

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران و معماری

گروه عمران

مدلسازی انتقال رسوب در مخازن سطحی

به کمک روش حجم محدود

دانشجو:

رضا عیدی

اساتید راهنما :

دکتر احمد احمدی

دکتر امیرعباس عابدینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریورماه ۱۳۹۳



دانشکده صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری
گروه مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد رضا عیدی

تحت عنوان:

مدلسازی فرآیند انتقال رسوب در مخازن سطحی به کمک روش حجم محدود

در تاریخ
بدرجه
توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضا	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر احمد احمدی
	نام و نام خانوادگی: دکتر امیرعباس عابدینی

امضا	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضا	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی گلی		نام و نام خانوادگی: دکتر رامین امینی
			نام و نام خانوادگی: دکتر سعید گلپان
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم به:

پیشگاه مادر و پدر همیشه مهربان و همسر عزیزم ، آنان

که در لحظات سخت و طاقت فرسای زندگی نور امید می

در دلم بوده و هستند .

تسکرو قءرءانی

اکنون که این تحقیق ثمره ماهها تلاش و کوشش بیوقفه اینجانب در عرصه علم و فنآوری در جهت رشد و بالندگی کشور عزیزم ایران است، مرهون زحمات خستگی ناپذیر اساتید محترم و همفکری و شراکت معنوی این عزیزان با این حقیر است.

لذا بر خود لازم می دانم از جناب آقای دکتر احمد احمدی و جناب آقای دکتر امیرعباس عابدینی که همواره با بینش دقیق علمی خود و با روی گشاده بنده را یاری داده اند قدردانی نمایم. بحق که بسیاری از دانسته های علمی خود را مدیون لطف و عنایت این عزیزان می باشم.

الهی بر تمامی عزیزانی که از آثارشان استفاده نمودم و دوستانی که در تهیه این مختصر حقیر را یاری نمودند نظری خاص فرما که همگی سخت محتاج آن اکسیر نگاه و کیمیای عشق تو هستیم.

باشد که این تحقیق هر چند ناچیز، مورد استفاده دیگران که در این زمینه فعالیت خواهند کرد قرار گیرد.

تعهدنامه

اینجانب رضا عیدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "مدلسازی عددی فرآیند انتقال رسوب در مخازن سطحی به کمک روش حجم محدود" تحت راهنمایی آقای دکتر احمد احمدی و آقای دکتر امیرعباس عابدینی به عنوان اساتید راهنما متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

امضای دانشجو

چکیده

در این مطالعه فرآیند انتقال رسوب در مخازن سطحی و به ویژه مخازن رسوب گیر مورد بررسی قرار می گیرد. مخازن رسوب گیر به منظور حذف ذرات رسوب بار معلق از جریان های ورودی به سازه های هیدرولیکی ساخته شده و مورد استفاده قرار می گیرند. شناخت الگوهای مختلف جریان درون مخازن مذکور و نحوه توزیع رسوبات ورودی داخل مخزن هدف اصلی مطالعه پیش رو است. این مطالعه از دو بخش مدلسازی عددی جریان بدون رسوب و جریان همراه با رسوبات بار معلق تشکیل شده است.

معادلات حاکم بر فرآیند انتقال رسوب از دو مدل هیدرودینامیک و مورفودینامیک تشکیل شده است. مدل هیدرودینامیک که از دو دسته معادله پیوستگی و بقا مومنتوم تشکیل شده است؛ جهت محاسبه های مولفه های وابسته به جریان مورد استفاده قرار می گیرد. در مطالعه پیش رو از مدل نرم افزاری انسیس فلوئنت^۱ ورژن ۱۳ استفاده شده است. مدل مورفودینامیک نیز شامل معادلات مربوط به فرآیند انتقال رسوب است. پارامترهای هیدرولیکی از قبیل سرعت و پارامترهای مدل آشفتگی بعد از محاسبه توسط مدل نرم افزاری در معادلات مدل مورفودینامیک مورد استفاده قرار می گیرد.

از آنجاییکه در این تحقیق از روش حجم محدود استفاده شده است؛ از اینرو معادلات پس از گسسته سازی شدن و تعیین ضرایب و معلومات، توسط زبان برنامه نویسی فرترن کدنویسی می

^۱ Ansys Fluent

شوند. نتایج ثبت شده در فایل های خروجی غلظت رسوب بار معلق و ضخامت لایه رسوبی بار بستر در نقاط شبکه بندی است . نتایج عددی بدست آمده با دو مدل آزمایشگاهی مقایسه شده و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است .

کلمات کلیدی : جریان آب کم عمق - مخازن رسوب گیر - بار معلق - انتقال رسوب - روش حجم محدود - مدل سازی عددی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۲-۱-۱-۱	مقدمه
۶-۲-۱	اهداف تحقیق
۶-۳-۱	ساختار پایان نامه
	فصل دوم: تاریخچه مطالعات
۹-۱-۲	مقدمه
۱۰-۲-۲	مطالعات فیزیکی
۱۳-۳-۲	مطالعات تئوری
۱۵-۱-۳-۲	مدل تحلیلی انتقال رسوب
۱۶-۲-۳-۲	مدل عددی انتقال رسوب
۱۶-۱-۲-۳-۲	مدل های یک بعدی انتقال رسوب
۱۸-۲-۲-۳-۲	مدل های دو بعدی انتقال رسوب
۱۹-۳-۲-۳-۲	مدل های سه بعدی انتقال رسوب
	فصل سوم: معادلات و روابط حاکم
۲۲-۱-۳	مقدمه
۲۳-۲-۳	مدل هیدرودینامیک
۲۳-۱-۳-۳	معادله پیوستگی

- ۲۴ معادله بقا مومنتوم..... ۲-۳-۳
- ۲۶ مدل انتقال رسوب ۳-۳
- ۲۷ انتقال بار معلق (معادله انتقال - انتشار) ۱-۳-۳
- ۲۸ محاسبات تغییرات بستر با معادلات متوسط گیری شده در عمق ۲-۳-۳
- ۲۹ شرایط مرزی برای حل معادله انتقال - انتشار ۲-۳-۳
- ۲۹ محاسبه تغییرات تراز بستر ۴-۳
- ۳۱ ۱-۴-۳ - محاسبه دبی بار بستر ۴-۳
- ۳۲ رابطه MPM ۱-۱-۴-۳
- ۳۳ رابطه ون راین ۲-۱-۴-۳
- ۳۳ مدل تراکم بستر ۲-۴-۳
- ۳۴ ۵-۳ - روش حجم محدود ۵-۳
- ۳۵ ۱-۵-۳ - روش حجم محدود برای معادله انتقال - انتشار ۵-۳
- ۳۸ ۲-۵-۳ - استفاده از روش الگوریتم ماتریس سه قطری ۵-۳
- ۳۹ ۳-۵-۳ - گسسته سازی معادله دبی رسوب بار معلق ۵-۳
- ۴۰ ۴-۵-۳ - گسسته سازی معادله تعیین تغییر تراز بستر ۵-۳

فصل چهارم: محاسبات و نتایج

- ۴۳ ۱-۴ - مقدمه ۴-۳
- ۴۴ ۲-۴ - مدل سازی جریان بدون رسوب ۴-۳
- ۴۴ ۱-۱-۴ - تعریف مدل نرم افزاری و شرایط مدل سازی ۴-۳
- ۴۷ ۲-۲-۴ - مدل سازی مخزن شماره (۱) ۴-۳
- ۵۰ ۲-۲-۴ - مدل سازی مخزن شماره (۲) ۴-۳
- ۵۲ ۳-۴ - مدل سازی فرآیند انتقال رسوب ۴-۳

- ۴-۳-۱- کدنویسی فرآیند انتقال رسوب ۵۳
- ۴-۴- مدلسازی غلظت رسوب بار معلق ۵۷
- ۴-۵- مدلسازی تغییرات تراز بستر ۵۹
- ۴-۵-۱- نتایج مخزن شماره (۱) ۶۰
- ۴-۵-۲- نتایج مخزن شماره (۲) ۶۳
- ۴-۵-۳- تاثیر الگوی جریان بر رسوب گذاری ۶۷

فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری

- ۵-۱- خلاصه ۷۱
- ۵-۲- نتیجه گیری ۷۲
- ۵-۳- پیشنهادات ۷۴
- مراجع ۷۵

خلاصه انگلیسی

فهرست اشکال

صفحه

- شکل ۳-۱- طرح کلی مدل تغییرات تراز بستر ۳۱
- شکل ۴-۱- مشخصات هندسی مخزن شماره (۱) ۴۵
- شکل ۴-۲- مشخصات هندسی مخزن شماره (۲) ۴۵
- شکل ۴-۳- مقایسه بین الگوی جریان حاصل از مدل نرم افزاری (الف) و نتیجه آزمایشگاهی (ب) ۴۹
- شکل ۴-۴- مقایسه بین الگوی جریان حاصل از مدل نرم افزاری (الف) و نتیجه آزمایشگاهی (ب) ۵۱
- شکل ۴-۵- پلان توپوگرافی لایه های رسوبی بار بستر مخزن شماره (۱) ۶۰
- شکل ۴-۶- مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۱) مخزن شماره (۱) ۶۱
- شکل ۴-۷- مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۲) مخزن شماره (۱) ۶۲
- شکل ۴-۸- پلان توپوگرافی لایه های رسوبی بار بستر مخزن شماره (۲) ۶۴
- شکل ۴-۹- مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۱) مخزن شماره (۲) ۶۵
- شکل ۴-۱۰- مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۲) مخزن شماره (۲) ۶۶
- شکل ۴-۱۱- مقایسه بین تراز بستر در مخزن شماره (۱) و مخزن شماره (۲) ۶۹

فهرست جداول

صفحه

جدول ۱-۳- ضرائب ثابت در معادلات $k - \varepsilon$	۲۶
جدول ۲-۳- پارامترهای طرح اختلاف پیوندی	۳۷
جدول ۳-۳- متغیرهای طرح اختلاف پیوندی	۳۷
جدول ۱-۴- شرایط مرزی ورودی	۴۶
جدول ۲-۴- شرایط مرزی خروجی	۴۶
جدول ۳-۴- پارامترهای مدل آشفستگی $k - \varepsilon$	۴۷
جدول ۴-۴- پارامترهای فاکتور شکل مخزن شماره (۱)	۵۰
جدول ۵-۴- پارامترهای فاکتور شکل مخزن شماره (۲)	۵۰
جدول ۶-۴- ورودی های مساله برای مخزن $6m \times 4m$	۵۶
جدول ۷-۴- ورودی های مساله برای مخزن $5m \times 4m$	۵۶
جدول ۸-۴- داده های ورودی مدل انتقال رسوب	۵۷
جدول ۹-۴- نتایج مدلسازی غلظت رسوب بار معلق مخزن شماره (۱)	۵۸
جدول ۱۰-۴- نتایج مدلسازی غلظت رسوب بار معلق مخزن شماره (۲)	۵۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

یکی از موضوعات اصلی و مهم در مطالعات سازه های هیدرولیک ، رسوب و مشکلات حاصل از آن است. ما در طبیعت با جریان هایی مواجه هستیم که رسوبات را همراه خود جابه جا می کنند . این جریان ها که در بسیاری از نمونه های طبیعی از قبیل رودخانه ها ، دریاچه ها ، نواحی ساحلی و انواع مخازن مشاهده می شوند ؛ به عنوان جریان آب کم عمق^۲ شناخته می شوند . در این جریان ، بعد قائم در مقایسه با دو بعد افقی جریان بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است .

یکی از سازه های هیدرولیکی پرکاربرد مخازنی هستند که به منظور اهداف مختلف طراحی و مورد استفاده قرار می گیرند . این مخازن که ابعاد آنها از مخازن سد ها تا مخازن نگهداری آب متغیر است دارای جریان های آب کم عمق هستند . از آنجاییکه مخازن به طور مستقیم تحت تاثیر جریان های ورودی هستند ، وجود رسوبات درون جریان به عنوان یک مشکل اصلی مورد توجه است . شناخت الگوهای جریان و رسوب می تواند در مطالعات مربوط به مشکلات رسوب مورد استفاده قرار گیرد . علاوه بر این یکی از روش های مقابله با مشکلات رسوب ، مخازن رسوب گیر هستند که در این مطالعه مورد نظر هستند .

^۲ Shallow water

بهرتر است از قبل از شروع بحث اصلی در این تحقیق به سوالات زیر پاسخ دهیم تا دید کلی نسبت به موضوع مورد بحث بوجود آید.

۱- دلیل اهمیت مطالعات مربوط به پدیده رسوب گذاری مخازن چیست؟

استفاده پایدار از مخزن برای تولید الکتریسیته، آبیاری، تفریح و سرگرمی و همچنین تامین آب خانگی و صنعتی موضوع مهمی برای بهره برداری از یک مخزن است. دریاچه حاصل از ساخت سد، مخازن نگه داری آب و استخرهای رسوب گیر بخشی از مخازن مورد توجه هستند. رسوب گذاری مخازن فرآیندی است که در آن ذرات رسوب در یک حجم بوجود آمده در اثر ساخت یک سازه هیدرولیکی ته نشین می شوند.

نتایج رسوب گذاری می تواند از نظر اقتصادی بسیار زیان آور باشد. کاهش ظرفیت ذخیره سازی در مخزن به معنی کاهش سرمایه به نسبت کاهش عمر مفید استفاده از مخزن است. علاوه بر کاهش عمر مفید مخزن، در مخازنی که به منظور تولید نیروی برق آبی ایجاد شده است، بار رسوب سبب آسیب رسیدن به تاسیسات خواهد شد. در مخازن کنترل کننده سیلاب، در صورتی که دریاچه بوسیله رسوبات پر شود، حجم کمتری از سیلاب متوقف شده و سطح آب زیاد جریان پایین دست سبب خسارت های اقتصادی و یا انسانی خواهد بود. امروزه در سراسر جهان میانگین سالانه کاهش ظرفیت ذخیره سازی در اثر رسوب گذاری در حال حاضر بیشتر از افزایش ظرفیت به وسیله ساخت مخازن جدید است. به طور تقریبی هر سال ۱ درصد از حجم ذخیره مخازن سرتاسر جهان در اثر ته نشینی مواد رسوبی کاهش می یابد. [۵۲]

۲- آیا تاکنون مطالعاتی در زمینه رسوب گذاری مخازن صورت گرفته است؟

اولین بار که مخزن در اثر رسوب پر می شود، کارهای کمی جهت حذف آن می توان انجام داد. بسته به مورد موجود، ساخت یک مخزن جدید جهت جایگزینی با مخزن پر شده یک گزینه

بسیار کم ارزش است. روش های پیش بینی رسوب گذاری مخازن موضوع چندین مطالعه تجربی از ۱۹۵۰ است. با توجه به اهمیت موضوع محققین بسیاری سعی در بررسی شرایط و عوامل حاکم بر فرآیند مورفولوژی داشته اند. پیش بینی عمر مفید مخازن هدف نهایی طراحان مخازن است که به عنوان یک مساله مهم در تحقیقات هیدرولیکی بشمار می رود. عمر مفید مخزن فاکتور مهمی در تعیین قابلیت اقتصادی مخازن ذخیره سازی است. هرچند، پیش بینی رسوب مخزن نسبت به سایر پروژه های پیچیده هیدرولیکی کاری ساده نیست، چندین فرآیند به طور همزمان رخ می دهد؛ انتقال رسوب، فرسایش و ته نشینی. این همزمانی مشکلاتی را در تشریح این پدیده در یک مدل تکی بوجود می آورد. یکی از راه های عملی حذف رسوبات از جریان های ورودی، احداث مخازن رسوب گیر در مسیر جریان اصلی و پیش از ورود به مخزن اصلی است.

۳- مخازن رسوب گیر چیست، هدف از ساخت و عملکرد آن ها به چه صورت است؟

مخزن رسوب گیر یا حوضچه رسوب گیر سازه ای خاکی و یا بتنی است که به منظور حذف مصالح قابل ته نشینی از جریان آب با استفاده از فرآیند رسوب گذاری مورد استفاده قرار می گیرد. این مخازن به صورتی طراحی می شوند تا آب به مدتی کافی در آن باقی مانده تا ذرات معلق فرصت ته نشینی داشته باشند. هر اندازه قابلیت نگهداشت رسوب مخزن رسوب گیر بیشتر باشد، عملکرد آن بهتر ارزیابی می شود.

۴- معادلات و شرایط حاکم بر فرآیندهای مورفولوژی چگونه است؟

فرآیندهای انتقال رسوب را نیز می توان همانند سایر پدیده های هیدرولیکی با استفاده از روابط و معادلات حاکم شبیه سازی کرد. شناخت معادلات مرتبط با موضوع انتقال رسوب، پارامترهای مهم و سایر روابط تجربی که توسط محققین مختلف در طول سال های گذشته بدست آمده بسیار ضروری است. فرآیند مورفولوژی بطور کلی دو دسته از انواع رسوب را شامل می شود. رسوب بار معلق

و رسوب بار بستر که معادلات حاکم بر هر کدام به صورت مجزا بیان خواهد شد . در این مطالعه به تفصیل معادلات و روابط حاکم مورد بررسی قرار می گیرد .

۵- روش های حل معادلات به چه صورت است ، دلیل استفاده از روش های عددی چیست ؟

حل معادلات و روابط حاکم بر پدیده های هیدرولیکی به کمک روش های تحلیلی و عددی امکان پذیر است . بدلیل پیچیدگی حاکم بر این روابط ، روش های عددی مختلفی بوجود آمد تا دقت و سهولت محاسبات را افزایش دهد . روش های عددی انواع مختلفی دارند که شرح آنها در ادامه بیان خواهد شد .

توانایی طراحی روش های عددی که قادر به پیش بینی تغییرات مورفولوژیک باشند دارای یک ارتباط شفاف ریاضی و مهندسی است. در عمل ، مسائل مورفودینامیک شامل اتصال بین یک مدل هیدرودینامیک ، که شرحی از میدان جریان که منجر به خصوصیتی از نرخ انتقال رسوب محلی می شود فراهم می کند، و یک معادله برای تغییر سطح بستر که تعادل ثابت از حجم رسوب و توزیع مجدد مستمر در زمان را شرح می دهد .

۶- روش عددی بکار رفته چیست و چه ویژگی دارد ؟

اولین فاکتور در انتخاب روش عددی برای حل معادلات حاکم بر پدیده های هیدرولیکی دقت و انطباق آن بر شرایط حاکم بر معادلات مذکور است . روش مذکور باید بتواند شرایط مرزی مساله و همچنین خاصیت هر یک از معادلات را با دقت بالا اعمال کند . در این مطالعه صورت گرفته ما با معادلات دیفراسیل جزئی رو به رو هستیم از اینرو روش عددی حجم محدود که برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی مناسب است استفاده می شود .

۱-۲- اهداف تحقیق

همانطور که گفته شد یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی مخازن تعیین عمر مفید آن است که رابطه مستقیم با رسوب گذاری دارد. از آنجاییکه دشمن اصلی ظرفیت مخازن رسوباتی است که به همراه جریان های ورودی به مخزن وارد می شوند؛ در نتیجه اطلاع از الگوی های توزیع رسوبات بار معلق درون مخزن امری ضروری است. همچنین نحوه ی تشکیل لایه های رسوبی بر روی بستر که متاثر از رسوبات ورودی به مخزن هستند و حداکثر ضخامت آنها در طول عمر استفاده از مخزن را با استفاده از معادلات حاکم و به کمک حل عددی تعیین کنیم.

هدف از تحقیق انجام شده حل معادلات حاکم بر فرآیند مورفولوژی است. ما با استفاده از روش حجم محدود معادلات موجود را گسسته سازی کرده و بعد از تعریف شرایط مرزی حاکم بر مساله، آن را با استفاده از یک کد نرم افزاری حل می کنیم. خروجی مساله الگوهای توزیع غلظت رسوب بار معلق و لایه های رسوبی تشکیل شده بر روی بستر مخزن است.

۱-۳- ساختار پایان نامه

پایان نامه در ادامه متشکل از چهار فصل است. در ابتدا تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف در زمینه فرآیند های مورفولوژی ارائه می شود. انواع روش های تجربی، آزمایشگاهی و مطالعات عددی که در زمینه های مختلف مربوط به رسوب انجام شده با شرحی مختصر از آنها ذکر می شود. در فصل سوم انواع مختلف رسوب و معادلات و روابط حاکم بر پدیده رسوب گذاری ارائه می شود. در این فصل معادلات مربوط به جریان و رسوب به صورت مجزا عنوان می شود. سپس روش حجم محدود به کار رفته و روش حل تعریف شده و معادلات گسسته شده نهایی بر اساس روش انتخاب شده ارائه خواهد شد. در ادامه و فصل چهارم مراحل انجام مدل سازی برای جریان بدون رسوب و مدل سازی فرآیند انتقال رسوب به صورت جداگانه شرح داده می

شود . نتایج خروجی مربوط به محاسبات مورد نظر ارائه و تحلیل خواهد شد . همچنین در پایان خلاصه ای از آنچه صورت گرفته به همراه نتایج حاصل بیان خواهد شد و همچنین توصیه هایی برای مطالعات آینده ارائه می شود .

