





دانشکده : عمران و معماری

گروه عمران

بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها

دانشجو : حمیدرضا زهابی

استاد راهنما :

دکتر رامین امینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۹۳

تقدیم به :

آنان که در تعریف نمی‌گنجند

رفتنی اند و به اثر ماندگار

امروز ، دیروزی اند

و همیشه فردایی اند

تشکر و قدردانی :

خداوند یکتا را سپاس می‌گوییم که به من امکان داد تا بتوانم این مرحله از تحصیل خود را نیز با موفقیت پشت سر بگذارم.

در اینجا لازم می‌دانم از استاد راهنمای بزرگووارم جناب آقای دکتر رامین امینی که همواره و در تمامی مراحل، من را یاری و راهنمایی نمودند و جناب آقای دکتر علامتیان عزیز برای مشاوره‌های ارزشمندشان تشکر و قدردانی نمایم.

در انتها از همیاری‌ها و همدلی‌های پر مهر پدر و مادرم تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا زهابی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - هیدرولیک دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه ی مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها تحت راهنمایی دکتر رامین امینی به عنوان استاد راهنما متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 تأثیرگذار 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 بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) 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.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

یکی از معضلات و مشکلات عمده در مهندسی سد و سایر رشته‌های مرتبط، مسئله رسوب و رسوب-گذاری می‌باشد. رسوب دشمن استفاده بلند مدت از مخازن است که می‌تواند کلیات یک طرح را زیر سوال ببرد. این مسئله در مناطق گرم و خشک نمود به مراتب بیشتری پیدا می‌کند زیرا با بارش باران و به راه افتادن اولین سیلاب حجم زیادی از مواد رسوبی وارد مخزن سد می‌شود، نتیجه آورد این رسوبات کاهش ظرفیت آبگیری مخزن است. با توجه به اینکه بیشتر سابقه تحقیقاتی در رابطه با رسوب‌گذاری در مخازن سطحی بصورت آزمایشگاهی می‌باشد و همچنین مزیت‌های فراوان مدل-سازی‌های عددی، در این رساله مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار حجم محدودی ۳D Flow انجام گردیده است. در ابتدا به **مطالعه** تاثیر هندسه‌های مختلف مخازن بر هیدرولیک جریان و الگوی نهشت رسوب بر روی داده‌های آزمایشگاهی موجود پرداخته، سپس برای صحت سنجی مدل‌سازی‌های انجام گرفته از داده‌های آزمایشگاهی استفاده گردید. در ادامه، سه مخزن مستطیلی شکل با نسبت‌های ابعادی مختلف برای مدل‌سازی انتخاب شده و هدف طرح مخزنی با بیشترین درصد تله اندازی رسوب می‌باشد. برای رسیدن به این هدف تغییراتی در مکان‌های ورودی و خروجی مخزن که با نسبت G/D معرفی می‌شود و پارامترهای جریان همچون دبی ایجاد گردید. در مجموع تعداد ۴۲ مدل‌سازی مختلف با نرم‌افزار ۳D Flow انجام گردید و در مدل‌سازی‌ها از مدل آشفتگی LES استفاده شد. در نهایت این نتایج حاصل شد که از بین سه مخزن مستطیلی، مخزن $۶*۴$ بهترین درصد تله اندازی رسوب را دارا بوده و با افزایش نسبت G/D نیز به این میزان افزوده خواهد شد و همچنین با افزایش دبی (یا به عبارت دیگر افزایش عدد فرود) بازدهی مخزن رسوب‌گیر بطور چشمگیری کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مخازن سطحی، مدل آشفتگی، رسوب، ۳D Flow، تله‌اندازی.

فهرست مطالب

فصل اول : مبانی و کلیات تحقیق

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱ بیان مسئله..... ۳
- ۳-۱ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق..... ۴
- ۴-۱ اهداف تحقیق..... ۵
- ۵-۱ سوالات تحقیق..... ۵
- ۶-۱ فرضیه‌های تحقیق..... ۶
- ۷-۱ قلمرو تحقیق..... ۶
- ۸-۱ ساختار تحقیق..... ۶

فصل دوم : پیشینه تحقیق

- ۱-۲ مقدمه..... ۹
- ۲-۲ روش‌های برآورد بار رسوبی..... ۹
- ۳-۲ پیشینه تحقیق روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار رسوب ۱۰
- ۴-۲ روش‌های هیدرولیکی برآورد بار رسوبی..... ۱۳
- ۵-۲ سوابق تحقیق برآورد بار رسوب بوسیله روش‌های عددی ۲۲

فصل سوم : مبانی نظری تحقیق

- ۱-۳ مقدمه..... ۳۵
- ۲-۳ دینامیک سیالات محاسباتی..... ۳۵

۳۷.....	۳-۳ معرفی نرم افزارهای محاسبات عددی.....
۳۷.....	۱-۳-۳ نرم افزار Fluent.....
۳۸.....	۲-۳-۳ نرم افزار Ansys.....
۳۹.....	۳-۳-۳ نرم افزار ANSYS-CFX.....
۴۰.....	۴-۳-۳ نرم افزار FLOW-۳D.....
۴۰.....	۴-۳ معادلات جریان.....
۴۲.....	۵-۳ مدل های آشفتگی.....
۴۵.....	۱-۵-۳ مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد.....
۴۷.....	۲-۵-۳ مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حالت RNG.....
۴۹.....	۳-۵-۳ مدل آشفتگی LES.....
۵۰.....	۶-۳ تعیین موقعیت سطح آزاد.....
۵۱.....	۷-۳ روش حجم سیال (VOF).....
۵۳.....	۱-۷-۳ الگوی دهنده و گیرنده.....
۵۵.....	۲-۷-۳ الگوی یانگز.....
۵۶.....	۳-۷-۳ الگوی صریح اویلر.....
۵۷.....	۴-۷-۳ الگوی ضمنی.....
۵۸.....	۸-۳ معرفی روش های عددی.....
۵۹.....	۱-۸-۳ روش تفاضل محدود.....
۶۰.....	۲-۸-۳ روش اجزاء محدود.....
۶۱.....	۳-۸-۳ روش حجم محدود.....

۴-۸-۳ روش های طیفی..... ۶۲

فصل چهارم : معرفی نرم افزار

۴-۱ مقدمه..... ۶۴

۴-۲ معادلات حاکم و سیستم های مختصات..... ۶۵

۴-۳ سطح آزاد و مشترک سیال..... ۶۸

۴-۴ مدل های آشفتگی..... ۷۰

۴-۵ فرضیه ی بوزینسک..... ۷۱

۴-۶ روش حجم سیال به کار رفته در نرم افزار FLOW-۳D..... ۷۲

۴-۷ روش کسر مساحت - حجم مانع..... ۷۷

۴-۸ مدل رسوب و آب شستگی در نرم افزار Flow-۳D..... ۷۸

۴-۹ مراحل معرفی هندسه ی مدل به نرم افزار FLOW-۳D..... ۸۳

۴-۹-۱ مش بندی مدل..... ۸۳

۴-۹-۲ حساسیت سنجی سلول محاسباتی..... ۸۴

۴-۹-۳ شرایط مرزی..... ۸۶

۴-۹-۴ روش عددی تحلیل مدل..... ۸۷

فصل پنجم : مدل سازی

۵-۱ مقدمه..... ۸۹

۵-۲ مطالعات آزمایشگاهی..... ۸۹

۵-۳ صحت سنجی..... ۹۱

۵-۳-۱ شرایط مرزی..... ۹۱

۹۲.....	۲-۳-۵ تعداد بهینه سلول محاسباتی.....
۹۳.....	۳-۳-۵ جریان آب شفاف
۹۶.....	۴-۳-۵ جریان آب محتوی رسوب
۹۸.....	۴-۵ نسبت ابعادی مخزن
۱۰۲.....	۵-۵ دبی ورودی به مخازن
۱۰۲.....	۶-۵ اندازه حفره ورودی و خروجی و میزان انحراف آن‌ها از یکدیگر.....
۱۰۳.....	۷-۵ مشخصات مدل سازی.....
۱۰۵.....	۸-۵ بررسی الگوهای نشست رسوب و بدست آوردن بهینه ترین مخزن.....

فصل ششم : نتایج و پیشنهادات

۱۱۸.....	۱-۶ مقدمه.....
۱۱۸.....	۲-۶ نتیجه گیری
۱۱۹.....	۳-۶ پیشنهادات
۱۲۰.....	منابع و مآخذ.....

فهرست اشکال

۴۱.....	شکل (۱-۳): تغییرات کمیت Φ بر حسب t
۴۴.....	شکل (۲-۳): تقسیم بندی کلی مدل های آشفتگی
۵۲.....	شکل (۳-۳): محاسبه تابع حجم سیال در روش VOF
۵۳.....	شکل (۴-۳): سطح تماس واقعی دو سیال.....
۵۵.....	شکل (۵-۳): سطح تماس به روش دهنده و گیرنده.....

- شکل (۳-۶): سطح تماس به روش یانگز..... ۵۶
- شکل (۴-۱): نمونه ای از مقادیر VOF در نزدیکی سطح آزاد..... ۷۳
- شکل (۴-۲): سه مرحله ی تعیین سطح آزاد به روش VOF..... ۷۵
- شکل (۴-۳): مدل رسوب در ۳D Flow تحت جت ریزشی..... ۸۱
- شکل (۴-۴): نیروهای وارد بر ذرات رسوب در سطح شیب دار..... ۸۱
- شکل (۴-۵): مدل فیزیکی سه بعدی در ۳D-FLOW..... ۸۳
- شکل (۴-۶): الگوی مش بندی نهایی..... ۸۳
- شکل (۴-۷): تغییر شکل موانع به دلیل تقاطع چندگانه در شبکه بندی ۳D-FLOW..... ۸۴
- شکل (۴-۸): عملکرد روش FAVOR بر روی مرزهای جامد با ابعاد مختلف..... ۸۵
- شکل (۴-۹): سطوح مشخص شده بر روی بلوک شش وجهی در دستگاه دکارتی..... ۸۶
- شکل (۵-۱): شمایی کلی از مخزن و متعلقات آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)..... ۹۰
- شکل (۵-۲): نحوه برآورد سرعت سنج های LSPIV، (کانتوش ۲۰۰۷)..... ۹۰
- شکل (۵-۳): نمایی کلی از مخزن و شرایط مرزی..... ۹۲
- شکل (۵-۴): سرعت در راستای محور X..... ۹۲
- شکل (۵-۵): الگوی خط جریان بدست آمده از داده های آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)..... ۹۴
- شکل (۵-۶): الگوی خط جریان بدست آمده از داده های عددی..... ۹۴
- شکل (۵-۷): اندازه سرعت بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)..... ۹۵
- شکل (۵-۸): اندازه سرعت بدست آمده از نتایج عددی..... ۹۵

- شکل (۵-۹): پروفیل نهشت رسوب در مخزن (۱) داده های آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)..... ۹۷
- شکل (۵-۱۰): نمایی کلی از مخازن..... ۹۸
- شکل (۵-۱۱): میزان انحراف حفره ورودی و خروجی از هم..... ۱۰۲
- شکل (۵-۱۲): توزیع سرعت در جهات مختلف در پلان، مخزن G1۷۲..... ۱۰۶
- شکل (۵-۱۳): میزان رسوب نهشت شده در مخازن..... ۱۰۷
- شکل (۵-۱۴): میزان رسوب تله اندازی شده در مخازن G۳..... ۱۰۹
- شکل (۵-۱۵): نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۰..... ۱۱۰
- شکل (۵-۱۶): درصد رسوب حجمی موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۰..... ۱۱۰
- شکل (۵-۱۷): نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۲..... ۱۱۱
- شکل (۵-۱۸): درصد رسوب حجمی موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۲..... ۱۱۱
- شکل (۵-۱۹): نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۴..... ۱۱۲
- شکل (۵-۲۰): درصد حجمی رسوب موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۴..... ۱۱۲
- شکل (۵-۲۱): نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۱۶..... ۱۱۳
- شکل (۵-۲۲): درصد حجمی رسوب موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۱۶..... ۱۱۳
- شکل (۵-۲۳): تغییرات انرژی جنبشی نقطه M، مخزن G۳۳۵۱۶..... ۱۱۴
- شکل (۵-۲۴): تغییرات ضریب دراگ در نقطه M، مخزن G۳۳۵۱۶..... ۱۱۵
- شکل (۵-۲۵): میزان نهشت رسوب در مخازن G۳ برای دبی های مختلف..... ۱۱۶

فهرست جداول

جدول (۱-۲) روش‌های متفاوت محاسبه بار رسوب رودخانه‌ها و حوضه‌های آبریز	۹
جدول (۲-۲) معروفترین روشهای برآورد بار رسوبی براساس معادلات انتقال رسوب	۱۴
جدول (۳-۲) مهمترین روابط انتقال رسوب در مقاطع روباز	۱۶
جدول (۱-۳) ضرایب ثابت $k-\varepsilon$ رابطه‌ی (۱۳-۳)	۴۷
جدول (۲-۳) ضرایب ثابت برای مدل $k-\varepsilon$ حالت RNG	۴۸
جدول (۴-۴) شرایط مرزی مورد استفاده در نرم افزار FLOW-۳D	۸۶
جدول (۱-۵) شرایط مرزی	۹۱
جدول (۲-۵) اطلاعات اولیه مربوط به سیال و رسوب	۹۶
جدول (۳-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن $۶*۲$	۹۹
جدول (۴-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن $۶*۴$	۱۰۰
جدول (۵-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن $۳*۴$	۱۰۱
جدول (۶-۵) اطلاعات مربوط به فاز آب و رسوب	۱۰۳
جدول (۷-۵) سعی های عددی انجام گرفته	۱۰۴
جدول (۸-۵) اطلاعات مربوط به سه گروه مخزن	۱۰۵
جدول (۹-۵) بیان میزان ته نشینی برحسب درصد	۱۰۸
جدول (۱۰-۵) درصد های رسوب نهشت شده در مخازن G^3	۱۰۹

فصل اول :

مبانی و کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

فرسایش خاک^۱ یکی از اصلی ترین عواملی است که منابع آب و خاک را در سراسر جهان تهدید می کند. انتقال ذرات فرسایش یافته به منابع آبی از قبیل دریاچه ها و سدها سبب افزایش حجم مرده در این منابع می گردد، به طوری که سالانه در حدود یکصد میلیون مترمکعب از حجم مفید دریاچه سدها کاهش می یابد. ذرات خاک انتقال یافته از مزارع کشاورزی حاوی مقادیر زیادی از مواد غذایی گیاهی مانند نیتروژن و فسفر می باشند که این مواد سبب تسریع رشد جلبک ها و به تبع آن کاهش کیفیت آب می شود. بنابراین به نظر می رسد مطالعات جامعی روی سیلاب و رسوب لازم است تا بتوان به راهکارهایی در قبال کنترل و مدیریت این وقایع طبیعی دست یافت، (قهرودی^۲، ۱۳۸۵).

برآورد و مقایسه میزان فرسایش حوزه های آبریز، زمینه شناسایی حوزه های بحرانی و اجرای طرح های کنترل فرسایش و رسوب را فراهم می سازد. مجموع اطلاعات و تحلیل های محدودی از میزان فرسایش آبریزهای کشور وجود دارد. از اینرو معمولاً عامل رسوب دهی به عنوان معرف فرسایش آبی در سطح حوزه های آبریز مورد توجه قرار می گیرد. در حالیکه برآورد رسوب معلق^۳ در حوزه های دارای آمار بطور مستقیم امکان پذیر است، برای حوزه های فاقد آمار روش های غیر مستقیم دیگری را باید جستجو کرد، (ثقفیان^۴، ۱۳۸۷).

مقدار رسوبی که یک جریان مشخص، قادر به حمل آن است یکی از موضوعات اصلی تحقیقات رسوب می باشد که در بسیاری از پروژه های مهندسی همچون برنامه ریزی و طراحی منابع ذخیره آب،

^۱ Soil Erosion

^۲ Ghahroodi

^۳ Suspended Loda

^۴ Saghafiyan

مورفولوژی و تغییرات بستر رودخانه، برآورد رسوب سالیانه رودخانه، طراحی و نگهداری کانال‌های آبیاری پایدار، لایروبی کانال‌ها و ... حائز اهمیت می‌باشد، (شفاعی بجستان^۱ و همکاران، ۱۳۸۹).

۱-۲ بیان مسئله

یکی از شاخص‌های مهم در پیشرفت هر کشور، دسترسی به آب با کیفیت در محل و زمان مورد نظر است، به طوری که عدم دسترسی به موقع می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده توسعه اقتصادی باشد، در کشور ما که در یک منطقه خشک قرار گرفته این مشکل، نمودی دوچندان دارد (عباسی زاده^۲ و همکاران، ۱۳۸۸). یکی از مهم‌ترین نتایج بهره‌برداری غیر اصولی انسان از محیط طبیعی را می‌توان تغییر افزایش پتانسیل سیل‌خیزی و فرسایش و انتقال رسوب حوزه‌های آبخیز بر شمرد که هر ساله خسارات هنگفتی به سرمایه‌های ملی کشور وارد می‌نماید، (افشار^۳، ۱۳۶۴).

آب یکی از مهم‌ترین عوامل فرسایش پوسته‌ی زمین است و در مسیر حرکت خود موادی را به صورت محلول معلق و باربستر حمل می‌کند. این مواد در هر جا که ایجاب کند ته‌نشین می‌شوند. وجود این مواد در آب برای شرب، بهره‌برداری صنعتی، کشاورزی، پرورش آبزیان و همچنین در کنترل سیل اهمیت زیادی دارد. این مواد از روی دامنه‌ها و دشت‌ها شسته شده و باعث فرسایش خاک و تخریب محیط‌زیست می‌گردند. از آنجا که خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی، سازه‌های آبی ساخته شده بر روی یا در کنار رودخانه بسیار گسترده است، شناخت دقیق این علم از اهداف مهم مهندسان هیدرولیک است. مواد رسوبی که در نزدیکی بستر به یکی از صور لغزش، غلتیدن و پرش حرکت می‌نمایند بار بستر می‌گویند. مواد رسوبی می‌توانند باعث ایجاد جزایر در مسیر رودخانه‌ها و در نتیجه کاسته شدن از ظرفیت انتقال جریان‌های سیلابی و رسوب‌گذاری در

^۱ Shafaei Bejestan

^۲ Abasi zade

^۳ Afshar

مخازن پشت سدها و در نتیجه کاسته شدن از ظرفیت مخازن و در نهایت از حیزانتفاع افتادن سد می شود.

به منظور ارزیابی کمی تاثیر ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن کم‌عمق بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها، استفاده از مدل‌های ریاضی اجتناب ناپذیر است. به‌همین دلیل در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن کم‌عمق بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوبات در آنها پرداخته شده است.

۱-۳ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

خاک پایه اصلی تولید در کشاورزی و جنگلداری است و بنابراین به‌عنوان منبع تغذیه بشر و مولفه اساسی در محیط و جغرافیای بشری شناخته می‌شود، (نیک^۱ و همکاران ۲۰۰۹). رسوب‌گذاری^۲ باعث کاهش ظرفیت رودخانه‌ها، انهار و مخازن می‌شود و همچنین اثرات متعدد و مخربی بر آبیاری در کشاورزی و سدها و مخازن تولید انرژی برقابی می‌گذارد. فرسایش خاک در اثر پدیده بارش-رواناب پدیده پیچیده‌ای است و تخمین آورد رسوب و فرسایش حوزه‌های آبخیز با مشکلات و پیچیدگیهای بسیاری روبرو است.

برنامه‌ریزی و مدیریت در حوزه‌های آبریز می‌باید با نگرشی جامع گرایانه و در ابعاد ملی و منطقه‌ای همراه باشد. برای مثال چنانچه احداث مخازن و سدها در برنامه توسعه یک حوزه قرار دارد، لازم است عملیات کنترل فرسایش و رسوب در سطح حوزه مورد نظر، همزمان و حتی پیش از احداث سد مد نظر قرار گیرد. چنانچه طرح‌های آبخیزداری به مرحله عمل در نیاید، مخازن سدها تبدیل به محل ذخیره رسوبات خواهد شد. علاوه بر مسئله پر شدن مخازن، رسوبات حوزه باعث اختلال در عملکرد آبگیرها، نه‌رهای آبرسانی، جاده‌ها، ریل‌های راه‌آهن، قنوات و مانند آنها می‌شوند. رسوبات اثراتی

^۱ Naik

^۲ Sedimentation

زیانبار بر صنعت حمل و نقل و کشتیرانی و سازه‌های اسکله‌ها نیز بر جای می‌گذارد (ثقفیان^۱، ۱۳۸۷).

۴-۱ اهداف تحقیق

با توجه به مطالب مطرح شده در قسمتهای قبلی مهمترین اهداف تحقیق حاضر عبارتند از:

- ۱- بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها.
- ۲- مدلسازی عددی میدان جریان و رسوب در مخازن سطحی.
- ۳- مقایسه تاثیر ابعاد هندسه و شکل مخازن بر توزیع رسوبات و هیدرولیک جریان در مخازن سطحی.
- ۴- بررسی تاثیرات تغییر در پارامترهای جریان ورودی به مخازن سطحی بر روی الگوی نشست رسوب.

۵-۱ سوالات تحقیق

مهمترین سوالات اصلی تحقیق حاضر عبارتند از:

- ۱- ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها چه تاثیری دارد؟
- ۲- مدلسازی عددی میدان جریان و رسوب در مخازن سطحی چگونه است؟
- ۳- تاثیر ابعاد هندسه و شکل مخازن بر توزیع رسوبات و هیدرولیک جریان در مخازن سطحی چه تفاوت‌هایی دارد؟

^۱ Saghafiyan

۴- آیا تغییر در پارامترهای جریان ورودی به مخازن سطحی بر روی الگوهای نشست رسوب موثر است؟

۱-۶ فرضیه‌های تحقیق

با توجه به عنوان اصلی تحقیق و نیز مبانی و مسائل مطرح شده در قسمت‌های قبلی مهمترین فرضیه تحقیق حاضر عبارت است از:

- ۱- ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها تاثیر دارد.
- ۲- مدلسازی عددی میدان جریان و رسوب در مخازن سطحی امکان پذیر است.
- ۳- اثرات ابعاد هندسه و شکل مخازن بر توزیع رسوبات و هیدرولیک جریان در مخازن سطحی قابل توجه است.
- ۴- اثرات تغییر در پارامترهای جریان ورودی به مخازن سطحی بر روی الگوهای نشست رسوب موثر است.

۱-۷ قلمرو تحقیق

قلمرو موضوعی تحقیق حاضر در حیطه بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه‌ی مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها است که به صورت مدلسازی عددی انجام می شود.

۱-۸ ساختار تحقیق

برای دستیابی به اهداف فوق، گزارش این تحقیق در شش فصل به شرح زیر تدوین می‌شود. در فصل اول به تعریف مسئله، فرضیات و اهداف پژوهش و ارائه مبانی اساسی پرداخته شده است. در فصل دوم ادبیات و پیشینه تحقیق ارائه شده و با بررسی منابع حاصل از جستجو در مورد بانک‌های اطلاعاتی مختصرا ارائه و جایگاه تحقیق حاضر در بین آنها معرفی می‌شود. در فصل سوم در مورد مبانی نظری

تحقیق صحبت خواهد شد و در فصل چهارم به معرفی نرم افزار و آشنایی بیشتر با آن خواهیم پرداخت. فصل پنجم به مدل سازی های مخازن مربوط خواهیم پرداخت. فصل ششم مربوط به بحث و نتیجه گیری و پیشنهادها می باشد و در انتها منابع مورد استفاده درج خواهد شد.

فصل دوم :

پیشینه تحقیق

۱-۲ مقدمه

در فصل قبلی مبانی و کلیات و اهداف تحقیق بطور کامل تبیین شده است در ادامه تحقیق حاضر در این فصل مبانی نظری و پیشینه پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است در ابتدا روشها و مدل‌های مختلف برآورد بار رسوبات مورد بررسی قرار گرفته است و سپس برخی از سوابق تحقیق ارائه شده است.

۲-۲ روش‌های برآورد بار رسوبی

بیشتر روش‌های ارزیابی منابع رسوب برای تخمین میزان واقعی بار رسوبی از دامنه‌ها، کناره‌های رودخانه و قسمت‌های دیگر حوضه آبخیز به کار می‌روند. این روش‌ها براساس سهولت کاربرد و قابلیت انطباق پذیری تغییر میکنند. برخی از این روش‌ها در جدول (۱-۲) آمده است.

جدول (۱-۲) روش‌های متفاوت محاسبه بار رسوب رودخانه‌ها و حوضه‌های آبریز

روش	مبنای کار	ملاحظات
رابطه دبی-دبی رسوب (روش هیدرولوژیکی)	اندازه‌گیریهای دبی و غلظت رسوب	قابل استفاده در رودخانه‌های مجهز به ایستگاه هیدرومتری (ساده، کم هزینه، در صورت کافی بودن آمار قابل اعتماد).
هیدرولیکی	استفاده از خصوصیات فیزیکی رسوب و شرایط جریان	معادلات مبتنی بر تنش برشی بحرانی، سرعت بحرانی، قدرت رودخانه‌ای مانند روش‌های نیوتن، میرپیتر مولر، توفالتی و (تعدد پارامترها، دقت کم، نیاز به کالیبره شدن) و ضعف آنها در مورد بار شسته حوضه.
هیدروگرافی	تعیین حجم مخزن و مقایسه با حجم اولیه آن	نقشه‌برداری (مشکل، پرهزینه، دقیق)، قابل استفاده در حوضه‌هایی که در آنها سد احداث شده و چند سالی از بهره‌برداری آن گذشته باشد.
مدل‌های تجربی رسوبدهی	روابط تجربی هیدرولوژیکی	رابطه رسوبدهی حوضه با پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر مساحت و شیب حوضه، بارندگی و ... (این روش در صورت کالیبره‌شدن می‌تواند قابل قبول باشد).
مدل‌های برآورد فرسایش	استفاده از عوامل مؤثر در فرسایش‌پذیری خاک (اقلیمی و فیزیوگرافی)	استفاده از مدل‌های PSIAC, FAO, USLE و تبدیل میزان فرسایش خاک به رسوبدهی حوضه (با توجه به پیچیدگی فرآیند انتقال رسوب در حوضه، استفاده از این روش در تخمین رسوبدهی همراه با خطای زیاد است).

۲-۳ پیشینه تحقیق روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار رسوب

محققین زیادی در رابطه با برآورد بار رسوبی و تاثیر آن بر هیدرولیک جریان تحقیق نموده‌اند. سینگ^۱ و درگانگلا^۲ (۱۹۹۲) معتقدند که یکی از مهمترین ابزارها برای پیشبینی بار رسوبی استفاده از منحنی های سنجه- رسوب است اما بدلیل تغییرات فصلی بارندگی، پوشش گیاهی، جریان رودخانه و غیره منحنی سنجه- رسوب نیز ممکن است در هر فصل تغییر کند. بنابراین در استفاده از این روش جهت تعیین بار رسوبی می بایست شرایط مذکور را مدنظر قرار داد. وی لزوم نمونه‌گیری در شرایط شدت بالای جریان را امری بسیار ضروری می‌داند چرا که معتقد است که گاهی ۵۰-۸۰ درصد بار رسوبی سالیانه در جریان های با شدت بالا حمل می‌شود.

هاروویز^۳ (۲۰۰۳) مشاهده کرد که چنانچه داده‌های کالیبره جمع آوری شده از لحاظ پریود زمانی مشابه با بار رسوبی در حال برآورد باشند، تخمین‌های بار رسوبی بصورت منطقی و دقیقی صورت می پذیرد. وی ارزیابی صحت و درستی منحنی‌های سنجه - رسوب را الزامی می‌داند. دی میسی^۴ و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که روش رگرسیون خطی با فاکتور تصحیح میزان بار رسوبی را برای بسیاری از رودخانه‌های ایلونویز پایین تخمین می‌زند و لذا جهت برآورد بار رسوبی خصوصاً بار رسوبی در دبی‌های بالاتر استفاده از روش رگرسیون غیرخطی را پیشنهاد دادند.

لی^۵ و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از منحنی سنجه رسوب و رابطه رگرسیونی، مقدار میانگین بار رسوبی محاسبه شده بدین روش را تقریباً ۲۰ برابر کوچکتر از میانگین بار رسوبی داده‌های اندازه‌گیری شده رودخانه Kaoping بدست آوردند که دلیل آن را عدم وجود اندازه‌گیری بار رسوب در دبی‌های پایین عنوان نمودند و معتقدند که معادله معروف سنجه-رسوب بیشتر برای شرایط غیرعادی با دبی بالا معتبر است در ضمن این محققین بر اندازه‌گیری بار بستر علیرغم مشکل بودن تکنیک و

^۱ Singh

^۲ Dergangela

^۳ Haro Wise

^۴ D.Misi

^۵ Lee

غیرحتمی بودنش تأکید فراوان داشتند چرا که میزان باریکتر یکی از پارامترهای مهمی است که می بایست به مقدار بار معلق اضافه شود.

اشمیت^۱ و مارچ^۲ (۲۰۰۶) ضمن استفاده از منحنی تداوم جریان و منحنی‌های سنجه جهت تعیین بارمعلق سالیانه، توانستند با استفاده از روشهای برون‌یابی و منحنی‌های سنجه و اندازه‌گیری صحرایی باریکتر تخمین مناسبی را جهت انتقال باریکتر واقعی انجام دهند. این دو محقق با استفاده از داده‌های حاصل از ۵۵ سیلاب اندازه‌گیری شده در رودخانه Lahne wies graben توانستند یک ضریب انطباق بسیار خوب را بین بار رسوبی معلق و دبی مؤثر بدست آورند. همچنین مشخص گردید که در این رودخانه بیش از ۷۰ درصد کل بار جامد یک پی‌رود مشاهداتی میتواند به تنهایی طی یک سیلاب انتقال یابد.

روویرا^۳ و بتالا^۴ (۲۰۰۶) تغییرات بار معلق رسوبی رودخانه Tordera را در سه مقیاس زمانی سالیانه، فصلی، ماهیانه و وقایع سیلابی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و ضمن برقراری رابطه آماری بین غلظت بار معلق و دبی جریان، از این روابط جهت تخمین بار رسوبی معلق استفاده کردند. نتیجه تحقیقات نشان داد که طی وقایع سیلابی، مقدار کل بار معلق انتقالی به بزرگی سیلاب، تداوم آن و زمان وقوع آن بستگی دارد.

کرودر^۵ در سال ۲۰۰۷ با تحقیق در مورد صحت منحنی‌های سنجه - رسوب دریافتند که چنانچه لگاریتم داده‌های دبی جریان - بار رسوبی را در مقابل هم پلات کنیم و منحنی‌های حاصله به صورت محدب و یا مقعر ظاهر شوند استفاده از روش‌های رگرسیونی خطی اغلب بار رسوبی را بیشتر و یا کمتر از حد واقعی برآورد می‌کنند لذا لزوم استفاده از رگرسیون غیرخطی را برای برآورد بار رسوبی پیشنهاد دادند. تایج نشان داد که میزان خطا در برآوردهای سالیانه بیشتر از برآوردهای تجمعی

^۱ Schmit

^۲ March

^۳ Rovira

^۴ Betala

^۵ Keroder

طولانی مدت است بدین ترتیب مشخص گردید که برآورد صحیح و دقیق بار رسوبی توسط روش رگرسیونی به سه عامل بستگی دارد:

- ۱- شکل منحنی دبی - بار رسوبی.
- ۲- مقدار داده‌های استفاده شده جهت کالیبره نمودن معادلات رگرسیون.
- ۳- دوره زمانی که طی آن بار رسوبی اندازه‌گیری شده است.

در ایران نیز تحقیقات زیادی جهت برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها و حوضه‌های آبخیز مختلف با استفاده از انواع روش‌های هیدرولوژیکی و منحنی‌های سنج - رسوب صورت پذیرفته است که به دلیل کثرت تحقیقات انجام گرفته به برخی از آنها اشاره خواهیم کرد:

پرتانی^۱ و طباطبایی^۲ (۱۳۸۵) بار رسوبی را به دو روش اصلی هیدرولوژیکی مشاهداتی و روش هیدرولیکی برای ۵ ایستگاه رودخانه قزل اوزن محاسبه کرده و سپس با مقایسه آن‌ها و بررسی رفتار روابط مختلف و عوامل مؤثر در میزان محاسبات، معادله مناسب برای هر ایستگاه را انتخاب نمودند. لهراسبی^۳ (۱۳۸۵) مدلی را که در آن تفکیک داده‌ها براساس ماه‌های خشک و مرطوب و کلاسه‌بندی مقادیر دبی جریان صورت گرفته باشد به عنوان مدل بهینه و به عنوان مدلی که دارای کمترین مجموع مربعات خطا است برای حوضه آبخیز هراز انتخاب نمود.

میرمعینی^۴ (۱۳۸۶) به منظور اصلاح و توسعه روشهای برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها، مقادیر برآوردی^۶ نوع منحنی سنج رسوب با مقادیر واقعی دوره‌های مختلف آماری در ۵ ایستگاه هیدرومتری از مناطق مختلف اقلیمی کشور را با شاخص‌های مختلف دقت و صحت مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که در برآورد بار رسوبی متوسط دوره آماری، منحنی سنج رسوب چند متغیره نتایج مناسبی را ارائه می دهد.

