



دانشکده عمران

گروه مهندسی آب و محیط‌زیست

بررسی پیشروی جریان گل آلود ناشی از سیلاب در مخازن سد ها

دانشجو :

سید ایمان مختاری

استاد راهنما :

دکتر امیر عباس عابدینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیط‌زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید ایمان مختاری

تحت عنوان: بررسی پیشروی جریان گل آلود ناشی از سیلاب در مخازن سد ها

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و

با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

— محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

— به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است .

— به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند .

— به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند .

— به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه ی راهم بود.

— الهها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل بپوشانم .

— پروردگارا حسن عاقبت ، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما .

— خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ " :از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگواری که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یآوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر امیر عباس عابدینی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند. از استاتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر مهدی عجمی و آقای دکتر سعید گلپان که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید

تعهدنامه

اینجانب **سید ایمان مختاری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی** دانشکده **مهندسی عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **بررسی پیشروی جریان گل آلود ناشی از سیلاب در مخازن سد ها**

تحت راهنمایی **دکتر امیر عباس عابدینی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافته‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد.

چکیده

جریان گل آلود یا ثقلی را می‌توان ورود یک سیال با جرم مخصوص معلوم در یک توده سیال با جرم مخصوص متفاوت، توصیف کرد.

هنگامی که جریان گل آلود رودخانه وارد مخزن پشت سد می‌شود، به علت سنگینتر بودن از آب محیط اطراف خود به داخل آن فرو رفته و در روی کف و در جهت شیب بستر، جریان می‌یابد. به این پدیده که در اثر اختلاف چگالی بین لایه های مختلف سیال بوجود می‌آید. جریان چگال گفته می‌شود. جریان چگالی حاوی ذرات جامد معلق، اصطلاحاً جریان گل آلود نامیده می‌شود. اگر جرم مخصوص سیال ورودی از جرم مخصوص توده سیال ساکن محیط بیشتر باشد، بصورت یک جریان غلیظ زیرگذر حرکت خواهد کرد.

با پیدایش رایانه ها و راهکارهای جدید برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت آب و رسوبات، مدل‌های ریاضی متعدد با فرضیات ساده‌کننده و درجه های مختلف دقت به منظور شبیه سازی روند رسوبگذاری در مخزن سدها بوجود آمده اند. به دلیل دشواری عملیات اندازه گیری مستقیم رسوبات نهشته شده در مخازن و بالا بودن هزینه های آن، و همچنین عدم کارایی روشهای تجربی برای کلیه سدها، مدل‌های ریاضی و رایانه ای به عنوان ابزارهایی بسیار مفید و کارآمد مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند. در این پایان نامه سعی شده است تا کاربرد و ارزیابی مدل ۳D-Flow در شبیه سازی انتشار جریان گل آلود در مخازن سدها مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

در این پژوهش به بررسی اثرات غلظت، اندازه دانه‌ها و شیب بستر بر روی مشخصات جریان شامل سرعت و ارتفاع رسوبات انباشته شده پرداخته می‌شود. در ادامه با تغییر مورفولوژی در محل رسوبات

تغییرات الگوی رسوب گذاری مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج این پژوهش در شناخت وضعیت جهش در جریان گل آلود و حاوی ذرات ریز رسوب و پیش بینی مشخصات آن در طراحی مفید خواهد بود.

مطالعه حاضر در ۵ فصل گردآوری شده است که پس از مقدمه حاضر، در فصل دوم به تئوری جریان غلیظ و گل آلود و چگونگی پیدایش آن پرداخته شده است. در ادامه اشاره ای بر تحقیقات گذشته در زمینه جریان غلیظ و گل آلود شده است.

فصل سوم به بیان معادلات حاکم بر جریان از جمله معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و مدل های آشفتگی چون RNG و $k-\epsilon$ می پردازد. سپس روش های عددی مختلف که برای حل معادلات جریان مورد استفاده قرار می گیرند به اختصار معرفی شده است. سپس خصوصیات و روش های موجود در نرم افزار مورد استفاده در این پایان نامه (Flow-۳D) به تفصیل بیان گردیده اند.

در فصل چهارم، نرم افزار Flow-۳D با کمک نتایج حاصل از مقاله آزمایشگاهی baas (۲۰۰۴) صحت سنجی شد و پس از بررسی آزمون های مختلف جهت صحت سنجی مدل، اثر تغییرات مورفولوژی بر الگوی رسوبگذاری مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بهترین و کالیبره ترین مدل عددی برای شبیه سازی انتشار جریان گل آلود ارائه می گردد که می توان در تحقیقات آتی از آن استفاده نمود.

در فصل آخر، نتایج حاصل از شبیه سازی ها ارائه گردید و ضمن جمع بندی، نقاط قوت و ضعف مدل به همراه پیشنهادات لازم بیان شد.

کلید واژه: جریان گل آلود، سیلاب، شبیه سازی، Flow-۳D، جریان غلیظ، جریان دو فازی

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۱	مقدمه ای بر تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ روش تحقیق
۴	۳-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل دوم
۷	معرفی جریان گل آلود و مروری بر مطالعات پیشین
۸	۱-۲ مقدمه ای بر جریان گل آلود
۱۰	۲-۲ ساختار رسوبات
۱۱	۳-۲ ساختار جریان های غلیظ
۱۸	۴-۲ توزیع و تحلیل غلظت
۲۳	بخش دوم: مروری بر مطالعات پیشین
۲۳	۵-۲ مقدمه
۲۴	۶-۲ رسوبات بستر و حرکت جهشی ذرات
۲۷	۷-۲ جریانهای غلیظ و گل آلود
۳۹	فصل سوم

۳۹	معادلات حاکم بر جریان و معرفی نرم افزار FLOW-۳D
۴۰	بخش ۱: معادلات حاکم بر جریان
۴۰	۱-۳ مقدمه
۴۰	۲-۳ معادله پیوستگی
۴۱	۳-۳ معادلات اندازه حرکت
۴۲	۴-۳ مدل‌های آشفتگی
۴۳	۱-۴-۳ فرضیه بوزینسک
۴۵	بخش ۲: معرفی روشها و نرم افزار حل عددی
۴۵	۵-۳ مقدمه
۴۶	۶-۳ روشهای مختلف گسسته سازی معادلات
۴۷	۱-۶-۳ روش تفاضل محدود
۴۸	۲-۶-۳ روش اجزاء محدود
۴۸	۳-۶-۳ روش حجم محدود
۴۹	۷-۳ معرفی نرم افزار FLOW-۳D
۵۰	۱-۷-۳ روش حجم سیال VOF
۵۱	۲-۷-۳ تقریبات عددی
۵۳	۳-۷-۳ مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در نرم افزار FLOW-۳D
۵۷	۴-۷-۳ مدل آبشستگی (SEDIMENT SCOUR)
۶۱	۵-۷-۳ مدل DRIFT-FLUX
۶۳	۶-۷-۳ موارد کاربرد صنعتی نرم افزار FLOW-۳D
۶۵	فصل چهارم
۶۵	مدلسازی عددی و تحلیل نتایج
۶۶	شرح شبیه سازی عددی و بررسی آزمون‌های مختلف
۶۶	بخش اول: صحت سنجی
۶۶	۱-۴ مقدمه
۶۶	۲-۴ معرفی مدل آزمایشگاهی
۶۹	۳-۴ بررسی حالات مختلف شبیه سازی عددی
۷۴	آزمون ۱) تعیین مدت زمان مورد نیاز برای اتمام شبیه سازی):
۷۹	آزمون ۲) تأثیر شرایط مرزی):

۸۰	آزمون ۳ (تأثیر ابعاد مش بندی):
۸۱	آزمون ۴ (تأثیر مدل های آشفتگی):
۸۲	۴-۴ بررسی نتایج شبیه سازی عددی
۱۰۶	بخش سوم: مدل سازی مخزن سد البرز و رودخانه بابل
۱۰۶	۴-۱ مقدمه
۱۰۶	۴-۲ مشخصات منطقه مورد مطالعه
۱۰۷	۴-۲-۱ رودخانه بلبیل (بابلرود)
۱۰۸	۴-۲-۲ سد البرز
۱۴۳	فصل پنجم
۱۴۳	نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۴	۵-۱ نتیجه گیری
۱۴۶	نتایج مدل سازی عددی جریان گل آلود رودخانه بابل ورودی به سد البرز
۱۴۷	۵-۲ ارائه پیشنهادات
۱۴۸	منابع و مراجع:

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: حرکت جریان غلیظ در مجاورت بدنه سد ----- ۱۰
- شکل ۲-۲: نمایی از ته نشینی رسوبات و نیمرخ طولی رسوب گذاری ----- ۱۶
- شکل ۳-۲: نمودار یک جریان غلیظ ----- ۱۷
- شکل ۴-۲: طرح شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی فیروز آبادی وهمکاران ----- ۳۰
- شکل ۵-۲: شماتیک فلووم وتاسیسات استفاده شده در آزمایشات بهرامی وهمکاران ----- ۳۱
- شکل ۶-۲: کانال آزمایشگاهی استفاده شده در مطالعه گارسیا ----- ۳۲
- شکل ۷-۲: مقایسه توزیع سرعت جریانهای غلیظ و گل آلود ----- ۳۲
- شکل ۸-۲: چگونگی ته نشینی رسوبات در فواصل مختلف از ورودی ----- ۳۳
- شکل ۹-۲: تنش برشی در امتداد پرش هیدرولیکی ----- ۳۴
- شکل ۱-۳: نمونه ای از مقادیر تابع VOF در نزدیکی سطح آزاد ----- ۵۰
- شکل ۱-۴: مقطع فوقانی و جانبی و موقعیت سرعت مترها در مدل آزمایشگاهی ----- ۶۸
- شکل ۲-۴: نمایی از مدل آزمایشگاهی شبیه سازی شده توسط ۲۰۱۲ SOLIDWORKS ----- ۶۹
- شکل ۳-۴: نحوه عملکرد روش Favor با مرزهای صلب با شبکه بندی های مختلف ----- ۷۱
- شکل ۴-۴: شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی ----- ۷۲
- شکل ۵-۴: نحوه عبور جریان در کانال طی بازه های مختلف زمانی ----- ۷۶
- شکل ۶-۴: مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۲) ----- ۸۲
- شکل ۷-۴: مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۳) ----- ۸۳
- شکل ۸-۴: مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۴) ----- ۸۳
- شکل ۹-۴: مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN D۱۳) ----- ۸۴

- شکل ۴-۱۰ مقادیر سرعت در راستای X در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run). ----- ۸۶
- شکل ۴-۱۱ مقادیر سرعت در راستای Y در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run). ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۲ مقادیر سرعت در راستای Z در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run). ----- ۹۰
- شکل ۴-۱۳ مقادیر سرعت در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run). ----- ۹۲
- شکل ۴-۱۴ مقادیر چگالی بالک در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run). ----- ۹۶
- شکل ۴-۱۵ مقادیر چگالی بالک در مخزن در بازه های مختلف زمانی (D۱۳ Run). ----- ۹۹
- شکل ۴-۱۶ پروفیل توپوگرافی مقطع عرضی هندسه مورفولوژی شکل گرفته توسط جریان گل آلود ----- ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷ حوضه آبخیز رودخانه بابل رود (ماخذ: نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی کشور بر گهای دراز
کلا، بابل، قائمشهر و پاشا کلا ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۱۸ مدلسازی رودخانه بابل و سد البرز در نرم افزار Solidworks ----- ۱۰۹
- شکل ۴-۱۹ مش بندی مدل هندسی در نرم افزار Flow-۳D ----- ۱۰۹
- شکل ۴-۲۰ مقادیر سرعت در جهت X در قاب های زمانی مختلف ----- ۱۱۶
- شکل ۴-۲۱ مقادیر سرعت در قاب های زمانی مختلف ----- ۱۲۱
- شکل ۴-۲۲ مقادیر سرعت در جهت X در قاب های زمانی مختلف ----- ۱۲۳
- شکل ۴-۲۳ مقادیر سرعت در مقاطع مختلف مدل رودخانه بابل و سد البرز ----- ۱۲۴
- شکل ۴-۲۴ پروفیل توپوگرافی مقطع عرضی هندسه مورفولوژی شکل گرفته توسط جریان گل آلود ----- ۱۲۷
- شکل ۴-۲۵ توپوگرافی مدل هیدرولیکی ساخته شده با نرم افزار Flow ۳-D ----- ۱۲۸
- ۴-۲۶ پلان محل مورد مطالعه با استفاده از نقشه های ماهواره ای. ----- ۱۲۸
- ۴-۲۷ مدل عددی و روش Favor در شبکه بندی انجام شده. ----- ۱۲۹
- شکل ۴-۲۸ مقادیر چگالی بالک و سرعت در قاب های زمانی مختلف ----- ۱۳۵
- شکل ۴-۲۹ پلان محل مورد مطالعه با استفاده از نقشه های ماهواره ای ----- ۱۳۵

- شکل ۴-۳۰ مقادیر چگالی بالک در برش عرضی سد. ----- ۱۴۰
- شکل ۴-۳۱ مقادیر چگالی بالک در برش عرضی نزدیک به بدنه سد. ----- ۱۴۴
- شکل ۴-۳۲ موقعیت مناسب دریچه تحتانی جهت تخلیه جریان گل آلود. ----- ۱۴۶
- فهرست جداول
- جدول ۳-۱- مقادیر اعداد ثابت معادلات ----- ۵۳
- جدول ۳-۲- مقادیر ثابتهای معادله دیفرانسیل ----- ۵۵
- جدول ۴-۱- نقاط مقایسه شده ارتفاع رسوبات در مدل آزمایشگاهی با شبیه سازی ----- ۷۷
- جدول ۴-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۱ ----- ۷۸
- جدول ۴-۳- نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۲ ----- ۷۹
- جدول ۴-۴- نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۳ ----- ۷۹
- جدول ۴-۵- نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۴ ----- ۸۰
- جدول ۴-۵- مشخصات اولیه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ----- ۸۸
- جدول ۴-۶- مشخصات سد البرز ----- ۱۰۸
- جدول ۴-۷- مشخصات کامل شبیه سازی صورت گرفته ----- ۱۱۰

فصل اول

مقدمه ای بر تحقیق

۱-۱ مقدمه

مخازن سدها با هدف ذخیره کردن بخشی از جریانهای سیلابی رودخانه و به منظور کنترل سیلاب، ذخیره آب برای مصارف پایین دست، تولید انرژی و یا تفریحات احداث می شوند. ته نشینی رسوب در مخزن سد باعث از دست رفتن حجم مفید آن شده و از این رو حفظ و نگهداری مخازن موجود و به حداقل رساندن تلفات حجم مخزن در اثر ته نشینی در اولویت برنامه ریزان مدیریت منابع آب کشورها قرار گرفته است. امروزه مدیریت پویای مخازن مقرر می کند که کشورها هرچه سریعتر اقدام به اجرای روشهایی برای کنترل فرسایش نمایند تا آورد رسوب به حداقل ممکن برسد. بنابراین ضروری است که روشهای مختلفی برای محاسبه و بررسی چگونگی توزیع رسوب در مخزن، کنترل رسوب ورودی و رسوب زدایی مخزن، مطالعه و استفاده شود.

هنگامی که جریان گل آلود رودخانه وارد مخزن پشت سد می شود، به علت سنگینتر بودن از آب محیط اطراف خود به داخل آن فرو رفته و در روی کف و در جهت شیب بستر، جریان می یابد. به این پدیده که در اثر اختلاف چگالی بین لایه های مختلف سیال بوجود می آید، جریان چگال گفته می شود. جریان چگالی حاوی ذرات جامد معلق، اصطلاحاً جریان گل آلود نامیده می شود. اگر جرم مخصوص سیال ورودی از جرم مخصوص توده سیال ساکن محیط بیشتر باشد، بصورت یک جریان غلیظ زیرگذر حرکت خواهد کرد.

با پیدایش رایانه ها و راهکارهای جدید برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی حرکت آب و رسوبات، مدل‌های ریاضی متعدد با فرضیات ساده‌کننده و درجه های مختلف دقت به منظور شبیه سازی روند رسوبگذاری در مخزن سدها بوجود آمده اند. به دلیل دشواری عملیات اندازه گیری مستقیم رسوبات نهشته شده در مخازن و بالا بودن هزینه های آن، و همچنین عدم کارایی روشهای تجربی برای کلیه سدها، مدل‌های ریاضی و رایانه ای به عنوان ابزارهایی بسیار مفید و کارآمد مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند.

پس از انجام آزمایشهای این تحقیق از مدل Flow-3D تحت شرایط RNG استفاده شد. این مدل چند جانبه و مدل تلاطمی سازگار با شرایط پیچیده جریان در شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی است. روش حل معادلات در این مدل بر اساس روش حجم محدود بوده که معادلات جریان شامل معادله پیوستگی و مومنتم و دیگر معادلات مانند معادله پخشیدگی را حل عددی می نماید.

۲-۱ روش تحقیق

غلظت بار رسوبی بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان تاثیر می گذارد و این مشخصات را بسته به مقدار عدد فرود و میزان رسوب با مشخصات آب صاف متفاوت می سازد. برای مثال در اغلب طرحهای انحراف آب از رودخانهها مشکل رسوبگذاری در دهانههای آبرگیر وجود دارد که این مشکل با تخلیه آنها به حوضچه آرامش و شکل گیری جریان گل آلود با یک پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه صورت می گیرد. این نوع جریانهای گل آلود بخشی از زنجیره جریانهای ثقلی حاوی رسوب می باشند که رسوبات عمدتاً به واسطه آشفستگی در سیال به حالت معلق می مانند. در این جریانها نیروی رانش به واسطه ذرات معلق آب کدر را سنگین تر از جریان آب زلال می گرداند. در این نوع جریان چگالی در جهت عمق تغییر می کند. به طورکل جریانهای غلیظ، جریانهای دوفازی می باشند که با اختلاف در چگالی فازها مانند آب سرد و گرم و یا مخلوط آب و گل تشکیل می شوند. اختلاف چگالی تابع عواملی مانند اختلاف درجه حرارت یا میزان نمک (شوری) و رسوب موجود در آن می باشد. جریان غلیظ حاوی ذرات جامد معلق بوده و جریان گل آلود (Turbidity current) نامیده می شوند. در هیدرولیک ظهور و کاربرد این جریان در مخازن سدها می باشد و خود یکی از روشهای مهم رسوب زدایی در مخازن به شمار می رود، به طوری که گارسیا(۱۹۸۹) از جریان گل آلود به عنوان روش عمومی جهت رسوب زدایی مخازن سدها نام می برد. مخلوط آب و رسوب رفتار سیال شبه نیوتنی داشته و اختلاف میان چگالی مخلوط و آب قابل توجه است.

در این پایان نامه سعی شده است تا کاربرد و ارزیابی مدل Flow-۳D در شبیه سازی انتشار جریان گل آلود در مخازن سدها مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

در این پژوهش به بررسی اثرات غلظت، اندازه دانه‌ها و شیب بستر بر روی مشخصات جریان شامل سرعت و ارتفاع رسوبات انباشته شده پرداخته می شود. در ادامه با پیاده سازی کالیبره ترین روش بر روی مطالعه موردی نحوه پیشروی جریان گل آلود مورد بررسی قرار می گیرد.

از جمله اهداف این پژوهش شناخت جریان گل آلود و نحوه پخش آن در مخزن سد به منظور کمینه کردن مشکلات ناشی از آن و مقابله با پدیده رسوبگذاری و همچنین از دست رفتن کیفیت آب پشت سد مخصوصاً برای مصارف شرب می باشد. نتایج این پژوهش در شناخت وضعیت مکانی جریان گل آلود در زمان وقوع سیلاب و پیش‌بینی مشخصات آن در طراحی مفید خواهد بود. همچنین می توان موقعیت و زمان باز شدن دریچه را برای هر سیل محاسبه نمود که این زمانبندی و موقعیت سنجی میتواند جهت صرفه جویی در هدر رفت آب ذخیره شده در مخزن بسیار مفید و کارآمد باشد.

۳-۱ ساختار پایان نامه

مطالعه حاضر در ۵ فصل گردآوری شده است که پس از مقدمه حاضر، در فصل دوم به تئوری جریان غلیظ و گل آلود و چگونگی پیدایش آن پرداخته شده است. در ادامه اشاره‌ای بر تحقیقات گذشته در زمینه جریان غلیظ و گل آلود شده است.

فصل سوم به بیان معادلات حاکم بر جریان گل آلود مورد استفاده می‌پردازد. سپس روش‌های عددی مختلف که برای حل معادلات جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند، به اختصار معرفی خواهند شد. سپس خصوصیات و روش‌های موجود در نرم‌افزار مورد استفاده در این پایان‌نامه (Flow-۳D) به تفصیل بیان می‌گردند.

در فصل چهارم، نرم‌افزار Flow-۳D با کمک نتایج حاصل از مقاله آزمایشگاهی که باس (baas) و همکارانش در سال ۲۰۰۴ تحت عنوان Deposits of depletive high-density turbidity currents منتشر کردند، صحت سنجی شد و پس از بررسی آزمونهای مختلف جهت صحت سنجی مدل، اثر تغییرات مورفولوژی بر الگوی رسوبگذاری مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بهترین و کالیبره ترین مدل عددی برای شبیه سازی انتشار جریان گل‌آلود ارائه می‌گردد که می‌توان در تحقیقات آتی از آن استفاده نمود. در ادامه به بررسی نحوه پخش جریان گل‌آلود ناشی از رسوبات ورودی توسط رودخانه بابل به مخزن سد البرز پرداخته شده است.

در فصل آخر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه گردید و ضمن جمع بندی، نقاط قوت و ضعف مدل به همراه پیشنهادات لازم بیان شد.

فصل دوم

معرفی جریان گل آلود و مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲ مقدمه ای بر جریان گل آلود

به طور کل جریان گل آلود یا ثقلی را می‌توان ورود یک سیال با جرم مخصوص معلوم در یک توده سیال با جرم مخصوص متفاوت، توصیف کرد. جریان‌های گل آلود در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و در منابع عظیم آب بوجود می‌آیند و مشکلاتی از قبیل رسوبگذاری در مخازن (که باعث کاهش ظرفیت ذخیره آب می‌گردد)، کاهش قابلیت کشتیرانی مخازن و افزایش سیلاب‌پذیری بالادست جریان (به دلیل رسوبگذاری در ناحیه دلتا) را بوجود می‌آورند. علاوه بر این، جریان گل‌آلود بر فعالیتهای بیولوژیک اثر گذاشته و زیان به تجهیزات نیروگاههای برقی آبی و انسداد دریچه‌ها و آبگیرها را سبب می‌شوند و لذا شناخت رفتار هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان گل‌آلود از اهمیت خاص برخوردار می‌باشد.

این جریان‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین فرایندهای رسوبگذاری در مخازن سدها شناخته شده که باعث انتقال رسوب به نزدیکی بدنه سد و تأثیر بر المانهای اساسی آن شده و کارکرد سد را پیش از اتمام عمر مفید آن با مخاطره روبرو می‌کند. با توجه به مسائل و مشکلاتی که تجمع رسوب در مخازن به همراه دارد، تحقیقات زیادی در سطح بین‌المللی برای حل این مشکل انجام شده است. تجربه‌های بدست آمده در کنار مطالعات و تحقیقات انجام شده در این راستا مشخص ساخته که استفاده از روش تخلیه جریانهای گل آلود می‌تواند در حل این مسئله به نتایج موفقیت آمیزی منجر گردد.

حرکت جریان گل آلود که یک حرکت دو یا چند فازی محسوب می‌شود، متفاوت از حرکت سیالات تک فاز که معمولاً با آن سروکار داریم، می‌باشد. از نظر تئوری جریان تک فاز یک سیال با ویسکوزیته مطلق کم می‌تواند در محدوده وسیع تغییرات سرعت صورت پذیرد، به طوری که چنین سیالی قادر است در سرعتهای کم به صورت لایه ای^۱ و در سرعتهای بالاتر به صورت آشفته^۲ جریان داشته باشد. در حالیکه جهت تداوم یک سیال دو یا چند فاز نظیر جریان گل آلود که مخلوط ذرات جامد و آب می‌باشند، سرعت

^۱ Laminar

^۲ Turbulent

جریان از یک مقدار مشخص که اصطلاحاً آن را سرعت بحرانی تجمع ذرات^۱ یا سرعت بحرانی انتقال ویسکوز^۲ می‌نامند، باید بیشتر باشد. به عبارت دیگر، اگر سرعت حرکت جریان به اندازه کافی بالا نباشد، ذرات جامد به صورت معلق در فاز مایع باقی نخواهند ماند. از دیدگاه الگوی جریان، جریان گل آلود را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم نمود. البته محققان در راستای تقسیم‌بندی‌های جزئی و دقیق‌تر، گروه‌های جریان حد واسط^۳ و امولسیون را نیز به گروه‌های فوق افزوده‌اند.

جریان همگن : در این نوع جریان ذرات جامد به طور کاملاً یکنواخت در میان فاز مایع پخش شده‌اند. غلظت و اندازه ذرات به قدری پایین و یا سرعت جریان به قدری بالاست که مخلوط آب و جامد رفتاری مشابه یک محیط تک فاز با لزجت یکسان را دارا می‌باشند.

جریان ناهمگن : در این نوع جریان ذرات جامد به طور یکنواخت در سیال پخش و توزیع نشده‌اند، بطوریکه در هر صفحه قائم از سیال یک گرادیان توزیع غلظت با عمق وجود دارد. به عبارت دیگر اندازه ذرات بگونه‌ای است که تمایل زیادی برای ته نشینی دارند و انتقال آن‌ها مستلزم اغتشاش کافی در جریان بوده و انرژی بیشتری را می‌طلبد.

جریان شبه همگن : در برخی حالات که ذرات ریزدانه بخش عمده‌ای از فاز جامد را تشکیل داده ولی هنوز ذرات درشت دانه نیز در فاز جامد وجود داشته و ممکن است در صورت کاهش سرعت سیال ته نشین گردند، جریان سیال به صورت شبه همگن اتفاق می‌افتد.

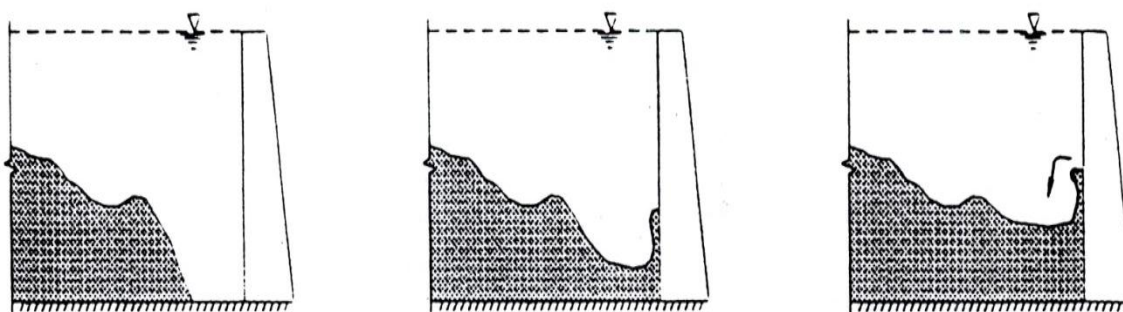
جریان‌های گل آلود به طور کلی در مخازن با شیب تند شکل می‌گیرد. هنگامی که جریان با غلظت بالا در مخزن بوجود می‌آید، رسوبات توسط نیروی ثقل خود در طول حوضه آبریز و به سمت سد حرکت می‌نماید. هنگامی که این رسوبات به بدنه سد می‌رسد، در امتداد دیواره مخزن و تا ارتفاع مشخص بالا

^۱ Deposition Critical Velocity

^۲ Viscous Transition Critical Velocity

^۳ Intermediate Flow

می‌آیند و سپس به پایین افتاده و جریان‌های گل‌آلود را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-۲). در شرایطی که در بدنه سد تخلیه‌کننده تحتانی وجود داشته باشد، چنین جریان‌های غلیظی به طور موثری از مخزن خارج می‌شود. در چنین حالتی ظرفیت تخلیه‌کننده باید به نحوی باشد که امکان تخلیه چنین جریان‌هایی را دارا باشد.



شکل ۱-۲: حرکت جریان غلیظ در مجاورت بدنه سد

۲-۲ ساختار رسوبات

رسوبات، مواد شکسته ریز شده‌ای هستند که از لحاظ فیزیکی و شیمیایی به دنبال از هم پاشیدگی تخته سنگ‌ها بر روی زمین ایجاد می‌شوند. دامنه اندازه این ذرات متغیر و شکل آن‌ها نیز از دانه‌های گرد گوشه تا زاویه‌دار متغیر است. ذرات رسوب جدا شده می‌توانند تحت اثر نیروی ثقل، باد یا آب انتقال یابند. حرکت ذرات در آب به صورت غلتش (لغزش)، جهش و حرکت به صورت بار معلق انجام می‌گیرد. هنگامی که سرعت برشی بستر جریان از مقدار بحرانی خود فراتر رود، حرکت رسوبات به صورت غلتش یا لغزش آغاز می‌شود. با افزایش سرعت برشی بستر، ذرات رسوبی در طول بستر با ایجاد جهش به حرکت خود ادامه داده و زمانی که سرعت برشی بستر از سرعت سقوط ذرات بیشتر گردد، این ذرات از جای خود بلند شده و نیروهای آشفته‌گی بر نیروی غوطه‌وری غلبه خواهد کرد و سبب معلق شدن این ذرات می‌گردد. در اغلب موارد حرکت رسوبات به صورت غلتش و جهش انتقال بار بستر و حرکت ذرات به صورت معلق

انتقال بار معلق نامیده می‌شود. محققان بسیاری از جمله اینشتین^۱ در سال ۱۹۴۲ و وایبرگ^۲ و اسمیت^۳ در سال ۱۹۸۷ نشان دادند که اکثر حرکت رسوبات بستر به صورت جهش است. بنابراین آگاهی از مشخصه‌های جهش ذرات بستر و چگونگی ارتباط آن‌ها با شرایط جریان، در قانونمند کردن حرکت بار بستر بسیار موثر است.

از میان تمام مشخصات اجزاء رسوب، اندازه رسوب بهترین و اصلی‌ترین خصوصیتی است که مورد توجه قرار می‌گیرد. چرا که میزان وقوع حرکت ذرات رسوبی مستقیماً به اندازه آن بستگی دارد. هر چه اندازه ذره بزرگتر باشد، مقاومت آن در مقابل حرکت بیشتر خواهد بود. با توجه به تنوع بسیار زیاد اندازه ذرات رسوبی در بستر کانال‌ها، بیان اندازه‌ای که معرف اندازه ذرات رسوبی و نشان‌دهنده رفتار هیدرولیکی آن در آب باشد، بسیار مشکل می‌باشد. به همین دلیل برای بیان اندازه ذرات از تعاریف گوناگونی همچون قطر کره معادل ذره، قطر سقوط، قطر عبوری از الک، قطر رسوبی و اندازه سه محوری استفاده شده است.

۳-۲ ساختار جریان‌های غلیظ

در جریان غلیظ یک سیال با سرعت مخالف صفر و چگالی متفاوت از چگالی سیالی که نسبتاً ساکن است وارد و در امتداد یکی از لایه‌های سیال ساکن به حرکت خود ادامه دهد. این بیان تمام خصوصیات لازم برای تشکیل جریان غلیظ را در بر می‌گیرد (احمدی رنایی، ۱۳۸۲). جریان وزنی یا ثقلی (جریان دوفازی) جریان با چگالی متوسط ρ_t است که ذاتاً در اثر اختلاف چگالی $\Delta\rho$ بر روی شتاب جاذبه (g) بوجود می‌آید.

این جریان مادام که جاذبه بوسیله نسبت $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$ کاهش یابد، رخ می‌دهد.

$$g' = g \left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \quad ۱-۲$$

^۱ Einstein

^۲ Wiberg

^۳ Smith

در واقع جاذبه کاهش یافته نیروی محرکه جریان وزنی بوده که در آن چگالی سیال پیرامون است (Graf and Altinaka, ۱۹۹۸). به طور کل جریان غلیظ جریان دوفازی است که با اختلاف کمی در چگالی فازها مانند آب سرد و گرم و مخلوط آب و گل می‌تواند به وجود آید. باید توجه کرد که جریان آب و هوا به دلیل اینکه نسبت چگالی‌های آنها حدود ۱۰۰۰ است، جریان غلیظ محسوب نمی‌گردد. علاوه بر این هر دو سیال در جریان غلیظ باید قابل امتزاج باشند. اختلاف چگالی بین سیال جریان غلیظ و سیال محیطی ساکن ممکن است ناشی از عوامل متعددی شامل اختلاف درجه حرارت، وجود رسوبات معلق، مواد جامد حل نشده، تفاوت شوری باشد (Altinakar et. al, ۱۹۹۰). جریان غلیظ حاوی ذرات جامد معلق، جریان گل آلود (Turbidity Current) نامیده می‌شود (Turner, ۱۹۷۳). حدود این اختلافات توسط نمودار (Graf & Altinakar, ۱۹۹۶) به شکل زیر بیان شده است:

اختلاف چگالی ناشی از درجه حرارت $\Delta\rho = 2kg/m^3$

اختلاف چگالی ناشی از شوری $\Delta\rho = 20kg/m^3$

اختلاف چگالی ناشی از گل آلود $\Delta\rho = 20-130(200)kg/m^3$

در $\Delta\rho = 20-130kg/m^3$ مخلوط آب و رسوب رفتار سیال شبه نیوتنی داشته و اختلاف میان چگالی مخلوط و آب قابل توجه است ($\Delta\rho < 130kg/m^3$). از این رو انتقال رسوبات به عنوان بار معلق غلیظ در نزدیکی بستر و به عنوان جریان گل آلود مورد بحث قرار خواهد گرفت (Graf, ۱۹۷۱). در حالت‌های اول و دوم جریان دارای رفتاری نیوتنی است.

جریان‌های طوفانی، جبهه‌های هوای سرد و جبهه‌های نسیم دریایی و اقیانوس‌ها جریان‌های غلیظی هستند که به خاطر کم بودن دمایشان در قسمتی از اتمسفر شکل می‌گیرند. طوفان‌های شن و گرد و غبار همانند بهمن مثالی از شکل‌گیری جریان غلیظ با ذرات معلق در هوا هستند. در دهانه‌های رودخانه‌های بزرگ پیشروی آب شور به سمت خشکی در زمان‌های سیلابی می‌تواند شکل معینی از حرکت جبهه

جریان غلیظ را داشته باشد (Alavian et. al, ۱۹۹۲). در اقیانوس‌ها جریان‌های چگالی یا ثقلی بوسیله شوری و یا غیرهمگنی ناشی از درجه حرارت تشکیل می‌شود و یا به صورت جریان‌های دوغ آب با ذرات معلق (Turbidity current) ملاحظه می‌شوند که در آنها اختلاف چگالی از گل و لای و ماسه معلق ایجاد شده و نیروی رانش بوجود می‌آورد.

خطوط حاوی کف در سطح اقیانوس ممکن است نشان دهنده زبانه یک جریان چگال باشد که متناوباً توسط فرایندهای جزر و مدی آورده می‌شوند. در کف اقیانوس‌ها حرکت گل و لای از جریان‌های ثقلی است که وقوع آن قطعی شده است. وقوع حرکت رسوبات در کف دریا و وجود ارگانیس‌م‌ها و هوادهی در عمق زیاد و نزدیک کف دلایل وجود جریان‌های ثقلی است. دانستن سرعت این جریان‌ها کمک بزرگی در درک پروسه‌های تشکیل آبراهه‌های زیر دریایی می‌باشد. در زمین لرزه‌ای که در سال ۱۹۲۹ میلادی به شدت ۷ ریشتر در شمال New Found land رخ داد و به زمین لرزه Grand-Banks مشهور شده، جلگه ای ژرف از جریان گل آلود به سمت جنوب اقیانوس در طول ۲۰۰ کیلومتر به راه افتاد. در صد کیلومتر اول حرکت، این جریان شتاب‌دار بوده و توانست بستر کف را شسته و کف دره را کنده و تا فاصله ۲۰۰ کیلومتر انتقال دهد. با از دست دادن سرعت در صد کیلومتر دوم مواد سنگین رسوب نموده و جریان در نهایت محو شده است (راد و فیروز آبادی، ۱۳۷۶).

به طور کل جریان گل آلود اغلب در هنگام سیلاب بوجود آمده و در محل برخورد رودخانه به مخزن سد این جریان به زیر آب مخزن فرو می‌رود و در کف مخزن جریان گل آلود ایجاد می‌گردد. چنانچه شیب کف زیاد باشد (بالاتر از ۰/۰۰۱) و یا پهنای آن کم، به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حرکت ذرات درشت‌تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و فقط جریان ذرات ریز باقی می‌ماند که می‌تواند به انتهای مخزن و ساختمان سد برسد و یا به مدت چند روز ادامه یابد و حتی در اقیانوس‌ها به حرکت خود ادامه دهد. چنین جریان‌هایی باید به اندازه کافی تولید آشفستگی نماید تا بتواند مواد دانه‌ای را به صورت معلق حمل نماید. مشاهدات و

آزمایشات روی جریان‌های چگال واقعی مخازن نشان می‌دهد که ۹۰٪ ذرات معلق در جریان چگال قطری زیر ۱۵-۱۰ میکرون و ۵۰٪ قطری کمتر از ۳-۲ میکرون دارند. همچنین این جریان‌ها به ندرت غلظت زیر $1-3 \text{ kg/m}^3$ (۰/۱ تا ۰/۳ درصد) دارند.

در بررسی تجربی به کمک اندازه‌گیری، اطلاعات مفیدی از جریان مانند ارتفاع بدنه، ساختار دماغه و پروفیل سرعت و پخش طولی و عرضی حاصل می‌شود. در این جریان استفاده از وسایل اندازه‌گیری با دقت لحظه‌ای مانند سیم‌داغ و لیزر با محدودیت زیادی روبرو است. وجود ذرات زیاد و کدورت جریان، امکان استفاده از وسایل فوق را منتفی ساخته و لذا استفاده از وسایلی که انعکاس صوت را میسر می‌سازد توصیه می‌شود. همچنین اندازه‌گیری غلظت که در جریان رودخانه با نمونه‌گیری و آنالیز نمونه انجام می‌شود، در این جریانها با محدودیت روبرو است. وجود گرادیان غلظت در امتداد قائم و همچنین در امتداد جریان باعث می‌شود که نمونه‌گیری نتواند به راحتی غلظت دقیق را نمایان کند.

در اندازه‌گیری ارتفاع رسوب که توسط رویج^۱ و دالزیل^۲ در سال ۲۰۰۱ انجام گرفت از تکنیک جدیدی استفاده شد، بدینگونه که با نصب یک الکتروود مرجع در بالای کانال در آب تمیز و نیز نصب ۶۶ الکتروود در کف کانال در سه ستون و ۲۲ ردیف، توانستند با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی میزان جرم رسوب در واحد سطح را با دقت 0.5 mg/cm^2 در فواصل مختلف، به صورت منحنی‌هایی در فواصل زمانی ۳۵، ۱۰ و ۶ ثانیه بدست آورند. یو^۳ و همکاران به بررسی تجربی رفتار ته‌نشینی رسوبات ریز در مخازن پرداخته و بیان نمودند که رفتار ته‌نشینی رسوبات به طور تنگاتنگ با اندازه ذرات رسوب مرتبط است. به دلیل آنکه نیروی رانش، نیروی گرانش مؤثر و نیز پروفیل سرعت به طور تنگاتنگ با پروفیل غلظت مرتبط است، لذا هیدرودینامیک جریان و پروفیل سرعت از عوامل بسیار تعیین‌کننده در رسوبگذاری است. در ادبیات

^۱ Rooij

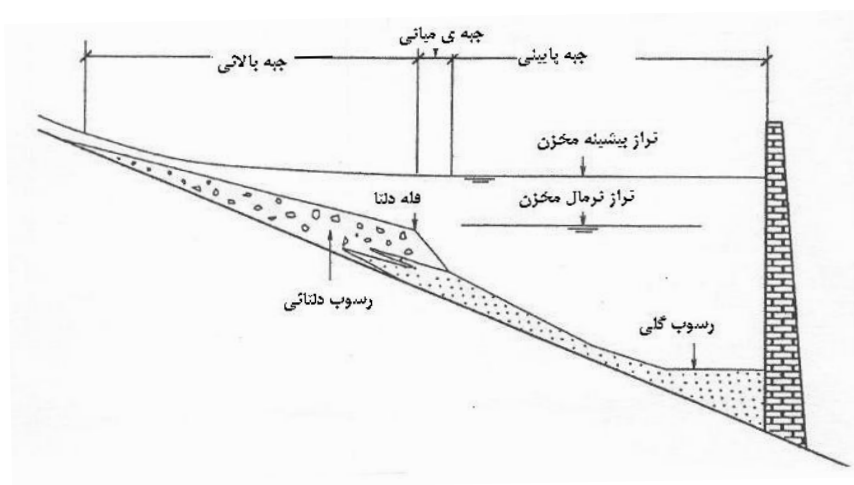
^۲ Dalziel

^۳ Yu

جریان گل آلود، رسوبات از نظر امکان ته‌نشینی به چهار دسته تقسیم می‌شود که نمایی از آن در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

- ذرات درشت که در دلتا هستند.
- رسوبات ریز که در منطقه شبه همگن (منطقه قبل از ناحیه فرو روی) ته‌شین می‌شوند.
- ذرات خیلی ریز که در منطقه جریان گل آلود (منطقه بعد از فرو روی) وجود دارند.
- ذرات خیلی ریز که در منطقه دریاچه گل آلود ته‌شین می‌شوند.

یو و همکاران در سال ۲۰۰۰ همچنین مقادیر رسوبات ته‌نشین شده و نیز تفاوت مواد ته‌نشین شده بین بالادست و پائین‌دست منطقه فرو روی را با هم دیگر مقایسه و نتیجه گرفتند که بیشتر ذرات ریز در ناحیه شبه همگن و عمده ذرات چسبنده ریز در ناحیه گل آلود ته‌نشین می‌شوند. در جهت جریان شبه همگن و گل آلود نرخ ته‌نشینی ذرات چسبنده ریز افزایش می‌یابد و با توجه به تعریفی که از عدد ریچارسون موضعی ارائه شد، ذکر نمودند که اگر عدد ریچارسون موضعی بزرگتر از $0/25$ باشد، میدان جریان در جوار فصل مشترک جریان گل آلود و آب صاف پایدار می‌باشد. همچنین، ضخامت بدنه جریان را مکانی در نظر می‌گیرند که در آن عدد ریچارسون موضعی حداقل باشد.



شکل ۲-۲: نمایی از ته‌نشینی رسوبات و نیمرخ طولی رسوب گذاری

صلاح‌الدین و همکاران دریافتند که رسوبات ریز در جریان چگال ظرفیت حمل ذرات درشت را افزایش می‌دهند. کسل^۱ و کراننبرگ^۲ در سال ۱۹۹۶ به بررسی آزمایشگاهی جریان گل آلود بسیار غلیظ به کمک خاک چینی بر روی سطح شیب‌دار پرداخته و با توجه به تعریفی که از عدد رینولدز مؤثر ارائه دادند، گذر از حالت لایه‌ای به مغشوش را در عدد رینولدز مؤثر ۲۰۰۰ بیان می‌کنند. البته لازم به ذکر است که خاک چینی همان کائولینیت تجاری است که به دلیل شباهت رفتار رئولوژیکی با لجن طبیعی و همچنین سهولت در دسترسی و کار با آن، به جای رسوبات بستر در آزمایشات مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلتیناکار^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۶ با استفاده از دو نوع مختلف رسوب، آزمایش‌هایی با جریان گل آلود انجام دادند و پروفیل سرعت و غلظت را در سه جهت و همزمان اندازه گرفتند. نتایج، نشان داد که پروفیل سرعت بی‌بعد نسبت به تغییرات بزرگ توزیع غلظت حساس نیست.

چگالی متوسط یک جریان گل آلود با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\rho_t = C_s \rho_s + (1 - C_s) \rho_a = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) C_s \quad 2-2$$

که در آن C_s غلظت وزنی مواد دانه‌ای است که نسبت به عمق جریان متوسط گیری می‌شود. جهت پارامتری کردن جریان غلیظ عدد فرود چگالی جریان که معادل نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ثقلی کاهش یافته به صورت زیر، استفاده نمودند :

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{(g'H \cos \alpha)}} \quad 3-2$$

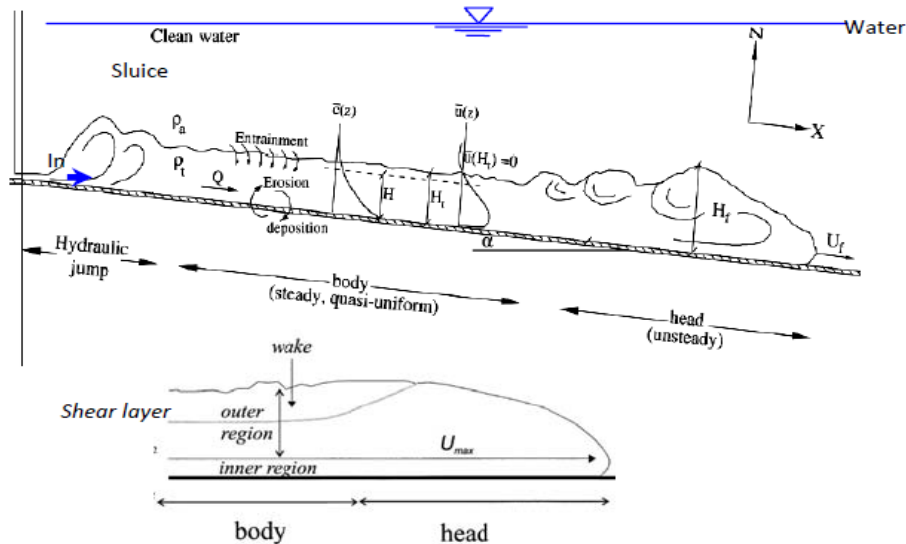
$$g' = \frac{(\rho_{mix} - \rho)}{\rho} \cdot g \quad 4-2$$

^۱ Kessel

^۲ Keranenburg

^۳ Altinakar

که در آن Fr_d عدد فرود دنسیمتریک و ρ_{mix} جرم مخصوص مخلوط آب و رس می باشد. معمولاً فصل مشترک بین جریان گل آلود و سیال محیطی به راحتی قابل تشخیص نبوده و به همین دلیل ارتفاع H و سرعت U با استفاده از انتگرال گیری از جریان حاصل می شود :



شکل ۲-۳ نمودار یک جریان غلیظ

$$q = \int_0^{H_t} u_z dz = \bar{U} \cdot H_t \quad 5-2$$

$$\int_0^{H_t} u_z^2 dz = \beta \bar{U}^2 \cdot H_t \quad 6-2$$

که در آن u_z سرعت نقطه ای و H_t (ضخامت کل جریان گل آلود) ارتفاع متناظر سرعت صفر است و \bar{U} عبارتند از متوسط سرعت جریان و β نیز عبارتند از ضریب توزیع سرعت (بوسینیسک) است.

۲-۴ توزیع و تحلیل غلظت

مدت زمان زیادی است که توزیع پروفیل عمقی غلظت رسوبات ریزدانه در کانال‌های آبیاری و رودخانه‌ها توجه دانشمندان و مهندسان علم هیدرولیک رسوب را به خود جلب کرده است. تخمین چگونگی توزیع این پروفیل به دلایل کاربردی گوناگون، از جمله طراحی آبنگورها، حوضچه‌های رسوب‌گیر و کانال‌های انتقال آب حائز اهمیت می‌باشد. امروزه با مطالعه رسوب حمل شده توسط رودخانه و ایجاد سازه‌هایی نظیر

حوضچه‌های متنوع رسوب‌گیر در ورودی شبکه‌ها و قرارگیری آبنگیر در شرایط مناسب، تا حد امکان از ورود رسوب به شبکه‌ها جلوگیری به عمل می‌آید. با این حال، در بسیاری موارد به دلیل تغییر شرایط یا عدم طراحی درست و بهینه حوضچه‌های رسوب‌گیر و یا نبود شرایط مناسب جهت استفاده از رسوب‌گیرها، رسوبات وارد شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌شوند و باعث بروز مشکلات بسیار زیادی در مسیر انتقال آب در کانال‌ها می‌گردند. رسوب نهشته شده در کانال اصلی باعث تغییر زبری کانال و همچنین کاهش سطح مقطع عبوری جریان شده و در مجموع باعث کاهش ظرفیت یا دبی کانال می‌شوند. در نتیجه آب مورد نیاز به بخش‌هایی از شبکه آبیاری و زهکشی نرسیده که خسارت جبران ناپذیری را ایجاد می‌کند. از اینرو ضروری است تا هر سال کانال‌های انتقال اصلی و فرعی به صورت مکانیکی لایروبی گردند که این امر هزینه زیادی را به شبکه‌های آبیاری و زهکشی تحمیل خواهد کرد. با مطالعه مکانیسم انتقال و ته نشینی رسوب در کانال‌ها می‌توان با طراحی مناسب سیستم حوضچه ته نشینی و کانال‌های انتقال، خسارات ناشی از ته نشینی را به حداقل رساند. هر چند در این زمینه در گذشته مطالعات زیادی انجام شده است، ولی با توجه به پیچیدگی اندرکنش رسوب و آب، هنوز مسائل شناخته نشده بسیاری باقی مانده است.