فصل دوم

تاریخچه مطالعات

۲-۱- مقدمه

قدیمی ترین مطالعات شناخته شده درباره انتقال رسوب به ۴۰۰۰ سال قبل در چین بازمی گردد. [۳۶] کارهای مهمی در قرن اخیر در زمینه انتقال رسوب ، رسوب گذاری مخزن و مخازن رسوب گیر انجام شده است. به طور کلی تمام مطالعات موجود به دو دسته مطالعات فیزیکی و مطالعات تئوریک تقسیم بندی می شوند. از آنجاییکه برای دانستن نحوه عملکرد مخازن رسوب گیر نیاز به اطلاعاتی در زمینه انتقال رسوب و فرآیندهای رسوب گذاری داریم ، تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته در این زمینه ها ارائه می شود .

مدلسازی فیزیکی و شبیه سازی عددی دو گزینه اصلی بکار رفته در تحلیل های مهندسی رودخانه است. هر دو روش دارای مزیت ها و مشکلاتی است. مدل های فیزیکی با اینکه نتایج را به صورت کاملاً واضح و مستقیم نشان می دهد ، اما پرهزینه و زمانبر است. بدلیل اینکه جریان، انتقال رسوب، و فرآیندهای تغییر بستر در رودخانه ها بسیار پیچیده است؛ بدست آوردن شباهت بین یک مدل فیزیکی و مشابه آن ها بسیار مشکل است. در مدل فیزیکی در اثر وجود ناهماهنگی در مقیاس مدل و تغییرات در شرایط محیطی آزمایش از قبیل دما خطاها افزایش می یابد. با توجه به توضیحات فوق ، مطالعات صورت گرفته را در دو عنوان مطالعات فیزیکی و مطالعات تئوری دسته بندی می کنیم

۲-۲- مطالعات فیزیکی

مطالعات فیزیکی با انجام آزمایش بر روی فلوم های آزمایشگاهی و یا با مشاهدات محلی انجام می گیرد. مطالعات آزمایشگاهی بدلیل مشکل بودن شبیه سازی رودخانه توسط فلوم و وجود فرضیات مختلف نتایج خوبی ارائه نمی کند. با این حال مطالعات آزمایشگاهی همچنان مهمترین مطالعات جهت بررسی صحت سایر مطالعات هستند و اغلب برای دانستن مفهوم کلی جریان و انتقال رسوب بکار می روند. بسیاری از محققین بوسیله نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، روش های تجربی را برای پدیده انتقال رسوب گسترش می دهند.

مطالعات میدانی بر اساس مشاهدات حقیقی صورت می گیرد که گزینه بهتری جهت دانستن سیستم پیچیده رودخانه ها خواهد بود. هرچند مشاهدات میدانی اغلب اوقات بسیار مشکل و غیر قابل ممکن خواهد بود. بعضی از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته به شرح زیر است.

یکی از قدیمی ترین و پرکاربردترین مطالعه صورت گرفته توسط نیوتن [۲۸] در سال ۱۹۵۱ انجام گرفته است. موضوع اصلی مطالعه صورت گرفته ماهیت تخریب بستر در یک کانال روباز بود که با استفاده از ذرات رسوب با اندازه یکنواخت صورت گرفت. بهامیدی پاتی [۴] در سال ۱۹۷۱ مطالعات آزمایشگاهی گسترده ای را با استفاده از فلوم ها برای سه اندازه مختلف ذره رسوب انجام داد. وی در هر مطالعه اندازه ذرات را یکنواخت فرض کرد. یکی از موضوعات مورد بررسی در آزمایش فوق بررسی تخریب بستر در زیر یک سد با توجه به آزادسازی آب با بار رسوب نسبتا کم از مخزن است. موضوع دیگر، مطالعه فرآیند رسوب گذاری در یک کانال در اثر تغییر در ظرفیت انتقال رسوب بین کانال و رودخانه ای است که کانال آب را از آن خارج می کند. بهامیدی پاتی یک رابطه تجربی برای تخمین پروفیل بستر یک کانال تخریب شده را براساس طول کانال، اندازه ذرات و دیگر پارامترها گسترش داد. این پارامترها تابعی از تنش برشی اولیه نسبت به زبری ذرات است.

یکی از مطالعات بسیار کاربردی توسط سونی [۳۷] در سال ۱۹۷۵ انجام گرفته است. او آزمایشاتی را جهت مطالعه پدیده رسوب گذاری در جریان ها را نسبت به جریان های روگذر رسوب انجام داد. وی از یک شرط بستر متحرک قبل از شروع شرایط رسوب گذاری بستر استفاده کرد که سبب ارائه بهتر موقعیت حقیقی شد. مهتا در ۱۹۸۰ [۲۴] مطالعات انجام گرفته توسط سونی را برای ذرات با اندازه های مختلف گسترش داد. سونی [۳۸] یک سال بعد در ۱۹۸۱ یک روش منحنی مشابه را با استفاده از تجزیه بعدی و داده های فلوم آزمایشگاهی جهت پیش بینی رسوب گذاری در کانال نسبت به افزایش رسوب ورودی و سپس تعادل ظرفیت انتقال رسوب ارائه کرد. ورودی این روش شرایط جریان متعادل و رسوب اضافی وارد شده برای تخمین رسوب گذاری است.

ین در سال ۱۹۹۲ [۵۱] مطالعات آزمایشگاهی را با استفاده ذرات رسوب با قطر متوسط اما انحراف معیار هندسی مختلف انجام داد. بنابراین عدم یکنواختی در رودخانه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. وی پدیده های بنیادی تکامل بستر کانال را در حین رسوب گذاری نسبت به بار اضافی رسوب به دنبال کاهش بار رسوب در اثر فرسایش در فلوم را مورد مطالعه قرار داد.

سیل در سال ۱۹۹۷ [۳۴] مطالعات آزمایشگاهی را با استفاده از فلوم و مخلوط های غیر یکنواخت رسوب انجام داد. وی از رسوبات با اندازه بین ۰/۱ میلیمتر تا ۶۵ میلیمتر استفاده کرد تا انتقال رسوب در رودخانه ها به شکل بهتری ارائه شود. سیل سه آزمایش را جهت مطالعه فرآیندهای رسوب گذاری در جریان ها انجام داد.

در سال ۲۰۰۹ سامه کانتوش [۲۰] مطالعات آزمایشگاهی خود را با عنوان تاثیر هندسه مخازن سطحی بر روی الگوی جریان و توزیع رسوب بار معلق انجام داد. وی با ساختن مخازن با هندسه و اشکال مختلف، مقادیر سرعت و غلظت رسوب را برای یک شرایط ورودی ثابت اندازه گیری و مقایسه کرد. هدف اصلی آزمایشات انجام شده بدست آوردن مقطعی بهینه با کمترین میزان رسوب

گذاری است. تویبایس شونتز و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۳۲] برآوردی دو بعدی از انتقال رسوب را در آب کم عمق با استفاده از تصویربرداری های حرارتی و آب گرم شده انجام دادند.

از آنجاییکه مخازن مورد مطالعه ما از نظر ابعاد تا حدودی مشابه با مخازن رسوب گیر و حوضچه های ته نشینی است، از اینرو در این بخش مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه ارائه می شود. یکی از قدیمی ترین مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در سال ۱۹۷۴ توسط اداره آب ایالت ایلینویز با همکاری شهر شیکاگو و بر روی یکی از مخازن ته نشینی تصفیه خانه آب مرکزی شهر انجام شد. این مطالعه مشخصات جریان را در یک مدل هیدرولیکی بررسی کرده و هدف از آن بهبود بخشیدن شرایط جریان در طرح های اولیه مخازن جهت ارتقا کیفیت آب بعد از تصفیه بود.

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از مخازن رسوب گیر و حوضچه های ته نشینی، جمشیدنیا و فیروزآبادی [۱۶] در سال ۲۰۱۰ بررسی های آزمایشگاهی را بر روی تاثیر موج گیر بر روی جریان در یک مخزن رسوب گیر مستطیل شکل اولیه انجام دادند. مطالعات آنها بر روی تاثیر موقعیت و حالت موج گیر ها بر روی توزیع سرعت جریان و شرایط اولیه هیدرولیکی میدان جریان صورت گرفت

در سال ۱۹۹۹ رانجا راجو [۳۱] و همکاران قابلیت حذف رسوب حوضچه های رسوب گیر را مورد بررسی قرار دادند. پس از انجام بررسی های آزمایشگاهی بر روی قابلیت مخازن، داده های آزمایشگاهی موجود از گذشته تا حال گردآوری شد. آنگاه دقت روابط تجربی و روش های تحلیلی موجود برای قابلیت ارزیابی شده و روابط جدید را ارائه کردند.

همانطور که پیشتر گفته شد، مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی و اعتبار سنجی هر یک از روش های عددی یا تحلیلی برای ارائه پدیده انتقال رسوب بسیار ضروری است. بسیاری از محققین همانند سونی و بهامیدی پاتی که مطالعات آزمایشگاهی انجام داده اند و سایر محققین از این مطالعات جهت گسترش روابط تجربی برای بررسی پدیده انتقال رسوب استفاده کرده اند.

۲-۳- مطالعات تئوری

مطالعات آزمایشگاهی محدودیت هایی نسبت به ارائه شرایط پیچیده حقیقی یک رودخانه در داخل یک فلوم آزمایشگاهی دارند. با توجه به این محدودیت ها محققین فرضیات بسیاری را با توجه به نیاز مطالعه حین انجام آزمایش در نظر می گیرند. این فرضیات دامنه مطالعات را برای در برگرفتن مسائل حقیقی مرتبط با آن محدود می کنند. شبیه سازی عددی امکان مدلسازی مقیاس حقیقی و اصلی را بدون هیچگونه مشکل در مقیاس را فراهم می کند که بسیار موثر است. هر چند اعتبار شبیه سازی عددی وابسته به عوامل زیر است : [۲۰]

۱- کیفیت تشریح فرآیندهای فیزیکی از نظر معادلات حاکم ، شرایط مرزی و فرمول های تجربی

۲- دقت معادلات دیفرانسیل حاکم گسسته شده بوسیله طرح های عددی

۳- قابلیت اجرای معادله جبری گسسته شده که به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم حل می شود

۴- کد نویسی دقیق فرآیندهای حل عددی

اگر تعریف ریاضی نامعقول باشد، گسسته سازی عددی نادرست و روش حل بی اثر است. اگر کد محاسباتی دارای اشتباهاتی باشد، نتایج محاسباتی قابل اعتماد نخواهد بود. از آنجاییکه بسیاری از فرمول های تجربی برای مسائل ریاضی بکار می رود، کارایی شبیه سازی عددی محدود است. قبل از آنکه یک مدل عددی برای یک پروژه حقیقی قابل اجرا باشد، نیاز است تا با نتایج حاصل از حل های تحلیلی و داده های حاصل از آزمایشگاه و مطالعات میدانی اعتبار سنجی و تایید شود.

تمامی مدل های ریاضی گسترش یافته بر پایه پنج معادله اساسی زیر استوار است. حالت یک

بعدی معادلات در زیر ارائه شده است. [۳۶]

۱- معادله پیوستگی برای جریان آب

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

که در آن Q دبی جریان و A سطح مقطع جریان است.

۲- معادله مومنتموم برای جریان آب

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق g شتاب گرانش زمین و Z عمق آب است.

۳- معادله مقاومت در برابر جریان

$$U = aS^b \quad (3)$$

a و b پارامترهای تجربی و S شیب کانال است

۴- معادله پیوستگی برای رسوب

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

در رابطه فوق G نرخ انتقال رسوب و λ تخلخل مخلوط رسوب

۵- معادله ظرفیت انتقال رسوب

$$G = cU^d \quad (5)$$

U میانگین سرعت جریان و c و d پارامترهای تجربی

محاسبات تحلیلی و عددی برای حل این معادلات توسط محققین بسیاری ارائه شده است. روش های تحلیلی حل این معادلات نسبت به سادگی و تاثیرگذاری شان مفید هستند اما حل های تحلیلی تنها برای موارد سهل و آسان قابل انجام است. حل های عددی در حل معادلات دیفرانسیلی مشکل در شرایط پیچیده بسیار موثر است.

۲-۳-۱- مدل تحلیلی انتقال رسوب

معمولا مدل های تحلیلی در حل مسائلی بکار می روند که شرایط جریان بسیار ساده بوده و می توان در دو راستا بررسی کرد. بکار بردن حل های تحلیلی برای مسائل دو بعدی و سه بعدی با شرایط پیچیده بسیار مشکل است. با این حال حل های تحلیلی هم زمان با بدست آوردن داده ها در بسیاری از شرایط جهت بررسی مدل عددی بسیار مهم است. بعضی از مدل های تحلیلی رسوب به صورت خلاصه در زیر آمده است.

یک از قدیمی ترین مدل ها توسط تینی [۴۲] در سال ۱۹۵۵ ارائه شده است. وی یک معادله دیفرانسیل یک بعدی را جهت شبیه سازی فرسایش بستر متراکم شده از رسوب یکنواخت در یک کانال روباز به شکل تحلیلی حل کرد. جهت بررسی نتایج ، نتایج محاسبات را با آزمایشات نیوتن در سال ۱۹۵۱ اعتبار سنجی کرد که نتایج بدست آمده منطبق بود. الخلیف [۱] در ۱۹۶۵ با استفاده از تقریب انیشتین در سال ۱۹۵۰ یک تابع بار بستر برای یک کانال فرسایش یافته ارائه و از تابع فوق برای تشریح فرسایش کانال استفاده کرد. جارامیلو [۱۸] در سال ۱۹۸۳ مدل انتقال رسوب سهموی خطی را جهت تخمین دبی بار بستر برای یک دامنه محدود و شبه محدود حل کرد. وی تراز بستر را با استفاده از اصلاح نرخ دبی بار بستر و معادله پیوستگی رسوب تخمین زد. در ۱۹۸۳ گیل [۱۴،۱۵] مدلی را جهت شبیه سازی تغییر بستر در حین فرسایش و رسوب گذاری با استفاده از یک مدل تحلیلی تراز بستر سهموی برای کانال با طول محدود ارائه کرد.

در ۱۹۸۴ جارامیلو و جین [۱۹] یک مدل رسوب سهموی غیر خطی را بدون در نظر گرفتن جریان غیر یکنواخت ارائه کردند. دی وریس [۹] در سال ۱۹۷۳ با استفاده از ترم های انتقال شتاب و گرادیان عمق یک مدل تغییر تراز بستر هذلولوی خطی را ارائه کرد. ژانگ و کاهویتا [۵۲] در سال ۱۹۸۷ یک مدل رسوب گذاری سهموی غیر خطی را حل کرده و نشان داد که تراز بستر تابعی از ریشه دوم زمان است. یک سال بعد و در ۱۹۸۸ مسوکنی [۲۵] دو مدل مختلف را به صورت مجزا برای فرآیندهای فرسایش و رسوب گذاری گسترش داد. وی یک مدل تحلیلی هذلولوی خطی را برای رسوب گذاری در مواردی که دبی رسوب افزایش می یابد و یک مدل تحلیلی سهموی غیر خطی را برای فرسایش در حالتی که دبی رسوب کاهش می یابد ارائه کرد.

۲-۳-۲- مدل های عددی انتقال رسوب

تمامی مدل های تحلیلی پدیده انتقال رسوب بر پایه فرضیات جریان آب دائم و شبه دائم استوار است و حالت غیر دائم جریان آب سبب پیچیدگی سیستم شده که ارائه حل تحلیلی برای آن بسیار مشکل است. این فرضیات معمولاً در شرایط حقیقی نامعتبر هستند. برای غلبه بر این محدودیت ها محققین روش های عددی را برای حل معادلات انتقال رسوب در حالات پیچیده ارائه کردند. این رویکرد با پیشرفت در زمینه کامپیوتر برای روش هایی که به حجم زیادی از محاسبات نیاز دارند توسعه یافت. از اینرو مدل های عددی انتقال رسوب گسترش یافت. تمامی مدل های عددی را می توان براساس ابعاد به سه دسته یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی دسته بندی کرد. بعضی از مدل های عددی بسیار شناخته شده به صورت زیر است.

۲-۳-۲-۱- مدل های یک بعدی انتقال رسوب

در مدلسازی یک بعدی انتقال رسوب غلظت به صورت میانگین در راستای قائم و جانبی خواهد بود. این مدل ساده ترین حالت انتقال رسوب است که تنها شامل یک معادله در یک راستا

است. استفاده از این تقریب به عنوان حل های تحلیلی آسان است و می توان به سهولت برای معادلات دیفرانسیل یک بعدی بکار برد ، اما این تقریب را نمی توان در مواردی که جریان در راستای طولی و قائم دارای اهمیت است مورد استفاده قرار داد. بسیاری از مدل های تحلیلی و عددی یک بعدی انتقال رسوب تاکنون ارائه شده است. یانسن [۱۷] در سال ۱۹۷۹ ، سونگ [۶] در سال ۱۹۸۰ و دی وریس [۱۱] در ۱۹۸۹ مدل های یک بعدی را بررسی کردند. گارد [۱۲] در ۱۹۶۵ یک مدل عددی یک بعدی را برای شبیه سازی رسوب گذاری تحت جریان های شبه دائمی ارائه کرد. گسler [۱۳] در سال ۱۹۷۱ از روش اختلاف محدود برای گسترش یک مدل عددی یک بعدی جهت پیش بینی فرسایش و رسوب گذاری استفاده کرد. طرح پیش بینی وی در موارد فرسایش و رسوب گذاری چرخشی مناسب بود. دی وریس با استفاده از یک طرح اختلاف محدود صریح یک مدل عددی جهت محاسبه تراز بستر و پروفیل سطح آب در حین فرآیند رسوب گذاری در کانال ارائه کرد [۱۰]. این روش قادر بود تا نتایج بسیار دقیق را با استفاده از تحمیل یک قید بر گام زمانی بدست آورد. در ۱۹۷۳ چونگ [۶] از مدل مشابه استفاده کرده و آن را با استفاده از روش اختلاف محدود ضمنی جهت برطرف کردن قید گام زمانی حل کرد. یک سال بعد سوامی [۴۰] در ۱۹۷۴ یک مدل عددی را برای رسوب گذاری در بالادست یک سد برای دبی ثابت ارائه کرد. وی از روش تکرار استفاده و معادله را برای مقادیر گام زمانی کوچک حل کرده و سپس با استفاده از سری سینوسی فوریه پروفیل نهایی بستر را اصلاح کرد. محمود [۲۳] در سال ۱۹۷۵ یک روش عددی را با در نظر گرفتن تغییرات بار معلق در زمان و مکان ارائه کرد. وی از یک از طرح اختلاف محدود ضمنی برای حل عددی آن استفاده کرد. در ۱۹۷۸ موسکاترویک [۲۶] یک مدل برای تغییر عمق در امتداد سطح مقطع ارائه کرد. وی از طرح چهار نقطه پریسمانبرای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده کرد.

پارک و جین [۳۰] در سال ۱۹۸۶ مدل یک بعدی با استفاده از طرح پریسمان را جهت شبیه سازی تغییر در تراز بستر را نسبت به بار اضافی رسوب ارائه کرد. بهالامودی و چادهری [۳] در ۱۹۹۱ از طرح صریح با دقت مرتبه دوم برای گسترش مدل عددی استفاده کرد. دو مدل یک بعدی پرکاربرد

Mike^{۱۱} توسط DHI^۳ در سال ۲۰۰۳ و دیگری ۶ HEC توسط USACE^۴ در سال ۱۹۹۳ برای انتقال رسوب، فرسایش و رسوب گذاری در کانال های مستقیم و رودخانه ها ارائه شده است.

۲-۳-۲-۲- مدل دو بعدی انتقال رسوب

در مدل انتقال رسوب دو بعدی غلظت رسوب در یک راستا عمود بر راستای قائم با توجه به مشخصات جریان و نیازهای مورد مطالعه میانگین گیری می شود. براساس مدل های دو بعدی انتگرال گیری شده می توان مدل های دو بعدی را به صورت انتگرال گیری شده در عمق و انتگرال گیری جانبی دسته بندی کرد. در مدل های انتگرال گیری شده در عمق تمامی پارامترهای مدل و متغیرها در یک ستون آب مشابه فرض می شود. کاربرد مدل های دو بعدی در مقایسه با مدل های یک بعدی بسیار پیچیده است. مدل های دو بعدی در مقایسه با سایر گزینه ها محبوبتر بوده و اطلاعات کافی را در مورد پروژه مورد نظر با استفاده از منابع بهینه ارائه می کند. بعضی از مدل های دو بعدی که تاکنون ارائه شده به شرح زیر است:

استروکسما [۳۹] در سال ۱۹۸۵ یک مدل دو بعدی انتقال رسوب را جهت شبیه سازی تغییرات بستر در مقیاس بزرگ در دلف هیدرولیک ارائه کرد. شیمیزو و ایتاکورا [۳۵] در سال ۱۹۸۹ یک مدل دو بعدی انتقال رسوب برای کانال های رسوبی بسط داد. چادهاری [۵] در ۱۹۹۶ مدل دو بعدی انتقال رسوب بار بستر را برای کانال های مستقیم و پیچ و خم دار ارائه کرد. بعضی از مدل های دو بعدی انتقال رسوب پرکاربرد، Mike^{۲۱} توسط DHI در سال ۲۰۰۳، مدل TABS-MD توسط توماس و مک آنالی [۴۱] در ۱۹۹۰، CCHE^{۲D} توسط وو در سال ۲۰۰۱ و مدل HSCTM^{۲D} توسط هایتر در ۱۹۹۵ گسترش یافته اند.