^۱ Partani

^۲ Tabatabaee

^۳ Lohrasbi

^۴ Mir Moeeni

۴-۲ روش‌های هیدرولیکی برآورد بار رسوبی

مهندسين هیدرولیک و زمین‌شناس طی دو قرن اخیر، حرکت مواد رسوبی در رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند، چرا که رفتار مواد رسوبی، در هیدرولیک رودخانه و تغییر مورفولوژی آن، حائز اهمیت است. طبیعت پیچیده انتقال رسوب و وابستگی آن به شرایط طبیعی، علم انتقال رسوب را به رشته‌های تجربی یا نیمه تجربی تبدیل کرده است. روابط و معادلاتی که به بررسی حرکت مواد رسوبی می‌پردازند اغلب، براساس مفاهیمی بنا شده‌اند که در تعیین آنها، ساده‌انگاری‌هایی صورت گرفته است. این ساده کردن فرضیات و نادیده گرفتن برخی جزئیات محققین را قادر ساخته تا نرخ انتقال رسوب را به کمک یک یا دو شاخص هیدرولیکی رودخانه تعیین کنند ازجمله این شاخص‌ها می‌توان به دبی آبراهه، سرعت متوسط جریان، شیب خط انرژی و تنش برشی اشاره کرد. هر یک از این روابط براساس یک سری نتایج آزمایشگاهی محدود یا در بعضی موارد بر طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی بر روی آبراهه‌ها ارائه شده‌اند. به لحاظ ماهیت تجربی و یا نیمه تجربی این روابط، نتایج حاصل از آنها غالباً با هم متفاوتند و این نتایج بعضاً با آنچه که به واقع در آبراهه‌ها مشاهده می‌شود نیز تفاوت‌های فاحشی دارند. در نتیجه، هیچ یک از معادلات انتقال رسوب ارائه شده تاکنون نتوانسته‌اند کاملاً در مجامع مهندسی پذیرفته شوند. چرا که هیچ یک قادر به تخمین و محاسبه دقیق نرخ انتقال رسوب نیستند. این عدم دقت در نتایج حاصل از معادلات در رودخانه‌هایی که تحت تأثیر شرایط خاص جوی و طبیعی قرار دارند، آشکارتر است (یانگ^۱، ۱۹۹۶).

معادلات انتقال رسوب به طور مدام و پیوسته در حال تغییر، تکمیل و افزایش‌اند که جدول ۲-۲ معروفترین این معادلات را به نمایش گذاشته است و روابط ریاضی مربوطه نیز در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

^۱ Yang

جدول (۲-۲) معروفترین روشهای برآورد بار رسوبی براساس معادلات انتقال رسوب

روش	محاسبه بار رسوبی			توصیه‌های کاربردی
	بار کف	بار معلق	بار کل	
Schoklitsch (۱۹۳۴)	*			در رودخانه‌های با مواد بستری درشت دانه، اندازه ذرات رسوبی $D = (0.3-5) \text{ mm}$
Casey (۱۹۳۵)	*			برای رودخانه‌های با مواد بستر ماسه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت
Shields (۱۹۳۶)	*			براساس داده‌های آزمایشگاهی و برای اندازه‌های دانه‌های رسوبی $1.7 - 2.5 \text{ mm}$
Lane & Kalinsk (۱۹۴۱)		*		براساس داده‌های آزمایشگاهی است
Kalinsk (۱۹۴۷)	*			براساس داده‌های آزمایشگاهی و اندازه ذرات یکنواخت
Meyer-Peter & Muller (۱۹۴۸)	*			برای اندازه ذرات رسوبی $(0.4-30) \text{ mm}$
Einstein (۱۹۵۰)	*	*	*	برای رودخانه‌های با بستر شنی و ماسه غیریکنواخت، رودخانه‌هایی که بار معلق دارند
Velikanov (۱۹۵۴)			*	براساس داده‌های آزمایشگاهی است
Laursen (۱۹۵۸)			*	برای داده‌های آزمایشگاهی با اندازه مواد بستری $(0.011-4.08)$
Rottner (۱۹۵۹)	*			براساس همبستگی آماری و نتایج آزمایشگاهی با کاربرد وسیع
Brooks (۱۹۶۳)		*		از لحاظ فرضیات پایه شبیه رابطه انیشتن است
Colby (۱۹۶۴)			*	براساس نتایج آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از آبراهه‌های طبیعی و استفاده از توابع باربستر انیشتن
Change, Simons & Richardson (۱۹۶۷)	*	*	*	برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و براساس نتایج حاصل از قلم‌های آزمایشگاهی

Engelund (۱۹۶۵)		*		در رودخانه‌های مختلف و براساس دبی‌های مختلف بدست آمده است
Bagnold (۱۹۶۶)	*	*	*	برای رودخانه‌هایی که دارای فرم بستر می‌باشند
Engelund & Hansen (۱۹۶۷)			*	برای رودخانه‌هایی که دارای فرم بستر دون می‌باشند
Toffaletti (۱۹۶۹)			*	براساس نتایج حاصل از فلووم‌های آزمایشگاهی و نتایج واقعی بدست آمده از آبراهه‌های طبیعی
Shen&Hung(۱۹۷۲)			*	برای رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و براساس نتایج حاصل از فلووم‌های آزمایشگاهی
Yalin (۱۹۷۷)	*			در رودخانه‌های ماسه‌ای و شنی با جریان کاملاً متلاطم
Dobys (۱۹۷۹)	*			براساس داده‌های حاصل از آزمایشگاه و برای رودخانه‌های مختلف است
Parker & et.al. (۱۹۸۲)	*			برای رودخانه‌های با بستر شنی و لایه سطحی محافظ
Yang (۱۹۸۲)			*	در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه و برای فرم بسترهای مختلف
Samaga (۱۹۸۵)		*		برای رودخانه‌های با فرم بستر جریان و اندازه‌های مختلف رسوبات
Fine Rijn (۱۹۸۵)	*	*	*	برای رودخانه‌های مختلف و براساس داده‌های آزمایشگاهی
Zanke (۱۹۸۷)	*			کاربرد در رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه
Ackers & White (۱۹۹۰)			*	برای انواع فرم بستر و جریان زیر بحرانی
Karim & kennedy (۱۹۹۰)			*	برای رودخانه‌های مختلف
Parker (۱۹۹۰)	*			برای رودخانه‌های با بستر شنی و لایه سطحی محافظ
Wilcok (۱۹۹۷)			*	مناسب برای رودخانه‌های با بستر شنی
Sun & Donahue (۲۰۰۰)	*			برای رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه و برای ذرات (۲ تا ۱ میلی‌متر)
Cheng (۲۰۰۲)	*			برای شرایط مختلف انتقال بار رسوبی و رودخانه‌های با مواد بستری درشت‌دانه

جدول (۲-۳) مهمترین روابط انتقال رسوب در مقاطع روباز

توضیح	نوع	رابطه	محقق (سال)
C : ضریب زبری شزی، V, V_c : سرعت های متوسط و بحرانی در آستانه حرکت.	باربستر	$q_b = \frac{K}{C^4} \gamma V^2 (V^2 - V_c^2)$	Dubois (۱۸۷۹)
q_b = دبی بار بستر، d = اندازه ذره، q, q_c = دبی آب و دبی بحرانی آستانه حرکت	باربستر	$q_b = 7000 \frac{S^{\frac{3}{2}}}{d^{\frac{1}{2}}} (q - q_c), q_c = \frac{0.00001944d}{S^{\frac{3}{4}}}$	Schoklitsch (۱۹۳۲)
q, q_b = دبی آب و بار بستر در واحد عرض آبراهه، d = قطر ذره رسوب، τ_c : تنش برشی بحرانی	باربستر	$\frac{q_b \gamma_s}{q \gamma S} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d}$	Sheilds (۱۹۳۶)
q_s : دبی بارمعلق، q : دبی جریان، P_L : ضریب تایع عمق و سرعت سقوط، ω : سرعت سقوط، a : فاصله از سطح آب، U^* : سرعت برشی، D : عمق جریان، C_a : غلظت وزنی	بارمعلق	$q_s = q_c \cdot p_L \cdot \exp\left(\frac{15\omega a}{U^* D}\right)$	Lane and Kalinske (۱۹۴۱)
q_b = بار بستر در واحد عرض آبراهه، d = اندازه میانه ذرات رسوب	باربستر	$\frac{q_b}{U^* d} = f' \left(\frac{\tau_c}{\tau} \right)$	Kalinske (۱۹۴۷)

Meyer-Peter and Muller(۱۹۴۸)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = k(\theta - \theta_{cr})^{1.5}, \theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)D}$	باربستر	سه نسخه متفاوت با $k=۸,۱۲,۳۲$
Einstein(۱۹۵۰)	$q_s = 11.6 U_*' C_a a \left[\left(2.303 \log \frac{30.2D}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right]$	بارمعلق	C_a : غلظت وزنی ، U_*' : سرعت برشی، Δ : زبری ظاهری سطح بستر، I_1, I_2 : ضرائب رابطه بarmعلق انیشترین
Zhang(۱۹۶۱)	$C_* = \frac{1}{20} \left(\frac{V^3}{gR\omega} \right)^{1.5} \left[1 + \left(\frac{1}{45} \frac{V^3}{gR\omega} \right)^{1.15} \right]^{-1}$	بارمعلق	C^* : متوسط غلظت بار معلق(جرم در واحد حجم)، R : شعاع هیدرلیکی
Dou(۱۹۶۴)	$q_{b*} = 0.01 \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \tau_b (V - V_c) \frac{V}{g\omega}$	باربستر	q_{b*} : دبی رسوب بصورت جرم در واحد زمان در واحد عرض
Simons and Richardson (۱۹۶۶)	$q_{sw} = \gamma D C_a \left[v I_1 - \frac{2U_*}{k} I_2 \right]$	بارمعلق	I_1, I_2 : ضرائب رابطه، q_{sw} : دبی رسوب برحسب وزن در ثانیه در واحد عرض آبراهه ، C_a : غلظت وزنی، U_*' : سرعت برشی، v : لزجت سینماتیکی سیال، k : ثابت کارمن
Bagnold(۱۹۶۶)	$q_{s*} = 0.01 \frac{\tau_b \rho_s V}{(\rho_s - \rho)\omega}$	بارمعلق	τ_b : تنش برشی بستر

Bagnold(۱۹۶۶)	$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = V \theta ((s-1)/gD)^{0.5} (0.17 + 0.01V / \omega)$	بارکل	q_s : بار کل رسوبات در جریان ورقه‌ای
Chang and Symons and Richardson(۱۹۶۷)	$q_b = \frac{K_b \gamma_s V (\tau - \tau_c)}{(\gamma_s - \gamma) \tan \phi} = K_t V (\tau - \tau_c)$	باربستر	q_b دبی وزنی بار بستر، k_b و k_t = ثابت، Φ = زاویه ایستائی.
Yalin(۱۹۷۲)	$\frac{q_{b*}}{\gamma_s dU_*} = 0.635 \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c} \left(1 - \frac{1}{a \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c}} \ln \left(1 + a \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c} \right) \right)$	باربستر	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Engelund and Hansen (۱۹۷۲)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 0.05 V^2 \theta^5 / [g(s-1)D]$	بارکل	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Ackers and White(۱۹۷۳)	$G_{gr} = H \left(\frac{F_{gr} - A_{gr}}{A_{gr}} \right)^m$ $F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \left(\frac{U}{\left(\sqrt{32} \text{Log}(12R / D_{50}) \right)} \right)^{1-n}$ $m = 1.34 + 9.66 / D_{gr} \quad A_{gr} = 0.14 + 0.23 / \sqrt{D_{gr}}$ $\text{Log} H = 2.86 \text{Log} D_{gr} - (\text{Log} D_{gr})^2 - 3.53, ,$	بارکل	G_{gr} : پارامتر، n : پارامتر، D_{gr} : پارامتر اندازه ذره بدون بعد، R : شعاع هیدرولیکی

Engelund and e (۱۹۷۶) Freds	$\phi = \frac{q_s}{\gamma_s \sqrt{g(s-1)D^3}} = 11.6(\theta - \theta_{cr})(\sqrt{\theta} - 0.7\sqrt{\theta_c})$	باریستر	ϕ : دبی رسوب بصورت جرم در واحد زمان در واحد عرض
Yang (۱۹۷۹)	$\text{Log} C_t = a_1 + a_2 \text{Log}(uS / \omega - u_{cr}S / \omega)$ $a_2 = -0.565 - 0.286 \text{Log}\left(\frac{\omega d}{\nu}\right) - 0.457 \text{Log} \frac{u_*}{\omega}$ $a_2 = 1.78 - 0.409 \text{Log}\left(\frac{\omega d}{\nu}\right) - 0.314 \text{Log} \frac{u_*}{\omega}$	بارکل	W : سرعت سقوط، C_t : متوسط غلظت رسوبات، D : اندازه ذره رسوب
Smart and Jaggi (۱۹۸۳)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 4 \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} q S_e^{1.6} \frac{(1 - \theta_{cr}(\alpha)) / \theta}{\sqrt{g(s-1)^3 D^3}}$ $\theta_{cr}(\alpha) = \theta_{cr}(1 - \tan \alpha / \tan \phi) \cos \alpha, \quad \alpha = \text{bed slope angle}$	باریستر	در رسوبات یکنواخت: $\left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} = 1.05$
Van Rijn (۱۹۸۴)	$q_s = \frac{c_a F h V}{\sqrt{g(s-1)D^3}}$	بارمعلق	C_a : غلظت در تراز مبنا، F : ضریب، h : عمق، V : سرعت، D : اندازه ذره، s : چگالی نسبی، g : شتاب
Van Rijn (۱۹۸۴)	$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 0.053 \frac{((\theta - \theta_{cr}) / \theta_{cr})^{2.1}}{\left[D (g(s-1) / \nu^2)^{1/3} \right]^{0.3}},$ $\theta = \tau / (g(\rho_s - \rho)D) \quad ,$	باربستر	τ : تنش برشی D : اندازه ذره رسوب
Van Rijn (۱۹۸۴)	$q_s = \frac{c_a F h V}{\sqrt{g(s-1)D^3}}$	بارمعلق	C_a : غلظت در تراز مبنا، F : ضریب، h : عمق V : سرعت، D : اندازه ذره، s : چگالی نسبی، g :

Rickenmann(۱۹۹۱)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 3.1 \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \theta^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) F_r^{1.1} / \sqrt{s-1}$	باریستر	F_r : عدد فرود، در رسوبات یکنواخت: $\left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} = 1.05$
Cheng(۲۰۰۲)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 13\theta^{1.5} \exp(-0.05/\theta^{1.5})$	باریستر	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Abrahams(۲۰۰۳)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = \theta^{1.5} V / V_*$	باریستر	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Camenen and Larson(۲۰۰۵)	$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D^3}} = 12\theta^{1.5} \exp(-4.5\theta_{cr} / \theta)$	بار معلق	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Ayyoubzadeh(۱۹۹۷)	$\tau_* = U_*^2 / (s-1)gD^2 : q_b = 10^{-5.4011} \tau_*^{-2.2102-2.0586\log(\tau_*)}$	باریستر (مقطع مرکب)	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Atabay(۲۰۰۴)	$X(ppm) = \frac{-76.8986 + 2077.3073Q_{total}^{0.5}}{1 - 19.2965Q_{total}^{0.5} + 134.3828Q_{total}}$	باریستر (مقطع مرکب)	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.
Tang et al.(۲۰۰۶)	$q_b = (1-e)\alpha C_s \Delta + b,$ Overbank Flows: $C_s = -0.2578 + 4.4504 \times 10^{-8} U_*^{-5.582}$	باریستر (مقطع مرکب)	پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند.

۲-۵ سوابق تحقیق بر آورد بار رسوب بوسیله روش‌های عددی

اعلمی^۱ و همکاران (۱۳۸۱) شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ذخیره‌ای با استفاده از مدل لوله جریان مطالعه موردی مخزن سد کارده را انجام داده است. در این مطالعه مدل لوله جریان برای شبیه‌سازی رودخانه‌های آبرفتی به منظور بررسی رسوب‌گذاری مخازن سدهای به کار گرفته شده و مطالعه موردی روی مخزن سد کارده انجام یافته است. نتایج حاصل از اجرای این مدل با هیدروگرافی انجام یافته در سال ۱۳۷۵ روی مخزن سد مزبور و مدل Hec-۶ مقایسه گردیده و نشان داده شده است که این مدل ضمن دارا بودن خصوصیات و کارایی مدل‌های ریاضی یک بعدی به دلیل در نظر گرفتن شرایط جریان به صورت نیمه دو بعدی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین در کاربرد این مدل برای مخازن سدها به دلیل اهمیت تاخیر مکانی و زمانی، انتقال نامتعادل رسوبات مورد استفاده قرار گرفته و حساسیت بسیار شدید آن به ضریب بازایافت فرسایش و رسوب‌گذاری نشان داده شده است. کالیبراسیون مدل با هیدروگرافی انجام یافته در مخزن سد نشان می‌دهد که اگر روند رسوبگذاری به همین منوال ادامه یابد طی سی سال از بهره برداری سد حدود ۷۰٪ حجم مخزن از رسوبات پر شده و عمر مفید آن عملاً به پایان خواهد رسید.

حسن زاده^۲ و همکاران (۱۳۸۱) بررسی مدل ریاضی رسوب گذاری در کانال‌های آبرفتی در حالت جریان‌های غیر دایمی را انجام داده است. شناخت و تحلیل شرایط انتقال رسوب و تغییراتی که در طول زمان از نظر رسوبی در سیستم های انتقال آب و کانال‌های آبرفتی به وجود می‌آید، از دیرباز مورد توجه محققین و طراحان سازه‌های هیدرولیکی بوده است. به همین منظور بسیاری از پدیده‌های رسوبی اعم از فرسایش، آبشستگی و رسوبگذاری همواره مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته و اطلاعات، روابط و معادلات فراوانی به صورت تجربی و تئوری ارائه شده است. از جمله شبیه سازی ریاضی جریان‌های انتقال رسوب از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده است. در این تحقیق شبیه سازی و مدل

^۱ Alami

^۲ Hasanazade

ریاضی انتقال رسوب در جریان‌های غیر دایمی در کانال‌های آبرفتی مورد توجه قرار گرفته است. از این رو ابتدا مدل ریاضی با حل معادلات جریان غیر دایمی (معادلات سن - ونان) و معادله پیوستگی رسوب به صورت مزدوج و با روش تفاضلات محدود صریح، بوسیله الگوی مک کورمک، با دقت از درجه دوم تهیه گردید. سپس با لحاظ کردن شرایط مرزی مناسب و اعمال داده‌های رودخانه آجی چای در ایستگاه و نیاز تحلیل و قابلیت و کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این مدل می‌توان روند تغییرات بستر و پروفیل سطح آب را به صورت تابعی از زمان و مکان و برای هر نوع معادله دبی رسوب، پیش بینی نمود.

فیروزآبادی^۱ و همکاران (۱۳۸۳) مقایسه رفتار جریان‌های چگالی در مخازن مستطیلی و دایروی و تاثیرات آن در راندمان رسوب‌گذاری را مورد بررسی قرار داده است. با وجود متداول بودن هر دو نوع مخزن مستطیلی و دایروی در تاسیسات تصفیه آب، نظر واحدی بین متخصصین درباره مزایا و معایب آن‌ها نسبت به یکدیگر وجود ندارد. با در نظر گرفتن تاثیرات پیچیده‌ای که از حضور تغییرات چگالی بین ورودی و محتویات مخزن در آن به وجود می‌آید سعی شده برخی از مزایای حوضچه‌های مستطیلی روشن شود. این مقایسه تنها بر اساس بازده بالاتر صورت نگرفته و به طور عمده به شدت حضور پدیده‌های منفی، مثل جریان جت در کف، توجه شده است. محاسبات عددی بر روی مخزن مستطیلی معادل مخزن دایروی بدون مانع ورودی حاکی از حضور نداشتن لایه‌های انتقال دهنده رسوب، شدت پایین تر جت کف و افزایش بازده با کاهش عدد فرود ورودی می باشد. همه عوامل فوق باعث می شوند که مخازن مستطیلی در بار ذرات و هیدرولیکی بالا بهتر از مخازن دایروی عمل کنند. به علت وجود نداشتن داده‌های تجربی برای مخزن معادل فرضی تنها این امکان وجود داشت که اعتبار نتایج محاسباتی از مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی مساله استاندارد دیگری تایید شود.

^۱ Firooz Abadi

قمشی^۱ (۱۳۸۵) پیش بینی وضعیت رسوب گذاری در مخزن سد کرخه را انجام داده است. مخزن سد کرخه با حجمی بالغ بر ۶.۹۵ میلیارد مترمکعب (در رقوم ۲۷۵ متر) بزرگترین مخزن در سطح کشور محسوب می شود که در سال های گذشته مورد بهره برداری قرار گرفته است. در تحقیق ایشان که با هدف پیش بینی وضعیت رسوب گذاری در مخزن سد کرخه صورت گرفته است از مدل HEC-۶ و مدل DEPO استفاده شده است. به منظور استفاده از این مدل ها حجم زیادی از اطلاعات شامل وضعیت هندسی مقاطع مخزن، آمار دبی جریان رودخانه، آمار دبی جریان- دبی رسوب، دانه بندی مواد معلق در جریان های مختلف، دانه بندی مواد بستر و برخی اطلاعات دیگر به کار گرفته شده اند. بعد از آماده سازی فایل های ورودی برای اجرای دو مدل با در دسترس بودن اطلاعات ورودی اقدام به اجرای آنها و مقایسه گرافیکی نتایج خروجی برای حالات مختلف شده است. به طور خلاصه می توان گفت که میزان رسوبات ورودی به مخزن به طور متوسط ۱۴.۷ میلیون متر مکعب در سال بوده است. با توجه به نتایج اجرای مدل ها، ضریب کاهش حجم سالیانه مخزن ۰.۰۰۱۵۸ به دست آمده است. هم چنین در پایان دوره ۱۰۰ ساله، حجم مفید مخزن در حدود ۵.۴-۵.۸ میلیارد مترمکعب و فاصله پیشانی رسوب در دلتا از بدنه سد ۱۸-۲۳ کیلومتر بوده، بنابراین ایشان پیشنهاد کرده اند که کلیه تاسیسات در محدوده بین دیواره سد و فاصله دلتای پیش بینی شده تعبیه شوند تا رسوب گذاری مشکلی برای آنها بوجود نیآورد.

آشوری^۲ (۱۳۸۵) در تحقیقی به بررسی روند رسوب گذاری در حوضچه ی ترسیب کانال های آبیاری کشت و صنعت امام خمینی (ره) با استفاده از نرم افزار SHARC پرداخته است. در این تحقیق سرعت ته نشینی ذرات سیلت را با استفاده از روش ویتریچ در رودخانه بدست آورد و سپس این اطلاعات را وارد نرم افزار نموده است. در نهایت این نرم افزار به تخمین از سرعت ذرات ورودی به حوضچه را می دهد که با مقایسه خروجی این قسمت می توان این اظهار را نمود که سرعت ذرات انتقالی رودخانه و

^۱ Ghomshi

^۲ Ashoori

سرعت ذرات ورودی به حوضچه تقریباً یکسان محاسبه شده است و مقدار آن $0/42$ میلیمتر بر ثانیه است.

ایران دوست^۱ و همکاران (۱۳۸۵) تعیین پروفیل رسوب گذاری در کف مخزن سد اکباتان با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی را انجام داده اند. در شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) روش های موجود آموزش و واسنجی عصبی بر اساس ساختار پرسپترون چندلایه ای می باشد، لیکن این روش ها دارای مشکلات ناشی از عدم همگرایی در روش های یادگیری، عدم ثبات اوزان شبکه در شرایطی که طیف داده های ورودی دارای انحراف معیار بزرگ بوده و بالاخره نیاز به داده و اطلاعات فراوان جهت آموزش شبکه می باشند. برای غلبه بر مشکلات فوق در این تحقیق روش جدید ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی - بهینه سازی ریاضی غیرخطی ارایه شده و شبکه عصبی مصنوعی که با استفاده از روش پس انتشار خطا طراحی گردیده به عنوان ابزار قدرتمندی برای برآورد میزان رسوب مخزن سد اکباتان معرفی شده است. بر این اساس با استفاده از معادله بین دبی رسوب و جریان آب رودخانه آبشینه و آمار ایستگاه یالفان مدل طراحی شده ANN با گره های مختلف در لایه ها ورودی ها و لایه مخفی اجرا گردید. نتایج واسنجی نشان می دهد برای توزیع رسوب در مخزن سد اکباتان بایستی از شش گره در لایه ورودی و هشت گره در لایه مخفی استفاده نمود. در این تحقیق رابطه رضایت بخشی بین تعداد مولفه های لایه مخفی با تعداد داده های آموزش و تعداد مولفه های ورودی تعیین شده است.

شمسائی^۲ و همکاران (۱۳۸۶) در تحقیقی مطالعه فرسایش مخزن سفیدرود را با استفاده از نرم افزار GSTAR مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نتایج این مدل ریاضی با مشاهدات عینی و اندازه گیری های انجام شده در خصوص سد سفیدرود منجر به نتایج قابل قبولی گردیده است.

مزدک خضری نژاد^۱ و همکاران (۱۳۸۷) با مطالعه بر روی سد گرشا در کرمانشاه با استفاده از مدل دوبعدی CCHE۲D مصالح بستر را بر اساس قطر به ده دسته تقسیم کردند و منحنی دانه بندی را بر

^۱ Irandoost

^۲ Shamsaee

اساس قطر میانه هر دسته به مدل معرفی کردند و تخلل مصالح ته نشین شده را $0/6$ فرض کردند. پس از ورود پارامترهای مورد نیاز و همچنین تعیین شرایط اولیه رقوم سطح، مدل ریاضی با مقادیر مختلف پارامترهای ورودی از جمله زبری، گام زمانی محاسبات، روش عددی مورد استفاده اجرا شد و حساسیت نتایج خروجی به این پارامترها بررسی شد. هم چنین با تغییر ابعاد شبکه محاسباتی، مناسب ترین ابعاد شبکه برای مخزن مورد مطالعه انتخاب کردند. این ابعاد در کوچکترین سلول 6 متر و در بزرگترین سلول 100 متر بوده است. نتایج مدل ریاضی نشان داد که در طی 50 سال از عمر مفید سد، حدود $44/5$ میلیون متر مکعب رسوب در مخزن ته نشین می شود که تقریباً معادل 3 درصد از حجم مخزن سد گرشا است.

ساعدی^۲ و همکاران (۱۳۸۷) به تحلیل دقت روش های مختلف محاسبه بار رسوب در مخازن سدها (مطالعه موردی سد شهید عباس پور) با استفاده از نرم افزار GSTARS-۳ پرداخته اند. نتایج تحقیق مذکور نشان می دهد که معادلات یانگ (۱۹۷۳ و ۱۹۷۴) و سپس معادلات ایکرز و وایت اصلاح شده نزدیکترین نتایج را به مقادیر اندازه گیری شده ارائه می دهند این دو رابطه و سایر روابط، در نواحی بالادست، دارای نتایج بسیار نزدیکی به مقادیر اندازه گیری شده بوده، ولی هرچه به پایین دست و بدنه سد نزدیک می شویم، اختلاف نتایج مدل سازی عددی و اندازه گیری های واقعی و در نتیجه خطای مدل سازی افزایش می یابد.

حسن زاده^۳ و همکاران (۱۳۸۷) مقایسه نتایج مدل ریاضی رسوبگذاری در مخزن سد علویان مراغه با داده های آبنگاری را انجام داده است. رسوبگذاری در مخزن سد نه تنها سبب کاهش ظرفیت و عمر مفید مخزن می شود، بلکه ضمن ایجاد اشکالات عدیده در باز و بسته کردن دریچه های عمقی و نیمه عمقی سد، موجب افزایش سطح مخزن و افزایش تبخیر و تلفات آب می شود. این مسایل، اهمیت

^۱ M. Khezri nezhad

^۲ Saedi

^۳ Hasanzade

بررسی پدیده انباشت رسوب در مخازن جهت پیش بینی نحوه توزیع رسوب و آرایه راهکارهای مدیریتی در کنترل مخازن را کاملاً مشهود می سازد. مدل های ریاضی یکی از ابزارهای مهم برای پیش بینی مقدار رسوبگذاری در مخازن سدهای ذخیره ای و برآورد عمر مفید آنهاست. این مدل ها مبتنی بر تحلیل معادلات حاکم بر پدیده های موثر در انتقال، توزیع، انباشت و آب شستگی رسوب می باشند. در مقاله حاضر، بعد از واسنجی مدل $G_{stars}^{3.0}$ به کمک داده های آبنگاری مخزن سد علویان مراغه، نمودارهای حجم - سطح - ارتفاع و نحوه رسوب گذاری در مقطع طولی و مقاطع عرضی برای حالت های بستر اولیه، آبنگاری شده و نتایج حاصل از تحلیل پدیده رسوب گذاری به کمک مدل برای یک دوره ۵۰ ساله ترسیم و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و عمر مفید مخزن برآورد شده است. نتایج محاسبات بیانگر آن است که پس از طی ۵۰ سال، حجم رسوبات انباشته شده در مخزن به حدود ۱۵ میلیون متر مکعب بالغ می شود که تقریباً معادل ۲۵ درصد ظرفیت مفید مخزن است.

محمد زاده^۱ و همکاران (۱۳۸۷) بهبود روش تعیین ضریب شکل مخازن سدها و بررسی تغییرات آن در اثر رسوب گذاری را بررسی نموده است. ضریب شکل یکی از مهمترین خصوصیات فیزیکی مخازن سدها می باشد که عبارت است از عکس شیب منحنی ارتفاع - حجم مخزن در دستگاه مختصات لگاریتمی. از ضریب شکل برای طبقه بندی مخازن و پیش بینی توزیع رسوب در آنها استفاده می شود. در این تحقیق یک روش جدید جهت بهبود تعیین ضریب شکل مخازن آرایه شده است. در روش پیشنهادی، به جای منحنی ارتفاع - حجم، منحنی بدون بعد ارتفاع - حجم مخزن در مختصات تمام لگاریتمی ترسیم می شود و سپس مقدار ضریب شکل تعیین می گردد. داده های ارتفاع - حجم اولیه و داده های حاصل از رسوب سنجی های انجام شده در مخازن ۴ سد در ایران (دز، شهید عباسپور، کارده و لتیان) و ۴ سد در آمریکا (روزولت، سدار بلاف، کروین و نامبی فالز) استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که ضرایب شکل همه مخازن مورد مطالعه، در اولین یا دومین عملیات رسوب سنجی کم شده، به گونه ای که مقدار عددی آنها به ۲ تا ۲.۵ کاهش یافته است. همچنین تیپ همه مخازن

^۱ Mohammadzade

پس از رسوب‌گذاری به تیپ III تغییر پیدا کرده است. لذا بهتر است برای کاربرد روش کاهش سطح در توزیع رسوبات، تیپ مخازن از نوع III انتخاب شود. از مهمترین مزایای روش جدید این است که به طور هم زمان می توان منحنی های بدون بعد ارتفاع - حجم چندین مخزن (و یا یک مخزن در رسوب سنجی های متعدد) را در یک دستگاه مختصات لگاریتمی ترسیم نموده و ضریب شکل آن‌ها را با هم مقایسه کرد. در حالی که در روش قدیمی بایستی منحنی ارتفاع - حجم مخزن هر سد را به طور جداگانه در یک دستگاه مختصات لگاریتمی ترسیم نمود.

ظهیری^۱ و همکاران (۱۳۸۸) شبیه سازی وضعیت رسوب گذاری رودخانه کارون با استفاده از مدل ریاضی GSTARS ۲.۰ را انجام داده است. رودخانه کارون در استان خوزستان دارای مسایل پیچیده ای در ارتباط با رسوبات شامل تشکیل و توسعه جزایر رسوبی، فرسایش سواحل، رسوب گذاری شدید و نیز کاهش سرعت و ظرفیت آب گذاری رودخانه است. برای سامان دهی این رودخانه، طرح‌ها و اقدامات مهندسی شامل احداث دایک کنترل سیل و لایروبی رودخانه پیشنهاد شده است. برای بررسی کارایی و تاثیر متقابل این اقدامات، باید وضعیت رسوب‌گذاری رودخانه در هر یک از این گزینه ها به طور مناسبی شبیه سازی شود. در این مقاله، فرآیند رسوب‌گذاری و فرسایش رودخانه کارون در محدوده ایستگاه هیدرومتری اهواز تا فارسیات به طول حدود ۵۰ کیلومتر با استفاده از مدل ریاضی GSTARS ۲.۰ شبیه سازی شده است. این مدل با استفاده از مفهوم تیوب‌ها یا لوله‌های جریان، قابلیت شبیه سازی توزیع رسوب‌گذاری را به صورت شبه دوبعدی (طولی و عرضی) در رودخانه‌ها دارد. برای واسنجی هیدرولیکی و رسوبی این مدل به ترتیب از تغییرات رقوم سطح آب در سیلاب ۱۳۸۴ و تغییرات هندسی مقاطع عرضی رودخانه دز به مدت ۷ سال (از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۴) استفاده شده است. نتایج این واسنجی نشان می دهد که روابط رسوبی اکرز - وایت (۱۹۷۴) و توفالتی (۱۹۶۹) مطابقت بهتری با شرایط موجود رودخانه دارند. همچنین نتایج این مدل ریاضی بیانگر رسوب‌گذاری شدید مواد معلق (حدود ۲.۵ میلیون تن در سال) در این بازه مطالعاتی است.

^۱ Zahiri

مساعدی^۱ و همکاران (۱۳۸۸) برآورد حجم رسوب گذاری در مخازن سدهای کرج و دز و مقایسه آن با نتایج هیدروگرافی را انجام داده اند. فرسایش و انتقال رسوب از پدیده‌هایی می‌باشند که در مراحل مختلف تبدیل بارش به رواناب و در مسیر انتقال جریان به وقوع می‌پیوندند. بخشی از رسوبات در حال انتقال در مخازن سدها ته نشین می‌شوند که می‌توانند عواقب فنی، اقتصادی و یا حتی اجتماعی نامطلوب به بار آورند. بنابراین باید میزان رسوب گذاری در مخزن سد قبل از احداث آن و همچنین در هنگام بهره برداری با اطمینان قابل قبولی برآورد شود. از سوی دیگر تعیین مقدار دقیق فرسایش و یا رسوب گذاری در عمل بسیار مشکل بوده ولی روش های متفاوتی برای برآورد آنها پیشنهاد شده است. در این پژوهش به منظور برآورد میزان رسوب ورودی به مخازن سدهای دز و کرج و همچنین میزان رسوب خروجی از این سدها، بر اساس آمار دبی و غلظت رسوب متناظر آنها در ایستگاه های هیدرومتری ورودی و خروجی این سدها، معادلات منحنی های سنج رسوب ماهانه در این ایستگاه ها تعیین گردید. سپس با استفاده از معادلات به دست آمده و بر اساس مقادیر دبی روزانه، دبی رسوب ورودی به هر سد و خروجی از آن در طول دوره ای که عملیات هیدروگرافی در سدها انجام شده است، برآورد شد. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نیز، پس از تعیین مناسب ترین آرایش شبکه و مدل، دبی رسوب ورودی و خروجی هر سد برآورد گردید. سپس مقادیر دبی رسوب با توجه به وزن مخصوص رسوبات به حجم رسوب ورودی و یا خروجی تبدیل شدند. با استفاده از نتایج هیدروگرافی های انجام شده، مقادیر حجم رسوب گذاری در مخزن هر یک از سدها در طول دوره هیدروگرافی تعیین شد. آن گاه مقادیر حجم رسوب برآوردی در هر سد با مقدار واقعی رسوب گذاری مقایسه گردید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که معادلات سنج رسوب، مقدار رسوب گذاری را برای سد دز حدود ۷۰ درصد میزان حجم واقعی و برای سد کرج حدود ۹۷ درصد مقدار واقعی برآورد نموده اند، حال آن که شبکه عصبی مصنوعی برای سد دز ۱۱۵ درصد حجم واقعی و برای سد کرج ۹۴ درصد حجم واقعی برآورد داشته است. در پایان پیشنهاد داده اند که مشابه این پژوهش در مورد تعدادی

^۱ Mosaedi

بیش تر از رودخانه ها و مخازن سدها از مناطق مختلف جهان با شرایط متفاوت اقلیمی و هیدرولوژیکی انجام شوند تا کارآیی روش ذکر شده مورد بررسی بیش تری قرار گرفته و بتوان به توسعه این روش کمک نمود.