برای بررسی حرکت رسوب در آب به عنوان ماده‌ای با وزن مخصوص سنگین‌تر از آن از معادله پخش به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial c}{\partial x} + \varepsilon_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial y} \quad 7-2$$

معادله فوق معادله پخشیدگی رسوب در جریان دو بعدی می‌باشد. اولین ترم سمت راست این معادله بیانگر جابجایی افقی، ترم‌های دوم، سوم، چهارم و پنجم مربوط به پخشیدگی رسوب و ترم آخر مربوط به ته نشینی ذرات است. برای تعیین پروفیل غلظت مواد معلق فرض می‌گردد که پروفیل قائم بار معلق در حال تعادل باشد و فرآیند پخشیدگی رسوب ماندگار و یکنواخت خواهد بود. بنابراین می‌توان از همه عبارات

مربوط به تغییرات زمانی و همچنین تغییرات در راستاهای بجز عمود بر جریان صرف نظر کرد. یعنی پخشیدگی فقط در عمق تغییر می کند و غلظت مواد معلق در طول تغییر نمی کند. بنابراین معادله ۲-۷ به

شکل زیر تغییر می کند

$$V_v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad ۸-۲$$

در اینجا V_v مولفه عمودی سرعت مواد معلق می باشد که بجای آن از Ω (سرعت سقوط ذرات) استفاده می شود. ضریب پخشیدگی ε_s نیز به ضریب ادی در جریان های درهم ربط داده می شود. با انتگرال گیری و با فرض ثابت بودن مقادیر W و ε_v و اینکه ضریب پخشیدگی در این رابطه با ضریب ادی ε در جریان های آشفته مرتبط می باشد. در نهایت معادله مشهور Rouse-Vanoni که بر پایه تئوری diffusion-advection استوار می باشد، جهت محاسبه پروفیل غلظت رسوب به شکل زیر در می آید:

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{H-h}{h} \frac{a}{H-a} \right)^Z \quad ۹-۲$$

در معادله فوق، C_a غلظت رسوب، H عمق آب، h عمق مورد نظر بالای کف و Z پارامتر تعلیق می باشد که بیان کننده نسبت بین نیروهای لیفت و وزن بر روی ذره را بیان می دارد.

$$Z = \frac{\Omega}{\beta k u_*} \quad ۱۰-۲$$

که در آن k ثابت جهانی وان کارمن و برابر با $۰/۴$ ، Ω سرعت سقوط ذرات در آب تمیز، u_* سرعت برشی، β پارامتر تناسب بین ضریب اختلاط رسوب و سیال:

$$\beta = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_w} \quad ۱۱-۲$$

اینکه ضریب پخشیدگی رسوب ε_s بیشتر یا کمتر از ضریب پخشیدگی جریان ε_w باشد، اظهار نظر قطعی در منابع وجود ندارد. محققانی همچون Van Rijn (۱۹۹۳)، Abdel-Fattah (۱۹۹۸) و (۱۹۷۰)

Coleman اظهار داشتند که مقدار پارامتر β بیشتر از واحد می‌باشد. برخی از جمله Zanke (۱۹۸۵) Yang, (۱۹۸۲) و Laursen گزارش نمودند که مقدار آن نمی‌تواند بیشتر از واحد باشد. برخی محققان نظیر Rouse – Vanoni (۲۰۰۶)، لین و کالینسکی نیز مقدار آن را برابر با ۱ فرض کردند. مدارکی وجود دارد که مقدار βk بیشتر از ۰/۴ می‌باشد. با فرض مقدار ثابت وان کارمن برابر با ۰/۴، مقدار پارامتر β بیشتر از واحد می‌باشد و این یعنی اینکه پخشیدگی رسوبات خیلی شدیدتر از پخشیدگی آب می‌باشد. این در حالی است که برخی محققین از قبیل زانک (Zank, ۱۹۸۵) گزارش نمودند که مقدار k باید بیشتر از ۰/۴ باشد.

با افزایش اندازه ذره، مقدار پارامتر β کمتر می‌شود. این امر توسط محققانی همچون اسماعیل و حسن (پس از عبادزاده ۱۹۸۷) تایید شده است. ایشان گزارش دادند که برای قطر ۰/۱ و ۰/۱۶ میلی متر، مقدار β به ترتیب برابر با ۱/۶ و ۱/۳ می‌باشد. Van Rijn در سال ۱۹۹۳ فرض نمود که مقدار پارامتر β بیشتر از ۱ بوده و آن را به صورت تابعی از سرعت برشی و سرعت سقوط ذره ارائه دادند:

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{\omega^2}{u_*} \right) \quad 0.1 < \frac{\omega^2}{u_*} < 1 \quad 12-2$$

لین و کالینسکی با فرض β برابر با ۱ و $k=0.4$ معادله زیر را برای پیش‌بینی توزیع عمقی غلظت رسوب ارائه دادند:

$$C = C_a \exp \left[\frac{-1.5\omega \left(\frac{h-a}{H} \right)}{u_*} \right] \quad 13-2$$

در معادله بالا ω سرعت سقوط مربوط به اندازه D_{35} یا D_{50} مواد معلق می‌باشد و مقدار C_a برابر با غلظت مواد معلق در عمق a از بستر کانال است. البته بدست آوردن توانایی کمی کردن صحیح غلظت رسوبات معلق همواره مد نظر محققان بوده و در راستای تحقق این هدف، روش‌های اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق در طول زمان دستخوش تغییر و تحول شده‌اند. رودخانه‌های ما در مقایسه با رودخانه‌های

جهان به دلیل شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و فشار بیش از حد به اراضی حوضه‌های آبخیز، رسوبات بیشتری حمل نموده و لذا آسیب و خسارت زیادی را به دنبال دارند. مهم‌ترین این خسارت شامل تخریب پل و سازه‌های کنار رودخانه، عمیق‌تر شدن بستر کانال‌ها، کاهش پتانسیل انتقال رسوب در پائین‌دست، پر شدن کانال‌های آبرسانی و کاهش عمق رودخانه‌ها، رسوبگذاری در مخازن پشت سد و کاهش ظرفیت آن و انتقال آلودگی‌ها می‌باشند.

از طرفی، آزمایشات نشان می‌دهند که در یک پروفیل قائم جریان آب، مقدار بار معلق حدود ۷۰٪ تا ۹۰٪ بار رسوب کل را تشکیل می‌دهد. این سهم بالا، اهمیت برآورد مناسب بار معلق را به عنوان بخش تعیین کننده بار کل رسوب روشن‌تر می‌سازد. روش معمول برای تخمین رسوب در علم هیدرولوژی استفاده از منحنی سنج رسوب می‌باشد. در واقع از طریق داده‌های هیدرومتری و رسوب سنجی و با توجه به اینکه عموماً دبی رسوب Q_s تابعی از دبی جریان Q_w می‌باشد، رابطه‌ای بین این دو استخراج می‌گردد که به منحنی سنج رسوب معروف می‌باشد و با استفاده از ارقام دراز مدت گذر جریان در رودخانه، بار معلق دراز مدت رودخانه برآورد می‌شود.

اگرچه دبی رسوب انتقالی در رودخانه تابع دبی جریان می‌باشد، ولی این عامل تنها عامل موثر بر دبی رسوب نمی‌باشد. بنابراین تعیین دبی رسوب با استفاده از این روش عموماً همراه با خطا می‌باشد. به همین دلیل، جهت برآورد رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها، معادلات متعددی توسط محققان تعریف شده است. برخی از این معادلات و روابط که از اعتبار و مقبولیت جهانی برخوردار می‌باشند شامل روش‌های راس، اینشتین، ساماگا، لین و کالینسکی، بگنولد و فان راین می‌باشند. از طرفی در اکثر معادلات تخمین رسوبات معلق، غلظت رسوبات اندازه‌گیری شده یکی از پارامترهای موثر می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری رسوب به دو دسته روش‌های سنتی و روش‌های سنجش از راه دور تقسیم‌بندی شده‌اند. روش‌های سنتی

شامل دو روش دستی و استفاده از اسپکتروفتومتر بوده و روش‌های استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، پردازش تصاویر دیجیتال و استفاده از ADV و ACP در زمره روش‌های سنجش از راه دور قرار گرفته‌اند.

بخش دوم: مروری بر مطالعات پیشین

۲-۵ مقدمه

یکی از راهکارهای مهم مدیریت رسوب در مخازن سدها، استفاده از پدیده جریان گل آلود می‌باشد. جریان گل آلود توأم با حجم قابل توجهی از رسوبات معلق رودخانه و حوزه بوده و با توجه به دارا بودن سرعت و غلظت قابل توجه، بخشی از رسوبات ته نشین شده در دوره‌های قبلی را نیز فرسایش داده و با خود حمل می‌کند. با مانور مناسب دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی، می‌توان حجم قابل توجهی از رسوب ورودی را قبل از ته نشین شدن در مجاورت بدنه سد، از بدنه سد خارج نمود. این روش برای مخازن بزرگ که دارای ظرفیت ذخیره چندین ساله بوده و پایین آوردن تراز سطح آب آنها به دلایل فنی و اقتصادی امکان پذیر نباشد، روش مناسبی می‌باشد.

برای استفاده از جریان گل آلود، باید زمان تشکیل آن و حجم و غلظت رسوب ورودی به مخزن سد مشخص شود. همچنین باید نحوه پخش و انتقال آن در نقاط مختلف مخزن سد تعیین شود. این کار نیازمند برنامه ریزی دقیق، اندازه گیری های میدانی منظم و پیوسته در مخزن سد و نیز بودجه زیادی است. به همین دلیل، بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه اندازه گیری جریان گل آلود، آزمایشگاهی بوده و مطالعات محدودی در مخازن سدها انجام شده است.

مطالعات به ۲ بخش مطالعه بر روی جریانهای گل آلود و غلیظ، مطالعه بر روی رسوبات بستر و حرکت جهشی ذرات تقسیم شده است.

۲-۶ رسوبات بستر و حرکت جهشی ذرات

در اغلب موارد حرکت رسوبات به صورت غلتشی و جهشی بوده و انتقال بار بستر و حرکت ذرات به صورت معلق را انتقال بار معلق می‌نامند. محققان بسیاری از جمله وایبرگ^۱ و اسمیت^۲ در سال ۱۹۸۷ نشان دادند که اکثر حرکت رسوبات بستر به صورت جهش است. بنابراین آگاهی از مشخصه‌های جهش ذرات بستر و چگونگی ارتباط آنها با شرایط جریان در قانونمندی حرکت بار بستر بسیار موثر است. تاکنون حرکت جهشی ذرات در بستر کانال توجه محققان بسیاری را جلب نموده است. اینشتین در سال ۱۹۴۲ انتقال بار بستر را انتقال ذرات رسوبی دانست که در لایه باریکی به ضخامت دو برابر قطر ذرات بالای بستر به صورت جهشی، غلتش یا لغزش وجود دارند. وی همچنین فرض نمود متوسط فاصله‌ای که هر ذره در نزدیکی بستر طی خواهد کرد ۱۰۰ برابر قطر ذره بوده و مستقل از شرایط جریان است.

ابت^۳ و فرانسیس^۴ در سال ۱۹۷۹ انتقال رسوب به صورت جهش را به لایه‌ای با ضخامت ۱۰ برابر قطر ذره محدود نمودند. سپس با تحلیل نیروهای وارد بر ذرات نشان دادند که در این لایه، اثر نیروی ثقل ذره حاکم است و عامل شروع جهش ذره، تنش برشی کف می‌باشد. آزمایش‌های آنها همچنین نشان داد که جهش ذره در جریان ورقه‌ای نیز به وقوع می‌پیوندد، به این معنی که پدیده جهش ذره نتیجه نیروهای آشفستگی نیست. فن راین^۵ در سال ۱۹۸۴ به ارائه مدل عددی سیر یک گام جهش تک ذره پرداخت. در مدل وی نیروهای غوطه‌وری، لیفت و دراگ تعیین شده بود. وی همچنین با استفاده از داده‌های برداشت شده توسط فن بیک و لوک دو پارامتر ضریب زبری معادل k_s و ضریب لیفت α_L را کالیبره نموده و به

^۱ Wiberg

^۲ Smith

^۳ Abbot

^۴ Francis

^۵ Van Rijn

اعتبار بخشی مدل خود پرداخت. پس از وی نیز محققانی نظیر سکین^۱ و کیکارا^۲ در سال ۱۹۹۲، لی^۳ و سو^۴ در سال ۱۹۹۴، هو^۵ و هویی^۶ در سال ۱۹۹۶ و نینو^۷ و گارسیا^۸ در سال ۱۹۹۸ به توسعه مدل تئوری جهش تک ذره پرداختند و جزئیات بیشتری از حل لاگرانژی مسیر حرکت ذره از جمله شرایط مرزی اعمالی و نیروهای هیدرودینامیکی وارده، ارائه نمودند.

به عنوان مثال لی و سو در سال ۱۹۹۴ در مدل تئوریک خود با اضافه نمودن نیروی لیفت ناشی از اثر چرخش ذره، نشان دادند که طول و ارتفاع جهش ذره به ترتیب ۱۲٪ و ۶٪ افزوده شده و بنابراین نمی توان آن را نادیده گرفت. از تحقیقات صورت پذیرفته در دهه اخیر نیز می توان به مدل آزمایشگاهی انسی و همکاران^۹ در سال ۲۰۰۲ و مدل تئوری-آزمایشگاهی لی و همکاران در سال ۲۰۰۶ اشاره نمود. انسی و همکاران برای بررسی دو بعدی حرکت ذره کروی در یک جریان فوق بحرانی با شیب تند بستر، عرض کانال را تنها یک میلیمتر بیشتر از قطر ذره انتخاب نمودند. به دلیل عرض کم کانال و تأثیرپذیری جریان از دیواره‌ها، عدد رینولدز جریان در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق پارامتر شیلدز بحرانی τ_{*ct} را از مقادیر بیان شده توسط شیلدز و دیگر محققان پایین تر نشان داد. آنها این امر را به هندسه ذره مرتبط دانستند، زیرا اکثر محققان قبلی از ذرات طبیعی استفاده کرده بودند. آنها همچنین برای مرز بین حرکت غلتشی ذره و تبدیل آن به حرکت جهشی از این پارامتر استفاده و نشان دادند که زمانی که این پارامتر بی بعد از ۰/۰۳ بیشتر گردد، این تبدیل رخ خواهد داد.

^۱ Sekine

^۲ Kikkawa

^۳ Lee

^۴ Hsu

^۵ Hu

^۶ Hui

^۷ Nino

^۸ Garcia

^۹ Ancey et al

در تعیین ضخامت لایه‌ای جریان بار بستر می‌توان از ارتفاع جهش ذرات استفاده و نرخ انتقال بار بستر را به صورت تابعی از طول و ارتفاع جهش ذره بیان کرد. بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی یا عددی برای ردیابی حرکت ذرات در نزدیکی بستر و تشخیص ارتباط این مشخصه‌ها با شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان، امری ضروری است. محققان با توجه به توسعه تکنولوژی و تجهیزات آزمایشگاهی گام‌های جدیدی را در راستای شناخت، مواردی را برای تکمیل نتایج آزمایشگاهی و پیشرفت در توسعه مدل عددی پیشنهاد نموده‌اند.

مهدیزاده محلی و صالحی نیشابوری در سال ۱۳۸۹ در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهشی ذرات در نزدیکی بستر کانال پرداختند. در این تحقیق سعی شد تا جزئیات بیشتر و دقیق‌تری از تمامی مشخصه‌های حرکت جهشی ذره رسوبی با استفاده از تجهیزات جدید موجود مورد بررسی قرار گیرد و با یک دید جامع تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شرایط هیدرولیکی (تغییر در عمق و دبی جریان)، تغییر در اندازه و چگالی ذره رسوبی و همچنین تغییر در زبری بستر بر روی این پدیده بررسی شود. قابل ذکر است که در این تحقیق تنش برشی بستر که پارامتر تأثیرگذار در پدیده است، مستقیماً با اندازه‌گیری نوسانات سرعت (v', u') و محاسبه تنش رینولدز $(-\rho u'v')$ با استفاده از تکنیک تصویربرداری از جریان به دست آمده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش آشفتگی جریان، طول و ارتفاع جهش و سرعت ذره افزایش یافته و زوایای برخورد به بستر و بلندشدگی مجدد آن کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشهای ایشان همچنین حاکی از این بود که با افزایش قطر متوسط ذرات بستر، تمامی خصوصیات جهش افزایش می‌یابد. (مهدیزاده محلی و صالحی نیشابوری، ۱۳۸۹) برای حل عددی معادلات حاکم بر ذره و به دست آوردن مسیر حرکت آن در یک گام جهش، سرعت‌های اولیه جهش در هر دو جهت افقی و قائم به دست آمد که از آنها می‌توان به عنوان شرایط اولیه در حل عددی استفاده نمود. مولفه افقی سرعت ذره رسوبی در دامنه ۳ تا ۸ برابر سرعت برشی و مولفه قائم آن در دامنه ۱/۵ تا ۳/۵ برابر سرعت برشی قرار داشت.

خولار و همکاران در سال ۲۰۰۲ در یک مطالعه آزمایشگاهی، اثر رسوبات معلق روی مقاومت در مقابل جریان در آبراهه‌های آبرفتی را مورد بررسی قرار دادند. این محققین آزمایش‌های خود را در یک کانال شیب‌پذیر به طول ۳ متر و عرض ۲۰ سانتیمتر انجام و از مواد با دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت جهت ایجاد بستر با رسوبات متحرک استفاده کردند. در این تحقیق غلظت‌های مختلف مواد معلق استفاده شد و نتایج حاصل از آن با نتایجی که قبلاً در کانال‌های با بستر ثابت انجام شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر رسوبات معلق روی مقاومت در مقابل جریان در بسترهای ثابت و متحرک یکسان نیست. بر روی بستر متحرک، بدون تغییر قابل ملاحظه در اندازه فرم بستر، فاکتور اصطکاکی در آبراهه‌های رسوبی با افزایش غلظت بار معلق کاهش می‌یابد. در نتیجه در کانال‌های با بستر متحرک مقاومت هیدرولیکی با افزایش غلظت بار معلق کاهش می‌یابد. در کانال‌های با بستر زبر مقاومت در مقابل جریان با افزایش غلظت بار رسوب معلق هم افزایش و هم کاهش می‌یابد.

۲-۷ جریانهای غلیظ و گل آلود

تاکنون مشاهدات میدانی نه چندان زیادی در زمینه جریان‌های گل‌آلود انجام گرفته است. به دلیل دشواری و گرانی اندازه‌گیری میدانی، عمده بررسی‌های تجربی جریان گل‌آلود در آزمایشگاه صورت گرفته، مدل‌های ریاضی این جریان‌ها در ۷۰ سال اخیر توسعه یافته و به دلیل فقدان شناخت کافی روی پارامترهای مختلف نظیر ضریب درون آمیختگی رسوب ϵ_s ، معادلات به خوبی حل نشده‌اند. بررسی میدانی جریان گل‌آلود ناشی از حرکت این جریان در عمق زیاد و در زیر حجم وسیع آب بسیار مشکل و پرهزینه و مخرب است. همچنین به دلیل تقریب‌های زیادی که در استخراج نتایج اعمال می‌شود، بکارگیری آنها با عدم قطعیت زیاد همراه است (Bradford & Katopodes ۱۹۹۹). اکثر این بررسی‌ها به صورت دو بعدی بوده که به عنوان نمونه به (Altinaker et al, ۱۹۹۶)، (Yu et al ۲۰۰۰)، (Lee & Yu.,) و (۱۹۹۷) و (Bonnecase et al, ۱۹۹۳) می‌توان اشاره کرد.

در طول سال ۱۹۵۰ و بعد از آن مسائل رسوبگذاری مخازن ناشی از جریان‌های گل آلود به صورت تئوری و آزمایشگاهی در بسیاری کشورها مطالعه شده است. دی سزار و همکاران در تحقیقی یک مدل عددی مربوط به جریان گل آلود ارائه و نتایج حاصل با یک مدل آزمایشگاهی و همچنین مشاهدات میدانی مخزن (Lozzon) در آلپ کشور سوئیس مقایسه شد. (De Cesare et al, ۲۰۰۱). مدل عددی برای جریان دو فازی جهت شبیه‌سازی جریان‌های گل آلود بوده است. تحقیق دیگری توسط پارکر نیز بر روی ضخامت جریان گل آلود و عدد فرود قبل و بعد نقطه پلانچ انجام شد که در آن اعداد فرود به صورت توابعی که فقط به میزان درون آمیختگی سیال پیرامون ارتباط دارد ارائه گردیده است. (Parker & Toniolo, ۲۰۰۶). فوکوشیما نیز آزمایشاتی در حرکت جریان گل آلود سه بعدی انجام داد. نتایج وی نیز نشان می‌دهد که افزایش غلظت ورودی باعث افزایش گسترش عرضی می‌شود. اما در شیب‌های بالا این افزایش غلظت تاثیر چندانی از خود نشان نمی‌دهد. آزمایشات فوکوشیما همچنین نشان می‌دهد که افزایش شیب کف و غلظت هر دو به سرعت پیشروی جریان و یا سرعت پیشانی می‌افزاید (Fukushima & Hayakawa, ۱۹۹۵).

بررسی سه بعدی جریان گل آلود توسط علویان در سال ۱۹۸۶ انجام و ویژگی‌های جریان به خوبی استخراج شده است. در واقع علویان جریان گل آلود آب نمک را به صورت سه بعدی بررسی کرده و ذکر می‌کند که در فصل مشترک، گردابه‌ها و توربولانس به شدت مستهلک می‌شود. در مطالعه دیگری کوبو و ناکاجیما بر روی مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی آرایش موج رسوبی ناشی از جریان‌های گل آلود کار کردند. (Kubo Y., Nakajima T. ۲۰۰۲)

نتایج بدست آمده در راستای فهم نحوه شکل‌گیری موج رسوبی همراه با یک مدل عددی ارائه شد. لی

و یو مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را روی جریان گل آلود انجام دادند. (Lee H.Y., Yu W.S. ۱۹۹۷)

در این آزمایشات مقدار عدد فرود بحرانی در نقطه پلانج برابر با $0/88$ در نظر گرفته و در زمانی که عدد فرود این نقطه برابر با $0/6$ شود نقطه پلانج تغییر محل نمی‌دهد. مطالعه دو بعدی جریان گل‌آلود و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از جمله شیب و عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت و غلظت در مطالعه‌ای توسط کشتکار در سال ۱۳۸۷ مورد توجه قرار گرفت. شفيعی در سال ۱۳۷۶ با استفاده از مدل هیدرولیکی رودخانه و دریاچه پشت سد، خروج جریان‌های گل‌آلود را مورد بررسی قرار داد، به گونه‌ای که مقدار رسوب خروجی و راندمان حاصل از آن نیز محاسبه شد. همچنين عباسی در سال ۱۳۸۱ راندمان تخلیه رسوبات مخزن را با مدل فیزیکی مورد بررسی قرار داد.

قدیمی‌ترین مشاهدات روی جریان‌های گل‌آلود دریاچه‌ای توسط فورل^۱ در سال ۱۸۹۲ در دریاچه جنوا^۲ انجام شد. مطالعات وی نشان داد که رودخانه رون مملو از رسوب، به داخل دریاچه جریان یافته و یک جریان گل‌آلود ایجاد می‌کند. بل^۳ در سال ۱۹۴۲ مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را در زمینه جریان های گل‌آلود در فلوم‌های متعدد انجام و به اهمیت جریان‌های گل‌آلود در مساله رسوبگذاری مخازن پی برد و اینگونه بررسی‌ها از آن به بعد ادامه پیدا کرد. نقش رسوبات ریز دانه در جریان‌های گل‌آلود و افزایش ظرفیت حمل رسوبات درشت دانه‌تر و ته‌نشینی آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت (Salaheldin et al, ۲۰۰۰). فلیکس و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری ترکیبی پروفیل سرعت و غلظت را در جریان گل‌آلود مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری توام سرعت و غلظت در جریان غلیظ نشان داد که همسویی تغییرات زمانی پروفیل عمودی سرعت و غلظت به مقدار غلظت و شرایط جریان بستگی دارد (felix et al, ۲۰۰۵).

استوسک و زی مرمن، تبادل آب و رسوب را در یک دهانه جزر و مدی بندرگاه با استفاده از مدلسازی سه بعدی مورد بررسی قرار دادند (Stoschek & Zimmermann, ۲۰۰۶). راد و فیروز آبادی اثر عوامل

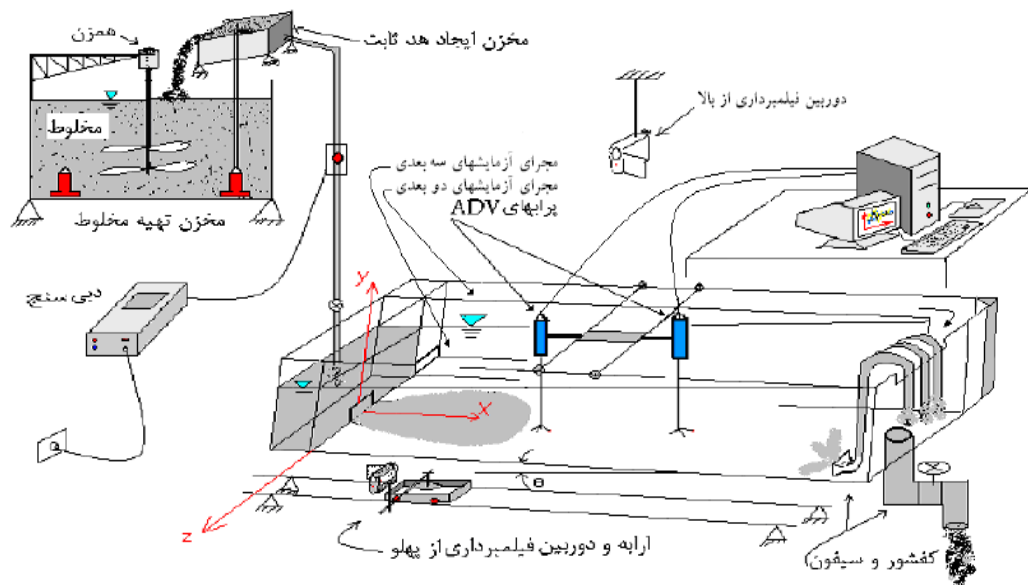
^۱ Forel

^۲ Geneva

^۳ Bell

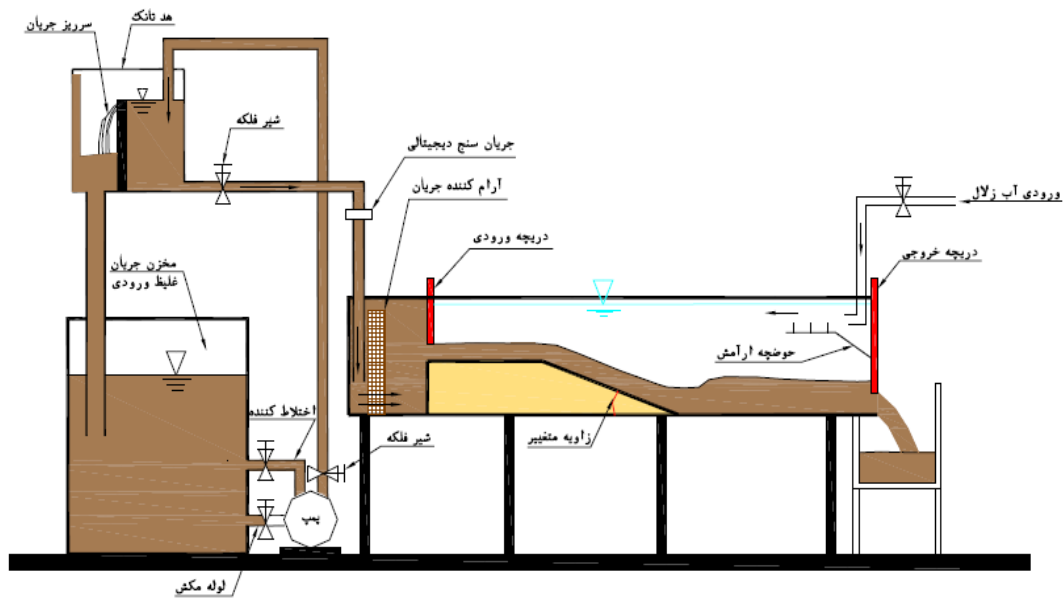
متعدد در مشخصه‌های جریان چگالی دو بعدی حاوی ذرات را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها همچنین با هدایت جریان در کانالی با پهنای کم تغییرات مشخصات جریان را بررسی و با حالت عدم هدایت جریان مقایسه کردند (راد و فیروز آبادی، ۱۳۷۶). همچنین فیروز آبادی و همکاران تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های جریان غلیظ سه بعدی و مغشوش حاوی ذرات ریز را به روش تجربی مطالعه کردند (فیروز آبادی و همکاران، ۱۳۸۴). محمد نژاد و شمسایی مشخصه‌های جریان‌های غلیظ و نقش آن در رسوب‌گذرای دریاچه پشت سدها را مورد بحث و بررسی قرار دادند و معادلات حاکم بر جریان را از روش تفاضل محدود و تکنیک رانگ گوتا مرتبه چهار حل کردند (محمد نژاد و شمسایی، ۱۳۸۱).

احمدی در مطالعات آزمایشگاهی خود تأثیر ایجاد مجرای خط القعر مخزن سدها را در میزان راندمان تخلیه جریان گل آلود مورد بررسی قرار داد (احمدی رنانی، ۱۳۸۲). حسن پور حیدری در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر طول مجرای خط القعر را بر راندمان تخلیه جریان گل‌آلود در مخازن سدها مورد بررسی قرار داد (حسن پور حیدری، ۱۳۸۳). مساله مهم در این خصوص این است که در جریان‌های گل‌آلود علاوه بر پیچیدگی ناشی از حضور ذرات بدلیل حرکت در زیر آب صاف و وجود برش در فصل مشترک، تغییرات مرز کف بدلیل رسوبگذاری و یا رسوب‌برداری ناشی از شویندگی بستر، سقوط ذرات و تغییرات نیروی رانش، تداخل آب صاف در فصل مشترک جریان رسوبی با آب صاف و نیز تداخل بستر و عوامل متعدد دیگر پیچیده‌تر می‌شود (راد و فیروزآبادی، ۱۳۷۶). در مطالعه آزمایشگاهی فیروزآبادی تأثیر ارتفاع بازشدگی دهانه ورودی بر پروفیل سرعت و غلظت جریان گل‌آلود در مخازن مستطیلی بررسی شد. شکل ۲-۴ نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی ایشان را نشان می‌دهد.



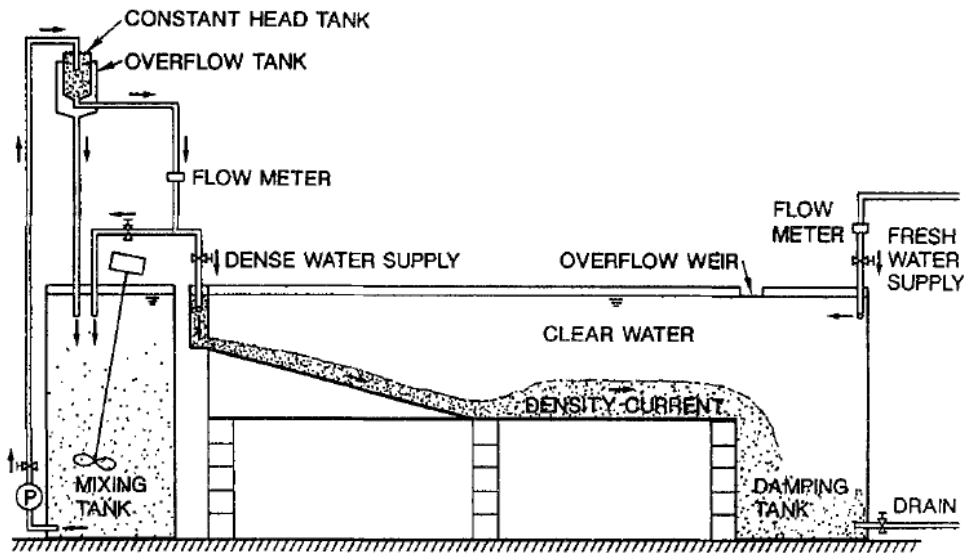
شکل ۲-۴: طرح شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی فیروز آبادی و همکاران

بهرامی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مطالعاتی بر روی تأثیر خصوصیات جریان غلیظ در اثر وقوع پرش هیدرولیکی انجام دادند. ایشان با ایجاد یک مدل هیدرولیکی که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌گردد، آزمایشات متعدد در سه شیب با زوایای $4/57$ ، $6/84$ و $9/09$ درجه، دبی‌های مختلف جریان غلیظ به میزان $0/5$ ، 1 و $1/5$ لیتر بر ثانیه با جرم حجمی 1014 ، 1007 و 1020 کیلوگرم بر متر مکعب برای انجام گردید. نتایج نشان داد که پرش‌های ایجاد شده پس از قسمت شیب‌دار در فاصله نزدیک به انتهای شیب تشکیل شده، این پرش‌ها دارای محدوده عدد ریچاردسون $0/7$ تا $0/915$ بوده و در ضمن سرعت جریان پس از پرش 21 تا 32 درصد نسبت به عمق اولیه پرش افزایش داشت.

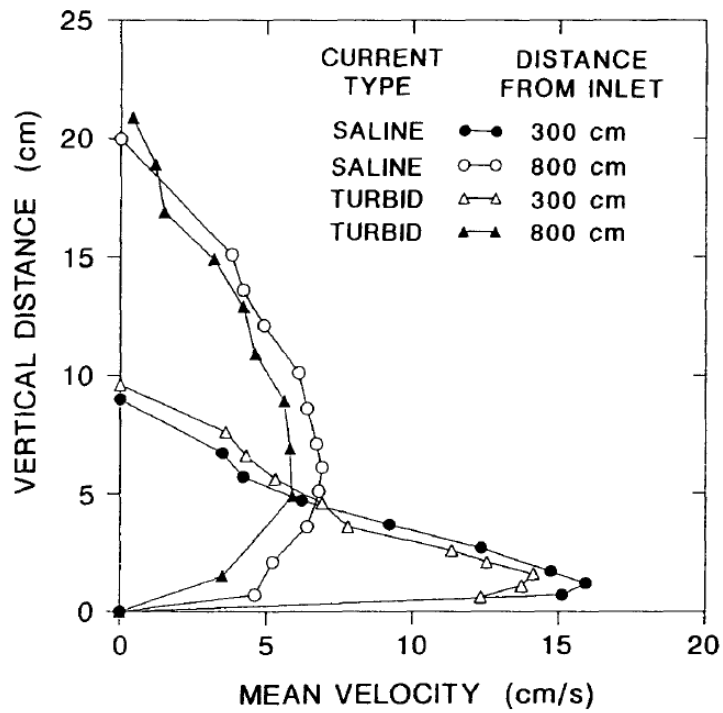


شکل ۲-۵: شماتیک فلوم و تاسیسات استفاده شده در آزمایشات بهرامی و همکاران

جامع‌ترین و وسیع‌ترین مطالعات روی پرش هیدرولیکی در جریان‌های گل آلود را گارسیا در سال ۱۹۹۳ جهت بررسی رفتار این جریان در کانال مستطیلی شکل انجام داد. وی ابتدا پرش هیدرولیکی همراه با مخلوط آب و نمک و سپس پرش بر روی مخلوط آب و رسوب را ایجاد نمود. البته در پژوهش صورت گرفته، جهش با تغییر شیب کف کانال ایجاد شده و از اصطکاک بستر در ناحیه ایجاد جهش صرف‌نظر گردیده است. به طور کل تحقیقات وی به بررسی خصوصیات مختلف جریان‌های گل‌آلود و نمکی در اعداد فرود مختلفی از جریان، شباهت‌ها و تفاوت‌های ساختار درونی جهش در جریان‌های حاوی رسوبات معلق و جریان‌های حاوی نمک و همچنین نقش جهش در چگونگی ته نشین شدن رسوبات در پایین دست کانال پرداخته است. آزمایش‌های ایشان در کانالی به عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۷۸ سانتیمتر و طول ۱۲ متر که در شکل ۲-۶ مشاهده می‌گردد، انجام گرفته است. قسمت ابتدایی کانال به طول ۵/۵ متر با شیب ۰/۰۸ و قسمت دوم کانال افقی و به طول ۶/۵ متر می‌باشد.

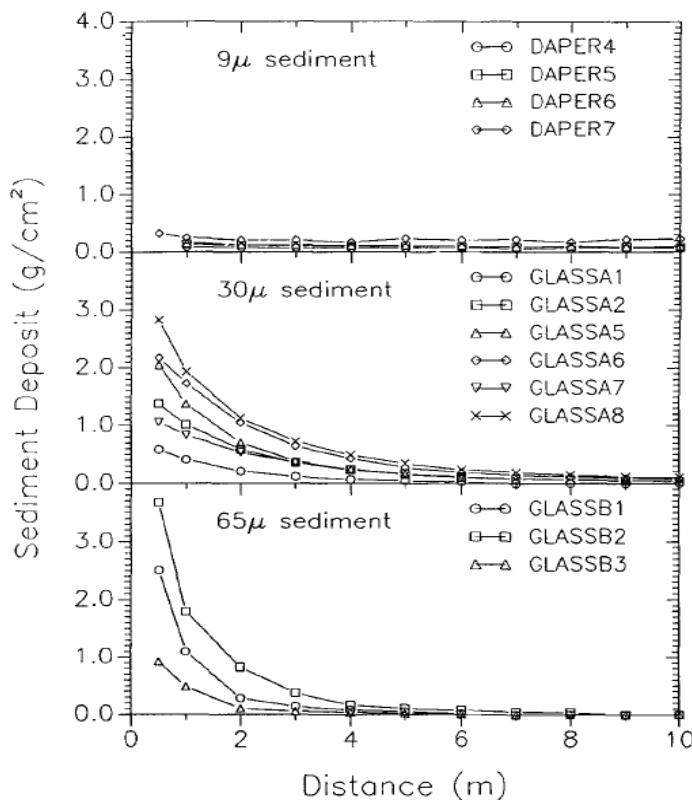


شکل ۲-۶: کانال آزمایشگاهی استفاده شده در مطالعه گارسیا



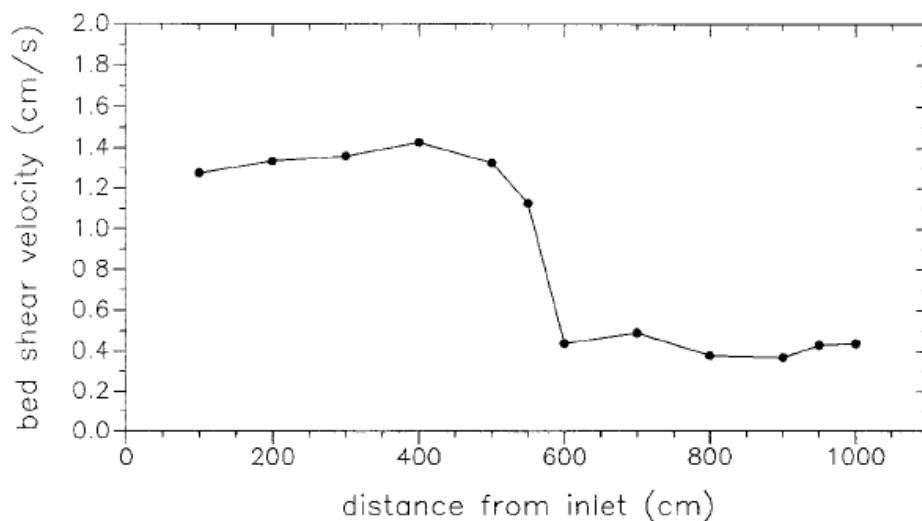
شکل ۲-۷: مقایسه توزیع سرعت جریانهای غلیظ و گل آلود

گارسیا آزمایشات خود را به دو قسمت تقسیم نمود. یک سری آزمایشات با تزریق نمک در غلظت‌های مختلف جریان انجام و سری دوم آزمایشات با تزریق رسوبات با محدوده قطر بین ۴ تا ۶/۵ میکرومتر به جریان صورت پذیرفت و در نهایت به نتایجی دست یافت. بر اساس نتایج و مطابق شکل ۲-۷، توزیع سرعت و غلظت جریان‌های گل‌آلود با دانه‌های ریز رسوب و جریانهای نمکی قبل و بعد از جهش شبیه به یکدیگر می‌باشند. به طور کلی با افزایش اندازه ذرات، تمایل به ته‌نشینی مطابق شکل ۲-۸ افزایش یافته و در نتیجه ضخامت ته‌نشینی افزایش می‌یابد. در فواصل مساوی از محل ورودی جریان و در شرایط ورودی یکسان، مواد درشت‌دانه نسبت به مواد ریزدانه ضخامت ته‌نشینی بیشتری دارد و نهایت آنکه ضخامت ته‌نشینی با فاصله ورودی از جریان به صورت نمایی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۸: چگونگی ته‌نشینی رسوبات در فواصل مختلف از ورودی

همچنین ضریب زبری کف در مورد رسوبات ریزدانه به صورت نمایی کاهش می‌یابد. تنش برشی نیز در پایین دست جهش در هر دو جریان نمکی و گل آلود مطابق شکل ۲-۹ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و به همین دلیل ته‌نشینی ذرات رسوبی در پائین دست جهش افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۹: تنش برشی در امتداد پرش هیدرولیکی

همچنین گارسیا و پارکر در سال ۱۹۸۹ جهت بررسی پرش هیدرولیکی در جریانهای غلیظ و در شکست شیب‌ها از ۴ نوع ذره رسوبی با قطرهای ۴ و ۹ و ۳۰ و ۶۵ میکرومتر استفاده و در نهایت به این نتیجه رسیدند که به ازای قطرهای کوچکتر یعنی ۴ و ۹ میکرومتر پرش هیدرولیکی در نزدیکی محل شیب تشکیل شده ولی به ازای قطرهای بزرگتر یعنی ۳۰ و ۶۵ میکرومتر جهش در محل شیب تشکیل نشده و جریان با حالت بحرانی عبور می‌کند که این تغییرات توسط مطالعه عددی که برخی محققین از جمله کوستیک و پارکر انجام دادند، مورد تأیید قرار گرفت.

پس از گارسیا تحقیقات دیگری در خصوص امکان وقوع پرش هیدرولیکی در جریان غلیظ رسوبی انجام شد. Parker و Kostic در سال ۲۰۰۵ با ارائه یک مدل ریاضی حداکثر قطر ذراتی که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی گارسیا امکان وقوع پرش هیدرولیکی وجود داشت را ۱۲۰ میکرون بیان کردند. تاکنون مطالعات اندکی در زمینه تأثیر رسوبات ریزدانه معلق و غلظت رسوبات بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در

کانال مستطیلی انجام شده است. در تحقیقات گارسیا این موضوع به طور جامع بررسی شده است به طوری که با ایجاد و طراحی مدل آزمایشگاهی و سیستم گردشی جریان رسوب، به بررسی نقش غلظت بر روی مشخصات چهش هیدرولیکی در دامنه بسیار وسیعی از اعداد فرود پرداخته شده است.

در تحقیقات انجام شده توسط ظهیری و همکاران، نتایج ۳ مرحله اندازه گیری صحرایی شامل سرعت جریان و غلظت رسوب در چند نقطه از مخزن سد دز را مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و حجم رسوب ورودی ناشی از جریان گل آلود به مخزن سد محاسبه شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که فقط در سیل اردیبهشت ماه ۱۳۸۲ (با دبی ۲۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه)، حدود ۱/۱ میلیون متر مکعب رسوب در اثر جریان گل آلود در مجاورت بدنه سد ته نشین شده است. بنابراین می توان با برنامه ریزی مناسب و انجام عملیات رسوب شویی مخزن در فصل سیلاب، رسوب گذاری جلوی آبگیر نیروگاه را مهار نمود. حداکثر ضخامت جریان گل آلود در این سیل حدود ۲۵ متر تخمین زده شده است. همچنین مشخص شد که برای محاسبه حجم رسوب ناشی از جریان گل آلود، علاوه بر مقدار دبی سیل، زمان وقوع سیل نیز بسیار مهم است.

تاکنون بررسی های زیادی روی تغییرات مورفولوژی در دوره های زمانی مختلف، توسط پژوهشگران داخل و خارج از کشور انجام شده است. بررسی مکانیزم فرسایش رودخانه در پایاب سد میناب در رودخانه میناب (حسین زاده و نوحه گر. ۱۳۸۵؛ نوحه گر، حسین زاده و افشار. ۱۳۸۹)، بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی در اطراف سدها (بیاتی، کرمی، رجبی و مختاری. ۱۳۸۸)، بررسی تأثیر سد شهید مدنی بر رودخانه پایاب (اعلمی، احمدیان و تیموری مقدم. ۱۳۸۸) و مطالعه تأثیر سد مخزنی کرخه بر بستر رودخانه کرخه (بخشعلی پور و قمشی. ۱۳۹۰) از جمله پژوهشهای انجام شده در داخل کشور می باشد. مطالعه تغییرات بستر پایاب سد کوچیتی (گیجی و پیرر. ۲۰۰۳)، تغییرات دراز مدت بستر رودخانه

ریوگراندو در اثر احداث سازه های آبی (گیجی، پیرر و درو. ۲۰۰۵)، تغییرات هندسه هیدرولیکی پایین دست هاپ چئون (شین و پیرر. ۲۰۱۰)، تأثیر پالسه های روزانه جریان ناشی از سد بر روی رودخانه هووانگ (شین و پیرر. ۲۰۱۱)، بررسی تأثیر سد اینگل برایت بر مورفولوژی پایین دست و بررسی تأثیر عملکرد سد کیتسون بر مورفولوژی رودخانه آرکانساس نمونه هایی از مطالعات در این زمینه در خارج از کشور می باشد.

در این زمینه سیفی زاده و همکاران با استفاده از مدل های ریاضی، تغییرات مورفولوژی رودخانه پلرود در پایاب سد برای یک دوره کوتاه مدت پس از احداث سد، پیش بینی کردند. سپس نتایج آن با حالت عدم وجود سد مقایسه شد. نتایج نشان داد که در حالت وجود سد، فرسایش بیشتری در رودخانه ایجاد می شود. بیشترین فرسایش در حالت وجود سد، ۴/۷ متر و در حالت عدم وجود سد ۳/۷ متر می باشد. بیشترین تأثیر احداث سد بر مورفولوژی رودخانه، تا فاصله ۱۰ کیلومتری از محور سد در پایاب می باشد. در فاصله دورتر تغییرات بستر رودخانه در دو حالت وجود و عدم وجود سد تقریباً مشابه و شدت این تغییرات بسیار کم می باشد. بیشترین تغییرات رودخانه در سال های ابتدایی رخ داده و با گذشت زمان از شدت تغییرات کاسته شده است. نتایج همچنین نشان داد که فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه با گذشت زمان در حال رسیدن به تعادل می باشد و رودخانه به حالت رژیم خواهد رسید.

بنی هاشمی و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از یک کانال با بازشدگی در پلان و مقطع قائم، و با تغییر برخی از پارامترهای موثر در رسوبگذاری مانند دبی آب، عمق آب مخزن، دبی رسوب و خواص فیزیکی - هندسی مخزن رسوبگذاری دلتایی در مخزن سد را مورد مطالعه قرار دادند سپس برای آزمایش های انجام شده، مدل عددی مشابه در محیط HEC-RAS با استفاده از توابع مختلف انتقال رسوب شبیه سازی شده و نتایج آن با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. و تابع انتقال رسوبی که نزدیکترین پاسخ را به مدل آزمایشگاهی داده مشخص کردند. نتایج هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی

نشان داد که، میزان تغییرات سرعت حرکت دلتای رسوبی در مخزن نسبت به عمق آب حساس تر از سایر پارامترهای مورد مطالعه بوده است. برای نمایش قانون حاکم بر میزان جابجایی دلتا در هر دو مدل، با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای ترکیبی متناسب با فیزیک مساله استخراج شده و با کمک اعداد بی بعد حاصل و همچنین نتایج حاصله، با معرفی یک عدد بی بعد جدید نمودارهای مشخصه پیشروی دلتا ترسیم شده اند. مقایسه نتایج نشان می دهد که هر دو مدل با توجه به شرایط آزمایش رفتار مشابهی دارند.