^۳ Danish Hydraulic Institute

^۴ United State Army Corps of Engineers

^۵ National Center for Computational Hydroscience and Engineering ۲nd dimension

^۶ Hydrodynamic Sediment and Contaminant Transport Model ۲nd dimension

یکی از موضوعات مورد علاقه در مهندسی هیدرولیک رسوب حاصل از آبشستگی است. روش های عددی دو بعدی و سه بعدی بسیاری برای شبیه سازی فرآیند فوق ارائه شده است. یکی از این روش های اخیر توسط لیو و لندری [۲۲] در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است که از یک شبکه بندی بی ساختار با استفاده از طرح گودائف انجام شده است. در همین سال فیسل بن خلدون و محمد سید [۲] از ترکیب روش مشخصات و روش حجم محدود برای انجام مطالعات خود استفاده کرده است.

در زمینه مخازن رسوب گیر یکی از مطالعات صورت گرفته توسط زنگ و همکارانش [۵۳] در سال ۲۰۰۳ انجام شد. آنها مطالعه ای را به کمک شبیه سازی عددی جهت یافتن رابطه ای بین افزایش میزان نشست ذرات و اندازه مخزن رسوب گذاری انجام دادند. این رابطه در واقع به عنوان یک محدودیت در طراحی بهینه مخازن رسوب گذاری مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۵ ناصر و همکارانش [۲۷] مدل شبیه سازی دو بعدی از جریان و حذف رسوب را در مخزن رسوب گیر مستطیل شکل ارائه کردند.

۲-۳-۲-۳- مدل سه بعدی انتقال رسوب

مدل های سه بعدی انتقال رسوب بدلیل آنکه تمام ابعاد فضا را شامل می شود اطلاعات کامل تری دارد. استفاده از مدل های سه بعدی تنها در شرایطی بکار می رود که جزئیات بی شماری از کمیت های جریان نیاز به شبیه سازی داشته و مشخصات آن در تمامی جهات اهمیت دارد. مدل های سه بعدی در شرایطی که جریان لایه لایه باشد مانند جریان آب تازه بر روی آب نمک یا جریان آب گرم بر روی آب سرد بیشترین کاربرد را دارد.

محققین بسیاری مدل های سه بعدی را تاکنون ارائه کرده اند. وانگ و ادف [۴۹] در سال ۱۹۸۶ یک مدل المان محدود سه بعدی را برای جریان غیر دائمی ارائه کرده اند. لین و فالکنر [۲۱] یک دهه بعد و در ۱۹۹۶ یک مدل سه بعدی را برای دهانه رودخانه ها و نواحی ساحلی بیان کردند. ون راین [۴۳] در ۱۹۸۷ مدل انتقال رسوب سه بعدی را با مدل دو بعدی جریان انتگرال گیری شده

در عمق ترکیب کرد. دی مورن و ردی [۷] در سال ۱۹۸۶ یک مدل انتقال جریان را با استفاده از مدل $k - \epsilon$ ارائه کردند. دی مورن در ۱۹۹۱ مدل را با در نظر گرفتن انتقال بار بستر و بار معلق توسعه داد [۸]. وو [۵۰] در سال ۲۰۰۰ مدل انتقال رسوب سه بعدی را برای کانال های مستقیم و پیچ و خم دار ارائه کرد. بعضی از مدل های سه بعدی پر کاربرد Deflt-۳D است که بوسیله Delft Hydraulics در سال ۲۰۰۳ ارائه شد.

در زمینه مخازن رسوب گیر یکی از مطالعات سه بعدی توسط بیشو و یجایا [۴۷] در سال ۲۰۱۲ انجام گرفته است. وی در این مطالعه هندسه های مختلف مخازن رسوب گیر را به وسیله روش عددی سه بعدی مورد بررسی کرده است. جهت بررسی عددی از نرم افزار مدل عددی SSIM که جهت بررسی عددی هیدرولیک و انتقال رسوب مخازن رسوب گیر با هندسه های مختلف بکار می رود، استفاده شده است.

فصل سوم

معادلات و روابط حاکم

۳-۱- مقدمه

در این فصل معادلات حاکم مورد نیاز برای شبیه سازی میدان جریان و انتقال رسوب را ارائه می کنیم . همچنین معادلات اضافی بکار رفته از قبیل دبی بار بستر و تغییرات تراز بستر نیز در ادامه ارائه خواهد شد . این فصل از آن جهت دارای اهمیت است ؛ که منشا معادلات بکار رفته در شبیه سازی های انجام شده را شرح می دهد . خواننده می تواند با استفاده از این فصل دید مناسبی نسبت به اهداف فیزیکی و عددی معادلات حاکم بکار رفته در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۷) بدست آورد .

از آنجاییکه در این مطالعه با جریان و رسوب روبه رو هستیم ؛ از اینرو معادلات مربوط به مدل سازی جریان و رسوب به دو دسته زیر تقسیم می شوند :

۱- مدل هیدرودینامیک

الف (معادله پیوستگی جرم^۸

ب (معادله بقا مومنتوم^۹

^۷ Computational Fluid Dynamic

^۸ Mass Continuity

۲- معادلات انتقال رسوب

الف (انتقال بار بستر (معادله اکسنر^{۱۰})

ب (انتقال بار معلق (معادله انتقال - انتشار)

۳-۲- مدل هیدرودینامیک

همانطور که گفته شد جریان حاکم بر مخازن سطحی ، جریان آب کم عمق است . معادلات آب کم عمق در جریان رودخانه ها ، جریان بعد از شکست سد، دریاچه و حوضچه های طبیعی ، مخازن سد ها و سایر مخازن سطحی حاکم است. معادلات آب کم عمق عبارتند از معادله پیوستگی و بقا مومنتوم ، که با فرض کوچک بودن شتاب جریان در راستای قائم بدست می آید. مشخصه اصلی آب های کم عمق کوچک بودن عمق جریان در مقایسه با مقیاس های افقی است.

۳-۲-۱- معادله پیوستگی

اساس منشا فیزیکی معادله پیوستگی بقا جرم است . با توجه به چندین مدل سیال موجود ، از مدل اوپلری برای بدست آوردن معادله پیوستگی استفاده شده است . در مدل بکار رفته مقادیر سرعت وابسته به مکان است . معادله پیوستگی برای یک المان سیال در حالت کلی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1-2)$$

در معادله فوق ρ چگالی سیال ، u ، v و w به ترتیب مقادیر سرعت در راستای x ، y و z است. در صورتی که سیال تراکم ناپذیر فرض شود ، چگالی می تواند تنها تابعی از دما و غلظت

^۹ Momentum Conservation

^{۱۰} Exner-Equation

ناخالصی های سیال باشد. در بسیاری از موارد با توجه به ناچیز بودن تغییرات چگالی از آن صرف نظر کرده و معادله پیوستگی به شکل زیر باز نویسی می شود :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

۳-۲-۲ معادله بقا مومنتوم

معادله بقا مومنتوم یا معادله ناویر استوکس ارتباط بین تغییرات سرعت و تنش های نرمال مثل فشار و تنش برشی را در سیال بیان می کند . در بدست آوردن معادلات بقا مومنتوم نیز از مدل اوپلری استفاده شده است . در سیستم مختصات کارتزین معادله فوق به صورت زیر است : [۲۰]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho wu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho wv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) = \\ -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (5-2)$$

در روابط فوق u ، v و w به ترتیب سرعت در جهت های x ، y و z است. p فشار ، ρ چگالی سیال ، g شتاب گرانش و t زمان است. τ_{ij} تنش های برشی سیال هستند. مجموعه معادلات (۳-۳) تا (۵-۳) به عنوان معادلات بقا مومنتوم و معادله (۲-۳) به عنوان معادله پیوستگی نامیده می

شوند. با حل چهار معادله موجود ، چهار مجهول سرعت و فشار در تمامی نقاط سیال بدست می آید. جهت سهولت در انجام مدلسازی و حل محاسبات معمولاً از شکل دو بعدی و انتگرال گیری شده در عمق معادلات استفاده می شود.

بخشی دیگر از محاسبات مربوط به مولفه هیدرودینامیک در مدل مورفودینامیک تعیین تنش های آشفتگی است که در اثر نوسانات سرعت ایجاد می شوند. برای محاسبه پارامتر مربوط به آشفتگی روش های مختلفی وجود دارد که یکی از شناخته شده ترین آنها مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ است.

در مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ لزجت گردابه ای v_t ، مقدار انرژی جنبشی k و نرخ اتلاف

انرژی جنبشی آشفتگی ε از روابط زیر محاسبه می شوند : [۲۰]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(ku) + \frac{\partial}{\partial y}(kv) + \frac{\partial}{\partial z}(kw) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) + G - \varepsilon \quad (۶-۲)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon u) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon v) + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon w) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) + C_{\varepsilon 1} G \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۷-۲)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^\gamma}{\varepsilon} \quad (۸-۲)$$

در معادلات فوق G ترم تولید انرژی جنبشی آشفتگی بوده و برابر است با :

$$G = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (۹-۲)$$

با استفاده از رابطه (۹-۳) ترم G به صورت زیر است :

$$G = \left[v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\gamma}{\gamma} k \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} =$$

$$v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = v_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10-3)$$

در رابطه فوق از تانسور کرنش استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می شود :

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \times \frac{1}{2} \quad (11-3)$$

همانطور که مشخص است تانسور کرنش متقارن است . $S_{ij} = S_{ji}$

سایر ضرایب موجود در معادلات k و ε ضرائب ثابتی هستند که در جدول زیر ارائه شده اند.

جدول (۱-۳) ضرائب ثابت در معادلات $k - \varepsilon$

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
۰/۰۹	۱/۴۳	۱/۹۲	۱	۱/۳

۳-۳- مدل انتقال رسوب

مدلسازی انتقال رسوب در مخزن شامل دو موضوع اصلی توزیع غلظت رسوب بار معلق و تغییرات تراز بستر مخزن در یک دوره زمانی مشخص می باشد. محاسبه تغییرات تراز بستر وابسته به تعیین غلظت رسوب بار معلق و دبی انتقال آن و همچنین دبی انتقال بار بستر در مخازن می باشد.

۳-۱- انتقال بار معلق (معادله انتقال - انتشار)

همانطور که قبلا گفته شد راه مناسب برای شبیه سازی رسوب بار معلق بکار بردن معادله انتقال- انتشار است . معادله مذکور دو راه برای انتقال جرم دارد . انتقال ، جابه جایی ذره نسبت به جریان سیال است ؛ یعنی ذرات با حرکت سیال جابه جا می شوند . انتشار ، جابه جایی ذره در اثر اختلاف بین غلظت مولکولی است .

با افزایش سرعت برشی ، ذرات بستر که شروع به حرکت نموده اند ممکن است به حالت معلق درآیند. برای محاسبه بار معلق در یک مقطع از جریان لازم است توزیع غلظت بار رسوبی در عمق مشخص باشد. با مشخص بودن غلظت بار رسوبی و سرعت می توان بار معلق را با انتگرال گیری در عمق محاسبه نمود. غلظت بار معلق در هر نقطه از میدان جریان با حل معادله انتقال- انتشار امکان پذیر است که شکل کلی آن در حالت سه بعدی و مختصات کارتزین به صورت زیر است :]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Cu) + \frac{\partial}{\partial y}(Cv) + \frac{\partial}{\partial z}(C(w_s - w)) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (۳-۱۲)$$

ترم اول در سمت چپ معادله فوق نرخ تغییرات غلظت در مکان نسبت به زمان است . همچنین سه ترم دیگر طرف چپ معادله فوق ترم های انتقال و ترم های سمت راست معادله مذکور ترم های انتشار هستند . در رابطه فوق C غلظت حجمی رسوبات معلق ، v_t لزجت گردابه ای آشفتگی که براساس رابطه (۳-۸) محاسبه می شود و σ_s عدد آشفتگی پرانتل اشمیت^{۱۱} برای انتقال رسوب است که مقادیر آن بین ۰/۵ تا ۱ بوده و بسیاری از محققین آن را ۱ در نظر می گیرند. ون راین این ضریب را به صورت زیر محاسبه کرده است:

^{۱۱} Turbulent Prandtl - Schmit number

$$\sigma_s = \frac{1}{\beta\varphi} \quad (12-2)$$

که φ بیان کننده اثر رسوبات بر ساختار آشفته‌گی جریان می باشد و برای غلظت های کمتر از 2500 mg/lit در حدود 0.9 تا 1 قرار دارد. ضریب β تفاوت پخش ذرات رسوب نسبت به ذرات سیال را نشان می دهد و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\beta = 1 + \gamma \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^2 \quad \text{برای} \quad \frac{1}{2} < \frac{w_s}{u_*} < 1 \quad (14-2)$$

برای محاسبه سقوط ذرات (w_s) می توان بر حسب قطره ذره d_s از یکی از روابط زیر استفاده نمود:

[46]

$$w_s = \begin{cases} \frac{1}{18} \frac{(G-1)gd_s^2}{\nu} & d_s < 100 \mu\text{m} \\ \left\{ 10 \frac{\nu}{d_s} \left[\left(1 + \frac{0.1(G-1)d_s^2}{\nu^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\} & 100 \mu\text{m} < d_s < 1000 \mu\text{m} \\ \frac{1}{1} [(G-1)gd_s]^{1/2} & 1000 \mu\text{m} < d_s \end{cases} \quad (15-2)$$

پس محاسبه و تعیین غلظت رسوبات معلق در میدان حل می توان مولفه های دبی رسوب بار معلق را در امتداد محورهای کارتزین به صورت زیر محاسبه می شود:

$$q_{sx} = \int_a^{z_b} \left(uc - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial x} \right) dz \quad (16-2)$$

$$q_{sy} = \int_a^{z_b} \left(uc - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial y} \right) dz \quad (17-2)$$

۳-۳-۲- محاسبات تغییرات بستر با معادلات متوسط گیری شده در عمق

در حل معادلات رسوب و پیش بینی تغییرات تراز بستر آبراهه می توان به صورت دو بعدی از

فرم متوسط گیری شده عمقی معادلات استفاده نمود تا زمان حل کاهش یابد.

در صورت استفاده از معادلات متوسط گیری شده در عمق آب های کم عمق ، برای محاسبه تغییرات تراز بستر ، یا باید میزان بار کل را از روابط تجربی و به صورت مستقیم محاسبه کرد و یا بار بستر و بار معلق به صورت جداگانه محاسبه گردند. برای محاسبه بار معلق ابتدا باید از معادله انتقال – انتشار در امتداد عمق انتگرال گیری نمود. با انتگرال گیری از معادله (۳-۱۲) و صرف نظر از ترم های ناشی از تغییر توزیع سرعت و غلظت رسوب در امتداد عمق می توان نوشت : [۲۹]

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tilde{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tilde{v}C) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\tilde{v}_t}{\sigma_s}\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\tilde{v}_t}{\sigma_s}\frac{\partial C}{\partial y}\right) \quad (۳-۱۸)$$

۳-۳-۳- شرایط مرزی برای حل معادله انتقال – انتشار

بدیهی است برای حل معادله (۳-۱۲) باید شرایط مرزی میدان حل مشخص باشد. شرایط

مرزی به صورت زیر است : [۴۳]

۱- در سطح آزاد جریان ، رسوبی وارد یا خارج نمی شود و در نتیجه شار صفر به مدل داده می شود

$$w_s C + \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (۳-۱۹)$$

۲- در مقطع ورودی پروفیل توزیع غلظت رسوب و در مقطع خروجی معمولاً گرادیان صفر به مدل اعمال می شود .

۳-۴- مدل تغییرات تراز بستر

برای محاسبه تغییرات تراز بستر از معادله اکسندر^{۱۲} استفاده نمود . این رابطه اصل بقا جرم

رسوب در بازه ای از رودخانه به طول dx را بیان می کند . با در نظر گرفتن این اصل می توان رابطه

زیر را نوشت : [۵۰]

^{۱۲} Exner equation

$$(1 - p') \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (hC) + \frac{\partial q_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty}}{\partial y} + E - D = 0 \quad (20 - 2)$$

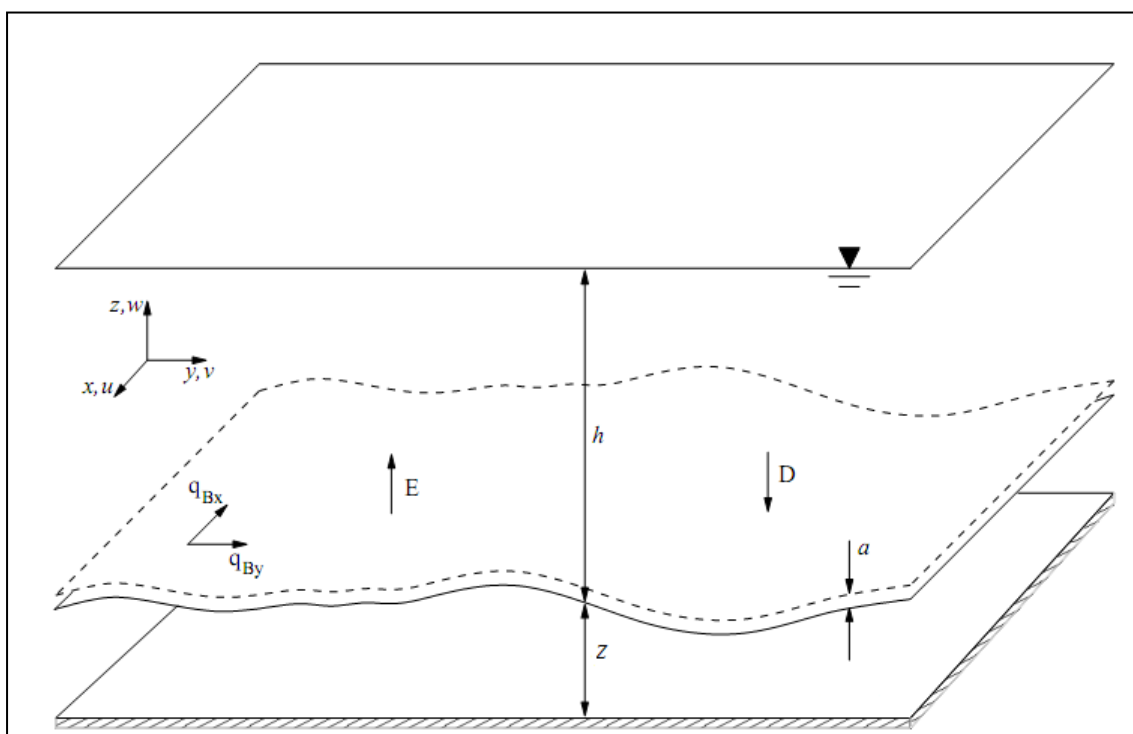
در رابطه فوق p' تخلخل مصالح بستر ، C متوسط غلظت رسوبات معلق در عمق و q_{tx} و q_{ty} به ترتیب مولفه های بار رسوبی کل در جهت های x و y می باشند. ترم دوم این رابطه افزایش یا کاهش رسوبات معلق در طول بازه زمانی مورد نظر می باشد که در شرایط جریان با دبی ثابت می توان از آن صرف نظر کرد.

همچنین در رابطه فوق D نرخ ته نشینی ذره در واحد عرض و E نرخ بلند شدن رسوب در واحد عرض است . مقدار $(E-D)$ را می توان به صورت زیر محاسبه کرد : [۴۳]

$$E - D = (w - w_s)c \quad (21 - 2)$$

در رابطه فوق C غلظت رسوبات معلق و w مقدار سرعت در جهت قائم است . همچنین پارامتر w_s مربوط به سرعت سقوط ذرات است که از رابطه (۳-۱۵) محاسبه می شود .

به این ترتیب با مشخص بودن بار رسوبی کل و غلظت بار معلق در عمق و تخلخل مصالح بستر ، تغییرات تراز بستر در گام های زمانی متوالی با حل معادله فوق بدست می آید. بار رسوبی کل را می توان به دو صورت محاسبه نمود. حالت اول به صورتی است که برای محاسبه بار کل از روابط مستقیم که ارائه شده است استفاده کنیم. حالت دوم که بسیار رایج تر است محاسبه بار بستر و بار معلق به صورت جداگانه و در نظر گرفتن مجموع آن دو به عنوان بار کل است. شکل (۳-۱) طرح کلی مدل تغییرات بستر را نشان می دهد .



شکل ۳-۱) طرح کلی مدل تغییرات تراز بستر

در شکل فوق a نیمی از فاصله بستر تا بیشترین سطح انتقال بار بستر است. اگر طبق تعریف انیشتین^{۱۳} حداکثر ضخامت لایه انتقال بار بستر به صورت γd_{Δ} تعریف شود؛ می توان مقدار زیر را در نظر گرفت: $a = \gamma d_{\Delta}$. در شکل فوق a ضخامت لایه انتقال بار بستر تعریف می شود.

۳-۴-۱- محاسبه دبی بار بستر

بار بستر باری است که در ناحیه نزدیک کف به صورت لغزیدن، غلتیدن و جهیدن حمل می شود. انیشتین^{۱۴} بار بستر را به صورت باری که در ناحیه با ضخامت حدود دو برابر قطر ذرات در نزدیکی بستر حمل می شود، تعریف کرد و حداکثر طولی که ذره رسوب بصورت بار بستر حرکت می کند را ۱۰۰ برابر قطر ذره رسوب تخمین زده است.

^{۱۳} Einstein

^{۱۴} Einstein

از میان روابط متعددی که برای محاسبه بار بستر ارائه شده است دو رابطه پرکاربرد MPM^{۱۵} و ون راین^{۱۶} بیان می شود.