امامقلی زاده^۱ و همکاران (۱۳۸۹) بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS را انجام داده اند. رودخانه شیرین دره واقع در استان خراسان شمالی، نقش مهمی در تامین آب منطقه دارد. با توجه به اهمیت رودخانه مذکور، در تحقیق حاضر سعی شد با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه شیرین دره پرداخته شود. بدین منظور برای شبیه سازی هیدرولیک جریان رودخانه از آمار سیلاب ۳۸ ساله اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری قتلش واقع بر روی رودخانه شیرین دره استفاده گردید. سپس مدل HEC-RAS برای دبی ۲۵ ساله ۲۸۴.۸ (مترمکعب در ثانیه) اجرا گردید. بعد از کالیبره کردن مدل، نتایج حاصل از آن برای اجرای هیدرولیک رسوب رودخانه مورد استفاده قرار گرفت. برای مدلسازی رسوب رودخانه ۱۹ نمونه رسوب در طول رودخانه (به طول ۳۹ کیلومتر) جمع آوری گردید. با شبیه سازی هیدرولیک جریان و رسوب، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه در مقاطع مختلف رودخانه محاسبه گردید. مقایسه بین نتایج بدست آمده و داده های اندازه گیری شده نشان می دهد، معادله لارسن با داشتن خطای کمتری برآورد قابل قبول تری نسبت به سایر معادله ها داشته است. بر این اساس این عزیزان پیشنهاد داده اند جهت شناخت پتانسیل میزان انتقال رسوب از این مدل در مناطق مختلف رودخانه استفاده شود. همچنین برای بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه از معیار شیلدز و هالستروم استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می دهد، وضعیت هیدرولیکی جریان در طول رودخانه به گونه ای است که تمامی مقاطع رودخانه در وضعیت فرسایش می باشد.

^۱ Emamgholi zade

جلیلی^۱ و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر شکل دهانه آبگیر بر الگوی جریان و مقدار رسوب گذاری در آبگیر جانبی قائم را بررسی نموده اند. آب جاری رودخانه ها یکی از منابع اصلی تامین، آب مورد نیاز کشاورزی و شرب می باشد. یکی از قدیمی ترین روش های برداشت آب از رودخانه ها که هنوز هم بیشترین کاربرد را دارد، استفاده از آبگیرهای جانبی قائم می باشد. در این نوع از آبگیرها، به علت عدم تناسب سرعت جریان در دهانه بالادست و پایین دست آبگیر، شاهد جداشدگی جریان و در پی آن رسوب گذاری در دهانه بالادست خواهیم بود. در این تحقیق، با استفاده از مدل عددی SSIIM ۲.۰ حالت هیدرولیکی بهینه آبگیر، به طوری که کمترین جداشدگی جریان در دهانه بالادست رخ دهد، تعیین و سپس مشابه همین مدل در مدل فیزیکی به اجرا درآمد. نتایج حاکی از آن بود که مدل هیدرولیکی بهینه در مدل عددی و مدل فیزیکی که بر اساس داده های رسوبی به دست آمده است، یکسان می باشند. این مدل بهینه، قوس ترکیبی ۷ در ۶۳ سانتی متری در دهانه بالادست آبگیر می باشد.

رمضانی^۲ و قمشی^۳ (۱۳۹۰) بررسی میزان تاثیر جریان های غلیظ بر روند رسوب گذاری مخزن سد سفیدرود را انجام داده اند. جریان غلیظ از عوامل بسیار مهم بر نحوه توزیع رسوبات و همچنین انتقال و خروج آن ها از مخزن سد می باشد. در تحقیق ایشان، میزان تاثیر این جریان ها با استفاده از مدل TCM و در یک دوره ۳۰ ساله در سد سفیدرود مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه بین حالتی که جریان های غلیظ، خود را به بدنه سد رسانده و از سد خارج شوند و حالتی که تاثیر این جریان ها نادیده گرفته شود و تقریباً کلیه رسوبات ورودی به مخزن درون آن ته نشین شوند، انجام شده است. نتایج نشان می دهد در صورت خروج جریان های غلیظ از سد، بازده تله اندازی شاخه قزل اوزن حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت دیگر کاهش می یابد. همچنین، برای شاخه شاهرود این کاهش حدود ۲۰ درصد می باشد. مقایسه بین این دو حالت نشان می دهد در صورت خروج جریان های غلیظ

^۱ Jalili

^۲ Ramezani

^۳ Ghomshi

از سد، متوسط کاهش حجم سالیانه مخزن در شاخه قزل اوزن از ۱۰۰۷ به ۰۷۳ درصد و در شاخه شاهرود از ۰۵۵ به ۰۴۳ درصد کاهش می‌یابد.

عزیزی^۱ و همکاران (۱۳۹۱) تاثیر شکل صفحه مستغرق بر آب‌شستگی موضعی و الگوی رسوب‌گذاری در کانال‌های آبرفتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. صفحات مستغرق (صفحات آیوا) روشی نو و کارآمد جهت مدیریت رسوبات رودخانه‌ای می‌باشد. یکی از عوامل موثر بر کارایی و عملکرد صفحات مستغرق، شکل صفحات می‌باشد. تاکنون عمدتاً استفاده از صفحات مستطیلی مرسوم بوده است، ولی به منظور کاهش ابعاد و بهینه‌سازی شکل صفحات، جهت کاهش هزینه‌ها و نیز کاهش آب‌شستگی، مطالعاتی در حال انجام است که تحقیق ایشان نیز در این راستا انجام شده است. در این تحقیق، با استفاده از مدل فیزیکی، چهار شکل صفحات، شامل: صفحه مستطیلی تخت و سه صفحه مستطیلی با بریدگی‌های ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، و ۶۰ درجه در لبه ابتدایی صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در اعداد فرود ۰۱۴، ۰۱۶، ۰۱۸، و ۰۲۰ انجام شده است. در اعداد فرود ۰۱۴ و ۰۱۶، شرایط آب‌زلال و در اعداد فرود ۰۱۸ و ۰۲۰، شرایط بستر متحرک برقرار می‌باشد. نتایج تحقیق، عملکرد صفحات را بر اساس تاثیر شکل صفحات بر آب‌شستگی موضعی پیرامون صفحات، و نحوه توزیع رسوبات در پایین دست صفحات مشخص می‌سازد. حداکثر کاهش عمق چاله فرسایشی، به ازای بریدگی ۶۰ درجه در لبه ابتدایی صفحات و نسبت به صفحه مستطیلی ساده، در اعداد فرود ۰۱۴ و ۰۱۶ به ترتیب ۳۳ و ۴۹ درصد و در اعداد فرود ۰۱۸ و ۰۲۰ به ترتیب ۴۳ درصد و ۲۸ درصد تعیین شد. همچنین، بیش‌ترین کاهش عمق آب‌شستگی در لبه ابتدایی صفحات، در بریدگی ۶۰ درجه صفحات مشاهده شد. مقدار کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به صفحه مستطیلی اولیه، به ترتیب ۴۱٪، ۴۸٪، و ۶۱٪ برای اعداد فرود ۰۱۴، ۰۱۶، و ۰۱۸ حاصل شد. در عدد فرود ۰۲۰، عمق آب‌شستگی در لبه ابتدایی صفحه بسیار ناچیز و در حدود صفر می‌باشد.

^۱ Azizi

نوذری^۱ (۱۳۹۱) بررسی اثر غلظت و دانه‌بندی بار رسوبی بر پارامترهای پرش هیدرولیکی و الگوی رسوب‌گذاری در پایین دست آن را انجام داده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر غلظت و دانه‌بندی بار رسوبی بر پرش هیدرولیکی و نحوه تشکیل و گسترش امواج ماسه ای در پایین دست پرش هیدرولیکی که غالباً در حوضچه‌های آرامش دریچه‌های تخلیه رسوب در تاسیسات انحراف آب از رودخانه‌ها پدید می‌آید، بررسی شده است. آزمایش‌ها در یک حوضچه آرامش مستطیلی با بستر صاف به طول ۳ متر، عرض ۰.۵ متر و ارتفاع ۰.۶ متر اجرا شد. در این آزمایش‌ها از ماسه‌های یکنواخت به قطرهای ۰.۶، ۱.۴، ۴.۱ و ۵.۶ میلیمتر با غلظت‌های اختلاطی مختلف بین ۰.۲ الی ۰.۶ و برای اعداد فرود بین ۳ تا ۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود بار رسوبی با دانه بندی‌های مختلف تغییر زیادی در مشخصات جهش هیدرولیکی ایجاد نمی‌کند و افزایش غلظت رسوبات نیز تاثیر چندانی بر روی این پارامترها ندارد. لیکن رسوبات ورودی به جریان، پس از عبور از ناحیه فوق بحرانی، در ناحیه زیر بحرانی ته نشین می‌شود و با تشکیل یک موج ماسه‌ای، همانند یک آبپایه انتهایی عمل می‌کند. این موج ماسه ای در کنترل موقعیت جهش موثر است و جهش را در محدوده حوضچه تثبیت می‌کند. موقعیت تشکیل این موج ماسه ای و زمان توسعه آن، تابعی از شرایط جریان و خصوصیات رسوب است. ارتفاع این موج ماسه‌ای بسیار نزدیک به ارتفاع آب پایه انتهایی است و مقدار آن را می‌توان به کمک انرژی مخصوص جریان ورودی پیش بینی کرد.

^۱ Nozari

فصل سوم :

مبانی نظری تحقیق

۳-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی تفصیلی در مورد دینامیک سیالات محاسباتی، انواع روش‌های عددی و معرفی نرم افزارهای محاسبات عددی پرداخته شده و در انتها با معرفی نرم افزار Flow-۳D به تشریح معادلات کلی حاکم بر جریان سیال، معادلات حاکم بر جریان آشفته، روش حجم سیال، روش کسر مساحت و حجم مانع به کار رفته در نرم افزار پرداخته خواهد شد.

۳-۲ دینامیک سیالات محاسباتی^۱

دینامیک سیالات محاسباتی علم پیش‌بینی جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش‌های شیمیایی، و پدیده‌های وابسته به آن بوسیله حل معادلات ریاضی، که قوانین فیزیکی را بیان می‌کنند، با استفاده از یک فرآیند عددی است. دینامیک سیالات را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد:

- دینامیک سیالات تجربی
- دینامیک سیالات تئوری
- دینامیک سیالات محاسباتی

مهندسی مدرن امروزی در بخش سوم (دینامیک سیالات محاسباتی) عمل می‌کند که به سرعت، دیگر ابعاد تجربی و تئوری خالص را تکمیل می‌کند. در اصل دینامیک سیالات محاسباتی حل عملی معادلات دقیق حاکم را برای داده‌های مسئله کاربردی مهندسی تکمیل می‌کند.

دینامیک سیالات محاسباتی عبارت از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی براساس شبیه‌سازی کامپیوتری است. در حقیقت دینامیک سیالات محاسباتی علم جایگزینی معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی حاکم با اعداد و پیشروی این

^۱ Computational Fluid Dynamics

اعداد در مکان و یا زمان برای به دست آوردن یک توصیف عددی نهایی از میدان جریان کامل دلخواه، در مقابل حل تحلیلی در شکل بسته است.

در سال های اخیر علم دینامیک سیالات محاسباتی راه خود را در مهندسی هیدرولیک پیدا کرده و شمار زیادی از مشکلات هیدرولیکی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) حل شده است. مدل های (CFD) با هدف بسیار عمومی برای استفاده در مهندسی مکانیک ساخته شده اند. امروزه علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم های با هندسه ناموزون و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان درآمده و در دهه ی گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسئله، تاثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه های اندازه گیری در بسیاری از کاربردهای علمی، ازجمله دلایلی هستند که استفاده از روش های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش های عددی محدود می کند. زمان اولین مدل مدرن ساخته شده در دینامیک سیالات محاسباتی به آغاز قرن بیستم، با کار لودویگ پراندتل باز می گردد. وی راهی برای برقراری ارتباط بین روش های کاملاً تجربی مهندسی هیدرولیک و روش های کاملاً تئوری و ریاضیاتی مکانیک منطقی ایجاد نمود.

دومین تولید تحلیل های دینامیک سیالات محاسباتی، که امروزه به طور کلی توصیفی از نظم و ترتیب هستند، شامل اعمال معادلات بقا برای مسائل دینامیک سیالات محاسباتی کاربردی هستند که در نوع خود بسیار پیچیده بوده و باید با بیش از یک کامپیوتر مورد استفاده قرار گیرد. دلایل دیگر رشد استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی را می توان در ارائه ی حل تقریبی برای معادلات ناویر-استوکس، کاهش بازه ی زمانی برای تغییر پارامترها، طراحی و توسعه ی ابزارها، ارزانتر بودن نسبت به مدل سازی آزمایشگاهی و نیز قابلیت بالای آن برای شبیه سازی شرایط جریانی که انجام آن در آزمایشگاه امکان پذیر نیست، دانست. حل مسائل سیال در دینامیک سیالات محاسباتی به کمک روش

های عددی در قالب الگوریتم هایی صورت می پذیرد و برنامه ی (CFD) خوب، شامل تعادل بین حل دقیق و پایداری جواب است. بررسی اعتبار (CFD) نیازمند اطلاعات بالا در جزئیات مربوط به شرایط مرزی مسئله و حجم بالایی از نتایج است. برای بررسی اعتبار یک تحلیل CFD، لازم است از مشابه آزمایشگاهی آن کمک گرفته شود.

۳-۳ معرفی نرم افزارهای محاسبات عددی

در راستای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، چندین نرم افزار توسط شرکت های نرم افزاری با قابلیت حل معادلات مربوط به دینامیک سیالات تولید شده که هر یک مزایا و معایب مربوط به خود را دارا هستند. در ادامه به برخی از این نرم افزارها اشاره شده و توضیحاتی در مورد آنها ارائه می شود.

با پیشرفت روز افزون مسائل مهندسی، پیچیده تر شدن مسائل و افزایش هزینه ها در بهره گیری از نتایج آزمایشگاهی و نیز نیاز به کسب نتایج بهتر، دقیق تر و با جزئیات بیشتر از مسائل مورد آزمایش، استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی رو به افزایش نموده است. از طرفی با توجه به این نکته که دسترسی به جواب های دقیق به دلیل پیچیده بودن محاسبات از طریق روش های تحلیلی امکان پذیر نیست و یا اینکه استفاده از این روش ها مستلزم ساده سازی بیش از حد مسائل است، روش های عددی جواب های بهتری در اختیار قرار می دهد. برای بهره گیری از روش های عددی، به دلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم افزارهای محاسباتی هستیم. این نرم افزارهای محاسباتی، امکان به دست آوردن اطلاعات کامل با جزئیات دقیق تر و بیشتری را فراهم می کنند. به طور مثال به کمک آنها حتی می توان مواردی از قبیل تغییرات سرعت، فشار و درجه حرارت را در کل حوزه ی مورد مطالعه به دست آورد. درحالیکه کسب این نتایج در شرایط آزمایشگاهی امکان پذیر نیست.

۳-۳-۱ نرم افزار Fluent

نرم افزار Fluent یکی از مشهورترین نرم افزارهای صنعتی برای مدل سازی دو و سه بعدی مسائل است. این نرم افزار بر پایه‌ی روش حجم محدود عمل نموده و قابلیت های فراوانی از جمله مدل سازی جریان های دائم و غیر دائم، جریان لزج و غیر لزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته را دارا است. این نرم افزار از مدل های $k-\epsilon$ و LES در مدل سازی جریان آشفته استفاده می کند. این نرم افزار امکان استفاده از دو نوع محاسبه گر یک دقته (One Precision) و دو دقته (Double Precision) را برای کاربران فراهم می کند. در اغلب موارد، محاسبه گر یک دقته در حل مسائل از دقت خوبی برخوردار است، اما در برخی از مسائل خاص استفاده از محاسبه گر دو دقته مفیدتر خواهد بود. این نرم افزار تحلیل جریان با شبکه های غیر ساختار یافته برای هندسه های پیچیده را فراهم می سازد. همچنین Fluent به کاربر اجازه ی بهبود شبکه (مثلا ریزتر کردن و درشت تر کردن شبکه در مرزها و مکان های لازم در هندسه) را می دهد. این نرم افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه ای قرار می دهد که بتوانند صفحات کاربری را با تعریف توابع و ماکروهای جدید به دلخواه تنظیم نمایند. نرم افزار Fluent از مش های بی سازمان برای کاهش زمانی که برای حل شبکه مصرف می شود، بهره می برد و نیز مدل سازی هندسی و پروسه ی تولید مش را ساده می کند و می توان مدل های پیچیده تر را نیز در آن پیاده کرد. محیط گرافیکی این نرم افزار در نسخه های مختلف آن متفاوت بوده، به گونه ای که در نسخه های اولیه ی این نرم افزار تا حدودی کار در محیط آن مشکل است اما با بهبود محیط گرافیکی آن در نسخه های اخیر، کار با این نرم افزار و برقراری ارتباط بین استفاده کننده و محیط نرم افزار آسان تر شده است. در حال حاضر این نرم افزار توسط شرکت Ansys خریداری شده است و به اسم Ansys Fluent عرضه می گردد.

۳-۳-۲ نرم افزار Ansys

این نرم افزار در سال ۱۹۷۱ توسط شرکت آمریکایی Swanson به عنوان یکی از پیشگامان نرم افزارهای اجزا محدود ساخته شد و مورد استفاده ی محققان قرار گرفت و جزء اولین نرم افزارهایی است که آنالیزهای غیر خطی، مکانیک شکست، مخازن و سایر آنالیزها را در بسته ی نرم افزاری خود قرار داد. نرم افزار Ansys یکی از نرم افزارهای کاربردی اجزا محدود جهت تحلیل مسائل است. این نرم افزار نخست برای تحلیل مسائل سازه ای طراحی گردید و سپس برای استفاده در تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی نیز توسعه داده شد. نخستین بسته ی نرم افزار Ansys برای تحلیل مسائل مربوط به سیالات با نام تجاری FLOTRAN (Transport Flow) عرضه گردید. این نرم افزار قابلیت مدل نمودن مسائل استاتیک و دینامیک سازه ای، انتقال حرارت و مسائل مربوط به سیالات را دارد. به علاوه Ansys می تواند مسائل مربوط به آکوستیک و الکترومغناطیس را نیز در نظر بگیرد.

۳-۳-۳ ANSYS-CFX نرم افزار

نرم افزار ANSYS-CFX شکل توسعه یافته و پیشرفته ی بسته ی نرم افزاری Ansys بوده که توانایی تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی در آن وارد شده است. این نرم افزار ابتدا با نام CFD-FLUENT توسط شرکت UKAEA عرضه شد، سپس تغییر نام یافت و در نهایت در سال ۲۰۰۳ توسط شرکت نرم افزاری Ansys خریداری گردید. از توانایی های این نرم افزار می توان به کارایی آن روی شبکه های مرکب از المان های چهار وجهی، شش وجهی، منشوری و یا هرمی اشاره کرد. این نرم افزار قابلیت تحلیل جریان آرام و آشفته، سیالات تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی (سیالی که از یک رابطه ی خطی بین تنش برشی و کرنش برشی پیروی نمی کند) و جریان با سطح آزاد را دارد و در زمینه های گوناگون نظیر هوا-فضا، مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، مسائل دریایی نیز کاربرد دارد. نرم افزار ANSYS-CFX یک نرم افزار با هدف عمومی دینامیک

سیالات محاسباتی است که یک حل گر پیشرفته را با قابلیت های پیش و پس پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده و توانایی مدل کردن مواردی از قبیل جریان های پایدار و ناپایدار، جریان های آرام و آشفته، جریان های مادون صوت، در حد صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان های غیر نیوتنی، انتقال مولفه های اسکالر فاقد عکس العمل، جریان های چند فازی، مسائل احتراق را دارا است. ANSYS-CFX شامل چهار مدل نرم افزاری است که یک هندسه و یک شبکه بندی را دریافت نموده و اطلاعات مورد نیاز را برای انجام یک تحلیل CFD انتقالی می دهد.

۳-۳-۴ نرم افزار FLOW-۳D

این نرم افزار همانطور که از نام تجاری آن پیداست، مختص جریان های سه بعدی بوده و در تحلیل مسائل جریان های با سطح آزاد قابلیت ویژه ای دارد. نرم افزار FLOW-۳D نیز همانند نرم افزار Fluent از روش حجم محدود در محاسبات خود در شبکه بندی منظم مستطیلی بهره می گیرد. این نرم افزار از سه مدل آشفتگی چون مدل پرانتل، مدل یک معادله ای مانند k و مدل چند معادله ای مانند $k-\epsilon$ استفاده می کند. این نرم افزار ابزار مدل سازی توانمندی است که دید مهندسی با ارزشی را درباره ی بسیاری از فرآیندهای فیزیکی جریان در اختیار ما قرار می دهد. علاوه بر قابلیت های ویژه برای پیشگویی دقیق جریان های با سطح آزاد، FLOW-۳D نرم افزاری ایده آل برای استفاده در طراحی و در فرآیندهای بهینه سازی تولید است.

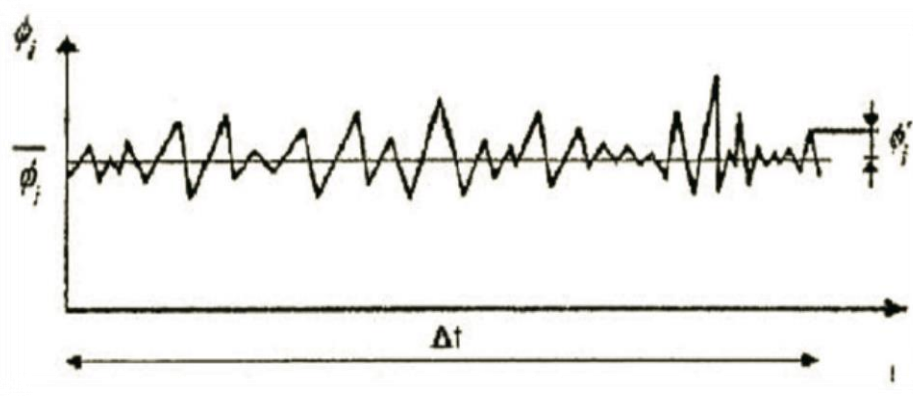
۳-۴ معادلات جریان

به منظور آشنایی با اساس کار نرم افزار به بیان معادلات حاکم بر جریان های آشفته خواهیم پرداخت. در جریان های تراکم ناپذیر، روابط (۱-۳) و (۲-۳) به ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت در جهت اختیاری i هستند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱-۳)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (۲-۳)$$

در روابط فوق u سرعت لحظه ای در جهت i ، ν لزجت سینماتیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g_i مولفه شتاب ثقل در جهت i و p فشار در هر نقطه از سیال است. در تحلیل عددی جریان آشفته می-توان از روابط فوق استفاده کرد اما باید بتوان نوسانات نامنظم و لحظه‌ای کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و هر نقطه مدل نمود. اما چنانچه مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند Φ را به مقدار متوسط و زمانی مطابق شکل (۱-۳) تفکیک کنیم،



شکل (۱-۳): تغییرات کمیت Φ بر حسب t

در این صورت روابط زیر را خواهیم داشت:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (۳-۳)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (۴-۳)$$

$$\phi_i = \bar{\phi} + \phi_i' \quad (۵-۳)$$

مقدار متوسط کمیت های ذکر شده در روابط بالا، در رابطه (۶-۳) بیان شده است.

$$\phi_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} \phi_i dt \quad (6-3)$$

Δt در روابط فوق، دوره تناوبی است که نوسانات آشفتگی را بیان می کند و به اندازه کافی بزرگ است ولی در مقایسه با زمان لازم برای جریان غیر دائمی کوچک است. با جایگزینی روابط فوق در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، در معادله پیوستگی سرعت ها به سرعت های متوسط تبدیل شده اند، ولی در معادله اندازه حرکت پارامتر $\overline{u'_i u'_j}$ اضافه می شود.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7-3)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (8-3)$$

عبارت $\overline{\rho u'_i u'_j}$ بیانگر تنش رینولدز است که بر سیال اعمال شده و اثر گردابه ای آشفتگی را در سیال اعمال می کند. در اثر جریان های آشفته، مقدار تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش ناشی از لزجت مولوکولی (دینامیکی) $\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ است. تعیین پارامتر تنش رینولدز مشکل است و به همین منظور مدل های آشفتگی متفاوتی برای اینکار توسعه داده شده اند.

۳-۵ مدل‌های آشفستگی

هنگامیکه یک نیروی خارجی مثل یک گرادیان فشار به سیالی که با سرعت متوسط V در حرکت است، وارد می‌شود؛ باعث افزایش سرعت و در نتیجه تغییر اندازه حرکت ذرات سیال می‌شود. در اثر این افزایش مومنتوم که توسط نیروی اینرسی خارجی ایجاد شده است، ذرات سیال که به صورت موازی در جهت جریان متوسط حرکت می‌کنند، مسیر حرکت خود را در جهت عمود بر این جهت تغییر می‌دهند و از لایه ای به لایه‌ی دیگر می‌روند. البته فاصله‌ای که این ذرات در این جهت طی می‌کنند محدود است و براساس نظریه پرانتل حداکثر آن برابر با حاصل ضرب یک ضریب به نام ثابت فون-کارمن ($K=0.414$) در عمق جریان (Y) است. این حرکت تصادفی ذرات سیال باعث تغییر شکل‌های برشی و چرخشی و تشکیل گردابه‌ها در جریان می‌شود. با افزایش عدد رینولدز جریان همزمان با افزایش سرعت‌های نوسانی ذرات سیال، اندازه‌ی این گردابه‌های جریان نیز افزایش می‌یابد. در واقع تنش‌های رینولدز تابعی از سرعت و اندازه‌ی همین گردابه‌های جریان است که باعث خارج نمودن انرژی از جریان متوسط و ورود آن در حرکات آشفستگی و سپس استهلاک آن می‌شود. این انرژی که انرژی جنبشی آشفستگی (K) نامیده می‌شود، برابر با میانگین مجذور سرعت‌های نوسانی ذرات است و با تشکیل آشفستگی‌ها از جریان متوسط خارج می‌شود و با ورود به گردابه‌ها، با نرخ استهلاک انرژی جنبشی (ε) مستهلک می‌شود و رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2} \right) \quad (9-3)$$

مجموعه معادلاتی که به منظور تعیین این کمیت‌ها در جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌های آشفستگی نامیده می‌شوند. شکل (۳-۲) یک تقسیم‌بندی کلی از مهمترین مدل‌های آشفستگی را ارائه می‌دهد. در گروه اول این تقسیم‌بندی که به مدل‌های متوسط‌گیری شده‌ی زمانی معروف هستند، اساس کار بر مبنای متوسط‌گیری معادلات ناویر-استوکس در زمان و محاسبه‌ی

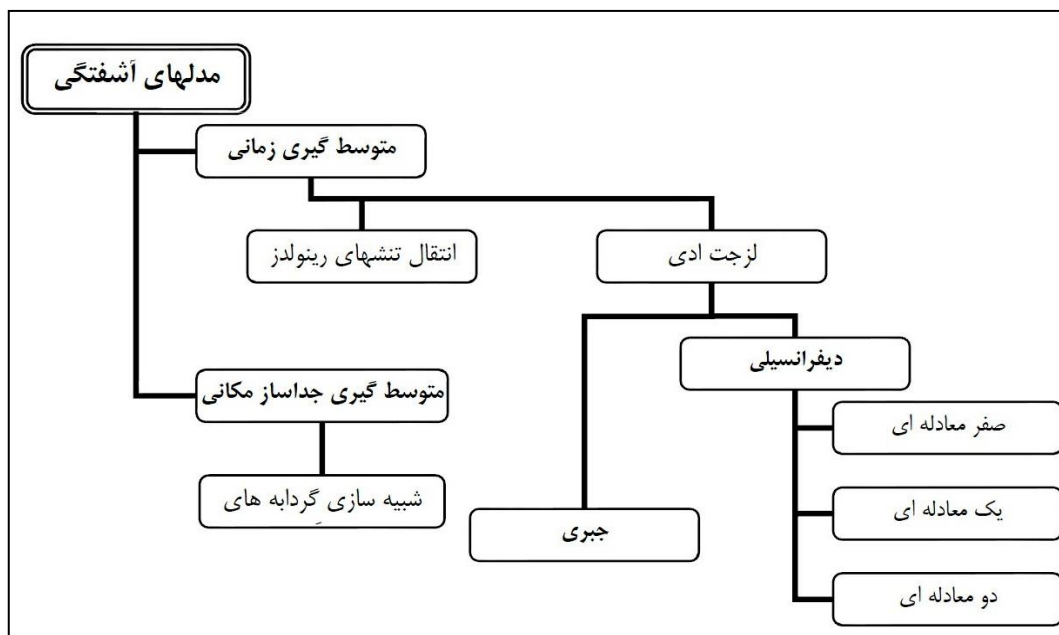
تنش‌های رینولدز است. این مدل‌ها به دو دسته مدل‌های لزجت گردابه‌ای و مدل‌های انتقال تنش رینولدز تقسیم بندی می‌شوند. در دسته‌ی اول تانسور تنش رینولدز براساس گرادیان سرعت متوسط بیان می‌شود. فرض اساس در این مدل‌ها، تئوری لزجت ادی بوزینسک (۱۸۷۷) است که براساس آن تنش‌های رینولدز متناسب با نرخ تغییر شکل متوسط جریان در نظر گرفته می‌شود و کمیت لزجت ادی نیز ضریب این تناسب است و براساس روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (۱۰-۳)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \rightarrow i = j \\ 0 \rightarrow i \neq j \end{cases} \quad (۱۱-۳)$$

$$\nu_t = ul \quad (۱۲-۳)$$

پارامتر δ_{ij} ، Kronecker delta نامیده می‌شود. لزجت گردابه‌ای ν_t از خصوصیات سیال نیست، بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متفاوت است. در رابطه‌ی (۱۲-۳) ، u مقیاسی از سرعت و l مقیاسی از طول آشفتگی است. براساس نوع و تعداد معادلاتی که برای تعیین این دو مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌های آشفتگی زیر مجموعه این دسته مطابق با شکل (۲-۳) تقسیم بندی می‌شوند. اما در مدل‌های انتقال تنش‌های رینولدز به جای استفاده از مفهوم لزجت گردابه‌ای، معادلات کامل انتقال تنش‌های رینولدز بسط داده و تحلیل می‌گردند.



شکل (۳-۲): تقسیم بندی کلی مدل های آشفتگی

یک روش کلی دیگر در مدل کردن آشفتگی، استفاده از یک جدا ساز مکانی و جدا کردن نوسانات آشفتگی بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس از یکدیگر است. این روش تحت عنوان شبیه سازی گردابه-های بزرگ^۱ (LES) معروف است. در این روش نوسانات آشفتگی در دو بخش نوسانات بزرگ مقیاس و نوسانات کوچک مقیاس تقسیم بندی می شوند که بخش بزرگ مقیاس به طور مستقیم شبیه سازی می شود و در مورد بخش کوچک مقیاس اثرات آن در نظر گرفته می شود. از نظر زمان محاسباتی روش (LES) بین مدل های (RANS) و مدل های (DNS) قرار می گیرند. مدل های آشفتگی صفر معادله ای و یک معادله ای به علت استفاده از داده های تجربی و ضعف هایی که در استفاده از آنها در مراحل مختلف حل به چشم می خورد، از لحاظ کار عددی کاربرد چندانی ندارند. از کاربردی ترین مدل های دو معادله ای، مدل $k-\epsilon$ می باشد.

^۱ Large eddy simulation model

۳-۵-۱ مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد

در مدل $k-\varepsilon$ که کاراترین و پرکاربردترین مدل در تحلیل جریان‌های آشفته است، ثابت‌های معادلات و نیز استخراج خود معادلات توسط جونز و لاندِر (Jones & Launder) صورت گرفته است. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک روش نیمه تجربی است که معادله ی k آن دقیقاً از ترکیب k و ε است؛ چنین فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز است. معادلات حاکم بر این مدل توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon \quad (۱۳-۳)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۴-۳)$$

لزجت گردابه‌ای در معادلات فوق توسط رابطه‌ی (۱۴-۳) به دست می‌آید:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۵-۳)$$

در معادلات بیان شده‌ی بالا، G_b عبارت چشمه‌ی معادل ε است که اثر شناوری را در معادله اعمال می‌کند و G_k عبارت چشمه ی معادل k است که اثر گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌-

^۱ Two equation (k- ε) model

کند. ثابت $C_{3\varepsilon}$ در معادله ی ε اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می کند که در رابطه ی زیر آمده است:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{V}{u}\right| \quad (۱۶-۳)$$

با توجه به این رابطه، چنانچه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد، در این صورت در لایه ی برشی این ثابت برابر یک خواهد شد و اگر جهت جریان عمود بر جهت ثقل باشد این مقدار برابر صفر خواهد بود. ثابت های معادلات بیان شده در این قسمت در جدول (۱-۳) قابل مشاهده است.