بنی هاشمی و همکارانش همچنین به بررسی نتایج نرم افزار HEC-RAS با نگاه به توابع انتقال رسوب و روش های سرعت سقوط به کار گرفته شده در آن پرداختند. بدین منظور بعد از مطالعه و بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد لتیان طی ۳۵ سال گذشته در این پژوهش با شبیه سازی مخزن سد لتیان در مدل عددی HEC-RAS میزان دقت و خطای این مدل، برای سه معیار مهم و ضروری رسوبگذاری یعنی سرعت پیشروی دلتا، میزان نشست رسوبات در نقاط مختلف مخزن و نرخ بالا آمدن کف مخزن در مجاور بدنه سد و دریچه ها را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت، با انتخاب تابع و روش مناسب نحوه پیشرفت رسوبات در مخزن سد در سال ۱۴۰۰ پیش بینی کردند.

فصل سوم

معادلات حاکم بر جریان و معرفی نرم افزار Flow-۳D

بخش ۱ : معادلات حاکم بر جریان

۱-۳ مقدمه

معادلات حاکم بر جریان سیال از قوانین بقای جرم و مومنتوم بدست می‌آیند و به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی می‌باشند. به طور کلی برای بدست آوردن معادلات جریان، سه گام زیر را می‌توان در نظر گرفت :

▪ انتخاب قوانین پایه صحیح

▪ کاربرد قوانین توسط یک مدل مناسب جریان

▪ اقتباس معادلات ریاضی که مجسم کننده قوانین فیزیکی فوق باشند.

۲-۳ معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل برای یک المان سیال به دست

می‌آید. معادله عمومی پیوستگی به شکل زیر است:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1-4)$$

که در آن V_f کسر حجم باز به جریان، ρ چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) می‌باشند. A_x کسر سطح باز در جهت x است، A_y و A_z به طور مشابه کسر سطح در جهات y و z می‌باشند.

۳-۳ معادلات اندازه حرکت

معادلات حرکت سیال با مولفه‌های سرعت (u, v, w) در سه جهت مختصات، یعنی معادلات ناویر-

استوکس به شکل زیر هستند :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (۲-۴)$$

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های جرم، (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های لزجت است. برای متغیرها لزجت

دینامیکی μ ، شتاب‌های لزجی به شکل زیر هستند :

$$\begin{aligned} \rho V_F f_x &= w s_x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \\ \rho V_F f_y &= w s_y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \\ \rho V_F f_z &= w s_z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \end{aligned} \quad (۳-۴)$$

که در آن :

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

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\}$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\}$$

در معادلات فوق جملات WSX ، WSY و WSZ بیانگر تنش‌های برشی دیواره‌ها هستند. اگر این جملات حذف شوند، دیگر تنش برشی دیواره‌ای نخواهیم داشت زیرا جملات باقیمانده شامل کسر مساحت‌های جریان (A_x, A_y, A_z) می‌شوند که در آن‌ها دیواره‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. تنش‌های روی دیواره‌ها به وسیله فرض سرعت مماسی صفر در قسمتی از سطح محدود به جریان شبیه‌سازی می‌شوند. شبکه و مرزهای موانع متحرک جزء موارد استثنا هستند زیرا در آن‌ها سرعت مماسی غیر صفر است.

۳-۴ مدل‌های آشفتگی

غالباً در اکثر پروژه‌های مهندسی جریان به صورت آشفته است. در اعداد رینولدز پایین جریان آرام است ولی در اعداد رینولدز بالا مشاهده می‌شود که جریان آشفته می‌شود، به طوری که یک حالت تصادفی از حرکت در جایی که سرعت و فشار به طور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند گسترش می‌یابد. این جریان‌ها به وسیله خصوصیتی که در ادامه ارائه شده‌اند، شناسایی می‌گردند:

■ جریان‌های آشفته به شدت غیر یکنواخت هستند. در این جریان‌ها اگر تابع سرعت در برابر زمان ترسیم شود، بیشتر شبیه به یک تابع تصادفی خواهد بود. کلمه بی نظم^۱ تا حدودی می‌تواند بیانگر وضعیت این جریان‌ها باشد.

■ این جریان‌ها معمولاً سه‌بعدی هستند، پارامتر سرعت میانگین گاهی اوقات ممکن است که تنها تابع دو بعد، اما هم‌چنین در هر لحظه ممکن است سه بعدی باشند.

■ در اینجا ذکر این نکته نیز لازم است که آشفتگی جریان باعث می‌شود که جریان‌هایی با مقادیر متفاوت اندازه حرکت یکدیگر برخورد کنند. گرادیان‌های سرعت بر اثر ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابند و این امر

^۱ Chaotic

باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که اختلاط یک پدیده مستهلک کننده انرژی است. انرژی تلف شده نیز طی فرآیندی یک‌طرفه به انرژی داخلی (حرارتی) سیال تبدیل می‌شود.

■ طی سال‌های اخیر نشان داده شده است که جریان‌های آشفته ساختاری نوسانی دارند. به بیان دیگر می‌توان گفت که به کمک پدیده‌های تکراری و قابل پیش‌بینی می‌توان فرایندهای موثر بر وضعیت جریان را در قسمت اعظم آن به دست آورد. هم‌چنین قسمت غیر قابل پیش‌بینی جریان باعث می‌شود که هر یک از پدیده‌ها حالات مختلفی از نظر اندازه، کشیدگی و پیوند زمانی بین هر دو تکرار داشته باشند. به همین دلیل بیان روابطی برای این قسمت بسیار مشکل است.

تمام مشخصاتی که به آن‌ها اشاره شد برای بررسی یک جریان آشفته مهم هستند. تاثیراتی که توسط آشفتگی ایجاد می‌شود بسته به نوع کاربری ممکن است ظاهر نشوند 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.

۳-۴-۱ فرضیه بوزینسک

بسیاری از مدل‌های آشفتگی بر پایه این فرضیه هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می‌یابد. فرضیه بوزینسک می‌گوید که می‌توان تنش‌های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد:

تنش‌های ویسکوزیته:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (۵-۴)$$

ارتباط تنش‌های رینولدز با نرخ میانگین تغییر شکل‌ها:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (6-4)$$

μ_t ویسکوزیته گردابه‌ای یا مولکولی نامیده شده واحد آن Pa.s. است.

مدل‌های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش‌های

آشفتگی با سرعت‌های متوسط‌گیری شده یا گرادیان آن‌ها تقسیم می‌شوند:

▪ مدل‌های صفر معادله‌ای^۱

▪ مدل‌های یک معادله‌ای^۲

▪ مدل‌های دو معادله‌ای^۳

▪ مدل‌های دارای معادله تنش^۴

▪ مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۵

بخش ۲: معرفی روش‌ها و نرم افزار حل عددی

۳-۵ مقدمه

در بخش قبل دیده شد که معادلات اصلی برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی، سه معادله دیفرانسیل

شامل روابط پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x, y, z هستند. این معادلات دیفرانسیل جزئی را به جز

در موارد خاص (محیط‌های جریان ساده)، نمی‌توان با روش‌های تحلیلی حل نمود.

در روش تجربی، ابتدا مدل فیزیکی از مسئله مورد نظر ساخته شده و سپس پارامترهای مورد نظر

توسط وسایل اندازه‌گیری محاسبه می‌شوند. صرف‌نظر از خطاهای مقیاس، در بسیاری از جریان‌های

^۱ Zero equation models

^۲ One equation models

^۳ Two equation models

^۴ Stress equation models

^۵ Large eddy simulation models

پیچیده، این روش واقعی‌ترین نتایج را به دست می‌دهد. اما از آنجا که ساخت مدل و تهیه وسایل اندازه-گیری مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار زیادی می‌باشد، در بسیاری از موارد نمی‌توان از این روش استفاده کرد.

در روش تئوری، با حل معادلات حاکم بر جریان از طریق تحلیلی، جواب مسئله مورد نظر به دست خواهد آمد. به جهت حصول جواب تحلیلی در این روش، می‌توان گفت که استفاده از روش تئوری، دقیق-ترین راه در حل مسائل مکانیک سیالات است. اما در بسیاری از موارد، معادلات حاکم بر جریان به قدری پیچیده هستند که هیچ راه حل تحلیلی برای آن‌ها وجود ندارد. بعنوان مثال، در جریان غیر دائم در کانال‌های باز که توسط مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی بیان می‌گردد، به لحاظ وجود عبارات غیر خطی، جز در حالت‌های خیلی ساده، حل به روش تحلیلی امکان‌پذیر نیست. بنابراین ملزم به استفاده از روش‌های عددی خواهیم بود.

یکی از گزینه‌های متداول حل معادلات دیفرانسیل حاکم، کاربرد روش‌های عددی می‌باشد. در روش عددی، انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی به صورت عددی انجام می‌گیرد. در سال‌های اخیر با گسترش استفاده از کامپیوتر، این روش نسبت به روش‌های تجربی و تئوری کاربرد بیش‌تری یافته است. در روش‌های حل عددی، برای حل این معادلات ابتدا محدوده حل شبکه‌بندی شده و از روش‌های منفصل سازی (زمان و مکان) برای تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری و حل آن توسط کامپیوتر روی تمام نقاط شبکه استفاده می‌گردد که دقت این روش‌ها وابسته به نحوه منفصل سازی معادلات می‌باشد. مزیت این روش‌ها نسبت به روش‌های تحلیلی این است که روند محاسبات بسیار ساده‌تر می‌شود. البته بدلیل حجم زیاد محاسبات در این روش‌ها، همواره نمی‌توان انتظار جواب‌هایی کاملاً دقیق داشت، زیرا منابع خطایی زیادی در این روش‌ها وجود دارد. از جمله عواملی که باعث اختلاف نتایج این روش‌ها با جواب‌های دقیق می‌گردد، می‌توان موارد زیر را عنوان نمود:

■ ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی که در بدست آوردن معادلات نمایانگر پدیده مورد نظر اعمال می‌گردد.

■ خطاهایی که ناشی از روش‌های منفصل سازی معادلات است.

■ استفاده از روش‌های تکراری و طولانی برای حل معادلات جبری حاصل.

■ ساده‌سازی‌ها در مدل هندسی مساله

۳-۶ روش‌های مختلف گسسته سازی معادلات

برای منفصل سازی معادلات حاکم بر جریان، روش‌های مختلف و زیادی ابداع گردیده است که به عنوان نمونه می‌توان از روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود و اجزاء محدود نام برد. معمول ترین روش‌ها نیز به نوبه خود ممکن است دارای روش‌های مختلف زیر مجموعه‌ای باشند که هر کدام از آن‌ها، با توجه به شرایط مسئله ممکن است در حل آن مناسب‌تر باشد و دقت کافی را در محاسبات مربوطه اعمال کند. البته با کوچک کردن شبکه‌بندی‌ها در محیط حل، می‌توان اطمینان داشت که جواب‌های حاصل از روش‌های مختلف فوق، بسیار به یکدیگر نزدیک باشند.

۳-۶-۱ روش تفاضل محدود^۱

این روش، یکی از روش‌هایی است که از فرم دیفرانسیلی معادلات استفاده می‌کند. در این روش هر ترم معادله دیفرانسیل، با یک عبارت جبری تقریب زده می‌شود. هم‌چنین فقط در مواردی می‌توان از این شبکه‌بندی با ساختار استفاده کرد که مرزهای محیط حل دارای شکل هندسی ساده منظمی باشد. معادلات جبری به دست آمده از دو روش قابل حل هستند. روش اول، روش صریح است، در روش صریح، مقدار پارامتر مورد نظر در هر نقطه با استفاده از مقادیر پارامترهای نقاط مجاور آن نقطه که در گام قبلی محاسبه شده‌اند، به دست می‌آید. یعنی در هر گام از محاسبه، تنها یک مجهول در معادله وجود

^۱ Finite Differences Method

دارد که به راحتی به دست می‌آید. اما روش دوم که روش ضمنی نام دارد، در هر مرحله از محاسبات دارای چندین مجهول است. زیرا پارامتر مورد نظر در هر نقطه با استفاده از مقادیر نقاط مجاور آن پارامتر که مقدار آنها در گام فعلی به دست می‌آید، تعیین می‌گردد. یعنی در این روش در هر گام محاسباتی، با حل یک دستگاه معادلات مقدار پارامتر مورد نظر در تمام نقاط به دست می‌آید.

روشن است که حل معادلات ضمنی بسیار پایدارتر از معادلات صریح‌اند. روش‌های ضمنی، دارای فایده مهم پایداری معادلات تفاضل محدودند. زیرا بیش‌تر آن‌ها بی‌قید و شرط، پایدارند. بنابراین گام‌های زمانی بزرگ‌تر در این روش مجاز است. روش‌های تفاضل محدود، برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل بسیار ساده هستند. اما دارای چند ایراد نیز هستند. ایراد این روش است که تنها روی شبکه‌های با ساختار قابل استفاده‌اند. یعنی یا تنها برای مسائل دارای محدوده منظم و کوچک به کار می‌روند و یا اینکه باید کل شبکه‌بندی به اندازه ریزترین شبکه مورد نیاز باشد که این مورد نیز باعث افزایش حجم محاسبات و زمان آن خواهد شد.

۳-۶-۲ روش اجزاء محدود^۱

در این روش، از شکل انتگرالی معادلات استفاده می‌شود. یعنی از معادلات حاکم، در روی محدوده مورد نظر حل، انتگرال‌گیری می‌شود. در نتیجه تنها برای گسسته‌سازی ترم‌های مکانی معادلات به کار می‌رود و برای گسسته‌سازی ترم‌های زمانی، باید از روش تفاضل محدود استفاده کرد.

۳-۶-۳ روش حجم محدود^۱

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 گردید، محدوده حل را شبکه‌بندی نموده و معادلات دیفرانسیلی با کمک روش‌های تفاضل محدود گسسته‌سازی شده و روی شبکه مورد نظر حل می‌گردند.

معادلات تفاضل محدود که معادله‌های دیفرانسیلی را تقریب می‌زنند، در قلمرویی مستطیلی و با فاصله‌های مساوی قابل حل می‌باشند. اما این قلمروها در عمل بسیار کم می‌باشند و شکل بیش‌تر قلمروها نامنظم است. در این صورت با تبدیل مختصات فیزیکی به مختصات مستطیلی فضای حل، می‌توان روش‌های تفاضل محدود را برای این قلمرو به کار برد. البته با این کار مشکلات جدی در دقت و همگرایی حل ایجاد می‌گردد. اما در روش‌های حجم محدود، نیازی به شبکه‌های با سازمان وجود ندارد. همچنین چون معادلات انتگرالی را مستقیماً در قلمرو فیزیکی به کار می‌بریم، تبدیل مختصات دیگر لازم نیست. در این روش نیز مانند اجزاء محدود، از معادلات حاکم بر جریان در محدوده حل انتگرال گرفته می‌شود. همچنین این روش مانند روش اجزاء محدود تنها قادر به گسسته‌سازی مشتقات مکانی است و برای گسسته‌سازی مشتقات زمانی باید از روش تفاضل‌های محدود استفاده نمود. تفاوت عمده این روش با روش اجزاء محدود در این نکته است که روش اجزاء محدود معادلات را بر روی المان‌ها حل می‌کند ولی در روش حجم محدود معادلات بر روی گره‌ها حل می‌شوند.

۷-۳ معرفی نرم‌افزار FLOW-۳D

آغاز کار FLOW-۳D را می‌توان سال ۱۹۶۳، هنگامی که در آزمایشگاه (LANL) Los Alamos دکتر C.W. Tony Hirt یک روش منحصر به فرد افزایش پایداری روش‌های حل عددی با نام VOF (Volume of Fluid) ارائه داد، دانست. ماموریت شغلی و علمی او در آن زمان گسترش و بهبود یک روش برای مدل نمودن دینامیک سیالات برای کاربردهای علمی و صنعتی بود. بر این اساس جهت گسترش و بهبود کار، از راهکارهایی همچون اخذ نظرات واحدهای صنعتی و محاسباتی برای ایجاد یک نرم‌افزار CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) استفاده گردید.

این روند کار منجر به ایجاد یک نرم‌افزار با قابلیت بالا به نام FLOW-۳D در سال ۱۹۸۵ گردید. اکنون پس از گذشت سال‌ها با ارتقاء نرم‌افزار مربوطه، FLOW-۳D، یک نرم‌افزار جامع دینامیک سیالات محاسباتی برای مقاصد تجاری، علمی، نظامی و صنعتی می‌باشد.

نرم‌افزار FLOW-۳D یک مدل مناسب برای مسائل پیچیده سیالات می‌باشد، که دارای بازه کاربرد وسیعی می‌باشد. این برنامه برای جریان‌های سه بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس FLOW-۳D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد، که در ادامه شرح داده خواهد شد. همچنین این نرم‌افزار از پنج مدل آشفتگی نظیر مدل‌های $k - \varepsilon$ و RNG استفاده می‌کند. در نرم‌افزار FLOW-۳D از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است:

روش حجم سیال^۱ (VOF) : این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می-گیرد.

روش کسر مساحت -حجم مانع^۲ (FAVOR) : برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

۱-۷-۳ روش حجم سیال VOF

روش انتقال VOF موجود در ۳D-FLOW بر مبنای تقریبات سلول دهنده - پذیرنده^۳ می‌باشد که اولین بار توسط Hirt و Nichols بیان شد. روش استاندارد از اپراتور Splitting و مقادیر تابع VOF از زمان قبل را برای محاسبه شار عبوری در هر سه جهت مختصات محاسبه می‌کند. وقتی سطح آزاد وجود دارد همه المان‌ها شامل سیال نمی‌باشد. بعضی از المان‌ها پر و بعضی خالی هستند و تعداد کمی از المان‌ها هم شامل سطح آزاد می‌باشند (یعنی نیمه پر هستند). یک راه مناسب برای تعیین موقعیت المان تعیین کمیت F است که میزان کسری از المان را که توسط سیال احاطه شده است را تعیین می‌کند. به این کمیت، تابع حجم سیال (VOF) گفته می‌شود (شکل ۱-۳).

0.0	0.0	0.0	0.0
0.6	0.55	0.15	0.0
1.0	1.0	0.7	0.0
1.0	1.0	0.9	0.05

شکل ۱-۳ نمونه‌ای از مقادیر تابع VOF در نزدیکی سطح آزاد

^۱ Volume of Fluid

^۲ Fractional Area-Volume Obstacle Representation

^۳ Donor-acceptor

تابع کسر سیال F در محیط سیال برابر با یک و در خارج از سیال برابر با صفر می‌باشد. با داشتن مقدار کسر F می‌توان مکان عمومی و زاویه سطح آزاد در المان سطحی را بدست آورد و این حالت با سیال موجود در المان‌های مجاور کنترل می‌شود. سیال در المان‌های سطحی می‌بایست در نزدیک‌ترین فاصله با المان‌های مجاور که بیشترین سیال را دارند قرار بگیرد.

وقتی که مکان و زاویه قرارگیری سطح آزاد تعیین شد. می‌توان از خصوصیات مرزی سطح آزاد برای محاسبات عددی حرکت سیال استفاده کرد. با حرکت سیال، مقدار کمیت F نیز در طی جریان تغییر خواهد کرد و با حرکت سیال از بین شبکه ثابت حجم کنترل، به طور اتوماتیک تعدادی از المان‌ها توسط سیال شکسته می‌شوند.

مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در یک شبکه ثابت حرکت می‌کند و در نتیجه به تغییر شکل و بازسازی شبکه نیازی نیست و همچنین جرم‌های سیال می‌توانند براساس قوانین دینامیک با هم ترکیب یا از هم جدا شوند و به هیچ منطق خاصی برای تعیین تقاطع سطوح نیاز نیست.

مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در یک شبکه ثابت حرکت می‌کند و در نتیجه به تغییر شکل و بازسازی شبکه نیازی نیست و همچنین جرم‌های سیال می‌توانند براساس قوانین دینامیک با هم ترکیب یا از هم جدا شوند و به هیچ منطق خاصی برای تعیین تقاطع سطوح نیاز نیست. روش VOF برای فرایندهای که متناوباً تر و خشک می‌شوند مثل امواج در ساحل یا امواج جذر و مدی مناسب می‌باشد.

۳-۷-۲ تقریبات عددی

نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم بندی می‌شود که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. موانع منحنی شکل، دیوارهای مرزی و اشکال هندسی

دیگر، بوسیله تعیین کسر مساحت وجوه و کسر حجم باز به جریان سلول، در شبکه جای می‌گیرند (روش FAVOR).

برای هر حجم کنترل مقادیر شارهای سطحی، تنش‌های سطحی و نیروی‌های حجمی می‌توانند بوسیله مقادیر متغیر مجاور محاسبه شوند. سپس این کمیت‌ها برای اینکه بتوانند شکل گسسته شده قوانین بقاء را که توسط معادلات حرکت بیان شده‌اند، نشان دهند با هم ترکیب می‌شوند. اکثر جملات در این معادلات با استفاده از روش مقادیر گام‌های زمانی برای کمیت‌های مکانی، یعنی صریح، محاسبه می‌شوند، اگر چه روش‌های ضمنی نیز وجود دارند که به همان اندازه خوب هستند. این روش (یعنی صریح) روش ساده‌ای است که برای بیشتر مسائل کاربرد دارد ولی به یک گام زمانی محدود برای حفظ پایداری محاسباتی و دقت نتایج نیاز دارد.

یکی از موارد استثناء روش صریح استفاده از آن در محاسبه نیروهای فشاری معادله مقدار حرکت است. مقادیر فشار و سرعت بطور ضمنی، به‌وسیله استفاده از فشارهای گسترش یافته در معادلات مومنتم و سرعت‌های گسترش یافته زمانی در معادلات پیوستگی جرم با هم درگیر می‌شوند. این فرمول بندی-های شبه ضمنی معادلات گسسته شده باعث می‌شود که حل پایداری برای مسائل تراکم‌ناپذیر و سرعت-های پایین بدست آید. در روش‌های شبه ضمنی نتایج با استفاده از ترکیب یک سری از معادلات بدست می‌آید و توسط روش‌های تکراری حل می‌شود.

روش عددی اصلی که در Flow-3D استفاده می‌شود. روش دقت مرتبه اول^۱ نسبت به افزایش زمان و مکان است. وقتی که شبکه مورد استفاده در روش حجم محدود غیر یکنواخت است می‌بایست در انتخاب درجه دقت حل عددی توجه کرد، دقت مرتبه دو^۲ در این حالت مناسب‌تر است. در همه حالات دست کم می‌توان از دقت درجه یک برای شرایط مرزی استفاده کرد. مثلاً، در سلول‌هایی که بخشی از سلول توسط

^۱ 1st order

^۲ 2nd order

مانع اشغال شده است، روش FAVOR معادل با استفاده از درون‌یابی خطی برای شرایط مرزی در این سلول است.

۳-۷-۳ مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در نرم‌افزار Flow-۳D

مدل‌های آشفتگی که در نرم‌افزار Flow-۳D مورد استفاده قرار می‌گیرند بدین شرح می‌باشند :

- ۱- Prandtl mixing length
- ۲- One-equation transport
- ۳- Two-equation $k - \varepsilon$ transport
- ۴- RNG (renormalized group theory)
- ۵- Large eddy simulation

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تعداد مدل‌های آشفتگی ارائه شده قابل توجه می‌باشد که این به علت کاربرد وسیع نرم‌افزار Flow-۳D در زمینه‌های متفاوت می‌باشد. به همین دلیل از بسط و شرح دادن تمامی مدل‌های آشفتگی صرف نظر کرده و تنها موارد $k - \varepsilon$ و RNG را بررسی خواهیم کرد.

۳-۷-۳-۱ مدل $k - \varepsilon$

مدل $k - \varepsilon$ استاندارد بیش‌ترین کاربرد را در تحلیل جریان‌های آشفته دارد، مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل یک روش نیمه تجربی است که معادله k آن دقیقاً از ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می‌شود اما معادله ε حاکم، براساس شواهد تجربی و آزمایشگاهی و روابط ریاضی حاصل می‌گردد. در استخراج این معادلات چنین فرض شده که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز است. معادلات حاکم بر این مدل توسط روابط زیر بیان می‌شود:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (۷-۴)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\delta\varepsilon} \right) \frac{\delta\varepsilon}{\delta x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{s\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8-4)$$

G_k و G_b مرجع جرم معادله k می‌باشند که به ترتیب اثر شناوری و گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کنند و در آن لزجت گردابه‌ای با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9-4)$$

δk و $\delta\varepsilon$ به اعداد پراوتل آشفتگی مشهور هستند و داریم:

جدول ۳-۱- مقادیر اعداد ثابت معادلات

c_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δk	$\delta\varepsilon$
۰/۰۰۹	۱/۱۴۴	۱/۱۹۲	۱۱	۱/۱۳۰

ثابت $c_{2\varepsilon}$ در معادله ε اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند و برابر است با:

$$c_{2\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (10-4)$$

بنابراین چنانچه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد، در لایه برشی این ثابت برابر ۱ خواهد شد و

اگر جهت جریان عمود بر جهت ثقل باشد این مقدار صفر خواهد بود.

این مدل ابزار نسبتاً ساده محاسباتی است، منجر به محاسبات پایداری می‌شود که نسبتاً به سادگی

همگرا می‌شوند و برای اکثر جریان‌ها تخمین‌های معقولی را ارائه می‌دهد. تخمین‌های ضعیف در جریان-

های چرخشی، جریان‌های با مناطق قوی جدایی جریان، جت‌ها، جریان‌های نامحدود خاص، جریان‌های

کاملاً توسعه یافته در مجاری غیر دایروی نیز از جمله معایب این روش می‌باشند. این مدل تنها برای

جریان‌های کاملاً آشفتنه به کار می‌رود.

۲-۳-۷-۳ مدل RNG

در این روش آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق و به کمک روابط ریاضی بدست می-آید. در این مدل در مقایسه با حالت استاندارد یک ترم اضافه در معادله ε وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسبات در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل نسبت به حالت استاندارد، در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری دارد و بر خلاف آن به منظور تعیین اعداد آشفتگی پیرانتل از رابطه تحلیلی استفاده می-شود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد و به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان در میدان‌های دارای انحنای و یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این مدل بصورت روابط زیر می‌باشند:

$$k \text{ معادله: } \rho \frac{Dk}{Dt} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (11-4)$$

$$\varepsilon \text{ معادله: } \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{r\varepsilon} \cdot G_b) - c_{r\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (12-4)$$

لزجت مؤثر گردابه‌ای μ_{eff} در معادلات فوق توسط روابط زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad \text{و} \quad d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\bar{\nu}}{\sqrt{(\bar{\nu} - (1 + c_v))}} d\bar{\nu} \quad (13-4)$$

چنانچه رابطه دیفرانسیلی فوق انتگرال‌گیری شود لزجت گردابه‌ای تعیین می‌شود که در مقادیر رینولدز بالا این رابطه بصورت رابطه مشهور $\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ تبدیل می‌شود. البته در مقادیر رینولدز کم و بخصوص در نزدیکی دیواره می‌توان از همان حالت دیفرانسیلی استفاده نمود.

مقادیر معکوس عدد پیرانتل آشفتگی، α_k و α_ε ، بر اساس رابطه زیر معین می‌شود:

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha - 1.3929} \right|^{0.3621} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (14-4)$$

در جریان‌های با رینولدز بالا $1 \ll \left(\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}\right)$ که جریان کاملاً آشفته است مقدار $\alpha = 1$ بوده و معکوس اعداد پرانتل آشفتگی مقادیر ثابتی دارند؛ یعنی $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$ ، RNG ، باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد باشد، شده و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{c_\mu \rho \eta^2 (1 - \eta/\eta_c) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^2} k \quad (15-4)$$

که در معادله فوق $\eta \equiv sk/\varepsilon$ می‌باشد و s بیانگر مدول نرخ کرنش متوسط می‌باشد که رابطه آن بر حسب نرخ کرنش متوسط چنین است:

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{و} \quad s \equiv \sqrt{2S^2} \quad (16-4)$$

در این مدل ثابت‌های معادله دیفرانسیل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

جدول ۳-۲- مقادیر ثابت‌های معادله دیفرانسیل

c_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δk	$\delta \varepsilon$
0.09	1.44	1.92	11	1.30

۳-۷-۴ مدل آبشستگی (Sediment scour)

مدل آبشستگی^۱ در نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی انتقال رسوب، فرسایش و ته نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات در اثر جریان سیال می‌باشد. مدل آبشستگی از دو میدان غلظت استفاده می‌کند:

^۱ Sediment Scour

۱- رسوبات معلق ۲- رسوبات بستر. جابجایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال در اثر تغییرات گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی جریان ورودی ذرات معلق و یا در اثر فرسایش بستر ایجاد گردند. رسوبات بستر به دلیل اینکه توسط ذرات مجاور محدود شده اند، به راحتی جابه جا نمی‌شوند. رسوبات بستر تنها در صورتی می‌توانند حرکت کنند که به صورت فرسایش یافته در سطح مشترک سیال و بستر به بار معلق تبدیل شوند و بار معلق در صورتی می‌تواند به بار بستر تبدیل شود که سرعت ته نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد. قسمتی از حجم کنترل که توسط ذرات جامد رسوب و سیال اشغال شده است، به ترتیب با نمادهای f_L و f_S تعریف می‌شود به طوری که :

$$f_S + f_L = 1 \quad (17-4)$$

بار معلق لزجت واقعی سیال را افزایش می‌دهد. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که جزء حجمی ذرات جامد f_S به حد جزء حجمی چسبندگی f_{SCO} برسد. پس از آن با افزایش بار معلق سبب بالا رفتن لزجت نمی‌گردد بلکه سبب می‌شود ذرات شروع به فعالیت با رفتار جامد گونه ای داشته باشند. در این حالت لزجت متوسط سیال از رابطه ذیل محاسبه می‌شود :

$$\mu^* = \mu_f \left[1 - \frac{\text{Min}(f_S, f_{SCO})}{f_{SCO}} \right]^{-1.05} \quad (18-4)$$

که در آن، μ_f ویسکوزیته سیال f_{SCR} جزء بحرانی ذرات رسوب می‌باشد که مقدار آن بصورت پیش فرض ۰/۶۷ انتخاب شده است. μ^* ویسکوزیته افزایش یافته به واسطه رسوبات معلق در سیال که حداکثر آن به ازای مقدار جزء بحرانی رسوبات برابر $18 \mu_f$ هست اگر کسر حجمی رسوب بیشتر یا مساوی مقدار f_{SCR} باشد دانسیته رسوب متراکم برابر با $f_{SCR} \times \rho_s$ می‌باشد که جزء شرایط اولیه مدل می‌باشد.

^۱ Solid Volume Fraction

^۲ Liquid Volume Fraction

^۳ Cohesive Solid Fraction

^۴ Critical Solid Fraction

چگالی ظاهری ($\bar{\rho}$) به صورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می گردد:

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s(\rho_s - \rho_L) \quad (19-4)$$

که در آن ρ_s و ρ_L چگالی ظاهری سیال و رسوب می باشند. طبق تعریف، *Drift* عبارتست از ته نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری موثر بر ذره رسوب. در مدل آبشستگی نرم افزار Flow-۳D ذرات رسوب به صورت کروی شکل فرض شده به گونه ای که تحت اثر لزجت سیال قرار دارند. لذا مطابق رابطه زیر ضریب ته نشینی (D_f) به دست می آید:

$$D_f = \frac{d_s^2(\rho_s - \rho_L)}{18\mu} \quad (20-4)$$

بنابراین برای محاسبه سرعت ته نشینی خواهیم داشت:

$$u_{drift} = D_f \times f_L \frac{\nabla P}{\bar{\rho}} = \frac{f_L \times d_s^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\bar{\rho}} (\rho_s - \rho_L) \quad (21-4)$$

که در رابطه فوق $\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}$ عبارت است از گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب. به $\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}$ به ۱۰ برابر وزن ذره محدود شده و باعث حذف نوسانات عددی در مقدار فشار می گردد. در نزدیکی سطح آزاد سیال مقدار $\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}$ با شتاب ثقل (g) جایگزین می گردد. ضریب f_L به کار رفته در معادله فوق به این دلیل است که رسوب گذاری فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکان پذیر بوده، بنابراین در صورتی که حجم کنترل از رسوبات باشد، $f_L = 0$ گردیده و بنابراین $u_{drift} = 0$ خواهد شد. همچنین مدل Flow-۳D برای محاسبه نیروی شناوی برای بدست آوردن ضریب ته نشینی از رابطه (۴-۴۴) بهره می گیرد.

$$f \leq f_{sco} \leq f_{SCR} \quad \text{اگر رابطه (۴-۱۸ و ۴-۲۰)}$$

$$D_f = \left[\frac{f_s - f_{SCR}}{f_{sco} - f_{SCR}} \right]^{-2} \left[1 - \frac{f_s - f_{SCR}}{f_{sco} - f_{SCR}} \right]^3 \quad \text{if } f_{sco} \leq f_s \leq f_{SCR}$$

صفر if $f_{SCR} \leq f_s$

در سطح رسوبات بستر تنش برشی فعال بوده و سبب فرسایش و جابجا شدن رسوب در سطح بستر می شود. این فرسایش تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و چگالی سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی حداقل تنش برشی مورد نیاز برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می دهد (Brethour, ۲۰۰۶).

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_L - \rho_S)d} \quad (۲۲-۴)$$

که در رابطه فوق، θ_{crit} پارامتر شیلدز بحرانی و τ_{crit} تنش برشی جریان در آستانه حرکت ذره رسوب است. هدف از بسط و تشزیح این مدل تخمین و پیش بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک فرسایش یافته اند. به همین منظور پارامتر سرعت برشی $\sqrt{\tau/\rho}$ برای اندازه گیری قدرت کف کنی جریان تعریف می گردد. بنابراین می توان سرعت کنده شدن رسوبات از بستر (u_{lift}) را مطابق رابطه زیر ارائه کرد:

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\bar{\rho}}} \quad (۲۳-۴)$$

که در آن، n_s بردار نرمال سطح بستر، α پارمتر بی بعدی که احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر را نشان می دهد که معمولاً برابر با ۱ یا کمتر است.

زاویه استقرار طبیعی رسوبات در این مدل از رابطه (۴۷-۴) حاصل می شود که در آن n بردار نرمال سطح و g بردار جاذبه هست.

$$\theta = \frac{n}{|g|} \quad (۲۴-۴)$$

تنش بحرانی سطح شیبدار موثر در آبشستگی بستر در نرم افزار Flow-۳D با تاثیر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات که جزء ورودی مدل هست توسط رابطه (۴۸-۴) برآورد می گردد.

$$\tau_{crit} = \tau_{crit} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}} \quad (۲۵-۴)$$

در جریان ساکن زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب میزان حداقل شیبی را که طی آن دیواره های حفره آبخستگی می تواند پایدار بماند، تعیین می کند. زاویه اصطکاک داخلی بالای رسوبات نشان از پایدار بودن شیب دیواره در شیب های تند دارد (مانند رس). در زاویه های پایین، دیواره تمایل زیادی برای ریزش و حرکت به سمت جلو دارد (مانند ماسه).

حرکت رسوبات معلق در سیستم به وسیله معادله همرفت- پخش بیان می گردد به گونه ای که با اضافه کردن جمله های ته نشینی (Drifting) و بلند شدن (Lifting) رسوب، معادله مذکور مطابق رابطه ذیل می باشد (Brethour, ۲۰۰۶):

$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t}\right)_x + u \cdot \nabla c_s = D \nabla^2 c_s - u_{lift} \cdot \nabla c_s - u_{drift} \cdot \nabla c_s \quad (۲۶-۴)$$

که در آن، U سرعت محلی سیال (جریان) و U_{lift} و U_{drift} به ترتیب سرعت های مربوط به بلند کردن و ته نشینی رسوبات می باشد. مدل آبخستگی پیوسته با افزایش مقدار ویسکوزیته جریان سیال به همراه رسوبات معلق و بازگشت به حل معادلات جریان سیال را به منظور تعیین بستر متراکم شده، تامین می کند.

در مجموع مدل آبخستگی در نرم افزار ۳D-Flow از یک رویکرد مستقیم و آسان برای مدل کردن و فرسایش و رسوبگذاری در جریان های ۳ بعدی بهره می برد. شبیه سازی های انجام شده نشان می دهند که عمق چاله آبخستگی در حالت تعادل به خوبی با نتایج تجربی هم خوانی دارند (Brethour, ۲۰۰۶). با این حال محدودیت های زیر برای مدل آبخستگی در نسخه حاضر (۷.۹.۳.۲) وجود دارد (Brethour, ۲۰۰۶):

ذرات درشت رسوب نمی توانند به درستی شبیه سازی شوند، زیرا فرضیات حاکم بر بخش ته نشینی مدل نقص می شوند. چنین مدلی نوعاً نیاز به مدل کردن بار بستر دارد که در آن ذرات رسوب بر روی بستر

رسوبات متراکم غلطش یا لغزش دارند (تا این که در حین جریان سیال معلق شوند). برای بستر فرسایش پذیر فقط یک نوع ذره می تواند برای مدل تعریف شود.

شبیه سازی صورت گرفته در این تحقیق توسط آخرین نسخه نرم افزار Flow-3D (ver.10.0.2) صورت پذیرفته است.

۳-۷-۵ مدل Drift-flux

شرط فیزیکی Drift-flux در شبیه سازی جریان دو سیال با چگالی متفاوت، که در اختلاط با هم هستند، مورد استفاده قرار می گیرد. در اختلاط دو سیال، یکی از سیال ها به صورت پیوسته است و دیگری به صورت پراکنده در داخل سیال اولی قرار دارد (جریان غلیظ در داخل آب صاف).

شرط فیزیکی Drift-flux در چهار حالت مختلف می تواند مورد استفاده قرار بگیرد:

۱. یک سیال، جریان با چگالی متغیر با سطح آزاد یا بدون سطح آزاد: جریان اختلاطی از دو سیال،

هر کدام با دانسیته ثابت، است. در زبانه General، گزینه one fluid انتخاب می شود و چگالی

متغیر با انتخاب یکی از گزینه های زیر در شرط فیزیکی Density evaluation فعال می شود:

- First order approximation to density transport equation
- Second order monotonicity preserving approximation to density transport equation

سپس در پنجره شرط فیزیکی Drift-flux، چگالی هر دو فاز قابل تعریف است. در زیر شاخه initial از

نمودار درختی meshing and geometry، توزیع اولیه چگالی دو سیال در شرایط اولیه نیز قابل تعریف

است. چگالی اختلاط دو سیال در مرز های ورودی سرعت و فشار نیز در تعریف شرایط مرزی قابل تعریف

است. در شبیه سازی حالت شرح داده شده، امکان شبیه سازی انتقال دما^۱ وجود ندارد.

^۱ Heat transfer

۲. جریان یک سیال با قابلیت انجماد و با سطح آزاد یا بدون سطح آزاد: در این حالت جریان مخلوطی از مایع و فاز منجمد است که هر کدام دارای چگالی ثابت هستند. در زبانه general گزینه one fluid انتخاب می شود. شرط فیزیکی solidification نیز در این حالت باید فعال شود. مشابه حالت اول، در اینجا نیز باید چگالی فاز مایع (فاز پیوسته) و فاز جامد (فاز گسسته) تعریف شود. در این حالت یکی از گزینه های چگالی یکنواخت ثابت^۱ یا چگالی وابسته به کمیت های دیگر^۲ باید در شرط فیزیکی density evaluation انتخاب شود.

۳. دو سیال غیر قابل تراکم و هر کدام با چگالی ثابت: در این حالت، گزینه های no two fluid و sharp interface و incompressible در زبانه general انتخاب می شود. چون جریان از نوع دو سیاله انتخاب شد، لذا در خصوصیات هر کدام از سیال ها در زبانه fluids می توان مقادیر مورد نظر برای آن ها را تعریف کرد.

۴. مخلوط سیال های قابل تراکم و غیر قابل تراکم: در این حالت، چگالی گاز قابل تراکم با استفاده از معادله حالت تعیین می شود، در حالی که ماده غیر قابل تراکم دارای چگالی ثابت است و همیشه فرض می شود که چگالی آن خیلی بیشتر از چگالی گاز است. در این حالت، گزینه های two fluid، no sharp interface و compressible در زبانه general انتخاب می شود. چگالی سیال تراکم ناپذیر در زبانه fluids در زیر شاخه های مربوط به سیال شماره یک (Fluid#۱) تعریف می شود ولی خصوصیات سیال تراکم پذیر، از جمله پارامتر های موجود در معادله حالت و معادله چگالی متغیر با دما، باید به طور کامل در زیر شاخه های سیال شماره ۲ (Fluid#۲) تعریف شود.

^۱ Constant uniform density

^۲ Density evaluated as a function of other quantities

شایان ذکر است که زمانی که هدف کاربر شبیه سازی یک سیال قابل تراکم در میدان حل است باید در شرایط اولیه و مرزی، جز سیال^۱ مربوط به سیال شماره ۱ را برابر صفر در نظر بگیرد. در این حالت در شرایط اولیه فقط سیال تراکم پذیر در میدان حل وجود خواهد داشت و از مرز های میدان حل نیز فقط همین سیال وارد میدان خواهد شد.

۳-۷-۶ موارد کاربرد صنعتی نرم افزار Flow-۳D

Flow-۳D می تواند برای موارد و مسائل پیچیده دینامیک سیالات در صنعت و تحقیقات نظیر مسائل

هوا و فضا، مسائل مربوط به دریا، مهندسی هیدرولیک و ... مورد استفاده قرار گیرد.

یافتن یک راه حل مناسب عددی جهت پرداختن به مسائل مربوط به هیدرولیک جریان با سطح آزاد از

جمله مسائلی است که اهمیت زیادی دارد چرا که برپا نمودن مدل فیزیکی برای حصول نتایج تجربی و

آزمایشگاهی کاری وقت گیر و پرهزینه می باشد. در این رابطه نرم افزار Flow-۳D یک نرم افزار پر قدرت

برای مدل نمودن جریانات مشابه می باشد.

دخول هوا در پرش هیدرولیکی و سرریزها، جریان اطراف پایه پل، تخریب سد، کنترل پرش

هیدرولیکی، جریان روی پله، جریان سرریز، جریانات کم عمق، امواج کم عمق، آبشستگی، جریان های دو

فازی و ... از نمونه های کاربردی این نرم افزار در مهندسی هیدرولیک می باشد.

^۱ Fluid fraction

فصل چهارم

مدلسازی عددی و تحلیل نتایج

شرح شبیه سازی عددی و بررسی آزمون‌های مختلف

بخش اول: صحت سنجی

۱-۴ مقدمه

شبیه سازی عددی انتشار جریان گل‌آلود در مخازن سدها، به منظور شناخت بهتر این نوع جریانها از اهمیت بسزایی برخوردار است. تجربه محققین در زمینه این گونه شبیه سازی ها نشان داده است که در بین بسته‌های نرم افزاری موجود، نرم افزار Flow-۳D قابلیت مناسبی در مدل نمودن این نمونه از جریان دارد. در این مطالعه به منظور بررسی نحوه انتشار جریان گل از نرم افزار (Flow-۳D ver.۱۰/۲) استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی در این نرم افزار بر روی مدل آزمایشگاهی باس (baas et al ۲۰۰۴) صورت گرفته و سپس با ایجاد شرایط مدل‌سازی عددی یکسان و مشابه با مدل آزمایشگاهی، شبیه‌سازی انجام می‌شود و پارامترهای هیدرولیکی میدان جریان بر روی این مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴ معرفی مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی باس (baas et al ۲۰۰۴)، فلوم دلتا، از تجهیزات ساختمان لرزه شناسی دانشگاه اتریش می باشد (شکل ۱-۴). مدل آزمایشگاهی شامل کانال مستقیم و شیبدار متصل به یک میز رسوبگذاری افقی می‌باشد. کانال دارای ۴ متر طول، ۰.۲۲ متر عرض و ۰.۶ متر عمق است و با شیب ۳.۷ درجه ثابت شده است. میز رسوبگذاری دارای ۳.۵ متر طول و ۳ متر عرض است و در یک تانک ۴×۴ متر بدون هیچ دیوار جانبی جهت به حداقل رساندن برگشت جریان تعبیه شده است (شکل ۱-۴).

رسوب با آب تازه در یک تانک مخلوط تعبیه شده در انتهای بالادست کانال مخلوط می‌شوند. آب با استفاده از یک پمپ با دبی ثابت 7.8 LS^{-1} یا 5.2 LS^{-1} به تانک مخلوط رسانده می‌شود. رسوب توسط یک نوار نقاله به تانک مخلوط رسانیده می‌شود. سه نوع رسوب در آزمایشات استفاده شده است (جدول ۱):

۱- به طور متوسط دسته‌بندی شده، دانه‌بندی خوب و ماسه طبیعی (سایز متوسط دانه ها $D=0.235\text{mm}$)

۲- خوب دسته‌بندی شده، ماسه‌های خیلی خوب دانه‌بندی شده و ترکیب مهره‌های شیشه‌ای کروی

($D=0.06\text{mm}$)

۳- به طور متوسط خوب دسته‌بندی شده، دانه‌های شیشه‌ای کروی زبر با اندازه سیلت ($D=0.04\text{mm}$)

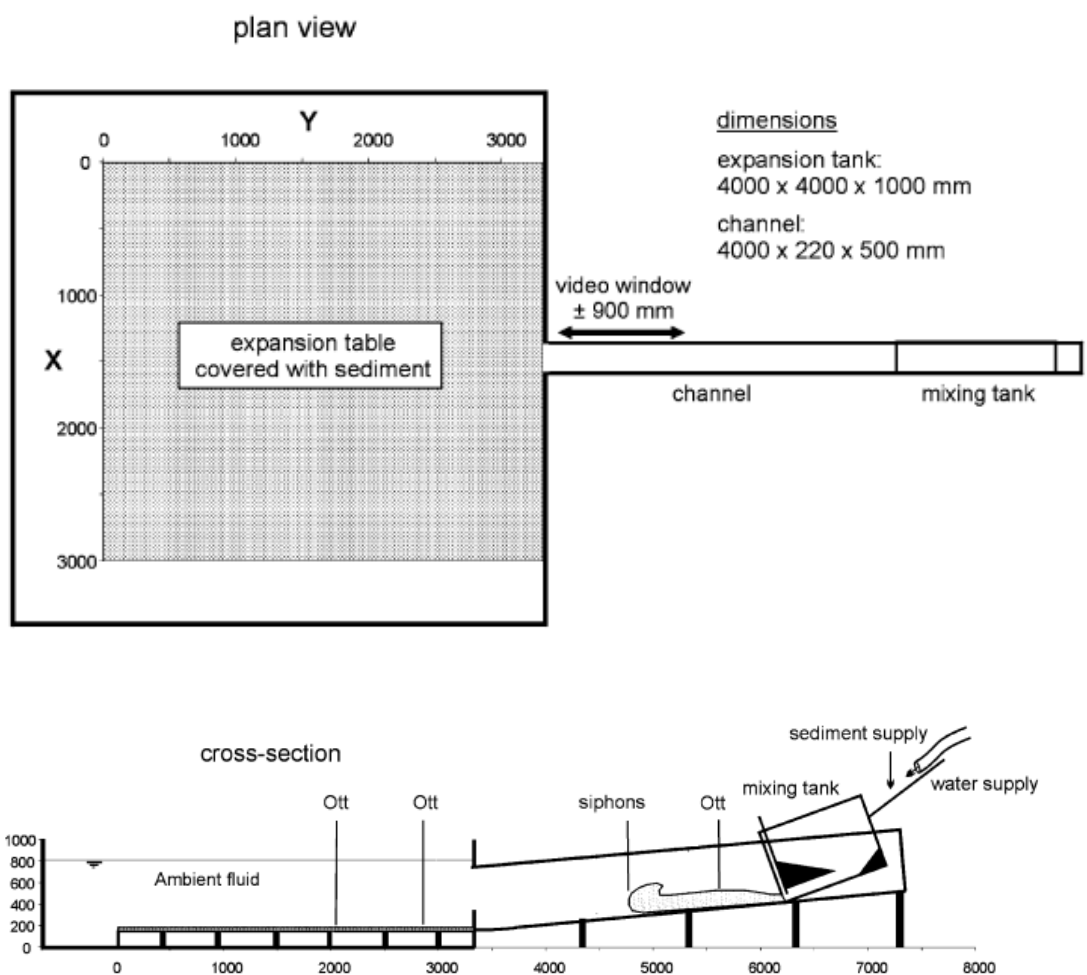
مقدار کمی از دانه‌های رنگی قبل از آزاد کردن آنها در تانک مخلوط به منظور سهولت شناسایی رسوبات بعد از فرسایش به رسوبات اضافه شده است. دانه‌های رنگی سایز بزرگتری از دانه‌های جریان گل‌آلود با چگالی زیاد دارند. اما جدا از مشارکت احتمالی آنها برای توسعه خاکریز کانال در جریان گل‌آلود با چگالی زیاد، ذرات سایز سیلت ته‌نشین شده تأثیرشان در فرسایش کم بوده است.

