیات
۹۷	۳-۶-۲- کاربرد، مزایا و محدودیت‌های معادلات حاکم در انواع مدل‌های ریاضی
۹۸	۳-۶-۳- معادلات حاکم بر بار بستر
۹۸	۳-۶-۴- معادلات حاکم بر بار معلق
۹۹	۳-۶-۵- ویژگی‌های موثر در انتخاب مدل‌های ریاضی
۱۰۱	۳-۶-۶- سهولت دسترسی به مدل و نسخه به روز آن
۱۰۳	۳-۷-۷- معرفی چند نرم‌افزار مناسب برای بررسی پدیده‌های مرتبط در مهندسی رودخانه
۱۰۳	۳-۷-۱- کلیات
۱۰۳	۳-۷-۲- روندیابی سیلاب
۱۰۴	۳-۷-۳- مدل‌سازی اثر الگوی جریان بر ریخت‌شناسی رودخانه
۱۰۴	۳-۷-۴- مدل‌سازی اثر سازه‌های هیدرولیکی بر الگوی جریان و ریخت‌شناسی رودخانه
۱۰۴	۳-۷-۵- مدل‌سازی الگوی جریان و آبستگي و رسوب‌گذاری اطراف سازه‌های هیدرولیکی
۱۰۵	۳-۷-۶- مدل‌سازی کیفیت آب در رودخانه و مسایل زیست‌محیطی
۱۰۵	۳-۸-۸- بررسی مزایا و محدودیت‌های نرم‌افزارهای معرفی شده
۱۰۵	۳-۸-۱- مدل STARS - BRI
۱۰۶	۳-۸-۲- مدل CCHE1D
۱۰۷	۳-۸-۳- مدل CCHE2D



فهرست مطالب

صفحهعنوان

۱۰۸

FLUENT مدل ۵-۸-۳

۱۰۸

FLUVIAL12 مدل ۶-۸-۳

۱۰۹

GSTARS3 مدل ۷-۸-۳

۱۱۰

HEC6 مدل ۸-۸-۳

۱۱۰

HEC - RAS مدل ۹-۸-۳

۱۱۰

MIKE11 مدل ۱۰-۸-۳

۱۱۱

MIKE21 مدل ۱۱-۸-۳

۱۱۲

QUAL2E مدل ۱۲-۸-۳

۱۱۲

SMS 8.0 مدل ۱۳-۸-۳

۱۱۲

SSIIM مدل ۱۴-۸-۳

۱۱۳

۳-۹-۳- چگونگی استفاده از نرم‌افزارهای معرفی شده

۱۱۳

۳-۹-۱- کلیات

۱۱۳

۳-۹-۲- روش‌های جمع‌آوری آمار و اطلاعات پایه در مطالعات مهندسی رودخانه

۱۱۴

۳-۹-۳- آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

۱۱۵

۳-۹-۴- کاربرد مدل‌ها

۱۳۳

منابع و مراجع



فهرست شکل‌ها و نمودارها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۹	شکل ۱-۲- انواع انحراف‌ها در مدل کج
۳۳	شکل ۲-۲- تجهیزات اندازه‌گیری بده
۳۷	شکل ۳-۲- طرح شماتیک سرعت‌سنج PIV
۳۷	شکل ۴-۲- سرعت‌سنج صوتی
۳۹	شکل ۵-۲- طرح شماتیک متغیرهای مورد بررسی در مطالعات آبشکن
۴۳	شکل ۶-۲- شکل کلی گردابه و پارامتر r (شعاع گردابه)
۴۹	شکل ۷-۲- مراحل توزیع غلظت در رودخانه
۴۹	شکل ۸-۲- پخش جت در سطح سیال
۵۰	شکل ۹-۲- تغییرات پارامترهای بدون بعد $\frac{y_0}{p}, F_\Delta, S_0$
۵۲	شکل ۱۰-۲- دو نمونه از میکرومدل‌های آماده آزمایش
۶۲	شکل ۱-۳- مقایسه مدل تعادلی و غیرتعادلی در یک آزمون فرضی
۶۴	نمودار ۱-۳- ساختار کلی مدل‌های ریاضی در مهندسی رودخانه
۶۵	شکل ۲-۳- نمایی از مقطع عرضی مرکب با سیلابدشت
۶۵	شکل ۳-۳- شبکه‌بندی در یک مدل آبراهه یک بعدی
۶۶	شکل ۴-۳- نمایی شماتیک از یک شبکه آبراهه
۶۶	شکل ۵-۳- موقعیت یک اتصال و مقاطع عرضی قبل و بعد از آن
۶۶	شکل ۶-۳- انواع سلول‌ها در حالت دو بعدی (مثلثی و چهارگوش)
۶۷	شکل ۷-۳- انواع سلول‌ها در حالت سه‌بعدی
۶۸	شکل ۸-۳- شبکه‌های با سازمان و بی سازمان
۶۸	شکل ۹-۳- شبکه بی سازمان در میدان جریان حول پایه پل واقع در کانال مستقیم
۶۸	شکل ۱۰-۳- شبکه با سازمان در میدان جریان الف- حول یک آبشکن واقع در کانال مستقیم، ب- جزئیات اطراف آبشکن
۶۸	شکل ۱۱-۳- شبکه‌های سه‌بعدی الف- بی سازمان، ب- با سازمان
۶۸	شکل ۱۲-۳- شبکه‌های متعامد و نامتعامد
۶۹	شکل ۱۳-۳- شبکه منحنی‌الخط متعامد برای میدان جریان در یک خم رودخانه
۶۹	شکل ۱۴-۳- تبدیل قلمرو فیزیکی با شبکه‌بندی منحنی‌الخط غیرمتعامد به قلمرو محاسباتی
۷۰	شکل ۱۵-۳- آرایش‌های مختلف اتصال در شبکه چند بلوکی الف- تکه‌ای، ب- تطابق ساده، ج- تطابق پیچیده
۷۱	شکل ۱۶-۳- تعریف ابعاد دو سلول مجاور

فهرست شکل‌ها و نمودارها

صفحه	عنوان
۷۴	شکل ۳-۱۷- مشخصات میدان در حالت متوسط‌گیری شده در عمق
۷۵	شکل ۳-۱۸- وضعیت یک مقطع عرضی
۸۷	شکل ۳-۱۹- محل مناسب برای در نظر گرفتن شرط مرزی خروجی
۸۸	شکل ۳-۲۰- استفاده از تقارن به منظور مدل‌سازی یک چهارم هواکش سه‌بعدی
۸۹	شکل ۳-۲۱- استفاده نامناسب از شرط مرزی تقارن
۹۴	شکل ۳-۲۲- نمونه‌ای از الگوریتم فرآیندهای مدل‌سازی
۱۰۴	شکل ۳-۲۳- نمونه برگه ارزیابی مدل
۱۱۶	شکل ۳- ۲۴ - تغییرات نیمرخ طولی برای گودالی به عمق ۱ متر در ۲۵۰ متری پایین دست پل
۱۱۷	شکل ۳-۲۵- الگوی جریان شبیه‌سازی شده در رودخانه Neckar آلمان به ازای بده ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه
۱۱۸	شکل ۳-۲۶- مقایسه نیمرخ طولی سطح آب برای بده ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه در رودخانه Neckar
۱۱۹	شکل ۳-۲۷- مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی Fluent با نتایج آزمایشگاهی
۱۲۰	شکل ۳- ۲۸ - مقایسه نتایج عددی و فیزیکی نیمرخ سطح آزاد جریان برای بده $318 \text{ m}^3/\text{s}$
۱۲۱	شکل ۳-۲۹- تاثیر گودال برداشت شن و ماسه بر نیمرخ طولی بستر
۱۲۲	شکل ۳-۳۰- رسوب‌گذاری در بستر رودخانه کارون و تشکیل جزایر رسوبی
۱۲۲	شکل ۳-۳۱- واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی GSTARS
۱۲۳	شکل ۳-۳۲- واسنجی روابط رسوبی مختلف برای مقطع عرضی ایستگاه اهواز
۱۲۴	شکل ۳-۳۳- موقعیت بازه مطالعاتی، سد تنظیمی گتوند و شهر گتوند
۱۲۵	شکل ۳-۳۴- مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های HEC - 6 و HEC - RAS
۱۲۵	شکل ۳-۳۵- واسنجی مدل HEC - RAS با سیلاب دی ماه ۱۳۷۷
۱۲۶	شکل ۳-۳۶- صحت‌سنجی هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی توسط مدل HEC - RAS دی ماه ۱۳۷۶
۱۲۸	شکل ۳- ۳۷ - مقایسه مقادیر عمق متوسط جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در وسط بازه
۱۲۹	شکل ۳-۳۸- مقایسه مقادیر متوسط سرعت جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده
۱۳۰	شکل ۳-۳۹- مقایسه سرعت حاصل از مدل MIKE11 با مقادیر سرعت متوسط حاصل از مدل SMS
۱۳۰	شکل ۳-۴۰- مقایسه مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده و نتایج مدل



عنوان

صفحه

۱۴	جدول ۱-۲- نیروها و معادلات ابعادی آنها
۱۵	جدول ۲-۲- مقیاس پارامترهای مهم
۱۷	جدول ۳-۲- ویژگی مقیاس فرودی در مدل‌های تغییر فرم نیافته
۲۰	جدول ۴-۲- ضریب زبری مانینگ در برخی از مواد
۲۰	جدول ۵-۲- معیار سنجش تلاطم در مدل
۲۳	جدول ۶-۲- خصوصیات مصالح معمول در مدل رسوب
۲۸	جدول ۷-۲- تعیین مقیاس زمان براساس نوع مدل
۳۴	جدول ۸-۲- مقیاس برخی از مدل‌های هیدرولیکی
۳۸	جدول ۹-۲- خصوصیات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی رودخانه
۴۵	جدول ۱۰-۲- تعیین ضرایب تشابه
۴۶	جدول ۱۱-۲- تعیین ضرایب تشابه برای عمق زیاد
۴۶	جدول ۱۲-۲- تعیین ضرایب تشابه برای جریان کاملاً متلاطم
۴۷	جدول ۱۳-۲- تعیین ضرایب روش گارد
۴۷	جدول ۱۴-۲- تعیین ضرایب روش کومورا
۷۸	جدول ۱-۳- ضرایب ثابت مدل $k - \varepsilon$
۸۱	جدول ۲-۳- برخی از معادلات انتقال بار معلق
۸۳	جدول ۳-۳- روش‌های تعیین ضرایب طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق
۸۴	جدول ۴-۳- برخی از معادلات انتقال بار بستر
۸۴	جدول ۵-۳- برخی از معادلات انتقال بار کل
۹۳	جدول ۶-۳- دامنه کلی واسنجی / صحت‌سنجی
۹۵	جدول ۷-۳- برخی از مدل‌های هیدرودینامیک و رسوب
۹۶	جدول ۸-۳- برخی از مدل‌های کیفیت آب
۱۰۶	جدول ۹-۳- قابلیت مدل‌های معرفی شده





omoorepeyman.ir

مقدمه

شناخت دقیق یک فرآیند فیزیکی توسط اندازه‌گیری پارامترهای حاکم بر آن در مقیاس واقعی امکان‌پذیر است. در مطالعات میدانی، فیزیک مساله در شرایط واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد که منجر به درک دقیقی از ویژگی‌های مرتبط با مساله می‌شود، اما با توجه به ابعاد وسیع مسایل مرتبط با مهندسی رودخانه، این روش مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. از طرفی محدودیت ابزارهای در دسترس، شرایط منطقه مورد مطالعه و عدم تکرار وقایع با شرایط مشابه، مطالعات میدانی را با مشکل مواجه می‌سازد. از سوی دیگر کنترل شرایط حاکم بر سامانه‌ی واقعی (نظیر بازه‌ای از یک رودخانه) معمولاً دشوار بوده و اندازه‌گیری پارامترهای حاکم نیز با پیچیدگی‌های فراوانی همراه است. علاوه بر آن، بررسی تاثیر شرایط مختلف بر پدیده مورد مطالعه (نظیر تاثیر سیلاب‌های مختلف بر روند پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، تاثیر وجود سازه‌های مختلف در مسیر جریان، تاثیر تخلیه پساب کارخانه‌ها بر روی کیفیت آب رودخانه، اثر الگوی جریان بر روی ریخت‌شناسی رودخانه، تاثیرات ناشی از اعمال روش‌های حفاظت سواحل بر هندسه و هیدرودینامیک جریان رودخانه، تاثیر روش‌های انحراف جریان بر روی رودخانه و پیرامون آن) در مقیاس واقعی به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بدین علت شناخت و بررسی پدیده‌های فیزیکی، معمولاً در حالت کلی به دو طریق زیر صورت می‌گیرد:

– مدل‌سازی آزمایشگاهی یا فیزیکی

– مدل‌سازی ریاضی

در روش آزمایشگاهی، می‌توان از مدل در اندازه‌های نمونه اصلی برای پیش‌بینی مشخصات یک مجموعه استفاده کرد. اما در بیش‌تر موارد انجام چنین آزمایش‌هایی به علت بزرگ بودن اندازه‌های میدان، بسیار گران و اغلب غیرممکن است، لذا آزمایش‌ها روی مدل‌هایی با مقیاس کوچک‌تر انجام می‌شود. البته بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از مسایل عملی، از جمله دلایلی است که استفاده از روش‌های آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های تئوریک محدود می‌سازد.

محاسبات تئوریک، حاصل یک مدل‌سازی ریاضی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مسایل حرکت سیالات، فقط برای تعداد اندکی از مسایل عملی می‌توان به حل تحلیلی رسید. بنابراین در اغلب موارد برای حل تئوری این مسایل از روش‌های عددی استفاده می‌شود. البته خاطر نشان می‌کند که برای برخی از پدیده‌های فیزیکی حل ریاضی آنها تکمیل نشده است، بنابراین تلفیقی از مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی برای شناخت این پدیده‌ها مورد نیاز است.

شناخت توانایی‌ها و ضعف‌های مدل‌سازی‌های فیزیکی و ریاضی برای انتخاب صحیح یک روش مناسب ضروری است. به علت شباهت رفتار هیدرودینامیکی مدل فیزیکی با نمونه واقعی و نیز ضرورت مدل کردن جریان‌های پیچیده سه‌بعدی، هنوز مدل‌های فیزیکی کاربرد وسیعی دارند. بسیاری از پدیده‌ها دارای آن چنان پیچیدگی هستند که روابط ریاضی حاکم یا پیچیده بوده و یا هنوز حل عددی دقیق آنها امکان‌پذیر نیست. معمولاً اطلاعات دقیق در مورد یک فرآیند فیزیکی توسط اندازه‌گیری‌ها به‌دست می‌آید. اما همچنان که گفته شد انجام آزمایش در یک مدل با مقیاس یک به یک خیلی گران بوده و یا شاید غیرممکن باشد. در استفاده از مدل‌های فیزیکی، مساله دقت و نحوه تعمیم نتایج به‌دست آمده از مدل به نمونه اصلی در تمام جنبه‌های مختلف مطرح می‌باشد.

مدل ریاضی، مدلی است که براساس روابط حاکم بر یک پدیده به وجود می‌آید. بنابراین تنها پدیده‌هایی را می‌توان مدل‌سازی نمود که اولاً روابط ریاضی حاکم بر آن پدیده استخراج شده باشد و ثانیاً روش قابل قبول و ابزار مناسبی برای حل روابط وجود داشته باشد.

– هدف

هدف از تدوین و ارائه این نشریه آشنایی با مبانی مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی و اصول کاربرد آنها در مباحث مرتبط با مهندسی رودخانه به شرح زیر، می‌باشد:

- آشنایی با اصول و روابط مدل‌سازی فیزیکی
- آشنایی با روش‌های ساخت مدل‌های فیزیکی
- آشنایی با محدودیت‌ها، مزایا و معایب مدل‌های فیزیکی
- آشنایی با روابط حاکم بر میدان جریان در رودخانه‌ها
- آشنایی با روابط حاکم بر انتقال رسوب در رودخانه‌ها
- آشنایی با روش‌های مختلف عددی برای حل معادلات حاکم بر جریان و انتقال رسوب
- آشنایی با نرم افزارهای توسعه یافته در ارتباط با مهندسی رودخانه
- آشنایی با نکات کلی برای انتخاب مدل ریاضی مناسب در کارهای مهندسی رودخانه

– دامنه کاربرد

دامنه کاربرد این راهنما به موارد زیر محدود می‌شود:

- عمدتاً محدود به رسوبات غیرچسبنده
- عمدتاً محدود به رودخانه‌های غیر جزر و مدی
- قابل استفاده برای جریان‌های دائم و غیردائم
- قابل استفاده برای مسایل مرتبط با تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه
- قابل استفاده برای سازه‌های رودخانه‌ای



فصل ۱

کلیات





omoorepeyman.ir

۱-۱- کلیات

رودخانه یکی از عواملی است که همواره در پیدایش، تکامل و توسعه جوامع بشری نقش قابل توجهی داشته است. به نظر می‌رسد تامین آب برای آبیاری مزارع اصلی‌ترین انگیزه اقدامات اولیه در خصوص بهره‌برداری از رودخانه بوده است. امروزه رودخانه، علاوه بر تامین بخش قابل توجهی از آب مورد نیاز، در زمینه فعالیت‌های گوناگون بشری نظیر تامین انرژی و غذا، حمل و نقل، امکانات تفریحی و پاره‌ای دیگر از موارد توسعه اقتصادی و اجتماعی نقش مهمی را ایفا می‌کند.

مهندسی رودخانه مجموعه اقداماتی است که در زمینه مطالعات (شناخت، برنامه‌ریزی و طراحی)، ساخت سازه‌ها و بهره‌برداری به منظور مهار، کاهش خطرات و به حداقل رساندن تبعات منفی و همچنین بهسازی وضعیت آن در جهت تامین نیازهای بشری و حفظ محیط زیست صورت می‌گیرد [۱].

این اقدامات اهداف مختلفی نظیر مهار سیلاب، اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه، هدایت و انحراف جریان، کنترل فرسایش و رسوب‌گذاری، فراهم نمودن شرایط کشتیرانی، مسایل زیست‌محیطی و کیفیت آب را تامین می‌کند. در بخش‌های بعد در مورد هریک از موارد فوق توضیحات بیش‌تری ارائه شده است.

۱-۲- مسایل مطرح در مهندسی رودخانه

۱-۲-۱- حفاظت سواحل

به‌طور کلی روش‌های بسیاری برای حفاظت سواحل رودخانه وجود دارد و تعیین موثرترین روش در یک منطقه خاص به عوامل متعددی بستگی دارد که عمده‌ترین آنها عبارتند از مواد تشکیل‌دهنده بستر و ساحل، ریخت‌شناسی، هیدرولوژی و هیدرولیک رودخانه، ارزش زمین‌ها و ابنیه در محدوده مورد حفاظت، هزینه‌های حفاظت، سرعت فرسایش، جریان آب زیرزمینی، افت ناگهانی سطح آب رودخانه، قابلیت دسترسی به مصالح مصرفی و وجود نیروی کارآمد و متخصص.

اقدامات حفاظت سواحل رودخانه را می‌توان به طور کلی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد:

- روش‌های حفاظت مستقیم اقداماتی است که مستقیماً روی کناره‌های رودخانه انجام گرفته تا مانع فرسایش و تخریب آن توسط جریان آب، اثر موج و غیره گردد. این اقدامات به‌وسیله احداث پوشش‌ها، دیوارهای حایل و پوشش‌های گیاهی صورت می‌گیرد.
- حفاظت غیرمستقیم مجموعه اقدامات حفاظتی است که مستقیماً روی کناره‌ها انجام نمی‌گیرد، بلکه در داخل رودخانه و به منظور کاهش قدرت تخریبی جریان از طریق انحراف جریان از ساحل، کاهش سرعت جریان یا فراهم آوردن موجبات ته نشست رسوبات در مقابل کناره‌ها انجام می‌شود. احداث آبشکن‌ها، پره‌ها، صفحات مستغرق و خاکریزها نمونه‌هایی از کارهای حفاظتی می‌باشد [۲].



۱-۲-۲- مه‌ار سیلاب

سیل یا سیلاب عبارتست از جریان زیاد (غیرعادی) آب در سطح زمین، داخل رودخانه، در سیل‌راه، در دریاچه یا در منطقه ساحلی که منجر به اثرگذاری قابل توجه شود [۳].

روش‌های مه‌ار سیلاب را می‌توان به دو دسته اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم‌بندی کرد:

- اقدامات سازه‌ای عبارتند از احداث گوره‌ها و دیوارهای سیل‌بند^۱، بهسازی آبراه، انحراف سیلاب، احداث حوضچه‌های تاخیری و فراهم نمودن اراضی ویژه ذخیره سیلاب^۲ و مخازن تسکین سیلاب^۳
- اقدامات غیرسازه‌ای عبارتند از مدیریت کاربری اراضی^۴، ساماندهی اماکن و پاکسازی سیلابدشت^۵، بهسازی شرایط حوضه آبریز و ذخیره آب در محل، پیش‌بینی و هشدار سیل، اطلاع‌رسانی و آموزش مردم، ایمن‌سازی انفرادی ساختمان‌ها، تخلیه مناطق در خطر، سیل‌ستیزی، امداد رسانی بعد از سیلاب، بیمه سیل و سازگاری با سیلاب [۳].

۱-۲-۳- اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه

اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه با استفاده از روش‌های زیر قابل انجام می‌باشد:

- پاکسازی مسیر رودخانه از عوامل و موانع موجود در بستر و سیلابدشت
- اصلاح ساختار هیدرولیکی سازه‌های موجود در رودخانه و همچنین اصلاح مقطع و مشخصه‌های هندسی مجرای رودخانه
- حذف پیچان‌رودها با ایجاد میانبر مناسب برای افزایش ظرفیت انتقال رودخانه
- تثبیت و کنترل شاخه‌های پر رسوب رودخانه
- تثبیت کناره‌ها و شیب‌های ناپایدار با استفاده از احداث سازه‌های مناسب
- تثبیت بستر رودخانه توسط روش‌های متداول

۱-۲-۴- هدایت و انحراف جریان

انحراف جریان رودخانه از طریق ایجاد مجرای خروجی به منظور عبور جریان‌های مازاد صورت می‌گیرد. عمده‌ترین روش‌های

انحراف جریان به قرار زیر می‌باشند [۲۱]:

- انحراف به زمین‌های پست و یا کم ارزش
- انحراف بین حوضه‌ای (انحراف به رودخانه مجاور)
- انحراف به مخازن تاخیری یا دریاچه‌ها



- 1- Levees and Flood Walls
- 2- Retarding Basin and Flood Storage Areas
- 3- Flood Mitigation Reservoirs
- 4- Land Use Management
- 5- Property Acquisition and Flood Way Clearance

۱-۲-۵- کنترل فرسایش و رسوب گذاری

فرسایش و رسوب گذاری در سواحل و بستر و اطراف سازه‌های موجود در رودخانه‌ها یکی از معضلات عمده در رودخانه‌ها می‌باشد. ساخت سازه‌های هیدرولیکی، برداشت شن و ماسه از بستر و یا ایجاد تغییرات به‌منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در رودخانه باعث تغییر در الگوی جریان رودخانه شده که در نهایت موجب فرسایش و رسوب گذاری در بخش‌های مختلف رودخانه می‌شود. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در طراحی این سازه‌ها و یا ایجاد تغییرات مورد نظر، تخمین مقدار فرسایش و رسوب گذاری در قسمت‌های مختلف رودخانه و سیلابدشت و کنترل آن می‌باشد.

۱-۲-۶- فراهم نمودن شرایط کشتیرانی

برای دستیابی به عمق مناسب برای کشتیرانی می‌توان از راه‌های زیر استفاده نمود:

- استفاده از مخازن ذخیره‌ای در بالادست برای زمان‌های کم آبی
- استفاده از سازه‌های حفاظت دیواره برای جلوگیری از مهاجرت پیمانرودها، کاهش عرض رودخانه برای افزایش عمق جریان و ثابت کردن دیواره‌های رودخانه [۲۲]
- کنترل رسوب گذاری در بستر رودخانه و جلوگیری از کم عمق شدن آن

۱-۲-۷- مسایل زیست محیطی و کیفیت آب

لازم به توجه است که هر گونه فعالیت در زمینه مهندسی رودخانه تغییراتی را در محیط زیست منطقه در بر خواهد داشت. برای مثال اقدامات زیربنایی اولیه نظیر خاکبرداری و تغییر مسیر رودخانه، پسماندهای مهم تولید شده در هریک از مراحل طرح مانند آلاینده‌های هوا، مواد زاید کارگاه‌ها، آلودگی‌های صوتی و ارتعاشات از جمله موارد تخریب و تغییر محیط زیست می‌باشند که با توجه به درجه اهمیت آنها باید در مطالعات طرح لحاظ شوند. شناخت آلاینده‌های رودخانه‌ها، شبیه‌سازی و پیش‌بینی آلودگی در آنها و مسایل آلودگی‌های محیطی و همچنین تعیین غلظت آلودگی برای طراحی تاسیسات حفاظت از محیط زیست اموری ضروری می‌باشند.

۱-۳- ضرورت مدل سازی و انواع مدل‌ها

در بندهای قبل مسایل مرتبط با مهندسی رودخانه بیان شد. بررسی هریک از موارد مذکور با توجه به پیچیدگی آنها نیازمند مطالعه و بررسی گسترده است. در این زمینه استفاده از گزینه‌های مطالعات میدانی، مدل‌های آزمایشگاهی و مدل سازی عددی مطرح می‌شود.

شناخت دقیق یک فرآیند فیزیکی توسط اندازه‌گیری پارامترهای حاکم بر آن در مقیاس واقعی امکان‌پذیر است. در مطالعات میدانی، فیزیک مساله در شرایط واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد که منجر به درک دقیقی از ویژگی‌های مرتبط با مساله می‌شود، اما با توجه به ابعاد وسیع مسایل مرتبط با مهندسی رودخانه، این امر، مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. از طرفی محدودیت ابزارهای در دسترس، شرایط منطقه مورد مطالعه و عدم تکرار وقایع با شرایط مشابه، مطالعات میدانی را با مشکل مواجه می‌سازد. از سوی دیگر کنترل شرایط

حاکم بر سامانه‌ی واقعی (نظیر بازه‌ای از یک رودخانه) معمولاً دشوار بوده و اندازه‌گیری پارامترهای حاکم نیز با پیچیدگی‌های فراوانی همراه است. علاوه بر آن، بررسی تاثیر شرایط مختلف بر پدیده مورد مطالعه (نظیر تاثیر سیلاب‌های مختلف بر روند پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، تاثیر وجود سازه‌های مختلف در مسیر جریان، تاثیر تخلیه پساب کارخانه‌ها بر روی کیفیت آب رودخانه، اثر الگوی جریان بر روی ریخت‌شناسی رودخانه، تاثیرات ناشی از اعمال روش‌های حفاظت سواحل بر هندسه و هیدرودینامیک جریان رودخانه، تاثیر روش‌های انحراف جریان بر روی رودخانه و پیرامون آن) در مقیاس واقعی به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بدین علت شناخت و بررسی پدیده‌های فیزیکی، معمولاً در حالت کلی به دو طریق زیر صورت می‌گیرد:

- مدل‌سازی آزمایشگاهی یا فیزیکی

- مدل‌سازی ریاضی

در روش آزمایشگاهی، می‌توان از مدل در اندازه‌های نمونه اصلی برای پیش‌بینی مشخصات یک مجموعه استفاده کرد. اما در بیش‌تر موارد انجام چنین آزمایش‌هایی به علت بزرگ بودن اندازه‌های میدان، بسیار گران و اغلب غیرممکن است، لذا آزمایش‌ها روی مدل‌هایی با مقیاس کوچک‌تر انجام می‌شود. البته بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از مسایل عملی، از جمله دلایلی است که استفاده از روش‌های آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های تئوریک محدود می‌سازد.

محاسبات تئوریک، حاصل یک مدل‌سازی ریاضی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مسایل حرکت سیالات، فقط برای تعداد اندکی از مسایل عملی می‌توان به حل تحلیلی رسید. بنابراین در اغلب موارد برای حل تئوری این مسایل از روش‌های عددی استفاده می‌شود. البته باید در نظر داشت که برای برخی از پدیده‌های فیزیکی، حل ریاضی آنها تکمیل نشده است، بنابراین تلفیقی از مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی برای شناخت این پدیده‌ها مورد نیاز است.

۱-۴- مزایا و معایب انواع مدل‌سازی

شناخت توانایی‌ها و ضعف‌های مدل‌سازی‌های فیزیکی و ریاضی برای انتخاب صحیح یک روش مناسب ضروری است. به علت شباهت رفتار هیدرودینامیکی مدل فیزیکی با نمونه واقعی و نیز ضرورت مدل کردن جریان‌های پیچیده سه‌بعدی، هنوز مدل‌های فیزیکی کاربرد وسیعی دارند. بسیاری از پدیده‌ها دارای چنان پیچیدگی هستند که روابط ریاضی حاکم یا پیچیده بوده و یا هنوز حل عددی دقیق آنها امکان‌پذیر نیست. معمولاً اطلاعات دقیق در مورد یک فرآیند فیزیکی توسط اندازه‌گیری‌ها به دست می‌آید. اما همچنان که گفته شد انجام آزمایش در یک مدل با مقیاس یک به یک خیلی گران بوده و یا شاید غیرممکن باشد. در استفاده از مدل‌های فیزیکی، مساله دقت و نحوه تعمیم نتایج به دست آمده از مدل به نمونه اصلی در تمام جنبه‌های مختلف مطرح می‌باشد.

مدل ریاضی، مدلی است که براساس روابط حاکم بر یک پدیده به وجود می‌آید. بنابراین تنها پدیده‌هایی را می‌توان مدل‌سازی نمود که اولاً روابط ریاضی حاکم بر آن پدیده استخراج شده باشد و درثانی روش قابل قبول و ابزار مناسبی برای حل روابط وجود داشته باشد. یک مدل ریاضی دارای مزایایی است که در زیر ارائه شده است [۴] و [۵]:

- مهم‌ترین امتیاز، هزینه پایین آن است. در بیش‌تر کاربردها، هزینه به‌کاربردن یک مدل ریاضی به مراتب کم‌تر از

مدل‌سازی آزمایشگاهی است که با پیچیده شدن فیزیک مساله این عامل اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند.

- نتایج حاصل شده به سرعت به دست می‌آیند، به طوری که بررسی تاثیر هر یک از متغیرها در یک پدیده خاص، خیلی سریع و آسان بوده و می‌توان در زمان کوتاه یک طرح بهینه را به دست آورد.
- در یک مدل‌سازی ریاضی، خیلی از شرایط واقعی مساله به راحتی قابل شبیه‌سازی است.
- امکان شبیه‌سازی شرایط ایده‌آل، به طوری که فقط روی پارامترهای محدودی تمرکز شده و بقیه جنبه‌ها حذف شود، وجود دارد. با این حال سهولت کاربرد و دقت نتایج به دست آمده از مدل‌سازی ریاضی بستگی به مدل و روش‌های عددی مورد استفاده دارد. برای برخی مسایل که دارای پیچیدگی‌های زیادی است، به دست آوردن حل عددی دشوار بوده یا بسیار گران خواهد بود. همچنین برخی از پدیده‌های فیزیکی دارای بیان ریاضی مناسبی نیستند. مدل‌های ریاضی با توجه به نحوه توسعه و بهره برداری، به دو نوع تجاری و غیر تجاری تقسیم می‌شوند. یکی از معایب مدل‌های ریاضی تجاری نداشتن متن برنامه است، به طوری که اگر اشکالی وجود داشته باشد، ممکن است نتوان آن را رفع نمود یا مدل را برای شرایط مورد نظر تغییر داد.
- بدون شک استفاده از مدل فیزیکی تنها روش تحقیق درباره یک پدیده اساسی جدید است. البته در ترکیب تعدادی از پدیده‌های شناخته شده، به کار بردن مدل ریاضی مفیدتر خواهد بود. حتی در این شرایط نیز برای تعیین اعتبار باید نتایج به دست آمده از مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی و یا میدانی مقایسه شده و از طرفی صحت نتایج مدل‌های ریاضی و فیزیکی باید به وسیله داده‌های میدانی مورد تایید قرار گیرند. بنابراین یک مدل خوب، مدلی است که نتایج حاصل از آن تا حد قابل قبولی به واقعیت نزدیک باشد و به استناد داده‌های میدانی و آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده باشد.
- در نهایت، حجم مناسب فعالیت برای شناخت یک پدیده می‌تواند از ترکیب خردمندان‌های از مدل‌های ریاضی و فیزیکی حاصل شود. البته سهم هر یک از این دو در ترکیب پیشنهادی بستگی به طبیعت مساله، اهداف شبیه‌سازی، مسایل اقتصادی و شرایط خاص پدیده مورد نظر دارد. در ادامه به مدل‌های فیزیکی و ریاضی و استفاده هر یک از آنها در مباحث مهندسی رودخانه پرداخته می‌شود.





omoorepeyman.ir

فصل ۲

مدل‌های فیزیکی و میکرومدل‌ها





omoorepeyman.ir

۲-۱- کلیات

مطالعه و بررسی کامل پدیده‌های طبیعی با عوامل متعدد در عمل بسیار مشکل است. لذا لازم است با حذف عوامل کم‌اهمیت‌تر و در نظر گرفتن عوامل موثرتر، مساله واقعی اولیه^۱ (نمونه اصلی) را با یک مساله ساده‌تر به نام مدل که تعداد عوامل آن محدود است، جایگزین کرده و نتایج بررسی آن را به مساله واقعی تعمیم داد. حذف عوامل کم‌اهمیت باید براساس فرضیات معقول صورت گیرد. البته پس از کسب نتایج حاصل از مدل، لازم است صحت مفروضات اولیه در مدل نمودن مساله واقعی بازنگری شود. در این صورت مهم‌ترین انگیزه در مدل کردن پدیده‌ها، تشخیص و تعیین حداقل تعداد عوامل موثر و قابل بررسی نمودن پدیده‌هاست. البته در برخی موارد، هدف از مطالعه مدل یک پدیده، کشف فیزیک حاکم بر آن است تا با پیش‌بینی رفتار و سپس با کنترل عوامل حاکم بر آن، بتوان از آن بهره‌برداری مناسب نمود [۶].

۲-۲- اهداف مدل‌سازی فیزیکی

۲-۲-۱- بررسی کیفی

شناخت فیزیک و روند کلی مساله، شرایط ابتدایی و انتهایی یک پدیده و غیره همه پدیده‌های کیفی هستند که در شناخت و طراحی مساله واقعی حایز اهمیت می‌باشند. شاید در سال‌های قبل کم‌تر به مفیدبودن اطلاعات کیفی که یک مدل در اختیار مصرف‌کننده می‌گذارد، توجه می‌شد، اما امروزه با پیشرفت علمی که در سایر شاخه‌ها وجود دارد و با پیدایش میکرومدل‌ها به این مساله توجه بیش‌تری می‌شود.

۲-۲-۲- بررسی کمی

مهم‌ترین وظیفه یک مدل فیزیکی آن است که کمیت‌های مختلف از یک پدیده واقعی را با کم‌ترین خطا و به بهترین صورت ارائه دهد. هر چقدر، داده‌های^۲ وسیع‌تر و دقیق‌تری وجود داشته باشد، بررسی کمی مدل مورد نظر موفق‌تر خواهد بود [۷].

۲-۳- مدل‌های فیزیکی

۲-۳-۱- روابط پایه

۲-۳-۱-۱- معادلات حاکم

برای آن که مدل یک پدیده بتواند نمایانگر رفتار مساله اصلی باشد، لازم است فیزیک حاکم بر مدل و نمونه اصلی یکسان باشد. در این صورت تشابه هیدرولیکی بین آن دو برقرار است. منظور از تشابه هیدرولیکی، برقراری تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی است که باید به طور هم‌زمان در مدل و نمونه اصلی برقرار باشد [۲۳].



۲-۱-۳-۲- محدودده کاربرد، مزایا و معایب معادلات حاکم

از آنجا که نیروهای موثر بر پدیده در شکل‌دهی آن کاملاً موثر می‌باشند، یکی از موارد اصلی در مدل‌سازی فیزیکی، ضرورت برقراری تشابه دینامیکی بین مدل و نمونه اصلی است. در این راستا ضروری است که این نیروها و میزان تاثیر هر یک از آنها در پدیده‌های مختلف شناخته شود. نیروهای موثر در پدیده‌های هیدرولیکی با معادلات ابعادی آنها در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

جدول ۱-۲- نیروها و معادلات ابعادی آنها

معادله ابعادی	رابطه	نیرو
$[F_i] = \rho L^2 V^2$	$F_i = ma$	نیروی اینرسی
$[F_\mu] = \mu VL$	$F_\mu = \tau A$	نیروی لزجت
$[F_g] = \rho L^3 g$	$F_g = mg$	نیروی ثقل
$[F_p] = \Delta PL^2$	$F_p = \Delta PA$	نیروی فشاری
$[F_c] = EL^2$	$F_c = EA$	نیروی ارتجاعی
$[F_\sigma] = \sigma L$	$F_\sigma = \sigma L$	نیروی کشش سطحی در واحد طول

نیروی اینرسی همیشه در تمام پدیده‌ها وجود دارد و براساس این که چه نیروهای دیگری در پدیده مورد مطالعه تاثیر بیش‌تری دارند و با توجه به نسبت آن نیروها به نیروی اینرسی قوانین تشابه به‌صورت زیر استخراج می‌شوند. در تمام روابط زیر منظور از m مدل و منظور از p ، نمونه اصلی می‌باشد که نسبت این دو با r نشان داده شده است.

- زمانی که نیروی ثقل غالب باشد: عدد فرود

$$\left(\frac{F_i}{F_g}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_g}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} = Fr\right)_m = Fr_p \quad (1-2)$$

کاربرد: در تمام جریان‌های کانال‌های باز و رودخانه‌ها، جریان روی سرریزها، مستهلک‌کننده‌های انرژی، امواج سطحی و

جریان‌های خروجی از روزنه‌ها و جریان‌های تحت ثقل

- زمانی که نیروی لزجت غالب باشد: عدد رینولدز

$$\left(\frac{F_i}{F_\mu}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_\mu}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{VL}{\nu} = Re\right)_m = Re_p \quad (2-2)$$

کاربرد: در سازه‌های کاملاً مستغرق (زیر دریایی، هواپیما، ...)، لوله‌ها، پمپ و توربین‌ها و جریان‌های تحت فشار، محاسبه نیروی پسا

- زمانی که کشش سطحی غالب باشد: عدد وبر

$$\left(\frac{F_i}{F_\sigma}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_\sigma}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{\sigma/\rho L}} = We\right)_m = We_p \quad (3-2)$$

کاربرد: در جت‌های کوچک، امواج ثقلی کوچک، جریان با تیغه نازک در سرریز (عمق کم جریان روی سرریز)

- زمانی که نیروی ارتجاعی غالب باشد: عدد ماخ



$$\left(\frac{F_i}{F_c}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_c}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}\right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}\right)_p = Ma_p \quad (۴-۲)$$

کاربرد: در جریان‌های ناپایدار سریع (ضربه قوچ)، آزمایش موشک‌ها

- زمانی که نیروی فشار غالب باشد: عدد اولر

$$\left(\frac{F_i}{F_p}\right)_m = \left(\frac{F_i}{F_p}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{\Delta P/\rho}}\right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{\Delta P/\rho}}\right)_p = Eu_p \quad (۵-۲)$$

کاربرد: در توزیع فشار روی دیواره کناره سازه (مثل کشتی)، مدل بادبزنها یا فن‌ها

در روابط بالا V : نشان‌دهنده سرعت، L : بعد طول، ρ : چگالی، ν : لزجت سینماتیکی، E : ضریب الاستیسته، σ : کشش سطحی

و ΔP اختلاف فشار می‌باشد. جدول (۲-۲) مقیاس پارامترهای مهم در صورت استفاده از برخی اعداد بدون بعد را نشان می‌دهد [۲۳].

جدول ۲-۲- مقیاس پارامترهای مهم

توان P_r	بده Q_r	شتاب a_r	نیروها F_r	زمان t_r	سرعت V_r	عدد بی بعد
$\rho_r L_r^{7/2}$	$(L_r)^{5/2}$	1	$(L_r)^3$	$(L_r)^{1/2}$	$(L_r)^{1/2}$	F_r
$\rho_r \nu_r^3 L_r^{-1}$	$L_r \nu_r$	$(\nu_r^2)(L_r^{-3})$	$(\rho_r)^{-1}(\mu_r)^2$	$\nu_r^{-1} L_r^2$	$\nu_r L_r^{-1}$	Re
$L_r^{1/2} \sigma_r^{3/2} \rho_r^{-1/2}$	$L_r^{3/2} \sigma_r^{1/2} \rho_r^{-1/2}$	$\sigma_r L_r^{-2}$	$\sigma_r L_r$	$L_r^{3/2} \sigma_r^{-1/2} \rho_r^{1/2}$	$\sigma_r^{1/2} \rho_r^{-1/2} L_r^{-1/2}$	We

۲-۳-۱-۳- آنالیز ابعادی

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان به‌طور مستقیم از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و مومنوم به‌دست آورد. در چنین مواردی سعی می‌شود تا برای استخراج رابطه ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا کلیه متغیرهایی که در به‌وجود آوردن آن پدیده نقش دارند، مشخص کرده سپس با برقرار کردن یک رابطه بین آنها پدیده مورد نظر را مورد بررسی قرار داد. برای این منظور از آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. محاسن این روش عبارتند از:

- باعث کاهش متغیرها می‌شود.
- منحنی‌های طراحی مفید ارائه می‌دهد.
- روابط بدون بعد کار آمد تعیین می‌کند که برای سامانه‌های مختلف اندازه‌گیری صدق می‌کند.
- به طراحی تعداد و نوع آزمایش‌ها کمک می‌کند.

در آنالیز ابعادی ابتدا متغیرهای موثر بر پدیده مشخص می‌شوند. سپس تلاش می‌شود این عوامل در قالب اعداد بدون بعد مناسب با یکدیگر ترکیب شوند تا نهایتاً با برقراری رابطه یا روابطی بین این اعداد بدون بعد امکان تحلیل نتایج فراهم گردد. اگر چه باور عمومی آن است که آنالیز ابعادی ابزاری مناسب برای روش‌های آزمایشگاهی است، اما کاربرد آن در موارد کاملاً تحلیلی نیز زیاد است. هر چه تعداد عوامل موثر در پدیده مورد نظر بیشتر باشد، کاربرد این روش ضروری‌تر است.

روش‌های مختلفی برای آنالیز ابعادی وجود دارد که از آن میان دو روش مهم عبارتند از:

- روش رالی

- روش باکینگهام

اگر تعداد متغیرها کم باشد (حدود ۴ متغیر) روش رالی مناسب است، ولی اگر تعداد بیش‌تر شد باید از روش باکینگهام استفاده شود [۲۴].

روش دوم که کارآمدتر است در زیر شرح داده می‌شود:

- روش باکینگهام، (π باکینگهام)

مراحل این روش عبارتند از:

شناسایی متغیرهایی که در پدیده دخالت دارند (n)، انتخاب متغیرهای تکراری براساس ابعاد اصلی (m)، تشکیل گروه بدون بعد

با تلفیق یکی از متغیرهای باقی‌مانده با متغیرهای تکراری ($n-m$)

تعداد ابعاد اصلی - تعداد متغیرها = تعداد گروه متغیرها $n - m =$

در هر گروه یک نمای مجهول برای هر متغیر تعیین شده و به‌جای هر متغیر، ابعادش قرار می‌گیرد. هر گروه با یک π نشان داده می‌شود.

برای هر یک از π ها باید جمع نماهای هر یک از ابعاد برابر صفر باشد. معادلات نماها حل شده و مقادیر به‌دست آمده را در گروه

اصلی قرار می‌دهند تا پارامترهای بدون بعد نهایی به‌دست آید.

در انتخاب متغیرهای تکراری باید نکات زیر رعایت شود [۲۴]:

- بعدی که معرف هندسه جریان باشد انتخاب شود (مثل طول)
- بعدی که نشان‌دهنده خصوصیات سیال باشد انتخاب شود (مثل ρ)
- بعدی که نشان‌دهنده خصوصیات حرکت سیال باشد انتخاب شود (مثل سرعت)

۲-۳-۲- انواع مدل‌های فیزیکی و موارد کاربرد و محدودیت‌های آنها

۲-۳-۲-۱- تقسیم‌بندی براساس مقیاس مدل

- مدل تغییر فرم نیافته^۱ (مستقیم) یا مدل تک مقیاس

مدل‌های تک مقیاس معمولی‌ترین و ساده‌ترین نوع مدل‌های فیزیکی می‌باشد که در آن تمام مقیاس‌های طولی مثل طول،

عرض و عمق دارای مقدار یکسانی هستند. اگر در مساله مورد نظر محدودیت‌هایی نظیر فضا، امکانات و هزینه وجود نداشته باشد،

باید از مدل تک مقیاس استفاده شود. در ادامه و با توضیح مدل‌های کج یا تغییر فرم یافته^۲ تفاوت‌ها و مزایای این دو نوع مدل نسبت

به هم آشکار می‌شود.

ضعف مدل‌های تک مقیاس در مدل‌های رودخانه‌ای مشخص می‌شود. این ضعف‌ها عبارتند از:

- مشکل اندازه‌گیری در مدل وقتی که عمق و سرعت در مدل خیلی کوچک هستند.

1- Undistorted Model

2- Distorted Model

- ممکن است عدد رینولدز از حد معین آن برای داشتن جریان متلاطم کم‌تر شود.
- دستیابی به زبری‌های کوچک باعث بروز مشکل می‌شود، زیرا مقدار افت اصطکاکی (f) برای عدد رینولدز بالا فقط تابع زبری نسبی است. با شرایط یکسان (f) در مدل و نمونه اصلی، کم شدن عدد رینولدز در مدل به کاهش زبری نسبی منجر می‌شود. در نتیجه جریان با جدار زبر در نمونه اصلی به جریان با جدار صاف در مدل تبدیل شده و به کلی ماهیت جریان عوض می‌شود. این امر موجب می‌شود که مقاومت حاصل از لزجت نیز علاوه بر مقاومت ناشی از اصطکاک ظاهر شود. در این منطقه ضریب زبری مانینگ (n) علاوه بر آن که تابع زبری نسبی است، تابع لزجت و یا عدد رینولدز نیز می‌باشد. به منظور غلبه بر این مشکلات یک راه حل آن است که مدل با مقیاس بزرگ‌تر ساخته شود که در بسیاری موارد غیر عملی است و راه دیگر آن است که مدل با دو مقیاس ساخته شود. در جدول (۲-۳) ویژگی مقیاس فرودی برای مدل‌های غیر کج ارائه شده است.

جدول ۲-۳- ویژگی مقیاس فرودی در مدل‌های تغییر فرم نیافته

ضریب مانینگ	بده	زمان	سرعت	طول	پارامتر
$\frac{1}{L_r^6}$	$\frac{5}{L_r^2}$	$\frac{1}{L_r^2}$	$\frac{1}{L_r^2}$	L_r	مقیاس

- مدل تغییر فرم یافته یا مدل کج

همان‌گونه که در بخش قبلی بیان شد مدل‌های تغییر فرم نیافته دارای ضعف‌هایی می‌باشند. به‌همین منظور در مدل‌سازی رودخانه به طول چند کیلومتر و عمق چند متر، برای بر طرف کردن این ضعف‌ها و صرفه‌جویی در فضا و هزینه‌های طرح و رعایت پاره‌ای مسایل فنی دیگر، معمولاً مقیاس افقی نسبت به مقیاس قائم متفاوت انتخاب می‌شود. بنابراین مدل کج مدلی است که مقیاس‌های طولی آن متفاوت باشند.

معمولاً نسبت مقیاس‌های طولی به عرضی یا عمقی ($c_r = \frac{X_r}{Y_r} \text{ یا } \frac{X_r}{Z_r}$) بین ۵ الی ۱۰ می‌باشد. در این مدل‌ها هر چند ساخت

مدل راحت‌تر است، ولی تجزیه و تحلیل داده‌ها مشکل‌تر می‌باشد. در این مدل‌ها، بین مقیاس پارامترهای مختلف، مقیاس ارتفاع (D_r) و مقیاس طولی (L_r)، روابط (۲-۶) و (۲-۷) برقرار می‌باشد [۲۳]:

$$\frac{V_P}{V_m} = \left(\frac{D_P}{D_m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{مقیاس سرعت} \quad (۲-۶)$$

$$\frac{S_P}{S_m} = \frac{\frac{D_P}{L_P}}{\frac{D_m}{L_m}} = \frac{D_r}{L_r} = e \quad \text{مقیاس شیب} \quad (۲-۷)$$

که در این رابطه به e ضریب انحراف مدل نیز می‌گویند. با استفاده از رابطه مانینگ و فرض عریض بودن رودخانه و تساوی مقیاس طولی و عمقی مقیاس زبری از رابطه (۲-۸) تعیین می‌شود. با فرض عریض بودن رودخانه و تساوی مقیاس قائم و افقی در مدل، رابطه (۲-۸) به صورت رابطه (۲-۹) ساده خواهد شد:

$$n_r = (D_r)^{\frac{1}{6}} \times e^{\frac{1}{2}} \quad (۲-۸)$$

این مدل‌های دارای محاسنی می‌باشند که عبارتند از:

- دقت بیش‌تر در اندازه‌گیری ابعاد قائم مدل مانند تراز سطح آب و سرعت
- کاهش هزینه‌های مدل به علت کاهش طول و یا عرض مدل
- تامین نیروی رانش مورد نیاز جهت حرکت مواد بستر در مدل‌های با بستر متحرک
- حذف و یا به حداقل رساندن نیروی کشش سطحی
- ساده شدن بهره‌برداری مدل به علت کوچک‌تر شدن آن

با وجود مزایای بیان شده برای مدل‌های کج، این مدل‌ها دارای معایبی نیز می‌باشند که عبارتند از:

- توزیع سرعت به علت زبری اضافی در جدار و توزیع فشار به علت تغییر شیب حاصل از مقیاس قائم به مقدار زیادی انحراف یافته و نمی‌توان مقدار و جهت آن را نسبت به نمونه اصلی به طور صحیح تفسیر نمود.
- حرکت و تاثیر موج را نمی‌توان در نظر گرفت.
- تعمیم نتایج به راحتی ممکن نیست.
- زبری جداره باید برای شبیه‌سازی تغییر کند.

در مجموع باید در استفاده از مدل کج در موارد زیر دقت بیش‌تری لحاظ شود:

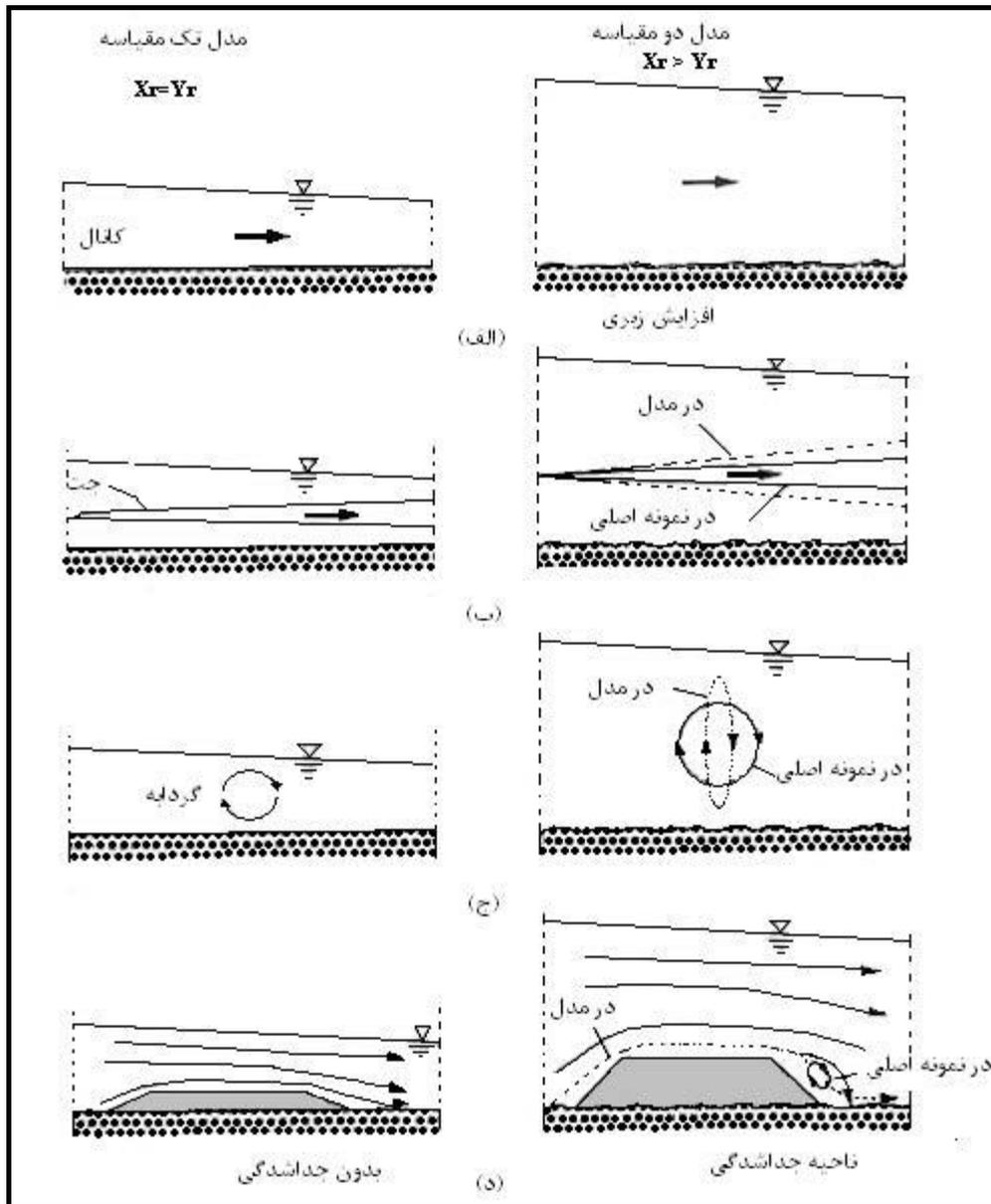
- جریان‌های ثانویه
- گردابه‌ها
- جداشدگی در شیب‌ها
- توزیع جانبی جریان
- ضریب اصطکاک
- اندازه‌گیری بده جریان که در صورت عدم دقت با خطا محاسبه می‌شود

نکته مهم دیگر این است که تغییر مقیاس فقط در طول و عرض نمی‌باشد. پارامترهایی مثل سرعت، سرعت سقوط ذرات، چگالی و زمان نیز می‌توانند دچار انحراف شوند.