جدول (۱-۳) ضرایب ثابت $k-\varepsilon$ رابطه ی (۱۳-۳)

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δ_k	δ_ε
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

۳-۵-۲ مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ حالت RNG

یکی از شکل های روش $k-\varepsilon$ معروف به RNG^1 است. در این مدل، یک ترم اضافی در معادله ی ε وارد می شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می گردد. این مدل نسبت به مدل استاندارد، در جریان چرخشی کارایی بیشتری دارد و بر خلاف مدل استاندارد جهت تعیین اعداد آشفتگی پранتل، از رابطه ی تحلیلی استفاده می کند. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین، دقت مناسبی دارد. بنابراین، مدل فوق در تعیین مقادیر آشفتگی جریان در میدان های دارای انحناء یا پیچیدگی هندسی مورد توجه بیشتر است. معادلات حاکم در این مدل به صورت روابط زیر هستند:

^۱ Renormalized group (RNG) model

$$p \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (۱۷-۳)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (۱۸-۳)$$

در روابط بالا، μ_{eff} لزجت گردابه ای موثر است. α_k و α_ε مقادیر معکوس عدد پرانتل آشفستگی هستند که در جریان‌های با عدد رینولدز بالا تقریباً برابر $۱/۳۶۳$ است. عبارت R اضافه شده به معادله ی ε در مدل RNG نسبت به مدل حالت استاندارد باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد است، شده است. مقادیر ثابت‌های مورد استفاده در روابط فوق در جدول (۲-۳) ذکر شده اند.

جدول (۲-۳) ضرایب ثابت برای مدل k- ε حالت RNG

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	β	η_0
۰/۰۸۴۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۰/۰۱۲	۴/۳۸

در معادله ی (۱۹-۳) مقدار η برابر است با $\frac{Sk}{\varepsilon}$ و S بیانگر نرخ کرنش متوسط است که در روابط (۳-۳) و (۲۰) و (۲۱-۳) بیان شده است:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۹-۳)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (۲۰-۳)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (۲۱-۳)$$

به طور کلی در جریان سه بعدی، شش مولفه‌ی تنش رینولدز وجود دارد و مدل آشفتگی کامل، مدلی است که هر کدام از تنش‌های معادله‌ی انتقال آن را معرفی می نماید. حل این معادلات با پیشرفته ترین روش‌های عددی و کامپیوترهای مدرن امروزی هنوز مقرون به صرفه نیست. بدین منظور برای ساده سازی معادلات، از جایگزینی عبارات جبری به جای ترم دیفرانسیل جزئی بهره گرفته می شود که حل آنها به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد.

۳-۵-۳ مدل آشفتگی LES

ایده اساسی این مدل این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، بطور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند.

زمانی که از مدل LES استفاده می شود باید دقت کرد که این مدل سه بعدی و وابسته به زمان است. علاوه بر این، نوسانات باید مقداردهی اولیه شوند و یا در مرزهای ورودی تعریف شوند. اگر چه این عمل نیازمند تلاش بسیار بوده و نیازمند هزینه محاسباتی بالا است ولی نتایجی که تولید می شود دارای جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های برپایه متوسط گیری رینولدز است. در مدل LES، اثرات آشفتگی که خیلی کوچکند و قابل محاسبه نیستند باید با یک لزجت آشفتگی، که متناسب است با یک مقیاس طول ضربدر معیاری از نوسانات سرعت در آن مقیاس، نمایش داده می شود. Smagorinsky از یک میانگین هندسی ابعاد سلول شبکه برای مقیاس طول استفاده می کند:

$$L = (\partial x \partial y \partial z)^{1/3} \quad (۲۲-۳)$$

و نوسانات سرعت را با حاصلضرب بزرگی L و تنش برشی متوسط مقیاس می‌کند. این کمیت ها برای ارائه لزجت گردابی سینماتیکی مدل LES با هم ترکیب می‌شوند:

$$V_T = (CL)^2 \cdot \sqrt{e_{ij}e_{ij}} \quad (23-3)$$

بطوریکه C ضریب ثابتی در دامنه 0.1 تا 0.2 است و e_{ij} اشاره به مولفه‌های تانسور نرخ کرنش دارد.

۳-۶ تعیین موقعیت سطح آزاد

در تحلیل جریان های دارای سطح آزاد، علاوه بر میدان های سرعت، فشار و آشفتگی، موقعیت مکانی و زمانی سطح آزاد نیز یکی از مجهول های مورد بررسی است و تعیین آن در زمان های مختلف از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا در این شبیه سازی ها، موقعیت و در نتیجه مرزهای سطح آزاد در زمان های مختلف تغییر می کنند؛ بنابراین برای آنکه بتوان شرایط مرزی مناسب مربوط به سطح آزاد را اعمال نمود، موقعیت مکانی و زمانی سطح آزاد باید به طور کامل و دقیق مشخص گردد. موضوع مهم در رابطه با روش های تقریب سطح آزاد این است که روش های تقریب سطح آزاد باید قادر به پیش بینی هرگونه شکلی اعم از افقی، عمودی، چرخشی و ریزشی در سطح آزاد به صورت بهینه و مستقل از متغیرهای شرطی باشند.

تاکنون روش های زیادی برای تعیین موقعیت سطح آزاد در شبیه سازی های عددی جریان های روباز صورت گرفته است. محققین براساس دیدگاه های مختلف اویلری و لاگرانژی، الگوریتم های عددی متفاوتی را ارائه کرده اند. این روش ها به دو دسته ی کلی تقسیم بندی می شوند. دسته ی اول به روش های فصل مشترک خطی معروف هستند. در این روش ها، سطح آزاد به صورت خط یا نشانگرهایی بیان می شود که مشخصات این نشانگرها در مدت محاسبه در حافظه ذخیره می شود. از

این نوع روش‌ها می‌توان به روش تابع ارتفاع که توسط Hirt (۱۹۷۵) ارائه شد و یا روش خطوط نشانه اشاره نمود. ضعف این روش‌ها در توصیف سطوحی است که دارای اشکال پیچیده مثل چرخش و یا ریزش بر روی خود هستند، بنابر این مثلاً شکل شکست موج را نمی‌توانند شبیه سازی کنند. روش‌های دیگر به نام روش‌های ناحیه ای و یا حجمی معروف هستند. این روش‌ها در تعریف سطوحی که یک مرز آزاد دارند خیلی مناسب هستند. اولین روش از این نوع، روش MAC است که توسط Welch (۱۹۶۶) ارائه شد. در این روش از ذرات نشانه گذار بدون جرم برای تعیین موقعیت سطح آزاد استفاده می‌شود. این ذرات نشانه‌گذار همراه با سطح آزاد حرکت می‌کنند و مشخص می‌نمایند که در هر زمان کدامیک از سلول‌های محاسباتی پر، خالی و یا در بر گیرنده‌ی سطح آزاد هستند. مشکلی که در این روش وجود دارد این است که برای تعیین دقیق موقعیت سطح آزاد (به خصوص در مورد جریان‌هایی که در آن‌ها سطح آزاد تغییر شکل‌های پیچیده‌ای را تجربه می‌کند)، نیاز به تعداد بسیار زیادی از این ذرات نشانه‌گذار است. این امر حافظه‌ی لازم برای ذخیره سازی اطلاعات و نیز زمان محاسبات را بسیار افزایش می‌دهد.

از همین نوع، روش دیگری به نام روش حجم سیال^۱ (VOF) توسط Nichols و Hirts ارائه گردید که از همان ایده‌ی روش قبل پیروی می‌کرد با این تفاوت که در این روش از کسر اشغال شده‌ی سلول محاسباتی توسط سیال به عنوان عامل مشخص کننده‌ی سطح آزاد استفاده می‌شود. این روش امروزه به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های تحلیل جریان‌های دارای سطح آزاد، نه تنها در مباحث هیدرولیکی بلکه در مباحث دیگری همچون حرکت مذاب در مهندسی ریخته‌گری در شبیه سازی‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته در سال‌های اخیر روش‌های جدیدتری از نوع روش‌های بدون شبکه ارائه شده‌اند که در حال مطالعه و بررسی بیشتر هستند.

^۱Volume of Fluid

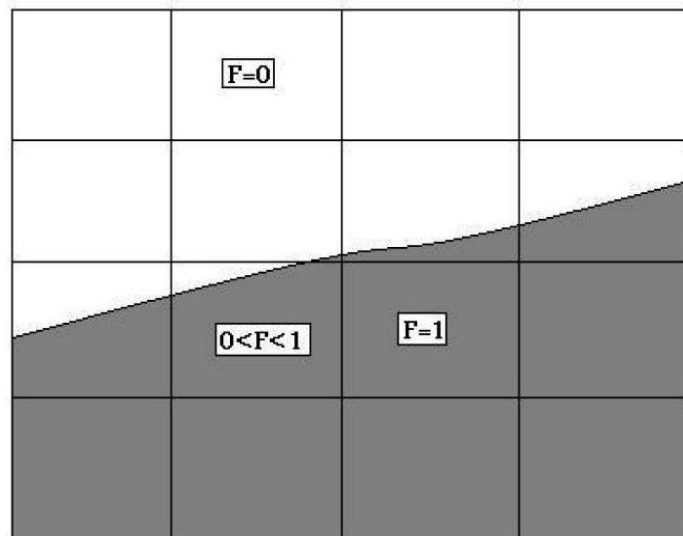
۷-۳ روش حجم سیال (VOF)

تعیین سطح مشترک دو فاز سیال در بسیاری از مسائل هیدرولیکی مطرح بوده است. در پدیده های هیدرولیکی نیز تعیین سطح آزاد جریان در حل میدان جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. روش های گوناگونی در تعیین سطح آزاد استفاده می شود که نسبت به دیدگاه حاکم بر حل میدان جریان متفاوت هستند. در میدان های جریان با شبکه ی ثابت، سطح آزاد براساس دیدگاه اویلری نسبت به جریان مشخص می شود. در پدیده هایی مانند شکست موج که از پیچیدگی خاص خود برخوردار است، به خصوص در حالت سه بعدی از روش MAC (Marker & Cell) استفاده می شود. در این روش تغییرات و جابجایی تعداد زیادی از ذرات سیال در محاسبات وارد می شوند بنابراین نیاز به هزینه های محاسباتی زیادی است. در روش حجم سیال (VOF) برای هر درصد حجم سلول یک معادله ی دیفرانسیلی حل می شود که در نهایت مقدار درصد حجم سیال در هر سلول معین می گردد. روش های توسعه یافته براساس روش حجم سیال با توجه به دیدگاه اویلری نسبت به میدان جریان، کارایی بیشتری دارند. در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال از یک تابع به نام درصد حجم سیال F استفاده می شود (Volume of fraction). شکل دیفرانسیلی تابع F در حالت سه بعدی در رابطه ی زیر

آمده است:

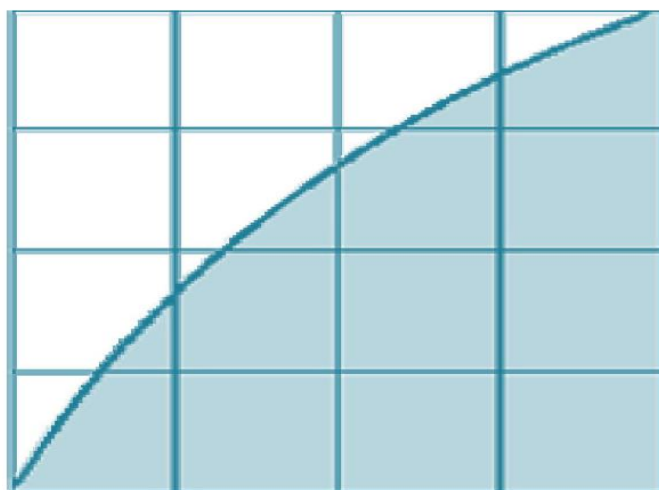
$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (۲۴-۳)$$

در این رابطه u ، v و w به ترتیب مولفه های سرعت در جهات x ، y و z هستند. در حل معادله ی فوق در سلولی که پر از سیال باشد مقدار F برابر یک است و در سلول های خالی از سیال این مقدار برابر صفر است. در سلول های نیمه پر، مقدار F عددی بین صفر و یک است. شکل (۳-۳) نمایی شماتیک را از این سلول ها نشان می دهد.



شکل (۳-۳): محاسبه تابع حجم سیال در روش VOF

عمل ردیابی سطح آزاد شامل سه بخش است. بخش اول مکان‌یابی سطح پس از انتقال سیال و بخش دوم تعیین مرز جدایی دو سیال یا فاز از یکدیگر است و سرانجام بخش سوم شامل استفاده از شرایط مرزی در سطح مشترک است. شکل (۴-۳) نمایی از سطح تماس واقعی دو سیال را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳): سطح تماس واقعی دو سیال

در ادامه به الگوهای مختلف روش حجم سیال اشاره می‌شود.

۳-۷-۱ الگوی دهنده و گیرنده

در روش دهنده و گیرنده که الگوی اصلی روش VOF است، جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می-گردد. در سلول‌های شامل سطح آزاد، سطح سیال یا به صورت افقی و یا به صورت قائم در نظر گرفته می‌شود که نحوه‌ی چرخش سطح بستگی به سلول‌های مجاور دارد. این الگو بسیار به روش ارائه شده توسط Nichols و Hirts شباهت دارد. در این روش یک سلول به عنوان دهنده‌ی حجمی معین از سیال و دیگری به عنوان گیرنده ایفای نقش می‌کند. شایان ذکر است که دو سلول دهنده و گیرنده در مجاورت هم واقع شده‌اند. چنانچه سرعت در جهت x را u بنامیم و u بزرگتر از صفر باشد، سلول سمت چپ (بالادست) به عنوان سلول دهنده مطرح است و سلول سمت راست (پایین دست) به عنوان سلول گیرنده در نظر گرفته می‌شود. چنانچه u کوچکتر از صفر باشد، موقعیت‌های سلول‌های دهنده و گیرنده جابجا خواهد شد. میزان شار (توده‌ی سیال) جابجا شده از یک سلول دهنده به یک سلول گیرنده در روابطی که در پیش رو داریم، مشخص خواهند شد. چنانچه میزان شار در سلول $|V|$ باشد و مقدار آن برابر با $u \cdot \delta t$ در نظر گرفته شود و f_A و f_D به ترتیب بیانگر درصد حجم سیال سلول گیرنده یا دهنده باشد، در این صورت مقدار شار f سلول گیرنده یا دهنده مطابق با روابط زیر به دست می‌آید:

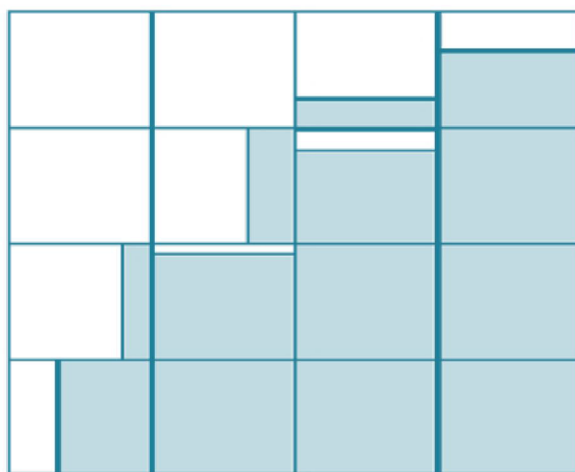
$$FL_A = f_A \times |V| \quad (۲۵-۳)$$

$$FL_D = f_D \times |V| \quad (۲۶-۳)$$

$$\delta f = \text{Min} \left\{ f_{\frac{A}{D}} |V| + CF f_D \delta x_D \right\} \quad (۲۷-۳)$$

$$CF = \text{Max} \left\{ \left(1 - f_{\frac{A}{D}} \right) |V| - (1 - f_D) \delta_{x_D}, 0 \right\} \quad (28-3)$$

منظور از Min استفاده شده در رابطه ی (۲۷-۳) این است که شار f بیشتری از شار f وجه های سلول دهنده خارج نشود، همچنین منظور از Max استفاده شده در رابطه ی (۲۷-۳) آن است که چنانچه برای سلول مورد نظر، شار f بیشتری مدنظر باشد که این حجم شار f بیش از شار f ورودی باشد، در این صورت این کمبود تامین شود. پس اگر شار f موجود از وجه سلول دهنده بیش از شار f وجه سلول گیرنده باشد، آنگاه برای ایجاد تعادل از CF استفاده می گردد و چنانچه شار f موجود از وجه سلول دهنده کمتر از شار f وجه سلول گیرنده باشد، آنگاه برای ایجاد تعادل از رابطه ی دارای Min استفاده می شود. شکل (۵-۳) نمایی از سطح تماس به روش دهنده و گیرنده را نشان می دهد.



شکل (۵-۳): سطح تماس به روش دهنده و گیرنده

۳-۷-۲ الگوی یانگز

از آنجایی که این روش توسط یانگز معرفی شده است، به همین نام معروف است. در این روش جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می‌شود. در شبکه‌های نامنظم این روش دقت مناسبی دارد و در شبکه‌های منظم، دقت آن قابل قبول است. در این الگو به طور منظم جهت تعیین سطح مشترک دو سیال از درونیایی خطی استفاده می‌شود، پس از آن در هر سلول و براساس شیب به دست آمده از دو سلول مجاور، سرعت محلی تعیین می‌گردد. با مشخص شدن جزء حجم سیال (F_{ij}) در هر سلول، میزان شار f در دیواره‌ی سمت راست هر سلول FL_r طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

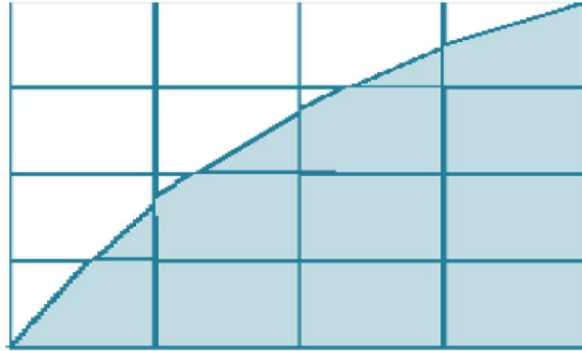
$$FL_r = \begin{cases} F_{i,j} \times u_r \frac{\Delta t}{\Delta x} & u_r \geq 0 \\ F_{i+1,j} \times u_r & u_r < 0 \end{cases} \quad (29-3)$$

برای تعیین شیب مسطح مشترک دو سیال در هر سلول، از رابطه‌ی زیر برای تعیین β (زاویه‌ی بین محور x و سطح مشترک دو سیال) استفاده می‌شود.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-n^x}{n^y} \right) \quad (30-3)$$

$$\begin{cases} n_{i,j}^x = \frac{1}{\Delta x} (F_{i+1,j+1} + 2F_{i+1,j} + F_{i+1,j-1} - F_{i+1,j-1} - 2F_{i-1,j} - F_{i-1,j-1}) \\ n_{i,j}^y = \frac{1}{\Delta x} (F_{i+1,j+1} + 2F_{i,j+1} + F_{i-1,j+1} - F_{i-1,j+1} - 2F_{i,j-1} - F_{i-1,j-1}) \end{cases} \quad (31-3)$$

در ادامه شکل (۳-۶) نمایی از سطح تماس به روش یانگز را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶) سطح تماس به روش یانگز

۳-۷-۳ الگوی صریح اویلر

در این روش جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می‌شود. این روش در اصل یک روش تفاضل محدود است که به صورت صریح مقدار درصد حجم سلول را در گام زمانی جدید و براساس رابطه‌ی (۳-۳۲) تعیین می‌کند.

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} V + \Delta(u_f^n f^n) = 0 \quad (۳-۳۲)$$

در رابطه‌ی فوق، منظور از n ، گام زمانی قبلی و $n+1$ گام زمانی جدید و μ_f شار حجم گذرانده از سطح سلول است. f همان درصد حجم سلول و V حجم سلول مورد نظر بوده و اختلاف دو گام زمانی متوسط با Δt نمایش داده شده است. منظور از Δ تفاضل پیشرو است که مطابق رابطه‌ی (۳-۳۳) بدست می‌آید:

$$\Delta(x) = x_{i+1} - x_i \quad (۳-۳۳)$$

۳-۷-۴ الگوی ضمنی

این الگو جریان را به صورت دائمی تحلیل نموده و در اصل یک روش تفاضل محدود^۱ است. این الگو به صورت ضمنی، مقدار درصد حجم سلول را در گام زمانی جدید و براساس رابطه‌ی زیر مشخص می‌کند.

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} V + \Delta(u_f^{n+1} f^{n+1}) = 0 \quad (3-34)$$

الگوهای مختلفی از روش VOF بیان شدند و مقایسه‌ای از دقت این الگوها در پیش بینی سطح آزاد صورت گرفته است. همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شد اگر سطح تماس دو سیال به صورت شکل فوق باشد در این صورت با الگوهای شرح داده شده می‌توان آن را شبیه سازی نمود که در این بین الگوی یانگز معمولاً بهترین سطح تماس را مدل می‌کند. البته سایر الگوها مانند الگوی دهنده و گیرنده که سطح تماس دو سیال را در هر سلول به صورت افقی یا قائم در نظر می‌گیرد نیز دقت قابل قبولی دارد.

۳-۸ معرفی روش‌های عددی

حل عددی یک معادله‌ی دیفرانسیل، از یک دسته اعداد تشکیل یافته که با استفاده از آن‌ها می‌توان توزیع متغیر وابسته را به دست آورد. به بیان دیگر، راه حل عددی شبیه یک تجربه‌ی آزمایشگاهی است که طی آن قرائت‌هایی از روی دستگاه انجام می‌گیرد و در نتیجه ما قادر خواهیم بود که توزیع کمیت‌های اندازه گرفته شده را در محدوده‌ی مورد بررسی، برقرار سازیم. البته حداقل در مقاصد علمی باید تعداد این مقادیر به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. ساختار برنامه‌های CFD، روش عددی بوده و فهم

^۱ Finite Difference

مناسب الگوریتم حل عددی یک مسئله مهم است. سه ایده‌ی ریاضی در مشخص کردن کارایی یا عدم کارایی هر یک از الگوریتم‌ها مفید است که شامل همگرایی، سازگاری و پایداری است. همگرایی خاصیتی از روش عددی برای به دست آوردن جوابی است که به حل دقیق نزدیک است، بطوریکه فاصله‌ی شبکه، اندازه‌ی حجم کنترل یا المان به صفر میل می‌کند. طرح‌های عددی سازگار، دستگاهی از معادلات جبری را ایجاد می‌کنند که می‌توان نشان داد با معادله‌ی حاکم اصلی، زمانی که فاصله‌ی شبکه به سمت صفر میل پیدا می‌کند، معادل است. پایداری در روش عددی با میرایی خطا همراه است. اگر یک روش پایدار نباشد، حتی با گرد کردن خطاها در داده‌های اولیه، می‌تواند موجب واگرایی یا نوسانات زیاد گردد. در روش‌های CFD با توجه به اینکه معادلات حاکم غیر خطی است، دوام و پایداری شرط لازم برای همگرایی بوده، ولی کافی نیستند. به طور کل چهار روش حل مجزا برای روش‌های عددی وجود دارد که شامل روش تفاضل محدود، روش اجزاء محدود^۱، روش حجم محدود^۲ و روش‌های طیفی هستند.

تفاوت‌های اصلی میان این چهار روش به روشی که در آن متغیرهای جریان تقریب می‌خورند و فرآیند گسسته‌سازی صورت می‌گیرد، مربوط می‌شود. از میان این چهار روش، دو روش تفاضل محدود و المان محدود در بسته‌های نرم افزاری کاربرد بیشتری دارند. روش المان محدود هنگامی استفاده می‌شود که مسئله دارای هندسه‌ی پیچیده است، بطوریکه روش تفاضل محدود برای حل مسئله جوابگو نیست. اما هر دو روش در نهایت منجر به تولید دستگاه معادلات جبری می‌شوند که با حل آن، مقادیر مجهول تابع در نقاط معینی از میدان به دست می‌آید. برای نواحی با تغییرات سریع (نزدیک لبه‌ها و گوشه‌ها) در هر دو روش، نیاز به فواصل شبکه‌ای کوچکتر است. با این اصلاح شبکه، روش اجزاء محدود از سادگی برخوردار می‌شود، اما در هنگام استفاده از روش تفاضل محدود نیاز به مدت زمان حل بیشتری دارد. در تحلیل تنش‌ها نیز روش المان محدود متداول‌تر از روش تفاضلات محدود است و حتی موارد استفاده از آن در انتقال گرما و جریان سیالات رو به فزونی است.

^۱ Finite element

^۲ Finite volume

۳-۸-۱ روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از روش‌هایی است که از فرم دیفرانسیلی معادلات استفاده می‌کند. در این روش هر ترم معادله‌ی دیفرانسیل با یک عبارت جبری تقریب زده می‌شود. همچنین فقط در مواردی می‌توان از این شبکه بندی با ساختار استفاده کرد که مرزهای محیط دارای شکل هندسی ساده‌ی منظمی باشند. در این روش برای گسسته سازی معادلات از سری تیلور یا برازش یک منحنی برای مقدار تقریبی مشتق و تابع استفاده می‌شود. معادلات جبری به دست آمده با دو روش قابل حل هستند:

- روش صریح

- روش ضمنی

در روش صریح، مقدار پارامتر مورد نظر در هر نقطه با استفاده از مقادیر پارامترهای نقاط مجاور آن نقطه که در گام قبلی محاسبه شده اند، به دست می‌آید. یعنی در هر گام از محاسبه، تنها یک مجهول در معادله وجود دارد که به راحتی به دست می‌آید. اما در روش ضمنی که در هر مرحله از محاسبات دارای چندین مجهول است، زیرا پارامتر مورد نظر با استفاده از مقادیر نقاط مجاور که مقدار آنها در گام فعلی بدست می‌آید، تعیین می‌گردد. یعنی در این روش، در هر گام محاسباتی، با حل یک دستگاه معادلات، مقدار پارامتر مورد نظر در تمام نقاط بدست می‌آید.

۳-۸-۲ روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود از شکل انتگرالی معادلات استفاده می‌کند. یعنی از معادلات حاکم، در روی محدوده‌ی مورد نظر حل، انتگرال گیری می‌شود. در نتیجه تنها برای گسسته سازی ترم های مکانی معادلات به کار می‌رود و برای گسسته سازی ترم های زمانی از روش تفاضل محدود استفاده می‌گردد. در این روش معادله در یک ضریب وزنی ضرب می‌شود. این ضریب نقش یک تابع درونیایی را دارد. این ضریب وزنی را تابع شکل می‌نامند. سپس از معادله‌ی به دست آمده روی محیط حل، انتگرال

گیری می‌شود. تابع شکل می‌تواند به صورت خطی، درجه دو یا با درجات بالاتر باشد که هرچه این تابع با درجه‌ی بالاتری باشد، دقت حل بیشتر می‌گردد. هر چند که با این کار حجم و زمان محاسبات نیز افزایش می‌یابد. تابع شکل در گره‌ی که تعریف می‌گردد برابر یک بوده و در بقیه‌ی گره‌ها صفر است. پس از به دست آمدن تابع شکل، با ضرب آن در معادلات جریان، انتگرال گیری از روی عبارات انتگرال انجام می‌گیرد. این روش دارای گستردگی زیادی با توجه به شرایط مسئله، نوع المان‌های مورد نظر است.

۳-۸-۳ روش حجم محدود

در روش حجم محدود که یکی از حالات ویژه‌ی باقیمانده‌ی وزنی است، درک مستقیم حالت فیزیکی مسئله آسان است. در این روش ابتدا دامنه به تعدادی حجم کنترل غیر پوشان تقسیم شده به نحوی که هر حجم کنترل حول یک نقطه از میدان قرار می‌گیرد و آنگاه از معادله‌ی دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادلات به صورت عددی گسسته سازی می‌شوند. ایده‌ی اصلی در این روش گسسته‌سازی، تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط گسسته نیست، بلکه شرط برقراری، اصل بقاء جرم است. پس از انتگرال گیری بر روی حجم کنترل مورد نظر مربوط به هر گره، عبارتی که در معادلات دیفرانسیل مربوطه وجود دارند باید به نحوی گسسته شوند که فرمول حاصل پایدار و دقیق باشد. قوانین بقای حرکت سیال را می‌توان به یکی از شکل‌های جبری، دیفرانسیلی و یا انتگرالی بیان نمود. برای حل معادلات دیفرانسیلی، همانطور که قبلاً تشریح شده، محدوده‌ی حل را شبکه بندی نموده و معادلات دیفرانسیلی با کمک روش‌های تفاضل محدود گسسته سازی شده و روی حجم کنترل مورد نظر حل می‌گردد. در روش حجم محدود نیازی به شبکه‌های با سازمان وجود ندارد. همچنین چون معادلات انتگرالی را به طور مستقیم در قلمرو فیزیکی به کار می‌بریم، دیگر تبدیل مختصات لازم نیست. در این روش نیز مانند روش اجزاء محدود از معادلات حاکم بر جریان در محدوده‌ی حل، انتگرال گرفته می‌شود.

فصل چهارم :

معرفی نرم افزار

۴-۱ مقدمه

Flow-۳D نرم افزاری قوی در زمینه ی مکانیک سیالات می باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت Flow Science Inc. صورت گرفته است. این نرم افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده ی کاربردی وسیعی طراحی شده است. یکی از قابلیت های عمده ی این برنامه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان های با سطح آزاد به روش VOF می باشد. این مدل توسط هرت^۱ و نیکولز^۲ (۱۹۸۱) گزارش شده است.

Flow-۳D شامل الگوهای فیزیکی مختلفی می باشد که برخی از آنها عبارتند از: آب های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفستگی، کشش سطحی و محیط های متخلخل. این مدل ها در زمینه هایی مانند ریخته گری مواد، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، هوا فضا، علوم دریایی و نفت و گاز کاربرد دارد. برای استفاده از این نرم افزار به یک پردازنده ی Pentium (III) با ویندوز Xp احتیاج است. حداقل حافظه ی کارت گرافیک نیز ۳۲^{Mb} می باشد. این برنامه بر روی سیستم عامل Seven و Linux قابل نصب می باشد. از مزایای دیگر این نرم افزار، قابلیت شبکه کردن آن با سیستم های پردازنده ی دیگر است.

این نرم افزار در تحلیل مسائل جریان های با سطح آزاد قابلیت ویژه ای دارد. نرم افزار Flow-۳D نیز مانند نرم افزار FLUENT از روش حجم محدود در محاسبات شبکه بندی منظم مستطیلی بهره می گیرد. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه سازی عددی است که به کمترین ذخیره ی حافظه احتیاج دارد. این نرم افزار از تکنیک خاصی به نام FAVOR^۳

^۱ Hert

^۲ Nicole

^۳ Fractional Area-Volume Obstacle Representation

سود می برد و برای شبیه سازی هندسی از شبکه بندی مستطیلی استفاده می کند. در این روش برای هر حجم کنترل، مقدار فشار، سرعت، دما و ... به صورت مجزا محاسبه می شود.

۴-۲ معادلات حاکم و سیستم های مختصات

Flow-۳D یک برنامه ی کامپیوتری با کاربردهای کلی (عمومی) و توانایی های بسیار است. کاربر می تواند با وارد کردن اطلاعات مدل های مختلف، محدوده ی وسیعی از پدیده های جریان را شبیه سازی نماید. در این بخش به یک سری معادلات حرکت سیال که در نرم افزار استفاده شده است، اشاره می شود. در این نرم افزار از تقریب تفاضل و حجم محدود برای محاسبه ی زمانی و مکانی متغیرها در معادلات حرکت استفاده شده است. معادلات دیفرانسیلی که باید حل شوند در قالب مختصات دکارتی (x,y,z) نوشته می شود. برای مختصات استوانه ای (z,r,θ) ، مختصات x به صورت شعاعی تغییر می کند. مختصات y به مختصات زاویه ای انتقال داده می شود و z مختصات محوری است. برای هندسه های استوانه ای، ترم های اضافی باید به معادلات حرکت دکارتی اضافه شوند. این ترم ها دارای یک ضریب به نام ζ است که اگر $\zeta=0$ باشد، مختصات مربوط به هندسه ی دکارتی می شود و وقتی $\zeta=1$ است، هندسه ی استوانه ای حاصل می شود. تمام معادلات با مساحت و حجم توابع ضریب نفوذ، فرموله می شوند. این فرمول سازی که به روش FAVOR معروف است برای مدل سازی هندسه های پیچیده استفاده می شود. به عنوان نمونه در نواحی تیغه های نازک منفذدار دارای ضریب نفوذ پذیری استفاده می شود. توابع نفوذ پذیری همچنین برای بیان برخی ساده سازی ها در مشخصات سطوح آزاد و شرایط مرزی دیواره استفاده می شوند. به طور کلی در Flow-۳D کسرهای مساحت و حجم، مستقل از زمان هستند. با این وجود این کمیت ها ممکن است زمانی که از مدل موانع متحرک استفاده می شود، تغییر کنند. معادله ی پیوستگی جرم به طور کلی به صورت زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۱-۴)$$

که در این رابطه V_F نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ دانسیته ی سیال، R_{DIF} ترم نفوذ پذیری آشفته گی و R_{SOR} برابر منبع جرم است. (u,v,w) به ترتیب اجزاء سرعت در جهتهای (x,y,z) یا (z,r,θ) هستند. A_x, A_y و A_z به ترتیب برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهات x,y,z هستند. ضریب R وابسته به انتخاب سیستم مختصات به صورت زیر است. هنگامیکه از مختصات استوانه ای استفاده می شود، مشتقات y باید به مشتقات قطبی تبدیل شوند.

$$R = \frac{r_m}{r} \quad (۲-۴)$$

در این رابطه، $y=r_m.\theta$ است و r_m برابر با شعاع از مبدا ثابت است. هنگامیکه از مختصات دکارتی استفاده شود $R=۱$ و $\xi=0$ است. اولین عبارت در طرف راست معادله پیوستگی برابر پارامتر نفوذ آشفته گی به شرح زیر است:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (۳-۴)$$

$$v_\rho = \frac{C_p \mu}{\rho} \quad (۴-۴)$$

در رابطه ی $(۴-۳)$ ، μ برابر ضریب پخش مومنوم (لزجت) و C_p یک عدد ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفته گی اشمیت است. اینگونه از انتقال جرم ها در زمینه ی فرآیندهای آشفته گی اختلاط که گرادیانی غیر یکنواخت دارند، کاربرد دارد. R_{SOR} ترم مربوط به دانسیته است که در مدل سازی تزریق جرم از خلل و فرج یک دیوار استفاده می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5-4)$$

معادلات مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس) برای اجزاء سرعت سیال (x,y,z) در سه جهت مختصات،

با یکسری ترمهای اضافی به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vRA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x - f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vRA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y - f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vRA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z - f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

(6-4)

در این معادلات، G_x ، G_y و G_z شتابهای بدنه، f_x ، f_y و f_z شتاب ناشی از لزجت، b_x ، b_y و b_z افت جریان

در محیطهای دارای خلل و فرج و ترم آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.