۳-۴-۱-۱- رابطه MPM

این رابطه براساس آزمایشات بسیاری که میر پیتر^{۱۷} و مولر^{۱۸} انجام داده اند بدست آمده است. آزمایشات بر روی فلوم آزمایشگاهی با مقطع $2m \times 2m$ و به طول ۵۰ متر با رسوب یکنواخت و مخلوط با قطرهای ۰/۴ تا ۲۹ میلیمتر، تحت اثر شیب بستر ۰/۴ تا ۲ درصد و عمق جریان ۰/۱ تا ۱/۲ متر انجام شده است. رابطه ارائه شده به صورت زیر است:

$$q_{b,x} = \sqrt[4]{(G-1)gd_i^3} \frac{u_i}{\sqrt{u_i^2 + u_j^2}} \max(\tau_* - 0.47)^{1/2} \quad (22-2)$$

$$q_{b,y} = \sqrt[4]{(G-1)gd_i^3} \frac{u_j}{\sqrt{u_i^2 + u_j^2}} \max(\tau_* - 0.47)^{1/2} \quad (22-2)$$

که در آن

$$\tau_* = \frac{\gamma n^2 (u_i^2 + u_j^2)^{1/2}}{(\rho_s - \rho) d_i h^{1/2}} \quad (24-2)$$

در رابطه فوق $q_{b,y}$ و $q_{b,x}$ دبی بار بستر و u_j و u_i مقادیر سرعت در راستای y و x هستند. d_i قطر ذرات رسوب، G دانسیته نسبی ذرات رسوب، τ_* تنش وارد بر بستر، n ضریب مانینگ، h عمق جریان، ρ چگالی آب و ρ_s چگالی رسوب و γ وزن مخصوص آب می باشد. رابطه

^{۱۵} Meyer Peter and Muller

^{۱۶} Van Rijn

^{۱۷} Meyer-Peter

^{۱۸} Muller

فوق برای رودخانه ها و کانال ها با شیب کمتر از ۰.۲٪ ، $۰/۴ \leq d_i \leq ۲۹$ میلیمتر و $۱/۲۵ \leq G \leq ۴/۲$ برقرار است.

۳-۴-۱-۲-رابطه ون راین

در این رابطه با تعریف پارامتر بی بعد تنش کف به صورت رابطه (۳-۲۵) تعریف می شود که با استفاده از آن و رابطه (۳-۲۶) بار بستر محاسبه می شود.

$$T = \frac{\tau_b - \tau_{b,cr}}{\tau_b} \quad (۳-۲۵)$$

$$\frac{q_b}{\sqrt{(G-1)gd_b^{1/5}}} = AT^{1/5}, \quad A = \begin{cases} ۰/۰۵۳ & T < ۲ \\ ۰/۱ & T \geq ۲ \end{cases} \quad (۳-۲۶)$$

در رابطه فوق q_b دبی بار بستر ، d_b قطر متوسط ذرات رسوب و G دانسیته نسبی ذرات رسوب است.

۳-۴-۱-مدل تراکم بستر

هنگامیکه رسوبات وارد بستر شده و شروع به ته نشینی می کنند، ذرات تمایل دارند تا خود را با لایه های پایینی ، که در طی گذر زمان متراکم شده اند ، تطبیق دهند . به این فرآیند تحکیم رسوبات ته نشین شده می گویند . این عمل نمی تواند مشکل ترین قسمت از مدلسازی فرآیند انتقال رسوب باشد ، زیرا این پدیده به نسبت مشکل بودن ذاتی خود شناخته نشده است . این بخش از مدل انتقال رسوب تنها باید در رسوب گذاری مخازن در نظر گرفته شود ، زیرا مقادیر دقیق حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن باید محاسبه شود .

یک مدل کلاسیک برای تراکم رسوب براساس داده های تجربی وجود دارد . استیونس^{۱۹} در سال ۱۹۸۷ با تحلیل فرآیند رسوب گذاری در پروژه سد سه دره^{۲۰} در چین ، یک معادله جهت محاسبه عمق متراکم شده رسوب را با استفاده از تئوری تحکیم خاک ارائه و رابطه زیر را بیان کرد :

$$h = \frac{M}{1258} - 0.024 \left[\frac{M}{1258} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (27-2)$$

در رابطه فوق $\frac{M}{1258}$ ضخامت لایه رسوبی متراکم نشده است که با z نشان داده می شود . می توان رابطه را به صورت زیر بازنویسی کرد :

$$h = z - 0.024 z^{\frac{4}{3}} \quad (28-2)$$

معادله بدست آمده برای یک سد مشخص در چین صورت گرفته و یک رابطه کلی برای تراکم لایه های رسوبی نیست . تنها محدودیت رابطه فوق عدم وابستگی به زمان است . یکی از مزیت های استفاده از معادله تجربی بدست آمده عدم نیاز به استفاده از داده های یک مخزن در حال کار با پیش بینی دقیق است .

۳-۵- روش حجم محدود

معادلات حاکم بکار رفته در این مطالعه فاقد حل های تحلیلی هستند . از اینرو تنها راه حل آن ها استفاده از روش های عددی است . در این بخش روش های گسسته سازی و حل معادلات ناویر استوکس ، معادله انتقال - انتشار و معادله اکسنر ارائه می شود .

اصولاً سه طرح جهت گسسته سازی معادلات دیفراسیل پاره ای^{۲۱} وجود دارد . روش های مذکور عبارتند از روش اختلاف محدود^{۲۲} ، روش المان محدود^{۲۳} و روش حجم محدود^{۲۴} . علاوه بر این

^{۱۹} Stevens

^{۲۰} Three Gorges Dam

^{۲۱} Partial Deferential Equations

به هنگام استفاده از روش های فوق دو حالت روش صریح^{۲۵} و ضمنی^{۲۶} قابل انتخاب است . در روش صریح هر یک از معادلات اختلافی تنها یک مجهول دارند ، در حالیکه در روش ضمنی مجهولات در هر گام زمانی بطور همزمان برای تمامی گره ها محاسبه می شوند .

از آنجاییکه در مطالعه صورت گرفته برای حل معادلات ناویر استوکس از مدل نرم افزاری انسیس فلونت^{۲۷} استفاده شده است ، لذا حل عددی تنها برای معادلات مربوط به فرآیندهای انتقال رسوب مورد استفاده قرار می گیرد . برای گسسته سازی و حل معادلات مدل انتقال رسوب از روش حجم محدود دو بعدی استفاده شده است. با توجه به معادلات موجود برای هر یک از حالات انتقال رسوب شکل گسسته شده هر یک به صورت جداگانه ارائه می شود.

۳-۵-۱- روش حجم محدود برای حل معادله انتقال - انتشار

برای گسسته سازی و حل معادله (۳-۱۲) از روش طرح اختلاف پیوندی^{۲۸} که توسط اسپالدینگ^{۲۹} در ۱۹۷۲ ارائه شده استفاده می کنیم. طرح اختلاف پیوندی براساس ترکیبی از طرح های اختلاف بالادست^{۳۰} و اختلاف مرکزی^{۳۱} می باشد. طرح فوق از دقت مرتبه دوم است. در اینجا شکل ضمنی طرح اختلاف پیوندی را برای معادله انتقال - انتشار در حالت دو بعدی ارائه می کنیم. با صرف نظر کردن از پارامتر غیر دائم رابطه (۳-۱۲) داریم :

$$(huCA)_e - (huCA)_w + (huCA)_n - (huCA)_s =$$

^{۲۲} Finite Deference Scheme

^{۲۳} Finite Element Scheme

^{۲۴} Finite Volume Scheme

^{۲۵} Explicit

^{۲۶} Implicit

^{۲۷} Ansys Fluent

^{۲۸} Hybrid differencing scheme

^{۲۹} Spalding

^{۳۰} Upwind Deference

^{۳۱} Central Deference

$$\left(\Gamma A \frac{\partial C}{\partial x}\right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial C}{\partial x}\right)_w + \left(\Gamma A \frac{\partial C}{\partial x}\right)_n - \left(\Gamma A \frac{\partial C}{\partial x}\right)_s \quad (29-2)$$

که در رابطه فوق $\Gamma = \frac{v_t}{\sigma_s}$ است. حال برای حل معادله گسسته شده باید پارامترهای رابطه (29-3) را تقریب بزنییم. این عمل را با تعریف دو متغیر F و D جهت نشان دادن شار جابه جا شده در واحد سطح و قابلیت نفوذ در سطح سلول نشان می دهیم.

$$F = hu \quad , \quad D = \frac{\Gamma}{\delta x} \quad (30-2)$$

با تعریف متغیرهای فوق رابطه (29-3) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$F_e C_e - F_w C_w + F_n C_n - F_s C_s =$$

$$D_e(C_E - C_P) - D_w(C_P - C_W) + D_n(C_N - C_P) - D_s(C_P - C_S) \quad (31-2)$$

حال با اعمال پارامتر غیر دائم به رابطه گسسته شده (29-3) و بازنویسی آن داریم:

$$a_p C_p = a_w C_w + a_E C_E + a_S C_S + a_N C_N + a_p^* C_p^* + S_u \quad (32-2)$$

که در رابطه فوق C_d ها مقادیر غلظت در نقاط شبکه بندی میدان حل بوده و سایر پارامترها به شرح جدول زیر است :

جدول ۲-۳ پارامترهای طرح اختلاف پیوندی

a_w	$\max \left[F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{\gamma} \right), \cdot \right]$
a_e	$\max \left[F_e, \left(D_e + \frac{F_e}{\gamma} \right), \cdot \right]$
a_n	$\max \left[F_n, \left(D_n + \frac{F_n}{\gamma} \right), \cdot \right]$
a_s	$\max \left[F_s, \left(D_s + \frac{F_s}{\gamma} \right), \cdot \right]$
a_p	$\frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}$
S_u	$\bar{S} \Delta V - S_p C_p$
ΔF	$F_e - F_w + F_n - F_s$
a_p	$a_w + a_e + a_n + a_s + a_p + \Delta F - S_u$

جدول ۳-۳ متغیرهای طرح اختلاف پیوندی

	w	e	S	N
F	$(hu)_w A_w$	$(hu)_e A_e$	$(hu)_n A_n$	$(hu)_s A_s$
D	$\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w$	$\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e$	$\frac{\Gamma_s}{\delta x_{SP}} A_s$	$\frac{\Gamma_n}{\delta x_{PN}} A_n$

۳-۵-۲- استفاده از روش الگوریتم ماتریس سه قطری^{۳۲}

برای حل رابطه (۳-۳۰) با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری آن را به شکل زیر بازنویسی می کنیم.

$$-a_s C_s^i + a_p C_p^i - a_n C_n^i = a_p C_p^i + a_w C_w^i + a_g C_g^i + S_u \quad (۲۳-۲)$$

مقادیر سمت راست به عنوان معلومات در هر مرحله و براساس مقادیر بدست آمده در گام زمانی قبل است. با تعریف متغیرهای زیر می توان رابطه فوق را به شکل کلی ماتریس سه قطری تبدیل کرد.

$$\alpha_j \equiv a_n, \quad \beta_j \equiv a_s, \quad D_j \equiv a_p, \quad E_j \equiv a_p C_p^i + a_w C_w^i + a_g C_g^i + S_u \quad (۲۴-۲)$$

حال با تعریف متغیرهای فوق روش حل به وسیله الگوریتم ماتریس سه قطری به شرح زیر است. در مساله دو بعدی مورد نظر ابتدا مقادیر را برای هر راستای طولی محاسبه و سپس به راستای قائم بعد می رویم.

با تعریف شکل ماتریس سه قطری به صورت زیر داریم :

$$-\beta_j C_{j-1} + D_j C_j - \alpha_j C_{j+1} = E_j \quad (۲۵-۲)$$

که برای محاسبه مقدار C_j در هر گام زمانی از رابطه زیر استفاده می شود :

$$C_j = A_j C_{j+1} + E_j' \quad (۲۶-۲)$$

که در آن

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad (۲۷-۲)$$

^{۳۲} Tri-Diagonal Matrix Algorithm

$$E'_j = \frac{\beta_j C'_{j-1} + E_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \quad (28-3)$$

این قاعده می تواند در نقاط مرزی $j = 1$ و $j = n + 1$ با دادن مقادیر زیر به A و C' مورد استفاده قرار گیرد.

$$A_1 = 0, \quad E'_1 = C_1, \quad A_{n+1} = 0, \quad E'_{n+1} = C_{n+1}$$

با توجه به اینکه مقادیر C در نقاط مرزی معلوم است، برای محاسبه سایر نقاط میدان حل بایستی از فرآیند تکرار استفاده کرد و حل را تا همگرا شدن مقادیر فرض شده و محاسبه شده ادامه داد.

۳-۵-۳- گسسته سازی معادله دبی رسوب بار معلق

با در نظر گرفتن روابط (۳-۱۶) و (۳-۱۷) می توان شکل گسسته آن ها را در حالت دو بعدی و براساس میانگین سرعت و غلظت در واحد عمق محاسبه کرد. روابط به شکل زیر بازنویسی می شوند:

$$q_{s,i} = u_i C_{ij} - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{(C_{i+1,j} - C_{i-1,j})}{\delta x} \quad (29-3)$$

$$q_{s,j} = u_j C_{ij} - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{(C_{i,j+1} - C_{i,j-1})}{\delta y} \quad (30-3)$$

در روابط فوق C_{ij} مقدار غلظت رسوب معلق در نقطه (i,j) ، u_i ، u_j ، δx و δy به ترتیب بردارهای سرعت و گام های مکانی در راستای x و y هستند.

۳-۵-۴- گسسته سازی معادله تعیین تغییر تراز بستر

همانطور که گفته شد جهت محاسبه تغییرات تراز بستر با استفاده از رابطه (۳-۲۰) باید مقدار دبی کل را در هر نقطه از میدان حل محاسبه کرد. با در نظر گرفتن دبی کل به صورت حاصل مجموع بار رسوب معلق و بار رسوب بستر، بعد از محاسبه مقادیر بار رسوب بار بستر و بار معلق براساس روابط ارائه شده در بالا حال می توان مقدار رسوب کل را تعیین کرد:

$$q_{tx} = q_{bx} + q_{sx} \quad (۳-۴۱)$$

$$q_{ty} = q_{by} + q_{sy} \quad (۳-۴۲)$$

در روابط فوق q_{tx} و q_{ty} دبی بار کل رسوب در، مقادیر q_{bx} و q_{by} دبی بار بستر و q_{sx} و q_{sy} دبی بار معلق در راستای x و y است.

حال با مشخص بودن مقادیر دبی کل رسوب، غلظت رسوب بار معلق در هر نقطه از میدان حل، ارتفاع جریان و تخلخل مصالح بستر می توان تراز بستر را با استفاده از رابطه (۳-۲۰) در هر گام زمانی بدست آورد.

شکل گسسته ترم های غیر دائم آن به شکل زیر است:

$$(1 - p') \int \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial z_b}{\partial t} dt \right] dV + h \int \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial C}{\partial t} dt \right] dV = . \quad (۳-۴۳)$$

$$(1 - p')(z_b^1 - z_b^0) \Delta V + h(C_p^1 - C_p^0) \Delta V = . \quad (۳-۴۴)$$

$$\Delta V((1 - p')(z_b^1 - z_b^0) + h(C_p^1 - C_p^0)) = . \quad (۳-۴۵)$$

سپس شکل گسسته ترم های دائم آن را به صورت زیر تعیین می کنیم.

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\int \left(\frac{\partial q_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty}}{\partial y} \right) dV \right] dt = \cdot \quad (46-3)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \left([(Aq_{tx})_e - (Aq_{tx})_w] + [(Aq_{ty})_n - (Aq_{ty})_s] \right) dt = \cdot \quad (47-3)$$

با در نظر گرفتن روش ضمنی در حل معادله گسسته شده رابطه آن به صورت زیر خواهد بود :

$$[(Aq_{tx})_e - (Aq_{tx})_w] + [(Aq_{ty})_n - (Aq_{ty})_s] = \cdot \quad (48-3)$$

با ترکیب روابط (43-3) و (46-3) شکل کلی گسسته شده رابطه (45-3) به صورت زیر بازنویسی می شود :

$$\Delta V \left((1 - p') (z_b^1 - z_b^0) + h(C_p^1 - C_p^0) \right) + \Delta t \left([(Aq_{tx})_e - (Aq_{tx})_w] + [(Aq_{ty})_n - (Aq_{ty})_s] \right) = \cdot \quad (49-3)$$

$$z_b^1 = z_b^0 - \frac{h(C_p^1 - C_p^0)}{\Delta x \Delta y (1 - p')} - \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y (1 - p')} \left([(Aq_{tx})_e - (Aq_{tx})_w] + [(Aq_{ty})_n - (Aq_{ty})_s] \right) \quad (50-3)$$

با استفاده از رابطه (50-3) می توان براساس مقدار قبلی تراز ، تراز بستر را در گام های

زمانی مختلف محاسبه کرد.

فصل چهارم

محاسبات و نتایج

در این فصل محاسبات مربوط به مدلسازی عددی فرآیند انتقال رسوب و نتایج بدست آمده ارائه می شود. از آنجاییکه جریان مورد مطالعه همراه با رسوب است، از اینرو محاسبات فرآیند انتقال رسوب در دو بخش انجام می شود. در بخش اول مولفه های هیدرودینامیک وابسته به جریان از قبیل سرعت در دو راستای افقی و پارامترهای آشفتگی جهت تعیین لزجت گردابه ای با کمک مدل نرم افزاری انسیس فلونت^{۳۳} محاسبه می شود. بخش دوم محاسبات که هدف اصلی مطالعه صورت گرفته است، حل معادلات حاکم بر فرآیند انتقال رسوب از قبیل معادله انتقال - انتشار، معادله دبی انتقال بار بستر و معادله اکسنر با استفاده از کدنویسی به کمک زبان فرترن^{۳۴} است.

اگرچه در فرآیند انتقال رسوب ذرات درون سیال وجود داشته و بر روی شرایط جریان تاثیر می گذارد، با این حال در بخش اول مطالعات صورت گرفته سیال به صورت آب بدون رسوب مدلسازی شده است. همچنین تاثیر لایه های رسوبی ته نشین شده در طول زمان آزمایش بر روی جریان در مدل نرم افزاری لحاظ نشده است. در ادامه به تفصیل هر دو بخش مدلسازی قرار خواهد گرفت.

^{۳۳} Ansys Fluent

^{۳۴} Fortran

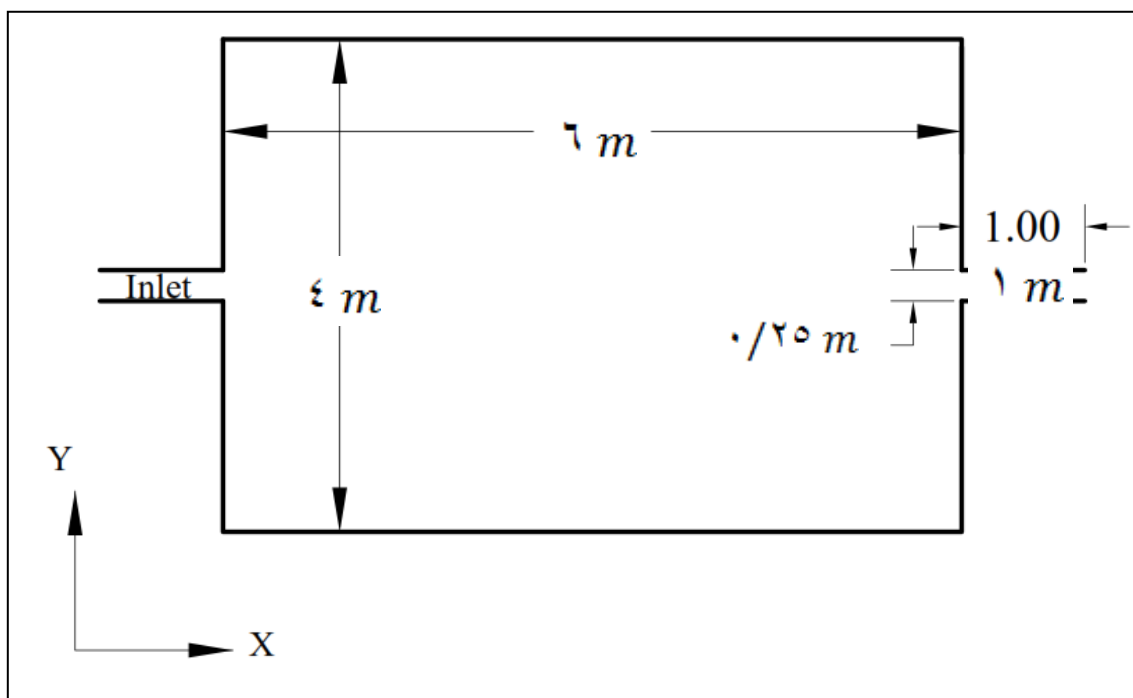
۴-۲- مدلسازی جریان بدون رسوب

از پارامترهای اصلی معادله انتقال - انتشار جهت محاسبه غلظت رسوب بار معلق درون مخزن ، مقادیر سرعت در دو راستای افقی و پارامترهای مربوط به مدل آشفتگی دو معادله ای $k - \varepsilon$ است . با توجه به اهمیت بررسی و صحت سنجی نتایج بدست آمده از مطالعات عددی ، نتایج مربوط به یک مطالعه آزمایشگاهی پیرامون موضوع انتقال رسوب به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته می شود . در مطالعه پیش رو جهت بررسی صحت نتایج عددی از مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته توسط کانتوش در سال ۲۰۰۸ استفاده می شود . همچنین جهت بررسی بیشتر مدلسازی و محاسبات برای دو مخزن با ابعاد مختلف صورت می گیرد .