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد مدل کج در مقابل مدل تغییر فرم نیافته از پیچیدگی‌های بیش‌تری برخوردار است. در این‌گونه مدل‌ها علاوه بر مقیاس، مسایل مختلف دیگری ممکن است دچار انحراف شوند که مطلوب نبوده و باید به آنها توجه ویژه شود. در شکل (۲-۱) چهار نوع از این انحراف‌ها نشان داده شده است که عبارتند از [۲۴]:

- در اثر بزرگ‌تر بودن مقیاس قائم، در زبری کف بزرگ‌نمایی می‌شود که باعث بروز خطا می‌گردد.
- در صورت وجود جت، ضخامت آن به طور غیرحقیقی زیاد می‌شود.
- شکل گردابه‌ها تغییر کلی می‌کند.
- چون شکل کلی برآمدگی کف (در صورت وجود) بزرگ‌تر می‌شود، اثر گردابه‌های پشت مانع باعث ایجاد خطا می‌شود.





شکل ۲-۱- انواع انحراف‌ها در مدل کج [۲۴]

۲-۲-۳-۲- تقسیم‌بندی براساس نوع بستر

معمولا اگر هدف از مطالعه، بررسی مسایلی مثل آبشستگی، تغییرات ریخت‌شناسی و انتقال رسوب باشد، تغییرات شکل بستر بر اثر عبور جریان اهمیت ویژه دارد (بستر متحرک)، ولی اگر هدف از مطالعه، بررسی شکل کلی جریان و توزیع سرعت باشد، مدل را با بستر ثابت در نظر می‌گیرند که در این صورت زبری جداره اهمیت دارد.

- مدل با بستر ثابت

اهداف مدل‌های با بستر ثابت عبارتند از:

- تعیین توزیع و الگوی جریان سطح آزاد در محل سازه‌های هیدرولیکی (نظیر آبگیرهای جانبی) و یا عوارض طبیعی یا مصنوعی



- بررسی نیمرخ جریان سطح آزاد در طول کانال یا رودخانه
 - تعیین الگوی جریان در مجاورت اشیایی که توسط جریان احاطه شده و یا درون آن مستغرق هستند، به منظور تعیین نیروهای وارد بر آنها و محاسبه افت انرژی جریان در محل آنها [۲۴]
- در این‌گونه مسایل به علت وجود سطح آزاد سیال از یک طرف و مغشوش بودن حرکت سیال از سوی دیگر، باید اعداد فرود و رینولدز در مدل و نمونه اصلی برابر باشند. این بدین معنی است که مقیاس طولی باید برابر یک باشد. برای رفع این مشکل می‌توان از بین اعداد فرود و رینولدز یکی را به‌عنوان پارامتر اصلی انتخاب کرده و دیگری که اثر کمتری دارد را حذف نمود.
- معمولاً در مدل‌های رودخانه‌ای، با تساوی عدد فرود، تشابه دینامیکی بین نیروهای برشی (اصطکاک) را از طریق فرمول مانینگ به صورت تشابه هندسی در زبری جداره برقرار می‌کنند. براساس رابطه مانینگ و استفاده از مقیاس فرودی در تعیین مقیاس سرعت جریان V_r مقیاس زبری کف در نمونه اصلی به مدل از رابطه (۹-۲) تعیین می‌شود.

$$n_r = (L_r)^{\frac{1}{6}} \quad (9-2)$$

که در این رابطه n_r نسبت ضریب مانینگ در نمونه اصلی به مدل و L_r مقیاس طول می‌باشد. در جدول (۴-۲) ضریب زبری (n) بعضی از مواد مورد استفاده در مدل‌سازی ارائه شده است.

جدول ۲-۴- ضریب زبری مانینگ در برخی از مواد [۲۳]

n	نوع ماده	n	نوع ماده
۰/۰۲۵	خاک در شرایط خوب	۰/۰۱۶	آسفالت
۰/۰۳۵	خاک سنگلاخ	۰/۰۱۶	آجر
۰/۰۱۵	لوله چدنی	۰/۰۱۲	بتن پرداخت شده
۰/۰۱۲	لوله فولادی صاف	۰/۰۱۵	بتن پرداخت نشده
۰/۰۱۵	لوله آهنی	۰/۰۱۵	لوله بتنی
۰/۰۱۲	جداره چوبی	۰/۰۱	پلکسی گلاس

البته اگر در طول رودخانه تغییرات زیاد ضریب مانینگ وجود داشته باشد که نتوان زبری معادل آنها را در آزمایشگاه ایجاد کرد، راه حل مناسب انتخاب شیب معادل با آن زبری طبق رابطه (۱۰-۲) است [۲۳]:

$$S_r = \frac{y_r}{R_r^{4/3}} n_r^2 \quad (10-2)$$

در روابط بالا y_r نشان دهنده مقیاس قائم در مدل کج می‌باشد. مساله مهم در این مدل‌ها این است که اطمینان حاصل شود، مدل با عدد رینولدز بالا جریان دارد، زیرا در این صورت مقدار افت ناشی از زبری، مستقل از عدد رینولدز بوده و فقط تابع زبری نسبی است. برخی معیارها که برای سنجش جریان متلاطم مدل در این موارد به کار می‌رود، در جدول (۵-۲) ارائه شده است:

جدول ۲-۵- معیار سنجش تلاطم در مدل [۷]

محقق	رابطه
آزمایشگاه‌های هیدرولیک آمریکا	$R_e \geq 2500$
هنگ مهندسين ارتش آمریکا	$V.R \geq 0.02, R_e = 1800$
آزمایشگاه راه‌های آبی آمریکا	$V.R \geq 0.007$

ادامه جدول ۲-۵- معیار سنجش تلاطم در مدل [۷]

رابطه	محقق
$\frac{V.R}{\nu} > 1000$	راسل
$\frac{V.R}{\nu} > 500$	چو
$\frac{V*.K}{\nu} > 100$	هندرسون
$\frac{V*.K}{\nu} > 70$	یالین

که در این روابط V : سرعت متوسط، R : شعاع هیدرولیکی، K : زبری معادل، V^* : سرعت برشی، Re : عدد رینولدز و ν لزجت سیال می‌باشد.

از معیار زبری معادل به علت مشکل بودن تعیین آن، کم‌تر استفاده می‌شود، ولی در صورتی که بستر رودخانه مسطح باشد و از دانه‌بندی یکنواخت تشکیل شده باشد، می‌توان به جای آن از دانه‌بندی مواد رودخانه استفاده کرد که در شیب‌های معمولی قابل قبول می‌باشد. بعد از حصول اطمینان از متلاطم بودن جریان با توجه به یکی از روابط قبل می‌توان زبری معادل را از روابط مربوطه نظیر مانینگ یا شزی به دست آورد. با توجه به مطالب گفته شده در مدل با بستر ثابت باید شرایط زیر حاکم باشد [۲۳]:

- عدد فرود در مدل و نمونه اصلی یکسان باشد.
- جریان در مدل و نمونه اصلی متلاطم باشد. (مدل رودخانه‌ای)
- تشابه زبری با توجه به رابطه مانینگ یا شزی حاکم باشد.

- مدل با بستر متحرک

در مدل‌های بستر متحرک علاوه بر جریان، حرکت مواد بستر تحت تاثیر جریان در نظر گرفته می‌شود. این مدل‌ها با عنوان بستر سست، بستر متحرک یا بستر قابل حرکت شناخته می‌شوند و به منظور مدل‌سازی حرکت ذره، فرسایش مرزها و الگوی جریان در مجاورت مرزهای فرسایش‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد این مدل‌ها را می‌توان در ۴ گروه کلی دسته‌بندی کرد:

- ۱- مطالعه جریان روی بستر هموار متحرک
- ۲- مطالعه جریان با وجود شکل بستر
- ۳- تعیین نرخ انتقال بار رسوبی (بار معلق و بار بستر)
- ۴- تعیین الگوی جریان و حرکت رسوب در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی

لازمه داشتن مدل بستر متحرک، حرکت ذرات کف است. به‌علاوه لازم است که حرکت ذرات در نمونه اصلی و مدل شبیه هم باشند. در مدل‌سازی حرکت رسوب لازم است به نوع رسوب و نیروهای موثر بر حرکت آن توجه شود. در حالت طبیعی رسوبات کف می‌توانند چسبنده یا غیرچسبنده باشند. نیروی غالب برای حرکت رسوبات چسبنده نظیر رس و سیلت، نیروهای الکتریکی و برای رسوبات غیرچسبنده نظیر شن و ماسه، نیروهای گرانشی است. از آن‌جا که مدل‌سازی رسوبات چسبنده به طور قابل توجهی تقریبی است، بهتر است در برآورد آنها از روش‌های عددی استفاده شود، لذا مدل‌سازی بستر متحرک بیش‌تر برای مصالح شنی و ماسه‌ای

به کار می‌رود. در مدل‌سازی بسترهای شنی و ماسه‌ای، بزرگی نسبی نیروهای گرانشی و اندرکنش الکتریکی ذرات محدودیت‌هایی را در انتخاب مدل رسوب تحمیل می‌کند.

انتخاب مواد بستر در مدل

یکی از مسایل مهم در مدل‌های با بستر متحرک انتخاب مواد بستر در مدل می‌باشد، به نحوی که به ازای بده‌های مشابه بتوانند حرکت کنند. در انتخاب خصوصیات رسوب در مدل، لازم است اندازه ذرات و وزن مخصوص آنها مورد توجه قرار گیرد. اگر از مقیاس هندسی در انتخاب اندازه ذرات استفاده شود، ذرات در حد رس و سیلت ریز می‌شوند و ممکن است در این صورت رفتاری متفاوت با بستر نمونه اصلی داشته باشند. اندازه مواد از نقطه نظر شناوری و تاثیر نیروی کشش سطحی بسیار مهم است. اگر اندازه دانه‌ها خیلی کوچک باشد، نیروی کشش سطحی نسبت به وزن دانه‌ها زیاد خواهد بود. به منظور حل این مشکل توصیه می‌شود که اندازه ذرات در مدل کم‌تر از 0.1 mm نباشد [۲۴]. از سوی دیگر اگر اندازه ذرات از حدی بزرگ‌تر باشد، با توجه به وزن مخصوصشان ممکن است نتواند توسط میدان حمل شوند. یک راه حل این مساله براساس توصیه Chein, Enstein (1956) و USBR (1980) استفاده از مدل دو مقیاسه برای ایجاد سرعت لازم برای حرکت مواد است. Flower, Smith (1987) با مدل‌سازی تک مقیاسه به این نتیجه رسیدند که این مدل‌ها برای بستر متحرک زیاد مناسب نیستند و برای پیش‌بینی‌های بهتر استفاده از مدل دو مقیاسه لازم است. از آن‌جا که مقدار تحریف، اثرهای ثانویه‌ای را در مدل به دنبال خواهد داشت، تا حد ممکن باید e (مقدار تحریف که به صورت نسبت مقیاس قائم به مقیاس افقی تعریف می‌شود) کوچک انتخاب شود [۲۴]. این اثرها عبارتند از:

الف- تغییر در نیمرخ سرعت و فشار

ب- افزایش شیب طولی و احتمال تغییر رژیم جریان

براساس توصیه USBR (1980) مقدار تحریف بهتر است بین ۲ تا ۷ تغییر کند. در شرایطی که شیب نمونه اصلی خیلی کم باشد، انتخاب مقدار تحریف بزرگ‌تر امکان‌پذیر است. باید توجه شود در شرایطی که هدف اصلی، مطالعه جریان حاوی رسوب در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی نظیر پایه پل و دهانه آبگیر است، لازم است مدل یک مقیاسه ساخته شود و به‌علاوه به اندازه کافی بزرگ باشد تا حرکت رسوب در مدل امکان‌پذیر باشد.

میزان تحریف باید تا حدی که حرکت مواد رسوبی را کند نکرده و تشابه هیدرولیکی تحت‌الشعاع تشابه ریخت‌شناسی قرار نگیرد، کم در نظر گرفته شود. در صورتی که با وجود تحریف مدل، مصالح باز هم حرکت نکنند، می‌توان شیب را افزایش داد [۲۴]. افزایش شیب، مدل را از قانون فرود دور می‌سازد. Franco (1978) این افزایش شیب را به صورت رابطه (۱۱-۲) تعریف می‌کند:

$$S_{su} = S_m - \left[S_p \left(\frac{Y_r}{X_r} \right) \right] \quad (11-2)$$

که در این رابطه، S_{su} : افزایش شیب، S_m : شیب لازم برای حرکت مواد بستر و S_p شیب مدل اصلی می‌باشد. لازم به یادآوری است که شیب اضافه در مدل‌هایی که دارای انحنای هستند و مدل‌های جزرومدی توصیه نمی‌شود.

راه حل دیگر برای حرکت مواد بستر در مدل و ایجاد تعادل بین مقاومت اصطکاکی و حرکت مواد رسوبی و به حداقل رساندن میزان تحریف، استفاده از مواد سبک‌تر مانند زغال، پشم شیشه، خاک اره یا دانه‌های پلاستیکی می‌باشد که وزن مخصوص آنها بین ۱/۶ تا ۱/۲ است. برای مثال آزمایشگاه راه‌های آبی مهندسی ارتش آمریکا برای مدل‌سازی مواد بستر از زغال شکسته با وزن

مخصوص $1/3$ و قطر متوسط 0.3 mm به طور گسترده استفاده می‌کند [۲۴]. Herberton (1969) پیشنهاد می‌کند ذرات در مدل نسبت به نمونه اصلی بزرگ‌تر و سبک‌تر باشند. این موضوع با استفاده از روابط تئوری تایید می‌شود. در جدول (۲-۶) خصوصیات مصالح معمول در مدل‌سازی ارائه شده است.

نکته دیگری که در انتخاب مصالح باید به آن توجه شود، هزینه و دسترسی آسان به مصالح است، به خصوص زمانی که رودخانه در محدوده وسیعی مدل می‌شود. به علاوه لازم است طراح با رفتار رسوبی مصالح آشنا باشد.

باید توجه داشت که تحت شرایط خاصی از جریان (نزدیک آستانه حرکت)، مدل‌های بستر ماسه‌ای با متوسط قطر 0.3 mm تا 0.5 mm تمایل زیادی به تشکیل ریپل دارند، در حالی که ممکن است این شکل بستر در نمونه اصلی وجود نداشته باشد. برای کنترل این مساله Nicollet (1988) رابطه (۲-۱۸) را پیشنهاد می‌دهد:

$$d_* = d \left(\frac{\Delta\rho/\rho}{v^2} \right)^{1/3} \geq 15 \quad (2-12)$$

که در این رابطه، d : پارامتر بدون بعد ذره، d : قطر ذره، $\Delta\rho$: جرم مخصوص مستغرق ذره، ρ : چگالی سیال و v لزجت سینماتیکی سیال است.

راه حل ساده دیگر برای جلوگیری از تشکیل ریپل در مدل برای شرایطی که وزن مخصوص رسوب در مدل و نمونه اصلی یکسان باشد، استفاده از ذرات با قطر بیش‌تر از 0.7 mm می‌باشد [۲۴]. علاوه بر موارد فوق در انتخاب مصالح رسوب در مدل لازم است به موارد زیر دقت شود [۲۴]:

جدول ۲-۶ - خصوصیات مصالح معمول در مدل رسوب [۲۴]

مصالح	وزن مخصوص	اندازه (میلی‌متر)
ماسه کوارتز	۲/۶۵	۰/۱-۱
باکلیت	۱/۴-۱/۵	متغیر
زغال قهوه‌ای شکسته	۱/۲-۱/۲۷	متغیر
Styavene	۱/۴	متغیر
پوست گردو	۱/۳	۰/۳
پلی استرن	۱/۰۵	۱-۱/۵
Gilsonite (نوعی آسفالت)	۱/۰۳۶	متغیر
Lucite	۱/۱۸۵	متغیر
پوسته شکسته هسته زردآلو	۱/۳۲	۰/۳

- ذرات رسوب باید از سیال سنگین‌تر باشند. این توجه محدودیتی در رابطه با وزن مخصوص ایجاد می‌کند.
- در روند انتقال نباید تغییری در شکل و اندازه مصالح رسوبی مدل ایجاد شود. برخی از رسوبات سبک وزن نظیر زغال به راحتی شکسته و فرسوده می‌شوند.
- مدل‌های رسوب نباید سبب تغییر رنگ آب شوند؛ به طوری که دید کم شود.
- زاویه ایستایی مصالح رسوب در مدل نباید کم‌تر از شیب ذرات انباشته شده در مدل باشد. این موضوع بیش‌تر در مدل‌های کج مطرح است.

- منحنی دانه‌بندی و شکل رسوبات مدل باید تقریباً با نمونه اصلی برابر باشد. اگر شرایط جریان بستر مسلح ایجاد کند ارضای این شرط دشوار است.
- در زغال شکسته با قطر بیش‌تر از حدود 0.88 mm تمایل به پوسته پوسته شدن وجود دارد. این مساله ممکن است سبب جدایی هیدرولیکی^۱ شود.

- شبیه‌سازی حرکت ذرات

در حالت کلی در جریان یکنواخت کانال‌های باز عریض و بدون رسوبات چسبنده، رابطه (۲-۱۳) براساس آنالیز ابعادی حاکم است:

$$\Pi_A = \varphi_A \left(\frac{u_* d}{\nu}, \frac{\rho u_*^2}{g \Delta \rho d}, \frac{Y}{d}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad (2-13)$$

که در این رابطه، Π_A : کمیت بدون بعد مربوط به ضریب مقاومت کانال جریان، u_* : سرعت برشی در جریان یکنواخت، $u_* d / \nu$: رینولدز برشی ذره است که با Re_* نشان داده می‌شود، d : قطر ذره، Y : عمق جریان، S_0 : شیب کانال، ρ ، ρ_s : به ترتیب جرم مخصوص سیال و رسوب، $g \Delta \rho$: وزن مخصوص مستغرق، ν : لزجت سینماتیکی و g شتاب گرانش می‌باشد. θ پارامتر شیلدز، به عنوان چگالی جریان یا عدد فرود ذره شناخته شده و به صورت رابطه (۲-۱۴) تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{\rho u_*^2}{g \Delta \rho d} \quad (2-14)$$

رابطه بین Re_* و θ به دیاگرام شیلدز معروف است.

با توجه به هدف اصلی مدل‌سازی می‌توان برخی از پارامترهای رابطه (۲-۱۳) را کنار گذاشت. همان‌طور که در ابتدا بیان شد، مدل بستر متحرک برای چهار هدف متفاوت ساخته می‌شود:

- مطالعه جریان روی بستر هموار متحرک
 - مطالعه جریان با وجود شکل بستر
 - نرخ انتقال بار رسوبی (بار معلق و بار بستر)
 - تعیین الگوی جریان و حرکت رسوب در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی
- ضوابط تشابه و مدل‌سازی هر یک از شرایط فوق در ادامه توضیح داده می‌شود:

- جریان روی بستر متحرک هموار

در مدل‌های تک مقیاسه نسبت‌های ضریب مقاومت و قطر ذره در مدل و نمونه اصلی براساس روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۶) تعیین می‌شود:

$$f_r = 1 \quad (2-15)$$

$$d_r = X_r \quad (2-16)$$

که در این رابطه، f_r : نسبت ضریب مقاومت داری و اسیب‌خا در نمونه اصلی به مدل، d_r : مقیاس قطر ذره و X_r مقیاس طولی است.



اگر مدل دو مقیاسه باشد، رابطه (۲-۱۵) و (۲-۱۶) به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$f_r = \frac{R_{hr}}{X_r} \xrightarrow{\text{کانال عریض}} f_r = \frac{Y_r}{X_r} = e \quad (2-17)$$

$$d_r = Y_r \times e^3 \quad (2-18)$$

که در این رابطه، Rh_r : نسبت شعاع هیدرولیکی در نمونه اصلی به مدل و Y_r نسبت مقیاس عمقی می‌باشد. روابط فوق در شرایطی صادق‌اند که:

$$n \propto d^{1/6} \quad (2-19)$$

برای مدل‌سازی حرکت بستر هموار خواهیم داشت:

$$\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \right]_r d_r^3 = 1 \quad (2-20)$$

اگر رابطه (۲-۲۰) به عنوان رابطه اصلی پذیرفته شود، اما معادله (۲-۲۰) ارضا نشود، ممکن است حرکت ذرات بر رفتار مقاومتی کف منطبق نباشد.

- جریان با وجود شکل بستر

علاوه بر مقاومت اصطکاکی، وجود شکل بستر در کانال‌های آبرفتی سبب ایجاد نیروی رانش و توزیع فشار در اطراف آنها خواهد شد. پیچیدگی‌هایی که در چنین جریان‌هایی وجود دارد سبب می‌شود، محاسبه مقاومت جریان، دقت حالت بستر هموار را نداشته باشد. در این شرایط می‌توان برای مدل‌سازی حرکت رسوب در صورتی که $Re_* > 60$ (و کمی محافظه‌کارانه‌تر، $Re_* > 400$) باشد، از معیاری که در رابطه (۲-۲۱) ارائه شده است، استفاده کرد [۲۴]:

$$\sqrt{\theta_r} = \frac{u_{*r}}{\sqrt{g_r \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r d_r}} = \frac{Y_r}{\sqrt{X_r d_r \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r}} = 1 \quad (2-21)$$

که در این رابطه، θ : عدد شیلدز نامیده می‌شود و θ_r پارامتر شیلدز نسبی است.

باید توجه شود اگر $Re_* < 60$ باشد، اثر نیروهای لزجت قابل صرف‌نظر کردن نیست، لذا رابطه (۲-۲۱) باید به صورت رابطه (۲-۲۲) اصلاح شود:

$$\sqrt{\left(\frac{\theta}{\theta_c} \right)_r} = \frac{u_*}{u_{*c}} = \frac{Y_r}{\sqrt{X_r d_r \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r \theta_{cr}}} = 1 \quad (2-22)$$

θ_c : عدد بحرانی شیلدز است. براساس دیاگرام شیلدز (۱۹۶۳) زمانی که عدد شیلدز جریان از عدد شیلدز بحرانی بیش‌تر گردد، ذرات شروع به حرکت می‌کنند. در شرایطی که $Re_* < 60$ است، θ_c به طور معکوس با Re_* تغییر می‌کند. در شرایطی $Re_* > 60$ مقدار θ_c بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ است.

در استفاده از رابطه (۲-۲۱) و (۲-۲۲) لازم است مقیاس‌های طولی و عمقی و مقیاس عمق ذرات طوری انتخاب گردند که در نهایت این روابط برقرار باشند. مقدار θ_c را در مدل و نمونه اصلی می‌توان براساس نمودار شیلدز تعیین نمود.

با استفاده از این روابط برای بستر متحرک انتظار می‌رود شرایط مقاومت جریان در نمونه اصلی و مدل، رفتار تقریباً مشابهی داشته باشد. اما این انتظار همیشه برآورده نمی‌شود و لازم است مدل‌ساز نهایتاً با سعی و خطا به این هدف دست یابد.

انتقال رسوبات

رسوبات بستر به دو شکل بار بستر و بار معلق منتقل می‌شوند. زمانی که شدت جریان روی کف اندکی از مقدار بحرانی افزایش یابد، ذرات به شکل لغزش، غلتش و پرش شروع به حرکت خواهند کرد که به آن بار بستر گفته می‌شود. با افزایش شدت جریان طول جهش ذرات افزایش یافته و ذرات به شکل بار معلق منتقل می‌شوند. هر چند تمایز این دو حالت کاملاً روشن نیست، اما مکانیسم حرکت بار معلق با بار بستر متفاوت است. پارامتر موثر در حرکت بار بستر، شدت جریان و برای بار معلق، سرعت سقوط ذرات (W_s) می‌باشد. معمولاً مقدار $u_* / W_s = 0.5$ به عنوان شروع حرکت مواد معلق پذیرفته می‌شود [۲۴].

بار بستر

برای مدل‌سازی نرخ بار بستر با فرض جریان کاملاً آشفتنه در نزدیکی ذرات بستر و تبعیت از رابطه (۲-۲۱)، می‌توان رابطه (۲-۱۳) را به صورت زیر خلاصه کرد [۲۴]:

$$\Phi_r = \left(\frac{q_s}{\rho_s \sqrt{(\Delta\rho/\rho)gd^3}} \right) = 1 = \theta_r \quad (2-23)$$

که این رابطه، نسبت نرخ انتقال بار بستر در نمونه اصلی به مدل می‌باشد.

با فرض جریان آشفتنه و ثابت بودن Y/d و ρ_s/ρ ، مقیاس بده حجمی بار بستر در کل طول کانال برابر است با:

$$(Q_s)_r = \frac{Y_r^3}{X_r^{1/2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r} \quad (2-24)$$

با وجود حرکت شکل بستر، مقیاس زمانی با آنچه با استفاده از عدد فرود به دست می‌آید، متفاوت است. در این شرایط مقیاس زمانی بار بستر را می‌توان از رابطه (۲-۲۵) محاسبه کرد:

$$t_{sr} = X_r^{2.5} (\Delta\rho/\rho)_r / Y_r^2 \quad (2-25)$$

مقیاس زمانی حرکت ذرات رسوب برای مدل‌های تحریف نشده بسیار بزرگ‌تر از مقیاس زمان براساس فرود است. مقیاس زمان برای جریان برابر است با:

$$t_{fr} = X_r / Y_r^{0.5} \quad (2-26)$$

براساس یافته‌های WES، با توجه به ابعاد مصالح کف، هر روز در نمونه اصلی معادل ۵ تا ۱۰ دقیقه در مدل است [۳۷]. یعنی:

$$t_{sr} = 144 - 288 \quad (2-27)$$

با توجه به عدم قطعیت‌هایی که در رابطه با موضوع رسوب و مقیاس‌های مدل وجود دارد، واسنجی مقیاس زمانی ضروری است. چگونگی واسنجی در ادامه توضیح داده می‌شود. Shen (1971) پیشنهاد می‌کند برای مدل‌سازی بار بستر در رودخانه‌های شنی و ماسه‌ای از رابطه میر - پیتر استفاده شود، زیرا در این رابطه چگالی ذرات و تحریف شیب در نظر گرفته شده است.

- بار معلق

مدل‌سازی حرکت بار معلق و ته‌نشینی آن، در مواردی نظیر مطالعات حوضچه رسوبگیر و آبگیرها بسیار با اهمیت است. برای مدل‌سازی نرخ بار معلق رابطه (۲-۱۳) را با توجه به تاثیر قابل توجه سرعت برشی و سقوط ذرات می‌توان با رابطه (۲-۲۸) جایگزین نمود [۲۴]:

$$\Pi_{gs} = \varphi_{gs} \left(\frac{u_* d}{\nu}, \frac{u_*}{\omega}, \frac{Y}{d}, \frac{\rho}{\rho_s} \right) \rightarrow \Phi_r = \left(\frac{q_s}{\rho_s \sqrt{(\Delta\rho/\rho)gd^3}} \right) = 1 = \left(\frac{u_*}{\omega} \right)_r \quad (2-28)$$

با جایگذاری روابط سرعت برشی و سرعت سقوط برای ذرات کروی در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$Y_r / \sqrt{X_r d_r \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r} C_{Dr} = 1 \quad (2-29)$$

که در این رابطه، C_{Dr} ضریب رانش نسبی است.

زمانی که عدد رینولدز ذره ($W_s d / \nu$)، در محدوده ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ قرار گیرد و C_{Dr} حدوداً برابر یک باشد، رابطه (۲-۲۹) به معادله (۲-۲۱) تبدیل می‌شود.

- الگوی موضعی جریان و حرکت رسوب

در این موارد، هدف اصلی بررسی آبستتگی و رسوب‌گذاری در مجاورت سازه‌ها و یا ویژگی‌های موضعی رودخانه نظیر خم‌ها می‌باشد. از آن‌جا که این الگوها معمولاً سه‌بعدی هستند، لذا مدل‌سازی آنها با استفاده از الگوهای تحریف شده توصیه نمی‌شود. برای مدل‌سازی این شرایط، اگر در نمونه اصلی $Re_* > 60$ باشد، ذرات در جریان کاملاً متلاطم غوطه‌ور خواهند بود و رفتار جریان و ذرات کف تابعی از Re_* نسبی نخواهد بود، بنابراین [۲۴]:

$$\sqrt{\theta_r} = Y_r / \sqrt{X_r d_r \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r} = 1 \quad (2-30)$$

اما اگر $Re_* < 60$ باشد، لازم است اصلاحاتی در رابطه (۲-۳۰) انجام شود. اثر رینولدز ذره را می‌توان به صورت زیر اعمال کرد:

$$\frac{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_r d_r^3}{\nu_r} = 1 \quad (2-31)$$

- مقیاس زمان

یک نکته مهم در انجام آزمایش‌های با بستر متحرک، تعیین زمان تعادل است. زمان تعادل زمانی است که بعد از آن دیگر هیچ اتفاق محسوسی که باعث تغییر در پارامترهای مهم و تاثیرگذار در آزمایش شود روی ندهد. از آن‌جا که این اتفاق در زمان بی‌نهایت روی می‌دهد، معمولاً زمان تعادل را کسری از زمانی انتخاب می‌کنند که دیگر هیچ اتفاقی روی نمی‌دهد. این زمان در مدل‌های مختلف متفاوت است و گاه ممکن است زیاد و قابل توجه باشد. از آن‌جا که قانون تشابه فرود در مدل‌های با بستر متحرک صادق نبوده، مقیاس زمان از طریق واسنجی و صحت‌سنجی و براساس سعی و خطا تعیین می‌شود. (USB 1980) روش کار را به این صورت توصیف می‌کند:

- بستر رودخانه در نمونه اصلی در یک فاصله زمانی معین برداشت می‌شود و بستر مدل براساس برداشت‌های اولیه از بستر رودخانه ساخته می‌شود. فاصله زمانی بین دو برداشت متوالی به عنوان دوره صحت‌سنجی شناخته می‌شود.
- پدیده هیدرولیکی که در نمونه اصلی در دوره صحت‌سنجی اتفاق می‌افتد، در مدل شبیه‌سازی می‌شود و مقیاس مدل تخمین زده می‌شود.
- بستر مدل در انتهای دوره صحت‌سنجی تخمین زده می‌شود و با شرایط ثانویه نمونه اصلی مقایسه می‌شود. در صورت تطبیق شرایط ثانویه با نمونه اصلی، مقیاس زمانی مدل تعیین می‌شود. در طول تعیین مقیاس زمانی ممکن است لازم شود مقیاس بده، روش تزریق رسوب، مقیاس شیب و شاید دانه‌بندی مواد بستر تغییر کند و این روند با دستکاری مقیاس زمانی، بده و شیوه تغذیه رسوب و مقیاس شیب تکرار شود تا پاسخ نمونه اصلی حاصل شود [۷]. صحت‌سنجی رضایت بخش تنها زمانی اتفاق می‌افتد که تطابق نتایج مدل با نمونه اصلی در محدوده قابل قبول باشد، اگرچه (USBR 1980) هیچ تعریف معینی از این محدوده قابل قبول ارائه نمی‌کند. برای مدل‌های تحریف‌نشده در شرایط مختلف مقیاس زمانی را می‌توان از روابط جدول (۲-۷) تخمین زد [۴].

جدول ۲-۷- تعیین مقیاس زمان براساس نوع مدل [۴]

مقیاس زمان (t_r)	نوع مدل
$L_r^{0.5}$	براساس قانون فرود
$L_r^{2.0}$	براساس قانون رینولدز
$L_r^{1.5}$	انتقال رسوب براساس رابطه میر پیتر
$L_r^{-1.0}$	سقوط ذرات براساس قانون استوکس
1	سقوط ذرات برای ذرات بزرگ‌تر ۱ میلی‌متر
$L_r^{2.0}$	فرسایش عمودی
$L_R^{0.5}$	فرسایش افقی

۲-۳-۳- مسایل مطرح در انواع مدل‌های فیزیکی

۲-۳-۳-۱- اثرهای مقیاس

در مدل‌سازی اگر هم‌زمان تمام اعداد بی‌بعد در مدل و نمونه اصلی یکسان باشند (با استفاده از سیال مشابه در هر دو)، لازم است ابعاد مدل و نمونه اصلی یکسان باشد. لذا به منظور ساده‌سازی ساخت مدل، با توجه به شرایط مورد مطالعه، اثر یک نیروی پایه را به عنوان ملاک مدل‌سازی در نظر گرفته و اثر سایر نیروها ناچیز فرض می‌شود. این مساله در تمام موارد صادق نیست، مخصوصاً زمانی که ابعاد مدل نسبت به نمونه اصلی خیلی کوچک باشد. در این موارد شرایطی ایجاد می‌شود که اثر این نیروها در مدل خیلی بیش‌تر از نمونه اصلی خواهد شد و نمی‌توان از مقادیر کمی مدل برای پیش‌بینی کمیت‌های نمونه اصلی استفاده کرد. این مشکل با عنوان اثرهای مقیاس شناخته می‌شود. برخی موارد معمول که به سبب اثرهای مقیاس ایجاد می‌شوند عبارتند از کاونتاسیون، اصطکاک و کشش سطحی.

از جمله مسایل کلاسیک کاونتاسیون و اصطکاک که به سبب اثرهای مقیاس ایجاد می‌شود، می‌توان به آزمایش‌های روزنه‌های کوچک اشاره کرد. به سبب اثرهای مقیاس، آبگذری مدل نسبت به نمونه اصلی برای یک باز شدگی معین شیر کم‌تر خواهد بود. در مدل‌هایی که براساس مقیاس فرود ساخته می‌شوند، زمانی که عمق جریان در مدل کم‌تر از 25 mm است، اثر کشش سطحی اهمیت پیدا می‌کند [۲۶]. در

بسیاری از موارد می‌توان مقدار کمی اثرهای مقیاس را در حین آزمایش تعیین کرد. اثرهای مقیاس با افزایش مقیاس مدل افزایش می‌یابند. به منظور کاهش این اثرها، محدودیت‌هایی در انتخاب مقیاس مدل‌های مختلف وجود دارد. برای مثال، محدوده مقیاس افقی برای مدل‌های رودخانه‌ای بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ می‌باشد و برای مقیاس قائم در مدل‌های رودخانه‌ای کج بین ۲۰ تا ۱۰۰ توصیه می‌شود. در ساخت مدل‌ها تا حد ممکن مقیاس قائم باید به مقیاس افقی نزدیک باشد. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی ذکر شد، معمولاً نسبت مقیاس قائم به مقیاس افقی مقداری بین ۵ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود که این مقدار با توجه به نوع مدل (با بستر ثابت یا بستر متحرک) می‌تواند متفاوت باشد [۷].

اثر مقیاس طولی بزرگ در مدل‌هایی که نسبت به نمونه اصلی خیلی کوچک‌ترند به سبب افزایش اثرهای لزجت و کشش سطحی ترم‌های عدد رینولدز و عدد وبر اهمیت پیدا می‌کند. در این حالت اثرهای مقیاس عبارتند از:

- کاهش تلاطم جریان در مدل
- افزایش اهمیت کشش سطحی، تا جایی که ممکن است شتاب توسعه موج‌های موینگی از موج‌های ثقیلی بیش‌تر شود.
- تغییر الگوی موضعی جریان

برای داشتن جریانی کاملاً متلاطم، حداکثر مقیاس طولی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$L_r^{\max} = \left[5.65 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re}_p^{2/3} \cdot (k/h)_p^{7/9} \right] \cdot n^{10/3} \quad (۳۲-۲)$$

به همین منظور Novak (1981) روابط زیر را پیشنهاد می‌دهد:

$$\text{Re}_m \geq \frac{126R}{k\sqrt{\lambda}} \quad ; \quad \lambda = \frac{8gS_0R}{U_0^2} \quad (۳۳-۲)$$

که در این رابطه، R: شعاع هیدرولیکی، k: زبری موثر، U_0 : سرعت متوسط جریان و S_0 شیب کانال است.

- تحریف مقیاس قائم^۱

در این حالت اثرهای مقیاس عبارتند از:

- تغییر توزیع جریان عرضی در مدل نسبت به نمونه اصلی
- افزایش شیب جانبی و لذا احتمال ناپایداری شیب‌ها
- تغییر توزیع گرادیان فشاری در مجاورت سازه‌های جریان، کف و سواحل به سبب تغییر توزیع جریان جانبی و در نتیجه تغییر ضریب انقباض
- مقیاس زمانی متفاوت حرکت‌های قائم و افقی

- انحراف اندازه رسوبات^۲

پارامتر R/d نسبت مقیاس افقی به مقیاس ذره است. این تحریف اثرهای مقیاس زیر را سبب می‌شود:

- کاهش زبری نسبی

احتمال متفاوت بودن روند رسوب‌گذاری در نمونه اصلی و مدل به علت عدم دقت در شبیه‌سازی انتقال و رسوب‌گذاری رسوبات معلق



تفاوت مقیاس زمانی حرکت آب و حرکت رسوب و در نتیجه پیچیدگی‌های ارزیابی بستر کانال به ویژه در جریان‌های غیردایمی

- انحراف شیب^۱

در برخی از مدل‌های بستر متحرک، تغییر شیب به سبب ایجاد تنش برشی لازم برای حرکت ذرات انجام می‌شود. اثرهای مقیاسی که به سبب تغییرات شیب ایجاد می‌شود، کاملاً مشخص نیست. با این وجود احتمالاً مهم‌ترین اثر آن در مدل‌سازی‌هایی که بر پایه u_*0 / u_*c انجام می‌شود، تشدید ارتفاع فشار ایستایی^۲ است. اثر تغییر شیب بسیار شبیه تغییر مقیاس قائم است [۲۴] و [۲۶].

۲-۳-۳-۲- واسنجی مدل‌های فیزیکی

واسنجی مدل به این معنا است که بررسی شود آیا شرایط ایجاد شده و نتایج به دست آمده واقعی هستند یا خیر؟ هدف از اجرای این مرحله نزدیک کردن شرایط آزمایش به واقعیت است، به طوری که با تغییر در بعضی از ضرایب، خطاهایی که در اثر تغییر مقیاس و یا در اثر محدودیت امکانات در مدل به وجود آمده را کم کرده و یا از بین ببرد. داده‌های صحرایی جمع‌آوری شده از همان طرح می‌توانند منبع مفیدی برای واسنجی مدل باشند. در این مرحله ساخت هم‌زمان مدل ریاضی و فیزیکی یک پروژه ارزش خاصی پیدا می‌کند و این دو نوع مدل در شرایط مختلف به پیشرفت یکدیگر کمک می‌کنند [۲۴].

در مدل‌های فیزیکی واسنجی، مدل بخشی از مرحله ساخت است. در مدل‌های با بستر ثابت، عمدتاً با ایجاد زبری مناسب، نیمرخ سطح آب و توزیع سرعت در مدل، واسنجی می‌شود. در مدل‌های فیزیکی با بستر متحرک و خصوصاً مدل‌های فیزیکی کج که معمولاً قوانین شبیه‌سازی و مقیاس مدل در انتخاب مصالح بستر دقیقاً رعایت نمی‌شود، واسنجی و صحت‌سنجی از اهمیت بیش‌تری برخوردار است.

توزیع سرعت خصوصاً در مدل‌های کج از جمله اطلاعاتی است که برای واسنجی مدل استفاده می‌شود. انحراف مقیاس افقی و قائم در مدل‌های کج سبب می‌شود سرعت در مدل به خوبی بازسازی نشود و در این موارد واسنجی مدل از اهمیت خاصی برخوردار است. در مدل‌های فیزیکی، واسنجی و صحت‌سنجی دو مرحله به هم وابسته هستند که باید به طور جداگانه انجام شوند. زمانی که اطلاعات طبیعت تحت شرایط خاصی اندازه‌گیری می‌شود، مدل تحت همان شرایط اجرا می‌شود و نتایج با اعمال مقیاس‌ها، با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. اگر نتایج مدل و نمونه اصلی مطابقت داشته باشند، مدل تایید شده، در غیر این صورت لازم است اصلاحاتی در مدل صورت گیرد. بعد از هر اصلاحی در مدل لازم است مرحله صحت‌سنجی نیز انجام شود.

در کارهای آزمایشگاهی که برای بررسی یک پدیده خاص انجام می‌شود، غالباً اطلاعاتی از نمونه اصلی وجود ندارد تا مدل واسنجی شود. در این شرایط بهتر است آزمایش‌هایی مشابه آزمایش‌هایی که محققین دیگر انجام داده‌اند را انجام داد تا از صحت مدل و ابزارهای اندازه‌گیری مطمئن شد [۴].

۲-۳-۳-۳- تحلیل داده‌های حاصل از مطالعات مدل‌های فیزیکی

هر چقدر که شناخت پارامترهای موثر در یک پدیده خاص کامل‌تر باشد و آنالیز ابعادی قوی‌تر انجام شده باشد، تحلیل داده‌ها کامل‌تر خواهد بود. نکته مهم دیگر در تحلیل داده‌ها، نوع و مقدار نتایج حاصل از آزمایش‌ها است. داده‌ها نباید آن قدر کم باشند تا در تحلیل نتایج، مهندس مدل دچار سردرگمی شود. نتایج باید به قدری زیاد باشد که بتوان از میان آنها رابطه واضحی برقرار کرد.

1- Slope Distortion
2- Stagnation-Pressure

همچنین دامنه داده‌ها باید به قدری وسیع باشد که رابطه استخراج شده تحت شرایط مختلف هیدرولیکی صادق باشد. حتی الامکان آزمایش‌ها در شرایط جریان‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی انجام شوند تا طیف کاملی از شرایط هیدرولیکی را پوشش دهند [۲۴]. توصیه می‌شود پس از انجام بخشی از آزمایش‌ها، مرحله تجزیه و تحلیل آغاز گردد. زیرا بارها مشاهده شده است که نتایج برخی از آزمایشات با سایر نتایج مطابقت ندارد، در این صورت می‌توان آزمایش مزبور را به راحتی تکرار کرد. اما در صورتی که تجزیه و تحلیل داده‌ها بعد از اتمام کلیه آزمایشات و حتی تغییر در مدل انجام شود، بازگشت به آزمایشگاه و تکرار آزمایش نیازمند هزینه زیاد و شاید غیرممکن باشد.

۲-۳-۳-۴- کاربرد داده‌های حاصل از مدل‌های فیزیکی برای نمونه‌ی اصلی

اگر تشابه مناسب بین مدل و نمونه اصلی برقرار بوده و آزمایش‌ها به بهترین و کامل‌ترین نوع ممکن انجام شده و خطاها با واسنجی صحیح از بین برده شوند، با ضرب کردن مقیاس مدل در هر پارامتر، مقدار اصلی آن در نمونه اصلی به دست می‌آید. البته هیچ‌گاه خطاها صفر نمی‌شوند و همیشه خطاهای مقیاسی، خطاهای برداشت در اندازه‌گیری و غیره وجود دارد [۲۴].

۲-۳-۴- طراحی و کاربرد مدل‌های فیزیکی

۲-۳-۴-۱- مراحل مدل‌سازی فیزیکی و پیاده کردن مدل

مراحل مدل‌سازی فیزیکی را می‌توان به سه مرحله زیر دسته‌بندی کرد:

- مطالعات اولیه و محاسبات تئوری
- مرحله ساخت
- مرحله اجرای مدل

هر یک از موارد فوق در ادامه توضیح داده شده است:

- مطالعات اولیه و محاسبات تئوری

- جمع‌آوری اطلاعات پایه
 - این اطلاعات شامل نقشه‌های پلان و نیمرخ نمونه اصلی، اطلاعات هیدرولوژی، زمین‌شناسی و توپوگرافی می‌باشد.
- انتخاب مقیاس مدل: مدل از نظر فنی باید به اندازه کافی بزرگ و از نظر اقتصادی تا حد ممکن کوچک ساخته شود. برای تعیین مقیاس مناسب عوامل متفاوتی باید مدنظر قرار گیرند، از جمله:
 - محدودیت‌های امکانات مدل‌سازی (بده حداکثر، ارتفاع حداکثر، مساحت زمین)
 - ملاحظات ساخت
 - محدودیت‌های اندازه‌گیری
 - اثرهای مقیاس
- تبادل نظر با کارفرما
 - بررسی نیاز کارفرما و ارائه راه حل از سوی آزمایشگاه. در این مرحله ممکن است ساخت مدل به صورت کلی یا جزئی منتفی شود.



- جمع‌بندی مطالعات و انجام محاسبات
 - تهیه مبانی طرح و مطالعه گزارشات مدل‌های مشابه و داده‌های صحرائی
 - تعیین پارامترهای موثر بر پدیده و انجام تحلیل ابعادی و دسته‌بندی پارامترها
 - تعیین بخش‌هایی از طرح که باید برای آنها مدل ساخته شود، نوع مدل و تعداد آنها
 - تعیین مقیاس براساس نوع مدل و شرایط تشابه
 - تعیین سایر پارامترهای جریان براساس مقیاس
- انتخاب مکان مدل
 - در انتخاب محل مدل باید به مواردی نظیر داشتن فضای مناسب، دسترسی به جریان آب به اندازه کافی، امکان برگشت آب به مخزن اصلی آزمایشگاه، دسترسی آسان به امکانات برقی و غیره جهت اتصال وسایل اندازه‌گیری، داشتن مسیر مناسب برای انتقال وسایل و مصالح مدل و جزئیات امنیتی توجه شود.
- انتخاب مصالح مدل
 - ملاحظات انتخاب مصالح مدل در بخش مربوط ارائه شده است.
- تهیه نقشه‌های مدل

- مرحله اجرای مدل

مرحله اجرایی مدل، شامل ساخت مدل و تاسیسات ورودی و خروجی مدل و فراهم نمودن وسایل اندازه‌گیری می‌باشد. تاسیسات ورودی وظیفه تامین و کنترل بده جریان، آرام کردن و هدایت جریان به مدل و در موارد لزوم تغذیه رسوب و تولید موج را به عهده دارند. معمولاً برای تامین آب مورد نیاز از لوله‌های اصلی آزمایشگاه استفاده می‌شود. گاهی هم برای تامین آب سامانه پمپاژ جداگانه نصب می‌شود.

از آن‌جا که جریان آب ورودی به مدل دارای انرژی جنبشی زیاد است، لازم است برای آرام کردن و توزیع یکنواخت آن تمهیدات لازم فراهم گردد. برای این منظور از سازه و مصالح آرام‌کننده جریان استفاده می‌شود. این سازه شامل حوضچه با شکل مربع مستطیل است که درون آن موانعی از جنس چوب، ورق فلزی مشبک و یا آجر مشبک قرار داده می‌شود. گاهی این سازه‌ها به شکل سبد محتوی شن درشت و قلوه سنگ در ابتدای فلولم ورودی ساخته می‌شود. میزان افت انرژی بستگی به قطر قلوه سنگ‌ها و ضخامت سنگ دارد.

از دیگر سازه‌های ورودی که برای هدایت جریان به مدل استفاده می‌شوند، می‌توان به تبدیل‌ها اشاره کرد. دقت اجرای مدل به مرحله ساخت آن بستگی دارد. به طوری که در آزمایشات اولیه دقت کمتر و در آزمایش‌های نهایی دقت بیش‌تری لازم است. پس از ساخت لازم است که مدل کاملاً آب‌بندی شود. ساختمان اولیه مدل باید به گونه‌ای طراحی شود تا در هنگام تجدید نظر از کم‌ترین تغییر برخوردار باشد. تاسیسات خروجی در پایین دست مدل نیز از اجزای مهم مدل است که در آن تمهیدات و وسایل اندازه‌گیری بده جریان در نظر گرفته می‌شود؛ وسایل اندازه‌گیری بده معمولاً در منتهی الیه مدل احداث می‌گردند شکل (۲-۲). برای کنترل سطح آب می‌توان از انواع دریچه‌های کشویی، دریچه‌های تاشو و شیرها استفاده کرد [۷] و [۴].

۲-۳-۴-۲- طراحی مدل‌های فیزیکی

مراحل مختلف طراحی یک مدل فیزیکی به صورت زیر است:

- تبیین صورت مساله
- پیشنهاد انواع روش‌های حل
- شکل‌گیری طرح مدل براساس تحلیل ابعادی
- تعیین نوع مدل (تک مقیاسه یا مدل با مقیاس کج)، مقیاس مدل و دیگر پارامترهای مورد نظر مثل مصالح و غیره با توجه به نوع آزمایش و امکانات



شکل ۲-۲- تجهیزات اندازه‌گیری بده

- تهیه وسایل اندازه‌گیری و بررسی میزان دقت آنها
- تعیین تعداد آزمایش‌ها با توجه به زمان‌بندی و پارامترهای مورد نظر برای بررسی محل آزمایشگاه و یا محل ساخت مدل نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. نکات زیر باید در انتخاب محل مدنظر قرار گیرد:
- در صورت نیاز، محل ساخت مدل نزدیک به مواد مصرفی مثل مصالح و غیره باشد.
- از امکانات مناسب مثل برق، آب، تهویه و غیره برخوردار باشد.
- تا حد ممکن از لحاظ آب و هوایی، دما، رطوبت و غیره شبیه محل مورد نظر در نمونه اصلی باشد.
- اگر از وسایل دقیق الکتریکی در اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود، باید محل از گرد و خاک و غبار، نوسانات برق و غیره محفوظ باشد.
- تا حد ممکن محیط آزمایشگاه سر باز نباشد تا عواملی مثل باد، باران و غیره بر نتایج آزمایشات تاثیر نگذارند.
- راه‌های دسترسی به محل برای عموم آزاد نباشد، تا اشخاص متفرقه ناخواسته باعث ایجاد خطا در داده‌ها شوند [۷].



۲-۳-۴-۳- نکات طراحی مدل‌های فیزیکی

- مقیاس مدل

مقیاس اصلی برای هر مدل هیدرولیکی مقیاس هندسی است که با نسبت طولی از مدل به طول نظیر آن در نمونه اصلی تعریف می‌شود. انتخاب مقیاس هندسی مناسب بستگی به نوع سیال، امکانات و فضای موجود و هدف تهیه مدل دارد. انتخاب چند مقیاس در یک مدل نیز راهی برای اقتصادی‌تر کردن طرح می‌باشد. برای مثال در مطالعات مقدماتی مدل، مقیاس $\frac{1}{100}$ و در مطالعات بعدی مقیاس $\frac{1}{6}$ توصیه می‌شود [۷]. از نظر فنی در صورتی که امکانات و فضا اجازه دهد، مدل باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا نتایج حاصل از دقت کافی برخوردار باشند، ولی از نظر اقتصادی مدل کوچک‌تر مناسب‌تر است. در جدول (۲-۸) مقیاس برخی از مدل‌های هیدرولیکی توصیه شده ارائه شده است.

جدول ۲-۸- مقیاس برخی از مدل‌های هیدرولیکی [۷]

مقیاس	مدل	مقیاس	مدل
$\frac{1}{1000}$ تا $\frac{1}{100}$	مقیاس افقی مدل‌های چند مقیاسه	$\frac{1}{100}$ تا $\frac{1}{20}$	مقیاس قائم مدل‌های چند مقیاسه
$\frac{1}{30}$ تا $\frac{1}{5}$	شیرها و دریچه‌ها	$\frac{1}{30}$ تا $\frac{1}{20}$	ابنیه فنی کانال‌ها (تندآب‌ها و ...)
$\frac{1}{25}$ تا $\frac{1}{40}$	امواج	$\frac{1}{150}$ تا $\frac{1}{100}$	سازه‌های دریایی و بندرها

یک مورد مهم در انتخاب مقیاس، توجه به مساله خطاهای مقیاسی^۱ می‌باشد. این خطاها معمولاً در اثر عدم شبیه‌سازی کامل به وجود می‌آیند که در اثر آن نیروهای خارج از نیروهای اثرگذار در واقعیت وارد مدل می‌شوند و یا نیروهای واقعی حذف می‌شوند.

یکی از علل ایجاد این نوع خطاها به این واقعیت مربوط می‌شود که معمولاً هم نیروی ثقل و هم نیروی ناشی از لزجت در جریان اثرگذار هستند، ولی با کم‌رنگ در نظر گرفتن اثر یکی از آنها خطا ایجاد می‌شود. به علاوه شرط تشابه هندسی نیز ممکن است به طور کامل رعایت نشود. برای مثال دستیابی به تشابه هندسی زبری سطوح در تماس با سیال، در اغلب موارد مشکل است.

تاثیر مقیاس راحتی در یک مدل را که با دو مقیاس ساخته می‌شود، می‌توان ملاحظه کرد. بنابراین اگر نیروی غالب به درستی انتخاب شود، مقدار خطاها کم‌تر می‌شود ولی از بین نمی‌رود.

- محدودیت در ابعاد مدل

تاثیر ابعاد انتخابی مدل در میزان خطاهای مدل قابل توجه است. مثلاً در ساخت یک مدل خیلی کوچک، علاوه بر مشکلات اندازه‌گیری نوسانات تراز و فشار آب، ممکن است نیروی کشش سطحی نیز اثرهای نامطلوبی از خود به جا بگذارد و اندازه‌گیری‌ها را با خطا همراه سازد.



برای پرهیز از تاثیر نیروی کشش سطحی، Kobus (1980) پیشنهاد می‌کند ارتفاع آب در مدل از 3 cm کم‌تر نباشد. برای به حداقل رساندن تاثیر نیروهای لزجت و کشش سطحی توصیه می‌شود از ساختن مدل‌های خیلی کوچک پرهیز شود. در مدل‌های شیرها و دریچه‌ها، مجاری تحت فشار و تخلیه‌کننده‌ها توصیه می‌شود حداقل گذرگاه جریان، قطر و یا عرض به منظور پرهیز از تاثیر نیروهای کشش سطحی، از 100 mm کم‌تر نباشد [۷].

- وسایل اندازه‌گیری

وسایل اندازه‌گیری عموماً تحت شرایط خاص کاربرد دارند و بسته به پارامتری که اندازه می‌گیرند باید دارای دقت مناسب باشند. ابعاد وسایل اندازه‌گیری باید آن قدر کوچک باشد که باعث تغییر عمده در فیزیک مساله نشود. به همین جهت معمولاً اندازه‌گیری‌ها به صورت نقطه‌ای می‌باشد. در ادامه مشخصات برخی وسایل اندازه‌گیری بیان شده است [۶].

- اندازه‌گیری بده جریان

برای اندازه‌گیری بده جریان می‌توان از وسایلی مانند انواع فلوم‌ها و سرریزها برای جریان روباز و انواع روزنه‌ها و ونتوری مترها، برای جریان در لوله‌ها استفاده نمود. وسایل دیگری که ممکن است برای اندازه‌گیری بده جریان استفاده شود، شامل استفاده از بده‌سنج‌های التراسونیک و الکترومغناطیس می‌باشد. در مدل‌های کوچک و برای اندازه‌گیری بده‌های کم بهتر است از روش حجمی استفاده شود. بدین صورت که جریان خروجی از مدل وارد مخزن با حجم ثابت شده و با اندازه‌گیری مدت زمان پر شدن مخزن، مقدار بده با تقسیم حجم مخزن به زمان پر شدن آن محاسبه می‌شود. روش دیگر استفاده از مخازنی است که روی ترازو قرار دارند و با اندازه‌گیری وزن آب ورودی به مخزن و زمان پر شدن مخزن می‌توان مقدار بده را تعیین نمود.