برای تغییرات لزجت دینامیکی، شتاب ناشی از لزجت در جهات سه گانه عبارت است از:

$$\rho V_F f_x = w s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x}(A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\}$$

$$\rho V_F f_y = w s y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x}(A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \quad (7-4)$$

$$\rho V_F f_z = w s z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x}(A_x \tau_{xz}) \right\}$$

در عبارت بالا، ترم‌های WSZ، WSX و WSY تنش‌های روی دیواره هستند. اگر از این ترم‌ها صرف نظر کنیم، هیچ تنش برشی روی دیواره‌ها نداریم زیرا ترم‌های باقیمانده که شامل کسرهای جزئی مساحت‌های جریان (A_x ، A_y و A_z) روی دیوار هستند، حذف می‌شوند. تنش‌های روی دیوار به وسیله‌ی فرض یک خط مماسی صفر روی قسمتی از مساحت سطح محدود به جریان، مدل می‌شوند. شبکه‌ها و مرزهای موانع متحرک استثنا هستند، زیرا آن‌ها می‌توانند به وسیله‌ی سرعت‌های مماسی غیر صفر ذکر شوند.

تانسورهای تنش نیز به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\xi u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (۸-۴) \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}\end{aligned}$$

۴-۳ سطح آزاد و مشترک سیال

خصوصیات سیال براساس تابع $F(x,y,z)$ که بیانگر تغییرات حجم سیال است، تعریف می‌شود. در این تابع، حجم سیال، حجم واحد بوده و در رابطه‌ی زیر صادق است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) + \xi \frac{FuA_x}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (۹-۴)$$

که در آن F_{DIF} برابر است با:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right\} \quad (۱۰-۴)$$

ضرایب پخش به صورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود و در آن C_F یک مقدار ثابت است:

$$v_\rho = \frac{C_F \mu}{\rho} \quad (۱۱-۴)$$

این ترم نفوذ تنها یک دید برای اختلاط آشفته‌گی دو سیال که توزیع آن با تابع F بیان می‌شود، ایجاد می‌کند. تعریف F وابسته به مسئله‌ای است که مدل می‌شود. مسائل غیرقابل تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد و یا دو سیال با سطح مشترک است. برای یک سیال، F معرف کسر حجمی اشغال شده با سیال است. بنابراین در مکان‌هایی که $F=1$ باشد، سیال وجود دارد و در مکان‌هایی که $F=0$ باشد، حباب و حفره وجود دارد. نواحی حبابی و خالی، ناحیه‌هایی هستند که در آنها جرم سیال وجود ندارد و یک فشار یکنواخت در آنها حاکم است. تعبیر فیزیکی این نواحی مانند مکان‌هایی است که بخار یا گاز با دانسیته‌ی قابل صرف نظر در مقابل سیال، پر شده است. مسائل دارای دو سیال ممکن است

شامل دو سیال غیر قابل تراکم و یک سیال قابل تراکم باشد. F کسر حجمی سیال غیر قابل تراکم است. نواحی متمم با کسر حجمی $1-F$ ، معرف سیال دومی است.

۴-۴ مدل های آشفتگی

اکثر جریان های موجود در طبیعت به صورت آشفته می باشند. در اعداد رینولدز پایین، جریان آرام بوده ولی در اعداد رینولدز بالا جریان آشفته می شود، به طوریکه یک حالت تصادفی از حرکت در جایی که سرعت و فشار به طور پیوسته درون بخش های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می کنند، گسترش می یابد. این جریان ها به وسیله ی خصوصیتی که در ادامه مطرح شده اند، شناسایی می گردند.

(۱) جریان های آشفته به شدت غیر یکنواخت هستند. در این جریان ها اگر تابع سرعت در برابر زمان ترسیم شود، بیشتر شبیه به یک تابع تصادفی خواهد بود.

(۲) در این نوع جریان ها، گردابه های کوچک بسیار زیادی وجود دارند. شکل کشیده یا عدم تقارب گرداب ها یکی از خصوصیات اصلی این جریان ها است، که این امر با افزایش شدت نوسانات فشار افزایش می یابد.

(۳) این جریان ها معمولاً سه بعدی هستند. پارامتر سرعت میانگین گاهی اوقات ممکن است تنها تابع دو بعد باشد، اما در هر لحظه ممکن است سه بعدی شود.

(۴) آشفتگی، شدت جریان های چرخشی در جریان را افزایش می دهد که این عمل می تواند باعث اختلاط شود. فرآیند چرخش در سیالاتی رخ می دهد که حداقل میزان یکی از مشخصه های پایستار آن ها متغیر باشد. در عمل، اختلاط به وسیله ی فرآیند پخش انجام می شود. به این جریان ها غالباً جریان های پخششی نیز می گویند.

۵) آشفته‌گی جریان باعث می‌شود جریان‌هایی با مقادیر متفاوت اندازه حرکت با یکدیگر برخورد کنند. گرادیان‌های سرعت بر اثر لزجت سیال کاهش می‌یابند و این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که اختلاط، یک پدیده‌ی مستهلک کننده‌ی انرژی است.

انرژی تلف شده نیز طی فرآیندی یک‌طرفه به انرژی داخلی (حرارتی) سیال تبدیل می‌شود. تمام مشخصاتی که به آنها اشاره شد برای بررسی یک جریان آشفته مهم هستند. تاثیراتی که توسط آشفته‌گی ایجاد می‌شود بسته به نوع کاربری ممکن است ظاهر نشود و به همین دلیل باید این جریان‌ها را با توجه به نوع و کاربری آن مورد بررسی قرار داد. برای بررسی جریان‌های آشفته روش‌های مختلفی وجود دارد که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد. مدل‌های آشفته‌گی، لزجت گردابه‌ای و یا تنش رینولدز را تعیین می‌کنند و فرضیات زیادی برای همه‌ی آنها حاکم است که عبارتند از:

- معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده‌ی زمانی (RANS) بیانگر حرکت متوسط جریان آشفته است.

- پخش آشفته‌گی متناسب با گرادیان، ویژگی‌های آشفته‌گی است.
- گردابه‌ها می‌توانند ایزوتروپیک و یا غیر ایزوتروپیک باشند.
- همه‌ی مقادیر انتقال آشفته، توابع موضعی از جریان هستند.
- در مدل‌های آشفته باید همسازی وجود داشته باشد.
- این مدل‌ها می‌توانند یک مقیاسی و یا چند مقیاسی باشند.
- همه‌ی مدل‌ها در نهایت به کالیبراسیون به صورت تجربی نیاز دارند.

۴-۵ فرضیه ی بوزینسک

بسیاری از مدل های آشفتگی بر پایه ی این فرضیه استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل ها، آشفتگی افزایش می یابد. فرضیه ی بوزینسک بیان می کند که می توان تنش های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل ها ارتباط داد. تنش های ناشی از لزجت به صورت زیر است:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۴-۱۲)$$

ارتباط تنش های رینولدز با نرخ میانگین تغییر شکل ها به صورت زیر است:

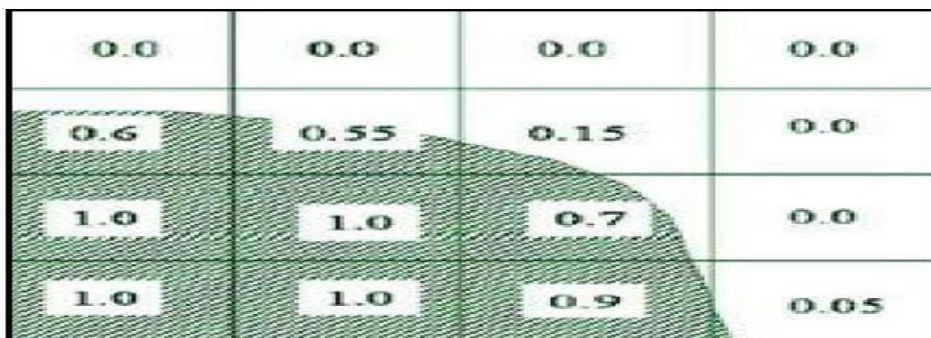
$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (۴-۱۳)$$

μ لزجت گردابه ای یا مولکولی نامیده شده و واحد آن پاسکال-ثانیه است. مدل های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش های آشفتگی با سرعت های متوسط گیری شده یا گرادیان آنها به مدل های صفر معادله ای، تک معادله ای، دو معادله ای، مدل های دارای معادله ی تنش و مدل های شبیه سازی شده ی گرداب های بزرگ (LES) تقسیم می شوند.

۴-۶ روش حجم سیال به کار رفته در نرم افزار FLOW-۳D

روش انتقال VOF موجود در این نرم افزار، بر مبنای تقریبات سلول دهنده و گیرنده است. همانطور که قبلاً ذکر گردید این روش اولین بار توسط Hirt & Nichols بیان شد. هنگامی که در مساله سطح آزاد وجود دارد، همه ی المان ها شامل سیال نمی شوند. بعضی از المان ها پر و بعضی خالی هستند و تعدادی از المان ها که شامل سطح آزاد هستند نیمه پر می باشند. یک راه مناسب برای تعیین موقعیت المان، تعیین مقدار کمیت تابع F است که بیانگر میزان کسری از المان است که توسط سیال اشغال

شده است. تابع کسر سیال F در محیط سیال برابر یک و در خارج سیال صفر است. با داشتن مقدار کسر F می توان مکان عمومی و زاویه ی سطح آزاد در المان های شامل سطح آزاد را به دست آورد و این حالت با سیال موجود در المان های مجاور کنترل می شود. سیال در المان هایی که شامل سطح آزاد است باید در نزدیکترین فاصله با المان های مجاور که بیشترین سیال را دارند، قرار گیرد. هنگامیکه مکان و زاویه ی قرارگیری سطح آزاد تعیین شد، می توان از خصوصیات مرزی سطح آزاد برای محاسبات عددی حرکت سیال استفاده کرد. با حرکت سیال، مقدار کمیت F نیز در طی جریان تغییر نموده و با حرکت سیال از بین شبکه ی ثابت حجم کنترل، به طور اتوماتیک تعدادی از المان ها قطع می شوند. برای یک حجم کنترل، مقدار تابع F همانطور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است در بازه ی [۰-۱] قرار دارد. حجم سیال در هر سلول به صورت رابطه ی (۴-۱۴) بیان می شود.



شکل (۴-۱) : نمونه ای از مقادیر VOF در نزدیکی سطح آزاد

$$F_{Vol} = FV_f dx dy dz \quad (۴-۱۴)$$

روش قوی، درست و رایجی که به هر دو هدف موجود در شبکه ی ثابت اویلری می رسد، محاسبه ی شار حجمی با استفاده از بازسازی هندسی سطح مشترک است که از مقادیر تابع VOF در داخل و اطراف حجم کنترل معلوم استفاده می کند. بیشتر روش های موجود از روش مشابهی برای تعیین شکل مشترک استفاده می کنند. این روش ها دارای خصوصیات بقای حجم خوبی هستند. مزیت بزرگ روش

VOF این ست که سیال در یک شبکه ی ثابت حرکت می کند و در نتیجه نیاز به تغییر شکل و بازسازی شبکه برطرف می شود و همچنین جرم های سیال براساس قوانین دینامیک با هم ترکیب یا از هم جدا می شوند و به هیچ منطق خاصی برای تعیین تقاطع سطوح نیاز نیست. روش VOF برای فرآیندهایی که متناوبا تر و خشک می شوند مانند حرکت امواج در سواحل و یا امواج جزر و مدی مناسب می باشد.

روش جدید انتقال به کار رفته در نرم افزار Flow-3D شامل سه مرحله ی تخمین سطح مشترک سلول با سطح افقی، انتقال حجم سیال مطابق با سرعت محلی و محاسبه ی مقادیر جدید کسر سیال در سلول های محاسباتی با استفاده از همپوشانی می باشد. در این روش برخلاف روش استاندارد VOF برای هر سلول یک وجه مشترک تعریف می شود که با توجه به این مساله، مقادیر حاصله از هر سلول می تواند به صورت کسری از حجم سلول بیان گردد. این عمل با توجه به تعریف بردار نرمال عمود بر وجه مشترک (n) قابل توصیف است. وجه مشترک هر سلول توسط یک سطح مانند رابطه ی (۴-۱۵) مشخص می گردد.

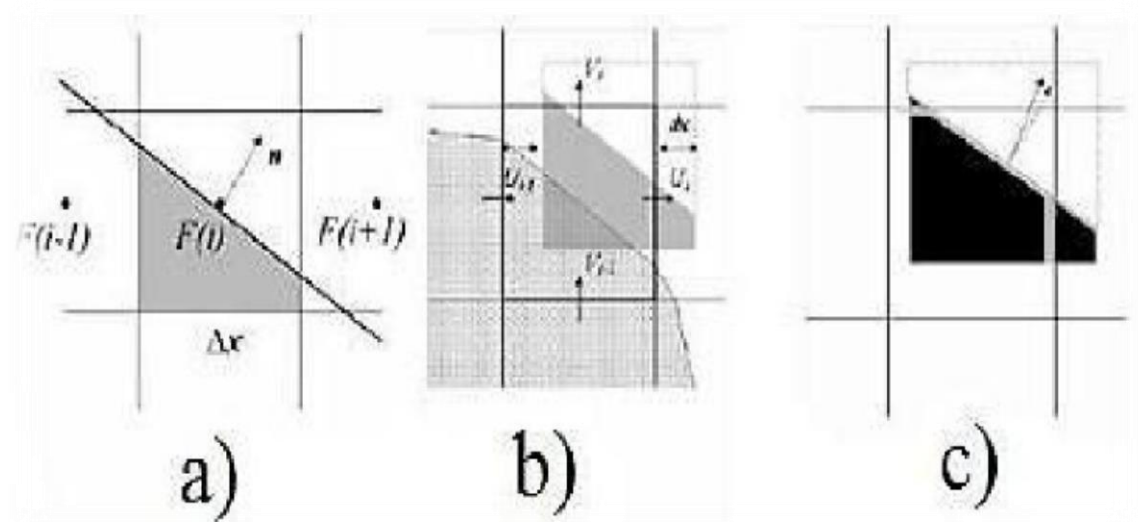
$$n_x x + n_y y + n_z z = C \quad (۴-۱۵)$$

مقدار C در معادله ی بالا، به وسیله ی فرآیند تکرار تا برابر شدن حجم سیال در محدوده ی سلول و سطح واقعی میزان سیال در سلول به دست می آید. با توجه به معادلات ارائه شده در روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷)، مقدار شار برای هر حجم کنترل قابل محاسبه می باشد.

$$n_x = \frac{1}{|n|} \frac{F_r - F_l}{\Delta x} \quad (۴-۱۶)$$

$$\begin{cases} F_l = \frac{2(1-F_i)(1-F_{i-1})}{2-F_i-F_{i-1}} \\ F_r = \frac{2(1-F_i)(1-F_{i+1})}{2-F_i-F_{i+1}} \end{cases} \quad (۱۷-۴)$$

در معادلات فوق، Δx ، F_l و F_r به ترتیب بیانگر اندازه ی سلول در جهت x ، کسر وجه چپ و راست سلول است که توسط سیال اشغال نشده است. و i برابر با اندیس در جهت x است. به عنوان مثال اگر سلول i یا $i+1$ پر باشند (یعنی F_l و F_{i-1} برابر یک باشند) بنابراین میزان F_i برابر با صفر خواهد بود. در این محاسبات از مقایسه ی گام زمانی قبلی یعنی $t=t_n$ استفاده شده است. برای محاسبه ی مولفه های نرمال در جهت y و z نیز از روش مشابهی استفاده می شود. گام بعدی، حرکت حجم سیال در سلول است. این موضوع به وسیله ی حرکت هر وجه از سلول توسط مولفه های سرعت که در هر وجه قرار دارد انجام می شود. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۴-۲): سه مرحله ی تعیین سطح آزاد به روش VOF

برای مثال سمت چپ با مولفه ی سرعت u_{i-1} حرکت می کند و وجه سمت راست با سرعت u_i حرکت می کند. فاصله ی dx که وجه سلول با آن حرکت می کند، با حل معادله ی (۱۸-۴) به دست می آید.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A_x}{V_f} U \quad (18-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = \frac{A_{xi}}{V_{fa}} \frac{U \Delta t}{1 - \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial x} \Delta t} \\ \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta x} \end{array} \right. \quad (19-4)$$

فاصله ی dx با استفاده از بسط تیلور سرعت u با در نظر گرفتن جملات درجه صفر و یک و استفاده از سرعت متوسط در طول فاصله ی dx با انتگرال گیری از رابطه ی (۱۸-۳) به دست می آید. در نتیجه دقت جواب ها برای اندازه سلول Δx از درجه ی دو است. کسر حجم V_{fa} از سلول بالادست وجه سلول به دست خواهد آمد. مولفه ی سرعت u_i در طول وجه سیال ثابت فرض می شود، زیرا وجه سیال می بایست بدون چرخش حرکت کند، یعنی می بایست المان حاصل با خودش موازی باشد. بنابراین معمولاً حجم سیال بعد از انتقال ممکن است با حجم سلول اصلی فرق کند، حتی اگر دیورژانس سرعت در سلول برابر صفر باشد.

$$dV = \frac{V_{old}}{V_{New}} \neq 1.0 \quad (20-4)$$

جهت نرمال n بر سطح مشترک ممکن است با تغییر نسبت شکل حجم سیال انتقال یافته، تغییر کند. همانطور که در شکل (۲-۴) نشان داده شد، هنگامیکه معادلات (۱۶-۴) و (۱۷-۴) برای به دست

آوردن C حل می‌شوند، به سیال اجازه داده می‌شود در طی فرآیند انتقال متراکم یا منبسط شود. مرحله ی آخر، واگذار کردن حجم سیال انتقال یافته به سلول پذیرنده ی جدید است. این عمل به کمک معادله ی (۴-۱۶) انجام خواهد شد. تصحیح حجم سیال محاسبه شده از مقدار محاسبه شده ی dV در رابطه ی (۴-۲۰) برای اطمینان از برابری حجم سیالی است که در سلول های پذیرنده قرار می گیرد. در الگوریتم جدید، حجم سیال در اشل محلی حفظ می‌شود. حجم سیالی که سلول دهنده را ترک می‌کند معادل است با حجم سیالی که در سلول های پذیرنده قرار می‌گیرد.

۴-۷ روش کسر مساحت - حجم مانع^۱

روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزها کاربرد دارد. همانطور که کسر حجم سیال موجود در هر المان شبکه برای قرار گیری سطوح سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد، در عمل وجود کسر حجم باز V_f برای یک المان سیال مانع از وجود بخش صلب در آن المان نمی‌شود. همچنین نسبت سطح آزاد هر وجه المان نیز محاسبه می‌شود. روش مشابه VOF می‌تواند در تعیین مرزهای صلب که شبکه را قطع می‌کنند، مورد استفاده قرار بگیرد. این اطلاعات بعداً برای تعیین شرایط هندسی دیواره های مرزی که جریان می‌بایست با آنها مطابق باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فلسفه ی روش FAVOR بر این مبناست که الگوریتم عددی بر مبنای اطلاعاتی شامل یک فشار، یک دما، و ... برای حجم کنترل می‌باشد که این با استفاده از مقادیر زیادی از اطلاعات برای تعریف هندسه متناقض است. بنابراین روش FAVOR المان های ساده ی مستطیلی را حفظ می‌کند، در صورتیکه می‌تواند اشکالی با هندسه ی پیچیده در حد سازگاری با مقادیر جریان میانگین گیری شده

^۱ Fractional Area-Volume Obstacle Representation

را برای هر المان نشان دهد. از آنجائیکه هندسه ی مرزها معمولاً ثابت است، کسر حجم V_f و کسر مساحت A_f نیازی به حرکت یا تغییر با جریان ندارد. وقتی روش VOF با روش FAVOR ترکیب می شود، کسر حجم سیال F به وسیله ی کسر حجم باز المان، یعنی V_f و نه کسر حجم کل المان تعریف می شود. به عبارتی دیگر اگر V حجم المان باشد، حجم واقعی سیال در المان برابر با $V(FV_f)$ خواهد بود نه FV .

۴-۸ مدل رسوب و آبشستگی در نرم افزار Flow-۳D

فرسایش ناشی از گذر آب یک پدیده ی فیزیکی بسیار پیچیده است؛ چراکه علاوه بر وابستگی دینامیکی سطح آزاد جریان بر روی خاک، به عامل زمان (به منظور تاثیر متقابل جریان و خاک) نیز وابسته می باشد. نرم افزار Flow-۳D نه تنها قادر است که سطح آزاد جریان سیال عبوری را مدل کند، بلکه قادر است که مسائل سه بعدی فرسایش و انتقال توده ی رسوب و رسوب معلق را نیز مدل نماید. مدل رسوب و آبشستگی (Sediment & Scour) در نرم افزار Flow-۳D می تواند حرکت توده ی رسوب و رسوب معلق را پیش بینی کند. این مدل در فرسایش پذیری اطراف پایه ی پل، پایین دست سازه های هیدرولیکی و انواع کانال های باز کاربرد دارد.

این مدل براساس نیروهای رانش و بالابرنده (Lifting & Drifting) و نهشت رسوبی طراحی شده است. عملکرد نیروی رانش، ایجاد نیروی محرک بر ذرات رسوب است که باعث معلق شدن این ذرات در سیال می شود. این مدل، مدل جریان رانشی (Drift-Flux Model) نیز نامگذاری شده است. مدل بالابرنده همان نیروهای برگشت ناشی از تنش برشی موضعی بر ذرات رسوب است. حرکت رسوب توسط مدل درگ کنترل می شود. زمانیکه میزان غلظت رسوب از مقدار کسر حجمی چسبندگی جامدات (Cohesive Solid Fraction) که توسط کاربر تعریف شده است بیشتر شود، رسوب رفتار جامد از خود نشان داده و مدل درگ فعال می شود. در Flow-۳D توزیع رسوب در میدان جریان شامل رسوب معلق و توده ی رسوب است. با افزایش غلظت رسوب معلق، لزجت (ویسکوزیته) نیز افزایش

می‌یابد. وقتی غلظت رسوب یا جامدات مساوی یا بزرگتر از کسر حجمی چسبنده می‌شود، تغییراتی در لزجت دیده نمی‌شود. رفتار جامدگونه، ناشی از برهم کنش ذرات است. علاوه بر این عبارت درگ خطی (Ku) که در معادلات اندازه حرکت اضافه شده است، رفتار جامدگونه‌ی رسوب را پیش‌بینی می‌کند.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\nabla \cdot \tau}{\rho} + g - Ku \quad (۲۱-۴)$$

که در این رابطه $\bar{\rho}$ چگالی متوسط بستر توده‌ی رسوب می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\rho} = \rho_1 + f_s(\rho_s - \rho_1) \quad (۲۲-۴)$$

ρ_1 و ρ_s به ترتیب چگالی سیال و چگالی توده‌ی رسوب است. τ تنش برشی ناشی از لزجت سیال است. K ضریب درگ بین ذرات است که با فرض رفتار جامدگونه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} K = 0 \\ K = \left[\frac{f_{s,cr} - f_{s,co}}{f_{s,cr} - f_s} \right] \left[\frac{f_{s,cr} - f_{s,co}}{f_{s,cr} - f_s} - 1 \right] \\ K = \infty \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} f_s < f_{s,co} \\ f_{s,co} < f_s < f_{s,cr} \\ f_s > f_{s,co} \end{array} \right. \quad (۲۳-۴)$$

که در آن f_s بخش جامد رسوب (میزان جامد حجم کل رسوب)، $f_{s,co}$ بخش جامد چسبنده‌ی رسوب است که در آن برهم کنش ذرات رخ داده و با افزایش غلظت رسوب، گرانشی سیال افزایش پیدا می‌کند. $f_{s,cr}$ بخش جامد بحرانی رسوب است که در آن جریان سیال متوقف می‌شود و رفتاری صلب‌گونه دارد. ضریب درگ در این حالت بی‌نهایت است. بردار سرعت ذرات رسوب دارای دو مولفه‌ی u_{drift} و u_{lift} است که از روابط زیر پیروی می‌کند.

$$u_{drift} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu^*} \frac{\nabla P}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (24-4)$$

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\rho}} \quad (25-4)$$

d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، μ لزجت سیال (آب) و $\frac{\nabla P}{\rho}$ شتاب بدنه (ذرات رسوب) است. $\frac{\nabla P}{\rho}$ تا ۱۰ برابر بزرگی شتاب ثقل می تواند افزایش داشته باشد تا تاثیرات نوسان عددی فشار محو شود. در مجاورت سطح آزاد سیال $\frac{\nabla P}{\rho}$ با شتاب ثقل (g) جایگزین می شود. در منطقه هایی از جریان که از جسم جامد (در این جا رسوب) پر می باشد. یعنی کسر حجمی سیال آب صفر باشد، سرعت شناوری از بالا به سمت صفر میل می کند. تنش برشی در بستر رسوبات ته نشین شده باعث حرکت رسوب می شود. مقدار فرسایشی که در سطح رسوبات ته نشین شده اتفاق می افتد تابعی از تنش برشی سیال، تنش برشی بحرانی، چگالی سیال و جسم جامد (رسوبات) می باشد.

$$\mu^* = \mu_f \left[1 - \frac{\min(f_s, f_{s,o})}{f_{SCR}} \right]^{-1.55} \quad (26-4)$$

μ_f لزجت مولکولی سیال است. رابطه ی بالا نشان می دهد تا زمانیکه بخش جامد یا غلظت رسوب مساوی مقدار بخش جامد چسبنده ی رسوب می شود، لزجت سیال افزایش پیدا می کند. زمانیکه مدل جامدگونه فعال می شود گرانروی ثابت است. اما زمانیکه بخش جامد رسوب برابر بخش جامد بحرانی می شود، لزجت بی نهایت می شود؛ یعنی حالت کاملاً حامد تشکیل شده است و همانند مدل ضریب درگ است. نسبت منافذ (e) در ماسه ی غیر چسبنده در حدود ۰/۷۵-۰/۳۵ است. اگر بخش جامد از

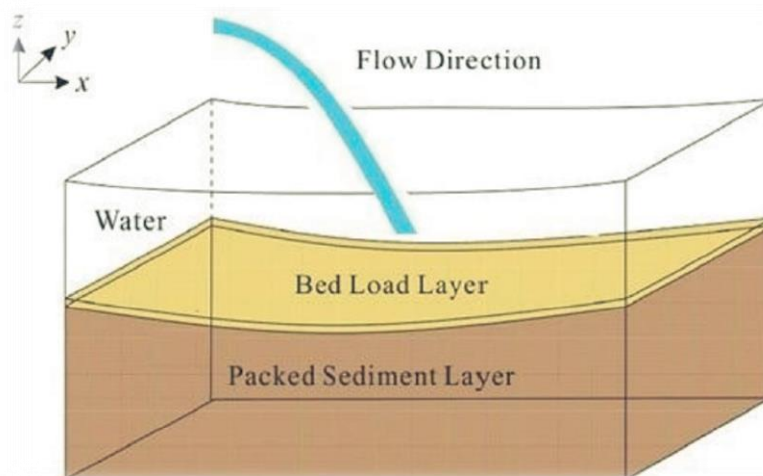
نسبت منافذ بستر رسوب بیشتر شود، μ^* به بالاترین حد ممکن می‌رسد. مقدار بیشینه‌ی μ^* برای α_u تقریباً ۱۸ است. f_1 بخش مایع است. در نواحی که $f_1=0$ است، u_{drift} برابر صفر است. α_u ضریب احتمال بالابرنده‌ی ذرات از سطح بستر توده‌ی رسوب است و برابر $(0 \leq \alpha_u \leq 1)$ می‌باشد. Π_s بردار عمود بر سطح بستر و τ_{crit} تنش برشی بحرانی برای غلبه بر اصطکاک ذرات بستر رسوب است که از روابط شیلدز و یا نمودارهای آن تعیین می‌شود.

$$\theta_{crit} = \Theta = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_s - \rho_1)d} \quad (27-4)$$

مدل بالابرنده‌ی همان مدل بار معلق است که در آن فرض می‌شود. تعلیق در انتقال ذرات بستر مشترک رسوب و سیال نقش اصلی را ایفا می‌کند.

آبستگی به تنش برشی سیال، تنش برشی بحرانی ایجاد کننده‌ی فرسایش و اختلاف چگالی بین سیال و ذرات رسوب بستگی دارد. در Flow-3D انباشت رسوب محدوده‌ی بستر تابعی از $(\tau - \tau_{crit})^{1.5}$ می‌باشد. مدل بالابرنده‌ی حرکت بار بستر را شبیه‌سازی و حجم موضعی فرسایش ناشی از بستر توده‌ی رسوب را پیش‌بینی می‌کند.

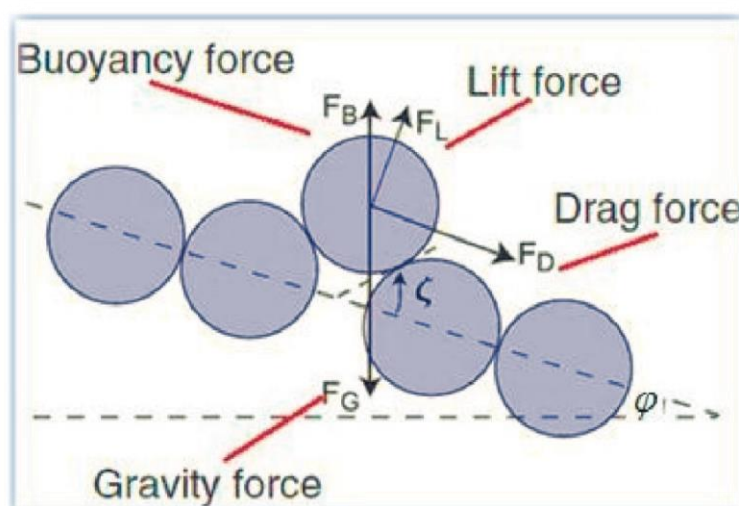
رسوب زمانی تشکیل می‌شود که تنش برشی عادی بستر از تنش برشی بحرانی بیشتر باشد. به عنوان نمونه شکل (۳-۴) مدل رسوب در Flow-3D را تحت جت ریزشی نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴) : مدل رسوب در ۳D Flow تحت جت ریزشی

عامل مهم دیگری که بر تغییرات شیب بستر و استانه‌ی حرکت ذرات رسوب در جریان‌های ایستایی تاثیر می‌گذارد، زاویه‌ی ایستایی است. یک زاویه‌ی ایستایی کوچک شرایط آسانتری را برای لغزش فراهم می‌کند. درحالی‌که زوایای ایستایی بزرگ در ذراتی وجود دارد که شروع لغزش برای آنها مشکل‌تر است. در مدل آبشستگی رسوبات در ۳D-Flow زاویه‌ی ایستایی یک پارامتری است که با واحد درجه در قسمت ورودی نرم‌افزار برای مدل‌سازی وارد می‌شود.

زاویه‌ی گسیختگی واقعی ϕ از ضرب نقطه‌ای بردار نرمال سطح مشترک (بین رسوب و آب) و بردار ثقل (جاذبه) به دست می‌آید.



شکل (۴-۴) نیروهای وارد بر ذرات رسوب در سطح شیب‌دار

مدل مورد نظر به وسیله‌ی تغییر دادن و عوض کردن تنش برشی بحرانی در سطح مشترک شیب‌دار به کار گرفته می‌شود. جایی که ϕ صفر است (یعنی یک سطح افقی با در نظر گرفتن جاذبه). تنش برشی بحرانی موثر برابر است با تنش برشی بحرانی τ_{crit} روی سطح مشترک‌های شیب‌دار تنش برشی بحرانی برابر است با:

$$\tau_{crit} = \tau_{crit}^0 \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \phi}{1 - \sin^2 \zeta}} \quad (28-4)$$

قابل توجه است که وقتی شیب سطح مشترک محلی ϕ با زاویه‌ی گسیختگی ζ برابر باشد، $\tau_{crit} = 0$ خواهد بود. در مجموع مدل مورد نظر مقدارهای منفی τ_{crit} را در جائیکه $\phi > \zeta$ باشد پیش‌بینی می‌کند. در چنین موقعیتی رسوبات حتی در نبود عمل برش به وسیله‌ی سیال به صورت خود به خود فرسایش پیدا می‌کنند. حرکت رسوبات معلق در سیستم در نظر گرفته شده به وسیله‌ی معادله‌ی پخش انتشار-انتقال^۱ توصیف شده است. با در نظر گرفتن مجموع تاثیرات شناوری و بلندشدگی رسوبات، داریم:

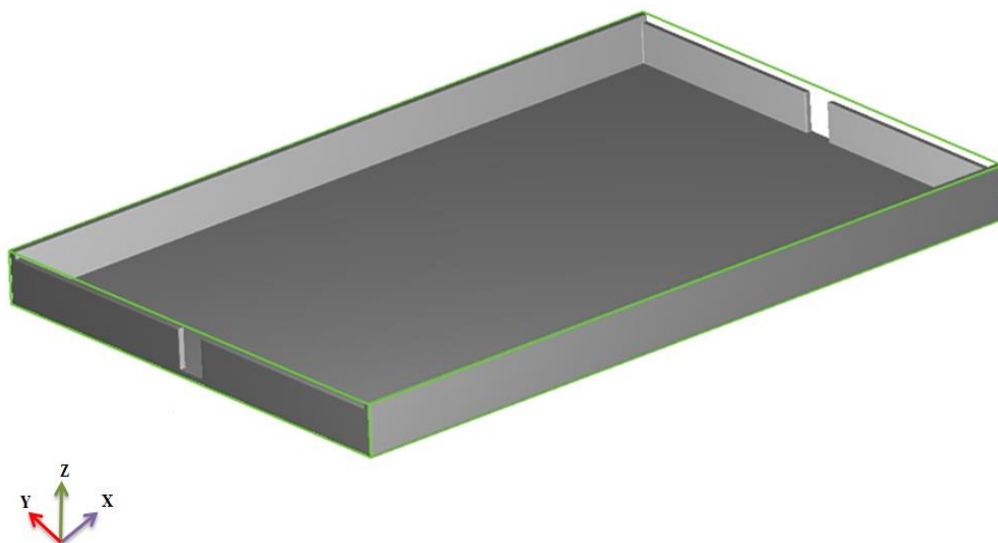
$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t} \right)_x + u \cdot \nabla C_s = D \nabla^2 C_s - u_{lift} \cdot \nabla C_s - u_{drift} \cdot \nabla C_s \quad (29-4)$$

که در آن u سرعت محلی سیال، u_{drift} و u_{lift} به ترتیب سرعت شناوری و سرعت بلندشدگی می‌باشد. سرعت بلندشدگی همه جا وجود دارد به جز در مجاورت و همسایگی سطح مشترک رسوبات ته‌نشین شده، جایی که تنش برشی محلی از τ_{crit} بیشتر می‌شود. D ضریب انتشار است که در Flow-۳D این ضریب تحت نام ضریب مولکولی معرفی شده است. C_s غلظت رسوبات معلق است. مقدار u_{drift} در ناحیه‌ای که تنش برشی بستر از تنش برشی بحرانی کمتر است، برابر صفر است؛ یعنی در حرکت رسوب معلق بالابردگی نقشی ندارد و در سطح مشترک توده‌ی رسوب تاثیرگذار است.