در هر آزمایش، جریان خروجی از دریچه تانک مخلوط (شکل ۴-۱)، جریان ورودی رسوب و آب در آن توسط توسعه یک هد ثابت در تانک مخلوط‌گر متعادل شده است. هد ثابت شکل‌گیری یک جریان شبه دائمی گل‌آلود را اطمینان می‌دهد. دوره تناوب جریان شبه دائمی توسط دوره تناوب جریان مخلوط (۱۵ ثانیه) دنبال می‌شود که در آن سطح آب در تانک مخلوط افت کرده و جریانهای گل‌آلود پیشرونده با چگالی و سرعت کم به داخل کانال جریان می‌یابد. در آزمایشات با ماسه‌های خوب، صفحه صاف بوده و حفره‌ای جهت افزایش شیب به 8.6° تعبیه شده است (جدول ۴-۱). بدین روش فرسایش در کانال حداقل نگره داشته می‌شود. در آزمایشات با ماسه‌های خیلی خوب و سیلت زبر شیب به 3.7° کاهش می‌یابد.

میز رسوبگذاری برای اجازه فرسایش دادن به جریان گل‌آلود با چگالی بالا روی آن، با یک لایه افقی از رسوب سست به ضخامت 0.03 متر پوشیده شده است. این رسوب همان رسوب استفاده شده در تانک مخلوط کننده می‌باشد.

سرعت‌های جریان در فاصله ۰.۳ متری از کف کانال توسط سرعت سنج‌هایی به قطر ۰.۰۲۵ متر اندازه‌گیری می‌شود. یک سرعت سنج در فاصله ۰.۶ متری از پایین دست دریچه تانک مخلوط کننده (Ott^۱) تعبیه شده است (شکل ۴-۱).

دو سرعت سنج دیگر در میز رسوبگذاری در فاصله ۰.۴۶ و ۱.۲۶ متری از خروجی کانال (Ott^۲ و Ott^۳) سرعت جریان را اندازه‌گیری می‌کنند.

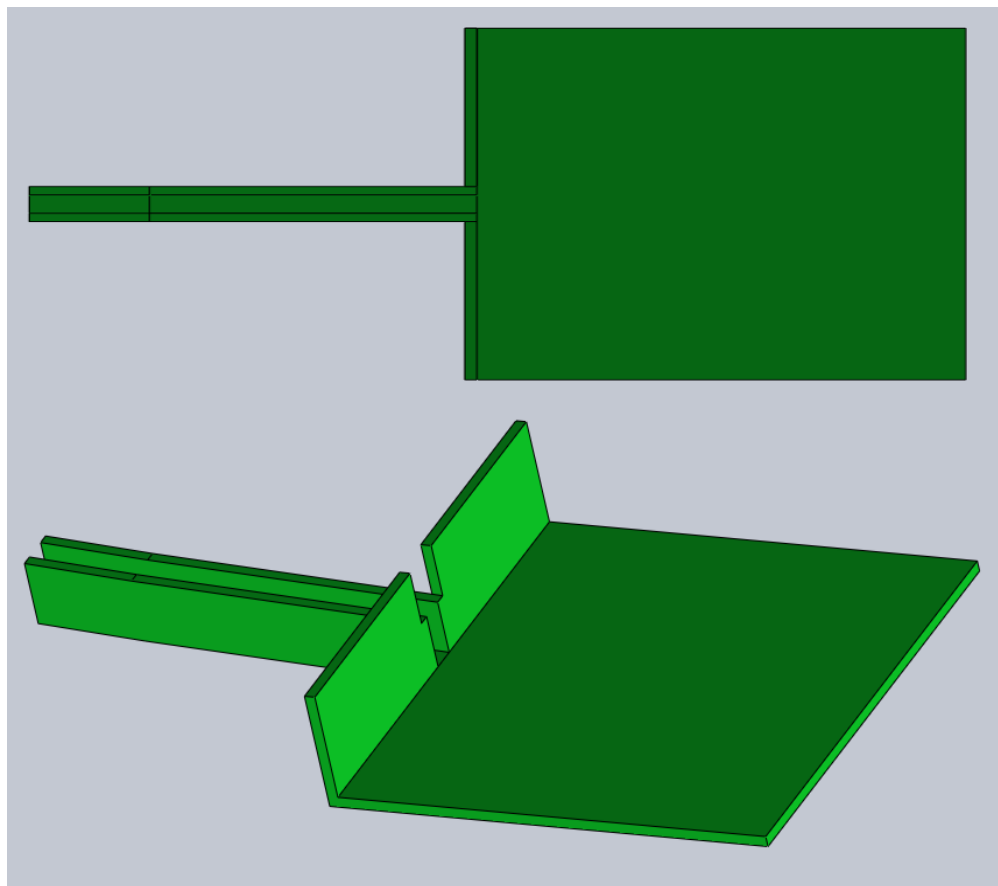


شکل ۴-۱ مقطع فوقانی و جانبی و موقعیت سرعت مترها در مدل آزمایشگاهی

۳-۴ بررسی حالات مختلف شبیه سازی عددی

مدل آزمایشگاهی مقاله باس در نرم افزار SolidWorks ساخته و با فرمت *.stl* به نرم افزار Flow-۳D معرفی گردید. ابعاد مدل سه بعدی ساخته شده دقیقاً مطابق با مدل هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه می باشد که قبلاً به طور کامل معرفی گردید. شکل ۲-۴ نماهای مختلفی از مدل هیدرولیکی ساخته شده با نرم افزار ۲۰۱۲ SolidWorks را نمایش می دهد. در این تحقیق مدلسازی کانال یکبار با زاویه شیب ۳.۷ درجه و بار دیگر با زاویه شیب ۸.۶ درجه صورت گرفته است.

در تمامی شبیه سازی های صورت گرفته در این تحقیق میدان جریان سه بعدی به وسیله مدل آشفتگی RNG حل شده است. دلیل استفاده از این مدل آشفتگی را می توان در ویژگی ها و مزیت آن نسبت به مدل های $k-\epsilon$ دانست. این مدل به واسطه داشتن ترم اضافی در معادله ϵ برای تحلیل جریانات سریعاً کرنش یافته است و این مدل در شبیه سازی جریانات گذرا توان بالایی دارد. همچنین به استناد مقایسه ای که رستمی در سال ۱۳۸۶ بین مدل های آشفتگی با استفاده از نرم افزار Flow-۳D انجام داده بود و مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق تری نسبت به سایر مدل های آشفتگی داشتند، از مدل آشفتگی RNG استفاده گردید.



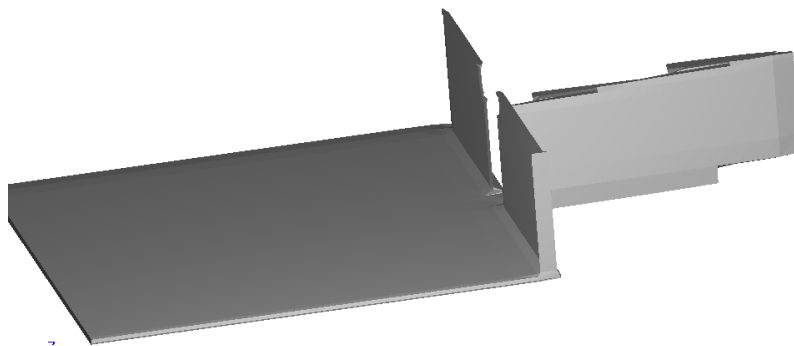
شکل ۴-۲ نمایی از مدل آزمایشگاهی شبیه سازی شده توسط SolidWorks ۲۰۱۲

جهت کاهش تأثیرات عوامل خارجی و نزدیکتر کردن شرایط مدل به شرایط واقعی به عنوان اولین گام در مدلسازی عددی به کالیبره کردن مدل پرداخته شد. مدل عددی حاضر بر مبنای مدل آزمایشگاهی باس تهیه شده است. آنچه در اینجا مطرح می‌شود، کالیبره کردن مدل عددی از لحاظ شرایط مرزی و شبیه‌سازی می‌باشد. برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن به حالت شرایط پایدار ضروری می‌باشد.

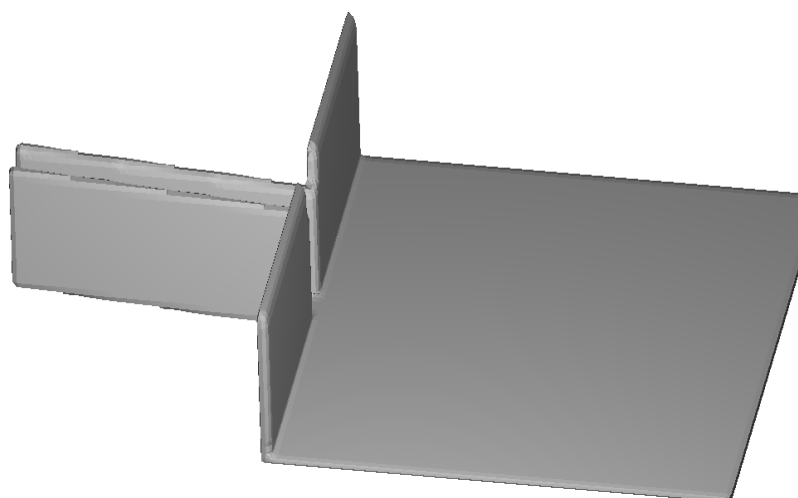
آزمون‌های مختلفی جهت حصول بهترین پاسخ از نرم‌افزار Flow-۳D و مقایسه گزینه های ممکن، شرایط مرزی و اولیه مناسب و نیز حساسیت سنجی مدل نسبت به پارامترهای گوناگون مؤثر در مدل‌سازی صورت گرفته است. حساسیت مدل‌های عددی به شبکه بندی و انفصال میدان حل و همچنین

شرایط مرزی یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در این زمینه الگوهای شبکه بندی مختلفی نیز ارائه شد که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوتی می‌باشند. $Flow-3D$ نسبت به مرزهای جامد و شبکه بندی، برخورد نسبتاً متفاوتی را با سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود.

می‌توان تمام جزئیات مورد نظر در یک بلوک را مد نظر قرار داد. در شکل ۳-۴ مدل عددی و روش Favor در شبکه‌بندی‌های گوناگون نشان داده شده است. از مباحث فوق نتیجه گرفته می‌شود که ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه‌بندی مدل عددی، به‌خصوص در جریان‌های پیچیده (مانند مدل مورد مطالعه)، بزرگترین محدودیت می‌باشد و انتخاب مناسب آن می‌تواند دقت محاسبات را افزایش دهد. در این مطالعه شبکه‌بندی‌های مختلف در آزمون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بهترین شبکه‌بندی برای آزمون‌های بعدی انتخاب شده است.



(الف)



(ب)

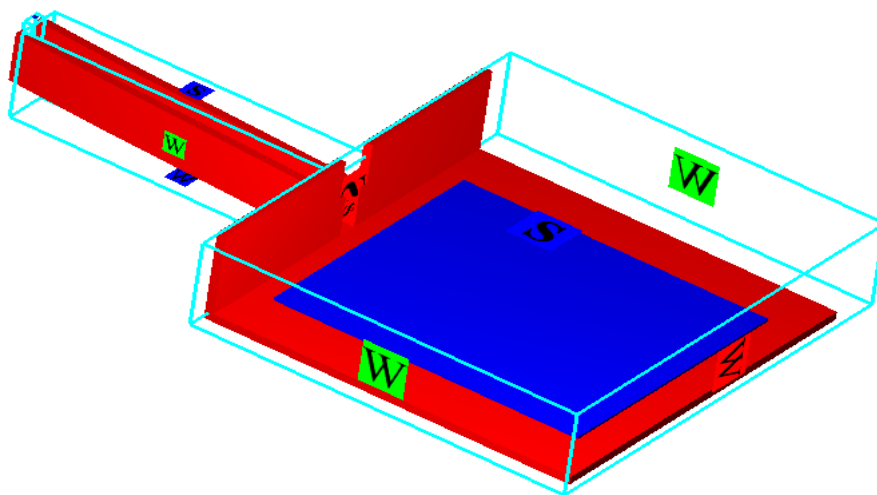
شکل ۳-۴ نحوه عملکرد روش Favor با مرزهای صلب با شبکه بندی های مختلف

شکل الف ۱۰x۱۰x۱۰ cm

شکل ب ۹x۹x۹ cm

شرایط مختلف مرزبندی در آزمون های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمونها جهت کاهش اختلاف میان مقادیر عددی و آزمایشگاهی در آزمونهای مختلف به تغییر مش بندی، شرایط مرزی و.. پرداخته شده است.

شرایط مرزی مهمترین ملاک در شبیه سازی عددی یک مدل آزمایشگاهی می باشد. مدل آزمایشگاهی مورد نظر ما به شکل زیر در نرم افزار Flow-3D شبیه سازی شده است (شکل ۴-۴):



شکل ۴-۴ شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی

در بالادست کانال یک ورودی جریان گل آلود تعریف شده است. دیوارهای جانبی کانال و میز رسوبگذاری با شرط مرزی wall تعریف شده اند. سطح فوقانی مدل با شرط مرزی symmetry مدل سازی شده است. در کف میز رسوب گذاری به ارتفاع ۳ سانتیمتر رسوب تعریف شده است.

برای بررسی خطای نتایج مدل شبیه سازی شده با داده های آزمایشگاهی ۴ آزمون متنوع به ازای ۳ غلظت رسوب ۲۱، ۲۹ و ۳۵ درصد انجام گردید. تمامی آزمون ها به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است.

محل اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی حاصل از شبیه سازی دقیقاً منطبق بر محل اندازه گیری پارامترهای مذکور در مدل آزمایشگاه می باشد. در جدول های ارائه شده، مجذور میانگین مربعات خطا

حاصل جذر توان دوم تفاوت مقدار عددی و آزمایشگاهی بر تعداد داده ها $(RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^K (X_K - Y_K)^2}{K}})$

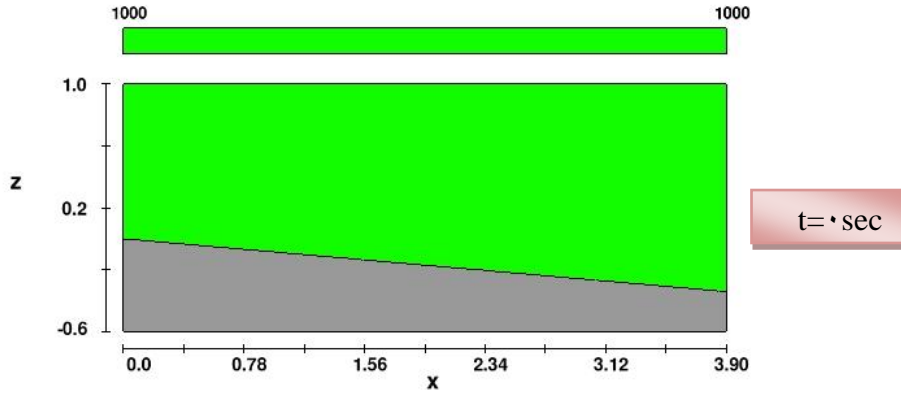
می باشد. میانگین مطلق خطا نیز برابر با قدر مطلق تفاوت مجموع مقادیر عددی و مجموع مقادیر آزمایشگاهی بر تعداد داده ها $(MAE = \frac{\sum_{k=1}^K |K_X - K_Y|}{K})$ می باشد. مجذور میانگین مربعات خطا برای بیشترین خطای موجود بر روی مدل برای موقعیتی که بدترین نتیجه شبیه سازی را می دهد، به عنوان بحرانی ترین حالت انتخاب شد. در نهایت مدل اولیه به صورت زیر ساخته شد و توسط آزمایشات صورت گرفته به صحت سنجی مدل پرداخته شد.

آزمون ۱) (تعیین مدت زمان مورد نیاز برای اتمام شبیه سازی):

در مدل عددی مورد مطالعه پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای استخراج نتایج از مدل معادل ۳۰ ثانیه مدنظر قرار گرفت. در ادامه به شرح مراحل کار پرداخته شده است:

جهت تعیین زمان مورد نیاز برای استخراج نتایج از مدل، ابتدا با زمان های مختلف از ۱۰ تا ۶۰ ثانیه مدل عددی Run شد و به ازای یک دبی ثابت توزیع سرعت و حرکت ذرات در طول کانال و الگوی رسوب گذاری در میز رسوب گذاری مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا حرکت ذرات رسوب در طول مدل اهمیت یافته است. همانطور که در شکل ۴-۵ مشاهده می کنید به ازای زمان $t=30\text{sec}$ جریان به حالت پایدار رسیده و فرآیند رسوب گذاری به اتمام رسیده است.

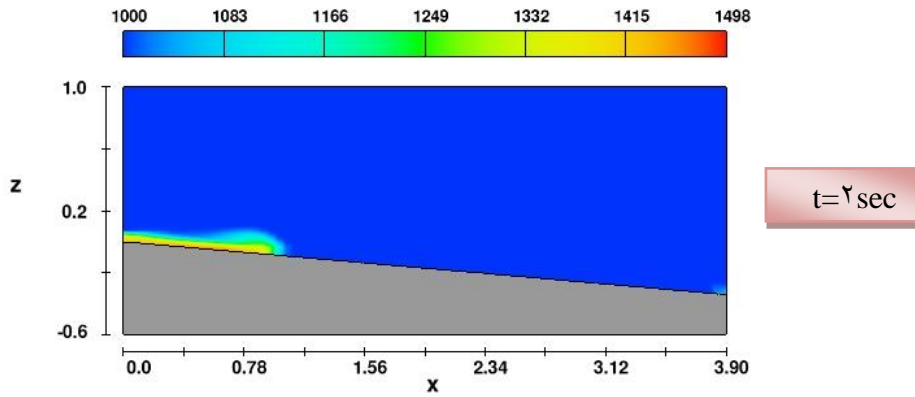
macroscopic density contours



FLOW-3D t=0.0 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

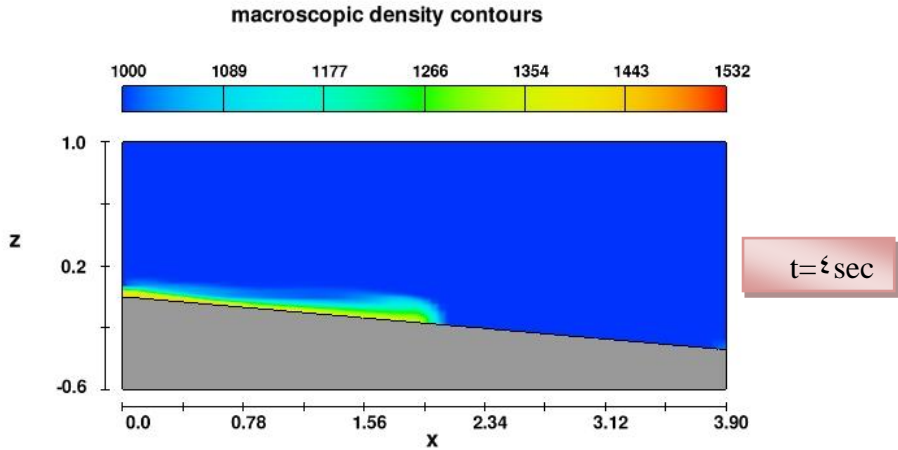
1

macroscopic density contours



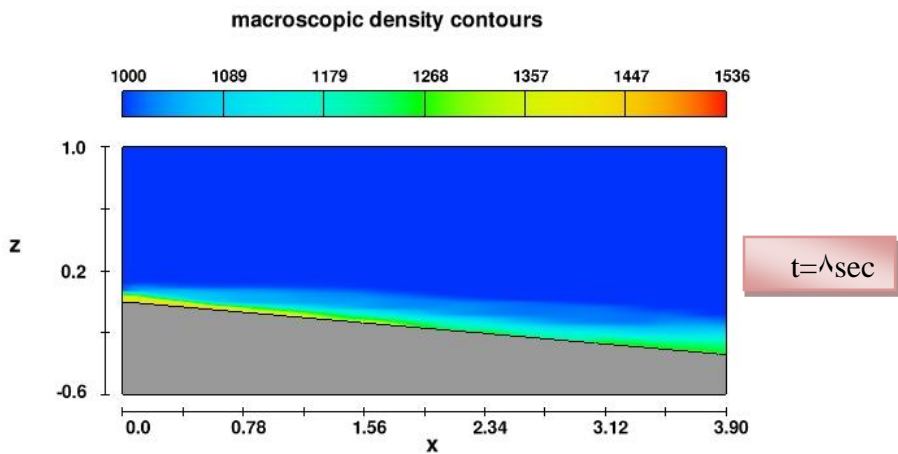
FLOW-3D t=1.9978093 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

3



FLOW-3D t=3.9969053 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
 23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

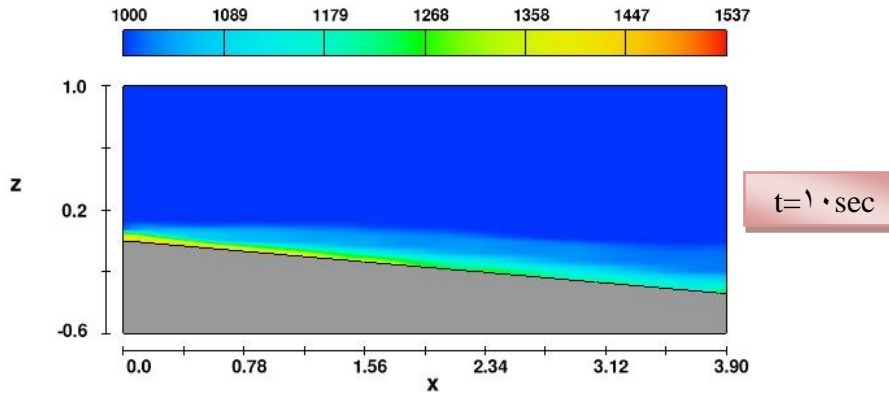
5



FLOW-3D t=8.0014439 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
 23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

9

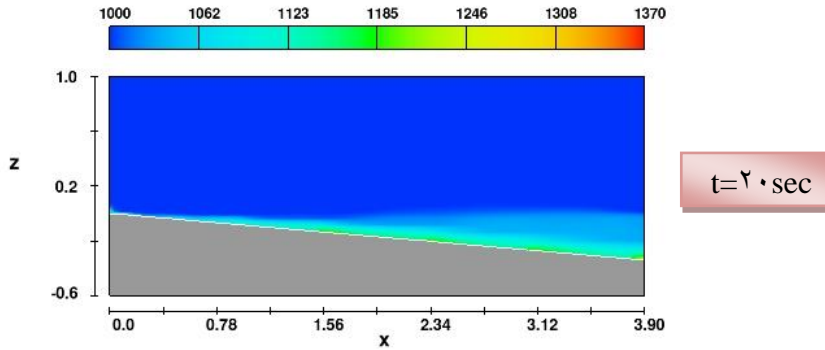
macroscopic density contours



FLOW-3D t=10.000540 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

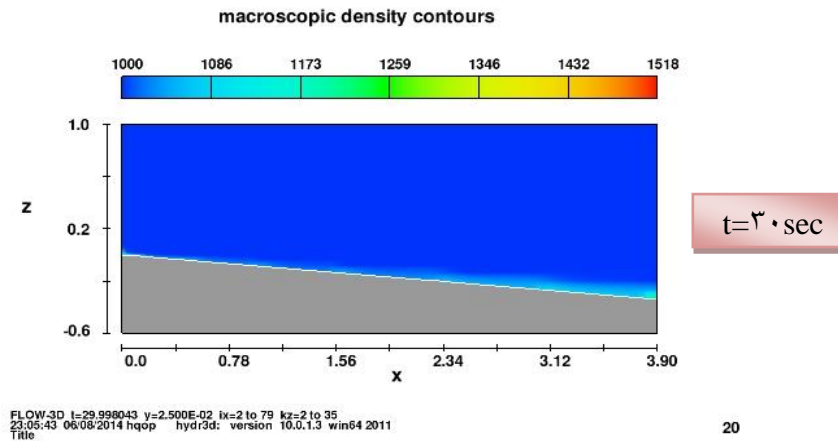
11

macroscopic density contours



FLOW-3D t=19.999174 y=2.500E-02 ix=2 to 79 kz=2 to 35
23:05:43 06/08/2014 hqop hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

10



شکل ۴-۵- نحوه عبور جریان در کانال طی بازه‌های مختلف زمانی

مطابق شکل ۴-۵ برای مدل عددی در زمان شروع محاسبات نرم افزار ($t=0 \text{ sec}$)، جریان در کانال و میز رسوبگذاری در حالت سکون می‌باشد. است و وضعیت در میز رسوبگذاری هنوز تحت تأثیر جریان بالادست قرار نگرفته است. با شروع محاسبات نرم‌افزار جریان گل‌آلود از بالادست کانال شروع به حرکت کرده تا زمان $t=10 \text{ sec}$ ، مطابق شکل جریان گل‌آلود به انتهای کانال می‌رسد. از این زمان به بعد جریان وارد میز رسوبگذاری شده و به مرور زمان با عبور از روی میز رسوبگذاری به سمت انتهای میز حرکت می‌کند. در زمان $t=30 \text{ sec}$ رسوبگذاری به طور کامل انجام گرفته و دیگر وضعیت رسوبگذاری تحت تأثیر جریان بالادست نخواهد بود.

جهت بررسی صحت مدل عددی باید نتایج حاصل از این مدل‌سازی بررسی گردد. به همین منظور این آزمون برای به ازای ۳ غلظت رسوب ۲۱، ۲۹ و ۳۵ انجام شد و مقادیر سرعت در ۰.۶ متری از دریچه و در فواصل ۰.۴۶ و ۱.۲۶ متری از خروجی کانال در مخزن و همچنین ارتفاع ذرات رسوب در ۹ نقطه

(جدول ۴-۱) محاسبه شد. در این آزمون زمان در نظر گرفته شده برای حل مسئله ۳۰ ثانیه، ابعاد حداقل سلول سلول برابر ۹ X ۹ X ۹ (بر حسب سانتی متر به ترتیب $Z \times Y \times X$) می باشد. جدول ۴-۲ مقادیر مدت زمان شبیه سازی و میانگین خطاهای مطلق و کلی را برای مدلسازی های مذکور نمایش می دهد.

جدول ۴-۱ نقاط مقایسه شده ارتفاع رسوبات در مدل آزمایشگاهی با شبیه سازی

X=1500	X=1500	X=1500	X=1000	X=1500	X=2000	X=1000	X=1500	X=2000
Y=1000	Y=2000	Y=3500	Y=2060	Y=2060	Y=2060	Y=3100	Y=3100	Y=3100

جدول ۴-۲ نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۱

	C=۲۱% (Run ۱۴)		C=۲۹% (Run ۱۲)		C=۳۵% (Run ۱۳)	
	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب
مدت زمان شبیه سازی (sec)	۵۰۶۵۵		۵۶۲۵۲		۴۸۸۷۸	
میانگین مطلق خطا	۲۲.۱۸	۲۴.۵۷	۱۵.۹۵	۲۲.۷۳	۳۴.۰۲	۱۲.۴۳
مجدور میانگین مربعات خطا	۳۲.۲۲	۳۲.۸۲	۲۴.۴۹	۳۶.۸۹	۴۲.۰۹	۱۹.۱۹

مدت زمان شبیه سازی و میانگین خطاهای مطلق و کلی در جدول فوق برای مقادیر سرعت و عمق رسوبات ته نشین شده موجود است. مقادیر سرعت مربوط یک نقطه در میانه کانال، خروجی کانال و میز

رسوبگذاری می‌باشد. در یک مقادیر خطای مطلق در این آزمون زیاد به نظر می‌رسد. لذا به دلیل اهمیت بررسی دقیق جریان گل‌آلود می‌توان ابعاد سلول‌های محاسباتی را علت بزرگی خطاها دانست.

آزمون ۲ (تأثیر شرایط مرزی):

پس از تحلیل نتایج آزمون ۱ شرایط مرزی جهت کاهش خطاهای حاصل از آن آزمون تغییر داده شد. بدین صورت که شرایط مرزی در بالادست علاوه بر در نظر گرفتن دبی جریان گل‌آلود ورودی محدودیت عمق جریان ورودی به علت تعبیه دریچه توسط گزینه Fluid elevation در مدلسازی عددی لحاظ گردید. دیگر شرایط مدلسازی این آزمون مشابه آزمون قبل می‌باشد. جدول ۳-۴ مقادیر مدت زمان شبیه سازی و میانگین خطاهای مطلق و کلی را برای مدلسازی های مذکورنمایش می‌دهد.

جدول ۳-۴ نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۲

	C=۲۱% (Run ۱۴)		C=۲۹% (Run ۱۲)		C=۳۵% (Run ۱۳)	
	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب
مدت زمان شبیه سازی (sec)	۷۸۵۴۵		۸۵۴۵۵		۸۸۷۹۸	
میانگین مطلق خطا	۱۶.۰۲	۱۵.۹۵	۱۱.۹۱	۱۴.۷۶	۱۹.۳۷	۸.۰۷
مجذور میانگین مربعات خطا	۲۲.۹۸	۲۱.۳۱	۱۵.۶۰	۲۳.۹۶	۲۳.۹۲	۱۲.۴۶

آزمون ۳ (تأثیر ابعاد مش بندی):

کلیه شرایط مرزی و هندسی مدل عددی این آزمون مشابه آزمون قبل می باشد، با این تفاوت که جهت نزدیکتر کردن نتایج عددی و آزمایشگاهی و بدست آوردن نتایج دقیقتر به بررسی تأثیر تغییر ابعاد سلول‌های شبکه‌های محاسباتی پرداخته شد. در این راستا از ابعاد سلولهای محاسباتی در نزدیکی میز رسوبگذاری کاسته شد. تعداد کل سلول های محاسباتی در این آزمون ۳۳۴۳۳۰ سلول بوده و ابعاد حداقل سلول برابر ۱x۱x۱ (بر حسب سانتی متر به ترتیب $Z \times Y \times X$) می باشد. جدول ۴-۴ مقادیر مدت زمان شبیه‌سازی و میانگین خطاهای مطلق و کلی را نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۴ نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۳

	C=21% (Run 14)		C=29% (Run 12)		C=35% (Run 13)	
	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب
مدت زمان شبیه سازی (sec)	۱۷۲۱۱۵		۱۷۸۳۳۵		۱۸۰۰۶۱	
میانگین مطلق خطا	۷.۴۱	۱۰.۶۰	۴.۱۲	۸.۰۳	۵.۰۱	۶.۲۰
مجذور میانگین مربعات خطا	۱۰.۵۰	۱۴.۴۶	۹.۱۵	۱۶.۳۶	۶.۴۰	۸.۹۳

همانطور که در جداول فوق مشاهده می‌کنید با کاهش ابعاد سلولهای محاسباتی تا میزان مشخصی که در بالا ذکر شد، مقادیر خطاهای حاصل کاهش می‌یابد.

آزمون ۴ (تأثیر مدل های آشفتگی):

همانطور که قبلاً اشاره شد بنا به دلایل ذکر شده، در تمامی آزمون‌ها از مدل آشفتگی RNG جهت حل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته استفاده شد. اما در این آزمون جهت بررسی صحت این انتخاب مدل شبیه‌سازی شده در آزمون ۳ توسط مدل آشفتگی k-ε حل شد و در نهایت نتایج حاصل از آن به صورت جدول زیر درآمد:

جدول ۴-۵ نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون ۴

	C=۲۱% (Run ۱۴)		C=۲۹% (Run ۱۲)		C=۳۵% (Run ۱۳)	
	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب	سرعت	عمق رسوب
مدت زمان شبیه سازی (sec)	۱۱۸۵۴۵		۱۱۵۲۱۴		۱۲۷۹۰۲	
میانگین مطلق خطا	۱۶.۸۲	۱۵.۹۵	۱۸.۰۲	۱۴.۷۶	۲۴.۹۲	۸.۰۷
مجذور میانگین مربعات خطا	۲۲.۳۶	۲۱.۳۱	۱۲.۶۴	۲۳.۹۶	۱۵.۵۸	۱۲.۴۶

همانطور که در جدول فوق مشاهده می شود، استفاده از مدل آشفستگی K-ε باعث کاهش مدت زمان شبیه سازی می شود. اما با توجه به مقادیر خطای موجود در این جدول می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از این مدل از دقت پایین تری برخوردار است و نتایج قابل اعتماد نخواهد بود. لذا انتخاب مدل آشفستگی RNG در حل مدلسازی عددی انتخابی صحیح تر می باشد.

از آزمون های فوق می توان نتیجه گرفت که با توجه به خطاهای کوچک ایجاد شده در مقادیر سرعت و ارتفاع ذرات رسوب و با توجه به زمان معقول شبیه سازی، می توان از آزمون ۳ در جهت مدلسازی انتشار جریان گل آلود پشت مخازن سدها بهره گرفت.

۴-۴ بررسی نتایج شبیه سازی عددی

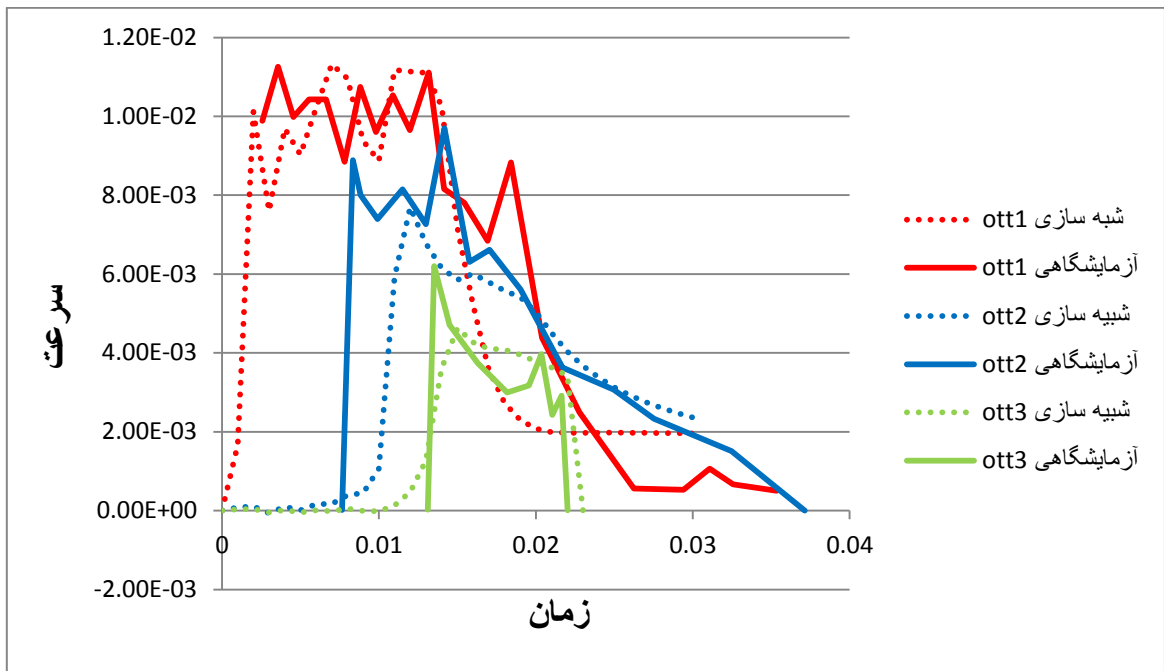
مدلسازی های متنوعی از شرایط مختلف آزمایشگاهی در نرم افزار ۳D-Flow صورت گرفت. در جدول زیر مشخصات کامل شبیه سازی های صورت گرفته آورده شده است که شرایط ذکر شده کاملاً مشابه شرایط آزمایشگاهی می باشد:

جدول ۴-۵ مشخصات اولیه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته

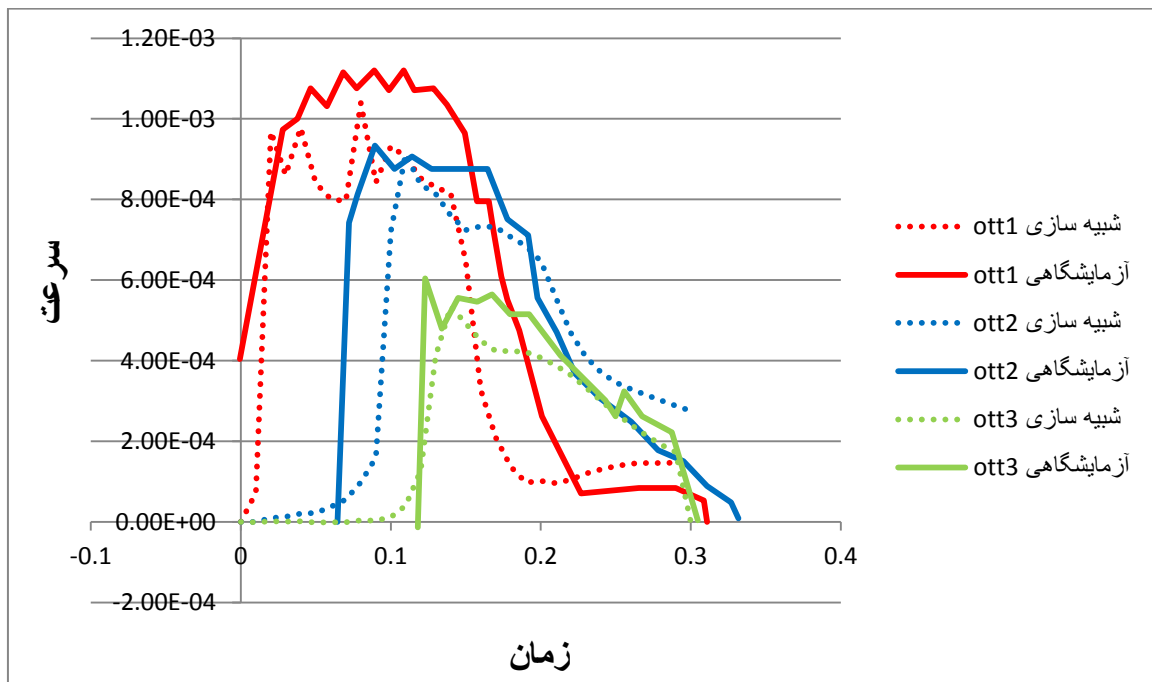
Run	قطر متوسط ذرات (mm)	غلظت اولیه رسوب (%)	شیب کانال	دبی ورودی به کانال (L/s)	شرایط فیزیکی مدل
۱	۰.۲۳۵	۲۷	۸.۶	۷.۸	Sediment scour-RNG
۲	۰.۲۳۵	۳۵	۸.۶	۷.۸	Sediment scour-RNG
۳	۰.۲۳۵	۱۴	۸.۶	۷.۸	Sediment scour-RNG
۴	۰.۰۴	۲۷	۳.۷	۵.۲	Sediment scour-RNG
۱۱	۰.۰۴	۲۹	۳.۷	۵.۲	Sediment scour-RNG
۱۲	۰.۰۶۹	۲۹	۳.۷	۵.۲	Sediment scour-RNG
۱۳	۰.۰۶۹	۳۵	۳.۷	۵.۲	Sediment scour-RNG
۱۴	۰.۰۶۹	۲۱	۳.۷	۵.۲	Sediment scour-RNG
D۱۳	۰.۰۶۹	۳۵	۳.۷	۵.۲	Drift-flux RNG

تنها تعدادی از داده‌های آزمایشگاهی برای مدلسازی جریان گل‌آلود با هدف مقایسه کردن مناسب بودند و تنها مشخصه اندازه‌گیری شده میانگیری نشده جریان در آزمایشگاه مؤلف سرعت در عمق جریان (در جهت X) می‌باشد. اولین تلاش مدلسازی تمام مدل آزمایشگاهی شامل آب و رسوب رسانی و ترکیب آنها در تانک مخلوط کننده بود. نتایج مدلسازی‌های صورت گرفته با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت نداشت که از جمله دلایل آن سختی مدلسازی مدل آزمایشگاهی با رفتار کاملاً مشابه آزمایشگاه می‌باشد (به عنوان مثال شرایط تانک مخلوط کننده). مدلسازی‌ها بدون تقلید از تانک مخلوط کننده با استفاده از یک شرط مرزی دبی ورودی به مدت ۱۵ ثانیه مدلسازی گردید. نتایج به مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در دو بخش مقادیر و الگوی مقادیر نزدیک شد. بر اساس مدلسازی صورت گرفته این نتیجه حاصل می‌شود که نرم افزار Flow-۳D می‌تواند برای نمایش مدلسازی‌های واقعی جریان استفاده شود.

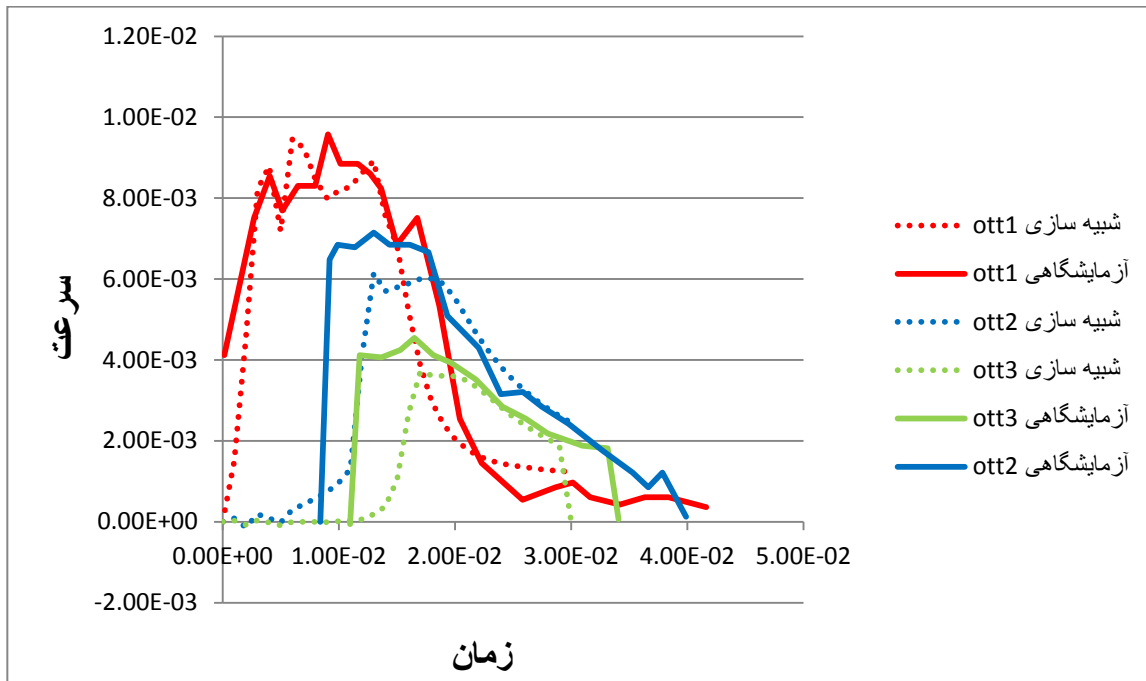
در ادامه نتایج خروجی آزمون ۳ برای چندین شبیه‌سازی مختلف مورد شرح و بررسی قرار می‌گیرد:



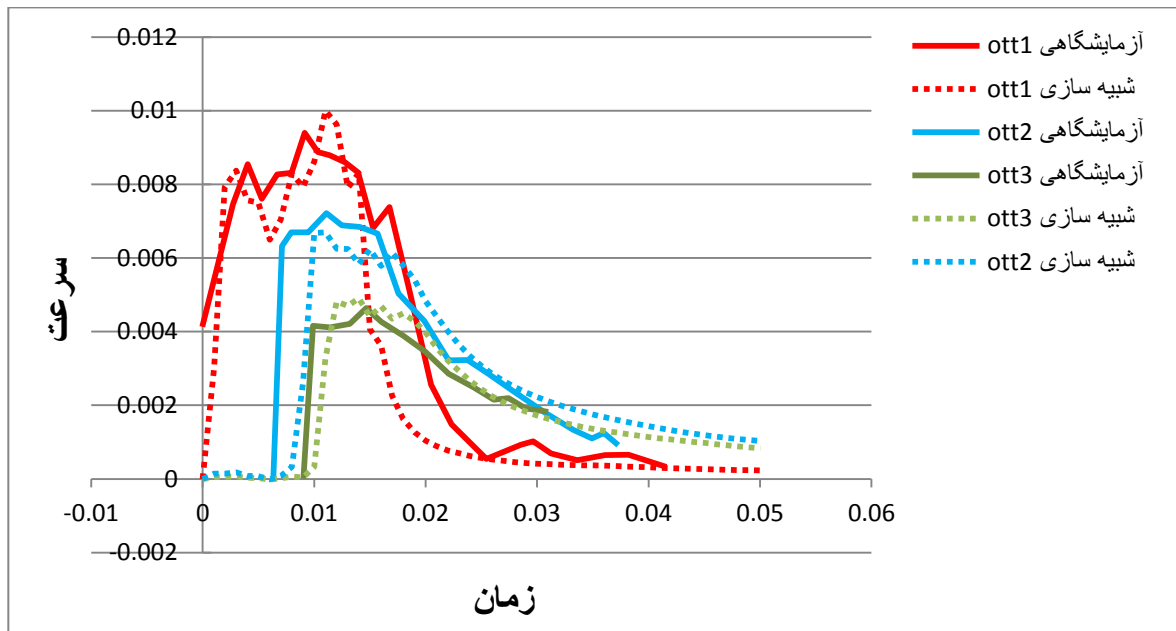
شکل ۴-۶ مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۲)



شکل ۴-۷ مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۳)

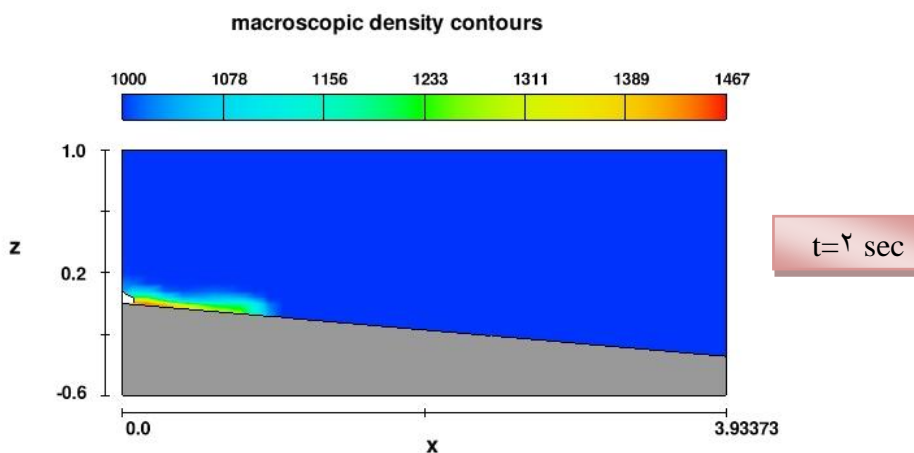


شکل ۴-۸ مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN ۱۴)



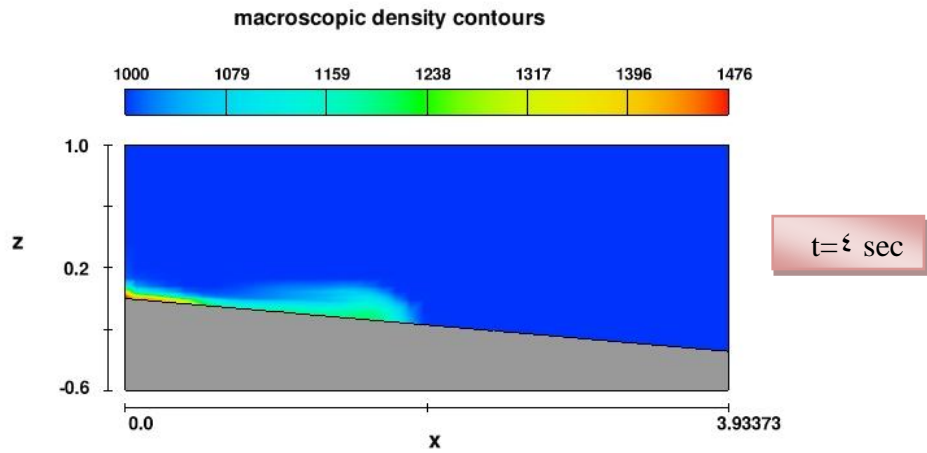
شکل ۴-۹ مقادیر سرعت بر حسب زمان (RUN D۱۳)

چندین روش جهت نمایش مشخصات هیدرولیکی جریان گل آلود وجود دارد که یکی از متداولترین روشها، مقطع عمودی موازی با محور جریان می باشد. مثالهایی از این روش برای تعدادی از مشخصه‌های جریان برای کانال تحت جریان گل آلود در شکل های زیر در بازه های زمانی مختلف نشان داده شده است. نتایج مربوط به Run ۱۲ می باشد. مشخصات جریان نمایش داده شده شامل مؤلفه سرعت در جهت x ، y و z و مقدار سرعت، تغییرات چگالی بالک در جریان می باشد. مقادیر هر متغیری با یک طیف رنگی در طول مدل نمایش داده شده است:



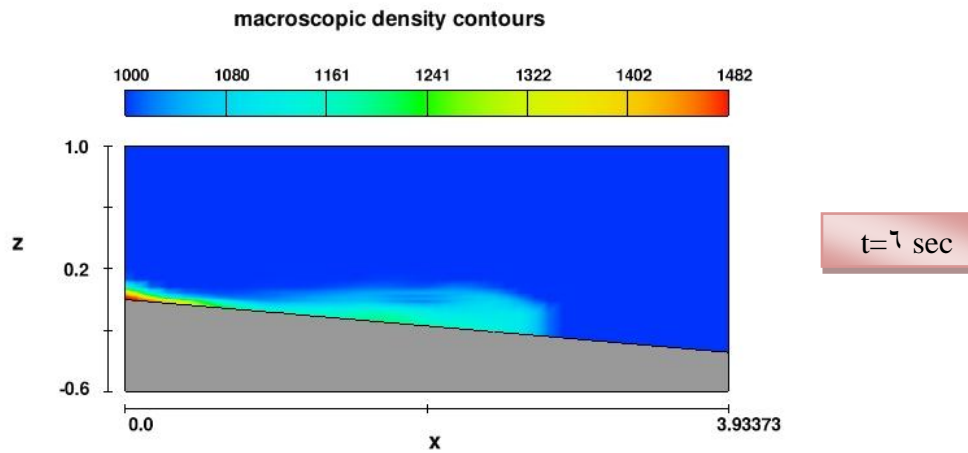
FLOW-3D t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkq| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

3



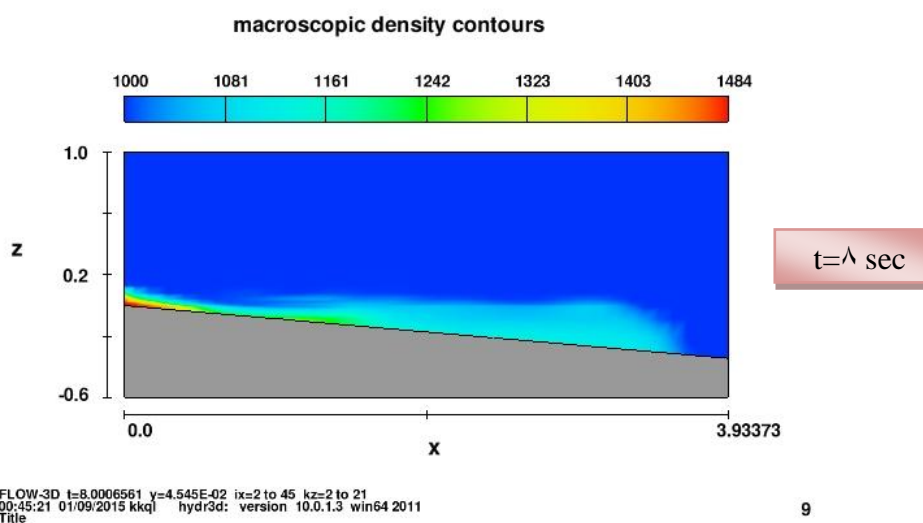
FLOW-3D t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkkq hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

5



FLOW-3D t=6.0013890 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkkq hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

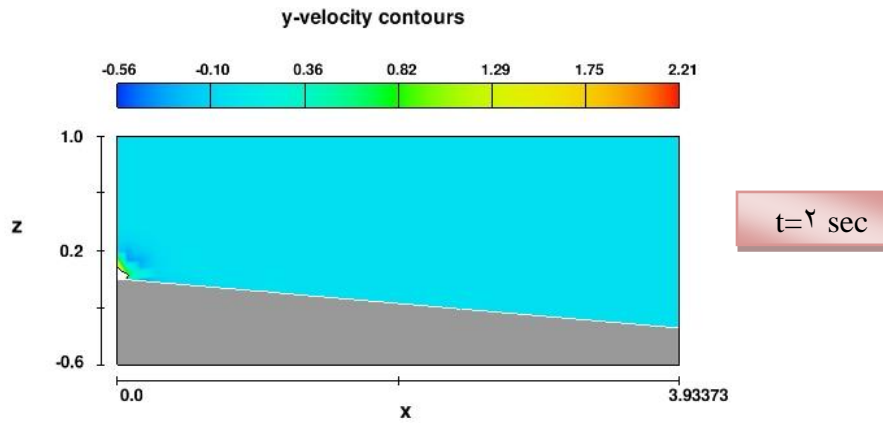
7



9

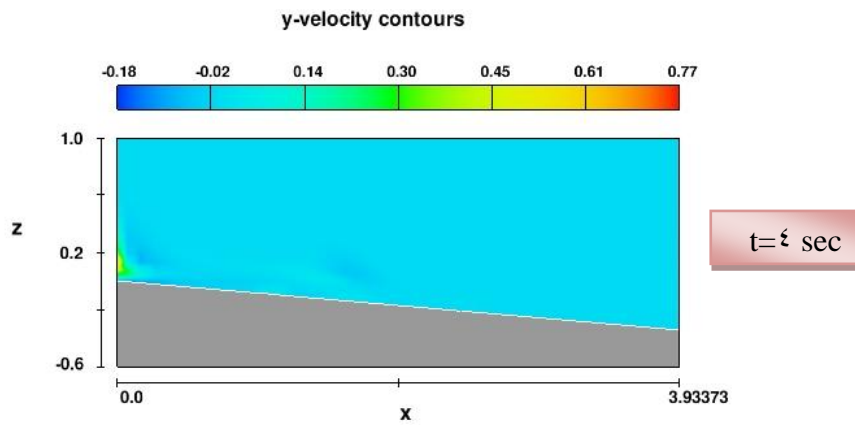
شکل ۴-۱۰ مقادیر سرعت در راستای X در بازه های مختلف زمانی (Run ۱۲).