- اندازه‌گیری تراز سطح آب (تراز سنج)

برای اندازه‌گیری تراز سطح آب معمولاً از تراز سنج استفاده می‌شود. روش دیگر، نصب پیژومتر در جداره فلوم می‌باشد و سطح آب درون پیژومترها معرف عمق آب در فلوم خواهد بود [۴]. در صورتی که اندازه‌گیری ارتفاع موج مدنظر باشد، از دو دستگاه ارتفاع سنج یکی برای تعیین حداکثر ارتفاع آب و دیگری برای تعیین حداقل ارتفاع آب استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از ابزارهای دقیق‌تری مانند اکوساندر و یا التراسونیک استفاده نمود. روش ساده‌تر، استفاده از دستگاه‌های ثابت می‌باشد.

- اندازه‌گیری سرعت

سرعت متوسط جریان در فلوم‌ها را به راحتی می‌توان با اندازه‌گیری عمق و بده جریان و عرض فلوم محاسبه نمود. ابزارهایی که برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای استفاده می‌شود شامل لوله پیتو، سرعت‌سنج‌های پره‌ای و سرعت‌سنج‌های الکترومغناطیسی می‌باشد. برای اندازه‌گیری دقیق و سه‌بعدی سرعت جریان می‌توان از سرعت‌سنج‌های لیزر داپلر، PIV^۱ و یا آکوستیک داپلر استفاده نمود [۴]. خصوصیات برخی از این ابزارها در ادامه ارائه شده است.

• سرعت‌سنج PIV

سرعت‌سنج PIV با دنبال کردن ذرات روی و یا داخل میدان جریان، بزرگی و جهت حرکت ذره را تعیین می‌کند. ذرات ردیابی شونده می‌توانند به صورت تکی یا مجموعه‌ای از ذرات با شکل معین دنبال شوند. کاربرد این سرعت‌سنج در مطالعه تلاطم و سایر مسایل هیدرودینامیکی بوده و به طور کلی برای تحلیل الگوهای داخلی جریان‌های کوچک توسعه یافته است. مبنای این اندازه‌گیری پردازش تصاویر و تحلیل آماری روی تصاویر می‌باشد. طرح شماتیک این سرعت‌سنج در شکل (۲-۳) ارائه شده است. همچنین روش سرعت‌سنج تصویری ذره برای میدان جریان‌های بزرگ، نظیر جریان سطحی رودخانه‌ها توسعه پیدا کرده است که سرعت‌سنج تصویری ذره بزرگ مقیاس^۱ نامیده می‌شود. اندازه‌گیری جابجایی نشانه بین دو تصویر متوالی در ناحیه کوچکی به نام مساحت بررسی^۲ انجام می‌شود. بردار سرعت برای هر مساحت بررسی، با تقسیم جابجایی بر بازه زمانی بین دو تصویر متوالی به دست می‌آید.

• سرعت‌سنج صوتی

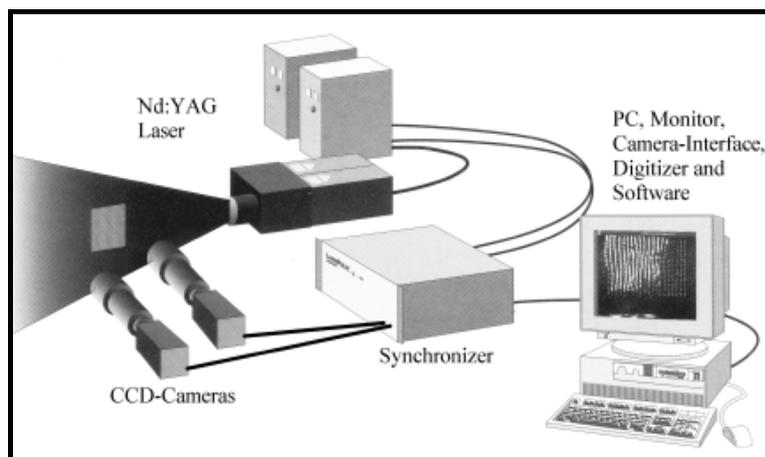
سرعت‌سنج‌های صوتی از دیگر دستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت در آزمایشگاه است. این دستگاه یک سرعت‌سنج بسیار دقیق است که براساس اختلاف الکترومغناطیسی بین دو الکتروود در یک سیال جاری عمل اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. بدین ترتیب در سرعت‌های جریان مختلف، شار مغناطیسی متفاوتی ایجاد شده و بنابراین می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب با دقت‌های بالا استفاده کرد. این دستگاه می‌تواند در تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعات مهندسی، اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز، اندازه‌گیری‌های محیط زیست و هیدرولوژیکی، بررسی انتقال گل‌ولای و مشاهده نحوه حرکت موج کاربرد داشته باشد. این دستگاه به منظور اندازه‌گیری جریانات با جهات مختلف و همچنین جریانات برگشتی اهمیت ویژه‌ای دارد. مقادیر سرعت می‌تواند به صورت متوسط و یا لحظه‌ای اندازه‌گیری شود. این دستگاه از طریق این حسگرها که در آن چهار الکتروود که دو به دو مقابل هم و عمود بر هم به فواصل معین واقع شده است، در داخل آب قرار داده می‌شود. اطلاعات جریان آب از این حسگر توسط یک سیم رابط به دستگاه پردازشگر انتقال می‌یابد.

اجزای این دستگاه به تفکیک در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

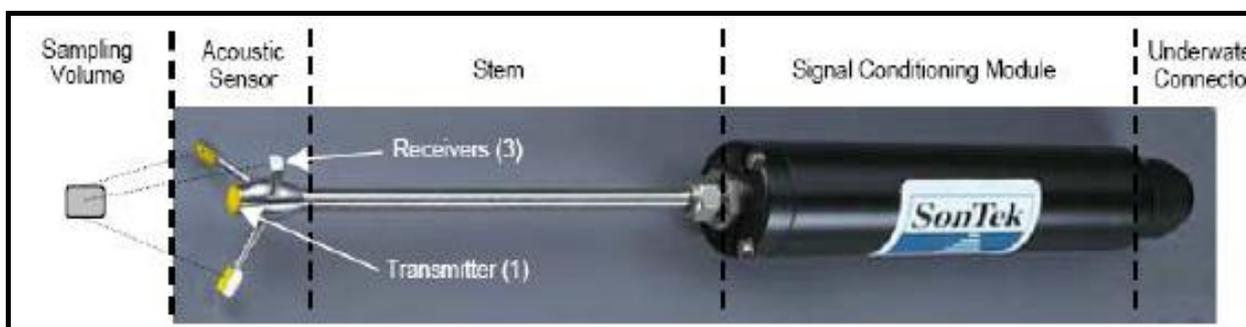
- اندازه‌گیری فشار

وسایل متداول اندازه‌گیری فشار عبارتند از پیزومتر و فشارسنج بوردون [۶]. البته با پیشرفتی که در علوم مختلف صورت گرفته است، اغلب وسایل اندازه‌گیری به صورت الکترونیکی و دیجیتالی عمل می‌کنند. دقت این گونه وسایل مهم‌ترین حسن این ابزار می‌باشد، ولی مشکل واسنجی دقیق این وسایل وجود دارد. نکته مهم دیگر در مورد این وسایل این است که هم‌زمان قادر به اندازه‌گیری سرعت، بده جریان و یا فشار می‌باشند.





شکل ۲-۳- طرح شماتیک سرعت‌سنج PIV



شکل ۲-۴- سرعت‌سنج صوتی

برای اندازه‌گیری فشارهای بالا، به‌جای استفاده از لوله‌های پیزومتر می‌توان از لوله‌های U شکل که حاوی جیوه یا سایر سیالات سنگین می‌باشد، استفاده نمود. برای اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی و یا اندازه‌گیری خودکار از ترانس دیوسر استفاده می‌شود [۴].

۲-۳-۴- انتخاب مصالح مورد نیاز و نحوه پیاده کردن آنها

در ساختمان مدل لزومی ندارد از مصالح مشابه نمونه اصلی استفاده شود، بلکه اگر سطوحی که از آنها جریان عبور می‌کند شبیه نمونه اصلی باشد و همچنین زبری سطوح آن تقریباً با مقیاس مربوط انتخاب شود، موضوع کفایت می‌کند. در انتخاب مصالح لازم برای مدل‌سازی باید مقاومت مصالح، سهولت دسترسی و هزینه‌های نهایی آنها و همچنین دقت مورد نیاز در برخی قسمت‌های مدل مورد توجه قرار گیرد. قابلیت جذب آب از مواردی است که در انتخاب مصالح اهمیت دارد. نباید در ساخت اجزای مهم مدل از موادی استفاده شود که در صورت جذب آب تغییر شکل می‌دهند. سهولت نصب و همچنین شکل‌پذیری سریع و ساده مصالح در زمان اجراء، در انتخاب نوع مصالح مورد توجه قرار می‌گیرد.

از چوب و تخته‌های چوبی چند لایه و همچنین فایبرگلاس به خاطر داشتن سطحی نرم و خاصیت ضد تورم برای ساخت جعبه‌های ورودی و خروجی مدل استفاده شده و درزهای قطعات چوبی به‌کار رفته با نوار پلاستیکی یا ماستیک آب‌بندی می‌شود. برای ساخت این جعبه‌ها ممکن است از مصالح دیگری نظیر بلوک‌های بتنی، آجر یا ورق‌های فلزی استفاده شود. از آسفالت به عنوان ماده آب‌بندی در ساختن مدل رودخانه‌ها و کانال‌ها استفاده می‌شود.

برای ساخت قسمت‌هایی از مدل که قرار است جریان در آنها قابل مشاهده باشد نظیر بدنه فلوم، از پلکسی گلاس و گاهی از شیشه معمولی استفاده می‌شود. استفاده از شیشه به سبب قیمت پایین تر آن، نسبت به پلکسی گلاس است. در این موارد باید توجه شود که شیشه توانایی تحمل تنش‌های غیریکنواخت حاصل از تغییرات حرارتی و بارگذاری غیریکنواخت را ندارد و ممکن است بشکند، لذا باید در این زمینه تمهیدات لازم اندیشیده شود.

در ساخت بستر و دیواره‌ها، با توجه به توپوگرافی مورد نیاز می‌توان از مصالح مختلفی استفاده کرد. برای ساخت بستر ثابت می‌توان از مصالحی چون بتن، فوم، یونولیت و سایر مصالحی که در هنگام اجرا انعطاف‌پذیر باشند، استفاده کرد.

موادی که برای ایجاد توپوگرافی بستر استفاده می‌شوند باید ویژگی‌های خاصی داشته باشند. برای مثال در هنگام ساخت مدل باید قابلیت تغییر شکل داشته باشند تا بتوان آنها را به راحتی مطابق شکل بستر شکل داد. همچنین پس از خشک شدن باید سطحی صاف با زبری بسیار کم داشته باشند. با توجه به نرم بودن خاک رس، این مورد یکی از گزینه‌های مورد استفاده است. استفاده از سیمان با ماسه نرم گزینه دیگری است که برای ایجاد توپوگرافی بستر استفاده می‌شود. در انتخاب نوع مصالح برای رسیدن به زبری‌های مورد نظر و همچنین مصالح مورد استفاده برای ایجاد بستر متحرک در بخش‌های مرتبط توضیحات لازم ارائه شده است. خصوصیات تعدادی از مصالح که در مدل‌سازی رودخانه زیاد استفاده می‌شود، در جدول (۲-۹) ارائه شده است. پوشش گیاهی رودخانه را می‌توان با استفاده از توری‌های سیمی و قطعات فلزی شبیه‌سازی کرد [۷] و [۴].

جدول ۲-۹- خصوصیات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی رودخانه

نوع مصالح	محاسن	معایب	کاربرد / توضیحات
بتن	استفاده از قطعات پیش‌ساخته در هنگام اجرا، قابلیت شکل‌پذیری در هنگام اجرا، عدم تورم در مجاورت آب پس از سخت شدن	عدم تغییر شکل پس از سخت شدن (می‌توان با استفاده از بتن‌های کندگیر این ایراد را برطرف کرد)	ساخت کناره‌های رودخانه
پارافین یا شمع	قابلیت شکل‌پذیری، سهولت کاربرد	شکنندگی، غیرشفاف بودن، حساسیت در برابر تغییر حرارت	به عنوان یخ در یخ‌زدگی رودخانه‌ها و حرکت جریان‌های توام با یخ
پلاستیک	شکل‌پذیری و ماشین‌خوری عدم تورم و تغییر شکل در مجاورت آب، شفاف بودن نوع خاصی از آن (پلکسی گلس)، عدم حساسیت در برابر تغییر حرارت		ساخت بدنه فلوم و قطعات با هندسه‌های پیچیده
چوب	شکل‌پذیری و سهولت ماشین‌خوری	تغییر شکل و تورم در مجاورت آب و رطوبت، عدم دوام برای مدت‌های طولانی، حتی در صورت استفاده از پوشش‌های سطحی نظیر رنگ	چوب ساروج هندوستان شاید مناسب‌ترین چوب برای ساخت اجزای اصلی مدل باشد.
فلزات	سادگی ساخت و ماشین‌خوری، نصب آسان، دوام و عدم تغییر شکل	غیرشفاف بودن	فلزات آهنی به شکل‌های مختلف نظیر تیر آهن، نبشی، قوطی و تسمه برای ساخت فلوم‌ها و فلزات غیرآهنی برای ساخت اجزای مدل و تاسیسات اندازه‌گیری استفاده می‌شوند.
گچ (مرده)	قابلیت شکل‌پذیری در هنگام اجرا، قابلیت شکل‌پذیری پس از ساخت	ناپایداری در برابر آب	جایگزین سیمان برای قسمت‌های مختلف



۲-۳-۵- مدل‌های فیزیکی انواع سازه‌ها

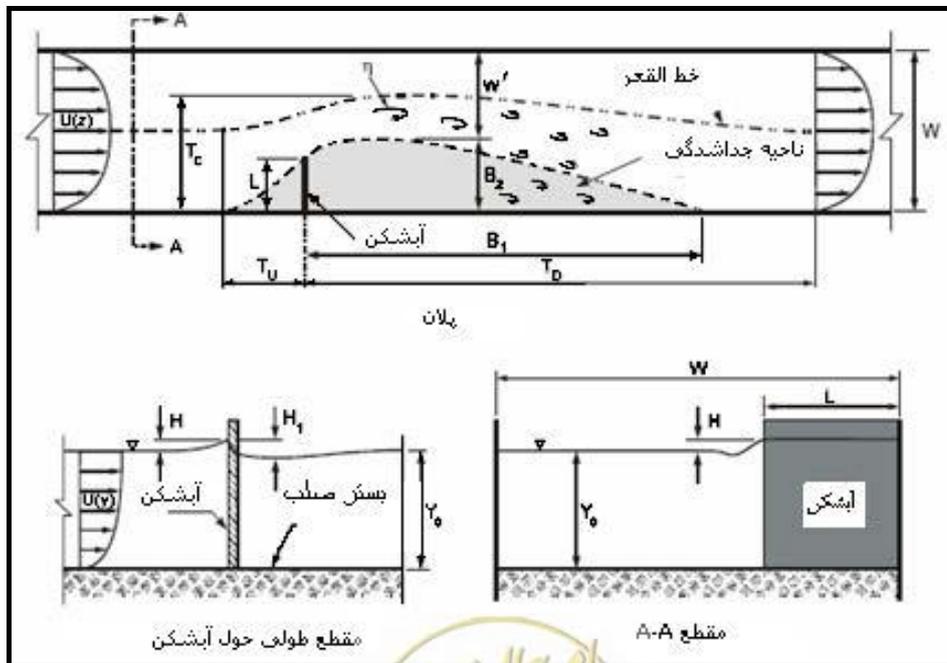
۲-۳-۵-۱- مدل فیزیکی آبشکن

بیش‌تر مطالعاتی که بر روی آبشکن‌ها انجام شده است بر روی میدان موضعی جریان و عمق آبستگي در مجاورت این سازه‌ها بوده است. مطالعاتی نیز بر روی ناحیه جداشدگی بالادست که مستقیماً روی میدان موضعی جریان اثر می‌گذارد و همچنین اثر آبشکن یا سری آبشکن‌ها روی خط‌القعر، انجام شده است.

در مطالعات آبشکن متغیرهای زیر دارای اهمیت می‌باشند شکل (۲-۵):

- فاصله نقطه جدایی جریان در بالادست تا آبشکن (T_U)
- فاصله‌ای از پایین دست آبشکن که دوباره خط القعر بر مرکز سطح کانال منطبق می‌شود (T_D)
- بیش‌ترین فاصله جانبی دیواره تا خط‌القعر (T_C)
- طول و عرض ناحیه جداشدگی در پایین دست (B_1) و (B_2)
- حداکثر عمق خط القعر در طول ناحیه تنگ‌شدگی
- طول و عمق آبستگي در محل آبشکن

براساس یافته‌های محققین، میدان جریان حول آبشکن تابعی از پارامترهای فیزیکی آبشکن، پارامترهای مجرا، پارامترهای جریان و پارامترهای رسوب می‌باشد.



شکل ۲-۵ - طرح شماتیک متغیرهای مورد بررسی در مطالعات آبشکن

معیار شبیه‌سازی دینامیکی جریان در آبشکن‌ها با بستر صلب، تشابه عدد فرود است. در ساخت و بررسی نتایج مدل باید اثرهای مقیاس در نظر گرفته شود.

در مدل‌سازی آبشکن در بستر متحرک با توجه به هدف مدل‌سازی (بررسی شکل بستر، بار بستر و بار معلق)، لازم است معیارهایی که در قسمت بستر متحرک مطرح شد، رعایت شود.

اجرای مدل، نظیر آنچه که در بخش ساخت مدل مطرح شد، می‌باشد. برای ساخت از موادی نظیر پلکسی گلاس، چوب چندلایه و برای ساخت آبشکن‌های نفوذ پذیر از ورق‌های فلزی متخلخل یا از سری میله‌ها استفاده می‌شود.

تعداد آزمایشات براساس نوع و موقعیت آبشکن‌ها تعیین می‌شود. برای برداشت داده‌هایی نظیر الگوی جریان، لازم است شبکه‌بندی برداشت سرعت انجام شود. ابعاد این شبکه براساس دقت مورد نیاز، شرایط جریان و میزان تغییرات سرعت در مکان مورد مطالعه تعیین می‌شود که در نواحی نزدیک به آبشکن فشرده‌تر می‌باشد [۸] و [۲۶].

۲-۳-۵-۲- مدل فیزیکی مجاری آبگیر

در آبگیری به روش ثقلی مهم‌ترین سوال، تعیین محل احداث آبگیر است. این نوع آبگیر را معمولاً در قوس خارجی ایجاد می‌کنند تا رسوب کم‌تری وارد آبگیر شود. البته تعیین بهترین محل در قوس خارجی برای این که کم‌ترین رسوب به آبگیر وارد شود، با ساخت مدل هر رودخانه و با آزمون و خطا امکان‌پذیر است. استفاده از وسایل کمکی مانند پره‌های مستغرق^۱ در مقابل آبگیر نیز در بررسی و ارائه پیشنهاد جهت آبگیری موثر است.

ارتفاع آبگیری از بستر رودخانه نیز مهم است. بهترین حالت زمانی است که آبگیر آن قدر بالا باشد تا رسوب و ذرات معلق و بار بستر وارد آبگیر نشوند و از سوی دیگر آن قدر پایین باشد تا از ورود آشغال‌ها، چوب‌ها و یخ‌های شناور سطحی به آبگیر جلوگیری شود. موارد بالا وقتی از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌شوند که آبگیری به روش پمپاژ باشد. در این گونه پروژه‌ها هزینه سنگین احداث یک ایستگاه پمپاژ در اثر اشتباه در جانمایی محل آبگیر به هدر می‌رود [۷].

۲-۳-۵-۳- مدل فیزیکی پایه و تکیه‌گاه پل

اگر هدف از ساختن مدل، بررسی اثر بالا آمدن سطح آب در بالادست پل، اندازه سرعت و جهت جریان باشد، از مدل با بستر ثابت استفاده می‌شود، مخصوصاً در مواقعی که اطلاعات صحرایی کم باشد. این گونه مدل‌ها هنگامی که پل مانعی عمده در مقابل جریان در دشت سیلابی ایجاد کرده و روش‌هایی برای بهبود وضعیت عبور سیل و کاهش تراز آب لازم باشد، ارزشمند هستند. ولی اگر هدف از ساختن مدل به دست آوردن سرعت جریان در نزدیکی پایه‌ها و مطالعه ابعاد آبشستگی در اثر وجود پایه پل باشد، باید از مدل با بستر متحرک استفاده کرد. در موارد زیر پیشنهاد می‌شود برای طراحی پایه پل از مدل فیزیکی استفاده شود [۹]:

- اگر عدد فرود رودخانه بیش‌تر از $0/8$ باشد، برای تخمین میزان آبشستگی در اثر شکل و جهت پایه از مدل استفاده می‌شود.
- اگر برای شکل خاصی از پایه پل اطلاعاتی در مورد آبشستگی و نیروهای هیدرودینامیک وجود نداشته باشد، استفاده از مدل فیزیکی در ارزیابی این موارد و احیانا اصلاح شکل پایه مفید می‌باشد.
- اگر داده‌های صحرایی از بده جریان و تراز آب کافی نباشد، مدل کمک خواهد کرد تا وضعیت جریان در شرایط سیلابی مشخص شود، به خصوص این که الگوی جریان در مدل بررسی می‌شود.
- اگر جریان با زاویه زیاد (بیش‌تر از) نسبت به محور طولی پایه‌ها به آنها برخورد کند، مطالعات مدل فیزیکی قابل توصیه است.

- اگر خاکریزهای جاده، مانع عمده‌ای در مقابل جریان سیل در دشت سیلابی ایجاد کند و یا بده زیاد جریان مجبور به عبور از یک دهانه باریک باشد، مدل فیزیکی به تعیین وضعیت جریان در دشت سیلابی، منحنی فرآب در بالادست پل، جهت جریان و برآورد عمق آبشستگی کمک می‌کند.
- وقتی شرایط بالا دست به منحنی فرآب بسیار حساس بوده و یا هندسه آبراهه بالادست و دشت سیلابی پیچیده باشد، استفاده از مدل به تخمین تراز سطح آب کمک می‌کند.
- اگر کارهای ساماندهی برای کنترل حرکت آبراهه رودخانه و پایدار کردن جهت جریان در اطراف پایه‌ها مورد نیاز باشد، مدل کمک می‌کند تا یک راه حل اقتصادی و موثر تعیین شود.

۲-۳-۵-۴- مدل فیزیکی کانال‌ها

کانال‌ها عموماً به علت مقطع و شیب یکنواختی که دارند با روش‌های تحلیلی طراحی می‌گردند. با این وجود، تندآب‌ها و سرریزها، خمیدگی و یا ترکیبی از این سازه‌ها در مسیر کانال‌ها ممکن است مسایلی به وجود آورند که حل آنها صرفاً به طریق تحلیلی میسر نبوده و لزوماً باید در طراحی آنها از آزمایش‌های مدل کمک گرفت. مدل چنین سازه‌هایی، با توجه به آن‌که نیروی ثقل بر جریان حاکم است، براساس قانون فرود ساخته می‌شود. در مواردی که نیروهای اصطکاکی، مانند سرریزهای تخت و بزرگ، اهمیت دارند باید با تعدیل شیب و یا زبری، افت اضافی را جبران کرد.

سرریزهای مستهلک‌کننده انرژی در کانال‌ها مشابه سرریز و حوضچه آرامش با مقطع مستطیلی بوده و از نقطه نظر اندازه‌گیری فشار و سایر موارد تفاوتی با آنها ندارند. در تندآب‌ها که از عمق پایاب کافی برای حوضچه آرامش برخوردار نیستند، لازم است از یک مانع جهت افزایش عمق آب حوضچه استفاده شود. عمق افزوده شده حوضچه از ایجاد جریان‌های با سرعت بالا جلوگیری کرده و مانع ورود آن به داخل کانال می‌شود.

حوضچه‌های آرامش که موجب تولید موج و نوسانات سطح آب می‌شوند، از نقطه نظر صدماتی که در جدار کانال‌های پایاب وارد می‌کنند، نیاز به مطالعه و بررسی توسط مدل دارند [۲۳].

۲-۳-۵-۵- مدل پدیده‌های گردابی

جریان گردابی یکی از پدیده‌هایی است که معمولاً در دهانه آبیگرها به وجود می‌آید. اساساً باید از تشکیل پدیده گردابی به دلیل تاثیر سویی که از خود باقی می‌گذارد، جلوگیری شود. وجود گرداب باعث افزایش میزان افت ورودی جریان، کاهش بده آبیگری، مکش اجسام شناور از سطح آب و هدایت آنها به سمت آبیگر و مخلوط شدن حجم زیادی از هوا با آب خواهد شد. عامل اخیر باعث لرزش، سرو صدا و خوردگی در توربین‌ها خواهد شد و نهایت خسارت زیادی را به وجود می‌آورد.

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ۱٪ تداخل هوا در ورودی یک پمپ بازده آن را تا ۱۵٪ کاهش می‌دهد. محققان در بررسی‌های خود، فرمول‌هایی را برای پیش‌بینی گرداب در آبیگرها ارائه داده‌اند، اما استفاده از این فرمول‌ها به تنهایی برای طراحی آبیگر کافی نمی‌باشد. در بسیاری از موارد، کاربرد روابط مختلف نتایج متناقضی را به وجود می‌آورد، به همین دلیل بدون استفاده از مدل هیدرولیکی با مقیاس مناسب امکان بررسی دقیق گرداب وجود ندارد.



در مطالعات مدل، مساله تشکیل پدیده گردابی بررسی گردیده و در صورت تشکیل گردابه، راه‌حل‌های لازم برای تضعیف و یا از بین بردن گردابه پیشنهاد می‌گردد. روش‌های علمی برای از بین بردن گرداب وجود دارد، اما تعیین ابعاد و آرایش این گونه روش‌ها، که اغلب از وسایل اضافی بهره می‌گیرند، به کمک مدل انجام می‌گیرد. از جمله این وسایل اضافی صفحات مشبک شناور می‌باشند که همراه سطح آب بالا و پایین می‌روند. ابعاد این صفحات مشبک و مقدار بازشدگی آنها توسط مدل تعیین می‌گردد. هر چند تاثیر نیروی ثقل در این گونه سازه‌ها مهم است، اما نباید اثرهای ناشی از لزجت و کشش سطحی در مجاورت محور گرداب که سیال در حال چرخش می‌باشد و همچنین در نواحی که سیال انحنای تندی دارد، نادیده گرفته شود. به طور کلی توصیه شده است که مدل ابتدا با مقیاس سرعت فرود آزمایش شود تا شرایط جریان بررسی گردد. اگر پدیده گردابی مشاهده شد، سرعت ورودی افزایش می‌یابد تا شدت گردابه تعیین گردد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مدل به علت انحراف از مقیاس سرعت فرود باید اصلاح شوند. واضح است که اگر سرعت در مدل و نمونه اصلی یکسان باشد و در مدل گرداب مشاهده شود، ممکن است در نمونه اصلی گردابه پدید نیاید، ولی اگر در مدل، گرداب موجود نباشد، مطمئناً در نمونه اصلی نیز گردابه وجود ندارد [۲۳].

اگر مدل خیلی کوچک باشد ممکن است شرایط جریان در مدل و نمونه اصلی یکسان نباشد، به طوری که بر خلاف متلاطم بودن جریان در نمونه اصلی، در مدل شرایط جریان بینابینی یا ورقه‌ای باشد. در این حالت عدد رینولدز نقش موثری در شرایط جریان خواهد داشت. به منظور جلوگیری از تاثیر کشش سطحی، مقدار عدد و بر نباید از یک مقدار حداقل کمتر باشد. برای جلوگیری از تاثیر لزجت لازم است رابطه (۲-۳۴) برقرار باشد [۴]:

$$\frac{Q_m}{v h_m} > 3 \times 10^4 \quad (2-34)$$

$$L_r = \left[\frac{Q_p}{3 \times 10^4 v h_p} \right]^{2/3} \quad (2-35)$$

که در این روابط، اندیس m بیانگر مدل و اندیس p بیانگر نمونه اصلی است. برای جلوگیری از تاثیر کشش سطحی باید [۴]:

$$\frac{\rho V_m h_m}{\sigma} > 10^4 \quad (2-36)$$

در روابط فوق ρ (kg/m³) چگالی سیال، V (m/s) سرعت جریان، h (m) عمق جریان، Q (m³/s) و کشش سطحی σ (N/m) در مدل می‌باشد. در این صورت با فرض $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\sigma = 0.075 \text{ N/M}$ ، حداقل مقدار L_r برابر است با:

$$L_r = 1.115 V_p \sqrt{h_p} \quad (2-37)$$

با در نظر گرفتن روابط (۲-۳۶) و (۲-۳۷) در تعیین L_r می‌توان سایر مقیاس‌ها را براساس مقیاس فرود تعیین کرد.

روابط زیر که توسط محققین مختلف ارائه شده وقتی استفاده می‌شوند که مدل فرودی باشد، ولی اثر لزجت هم دیده شود:

$$(Brikchi, 1953): V_r = L_r^{0.36} \quad (2-38)$$

$$(Fraser, 1953): V_r = L_r^0 \rightarrow (V_m = V_p) \quad (2-39)$$

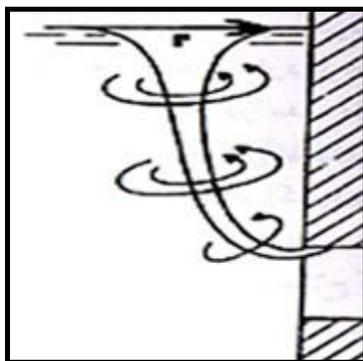
$$(Denny - Young, 1957): V_r = L_r^n \quad (0 \leq n < 0.5) \quad (2-40)$$



نوع دیگری از مدل وجود دارد که کاملاً فرودی بوده و در آن لزجت اثر نداشته باشد. شرط استفاده از این نوع مدل اینست که:

$$\text{Re} > 2.5 \times 10^5, r \leq 50 \text{cm} \quad (41-2)$$

که در این رابطه $\text{Re} = \frac{V_r r}{\nu}$ ، شعاع ابتدایی گردابه و V_r سرعت محیطی در شعاع r می‌باشد شکل (۶-۲)



شکل ۶-۲- شکل کلی گردابه و پارامتر r (شعاع گردابه) [۷]

۲-۳-۶- مدل‌های فیزیکی رودخانه‌ای

۲-۳-۶-۱- مدل‌های عمومی ریخت‌شناسی رودخانه

در طراحی مدل‌های رودخانه‌ای، اولین گام، در دسترس بودن اطلاعات نمونه اصلی است. این اطلاعات شامل مقاطع عرضی بستر رودخانه، منحنی بده - اشل و نیمرخ طولی بستر رودخانه می‌باشد. در رودخانه‌های با حرکت مواد بستر، داشتن منحنی دانه‌بندی مواد رسوبی و مقدار وزن مخصوص آن ضروری است. اگر اطلاعات مربوط به مقدار بار رسوبی متحرک در نمونه اصلی در دسترس نباشد، داشتن بده تقریبی مربوط به شروع حرکت مواد می‌تواند کارساز باشد. با در دست داشتن مقادیر سرعت در نمونه اصلی، مقیاس قائم به نحوی انتخاب می‌شود که سرعت‌های مدل با سرعت به‌دست آمده از آزمایش همخوانی داشته باشد. مقیاس شیب را می‌توان با در دست داشتن مقیاس سرعت و مقیاس افقی، در نهایت با داشتن مقیاس‌های سرعت و شیب به دست می‌آید [۷]. همچنین مقدار زبری مدل به کمک رابطه مانینگ محاسبه می‌شود:

$$S_r = V_r^2 n_r^2 R_r^{\frac{4}{3}} \quad (42-2)$$

به جای این روش می‌توان در جهت عکس اقدام کرد، یعنی مقیاس افقی متناسب با امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی انتخاب شده و سپس مقیاس قائم را محاسبه کرد. با در دست داشتن مقیاس‌های مدل می‌توان نسبت به راه اندازی و آزمایش‌های اولیه اقدام کرد. به علاوه می‌توان با ایجاد یک پدیده مشخص در مدل از روی شرایط نمونه اصلی، آزمایش‌هایی را برای تنظیم مدل انجام داد. این کار البته خسته کننده و وقت گیر خواهد بود. روش کار عموماً به این صورت است که مدل را برای شرایط مشخص از داده‌های موجود آزمایش کرده و سپس قابلیت آن را بررسی می‌کنند. در صورتی که تغییرات به‌دست آمده و شکل گرفته مواد بستر برای شرایط جریان در مدل، مشابه نمونه اصلی باشد، می‌توان گفت مدل تنظیم گردیده است. در این صورت زمان به‌دست آمده از مدل، که حرکت مواد رسوبی تابع آن است، به‌دست می‌آید. با مقایسه با زمان هیدروگراف سیل نمونه اصلی، مقیاس زمان به دست می‌آید. اگر شرایط حاصل شده از مدل با اندازه‌گیری‌های انجام شده در نمونه اصلی مطابقت نداشته باشد، باید مقیاس‌ها و احیاناً شیب مدل

را براساس آزمون و خطا آن قدر تغییر داد تا همخوانی با نمونه اصلی به وجود آید. روش‌های متفاوتی برای تعیین مقیاس مدل وجود دارد که هر کدام براساس معادلات استفاده شده و تعداد مجهولات می‌توانند برای تعیین مقیاس و طراحی مدل به کار روند. به این ترتیب برخی مقیاس‌ها با توجه به محدودیت‌ها و فیزیک مساله به صورت اختیاری انتخاب می‌شود و بقیه مقیاس‌ها براساس معادلات موجود محاسبه می‌شوند. روش‌ها با توجه به طبیعت مساله و نوع معادلات به کار رفته متفاوت می‌باشد. با توجه به کمبود مقیاس‌های در دسترس بین نتایج مدل و نمونه اصلی، نمی‌توان گفت کدام روش بهتر عمل می‌کند. دو دیدگاه مختلف برای مدل‌سازی در زمینه ریخت‌شناسی رودخانه موجود است:

- دیدگاه تجربی

در این دیدگاه از معادلات تجربی برای تعیین مقیاس‌های مدل در رودخانه‌های آبرفتی استفاده می‌شود. روش رژیم که در ادامه توضیح داده شده است، براساس این دیدگاه استوار است.

- روش رژیم

در این دیدگاه تعیین مقیاس رودخانه‌های آبرفتی براساس معادلات رژیم لسی^۱ تعیین می‌شود. براساس این روش که مبتنی بر دیدگاه تجربی است، در حالتی که رودخانه از نظر زمین ریخت‌شناسی در حالت تعادل باشد، به ازای بده مشخصی از رودخانه و در زمان معین، عرض، عمق و شیب بستر در اثر حرکت مواد رسوبی و فرسایش به صورت پایدار درمی‌آید. در این صورت روابط زیر صادق است [۷].

$$L_r = Q_r^{1/2} \quad (۴۳-۲)$$

$$D_r = L_r^3 \quad (۴۴-۲)$$

$$S_r = D_r L_r Q_r^{\frac{1}{6}} \quad (۴۵-۲)$$

- دیدگاه مبتنی بر قوانین حمل رسوب

شاید Einstein Chien (1956) اولین بار روشی را برای طراحی مدل براساس قوانین حمل رسوب ارائه کرد. در این دیدگاه، مدل براساس معیارها و ضوابط حمل رسوب طراحی می‌شود [۲۷].

در تمام روابط مدل‌های رودخانه‌ای D_r مقیاس قائم، L_r مقیاس افقی، Q_r مقیاس بده جریان، S_r مقیاس شیب، n_r مقیاس ضریب مانینگ، d_r مقیاس قطر معرف و ρ_{sf} مقیاس چگالی مواد می‌باشد.

- روش شیلدز^۲

این روش بخشی از دیدگاه مبتنی بر قوانین حمل رسوب قرار می‌گیرد. شیلدز تمام روابط خود را براساس سه معادله بنا گذاشت:

$$\frac{h_r d_r}{L_r^2} = 1 \quad \text{زبری رینولدز زبردانه‌ها} \quad (۴۶-۲)$$



$$\frac{h_r^2}{L_r d_r \Delta\gamma_{sr}} = 1 \quad \text{برابری پارامتر شیلدز} \quad (۴۷-۲)$$

$$\frac{L_r^3 d_r}{h_r^4} = 1 \quad \text{ترکیب مانینگ و استریکلر} \quad (۴۸-۲)$$

که در روابط مذکور h_r نسبت R_r به B و B پارامتری به نام عرض پایدار رودخانه است که از رابطه $B = 4.75\sqrt{Q}$ به دست می‌آید. بدیهی است که هر رودخانه به ازای هر بده یک عرض پایدار دارد. در این روابط ۳ معادله و چهار مجهول $\Delta\rho_{sr}$, h_r , L_r , d_r موجود است که بسته به شرایط و محدودیت‌های موجود می‌توان یکی را محاسبه نمود (برای مثال L_r) و سایر مقیاس‌ها را براساس مقیاس محاسباتی و با استفاده از سه رابطه فوق تعیین کرد. بسته به شرایط مدل‌سازی می‌توان از یک یا دو رابطه از سه رابطه فوق صرف‌نظر کرد. اگر هیچکدام از روابط حذف نشود، می‌توان برای تعیین مقیاس‌های مدل از جدول (۱۰-۲) استفاده نمود. به این ترتیب با توجه به مقیاس انتخابی یکی از ردیف‌های جدول در مدل‌سازی به کار می‌رود. در استفاده از جدول (۱۰-۲)، اولین ستون سمت چپ مقیاسی است که براساس شرایط و محدودیت‌های آزمایشگاهی تعیین می‌گردد و بقیه ستون‌های ردیف مربوط، مقیاس‌های دیگر مورد نیاز در مدل‌سازی است که با حل معادلات (۴۶-۲)، (۴۷-۲) و (۴۸-۲)، به صورت توانی از مقیاس فرضی حاصل شده است. اولین سطر جدول (۱۰-۲)، مجهولات سه معادله (۴۶-۲)، (۴۷-۲) و (۴۸-۲) می‌باشد.

اگر عمق زیاد باشد و نگران ناهمواری کف و سطح نبوده و پارامترهای میدان جریان مد نظر باشند، می‌توان از رابطه (۴۷-۲) صرف‌نظر کرد و از جدول (۱۱-۲) استفاده نمود.

اگر جریان کاملاً آشفته باشد، رینولدز زبری اثر ندارد و می‌توان رابطه (۴۶-۲) را حذف کرد و از جدول (۱۲-۲) برای تعیین ضرایب تشابه استفاده نمود [۲۷].

جدول ۱۰-۲- تعیین ضرایب تشابه

	L_r	h_r	d_r	$\Delta\gamma_{sr}$
L_r	L_r	$L_r^{0/7}$	$L_r^{-0/2}$	$L_r^{0/6}$
h_r	$\frac{10}{h_r^7}$	h_r	$\frac{2}{h_r^7}$	$\frac{6}{h_r^7}$
d_r	$\frac{10}{d_r^2}$	$\frac{7}{d_r^2}$	d_r	$\frac{6}{d_r^2}$
$\Delta\gamma_{sr}$	$\frac{10}{\Delta\gamma_{sr}^6}$	$\frac{7}{\Delta\gamma_{sr}^5}$	$\frac{2}{\Delta\gamma_{sr}^6}$	$\Delta\gamma_{sr}$

از آنجا که پارامتر دوم مخصوص بستر متحرک و تغییرات ریخت‌شناسی است، معمولاً حذف نمی‌شود [۲۷].

نحوه استفاده از جداول (۱۱-۲) و (۱۲-۲) نیز همانند جدول (۱۰-۲) است. با توجه به این که در این حالت ۲ معادله و ۴ مجهول موجود است. می‌توان با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی دو مقیاس را انتخاب و محاسبه نمود و با استفاده از روابط مقدار دو مقیاس مجهول دیگر را تعیین نمود. متغیرهایی که می‌توانند به طور مستقل فرض شوند در اولین ستون سمت چپ قرار دارند [۲۷].



جدول ۲-۱۱- تعیین ضرایب تشابه برای عمق زیاد [۲۷]

	L_r	h_r	d_r	$\Delta\gamma_{sr}$
h_r, L_r	L_r	h_r	$\frac{L_r^{1/2}}{h_r}$	$\frac{h_r^3}{L_r^{3/2}}$
$\Delta\gamma_{sr}, L_r$	L_r	$\frac{1}{h_r^2}, \Delta\gamma_{sr}^{1/3}$	$\Delta\gamma_{sr}^{1/3}$	$\Delta\gamma_{sr}$
$\Delta\gamma_{sr}, h_r$	$\frac{h_r^2}{\Delta\gamma_{sr}^{2/3}}$	h_r	$\Delta\gamma_{sr}^{-1/3}$	$\Delta\gamma_{sr}$

- روش گارد^۱

یکی دیگر از روش‌های تعیین ضرایب تشابه براساس قوانین حمل رسوب، توسط گارد در قالب رابطه زیر ارائه شده است که در آن ϕ به‌عنوان پارامتر مورد نظر می‌باشد [۲۷].

جدول ۲-۱۲- تعیین ضرایب تشابه برای جریان کاملاً متلاطم [۲۷]

	L_r	h_r	d_r	$\Delta\gamma_{sr}$
h_r, L_r	L_r	h_r	$\frac{h_r^4}{L_r^3}$	$\frac{L_r^2}{h_r^2}$
$\Delta\gamma_{sr}, L_r$	L_r	$\Delta\gamma_{sr}^{-1/2}, L_r$	$\frac{L_r}{\Delta\gamma_{sr}^2}$	$\Delta\gamma_{sr}$
$\Delta\gamma_{sr}, L_r$	$\Delta\gamma_{sr}^{1/2}, L_r$	h_r	$\frac{h_r}{\Delta\gamma_{sr}^{3/2}}$	$\Delta\gamma_{sr}$

$$\phi = L_r^{a_1} d_r^{a_2} \beta^{a_3} \tag{۴۹-۲}$$

ضرایب a_1, a_2 و a_3 از جدول (۲-۱۳) به‌دست می‌آید و ضریب β نیز از رابطه (۲-۵۵) تعیین می‌شود.

$$\beta = \frac{R_r}{h_r} = 1 + 2 \frac{h}{W} \frac{L_r}{h_r} \tag{۵۰-۲}$$

که در این رابطه W عرض متوسط و h عمق جریان در کانال اصلی است. مقدار β در حدود ۱/۲ می‌باشد [۲۷]. در این رابطه ابتدا مقادیر d_r و L_r با توجه به شرایط موجود انتخاب می‌شوند. مقداری مناسب برای β حدس زده شده و با استفاده از جدول (۲-۱۳) و رابطه (۲-۵۴) مقدار h_r انتخاب می‌شود. با استفاده از h_r و رابطه (۲-۵۵) مقدار β محاسبه شده و با مقدار اولیه مقایسه می‌گردد. در صورت تفاوت، این کار را ادامه داده تا در اثر سعی و خطا مقدار دقیق β به‌دست آید و به این ترتیب مقیاس مدل محاسبه شود.

- روش کومورا^۲

این روش شبیه روش گارد بوده، اما ضرایب آن متفاوت است که از جدول (۲-۱۴) به‌دست می‌آیند [۲۷].



1- Garde
2- Komura

جدول ۲-۱۳- تعیین ضرایب روش گارد [۲۷]

a_1	a_2	a_3	ϕ
۲/۲۴۴	۰/۲۵۷	-۰/۶	مقیاس بده (Q_r)
۰/۴۱۴	۰/۰۸۷	-۰/۲	مقیاس سرعت (V_r)
۰/۸۳	۰/۱۷	-۰/۴	مقیاس عمق (h_r)
-۰/۲۷۶	۰/۲۷۶	-۱/۲	مقیاس شیب (S_r)
۰/۵۵۲	۰/۵۵۲	۰/۶	مقیاس زمان (t_r)
۲/۴۸	-۰/۹۸	-۱۱/۷	نرخ انتقال رسوب در واحد عرض (q_{tr})

$$\phi = L_r^{a_1} d_r^{a_2} \beta^{a_3} \quad (۵۱-۲)$$

تعریف متغیرها و نحوه استفاده از جدول (۲-۱۴) دقیقاً مشابه جدول (۲-۱۳) است. در جدول (۲-۱۴)، t_{sr} مقیاس زمان فرآیندهای ریخت‌شناسی می‌باشد.

جدول ۲-۱۴- تعیین ضرایب روش کومورا [۲۷]

a_3	a_2	a_1	ϕ
-1	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	S_r
$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	V_r
$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{8}$	$\frac{5}{8}$	t_r
$-\frac{5}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{4}$	q_{tr}
-1	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	h_r
$\frac{3}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	t_{sr}
$-\frac{3}{2}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{17}{8}$	Q_r

۲-۳-۶-۲- مدل‌های بررسی پدیده‌های موضعی در رودخانه

مدل کردن پدیده‌های موضعی در رودخانه احتیاج به دقت بیش‌تری دارد. برای راحتی در اندازه‌گیری و نیز حصول دقت مقادیر به‌دست آمده، لازم است تا مقیاس بزرگ‌تری برای قسمت مورد نظر که در آن پدیده‌ای خاص رخ می‌دهد انتخاب کرد، در حالی که ممکن است مدل رودخانه نیز دو مقیاسه باشد. برای سهولت کار باید بازه‌ای از رودخانه که در پدیده موضعی مورد نظر دخالت دارد تعیین شده و فقط همان قسمت مدل شود. البته باید جریان‌های ورودی و خروجی با دقت خاص تعیین شوند.

نکته مهم دیگر این است که چون هدف از ساختن مدل بررسی پدیده‌ای خاص می‌باشد، باید مدل به نحوی طراحی گردد که نقش آن پدیده پررنگ‌تر شود و سایر مسایل اهمیت کم‌تری پیدا کنند. برای مثال اگر هدف بررسی برداشت شن و ماسه در رودخانه است، نوع جریان نباید طوری باشد که بستر دچار تغییر شکل زیاد شود.

معمولا هدف از ساختن این گونه مدل‌ها بررسی تغییرات حاصل از ایجاد یک پدیده می‌باشد. به همین دلیل بهتر است در کنار مدل اصلی که در آن پدیده موضعی خاص (مثل میانبر، کف‌کنی، رسوب‌گذاری و غیره) لحاظ شده، مدل دیگری بدون اثر آن پدیده ساخته شود. این روش هم به تحلیل نتایج و مقایسه داده‌ها کمک می‌کند و هم واسنجی و صحت‌سنجی مدل را آسان‌تر می‌سازد.

– مدل برداشت شن و ماسه

اگر رودخانه در حالت عادی بدون برداشت شن و ماسه باشد، می‌توان با ساخت یک مدل با بستر متحرک و احتمالا دو مقیاسه میزان شن و ماسه قابل برداشت از آن را تعیین کرد و اگر از رودخانه برداشتی صورت گرفته باشد، میزان خطرات احتمالی و زمان وقوع آنها پیش‌بینی گردد. برای ساختن مدل رودخانه‌ای که احتمال برداشت شن و ماسه از آن وجود دارد، باید نکاتی مد نظر قرار گیرد. با توجه به آن که مطابق توصیه‌های ارائه شده، مناسب است برداشت شن و ماسه از رودخانه‌هایی صورت گیرد که سیلاب دشت‌های غیرفعال داشته باشند، بنابراین عرض مدل فیزیکی از یک مدل رودخانه‌ای ساده بزرگ‌تر خواهد شد. رودخانه‌هایی با طول بزرگ‌تر از لحاظ برداشت مستعدتر هستند، بنابراین مدل این رودخانه‌ها مقیاس طولی بزرگ‌تری خواهند داشت. ابزار لازم برای اندازه‌گیری‌ها در این گونه مدل‌ها باید دقیق‌تر باشد، زیرا حجم مصالح جابجا شده از اهمیت خاص برخوردار است. ضمنا باید در نظر داشت که حتی‌الامکان برداشت مصالح از رودخانه‌هایی صورت گیرد که حرکت رسوبات به صورت بار بستر باشد و نوع جریان طوری نباشد که رییل و دیون شکل گیرد و حتی‌الامکان جریان زیر بحرانی و نسبتا یکنواخت باشد [۱۰].

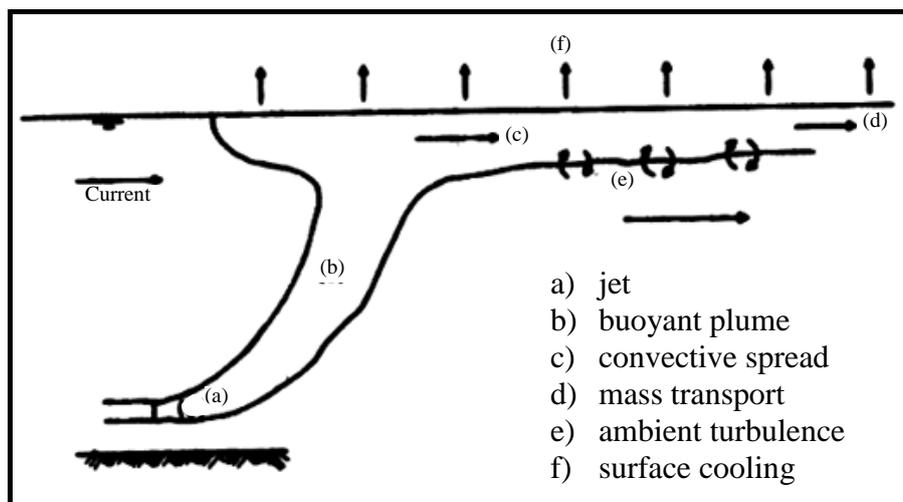
۲-۳-۶-۳-۲- مدل بررسی توزیع غلظت در رودخانه

با توجه به شکل (۲-۸)، مراحل مختلف توزیع غلظت که باید در طراحی یک مدل کامل بررسی توزیع غلظت مورد ملاحظه قرار گیرند، عبارتند از [۷]:

- پخش به صورت جت و در مورد دهانه خروجی مستغرق، صعود ستون شناور
- پخش و جابجایی جریان غلیظ
- حمل مواد به کمک جریان‌های جانبی
- سرد شدن سطحی جریان‌های خروجی گرم شده
- زوال طبیعی پساب‌های خروجی

وقتی یک جت افقی با سیال متفاوت با آب، در عمق تخلیه می‌شود، جت با نیروی شناوری که متناسب با اختلاف در چگالی دو سیال است، به سمت سطح متمایل می‌شود. تنش‌های برشی وارد شده بر اطراف جت، ابتدا در محیط آن و سپس در سرتاسر آن موجب تلاطم و اختلاط می‌گردد. با کاهش تفاوت چگالی، نیروی شناوری کاهش یافته و در نتیجه سرعت بالارونده کم‌تر می‌شود. با دور شدن جریان خروجی از محل تخلیه، مومنتوم افقی اولیه مستهلک شده و جت در سطح سیال پخش می‌شود. شکل (۲-۷) نشانگر این واقعیت است.





شکل ۲-۷- مراحل توزیع غلظت در رودخانه [۷]

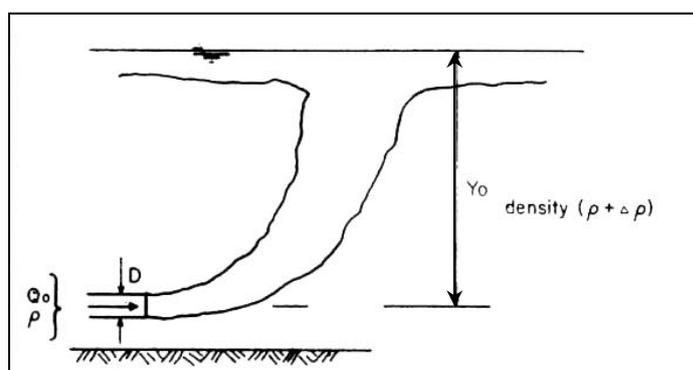
اگر Q_i بده جریان اختلاطی بین جریان خروجی و آب پذیرنده باشد، رابطه (۵۲-۲) صادق است:

$$Q_i = \phi(Q_0, g, \frac{\Delta\rho}{\rho}, D, y_0) \quad (52-2)$$

که در این رابطه:

Q_0 : میزان جریان اولیه در جریان خروجی، $\Delta\rho$: اختلاف چگالی، ρ : چگالی جریان خروجی، D : قطر دهانه خروجی، y_0 : عمق

سازه خروجی نسبت به سطح آب و g شتاب ثقل می‌باشد.



شکل ۲-۸- پخش جت در سطح سیال [۷]

با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۵۳-۲) به دست می‌آید:

$$S_0 = \frac{Q_i}{Q_0} = \phi\left(\frac{Q_0}{g'^{1/5} D^2}, \frac{y_0}{D}\right) \quad (53-2)$$

که در این رابطه: S_0 اختلاط بین سازه خروجی و سطح آب و g' شتاب ثقل کاهش یافته $(g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho})$ می‌باشد. که با استفاده از

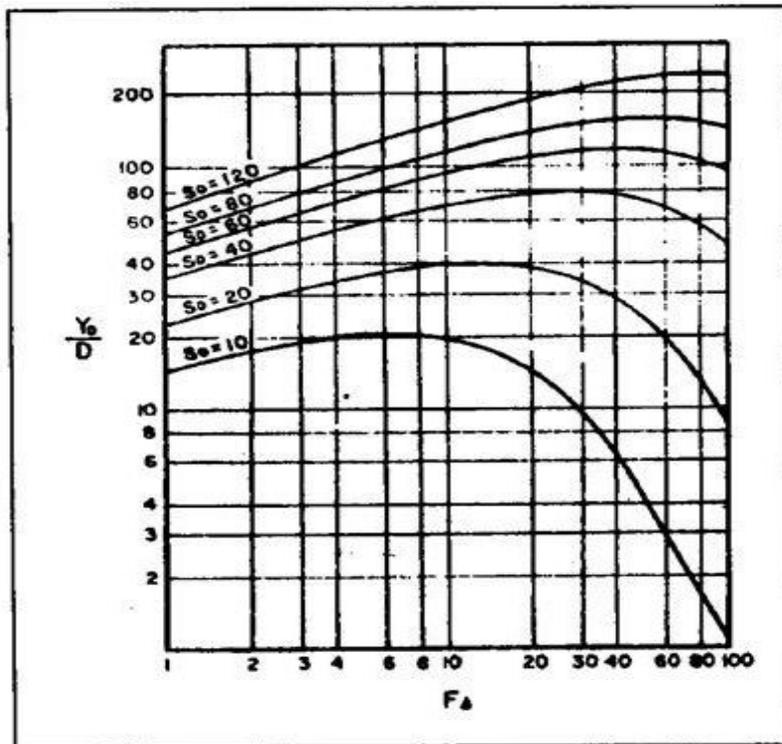
آن رابطه (۵۴-۲) حاصل می‌شود.

$$S_0 = \phi(F_\Delta, \frac{y_0}{p}) \quad (54-2)$$



که در این رابطه، F_{Δ} عدد چگالی سنجی فرود ($F_{\Delta} = \frac{V}{\sqrt{g'D}}$) می‌باشد.