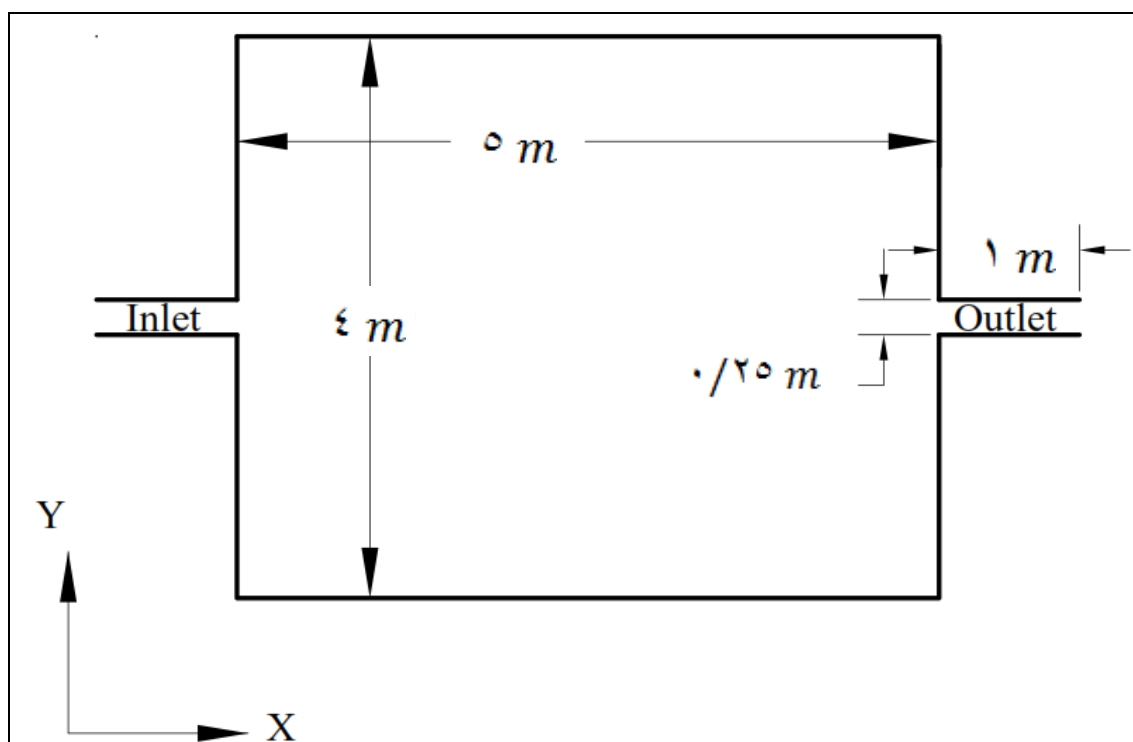
۴-۲-۱- تعریف مدل نرم افزاری و شرایط مدلسازی

مخزن شماره (۱) ، که در مطالعه آزمایشگاهی ابعاد آن به عنوان هندسه مرجع انتخاب شده است ، دارای ابعادی مطابق شکل (۴-۱) است . شکل مخزن به صورت متقارن بوده و طول و عرض آن به ترتیب برابر با ۶ متر و ۴ متر است . همچنین ارتفاع مخزن در طول آن ثابت و برابر با ۰/۲ متر است. علاوه بر آن دو کانال مستطیل شکل با عرض ۰/۲۵ متر و طول ۱ متر و هم ارتفاع با مخزن به عنوان ورودی و خروجی در ابتدا و انتهای مخزن تعبیه شده است .

مخزن شماره (۲) نیز به صورت متقارن بوده که طول و عرض آن به ترتیب برابر با ۵ متر و ۴ متر است . همچنین ارتفاع مخزن در طول مخزن ثابت و برابر با ۰/۲ متر است . مشابه با مخزن شماره (۱) دو کانال ورودی و خروجی به طول ۱ متر و عرض ۰/۲۵ متر و هم ارتفاع با مخزن در ابتدا و انتهای آن قرار دارد . مخزن شماره (۲) نیز در شکل (۴-۲) نشان داده شده است .



شکل (۴-۱) - مشخصات هندسی مخزن شماره (۱)



شکل (۴-۲) - مشخصات هندسی مخزن شماره (۲)

از آنجاییکه روش عددی مورد استفاده در حل معادلات اصلی رسوب ، روش حجم محدود است ؛ در نتیجه بایستی ابعاد شبکه بندی میدان حل در مدل نرم افزاری و مدل عددی یکسان در نظر

گرفته شود . ابعاد شبکه بندی برای هر دو مخزن مورد استفاده یکسان بوده و در هر دو راستای x و y به طور مساوی و برابر با $0/05$ متر در نظر گرفته شده است . همچنین شرایط مرزی میدان در ورودی در جدول (۴-۱) و شرایط مرزی خروجی در جدول (۴-۲) برای هر دو مخزن مشخص شده است .

جدول (۴-۱) شرایط مرزی ورودی

مقدار	واحد	نشانه	شرایط مرزی
۰/۰۰۷	m^3/s	Q_{in}	دبی ورودی
۰/۱۴	m/s	V_{in}	سرعت جریان ورودی
۰/۱	-	Fr_{in}	عدد فرود جریان ورودی
۰/۲	m	h_{in}	ارتفاع آب در مجرای ورودی
۰/۳۱	m	D_{in}	قطر هیدرولیکی مجرای ورودی
۱۰	%	I_{in}	شدت آشفتگی ورودی

جدول (۴-۲) شرایط مرزی خروجی

مقدار	واحد	نشانه	شرایط مرزی
۰/۲	m	h_{out}	ارتفاع آب در مجرای خروجی
۰/۳۱	m	D_{out}	قطر هیدرولیکی مجرای خروجی
۱۰	%	I_{out}	شدت آشفتگی مجرای خروجی

۴-۲-۲- مدلسازی مخزن شماره (۱)

از آنجاییکه در مطالعه آزمایشگاهی مخزن شماره (۱)، مخزن اصلی مدلسازی شده در مطالعه آزمایشگاهی است. از اینرو در پایان نامه نیز به عنوان مخزن اصلی در نظر گرفته می شود. بعد از تعیین مخزن مورد نظر و پیاده سازی هندسه آن در مدل نرم افزاری انسیس فلونت، محدوده مطالعه را به کمک شبکه با سازمان مستطیل شکل با ابعاد ۰/۰۵ در هر دو راستای جریان و عمود بر جریان گسسته سازی کردیم. شرایط مرزی نیز همانند جداول فوق به مدل نرم افزاری اعمال شده است. همچنین قسمت بالای مخزن به صورت یک خروجی با قطر هیدرولیکی ۰/۷۲ متر و شدت آشفستگی ۱ در نظر گرفته می شود تا شرایط جریان سطح آزاد اعمال شود.

در قسمت تعیین نوع مدل جریان، آن را به صورت جریان انتقالی^{۳۵} و از نوع VOF^{۳۶} با در نظر گرفتن جریان سطح آزاد مدل می کنیم. همچنین جهت مدلسازی جریان های چرخشی^{۳۷} احتمالی گزینه آن را در محل تعیین مدل جریان انتخاب می کنیم. برای مدل آشفستگی جریان، از مدل آشفستگی دو معادله ای $k - \varepsilon$ و از نوع RNG^{۳۸} استفاده می کنیم. همچنین برای رفتار نزدیک دیواره ها توابع دیوار نامتعادل^{۳۹} را انتخاب می کنیم. سایر ثابت های مربوط به مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۳-۴) پارامترهای مدل آشفستگی $k - \varepsilon$

عدد پرندتل دیوار ^{۴۰}	C_{μ}	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
۰/۸۵	۱/۹	۱/۴۵	۰/۰۹

^{۳۵} Transient Flow

^{۳۶} Volume Of Fluid

^{۳۷} Swirling Flow

^{۳۸} Re-Normalization Group

^{۳۹} Non-Equilibrium Wall Functions

^{۴۰} Wall Prandtl Number

بعد از تعریف کلیه شرایط مرزی ، بدلیل آنکه جریان به صورت غیر دائمی در نظر گرفته شده است ؛ گام زمانی و حداکثر زمان مورد نیاز را به مدل اعمال می کنیم . گام زمانی جهت انجام مدلسازی با توجه به عدد کورانت^{۴۱} برابر با ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته می شود . همچنین با توجه به مدل آزمایشگاهی حداکثر زمان برای انجام فرآیند ۱/۵ ساعت یا ۴۵۰۰ ثانیه و تعداد درون یابی در هر گام زمانی ۲۰ در نظر گرفته شده است . با در نظر گرفتن حداقل اختلاف بین نتایج دو گام محاسباتی به میزان ۰/۰۰۰۱ ، آن را به عنوان شرط همگرایی محاسبات در نظر می گیریم . جریان بعد از پایدار شدن و اتمام محاسبات با نتایج بدست آمده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت . شکل (۴-۳-الف) نتایج بدست آمده از مدل نرم افزاری و شکل (۴-۳-ب) مدل آزمایشگاهی مخزن شماره (۱) است .

همانطور که از شکل (۴-۳) مشخص است ، جریان درون مخزن شماره (۱) به صورت نامتقارن است . جریان پس از ورود به مخزن به طرف راست متمایل می شود . الگوی جریان در این مخزن دارای یک گردابه اصلی در مرکز مخزن و یک گردابه کوچک در گوشه ابتدائی سمت راست مخزن است .

با توجه به نتیجه بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی دلیل عدم تقارن جریان در این مخزن بیشتر بودن فاکتور شکل^{۴۲} (SK) از مقدار ۵/۵ است [۲۰] . طبق تعریف صورت گرفته توسط کانتوش رابطه ضریب شکل به صورت زیر است [۲۰] .

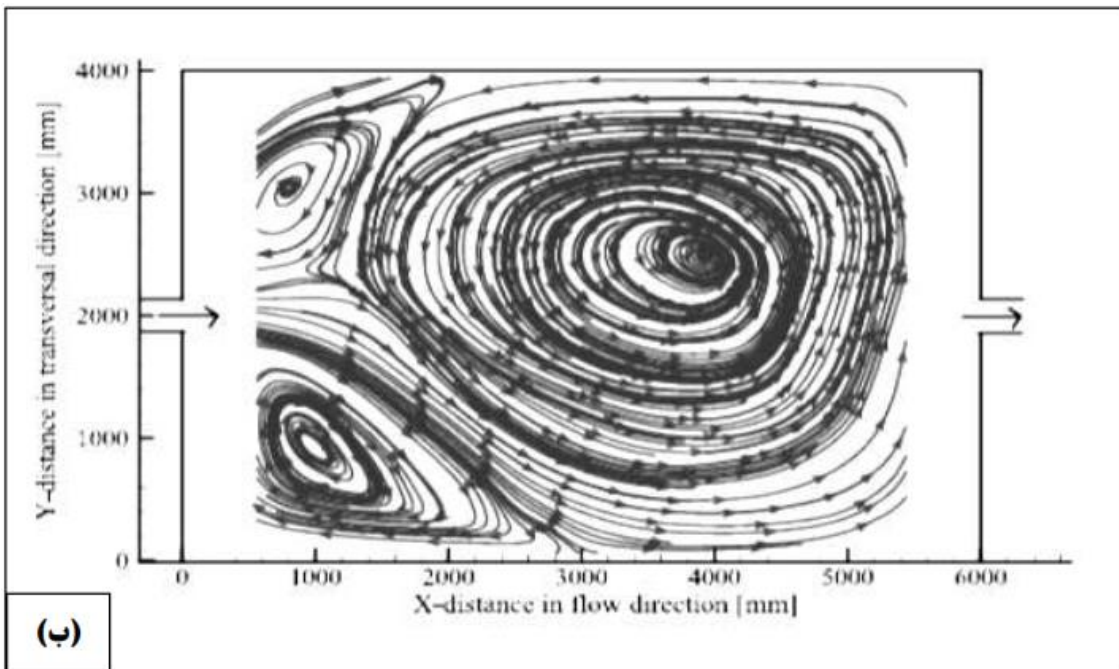
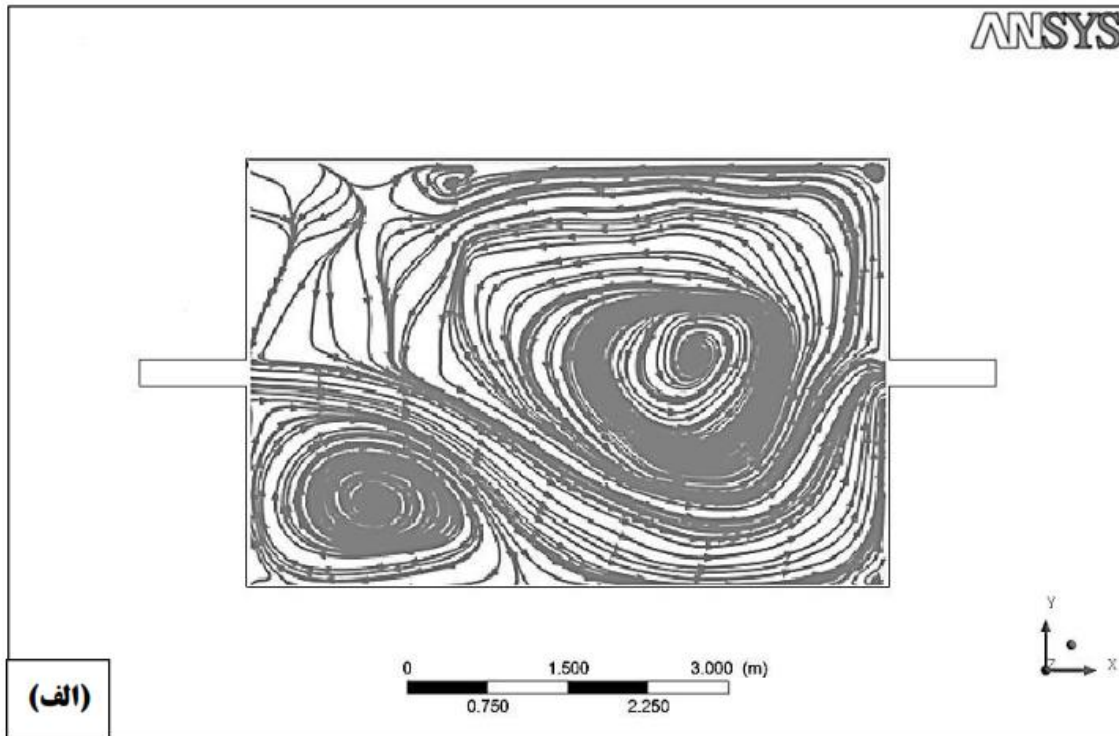
$$SK = (P/\sqrt{A_t}).AR \quad (۱ - ۴)$$

در رابطه مذکور P پیرامون مرطوب ، $(A_t = B \times L)$ مساحت مخزن و AR نسبت طول به عرض مخزن $(\frac{L}{B})$ است . براساس این تحقیق برای هندسه با فاکتور شکل $SK \geq ۵/۵$ ، جریان

^{۴۱}

^{۴۲} Shape factor

درون مخزن نامتقارن و برای فاکتور شکل $SK < 5/5$ جریان متقارن است [۲۰]. در جدول (۴-۴) مشخصات مربوط به محاسبه فاکتور شکل مخزن شماره (۱) ارائه شده است.



شکل (۴-۳) - مقایسه بین الگوی جریان حاصل از مدل نرم افزاری (الف) و نتیجه آزمایشگاهی (ب)

جدول (۴-۴) - پارامترهای فاکتور شکل مخزن شماره (۱)

فاکتور شکل (SK)	P	A_t	AR
۵/۹۷	۱۹/۵	۲۴	۱/۵

۴-۲-۳- مدل سازی مخزن شماره (۲)

مخزن شماره (۲) با توجه به ابعاد متفاوت با مخزن شماره (۱) و براساس جدول (۴-۵) دارای فاکتور شکل ۴/۸۹ است. مطابق تعریف صورت گرفته، جریان در این مخزن به صورت متقارن بوده و در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۴-الف) الگوی جریان بدست آمده از مدل نرم افزاری و شکل (۴-۴-ب) نتایج مدل آزمایشگاهی است.

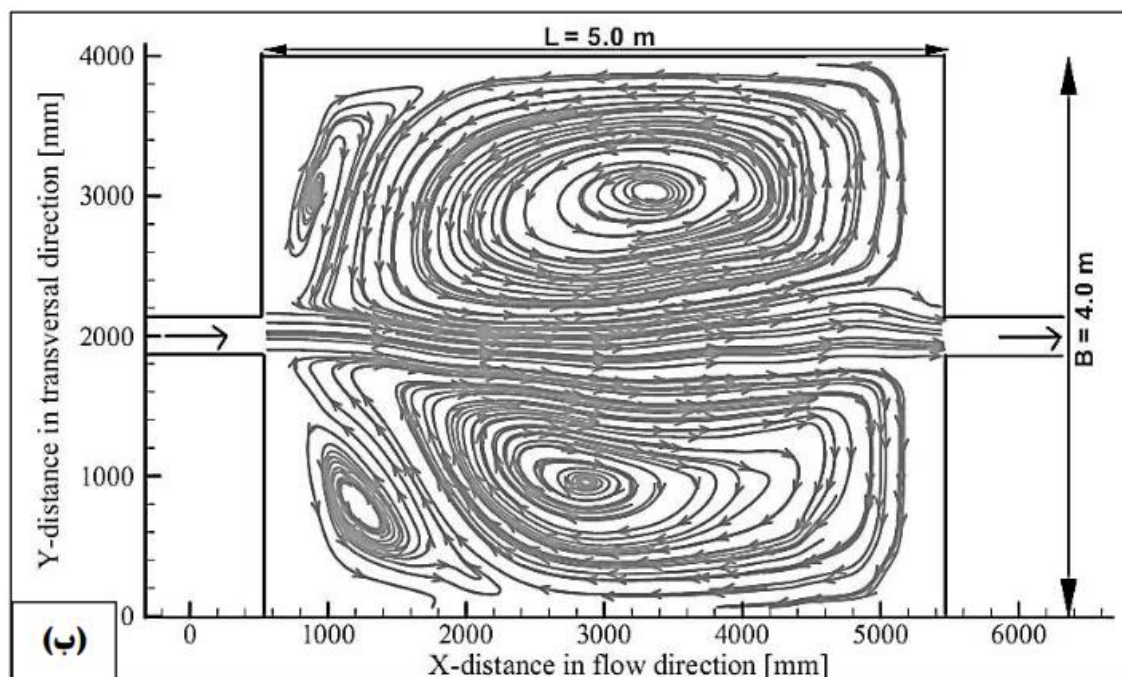
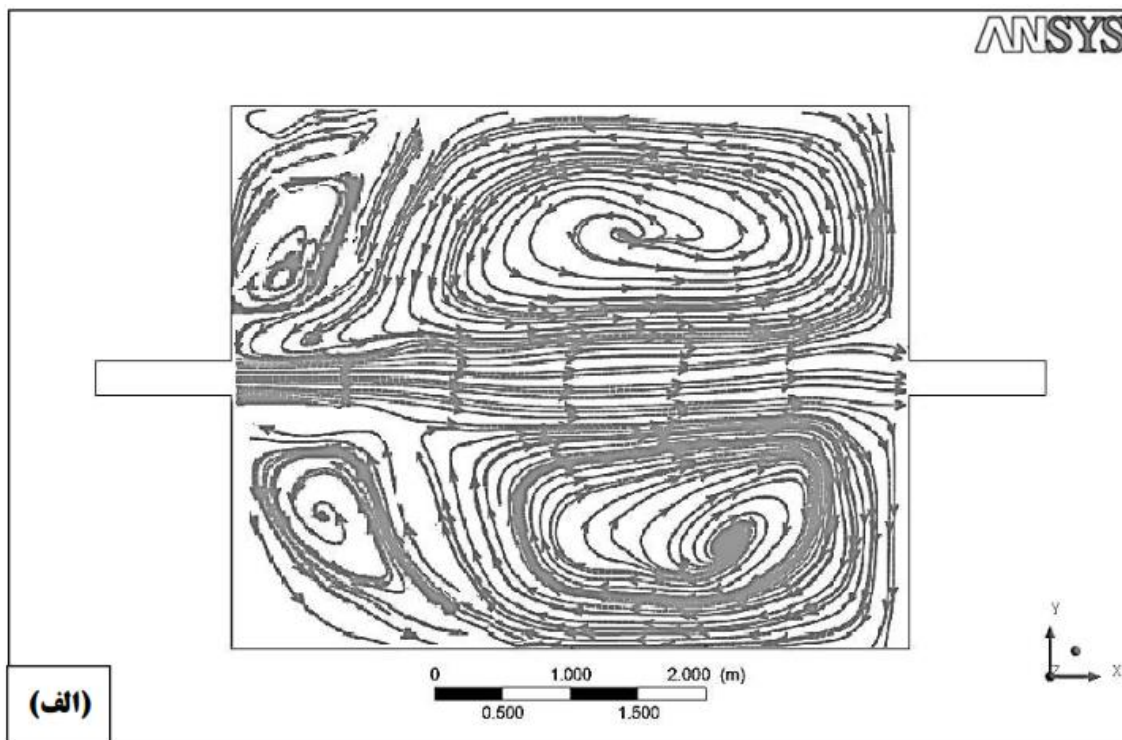
جدول (۴-۵) - پارامترهای فاکتور شکل مخزن شماره (۱)

فاکتور شکل (SK)	P	A_t	AR
۴/۸۹	۱۷/۵	۲۰	۱/۲۵

همانطور که از شکل (۴-۴) مشخص است، الگوی جریان در مخزن شماره (۲) به صورت متقارن است؛ که با توجه به عدد فاکتور شکل متناسب با آن قابل پیش بینی بود. وجود یک جریان طولی در محور مرکزی مخزن و دو گردابه اصلی به صورت متقارن در دو طرف آن قابل مشاهده است. همچنین دو گردابه کوچک در گوشه ابتدائی مخزن وجود دارد.