^۱ Advection-Diffusion

۹-۴ مراحل معرفی هندسه ی مدل به نرم افزار FLOW-۳D

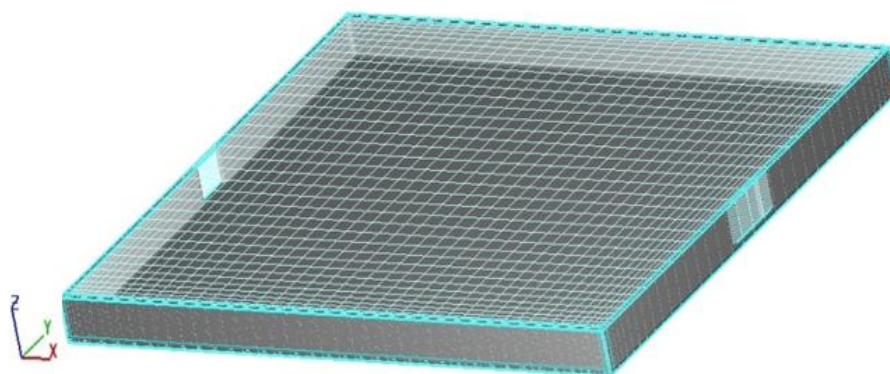
برای تهیه ی هندسه ی مدل از امکانات ترسیمی خود نرم افزار استفاده شده است. در این نرم افزار، مدل سه بعدی ترسیم و با فرمت (*.stl) ذخیره شده است. در شکل زیر یک مخزن از نوع مستطیلی نشان داده شده است:



شکل (۴-۵) مدل فیزیکی سه بعدی در FLOW-۳D

۹-۴-۱ مش بندی مدل

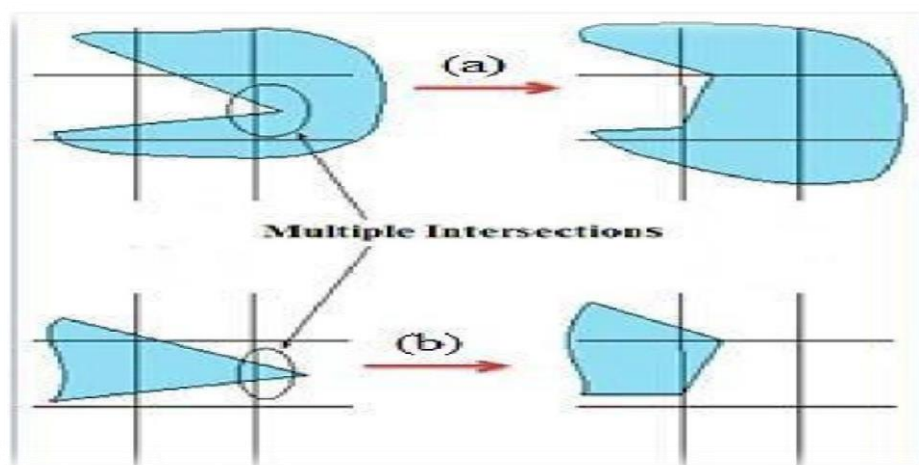
برای شبیه سازی، از یک بلوک تک به صورت یکپارچه مدل را احاطه نموده استفاده شده است.



شکل (۴-۶) الگوی مش بندی نهایی

۴-۹-۲ حساسیت سنجی سلول محاسباتی

حساسیت به شبکه بندی و انفصال میدان حل، همواره یکی از مسائل مهم در مدل های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه بندی مختلفی ارائه شده است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود هستند. Flow-۳D نسبت به مرزهای جامد و شبکه بندی نحوه ی برخورد متفاوتی در مقایسه با سایر بسته های نرم افزاری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارد. همانطور که در بخش ۷-۴ اشاره شد، Flow-۳D از روش کسر مساحت-حجم مانع استفاده می کند. در این روش، شکل نهایی موانع به شبکه ی ساخته شده در اطراف آنها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه های تیز، مقعر و یا محدب باشد ممکن است محل تقاطع چندگانه به وجود آید. این حالت هنگامی رخ می دهد که یک پاره خط شبکه بیش از یکبار توسط مانع قطع شود. در چنین حالتی قسمت واقع شده در یک سلول در تشکیل جسم مورد نظر توسط نرم افزار شناسایی نمی گردد و مطابق شکل (۷-۴)، شکل های سمت چپ به فرم شکل های سمت راست در می آید.



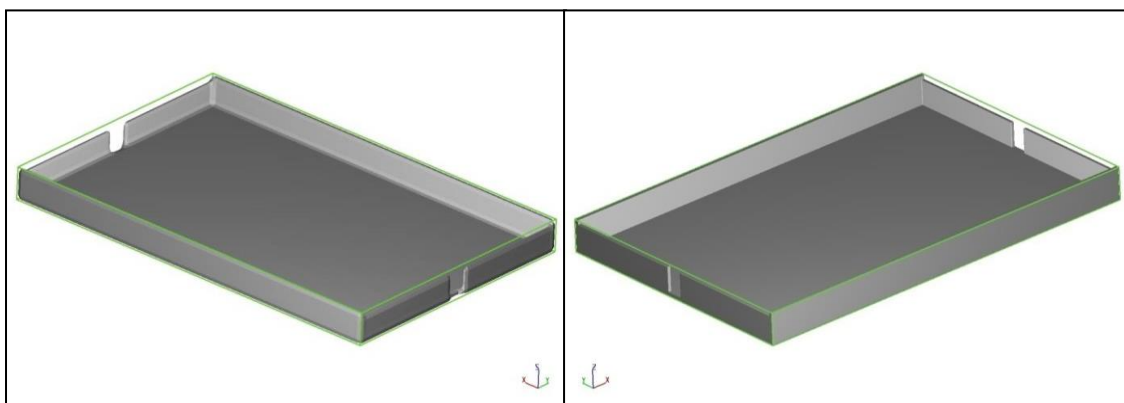
شکل (۷-۴) تغییر شکل موانع به دلیل تقاطع چندگانه در شبکه بندی Flow-۳D

برای مشخص کردن حدود شبکه بندی، بلوک هایی مشخص می شود که کلیه ی اندازه های سازه ی مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می شود. می توان تمام جزئیات مورد نظر را در یک بلوک

هم در نظر گرفت. یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار Flow-3D این است که می‌توان میدان محاسباتی را به چند بلوک تقسیم کرد و در هر بلوک بسته به شرایط از مش مناسبی استفاده نمود. هر بلوک، قسمتی از میدان محاسباتی را در بر می‌گیرد. این کار را به دو صورت می‌توان انجام داد:

- (۱) بلوک‌های متوالی و کنار هم به صورتی که هیچگونه همپوشانی نداشته باشند.
- (۲) بلوک‌های درهم به شکلی که یکی از بلوک‌ها کاملاً در بلوک دیگری قرار بگیرد.

مقادیر کمیت‌ها با روش عددی در هر بلوک محاسبه می‌شوند؛ سپس این مقادیر از یک بلوک به بلوک دیگر با استفاده از درونیابی منتقل می‌شوند به شکلی که پیوستگی برقرار باشد. روش درونیابی برای تبادل داده‌ها با توجه به نوع متغیرها متفاوت است. در شکل (۴-۸) نحوه‌ی عملکرد روش FAVOR با مرزهای جامد را در مش‌بندی ریز و درشت با ابعاد مختلف و بلوک‌های چندگانه نشان می‌دهد.



(ب) شبکه‌بندی با ابعاد $6 \times 6 \times 6$

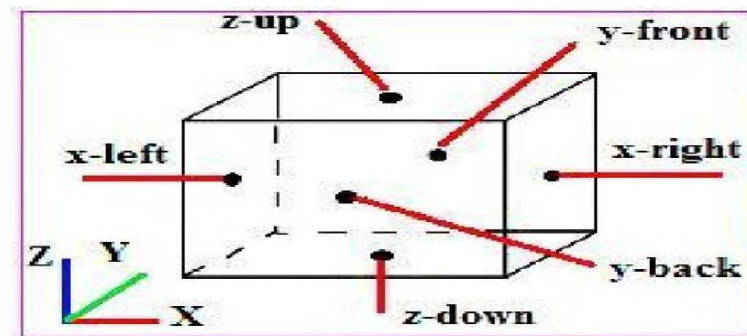
(الف) شبکه‌بندی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$

شکل (۴-۸) عملکرد روش FAVOR بر روی مرزهای جامد با ابعاد مختلف

بطور کلی می‌توان گفت که ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه‌بندی مدل عددی، به ویژه در مدل‌هایی با هندسه‌ی پیچیده، بزرگترین محدودیت می‌باشد و انتخاب مناسب آن می‌تواند دقت محاسبات را افزایش دهد.

۴-۹-۳ شرایط مرزی

در نرم افزار Flow-۳D برای تعریف شرایط مرزی، شش سطح مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها، شامل x -left x -right y -front y -back z -up z -down می باشد. شکل (۴-۸) سطوح مشخص شده بر روی بلوک شش وجهی در دستگاه دکارتی را نشان می دهد.



شکل (۴-۹) سطوح مشخص شده بر روی بلوک شش وجهی در دستگاه دکارتی

شرایط مرزی برای هر بلوک محاسباتی تعریف می شود. تعداد و شرایط مرزی که در این نرم افزار استفاده می شود، ۱۰ مورد است که در جدول (۴-۴) آورده شده است.

جدول (۴-۴) شرایط مرزی مورد استفاده در نرم افزار FLOW-۳D

ردیف	شرایط مرزی	ردیف	شرایط مرزی
۱	Symmetry	۶	Specified Velocity
۲	Wall	۷	Wave
۳	Continutive	۸	Volume Flow rate
۴	Specified Pressure	۹	Out Flow
۵	Periodic	۱۰	Grid Overlay

۴-۹-۴ روش عددی تحلیل مدل

در نرم افزار Flow-۳D سه تحلیل گر خطی برای محاسبه ی فشار از سیستم معادلات خطی پیوستگی وجود دارد.

- I. SOR (Successive Over Relaxation)
- II. ADI (Alternative Direction Implicit)
- III. GMRES (Generalized Minimal Residual Solver)

در الگوی GMRES، سیستم معادلات به صورت همزمان با یک تکنیک تکرار بر روی میدان محاسباتی حل می شود. الگوی SOR بسیار ساده است و حافظه ی بیشتری نیاز دارد و به طور کلی برای رسیدن به پاسخ، تعداد تکرار بیشتری می طلبد. در الگوی GMRES تعداد تکرارها برای همگرایی بسیار کمتر است (حدود ۱۰ برابر کمتر از الگوی SOR). تحقیقات نشان داده است که برای بسیاری از مسائل، این الگو کارآمدتر است. در این تحقیق نیز از الگوی GMRES استفاده شده است تا با کاهش تکرار برای همگرایی، موجب صرف جویی در آنالیز شود.

فصل پنجم :

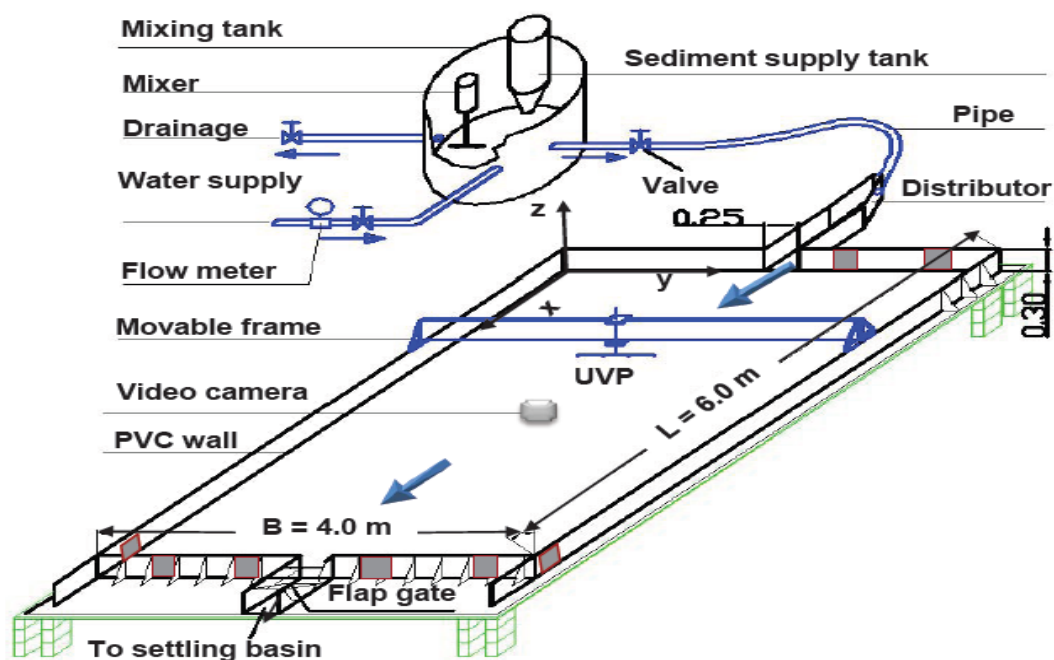
مدل سازی

۵-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا به معرفی مدل‌های آزمایشگاهی و بررسی کارهایی که در آزمایشگاه پیرامون موضوع انجام گرفته است، پرداخته خواهد شد، (کانتوش ۲۰۰۷). در ادامه کارهای انجام شده، سه مخزن سطحی را برای انجام مدل‌سازی‌های خود انتخاب می‌کنیم. در فرایند مدل‌سازی ابتدا وارد بحث صحت سنجی شده و نتایج حاصله از نرم افزار را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه خواهیم کرد. بعد از آن طی مراحل مدل‌سازی، تاثیرات تغییر در پارامترهای مختلف هندسی مخزن و مشخصات جریان ورودی را بر روی بازدهی مخازن در امر تله اندازی رسوب موجود در جریان مورد بررسی می‌گردد. در پایان با رسم گراف‌های مقایسه‌ای، مخزنی که بیشترین درصد تله اندازی رسوب را دارا باشد مشخص می‌گردد.

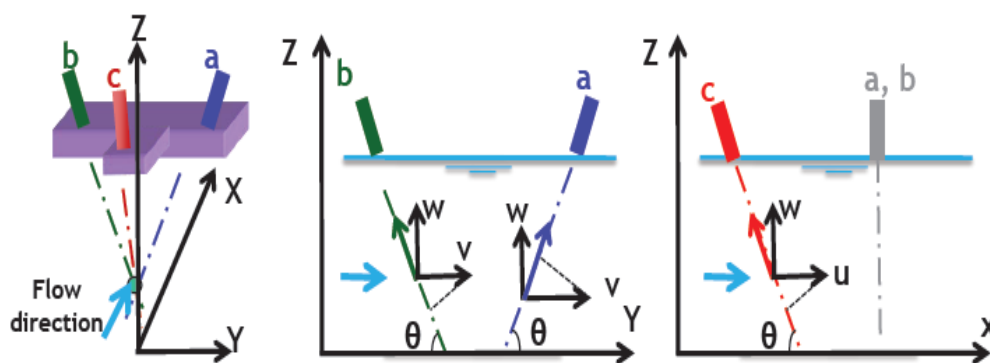
۵-۲ مطالعات آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی موجود مربوط به بررسی میزان رسوب‌گیری مخازن کم‌عمق و بررسی تاثیر هندسه بر روی الگوهای جریانی و رسوبی می‌باشد. در مجموع ۱۱ مخزن با نسبت‌های ابعادی مختلف در آزمایشگاه بررسی و برای شبیه‌سازی ذرات معلق (رسوبات) طبیعی در آزمایشگاه از پوست خرد شده گردو استفاده شده است، (کانتوش ۲۰۰۷). در شکل (۵-۱) شمایی کلی از دستگاه‌ها و مخزن مورد استفاده را مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۵) شمایی کلی از مخزن و متعلقات آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)

برای برداشت‌ها از دوربین‌های پیشرفته و سرعت‌سنج سه بعدی LSPIV^۱ و دستگاه UWS^۲ برای اندازه‌گیری ضخامت لایه رسوب نهشت شده بهره برده‌اند. در شکل (۲-۵) نحوه جایگذاری سنسورهای سنجش سرعت ملاحظه می‌گردد.



شکل (۲-۵) نحوه برآورد سرعت سنج های LSPIV، (کانتوش ۲۰۰۷)

^۱ Large-Scale Particle Velocimetry

^۲ Mini-Echo Sounder

۳-۵ صحت سنجی

در این بخش به منظور صحت سنجی مدل سازی های انجام شده توسط نرم افزار، نتایج بدست آمده از مدل سازی ها را با داده های آزمایشگاهی مقایسه خواهیم کرد. در ابتدا شرحی از مدل سازی ها و شرایط مرزی^۱ گفته خواهد شد و سپس به بررسی تعداد بهینه سلول محاسباتی خواهیم پرداخت. در نهایت مقایسه ها را در دو قسمت جریان آب شفاف و جریان آب محتوی رسوب بطور مجزا انجام خواهیم داد.

۱-۳-۵ شرایط مرزی

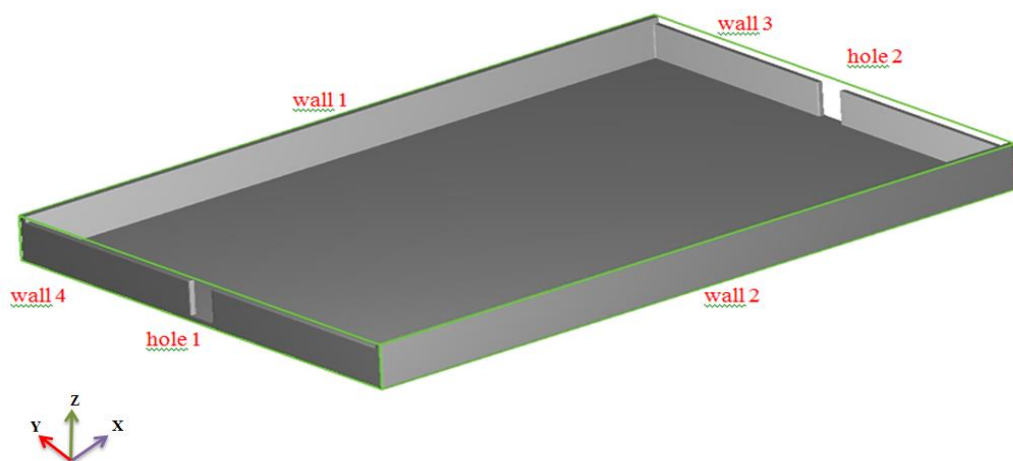
در نرم افزار مربوطه همانطور که قبلا گفته شد ۱۰ شرط مرزی آورده شده است. با توجه به هندسه مخزن و نحوه جریان داخل آن شرایط آورده شده در جدول (۱-۵) مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۱-۵) شرایط مرزی

نام	شرایط مرزی	نام	شرایط مرزی
Wall ۱	Wall	Hole ۲	Specified pressure
Wall ۲	Wall	Hole ۱	Specified velocity
Wall ۳	Wall	Sath	Specified pressure
Wall ۴	Wall	Bed	Wall

نمایی کلی از هندسه مخزن و نامگذاری های انجام شده در شکل (۳-۵) ارائه می گردد.

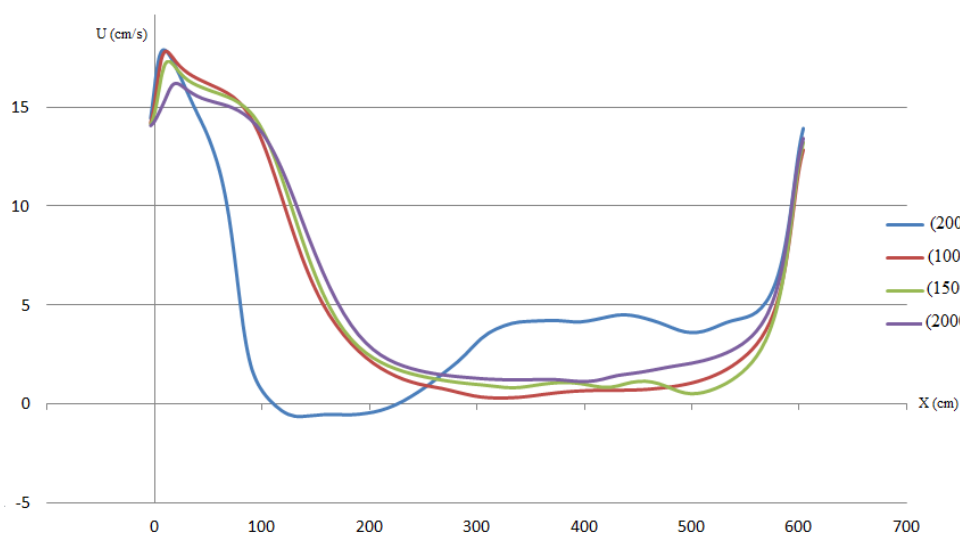
^۱ Boundry conditions



شکل (۳-۵) نمایی کلی از مخزن و شرایط مرزی

۵-۳-۲ تعداد بهینه سلول محاسباتی

به منظور تعیین تراکم بهینه سلول‌های محاسباتی در مدل‌سازی‌ها، سعی‌های عددی مختلفی بر روی پارامترهای جریان انجام گردید، سپس مقادیر پارامترهای جریان در مقاطع با هم مقایسه شد. بعنوان نمونه پروفیل سرعت در خط مرکزی مخزن به ابعاد 4×6 برای ۴ میزان سلول محاسباتی متفاوت رسم گردیده است که نتایج آن در گراف مقایسه‌ای در شکل ۴-۵ آورده شده است.



شکل (۴-۵) سرعت در راستای محور X

در شکل بالا محور عمودی نشان دهنده سرعت و محور افقی طول مخزن را نشان می‌دهد. هر یک از نمودارهای سرعت رسم شده مربوط به مقداری متفاوت از سلول محاسباتی می‌باشد.

با توجه به شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود در تراکم‌های ۴و۳، نتایج به یکدیگر بسیار نزدیک شده‌اند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تعداد سلول محاسباتی ۱۰۰۰۰۰ برای مدل‌سازی‌ها قابل قبول می‌باشد. حال با توجه به شرایط مرزی ذکر شده و تعیین مقدار سلول‌های محاسباتی، در بخش بعدی بحث صحت سنجی برای جریان آب شفاف و حاوی رسوب بیان می‌شود.

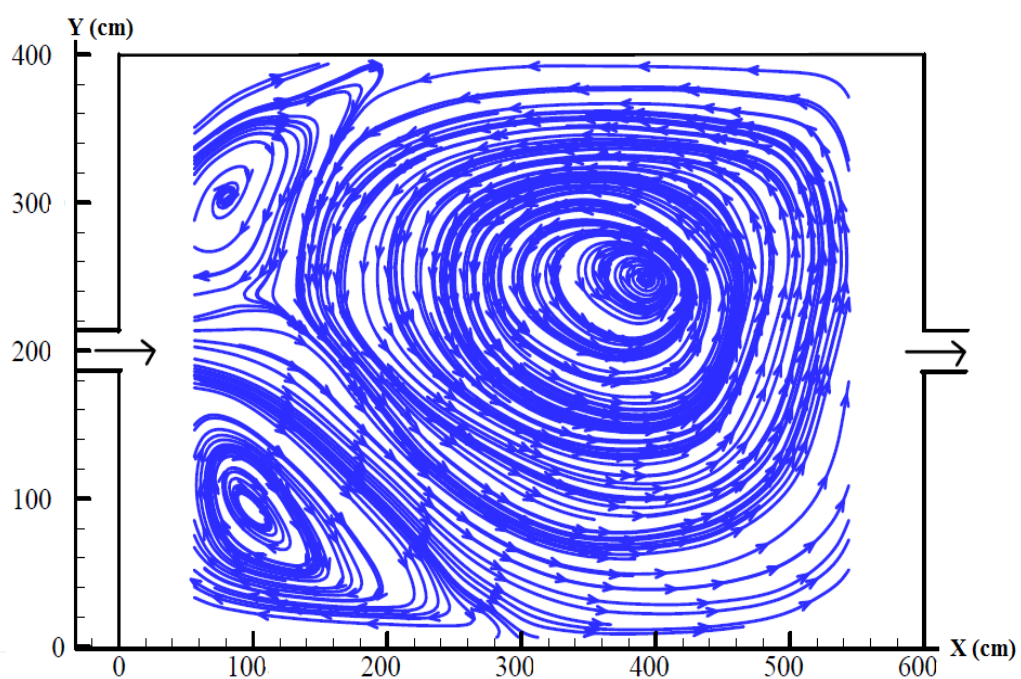
۵-۳-۳ جریان آب شفاف

در این مدل‌سازی، جریان بدون مواد رسوبی وارد مخزن می‌شود. بررسی داده‌های خروجی از نرم‌افزار و مقایسه آن با داده آزمایشگاهی دستگاه LSPIV مطلوب این بخش می‌باشد.

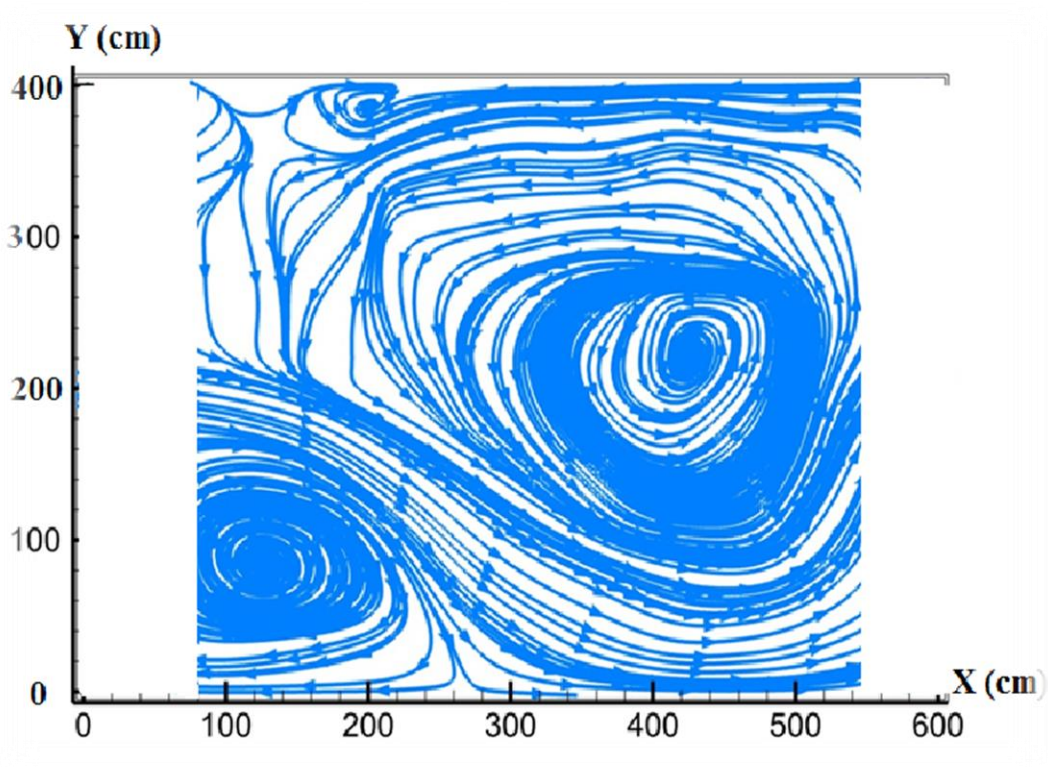
مشخصات جریان به قرار زیر می‌باشد:

مخزن به ابعاد ۴*۶	دبی : ۷ لیتر بر ثانیه	ارتفاع جریان: ۰.۲ متر
عدد فرود: ۰.۱	عدد رینولدز: ۲۸۰۰۰	

از نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های بالا، شکل‌های (۵-۵) تا (۸-۵) رسم گردیده‌اند.

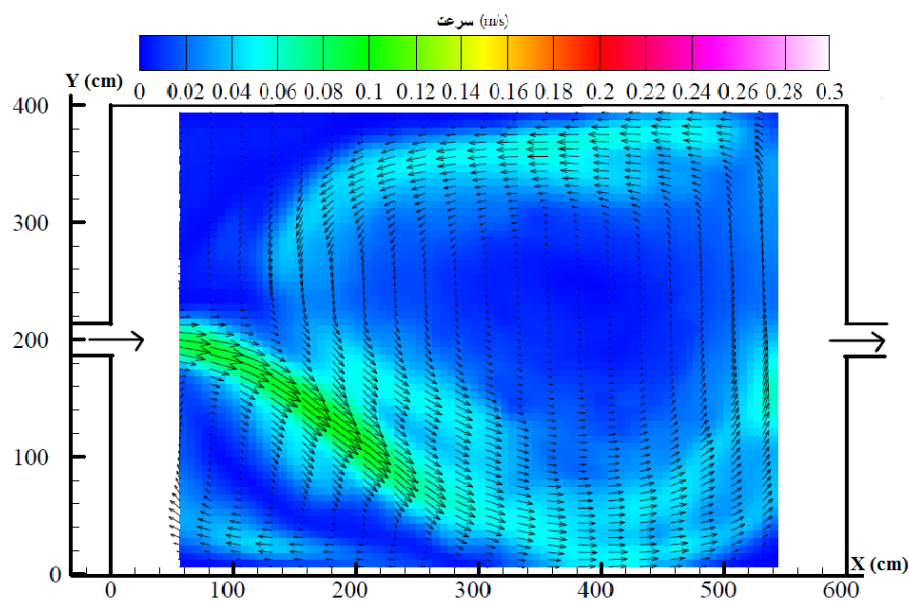


شکل (۵-۵) الگوی خط جریان بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)

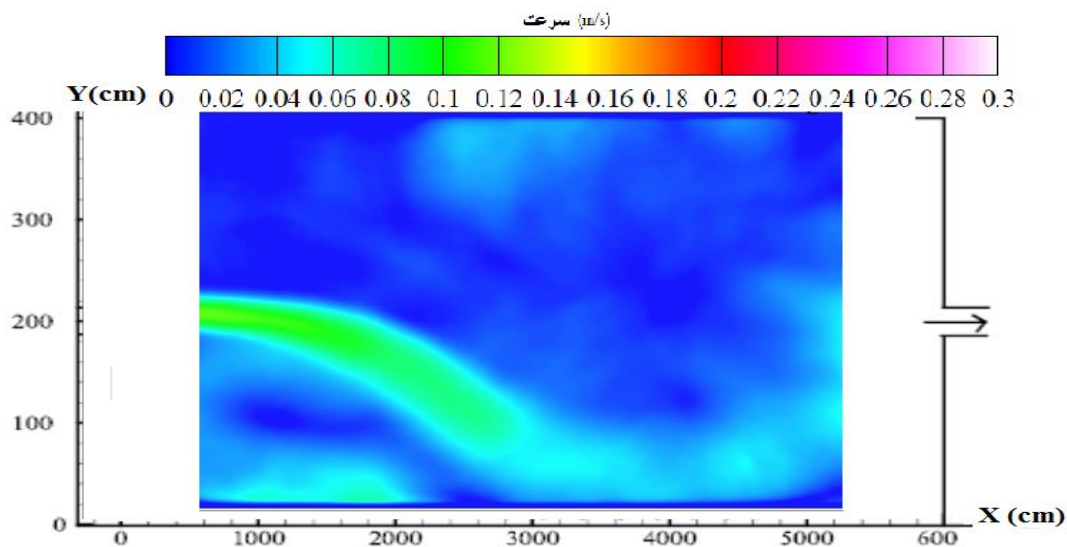


شکل (۵-۶) الگوی خط جریان بدست آمده از داده‌های عددی

تصاویر فوق نشان دهنده‌ی خطوط جریان در مخزن می‌باشد. محور افقی طول و محور عمودی عرض مخزن را نشان می‌دهد. شکل‌ها تقریباً دارای تقارن الگوی جریان می‌باشند. در شکل گردابه‌هایی ایجاد شده که می‌توان آن‌ها را عامل نهشت رسوب دانست. شکل (۷-۵) و (۸-۵) که در پایین نمایش داده شده‌اند، بیانگر توزیع سرعت در مخزن می‌باشند.



شکل (۷-۵) اندازه سرعت بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، (کانتوش ۲۰۰۷)



شکل (۸-۵) اندازه سرعت بدست آمده از نتایج عددی

شکل‌های بالا نشان می‌دهند که مدل‌سازی‌ها با نرم‌افزار بخوبی انجام گرفته است و این نرم افزار قابلیت مدل‌سازی جریان در مخازن سطحی را دارد.