تغییرات پارامترهای بدون بعد $F_{\Delta}, S_0, \frac{y_0}{p}$ در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.



شکل ۹-۲- تغییرات پارامترهای بدون بعد $F_{\Delta}, S_0, \frac{y_0}{p}$ [۷]

بنابراین شرط تشابه آن است که عدد چگالی سنجی فرود در مدل و نمونه اصلی یکسان باشد. علاوه بر این لازم است تشابه هندسی برقرار باشد، همچنین جریان در مدل نیز باید به صورت متلاطم باشد تا شرایط جریان در دهانه خروجی به صورت همسان با نمونه اصلی باشد. این امر مستلزم آن است که عدد رینولدز خروجی بیش از ۲۵۰۰ باشد. از طرف دیگر اگر سیال تحت تاثیر نیروی ثقل باشد که عموماً چنین است، لازم است قانون فرود نیز رعایت شود. یکسان بودن عدد چگالی سنجی فرود بین مدل و نمونه اصلی بدین معنی است که همان اختلاف چگالی که در نمونه اصلی وجود دارد، در مدل نیز رعایت شود [۲۳].

۲-۴- میکرومدل‌ها

میکرومدل عبارت است از یک مدل فیزیکی با مقیاس بسیار کوچک برای تجزیه و تحلیل مسایل مربوط به رسوب [۴]. با استفاده از این تکنولوژی مهندسان می‌توانند مکانیزم یک رودخانه واقعی را در مساحتی به اندازه یک میز معمولی شبیه‌سازی کنند. میکرومدل‌ها^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ به عنوان وسیله‌ای جدید و مکمل در کنار مدل‌ها استفاده شدند.

معمولا میکرومدل‌ها برای مدل‌های رودخانه‌ای استفاده می‌شوند. حسن این روش در کوچک بودن، ارزان بودن و قابل حمل بودن آن می‌باشد. اگر بودجه طرح کم باشد و استفاده‌کنندگان طرح از کلیت مساله و مکانیزم آن آگاهی داشته باشند می‌توان در شناخت کیفی و تصمیم‌گیری در مورد طرح به جای مدل از میکرومدل استفاده کرد.

استفاده از میکرومدل برای تمامی حالات مناسب نیست، چرا که به علت کوچک بودن و رعایت نشدن قوانین تشابه در آنها، اعداد به‌دست آمده، حقیقی نیستند و در صورتی می‌توان از این اعداد استفاده کرد که با مدل‌های بزرگ مقیاس و یا مدل‌های عددی، به درستی کالیبره شوند.

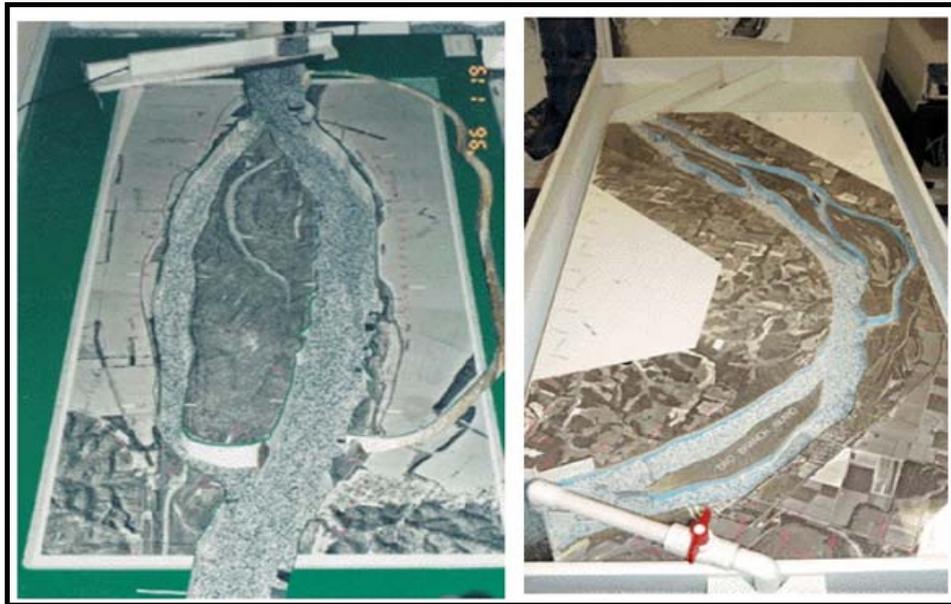
میکرومدل یک مدل بسیار سریع است. در یک مدل با مقیاس کوچک، زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرآیند انتقال رسوب و دریافت پاسخ از آن بسیار کم بوده، به همین خاطر می‌توان با استفاده از یک میکرومدل واسنجی شده در مدت زمان اندکی، تعداد زیادی از انواع گزینه‌های طراحی را در مدل اجرا کرده و بهترین گزینه را انتخاب نمود. میکرومدل یک مدل بسیار ارزان است. مطالعه کامل یک میکرومدل شامل نقشه‌برداری‌ها، ساخت مدل، بهره‌برداری و غیره، هزینه‌ای به مراتب کم‌تر از مطالعه مدل‌های با مقیاس بزرگ دارد [۴]. قابل حمل بودن میکرومدل یکی از بزرگ‌ترین امتیازات آن است. اشراف کامل بر یک میز کوچک و قابل حمل که در واقع نشانگر مدل یک مساحت چندصدکیلومتر مربعی است، اوج هنر این شاخه نسبتا جدید است. شکل (۲-۱۰) دو نمونه میکرومدل آماده آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۴-۱- مقیاس میکرومدل‌ها

معمولا میکرومدل‌ها با توجه به شرایط خاصی که دارند تک مقیاسه ساخته نمی‌شوند، چرا که اگر قرار باشد میکرومدل‌ها تک مقیاسه باشند، دیگر در فضای کوچکی به اندازه یک میز کار قابل اجرا نمی‌باشند. به همین دلیل میکرومدل‌ها معمولا تحریف شده ساخته می‌شوند و تمامی نکاتی که در مورد مدل‌های فیزیکی بیان شد در مورد آنها نیز صدق می‌کند. البته مقدار پارامتر e (نسبت

مقیاس قائم به مقیاس افقی) در میکرومدل‌ها بین ۵ تا ۱۳ می‌باشد. معمولا مقیاس افقی در آنها $\frac{1}{15000}$ تا $\frac{1}{600}$ و مقیاس قائم $\frac{1}{1200}$ تا $\frac{1}{100}$ است [۴].





شکل ۲-۱۰- دو نمونه از میکرومدل‌های آماده آزمایش

۲-۴-۲- واسنجی میکرومدل‌ها

مطالب ذکر شده در مورد واسنجی مدل‌های فیزیکی با مقیاس بزرگ در مورد میکرومدل‌ها نیز صدق می‌کند. البته چون هدف از ساخت میکرومدل مشاهده روند کلی است، اعداد و مقادیر به دست آمده از میکرومدل قابل اطمینان نیست. به همین جهت واسنجی و صحت‌سنجی دقیق در این نوع مدل‌ها ضروری نیست.

۲-۴-۳- طراحی میکرومدل‌ها

شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در میکرومدل از همان اصول مورد استفاده در شبیه‌سازی مدل‌های با مقیاس بزرگ پیروی می‌کند. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد مقیاس‌های معمولی که برای میکرومدل‌ها به کار می‌روند عبارتند از: ۱:۱۵۰۰۰ تا ۱:۶۰۰ برای مقیاس افقی و ۱:۱۲۰۰ تا ۱:۱۰۰ برای مقیاس عمودی. محدوده کج بودن در میکرومدل بین ۵ تا ۱۳ می‌باشد. کج بودن در اغلب مدل‌های فیزیکی برای حرکت رسوبات الزامی است. این مقیاس‌ها معمولاً براساس رودخانه خاص تحت مطالعه انتخاب می‌شوند، به طوری که میکرومدل بین مرزهای فلوم روی میز قرار گیرد.

کنترل خودکار میکرومدل همراه با روش‌های اندازه‌گیری بسیار دقیق، در واقع کلیدهای این تکنولوژی هستند. میکرومدل‌ها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که رفتاری مشابه با رودخانه واقعی داشته باشند. فرآیندهای هیدرولیکی رودخانه با به‌کارگیری ابزاری چون شیرهای کنترل، پمپ‌های سانتریفوژ و نرم‌افزارهای پیشرفته کامپیوتری شبیه‌سازی می‌شود. این ابزارها به مهندس اجازه می‌دهد تا جریان آب و رسوب را در سرتاسر مدل به صورت خودکار کنترل کند. با استفاده از این نرم‌افزار کامپیوتری، استفاده‌کنندگان میکرومدل‌ها قادر خواهند بود تا میزان بده و بار رسوبی معادل با آن‌را در هر زمان به وسیله یک کلیک ساده بر روی موس در مدل کنترل نمایند.

از آن‌جا که تغییرات جزئی در سطح آب مدل می‌تواند بیانگر تغییرات زیادی در رودخانه باشد؛ به همین خاطر برای اندازه‌گیری سطح آب در مدل از وسایل بسیار حساس استفاده می‌شود. به عنوان مثال بسته به مقیاس مدل، یک میلی‌متر تغییر در تراز سطح آب

مدل ممکن است معادل تغییری ۱۰ متری در رودخانه واقعی باشد. این وسایل اندازه‌گیری کوچک که تقریباً اندکی ضخیم‌تر از یک تکه کاغذ معمولی هستند، علاوه بر حساس بودن، مانع حرکت آب و رسوب در مدل نمی‌شوند.

۲-۴-۴- وسایل اندازه‌گیری در میکرومدل‌ها

تمام وسایل ذکر شده در مورد مدل‌های فیزیکی با مقیاس به مراتب کوچک‌تر و ظریف‌تر در میکرومدل‌ها کاربرد دارند. همچنین در میکرومدل‌ها از پمپ‌های بسیار کوچک با حساسیت بالا استفاده می‌شود.

انواع حسگر و ریزتراشه‌ها در میکرومدل‌ها کاربرد دارند که این به خاطر دقت بالای مورد نیاز در میکرومدل‌ها (به علت کوچک بودن نسبت به مدل‌های بزرگ‌تر) می‌باشد.

لیزرها و اسکنرهایی که مساحت تمام میز میکرومدل را پوشش می‌دهند و به برداشت توپوگرافی سطح و تغییرات آن می‌پردازند، از وسایلی می‌باشند که در مدل‌های بزرگ‌تر کم‌تر دیده می‌شوند. برای اطلاع از چگونگی توپوگرافی بستر مدل و وضعیت رسوبات در آن، از یک اسکنر سه‌بعدی و یک دیجیتایزر مکانیکی استفاده می‌شود. بعد از هر نوبت آزمایش مدل، مهندس با استفاده از اسکنر و دیجیتایزر، اطلاعات جامعی را از رسوبات پلاستیکی بستر مدل جمع‌آوری می‌کند. این اطلاعات به مختصات واقعی تبدیل شده و به صورت نقشه‌های عمق سنجی (توپوگرافی) ارائه می‌شوند. سپس این نقشه‌ها با نقشه‌های رودخانه واقعی مقایسه می‌شود تا واکنش رودخانه نسبت به طرح مورد نظر مشخص گردد [۴].

۲-۴-۵- نحوه ساخت میکرومدل

معمولاً برای ایجاد توپوگرافی مورد نظر در میکرومدل‌ها از گل رس و روغن بی بو استفاده می‌شود. در این شرایط گل رس باید آن قدر خمیری باشد تا در هنگام اجرا انعطاف‌پذیر باشد، به علاوه باید آن قدر سفت باشد که در اثر وزن خود، هنگام آزمایش تغییر حالت ندهد. در صورت ترک خوردن سطح در هنگام آزمایش می‌توان از دوغاب سیمان برای ترمیم آن استفاده کرد.

مواد و وسایلی که برای احداث یک میکرومدل استفاده می‌شود به اختصار عبارتند از ذرات پلاستیکی با وزن مخصوص کم (سبک) برای مدل کردن رسوبات رودخانه‌ای، آهن گالوانیزه برای شبیه‌سازی ساختمان‌های موجود در مسیر رودخانه مثل سازه‌های تنظیم جریان آب، پلی استرین و اکریلیک برای ایجاد یک کپی سه‌بعدی از مدل و مخلوطی از روغن و رس برای ایجاد مرزهای ثابت و متحرک در مدل.

اولین گام برای ایجاد یک شبیه‌سازی کوچک فیزیکی، ایجاد یک مدل یا کپی سه‌بعدی از رودخانه مورد مطالعه است. این کپی سه‌بعدی از شرایط موجود و براساس تجزیه و تحلیل عکس‌های هوایی و نقشه‌های توپوگرافی، با استفاده از موادی چون پلی‌استرین و اکریلیک ایجاد می‌گردد. این کپی که شرایط موجود و پلان رودخانه را نمایش می‌دهد، درون یک فلوم هیدرولیکی که به اندازه یک میز معمولی است، قرار داده می‌شود. در مرحله بعد رسوبات پلاستیکی به مدل اضافه شده و هرگونه ساختمان‌های اضافی با استفاده از یک دیجیتایزر سه‌بعدی به دقت در مکان خاص خودش قرار می‌گیرد.

فلوم هیدرولیکی مذکور شامل قسمت‌های مهمی از جمله یک جک دورانی برای کنترل شیب، یک مخزن آب همراه با پمپ و یک جداکننده رسوبات و یک شیر کنترل الکترونیکی می‌باشد. این فلوم سبک و قابل حمل می‌باشد و ممکن است در صورت نیاز به مناطق دیگر انتقال داده شود.



omoorepeyman.ir

فصل ۳

مدل سازی ریاضی





omoorepeyman.ir

۳-۱- کلیات

مدل ریاضی مدلی است که براساس روابط حاکم بر یک پدیده به وجود می‌آید. در مدل‌سازی ابتدا باید عناصر و روابطی که برای هدف خاصی در نظر گرفته می‌شود، انتخاب گردد. پس از تعیین اهداف و مقاصد مطالعه و تعریف کران‌های مجموعه، مجموعه واقعی به یک مدل مفهومی تبدیل می‌شود. مدل مورد نظر نباید نه خیلی ساده باشد و نه آن قدر جزییات زیاد را در برگیرد که مدل پیچیده شده و هزینه آن زیاد شود. بنابراین همیشه به جای تقلید دقیق از مجموعه واقعی، باید مدل طوری طراحی شود که پاسخگوی سوالات مورد نظر باشد. مدل باید آن جنبه‌هایی از مجموعه را شامل شود که تنها به اهداف مطالعه مربوط می‌باشد. امروزه به واسطه رشد روزافزون کامپیوتر و افزایش قدرت محاسباتی آنها، مدل‌های ریاضی به عنوان یک ابزار پر قدرت و توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال و انتقال رسوب در پدیده‌هایی با هندسه و معادلات پیچیده در اختیار محققین و مهندسين هستند.

۳-۲- اهداف مدل‌سازی ریاضی در مهندسی رودخانه

به طور کلی اهدافی که برای مدل‌سازی ریاضی در رودخانه‌ها می‌توان متصور شد، عبارتند از:

- درک بیش تر مساله
- توسعه گزینه‌های مختلف
- ارزیابی گزینه‌های مطرح شده

در ادامه زمینه‌های مطرح در مهندسی رودخانه برای بررسی توسط مدل‌های ریاضی ارائه می‌شود.

۳-۲-۱- بررسی پدیده‌های عمومی

یکی از اهداف مدل‌سازی ریاضی، بررسی پدیده‌های عمومی در رودخانه‌ها می‌باشد. برای تعیین الگوی کلی جریان یا انتقال رسوب در یک بازه طولانی از یک رودخانه یا بررسی ریخت‌شناسی رودخانه می‌توان از مدل‌های ریاضی که برای این منظور توسعه پیدا کرده‌اند، استفاده نمود. معمولاً در بررسی پدیده‌های عمومی، استفاده از مدل‌های یک بعدی انتخابی بهینه می‌باشد. با استفاده از مدل‌های یک بعدی می‌توان شرایط مختلف در بازه‌های طولانی رودخانه را در شرایط دراز مدت با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمود یا تاثیر سازه‌های گوناگون بر روی ساماندهی رودخانه در سیلاب‌های مختلف را مدل‌سازی نمود.

۳-۲-۲- بررسی پدیده‌های موضعی

پدیده‌های موضعی مختلفی در مهندسی رودخانه وجود دارد که با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان آنها را با دقت مناسب و مطلوبی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. برخی از این پدیده‌ها به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی در مسیر جریان به وقوع می‌پیوندند. وجود سازه‌های هیدرولیکی مختلف مانند پایه‌های پل، آبشکن‌ها، آبگیرها و غیره باعث تغییر هیدرودینامیک جریان شده که نهایتاً سبب تغییرات تراز بستر رودخانه به علت آبستتگی و رسوب‌گذاری در اطراف این سازه‌ها می‌گردد. برای تحلیل این پدیده‌ها استفاده از مدل‌های با دقت کافی و با امکان بررسی جزییات بیش تر نظیر مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ضروری می‌باشد. برخی از اهداف مطالعه این پدیده‌ها عبارتند از:

- درک و شناخت مناسب و دقیق الگوی جریان و مکانیزم‌های موجود در پدیده‌های موضعی

- استفاده از نتایج به دست آمده از مدل‌سازی این پدیده‌ها در طراحی سازه‌های هیدرولیکی
- انتخاب گزینه یا گزینه‌های بهینه و مناسب به لحاظ کم‌ترین خسارات ناشی از این پدیده‌ها

۳-۲-۳- روندیابی سیلاب

اهداف مورد نظر برای مدل‌سازی روندیابی سیلاب عبارتند از:

- تعیین و ارزیابی رفتار حوضه یا یک رودخانه در مقابل یک یا چند رویداد پی‌درپی بارش - رواناب
- تعیین و محاسبه ترازهای سیلاب در نقاط مختلف برای دوره بازگشت‌های متفاوت و برآورد خسارات احتمالی
- اتخاذ روش‌ها و طرح‌های مناسب و اقتصادی برای پروژه‌های مهار سیلاب
- هشدار به ساکنان مناطق در معرض خطر در مواقع سیلابی
- کمک به مدیران برای تصمیم‌گیری در مواقع ضروری

۳-۲-۴- بررسی اثر الگوی جریان رودخانه بر محیط پیرامون در شرایط مختلف جریان

اهدافی که از بررسی الگوی جریان رودخانه بر محیط پیرامون در شرایط مختلف جریان متصور است، عبارتند از:

- برآورد ظرفیت انتقال رودخانه و بررسی سناریوهای مختلف برای افزایش ظرفیت انتقال
- تاثیر تغییرات هندسی بر روی رژیم هیدرولیک و رسوب رودخانه
- بررسی تاثیر روش‌های هدایت و انحراف جریان بر روی الگوی جریان رودخانه و پیرامون آن
- تاثیر کاهش عرض رودخانه بر روی هیدرودینامیک جریان
- تاثیر استفاده از مخازن ذخیره‌ای بالادست و بهینه کردن استفاده از آنها

۳-۲-۵- بررسی الگوی جریان، آبشستگی و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و اطراف سازه‌های هیدرولیکی

یکی از روش‌های مناسب برای تعیین تاثیر سازه‌های هیدرولیکی بر روی جریان رودخانه استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد.

اهداف مدل‌سازی در این مقوله عبارتند از:

- بررسی تاثیر سازه‌های حفاظت بر روی الگوی جریان
- بررسی پایداری سطوح شیب‌دار
- بررسی عملکرد سازه‌های حفاظت دیواره رودخانه
- تاثیر حرکت بارها بر روی رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و کنترل بهینه رسوب‌گذاری در رودخانه‌های قابل کشتیرانی
- درک و شناخت دقیق الگوی جریان و مکانیزم‌های موجود در اطراف سازه‌های هیدرولیکی
- درک و شناخت دقیق مکانیزم‌های انتقال رسوب به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی
- ارزیابی و بررسی تغییرات موضعی تراز بستر رودخانه به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی
- کمک به طراحی شرایط پایداری سازه‌های هیدرولیکی در مقابل آبشستگی

- اصلاح و بهینه‌سازی ابعاد، محل استقرار و مشخصات هیدرولیکی این سازه‌ها با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل در جهت کاهش اثرهای مخرب سازه بر روی جریان و ریخت‌شناسی رودخانه
- بررسی تغییرات بستر در اثر برداشت شن و ماسه
- بررسی شکل‌گیری و تغییرات دلتای رودخانه‌های جزرومدی
- شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در خم رودخانه‌ها

۳-۲-۶- بررسی اثر الگوی جریان رودخانه و سازه‌های هیدرولیکی بر روی ریخت‌شناسی رودخانه

- مدل‌های ریاضی یکی از ابزارهای مناسب برای بررسی تاثیر سازه‌های هیدرولیکی بر روی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد. اهدافی که از این مدل‌سازی مورد نظر می‌باشد عبارتند از:
- شناخت دقیق تاثیر سازه‌های هیدرولیکی بر فرآیندهای ریخت‌شناسی رودخانه
 - شبیه‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه
 - بررسی تاثیر ساخت سازه‌های حفاظت بر روی ریخت‌شناسی رودخانه
 - تاثیر حذف پیچان‌رودها بر روی هیدرولیک و ریخت‌شناسی رودخانه
 - برآورد تغییرات درازمدت بستر و سواحل رودخانه

۳-۲-۷- بررسی مسایل زیست‌محیطی و کیفیت آب در رودخانه

پخش آلودگی‌ها در محیط توسط اندرکنش پارامترهای بسیاری صورت می‌گیرد که عبارتند از انتقال فیزیکی آلودگی درون محیط، مشخصات محیط سطحی و زیر سطحی که انتقال درون آن رخ می‌دهد، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آلودگی درون محیط، شرایط کليماتولوژی یا دیگر شرایط بیرونی. مدل‌های ریاضی می‌توانند برای درک و ارزیابی مناسبی از این اندرکنش‌ها و تدوین خط‌مشی‌های جامع و مناسب برای ارزیابی روش‌های کاهش بار آلودگی، مورد استفاده قرار گیرند. اهداف مدل‌سازی ریاضی در مسایل زیست‌محیطی و کیفیت آب می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- درک فرآیندهای کلیدی «علت و تاثیر» درون یک محیط طبیعی
- درک نقش آلاینده‌ها یا ورودی‌های شیمیایی و مشکلات کیفی آب رودخانه‌ها
- کمک به طراحی گزینه‌های مختلف و بهبود روش‌های پیشگیری از ورود آلاینده‌ها به رودخانه
- انجام برخی ارزیابی‌ها در زمان کوتاه‌تر و با هزینه کم‌تر نسبت به مطالعات میدانی
- ارزیابی تاثیرات سناریوهای کاهش آلاینده‌ها و چاره‌اندیشی برای حل مشکلات کیفیت آب رودخانه‌ها
- تعیین زمان بازیافت برای یک حجم آبی بعد از اعمال یک برنامه کاهش آلاینده
- تعیین زمان پاسخ یک حوضه یا حجم آبی مانند رودخانه یا دریاچه بعد از اعمال یک گزینه مدیریتی
- ارزیابی تاثیرات گزینه‌های مدیریتی مختلف و کاهش گزینه‌ها برای بهبود کیفیت آب توسط مدیران
- کمک به طراحی و توسعه برنامه‌های میدانی و آزمایشگاهی
- اصلاح استانداردهای کیفی آب برای مصارف آشامیدن، صنعتی و کشاورزی

۳-۳- انواع مدل‌های ریاضی

منظور از مدل ریاضی، مدلی است که روابط حاکم بر یک پدیده را با روش‌های تحلیلی یا عددی حل می‌کند که به دلیل پیچیده یا غیرممکن بودن حل تحلیلی برخی معادلات، منظور از مدل‌های ریاضی در این گزارش، مدل‌های عددی است. تقسیم‌بندی مدل‌های ریاضی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب براساس پارامترهای مختلفی صورت می‌گیرد. این تقسیم‌بندی‌ها به صورت زیر می‌باشند:

۳-۳-۱- تقسیم‌بندی براساس ابعاد مکانی

براساس ابعاد مکانی، مدل‌های ریاضی به مدل‌های یک‌بعدی^۱، شبه دو بعدی، دو بعدی، شبه سه بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند. فرآیندهای مطرح در رودخانه‌ها دارای طبیعت سه بعدی می‌باشند که در حالت ایده‌آل باید از مدل‌های سه بعدی برای مدل‌سازی آنها استفاده نمود. اما مدل‌های سه بعدی خیلی زمانبر می‌باشند. درحالی‌که مدل‌های یک‌بعدی و دو بعدی که به وسیله ساده‌سازی‌های مختلف مانند متوسط‌گیری در مقطع، عمق و عرض حاصل می‌شوند، راه حل مناسبی برای فعالیت‌های مهندسی می‌باشند. مدل‌های یک بعدی نیمرخ‌های طولی مشخصات جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب را به صورت متوسط‌گیری شده در مقطع مورد مطالعه قرار می‌دهند. مفهوم مدل‌های شبه دو بعدی، کاربرد و حل معادلات یک‌بعدی با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان (به موازات و همسایگی یکدیگر) در گستره عرضی رودخانه است. در این صورت توزیع عرضی پارامترهای جریان و رسوب را می‌توان ارزیابی کرد. با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان، خصوصیات جریان در چند زیر مقطع عرضی قابل محاسبه است. مدل‌های دو بعدی عمقی^۲ که در عرض متوسط‌گیری می‌شوند، مشخصات متوسط‌گیری شده در عرض جریان و انتقال رسوب را در مقطع طولی مطالعه می‌کند. مدل‌های دو بعدی افقی^۳ که مدل‌های دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق^۴ نیز نامیده می‌شوند، توزیع افقی مشخصات متوسط‌گیری شده در عمق جریان، رسوب و کیفیت آب را مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهند. در یک مدل شبه سه بعدی میدان جریان توسط مدل جریان متوسط‌گیری شده در عمق همراه با یک نیمرخ عمقی سرعت شبیه‌سازی می‌شود.

مدل‌های یک بعدی به طور وسیعی در مطالعات شبیه‌سازی فرآیندهای رسوب‌گذاری طولانی مدت در آبراهه‌ها، رودخانه‌ها و خورها به کار برده می‌شوند. مدل‌های دو بعدی قائم انتقال رسوب، برای پیش‌بینی نرخ انتقال، رسوب‌گذاری و فرسایش در رودخانه‌ها، خورها و مناطق ساحلی به کار برده می‌شوند. کاربردهای مرتبط در رودخانه‌ها شامل رسوب‌گذاری در اطراف خطوط لوله و تله‌های رسوبگیر در کانال‌های آبیاری می‌باشد. این مدل‌ها به طور وسیعی برای برآورد انتقال رسوب معلق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بیش تر شرایط وضعیت‌های آب کم عمق، تغییرات قائم پارامترهای جریان کوچک می‌باشد. در این حالت تعیین توزیع افقی مقادیر متوسط‌گیری قائم کافی می‌باشند. مدل‌های سه بعدی در تجزیه و تحلیل پدیده‌های موضعی کاربرد زیادی دارند و درک مناسبی از تأثیرات کوتاه‌مدت سازه‌های پیشنهادی را در اختیار کاربر قرار می‌دهند، اما برای ارزیابی ریخت‌شناسی بلندمدت دارای محدودیت می‌باشند. دلیل این امر محدودیت قدرت کامپیوترهاست.



- 1- D Models
- 2- Vertical 2-D Models
- 3- Horizontal 2-D Models
- 4- Depth-Averaged 2-D Models

۳-۳-۲- تقسیم‌بندی براساس شرایط جریان

براساس شرایط جریان، مدل‌های ریاضی معمولاً به پایدار، شبه پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی می‌شوند. فرآیندهایی که جریان و تغییرات بستر در آنها در طی زمان کند بوده و یا مطرح نباشند، توسط مدل‌های پایدار تجزیه و تحلیل می‌شوند، اما اگر تغییرات زمانی جریان یا بستر عمده باشد، باید از مدل‌های ناپایدار استفاده نمود. مدل‌های شبه پایدار هیدروگراف‌های ناپایدار را به فواصل زمانی زیادی تقسیم نموده، به طوری که هر قسمت نماینده یک بده پایدار باشد. مدل‌های شبه پایدار معمولاً برای شبیه‌سازی فرآیندهای طولانی مدت رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته این مدل‌ها در حالاتی که ناپایداری شدید باشد، مانند جریان‌های جزرومدی در خورها نمی‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند.

۳-۳-۳- تقسیم‌بندی براساس شرایط بستر و دیواره

در مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب در رودخانه‌ها بسته به نوع مطالعات می‌توان بستر و دیواره رودخانه‌ها را ثابت یا متحرک در نظر گرفت. اگر بررسی خصوصیات جریان مانند مهار سیلاب، پهنه‌بندی سیل‌گیری یا مطالعات آبیگری و تاثیر عمومی سازه‌های هیدرولیکی بر روی جریان مدنظر باشد، از مدل‌های با بستر ثابت استفاده می‌شود. در اکثر مدل‌های با بستر و دیواره متحرک تاثیر جریان بر روی بستر مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات آن شبیه‌سازی می‌شود و تعداد خیلی کمی از این مدل‌ها به بررسی تغییرات دیواره رودخانه (مانند مهاجرت پیچانرودها) می‌پردازند.

۳-۳-۴- تقسیم‌بندی براساس تعداد کلاس‌های اندازه رسوب

براساس تعداد کلاس اندازه‌های رسوب، مدل‌های انتقال رسوب به مدل‌های یکنواخت (تک‌اندازه) یا غیریکنواخت (چند اندازه‌ای) تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های رسوب یکنواخت تمام مخلوط رسوب را با یک کلاس اندازه رسوب بیان می‌کنند، درحالی‌که مدل‌های رسوب غیریکنواخت مخلوط رسوب را به تعدادی کلاس تقسیم کرده و رفتار هر کلاس را مورد مطالعه قرار می‌دهند. شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های غیریکنواخت رسوب واقعی‌تر از مدل‌های یکنواخت رسوب می‌باشد.

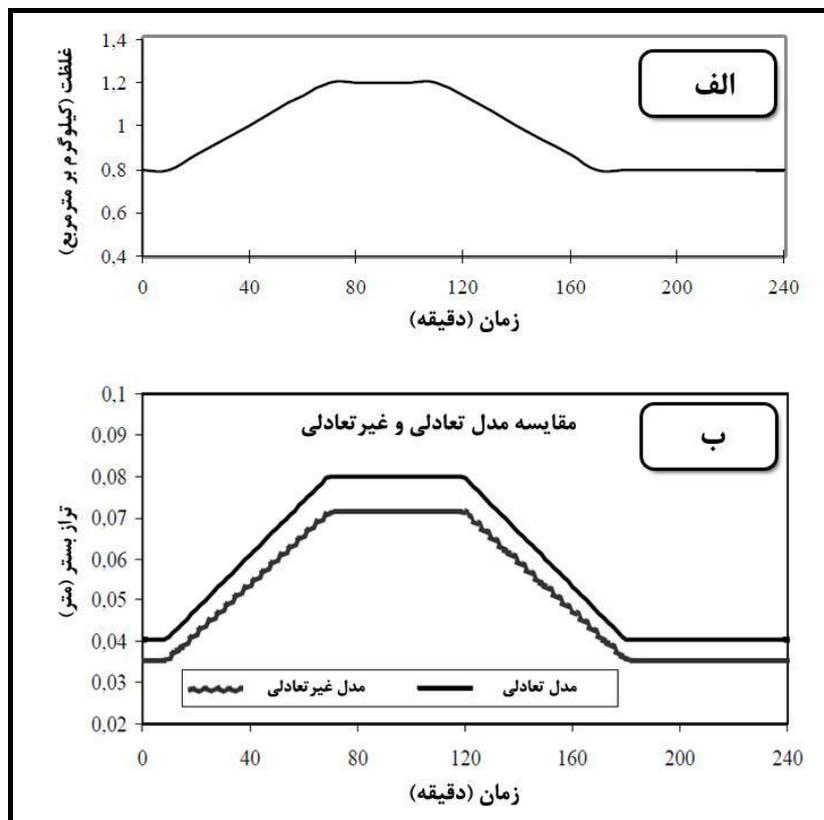
۳-۳-۵- تقسیم‌بندی براساس مدل‌های انتقال رسوب

مدل‌های انتقال رسوب معمولاً به مدل‌های بار بستر، بار معلق و بار کل تقسیم‌بندی می‌شوند. برخی مدل‌های توسعه داده شده فقط بار بستر یا بار معلق را بررسی می‌کنند.

۳-۳-۶- تقسیم‌بندی براساس شرایط انتقال رسوب

براساس شرایط انتقال رسوب، مدل‌های انتقال رسوب به مدل‌های تعادلی یا غیرتعادلی قابل تقسیم‌بندی می‌باشند. در بسیاری از مدل‌ها فرض می‌شود که نرخ واقعی انتقال رسوب در هر گره محاسباتی معادل با ظرفیت حمل رسوب توسط جریان در شرایط تعادلی است. مدل‌هایی که بر مبنای فرض تعادل محلی باشند را مدل‌های انتقال رسوب تعادلی می‌نامند. البته سامانه‌ی رودخانه‌های آبرفتی به دلایل مختلفی همیشه در زمان و مکان در حال تغییر می‌باشند. بنابراین شرایط تعادلی مطلق به ندرت در شرایط طبیعی وجود دارد. در مدل‌های انتقال رسوب غیرتعادلی این فرض معتبر نبوده و معادلات انتقال برای تعیین نرخ انتقال بار بستر و بار معلق واقعی پذیرفته می‌شوند.

به‌عنوان مثال برای جریانی با بده $Q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ در یک کانال فرضی به طول ۲۰ متر و با شیب طولی ۰.۰۰۱ که رسوبی با مشخصات $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ، $d_s = 0.09 \text{ mm}$ و $p = 0.45$ با توزیع نمایش داده شده در شکل (۳-۱-الف) بدان داخل می‌شود در صورتی که ضریب توان انتقال رسوب در آن معادل $\kappa = 0.000075$ باشد نتایج حاصل از دو مدل تعادلی و غیرتعادلی متفاوت خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد مدل تعادلی سریع‌تر به مقدار بیشینه نرخ جریان می‌رسد و از سوی دیگر، مدل غیرتعادلی به‌واسطه افزایش بار معلق و به تبع آن کاهش مقدار بار بستر، مقدار بیشینه کم‌تری نسبت به مدل تعادلی دارد. نتایج حاصل از مدل‌های تعادلی و غیرتعادلی برای مقطعی در فاصله ۵ متری از ابتدای کانال در شکل (۳-۱-ب) با یکدیگر مقایسه شده است، قابل ذکر است مدل‌های قدیمی همچون HEC6 از مدل انتقال رسوب تعادلی بهره می‌برند و این درحالی است که در مدل‌های جدیدتر همچون CCHE2D و GSTAR از روش انتقال رسوب غیرتعادلی نیز استفاده شده است [۳۹].



شکل ۳-۱ - مقایسه مدل تعادلی و غیرتعادلی در یک آزمون فرضی [۳۹]

- تقسیم‌بندی براساس روش‌های عددی

براساس روش‌های عددی، این مدل‌ها به مدل‌های تفاضل محدود^۱، حجم محدود^۲ و المان محدود^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایب مختلفی هستند. انتخاب یک مدل خاص بستگی به طبیعت مساله، تجربیات مدل‌ساز و ظرفیت کامپیوترهای مورد استفاده دارد.

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



۳-۳-۷- تقسیم بندی براساس روش محاسبه

براساس روش محاسبه، مدل های جریان و انتقال رسوب می توانند به کاملاً مجزا^۱، نیمه پیوسته^۲ و کاملاً پیوسته^۳ تقسیم شوند. مدل های کاملاً مجزا از تاثیر انتقال رسوب و تغییرات بستر روی میدان جریان با فرض کم بودن غلظت رسوب و تغییرات بستر، صرف نظر کرده و جریان و انتقال رسوب را به صورت جداگانه در هر گام زمانی محاسبه می کنند. مدل های کاملاً پیوسته تمام مشخصات جریان و رسوب را با هم محاسبه می نماید. مدل های نیمه پیوسته برخی از مشخصات را به صورت پیوسته و برخی دیگر را به صورت مجزا محاسبه می کند. به طور مثال، مدول های جریان و رسوب به صورت مجزا حل شده در حالی که انتقال رسوب، تغییرات بستر و جور شدگی مصالح بستر^۴ در مدول رسوب به صورت پیوسته محاسبه می شوند. به علت وجود اندرکنش بین جریان، رسوب و مصالح بستر در سامانه رودخانه های آبرفتی، مدل های کاملاً پیوسته از لحاظ فیزیکی معقول می باشند، گرچه کاربرد آنها و مدل های نیمه پیوسته محدود می باشد. با این حال، نتایج حاصل از مدل های مجزا به علت اختلاف مقیاس زمانی جریان و انتقال رسوب و استفاده از فرمول های تجربی برای زبری بستر و ظرفیت حمل رسوب، توجیه پذیر می باشد.

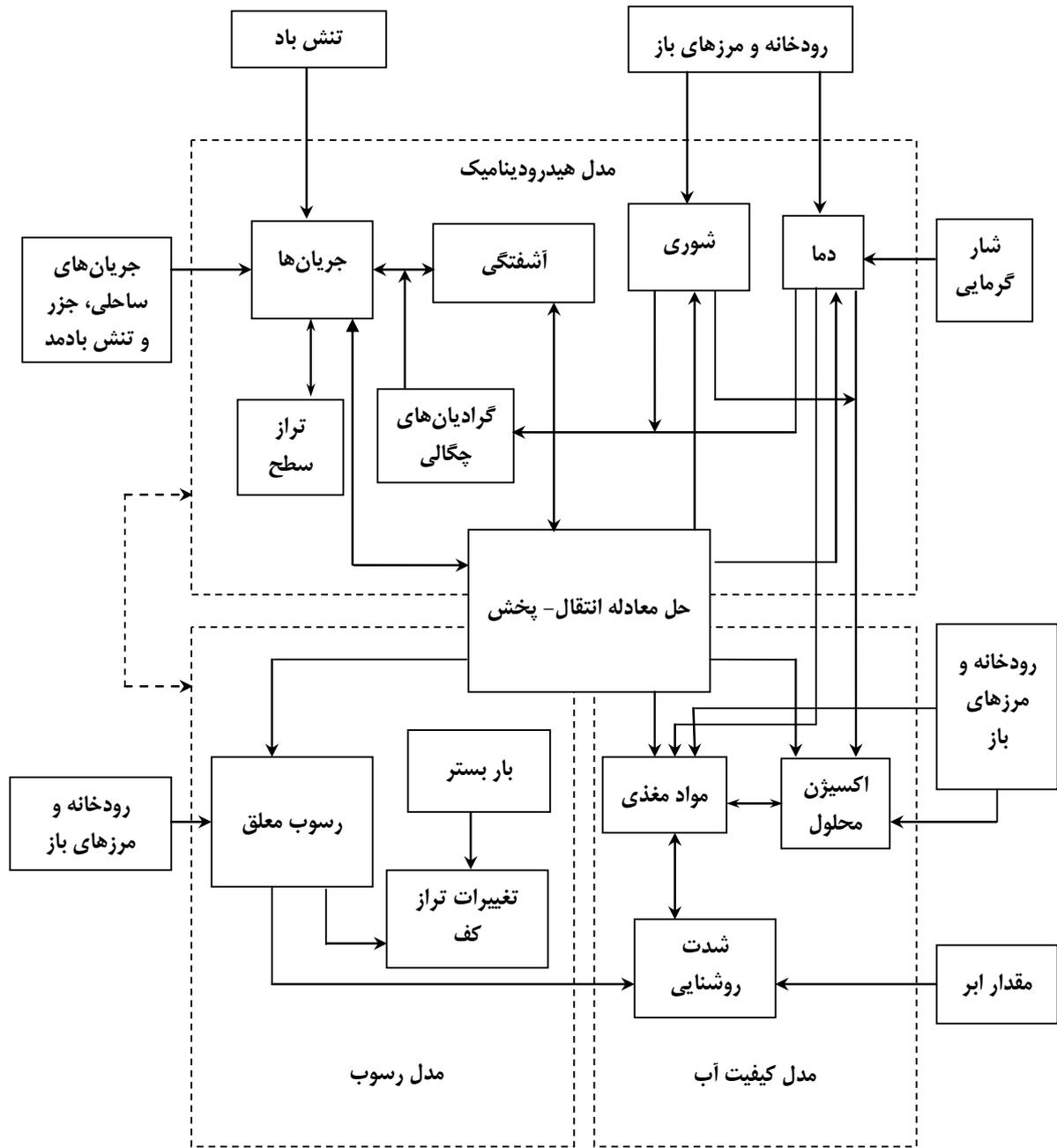
در نمودار (۳-۱) ساختار کلی مدل های ریاضی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب نشان داده شده است.

۳-۴- مبانی مدل سازی ریاضی

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر هر میدان جریان، باید میدان مزبور به مجموعه ای از نقاط یا سلول ها گسسته شود. معادلات مزبور بر روی مجموعه نقاط و یا سلول های حاصل شده، با استفاده از یک سری معادلات جبری تقریب زده شده و در نهایت، با حل دستگاه معادلات جبری به دست آمده، مجموعه ای از مقادیر عددی گسسته که به عنوان یک تقریب از حل معادلات بر روی کل میدان می باشند، حاصل می گردد. بنابراین به طور کلی برای شبیه سازی ریاضی و عددی هر نوع پدیده فیزیکی، باید مراحل به شرح زیر طی گردد:

- شناخت کامل از فیزیک رودخانه
- تعریف هندسه مورد نظر و قلمرو فیزیکی
- انتخاب پدیده های فیزیکی مورد بررسی
- استخراج معادلات حاکم
- تولید شبکه
- تشخیص و تعریف شرایط مرزی
- انتخاب روش عددی مناسب برای انفصال و حل معادلات
- انفصال معادلات حاکم
- حل معادلات منفصل شده
- ارزیابی و صحت سنجی مدل





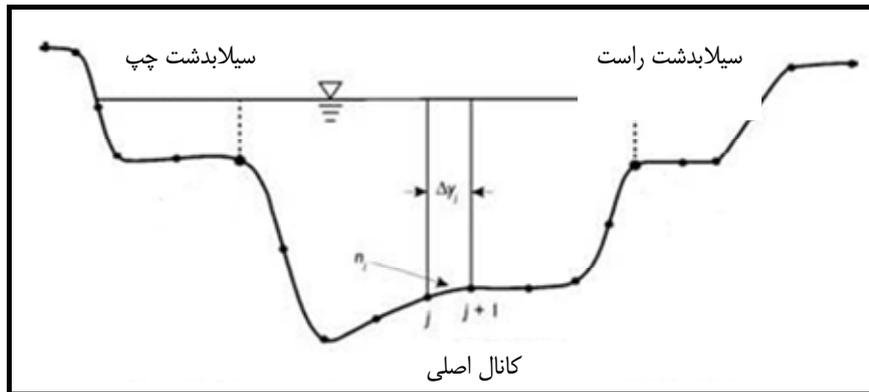
نمودار ۳-۱ - ساختار کلی مدل‌های ریاضی در مهندسی رودخانه

۳-۴-۱- شبکه‌بندی میدان حل

گسسته‌سازی میدان حل باید به نحوی صورت گیرد که منجر به حل کارای معادلات حاکم شود. شبکه‌بندی بر روی میدان باید طوری انجام شود که در انفعال یک معادله بر روی یک گره و یا سلول، تمام گره‌های مجاور آن به راحتی قابل شناسایی باشد. علاوه بر آن، شبکه‌بندی باید حتی‌الامکان منطبق بر مرزهای میدان بوده و تمام میدان در حل معادلات در نظر گرفته شود. بسته به روش حل معادلات حاکم و نیز هندسه میدان مورد نظر، شبکه‌بندی‌های مختلفی به شرح زیر قابل استفاده می‌باشند:

۳-۴-۱-۱- شبکه بندی در مدل های یک بعدی

برای آماده سازی هندسه آبراهه ها در مدل سازی یک بعدی در رودخانه ها، اندازه گیری نیمرخ سطح عمود بر جهت جریان در فواصل مختلف امری مرسوم می باشد. این نیمرخ ها مقاطع عرضی نامیده شده و فاصله بین آنها طول بازه^۱ نامیده می شود. در شکل (۳-۳) مقطع عرضی مرکب همراه با سیلابدشت ارائه شده است.

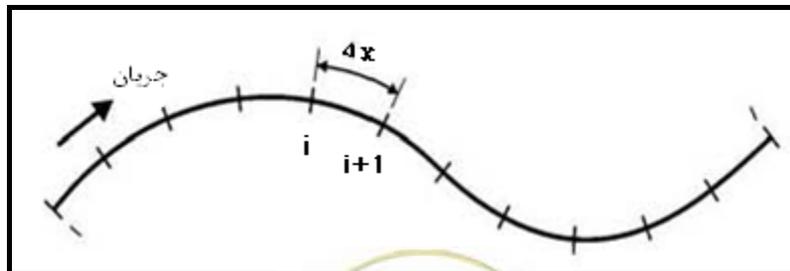


شکل ۳-۳ - نمایشی از مقطع عرضی مرکب با سیلابدشت

مقاطع عرضی در رودخانه های اصلی نسبت به همدیگر معمولاً می توانند دارای ۱۵۰ متر فاصله باشند. البته این یک قانون ثابت نیست و بستگی به نوع مطالعات دارد. برای مثال، در مطالعات کشتیرانی به علت اهمیت شرایط محلی، مقاطع عرضی باید فاصله کمتری نسبت به یکدیگر داشته باشند. مواردی که در آنها مقاطع عرضی مورد نیاز می باشد، عبارتند از:

- در مکان های با تغییرات شیب تند بستر
- در نقاط انبساط^۲ یا جمع شدگی^۳ آبراهه
- در سرشاخه ها و نیز بلافاصله بالادست یک اتصال^۴ و پایین دست آن
- بلافاصله بالا دست و پایین دست مقاطع کنترل مانند سرریزها

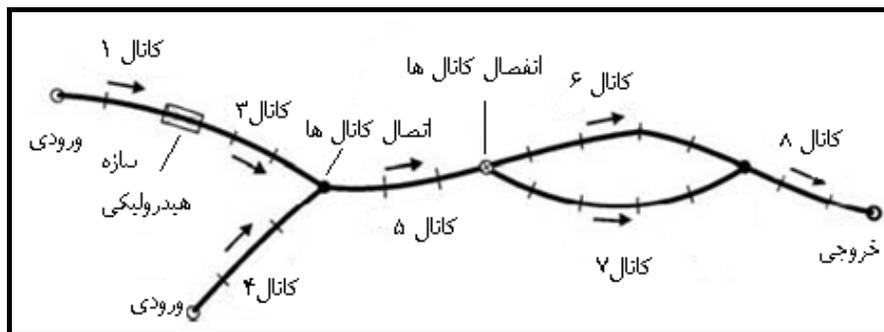
همچنین فاصله بین مقاطع عرضی باید به گونه ای باشند که بین دو مقطع متوالی تغییر ضریب زبری قابل قبول باشد. در شکل های (۳-۳)، (۳-۴) و (۳-۵) شبکه بندی در یک آبراهه یک بعدی، شبکه آبراهه و یک اتصال نشان داده شده است.



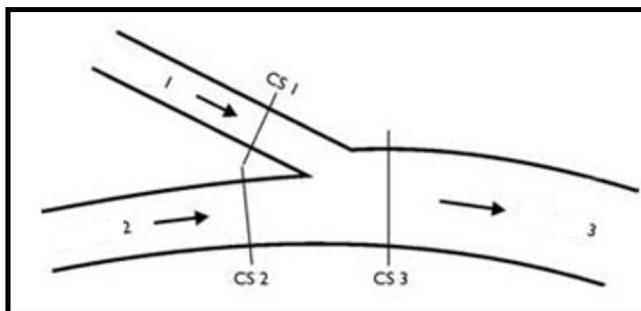
شکل ۳-۳ - شبکه بندی در یک مدل آبراهه یک بعدی

- 1- Reach Length
- 2- Expsion
- 3- Contraction
- 4- Confluence





شکل ۳-۴- نمای شماتیک از یک شبکه آبراهه

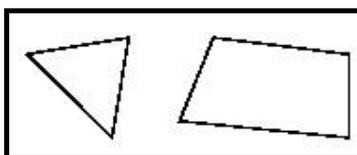


شکل ۳-۵- موقعیت یک اتصال و مقاطع عرضی قبل و بعد از آن

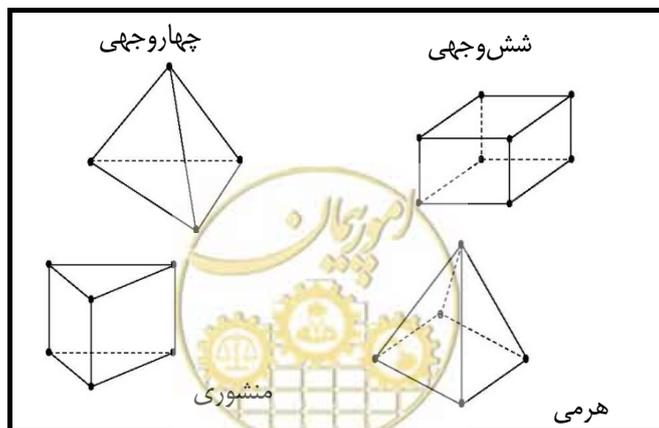
۳-۴-۱-۲- شبکه‌بندی در مدل‌های دو و سه‌بعدی

تقسیم‌بندی براساس شکل سلول

سلول‌های شبکه در حالت دوبعدی معمولاً به صورت مثلثی و یا چهارگوش بوده و در حالت سه‌بعدی به صورت چهاروجهی، شش‌وجهی، هرمی و یا منشوری می‌باشد. انواع این سلول‌ها در شکل‌های (۳-۶) و (۳-۷) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۶- انواع سلول‌ها در حالت دو بعدی (مثلثی و چهارگوش)



شکل ۳-۷- انواع سلولها در حالت سه بعدی

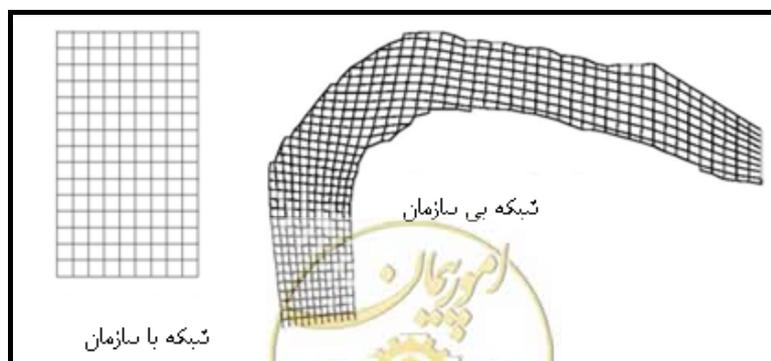
- تقسیم بندی براساس ساختار شبکه

شبکه‌ها می‌توانند با سازمان^۱ و بی سازمان^۲ باشند. در شبکه بندی با سازمان، معمولاً قلمرو محاسبات به شکل مستطیل انتخاب می‌شود و نقاط داخلی شبکه بر روی خطوط شبکه توزیع می‌شوند. بنابراین، نقاط شبکه را می‌توان به راحتی نسبت به خطوط شبکه مشخص کرد. به منظور کاهش هزینه محاسبات و نیز افزایش دقت حل می‌توان از شبکه بندی ریز در نواحی از میدان که تغییرات مشخصه های جریان زیاد است، استفاده کرده و در مقابل در نواحی با گرادیان پایین مشخصه ها، از شبکه بندی درشت تر استفاده کرد. این نوع شبکه بندی به شبکه بندی غیریکنواخت^۳ موسوم است. در شبکه های بی سازمان، شبکه بندی به گونه ای ساخته می‌شود که نقاط شبکه آن را نمی‌توان به خطوطی از شبکه که به صورت منظم تعریف شده اند، مرتبط کرد. برای ساختن شبکه می‌توان از اجزای مختلفی استفاده کرد. در بین انتخاب های موجود، اجزای مثلثی معروف ترند. معمولاً یک شبکه با سازمان در روش های حجم محدود استفاده شده و یک شبکه بی سازمان در روش های المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته این یک قاعده کلی نیست. در شکل (۳-۸) شبکه های با سازمان و بی سازمان مشاهده می‌شود. تقریباً تمامی شبکه هایی که از سلول های مثلثی استفاده می‌کنند نامنظم می‌باشند. همچنین در شکل های (۳-۹)، (۳-۱۰) و (۳-۱۱) به ترتیب یک نمونه از شبکه بی سازمان حول یک پایه پل، شبکه بندی با سازمان غیریکنواخت برای میدان جریان حول یک آبشکن واقع در یک کانال مستقیم و شبکه های سه بعدی با سازمان و بی سازمان نشان داده شده است.

- تقسیم بندی براساس تعامد خطوط شبکه

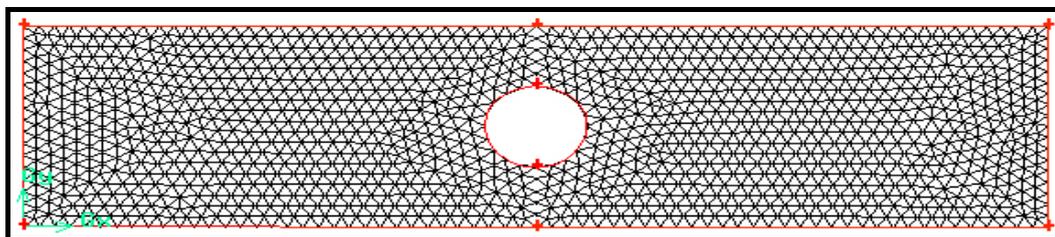
همچنین شبکه‌ها می‌توانند متعامد و یا غیرمتعامد باشند. متعامد بودن شبکه توسط زاویه بین محل تقاطع خطوط شبکه تعریف می‌شود. اگر زاویه ۹۰ درجه باشد شبکه متعامد بوده و در غیر این صورت شبکه غیرمتعامد می‌باشد. در شکل (۳-۱۲) شبکه های متعامد و نامتعامد مشاهده می‌شود.

یکی دیگر از روش های شبکه بندی قلمروهای فیزیکی غیر مستطیلی استفاده از شبکه بندی منحنی الخط می‌باشد. در این روش خطوط شبکه با قلمرو فیزیکی هماهنگ بوده و مرزهای میدان دقیق تر قابل توصیف و تشریح می‌باشد. سامانه مختصات منحنی الخط خود به دو حالت متعامد و غیرمتعامد تقسیم بندی می‌شود. در حالت شبکه بندی منحنی الخط متعامد، خطوط شبکه علاوه بر این که با مرزهای میدان هماهنگ می‌باشند، بر یکدیگر نیز عمود هستند (شکل ۳-۱۳).