همانطور که در ابتدای فصل بیان شد، مدل نرم افزاری جهت محاسبه مولفه های هیدرولیکی بکار می رود. از اینرو با استفاده از نتایج بدست آمده از مدل نرم افزاری، مولفه های

هیدرودینامیک جریان از قبیل سرعت در هر دو راستای x و y و همچنین پارامترهای مربوط به مدل آشفتگی K و ϵ را برای هر گره در میدان حل هر دو مخزن را تعیین کنیم .



شکل (۴-۴) - مقایسه بین الگوی جریان حاصل از مدل نرم افزاری (الف) و نتیجه آزمایشگاهی (ب)

۳-۴- مدلسازی فرآیند انتقال رسوب

مدلسازی رسوب ورودی به مخزن از دو مرحله کلی تشکیل شده است. رسوبات معلق همراه با جریان وارد مخزن می شوند. سپس با توجه به الگوی جریان درون مخزن، رسوبات معلق موجود در آن پس از عبور از ورودی مخزن منتشر می شوند. با توجه به افزایش ناگهانی عرض جریان و انبساط سطح مقطع، با توجه به ثابت بودن دبی، سرعت جریان کاهش می یابد. کاهش سرعت جریان و وجود گردابه های حاصل از آشفتگی درون مخزن سبب افزایش زمان توقف جریان درون مخزن می شود؛ که شرایط لازم برای ته نشینی رسوب را فراهم می کند. رسوبات ته نشین شده در طی گذر زمان لایه های رسوبی را بر روی بستر مخزن تشکیل خواهند داد.

در این بخش می خواهیم دو مرحله ذکر شده در بالا را به کمک روش عددی و کدنویسی مدلسازی کنیم. هدف اصلی از انجام مطالعه، شناخت الگوی توزیع غلظت رسوبات معلق، تعیین ضخامت لایه های رسوبی تشکیل شده و همچنین قابلیت نگهداشت رسوب مخزن است. همانطور که در فصل سوم گفته شد غلظت رسوب معلق در میدان حل درون مخزن به کمک معادله انتقال - انتشار و تغییرات ضخامت لایه رسوب تشکیل شده بر روی بستر مخزن به کمک معادله اکسیر محاسبه می شوند.

در ادامه اصلی ترین بخش مطالعه انجام شده، که مربوط به مراحل کدنویسی معادلات است را تشریح می کنیم.

۴-۳-۱- کدنویسی فرآیند انتقال رسوب

گام اول در حل هر یک از معادلات مورد نظر، تعریف میدان حل است. میدان حل در این مساله سطح مخزن و مجاری ورودی و خروجی است. منظور از تعریف میدان حل، مشخص کردن ابعاد شبکه بندی، مرزها و دیواره ها است. از آنجاییکه در مدل نرم افزاری ابعاد شبکه بندی تعریف شده است، باید شبکه بندی میدان حل در محاسبات عددی مطابق با آن تعریف شود. میدان حل برای مخزن شماره (۱) دارای طول و عرضی به اندازه ۸ و ۴ متر است. مخزن شماره (۲) دارای طولی به اندازه ۷ متر و عرض ۴ متر است. با توجه به اینکه دو مجرا به طول ۱ متر و عرض دهانه ۰/۲۵ متر در ورودی و خروجی هر دو مخزن وجود دارد؛ گره های محاسباتی به صورت گره های تر و خشک تعریف می شوند. گره های تر نقاط درونی مخزن و نقاط خشک نواحی خارجی مخزن است.

میدان حل برای هر دو مخزن به صورت یک فایل خروجی خواهد بود، که با توجه به مختصات هر گره مقدار (۱) برای گره تر و مقدار (۰) برای گره خشک در نظر شده است. فایل خروجی بدست آمده از کد نوشته شده برای میدان حل، به عنوان یک فایل ورودی در کد اصلی مورد استفاده قرار می گیرد. بعد از تعریف میدان حل و گره های محاسباتی در اولین گام باید غلظت رسوب بار معلق را در نقاط درونی مخزن محاسبه کرد.

همانطور که در فصل سوم گفته شد، با استفاده از معادله (۳-۱۲) می توان غلظت رسوب بار معلق را در هر نقطه از شبکه بندی مورد نظر محاسبه کرد. بدلیل آنکه گسسته سازی معادله مذکور در فصل سوم به کمک روش حجم محدود اختلاف پیوندی^{۴۳} صورت گرفته است؛ لازم است در ابتدا ضرایب مربوط به روش محدود انتخاب شده را برای هر یک از گره های محاسباتی بدست آورد. از آنجا که این ضرایب تنها به پارامترهای هیدرودینامیکی جریان وابسته هستند، از اینرو آنها را به

^{۴۳} Hybrid Differencing Scheme

صورت مجزا کدنویسی کرده و نتایج را به شکل یک فایل متنی ورودی جهت استفاده در کد اصلی بکار می‌بریم .

از آنجاییکه فرآیند انتقال رسوب وابسته به زمان است ، در نتیجه هر دو فرآیند محاسبه غلظت رسوب بار معلق و تغییرات تراز بستر را به صورت همزمان برای گام های زمانی متوالی کدنویسی می‌کنیم. در هر گام زمانی ابتدا غلظت رسوب بار معلق در هر گره محاسبه می‌شود .

سپس با تعیین دبی بار بستر و دبی بار معلق ، دبی مجموع برای استفاده در معادله اکسنر محاسبه می‌شود . سپس تغییرات تراز بستر در گام زمانی محاسبه می‌شود . کد اصلی طبق آنچه شرح داده شد دارای ساختار زیر است .

با توجه به ساختار کدنویسی به کمک فرترن ، در بخش اول ماهیت معلومات و مجهولات به کار رفته در روابط را مشخص کنیم . معلومات اصلی برای هر مخزن و معلومات مشترک در جداول (۴-۶) تا (۴-۸) ارائه شده است . معلومات مساله به صورت پارامترهایی هستند که در حین اجرای برنامه اعمال می‌شوند . مجهولات مساله غلظت رسوب بار معلق در هر گره ، دبی بار بستر و بار معلق و تغییرات ضخامت لایه رسوبی بستر هستند .

سپس فایل های ورودی مورد نیاز را تعریف می‌کنیم . همانطور که در بالا ذکر شد دو ورودی اصلی ، میدان حل تعریف شده و ضرایب روش حجم محدود مورد استفاده است که به صورت مجزا کدنویسی و محاسبه شده و به صورت فایل های ورودی به برنامه اعمال می‌شوند . بخش دیگری از ورودی های برنامه مولفه های هیدرودینامیک مورد نیاز از قبیل سرعت و پارامترهای مدل آشفتگی هستند که آنها نیز به کمک مدل نرم افزاری محاسبه شده و به صورت فایل های متنی به برنامه وارد می‌شوند .

بعد از آنکه ضرایب روش حجم محدود و مولفه های هیدرودینامیک از فایل های ورودی خوانده و سایر مقادیر ورودی و معلومات مورد نیاز تعریف شد ، قسمت های مربوط به محاسبات معادلات اصلی نوشته می شود . بخش محاسباتی اصلی در هر گام زمانی شامل سه مرحله خواهد بود . در ابتدا معادله گسسته شده انتقال - انتشار که در فصل سوم به شکل معادله (۳-۳۲) نوشته شد ، جهت محاسبه غلظت رسوب معلق در هر گره کدنویسی می شود . روش حل بکار رفته در محاسبه معادله مذکور روش الگوریتم ماتریس سه قطری و به صورت ضمنی است ؛ از اینرو یک روش مبتنی بر تکرار به کار می رود . مقادیر اولیه در هر گام برابر با مقادیر غلظت در هر نقطه در گام زمانی قبل است. در هر گام زمانی روش سعی و خطا تا زمانی که اختلاف بین دو مقدار سعی کوچکتر از 10^{-4} شود ادامه می یابد . در مرحله بعد با استفاده از مقادیر غلظت محاسبه شده در هر گره دبی بار معلق را با کمک معادلات (۳-۳۹) و (۳-۴۰) و با استفاده از روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) دبی بار بستر را محاسبه می کنیم . حال مجموع دبی بار معلق و دبی بار بستر به عنوان دبی کل جهت بکار رفتن در معادله اکسنر تعیین می شود . در آخرین مرحله در گام زمانی موجود به کمک معادله (۳-۵۰) تغییرات تراز بستر را برای هر گره محاسباتی در گام زمانی مورد نظر محاسبه می کنیم . بعد از اتمام محاسبات در هر گام زمانی ، مقادیر بدست آمده در گام زمانی بعد بکار می رود . تعداد گام های محاسباتی با توجه به گام زمانی مورد نظر و زمان کل محاسبات انجام می شود .

جدول ۴-۶) ورودی های مساله برای مخزن $4m \times 6m$

مقدار	واحد	نشانه	معلومات مساله
۶	m	L	طول مخزن
۴	m	B	عرض مخزن
۰/۲	m	h	ارتفاع مخزن
۰/۰۵	m	dx	ابعاد شبکه در راستای جریان
۰/۰۵	m	dy	ابعاد شبکه در راستای عمود بر جریان
۰/۰۰۱	s	dt	گام زمانی

جدول ۴-۷) ورودی های مساله برای مخزن $4m \times 5m$

مقدار	واحد	نشانه	معلومات مساله
۵	m	L	طول مخزن
۴	m	B	عرض مخزن
۰/۲	m	h	ارتفاع مخزن
۰/۰۵	m	dx	ابعاد شبکه در راستای جریان
۰/۰۵	m	dy	ابعاد شبکه در راستای عمود بر جریان
۰/۰۰۱	s	dt	گام زمانی

جدول ۴-۸) داده های ورودی مدل انتقال رسوب

مقدار	واحد	نشانه	ورودی
۳	kg/m^2	C	غلظت رسوب ورودی
۰/۰۰۱	s	dt	گام زمانی
۱۰۰۰	kg/m^2	ρ	چگالی آب
۱۵۰۰	kg/m^2	ρ_s	چگالی رسوب
۰/۴	-	p'	تخلخل مصالح بستر
۰/۰۵	m	δm	ضخامت لایه تخلخل

بعد از نوشتن کد اصلی مربوط به حل معادلات اصلی و تعریف مقادیر ورودی ها و مرزها ، محاسبات را برای زمان های مختلف انجام می دهیم . با توجه به هدف استفاده از مخازن رسوب گیر ، نتایج مورد نظر از محاسبات ، غلظت رسوب بار معلق درون جریان خروجی و ضخامت لایه های رسوبی ته نشین شده است . در ابتدا برای هر دو مخزن مورد مطالعه غلظت رسوب بار معلق ورودی و مقادیر اندازه گیری شده غلظت در خروجی در زمان مشخص تعیین می شود . همچنین اختلاف این دو مقدار با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش مورد بررسی قرار می گیرد . در ادامه ضخامت لایه های رسوبی تشکیل شده در زمان مشخص برای هر دو مخزن ارائه می شود .

۴-۴- مدلسازی غلظت رسوب بار معلق

هدف اصلی از ساخت مخازن رسوب گیر حذف رسوبات معلق درون جریان است . از اینرو تعیین هندسه مخازنی که ضریب نگهداشت رسوب بیشتری داشته باشند بسیار مهم است . دو مخزن

مورد مطالعه با دو الگوی جریان مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت . برای هر دو مخزن غلظت رسوب ورودی برابر با میزان غلظت رسوب ورودی در مطالعه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است . در جدول (۴-۹) مقدار بدست آمده برای غلظت رسوب در خروجی مخزن شماره (۱) با مقدار اندازه گیری شده در مدل آزمایشگاهی مقایسه می شود . نتیجه بدست آمده برای زمان ۴/۵ ساعت است .

جدول (۴-۹) - نتایج مدل سازی غلظت رسوب بار معلق مخزن شماره (۱)

نوع مدل	غلظت رسوب ورودی	غلظت رسوب خروجی	غلظت حذف شده از جریان
مدل آزمایشگاهی	3 kg/m^3	1 kg/m^3	2 kg/m^3
مدل عددی	3 kg/m^3	0.88 kg/m^3	2.12 kg/m^3

برای تعیین میزان دقت محاسبات اختلاف مقدار آزمایشگاهی و مقدار عددی را بدست می آوریم . بخشی از خطای بوجود آمده مربوط به رسوباتی است که بعد از ته نشینی در مخزن ، توسط جریان به خارج منتقل می شوند . همچنین می توان مقداری از اختلاف بین دو مقدار شرایط آزمایشگاهی باشد .

$$\text{درصد خطا} = \frac{2.12 - 2}{2} = 0.06 \equiv 6\%$$

مشابه آنچه برای مخزن شماره (۱) ارائه شد ، مقدار رسوب معلق اندازه گیری شده در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی مخزن شماره (۲) مورد بررسی قرار می گیرد . جدول (۴-۱۰) مقایسه بین نتیجه حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی ارائه شده است . بدلیل ابعاد کوچکتر مخزن شماره (۲) به نسبت مخزن شماره (۱) ، رسوب کمتری در مخزن شماره (۲) نگهداشته می شود . همچنین

در مخزن شماره (۱) بدلیل الگوی نامتقارن جریان آشفتگی بیشتر شده که تاثیر مستقیم بر نگهداشت رسوب دارد .

جدول (۴-۱۰) - نتایج مدل‌سازی غلظت رسوب بار معلق مخزن شماره (۲)

نوع مدل	غلظت رسوب ورودی	غلظت رسوب خروجی	غلظت حذف شده از جریان
مدل آزمایشگاهی	3 kg/m^3	$1/1 \text{ kg/m}^3$	$1/9 \text{ kg/m}^3$
مدل عددی	3 kg/m^3	$0/94 \text{ kg/m}^3$	$2/06 \text{ kg/m}^3$

$$\text{درصد خطا} = \frac{2/06 - 1/9}{1/9} = 0/084 \equiv 8/4\%$$

۴-۵- مدل‌سازی تغییرات تراز بستر

بعد از محاسبه غلظت رسوب بار معلق در هر نقطه در هر گام زمانی ، رابطه گسسته شده دبی رسوب بار معلق محاسبه می شود . سپس مجموع دبی رسوب بار معلق و رسوب بار بستر به عنوان دبی کل بار رسوب در نظر گرفته می شود که در معادله گسسته شده تغییر تراز بستر بکار می رود . محاسبات برای زمان های مختلف انجام و نتایج در فایل های خروجی ثبت می شوند .

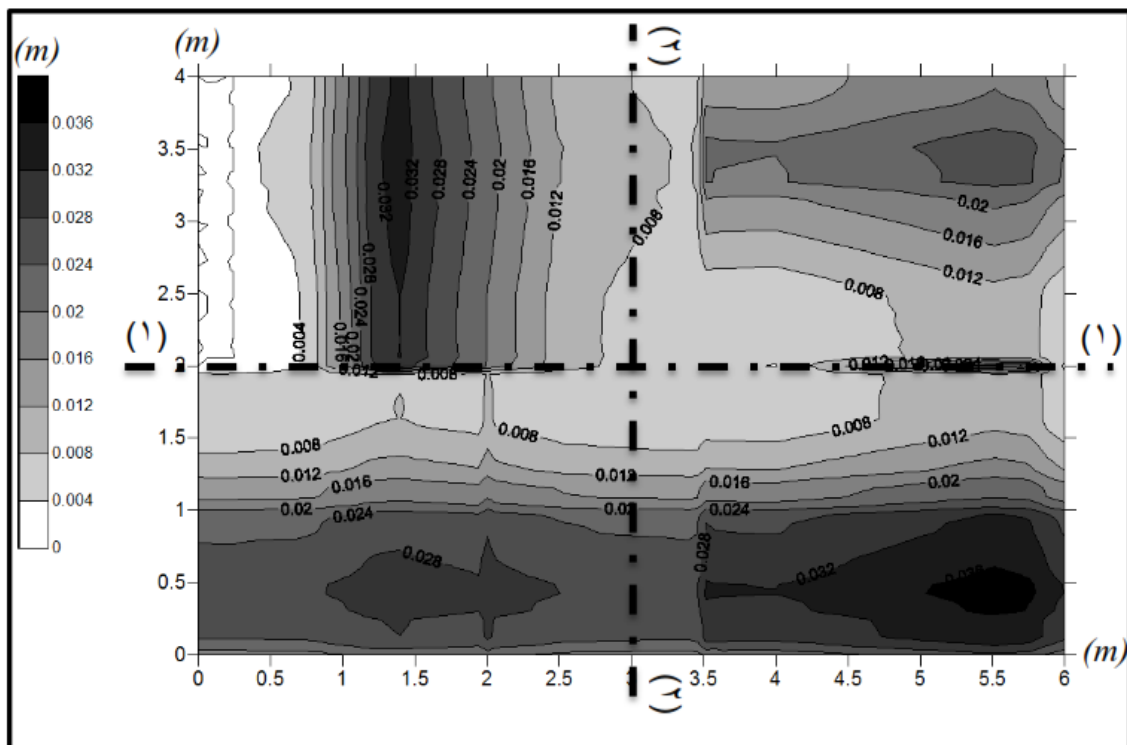
نتایج حاصل از محاسبات در زمان های مختلف به صورت ضخامت لایه رسوبی تشکیل شده بر روی بستر است . از آنجاییکه الگوی جریان در دو مخزن متفاوت است ، صحت نتایج بدست آمده را بر روی هر دو مخزن به صورت جداگانه بررسی می کنیم . به این دلیل از نتایج مطالعات آزمایشگاهی کانتوش^{۴۴} که در سال ۲۰۰۸ انجام شده استفاده می کنیم . همانطور که در فصل سوم

^{۴۴} Kantoush

ذکر شد ، مطالعه مذکور بر روی تاثیر هندسه مخزن بر روی الگوهای جریان و توزیع رسوب صورت گرفته است . برای هر مخزن در ابتدا پلان توپوگرافی لایه رسوبی تشکیل شده بر روی بستر و در دو مقطع مشخص ارائه می شود .

۴-۵-۱- نتایج مخزن شماره (۱)

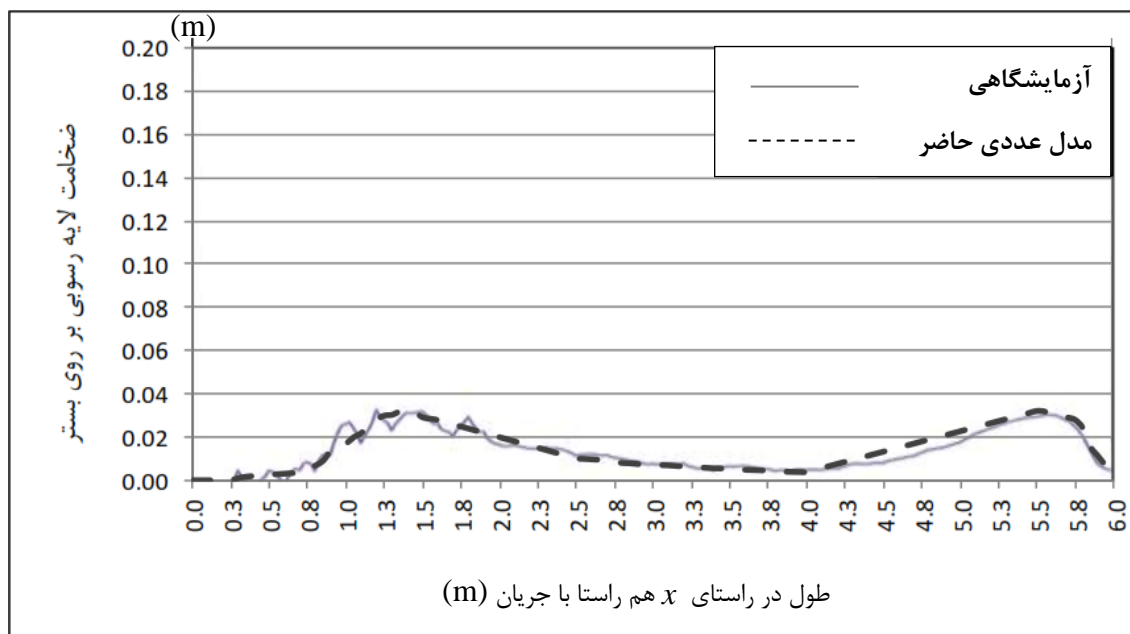
ابتدا نتایج مربوط به مخزن شماره (۱) را بررسی می کنیم . شکل (۴-۵) توپوگرافی لایه رسوبی تشکیل شده را بر روی بستر مخزن و بعد از ۱/۵ ساعت نشان می دهد . همانطور که از شکل مشخص است ، تمرکز لایه های رسوبی در کناره های مخزن نسبت به محور میانی آن بیشتر است . کمترین ضخامت لایه رسوبی در ابتدای مخزن و گوشه سمت چپ دیده می شود ، که دلیل آن تمایل جریان به سمت راست مخزن و کمتر بودن غلظت رسوب معلق در آن ناحیه است .