چهار تصویر از جریان مربوط به زمانهای ۲ تا ۸ ثانیه ارائه شده است. کانال با شیب ۳.۷ درجه می باشد. مقیاس واحدها در محورهای X و Z متر و سرعت متر بر ثانیه می باشد.



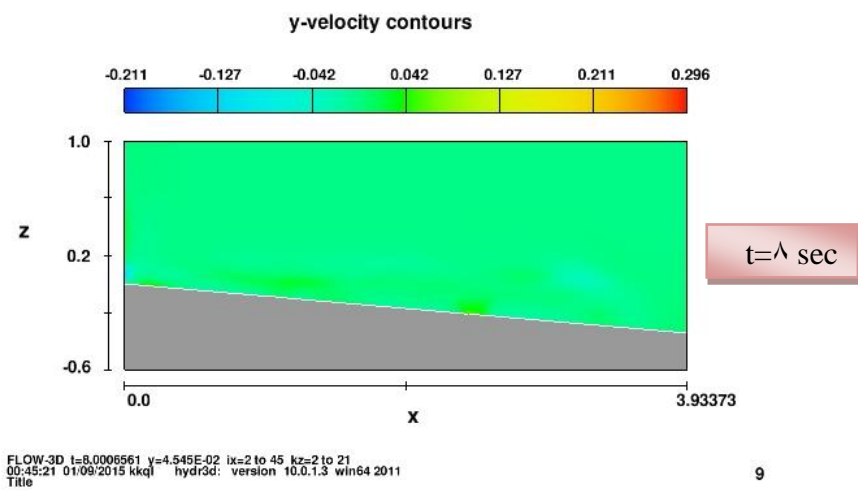
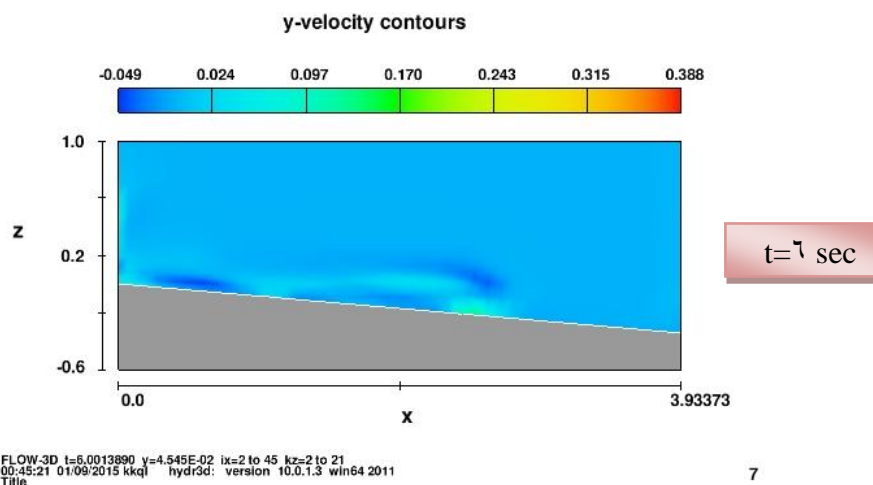
FLOW-3D: t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkq| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

3

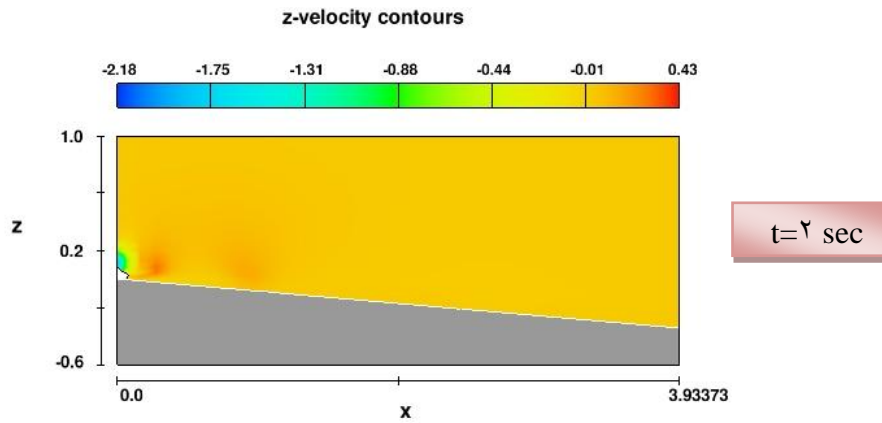


FLOW-3D: t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkq| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

5

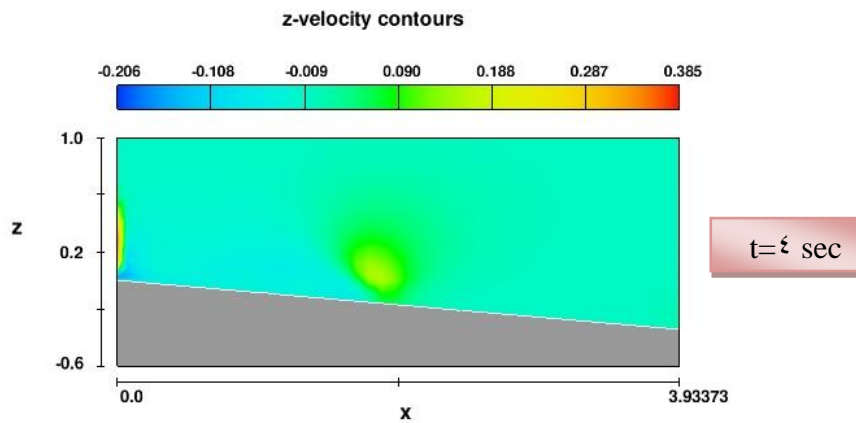


شکل ۴-۱۱ مقادیر سرعت در راستای Y در بازه های مختلف زمانی (Run ۱۲).



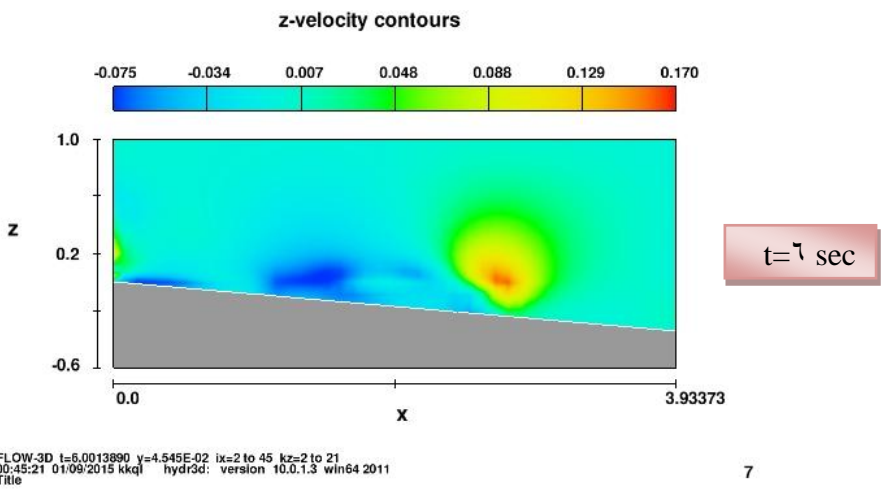
FLOW-3D: t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkqj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

3

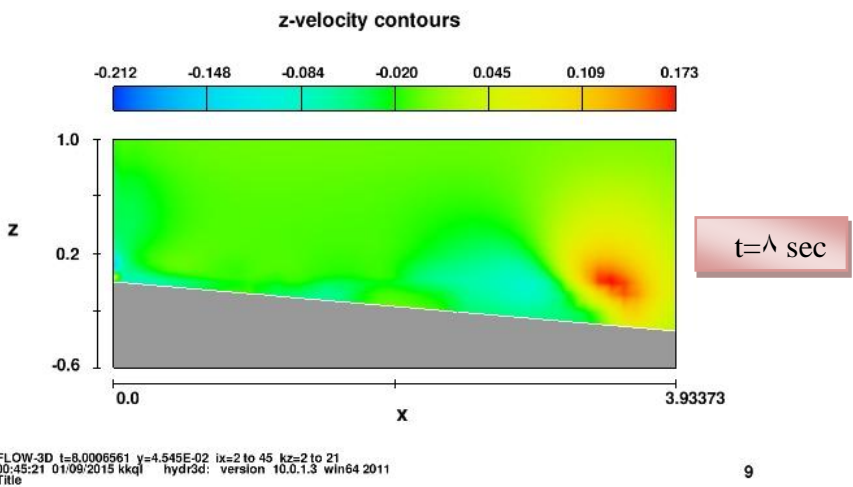


FLOW-3D: t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkqj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

5

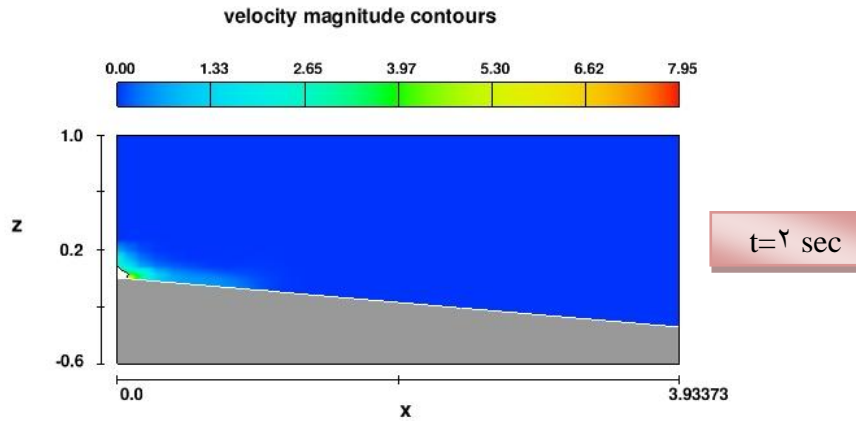


7



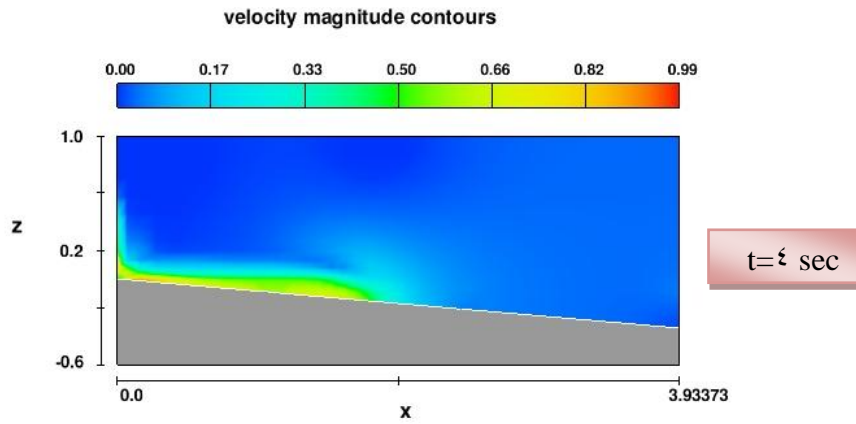
9

شکل ۴-۱۲ مقادیر سرعت در راستای Z در بازه های مختلف زمانی (Run ۱۲).



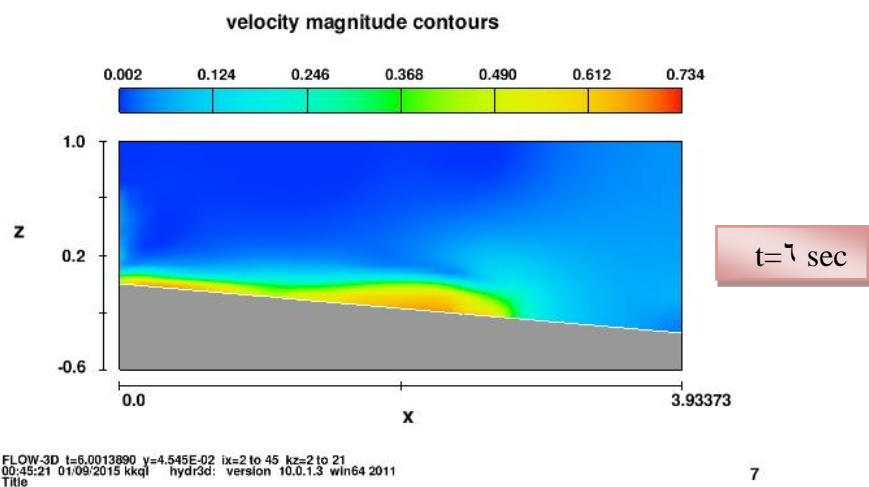
FLOW-3D t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkqj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

3

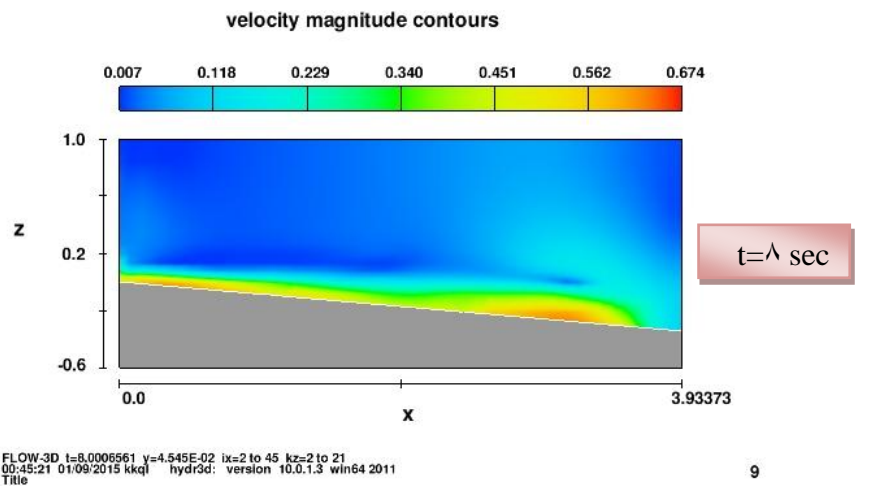


FLOW-3D t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
 00:45:21 01/09/2015 kkqj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
 Title

5



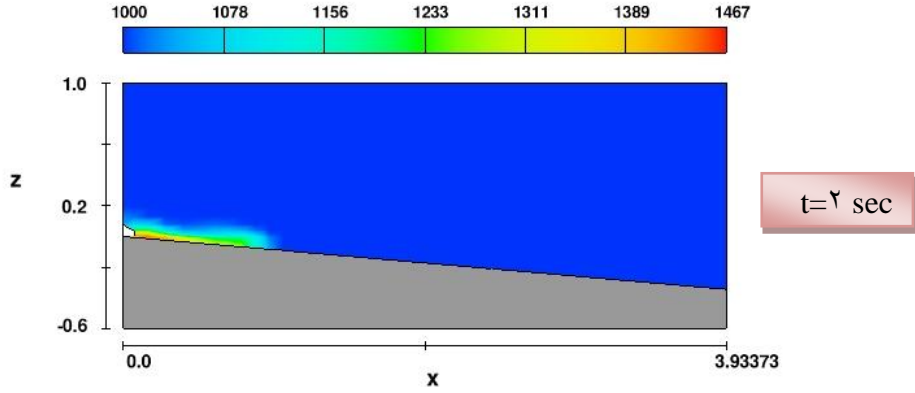
7



9

شکل ۴-۱۳ مقادیر سرعت در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run).

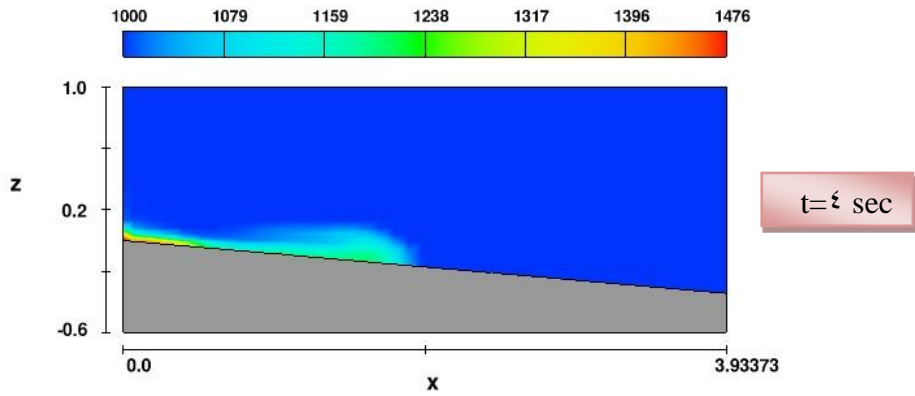
macroscopic density contours



FLOW-3D t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkgj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

3

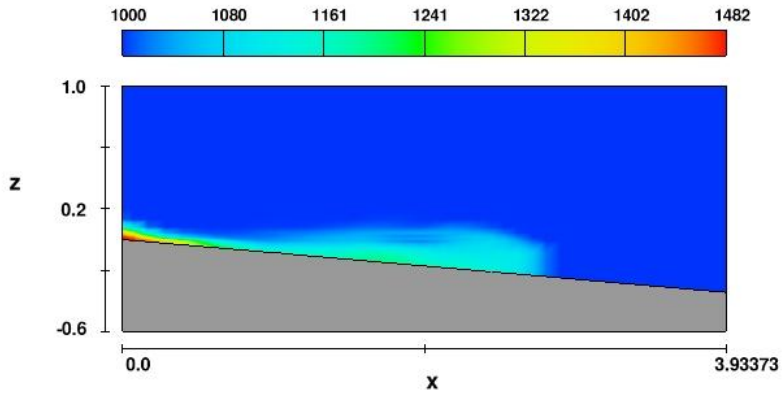
macroscopic density contours



FLOW-3D t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkgj hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

5

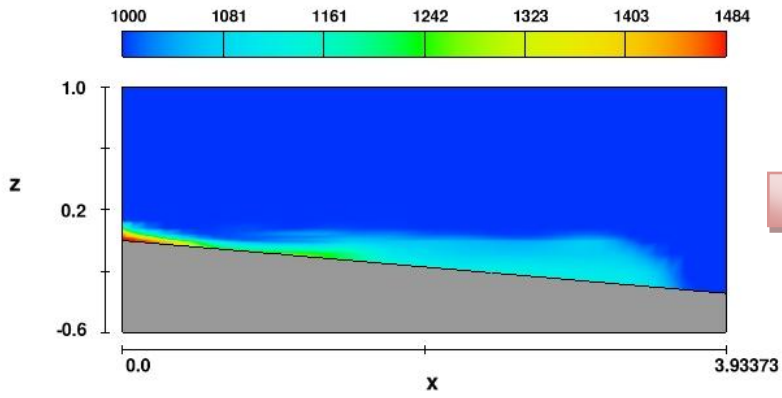
macroscopic density contours



FLOW-3D t=6.0013890 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkq| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

7

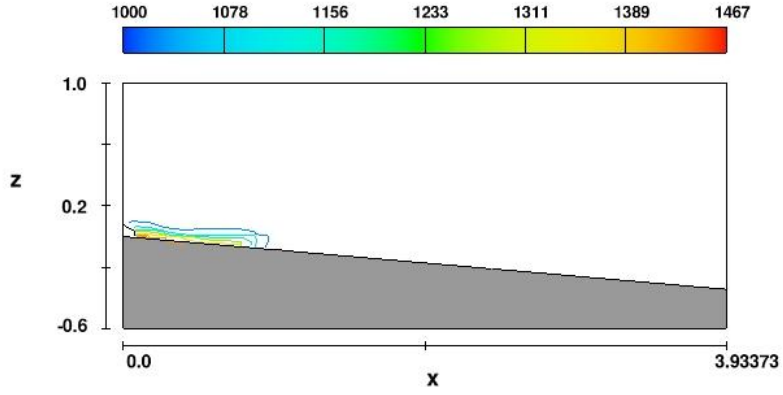
macroscopic density contours



FLOW-3D t=8.0006561 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkq| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

9

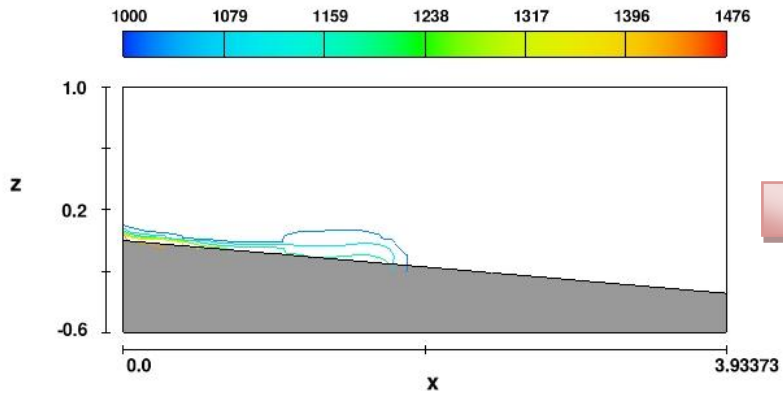
macroscopic density contours



FLOW-3D t=2.0001440 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkg| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

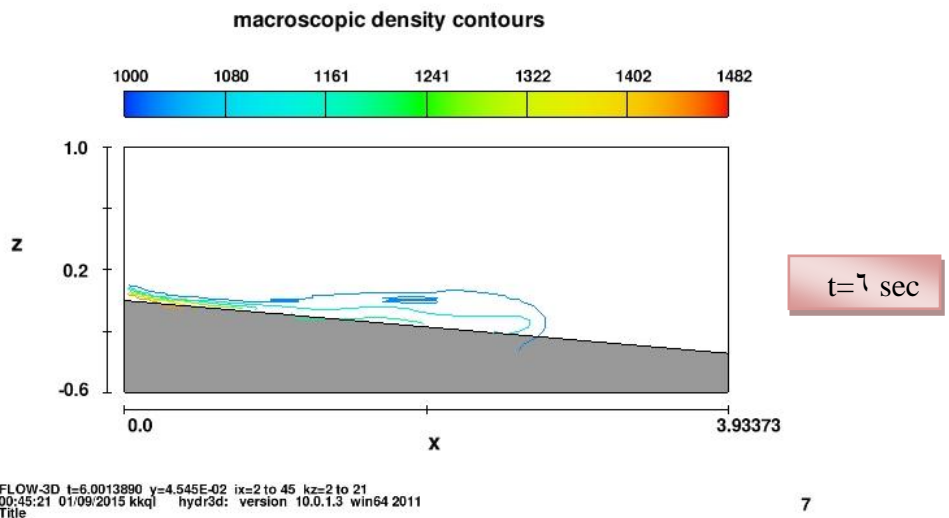
3

macroscopic density contours

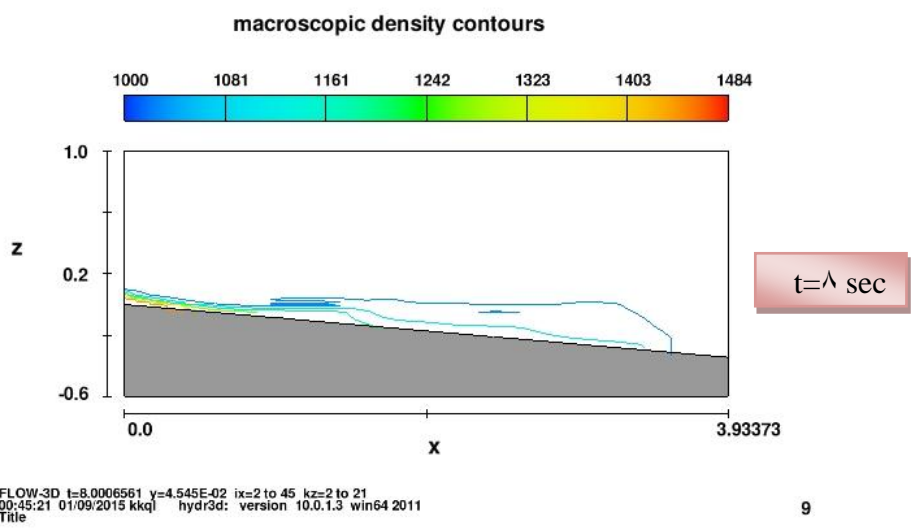


FLOW-3D t=4.0004125 y=4.545E-02 ix=2 to 45 kz=2 to 21
00:45:21 01/09/2015 kkg| hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Title

5

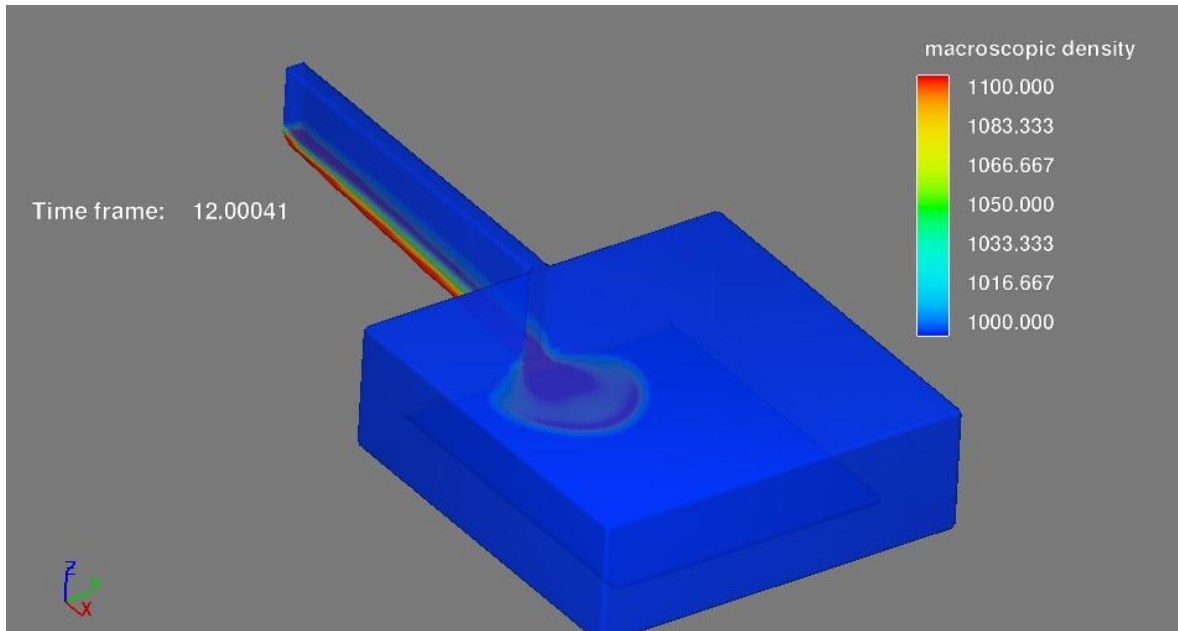
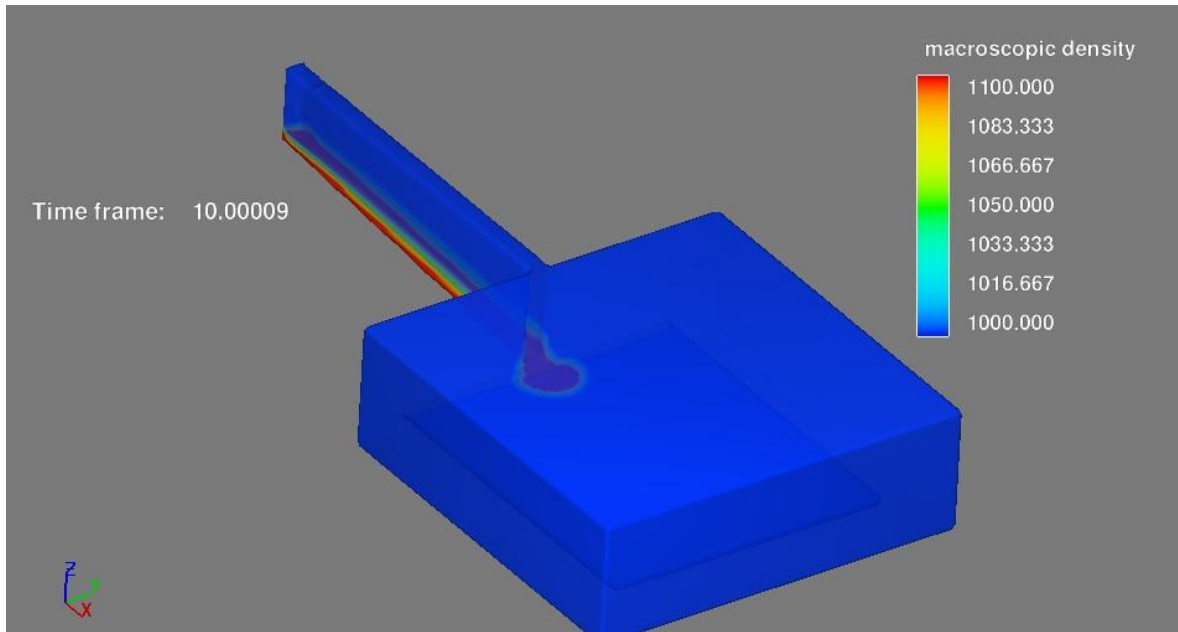


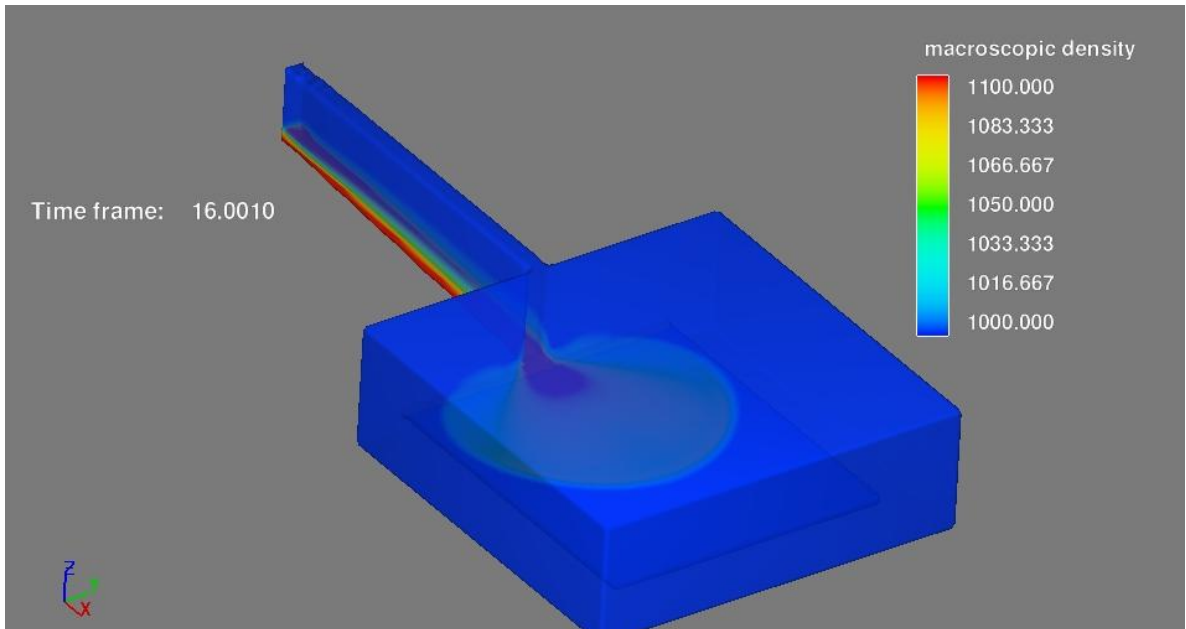
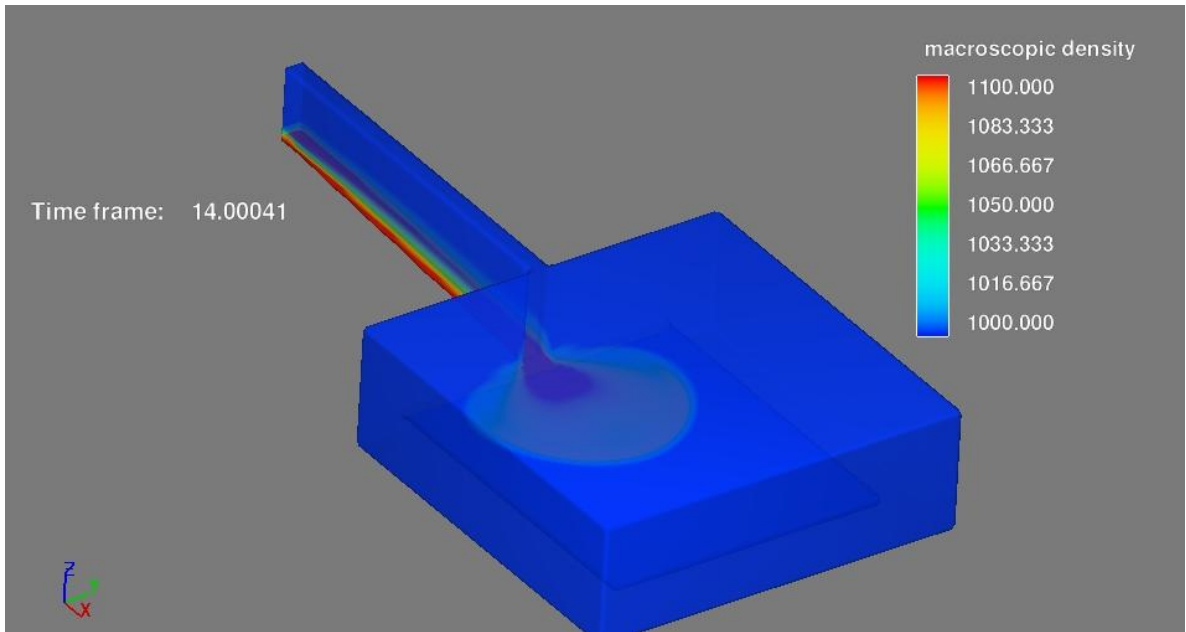
7

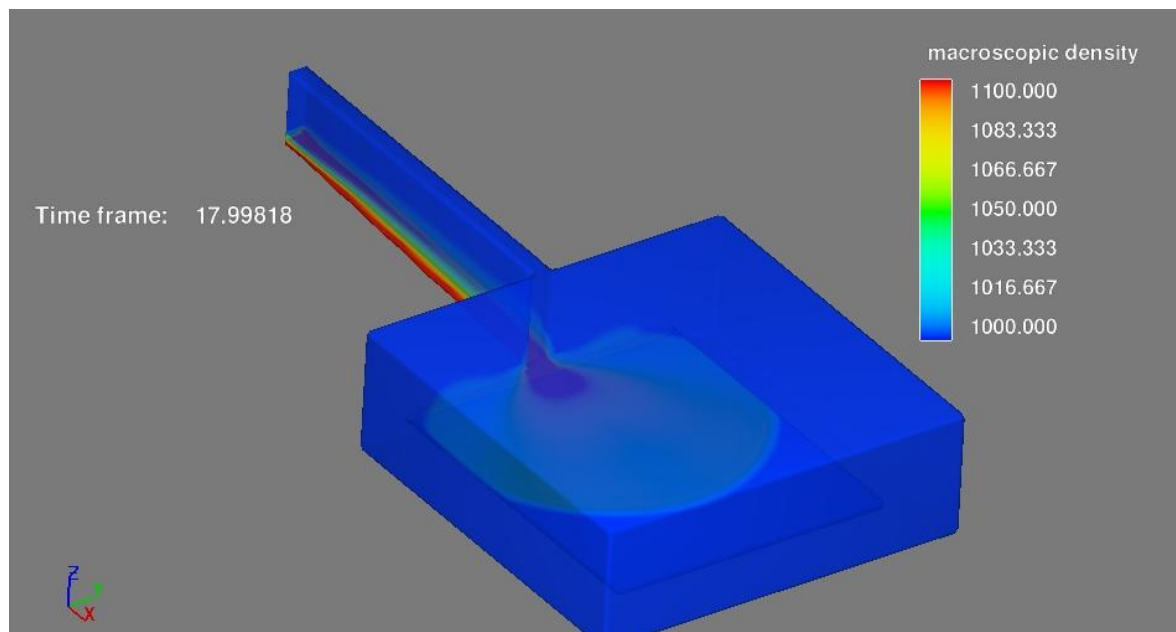


9

شکل ۴-۱۴ مقادیر چگالی بالک در بازه های مختلف زمانی (۱۲ Run).





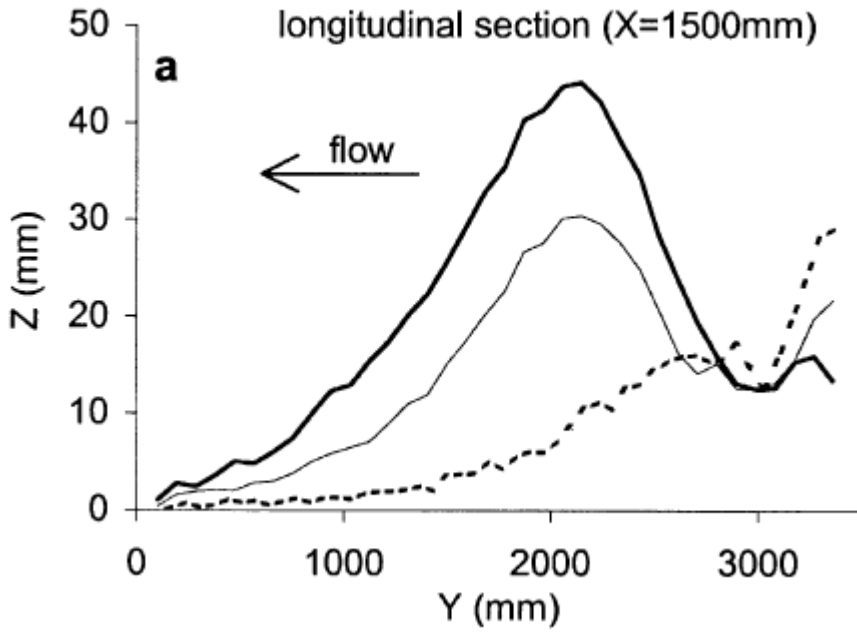
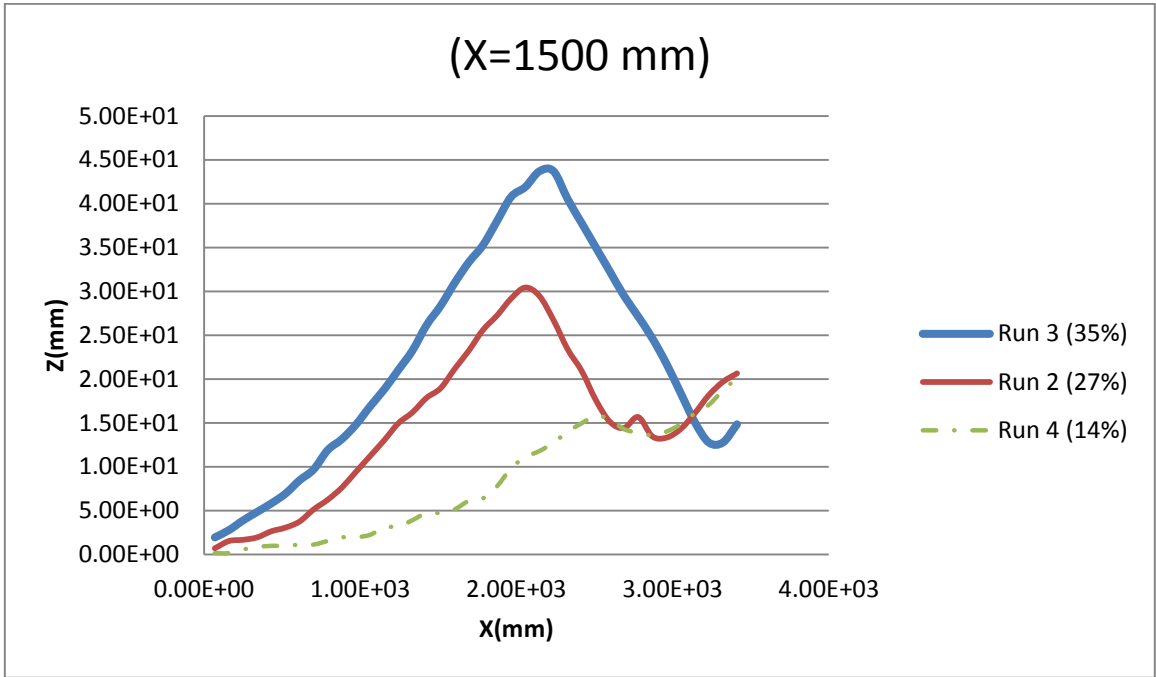


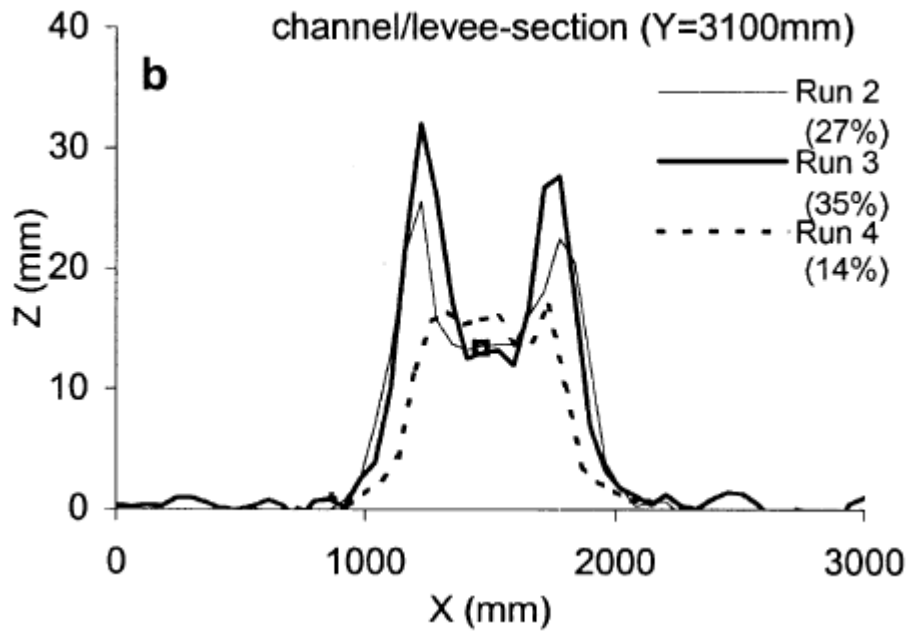
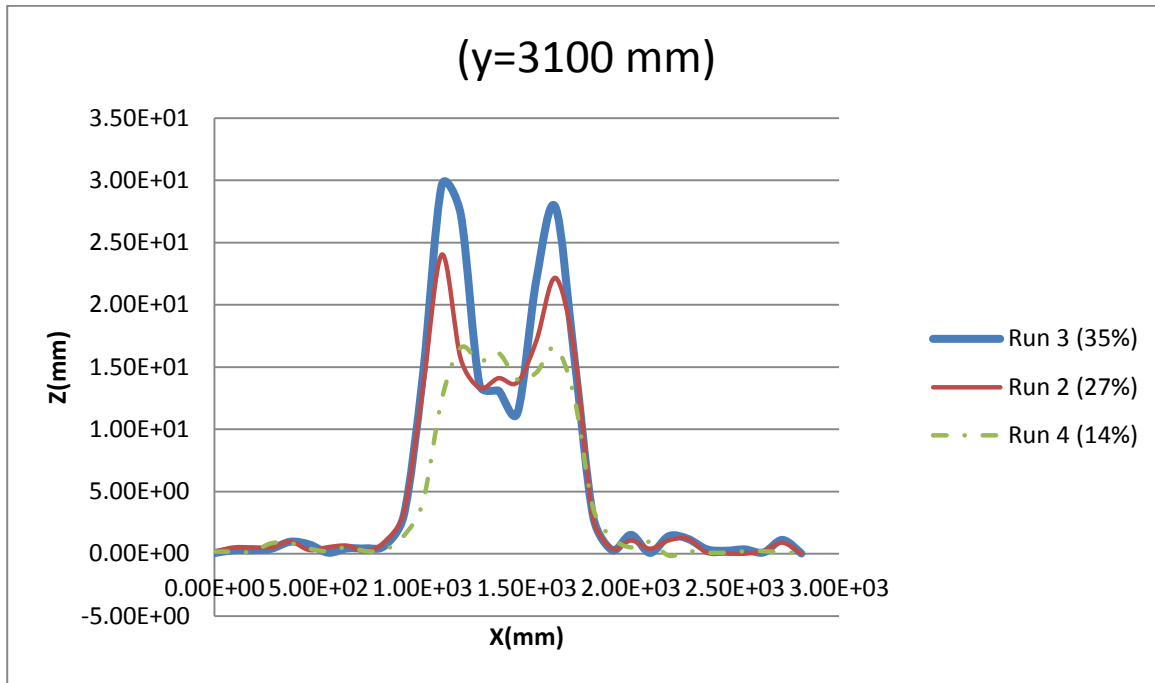
شکل ۴-۱۵ مقادیر چگالی بالک در مخزن در بازه های مختلف زمانی (Run D۱۳).