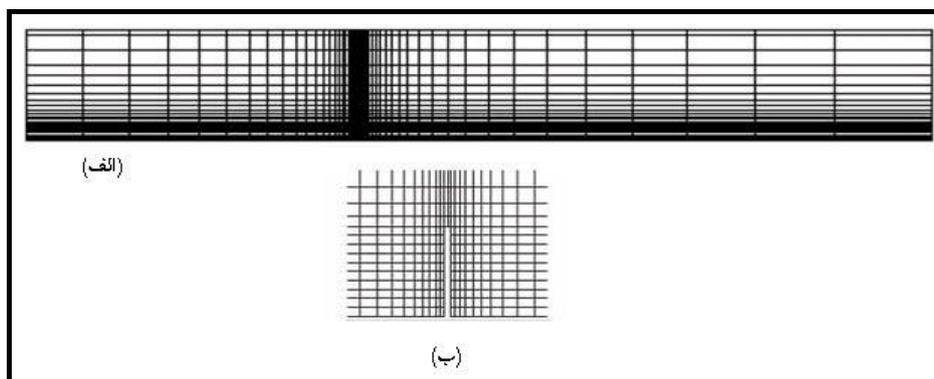


- 1- Structured
- 2- Non-Structured
- 3- Non-Uniform

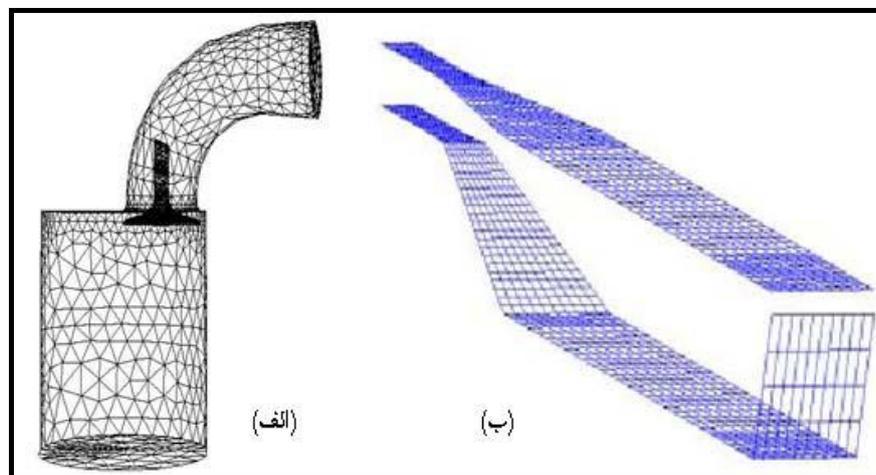
شکل ۳-۸- شبکه‌های با سازمان و بی سازمان



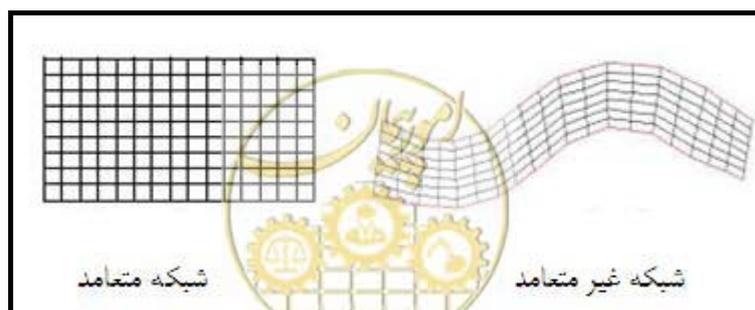
شکل ۳-۹- شبکه بی سازمان در میدان جریان حول پایه پل واقع در کانال مستقیم



شکل ۳-۱۰- شبکه با سازمان در میدان جریان الف- حول یک آبشکن واقع در کانال مستقیم، ب- جزییات اطراف آبشکن

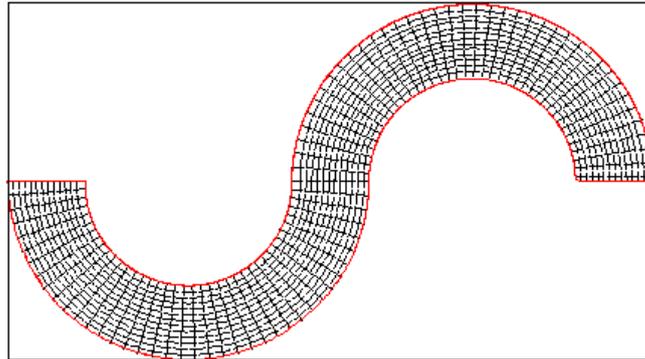


شکل ۳-۱۱- شبکه‌های سه‌بعدی الف- بی سازمان، ب- با سازمان

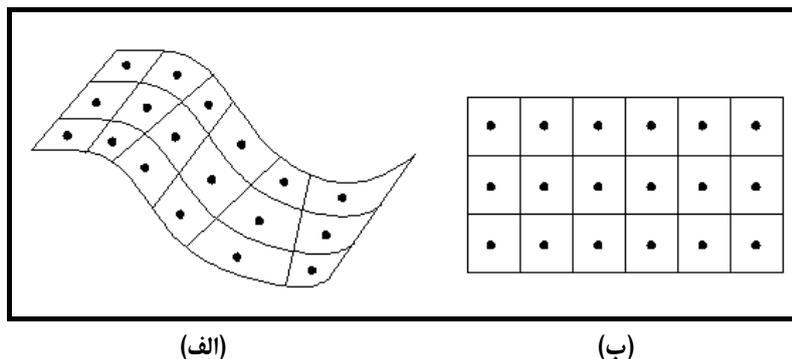


شکل ۳-۱۲- شبکه‌های متعامد و نامتعامد

در این شبکه‌بندی نحوه حل معادلات تفاوت‌چندانی با حالت کارتزین ندارد. در شبکه‌بندی منحنی‌الخط غیرمتعامد خطوط شبکه لزوماً بر هم عمود نیستند و به همین دلیل این مختصات قابلیت انعطاف بیش‌تری نسبت به سامانه متعامد دارد. بنابراین در شبیه‌سازی مسایلی از قبیل میدان جریان و انتقال رسوب روی بسترهای تغییر شکل یافته که در مسایل مهندسی رودخانه کاربرد زیادی دارد، به دلیل وجود هندسه نامنظم، قلمرو فیزیکی غیرمستطیلی و ضرورت توصیف دقیق مرزها، سامانه مختصات منحنی‌الخط غیرمتعامد ترجیح داده می‌شود. در این نوع شبکه‌بندی برای حل میدان جریان، فضای فیزیکی به یک فضای محاسباتی تبدیل می‌شود (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۳- شبکه منحنی‌الخط متعامد برای میدان جریان در یک خم رودخانه



شکل ۳-۱۴- تبدیل قلمرو فیزیکی با شبکه‌بندی منحنی‌الخط غیرمتعامد به قلمرو محاسباتی

همان‌گونه که در شکل (۳-۱۴) نیز مشاهده می‌شود، این عمل در حقیقت با تغییر شکل قلمرو فیزیکی به دست می‌آید و مهم‌ترین مساله پس از آن مشخص کردن نقاط شبکه در دامنه فیزیکی است. به عبارت دیگر باید برای نقطه خاص (i, j) در قلمرو محاسباتی، مختصات آن (x, y) در ناحیه فیزیکی تعیین شود. در روش اول معادلات دیفرانسیل نیز به ناحیه محاسباتی تغییر شکل یافته و سپس انتگرال‌گیری می‌شوند و در روش دوم معادلات به‌طور مستقیم در ناحیه فیزیکی انتگرال‌گیری شده و سپس روابط بین نواحی فیزیکی و محاسباتی وارد آنها می‌گردد.

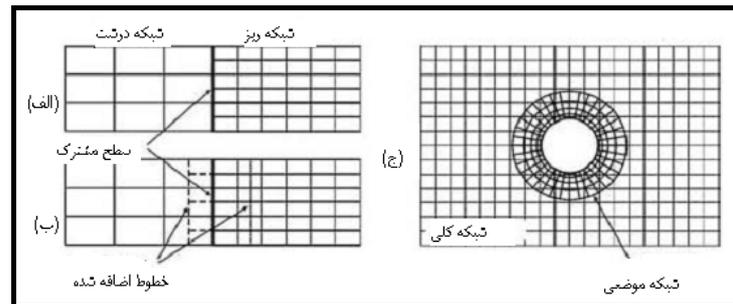
- تقسیم‌بندی براساس بلوک‌ها

با توجه به هندسه میدان، می‌توان از یک یا چند بلوک از شبکه‌ها استفاده نمود. یک شبکه چند بلوکی^۱ از چند شبکه منظم تشکیل می‌شود. در شکل (۳-۱۵) آرایش‌های مختلف اتصال در این نوع شبکه‌ها نشان داده شده است.



تقسیم‌بندی براساس حرکت شبکه

با توجه به امکان تغییر شبکه در طی مراحل حل می‌توان از شبکه‌های ثابت یا وقتی استفاده نمود. یک شبکه وقتی^۱ مطابق با محاسبه میدان جریان یا فیزیک مساله، حرکت می‌کند. این امکان وجود دارد که برای محاسبه وضعیت جدید هندسی شبکه هنگامی که سطح آب یا بستر در خلال یک گام زمانی حرکت می‌کند، شبکه بر طبق آن حرکت نماید. بنابراین محاسبات تغییرات بستر و سطوح آب که تابع زمان است، قابل انجام می‌باشند. یک شبکه وقتی برای مدل‌سازی تغییرات کف در رسوب‌گذاری و آبستتگی موضعی استفاده می‌شود. همچنین این شبکه برای مدل‌سازی تغییرات سطح آب برای محاسبه موج سیلاب قابل استفاده است.



شکل ۳-۱۵- آرایش‌های مختلف اتصال در شبکه چند بلوکی الف- تکه‌ای، ب- تطابق ساده، ج- تطابق پیچیده

۳-۱-۴- کیفیت شبکه‌ها

دقت و همگرایی محاسبات عددی بستگی به کیفیت شبکه دارد. سه پارامتر زیر که از مشخصات یک شبکه می‌باشند دارای اهمیت می‌باشند:

- ۱- نامتعاد بودن^۲
- ۲- نسبت ظاهری^۳
- ۳- نسبت انبساط^۴

نامتعاد بودن تقاطع خطوط شبکه میزان انحراف آن از زاویه ۹۰ درجه می‌باشد. اگر مقدار آن کوچک‌تر از ۴۵ درجه و یا بزرگ‌تر از ۱۳۵ درجه باشد، شبکه خیلی نامتعاد بوده و باید از این حالت دوری جست. کم بودن نامتعادی، باعث همگرایی خیلی سریع شده و در برخی حالات دارای دقت بهتری است.

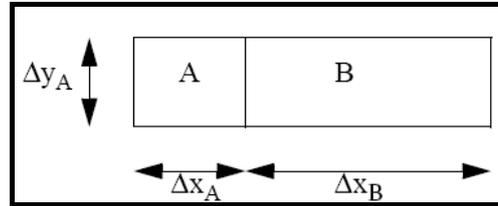
در صورت نیاز به حصول دقت در شبیه‌سازی بخش‌های خاصی از میدان جریان، انتخاب شبکه ریز در کل میدان حل باعث افزایش زمان حل و هزینه‌های محاسباتی خواهد شد. به علاوه اگر شبکه از حدی ریزتر باشد ممکن است خطاهای محاسباتی افزایش یابد. در مکان‌هایی که تغییرات گردایان شدید است لازم است از شبکه ریزتر استفاده شود. بنابراین استفاده از شبکه‌های غیریکنواخت مطرح می‌شود. در صورت استفاده از این شبکه‌ها نسبت‌های ظاهری باید تابع محدودیت‌های خاص باشند.

نسبت‌های انبساطی و ظاهری شبکه به ترتیب به صورت $\Delta x_A / \Delta x_B$ و $\Delta x_A / \Delta y_A$ تعریف می‌شوند شکل (۳-۱۶). این نسبت‌ها برای جلوگیری از مسایل همگرایی و بی‌دقتی نباید خیلی بزرگ باشند. اگر جهت جریان موازی با طولانی‌ترین وجه سلول باشد نسبت ظاهری در حدود ۲ تا ۳، مقدار معقولی می‌باشد.



- 1- Adaptive
- 2- Non-Orthogonality
- 3- Aspect Ratio
- 4- Expansion Ratio

تجربه نشان داده است که برای محاسبات جریان آب، نسبت‌های ظاهری ۱۰-۵۰ باعث همگرایی خیلی کند مدل می‌شود. بهتر است که میزان افزایش یا کاهش ابعاد سلول‌های مجاور از ۱/۲ برابر، بیش‌تر نشود. در این زمینه نیز تجربه نشان داده است که برای محاسبات جریان آب، نسبت‌های انبساطی در حدود ۱۰، نتایج به شدت غیرفیزیکی را ایجاد می‌کند [۲۸].



شکل ۳-۱۶- تعریف ابعاد دو سلول مجاور

۳-۴-۲- انتخاب گام زمانی

انتخاب Δt نیز بسته به روش منفصل‌سازی شبکه، دقت مورد نیاز، نوع مساله و شرایط جریان و سرعت انتقال اطلاعات بین نقاط گرهی مجاور دارد. برای مثال اگر از روش ضمنی (حل هم‌زمان دستگاه معادلات) برای حل معادلات حاکم استفاده شود، محدودیتی در انتخاب Δt در مورد پایداری مسایل پخش خالص وجود ندارد. در حالی که در مورد روش صریح (حل جداگانه هر گره یا سلول)، گسسته‌سازی این معادلات (پخش) محدودیت‌هایی در انتخاب گام زمانی ایجاد می‌کند. در مسایل جابجایی نفوذ نیز با توجه به الگوی انفصال (تفاضل مرکزی (توزیع خطی)، upwind (مقدار بالادست)، Quick (توزیع درجه دوم)) محدودیت‌هایی در انتخاب گام زمانی وجود دارد.

۳-۴-۳- معادلات حاکم بر میدان جریان

۳-۴-۳-۱- معادلات سه‌بعدی جریان

معادلات پیوستگی و ناویر استوکس بیانگر برقراری قوانین بقای جرم و مومنتم بوده و در حالت سه‌بعدی و در دستگاه مختصات کارتزین برای جریان لایه‌ای به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۹]:

- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1-3)$$

- معادله مومنتوم

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \mu \nabla^2 u_i \quad (2-3)$$

که در این معادله:

u_i : مولفه سرعت در جهت x_i ، P : فشار متوسط کل، ρ : چگالی سیال و g_i شتاب ثقل در جهت x_i و تانسور تنش بوده که

در $\mu \nabla^2 u$ حالت کلی به صورت معادله (۳-۳) بیان می‌شود:

$$\mu \nabla^2 u = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3-3)$$



در رابطه فوق μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. معادلات (۱-۳) و (۲-۳) دارای چهار مجهول (p, w, v, u) می‌باشند. البته جریان در مجاری طبیعی نظیر رودخانه‌ها حالت متلاطم دارد. ویژگی مشخص جریان متلاطم وجود تغییرات تصادفی مکانی و زمانی در کمیت‌های مختلف آن می‌باشد [۲۹]. با اعمال متوسط‌گیری زمانی در معادلات ناویر استوکس، معادلات رینولدز به شکل زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۴-۳)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \right) - \rho \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (۵-۳)$$

که در این معادله U سرعت متوسط جریان و P فشار متوسط کل می‌باشد. با توجه به این معادله، مجهولات جدید $-\rho \overline{u'v'}$ ، $-\rho \overline{u'w'}$ ، $-\rho \overline{v'w'}$ ، $-\rho \overline{u'^2}$ ، $-\rho \overline{v'^2}$ و $-\rho \overline{w'^2}$ به معادلات حاکم اضافه شده است. سه پارامتر اول به تنش برشی و سه عبارت بعدی به تنش‌های قائم رینولدز معروفند که برای یافتن آنها از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود.

۳-۲-۳-۴ معادلات شبه سه‌بعدی جریان

در معادلات شبه سه‌بعدی میدان جریان توسط جریان متوسط‌گیری شده در عمق همراه با یک نیمرخ عمقی شبیه‌سازی می‌شود. معادلات پیوستگی و مومنتوم جریان متوسط‌گیری شده در عمق در بخش بعدی بیان شده‌اند. در معادلات شبه سه‌بعدی اخیر از نیمرخ‌های سرعت تجربی زیر استفاده شده است [۲۱]:

۱- نیمرخ سرعت لگاریتمی [Rozouskii, 1957, Shimizu et al., 1990]:

$$\frac{u}{U} = 1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{U} \left[1 + \ln \left(\frac{z - z_b}{h} \right) \right] \quad (۶-۳)$$

که در این رابطه:

u : سرعت جریان در عمق z ; U : سرعت متوسط جریان در عمق، u_* : سرعت برشی، z_b : تراز کف، h : عمق آب و κ ثابت فون کارمن می‌باشد.

۵- نیمرخ سرعت لگاریتمی که توسط فرمول چندجمله‌ای پیشنهاد شده توسط Ikeda, Nishimura (1986) تقریب زده شده است:

$$\frac{u}{U} = 1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{U} G(\xi) \quad (۷-۳)$$

که در این معادله $\xi = (z - z_b)/h$ و $G(\xi)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(\xi) = 6.64\xi^3 - 13.9\xi^2 + 10.6\xi - 2.32 \quad (۸-۳)$$

۶- نیمرخ قانون نمایی^۱

$$\frac{u}{u_*} = \frac{U}{u_*} \frac{m+1}{m} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/m} \quad (۹-۳)$$



m پارامتر تطبیقی^۱ بوده و به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$m = \frac{\kappa U}{u_*} = \kappa \sqrt{\frac{8}{f}} = \kappa \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (10-3)$$

که در این رابطه C ضریب شزی و f ضریب اصطکاک داری و ویسباخ می باشد.

۷- نیمرخ سهموی^۲

$$\frac{u}{u_*} = \frac{U}{u_*} + \frac{u_* h}{\varepsilon} \left[\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 - \frac{1}{3} \right] \quad (11-3)$$

$$\varepsilon = \kappa u_* h \left(\frac{z}{h} \right) \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (12-3)$$

در این روابط ε (m^2/s) ضریب لزجت گردابه ای سینماتیک است که با انتگرال گیری از آن روی عمق جریان رابطه (۱۳-۳) به دست می آید:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{h} \int_{z_0}^h \varepsilon dz = \frac{1}{6} \kappa u_* h \quad (13-3)$$

۳-۳-۴-۳ معادلات دو بعدی (متوسط گیری عمقی)

در بسیاری از مسایل سطح آزاد (نظیر جریان در رودخانه های عریض)، تغییرات کمیت های متوسط جریان در جهت قائم (عمق جریان) ناچیز بوده و به همین دلیل می توان با اعمال فرضیات ساده کننده، از معادلات دو بعدی در پلان بهره جست.

این معادلات از انتگرال گیری معادلات (۳-۴) و (۳-۵) در عمق جریان و با اعمال فرض توزیع هیدرواستاتیک فشار حاصل می شوند و به معادلات متوسط گیری عمقی معروف می باشند. با توجه به شکل (۳-۱۷) می توان معادلات مزبور را به صورت زیر بیان نمود [۲۹]:

معادله پیوستگی:

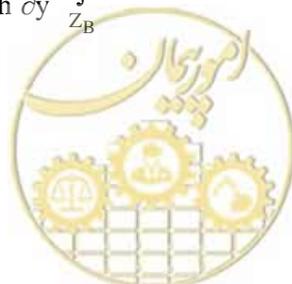
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h\bar{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\bar{V}) = 0 \quad (14-3)$$

معادله حرکت (مومنتم) در جهت X:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -g \frac{\partial}{\partial x}(h + Z_B) + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial (h\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial (h\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \quad (15-3)$$

$$+ \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x} \int_{Z_B}^{Z_B+h} \rho (U - \bar{U})^2 dz + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y} \int_{Z_B}^{Z_B+h} \rho (U - \bar{U})(V - \bar{V}) dz$$

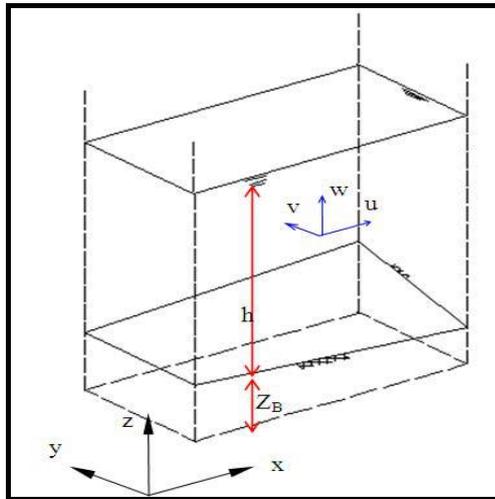
معادله حرکت (مومنتم) در جهت y:



$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = -g \frac{\partial}{\partial y} (h + Z_B) + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial (h \bar{\tau}_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial (h \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \quad (۱۶-۳)$$

$$+ \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x} \int_{Z_B}^{Z_B+h} \rho (U - \bar{U})(V - \bar{V}) dz + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y} \int_{Z_B}^{Z_B+h} \rho (V - \bar{V})^2 dz$$

معادلات یاد شده توزیع افقی متوسط‌گیری شده در عمق مولفه‌های سرعت در جهت x و y را بیان می‌کنند. با استفاده از این معادلات می‌توان نحوه تغییرات عمق (h) را نیز به دست آورد. در این معادلات τ_{sx} و τ_{bx} به ترتیب بیانگر تنش برشی بستر و سطح آب در جهت x می‌باشند. مدل‌های آشفتگی که قبلاً اشاره شد در بیان ترم‌های τ_{ij} در این معادلات دخالت داده می‌شوند.



شکل ۳-۱۷- مشخصات میدان در حالت متوسط‌گیری شده در عمق

۳-۳-۴- معادلات دو بعدی متوسط‌گیری شده در عرض

در شکل (۳-۱۸) وضعیت یک مقطع عرضی نشان داده شده است. مقدار متوسط عرضی یک متغیر سه بعدی ϕ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{b} \int_{b_1}^{b_2} \phi dy \quad (۱۷-۳)$$

که b_1 و b_2 مقدار مختصات y دو دیواره بوده و $b = b_2 - b_1$ عرض جریان در ارتفاع z می‌باشد.

با استفاده از انتگرال‌گیری از معادلات سه بعدی پیوستگی و مومنتوم در عرض معادلات پیوستگی و مومنتوم در جهات x و z به صورت زیر به دست می‌آیند [۲۵]:

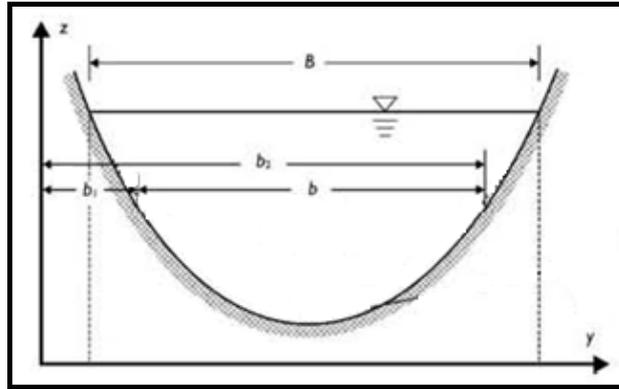
$$\frac{\partial (b \bar{U})}{\partial x} + \frac{\partial (b \bar{W})}{\partial z} = 0 \quad (۱۸-۳)$$

$$\frac{\partial (b \bar{U})}{\partial t} + \frac{\partial (b \bar{U}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (b \bar{U} \bar{W})}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} b \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial [b (\bar{T}_{zx} + \bar{D}_{zx})]}{\partial x} \quad (۱۹-۳)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial [b (\bar{T}_{xz} + \bar{D}_{xz})]}{\partial z} - \frac{1}{\rho} (m_2 \tau_{x1} + m_2 \tau_{x2})$$

$$\frac{\partial(b\bar{W})}{\partial t} + \frac{\partial(b\bar{U}\bar{W})}{\partial x} + \frac{\partial(b\bar{W}^2)}{\partial z} = -bg - \frac{1}{\rho}b\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial[b(\bar{T}_{zx} + \bar{D}_{zx})]}{\partial x} \quad (20-3)$$

$$+ \frac{1}{\rho}\frac{\partial[b(\bar{T}_{zz} + \bar{D}_{zz})]}{\partial z} - \frac{1}{\rho}(m_1\tau_{z1} + m_2\tau_{z2})$$



شکل ۳-۱۸- وضعیت یک مقطع عرضی

که در این روابط:

\bar{T}_{ij} : تنش های متوسط گیری در عرض، \bar{D}_{ij} : انتقال مومنتوم انتشاری ناشی از غیریکنواختی عرضی سرعت جریان، τ_{z1}, τ_{z2} ($1=1,2$): به ترتیب تنش های برشی در جهات x و z روی دو سطح دیواره، \bar{p} فشار متوسط گیری شده عرضی و m_1 ضرایب شیب دیواره می باشد که به صورت زیر تعریف می شود.

$$m_1 = \left[1 + (\partial b_1 / \partial x)^2 + (\partial b_1 / \partial z)^2 \right]^{1/2} \quad (21-3)$$

۳-۴-۵- معادلات شبه دو بعدی

با استفاده از تئوری جریان پتانسیل و ایده لوله های جریان، معادلات شبه دو بعدی توسعه پیدا کرده اند. لوله های جریان لوله هایی فرضی هستند که به وسیله خطوط جریان محدود می شوند. به علت این که بین خطوط جریان بده ثابت می باشد، هر لوله جریان مقدار بده ثابتی در راستای طول حمل می کند. برای جریان های غیرقابل تراکم و ناپایدار، معادله حرکت در راستای یک خط جریان به صورت زیر می باشد:

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h\right) = 0 \quad (22-3)$$

که در این معادله:

t : زمان، V_s : مولفه سرعت در راستای خط جریان، P : فشار، γ : وزن مخصوص آب، V : سرعت، g : شتاب ثقل، S : فاصله در راستای خط جریان و h ارتفاع هیدرولیکی می باشد. معادله حرکت عمود بر خط جریان به صورت زیر می باشد:

$$f_n = \frac{1}{g}\frac{\partial V_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{P}{\gamma} + h\right) = \frac{1}{g}\frac{V^2}{r} \quad (23-3)$$

که در این معادلات:

f_n : نیروی عمودی وارد بر خط جریان، V_n : مولفه سرعت عمود بر خط جریان، n : جهت عمود بر خط جریان و r شعاع انحنای خط جریان می‌باشد.

۳-۴-۶- معادلات یک بعدی جریان

با انتگرال‌گیری از معادلات سه‌بعدی روی سطح مقطع، معادلات یک بعدی حاصل می‌شوند. معادلات پیوستگی و مومنتوم یک بعدی به صورت زیر می‌باشند [۲۵]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(A\hat{U})}{\partial x} = 0 \quad (۲۴-۳)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial(A\hat{U})}{\partial t} + \frac{\partial(\beta A\hat{U}^2)}{\partial x} + gA \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x} + \frac{\tau_0 P}{\rho} = 0 \quad (۲۵-۳)$$

که در این روابط:

A : سطح مقطع عرضی، \hat{U} : سرعت متوسط‌گیری شده در مقطع عرضی، τ_0 : تنش متوسط کف، β : ضریب تصحیح مومنتوم، \bar{z}_s : تراز سطح آب و p محیط خیس شده می‌باشد.

۳-۴-۴- مدل‌های آشفتگی

به‌طور کلی مدل‌های آشفتگی به دو دسته تقسیم می‌شوند. در مدل‌های نوع اول، که برای اولین بار توسط بوزینسک ارائه شده است، ارتباط بین تنش‌های رینولدز و گرادیان سرعت متوسط به‌وسیله لزجت گردابه‌ای (μ_t) به صورت زیر بیان می‌شود [۲۹]:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (۲۶-۳)$$

که در این رابطه δ_{ij} و k (انرژی جنبشی آشفتگی) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (۲۷-۳)$$

$$k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{u_i^2} \quad (۲۸-۳)$$

مدل‌های نوع دوم از ایده بوزینسک استفاده نکرده و به‌طور مستقیم، تنش‌های رینولدز را با حل کامل معادلات انتقال تنش‌های رینولدز تعیین می‌کنند. با توجه به تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای محاسبه تنش‌های رینولدز، مدل‌های آشفتگی به انواع صفرمعادله‌ای، یک‌معادله‌ای، دومعادله‌ای و مدل‌های تنش رینولدز تقسیم‌بندی می‌شوند.



۳-۴-۱- مدل های صفر معادله ای

این مدل ها ساده ترین مدل های آشفتگی می باشند که از ایده بوزینسک در محاسبه تنش های رینولدز استفاده می کنند. در این مدل ها هیچ گونه معادله دیفرانسیلی برای محاسبه کمیت های آشفتگی به معادلات موجود افزوده نمی شود. داده های تجربی و آزمایشگاهی در این مدل ها نقش اساسی دارد.

ساده ترین نوع این مدل ها، فرض یک مقدار ثابت برای لزجت گردابه ای در کل میدان می باشد. به عنوان یک برآورد اولیه، می توان مقدار لزجت گردابه ای را ضریبی از لزجت سیال فرض نمود. با استفاده از این مدل ها می توان الگوی عمومی جریان را به طور تقریبی پیش بینی کرد، ولی امکان پیش بینی جزئیات میدان حل وجود ندارد. به عنوان مثال، این مدل ها در میدان هایی که دارای جریان های چرخشی می باشند، در پیش بینی ابعاد نواحی چرخشی از دقت کافی برخوردار نیستند [۲۹]:

از جمله این مدل ها، دو مدل طول اختلاط و لایه های برشی آزاد می باشند که توسط پرائتل برای جریان های دو بعدی از نوع لایه مرزی ارائه شده اند. در مدل اول، پرائتل لزجت گردابه ای را به صورت زیر بیان نمود [۲۹]:

$$v_t = I_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (29-3)$$

که در این رابطه I_m موسوم به طول اختلاط بوده و به صورت $I_m = c\delta$ بیان می شود. در این رابطه δ عرض جریان می باشد و c یک ضریب ثابت بوده که برای جریان های مختلف، مقادیر متفاوتی دارد [۲۹].

مدل لایه های برشی آزاد پرائتل برای دسته جریان های دوبعدی و در قسمت توسعه یافته لایه برشی ارائه شده است. پرائتل رابطه زیر را برای تعیین لزجت گردابه ای در این نوع از جریان ها ارائه کرده است:

$$v_t = c\delta |U_{\max} - U_{\min}| \quad (30-3)$$

در این رابطه، $|U_{\max} - U_{\min}|$ اختلاف سرعت ها در عرض لایه برشی می باشد. c یک عدد ثابت می باشد که برای جریان های مختلف، توسط مطالعات آزمایشگاهی تعیین شده است [۲۹].

دو مدل اخیر نسبت به مدل اول این برتری را دارند که توزیع مکانی برای تغییرات لزجت گردابه ای در نظر می گیرند. البته نقص عمده این دو مدل این است که فقط در میدان هایی که تعادل منطقه ای بین میزان تولید و استهلاک آشفتگی در آنها صادق باشد، برقرار بوده و پیش بینی میدان هایی که پدیده های انتقال و پخش به صورت جدی در آنها مطرح است، با استفاده از این مدل ها با خطای زیادی همراه است [۲۹].

۳-۴-۲- مدل های یک معادله ای

در این مدل ها از یک معادله دیفرانسیل برای انتقال کمیت آشفتگی (معمولا k) به شرح زیر استفاده می شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (31-3)$$

در این رابطه C_D مقدار ثابتی بوده که براساس مطالعات آزمایشگاهی برابر با 0.1643 تعیین شده است. σ_k برابر $1/0$ می باشد. با تعیین تغییرات k (m^2/s^2)، می توان با استفاده از رابطه (۳۱-۳) توزیع مکانی لزجت گردابه ای را در کل میدان تعیین و با استفاده از آن مقادیر تنش های رینولدز را به دست آورد [۲۹].

$$v_t = c'_\mu I \sqrt{k} \quad (3-33)$$

در رابطه فوق $I_{(m)}$ مقیاس طول آشفتگی و c'_μ یک ثابت تجربی برابر با ۰/۵۴۷ می‌باشد [۲۹]. در استفاده از این گونه مدل‌ها، تعیین توزیع مقیاس طولی مشکل است. لذا در کوشش برای افزایش محدوده توانایی مدل‌های آشفتگی، یک معادله دیفرانسیل دیگر برای تعیین مقیاس طول آشفتگی در نظر گرفته می‌شود [۲۹].

۳-۴-۳-۳ مدل‌های دومعادله‌ای

در این مدل‌ها از معادلات انتقال مستقلی برای مقیاس طول آشفتگی و انرژی جنبشی استفاده می‌شود. با وجود برخی محدودیت‌ها، این مدل‌ها به عنوان پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی مطرح می‌باشند. یکی از پرکاربردترین این مدل‌ها، مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد می‌باشد که معادلات حاکم بر این مدل توسط روابط زیر بیان می‌شوند [۲۹]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3-33)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-34)$$

در این روابط ε اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد و C_{μ} ، $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، σ_k و σ_ε ضرایب تجربی هستند که مقادیر آنها در جدول (۳-۱) نشان داده شده است [۲۹]:

جدول ۳-۱- ضرایب ثابت مدل $k-\varepsilon$ [۲۹]

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

مقادیر مرزی k و ε براساس روابط ارائه شده در بند ۳-۴-۳ تعیین می‌شود. با تعیین مقادیر k و ε می‌توان با استفاده از رابطه زیر لزجت گردابه‌ای را تعیین نموده و با استفاده از رابطه بوزینسک تنش‌های رینولدز را محاسبه نمود:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-35)$$

عیب عمده مدل‌های فوق، فرض لزجت گردابه‌ای ایزوتروپ در سه جهت و فرض تناسب $\overline{u_i u_j}$ با گرادیان سرعت می‌باشد. اعمال این فرضیات باعث عدم کفایت مدل‌های دومعادله‌ای در مواردی نظیر جریان‌های ثانویه می‌شود. بدین منظور، ایده بوزینسک کنار گذاشته شده و از مدل‌های کامل تحت عنوان مدل تنش رینولدز جهت بیان مستقیم تنش‌های آشفتگی استفاده شده است [۲۹].

۳-۴-۴-۳ مدل تنش رینولدز

مدل تنش رینولدز پیچیده‌ترین مدل کلاسیک آشفتگی است. در این مدل برای هر یک از تنش‌های رینولدز یک معادله انتقال در نظر گرفته می‌شود. معادله انتقال تنش رینولدز $\overline{\rho u_i u_j}$ به صورت زیر می‌باشد:



$$\frac{\overline{\partial u_i u_j}}{\partial t} + U_i \frac{\overline{\partial u_i u_j}}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i u_i u_j}) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u_j p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i p}}{\partial x_j} \right) - P_{ij} - G_{ij} + \pi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (3-36)$$

آهنگ	انتقال	انتقال پخشی	تولید	تولید	اتلاف کرنش
تغییر	جابجایی		تنش	شناوری	لزجت فشار

این معادله شش معادله دیفرانسیل جزئی را نشان می‌دهد بدین معنی که برای انتقال هر کدام از تنش‌های رینولدز مستقل یک معادله مورد نیاز می‌باشد. هر کدام از عبارات این معادله به صورت جداگانه مدل‌سازی شده که خواننده به منابع مختلف نظیر Rodi (1993) ارجاع داده می‌شود.

۳-۴-۵- معادلات انتقال رسوب

بررسی حرکت رسوبات در رودخانه‌ها، به منظور نیل به درک صحیح رفتار هیدرولیکی و ریخت‌شناسی رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی معادلات حاکم بر حرکت و انتقال رسوب و همچنین رسوب‌گذاری و فرسایش در بستر رودخانه بسیار پیچیده بوده و این پدیده‌ها غالباً توسط روش‌های نیمه تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

لازم به ذکر است که هیچ‌کدام از معادلات انتقال رسوب به درستی قادر به شبیه‌سازی رسوب‌گذاری و فرسایش در کلیه رودخانه‌ها و یا حتی بازه‌های مختلف یک رودخانه نمی‌باشند و باید برای هر رودخانه‌ای به فراخور خصوصیات هیدرولیکی جریان و رژیم رسوبی آن و با داشتن مجموعه‌ای از داده‌های صحرائی، حتی‌الامکان (با پذیرش خطای نسبی) مناسب‌ترین معادله را انتخاب نمود [۳۰].

براساس شکل انتقال ذرات رسوب در اثر جریان آب، بار رسوبی رودخانه به دو دسته بار بستر و بار معلق تقسیم می‌شود. پارامتری که تعیین‌کننده نوع انتقال ذرات رسوبی می‌باشد، پارامتر تعلیق نام دارد. این پارامتر تاثیر نیروی برشی بستر و مشخصات ذره رسوبی را در پدیده تعلیق رسوب اعمال کرده و به صورت زیر نشان داده می‌شود [۳۰]:

$$S_i = \frac{U_*}{\omega_s} \quad (3-37)$$

که در این رابطه، U_* و ω_s به ترتیب سرعت برشی جریان و سرعت سقوط ذره رسوبی می‌باشند. هر اندازه مقدار پارامتر فوق بزرگ‌تر باشد، احتمال وقوع حالت تعلیق بیش‌تر است. محدوده $0.5 < S_i < 1$ آستانه تعلیق بوده و اگر $S_i > 200$ باشد، تعلیق کاملاً هموزن رخ می‌دهد [۳۰].

مشخصه‌های مهم حرکت آب و انتقال رسوب در رودخانه‌ها عبارت است از تلاطم، تغییرات سطح آب، تغییر تراز بستر و اندرکنش فازهای متفاوت. روابطی که تمامی این موارد را با هم در نظر بگیرند در حال توسعه بوده و اکثر روابط تئوریک انتقال رسوب بر پایه فرضیات زیر ارائه شده‌اند [۳۱]:

- غلظت مواد رسوبی تا حدی کم است که اندرکنش بین جریان آب و حرکت ذرات رسوب را می‌توان نادیده گرفت و معادلات انتقال - پخشیدگی رسوب را می‌توان به‌طور جداگانه حل نمود.



- تغییرات بستر رودخانه بسیار آرام‌تر از حرکت آب می‌باشد، بنابراین در هر گام زمانی می‌توان محاسبات جریان را با فرض بستر ثابت^۱ انجام داد.

- مکانیسم اختلاط ذرات غیریکنواخت مصالح بستر از طریق اعمال ضرایب اصلاحی در روابط ظرفیت انتقال رسوبات یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. از اندرکنش دسته‌های ذرات با قطرهای مختلف ذرات رسوب صرف‌نظر می‌شود، لذا انتقال هر دسته با اندازه مربوط را می‌توان به‌صورت جداگانه در نظر گرفت.

بر مبنای فرضیات یاد شده، معادلات یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی انتقال رسوب توسعه یافته است. در ادامه به بررسی روابط تجربی و تئوریک ارائه شده جهت محاسبه بار معلق، بستر و کل پرداخته می‌شود.

۳-۴-۵-۱- انتقال بار معلق

- معادلات تجربی و نیمه تجربی انتقال بار معلق

نرخ انتقال وزنی بار معلق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۳۰]:

$$q_{sw} = \gamma_s \int_a^D U c dy \quad (3-38)$$

که در این رابطه:

D : عمق جریان، q_{sw} : نرخ وزنی انتقال بار معلق، U, c : به ترتیب متوسط زمانی غلظت حجمی رسوب و سرعت در فاصله y بالای بستر، a : ضخامت لایه مربوط به انتقال بار بستر که در حدود ۲ الی ۳ برابر قطر مصالح بستر در نظر گرفته می‌شود و γ_s وزن مخصوص رسوب می‌باشند.

برای پیدا کردن c از قوانین جابجایی - پخش^۲ استفاده می‌شود که شکل دیفرانسیلی معادلات حاکم در حالت‌های مختلف در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود. با فرض توزیع یکنواخت سرعت رابطه زیر توسط راس^۳ جهت توزیع قائم غلظت ارائه شده است [۳۰]:

$$\frac{C}{C_a} = \left[a \frac{(D-y)}{y(D-a)} \right]^{0.4 U_* \frac{w_s}{U_*}} \quad (3-39)$$

نمونه‌ای از سایر روابط ارائه شده برای محاسبه بار معلق در جدول (۳-۲) ارائه شده است.

که در این رابطه:

$\frac{w_s}{U_*}$: سرعت نسبی سقوط ذرات، C, C_a, \bar{C} : به ترتیب غلظت رسوب در فواصل a و y بالای بستر و غلظت متوسط رسوب

انتگرال‌گیری شده در عمق، U_*' : سرعت برشی اصلاح شده، $\Delta = \frac{d_{65}}{x}$ ، x ضریب تصحیح، I_1, I_2 : ضرایب انتقال (که برحسب

ضخامت نسبی لایه بار مواد بستر بیان میشوند)، λ : تخلخل مصالح بستر و ϕ زاویه استقرار مصالح مستغرق بستر می‌باشد.



- 1- Fixed-Bed
- 2- Convection - Diffusion
- 3- Rouse

- معادلات سه بعدی انتقال رسوب معلق

معادله حاکم بر انتقال غلظت رسوب در ناحیه معلق را با استفاده از معادله جابجایی - پخش به صورت زیر می توان بیان کرد [۳۱]:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j - \omega_{sk} \delta_{j3} c_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial x_j}) \quad (40-3)$$

که در این رابطه:

C_k, W_{sk} : به ترتیب سرعت سقوط و غلظت محلی دسته k ام، k : بیانگر دسته بندی ابعادی ذرات رسوب، δ_{j3} : دلتای کرونکر با $z=3$ که نشانگر جهت قائم می باشد، ϵ_s : ضریب پخش آشفته رسوبات معلق و α ضریب تطبیقی غیرتعادلی انتقال می باشد.

جدول ۳-۲- برخی از معادلات انتقال بار معلق

شماره	محقق/تاریخ	معادله	توضیحات
۴۱-۳	لین و کالینسکی/۱۹۴۷	$P_L = \frac{\bar{C}}{C_a}, q_{sw} = q C_a P_L \exp\left(\frac{15\omega_{sa}}{U_* D}\right)$	ضریب پخشیدگی اندازه حرکت رسوب معادل اندازه حرکت سیال [۳۰]
۴۲-۳	اینشتین/۱۹۵۰	$q_{sw} = 11.6 U_*' C_a a \left\{ \left[2.303 \log \frac{30.2D}{\Delta} \right] I_1 + I_2 \right\}$	در نظر گرفتن زبری ناشی از دانه های رسوب [۳۲]
۴۳-۳	چانگ، سایمونز و ریچاردسون/۱۹۶۵	$q_{sw} = \gamma D C_a \left(VI_1 - \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$ $a = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(1-\lambda)(\gamma_s - \gamma) \tan \phi}$	اصلاح ضریب پخشیدگی اندازه حرکت رسوب [۳۰]

در ناحیه پایینی قسمت بار معلق، نرخ ته نشینی را می توان از رابطه $D_{bk} = \omega_{sk} c_{bk}$ به دست آورد. همچنین نرخ ورود رسوب از بستر به لایه معلق توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$E_{bk} = - \left(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) = \omega_{sk} C_{b^*k} \quad (44-3)$$

در رابطه فوق C_{b^*k} بیانگر غلظت تعادلی در لایه مینا می باشد که با استفاده از روابط تجربی تعیین می شود.

- معادلات دوبعدی افقی^۱ انتقال رسوب معلق

با توجه به معادلات ارائه شده برای جریان در حالت متوسط گیری شده عمقی (انتگرال گیری در عمق از معادله سه بعدی)، معادله انتقال

بار معلق را می توان به صورت زیر نوشت [۳۱]:

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(hVC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y}) + \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (45-3)$$

که در این رابطه:

C_k : غلظت متوسط گیری شده عمقی رسوبات، k : بیانگر کلاس ابعادی ذرات رسوب، C_{*k} : ظرفیت انتقال رسوب معلق، ϵ_s : ضریب پخشیدگی آشفته رسوبات معلق و α ضریب تطبیقی غیرتعادلی انتقال می باشد که در ادامه به روش های مختلف تعیین آن پرداخته خواهد شد.

- معادلات یک بعدی انتقال رسوب معلق

معادله حاکم بر انتقال ذرات غیریکنواخت رسوب در حالت غیرتعادلی به صورت معادله (۳-۴۵) بیان می‌شود [۳۱].

$$\frac{\partial(AC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} + \frac{1}{L_s}(Q_{tk} - Q_{*tk}) = q_{lk}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (۳-۴۶)$$

که در این معادله:

C_{tk} : غلظت رسوب متوسط‌گیری شده در مقطع، Q_{tk} : نرخ واقعی انتقال رسوب، Q_{*tk} : ظرفیت انتقال رسوب و یا نرخ تعادلی، L_s : طول غیرتعادلی تطبیقی^۱ و q_{lk} نرخ ورود یا خروج جانبی رسوب در واحد عرض از کناره‌های رودخانه و یا شاخه‌های جانبی رودخانه می‌باشد. k بیانگر دسته‌بندی ابعادی ذرات رسوب بوده و N تعداد کل دسته‌بندی ابعادی ذرات می‌باشد. این معادله را می‌توان با توجه به نرخ انتقال رسوب و تعریف طول تطبیقی، برای محاسبه بار بستر، معلق و نیز بار شسته استفاده نمود. اگر $L_s = \frac{Uh}{(\alpha \omega_{sk})}$ و $Q_{tk} = QC_{tk}$ و $Q_{*tk} = QC_{*tk}$ باشد، معادله فوق را می‌توان برای محاسبه بار معلق استفاده کرد. در این حالت، U مولفه سرعت متوسط مقطع، h عمق جریان، ω_{sk} سرعت ته نشینی ذرات در دسته K و α ضریب بازگشت^۲ می‌باشد. C_{*tk} بیانگر ظرفیت انتقال بار رسوبی معلق است.

در شبیه‌سازی انتقال رسوب در حالت غیر تعادلی پارامترهای طول تطبیق بار بستر و ضریب تطبیقی غیرتعادلی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر روی نتایج می‌باشند، به طوری که وو، رودی و ونکا (۲۰۰۰)^۳ معتقدند که مقدار این پارامترها بر روی شبکه‌بندی و گام زمانی موثر می‌باشد و مقادیر کم این پارامتر نیاز به شبکه ریزتر و گام زمانی کوچک‌تر دارد. اما به طور کلی این پارامترها بیانگر طول مشخصه رسوب برای تغییر وضعیت از حالت غیر تعادلی به حالت تعادلی می‌باشد.

روش‌های متفاوتی برای تعیین این پارامترها از سوی محققین مختلف ارائه شده است. جدول (۳-۳) نشان دهنده‌ی مهم‌ترین روش‌هایی می‌باشد که برای تعیین این ضرایب وجود دارد.

اگر L_s عدد بسیار بزرگی انتخاب شود، به طوری که ترم سوم (موسوم به ترم تبادلی) برابر صفر شود، معادله مزبور را می‌توان جهت محاسبه بار شسته استفاده نمود.

۳-۴-۵-۲- انتقال بار بستر

- روابط تجربی و نیمه تجربی انتقال بار بستر

روابط تجربی و نیمه تجربی ارائه شده جهت محاسبه بار بستر را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد:

- روابط مبتنی بر روش تنش برشی
- روابط مبتنی بر روش شیب - انرژی
- روابط مبتنی بر روش بده جریان [۳۰]



- 1- Non-Equilibrium Adoption Length
- 2- Recovery Coefficient
- 3- Wu and Rodi and Wenka

در جدول (۳-۳) نمونه‌ای از روابط استخراج شده براساس روش‌های فوق ارائه شده‌اند. در این روابط، d : قطر معرف ذرات بستر، τ : تنش برشی وارد بر کف، τ_c : تنش برشی بحرانی (از طریق منحنی شیلدز قابل محاسبه می‌باشد)، γ و γ_s : به ترتیب وزن مخصوص آب و رسوب (ton/m^3)، R : شعاع هیدرولیکی مقطع (m)، S : شیب انرژی، q_b : نرخ بار بستر و q_c, q : به ترتیب بده آب و بده بحرانی آن در آستانه حرکت در واحد عرض آبراهه می‌باشند.

جدول ۳-۳- روش‌های تعیین ضرایب طول تطبیق بار بستر و فاکتور تطبیق بار معلق [۲۵]

نام روش	طول تطبیق بار بستر	فاکتور تطبیق بار معلق
۱ بل و سادر لند (۱۹۸۳)	تابعی از زمان	تابعی از زمان
۲ وانگ (۱۹۹۹)	۱۰-۲ متر (در آزمایشگاه)	-
۳ ناکاگوا و سوچیموتو (۱۹۸۰)	طول لغزش متوسط ذرات رسوبی	-
۴ فیلیپ و سادر لند (۱۹۸۹)	طول لغزش متوسط ذرات رسوبی	-
۵ راهول (۱۹۸۹)	۱ تا ۲ برابر اندازه شبکه	-
۶ فن راین (۱۹۸۴)	۷/۳ عمق جریان	-
۷ یالین (۱۹۷۲)	۶/۳ عرض کانال	-
۸ وو (۲۰۰۰)	۵-۱۰ برابر عمق جریان	-
آرمانی و دی سیلیویو (۱۹۸۸)	-	$\frac{1}{\alpha} = \frac{a}{h} + (1 - \frac{a}{h}) \exp \left[-1.5 \left(\frac{a}{h} \right)^{-1} \frac{\omega_{sk}}{u_*} \right]$
۹ وی (۱۹۹۹)	-	۰/۰۰۱

که در آن a عمق بار بستر و h عمق آب می‌باشد.

- معادلات تئوری انتقال بار بستر

معادله متوسط‌گیری شده عمقی برای انتقال رسوب بستر توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۳۱]:

$$\frac{\partial(h\bar{C}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx}q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by}q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L_s}(q_{bk} - q_{b^*k}) = 0 \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (۳-۴۷)$$

که در این معادله:

\bar{C}_{bk} : غلظت متوسط بار بستر در منطقه حرکت بار بستر، α_{bx} و α_{by} : مولفه‌های جابجایی بار بستر که معمولاً فرض می‌شود در امتداد تنش‌های برشی متناظر با جهات مزبور باشد، q_{bk} : نرخ انتقال بار بستر دسته k ام، q_{b^*k} : ظرفیت انتقال بار رسوب دسته k ام است و N تعداد دسته‌بندی ذرات از نظر قطر می‌باشد.

در مدل‌های سه‌بعدی، انتقال رسوبات بستر با استفاده از معادله (۳-۵۰) مشابه با مدل‌های دو بعدی محاسبه می‌شود.

- 1- Bell and Sutherland
- 2- Wang
- 3- Nakagawa and Tsujimoto
- 4- Rahuel
- 5- Van Rijn
- 6- Yalin
- 7- Wu
- 8- Armani and di Silvio
- 9- Wei



جدول ۳-۴- برخی از معادلات انتقال بار بستر

شماره	محقق / سال / مدل	معادله	توضیحات
۴۸-۳	دوبوی / ۱۸۷۹ / تنش برشی	$q_b = \frac{0.173}{d^{3/4}} \tau(\tau - \tau_c)$	$1.8 < d(\text{mm}) < 4$ $\text{ft}^3/\text{s}/\text{ft} : q_b$
۴۹-۳	شیلدز / ۱۹۳۶ / تنش برشی	$\frac{q_b \gamma_s}{q \gamma S} = 10 \frac{(\tau - \tau_c)}{(\gamma_s - \gamma) d}$	$1.56 < d(\text{mm}) < 2.47$
۵۰-۳	میبر - پیتر - مولر / ۱۹۴۸ / شیب - انرژی	$S_r = \frac{V^2}{K_r^2 R^{4/3}} \cdot K_r \gamma \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^2 RS = 0.047(\gamma_s - \gamma)d + 0.25 \rho^3 q_b^3 S = \frac{V^2}{K_s^2 R^{4/3}} V$ $\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} = \frac{S_r}{S}, K_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$	γ و γ_s : برحسب (ton/m^3) q_b : برحسب $(\text{ton}/\text{m}/\text{sec})$ d : قطر میانه ذرات (m)
۵۱-۳	شوکیچ / ۱۹۳۴ / بده	$q_b = 7000 \frac{S^{3/2}}{d^{1/2}} (q - q_c)$ $q_c = 0.00001944 \frac{d}{S^{4/3}}$	d : بر حسب میلی متر q_c, q : متر مکعب بر ثانیه q_b : کیلوگرم بر ثانیه در متر

۳-۴-۵- انتقال بار کل

معادلات بار کل مواد بستر برای تعیین ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌های طبیعی استفاده می‌شوند. دو روش عام برای تعیین بار کل وجود دارد: روش اول عبارت است از محاسبه جداگانه بار بستر و بار معلق و سپس جمع نمودن آنها و روش دوم عبارت است از تعیین بار کل به‌طور مستقیم [۳۰].

بگنولد در سال ۱۹۶۶ تابع انتقال رسوب خود را با توجه به مفهوم توان توسعه داد. او رابطه بین میزان انرژی موجود در یک سامانه آبرفتی و میزان کار انجام یافته توسط سامانه برای انتقال دادن رسوب را مورد توجه قرار داد [۳۰]. ایگرز و وایت با فرض این که تنها بخشی از تنش برشی وارد بر بستر آبراهه در به حرکت درآوردن رسوب درشت دانه موثر است، تابع کلی بی بعدی برای محاسبه انتقال رسوب ارائه کردند [۳۳]. در سال ۱۹۷۲ یانگ فرض‌های اساسی مورد استفاده در به‌دست آوردن معادلات متداول انتقال رسوب را مورد تجدید نظر قرار داده و معادله‌ای برای برآورد غلظت کل بار منتقل شده ارائه کرد [۳۰]. لارسن یک رابطه بین شرایط جریان و بده رسوب ارائه نمود. فرمول لارسن توسط کمیته اجرایی ASCE به صورت همگن ابعادی ارائه شده است [۳۰]. روابط فوق در جدول (۳-۵) ارائه شده‌اند.

جدول ۳-۵- برخی از معادلات انتقال بار کل

شماره	محقق / سال	معادله	توضیحات
۵۲-۳	بگنولد / ۱۹۶۶	$q_t = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \tau V \left(\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{v}{\omega} \right)$	برحسب پوند بر ثانیه در فوت
۵۳-۳	ایگرز و وایت / ۱۹۷۳	$F_{gr} = U_*^n \left[gd \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right]^{-0.5} \left[\frac{V}{\sqrt{32 \log(\alpha D/d)}} \right]^{-1-n}, G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$	F_{gr} : عدد قابلیت جابجایی رسوب
۵۴-۳	یانگ / ۱۹۷۲	$\log C_{ts} = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d}{v} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + (1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d}{v} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega}) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{crS}}{\omega} \right)$	
۵۵-۳	لارسن / ۱۹۵۸	$\tau' = \frac{\rho V^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{1/3} \cdot C_t = 0.01 \gamma \sum P_i \left(\frac{d_i}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{cr}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{\omega_i} \right)$	τ' : مقاومت ناشی از مصالح بستر

که در این روابط:

e_b : ضریب بازدهی بار بستر، $\tan \alpha$: نسبت نیروی برشی مماس D به نیروی قائم و p_i درصد مصالح موجود در گروه اندازه I می باشد.