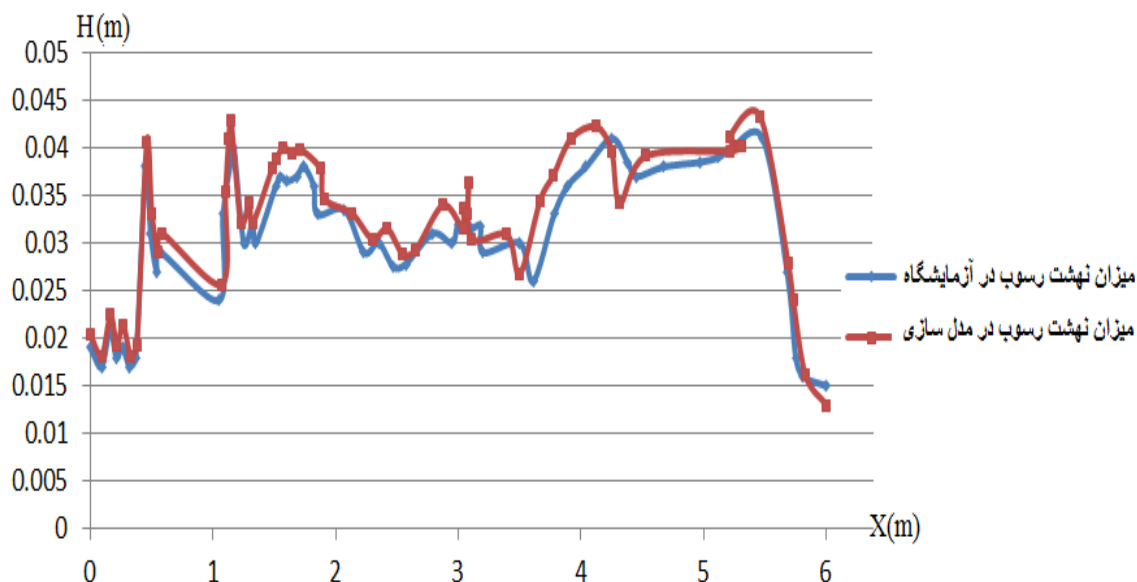
۵-۳-۴ جریان آب محتوی رسوب

در این بخش مخزن مستطیلی با ابعاد ۶*۲ متر را انتخاب و هدف، مقایسه میزان رسوب نهشت شده در مخزن مدل‌سازی شده با میزان رسوب نهشت شده در مخزن آزمایشگاه می‌باشد. اطلاعات اولیه مربوط به سیال و رسوب و حوضچه مدل‌سازی در جدول زیر آمده است .

جدول (۵-۲) اطلاعات اولیه مربوط به سیال و رسوب

عنوان	مقدار
طول مخزن (متر)	۶
عرض مخزن (متر)	۲
دبی (لیتر بر ثانیه)	۷
عمق آب (متر)	۰/۲
عدد فرود	۰/۱
عدد رینولدز	۲۸۰۰۰
قطر ذرات رسوب (میکرو متر)	۵۰
دانسیته رسوب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۵۰۰

در ادامه نمودار نتایج مربوط به مدل سازی ارائه گردیده است. شکل (۵-۹) پروفیل رسوب انباشته شده در بستر مخزن را بعد از ۴/۵ ساعت در مقطع $y=1$ نمایش می دهد.



شکل(۵-۹) پروفیل نهشت رسوب در مخزن (۱) داده های آزمایشگاهی،(کانتوش ۲۰۰۷)

(۲) داده های عددی

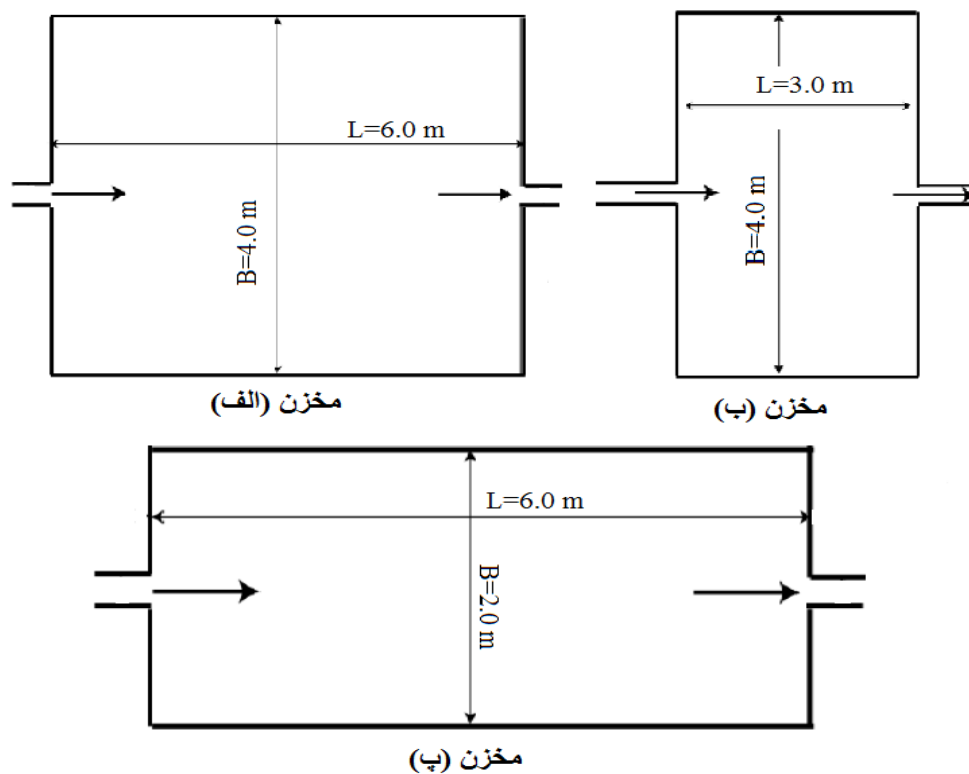
در شکل فوق محور افقی طول مخزن و محور عمودی میزان رسوب نهشت شده را در خط عرضی ۱ متر نشان می دهد با توجه به شکل می توان گفت که مدل سازی با دقت قابل قبولی انجام شده است. میزان خطا موجود در مدل را می توان به سائز سلول های محاسباتی مرتبط دانست. با کاهش سائز سلول های محاسباتی می توان خطاهای موجود را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش داد. از این رو با توجه به محدودیت های موجود در انتخاب سائز سلول های محاسباتی می توان نتایج فوق را قابل قبول دانست و در نتیجه اقدام به مدل سازی در نرم افزار کرد.

در ادامه این فصل به بررسی تاثیر شکل و هندسه مخازن و موقعیت ورودی و خروجی ها بر روی الگو- های جریانی و میزان ته نشینی رسوب می پردازیم. هدف از این قسمت بررسی درصد تله اندازی

رسوب در مخزن، بررسی آرایش ته نشینی رسوب و بررسی میزان تاثیر هندسه مخزن و سایر پارامترهای جریان بر میزان رسوب گذاری می باشد. در ابتدا امر در این قسمت پارامترهای مهم در مدل سازی را یک به یک بررسی خواهیم کرد.

۴-۵ نسبت ابعادی مخزن

طول و عرض مخزن که بیان کننده هندسه مخزن می باشد از جمله پارامترهای موثر در میزان رسوب گذاری می باشد. شکل (۵-۱۰) نمایی شماتیک از مخازن انتخابی را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۰) نمایی کلی از مخازن

جداول زیر اطلاعات هندسی مربوط به سه مخزن انتخابی را در مدل سازی های نرم افزار بیان می کند.

جدول (۳-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن ۶*۲

۶ × ۲ Basin Dimension			
Name	X Length ^{cm}	Y Length ^{cm}	Z Length ^{cm}
Wall ۱	۶۱۰	۶	۴۰
Wall ۲	۶۱۰	۶	۴۰
Wall ۳	۵	۲۱۰	۳۵
Wall ۴	۵	۲۱۰	۳۵
Hole ۱	۶	۲۵	۴۰
Hole ۲	۶	۲۵	۴۰
Water level	۲۰		

جدول (۴-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن ۶*۴

۶ × ۴ Basin Dimension			
Name	X Length ^{cm}	Y Length ^{cm}	Z Length ^{cm}
Wall ۱	۶۰.۵	۶	۴۰
Wall ۲	۶۰.۵	۶	۴۰
Wall ۳	۵	۴۱۰	۳۵
Wall ۴	۵	۴۱۰	۳۵
Hole ۱	۶	۲۵	۴۰
Hole ۲	۶	۲۵	۴۰
Water level	۲۰		

جدول (۵-۵) اطلاعات مربوط به هندسه مخزن ۳*۴

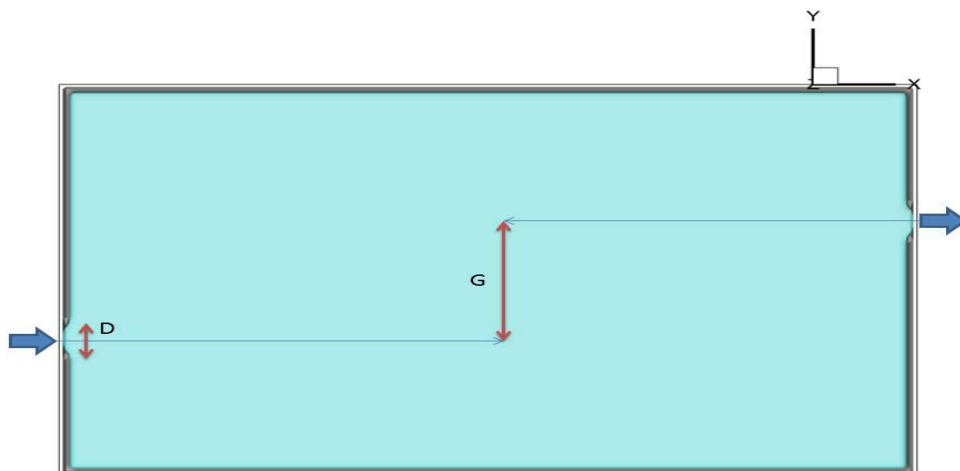
۳ × ۴ Basin Dimension			
Name	X Length ^{cm}	Y Length ^{cm}	Z Length ^{cm}
Wall ۱	۳۱۰	۶	۴۰
Wall ۲	۳۱۰	۶	۴۰
Wall ۳	۵	۴۱۰	۳۵
Wall ۴	۵	۴۱۰	۳۵
Hole ۱	۶	۲۵	۴۰
Hole ۲	۶	۲۵	۴۰
Water level	۲۰		

۵-۵ دبی ورودی به مخازن

دبی ورودی به مخازن، عبارتی میزان حجم جریان ورودی در واحد زمان می‌باشد. داده های آزمایشگاهی موجود فقط برای مقدار دبی ۷ لیتر بر ثانیه می باشد. در ادامه برای مدل سازی‌ها از سه مقدار دبی ، ۷ و ۳۵ و ۶۳ لیتر بر ثانیه استفاده خواهیم کرد و تاثیر تغییرات دبی را بررسی خواهیم کرد.

۵-۶ اندازه حفره ورودی و خروجی و میزان انحراف آن‌ها از یکدیگر

در هندسه تمام مخازن عرض حفره ورودی و خروجی میزان ثابتی می‌باشد. همانطور که در شکل (۵-۹) ملاحظه می‌نمایید عرض حفره با D نمایش داده شده است. پارامتر دیگر موجود در شکل، G می باشد و مبین مقدار انحراف ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر است. در این رساله، این تغییرات در هندسه را با پارامتر G/D نام گذاری می‌نماییم. در مدل سازی‌ها این نسبت از ۰ تا ۱۶ می‌باشد. نسبت $G/D=۰$ به مفهوم این است که ورودی و خروجی مخزن دقیقاً روبروی هم می‌باشند و نسبت $G/D=۱۶$ به مفهوم بیشترین فاصله ممکن ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر می‌باشد.



شکل (۵-۱۱) میزان انحراف حفره ورودی و خروجی از هم

۷-۵ مشخصات مدل سازی

به منظور مدل سازی مخازن انتخابی با هندسه های متفاوت و همچنین دبی های گوناگون ، در شروع نیازمند معرفی سیال می باشیم. در این رساله سیال ترکیبی از آب و رسوب می باشد که باید در دو فاز جداگانه به نرم افزار در قسمت Physics معرفی گردد. غلظت رسوب در جریان ۳ گرم در هر لیتر می باشد. طول کل مدت مدل سازی ۲۰۰۰ ثانیه می باشد و در قسمت General به نرم افزار داده می شود. مدل آشفتگی مورد استفاده LES می باشد که در قسمت Physics نرم افزار قرار دارد. برای انتخاب مدل قسمت Viscosity and Turbulence را تیک زده و در داخل پوشه گزینه LES را انتخاب می کنیم. در جدول (۶-۵) اطلاعات مربوط به فاز آب و رسوب ارائه می گردد.

جدول (۶-۵) اطلاعات مربوط به فاز آب و رسوب

مشخصه	دانسیته (kg/m^3)	ثابت کشش سطحی (N/m)	ویسکوزیته ($\text{N/m}^2\text{s}$)	قطر (μm)	دانسیته (kg/m^3)
مقدار	۱۰۰۰	۰.۰۷۳	۰.۰۰۱	۵۰	۱۵۰۰

در جدول (۷-۵) کلیه سعی های عددی انجام شده در این رساله آورده شده است، در مجموع ۴۲ سعی صورت گرفته است. به علت گرافیکی بودن نرم افزار و ابعاد مدل سازی و تعداد سلول های محاسباتی امکان مدل سازی ها در رایانه های معمولی میسر نبوده است. به این منظور مدل سازی ها در رایانه های پیشرفته مرکز تحقیقات دانشگاه صنعتی شریف اجرا شده اند.

جدول (۷-۵) سعی‌های عددی انجام گرفته

دبی	B/L	G/D	دبی	B/L	G/D	دبی	B/L	G/D
Q=۷ (متر بر ثانیه)	۶*۴	۰	Q=۳۵ (متر بر ثانیه)	۶*۴	۰	Q=۶۳ (متر بر ثانیه)	۶*۴	۰
		۲			۲			۲
		۴			۴			۴
		۸			۸			۸
		۱۶			۱۶			۱۶
	۴*۳	۰		۴*۳	۰		۴*۳	۰
		۲			۲			۲
		۴			۴			۴
		۸			۸			۸
		۱۶			۱۶			۱۶
	۶*۲	۰		۶*۲	۰		۶*۲	۰
		۲			۲			۲
		۴			۴			۴
		۸			۸			۸

در ادامه کلیه سعی‌های عددی که در جدول (۷-۵) معرفی شدند به صورت کامل آنالیز می‌شوند. در بخش‌های پیش رو نتایج بدست آمده را مورد بحث قرار می‌دهیم.

۸-۵ بررسی الگوهای نشست رسوب و بدست آوردن بهینه ترین

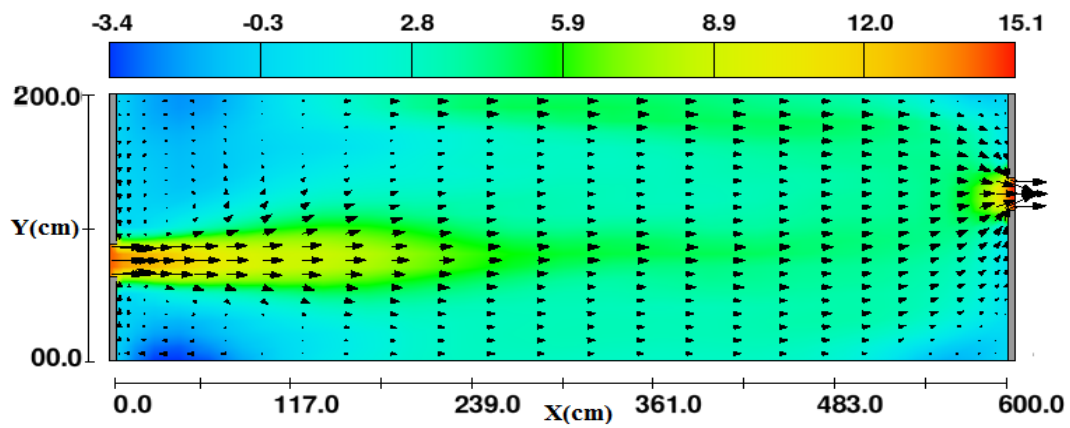
مخزن

به منظور بررسی مقدار تاثیر هندسه مخزن در میزان رسوب نهشت شده چندین مدل مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است. سه مخزن انتخابی با نسبت ابعادی متفاوت در جدول زیر مشخص گردیده است. برای اختصار مخازن به صورت عددی نام گذاری شده است. برای مثال $G^{۳۷۱۶}$ منظور مخزن با ابعاد ۶×۴ و دبی ۷ و نسبت $G/D=۱۶$ می باشد.

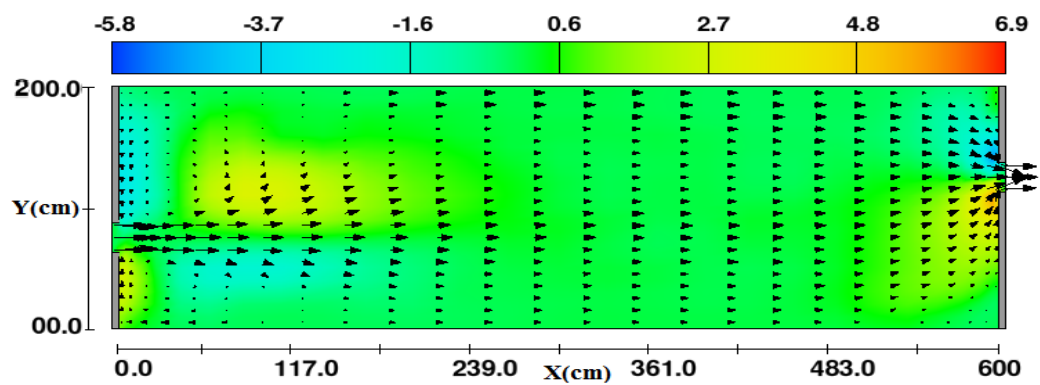
جدول (۸-۵) اطلاعات مربوط به سه گروه مخزن

نام	طول (متر)	عرض (متر)
G_1	۶	۲
G_2	۳	۴
G_3	۶	۴

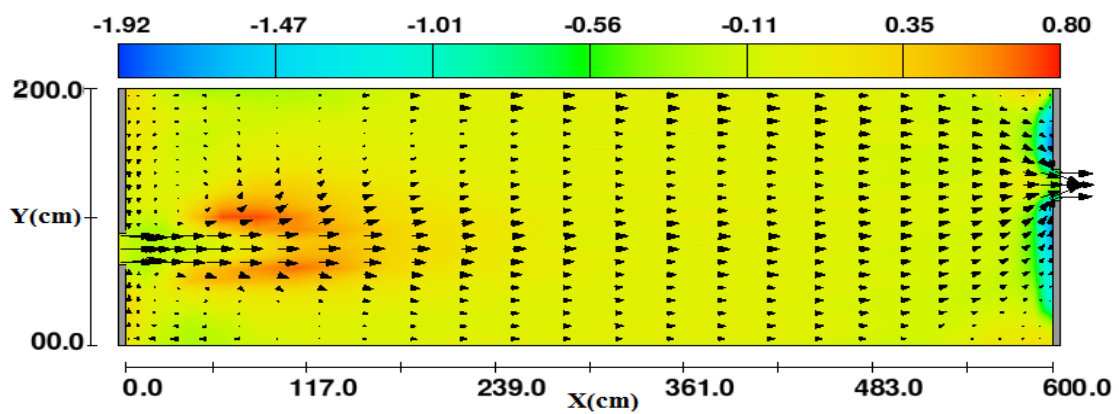
مخازن با نسبت های $G/D=۲$ و دبی ۷ لیتر بر ثانیه مدل سازی می شوند. از مدل سازی ها شکل های (۱۲-۵) استخراج می گردند.



الف) سرعت در راستای (X)



ب) سرعت در راستای (Y)

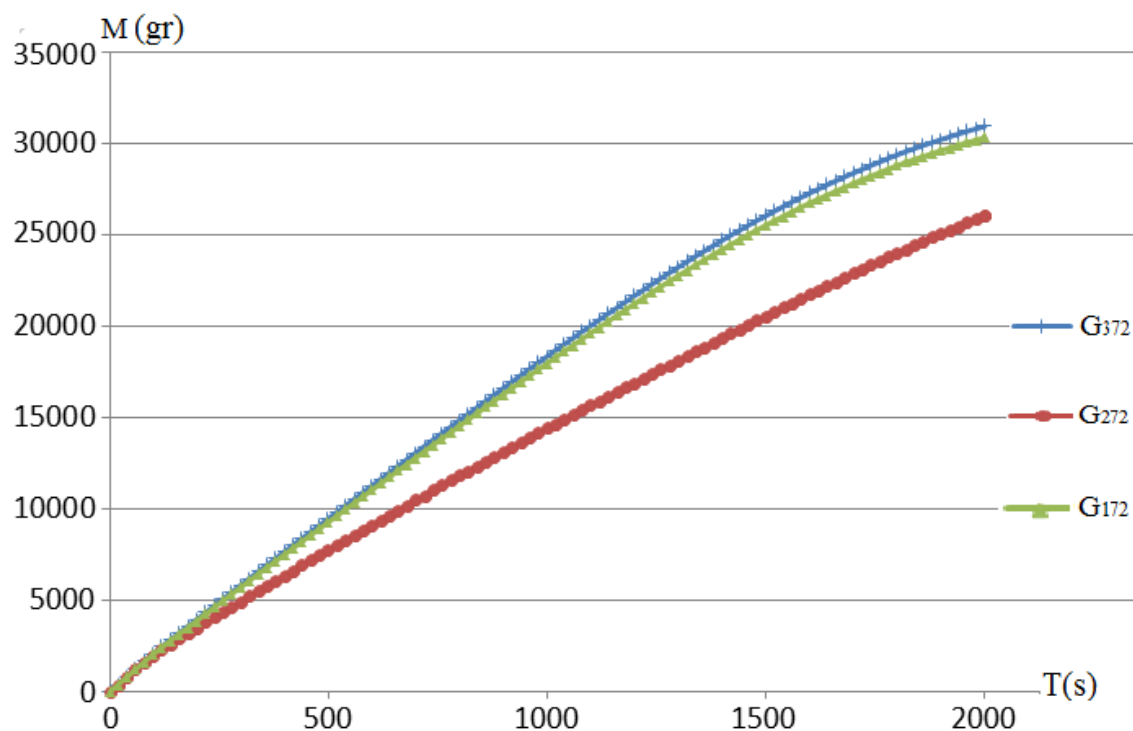


ج) سرعت در راستای (Z)

شکل (۵-۱۲) توزیع سرعت در جهات مختلف در پلان، مخزن G۱۷۲

در شکل‌های (۵-۱۲) محور افقی طول و محور عمود عرض مخزن را نشان می‌دهد. شکل‌ها در ارتفاع ۱۵ سانتی متری از کف مخزن رسم شده‌اند. در شکل‌ها ملاحظه می‌گردد سرعت در جهت جریان (X) نسبت به دو راستای دیگر بیشتر می‌باشد. توزیع سرعت در دو مخزن دیگر نیز به همین صورت می‌باشد.

نمودار زیر میزان نهشت و رابطه آن با گذر زمان برای سه مخزن ذکر شده در جدول (۵-۸) را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۳) میزان رسوب نهشت شده در مخازن

در نمودار فوق محور افقی نشان دهنده زمان و محور عمودی میزان رسوب نهشت شده و یا به عبارتی به تله افتاده در مخزن را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با گذر زمان میزان نهشت رسوب افزایش می‌یابد. با بررسی عددی داده‌های خروجی از نرم‌افزار میزان عملکرد بهینه‌تر مخزن سری G^3 مشهود

می‌باشد . عملکرد بهینه به این معنا که درصد وزنی رسوب ته‌نشین شده در این مخزن نسبت به دو مخزنه دیگر وضعیت مناسب‌تری دارد.

جهت بیان بهتر موضوع جدول (۹-۵)، شکل (۵-۱۳) را بصورت درصد بیان می‌کند.

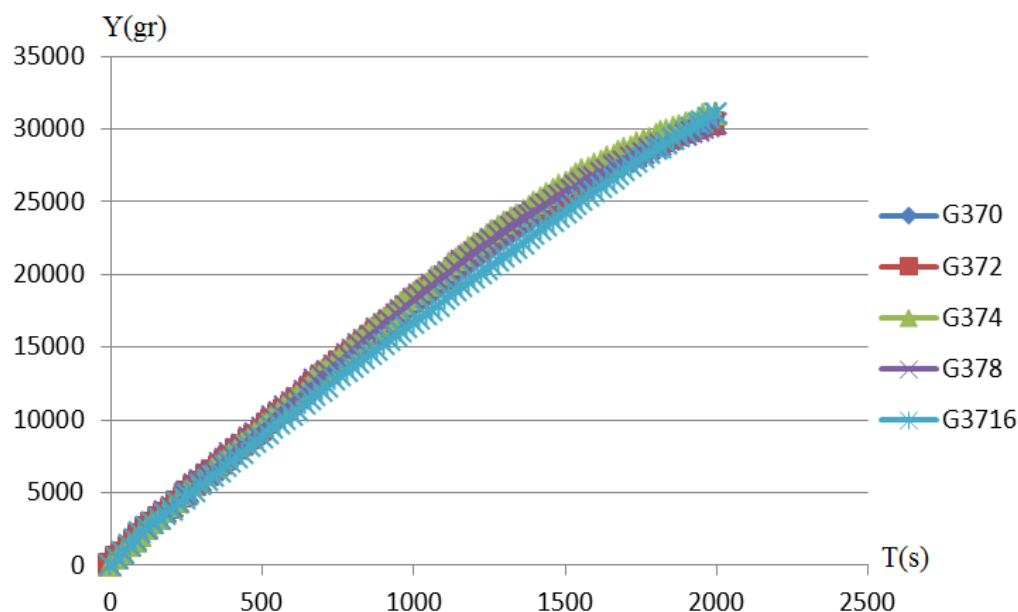
جدول (۹-۵) بیان میزان ته نشینی برحسب درصد

نام	درصد رسوب ته نشین شده
G۲۷۲	۶۲٪
G۱۷۲	۷۱.۱٪
G۳۷۲	۷۲.۵۱٪

از آنجایی که مخزن G۳۷۲ قابلیت‌های بهتری نسبت به مخازن دیگر در مهار رسوب دارد، در قسمت بعد به بررسی هندسه‌های مختلف مخزن G۳ پرداخته خواهد شد. منظور از هندسه‌های دیگر تغییر در مقادیر G/D در این مخزن می‌باشد . تغییر در مقادیر G/D و بررسی وضعیت جریان به انتخاب مخزن بهینه جهت مهار رسوب خواهد انجامید .

در این قسمت گوشه‌ای دیگر از نتایج بدست آمده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج برای مخزن G۳ که دارای ابعاد ۴*۶ بوده، به ازای دبی ۷ لیتر بر ثانیه برای ۵ مقدار مختلف نسبت G/D بررسی می‌شود.

برای بررسی وضعیت مخازن مورد نظر از جهت مهار رسوب، میزان نشست رسوب در این مخازن در نموداری به صورت زیر ارائه می‌گردد.



شکل (۵-۱۴) میزان رسوب تله اندازی شده در مخازن G^۳

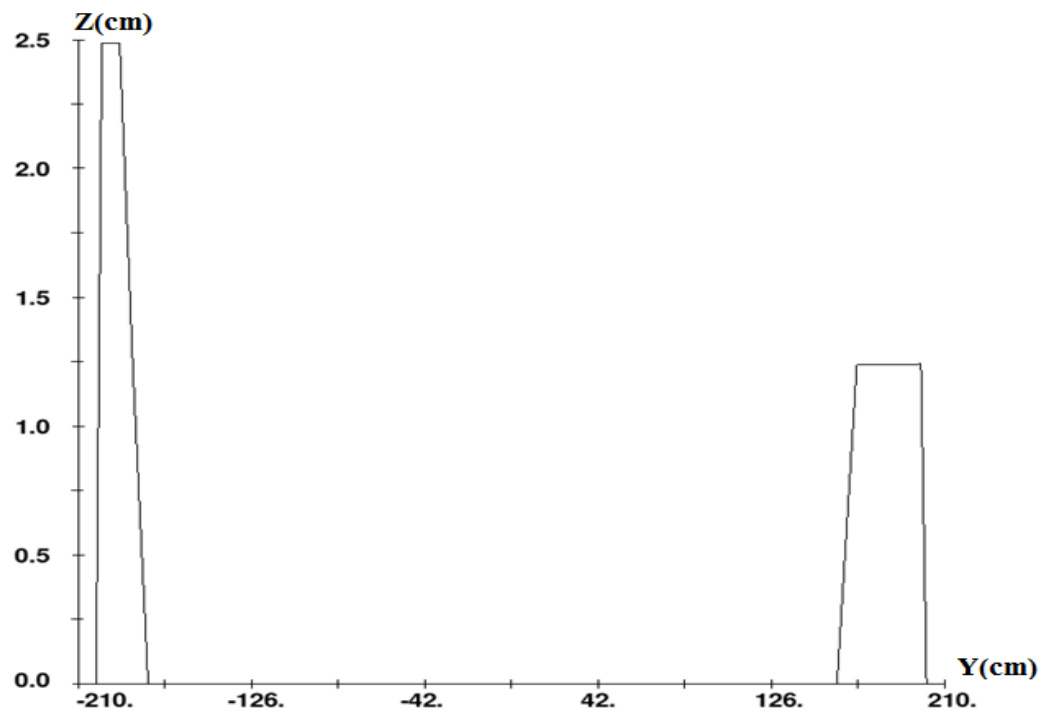
در نمودار فوق محور افقی نشان دهنده زمان و محور عمودی میزان رسوب نهشت شده بر حسب گرم را در مخازن G^۳ را نشان می دهد. با دقت در نمودار فوق می توان دریافت که مخزن G^{۳۷۱۶} بازدهی بیشتری در امر تله اندازی رسوب را دارا می باشد. برای درک بهتر موضوع جدول زیر که میزان نشست رسوب بر حسب درصد را بیان می کند ارائه می گردد.

جدول (۵-۱۰) درصد های رسوب نهشت شده در مخازن G^۳

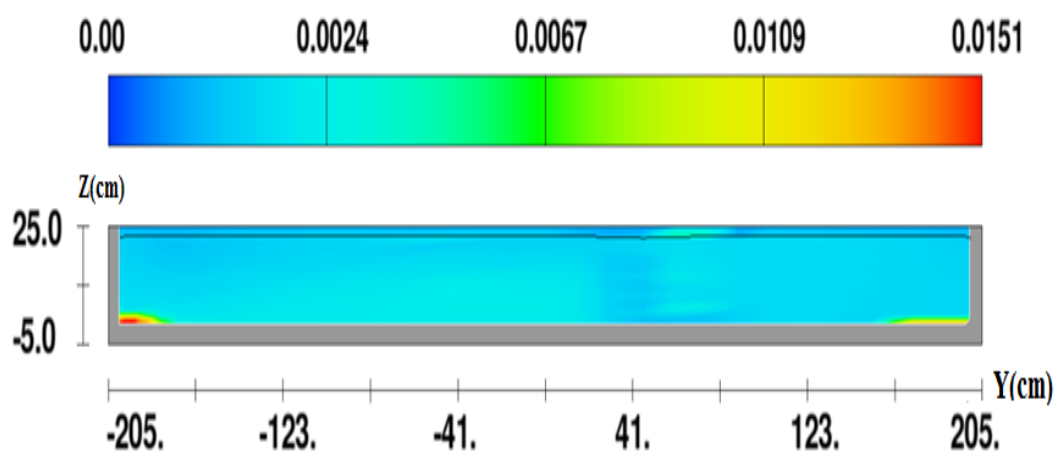
نام	در صد رسوب	نام	در صد رسوب
G ^{۳۷۰}	۷۲.۳۴٪	G ^{۳۷۸}	۷۳.۵۴٪
G ^{۳۷۲}	۷۲.۵۱٪	G ^{۳۷۱۶}	۷۳.۹۴٪
G ^{۳۷۴}	۷۳.۳۱٪		

بررسی عددی نتایج و ارائه آن در جدول فوق بیان می کند که مخزن G^{۳۷۱۶} بهترین وضعیت را دارد همچنین در بررسی های عددی مخازن دیگر نیز مشخص گردید این مخزن، برای دبی ۷ لیتر بر ثانیه.

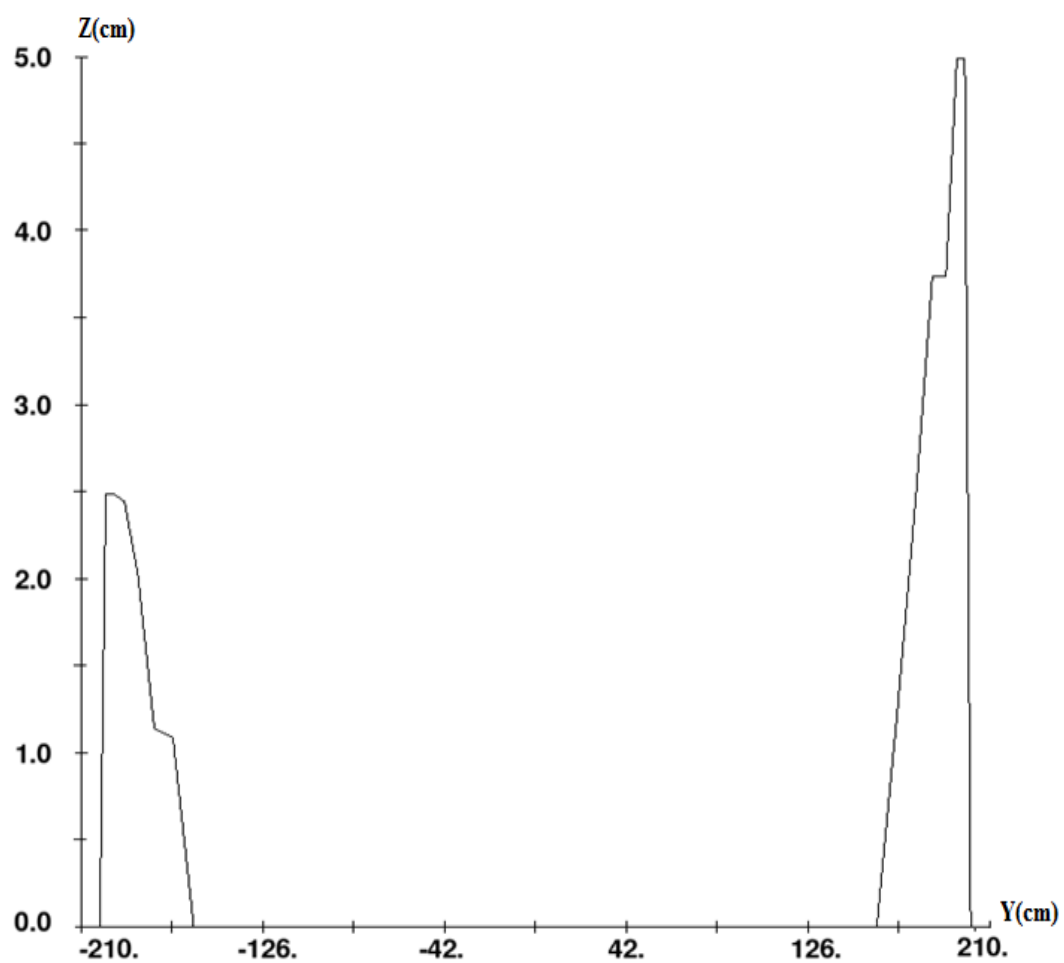
بهترین بازدهی را دارا می‌باشد. در ادامه خروجی‌هایی از نتایج مدل‌سازی مخازن گروه G^3 از نرم افزار Flow-3D برای درک بیشتر ارائه می‌گردد. شکل‌های زیر مقاطعی عرضی در فاصله ۰.۵ متری ورودی مخزن می‌باشند.