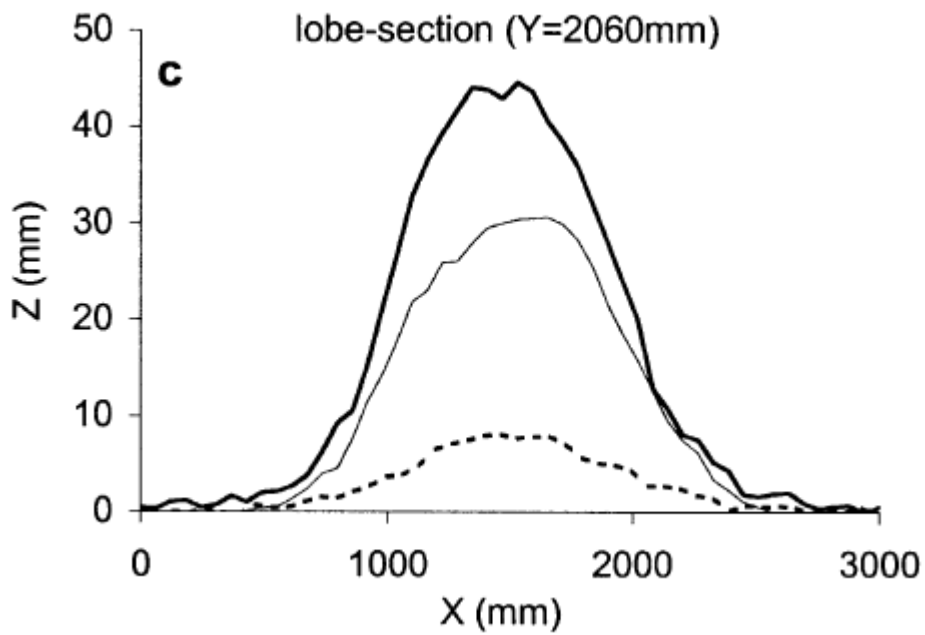
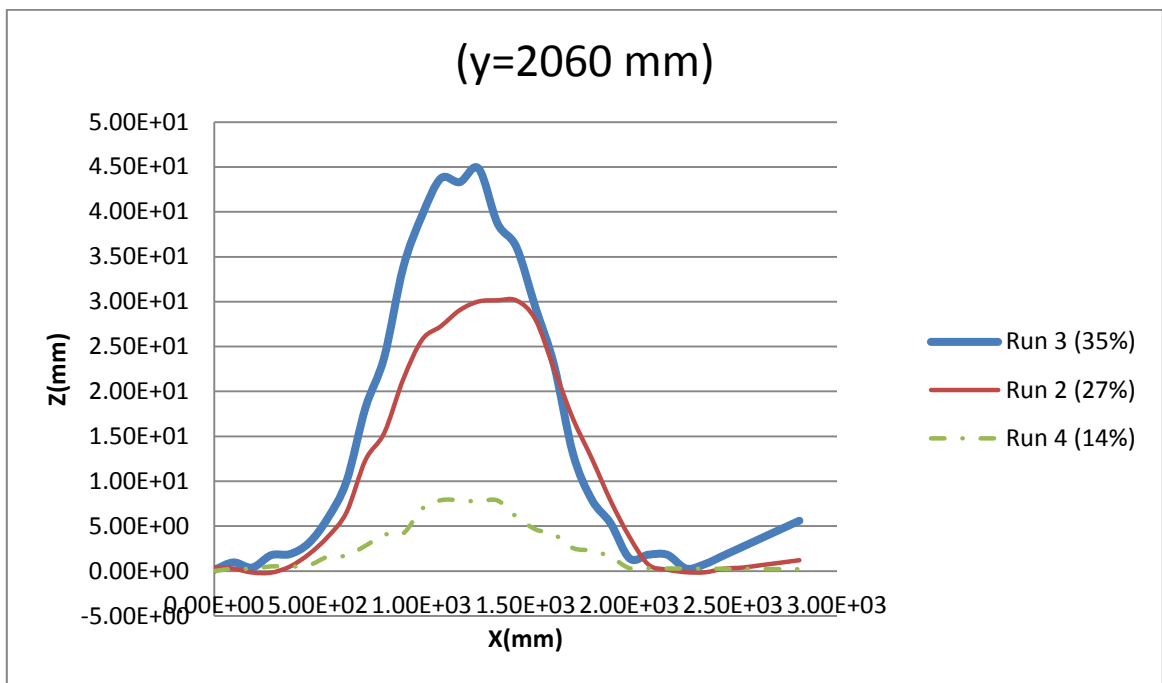
در ادامه به بررسی مورفولوژی ایجاد شده توسط جریان گل آلود در مدلسازی های مختلف پرداخته می شود. همانطور که در شکل های زیر مشاهده می شود مقادیر رسوبگذاری در هر سه بعد (Z,Y,X) به نمایش گذاشته شده است.

اشکال زیر پروفیل توپوگرافی هندسه مقطع عرضی مورفولوژی مختلف توسط جریان گل آلود مملو از ماسه خوب دانه بندی شده را نشان می دهد. مقاطع شامل مقطع طولی در امتداد کانال خاکریزی و گوشته (۴-۱۸ الف) و مقطع عرضی نزدیک به مبدا سیستم کانال-خاکریز (۴-۱۸ ب) و مقطع عرضی از گوشته (۴-۱۸ ج) برای Run های مختلف با غلظت رسوبات معلق متفاوت می باشد. در تمامی دیاگرامها منحنی های خط چین، خط باریک و خط ضخیم به ترتیب مربوط به جریان گل آلود با غلظت اولیه کم، متوسط و زیاد می شود.

مقادیر غلظت اولیه رسوبات در زیر شماره Run ها آورده شده است. مقادیر X و Y و Z به سیستم مختصات داده شده در شکل بر می گردد. توجه کنید که ارتفاعها بیش از حد واقع بزرگ شده اند.







شکل ۴-۱۶ پروفیل توپوگرافی مقطع عرضی هندسه مورفولوژی شکل گرفته توسط جریان گل آلود

شکل ۴-۱۶ الف مقادیر تغییرات مورفولوژی در جهت X را نمایش می دهد. با حرکت به سمت انتهای میز رسوبگذاری به دلیل کاهش سرعت جریان گل آلود ورودی به منطقه، میزان رسوبگذاری افزایش می یابد و

در ابتدای میز پدیده رسوب شویی اتفاق می افتد. و اما در انتهای میز به دلیل آنکه کمتر تحت تأثیر جریان گل آلود می باشد به نسبت سایر نقاط منطقه تغییرات محسوسی در مورفولوژی آن رخ نمی دهد.

جریان گل آلود هنگامی که وارد یک حوضچه وسیع می شود، همانطور که بار معلق خود را از دست می دهد مومنتوم خود را نیز از دست می دهد. در ۴ Run ضخامت رسوبگذاری در نزدیکی خروجی کانال برابر ۰.۰۳ متر می باشد که در جهت طولی و عرضی به سرعت کاهش می یابد. در طول خط مرکزی فلوم، ضخامت بستر در ابتدای ۰.۴ متری از نقطه انبساط (رسوبگذاری) به سرعت کاهش می یابد. سپس اندکی ثابت می ماند و در نهایت به طور نمایی بین ۱ تا ۲.۸۰ متری کاهش می یابد (شکل ۴-۱۶ الف). شکل ۴-۱۶ ب و ۴-۱۶ ج مقطع عرضی از به ترتیب خاکریز و انحنای برآمده را نمایش می دهد.

خاکریز در دو سمتش لبه های کوچکی دارد اما شکل اصلی آن شبیه یک برآمدگی با شیب جانبی که بالای آن صاف است می باشد.

کناره های شیبدار دارای ماکزیمم زاویه ۸ درجه می باشند. مقطع عبوری از برآمدگی در ۱.۳۴ متری از نقطه انبساط (شکل ۴-۱۶ ج) یک هندسه محدب رو به بالا با ضخامت حداکثر ۰.۰۰۷ متر در طول خط مرکزی فلوم و شیب جانبی کمتر از ۱ درجه دارد (شکل ج). در ۲ run و ۳ بدنه رسوب ایجاد شده توسط جریان گل آلود با چگالی بالا، بزرگتر از Run ۴ می باشد. همچنین آنها مورفولوژی متفاوتی خصوصاً در نزدیکی خروجی کانال دارند. شکل ب و ج هندسه رسوبگذاری دو بعدی به ترتیب در انتهای ۲ و ۳ را نمایش می دهد.

هر دو شکل رسوبگذاری شامل کناره های فرو رفته با عمق کم، نزدیک به مبدأ با لبه های باریک و بدنه برآمده شکل که ضخامت آن به طور نمایی کاهش می یابد.

شرایط ایجاد شده در تو رفتگی با کناره های بلند در شکل ب، مشابه یک کانال زیر آبی با خاکریز می باشد.

الگوی رسوب شکل گرفته توسط جریان گل آلود با چگالی بالا با $c=27\%$ (Run ۲) دارای زاویه پخش ۵۳ درجه می باشد که از Run ۴ کوچکتر می باشد. در Run ۳ نزدیک به ۳۰ درجه کاهش یافته بود. خاکریزهای دارای ماکزیمم ضخامت ۰.۰۲۶ متر در Run ۲، ۰.۰۳ متری در Run ۳ می باشند. خاکریزها در Run ۲ توسط شیبهای داخلی و خارجی به ترتیب با حداکثر گرادیان ۹ و ۷ درجه مشخص شده اند. این شیبها در Run ۳ ۱.۵ درجه تندتر می باشند.

در Run ۲ ماسه داخل کانال یک بستر با ضخامت حدود ۰.۰۱۹ متر بجز در محدوده بالای جریان میز رسوبگذاری جایی که ضخامت به ۰.۰۲۵ متر می رسد، ایجاد می کند.

ضخامت کف کانال در Run ۳ مشابه بود (تقریبا ۰.۰۲۰ متر). انتقال از کانال به گوشته یک افزایش ناگهانی در ضخامت بستر در طول مرکز کانال و یک تعریض تدریجی خاکریز در موقعیتی که ضخامت آن بیشترین است را نشان می دهد.

در مجموع با تحلیل و بررسی مدل های شبیه سازی شده توسط نرم افزار Flow-۳D و مقایسه نتایج آنها با نتایج مدل آزمایشگاهی به ازای پارامترهای سرعت و عمق رسوب در طول مدل، با توجه به مدت زمان شبیه سازی ها و دقت نتایج حاصل از آنها، می توان آزمون ۳ را مناسب ترین و کالیبره ترین مدل جهت شبیه سازی جریان گل آلود دانست. دستیابی به چنین مدل کالیبره شده ای می تواند به منظور بررسی روند تغییرات مورفولوژی در طول رودخانه ها و مخزن سدها در تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

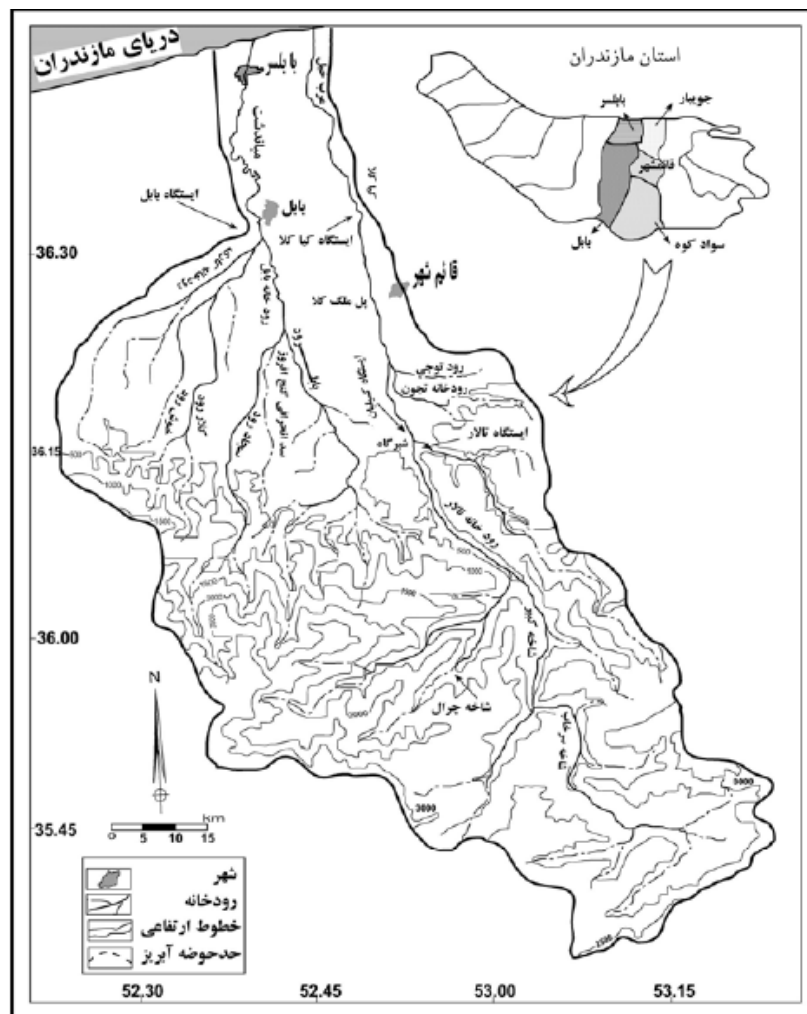
بخش سوم: مدل‌سازی مخزن سد البرز و رودخانه بابل

۴-۱ مقدمه

مرفولوژی مخازن سدها، علم شناخت سیستم مخازن از نظر شکل و فرم کلی، ابعاد و هندسه هیدرولیکی، پروفیل بستر و نیز روند و مکانیزم تغییرات آن می باشد. بررسی مرفولوژیکی برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی در آینده ضروری است و تنها از این طریق می توان عکس العمل طبیعی آن رانسبت به تغییرات طبیعی و یا اقدامات ناشی از اجرای طرح های اصلاح مسیر رودخانه بالادست پیش بینی نمود و میزان جابجایی، تغییر ابعاد و الگوی مخزن را تشخیص داد. در این فصل پس از صحت سنجی نرم افزار به مدل‌سازی مخزن و رودخانه بالادست سد البرز پرداخته و تغییرات مرفولوژی ناشی از دبی و رسوبات مشخص را بررسی می‌نماید.

۴-۲ مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال سلسله جبال البرز و در جنوب دریای مازندران قرار دارد. این محدوده از نظر موقعیت جغرافیایی در طول شرقی ۵۳/۲۴ تا ۵۲/۳۱ درجه و عرض شمالی ۳۶/۳۳ تا ۳۵/۴۵ درجه قرار دارد (نقشه شماره ۱). منطقه تحت بررسی، جز استان مازندران و شهرستانهای بابل، بابلسر، سوادکوه و قائم شهر می باشد (شکل ۴-۱). بر اساس اندازه گیری با پلانیمتر از روی نقشه توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ مساحت محدوده مورد مطالعه ۱۷۳۹/۳۵ کیلومتر مربع را شامل می شود. طول رود بابل با استفاده از کورویومتر از روی نقشه توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ ۱۰۱/۵ کیلومتر می باشد.



شکل ۴-۱۷ حوضه آبخیز رودخانه بابل رود (ماخذ: نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی

کشور برگهای دراز کلا، بابل، قائمشهر و پاشا کلا

۴-۲-۱ رودخانه بلیل (بابلرود)

رودخانه بابل در شهرستان بابل (استان مازندران) جاری است. این رودخانه از رشته ارتفاعات البرز مرکزی سرچشمه گرفته و با طی مسیر پر پیچ و خم در بندر بابلسر به دریای خزر می ریزد. حجم آبدهی سالانه ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلیون متر مکعب، متوسط دبی لحظه ای رودخانه ۹ متر مکعب در ثانیه اندازه گیری گردیده است. سرشاخه های رودخانه بنامهای (آذر، اسکلیم، کرسنگ، بابلک و آذررود) بوده و در دهکلان (دیوکلان) به هم پیوسته و رودخانه بابل را تشکیل می دهند. رودخانه بابل در جهت شمال جریان و از

روستاهای قران کلان، درون کلا شرقی عبور کرده و در گنج افروز با شاخه مهم سجاد رود تلاقی می نماید. رودخانه در همین منطقه از ارتفاعات کوهستانی خارج شده و وارد دشت جنوبی بابل می گردد. جنوب شهرستان بابل با شاخه های مهم دیگر چون کلان رود و کاری رود تلاقی می نماید. رودخانه از شهرستان بابل عبور و در شهرستان بابلسار وارد دریای خزر می گردد.

بابل رود دائمی بوده و بعلت پایین بودن نسبی تراز آبریز (بطور متوسط ۱۰۰۰ متر و تراز حداکثر ۳۷۰۰ متر از سطح دریا) دارای رژیم بارانی، برفی بوده و دوران پرآبی در فصل بهار می باشد. بخش عمده آبدهی رودخانه در فصل پاییز است.

منحنی هم باران در حوزه آبریز رودخانه از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیمتر می باشد. ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلیمتر در حوزه کوهستانی و ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیمتر در حوزه دشت واقع است. طول رودخانه بابل حدود ۱۷۰ کیلومتر بوده، وسعت حوزه آبریز حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع برآورد گردیده است. حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع از حوزه آبریز در مناطق کوهستانی و ۴۰۰ کیلومتر مربع در دشتهای ساحلی تشکیل می شود. عرض رودخانه بین ۸۰ تا ۱۵۰ متر و عمق آن ۲ تا ۵ متر متغیر بوده و بطور متوسط ۳ متر می باشد. مناطق کوهستانی حوزه آبریز رودخانه بابل پوشیده از جنگل می باشد.

۲-۲-۴ سد البرز

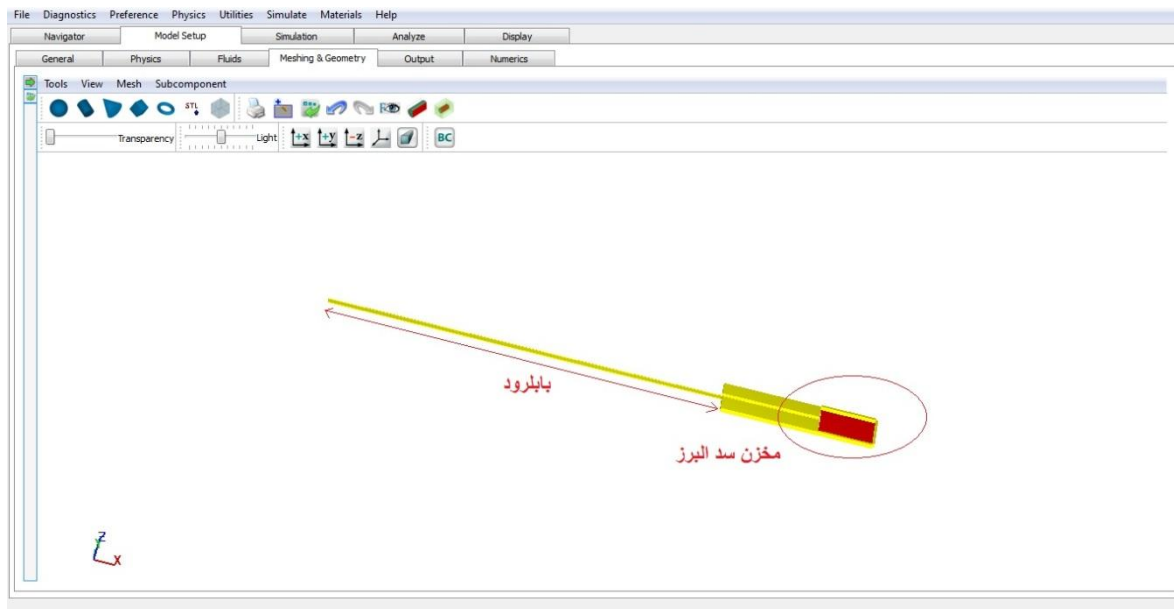
سد مخزنی البرز در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی بابل (۲۶۹ کیلومتری شمال شرقی تهران) بر روی رودخانه بابل اجرا می گردد. سد از نوع سنگریزه ای با هسته رسی می باشد. دبی حداکثر سیلاب محتمل ورودی ۱۴۶۶ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است.

جدول ۴-۶ مشخصات سد البرز

سنگریزه ای با هسته رسی	نوع سد
۷۸ متر	ارتفاع سد از پی
۳۰۷ متر از سطح دریا	تراز تاج سد
۲۳۵ متر	تراز بستر رودخانه در محل سد
۸۳۶ متر	طول تاج سد
۱۵ متر	عرض تاج سد
۱۵۰ میلیون متر مکعب	حجم مخزن در تراز عادی بهره برداری
۲۶۳ متر	تراز حداقل بهره برداری از مخزن

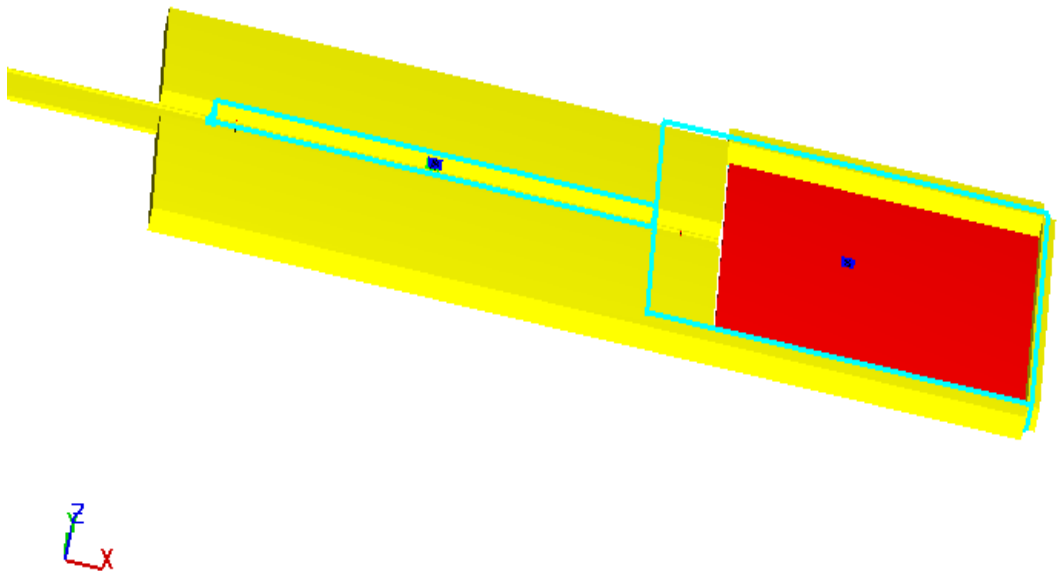
جهت تعیین مرفولوژی مخزن سد البرز ناشی از جریان رسوبی بابلرود مدلسازی با اشل جهت تعیین مرفولوژی مخزن سد البرز ناشی از جریان رسوبی بابلرود مدلسازی با مقیاس $\frac{1}{5}$ در نرم افزار Flow-۳D صورت گرفت. شرایط مدل واقعی شبیه سازی شده در نرم افزار به صورت جدول زیر می باشد:

مدل هندسی ترسیم شده در نرم افزار Solidworks مطابق شکل زیر صورت گرفت:



شکل ۴-۱۸ مدل‌سازی رودخانه بابل و سد البرز در نرم افزار Solidworks

در شکل ۴-۳ نیز مش بندی صورت گرفته در نرم افزار Flow-۳D آورده شده است. در بالادست کانال یک ورودی جریان گل آلود تعریف شده است. دیوارهای جانبی کانال و میز رسوبگذاری با شرط مرزی wall تعریف شده اند. سطح فوقانی مدل با شرط مرزی symmetry مدل‌سازی شده است.



شکل ۴-۱۹ مش بندی مدل هندسی در نرم افزار Flow-۳D

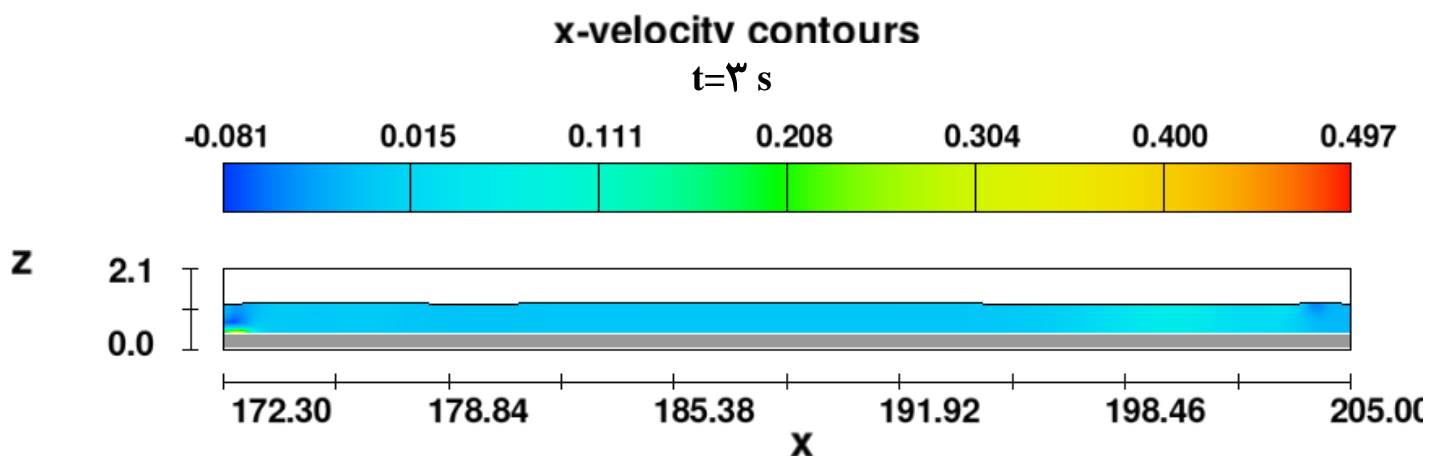
در مدل عددی مورد مطالعه پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای استخراج نتایج از مدل معادل ۱۰۰ ثانیه مدنظر قرار گرفت. در ادامه به شرح مراحل کار پرداخته شده است:

مدلسازی های متنوعی از شرایط مختلف آزمایشگاهی در نرم افزار Flow-3D صورت گرفت. در جدول زیر مشخصات کامل شبیه سازی های صورت گرفته آورده شده است که شرایط ذکر شده کاملاً مشابه شرایط واقعی می باشد:

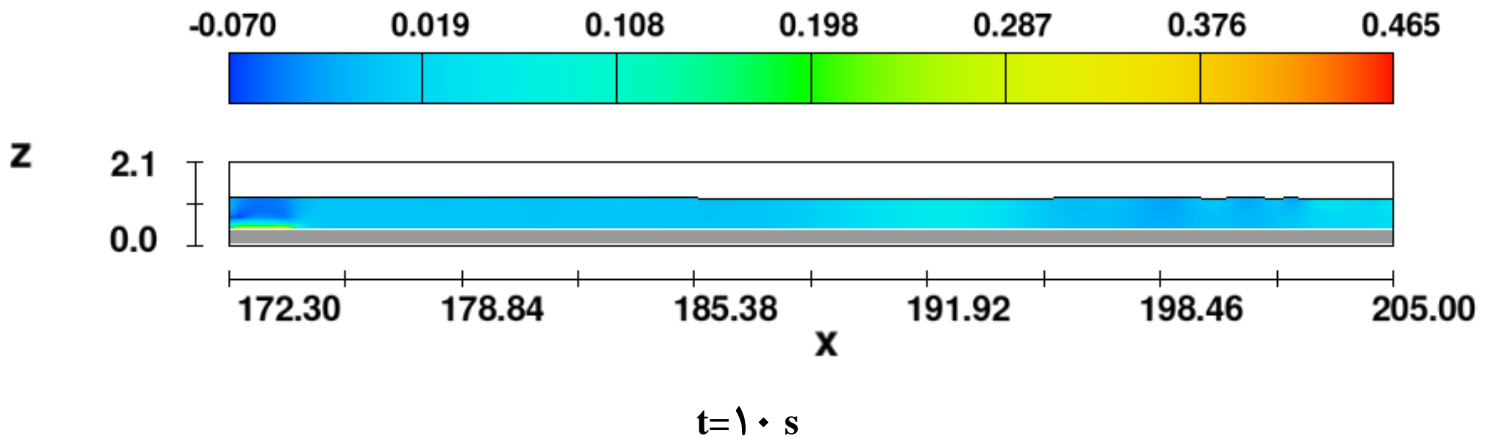
جدول ۴-۷ مشخصات کامل شبیه سازی صورت گرفته

طول رودخانه	عرض متوسط رودخانه	شیب متوسط	غلظت اولیه رسوب
۵۱ کیلومتر	۹۵ متر	٪۱.۸	٪۲۸.۲

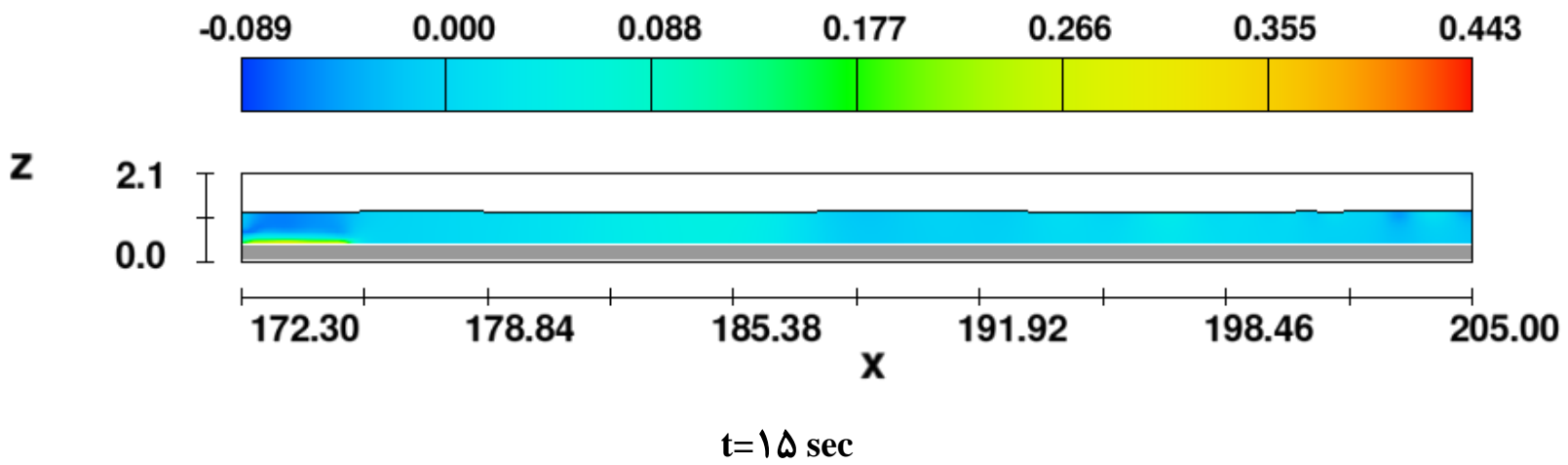
در ادامه نتایج خروجی مدلسازی صورت گرفته مورد شرح و بررسی قرار می گیرد. مشخصات جریان نمایش داده شده شامل مؤلفه سرعت در جهت X، Y و Z و مقدار سرعت، تغییرات چگالی بالک در جریان می باشد. مقادیر هر متغیری با یک طیف رنگی در طول مدل نمایش داده شده است. مقادیر سرعت در فاصله ۷.۵ سانتیمتری از کف کانال برداشت شده است:



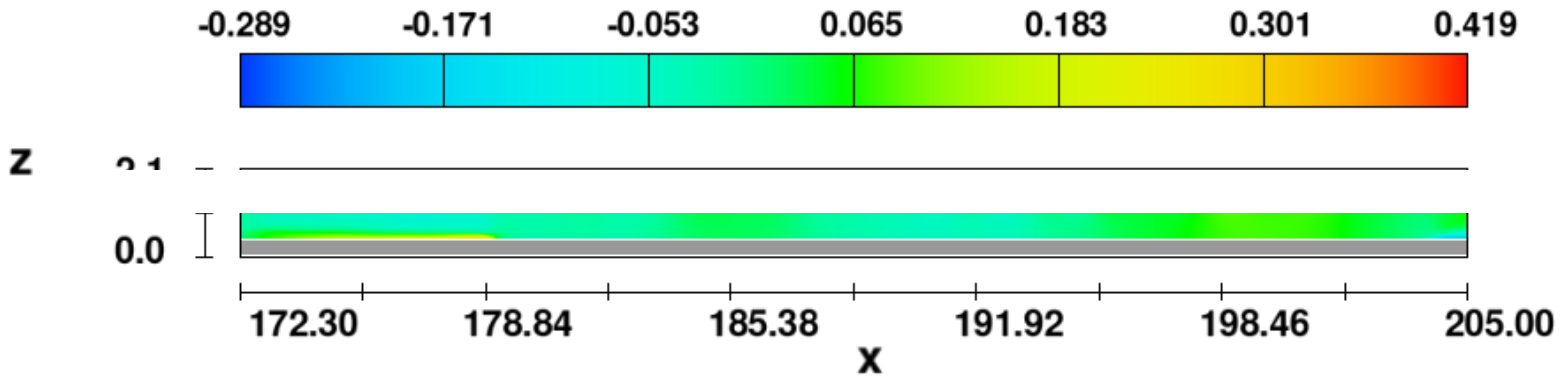
x-velocity contours



x-velocity contours

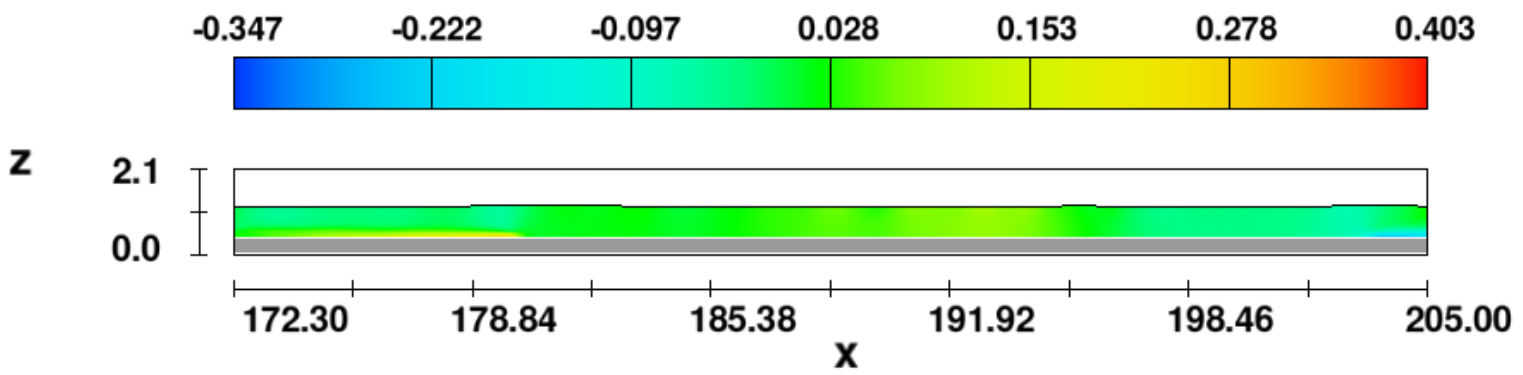


x-velocity contours



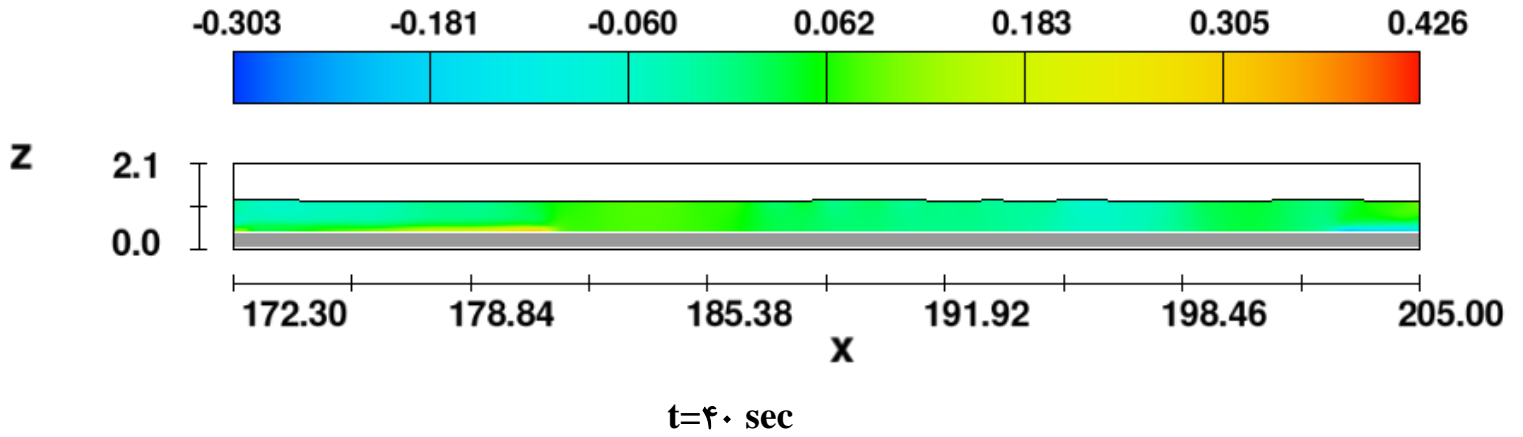
$t=2.0 \cdot \text{sec}$

x-velocity contours

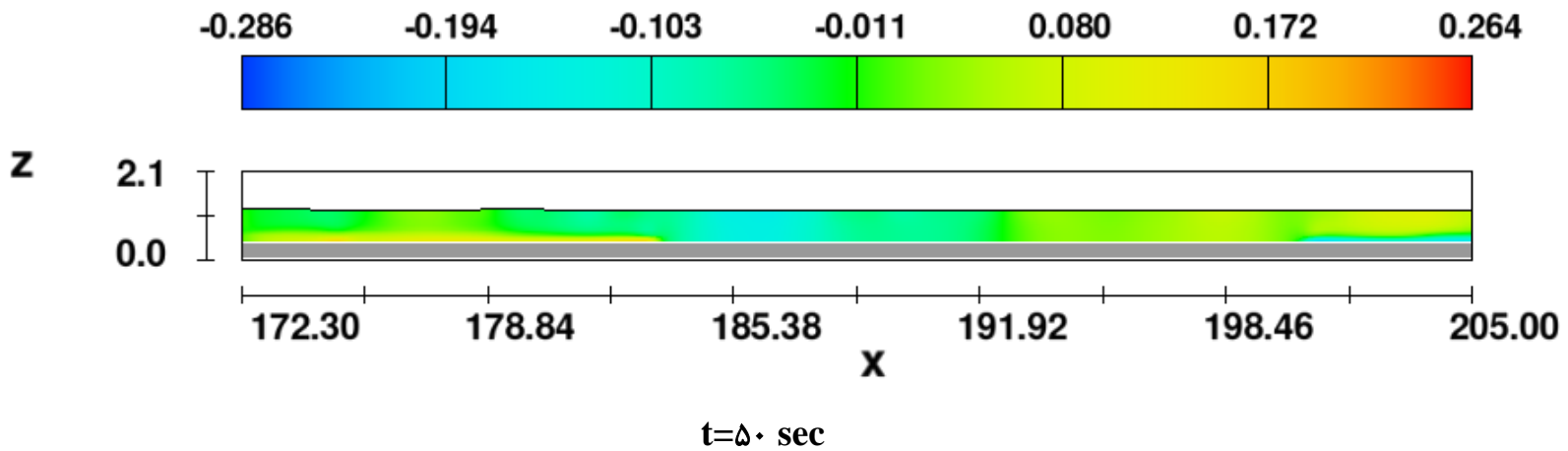


$t=3.0 \cdot \text{sec}$

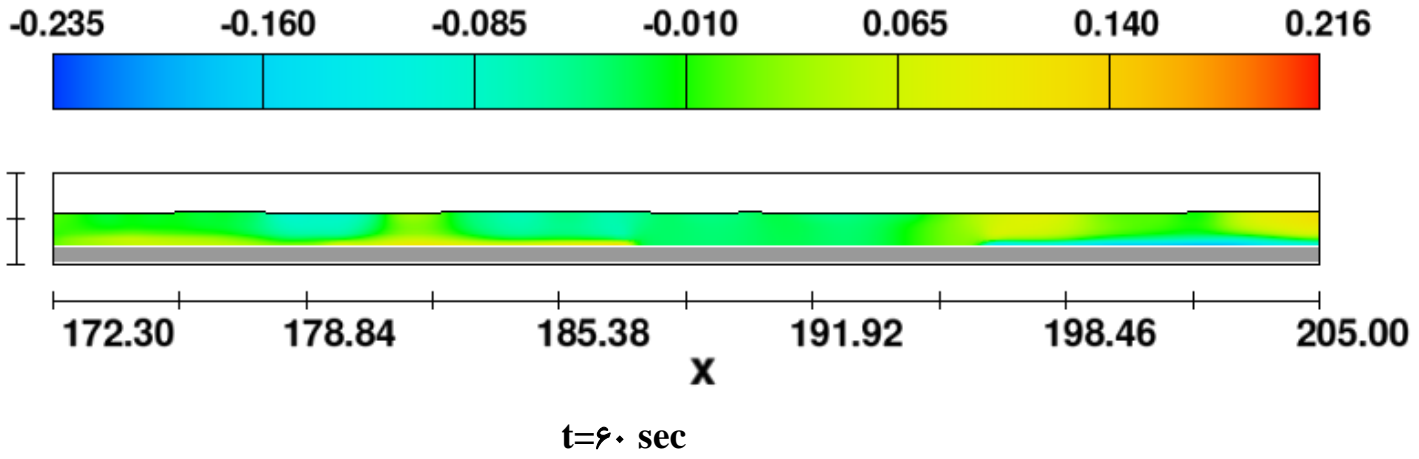
x-velocity contours



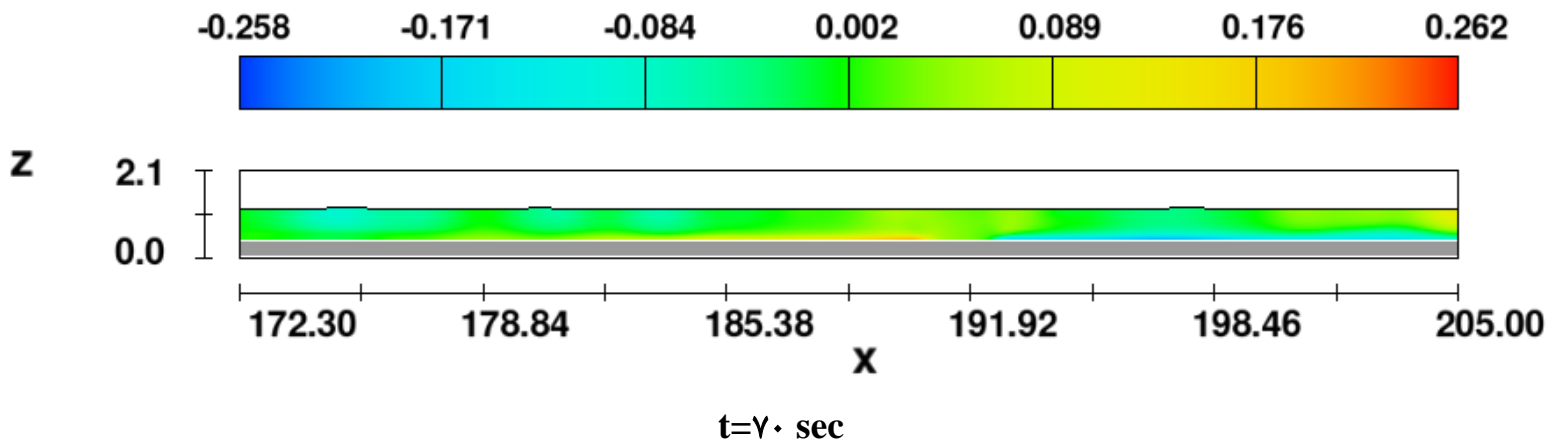
x-velocity contours



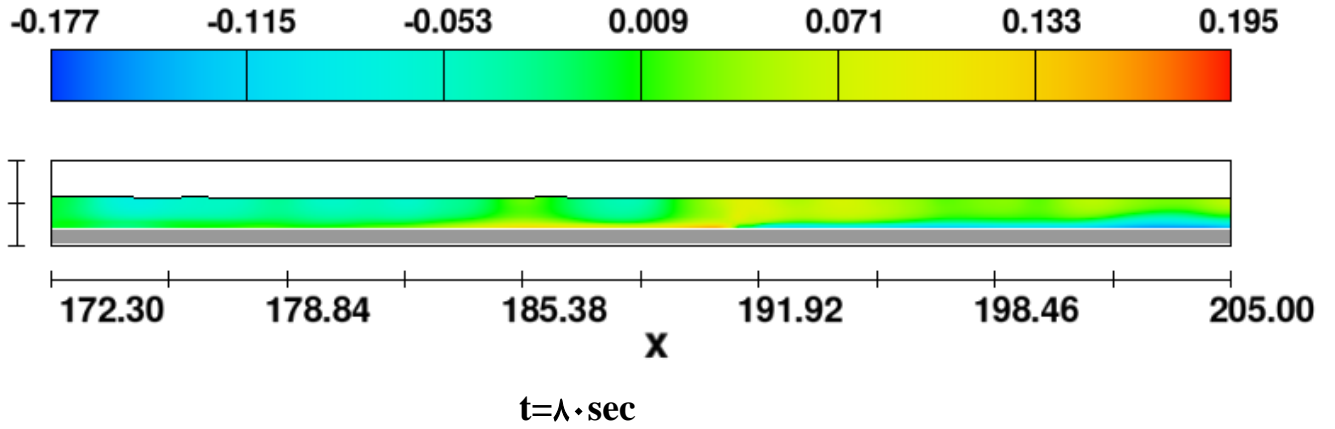
x-velocity contours



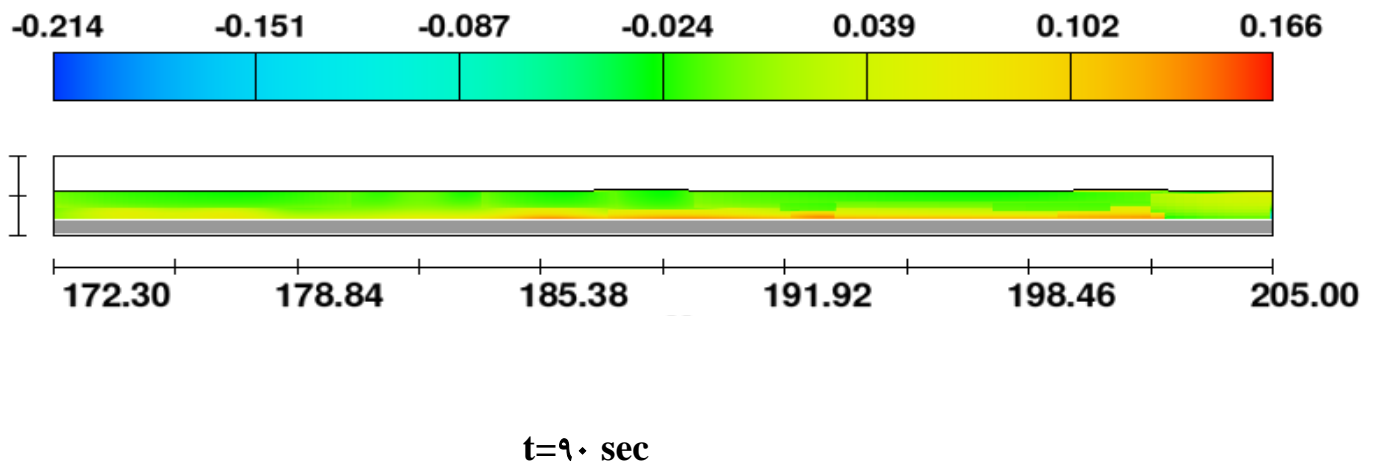
x-velocity contours



x-velocity contours



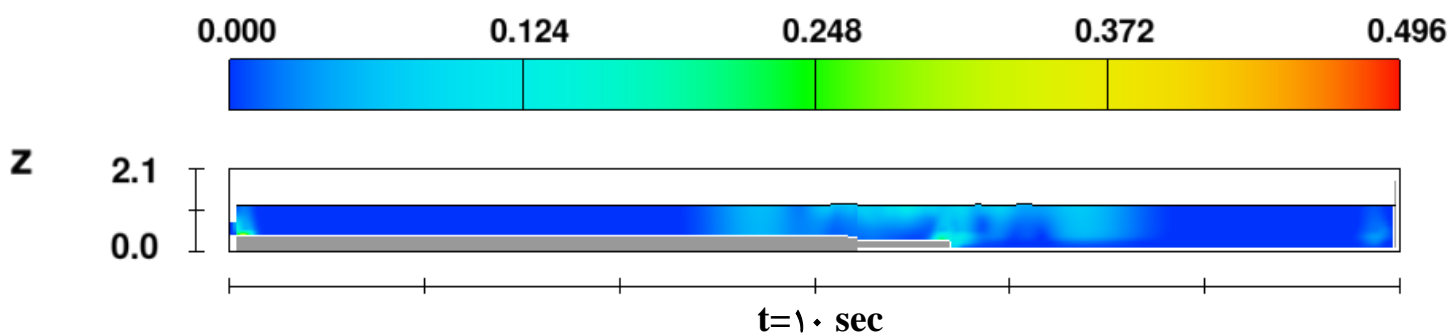
x-velocity contours



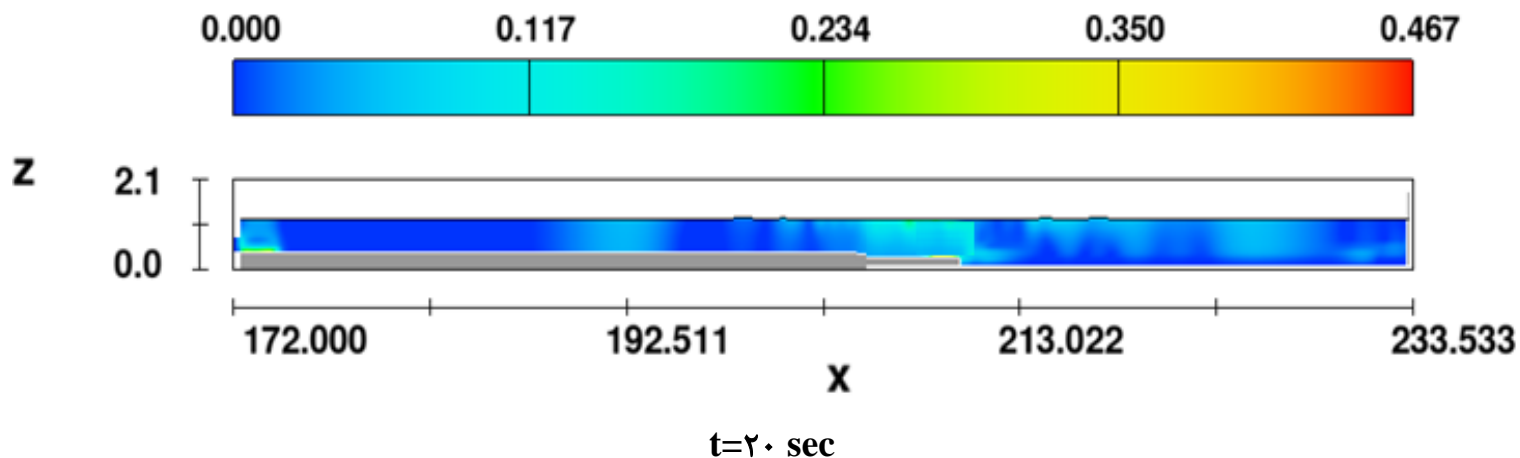
شکل ۴-۲۰ مقادیر سرعت در جهت X در قاب های زمانی مختلف