۳-۴-۵-۴- معادله تعادل رسوب

معادله موازنه جرم رسوب که بر روی کل عمق آب انتگرال گیری شده است، به صورت زیر قابل بیان می باشد:

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial q_{Tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Ty}}{\partial y} = 0 \quad (3-56)$$

که در این رابطه:

Z_b : تراز محلی بستر بالای مینا، p : تخلخل مصالح بستر، c : غلظت رسوب متوسط گیری شده در عمق و q_{Ty}, q_{Tx} به ترتیب مولفه های انتقال رسوب بار کل در جهات x و y می باشد.

۳-۴-۶- نحوه در نظرگیری شرایط مرزی در حل میدان جریان و انتقال رسوب

روش حل یک معادله دیفرانسیل پاره ای و اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی به نوع معادله بستگی دارد. انواع مختلف این معادلات و نحوه در نظرگیری شرایط مرزی آنها عبارتند از [۳۴]:

- معادلات بیضوی: در معادلات دیفرانسیل بیضوی پاره ای اغتشاش ایجاد شده و در هر نقطه و در همه سو منتشر می شود. بنابراین در این گونه معادلات تعیین شرایط مرزی در پیرامون میدان ضروری است.
- معادلات سهموی: در این نوع معادلات اثرپذیری فقط از یک جهت می باشد و بنابراین تعیین شرط مرزی فقط در یک طرف میدان ضروری است.
- معادلات هذلولوی: در این نوع معادلات اثرپذیری از جهات خاصی در فضای حل می باشد. روش کلاسیک برای حل معادله دیفرانسیل پاره ای هذلولوی با دو متغیر مستقل، روش مشخصه ها است.

- شرایط مرزی

از جمله شرایط مرزی معمول در معادلات گسسته جریان به روش حجم محدود عبارتند از:
ورودی، خروجی، دیوار، فشار ثابت، تقارن، تناوب (یا شرط مرزی تکراری)

- شرط مرزی ورودی

این شرط مرزی برای تعریف سرعت و تمام متغیرهای اسکالر وابسته در ورودی جریان استفاده می شود. استفاده از این شرط مرزی تنها در جریان های غیر قابل تراکم توصیه می شود و استفاده از آن در جریان های تراکم پذیر ممکن است منجر به نتایج غیر فیزیکی شود. توجه به این نکته ضروری است که شرط مرزی ورودی نباید در فاصله نزدیکی به یک مانع جامد قرار داده شود، زیرا در این صورت ممکن است شرایط ایستایی در جریان ورودی به شدت غیریکنواخت شود. داده های لازم در شرط مرزی سرعت ورودی عبارتند از:

- بزرگی سرعت و جهت آن و یا مولفه های سرعت

- پارامترهای آشفتگی (برای محاسبات آشفتگی)

اگر از مدل $k-\varepsilon$ برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شود، مقادیر مرزی k و ε را می‌توان با روابط (۳-۵۷) و (۳-۵۸) تعیین کرد [۲۵]:

$$k_{in} = 4.78 U_k^2 e^{-2z^t/h} \quad (۳-۵۷)$$

$$\varepsilon_{in} = E_1 \frac{U_k^3}{h} \left(\frac{z'}{h}\right)^{-1/2} e^{-3z'/h} \quad (۳-۵۸)$$

که در این روابط:

U^* : سرعت برشی در ورودی بر حسب متر بر ثانیه، z : مختصات قائم بالای کف بر حسب متر، h : ارتفاع جریان بر حسب متر و E_1 ضریبی وابسته به عدد رینولدز می‌باشد. برای اعداد رینولدز با بزرگی 10^4 تا 10^5 مقدار E_1 تقریباً برابر $9/8$ می‌باشد.

- دما (برای محاسبات انرژی)

با توجه به نوع مساله ممکن است اطلاعات دیگری نیز در ورودی جریان لازم باشد.

- شرط مرزی خروجی

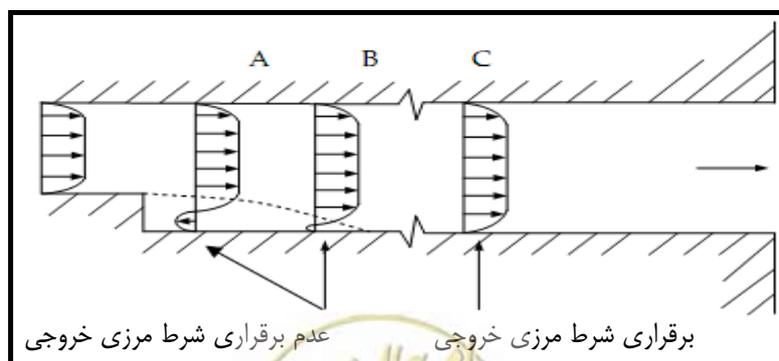
شرط مرزی خروجی به صورت زیر اعمال می‌شود:

- صفر کردن شار پخشی برای تمام متغیرهای جریان (به جز فشار)

- تصحیح شار جرمی به منظور تعادل شار جرمی ورودی با شار جرمی خروجی

از لحاظ فیزیکی فرض صفر بودن شار پخشی برای تمام متغیرهای جریان یعنی جریان کاملاً توسعه یافته است. جریان توسعه یافته جریانی است که در آن نیمرخ سرعت (یا نیمرخ‌های دیگر مربوط به خصوصیات دیگر جریان نظیر دما) بدون تغییر باقی بمانند. لازم به توجه است که در شرط مرزی خروجی ممکن است در مقطع جریان گرادیان‌هایی وجود داشته باشد. تنها گرادیان‌های پخشی عمود بر صفحه خروجی در این شرط مرزی لازم است صفر باشند.

شرط مرزی خروجی باید در فاصله‌ای دور از موانع هندسی انتخاب شود. به صورت شماتیک محل مناسب برای انتخاب شرط مرزی خروجی در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹ - محل مناسب برای در نظر گرفتن شرط مرزی خروجی

- شرط مرزی دیوار

دیوار به طور کلی مرزی است که در مسایل جریان سیال محبوس مطرح می شود. در بیش تر جریان های لزج شرط مرزی عدم لغزش و عدم نفوذ ($u = v = w = 0$) در محل دیوار در نظر گرفته می شود. با این وجود می توان برای دیوار یک سرعت مماسی در قالب سرعت انتقالی و یا سرعت زاویه ای در نظر گرفت. داده های لازم در شرط مرزی دیوار عبارتند از:

- زبری دیوار (برای جریان های متلاطم)
- شرایط مرزی حرارتی (برای محاسبات انتقال دما)
- شرایط برشی (برای دیوارهای لغزنده)
- شرایط حرکت دیوار (برای حرکت انتقالی و چرخشی دیوار)

با توجه به نوع مساله ممکن است اطلاعات دیگری نیز در شرط مرزی دیوار لازم باشد.

اگر از مدل $k-\epsilon$ برای مدل سازی آشفتگی در شرط مرزی دیوار استفاده شود، پارامترهای آشفتگی در شرط مرزی دیوار براساس روابط زیر تعیین می شوند:

$$k_p = \frac{u_k^2}{c_\mu^{1/2}} \quad (59-3)$$

$$\epsilon_p = \frac{u_k^2}{k y_p} \quad (60-3)$$

که در این روابط:

u_k^* : سرعت برشی در محل دیوار بر حسب متر بر ثانیه، K : ثابت فون کارمن، y_p : فاصله قائم نزدیک ترین گره شبکه از دیوار بر حسب متر و C_μ ثابت تجربی می باشد.

- مدل سازی اثر زبری دیوار در جریان های متلاطم

زبری دیوار روی مقاومت و انتقال حرارت و جرم روی دیوار اثر می گذارد. در جریان های متلاطم اثر زبری دیوار را می توان با استفاده از قانون دیواره لحاظ کرد. قانون دیواره، توزیع سرعت نزدیک دیوار را براساس سرعت متوسط جریان به صورت رابطه (60-3) بیان می کند:

$$\frac{u_p}{u_k} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho y_p u_k}{\mu} \right) - \Delta B \quad (61-3)$$

در رابطه فوق u_k^* به صورت زیر تعریف می شود:

$$u_k = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (62-3)$$

که در این روابط:

u_p : سرعت جریان در y_p ، y_p : نزدیک ترین گره شبکه به دیوار، τ_w : تنش برشی دیوار، K : ثابت فون کارمن، μ : لزجت سیال، ρ : چگالی سیال، C_μ : ثابت بدون بعد، ΔB : تابعی از ارتفاع زبری و E ثابت انتگرال گیری است که بستگی به زبری دیوار دارد.

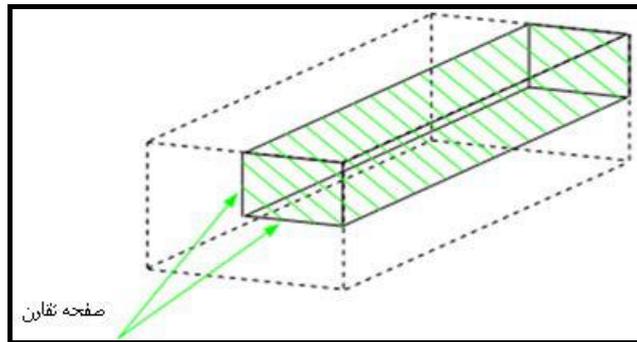


- شرط مرزی فشار ثابت

شرط مرزی فشار ثابت در جایی استفاده می‌شود که جزییات دقیق توزیع جریان نامعلوم بوده، اما مقادیر مرزی فشار معلوم است. نمونه مسایلی که این شرایط مرزی در آنها استفاده می‌شود، عبارتند از جریان‌های خارجی اطراف اجسام، جریان‌های سطح آزاد و جریان‌های داخلی با چند خروجی. در اعمال شرط مرزی فشار ثابت، تصحیح فشار در گره‌ها برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

- شرط مرزی تقارن

این شرط مرزی برای کاهش میدان محاسباتی در مدل استفاده می‌شود. در شکل (۳-۲۰) مثالی از کاربرد این مرز نشان داده شده است.



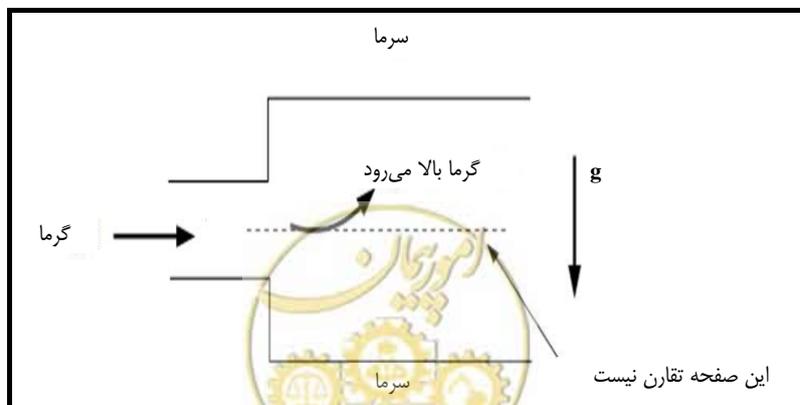
شکل ۳-۲۰- استفاده از تقارن به منظور مدل‌سازی یک چهارم هواکش سه‌بعدی

شرایط مرزی تقارن عبارتند از:

- هیچ جریان عرضی از مرز وجود ندارد.
- هیچ شار اسکالر به صورت عرضی از مرز صورت نگیرد.

در عمل سرعت‌های عمودی در هر مرز متقارن محوری، صفر می‌باشند و مقادیر مربوط به سایر متغیرها درست در خارج از محدوده حل برابر است با مقادیر آنها در نزدیک‌ترین گره داخلی محدوده حل.

توجه به این نکته ضروری است که هندسه متقارن مربوط به یک میدان جریان همواره نمی‌تواند دلیل بر متقارن بودن جریان هم باشد. شکل (۳-۲۱) بیانگر همین مساله است و استفاده از شرط مرزی تقارن در آن مناسب نمی‌باشد. اگر بتوان از تغییرات تراز آب صرف‌نظر کرد، می‌توان از این شرط مرزی برای مدل کردن سطح آزاد نیز استفاده کرد.



شکل ۳-۲۱- استفاده نامناسب از شرط مرزی تقارن

۳-۴-۷- روش های مختلف حل معادلات حاکم

سه روش عمده زیر به عنوان روش های انفصال میدان و حل معادلات حاکم بر جریان مطرح می باشند:

- روش تفاضل محدود^۱
- روش المان محدود^۲
- روش حجم محدود^۳

در روش تفاضل محدود برای به دست آوردن مشتقات Φ (متغیر وابسته ای که می تواند به جای انواع مختلف کمیت ها مانند مولفه های سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی، دما و غیره ظاهر شود) از بسط سری تیلور منقطع استفاده می شود و در نهایت یک معادله جبری برای مقدار Φ در هر نقطه از شبکه به دست می آید.

در روش المان محدود از توابع تکه ای ساده (خطی یا درجه دوم) برای بیان تغییرات موضعی متغیر مجهول Φ استفاده می شود و معادلات حاکم با استفاده از حل دقیق Φ ارضا می گردد. بدیهی است که اگر توابع تقریب تکه ای برای Φ در معادله جایگذاری شوند، معادله دقیقاً ارضا نخواهد شد و یک باقی مانده برای اندازه گیری خطاها تعریف می شود. سپس باقی مانده ها در برخی جهت ها توسط ضرب آنها در مجموعه ای از توابع وزنی و انتگرال گیری به حداقل می رسد. در نهایت مجموعه ای از معادلات جبری برای ضرایب مجهول توابع تقریب به دست می آید.

در روش حجم محدود میدان محاسباتی به تعدادی حجم کنترل به گونه ای تقسیم می شود که هر گره را یک حجم کنترل احاطه کند و حجم های کنترل دارای فضای مشترک با یکدیگر نباشند. سپس معادلات دیفرانسیل روی هر یک از حجم های کنترل انتگرال گیری می شود. برای محاسبه انتگرال های لازم، از نیمرخ های قطعه به قطعه که تغییر Φ را بین گره ها بیان می کند استفاده می شود.

روش های تفاضل محدود و حجم محدود به طور گسترده ای در مسایل جریان های رودخانه ای مورد استفاده قرار می گیرند. معادلات جبری حاصل از روش های تفاضل محدود و حجم محدود معمولاً دارای ماتریس ضرایب متقارن و دسته بندی شده هستند و در نتیجه کارآمدتر هستند، در حالی که معادلات جبری حاصل از روش های المان محدود اغلب دارای ماتریس ضرایب نامتقارنند و نیازمند تلاش بیش تری برای حل می باشند. روش های کلاسیک حجم محدود و تفاضل محدود برای شبکه های سازمان یافته و منظم قابل کاربرد بوده و استفاده از آنها برای میدان های نامنظم رودخانه ای مشکلات زیادی را ایجاد می کند. این در حالی است که روش های المان محدود قابلیت زیادی برای شبکه بندی نامنظم دارد، البته مزیت عمده ای در مورد مسایل یک بعدی نسبت به دیگر روش ها ندارد. در دهه های اخیر روش های حجم محدود و تفاضل محدود به نحوی توسعه یافته اند که هم انعطاف پذیری شبکه بندی روش های المان محدود را داشته باشند و هم از سادگی و کارآمدی روش های کلاسیک حجم محدود و تفاضل محدود بهره مند باشند. با توجه به توضیحات فوق، روش های حجم محدود و تفاضل محدود کارایی بیش تری در مدل های رودخانه ای دارند، اگرچه روش های المان های محدود به سبب انعطاف پذیری شبکه در بسیاری از مدل های رودخانه ای استفاده می شود [۲۵].



۳-۴-۸- بهینه‌سازی مدل ریاضی

اغلب برای بهینه کردن طرح نیاز است که مراحل پیچیده و زمانبر طراحی چندین بار تکرار شود و در هر مرحله نتایج طرح مورد ارزیابی قرار گرفته و براساس آن طراحی اصلاح شده و این کار آن قدر ادامه یابد تا طرح ایده‌آل حاصل شود. لازم است که تغییر پارامترها براساس یک الگوی خاص صورت گیرد، به طوری که با کم‌ترین عملیات به طرح بهینه (طرحی که تمام محدودیت‌ها و شرایط طراحی را ارضا نموده و هدف خاصی را به بهینه‌ترین وجه تامین می‌نماید) دست یافت.

به طور خلاصه برای بیان یک مساله طراحی باید مراحل زیر طی شود:

- مشخص نمودن متغیرهای طراحی (پارامترهای موثر در طراحی سامانه) که باید حتی‌الامکان مستقل از یکدیگر باشند.
 - تعیین تابع هدف و توصیف یک رابطه برای آن بر حسب متغیرهای طراحی
 - مشخص نمودن محدودیت‌ها، شرایط و قیود طراحی و تدوین روابطی برای آنها بر حسب متغیرهای طراحی
- با نسبت دادن مقادیر مختلف به متغیرهای طراحی می‌توان به طرح‌های مختلف دست یافت. هرگاه مقادیر فوق کلیه محدودیت‌ها و شرایط و قیود سامانه را ارضا نماید، طرح قابل قبول نامیده می‌شود. یک طرح غیر قابل قبول حداقل یکی از قیود طراحی را نقض می‌کند. انتخاب صحیح متغیرهای طراحی در فرمولاسیون مساله بسیار مهم است.
- تابع هدف: برای هر مساله مهندسی طرح‌های بسیاری وجود دارد که برخی از آنها نسبت به بقیه دارای مزیت نسبی است، لذا برای گزینش طرح‌های بهتر باید معیارهایی در اختیار باشد تا بتوان طرح‌ها را با هم مقایسه نمود. معیار مزبور باید تابعی باشد تا بتوان برای طرح مشخص مقدار آن را به دست آورد. به عبارتی باید تابع معینی از متغیرهای طراحی موجود باشد. چنین معیار مقایسه‌ای که برداری از متغیرهای طراحی x می‌باشد را با $F(x)$ نمایش می‌دهند. هدف از حل مساله بهینه‌سازی کمینه کردن یا بیشینه کردن تابع $F(x)$ است و از این رو آن را تابع هدف می‌نامند. انتخاب تابع هدف مناسب در مرحله طراحی بسیار مهم می‌باشد.

۳-۴-۹- تحلیل حساسیت مدل

آنالیز حساسیت یک روش سیستماتیک ارزیابی اثرها، ارائه و توجیه نتایج یک پروژه می‌باشد که از تغییر دادن مقدار متغیرهای کلیدی حاصل می‌شود. تعریف کلی حساسیت عبارت است از نرخ تغییر در یک فاکتور خروجی نسبت به نرخ تغییر یک فاکتور ورودی. فاکتورهای ورودی که در تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرند به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول مقادیر پارامتر ورودی بوده و گروه دوم معادلات و روابط تئوری مورد استفاده در مدل می‌باشد. اگر تحلیل حساسیت تغییرات کمی نسبت به یک پارامتر خاص یا الگوریتم نشان دهد، برای منعکس کردن این مشاهدات، کاربر می‌تواند از یک ضریب اطمینان استفاده نماید. در غیر این صورت این تغییرپذیری می‌تواند با تحقیقات بیشتر یا با معرفی یک دامنه یا ضریب اطمینان برای جبران کردن عدم قطعیت پارامتر مورد نظر کاهش یابد. تحلیل حساسیت می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های اضافی و کم کردن اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی شود.

در یک مدل مقدار تابع هدف می‌تواند به صورت تابعی از پارامترهای مستقل بیان شود:

$$Y_0 = F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

(۳-۶۳)

که در این رابطه:



Y_0 : تابع هدف و x_i پارامتر مستقل می باشد. مقادیر تابع هدف می تواند تغییرات تراز سطح آب و تراز بستر آبراهه بوده و ضرایب زبری، گام زمانی، توزیع اندازه ذرات و ... به عنوان پارامترهای مستقل مورد بررسی قرار می گیرند. مقدار تابع هدف مطابق با پارامتر x_i می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Y_i = F(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) \quad (۶۴-۳)$$

که در این رابطه Y_i مقدار تابع هدف و Δx_i انحراف پارامتر x_i می باشد. در این معادله به جز x_i همه پارامترها ثابت می باشند. با استفاده از دو معادله بالا ضریب حساسیت می تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\alpha_i = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} * 100(\%) \quad (۶۵-۳)$$

$$\beta_i = Y_i - Y_0 \quad (۶۶-۳)$$

که در این رابطه:

α نرخ تغییر مقدار تابع هدف مطابق با تغییر Δx_i بر مبنای پارامتر شبیه سازی بوده و β تغییر مقدار تابع هدف می باشد. پارامترهایی که مبنای شبیه سازی قرار می گیرند عمدتاً توسط اطلاعات میدانی در یک رویداد خاص یا مطالعات مدل فیزیکی یا تجربیات مهندس پروژه تعیین می شود. به طور کلی، پارامترهایی که برای تحلیل حساسیت انتخاب می شوند عبارتند از: مقادیر اطلاعات ورودی مانند هندسه و اندازه شبکه محاسباتی، ساختار شبکه محاسباتی (منظم، نامنظم)، بده ورودی، گام زمانی، دمای آب، توزیع ذرات رسوبی، تغییر تراز بستر، معادله ضریب زبری، ضرایب افت انرژی، معادلات انتقال رسوب و آبستگي، نوع مدل آشفتگی، معادله تنش برشی، تعداد لوله های جریان و تعداد تکرارها.

۳-۴-۱۰- واسنجی و صحت سنجی

واسنجی مدل شامل آزمایش کردن مدل با اطلاعات معلوم ورودی و خروجی است که برای تطبیق یا تخمین ضرایب یا پارامترها درون محدوده فیزیکی به کار گرفته می شود، به طوری که نتایج پیش بینی ها به بهترین وجه ممکن با اطلاعات مشاهده ای مطابقت نمایند. این فرآیند نیاز به مشخص کردن شرایط میدانی به نحو مناسبی دارد. این مقایسه ها می تواند به شکل نقشه ها، جداول یا نمودارها ارائه شود. معیار کلی مورد پذیرش برای تمامی حالات وجود ندارد. با این حال، باید اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی کمینه شود. به طور نمونه، این اختلاف باید کم تر از ۱۰ درصد تغییر پذیری در اطلاعات میدانی باشد. پس از واسنجی مدل، باید مدل صحت سنجی شود. روشی که برای صحت سنجی نتایج یک مدل مورد استفاده قرار می گیرد، به صورت زیر می باشد:

با در اختیار داشتن یک مجموعه اطلاعات اندازه گیری شده، آنها به دو زیر مجموعه برای استفاده در بخش واسنجی و صحت سنجی تقسیم می شوند، به طوری که بخش اعظم آن برای قسمت اول مورد استفاده قرار گیرد. پس از واسنجی مدل با اطلاعات اندازه گیری شده، می توان مدل را با استفاده از باقی مانده اطلاعات اندازه گیری شده، صحت سنجی نمود. یعنی بدون تغییر دادن پارامترهای واسنجی، مدل با شرایط جدید اجرا می شود. سپس با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل و مقادیر اندازه گیری شده می توان صحت عملکرد مدل را برای شرایط جدید بررسی نموده و میزان اطمینان به مدل واسنجی شده را برآورد نمود.

برای واسنجی و صحت سنجی می توان از مقایسه های کیفی و کمی بین مقادیر محاسباتی با راه حل های تحلیلی، آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه و داده های اندازه گیری شده میدانی استفاده کرد. برخی از روش های مقایسه های کمی عبارتند از:

- مقایسه میانگین‌ها
- تحلیل رگرسیون
- خطای نسبی

در روش اول میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده با میانگین نتایج محاسبه شده در شرایط مشابه مقایسه می‌شود. تابع چگالی احتمال جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده می‌شود.

در تحلیل رگرسیون مقادیر محاسبه شده نظیر سرعت، ارتفاع و غلظت به عنوان نقاط مزدوج در معادله آزمون در نظر گرفته می‌شوند:

$$x = \alpha + \beta C + E \quad (3-67)$$

که α و β به ترتیب عرض از مبدا و شیب واقعی بین مقادیر محاسبه شده C و داده‌های اندازه‌گیری شده x می‌باشند. E خطای ناشی از داده‌های مشاهداتی x می‌باشد. در تحلیل رگرسیون فرض بر این است که مقادیر محاسبه شده C با قطعیت درست می‌باشد و خطای E در داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد که ضرورتاً فرض واقعی نیست. از روش‌های رگرسیون خطی استاندارد می‌توان در محاسبه مربع ضریب همبستگی (R^2) و خطای استاندارد برآوردها استفاده کرد که نشان‌دهنده خطای بین داده‌ها و مدل می‌باشد. مدل‌هایی که به خوبی واسنجی می‌شوند دارای عرض از مبدا صفر و شیب یک خواهند بود.

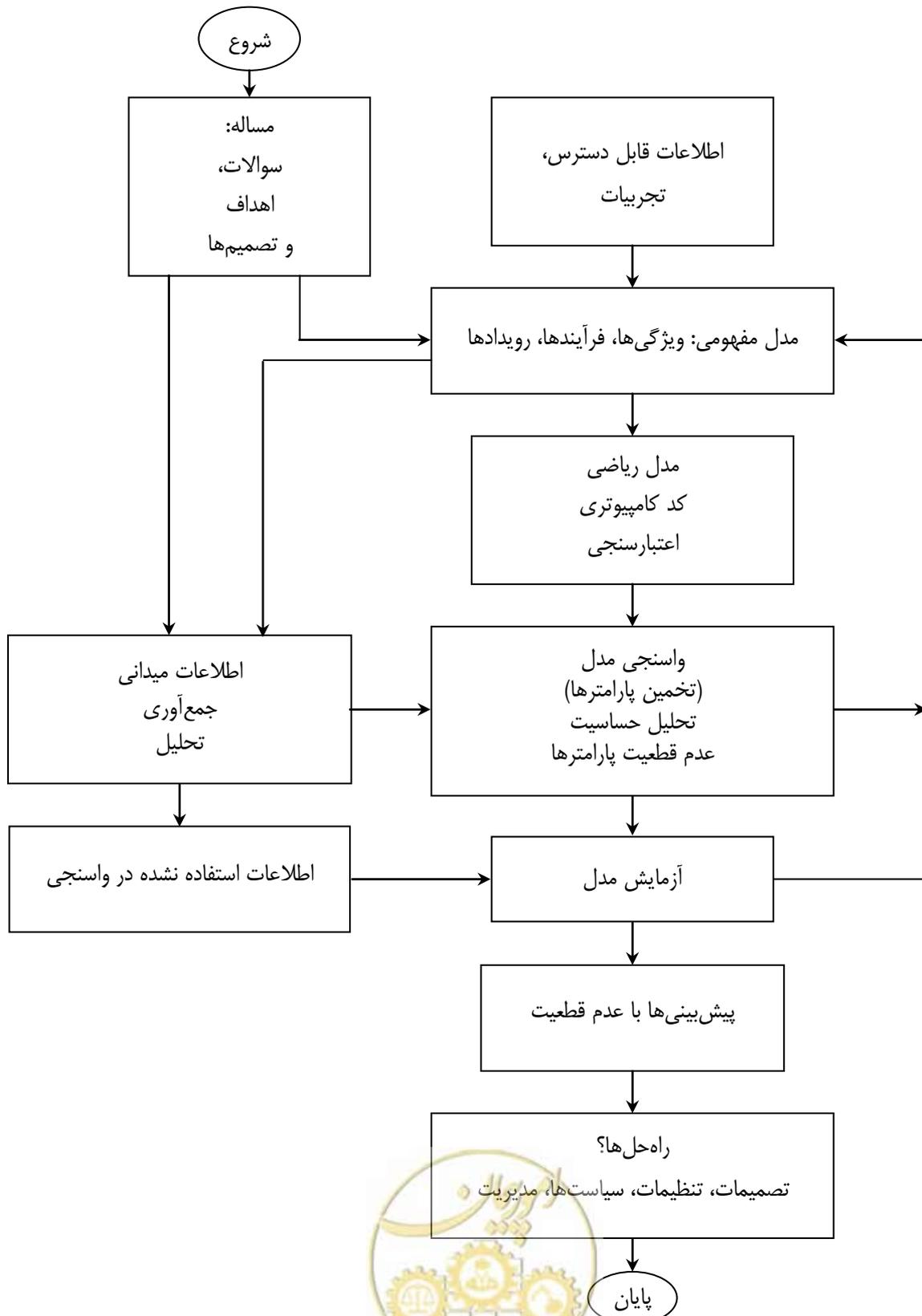
خطای نسبی، مقدار مطلق اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده تقسیم بر مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. فراوانی تجمعی خطای نسبی را می‌توان طی زمان یا مکان محاسبه و خطای نسبی میانه یا با فراوانی ۱۰ درصد و ۹۰ درصد را برآورد کرد. در مطالعات هیدرودینامیک جریان معمولاً از اطلاعات اندازه‌گیری شده بده جریان و تراز سطح آب و سرعت و جهت‌های آن در چند نقطه از بازه مورد مطالعه برای واسنجی استفاده می‌شود. در این حالت ضریب زبری که به صورت ضریب مانینگ یا ضریب شزی تعریف می‌شود، بیش‌تر مورد واسنجی قرار می‌گیرد. همچنین پارامترهای موثر در تعیین لزجت گردابه‌ای که بسته به نوع مدل آشفتگی مورد استفاده، برای مدل قابل تعریف می‌باشد، نیز باید در واسنجی مدنظر قرار گیرند. در مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، جریان‌های غیرماندگار و مدل‌های فرسایش و رسوب اطلاعات بیش‌تری برای واسنجی مورد نیاز است. تغییرات مکانی و زمانی بده جریان، تراز سطح آب، توزیع سرعت، تغییرات مکانی و زمانی غلظت رسوب و تغییرات مکانی و زمانی تراز و شکل بستر و ضرایب پخش از جمله اطلاعاتی هستند که برای واسنجی این گونه مدل‌ها مورد نیاز است.

جدول (۳-۶) دامنه کلی واسنجی و صحت‌سنجی را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد [۳۵]. مقادیر نشان داده شده به صورت درصد متوسط خطا یا اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشند که کاربران می‌توانند دقت مورد نظر را با آن بسنجند.

جدول ۳-۶- دامنه کلی واسنجی / صحت‌سنجی [۳۵]

مدل	در صد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده		
	خیلی خوب	خوب	متوسط
هیدرولوژی / جریان	< ۱۰	۱۵-۱۰	۲۵-۱۵
رسوب	< ۲۰	۳۰-۲۰	۴۵-۳۰
دمای آب	< ۷	۱۲-۸	۱۸-۱۳
کیفیت آب / ترکیبات نیتروژن	< ۱۵	۲۵-۱۵	۳۵-۲۵
سموم	< ۲۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰

در شکل (۳-۲۲) نمونه‌ای از الگوریتم مورد استفاده در مدل‌سازی شامل مراحل اعتبارسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است.



شکل ۳-۲۲- نمونه‌ای از الگوریتم فرآیندهای مدل‌سازی

۳-۵- مدل‌های ارائه شده موجود

۳-۵-۱- برخی از مدل‌های ریاضی توسعه یافته برای مطالعات هیدرودینامیک و رسوب

مدل‌های ریاضی زیادی توسط محققین مختلف برای مطالعه جریان و رسوب در رودخانه‌ها توسعه یافته است که برخی از آنها جنبه تجاری پیدا کرده و به دفعات در پروژه‌های متعدد در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مقایسه مدل‌ها، به طور خلاصه مشخصه‌های آنها در جدول (۳-۷) ارائه گردیده است.

جدول ۳-۷- برخی از مدل‌های هیدرودینامیک و رسوب

مدل	سیستم عامل	ابعاد			تغییرات زمانی		نوع حجم آبی				اتصال به GIS	مستندسازی		دسترسی به مدل	رسوب
		3D	2D	1D	پایدار	ناپایدار	مخزن	دریاچه	رودخانه	خور		سواحل	ضعیف		
BRANCH	Dos	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-	-	√	-	-
BRI-STARS	Win	√	-	-	√	√	-	-	-	√	-	-	√	-	-
CCHE1D	Win	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-	√	√	-	-
CCHE2D	Win	-	√	-	√	√	√	-	√	√	-	√	√	-	-
CH3D-WES	Win	-	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
DAFLOW	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
DELFT3D	Win	√	√	-	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	-
DYNHYD5	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
FEQ	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
FESWMS-2DH	Dos	-	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
FLOW3D	Win	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
FLUENT	Win	-	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
FLUVIAL12	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
FourPt	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
GEMSS	Win	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
GSTARS3	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
HEC6	Dos	-	-	√	√	√	-	√	√	√	-	√	√	√	-
HEC-RAS	Win	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
HIVEL2D	Win	-	√	-	√	√	√	-	√	√	-	√	√	√	-
Ialluvial	Dos	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
ISIS	Win	-	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
MIKE11	Win	-	√	-	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
MIKE21	Win	-	√	-	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	-
MOBED	Dos	√	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
RMA2	Win	-	√	-	√	√	-	-	√	√	-	√	√	√	-
SMS 8	Win	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
Sobek	Win	√	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
SSIIM	Win	√	-	√	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
UNET	Dos	-	√	-	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-
WSPRO	-	-	√	-	√	√	-	-	√	√	-	-	√	√	-

۳-۵-۲- برخی از مدل های ریاضی موجود برای شبیه سازی کیفیت آب

خلاصه ای از مشخصات برخی مدل های ریاضی شبیه سازی کیفیت آب که در زمینه مهندسی رودخانه کاربرد دارند به صورت مقایسه ای در جدول (۳-۸) ارائه گردیده است.

جدول ۳-۸- برخی از مدل های کیفیت آب

مدل		AQUATOX	CE - QUAL - RIV1	CE - QUAL - RIV1	CE - QUAL - ICM	CE - QUAL - W2	EXAMSII	HEC5Q	HSPF	MIKE11
ابعاد	1D	√	√	√	√	-	√	√	√	√
	2D	-	-	-	√	√	√	-	-	-
	3D	-	-	-	√	-	√	-	-	-
تغییرات زمانی	پایدار	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	ناپایدار	-	√	√	√	√	-	√	√	√
نوع حجم آبی	مخزن	√	-	-	√	√	√	√	√	-
	دریاچه	√	-	-	√	√	√	-	-	-
	رودخانه	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	خور	-	√	√	√	√	-	-	-	√
	سواحل	-	-	-	√	-	-	-	-	-
متغیرهای حالت	BOD - DO	√	√	√	√	√		√	√	√
مستندسازی	ضعیف	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	قوی	√	√	√	√	√	√	√	√	√
دسترسی به مدل	سفارشی	-	√	√	√	√	-	√	-	√
	آزاد	√	-	-	-	-	√	-	√	-

ادامه جدول ۳-۸- برخی از مدل های کیفیت آب

مدل		QUAL2E	RMA4	RMA11	TWQM	WASP	WQAM	WQRRS
ابعاد	1D	√	√	-	√	√	√	√
	2D	-	√	-	-	√	-	-
	3D	-	-	√	-	√	-	-
تغییرات زمانی	پایدار	√	√	√	√	√	√	√
	ناپایدار	-	√	√	-	√	-	√
نوع حجم آبی	مخزن	-	√	√	√	√	√	√
	دریاچه	-	√	√	-	√	√	-
	رودخانه	√	√	√	√	√	√	√
	خور	√	√	√	-	√	√	-
	سواحل	-	√	√	-	√	√	-
متغیرهای حالت	BOD - DO	√	√	√	√	√	√	√
مستندسازی	ضعیف	-	-	-	-	-	-	-
	قوی	√	√	√	√	√	√	√
دسترسی به مدل	سفارشی	-	√	√	√	√	√	√
	آزاد	√	-	-	-	-	-	-

۳-۶- معیارهای انتخاب مدل ریاضی

۳-۶-۱- کلیات

به علت طبیعت پیچیده فرآیندها و اندرکنش‌ها در حجم‌های آبی، مدل‌های ریاضی عمدتاً می‌توانند مولفه‌های اساسی محیطی که بر فرآیندهای مختلف پخش و انتقال رسوب یا آلاینده‌ها تاثیرگذار هستند را در نظر بگیرند. مدل‌سازی تمام مکانیزم‌ها و فرآیندهای موجود در طبیعت در یک مدل ریاضی مشکل و در برخی موارد غیرضروری است. بنابراین درجات مختلفی از سادگی یا پیچیدگی در مدل‌های ریاضی در نظر گرفته شده که باعث توسعه مدل‌های زیادی در زمینه‌های مختلف از قبیل هیدرودینامیک، انتقال رسوب و کیفیت آب شده است. بر این اساس برای مدل‌سازی یک یا چند پارامتر خاص در منطقه مورد مطالعه گزینه‌های مختلفی از مدل‌ها پیش روی یک مهندس طراح قرار دارد که باید از بین آنها یک مدل مناسب را انتخاب نماید. برای انتخاب یک مدل مناسب معیارهای مختلفی وجود دارد که در این بخش به آنها پرداخته می‌شود.

انتخاب یک مدل مناسب شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از:

۱- تعیین لیستی از مدل‌های موجود برای ارزیابی پدیده‌های مختلف

۲- توسعه مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی مدل‌های کاندیدا جهت ارزیابی نهایی

۳- توسعه مجموعه‌ای از معیارها برای دسته‌بندی توانایی‌های مدل‌ها درون هر طبقه از آنها

مرحله اول که شامل تهیه یک لیست از مدل‌های موجود می‌باشد در بخش قبل ارائه شد و در مورد هر مدل مشخصات کلی ارائه شده است. مراحل دوم و سوم در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۶-۲- کاربرد، مزایا و محدودیت‌های معادلات حاکم در انواع مدل‌های ریاضی

۳-۶-۲-۱- معادلات حاکم بر میدان جریان

در تمامی مدل‌های ذکر شده در بخش قبل اگر مدل‌سازی در محدوده‌ی تعریف شده برای این مدل‌ها صورت گیرد، نتایج قابل قبولی عاید می‌شود و خطاهای ناشی از مدل‌سازی به حداقل رسیده و در هزینه و زمان مدل‌سازی صرفه‌جویی زیادی می‌شود. بنابراین یکی از معیارهای انتخاب مدل می‌تواند معادلات حاکم به کار رفته در مدل‌های ریاضی باشد. معادلات حاکم بر میدان جریان شامل معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم هستند که در حالت کلی سه بعدی می‌باشند. برای استفاده از این معادلات برای مدل‌سازی جریان نیاز به مدل‌سازی آشفتگی می‌باشد. همان‌طور که بیان گردید مدل‌های آشفتگی مختلفی که هر کدام از آنها نیز دارای ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاصی بوده، قابل استفاده می‌باشند. البته این محدودیت‌ها هم می‌تواند شامل مدل‌سازی آشفتگی و روش‌های حل باشد و هم می‌تواند شامل هزینه و زمان اجرای مدل باشد.

برخی از مدل‌های ریاضی به صورت دو بعدی افقی و یا دو بعدی عمقی می‌باشند که در آنها با فرض تغییرات ناچیز سرعت در عمق یا در عرض، معادلات جریان در عمق یا در عرض متوسط‌گیری می‌شوند. مدل‌های دو بعدی افقی کاربرد وسیعی در مدل‌سازی جریان در رودخانه‌ها، خورها و سواحل دارند. در این مدل‌ها با فرض آب کم عمق معادلات پیوستگی و مومنتوم ساده‌سازی شده و با روش‌های مختلف عددی حل می‌شوند. از این مدل‌ها نمی‌توان برای مناطقی که نقش مولفه قائم سرعت قابل صرف نظر کردن نیست، استفاده

نمود. مثلا برای مدل سازی جریان در پیچانرود به علت وجود جریان های ثانویه نمی توان از این مدل ها استفاده نمود. مدل های دو بعدی عمقی برای شرایطی قابل استفاده می باشد که فرض تغییرات ناچیز در عرض صادق باشد. مثلا در رودخانه ها، مخازن باریک، خورها و کانال های دسترسی که تغییرات سرعت در عرض قابل صرف نظر کردن باشد، می توان از این مدل ها استفاده نمود.

در مدل های یک بعدی تغییرات پارامترها در دو بعد ناچیز فرض شده و معادلات حاکم بر جریان در آن دو بعد متوسط گیری می شوند. این مدل ها شامل مدل های یک بعدی طولی و یک بعدی عمقی می باشند. در مدل های یک بعدی طولی فرض می شود که جریان غالب در جهت طول می باشد. مثلا با استفاده از این فرض می توان جریان در رودخانه ها و خورها را مدل سازی نمود. این مدل ها ابزار مناسبی برای مطالعات ریخت شناسی رودخانه ها می باشند. مدل های یک بعدی عمقی نیز معمولا برای محاسبه لایه بندی و نیز سرعت سقوط ذرات مورد استفاده قرار می گیرند.

۳-۶-۳- معادلات حاکم بر بار بستر

برای تخمین و برآورد بار بستر روابط زیادی وجود دارد که اکثر آنها براساس اطلاعات آزمایشگاهی و تعداد کمی بر مبنای اندازه گیری های میدانی می باشند که در شرایط خاصی (مثلا در آزمایشگاه و تحت شرایط محدودی از سرعت جریان، تنش برشی، عمق جریان، بده جریان و شرایط هندسی برای محدوده ای از ذرات) به دست آمده اند. برای برآورد و تخمین پارامترهای مختلف در آزمایشگاه از وسایل اندازه گیری مختلفی استفاده می شود که این وسایل دارای دقت معینی بوده و هنگام استفاده از آنها نیز مقداری خطا وارد اطلاعات اندازه گیری شده می شود. استفاده از این وسایل نیز خود دارای محدودیت می باشد. نهایتا روابطی که براساس این اطلاعات حاصل می شود دارای محدوده ای از کاربرد می باشد که در هنگام استفاده از این روابط باید مدنظر قرار گیرد.

همچنین در این روابط ضرایبی وجود دارد که برای شرایط خاصی به دست آمده اند و ضمن کاربرد آنها برای یک منطقه متفاوت باید این ضرایب مجددا به دست آمده و مدل کالیبره شود. بنابراین استفاده از معادلات حاکم بر حرکت بار بستر محدودیت های شدیدتری نسبت به معادلات حاکم بر جریان دارد. در نتیجه توصیه می شود که برای استفاده از این مدل ها به منشای استخراج این روابط و محدودیت های آنها توجه شود.

۳-۶-۴- معادلات حاکم بر بار معلق

برای برآورد بار معلق نیز همانند بار بستر روابط تجربی زیادی توسعه داده شده است و محدودیت هایی که در مورد روابط بار بستر به آنها اشاره شد، در این روابط نیز وجود دارند. در استفاده از این روابط نیز باید به محدودیت های این روابط در هنگام استخراج توجه کرده و برای شرایط توصیه شده استفاده شوند.

البته علاوه بر روابط تجربی برآورد بار معلق روابط تئوری نیز توسعه داده شده اند و از آنجا که این روابط دارای محدودیت کمتری نسبت به روابط تجربی می باشند، توصیه می شود برای شبیه سازی بار معلق بیش تر از روابط تئوری استفاده شود.

محدودیتی که در روابط تئوری وجود دارد این است که برای استفاده از این روابط نیاز به یک غلظت مرجع وجود دارد که مقدار آن بستگی به بار بستر دارد.

روابط تجربی برای محاسبه غلظت بار معلق با دانه بندی یکنواخت در نزدیکی کف توسط (Fredsoe و Engelund (1976)، (Smith و McLean (1977)، (Van Rijn (1984b)، (Rodri و Celik (1988)، (Zyserman (1994) و Fredsoe و Cao (1999)

ارائه شده است. همچنین Einstein (1950)، Garcia و Parker (1991)، Hu و Wang (1999) روابط تجربی برای محاسبه غلظت بار معلق در نزدیکی کف برای ذرات با دانه‌بندی غیریکنواخت پیشنهاد کردند. در ادامه روابط Einstein، Van Rijn به عنوان نمونه آورده شده است. فرمول Einstein [۲۵] Einstein (1950) تراز مینا را برای محاسبه غلظت مرجع در فاصله دو برابر قطر ذرات بالای کف کانال در نظر می‌گیرد و میزان غلظت مینا را در این فاصله به عنوان تابعی از نرخ انتقال بار بستر معرفی می‌کند:

$$c_{b \times k} = \frac{1}{11.6} \frac{q_{b \times k}}{\delta S U_*} \quad (۶۸-۳)$$

که در این رابطه C_{b*} : غلظت ذرات در فاصله مرجع (وزن بر واحد حجم)، k : معرف دسته‌بندی ذرات از لحاظ قطر، Q_{b*} : نرخ انتقال بار بستر، δ : تراز مینا و U_* سرعت برشی موثر مربوط به زبری ذرات است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_*^t = U g^{0.5} / C^t \quad (۶۹-۳)$$

C' : بخشی از ضریب شزی مربوط به ذرات است که با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C' = 18 \log \left(\frac{4h}{d_{90}} \right) \quad (۷۰-۳)$$

فرمول Van Rijn (1984b) ایشان تراز مینا را برابر ارتفاع زبری معادل k_s و یا نصف ارتفاع شکل بستر در نظر گرفت و رابطه زیر را ارائه داد:

$$c_{b*} = 0.015 \frac{d_{50} T^{1.5}}{\delta D_*^{0.3}} \quad (۷۱-۳)$$

که در این رابطه:

C_{b*} : غلظت حجمی بار معلق در تراز مرجع، d_{50} : قطر متوسط ذرات و T پارامتر بدون بعدی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = (U_* / U_{*cr})^2 - 1 \quad (۷۲-۳)$$

که در این رابطه، U_{*cr} سرعت برشی بحرانی آستانه حرکت و D_* پارامتر ذره است که با رابطه (۷۰-۳) تعیین می‌شود:

$$D_* = d \left[(\rho_s / \rho - 1) g / v^2 \right]^{1/3} \quad (۷۳-۳)$$

۳-۶-۵- ویژگی‌های موثر در انتخاب مدل‌های ریاضی

۳-۶-۵-۱- دسترسی به لیست برنامه^۱ و امکان افزودن قابلیت‌های مورد نظر

یکی از ویژگی‌هایی که در انتخاب مدل می‌تواند مدنظر قرار گیرد دسترسی به لیست برنامه می‌باشد که متأسفانه بسیاری از مدل‌های موجود فاقد این ویژگی می‌باشند و بیش‌تر مدل‌ها به صورت یک جعبه سیاه ارائه می‌شوند. در این موارد کاربر هیچ‌گونه امکانی برای تغییر یا افزودن قابلیت‌های مورد نظر به مدل ندارد. لازم به ذکر است که اگر لیست برنامه‌ای نیز موجود باشد استفاده از آن نیاز به تجربه زیادی در زمینه برنامه‌نویسی و آشنایی کافی به زبان برنامه‌نویسی مورد استفاده در مدل دارد. همچنین یادگیری و

آشنایی با مدل و متغیرهای مورد استفاده در آن به زمان و تجربه‌ی زیاد نیاز دارد. این ویژگی زمانی حایز اهمیت می‌باشد که کاربر بخواهد از آن برای توسعه مدل برای اهداف مورد نظر استفاده نماید.

۳-۶-۵-۲- وجود مرجع علمی و راهنمای مدل

به علت این که اکثر مدل‌های موجود به صورت یک جعبه سیاه می‌باشند، بنابراین وجود یک مرجع علمی برای آن دارای اهمیت زیادی بوده و اجتناب ناپذیر می‌باشد. حجم اطلاعات و کیفیت مراجع علمی قابل دسترس برای مدل‌های مختلف دارای طیف وسیعی می‌باشند. این محدوده از گزارش‌های علمی ساده تا گزارش‌های فنی بسیار خوب توسعه داده شده و سامانه‌های بر - خط^۱ که به‌طور مستقیم به محیط مدل‌سازی متصل می‌شوند را شامل می‌شود. بنابراین می‌توان این محدوده را به سه قسمت کلی تقسیم‌بندی نمود: مستندسازی ضعیف، متوسط و قوی. توصیه می‌شود که از مدلی استفاده شود که حداقل دارای مستندسازی متوسط باشد.

۳-۶-۵-۳- توانایی مدل جهت شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده

از موارد دیگری که به‌عنوان معیار انتخاب مدل مطرح است، ارزیابی قابلیت مدل در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده می‌باشد. برخی از مدل‌ها برای هندسه‌های ساده توسعه داده شده‌اند بنابراین فقط برای شرایط خاصی قابل استفاده هستند. این مدل‌ها بیش‌تر برای کارهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما بسیاری از مدل‌های تجاری که امروزه توسعه داده می‌شوند، دارای قابلیت شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده با دقت‌های مختلف می‌باشند.

۳-۶-۵-۴- امکان حمایت و پشتیبانی فنی و علمی از مدل

یکی از ویژگی‌های موثر در انتخاب مدل امکان حمایت و پشتیبانی فنی و علمی از کاربران مدل می‌باشد. بسیاری از مدل‌های در دسترس، امکان حمایت و پشتیبانی فنی و علمی از مدل را دارا نمی‌باشند. از سوی دیگر، برخی از مدل‌های معروف مانند POM و HSPF دارای کارگاه‌های آموزشی می‌باشند. همچنین برای برخی از این مدل‌ها فضایی اینترنتی مهیا شده است که در آن کاربران (کاربران جدید و کاربران کارآموده) و توسعه‌دهندگان مدل دارای ارتباط مستقیم با یکدیگر می‌باشند و در نتیجه در تمامی مراحل مدل‌سازی از کاربر حمایت و پشتیبانی می‌شود. در این گونه مدل‌ها حمایت و پشتیبانی مدل می‌تواند شامل مراحل زیر باشد (توسط یک سامانه بر خط):

- حمایت و پشتیبانی از مدل قبل از پردازش اطلاعات
- حمایت و پشتیبانی از مدل در هنگام پردازش اطلاعات
- حمایت و پشتیبانی از مدل بعد از پردازش اطلاعات

۳-۶-۵-۵- توانایی انعطاف پذیری شبکه‌بندی در مناطق مختلف میدان جریان

برخی از مدل‌های تجاری برای شبکه‌بندی محیط مورد نظر برای رسیدن به سرعت بالایی در محاسبات صرفاً از شبکه‌های مستطیلی بهره می‌گیرند. اما این مدل‌ها قادر به شبکه‌بندی مناسب مناطق پیچیده (مانند سواحل رودخانه) نمی‌باشند، زیرا باعث کاهش دقت محاسبات می‌گردد. از سوی دیگر در برخی از مدل‌ها قابلیت تولید و استفاده از شبکه‌های مختلف وجود دارد. همچنین

در برخی موارد نیاز به ریز و درشت کردن شبکه در مناطق با گرادیان‌های مختلف می‌باشد. بنابراین بسته به اهداف مطالعات می‌توان نسبت به انتخاب مدلی با توانایی‌های مختلف شبکه‌بندی اقدام نمود. همچنین امکان شبکه‌بندی با المان‌های مثلی، چهارضلعی و نیز شبکه‌های با قاعده و بی‌قاعده نیز می‌تواند در زمره قابلیت‌های مهم یک مدل انعطاف‌پذیر باشد.

۳-۶-۵- کاربرد دوست بودن مدل

یکی از ویژگی‌های مهم در انتخاب مدل مناسب، کاربر دوست بودن آن است. بسیاری از مدل‌های موجود دارای این قابلیت نیستند و برای مدل‌سازی پدیده مورد نظر نیاز به مهارت زیادی در مدل‌سازی و استفاده از مدل می‌باشد. یک مدل کاربردوست باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان در فرآیند شبیه‌سازی می‌شود. به عنوان مثال مدل HEC-RAS به‌واسطه استفاده از رابط گرافیکی مناسب (و تحت ویندوز) در مقایسه با مدلی همچون Fluvial که تحت DOS بوده و رابط گرافیکی خاصی ندارد از کاربران بیش‌تری برخوردار است.

۳-۶-۶- سهولت دسترسی به مدل و نسخه به روز آن

بسیاری از مدل‌های موجود و توسعه داده شده در زمینه‌های مختلف قابل برداشت آزاد از طریق اینترنت نیستند و باید آنها را از موسسه توسعه دهنده آن خریداری نموده و یا باید مجوز استفاده از آن را تهیه نمود. بنابراین در بیش‌تر موارد برای استفاده از نسخه به روز شده یک مدل باید هزینه زیادی برای خرید مدل مورد نظر پرداخت شود.

۳-۶-۶-۱- حداقل نیاز به واسنجی

یکی از موارد بحث برانگیز در فرآیند مدل‌سازی، واسنجی نتایج به‌دست آمده توسط مدل می‌باشد. از آن‌جا که واسنجی یک فرآیند زمانبر می‌باشد، هر چه مدلی به واسنجی کم‌تری نیاز داشته باشد، در زمان و هزینه صرفه‌جویی بیش‌تری صورت می‌گیرد. بنابراین، این عامل می‌تواند یک ویژگی موثر در انتخاب مدل مورد نظر باشد. از سوی دیگر برای واسنجی مدل نیاز به برخی اطلاعات ثبت شده از محل مورد استفاده وجود دارد، که در برخی موارد موجود نبوده یا به راحتی قابل حصول نمی‌باشند.

۳-۶-۶-۲- صحت‌سنجی و کاربرد در موارد مشابه

صحت‌سنجی مدل یکی از موارد بسیار مهم در بحث مدل‌سازی می‌باشد، به‌طوری‌که قبل از استفاده از یک مدل باید از صحت نتایج و قابل اعتماد بودن مدل و نتایج به‌دست آمده از آن اطمینان حاصل کرد. در فرآیند مدل‌سازی توسعه‌دهندگان مدل پس از توسعه، مدل را با استفاده از آزمایش‌های مرجع صحت‌سنجی کرده و نتایج به‌دست آمده مستندسازی می‌شوند. یکی دیگر از راه‌های بررسی صحت مدل، ارزیابی نتایج حاصل شده از مدل در موارد به‌کار رفته در پروژه‌های مختلف می‌باشد.

۳-۶-۶-۳- حصول به دقت مورد نیاز

به‌طور کلی دقت یک مدل به فرضیات ساده‌کننده معادلات حاکم و روش‌های انفصال معادلات مرتبط می‌باشد. مدل‌ها از لحاظ پیچیدگی (تعداد فرضیات ساده‌کننده معادلات) به سطوح مختلفی قابل تقسیم‌بندی هستند. در هر کدام از این سطوح نتایج به‌دست آمده دارای دقت خاصی هستند و بسته به دقت مورد نیاز باید مدل انتخاب شده و مورد استفاده قرار گیرد. مثلاً برای مسایل خیلی



ساده استفاده از مدل های پیچیده و حل حالت کامل معادلات قابل توجیه نیست و برعکس. نوع روش های انفصال معادلات حاکم (مرتبه اول، مرتبه دوم، ...) نیز بر روی دقت حاصل شده تاثیر گذار می باشد.