شکل (۴-۵) - پلان توپوگرافی لایه های رسوبی بر روی بستر

حال جهت مقایسه بین ضخامت لایه رسوبی بدست آمده توسط مدل عددی و نتیجه بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی ، مقطع شماره (۱) را که هم راستا با جریان و در مرکز مخزن قرار گرفته در نظر می گیریم . شکل (۴-۶) ضخامت لایه تشکیل شده بعد از ۱/۵ ساعت مورد بررسی قرار می گیرد . محور افقی در شکل نشان دهنده طول مخزن از انتهای ورودی تا ابتدای خروجی است .

همانطور که از شکل (۴-۶) مشخص است ، الگوی تشکیل لایه رسوبی در مدل عددی از الگوی بدست آمده در مدل آزمایشگاهی پیروی می کند . با توجه به الگوی جریان درون مخزن و وجود گردابه اصلی غلظت رسوبات در یک سوم میانی مخزن کمتر از ابتدا و انتهای آن است ، که این امر سبب کمتر شدن ضخامت لایه تشکیل شده می شود . همچنین در ابتدای ورودی مخزن بدلیل بالا بودن میزان سرعت جریان ، شرایط ته نشینی رسوب مساعد نبوده و ضخامت لایه تشکیل شده بسیار ناچیز است .



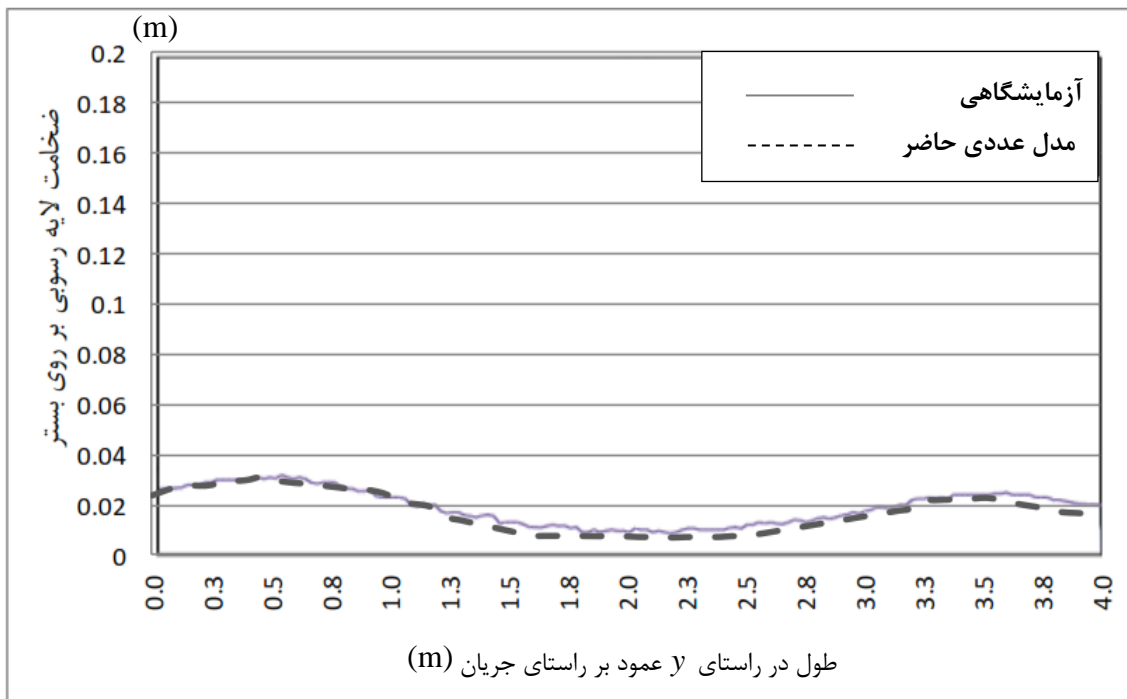
شکل (۴-۶) - مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۱) مخزن شماره (۱)

(m) جهت مقایسه بهتر و تعیین میزان خطای محاسباتی ، از رابطه زیر استفاده می کنیم . در روابط زیر A_e مساحت تقریبی زیر نمودار مطالعه آزمایشگاهی و A_n مساحت زیر نمودار بدست آمده به کمک مدل روش حجم محدود است .

$$A_e = 0.087 m^2 \quad , \quad A_n = 0.085 m^2$$

$$\text{میزان خطا} = \frac{A_e - A_n}{A_e} \times 100 \rightarrow \text{میزان خطا} = \frac{0.087 - 0.085}{0.085} \times 100 = 2.3\%$$

برای بررسی بیشتر نحوه ورود رسوب و الگوی تشکیل لایه رسوبی درون مخزن ، ضخامت لایه رسوبی بدست آمده توسط روش حجم محدود را بر روی مقطع شماره (۲) که عمود بر راستای جریان است با مقطع مشابه در مطالعه آزمایشگاهی مقایسه می کنیم . شکل (۴-۷) ضخامت لایه رسوبی تشکیل شده را در زمان ۱/۵ ساعت و در مقطع شماره (۲) نشان می دهد . محور افقی در شکل مذکور نشان دهنده عرض مخزن است .



شکل (۴-۷) - مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی مقطع شماره (۲) مخزن شماره (۱)

همانطور که از شکل (۴-۷) مشخص است ، الگوی تشکیل لایه رسوبی بدست آمده به کمک روش حجم محدود مشابه الگوی نشان داده شده در مطالعه آزمایشگاهی است . ضخامت لایه رسوبی در طرف راست مخزن نسبت به طرف چپ آن بیشتر است ؛ که دلیل این امر تمایل جریان ورودی به طرف راست مخزن و بیشتر شدن غلظت ورودی در این ناحیه می شود . افزایش غلظت رسوبات سبب افزایش ضخامت لایه رسوبی تشکیل شده می شود . همچنین در قسمت میانی مقطع نشان داده شده ضخامت لایه رسوبی بسیار کم بوده که دلیل آن کمتر بودن غلظت رسوبات معلق در آن منطقه است .

$$A_g = 0.079 \text{ m}^2 \quad , \quad A_n = 0.074 \text{ m}^2$$

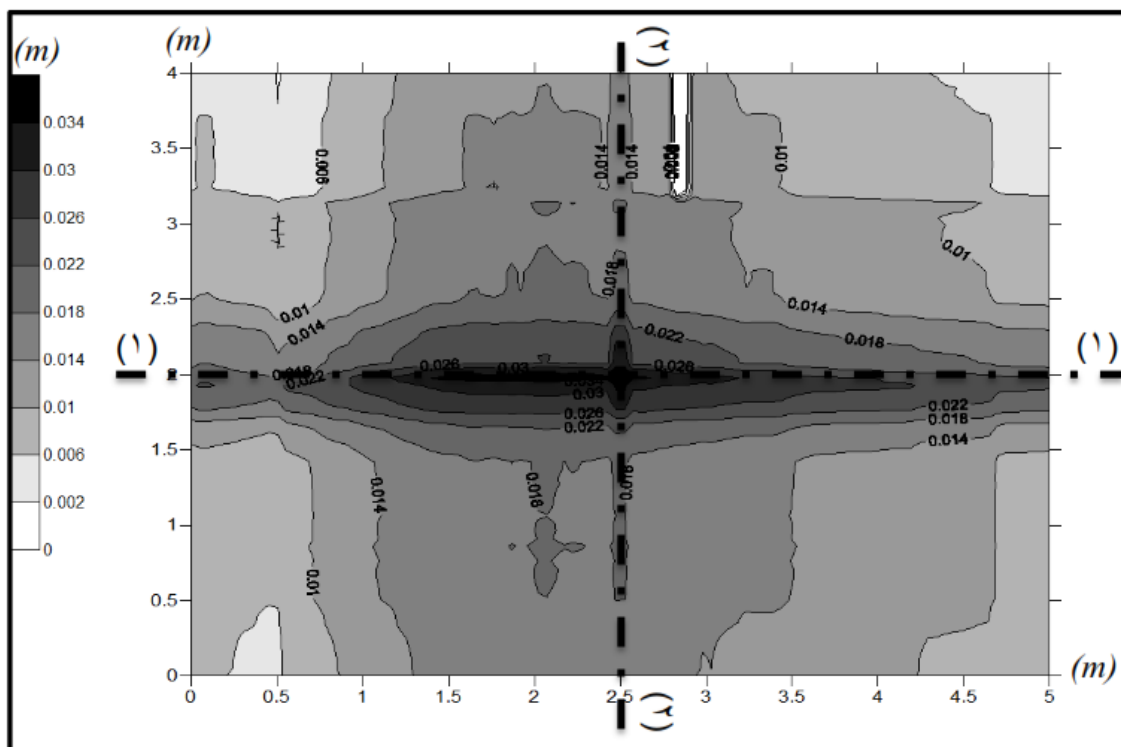
$$\text{میزان خطا} = \frac{0.079 - 0.074}{0.079} \times 100 = 6.3\%$$

با مقایسه میزان خطای محاسباتی در دو مقطع (۱) و (۲) ، می توان گفت دقت محاسباتی روش به کار رفته در راستای جریان بیشتر از راستای عمود بر جریان است .

۴-۵-۲- نتایج مخزن شماره (۲)

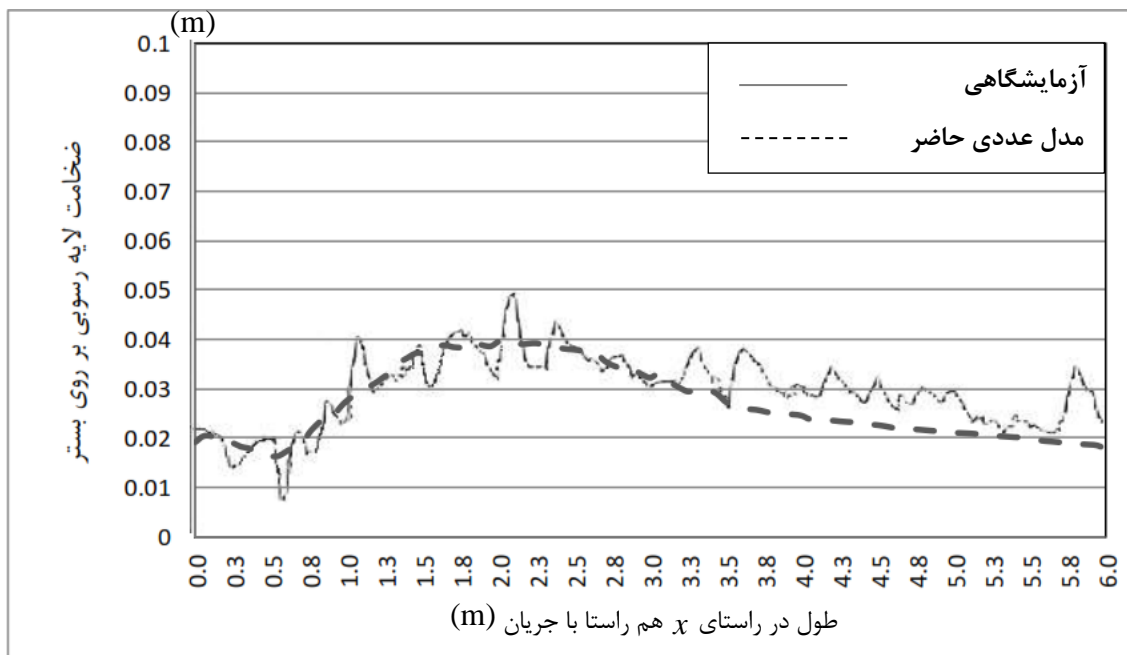
برای مخزن شماره (۲) نیز همانند مخزن شماره (۱) در ابتدا پلان توپوگرافی لایه رسوبی تشکیل شده بر روی بستر را نشان داده و سپس ضخامت لایه رسوبی را در دو مقطع مختلف با مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می دهیم .

شکل (۴-۸) توپوگرافی لایه رسوبی تشکیل شده بر روی بستر را بعد از زمان ۴/۵ ساعت نشان می دهد . همانطور که از شکل مشخص است تمرکز لایه های رسوبی در میانه مخزن بیشتر از سایر نقاط است . با فاصله گرفتن از محورهای میانی مخزن ضخامت لایه رسوبی کاهش می یابد . تغییرات ضخامت لایه رسوبی در راستای جریان بیشتر از راستای عمود بر آن است.



شکل (۴-۸) - پلان توپوگرافی لایه های رسوبی بر روی بستر

در ادامه ضخامت لایه رسوبی محاسبه شده به کمک روش حجم محدود را با نتیجه مطالعه آزمایشگاهی در مقطع شماره (۱) و هم راستا با جریان بررسی می کنیم. در شکل (۴-۹) محور افقی از انتهای مجرای ورودی تا انتهای مجرای خروجی است .



شکل (۹-۴) - مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در مقطع شماره (۱) مخزن شماره (۲)

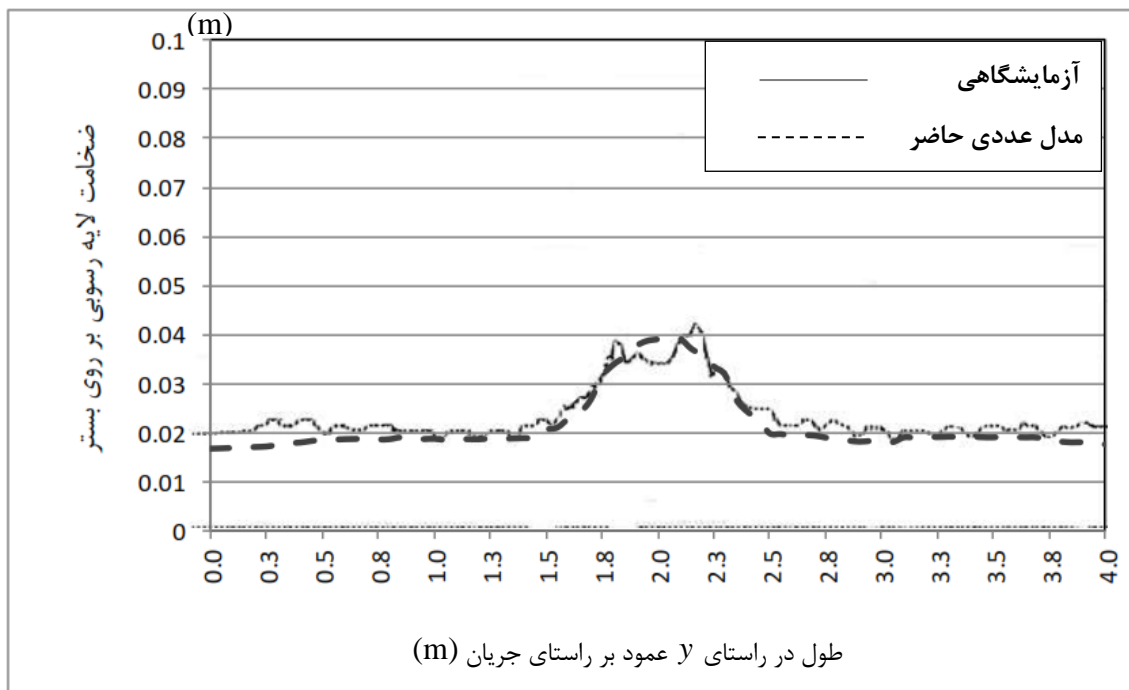
همانطور که از شکل (۹-۴) مشخص است، نحوه ی تشکیل لایه رسوبی بدست آمده از روش عددی مشابه نتیجه آزمایشگاهی است. همچنین بدلیل بیشتر بودن سرعت در ابتدای ورود به مخزن ضخامت لایه رسوبی نسبت به نقاط دیگر کمتر است. با فاصله گرفتن از ابتدای مخزن و کاهش سرعت جریان تمرکز رسوبات معلق افزایش یافته که این افزایش غلظت سبب بیشتر شدن ضخامت لایه رسوبی می شود. با کاهش غلظت رسوب معلق در انتهای مخزن، ضخامت لایه تشکیل شده به نسبت قسمت میانی کمتر است.

از آنجاییکه تاثیر رسوبات ته نشین شده در مدل عددی در نظر گرفته نشده است، لذا آن بخش از رسوبات که بعد از ته نشینی در اثر جریان به انتهای آن منتقل می شوند در مدل عددی محاسبه نشده است. از اینرو ضخامت لایه رسوبی محاسبه شده در انتهای مخزن کمتر از مقدار بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی است.

$$A_g = 0.1722 \text{ m}^2, \quad A_n = 0.16 \text{ m}^2$$

$$\text{میزان خطا} = \frac{0.1772 - 0.16}{0.1772} \times 100 = 9.7\%$$

همانند مخزن شماره (۱) ، الگوی تشکیل لایه رسوبی را در مقطع شماره (۲) عمود بر راستای جریان مورد بررسی قرار می دهیم . نتایج ارائه شده در شکل (۴-۱۰) برای زمان ۴/۵ ساعت است . محور افقی در شکل برابر با عرض مخزن است .



شکل (۴-۱۰) - مقایسه بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی مقطع شماره (۲) مخزن شماره (۲)

همانطور که از شکل (۴-۱۰) مشخص است ، الگوی بدست آمده از روش عددی از الگوی مطالعه آزمایشگاهی پیروی می کند . با توجه به الگوی متقارن جریان درون مخزن شماره (۲) تمرکز رسوبات در قسمت میانی مخزن بیشتر از دو طرف چپ و راست آن است ؛ از اینرو ضخامت لایه رسوبی در این منطقه نسبت به سایر نقاط بیشتر است .

همانند آنچه برای مقطع شماره (۱) انجام شد ، خطای محاسبات را برای مقطع شماره (۲) تعیین می کنیم . بخشی از خطا می تواند مربوط به شرایط آزمایش و همچنین دقت مقادیر سرعت

بدست آمده از مدل نرم افزاری باشد . همچنین از آنجاییکه در مدل عددی سرعت ها در حالت بدون رسوب لحاظ شده است ، لذا کاهش سرعت در اثر افزایش رسوب درون مخزن در نظر گرفته نمی شود. از اینرو ضخامت لایه رسوبی در دو طرف چپ و راست مخزن نسبت به مقدار آزمایشگاهی کمتر است.

$$A_g = 0.091 m^2 , A_n = 0.086 m^2$$

$$\text{میزان خطا} = \frac{0.091 - 0.086}{0.091} \times 100 = 5.5 \%$$

همانند آنچه برای مخزن شماره (۱) نتیجه شد ، با توجه به نتایج بدست آمده دقت محاسبات در راستای جریان بیشتر از دقت آن در راستای عمود بر جریان است . دلیل این امر می تواند به تاثیر مستقیم جریان بر حل معادلات بکار رفته باشد .

۴-۵-۳- تاثیر الگوی جریان بر رسوب گذاری

همانطور که پیشتر گفته شد ، در این مطالعه براساس هندسه مخزن دو الگوی جریان متفاوت مورد بررسی قرار گرفت . مخزن شماره (۱) با حجم $4/8 m^3$ و الگوی نامتقارن جریان و مخزن شماره (۲) با حجم $4 m^3$ و الگوی متقارن جریان در نظر گرفته شده است . از آنجاییکه شرایط هیدرولیکی و ورودی جریان برای هر دو مخزن یکسان در نظر گرفته شده ، برای یکسان سازی مقادیر جهت مقایسه ، نسبت حجم رسوب ته نشین شده به حجم مخزن محاسبه و بررسی می شود . در روابط زیر V_s حجم رسوب ته نشین شده و V_r حجم مخزن است .

مخزن شماره (۱) :

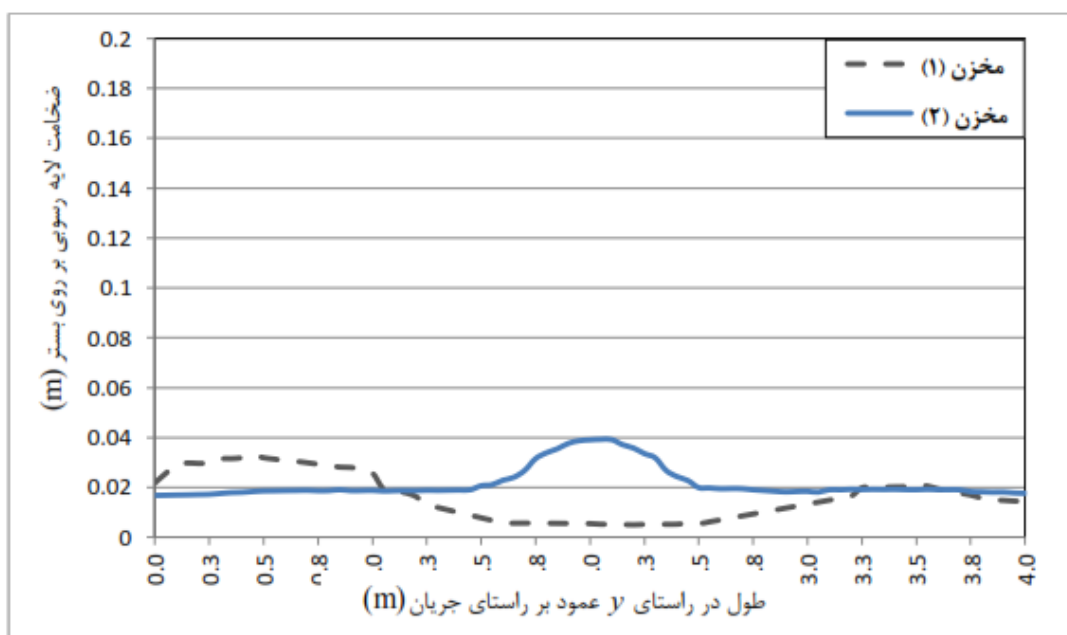
$$V_r = 4/8 m^3 , V_s = 0/4 m^3 \rightarrow \text{نسبت حجم} = \frac{0/4}{4/8} = 0/8$$

مخزن شماره (۲) :

$$V_r = 4 \text{ m}^3 , V_s = 0.28 \text{ m}^3 \rightarrow \text{نسبت حجم} = \frac{0.28}{4} = 0.07$$

همانطور که از محاسبات فوق مشخص است نسبت حجم رسوب ته نشین شده در مخزن شماره (۱) از مقدار آن در مخزن شماره (۲) بیشتر است . از آنجائیکه الگوی جریان نامتقارن و آشفتگی بیشتر است ، در نتیجه سبب بالا رفتن میزان نگهداشت رسوبات معلق و کاهش غلظت آن درون جریان خروجی می شود . از اینرو می توان نتیجه گرفت ، استفاده از مخازن رسوب گیر با هندسه هایی که سبب آشفتگی بیشتر شوند نتیجه مطلوب تری دارد .