همانطور که مشاهده می شود به دلیل شیب کم رودخانه بابل سرعت جریان گل آلود ورودی به مخزن سد البرز کم می باشد. در شکل ۴-۵ مقادیر سرعت آورده شده است:

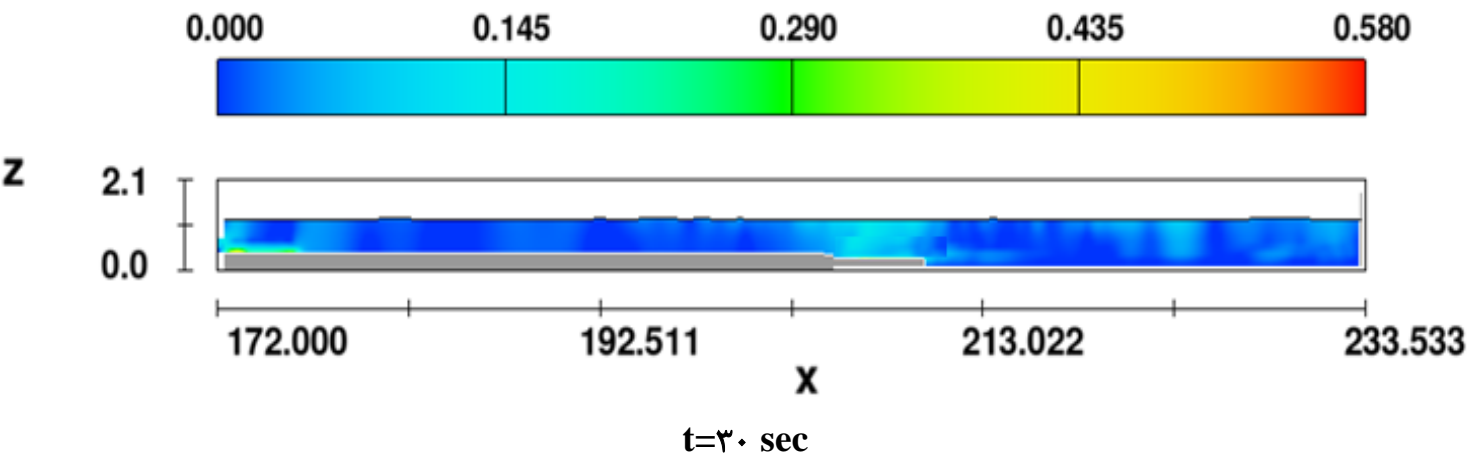
velocity magnitude contours



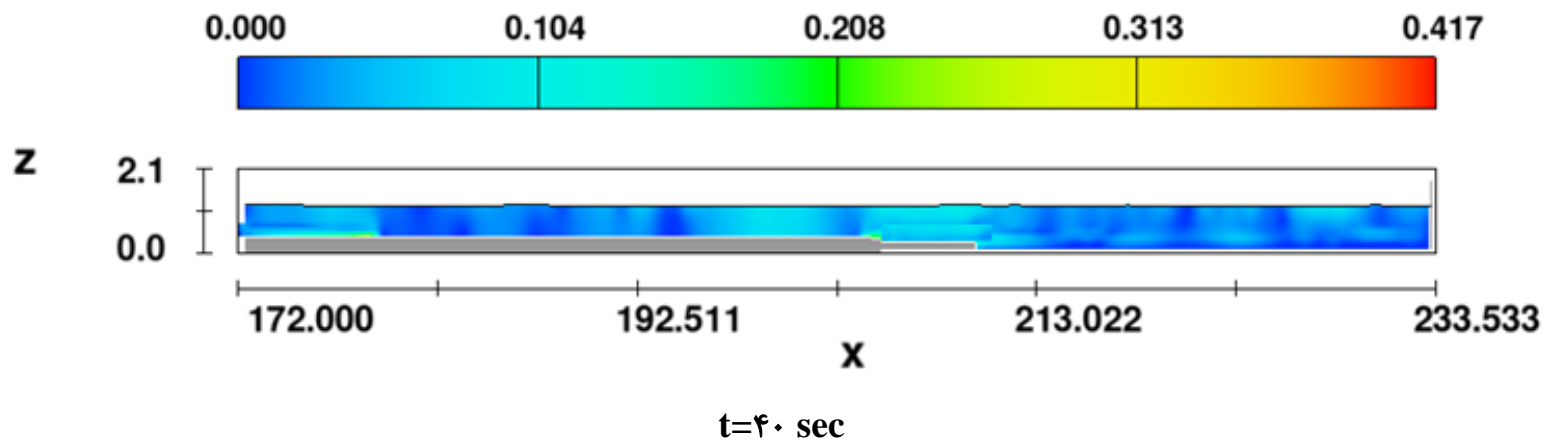
velocity magnitude contours



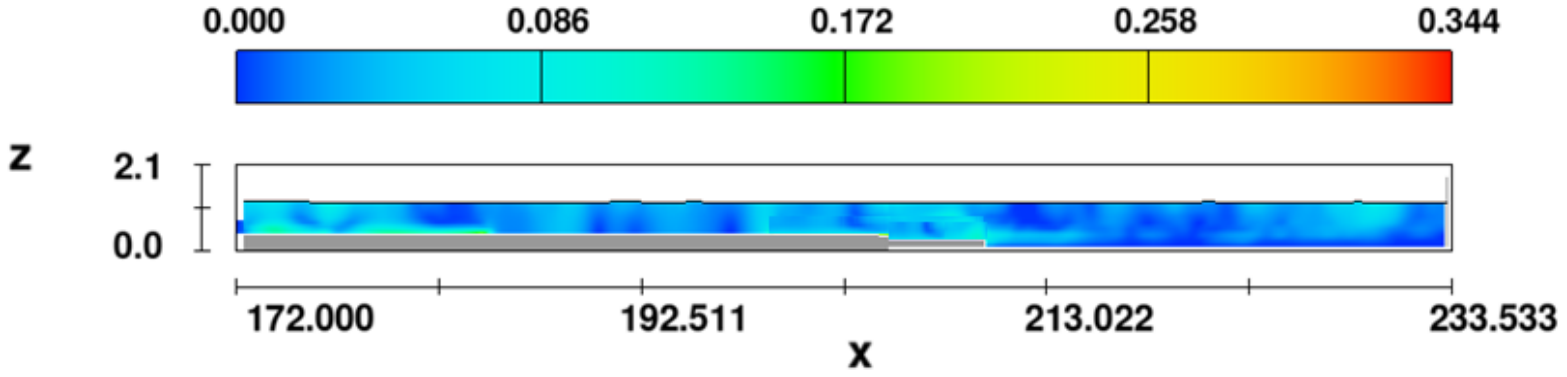
velocity magnitude contours



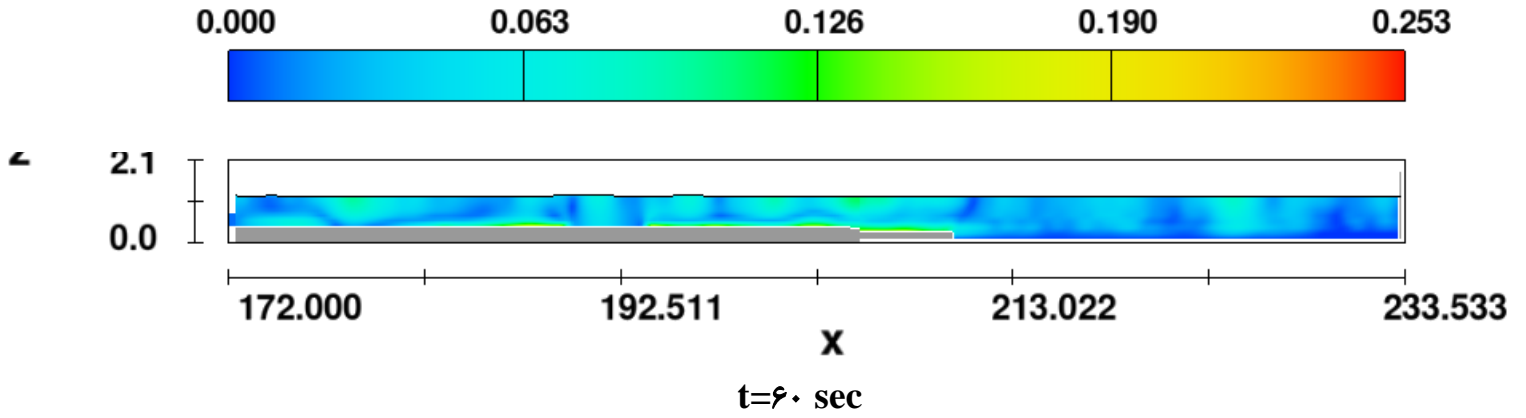
velocity magnitude contours



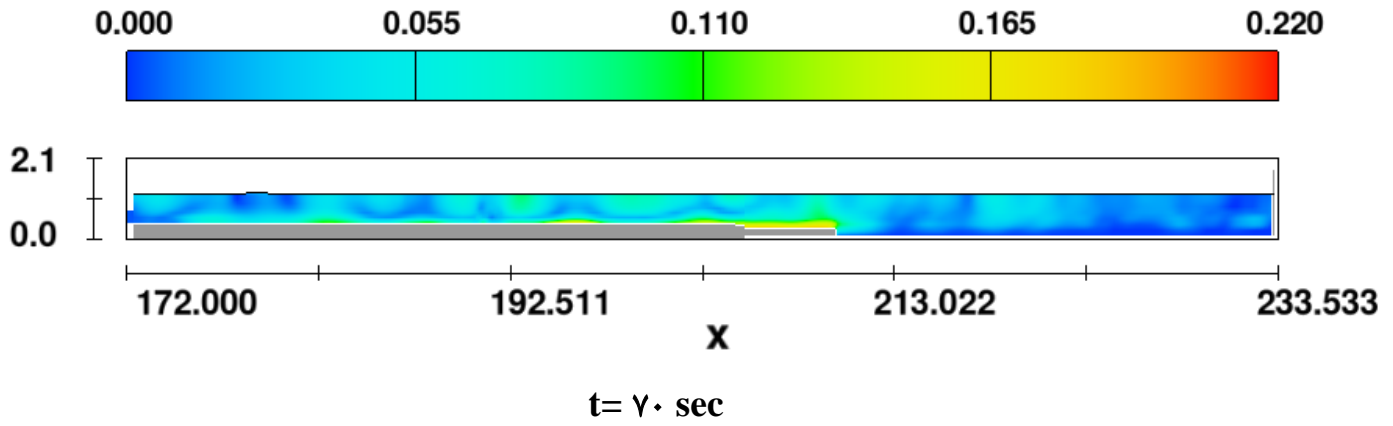
velocity magnitude contours



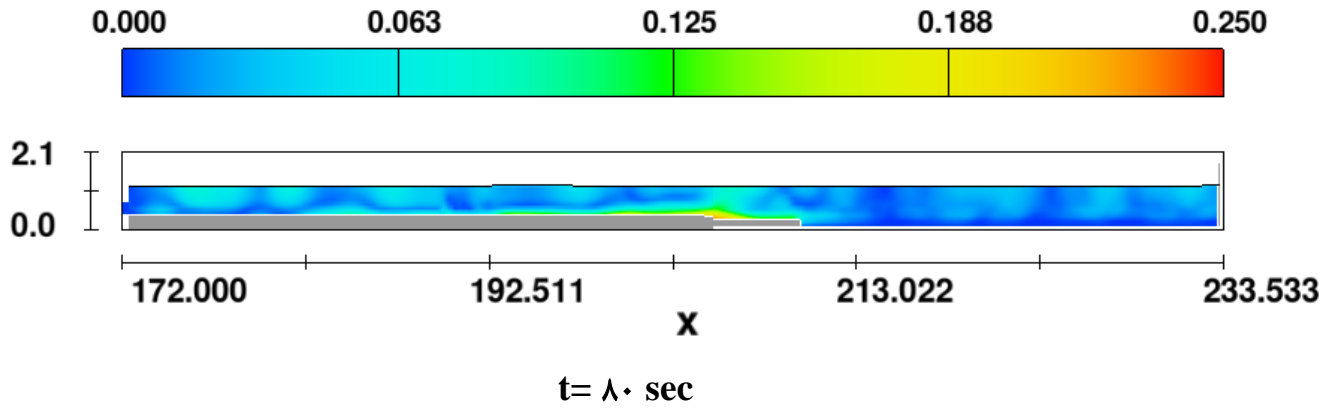
velocity magnitude contours



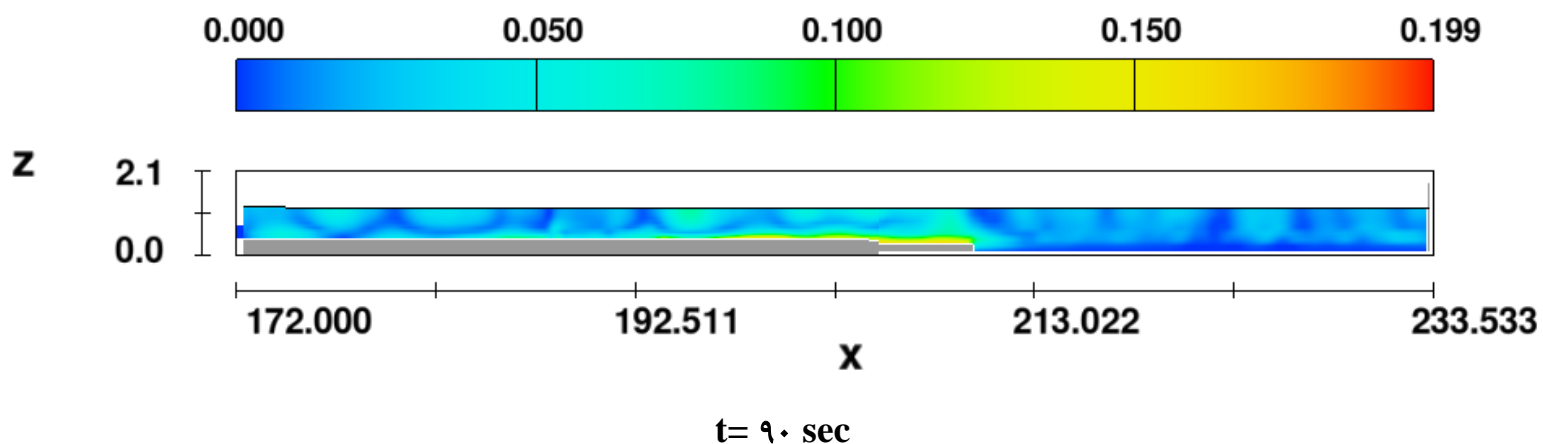
velocity magnitude contours



velocity magnitude contours



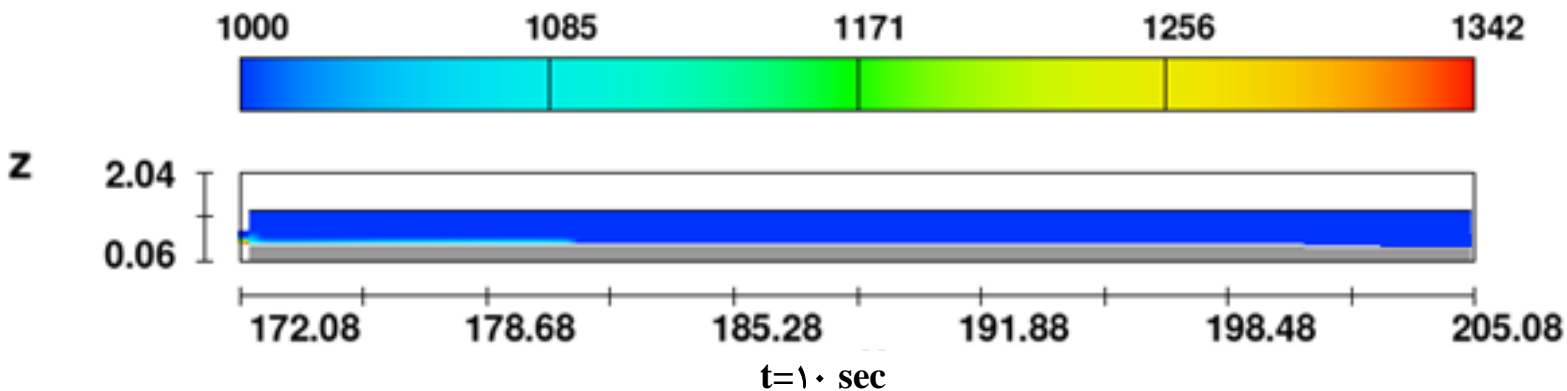
velocity magnitude contours



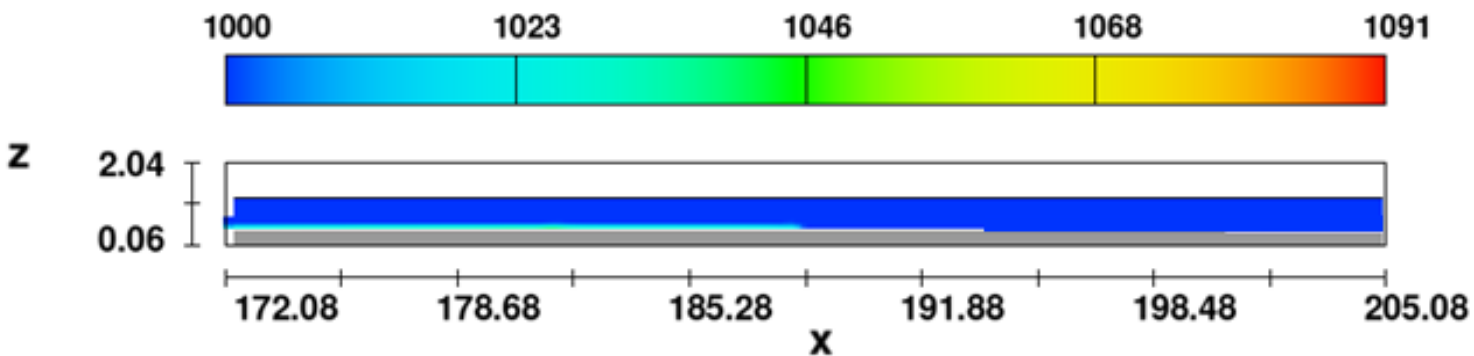
شکل ۴-۲۱ مقادیر سرعت در قاب های زمانی مختلف

مقادیر تغییرات چگالی بالک در زمانهای مختلف در شکل زیر (شکل ۴-۲۲) آورده شده است:

macroscopic density contours

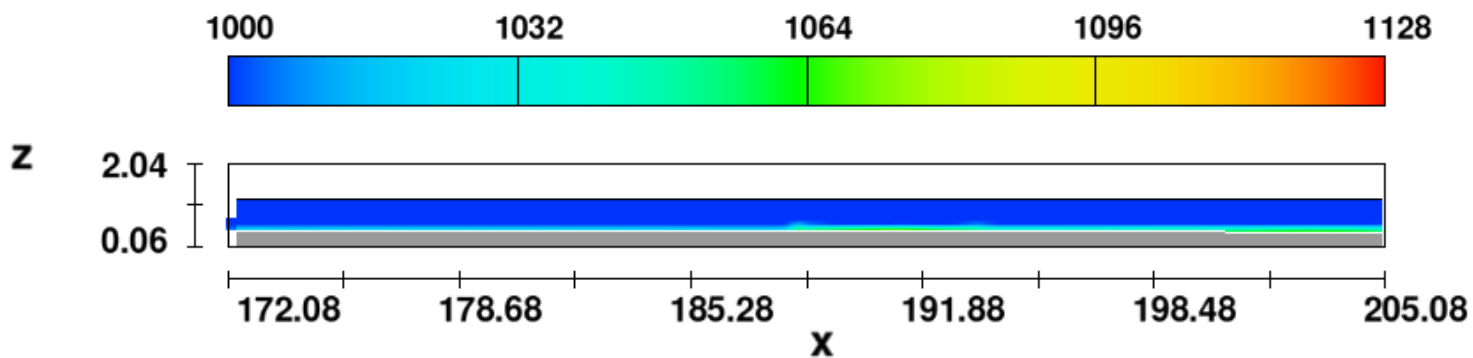


macroscopic density contours



$t=20 \cdot \text{sec}$

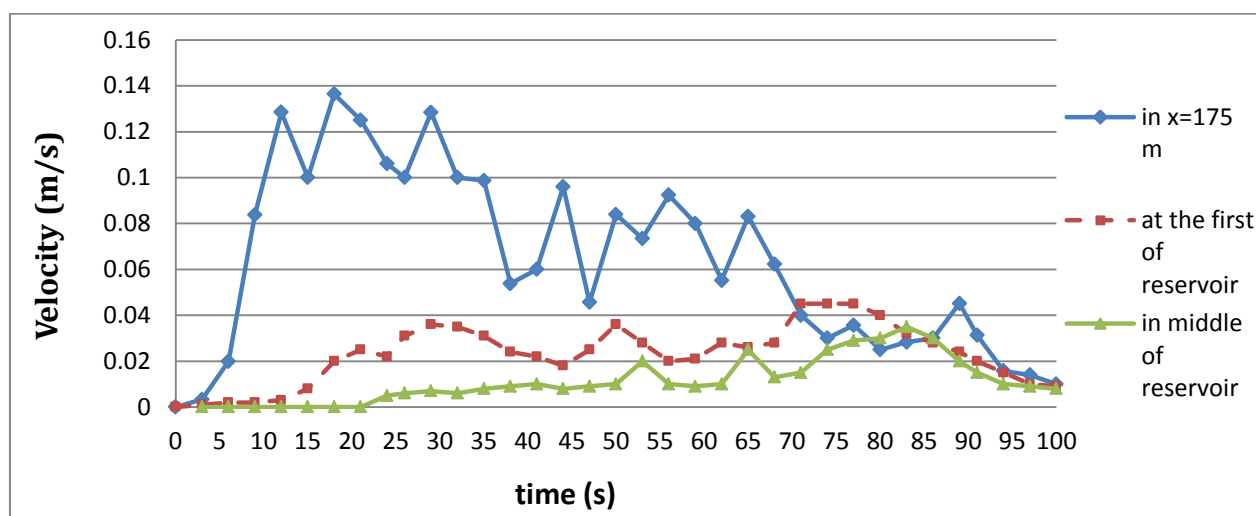
macroscopic density contours



$t=70 \cdot \text{sec}$

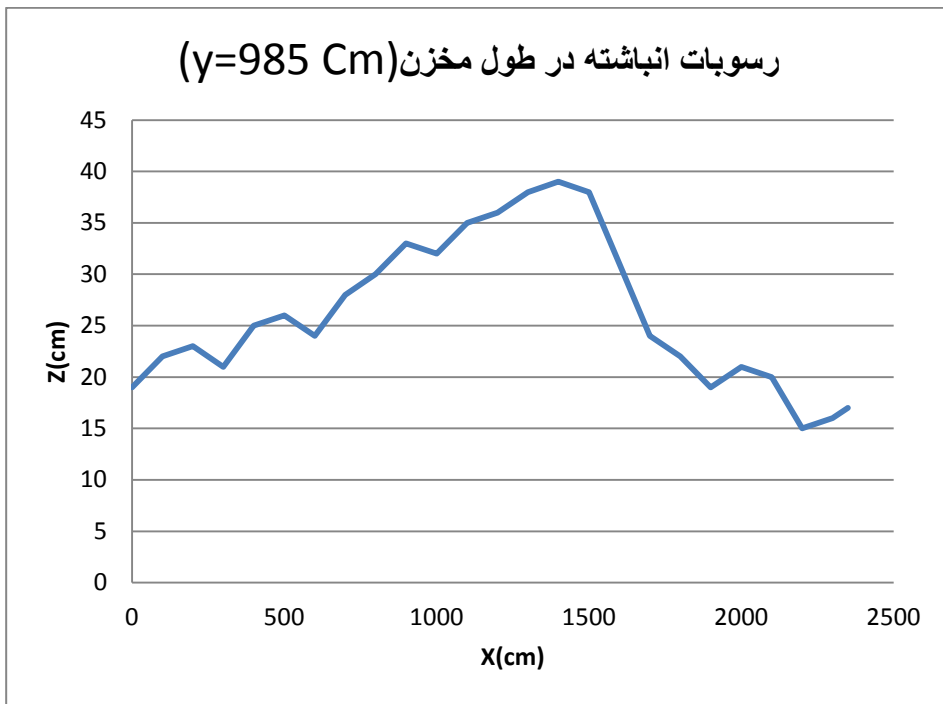
شکل ۴-۲۱ مقادیر چگالی بالک در قاب های زمانی مختلف

در شکل ۴-۲۳ مقادیر سرعت در هر سه مقطع ابتدا و انتهای رودخانه و وسط مخزن سد البرز آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود با عبور موج جریان گل آلود از هر مقطع سرعت در آن مقطع به ماکزیمم می رسد. همچنین در هر مقطع پس از عبور موج جریان گل آلود سرعت به مرور زمان کاهش می یابد. مقادیر سرعت در ابتدای رودخانه بیشترین مقدار را دارد و حرکت به سمت پایین دست رودخانه و مخزن از سرعت جریان کاسته می شود.

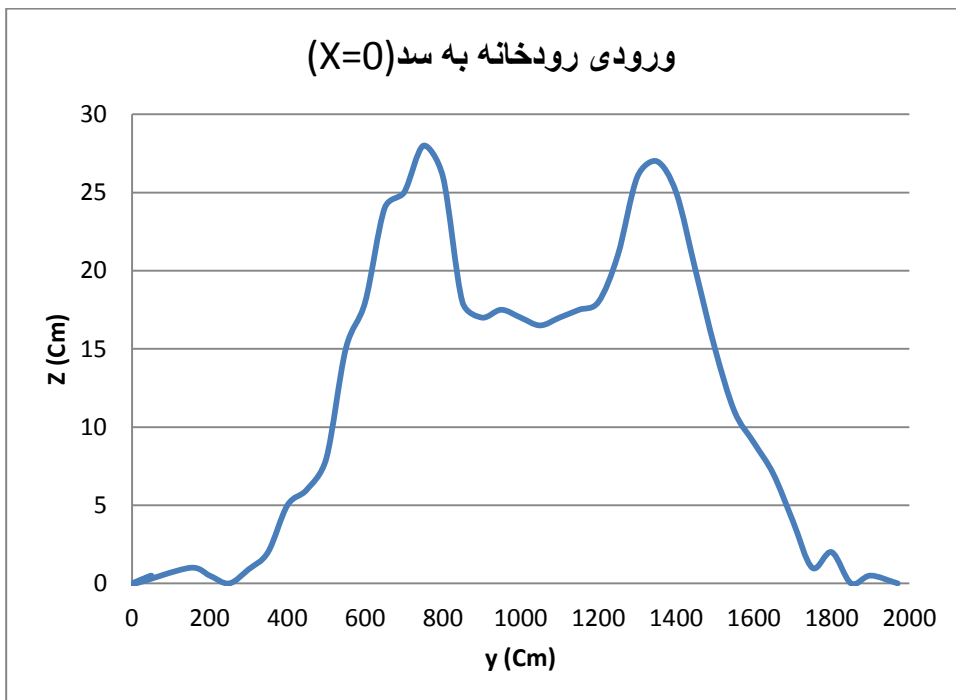


شکل ۴-۲۳ مقادیر سرعت در مقاطع مختلف مدل رودخانه بابل و سد البرز

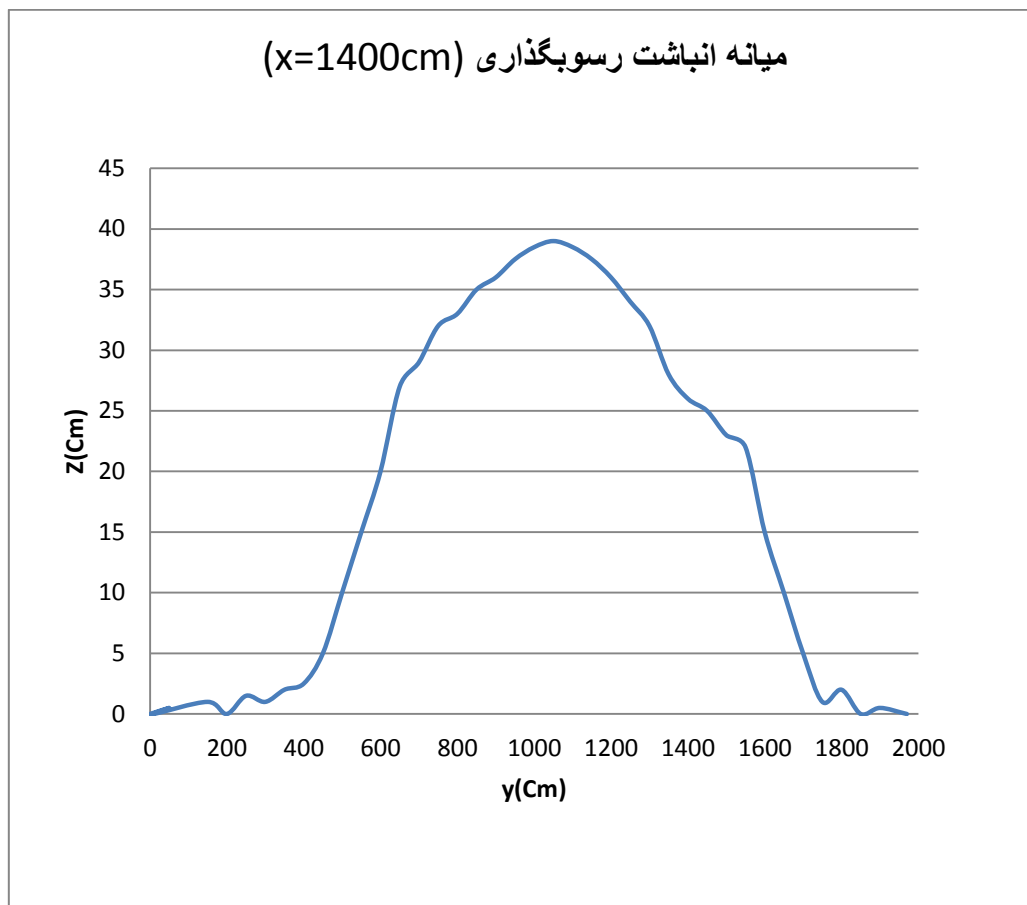
اشکال زیر پروفیل توپوگرافی هندسه مقطع عرضی مورفولوژی مختلف توسط جریان گل آلود را نشان می دهد. مقاطع شامل مقطع طولی در امتداد رودخانه (شکل ۴-۸ الف) و مقطع عرضی نزدیک به محل اتصال رودخانه به مخزن سد (شکل ۴-۸ ب) و مقطع عرضی از ماکزیمم انباشت رسوب (شکل ۴-۸ ج) می باشد. مقادیر X و Y و Z به سیستم مختصات مدلسازی شده در نرم افزار بر می گردد. توجه کنید که ارتفاعها بیش از حد واقع بزرگ شده اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۲۴ پروفیل توپوگرافی مقطع عرضی هندسه مورفولوژی شکل گرفته توسط جریان گل آلود

شکل ۴-۲۴ الف مقادیر تغییرات مورفولوژی در جهت X را نمایش می دهد. با حرکت به سمت انتهای مخزن سد به دلیل کاهش سرعت جریان گل آلود ورودی به منطقه، میزان رسوبگذاری افزایش می یابد و در ابتدای مخزن پدیده رسوبشویی اتفاق می افتد. و اما در انتهای مخزن به دلیل آنکه کمتر تحت تأثیر جریان گل آلود می باشد به نسبت سایر نقاط منطقه تغییرات محسوسی در مورفولوژی آن رخ نمی دهد. جریان گل آلود هنگامی که وارد یک مخزن وسیع می شود، همانطور که بار معلق خود را از دست می دهد مومنتوم خود را نیز از دست می دهد. در این مدلسازی ضخامت رسوبگذاری در نزدیکی خروجی کانال برابر

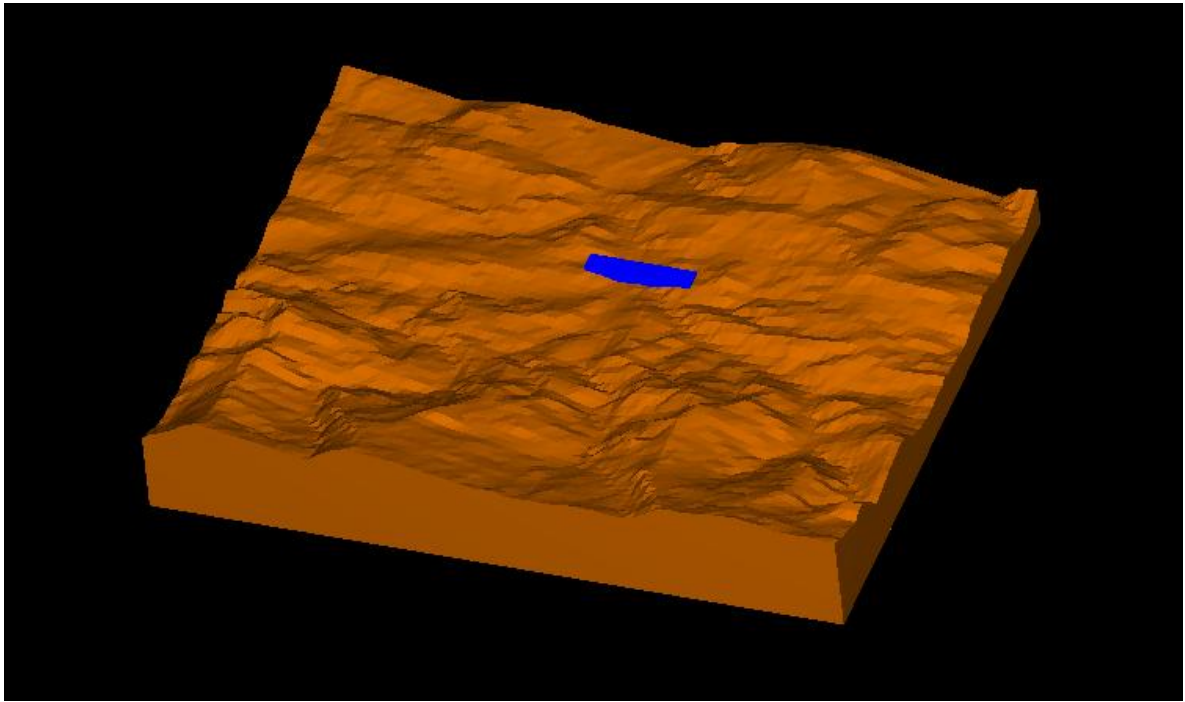
۰.۱۹ متر می باشد که در گامهای مجزا در جهت طولی و عرضی به سرعت کاهش می یابد. در طول خط مرکزی رودخانه، ضخامت بستر در ابتدای ۶ متری از نقطه انبساط (رسوبگذاری) به سرعت کاهش می یابد. سپس تا حدود ۰.۳۹ متر افزایش می یابد و در نهایت به طور نمایی بین ۱.۴ و ۲.۳۰ متری کاهش می یابد (شکل ۴-۲۴ الف). شکل ۴-۱۸ ب و ۴-۱۸ ج مقطع عرضی از ورودی رودخانه و میانه تل رسوبگذاری را نمایش می دهد.

اما شکل اصلی تل رسوبات شبیه یک برآمدگی با شیب جانبی که بالای آن صاف است می باشد.

کناره های شیبدار دارای ماکزیمم زاویه ۸.۸ درصد می باشند. مقطع عبوری از انباشت رسوب در ۹.۸۵ متری از نقطه ابتدای مخزن ($x=9.85m$ در شکل ۴-۱۸ ج) یک هندسه محدب رو به بالا با ضخامت حداکثر ۰.۳۹ متر در طول خط مرکزی فلووم و شیب جانبی تقریبی ۶.۵ درصد دارد (شکل ج).

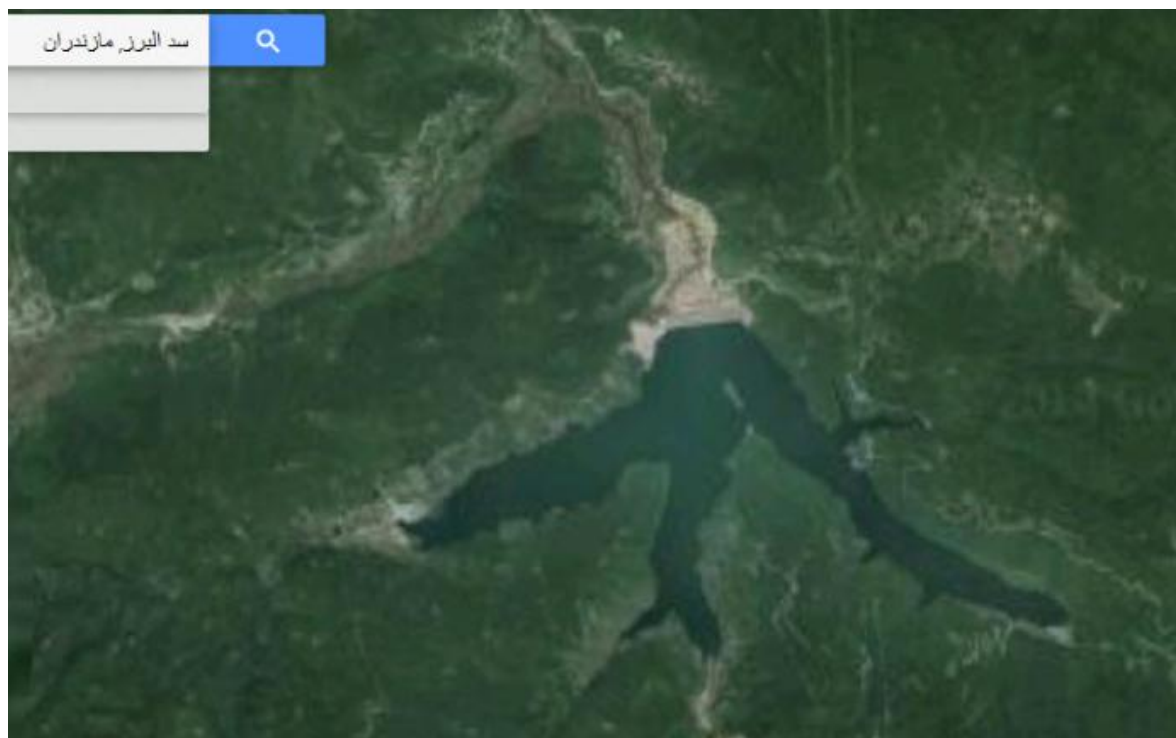
رسوبگذاری شامل کناره های فرو رفته با عمق کم، نزدیک به مبدأ با لبه های باریک و بدنه تپه مانند که ضخامت آن به طور نمایی کاهش می یابد، می باشد. شرایط ایجاد شده در تو رفتگی با کناره های بلند در شکل ب، مشابه یک کانال زیر آبی با خاکریز می باشد.

در ادامه جهت بررسی تاثیر مشخصات فیزیکی مخزن بر مقادیر سرعت و چگالی بالک، مخزن به صورت واقعی و با مقیاس ۱:۱ مدل شده است. نمونه واقعی با استفاده از x ، y و z در هر نقطه ساخته و با فرمت `*topof###.inp` به نرم افزار Flow-۳D معرفی گردید. ابعاد مدل سه بعدی ساخته شده دقیقاً مطابق مورد مطالعه می باشد که قبلاً به طور کامل معرفی گردید. شکل ۴-۲۵ توپوگرافی مدل هیدرولیکی ساخته شده با نرم افزار Flow ۳-D را نمایش می دهد.



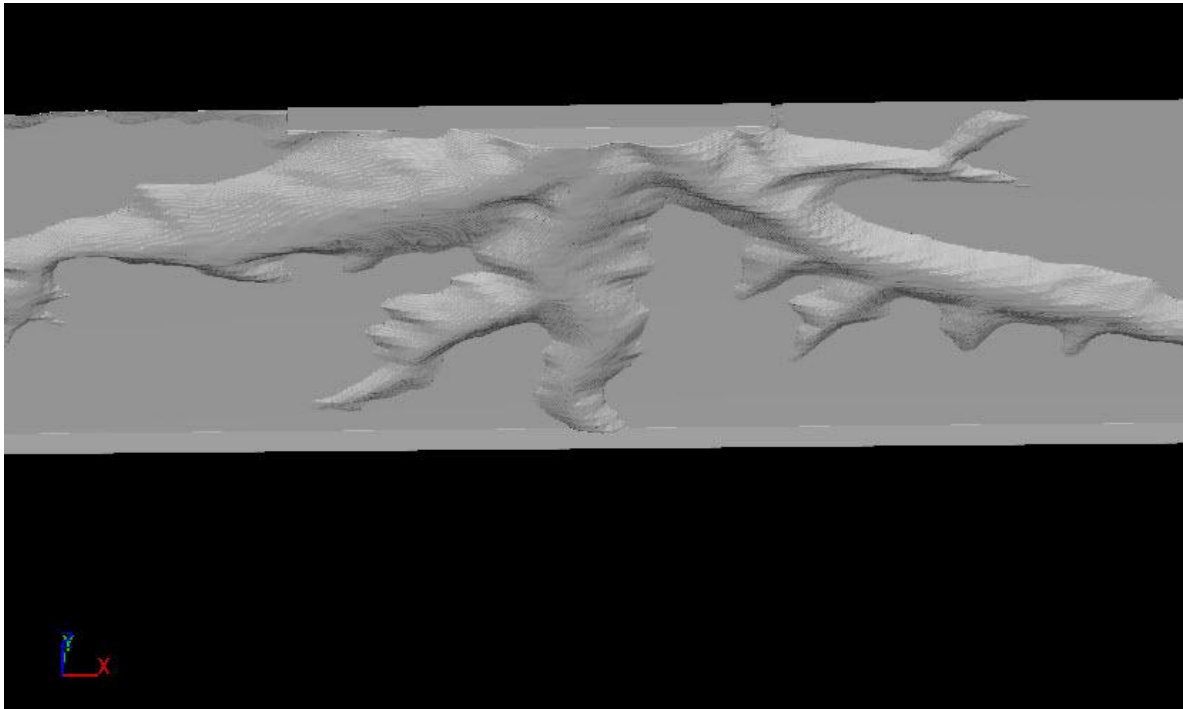
شکل ۴-۲۵ توپوگرافی مدل هیدرولیکی ساخته شده با نرم افزار ۳-D Flow

شکل ۴-۲۶ پلان محل مورد مطالعه با استفاده از نقشه های ماهواره ای را نمایش می دهد که در آن مخزن سد به وضوح آشکار است.