۳-۶-۶-۴- اطلاعات خروجی مناسب و به شکل مطلوب

نتایج خروجی یک مدل اگر به صورت مطلوبی ارائه شود، تاثیر زیادی روی درک و شناخت از پدیده مورد نظر دارد. بنابراین مدل هایی که دارای این قابلیت هستند که از لحاظ گرافیکی در سطح مطلوبی باشند، به طوری که نیازی به استفاده از نرم افزارهای گرافیکی کمکی نداشته باشند نهایتاً باعث صرفه جویی در زمان و هزینه مدل سازی می شوند. برخی از مدل ها نیز با توجه به فرمت های نتایج خروجی، قابل اتصال به سامانه های جغرافیایی می باشند که مزیت خوبی برای این مدل ها محسوب می شود. از جمله این مدل های می توان به همچون مدل های CCHE، HEC-RAS و MIKE اشاره نمود.

۳-۶-۶-۵- قابلیت کاربرد در سخت افزارها و برنامه های معمول

اکثر مدل هایی که توسعه داده می شوند، قابل کاربرد در کامپیوترهای شخصی می باشند و برخی دیگر علاوه بر آن، قابلیت استفاده در سامانه های شبکه ای را نیز دارند. همچنین برخی از این مدل ها برای سیستم عامل خاصی طراحی می شوند که باید در انتخاب مدل، مدنظر قرار گیرد. نسخه های قبلی برخی از مدل ها برای انواع خاصی از سخت افزارها و سیستم های عامل طراحی و توسعه داده شده اند، اما در مدل هایی که در حال تکامل هستند، توسعه دهندگان آنها سعی می کنند مدل خود را با شرایط و سیستم های عامل جدید تطبیق دهند که این گزینه باعث محبوبیت و موفقیت بیش تر مدل می گردد.

۳-۶-۶-۶- میزان موفقیت در کاربردهای قبلی توسط دیگران (داخل و خارج از کشور)

اگر مدلی برای اولین بار در داخل کشور مورد استفاده قرار گیرد، باید به سوابق مدل رجوع کرده و میزان موفقیت آن را در پروژه های بین المللی بررسی و ارزیابی نمود. میزان موفقیت مدل در کاربردهای مختلف عامل مهمی در انتخاب یک مدل قلمداد می شود. یکی از مواردی که می توان از آن طریق قابلیت های مدل را ارزیابی نمود، بررسی سوابق کاربرد مدل در پروژه های انجام شده در داخل کشور می باشد. با بررسی و جستجو در اسناد و مدارک موجود پروژه های انجام شده و همچنین تحقیق از کاربرانی که مدل مورد نظر را مورد استفاده قرار داده اند، می توان شناخت نسبتاً مناسبی از ویژگی ها و مشخصات مدل، خصوصاً در مورد واسنجی و تطابق روابط تجربی مورد استفاده با شرایط داخل کشور به دست آورده و میزان موفقیت مدل را در این پروژه ها برآورد نمود.

۳-۶-۶-۷- عمومیت فرض ها و حالت های پیش بینی شده در مدل

به علت استفاده مدل ها از فرضیات یا حالاتی که باعث ساده تر شدن معادلات می شوند، این مدل ها در سطوح مختلف پیچیدگی تقسیم بندی می شوند. بنابراین مدل هایی که خیلی ساده می باشند دارای عمومیت خیلی کمتری بوده و استفاده از آنها در حالات خاصی امکان پذیر می باشد. با افزایش پیچیدگی مدل ها این فرضیات عمومیت بیشتری یافته و از این مدل ها در موارد بیش تری استفاده می شود. همان طور که در بخش های قبلی نیز بیان شد استفاده از مدل های با میزان متفاوت فرضیات، بستگی به اهداف مطالعات داشته و در انتخاب باید یک نقطه بهینه بین هزینه ها و دقت ها مد نظر قرار گیرد.



۳-۶-۸- امکان ارتباط با سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ و تبادل اطلاعات با آن

یکی از امکانات بسیار مفید و کاربردی در بررسی و تحلیل فرآیندهایی که با طبیعت و جغرافیای منطقه سر و کار دارند، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌باشد. در برخی از مدل‌هایی که اخیراً توسعه داده شده‌اند، امکان ارتباط با این سامانه در نظر گرفته شده است، اما بسیاری از مدل‌ها فاقد این امکان می‌باشند. بنابراین، این ویژگی می‌تواند یکی از پارامترهای مطرح در انتخاب مدل باشد. در بخش‌های بعدی به نحوه‌ی استفاده از این معیارها به عنوان اصول راهنما در انتخاب مدل‌های مناسب پرداخته خواهد شد.

۳-۷- معرفی چند نرم‌افزار مناسب برای بررسی پدیده‌های مرتبط در مهندسی رودخانه

۳-۷-۱- کلیات

به‌طور کلی در این بخش برای انتخاب مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی پدیده مورد مطالعه چند معیار عمده در نظر گرفته شده است که عبارتند از اهداف مدل‌سازی، ابعاد مکانی و زمانی پدیده مورد مطالعه (یک‌بعدی، دوبعدی یا سه‌بعدی، پایدار یا ناپایدار)، قابلیت و نحوه دسترسی به مدل‌ها. براساس این معیارها برای مدل‌سازی هر پدیده چندین مدل انتخاب شده است که کاربر باید با توجه به دیگر معیارهایی که در زیر ارائه شده است، مدل مناسب مورد نیاز خود را انتخاب نماید.

این معیارها عبارتند از اهمیت مدل‌سازی، مقدار هزینه در نظر گرفته شده برای انجام شبیه‌سازی، دقت مورد نیاز برای مدل‌سازی‌ها، اطلاعات قابل دسترس برای اجرای مدل‌های مورد نظر، اطلاعات خروجی مورد نیاز و قابلیت دسترسی به مدل مورد نظر توسط کاربر. بهتر است که برای مقایسه بین مدل‌های مختلف و انتخاب گزینه مناسب از فرمی که در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است، استفاده نمود. با پر کردن فرم مورد نظر برای تمامی مدل‌ها و مقایسه آنها و نیز استفاده از روندی که در زیر برای انتخاب مدل مناسب ارائه شده، می‌توان مدل یا مدل‌های مناسب را انتخاب نمود. در ادامه برخی مدل‌های مختلف برای مدل‌سازی پدیده‌های مختلف معرفی شده و مزایا و محدودیت‌های آنها بیان شده است.

۳-۷-۲- روندیابی سیلاب

مدل‌هایی که برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها قابل کاربرد می‌باشند، عبارتند از:

CCHE1D, CCHE2D, HEC-RAS, HEC-HMS, FLUVIAL12, MIKE11, SMS 8

پنج مدل ابتدایی دارای قابلیت دسترسی آسان می‌باشند، اما دو مدل آخر اختصاصی بوده و برای استفاده از آنها باید به موسسه توسعه‌دهنده آنها سفارش داده شده و امتیاز استفاده از آنها خریداری شود. هر کدام از این مدل‌ها دارای دقت‌های متفاوتی بوده و لازم است که کاربر با توجه به اطلاعات قابل دسترس و دقت مورد نیاز مدل مناسب را انتخاب نماید.



۳-۷-۳- مدل سازی اثر الگوی جریان بر ریخت شناسی رودخانه

در این مدل ها پس از انجام مدل سازی جریان رودخانه، انتقال رسوب مدل شده و سپس تاثیر تغییرات نیمرخ بستر مدل می شود. به این معنی که بین مدل سازی جریان و انتقال رسوب یک حالت رفت و برگشتی وجود داشته و اندرکنش بین آنها در نظر گرفته می شود. مدل های معروفی که این قابلیت را دارا می باشند عبارتند از:

CCHE1D, MIKE11, CCHE2D, MIKE21, FLOW3D, SSIIM, HEC-RAS

۳-۷-۴- مدل سازی اثر سازه های هیدرولیکی بر الگوی جریان و ریخت شناسی رودخانه

در بسیاری از مدل های یک بعدی اثر سازه های هیدرولیکی مختلف بر روی الگوی جریان شبیه سازی می شود. اما تعداد کمی از این مدل ها ریخت شناسی رودخانه را مدل کرده و اثر این سازه ها را بر روی آن در نظر می گیرند. به عنوان مثال مدل HEC-RAS اگرچه قابلیت شبیه سازی یک بعدی اثر سازه های هیدرولیکی مختلف بر روی الگوی جریان و انتقال رسوب را دارد لیکن با توجه به عدم بررسی جریان های عرضی در آن، قادر به برآورد تاثیر این سازه ها بر تغییرات عرضی و ریخت شناسی رودخانه نمی باشد. مدل هایی که هم تاثیر سازه های هیدرولیکی و هم ریخت شناسی را در نظر می گیرند، عبارتند از:

CCHE1D, CCHE2D, FLOW3D, MIKE11

مدل شماره ۱: MIKE21
مولفه اول: هیدرودینامیک

ابعاد	مکانی: دو بعدی	زمانی: ناپایدار
مشخصات مدل	مدل هیدرودینامیک آب کم عمق، استفاده از روش تفاضل محدود برای انفصال معادلات، روش حل ضمنی معادلات	
تری و خشکی	در نظر می گیرد	جریان آب های زیر زمینی: در نظر نمی گیرد
اطلاعات اضافی	استفاده از مدل های مختلف آشفتگی، شبکه مستطیلی و مثلثی و منحنی الخط متعامد	

مولفه دوم: انتقال رسوب

نوع رسوب	رسوب چسبنده و غیر چسبنده
تعداد معادلات	۵ معادله تجربی برای پیش بینی انتقال بار بستر و بار معلق، حل معادله پخش - انتقال
ریخت شناسی	در نظر نمی گیرد.
دیگر خصوصیات	انتقال رسوب ناشی از جریان، جریان جزرومدی، جریان ناشی از موج

مولفه سوم: کلی

قابلیت دسترسی	قابل دسترس	پلتفرم	Windows
زمان اجرا	خوب	حمایت فنی	مناسب و قابل دسترس
مقبولیت	زیاد	لیست برنامه	عمومی نیست
مستند سازی	قوی و قابل دسترس	پس پردازنده	خوب، ارائه انیمیشن
پیش پردازنده	خوب	محدودیت ها	مدل سفارشی
دیگر خصوصیات	سرعت بالای محاسبات		

شکل ۳-۲۳- نمونه برگه ارزیابی مدل

۳-۷-۵- مدل سازی الگوی جریان و آبشستگی و رسوب گذاری اطراف سازه های هیدرولیکی

برای مدل سازی الگوی جریان، آبشستگی و رسوب گذاری در اطراف سازه های هیدرولیکی، مدل های زیر مطرح می باشند:

CCHE1D, FLOW3D, HEC - RAS, MIKE11

۳-۷-۶- مدل‌سازی کیفیت آب در رودخانه و مسایل زیست‌محیطی

به‌علت پخش سریع پارامترهای کیفی آب در جهات عمقی و عرضی، معمولاً مدل‌سازی کیفیت آب در رودخانه‌ها به‌صورت یک بعدی انجام می‌گیرد. از مدل‌های دو بعدی و سه‌بعدی بیش‌تر در مطالعات تحقیقاتی استفاده می‌شود. مدل‌های یک بعدی زیر برای مدل‌سازی کیفیت آب معرفی می‌شوند:

MIKE11, QUAL2E

در جدول (۳-۹) قابلیت‌های مختلف مدل‌های معرفی شده به‌صورت خلاصه ارائه شده است.

۳-۸-۱- بررسی مزایا و محدودیت‌های نرم‌افزارهای معرفی شده

قابلیت‌های مدل‌هایی که در بخش قبلی معرفی شده‌اند، در جدول (۳-۹) به‌صورت کلی معرفی شده‌اند. در بخش حاضر این مدل‌ها با جزئیات بیش‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر این قابلیت‌ها، مشخصات جزئی‌تر آنها شامل اطلاعات ورودی و خروجی، پارامترهای واسنجی، در بخش بعدی ارائه شده است. بنابراین کاربر با توجه به قابلیت‌های ارائه شده هر مدل، می‌تواند مدل مناسب را انتخاب نماید.

۳-۸-۱-۱- مدل STARS - BRI

۳-۸-۱-۱-۱- قابلیت‌ها

- یک مدل شبه دوبعدی که از مفهوم لوله‌های جریان برای شبیه‌سازی جریان آب و رسوب استفاده می‌کند
- محاسبه نیم‌رخ سطح آب در حالت بستر ثابت و در رودخانه‌ها، در صورتی که تغییرات تراز بستر ناچیز فرض گردد
- قابل کاربرد در شرایط زیربحرانی، فوق بحرانی و ترکیب این دو حالت، تحت پرش هیدرولیکی
- تحلیل جریان و رسوب در مجاری روباز با بستر متحرک
- تعیین فرسایش موضعی در پایه پل‌ها و دیواره‌های کناری پل‌ها با استفاده از ۵ روش مختلف
- محاسبات مسلح شدگی و شکستن لایه آرمور
- محاسبه جریان در محل بازشدگی پل‌ها با استفاده از گزینه هیدرولیک پل WSPRO
- محاسبه بیش‌ترین فرسایش در پایه پل‌ها با استفاده از معادلات متفاوت برای حالت‌های مختلف هندسه پایه پل
- بررسی مسایل جریان‌های جانبی ورودی و خروجی
- بررسی مسایل لایروبی با استفاده از خروج رسوب با جریان صفر در جهت جانبی
- بررسی مسایل گسیختگی سواحل با استفاده از ورود رسوب با جریان صفر از جهت جانبی



جدول ۳-۹- قابلیت مدل های معرفی شده

کیفیت آب	ریخت شناسی	رسوب	سازه ^۱	جریان	روند یابی سیلاب	ابعاد			مدل
						3D	2D	1D	
-	-	√	-	√	-	-	-	√	BRI - STARS
-	√	√	√	√	√	-	-	√	CCHE1D
-	√	√	-	√	-	-	√	-	CCHE2D
-	-	-	-	√	-	-	√	-	FLUENT
-	-	√	-	√	-	√	√	√	FLOW3D
-	-	√	-	√	√	-	-	√	FLUVIAL12
-	-	√	-	√	-	-	-	√	GSTARS3
-	-	√	-	√	-	-	-	√	HEC6
-	-	√	√	√	√	-	-	√	HEC - RAS
√	√	√	√	√	√	-	-	√	MIKE11
√	√	√	-	√	-	-	√	-	MIKE21
√	-	-	-	√	-	-	-	√	QUAL2E
-	-	√	-	√	√	√	√	√	SMS 8
√	√	√	-	√	-	√	-	-	SSIIM1,2

۳-۸-۱-۲- محدودیت ها

- با توجه به پایه اساسی هر مدل شبه دویبعدی، این مدل قابلیت شبیه سازی جریان های ثانویه را ندارد.
- اتصال رودخانه ها و همچنین تعریف جزایر میانی رودخانه، در این مدل بسط داده نشده است.
- مرزهای رودخانه در جهت جانبی ثابت فرض می شوند و تشکیل پیچ و خم های رودخانه ای^۲ قابل شبیه سازی نمی باشد.

۳-۸-۲- مدل CCHE1D

۳-۸-۲-۱- قابلیت ها

- مدل یک بعدی برای مدل سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب در شبکه های کانال
- محاسبه انتقال رسوب غیریکنواخت با استفاده از مدل غیرتعدلی انتقال
- محاسبه مقادیر فرسایش و رسوب گذاری با توجه به تغییرات هندسی مقاطع کانال، مشخصات بستر (شامل چورشدگی و مسلح شدن بستر) و فرآیندهای فرسایش جداره
- در نظر گرفتن یکپارچگی مدل سازی جریان کانال با مدل سازی فرآیندهای حوضه
- تعیین و ارزیابی ریخت شناسی رودخانه
- مدل سازی سازه های رودخانه ای و تاثیر آنها بر روی فرآیندهای رسوب گذاری
- مدل سازی جریان های ناپایدار در شبکه کانال های پیچیده
- استفاده از امکانات نرم افزار ArcView در اطلاعات ورودی و خروجی و نمایش گرافیکی

۱- ستون مدل سازی سازه در این جدول به مدلهایی اشاره دارد که امکان شبیه سازی سازه های معمول در مهندسی رودخانه (همچون سرریز و دریچه) را از طریق رابط گرافیکی و با توجه به معادلات تجربی موجود دارا هستند. بنابراین اگرچه در مدل های پیشرفته ای همچون FLUENT و CCHE2D امکان تحلیل الگوی جریان پیرامون هرگونه سازه ای وجود دارد لیکن به واسطه عدم وجود رابط گرافیکی مشخص در این خصوص علامت نخورده اند.

۳-۸-۲-۲- محدودیت‌ها

- این مدل در حال حاضر برای جریان‌های زیر بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه با توجه به یک بعدی بودن آن، در مواردی که پدیده لایه‌بندی^۱ در عمق مطرح می‌باشد و همچنین شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه کاربرد ندارد.

۳-۸-۳- مدل CCHE2D

۳-۸-۳-۱- قابلیت‌ها

- مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب در مجاری روباز
- توانایی شبیه‌سازی انتقال رسوب در حالت‌های غیریکنواخت و غیرتعادلی^۲
- توانایی کار با شبکه جابجا شده^۳ برای شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب
- محاسبه نیمرخ سطح آب در شرایط جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و بینابین
- محاسبه تاثیرات جریان‌ات ثانویه در انتقال بار بستر در مجاری روباز منحنی شکل
- قابلیت استفاده از رابط گرافیکی مناسب برای داده‌های ورودی و خروجی، شبکه‌بندی و تصحیح آن
- توانایی شبیه‌سازی جریان‌هایی که دارای چند ورودی و یا خروجی می‌باشند.
- استفاده از سه مدل آشفتگی در حالت متوسط‌گیری شده در عمق و در نتیجه توانایی کار در مناطق با جریان‌های چرخشی^۴ و مناطق نزدیک به سازه‌های هیدرولیکی
- شبیه‌سازی دقیق سیل گرفتگی و عقب نشینی سیل با توجه به معیار عمق بحرانی برای مناطق خشک و تر
- محاسبات مسلح شدگی و جور شدگی مصالح بستر
- توانایی جداسازی محاسبات بار بستر، بار معلق و تلفیق هم‌زمان آنها
- شبیه‌سازی رسوبات چسبنده و غیرچسبنده

۳-۸-۳-۲- محدودیت‌ها

- با توجه به دو بعدی بودن، مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های لایه‌بندی در عمق کاربرد ندارد.

۳-۸-۴- مدل FLOW3D

۳-۸-۴-۱- قابلیت‌ها

- مدل قوی در زمینه هیدرودینامیک محاسباتی برای مسایل یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی



- شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی: آب‌های کم عمق، کاویتاسیون، تلاطم، آبشستگی، کشش سطحی، جریان محیط‌های متخلخل و سطح آزاد آب
- استفاده از ۵ مدل آشفتگی، شامل طول اختلاط پراتل، مدل یک معادله‌ای، مدل $k-\epsilon$ ، مدل‌های RNG و مدل LES
- شبیه‌سازی فرسایش و ته‌نشینی رسوبات
- شبیه‌سازی سازه‌های مختلف هیدرولیکی نظیر پایه‌های پل، سرریزها، سیفون، دریچه کشویی و پارشال فلوم
- کاربرد مدل در مطالعات هوادهی در سرریزها، شکست سد، جریان بر روی پلکان، موج‌های کم ارتفاع

۳-۸-۲- محدودیت‌ها

- با توجه به نوع مدل‌های آشفتگی به کار رفته در مدل، نتایج آن در مجاورت موانع از دقت کافی برخوردار نیست.

۳-۸-۵- مدل FLUENT

۳-۸-۵-۱- قابلیت‌ها

- مدلی برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده به صورت دو بعدی و سه بعدی
- امکان تغییر شبکه و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرساختار یافته
- استفاده از شبکه‌های با المان‌های مثلثی و چهار ضلعی (برای هندسه‌های دو بعدی) و چهارضلعی، شش وجهی، هرمی یا گوه‌ای (برای هندسه‌های سه بعدی)
- به دست آوردن نتایج دقیق در ناحیه‌های با گرادیان‌های شدید با بهینه‌سازی حل و بهبود شبکه

۳-۸-۵-۲- محدودیت‌ها

- این مدل توانایی شبیه‌سازی انتقال رسوب را ندارد. شبیه‌سازی سطح آزاد در این مدل بسیار وقت گیر است.

۳-۸-۶- مدل FLUVIAL12

۳-۸-۶-۱- قابلیت‌ها

- مدل یک بعدی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب
- روندیابی جریان و رسوب در کانال‌های طبیعی و مصنوعی
- شبیه‌سازی تاثیرات ترکیبی هیدرولیک جریان، انتقال رسوب و تغییرات کانال برای یک دوره زمانی
- شبیه‌سازی تغییرات کانال شامل فرسایش و پرشدگی بیشتر، تغییرات عرض و تغییرات در توپوگرافی
- ارزیابی فرسایش عمومی در مقاطع پل، آورد رسوب، واکنش کانال به برداشت شن و ماسه و ایجاد تنگه
- استفاده از شش رابطه تجربی برای محاسبه بار رسوبی



۳-۸-۶-۲- محدودیت‌ها

- عدم شبیه‌سازی انتقال و ته نشینی ذرات با اندازه کوچک‌تر از 0.063 میلی متر
- عدم قابلیت گرافیکی در اطلاعات ورودی و خروجی
- این مدل تنها در رژیم‌های زیر بحرانی کاربرد دارد
- عدم بررسی دانه‌بندی در مقطع عرضی جریان (در هر مقطع فقط یک دانه‌بندی قابل تعریف است)
- انحنای مسیر به خوبی در این مدل قابل تعریف نیست لذا تنها برای شرایطی که هندسه مسیر دارای انحنای کمی است می‌توان از آن استفاده کرد
- قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه در این مدل وجود ندارد
- این مدل تنها در حالت مخزن تک شاخه‌ای می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد

۳-۸-۷- مدل GSTARS3**۳-۸-۷-۱- قابلیت‌ها**

- مدل شبه دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در بسترهای آبرفتی
- محاسبه نیمرخ سطح آب با و بدون انتقال رسوب
- محاسبه نیمرخ سطح آب در شرایط جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و بینابین
- انتقال رسوب و تغییرات طولی و عرضی بستر
- محاسبات مسلح شدگی و جورشدگی مصالح بستر
- محاسبه تغییرات در عرض و عمق مقطع براساس تئوری حداقل قدرت جریان (شبه سه‌بعدی)
- شبیه‌سازی رسوبات چسبنده و غیرچسبنده
- قابلیت ایجاد لایه‌های چند گانه برای بستر
- استفاده از ۱۵ رابطه برای محاسبه انتقال رسوب
- قابلیت تعریف حداکثر ۵ لوله جریان
- توانایی مدل کردن مخازن با شاخه‌های فرعی

۳-۸-۷-۲- محدودیت‌ها

با توجه به این که مدل شبه پایدار و شبه دو بعدی می‌باشد، برای جریان‌های متغیر سریع، جریان‌های ناپایدار، شرایطی که جریان دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشد و همچنین برای جریان‌های ثانویه کاربرد ندارد.

در این مدل بار بستر و بار معلق به صورت مجزا رفتار نمی‌کنند، لذا نمی‌تواند ته نشینی غیرمتعادل رسوب معلق را شبیه‌سازی کند.



۳-۸-۸-۸-۳ مدل HEC6**۳-۸-۸-۱-۱-۳ قابلیت‌ها**

- مدل یک بعدی برای شبیه سازی جریان و انتقال رسوب
- شبیه سازی بستر متحرک در رودخانه‌ها
- در نظر گرفتن پدیده مسلح شدن ذرات و از بین رفتن لایه محافظ
- فرسایش در پایین دست سد، تعیین محل و حجم رسوب گذاری در مخزن سد
- تغییرات دراز مدت فرسایش و رسوب گذاری ناشی از اصلاح کانال و رسوب گذاری در کانال‌های کشتیرانی
- شبیه سازی جریان‌های ماندگار

۳-۸-۸-۲-۲-۳ محدودیت‌ها

با توجه به این که مدل یک بعدی می‌باشد، توانایی شبیه سازی پدیده پیچانرودی یا توزیع رسوب در عرض رودخانه را ندارد.

۳-۸-۹-۸-۳ مدل HEC - RAS**۳-۸-۹-۱-۱-۳ قابلیت‌ها**

- مدل یک بعدی برای شبیه سازی جریان و انتقال رسوب
- محاسبه نیمرخ سطح آب
- شبیه سازی جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی
- شبیه سازی جریان‌های پایدار و ناپایدار
- شبیه سازی بستر متحرک
- ارتباط با سامانه اطلاعات جغرافیایی و استفاده وسیع از قابلیت‌های آن
- شبیه سازی انواع پل‌ها، آبگذرها، سرریزها، سازه‌های موجود در سیلابدشت و انواع کانال‌ها با شکل‌های مختلف
- در نظر گرفتن زبری متغیر در طول کانال و در مقاطع مختلف

۳-۸-۹-۲-۲-۳ محدودیت‌ها

- با توجه به این که مدل یک بعدی می‌باشد، توانایی شبیه سازی پدیده پیچانرودی یا توزیع رسوب در عرض رودخانه و سایر پدیده‌هایی با ماهیت دو بعدی و یا سه بعدی را ندارد.

**۳-۸-۱۰-۸-۳ مدل MIKE11****۳-۸-۱۰-۱-۱-۳ قابلیت‌ها**

- مدلی یک بعدی برای شبیه سازی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب

- روندیابی جریان در شبکه کانال‌ها و رودخانه‌ها در حالت‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی
- شبیه‌سازی جریان به صورت شبه دو بعدی در سیلابدشت
- ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری و شبیه‌سازی زهکش‌های سطحی
- بررسی تاثیر سازه‌های هیدرولیکی در تغییر نیمرخ سطح آب و بستر
- طراحی سامانه‌های کانال
- مطالعات جزر و مدی در رودخانه‌ها و خورها
- شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده و غیرچسبنده و تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه
- محاسبات انتقال رسوب در رسوبات لایه‌ای و غیریکنواخت
- شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها و سایر پیکره‌های آبی
- شبیه‌سازی بیش از ۱۲ پارامتر کیفی آب از جمله دما، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، باکتری کلیفرم، چرخه‌ی نیتروژن، چرخه‌ی فسفر و فلزات

۳-۸-۱۰-۲- محدودیت‌ها

- این مدل یک بعدی بوده و برای پدیده‌هایی که ماهیت دو بعدی و سه‌بعدی دارند، کاربرد ندارد. شبیه‌سازی فرسایش دیواره در مدل قابل انجام نمی‌باشد.

۳-۸-۱۱-۱- مدل MIKE21

۳-۸-۱۱-۱-۱- قابلیت‌ها

- مدلی دو بعدی در عمق برای شبیه‌سازی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب
- شبیه‌سازی انتقال رسوب، تشکیل دیون‌ها، تغییرات تراز بستر و مقاومت هیدرولیکی
- شبیه‌سازی جریان، انتقال رسوب چسبنده و غیرچسبنده، کیفیت آب و پخش و انتقال در رودخانه‌ها، خورها و دریاها
- در نظر گرفتن تری و خشکی
- استفاده از شبکه‌های مستطیلی، مثلثی و منحنی‌الخط متعامد
- در نظر گرفتن نیروی کوریولیس
- سرعت بالای محاسباتی مدل به‌علت استفاده از الگوهای حل مناسب
- مدل‌سازی ریخت‌شناسی رودخانه با استفاده از شبکه منحنی‌الخط متعامد

۳-۸-۱۱-۲- محدودیت‌ها

- با توجه به دو بعدی بودن مدل، قابلیت شبیه‌سازی پدیده لایه‌بندی در عمق وجود ندارد. قابلیت شبیه‌سازی مسایلی که کاملاً ماهیت سه‌بعدی دارند، نظیر جریان در مجاورت آبشکن‌ها وجود ندارد. با توجه به استفاده از مدل‌های صفر معادله‌ای در شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم در نواحی نزدیک دیواره از دقت کافی برخوردار نیست.



۳-۸-۱۲ - مدل QUAL2E

۳-۸-۱۲-۱ - قابلیت‌ها

- مدلی یک بعدی برای شبیه سازی کیفیت آب رودخانه‌ها و خورها
- شبیه سازی ۱۵ پارامتر کیفی در رودخانه‌ها از جمله، واکنش‌های عمده چرخه مواد مغذی، جلبک‌ها و گیاهان کف زنی و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، بازدمش اتمسفری و اثرهای آن بر میزان اکسیژن محلول و سه پارامتر پایدار و یک پارامتر غیرپایدار
- استفاده از سه نوع آنالیز عدم اطمینان شامل آنالیز خطای مرتبه اول، آنالیز حساسیت و شبیه سازی مونت کارلو
- پیش بینی تغییرات BOD, DO, دما، رشد جلبک‌ها تحت تاثیر مواد مغذی و آلی
- شبیه سازی کیفیت آب/ ایتروفیکشن، شبیه سازی آبراهه/ رودخانه، جریان یک بعدی، جریان شاخه‌ای، جریان‌های پایدار و شبه پایدار
- مدل سازی شوری، سیکل نیتروژن و فسفر، کلروفیل و اجزای بقایی و غیر بقایی
- سینتیک مرتبه اول اجزا

۳-۸-۱۲-۲ - محدودیت‌ها

- مدل قادر به شبیه سازی جریان‌های متلاطم و ناپایدار نمی‌باشد. به علاوه قابلیت شبیه سازی جریان‌هایی با ماهیت کاملاً دوبعدی و یا سه بعدی را ندارد.

۳-۸-۱۳ - مدل SMS 8.0

۳-۸-۱۳-۱ - قابلیت‌ها

- مدلی برای مدل سازی هیدرودینامیکی یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی
- شبیه سازی حرکت آلاینده‌ها و شوری
- ساختن شبکه‌های پیچیده و عظیم (در حد چندین هزار المان) با شکل‌های دلخواه
- استفاده از انواع شبکه‌های مختلف نظیر شبکه‌های منظم و نامنظم و منحنی الخط
- مدل‌های حمایت شونده توسط این مدل عبارتند از:
 - ERDC - WES {TABS - MD (GFGEN, RMA2, RMA4, RMA10, SED2D - WES), ADCIRC, GWAVE, STWAVE, HIVEL2D, CH3D}
 - HecRas - FESWMS - Flo2DH - BRI - STARS - M2D - GHOST
 - Generic 2D Finite Element Interface - Generic 2D Finite Difference Interface
- توانایی دریافت و ارسال فایل‌های با پسوند DXF مربوط به نرم افزار Autocad

۳-۸-۱۴ - مدل SSIIM

۳-۸-۱۴-۱ - قابلیت‌ها

- مدلی سه بعدی برای شبیه سازی جریان، رسوب و به طور محدود کیفیت آب



- استفاده از شبکه سه‌بعدی تقریباً غیرمتعامد همراه با مدل آشفتگی $k-\epsilon$
- توانایی مدل‌سازی انتقال رسوبات با بستر متحرک در هندسه‌های دلخواه و پیچیده رودخانه و کانال
- قابلیت در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف ذرات، جور شدگی ذرات، بار بستر و بار معلق، فرم‌های بستر و بسترهای شیبدار
- در نظر گرفتن تری و خشکی در شبکه‌های غیرساختاریافته
- در نظر گرفتن تغییرات چگالی و تاثیر غلظت رسوب بر جریان
- رابطه گرافیکی مناسب برای مشاهده خروجی‌های مدل

۳-۸-۱۴-۲- محدودیت‌ها

- صرف‌نظر کردن از ترم‌های انتقالی غیرمتعامد
- ثابت بودن لزجت سینماتیکی و چگالی جریان
- قائم بودن خطوط شبکه در جهت قائم
- عدم توانایی تولید شبکه مناسب برای هندسه‌های پیچیده

۳-۹- چگونگی استفاده از نرم‌افزارهای معرفی شده

۳-۹-۱- کلیات

برای بهره‌گیری از تمامی قابلیت‌های یک مدل، لازم است که کاربر با نحوه کارکرد مدل، محدودیت‌های مدل، معادلات مورد استفاده، نحوه منفصل‌سازی و روش حل آنها، پارامترهای واسنجی و نیز نوع خروجی‌های مدل آشنایی کامل داشته باشد. امروزه پوسته گرافیکی نرم‌افزارها معمولاً طوری طراحی می‌شود که منوهای مورد استفاده در آنها برای مدل‌سازی به ترتیب اولویت چیده شود تا کاربر به راحتی بتواند روند انجام محاسبات را پیش‌بینی نماید و این امر باعث افزایش مقبولیت و کاربرد دوست بودن این نرم‌افزارها می‌شود. در ادامه نحوه استفاده از نرم‌افزارها به‌طور کلی بیان شده و سپس روند استفاده از نرم‌افزارهایی که در بخش قبلی معرفی شده‌اند، به‌صورت جزئی‌تر بررسی شده و در نهایت کاربردهای نرم‌افزار مورد نظر در پروژه‌های مختلف ارائه می‌شود.

۳-۹-۲- روش‌های جمع‌آوری آمار و اطلاعات پایه در مطالعات مهندسی رودخانه

۳-۹-۲-۱- بازدیدهای صحرائی از مسیر رودخانه

این بازدیدها اطلاعاتی از قبیل پیکربندی مسیر رودخانه (شکل پلان)، مشخصات مقاطع عرضی و شیب رودخانه، مواد و مصالح بستر و کناره‌ها، بده جریان، خصوصیات رسوب و کیفیت آن، چگونگی بهره‌برداری از منابع رودخانه‌ای، کاربری اراضی حاشیه رودخانه‌ها، وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه و مسایل اجتماعی و زیست‌محیطی آن را به‌دست می‌دهد. در شرایطی که اطلاعات ثبت شده وجود نداشته باشد، افرادی که در حاشیه رودخانه‌ها زندگی می‌کنند، معمولاً بهترین اطلاعات را در مورد ترازهای سطح آب و سیلاب‌های گذشته در اختیار دارند.

۳-۹-۲-۲- بازدیدها و بررسی ایستگاه‌های هواشناسی، آب‌سنجی و رسوب‌سنجی محدوده مورد مطالعه

در این بازدیدها مکان ایستگاه‌ها و سرشاخه‌های آن روی نقشه مشخص می‌شود و در صورت لزوم پیشنهاد افزایش تعداد ایستگاه‌ها یا تجهیز ایستگاه‌های موجود ارائه می‌شود. از دیگر اطلاعات پایه مورد نیاز می‌توان به آمار و اطلاعات، گزارش‌ها، نقشه‌ها، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای اشاره کرد.

۳-۹-۳- آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های فیزیکی و ریاضی، به مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده نیاز می‌باشد. بخشی از اطلاعات ممکن است موجود باشند و بخشی نیز از اندازه‌گیری‌های صحرایی تهیه می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده ممکن است به صورت خام مورد استفاده قرار گیرند یا نیاز به پردازش و تحلیل داشته باشند. جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های صحرایی، نقش مهمی در واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های فیزیکی و ریاضی دارد. با توجه به شرایط مدل، داده‌های متفاوتی برای اجرای مدل مورد نیاز است، اما آنها را می‌توان در حالت کلی به صورت زیر طبقه‌بندی کرد.

۳-۹-۳-۱- داده‌های هندسی

این داده‌ها شامل پلان، مقاطع عرضی و طولی رودخانه، فاصله بین مقاطع، شیب رودخانه، موقعیت و مشخصات سازه‌های هیدرولیکی در مقاطع مختلف می‌باشند. این داده‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و یا برداشت‌های صحرایی تعیین می‌گردند. تعداد مقاطع عرضی بستگی به تغییرات شکل مقطع در طول رودخانه و دقت مورد نیاز در مطالعات دارد. در هنگام برداشت اطلاعات مقاطع عرضی باید به این نکته توجه شود که علاوه بر مقطع اصلی، سیلابدشت طرفین به اندازه کافی برداشت شود. در مدل‌های دو و سه‌بعدی این اطلاعات به صورت یک ماتریس بوده که شامل طول و عرض و همچنین ارتفاع و یا عمق نقاط می‌باشد. اطلاعات هیدروگرافی معمولاً با استفاده از عملیات نقشه‌برداری و هیدروگرافی، استفاده از نقشه‌های موجود و یا استفاده و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای (به صورت محدود) قابل دسترس می‌باشد.

داده‌های ضریب زبری در این گروه قرار می‌گیرد. ضریب زبری مشتمل بر دو قسمت است. بخشی از زبری مربوط به مصالح بستر که بیش‌تر با استفاده از مشخصات منحنی دانه‌بندی مصالح بستر و با استفاده از روابط تجربی موجود قابل محاسبه است. بخشی از ضریب زبری نیز به فرم بستر، پوشش گیاهی و موانع موجود در مقطع بستگی دارد، که در این خصوص نیز پیشنهادها و روابط مختلفی وجود دارد. ضریب زبری تخمین زده شده با استفاده از بررسی مرحله واسنجی تدقیق می‌شود.

۳-۹-۳-۲- داده‌های هیدرولوژیکی

این داده‌ها معمولاً شامل جریان ورودی و خروجی از بازه مورد مطالعه می‌شود که بسته به شرایط حاکم بر مدل (جریان ماندگار یا غیر ماندگار) یا اطلاعات در دسترس (بده، تراز سطح آب، آبنمود، رابطه بده - تراز سطح آب) به عنوان شرایط مرزی در مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل‌های جریان ماندگار، بده ثابت، تراز سطح آب ثابت و یا رابطه بده - تراز سطح آب به عنوان شرایط مرزی جریان و اطلاعات ورودی در مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل‌های جریان غیر ماندگار آبنمود جریان (بده - زمان یا تراز سطح آب - زمان یا رابطه بده - تراز سطح آب) به عنوان شرایط مرزی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این داده‌ها معمولاً از

طریق ایستگاه‌های آب سنجی که دارای تجهیزات ثبت تراز سطح آب و سرعت جریان می‌باشند، تهیه می‌شوند. برای رودخانه‌های جزر و مدی لازم است این اندازه‌گیری‌ها در دوره‌های زمانی کهکشند^۱ و مهکشند^۲ انجام شود تا این شرایط مرزی همراه با شرایط اولیه در محاسبات مدل در نظر گرفته شود. برخی از خواص آب مانند جرم مخصوص و درجه حرارت نیز به عنوان داده‌های ورودی مدل‌ها مورد نیاز می‌باشد که با اندازه‌گیری تعیین می‌شود.

۳-۹-۳- داده‌های رسوب

داده‌های رسوب در مدل‌ها به صورت داده‌های عمومی و یا شرایط مرزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دانه‌بندی رسوبات بستر، بار بستر و بار معلق، درصد رسوبات چسبنده و غیرچسبنده، جرم مخصوص و چگالی رسوبات به صورت داده‌های عمومی رسوب در مدل‌ها استفاده می‌گردد. غلظت یا بده رسوبات معلق و بار بستر (ثابت یا تابعی از زمان)، رابطه بده جریان و بده رسوب و یا تغییرات بستر در یک مقطع مشخص (ثابت یا تابعی از زمان) به‌عنوان شرایط مرزی جریان رسوب در مدل‌ها استفاده می‌شوند. این داده‌ها معمولاً از طریق نمونه‌برداری مصالح بستر و انجام آزمایش‌های لازم، نمونه‌گیری از جریان همراه با رسوب و یا با استفاده از تجهیزات ثبت غلظت رسوبات تعیین می‌گردند. برای رودخانه‌های با رسوبات چسبنده و ریزدانه لازم است تغییرات غلظت رسوبات در بازه‌های زمانی مشخص، حداقل در سه نقطه ابتدا، انتها و نقطه واسنجی در طول بازه اندازه‌گیری شود.

۳-۹-۳-۴- داده‌های کیفیت آب

از داده‌های مورد نیاز در مطالعات کیفیت آب می‌توان به نوع مولفه کیفیت آب، داده‌های بارهای نقطه‌ای فاضلاب ورودی به رودخانه‌ها، بارهای غیرنقطه‌ای نظیر داده‌های رواناب شهری، پارامترهای هواشناسی و داده‌های کاربری زمین اشاره کرد. در ادامه و به تفکیک هر نرم‌افزار مثال‌هایی جهت صحت‌سنجی، نمونه داده‌های خروجی و مثال‌هایی از کاربرد مدل‌ها در موارد مشابه ارائه می‌شود. در این مثال‌ها تنها برخی از نتایج ارائه شده است.

روند مدل‌سازی در تمامی مدل‌ها، تقریباً یکسان است. مدل‌سازی شامل تولید شبکه، انتخاب پارامترهای مناسب برای حل با توجه به پدیده مورد بررسی، لحاظ کردن شرایط مرزی و اولیه مناسب، واسنجی و صحت‌سنجی مدل می‌باشد. لذا به منظور پرهیز از تکرار، روند مدل‌سازی برای هریک از مدل‌ها به‌طور جداگانه ذکر نشده است.

۳-۹-۴- کاربرد مدل‌ها

۳-۹-۴-۱- مدل BRI - STARS

- مدل جریان

داده‌های ورودی: هندسه مجرای روباز، ضریب زبری، اطلاعات تراز کف رودخانه، افت‌های انرژی (موضعی، بازشدگی یا تنگ‌شدگی)، شرایط اولیه، شرایط مرزی هیدرولیکی (هیدروگراف بده، منحنی بده - اشل)، گام زمانی شبیه‌سازی پارامتر واسنجی: ضریب زبری، ضرایب بازشدگی و تنگ‌شدگی

داده‌های خروجی: نیمرخ سطح آب، سرعت جریان

- مدل انتقال رسوب

داده‌های ورودی: انتخاب معادلات انتقال رسوب، بده رسوب، دمای آب، تعداد کلاس اندازه ذرات، مشخصات ذرات رسوبی (اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات)، ضخامت لایه فعال، جریان رسوب ورودی جانبی، معادله آشفستگی پایه و کوله پل، پارامترهای آشفستگی پایه پل و ضرایب معادلات

پارامتر واسنجی: ضریب زبری، ضریب افت انرژی، فاصله بین مقاطع و تعداد لوله‌های جریان

داده‌های خروجی: تغییرات تراز کف رودخانه، فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف پایه‌ها و کوله‌های پل

کاربرد: شبیه‌سازی انتقال رسوب در رودخانه ارس و محدوده‌ی پل تاریخی جلفا [۱۱]

هدف مطالعه: بررسی تغییرات رودخانه در تراز و کناره‌ها بر اثر احداث چاله‌های فرضی برداشت مصالح در حجم‌ها و فواصل

مختلف نسبت به پل و در نهایت تعیین حجم و فاصله‌ی بهینه‌ی برداشت مصالح از پل

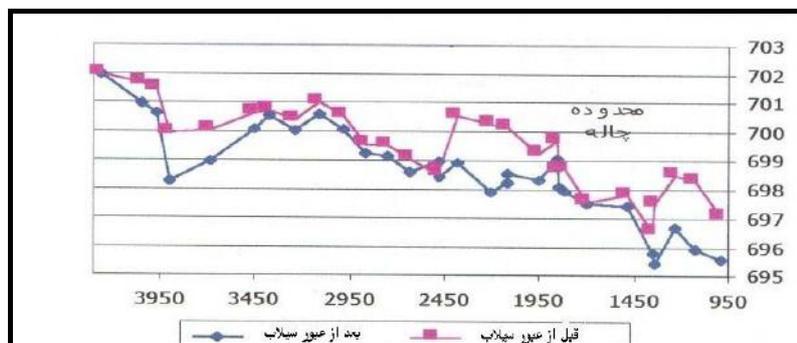
مشخصات مقاطع عرضی: در محدوده مطالعاتی تعداد ۳۸ مقطع عرضی و به طور متوسط با فاصله ۱۱۰ متر از یکدیگر برداشت شده است.

نتایج: نتایج به‌دست آمده در قالب نمودارهای نیمرخ سطح آب، رسوب‌گذاری و کف‌کنی در مکان‌های مختلف بوده که نمونه‌ای از

آن در شکل (۳-۲۴) نشان داده شده است.

توصیه‌ها: پارامترهای مهم برای واسنجی مدل، ضریب افت انرژی ناشی از خم، فاصله بین مقاطع و تعداد لوله‌های جریان بوده

که در این شرایط ۵ لوله جریان توصیه شده است.



شکل ۳-۲۴ - تغییرات نیمرخ طولی برای گودالی به عمق ۱ متر در ۲۵۰ متری پایین دست پل [۱۱]

۳-۹-۲-۲- مدل CCHE2D

- مدل هیدرودینامیک

داده‌های ورودی: هیدروگرافی، زمان شبیه‌سازی، شرایط اولیه و شرایط مرزی، اعماق تری و خشکی، تراز اولیه سطح آب و زبری

بستر و کناره‌ها

پارامترهای واسنجی: مقاومت بستر (ضریب مانینگ)

داده‌های خروجی: تراز سطح آب، مولفه‌های سرعت، توزیع تنش برشی، توزیع لزجت گردابه‌ای مدل رسوب غیرچسبنده

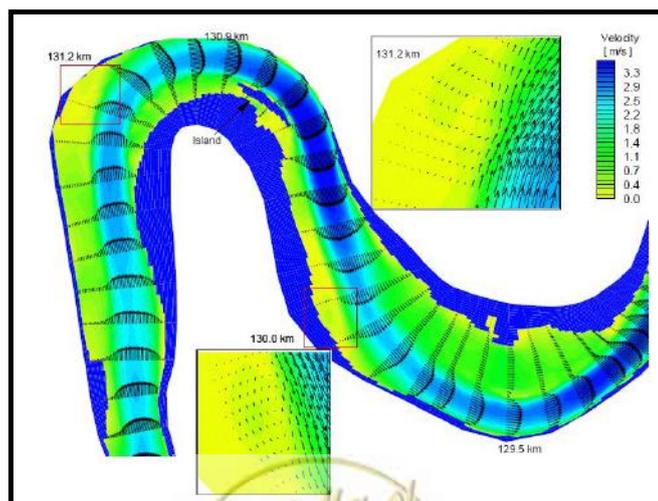


داده‌های ورودی: مشخصات جریان (بده یا هیدروگراف ورودی، تغییرات تراز آب مرز خروجی)، مشخصات رسوب بستر (منحنی دانه‌بندی بار بستر و بار معلق، چگالی رسوبات، دمای آب، تخلخل)

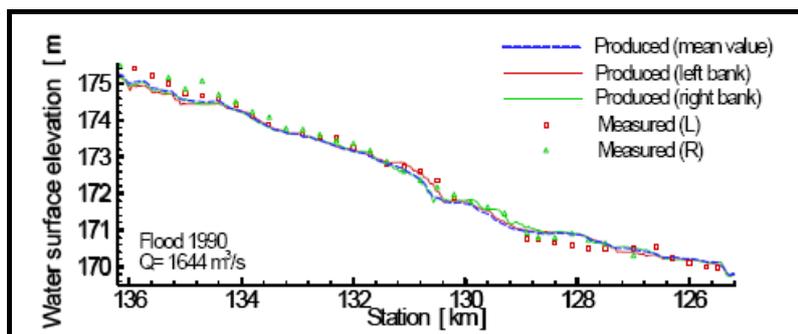
داده‌های خروجی: توزیع غلظت بار معلق، توزیع نرخ بار بستر، تغییرات تراز بستر و توزیع جدید دانه‌بندی در کل میدان کاربرد: شبیه‌سازی جریان ناپایدار در رودخانه Neckar آلمان [۳۷]

هدف مطالعه: شبیه‌سازی الگوی جریان ناپایدار به منظور پیش‌بینی تغییرات سطح آب و نیز میدان سرعت مشخصات محدوده مورد مطالعه: بده رودخانه از ۱۴/۱ متر مکعب بر ثانیه تا ۱۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه در زمان‌های مختلف متغیر بوده و بده متوسط آن ۸۸/۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. مصالح بستر در بازه مورد مطالعه غیریکنواخت بوده و از شن بزرگ تا ماسه و رس ریز از بالادست به پایین دست تغییر می‌کند. هیدروگراف بالادست رودخانه به عنوان شرط مرزی ورودی استفاده شده و به‌خاطر وجود یک مخزن در انتهای رودخانه مقدار ثابت ۱۶۹/۷ متر به عنوان تراز آب در پایین دست مدل در نظر گرفته شده است. نتایج: متوسط اختلاف بین نتایج عددی و صحرایی تراز سطح آب برای سیلاب‌های سال‌های ۱۹۹۳، ۱۹۹۰ و ۱۹۷۸ به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۱۳ و ۰/۱۷ متر می‌باشد. حداکثر اختلاف برابر ۰/۲۷ متر برای بده ۹۵۸ متر مکعب بر ثانیه در سال ۱۹۹۳ می‌باشد. میدان جریان شبیه‌سازی شده برای حداکثر سیلاب سال ۱۹۹۰ که معادل ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، در شکل (۳-۲۵) ارائه شده است. نیمرخ طولی سطح آب بده ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه در امتداد دو جداره رودخانه در شکل (۳-۲۶) ارائه شده و نتایج مدل عددی با نتایج صحرایی مقایسه شده است.

توصیه‌ها: ضرایب زبری در مجرای اصلی که متشکل از رس ریز تا شن درشت از پایین دست به بالادست متغیر بوده، به ترتیب از ۰/۱۷ تا ۰/۳۱ تعیین شده و در سیلاب‌دشت، محدوده تغییرات از ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد CCHE2D ابزار مناسبی در مهندسی هیدرولیک به منظور مطالعه تغییرات سطح آزاد با زمان، جریان‌های متلاطم، انتقال رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی در بسترهای رسوبی است.



شکل ۳-۲۵- الگوی جریان شبیه‌سازی شده در رودخانه Neckar آلمان به ازای بده ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه [۳۷]



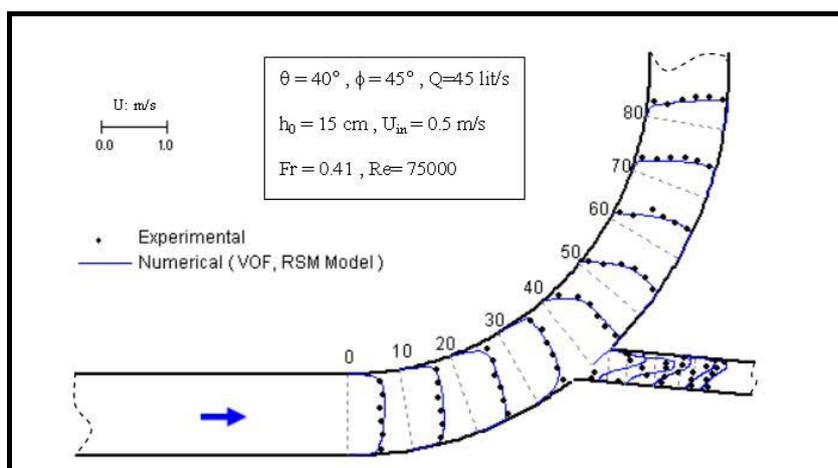
شکل ۳-۲۶- مقایسه نیمرخ طولی سطح آب برای بده ۱۶۴۴ متر مکعب بر ثانیه در رودخانه Neckar [۳۷]

۳-۹-۳-۳- مدل FLUENT

- داده‌های ورودی: ابعاد مساله و دقت آن (دوبعدی یا سه‌بعدی و دقت معمولی یا مرتبه دوم)، شبکه حل، نوع مدل شامل مدل‌های حل پایدار یا ناپایدار، مدل‌های آشفتگی (و ضرایب مربوط به هریک از آنها)، نوع و مشخصات مواد مورد نظر (شامل جامد یا سیال بودن، چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارت و ...)، تعریف فازها و مواد مربوط به هریک و ضرایب مربوط به اندرکنش بین آنها، شرایط مرزی شامل مرز جامد (و مشخصات مربوط همچون سرعت مرز، زبری، تشعشع و ...)، مرز سرعت ورودی (و مشخصات مربوط همچون مقدار و جهت سرعت ورودی و پارامترهای تلاطم بسته به نوع انتخاب در آن)، تقارن، خروجی، فشار ورودی، تعریف پارامترهای جانبی همچون مرزهای پرئودیک، تعیین شرایط حل (شامل ضرایب زیرتخفیف، معادلات مورد نظر برای حل، طرح‌های مورد نظر برای حل هریک از معادلات، شرایط اصلاح شبکه دینامیک و محدودیت‌های حل، شرایط آغازین و مقادیر پارامترهای مختلف در آن)، تعیین شرایط حل شامل گام زمانی، تعریف پارامترهای لازم برای گام متغیر و تعداد تکرار در هر گام زمانی
- پارامترهای واسنجی: ترم‌های آشفتگی در مرزها، ارتفاع زبری
- داده‌های خروجی: نمایش خطوط هم تراز تمامی متغیرها، بردارهای سرعت، مسیر حرکت ذرات فرضی، نمایش پارامترها در نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی
- کاربرد: مدل فیزیکی آبیگری جانبی از قوس [۱۲]
- هدف مطالعه: یافتن بهترین شرایط برای آبیگری از قوس ۱۸۰ درجه
- مشخصات محدوده مورد مطالعه: مطالعه مرتبط با آزمایشات انجام شده بر روی فلوم ۱۸۰ درجه می‌باشد. مقطع عرضی کانال به صورت مربعی با ابعاد 60×60 سانتی‌متر بوده و شعاع مرکزی آن $2/3$ متر می‌باشد. طول کانال‌های بالادست و پایین دست به ترتیب برابر $7/2$ و $3/5$ متر می‌باشد. بده و عمق جریان به ترتیب ۴۵ لیتر بر ثانیه و ۱۵ سانتی‌متر بوده است.
- نتایج: شکل (۳-۲۷) نشانگر نحوه توزیع سرعت در نزدیکی سطح آب در راستای کانال اصلی و نیز آبیگر جانبی می‌باشد. نتایج حاصل از این مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و همان طوری که شکل (۳-۲۷) نشان می‌دهد هماهنگی معقولی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. نتیجه بسیار مهمی که از کاربرد این نرم‌افزار حاصل شده، درک تفاوت اساسی ساختار تقسیم جریان در داخل کانال اصلی در دو حالت آبیگری از مسیر مستقیم و مسیر قوسی می‌باشد.

به طوری که در آگیری از قوس رودخانه، محدوده گسترش صفحه تقسیم جریان، در سطح آب بیش تر از کف می باشد که این حالت کاملاً عکس حالت آگیری از مسیر مستقیم می باشد.

- توصیه ها: با توجه به نتایج، بهتر است که در ناحیه های شکل گیری ناحیه چرخشی از مدل آشفستگی RSM یا $k-\omega$ استفاده شود. تجربه کاربران این نرم افزار نشان داده است کاربرد آن در شبیه سازی الگوی جریان حول سازه های رودخانه ای به منظور شناخت مکانیزم الگوی جریان بسیار سودمند است، اما شبیه سازی تغییرات سطح آزاد علی رغم ارائه نتایج نسبتاً دقیق مستلزم صرف هزینه بسیار از نظر زمانی است.