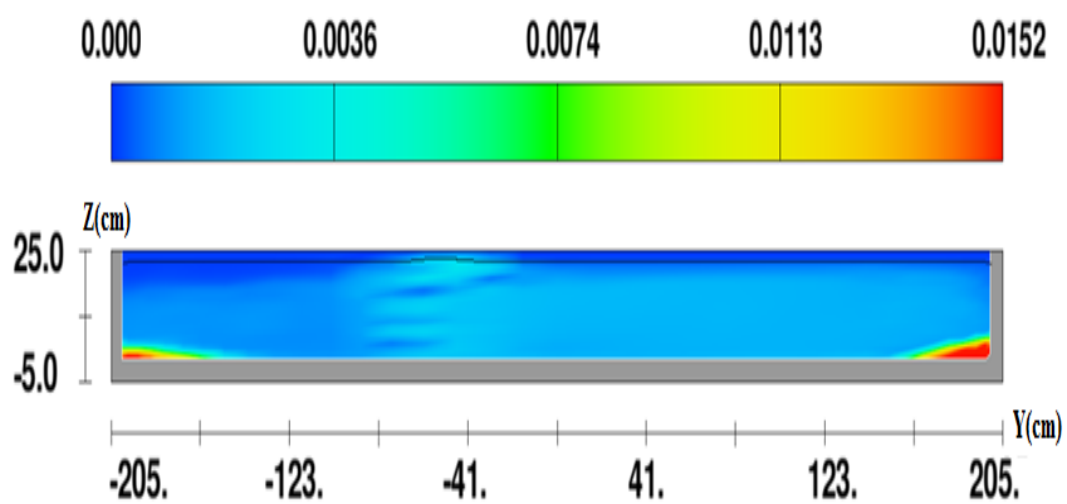
شکل (۵-۱۵) نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G^{370}



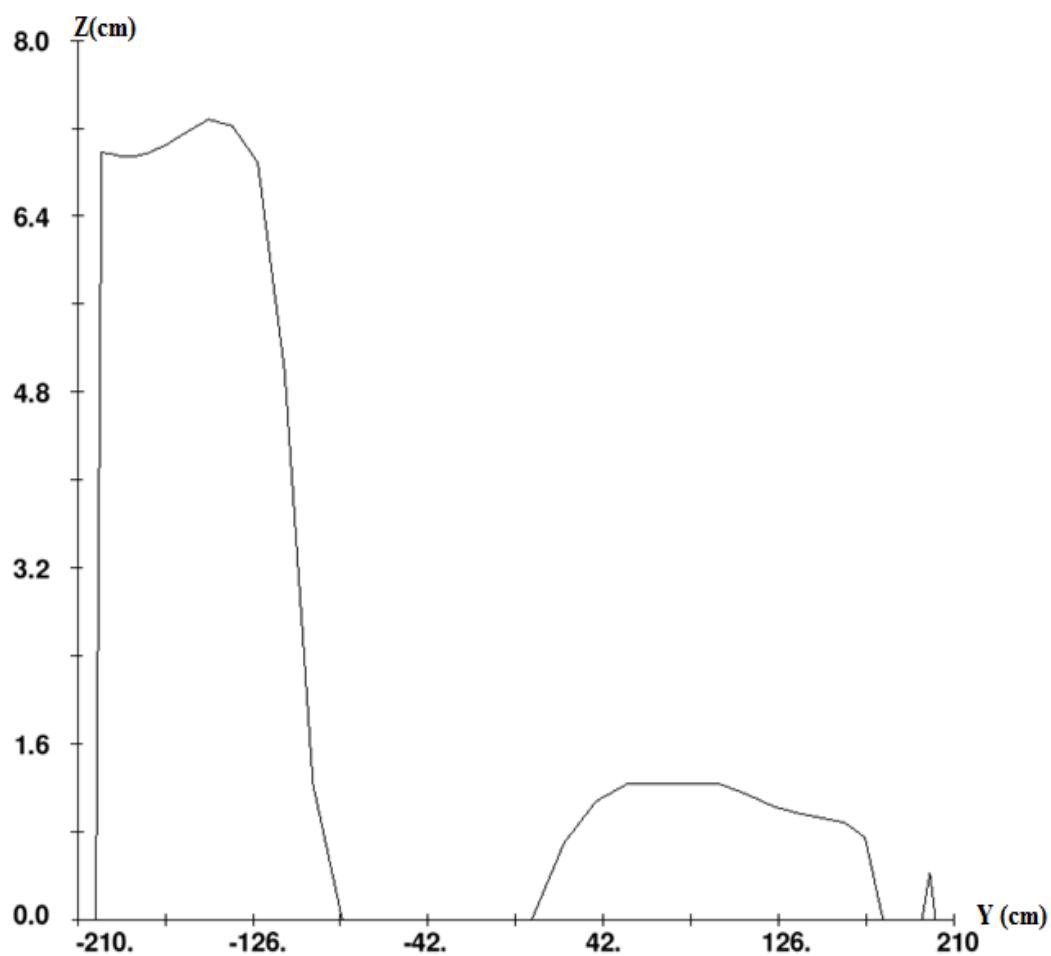
شکل (۵-۱۶) درصد رسوب حجمی موجود در بخش سیال در مخزن G^{370}



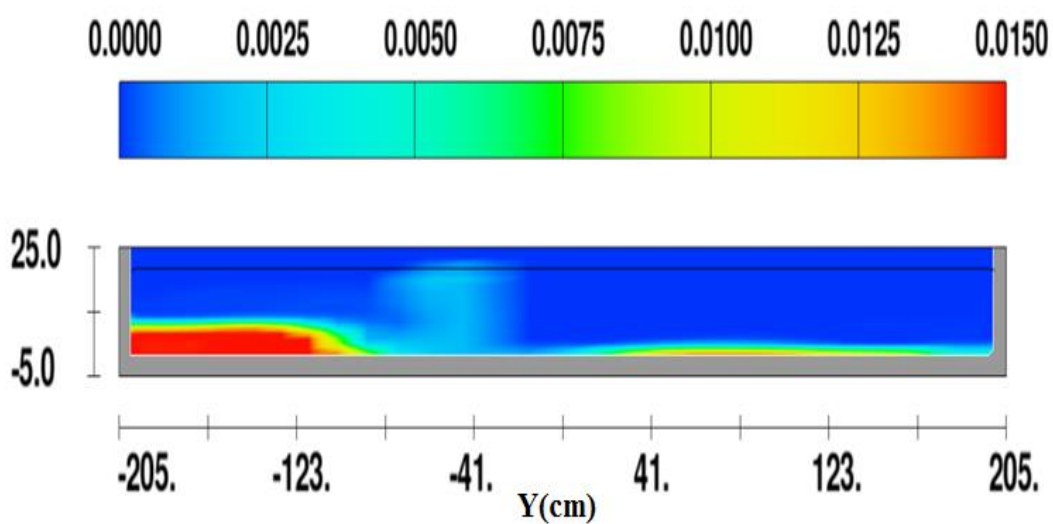
شکل (۱۷-۵) نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۲



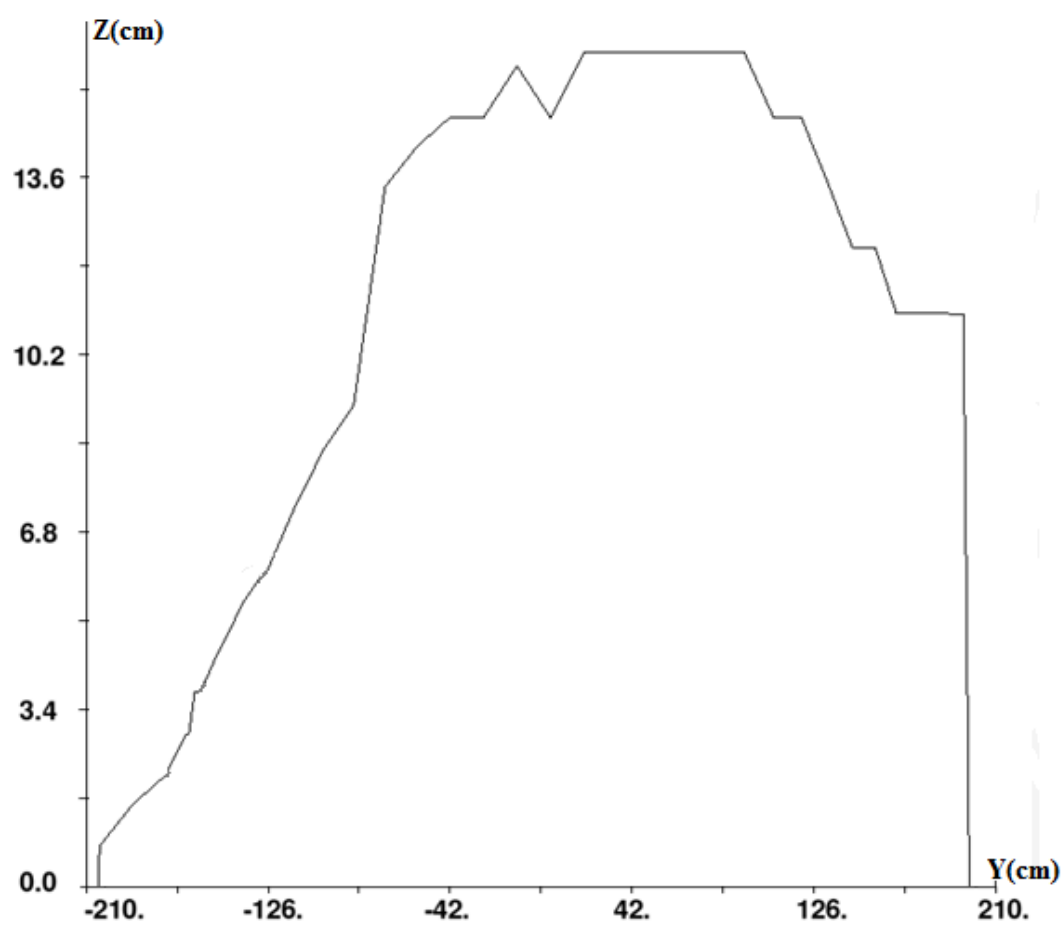
شکل (۱۸-۵) درصد رسوب حجمی موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۲



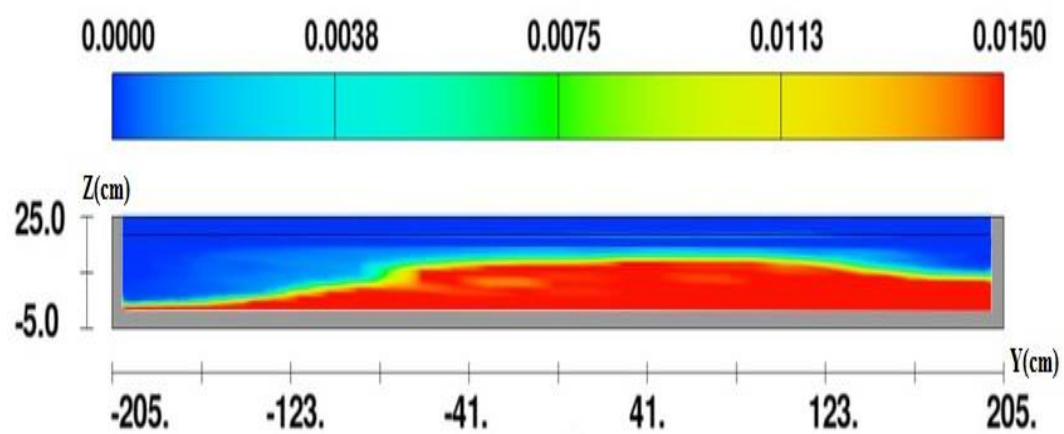
شکل (۵-۱۹) نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G374



شکل (۵-۲۰) درصد حجمی رسوب موجود در بخش سیال در مخزن G374

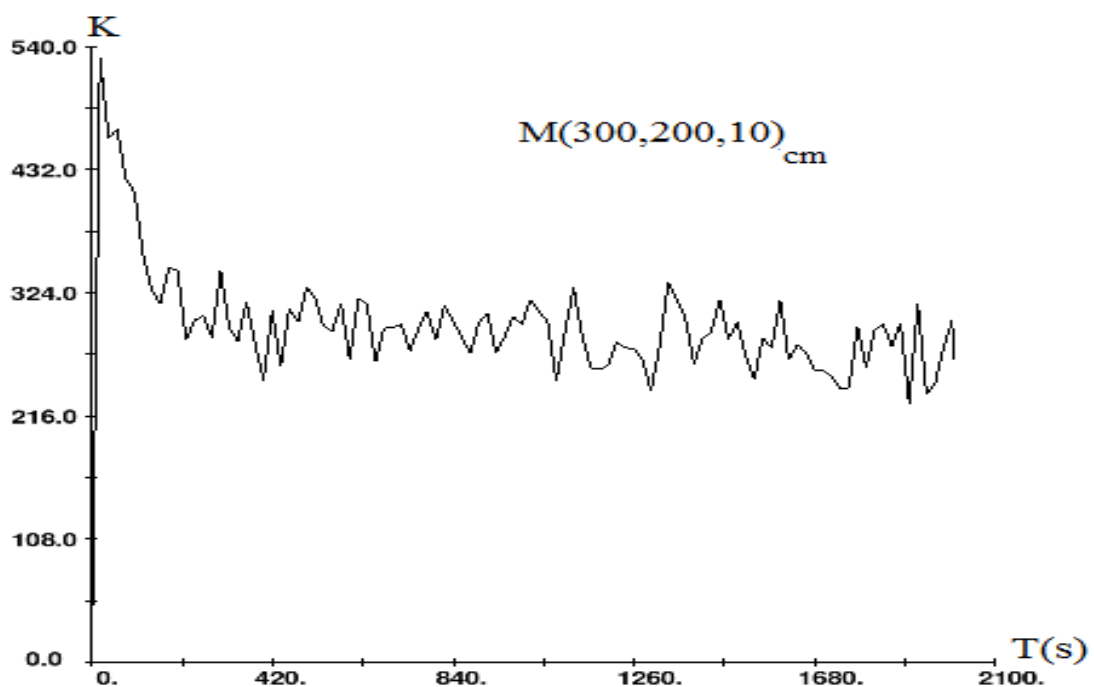


شکل (۵-۲۱) نمودار ارتفاع رسوب در مقطع عرضی مخزن G۳۷۱۶



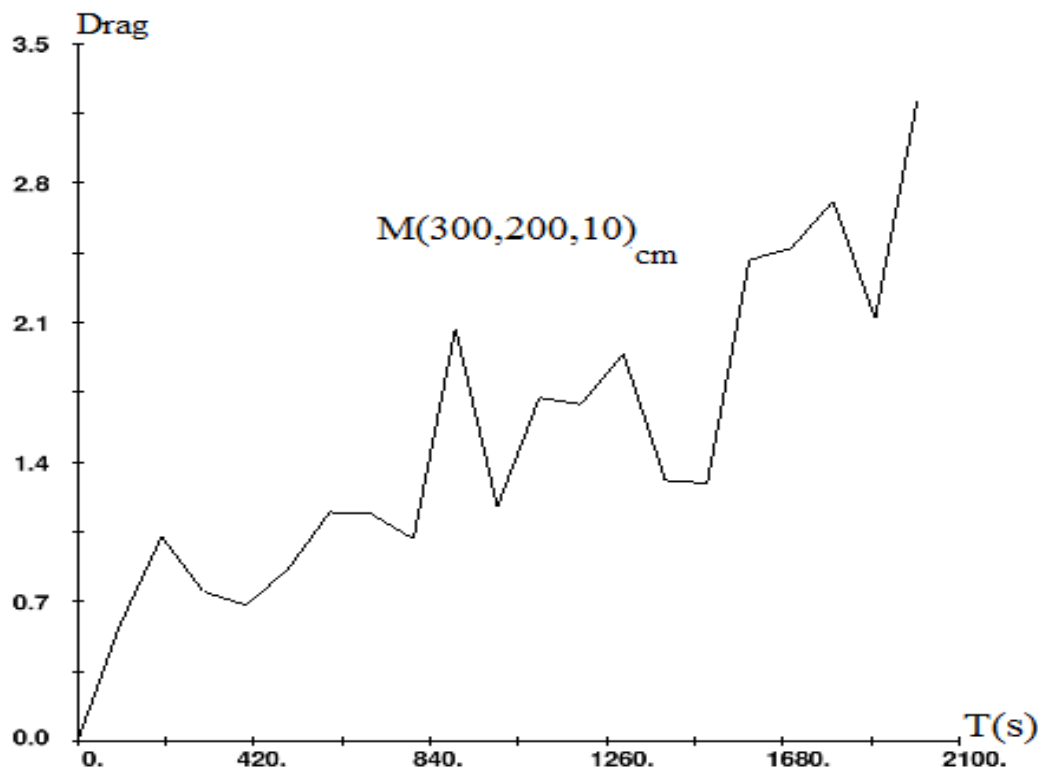
شکل (۵-۲۲) درصد حجمی رسوب موجود در بخش سیال در مخزن G۳۷۱۶

با توجه به مطالب بیان شده در این قسمت می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان G/D در مخازن درصد رسوب انباشته شده افزایش می‌یابد. از آنجایی که در بین گروه‌های مخازن، مخزن G^3 بهترین وضعیت را دارا بوده، می‌توان گفت در بین تمام ۴۲ سعی عددی صورت گرفته مخزن G^{3716} بهترین عملکرد را در مهار رسوب داشته است. حال این سوال بوجود می‌آید آیا با تغییر میزان دبی ورودی میزان نهشت رسوب و عبارتی بازدهی مخزن در تله اندازی رسوب تغییر خواهد کرد؟ برای پاسخ هر چه بهتر به این سوال نتایج مربوط به مخزن G^3 را برای دبی‌های ورودی ۷، ۳۵ و ۶۳ مورد بررسی قرار می‌دهیم. از آن جایی که میزان رسوب ورودی مقدار ثابت ۳ گرم در هر لیتر می‌باشد، طبیعی است که با افزایش مقدار دبی ورودی مقدار بیشتری رسوب وارد مخزن خواهد شد. از مدل‌سازی مخازن این قسمت شکل‌های زیر از نرم افزار استخراج گردیده است. شکل (۵-۲۳) انرژی جنبشی جریان را برای یک نقطه خاص از مخزن G^{36316} در طول زمان نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۳) تغییرات انرژی جنبشی نقطه M، مخزن G^{36316}

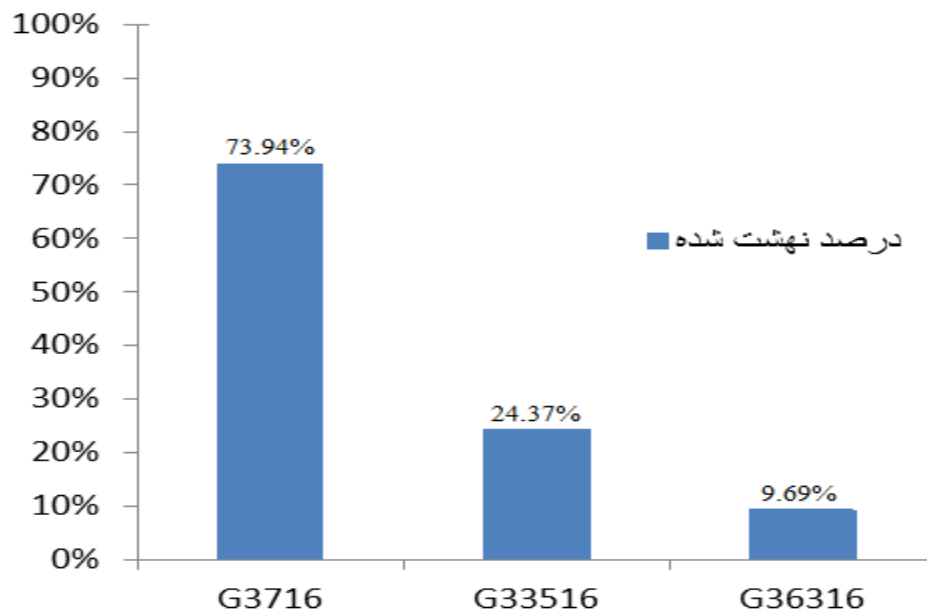
در شکل محور افقی نشان دهنده زمان و محور عمودی مقدار تغییرات انرژی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با گذر زمان انرژی جنبشی در نقطه M کاهش می‌یابد. شکل (۵-۲۴) تغییرات ضریب دراگ نرمال برای نقطه M را در طول زمان نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۴) تغییرات ضریب دراگ در نقطه M، مخزن G۳۶۳۱۶

در شکل بالا محور افقی زمان و محور عمودی مقادیر ضریب دراگ را نمایش می‌دهد. با گذر زمان ضریب درگ برای نقطه M رو به افزایش می‌باشد. دلیل این که با افزایش زمان انرژی جنبشی رو به کاهش و ضریب دراگ رو به افزایش است را می‌توان به مقدار درصد حجمی رسوب در جریان مرتبط دانست. با افزایش درصد حجمی رسوب در طی زمان لزجت سیال افزایش می‌یابد، نتیجه این امر کاهش انرژی جنبشی و افزایش ضریب دراگ است. این نتایج در مورد دو مخزن دیگر نیز مشابه می‌باشد.

در شکل (۲۵-۵) نتیجه نهایی مقایسه سه مخزن با سه دبی متفاوت آورده شده است.



شکل (۲۵-۵) میزان نهشت رسوب در مخازن G^3 برای دبی‌های مختلف

در شکل (۲۴-۵) درصد رسوب نهشت شده برای دبی‌های مختلف گروه مخازن G^3 نشان داده شده است. با توجه به درصدهای بیان شده می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان دبی، یا عبارت دیگر افزایش عدد فرود ورودی جریان، بازدهی مخازن رسوب‌گیر به شدت کاهش می‌یابد. همانطور که بیان شد افزایش میزان دبی تاثیر منفی در میزان رسوب‌گیری مخزن دارد. با توجه به مواردی که در بالا به آن پرداخته شد می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین مخزن با هدف مهار رسوب، مخزن G^{3716} می‌باشد. مواردی که با بررسی‌های فوق به آن دست یافته شده است به طور خلاصه به قرار زیر است.

- ۱- با افزایش نسبت G/D میزان نشست رسوب افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش دبی بازدهی مخزن رسوب‌گیر کاهش می‌یابد.
- ۳- با افزایش عدد فرود جریان ورودی بازدهی مخزن رسوب‌گیر کاهش می‌یابد.

فصل ششم :

نتایج و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه

بر اساس مواردی که در این پایان نامه به آن پرداخته شد، در این فصل به جمع بندی و نتیجه گیری و ارائه راه کارهایی برای مطالعات آینده خواهیم پرداخت.

۶-۲ نتیجه گیری

در این پایان نامه بررسی تاثیر ابعاد و شکل هندسه مخازن سطحی بر هیدرولیک جریان و توزیع رسوب در آنها پرداخته و به منظور بررسی این موضوع از نرم افزار ۳D Flow که قابلیت مدل سازی جریان های آشفته و انتقال رسوب را دارا می باشد، استفاده شده است .

مخازن دارای ابعاد مختلف و هندسه آن که شامل طول و عرض و همچنین آرایش قرارگیری ورودی و خروجی مخزن می باشد در نمونه های مختلف به صورت های گوناگون در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی تاثیر تغییر در پارامترهای جریان بر روی الگوهای جریانی و رسوبی، در مدل سازی ها از سه دبی متفاوت استفاده گردید. در مجموع ۴۲ سعی عددی صورت گرفته است. در نهایت مخازن مختلف با نرم افزار مدل گردیده و نحوه و مقادیر نشست رسوب در آنها مورد بررسی قرار گرفته است .

با توجه به اطلاعات خروجی از نرم افزار و بحث و بررسی های انجام گرفته، نتایج را بطور خلاصه می توان در چند مورد زیر بیان کرد:

۱. در بین مخازن مدل شده، برای یک دبی ثابت مخزن G^3 دارای بیشترین درصد تله اندازی رسوب می باشد.

۲. با افزایش نسبت G/D از ۱۰ تا ۱۶ در مخازن درصد تله اندازی رسوب بیشتر می شود.

۳. با افزایش میزان دبی جریان ورودی به مخزن، بازدهی مخازن رسوب گیر کاهش می یابد.

۴. با توجه به نتایج و با در نظر گرفتن بحث بهینه سازی اقتصادی اجرای مخازن رسوب گیر، افزودن به طول مخزن نسبت به عرض، درصد رسوب گیری را با رشد بیشتری افزایش می دهد.

با توجه به نتایج گفته شده ، مخزن G۳۷۱۶ بهترین عملکرد را در بین مخازن موجود از لحاظ مهار رسوب دارا می باشد. این مخزن در حدود ۷۳/۹۴ درصد از کل رسوب ورودی را مهار کرده است.

۳-۶ پیشنهادات

بر اساس مطالعات انجام شده به منظور بهبود شرایط و همچنین ایجاد بستری مناسب برای ادامه تحقیقات در مراحل بعدی پیشنهادات زیر ارائه می گردد:

- ۱- بررسی تاثیر استفاده از مدل های گوناگون آشفتگی در میزان نشست رسوب.
- ۲- بررسی تاثیر میزان گودافتادگی کف مخازن بر روی میزان نشست رسوب.
- ۳- مدل سازی با جزییات بیشتر که در عمل در مخازن رسوب گیر به کار گرفته می شوند، نظیر توری های یکسان ساز سرعت و غیره.

مراجع

۱. ابن جلال ر، شفاعی بجستان م، (۱۳۸۸)، "اصول نظری و عملی مکانیک خاک"، انتشارات دانشگاه شهید چمران.
۲. ابریشمی ج، حسینی م، (۱۳۸۵) "هیدرولیک و کانال های باز"، چاپ چهاردهم، انتشارات آستان قدس.
۳. اعلمی م، مرسولی ا، (۱۳۸۷)، کاربرد و ارزیابی مدل GSTARS^۳ در شبیه سازی نحوه رسوب گذاری مخازن (مطالعه موردی مخزن سد کارده)، چهارمین کنگره ملی عمران، دانشگاه تهران.
۴. امام قلی زاده، ص، ۱۳۸۶، بررسی و ارزیابی انجام فلاشینگ تحت فشار در سدهای مخزنی، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵. تقی زاده ح، (۱۳۸۹)، بهبود عملکردی هیدرولیکی سرریز چندوجهی لاشکل بوسیله شبیه سازی عددی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۶. تقدیسی ب، فعال ز، (۱۳۸۵)، بررسی اثر جریان های گردابی بر ذرات رسوبی بالادست سد انحرافی دز با استفاده از نرم افزار SSIIM. هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
۷. تقوی م، طالب بیدختی ن، (۱۳۷۴)، بررسی و کاربرد روش های معمول و متداول رسوب گذاری مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ش ۱۳۶، ص ۴۷-۵۹.
۸. قمشی م، (۱۳۶۷)، نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران.
۹. شفاعی بجستان م، (۱۳۸۴)، "اصول کاربرد مدلهای فیزیکی - هیدرولیکی"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۰. شفای بجستان م، (۱۳۸۷)، " اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب"، انتشارات دانشگاه

شهید چمران اهواز.

۱۱. شفای بجستان م، (۱۳۸۶)، " جریان در کانال های باز"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز،

چاپ دوم.

۱. Adrian, R. J. (۱۹۹۱). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *ann.rev. Fluid Mech.*, ۲۳:۲۶۱-۲۶۸. ۹۶
۲. Alavian, V. and Chu, V. H. (۱۹۸۵). Turbulent exchange flow in a shallow compound channel. In *Proc. ۲nd Congress International Association Hydraulic Research*, volume ۳, pages ۴۴۶-۴۵۱. ۴۵
۳. Bagnold, R. A. (۱۹۶۶). An approach to the sediment transport problem from general physics. *US. Geological Survey Professional Paper, Washington, D.C.*, page ۴۲۲. ۶۷
۴. Chang, F. and Richards, D. (۱۹۷۱). Deposition of sediment in transient flow. *Journal of the Hydraulics Division-ASCE*, ۹۷(۶). ۷۵
۵. Chang, H. (۱۹۶۷). Hydraulics of rivers and deltas. Technical report, Ph.D Dissertation, Colorado State University. ۷۴
۶. Dewals, B. J., Kantoush, S. A., Erpicum, S., Pirotton, M., and Schleiss, A. J. (۲۰۰۸). Analysis of flow instabilities in shallow rectangular basins. *Journal of Environmental Fluid Mechanics*, ۸(۱):۳۱-۵۴. ۲۶۰, ۲۸۲
۷. Englund, F. and Hansen, E. (۱۹۶۷). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. In: Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark, ۶۲ p. ۶۶, ۸۷
۸. Flow-۳D user manual (Version ۹.۳), (۲۰۰۸), Flow Science Inc.
۹. Gerkema, T. (۲۰۰۰). A linear instability analysis of tidally generated sand waves. *Journal of Fluid Mechanics*, ۴۱۷:۳۰۳-۳۲۲. ۶۹ *Sedimentology*, ۲۸(۶):۸۵۹-۸۶۵. ۸۷
۱۰. Heller, P., Pellaud, M., Bollaert, E., Schleiss, A., and Schlaepfer, R. (۲۰۰۷). River rehabilitation through a multi-purpose reservoir. In *۲nd Congress of IAHR, Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics*, Venice, Italy. ۸۵
۱۱. Kantoush, S. A., Bollaert, E., Boillat, J.-L., and Schleiss, A. J. (۲۰۰۷c). Experimental and numerical modeling of sedimentation in rectangular shallow reservoirs: a first comparison. *International Journal of Sediment Research*.

١٤. Kantoush, S. A., Bollaert, E., and Schleiss, A. J. (٢٠٠٧d). Influence of the width of a rectangular shallow reservoir on sedimentation behavior and trap efficiency. In *٣rd Congress of IAHR, Special Session of Reservoir Sedimentations*, Venice, Italy. ٤٧, ٤٩
١٥. Kantoush, S. A., De Cesare, G., Boillat, J.-L., and Schleiss, A. J. (٢٠٠٨). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using uvp, lspiv and numerical modeling. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, ١٩(٣-٤): ١٣٩-١٤٤. ٩٢
١٦. Kantoush, S. A. and Schleiss, A. J. (٢٠٠٧). Large scale piv- measurements at the surface of different shallow reservoir geometries. *Journal of Visualization*. ٤٦, ٩٢, ٩٨
١٧. Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., and Balzerek, H. (٢٠٠٧e). Evaluation of miniecho sounder measurements to estimate sediment thickness in shallow reservoirs. In *Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference, HMEM ٢٠٠٧*, Lake Placid, NY, USA. EWRI of ASCE & IAHR. ٩٢
١٨. Kantoush, S. A., Uyttewaalt, W., Bollaert, E., Boillat, J.-L., and Schleiss, A. J. (٢٠٠٦c). Experimental study of suspended sediment transport and deposition in a rectangular shallow reservoir. In *IAHR Proc. of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, pages ١٦٢٣-١٦٣١, Lisbon, Portugal. Taylor & Francis Group. ١٧٧
١٩. Kantoush, S. K., Boillat, J.-L., Bollaert, E., and Schleiss, A. J. (٢٠٠٧f). Influence of shallow reservoir geometry on the flow pattern and sedimentation process by suspended sediments. In *Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie*, pages ٣٥-٥٢, Lausanne, Switzerland. ٩٧
٢٠. Sloff, C. J. (١٩٩٧). *Sedimentation in reservoirs*. Comm. on hydr. and geotechn. engrg., Delft University of Technology. ٥٣
٢١. Sloff, C. J., Jagers, H., and Kitamura, Y. (٢٠٠٤). Study on the channel development in a wide reservoir. In *Proc. River Flow*, pages ٨١١-٨١٩, Napoli, Italy. ٧٤
٢٢. Weitbrecht, V., Kühn, G., and Jirka, G. H. (٢٠٠٢). Large scale PIV measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Meas. and Instr.*, ١٣: ٢٣٧-٢٤٥. ٩٦

Abstract

One of the main problems in Dam Engineering and related fields is sedimentation. Sediments are long term enemies of reservoirs and can question a project altogether. In warm and dry zones this problem shows itself more prominently, because as the first rain and thus runoff occurs, a great volume of sediments enter the dam's reservoir. The result of these sediments entering, is the reduced capacity of the reservoir. Because most of the literature on sedimentation in over-ground reservoirs is about experimental investigations, and also because of the numerous advantages of numerical modeling, in this thesis modeling has been done using the finite volume software Flow-3D. First, the effect of different geometries on flow's hydraulics and sediment's deposition pattern is studied using existing lab results. Then, we chose three rectangular reservoirs with different dimensional proportions for modeling with the goal of designing a basin with the best sediment trapping percentage. To achieve this purpose some discrepancies in the place of inflow and outflow which is introduced by the ratio G/D and flow's parameters like flow rate were made. Overall, 42 different models were made using Flow-3D, and LES turbulence model was used in the process. In the end we reached the conclusion that between these three rectangular reservoirs, the 1*4 had the best sediment trapping percentage, and as the G/D was increased this percentage increased too. Also by increasing the flow's rate (or in other terms increasing the Froude Number) efficiency of the sediment entrapment basin was reduced significantly.

Key Words:

Entrapment, Flow-3D, Over-ground Reservoirs, Turbulence Model, Sediment



Shahrood University of Technology

Department of Civil engineering

On effects of the dimensions and shape of shallow reservoirs on flow hydraulics and sediment distribution in them

Hamidreza Zahabi

Supervisor :

Dr.Ramin Amini

September ۲۰۱۴