در آخر نیز تاثیر الگوی جریان را بر روی نحوه ی تشکیل لایه های رسوبی درون مخزن بررسی می کنیم . با توجه به یکسان بودن عرض هر دو مخزن ، ضخامت محاسبه شده لایه رسوبی را در مقطع شماره (۲) هر دو مخزن با یکدیگر مقایسه می کنیم . شکل (۴-۱۱) نتایج را برای دو مخزن و در زمان ۴/۵ ساعت نشان می دهد .



شکل (۴-۱۱) - مقایسه بین تراز بستر در مخزن شماره (۱) م مخزن شماره (۲)

شکل (۴-۱۱) نشان می دهد که الگوی نامتقارن جریان درون مخزن سبب افزایش ضخامت لایه های رسوبی در دو طرف مخزن می شود در حالیکه جریان متقارن سبب تمرکز لایه رسوبی در ناحیه میانی می شود. از آنجاییکه فاصله مقطع شماره (۲) در مخزن شماره (۱) نسبت به فاصله آن در مقطع شماره (۲) بیشتر است از اینرو کمتر بودن سطح زیر نمودار مربوط به مقطع شماره (۲) مخزن شماره (۱) نسبت به مقطع شماره (۲) در مخزن (۲) قابل توجیه است.

فصل پنجم

جمع بندی و نتیجه گیری

۵-۱- خلاصه

همانطور که در ابتدا گفته شد ، هدف از پایان نامه حاضر مدلسازی فرآیند انتقال رسوب در مخازن سطحی است . با توجه به مشکلاتی که رسوبات برای سازه های هیدرولیکی دارند ، از اینرو مخازن رسوب گیر به عنوان یک عامل حذف رسوبات مورد توجه می باشند . هدف مورد نظر شناخت بهتر الگوهای توزیع بار رسوب ورودی به مخازن و نحوه تشکیل لایه های رسوبی در طول زمان عملکرد مخزن است . بدین منظور پایان نامه مذکور در پنج فصل نوشته شده است .

در ابتدا تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته پیرامون موضوعات مربوط به رسوب و تعدادی از مطالعات در زمینه مخازن رسوب گیر ارائه شد . سپس با توجه به ماهیت فرآیند رسوب ، معادلات و روابط به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت . فرآیندهای مورفولوژی دارای دو مولفه هیدرودینامیک و مورفودینامیک می باشند . مولفه های هیدرودینامیک که مربوط به جریان آب هستند بوسیله دو دسته معادله پیوستگی و مومنتوم تعیین می شوند . برای مدلسازی جریان بدون رسوب و بدست

آوردن مولفه های هیدرودینامیک از مدل نرم افزاری انسیس فلوئنت^{۴۵} ۱۳ استفاده شده است . سپس نتایج بدست آمده از مدل نرم افزاری فوق را به عنوان معلومات مساله اصلی به صورت فایل های ورودی به کد اصلی اعمال می کنیم. کد اصلی از سه کد تشکیل شده است . در کد اول هندسه میدان حل را که در واقع هندسه مخزن مورد نظر است تعریف می کنیم. در کد دوم ضرایب مربوط به روش حجم محدود را با استفاده از مولفه های هیدرودینامیک محاسبه می کنیم. سپس کد سوم که در واقع اصلی ترین کد محاسباتی است را براساس معادلات گسسته شده مربوط به رسوب نوشته و ورودی های آن را تعریف می کنیم. خروجی حاصل از کد های محاسباتی غلظت رسوبات بار معلق در گره های میدان محاسباتی و ضخامت لایه رسوبی تشکیل شده بر روی بستر است که در زمان های مختلف بدست می آید .

۵-۲- نتیجه گیری

از آنجاییکه مدلسازی صورت گرفته برای هر دو حالت جریان بدون رسوب و جریان همراه با رسوب انجام شده است ؛ نتایج برای دو الگوی جریانی مختلف بررسی می شود . با توجه به خروجی های بدست آمده از مدلسازی عددی صورت گرفته می توان نتایج زیر را بیان کرد .

۱- مدلسازی مولفه های هیدرودینامیک جریان با استفاده از مدل های نرم افزاری می تواند تا حدودی جایگزین مناسبی برای ساخت مدل های آزمایشگاهی جهت بررسی آن باشد . با توجه به مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری ، در صورتی که از شبکه بندی کوچکتر استفاده شود دقت نتایج بالاتر بوده و نزدیک به مدل اصلی خواهد بود .

۲- مولفه های هیدرودینامیک جریان از قبیل سرعت و آشفتگی تاثیر مستقیم بر الگوی توزیع رسوبات در میدان حل دارد . همانطور که مشخص است در مخزن شماره (۱) بدلیل الگوی نامتقارن جریان و آشفتگی بیشتر ، نگهداشت رسوب نسبت به مخزن شماره (۲) بیشتر است .

^{۴۵} ANSYS FLUENT

۳- با توجه به آنکه شرایط جریان آب کم عمق در مخازن سطحی وجود دارد لذا صرف نظر کردن از راستای قائم و دو بعدی فرض کردن جریان تاثیر قابل ملاحظه ای بر محاسبات نداشته و می توان برای سهولت و تسریع در محاسبات ساده سازی فوق را انجام داد .

۴- از آنجاییکه معادله انتقال انتشار مورد استفاده برای تعیین غلظت رسوبات درون مخزن بوسیله روش حجم محدود اختلاف پیوندی گسسته سازی شده است ، لذا برای ترم های انتقال از روش اختلاف پیشرو و برای ترم های انتشار از روش اختلاف مرکزی استفاده شده است . همچنین با توجه به خاصیت معادله مذکور ، در راستای جریان روش اختلاف پیشرو و در راستای عمود بر جریان روش اختلاف مرکزی بکار رفته است .

۵- نتایج خروجی بدست آمده از محاسبات عددی صورت گرفته نشان می دهد روش حجم محدود انتخاب شده خاصیت اصلی معادله انتقال انتشار را به خوبی نشان می دهد . تغییرات تراز بستر در گام های زمانی مختلف که متاثر از دبی رسوب بار معلق است در زمان های بالا با توجه به ثبات غلظت رسوب بار معلق نرخ ثابتی دارد .

۶- با توجه به آنکه در معادله اصلی مربوط به غلظت رسوب از پارامترهای تبادل رسوب بین بستر و جریان صرف نظر شده است ، در نتیجه با فاصله گرفتن از ابتدای مخزن و کاهش غلظت رسوب بار معلق تغییرات تراز بستر در اثر تشکیل لایه های رسوبی نسبت به ابتدای مخزن کمتر است .

۷- از آنجاییکه نتایج بدست آمده از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد ، می توان آن را جایگزین مناسبی برای مطالعات زمان بر و پر هزینه آزمایشگاهی در نظر گرفت .

۵-۳- پیشنهادات

از آنجاییکه هیچ مطالعه و تحقیق علمی از هر نظر کامل و جامع نیست در نتیجه پیشنهاداتی را برای محقق گرامی ارائه می شود .

الف - در مطالعه صورت گرفته جریان و مولفه های هیدرودینامیک به طور مجزا و مولفه های مورفودینامیک به طور مجزا بررسی شده اند . از اینرو می توان گفت تاثیر بار رسوبی و تغییرات تراز بستر بر روی الگوی جریان در نظر گرفته نشده است . می توان با ترکیب معادلات هیدرودینامیک و مورفودینامیک هر دو را به طور همزمان محاسبه کرد . استفاده از دستگاه معادلات دوتایی می تواند گزینه مناسب برای روش مطالعاتی جدید باشد .

ب - مدل آشفستگی بکار رفته در مدل نرم افزاری معادله دوتایی $k - \varepsilon$ است . تغییر مدل های آشفستگی با توجه به تغییر در پارامترهای آن می تواند بر روی ضرایب روش حجم محدود بکار رفته تاثیر بگذارد . لذا توصیه می شود تا سایر مدل های آشفستگی مورد بررسی قرار گیرد .

ج - در مدل عددی بکار رفته از پارامترهای مربوط به تبادل رسوب بین بستر و جریان صرف نظر شده است . می توان با لحاظ کردن پارامترهای مذکور تاثیر آن را بر میزان غلظت رسوبات بار معلق درون مخزن بررسی کرد.

د - روش حجم محدود بکار رفته یک روش ترکیبی از اولین و رایج ترین روش های حجم محدود است . انتخاب روش های حجم محدود دیگر به خصوص استفاده از روش های وزن دار می تواند تاثیر جریان ورودی را بر روی گره های درون میدان حل نشان دهد .

مراجع

[١] Al-Khafif S. M.(١٩٦٥), Study of open channels degradation and corresponding bed roughness, Phd. Thesis, University of California.

[٢] Benkhaldoun F, Seaid M., (٢٠١١), “Combined Characteristics and Finite Volume Methods for Sediment Transport and Bed Morphology in Surface Water Flows”. *Mathematics and Computers in Simulation* ٨١. Pp. ٢٠٧٣-٢٠٨٦

[٣] Bhallamudi S. M. and Chaudhry M. H. (١٩٩١), Numerical modeling of aggradation and degradation in alluvial rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ١١٧(٩)

[٤] Bhamidipaty Suryanarayana and Shen W. H. (١٩٧١), Laboratory study of degradation and aggradation, *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, Vol. ٩٧, pp. ٦١٥-٦٣٠.

[٥] Choudhury S. A.(١٩٩٦), Modeling and simulation of aggradation and degradation of straight and meander alluvial rivers, M. S. thesis, University of Mississippi, Mississippi.

[٦] Cunge J.A. and Verdreau N.(١٩٧٣), Mobile bed fluvial mathematical models, *La Houille Blanche*, Vol. ٧, pp-٥٦١-٥٨٠.

[٧] Demuren A. O. and Rodi W.(١٩٨٦), Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels, *Journal of fluid mechanics*, Cambridge, U.K. Vol. ١٧٢, pp. ٦٣-٩٢

[٨] Demuren A. O.(١٩٨٩), Calculation of sediment transport in meandering channels, Tech. section A, Proc. ٢٣rd IAHR Congr., International association for hydraulic research, Delft, Th Netherlands

[٩] De Vries(١٩٧٣), Analytical approaches to non steady bed load transport, Delft hydraulics laboratory, Research report, S-٧٨-٣

[١٠] De Vries M. (١٩٧٣), River bed investigations aggradation and degradation, Proc. of IAHR, International seminar on hydraulics of alluvial streams, New Delhi

- [١١] De Vries M., Klaassen G. J. and Struiksmā N. (١٩٨٩), On the Use of Movable Bed Models for River Problems: State of Art, Symp. River Sedimentation, Beijing, China
- [١٢] Garde R. J.(١٩٦٥), Aggradation upstream of a reservoir, Research journal, university of Roorkee, roorkee, Vol.٨, pp.٦٥-٧٢
- [١٣] Gessler J.(١٩٧١), Aggradation and degradation, River mechanics, Vol.١, Fort Collins, Colorado
- [١٤] Gill M. A. (١٩٨٣ a), Diffusion model for aggrading channels, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.٢١, No. ٥, pp. ٣٥٥-٣٦٧
- [١٥] Gill M. A. (١٩٨٣ b), Diffusion model for degrading channels, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.٢١, No. ٥, pp. ٣٦٩-٣٧٨
- [١٦] Jamshidnia H. and Firoozabadi b.(٢٠١٠), “Experimental Investigation of Baffle Effect on the Flow in a Rectangular Primary Sedimentation Tank”, Sharif University of Technology
- [١٧] Jansen P., Van B. L., Van B. J., De Vries M. and Zanen A. (١٩٧٩), Principles of River Engineering, Pitman Press
- [١٨] Jarmillo W. F. Torres(١٩٨٣), Aggradation and degradation of alluvial-channel beds, Phd. Thesis, University of Iowa
- [١٩] Jaramillo W. F. and Jain S. C. (١٩٨٤), Aggradation and degradation of alluvial-channel beds, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. ١١٠, No. ٨, pp. ١٠٧٢-١٠٨٥
- [٢٠] Kantoush S.A., (٢٠٠٩) “ Experimental Study on the Influence of the Geometry of Shallow Reservoirs on Flow Patterns and Sedimentation by Suspended Sediments”. PHD Thesis .
- [٢١] Lin B. L. and Falconer R. A.(١٩٩٦), Numerical modelling of three dimensional suspended sediment for estuaries and coastal waters, Journal of hydraulic research, Delft, The Netherlands, Vol. ٣٤(٤), pp. ٤٣٥-٤٥٦

[୧୧] Liu X. Landry B.J.(୧୯୯୫), “ Two-Dimensional Scour Simulations Based on Coupled Model of Shallow Water Equations and Sediment Transport on Unstructured Meshes” . *Costal Engineering* ୧୧. pp ୫୯-୫୯ .

[୧୨] Mahmood K.(୧୯୯୦), Mathematical modeling of Morphological transients in sand bed channels, Proc. of IAHR ୧୩th congress, Vol.୧

[୧୩] Mehta Piyush J. (୧୯୫୯), Study of aggradation in alluvial streams, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Roorkee, Roorkee, India

[୧୪] Mosconi C. E.(୧୯୫୫), River bed variations and evolution of armor layers, Phd. thesis, The University of Iowa

[୧୫] Muskatirovic D. and Miloradov M.(୧୯୯୫), Mathematical model for channel deformation. Vol. ୫, Jarosla Cerni institute for development of water resources, Belgrade

[୧୬] Naser Gh., Karney B.W., Salehi A.A., (୧୯୯୦). “Two-Dimensional Simulation Model of Sediment Removal and Flow in Rectangular Sedimentation Basin” . *Journal of Environmental Science*. Vol. ୧୩୧, No.୧୨, pp.୧୧୫୯-୧୧୫୯

[୧୭] Newton C. T.(୧୯୦୧), An experimental investigation of bed degradation in an open channel.

Transcript, Boston Society of Civil Engineers, pp.୧୫-୧୬ .

[୧୮] Olsen, N.R.B. and Kjellesvig, Hi.M. (୧୯୯୫), “Three-Dimensional Numerical Flow Modelling for Estimation of Maximum Local Scour Depth”, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, ୧୧(୧), ୧୧-୧୧

[୧୯] Park I. and Jain S. C. (୧୯୫୧), River-bed profiles with imposed sediment load, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. ୧୧୧, No. ୫

[୨୦] Ranja Raju K.G., Kothiyari U.C., Srivastav S. , Saxena M, (୧୯୯୯),“ Sediment Removal Efficiency of Settling Basin” . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol ୧୧୦. No ୦.

[୨୧] Schuetz T. Weiler M., (୧୯୯୧) , “ Two-Dimensional Assessment of Solute Transport in Shallow Waters with Thermal Imaging and Heated Water”, *Advances in Water Resources* ୧୧. Pp ୧୧-୧୧.

[११] Schuetz T. Weiler M., (१०११) , “ Two-Dimensional Assessment of Solute Transport in Shallow Waters with Thermal Imaging and Heated Water”, *Advances in Water Resources* ११. Pp ११-१०.

[१२] Seal R., Paola C., Parker G., Southard J. and Wilcock P. (११११), Experiments on Downstream fininf of gravel: narrow channel runs, *Journal of hydraulic engineering*, vol. १११, pp. ११११११

[१३] Shimizu Y. and Itakura T. (११११), Calculation of bed variation in alluvial channels, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. ११०(१), pp. १११-१११

[१४] Singh, V. (१०००), “Two Dimensional Sediment Transport Model Using Parallel Computers” , Thesis for Master of Science in Civil engineering, B.Tech., Banaras Hindu University, India

[१५] Soni J. P.(१११०), Aggradation in streams due to increase in sediment load, Ph. D. theis,

University of Roorkee, Roorkee

[१६] Soni J. P.(११११), Laboratory study of aggradation in alluvial channel;s, *Journal of Hydrology*, Vol. ११, pp. ११-१०१.

[१७] Struiksmā N., Oleson K. W., Flokstra C. and De vriend H. J. (१११०), Bed deformation in curved alluvial channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. ११(१)

[१८] Swamee P.K.(११११), Analytical and experimental investigation of stream bed variation upstream of a dam, PhD. Thesis, University of Roorkee

[१९] Thomas, W. A., McAnally, W. H., Jr. (१११०), User’s Manual for the Generalized Computer Program Systems for Open Channel Flow and Sedimentation: TABS-१ system, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS

[२०] Tinney E. R.(११००), A study of the mechanics of degradation of a bed of uniform sediment in an open channel, Phd. Thesis, University of Minnesota

[୧୩] Van Rijn, L.C. (୧୯୮୪), “Mathematical modelling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment.”, PhD Thesis , Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft.

[୧୪] Van Rijn, L.C. (୧୯୮୫a), “Sediment transport, Part I: Bed Load Transport”, *Journal of Hydraulic Engineering* , ASCE, ୧୧୦(୧୦), ୧୧୩୧-୧୧୦୬.

[୧୫] Van Rijn, L.C. (୧୯୯୩), *Principles of Sediment Transport*, AQUA Publications.

[୧୬] Van Rijn, L.C. (୧୯୮୫b), “Sediment Transport, Part II : Suspended Load Transport” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, ୧୧୦(୧୧), ୧୧୧୩-୧୧୧୧

[୧୭] Vijaya B., (୨୦୧୨), “୩D Numerical Investigation on Settling Basin”, Mater Thesis. Norwegian University of Science and Technology.

[୧୮] Wu, W. (୨୦୦୧), CCHE ୩D Sediment Transport Model (*Version ୨.୧*), Technical Report No. NCCHE-TR-୨୦୦୧-୩

[୧୯] Wang Z. Y. and Adeff S. E.(୧୯୮୬), Three dimensional modelling of river sedimentation processes, Proceeding ୩rd International symposium on river sedimentation, University of Mississippi

[୨୦] Wu, W., Rodi, W. and Wenka, T. (୨୦୦୦), “ ୩D Numerical Modeling Of Flow and Sediment Transport in Open Channels”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, ୧୨୬(୧), ୧-୧୦

[୨୧] Yen C., S. Chang and H. Lee (୧୯୯୨), Aggradation and Degradation process in alluvial channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. ୧୧୮, No. ୧୨, pp. ୧୬୦୧-୧୬୬୯

[୨୨] Yoon Y.N. (୧୯୯୨), “The State and the Perspective of the Direct Sediment Removal Methods from Reservoir “, *International Journal of Sediment Research*

[୨୩] Zhang H. and Kahawita R. (୧୯୮୪), Nonlinear model for aggradation in alluvial channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ୧୧୩, No. ୩, pp. ୩୦୩-୩୧୯

[୨୪] Zeng, Zhang, Xiao-Sheng,(୨୦୦୩) “ Application of Numerical Simulation on Optimum Design of Two-Dimensional Sedimentation tanks in the wastewater treatment plant” . *Journal of Environmental Science*. Vol. ୧୦, No.୩, pp.୩୧୬-୩୦୦

Abstract

This study is about sediment transport in shallow reservoir. Our purpose of reservoir is sediment basin. Sediment basins have built to capture and eliminate suspended sediment load in entrance flows to hydraulic structures. The main purpose of this study is understanding flow patterns and how distribute sediments in sediment basins. this study have two part: Numerical modeling of clear flow and Numerical modeling of flow with suspended sediment load.

The govern equations are hydrodynamic model and sediment transport model. Hydrodynamic model included continuity equation and momentum equations, that use for calculate the parameters of flow. In this study we use Ansys Flunet (13,1) to model clear flow. Sediment transport model included advection-diffusion equation and Exner equation. Hydraulic parameters such as velocity and parameters of two-dimensional $k - \varepsilon$ model use in sediment transport model.

Since in this study we use finite volume method, discretization the equations and determine the parameters of this method. We use Fortran code for numerical modeling of sediment transport. The results are suspended sediment concentration and thickness of bed load layer in each points. The result of numerical modeling are compare with results of an experimental study and the other results can get from it .

Keyword: Shallow water – Sediment basin – Suspended load – Sediment transport – Finite volume method – Numerical modeling