شکل ۳-۲۷- مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی Fluent با نتایج آزمایشگاهی [۱۲]

۳-۹-۴- مدل FLOW3D

- داده های ورودی: زمان شبیه سازی، تعداد سیالات (شامل یک یا دو سیال)، حالت جریان (تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر)، لزجت سیال، هندسه یا شبکه مورد استفاده، شرایط مرزی (فشار ثابت، سرعت ثابت، مرز خروجی، دیوار، تقارن و مرز متناوب)، شرایط اولیه، نوع الگوی حل معادلات و مدل آشفستگی

- پارامتر واسنجی: ارتفاع زبری

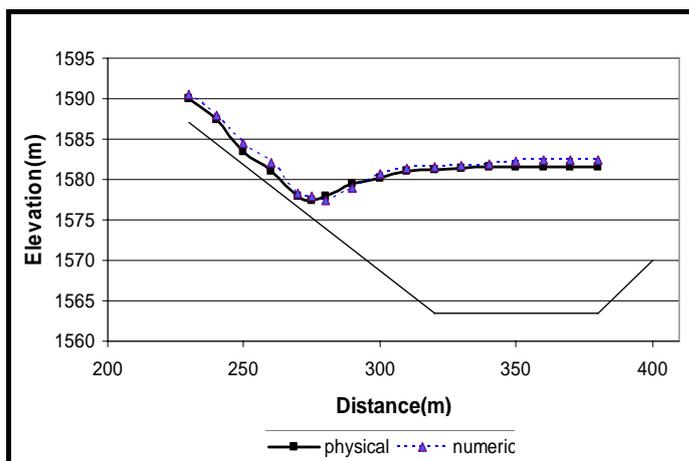
- داده های خروجی: تراز سطح آب، سرعت در جهات مختلف، لزجت آشفستگی، انرژی آشفستگی، کسر سطحی و حجمی و خطوط جریان

- کاربرد: مدل فیزیکی سد مخزنی تالوار [۱۳]

- هدف مطالعه: شبیه سازی حوضچه آرامش سد مخزنی تالوار

- مشخصات محدوده مورد مطالعه: این سد در جنوب غربی شهرستان زنجان احداث شده است. سد از نوع خاکی با هسته رسی بوده که ارتفاع تاج آن از کف رودخانه ۷۷ متر و حجم مخزن آن در تراز نرمال بهره برداری حدود ۵۰۰ میلیون متر مکعب می باشد. بده طراحی حوضچه آرامش ۷۳۷ متر مکعب بر ثانیه و ابعاد آن ۱۵ × ۷۳/۵ (عرض × طول) متر مربع می باشد.

نتایج: نتایج خروجی مدل به صورت گرافیکی شامل بردارهای سرعت، تراز سطح آزاد جریان و فشار ارائه شده است. مقایسه نتایج سرعت اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در ابتدای پرش و ورودی حوضچه آرامش نشان می دهد که اختلاف آنها از حدود ۰/۵ متر بر ثانیه تجاوز نمی کند. شکل (۳-۲۸) نمونه ای از نتایج خروجی را نشان می دهد.



شکل ۳-۲۸ - مقایسه نتایج عددی و فیزیکی نیمرخ سطح آزاد جریان برای بده $318 \text{ m}^3/\text{s}$ [۱۳]

۳-۹-۴-۵- مدل FLUVIAL 12

— داده‌های ورودی

- معادله انتقال رسوب مربوط، روش برآورد نیمرخ سطح آب (روش استاندارد، روندیابی موج دینامیک)، دمای آب، هیدروگراف(های) ورودی جریان، مشخصات جریان ورودی و رسوب شاخه‌های انشعابی (حداکثر ۹ شاخه)، زمان شروع و پایان هیدروگراف و گام زمانی شبیه‌سازی
- محدوده‌های با بستر ثابت، ضخامت لایه فرسایش‌پذیر، درصد ذرات رسوبی، ضرایب فرسایش سیلابدشت سمت چپ و راست، تعیین شرایط عدم فرسایش در مقاطع و عمق لایه غیر قابل فرسایش
- شیب مقطع پایین دست، مشخصات مقاطع، فاصله بین مقاطع، شعاع انحنای مقاطع و ضریب مانینگ مقاطع
- مقدار برداشت رسوب از مقاطع^۱، مشخصات چاله برداشت شامل ایستگاه محل برداشت، عمق چاله و شیب طرفین چاله دوزنقه‌ای شکل

— پارامترهای واسنجی: ضریب مانینگ، گام زمانی، ضخامت لایه فعال، معادله انتقال رسوب

- داده‌های خروجی: تراز سطح آب، عرض جریان، عمق جریان، سرعت متوسط در هر مقطع عرضی، شیب خط انرژی، بده بار بستر برای هر محدوده دانه‌بندی، عدد فرود در هر مقطع، مقدار رسوب برداشت شده از هر مقطع، مقطع عرضی تغییر یافته

— کاربرد: شبیه‌سازی برداشت شن و ماسه در رودخانه میناب [۱۴]

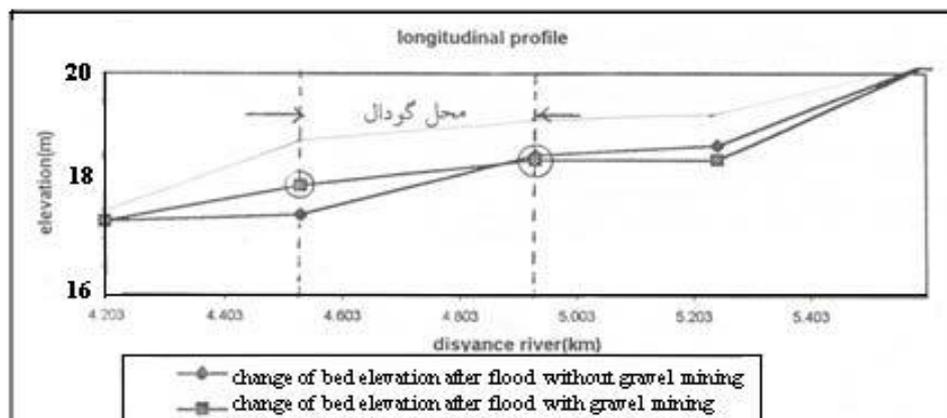
— هدف مطالعه: برآورد تاثیر برداشت شن و ماسه بر رفتار رودخانه

- مشخصات محدوده مورد مطالعه: رودخانه میناب مهم‌ترین رودخانه استان هرمزگان بوده که حوضه آبریز آن دارای وسعتی در حدود 10519 کیلومتر مربع است. متوسط بده رودخانه در دوره آماری 36 ساله در حدود $10/8$ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. دانه‌بندی مواد بستر در بالادست به صورت بستر شنی و در انتهای بازه به صورت مواد ریزدانه شامل رس و سیلت و ماسه ریز می‌باشد.

- نتایج: در شکل (۳-۲۹) نمونه‌ای از نتایج به‌دست آمده از کاربرد مدل ارائه شده است.
- توصیه‌ها: تجربه کاربران این نرم‌افزار نشان می‌دهد نوع معادله رسوب انتخابی تاثیر زیادی بر نتایج مدل دارد.

۳-۹-۶- مدل GSTARS3

- داده‌های ورودی: ابعاد مساله (شامل تعداد لوله‌های جریان، کلاس رسوبات، تعداد لایه‌های بستر)، شرایط حل شامل هیدرولیک جریان (پایدار، ناپایدار با موج یکنواخت یا دینامیک)، روش حل انتقال رسوبات (پایدار و ناپایدار و ضرایب مربوط)، شرایط فرسایش



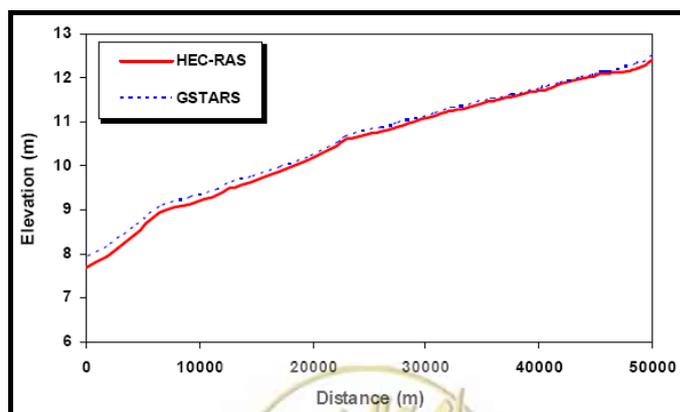
شکل ۳-۲۹- تاثیر گودال برداشت شن و ماسه بر نیمرخ طولی بستر [۱۴]

- محدوده‌های با بستر ثابت، ضخامت لایه فرسایش پذیر، درصد ذرات رسوبی، ضرایب فرسایش سیلابدشت سمت چپ و راست، تعیین شرایط عدم فرسایش در مقاطع و عمق لایه غیر قابل فرسایش
- مشخصات مقاطع، فاصله بین مقاطع، محدوده‌های غیرفعال هر مقطع برای جریان، محدوده‌های غیرفعال پایدار جریان، محدوده‌های خشک جریان، محدوده‌های بلوک شده، افت انرژی در هر مقطع و توزیع ضریب مانینگ در مقاطع
- مشخصات رسوبات معمولی و چسبنده (شامل سرعت سقوط، تحکیم، چگالی توده خشک و غیره)، گروه‌بندی ذرات، شرایط مرزی انتقال رسوب در بالادست (شامل اتصال، فرمولاسیون، مقدار رسوب در مقابل بده جریان یا زمان)، توزیع ذرات رسوب ورودی، تعداد و مشخصات رسوبات در میانه بازه و مشخصات بستر (شامل ضخامت، دانه‌بندی، محدوده دانه‌بندی ذرات)
- شرط مرزی بالادست (شامل تغییرات تراز یا جریان در زمان و یا محل اتصال)، شرط مرزی پایین دست (شامل اتصال، بده - اشل، تغییرات بده در زمان، سرریز، عمق نرمال، بده - اشل با ضرایب خاص) و شرایط مرزی میانی (شامل بده - اشل، تغییرات بده در زمان، سرریز، عمق نرمال، پل و دریچه شعاعی)
- پارامترهای واسنجی: ضریب مانینگ، گام زمانی، ضخامت لایه فعال، ضرایب بازشدگی و جمع شدگی جریان
- داده‌های خروجی: مقاطع (هندسه مقاطع تغییر شکل یافته)، نیمرخ بستر، تراز سطح آب، بده جریان، جریان‌های انحرافی، تنش برشی بستر، دانه‌بندی مقاطع، حجم مصالح در رودخانه‌های فرعی، حجم تجمعی مصالح در مجرای اصلی و سیلابدشت‌ها، غلظت رسوب در هر محدوده دانه‌بندی و هر زیرمقطع و ضخامت لایه بستر
- کاربرد: پیش‌بینی روند فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز [۱۵]

- هدف مطالعه: بررسی روند رسوب‌گذاری رودخانه کارون و تغییرات ریخت‌شناسی در محدوده شهر اهواز در حد فاصل بین ایستگاه اهواز تا فارسیات در بازه‌ای به طول تقریبی ۴۲ کیلومتر
- مشخصات محدوده مورد مطالعه: مکانیسم هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه کارون به ویژه در محدوده شهری اهواز دارای پیچیدگی بسیار زیادی است. برای مثال احداث پل‌ها با پایه‌های متعدد و جزایر پوشیده از گیاه باعث رسوب‌گذاری شدید در مقطع اصلی رودخانه شده است. در شکل (۳-۳۰) وضعیت رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز نشان داده شده است. رودخانه در این بازه به شدت پیچانرودی است.
- نتایج: نتایج واسنجی و صحت‌سنجی رسوبی در شکل‌های (۳-۳۱) و (۳-۳۲) مشاهده می‌شود. شکل (۳-۳۲) نتیجه مقایسه را برای بده ۱۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد.
- توصیه‌ها: نتایج مدل نشان می‌دهد که استفاده از رابطه میر - پیتر در این رودخانه منجر به نتایج صحیحی نخواهد شد، در حالی که رابطه Ackers - White انطباق خوبی با اندازه‌گیری‌ها دارد. ضریب زبری 0.3 در این محدوده مناسب می‌باشد.

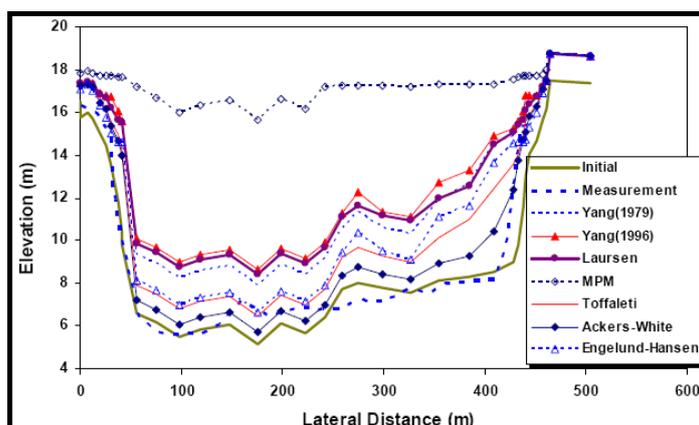


شکل ۳-۳۰- رسوب‌گذاری در بستر رودخانه کارون و تشکیل جزایر رسوبی [۱۵]



شکل ۳-۳۱- واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی GSTARS [۱۵]





شکل ۳-۳۲- واسنجی روابط رسوبی مختلف برای مقطع عرضی ایستگاه اهواز [۱۵]

۳-۹-۴-۷- مدل HEC6

- داده‌های ورودی:

- تعداد تکرار برای محاسبه بار رسوب در هر گام زمانی، روش محاسبه تغییرات بستر، سرعت سقوط، چگالی ذرات، روش محاسبه تنش برشی بستر، مشخصات رسوبات چسبنده (شامل چگالی، آستانه رسوب گذاری، ضریب تحکیم و نرخ فرسایش، شیب منحنی نرخ فرسایش) و مشخصات سایر رسوبات همچون سیلت، رس و ماسه (شامل معادله انتقال آنها و سایر مشخصات)
- محدوده‌های با بستر ثابت، ضخامت لایه فرسایش پذیر، درصد ذرات رسوبی، دانه بندی ذرات بستر، ضرایب فرسایش سیلابدشت سمت چپ و راست، تعیین شرایط عدم فرسایش در مقاطع، عمق لایه غیر قابل فرسایش و محدودیت‌های بستر متحرک
- مشخصات هندسی (مقاطع، فاصله بین مقاطع، شعاع انحنای مقاطع، ضریب مانینگ مقاطع، ضریب بازشدگی و جمع شدگی جریان)
- شرایط مرزی (هیدروگراف ورودی جریان، مقدار رسوب ورودی، مشخصات جریان ورودی و رسوب شاخه‌های انشعابی، تراز آب و بده - اشل در پایین دست)

- پارامترهای واسنجی: ضریب مانینگ و ضرایب فرسایش پذیری در سیلابدشت‌ها
- داده‌های خروجی: تراز سطح آب، عمق جریان، سرعت متوسط در هر مقطع عرضی، بار بستر به صورت تجمعی برای مقاطع مختلف، مقدار رسوب برداشت شده از هر مقطع و مقدار تغییر عمق مقطع
- کاربرد: انتقال رسوب در رودخانه کارون در محدوده شهر گتوند [۲۰]

- هدف: بررسی هیدرولیک جریان و تغییرات سطح مقطع
- مشخصات محدوده مورد مطالعه: این مکان، بازه‌ای از رودخانه کارون در محدوده شهر گتوند می‌باشد که از پایین دست سد تنظیمی گتوند شروع شده و تا انتهای شهر ادامه دارد. در شکل (۳-۳۳) محدوده مورد نظر نشان داده شده است. طول این بازه از رودخانه ۴/۳ کیلومتر می‌باشد. رودخانه کارون در این بازه دارای بستر شنی با مصالح درشت دانه است.

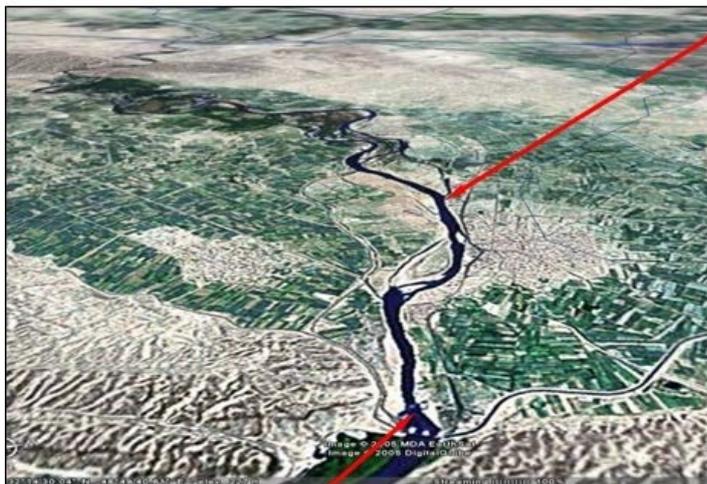
- نتایج: نتایج نیمرخ سطح آب که در کنار نیمرخ بستر ترسیم شده‌اند (شکل ۳-۳۴). جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از این نرم‌افزار و نرم‌افزار HEC - RAS ارائه شده است.

۳-۹-۴-۸- مدل HEC - RAS

- مدل جریان

- داده‌های ورودی: داده‌های هندسی (مقاطع عرضی، طول بازه‌ها، ضرایب افت انرژی، اطلاعات اتصالات، اطلاعات سازه‌های هیدرولیکی (مانند پل‌ها، آبگذرها، سرریزها و غیره)، ضریب زبری در مجرای اصلی و سیلابدشت‌ها، رژیم جریان (زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط)، شرایط مرزی (تراز سطح آب، عمق بحرانی، عمق نرمال، منحنی بده - اشل)، زمان شبیه‌سازی، تحلیل جریان پایدار یا جریان ناپایدار
- پارامترهای واسنجی: ضریب زبری در مجرای اصلی و سیلابدشت‌ها، ضرایب بازشدگی و جمع‌شدگی^۱ جریان
- داده‌های خروجی: نیمرخ سطح آب، سرعت جریان، شیب خط انرژی، سطح جریان، عرض بالای جریان، عدد فرود جریان
- کاربرد: ساماندهی رودخانه کارون در بازه ملائانی تا اهواز [۱۶]

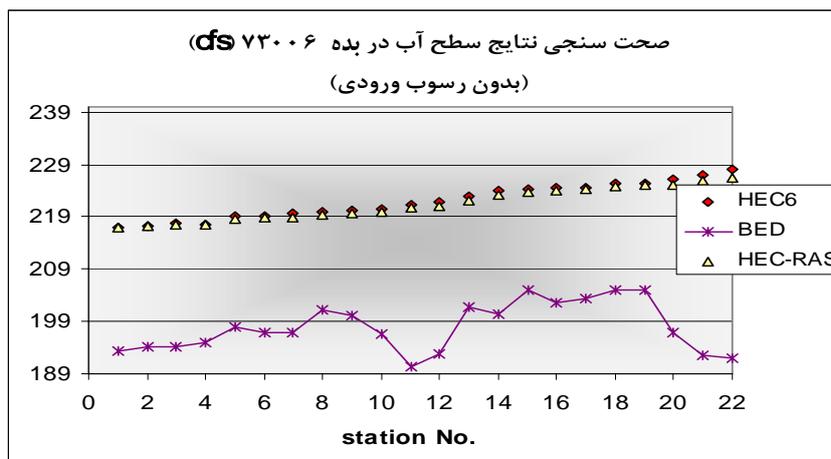
انتهای بازه



سد تنظیمی گتوند (ابتدای بازه)

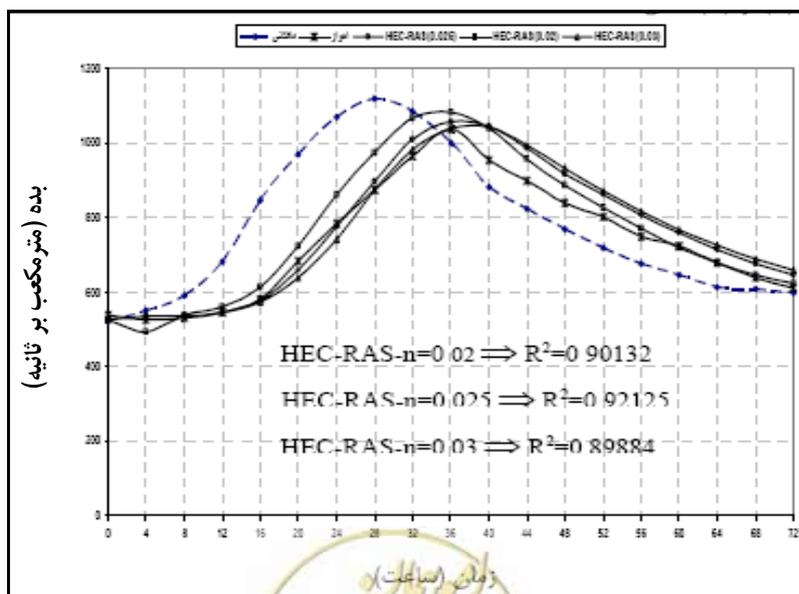
شکل ۳-۳۳- موقعیت بازه مطالعاتی، سد تنظیمی گتوند و شهر گتوند



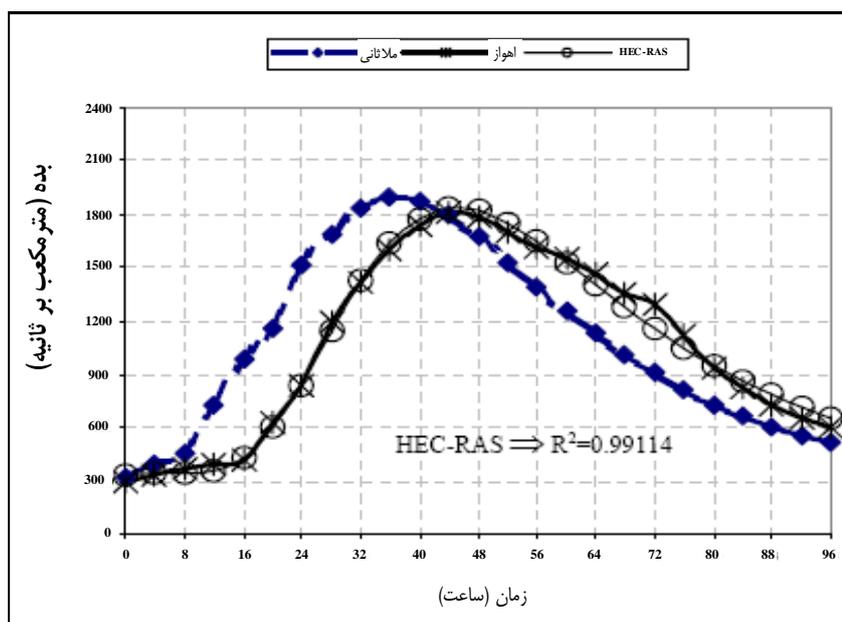


شکل ۳-۳۴- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌های HEC - RAS و HEC - 6

- هدف مطالعه: بررسی هیدرولیک جریان سیل در بازه‌ای از رودخانه کارون بین ایستگاه‌های آب‌سنجی ملاثانی و اهواز
- نتایج: نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد اصلاح کانال خطرات ناشی از سیل را در نواحی با اهمیت کاهش می‌دهد، به طوری که با جایگزینی مقاطع دوزنقه‌ای شکل در بیست کیلومتر انتهایی بازه ملاثانی - اهواز، ظرفیت آبدهی کانال به خوبی افزایش یافته و استفاده از خاکریزهای طولی به ارتفاع ۲ متر در ۱۰ کیلومتر ابتدایی و به ارتفاع ۱ متر در ۲۰ کیلومتر انتهایی از غرقابی شدن سواحل کناری در مواقع سیلابی جلوگیری به عمل می‌آورد. نتایج در شکل‌های (۳-۳۵) و (۳-۳۶) نشان داده شده است.
- توصیه‌ها: محدوده ضریب زبری $0.02 - 0.03$ برای این گونه رودخانه‌ها مناسب می‌باشد.



شکل ۳-۳۵- واسنجی مدل HEC - RAS با سیلاب دی ماه ۱۳۷۷ [۱۶]



شکل ۳-۳-۳- صحت سنجی هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی توسط مدل HEC - RAS دی ماه ۱۳۷۶ [۱۶]

۳-۹-۴-۹-۳ مدل MIKE11

– مدل جریان

- داده‌های ورودی: مقادیر اولیه تراز آب و بده جریان، اطلاعات باد (ضریب اصطکاک)، ضریب زبری بستر و سیلابدشت (ضریب مانینگ یا شزی)، تقریب موج، محاسبه موازنه دما، مشخصات لایه‌بندی (تعداد لایه‌ها)، ضریب لزجت آشفتگی، ضرایب پخش و انتقال، زمان و گام شبیه‌سازی
- پارامتر واسنجی: ضریب زبری، ضرایب پخش، ضریب لزجت آشفتگی
- داده‌های خروجی: سرعت، بده جریان، عدد فرود، شیب تراز آب، شیب تراز انرژی، تنش برشی بستر

– مدل رسوب

- داده‌های ورودی: قطر متوسط ذرات رسوب در بازه‌های مختلف و انحراف معیار آنها، نوع رابطه مورد استفاده برای شبیه‌سازی بار بستر، بار معلق و یا بار کل با ضرایب آنها، اعماق لایه‌های فعال و غیر فعال
- پارامتر واسنجی: ضریب زبری، تخلخل
- داده‌های خروجی: تغییرات بستر و غلظت رسوبات در هر نقطه گرهی
- کاربرد: مطالعه و طراحی پارکینگ قایق‌های اسکله سجافی هندیجان [۱۷]
- هدف مطالعه: شبیه‌سازی جریان رودخانه در ناحیه بین باغ بند و پاسگاه ژاندارمری سجافی
- مشخصات محدوده مورد مطالعه: موقعیت محل اجرای این پروژه در نزدیکی بندر سجافی واقع در استان خوزستان و در نزدیکی مصب رودخانه زهره بوده و فاصله آن تا بندر سجافی حدود ۱ کیلومتر است. با توجه به شرایط خاص منطقه و پیچیدگی‌های مربوط به رودخانه جزر و مدی زهره، مطالعات و بررسی‌های خاصی در منطقه طرح انجام شده است.

• نتایج: براساس نتایج به دست آمده در حالت عادی، بیشترین تراز آب مربوط به زمان بالا بودن تراز جزر ومدی و در حدود ۱/۸ متر نسبت به تراز مینا و بیشترین سرعت مربوط به پایین بودن تراز جزر و مدی و در حدود ۰/۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. در حالت سیلابی و بالا بودن تراز جزر و مدی بیشترین تراز آب حدود ۳ متر نسبت به تراز مینا و بیشترین سرعت مربوط به شرایط پایین بودن تراز آب و ۴ متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به نتایج مدل برای سیلاب ۲۵ ساله تراز آب در محدوده پیشنهادی پهلوگاه‌ها، لزوم در نظر گرفتن ته‌میداتی برای جلوگیری از غرقابی شدن بخش‌های حساس در زمان وقوع سیلاب وجود دارد. با توجه به سرعت‌های حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه با سرعت‌های مجاز برای پهلوگیری، این نتیجه به دست می‌آید که در حالت جریان متوسط رودخانه، شرایط امنی برای پهلوگیری وجود دارد، درحالی‌که در شرایط سیلابی سرعت موجود جریان به مراتب بیش از سرعت مجاز برای پهلوگیری است.

• توصیه‌ها: براساس نتایج حاصل از واسنجی ضریب زبری برای این منطقه ۰/۰۲۵ می‌باشد. در مدل هیدرودینامیک گام زمانی به کار رفته تاثیر زیادی بر دقت نتایج دارد.

کاربرد این نرم‌افزار در موارد دیگر نشان می‌دهد که در فرآیندهای پخش و انتقال، ضریب پخش طولی به شدت به سرعت جریان

وابسته است و برای جریان با بده‌های کم ($6 - 4 \text{ m}^3/\text{s}$) ضریب پخش طولی بین ($10 - 4 \text{ m}^2/\text{s}$) می‌باشد [۱۸]

۳-۹-۴-۱۰- مدل MIKE21

- مدل هیدرودینامیک

• داده‌های ورودی: هیدروگرافی، زمان شبیه‌سازی، شرایط اولیه و شرایط مرزی، چشمه و چاه، اعماق تری و خشکی و تراز اولیه سطح آب

• پارامترهای واسنجی: مقاومت بستر (ضریب مانینگ یا ضریب شزی) و ضریب لزجت گردابه‌ای

• داده‌های خروجی: تراز سطح آب، شار جریان و مولفه‌های سرعت

- مدل رسوب غیرچسبنده

• داده‌های ورودی: مشخصات جریان (سرعت و تراز سطح آب) و مشخصات رسوب بستر (پارامتر شیلدز بحرانی، قطر متوسط مصالح، چگالی رسوبات، دمای آب، تخلخل، درجه یکنواختی رسوبات)

• پارامترهای واسنجی: مقاومت بستر (ضریب مانینگ یا ضریب شزی)، میزان تخلخل و ضریب پخش رسوب

• داده‌های خروجی: میزان غلظت رسوب و تغییرات بستر در نقاط مختلف

- مدل رسوب چسبنده

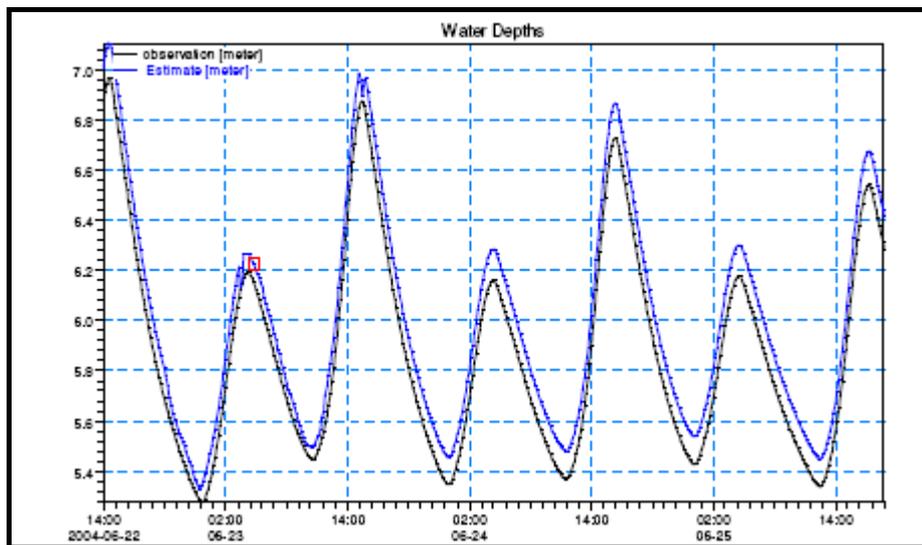
• داده‌های ورودی: مشخصات جریان، زمان شبیه‌سازی انتقال رسوب، تعداد لایه‌ها یا قسمت‌های دانه‌بندی رسوبات، شرایط اولیه و مرزی، سرعت سقوط ذرات، مشخصات لایه‌ها و چگالی لایه بستر

• پارامترهای واسنجی: ضرایب پخش در دو جهت و زبری بستر

• داده‌های خروجی: ضخامت لایه‌ها، نرخ رسوب‌گذاری، نرخ فرسایش، تنش برشی بستر و تغییرات ضخامت بستر

• کاربرد: روندیابی جریان در رودخانه جزر و مدی زهره [۱۹]

- مشخصات محدوده مورد مطالعه: رودخانه جزر و مدی زهره در جنوب غربی ایران واقع شده و دارای حوضه آبریزی به مساحت ۱۶۰۳۳ کیلومتر مربع می‌باشد. جزرومد دریا در دهانه این رودخانه تقریباً نیم روزی با متوسط جزرومد $۱/۶۷$ متر و میانگین حداکثر $۲/۷$ متر می‌باشد. میانگین بده در نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری به دریا $۸۸/۵$ متر مکعب بر ثانیه است.
- نتایج: در شکل‌های (۳۷-۳) و (۳۸-۳) نمونه‌های از نتایج به‌دست آمده برای عمق و سرعت جریان ارائه شده است. این نتایج را می‌توان در مواردی نظیر طراحی سازه‌های دریایی استفاده کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد.



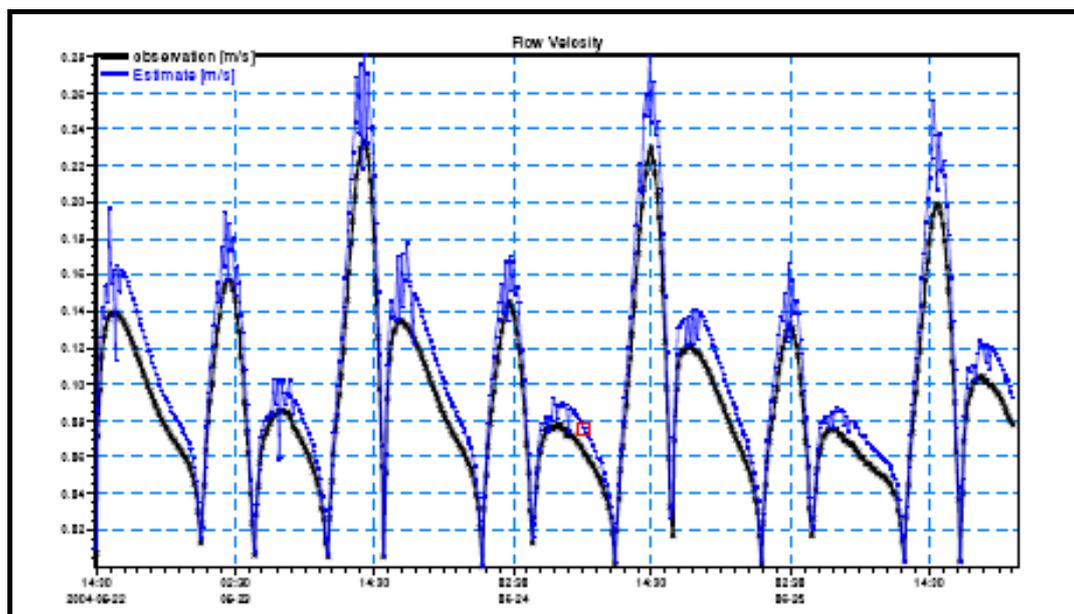
شکل ۳ - ۳۷ - مقایسه مقادیر عمق متوسط جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در وسط بازه [۱۹]

۳-۹-۴-۱۱ - مدل SMS8

- مدل جریان (مدل RMA2)

- داده‌های ورودی: اطلاعات هندسی (شبکه مناسب و اطلاعات هیدروگرافی)، ضریب زبری، ضریب لزجت گردابی، شرایط اولیه، شرایط مرزی بالادست و پایین دست (جریان موازی، بده یا سرعت جریان، تراز سطح آب، منحنی بده - اشل)، تعداد تکرارها و درصد خطای مجاز، اطلاعات خشک و تر شدن المان‌ها
- پارامتر واسنجی: ضریب زبری و ضریب لزجت گردابی

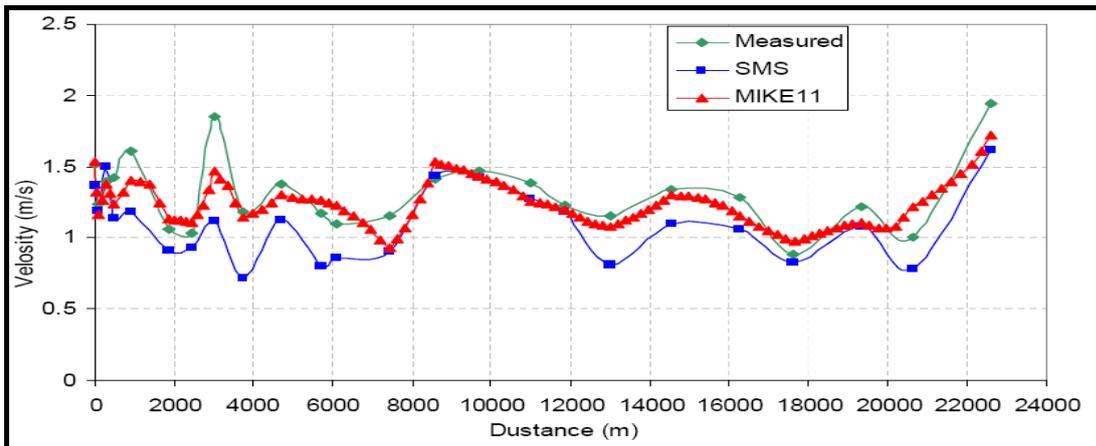




شکل ۳-۳۸- مقایسه مقادیر متوسط سرعت جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده [۱۹]

- داده‌های خروجی: نیمرخ سطح آب، سرعت جریان
- کاربرد: مطالعه فرآیند پخش و انتقال در رودخانه اتاباسکا کانادا [۱۸]
- هدف مطالعه: شبیه‌سازی پخش و انتقال ماده رنگی در بازه‌ای از رودخانه اتاباسکا کانادا
- مشخصات محدوده مورد مطالعه: این رودخانه از رشته کوه آلبرتای کانادا سرچشمه می‌گیرد. بده رودخانه در بازه وسیعی تغییر می‌کند. بده رودخانه در هنگام آزمایش $363/6$ متر مکعب بر ثانیه و جریان رودخانه پایدار بوده است.
- نتایج: نمونه‌ای از نتایج در شکل‌های (۳-۳۹) و (۳-۴۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج شبیه‌سازی حاصل از SMS تقریباً در تمامی مسیر، اندکی از مقادیر اندازه‌گیری شده کم‌تر است. همین موضوع سبب شده است که حداکثر غلظت در نتایج شبیه‌سازی شده با یک تاخیر زمانی نسبت به نتایج اندازه‌گیری شده انتقال یابد.
- توصیه‌ها: این مطالعه نشان می‌دهد، ترم انتقال به زبری کف و ترم پخش به ضریب پخش رودخانه بسیار وابسته است، لذا لازم است در تعیین آنها دقت لازم مبذول گردد. در مسایل عملی که به‌دست آوردن سریع و اولیه وضعیت انتقال و پخش آلودگی در اولویت می‌باشد، استفاده از مدل‌های دو بعدی به دلیل حجم زیاد داده‌های مورد نیاز توصیه نمی‌شود. استفاده از مدل‌های یک بعدی به‌جای مدل‌های دو بعدی تأثیر زیادی در میزان حداکثر غلظت متوسط عبوری از مقاطع رودخانه ایجاد نمی‌کند.



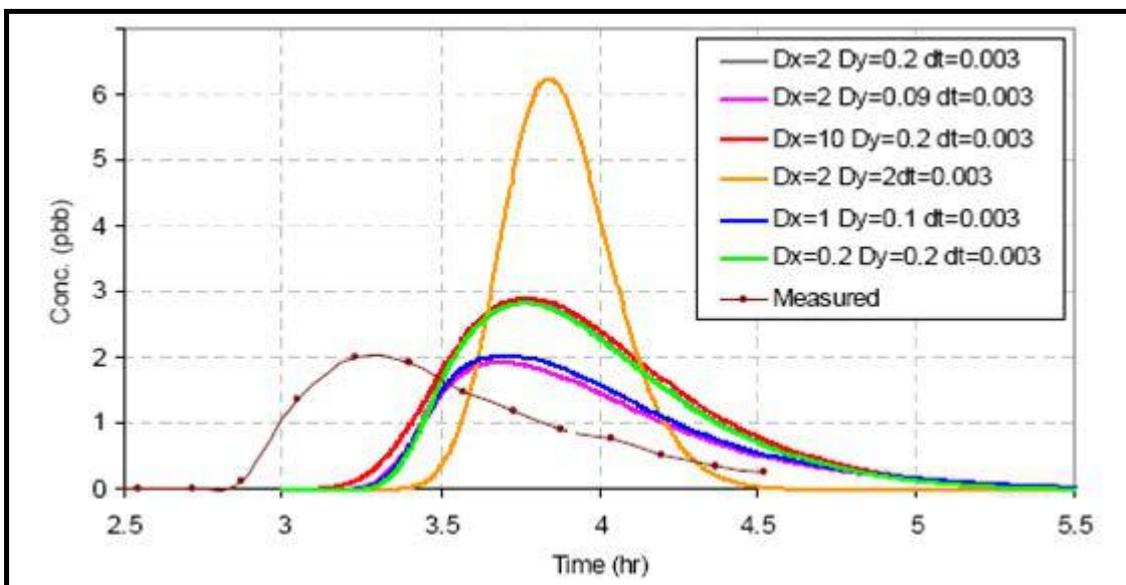


شکل ۳-۳۹- مقایسه سرعت حاصل از مدل MIKE11 با مقادیر سرعت متوسط حاصل از مدل SMS [۱۸]

۳-۹-۴-۱۲- مدل SSIIM

- مدل جریان

- داده‌های ورودی: هندسه رودخانه، ضرایب زیر تخفیف، شرایط اولیه، شرایط مرزی (تراز سطح آب، بده جریان)، زمان شبیه‌سازی، ضریب زبری بستر و دیواره، تعیین نوع مدل آشفتگی
- پارامتر واسنجی: ضریب زبری بستر و دیواره
- داده‌های خروجی: تراز سطح آب، سرعت جریان و شار جریان



شکل ۳-۴۰- مقایسه مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده و نتایج مدل [۱۸]

- مدل رسوب

- داده‌های ورودی: مشخصات رسوب (قطر ذرات رسوبی، سرعت سقوط ذرات)، معادله انتقال رسوب، ضخامت لایه فعال، زاویه ایستایی ذرات و شرایط مرزی (رسوب وزنی ورودی)
- پارامتر واسنجی: ضریب زبری

- داده‌های خروجی: تغییرات تراز بستر و سطح مقطع جدید
 - کاربرد: آبرگیر رودخانه کاپونگا^۱ در تانزانیا [۳۶]
 - هدف مطالعه: پیش‌بینی توزیع رسوب معلق در جریان وارد شونده به آبرگیر
 - مشخصات محدوده مورد مطالعه: رودخانه کاپونگا از رودخانه Great Ruaha که بده آن در فصل بارش ۱۵ تا ۲۰ متر مکعب بر ثانیه است، سرچشمه می‌گیرد و در برخی سال‌ها حداکثر بده سیلاب آن به ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه می‌رسد. بستر رودخانه متشکل از شن، ماسه و قلوه سنگ است، اما بیش‌تر بار رسوبی را ماسه ریز و لای تشکیل می‌دهد.
 - نتایج: نتایج مدل‌سازی عددی نشان داده است مدل SSIIM به ازای مقادیر مختلف بده رودخانه، نسبت عملکرد آبرگیر را با میانگین خطای ۱۴٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. نتایج نشان داده است استفاده از طرح مرتبه دوم منفصل‌سازی خطا را تا ۸٪ کم نموده است، از طرفی دو برابر نمودن تعداد نقاط شبکه (در جهات افقی) تنها ۳٪ در کاهش خطای نتایج مدل عددی موثر بوده است. به‌طور کلی کاربرد شبکه ریز با طرح انفصال مرتبه دوم منجر به بهبود دقت نتایج مدل عددی شده است. آزمایش حساسیت به روش محاسبه زبری موثر نشان داده است که رابطه مورد استفاده برای محاسبه زبری استفاده در نتایج مدل عددی تاثیر عمده‌ای نداشته است، اما رابطه Van Rijn از رابطه دیگر بهتر بوده است.
- توصیه‌ها: تجربه کاربران این نرم‌افزار نشان می‌دهد این مدل در هندسه‌های پیچیده دارای مشکل همگرایی است و پارامترهای زیادی براساس تجربه کاربر باید تغییر یابد تا مدل به همگرایی برسد. زمان اجرای این مدل از مشکلات دیگری است که کاربر را در مرحله واسنجی با مشکل روبرو می‌سازد.



منابع و مراجع

- ۱- «فهرست خدمات مطالعات مرحله شناسایی طرح‌های مهندسی رودخانه»، نشریه شماره ۱۹۰ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۷۸)
- ۲- «راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری پوشش‌ها در کارهای مهندسی رودخانه»، نشریه شماره ۳۳۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۵)
- ۳- «راهنمای مهار سیلاب رودخانه (روش‌های سازه‌ای)»، نشریه شماره ۲۴۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۸۰)
- ۴- شفای بجستان، م، «مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی - هیدرولیکی»، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۴)
- ۵- مقیمان، م، «محاسبات عددی - کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۲)
- ۶- حیدری نژاد، ق، «مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی»، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۷۶)
- ۷- نیک صفت، غ.ر، «تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیکی در طراحی سازه‌های آبی»، وزارت نیرو، (۱۳۸۰)
- ۸- محمودی زنگنه، ا، صناعی، م، اردشیر، ع، «اثر طول و فاصله در کاهش عمق آبستگي در سری آبشکن‌ها»، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، (۱۳۸۵)
- ۹- زراتی، ا.ر، «نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها»، ترجمه دانشگاه هرمزگان، (۱۳۸۱)
- ۱۰- اقبال‌زاده، ا، «بررسی جابجایی حفره ناشی از برداشت شن و ماسه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۰)
- ۱۱- غلامی، ه، «تعیین فاصله بهینه برداشت مصالح رودخانه‌ای از پل‌ها جهت کاهش خسارات ناشی از تخریب سازه پل‌ها»، طرح تحقیقات کاربردی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، (۱۳۸۳)
- ۱۲- صفرزاده، ا، ۱۳۸۳. «شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در آبیگری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۱۳- حسینی سهی، س.م.، ۱۳۸۴. «شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در حوضچه آرامش با استفاده از نرم افزار 3D - FLOW»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۱۴- سبزیوند، ر، «بررسی اثرات برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها (مطالعه موردی رودخانه میناب)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۸)
- ۱۵- شاهی نژاد، ب، ظهیری، ع.ا، رستمی، ا، «پیش‌بینی روند فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه کارون در محدوده شهری اهواز با استفاده از مدل ریاضی GSTARS»، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، (۱۳۸۷)
- ۱۶- سمیعی، ت، محمودیان شوشتری، م، «اصلاح رودخانه کارون در بازه ملاثانی تا اهواز»، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، (۱۳۸۵)
- ۱۷- «مطالعه و طراحی پارکینگ قایق‌های اسکله سجافی هندیجان»، جهاد تحقیقات آب و انرژی، (۱۳۸۷)



- ۱۸- زرگر، م، «مقایسه کاربردی مدل‌های MIKE11 و SMS در شبیه‌سازی عددی پخش و انتقال غلظت در رودخانه‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۳)
- ۱۹- کرمی‌خانیکی، ع، دهقانی، م، غریب‌رضا، م. ر، «بررسی کارایی نرم افزار Mike 21 در مدل‌سازی جریان‌های جزر و مدی مصب رودخانه‌ها، مطالعه موردی (مصب رودخانه زهره)»، پنجمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۴)
- ۲۰- مشکاتی، ه. «شبیه‌سازی انتقال رسوب در محدوده شهر گنوند با استفاده از مدل HEC6» (۱۳۸۴)
- 21- Przedwojski, B., Blazejewski, R., Pilarczyk, K. W., 1995. "River Training Techniques, Fundamentals, Design and Application", Balkema, Rotterdam.
- 22- Zhu, J., Zeng, Q., Guo, D. and Liu, Z., 1999. "Optimal Control of Sedimentation in Navigation Channels", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 125, No. 7, July, 1999.
- 23- Novak, P., Cábélka, J. 1981. "Models in Hydraulic Engineering - Physical: Principles and Design Applications", Pitman, Boston.
- 24- Ettema, R., Arndt, R., Robert, P. and Wahl, T., 2000. "Hydraulic Modeling :Concept and Practice", ASCE.
- 25- Wu, W. 2007. "Computational River Dynamics", Taylor & Francis, London.
- 26- Ettema, R., Muste, M., 2002. "Scale - effect trends in hydraulic models of flow at a dike in a flat - bed channel". IIHR - Hydroscience & Engineering College of Engineering, Iowa.
- 27- Garde, R.J. and Ranga Raju, K. G., 1985. "Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems", Wiley Eastern Limited.
- 28- Olsen N. R. B., 2002. "Hydroinformatic, fluvial hydraulics and limnology", Department of hydraulics and environmental engineering, The Norwegian university of science and technology.
- 29- Rodi, W., 1993, "Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics", 3rd Ed., IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam.
- 30- Van Rijn, L.C., 1989, "Handbook: sediment transport by current and waves", Report H 461, Delft Hydraulics.
- 31- Wang, S.S Y. and Adeff, S.E., 1986. "Three - dimensional modelling of river sedimentation processes", Proc. of the 3rd Int. Symp. on River Sedimentation, The Univ. of Mississippi, USA.
- 32- Einstein, H.A., 1950, "The bed - load function for sediment transportation in open channel flows", Technical Bulletin No. 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C.
- 33- Ackers, P. and White, W.R., 1973. "Sediment transport: A new approach and analysis", J. Hydr. Div, ASCE, Vol 99, p 2041 - 2060.
- 34- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method", Longman.
- 35- Donigian, Jr., A.S., 2000. HSPF Training Workshop Handbook. Calibration and Verification Issues, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10 - 14 January, 2000.
- 36- Ruether, N., Singh, J.M., Olsen, N.R.B. and Atkinson, E., 2005. "3 - D computation of sediment transport at water intakes". Water Management, V. 158, n., 1 pp 1 - 8.
- 37- WES., 1976, "Enlargement of Marcus Hook Anchorage, Delaware River". Miscellaneous Paper H-76-17, US Army Corps of Engineers.

- 38- Bureau of Reclamation, US. Dept. of the Interior (1980). Hydraulic Laboratory Techniques, USBR, Denver, Colorado.
- 39- Aslı BOR, 2008, "NUMERICAL MODELING OF UNSTEADY AND NON-EQUILIBRIUM SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS". MsC Thesis in Civil Engineering., İzmir Institute of Technology.

آدرس اینترنتی مدل‌های هیدرودینامیک و رسوب

- 40- AquaDyn: <http://www.technum.com/PAGES/EN/PRODUCT/AQUADYN/aquadyn.htm>
- 41- BRANCH: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 42- BRI - STARS: <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/software/bristars.cfm>
- 43- CCHE1D: <http://www.ncche.olemiss.edu/cche1d>
- 44- CCHE2D: <http://www.ncche.olemiss.edu/index.php?page=cche2d>
- 45- CH3D - WES: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 46- DAFLOW: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 47- DELFT3D: <http://www.wldelft.nl/soft/>
- 48- DYNHYD5: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 49- FEQ: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 50- FESWMS - 2DH: <http://water.usgs.gov/software/feswms.html>
- 51- FLOW3D: <http://www.flow3d.com/>
- 52- FLUENT: <http://www.fluent.com/>
- 53- FLUVIAL12: <http://chang.sdsu.edu/fluvial.html>
- 54- FourPt: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 55- GSTARS3: <http://www.usbr.gov/pmts/sediment/model/gstars/gstars3/index.html>
- 56- HEC6: www.Hec.usace.army.mil
- 57- HEC - RAS: www.Hec.usace.army.mil
- 58- HIVEL 2D: <http://hlnet.wes.army.mil/software/hivel/>
- 59- ISIS: <http://www.wallingfordsoftware.com>
- 60- MIKE11: <http://www.dhigroup.com/>
- 61- MIKE21: <http://www.dhigroup.com/>
- 62- RMA2: <http://chl.erdc.usace.army.mil/CHL.aspx?p=s&a=Software!14>
- 63- SMS: <http://www.emrl.byu.edu/sms.htm>
- 64- Sobek: <http://www.wldelft.nl/soft/>
- 65- SSIIM: <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiimwin/>
- 66- UNET: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html
- 67- WSPRO: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_usgs.html

آدرس اینترنتی مدل‌های کیفیت آب

- 68- AQUATOX: <http://www.epa.gov/waterscience/wqm/aquatox.html>
- 69- AVT - DVWK: <http://www.erfvorbund/aufgaben/project/gwguetel/atv - dvwk.html>
- 70- CE - QUAL - ICM: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>
- 71- CE - QUAL - R1: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>
- 72- CE - QUAL - RIV1: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>
- 73- CE - QUAL - W2: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>

- 74- DYRESM: <http://www.cwr.uwa.edu.au/ttfadmin/cwrsoft/doc/dyresm.html>
- 75- EXAMS: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>
- 76- HEC5 - Q: <http://www.wrc - hec.usace.army.mil/software/index.html>
- 77- HSPF: <http://www.epa.gov/ceampubl/softwdos.html>
- 78- MIKE11: <http://www.dhisoftware.com/mike11/description/mike11.html>
- 79- POM: <http://stommel.tamu.edu/baum/oceam - models.html>
- 80- QUAL2E: <http://www.eap.gov/ost/basins/bsnsdocs.html>
- 81- RMA4: <http://ripple.wes.army.mil/software/tabs/rma4.html>
- 82- RMA11: <http://ripple.wes.army.mil/software/tabs/rma11.html>
- 83- SMPTOX3: http://smig.usgs.gov/SMIG/archives_epa.html
- 84- SNTMP: <http://www.mesc.usgs.gov/rsm/more - temp.html>
- 85- SWAT: <http://web.aces.uiuc.edu/watershed/model/swat.html>
- 86- SWMM: <http://www.chi.on.ca/swmm.html>
- 87- TWQM: <http://www.wes.army.mil/elmodels/index.html>
- 88- WASP: <http://www.chi.on.ca/waspedownload.html>
- 89- WQRPS: <http://www.wrc - hec.usace.army.mil/software/index.html>



خواننده گرامی

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





omoorepeyman.ir

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision

Guideline for Application of Physical and Mathematical Models in River Engineering

No. 584

Office of Deputy for Strategic Supervision

Department of Technical Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Bureau of Engineering and Technical
Criteria for Water and Wastewater

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



omoorepeyman.ir



omoorepeyman.ir

این نشریه

با عنوان «راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه» با هدف آشنایی با مبانی مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی و اصول کاربرد آنها در مباحث مرتبط با مهندسی رودخانه و ارائه رهنمودها و دستورالعمل‌های لازم برای طراحی و به‌کارگیری صحیح مدل‌های فیزیکی و توسعه یا بهره‌برداری مناسب از مدل‌های ریاضی تهیه شده است.

در این مجموعه پس از ارائه کلیات مدل‌سازی فیزیکی به مسایل خاص مرتبط با مدل‌های رودخانه‌ای پرداخته شده است. در ادامه ضمن ارائه کلیات مدل‌سازی ریاضی، ویژگی‌های مدل‌های ریاضی موجود در زمینه مهندسی رودخانه، محدودیت‌ها و موارد کاربرد و اصول کلی برای انتخاب مدل مناسب ارائه شده است.