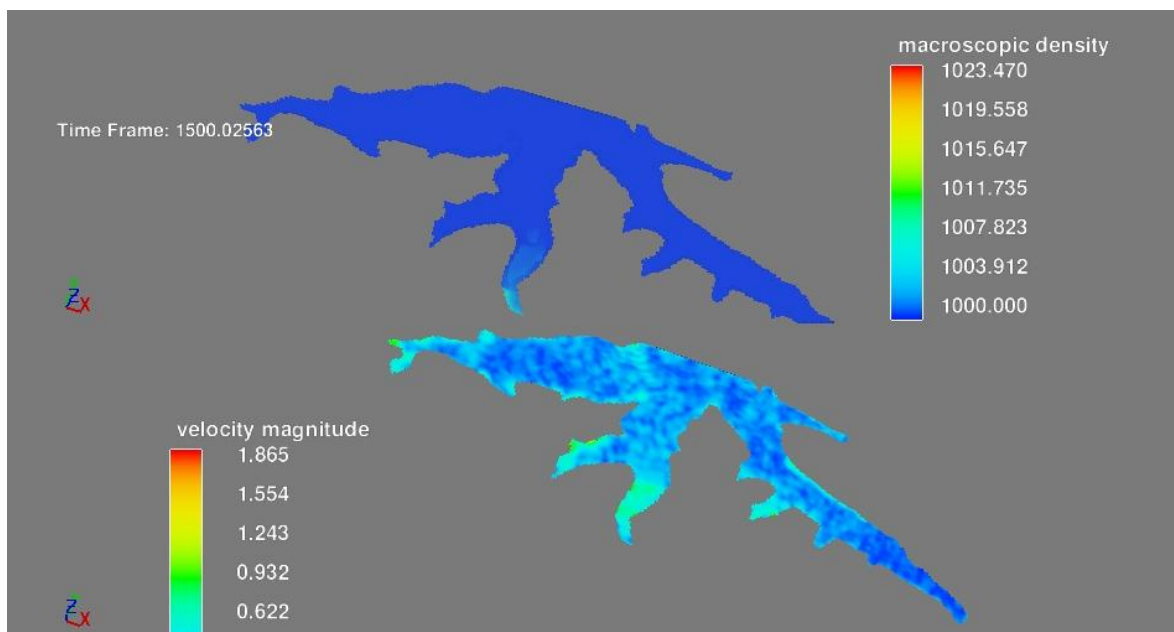
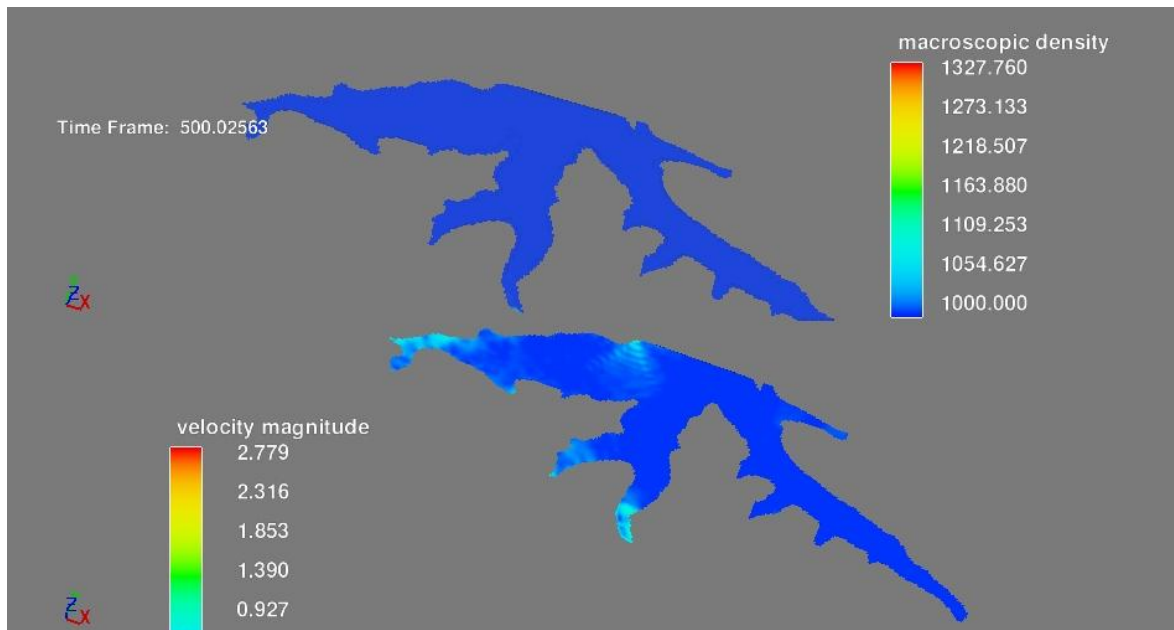
۲۶-۴ پلان محل مورد مطالعه با استفاده از نقشه های ماهواره ای

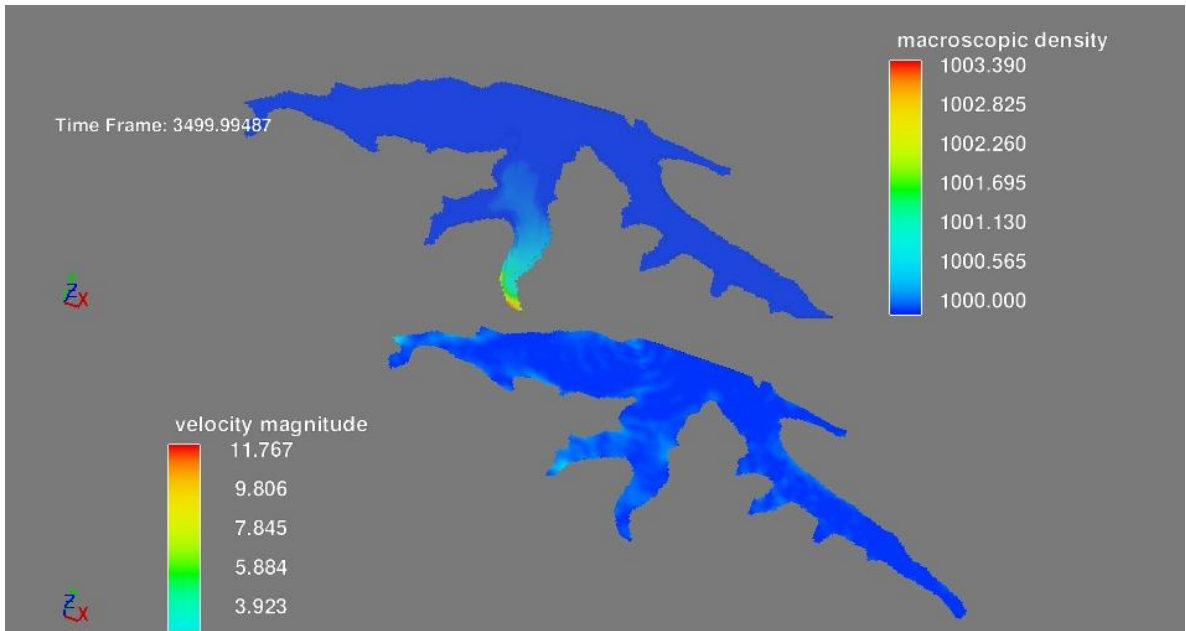
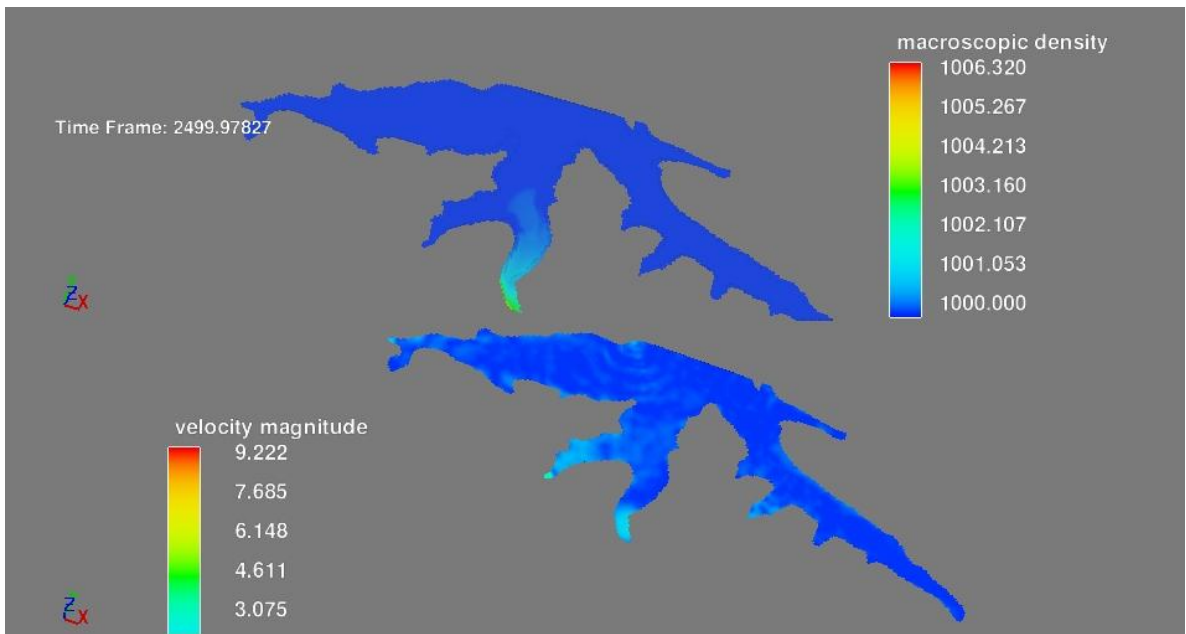
ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه بندی مدل عددی، به خصوص در جریان های پیچیده (مانند مدل مورد مطالعه)، بزرگترین محدودیت می باشد و انتخاب مناسب آن می تواند دقت محاسبات را افزایش دهد. در این مطالعه شبکه بندی به گونه ای انجام گرفت که مورفولوژی مخزن به صورت محسوس در محاسبات لحاظ گردد. همچنین مقادیر دانسیته جریان گل آلود و سرعت آن مشهود باشد. بدین منظور شبکه ای با فواصل ۵ متری و در کل با ۴۳۰۰۸۰۰۰ سلول محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴-۲۷ مدل عددی و روش Favor در شبکه بندی انجام شده نشان داده شده است.

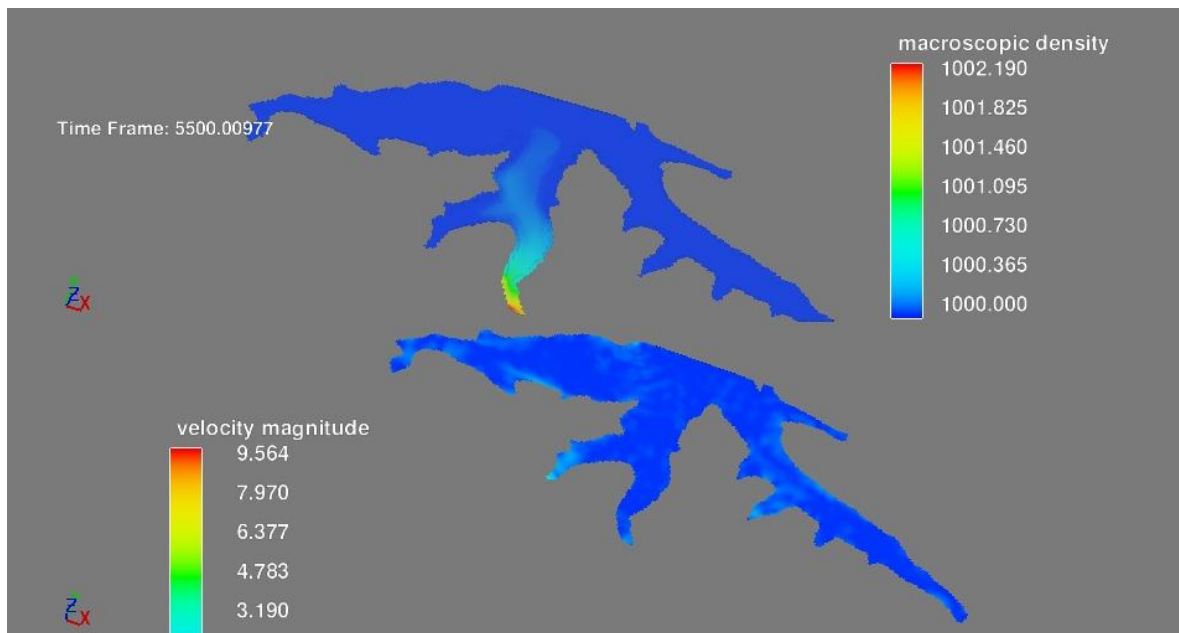
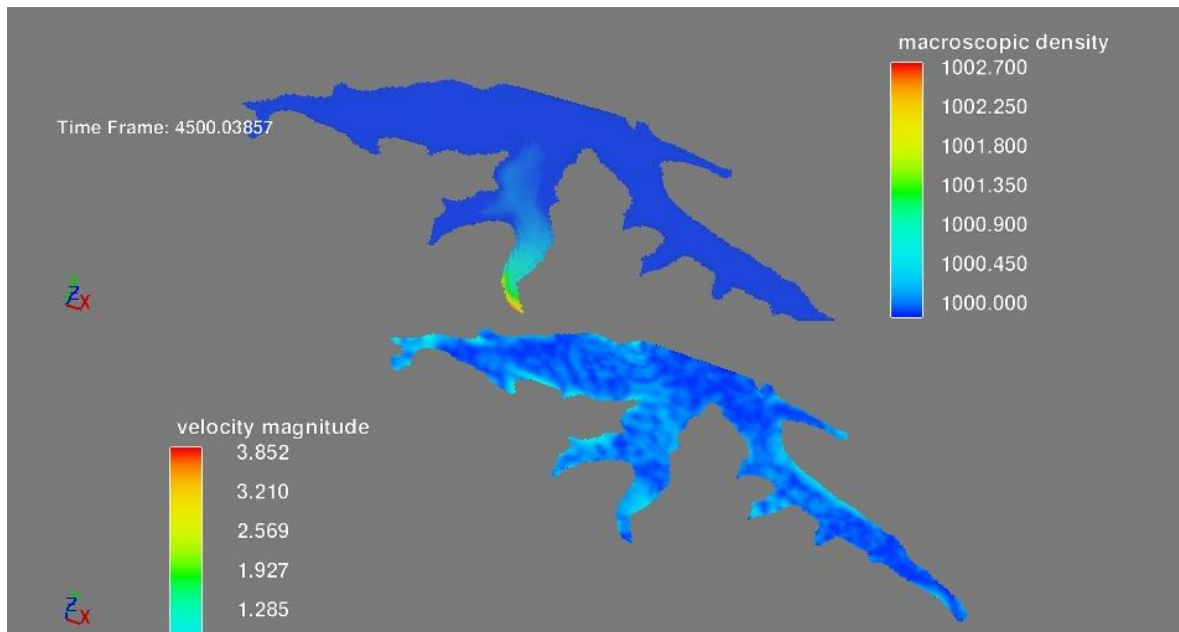


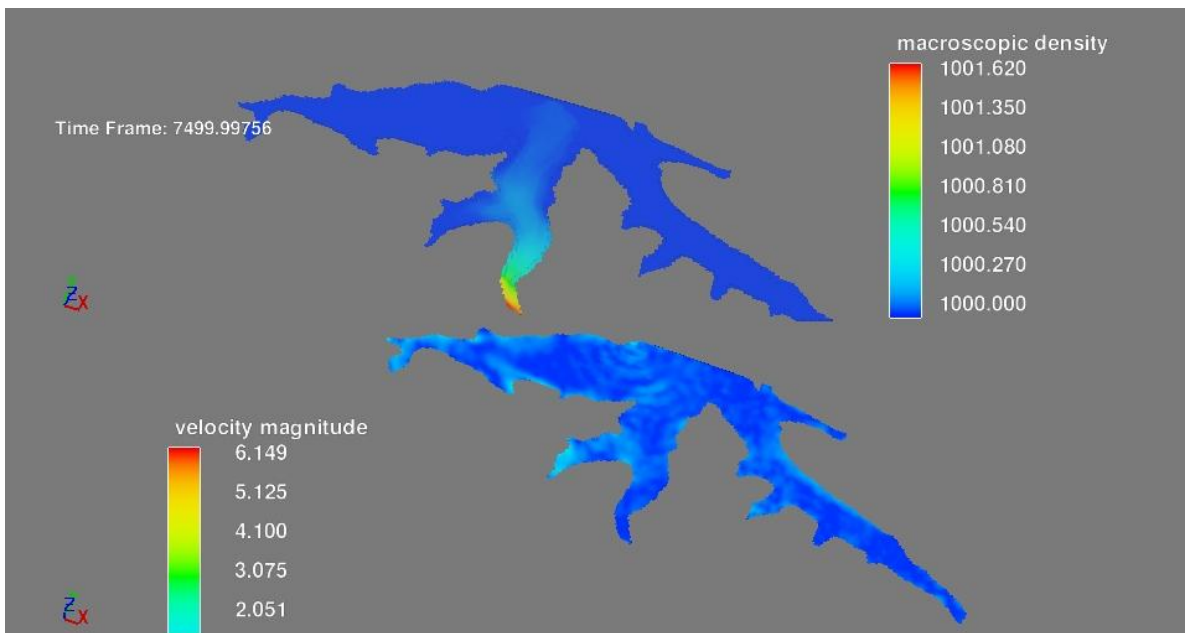
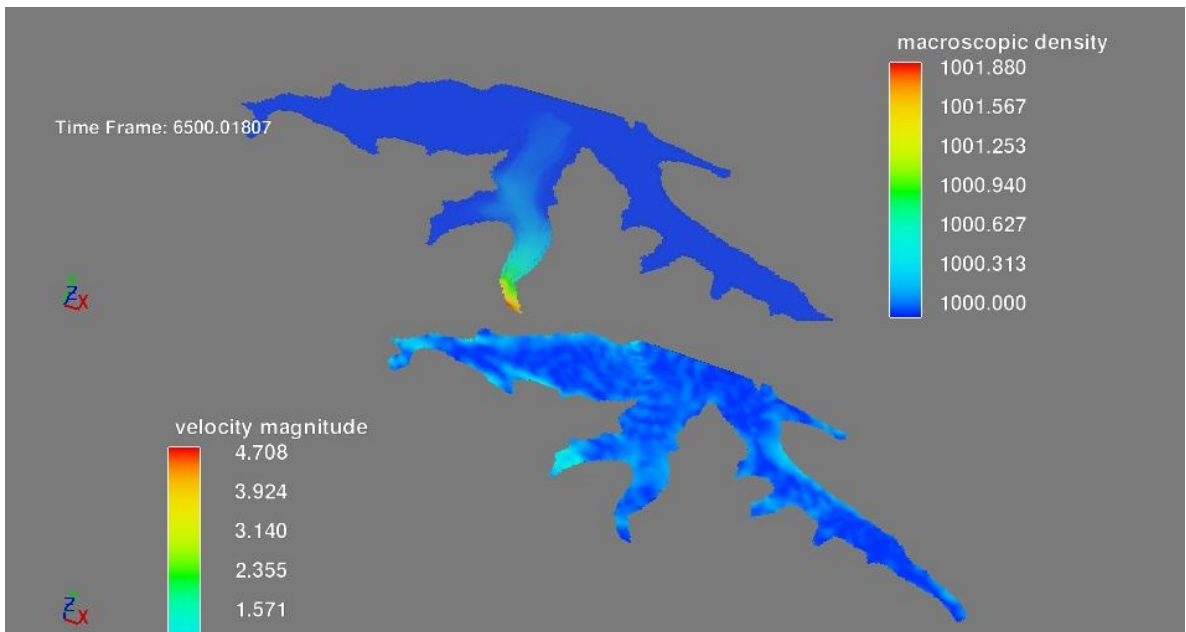
مدل عددی و روش Favor در شبکه‌بندی انجام شده ۲۷-۴

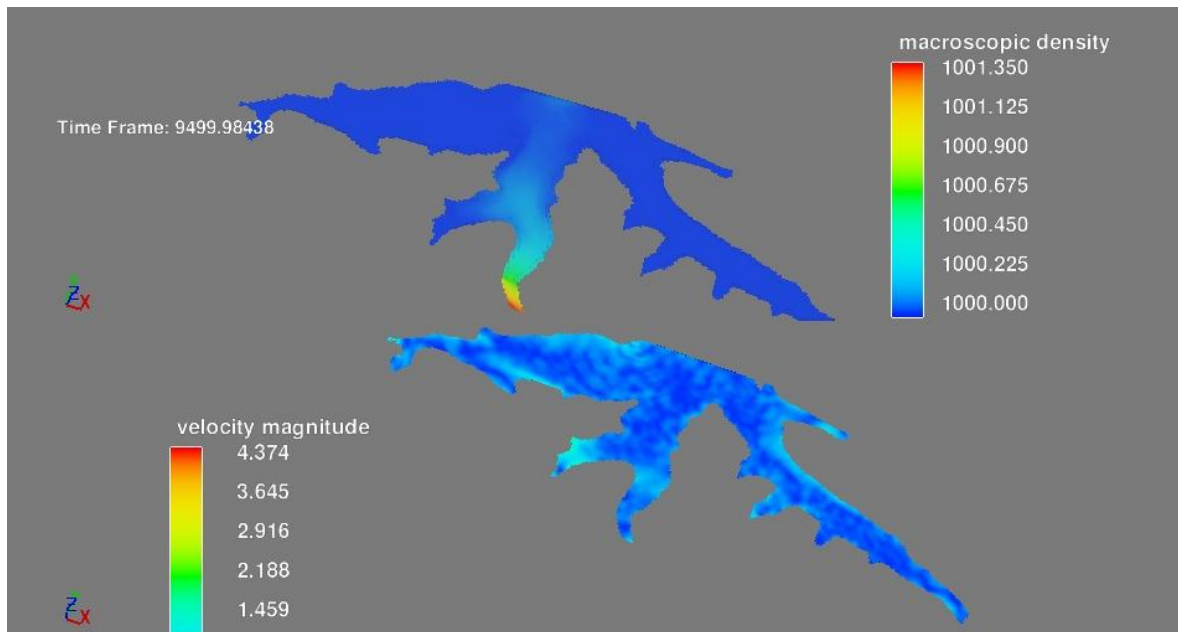
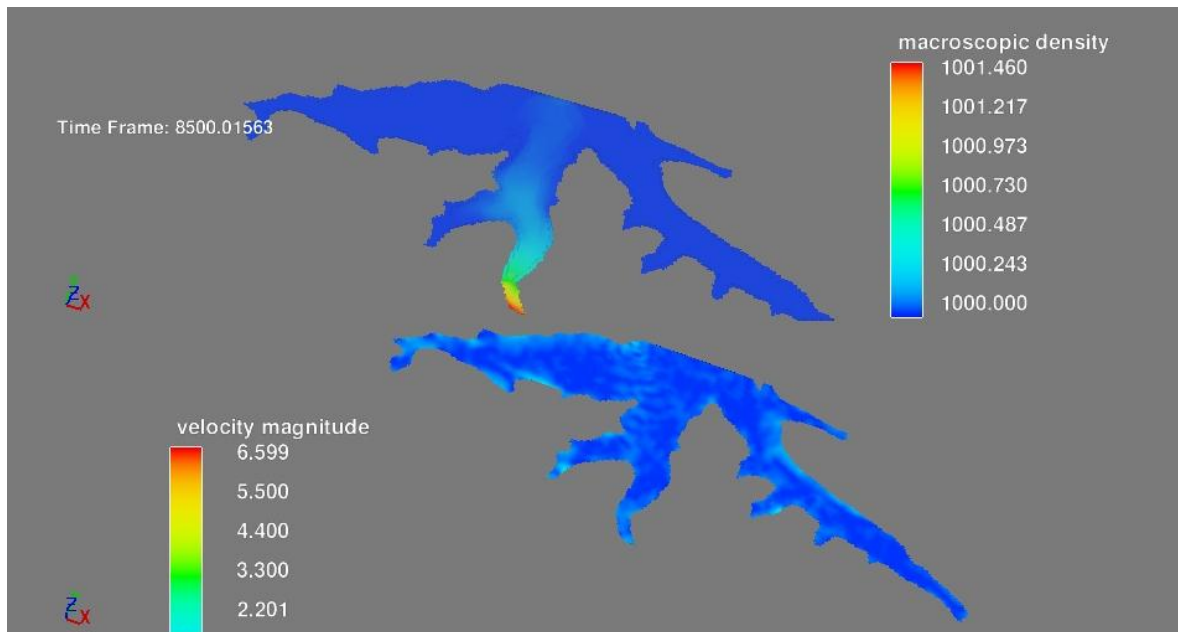
شبیه‌سازی به مدت ۱۰۰۰۰ ثانیه و با غلظت ۱۶٪ انجام شد که این زمان مدتی است که جریان گل آلود خود را به بدنه سد می‌رساند که می‌تواند در تحقیقات آتی مفید باشد. تصاویر شکل ۴-۲۸ مقادیر چگالی بالک (تصاویر فوقانی) و مقدار سرعت (تصاویر زیرین) را نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود جریان گل آلود پس از گذشت مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه و گذر از مقطع رودخانه به باز شدگی مخزن می‌رسد و در این قسمت غلظت رسوبات آورده شده توسط رودخانه به دلیل انحراف قبل از باز شدگی و از دست دادن مومنتم خود اکثراً نشست کرده و موجی گل آلود از ذرات ریز تر به صورت یک جریان زیر گذر در طول و سطح کف مخزن پخش می‌شود. سپس جریان کم غلظت باقی مانده به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به بدنه سد برسد. پس از رسیدن به بدنه سد جریان غلیظ ناشی از جریان گل آلود ورودی اندکی افزایش ارتفاع داده و به صورت موج به سطح آمده و به صورت برگشتی به عقب برمی‌گردد.







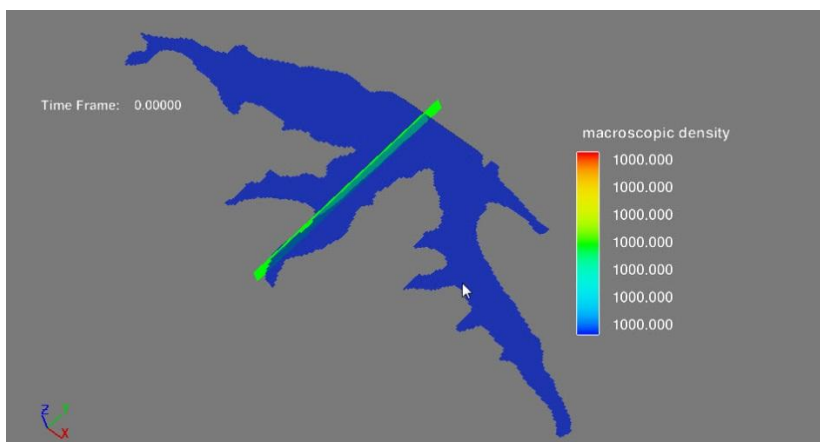




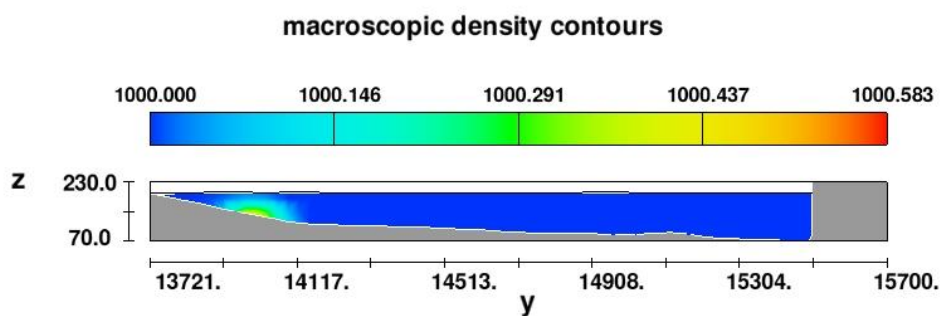
شکل ۴-۲۸ مقادیر چگالی بالک و سرعت در قاب های زمانی مختلف

مقادیر سرعت نشان می دهد که با ورود جریان گل آلود سطح مخزن دچار اغتشاش می شود و این به هم ریختگی تا انتها در سطح ادامه خواهد داشت. اما همانطور که در برش عرضی مخزن سد (شکل ۴-۳۰)

نشان داده شده است (شکل ۴-۱۵) این مقادیر روی شکل جریان غلیظ شکل گرفته بی تاثیر بوده و جریان غلیظ زیر سطحی بدون تاثیر پذیری به حرکت خود ادامه می دهد.

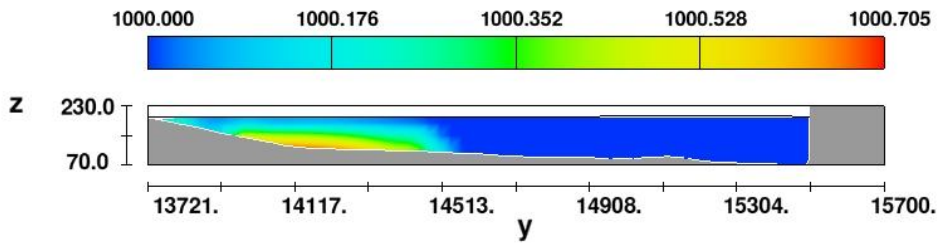


شکل ۴-۲۹ پلان مقطع برشی



FLOW-3D t=1.9999620E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

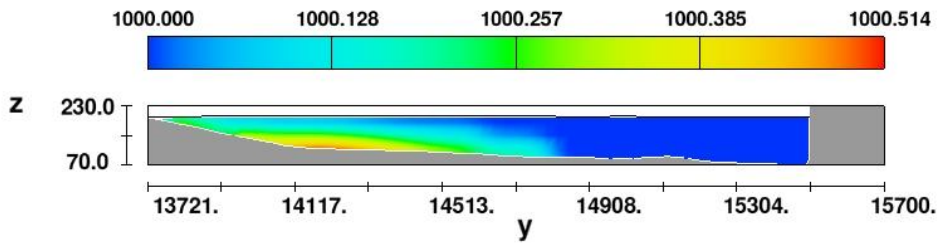
macroscopic density contours



FLOW-3D t=3.0000134E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqIn hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

7

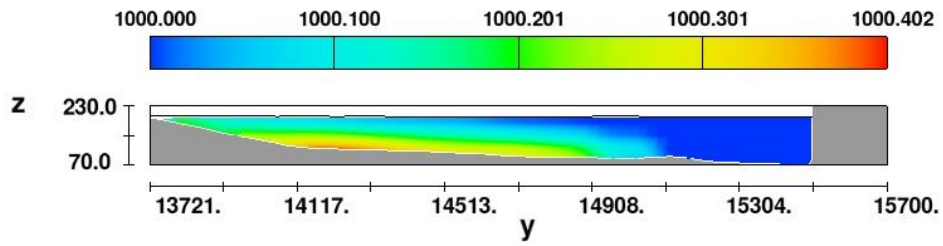
macroscopic density contours



FLOW-3D t=3.9999683E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqIn hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

9

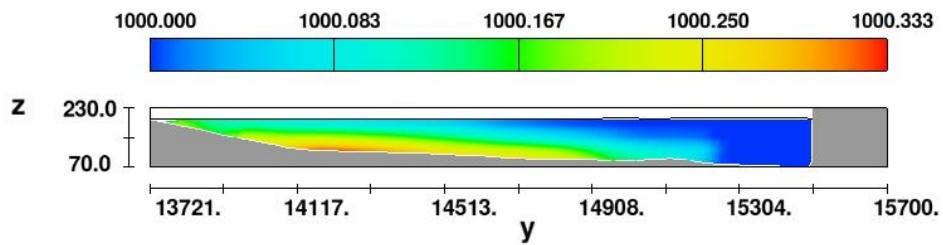
macroscopic density contours



FLOW-3D t=4.9999873E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

11

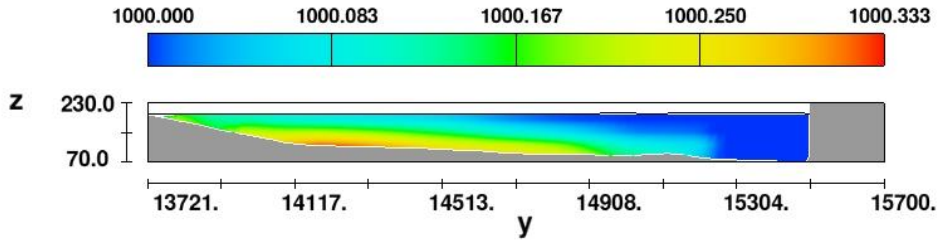
macroscopic density contours



FLOW-3D t=5.9999897E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

13

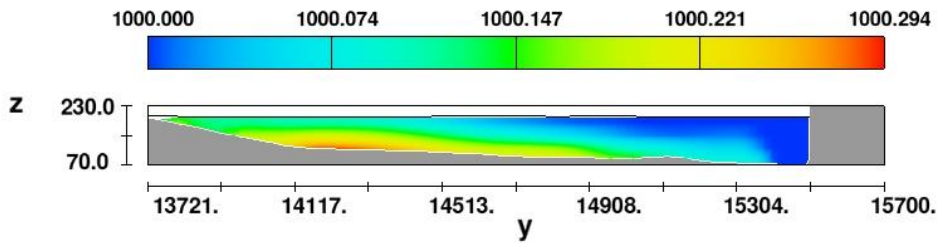
macroscopic density contours



FLOW-3D t=5.9999897E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

13

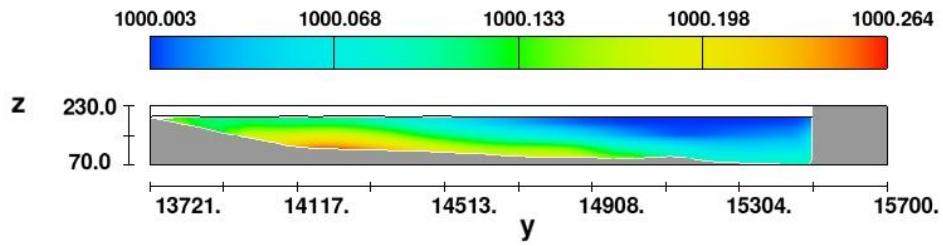
macroscopic density contours



FLOW-3D t=6.9999751E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

15

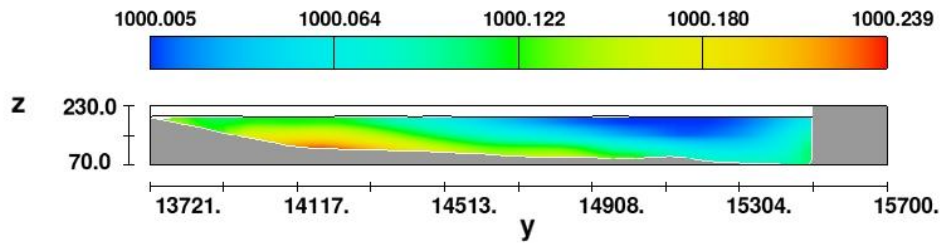
macroscopic density contours



FLOW-3D t=7.9999893E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

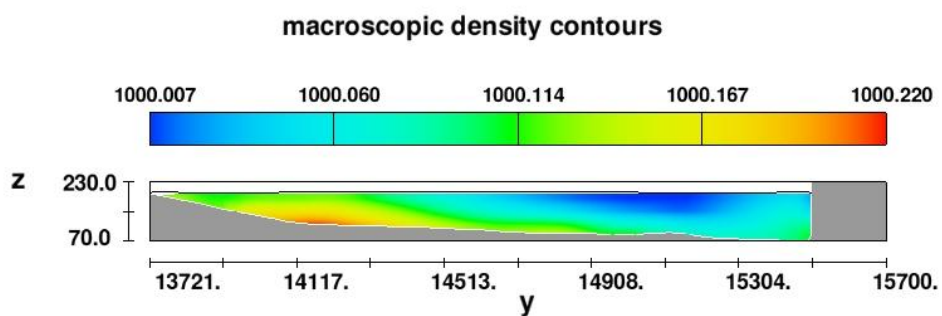
17

macroscopic density contours



FLOW-3D t=8.9999863E+03 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

19



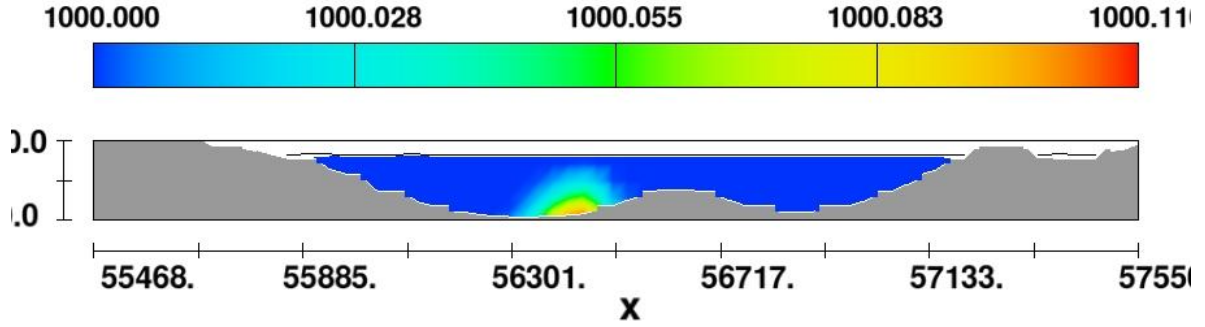
FLOW-3D t=1.0000061E+04 x=5.631E+04 jy=52 to 141 kz=2 to 9
 14:16:22 01/07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

21

۴-۳۰ مقادیر چگالی بالک در برش عرضی سد

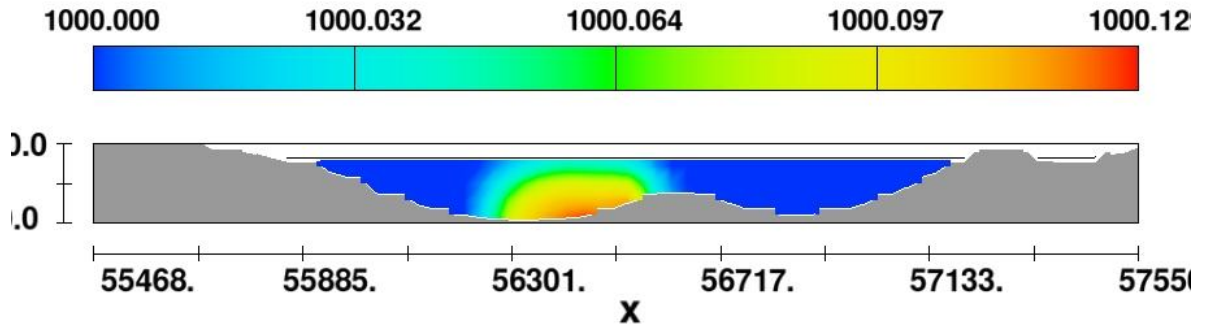
یکی از مهمترین اهداف بررسی رفتار جریان گل آلود و نحوه پخش آن زمان رسیدن آن به بدنه سد می باشد که می تواند به چاره اندیشی و حل مشکلات ناشی از این جریان کمک شایانی به محققان و اپراتور های کنترل کننده مخزن سد (چه از نظر کیفیتی و چه از نظر فنی) بنماید. بدین منظور مقادیر چگالی بالک در برش عرضی نزدیک به بدنه سد نمایش داده شده است (شکل ۴-۳۱).

macroscopic density contours



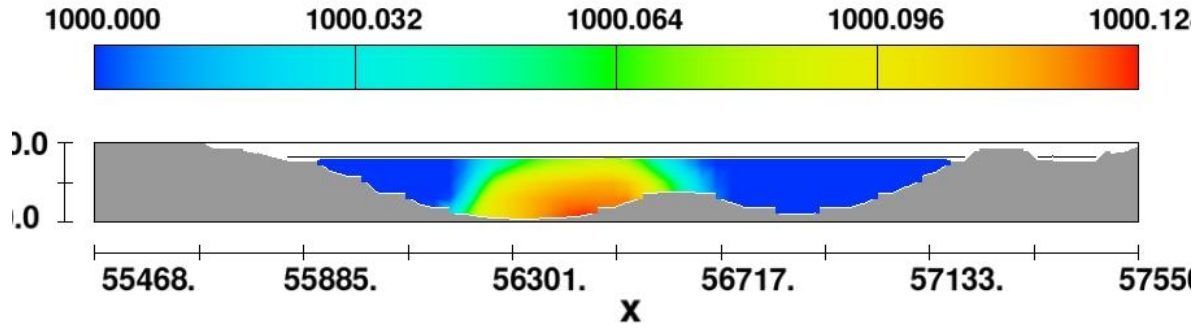
:7.4999976E+03 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

macroscopic density contours



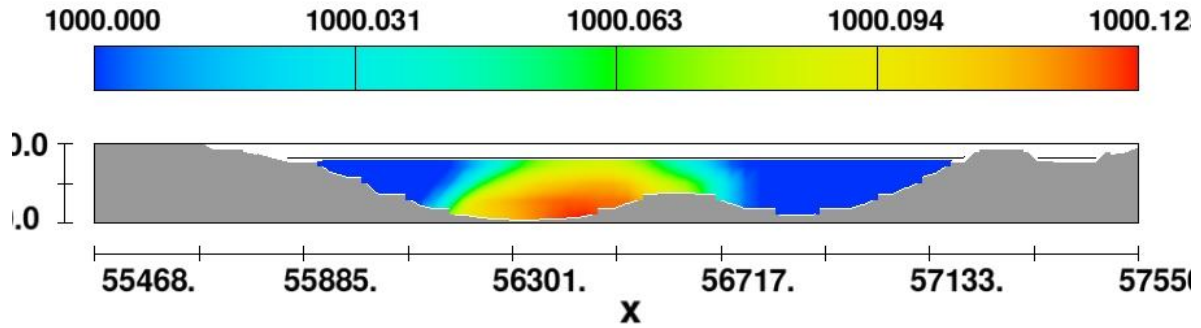
:7.9999893E+03 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

macroscopic density contours



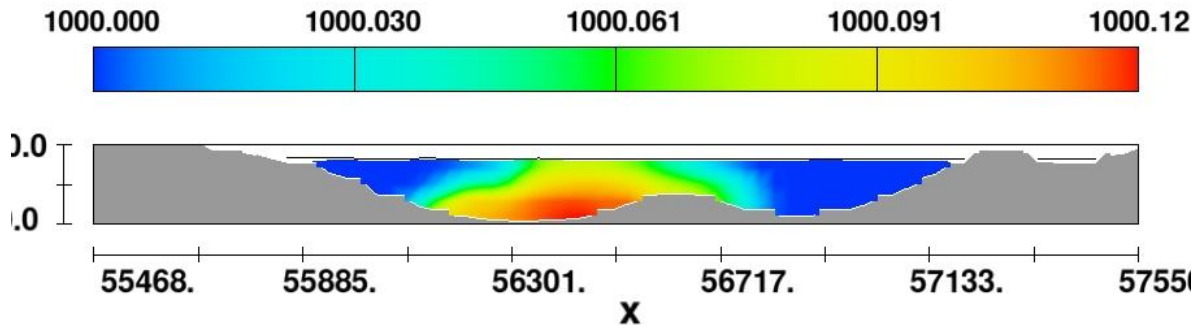
:8.5000156E+03 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

macroscopic density contours



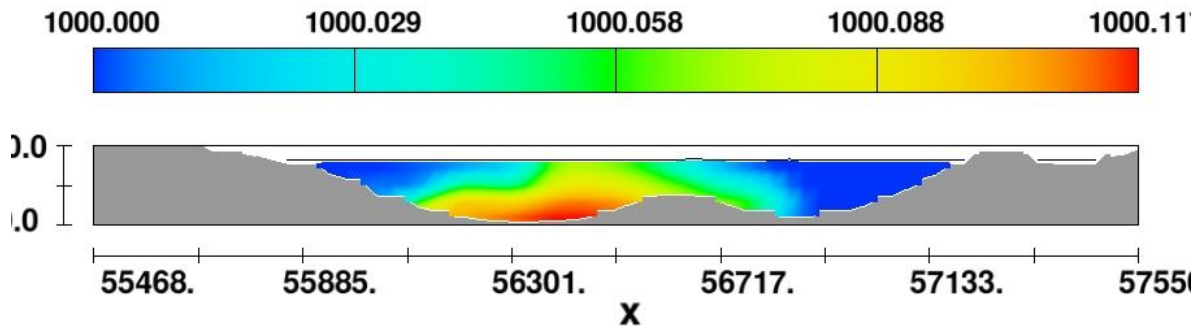
:8.9999863E+03 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

macroscopic density contours



:9.4999844E+03 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

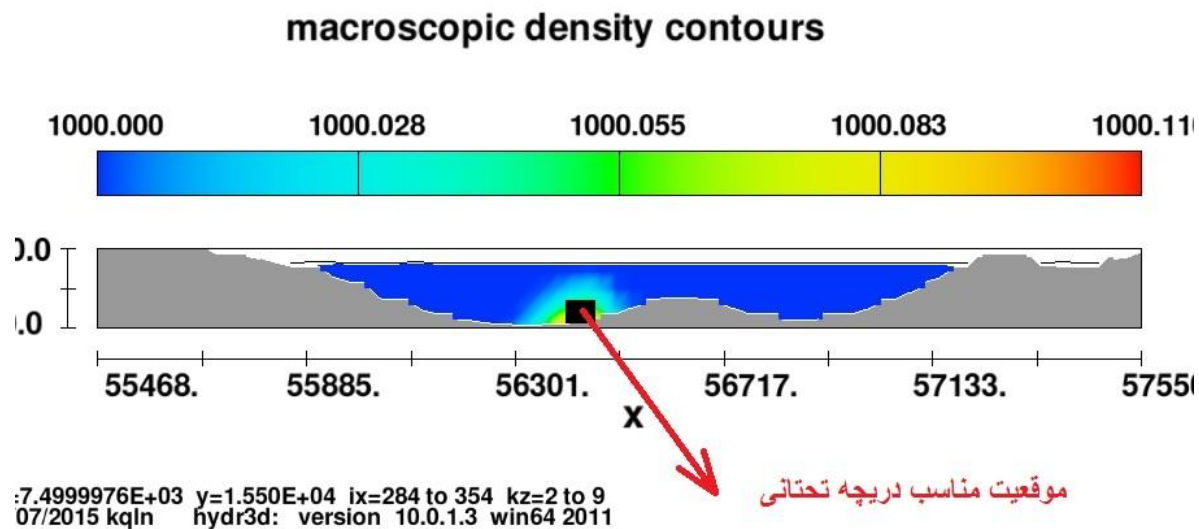
macroscopic density contours



:1.0000061E+04 y=1.550E+04 ix=284 to 354 kz=2 to 9
07/2015 kqln hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011

شکل ۴-۳۱ مقادیر چگالی بالک در برش عرضی نزدیک به بدنه سد

همانطور که در شکل ۳۱-۴ دیده میشود جریان غلیظ پیش از مدت زمان ۷۵۰۰ ثانیه به بدنه سد می رسد که بهترین زمان باز کردن دریچه های تحتانی می باشد. از نقطه نظر موقیت مکانی بهترین مکان پایین ترین تراز در $X=۵۶۷۰۰$ می باشد. در شکل ۳۲-۴ موقیت دریچه تحتانی نمایش داده شده است.



شکل ۳۲-۴ موقیت مناسب دریچه تحتانی جهت تخلیه جریان گل آلود

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه‌گیری

در چند دهه اخیر، مطالعات اندکی در زمینه بررسی آزمایشگاهی و مدل عددی جریانهای گل آلود انجام شده است. چنانچه گفته شد هدف این پایان‌نامه شبیه‌سازی عددی در جریان غلیظ و تأثیر غلظت بر مشخصات جریان و توزیع غلظت رسوبات معلق می‌باشد. جهت مدل‌سازی عددی از اطلاعات آزمایشگاهی تحقیقات صورت گرفته در مقاله باس استفاده شده است. در این فصل پس از معرفی مدل و تجهیزات آزمایشگاه مذکور، جریان گل آلود با استفاده از نرم افزار Flow-3D شبیه‌سازی شده، سپس مدل عددی کالیبره گردیده و بهترین شرایط مدل‌سازی انتخاب شده است.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی

۱- مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته با داده‌های آزمایشگاهی نشانگر خطای مدل‌سازی بود که از جمله دلایل آن سختی مدل‌سازی مدل آزمایشگاهی با رفتار کاملاً مشابه آزمایشگاه می‌باشد (به عنوان مثال شرایط فشار تانک مخلوط کننده).

۲- نتایج شبیه‌سازی عددی نمایانگر این نکته است که با تعبیه یک مخزن مشابه تانک مخلوط گر با بازشدگی مشخص و نزدیک کردن شرایط مدل‌سازی عددی به شرایط آزمایشگاهی نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر خواهد شد.

۳- بررسی‌های عددی صورت گرفته بر روی مدل‌سازی عددی نشان داد که استفاده از مدل آشفتگی RNG با توجه به هیدرولیک پیچیده جریان به جای مدل $k-\epsilon$ خطای حاصل از شبیه‌سازی عددی به میزان ۱۴٪ کاهش می‌یابد.

۴- با توجه به آشفتگی شدید در محل اتصال کانال به میز رسوبگذاری حداکثر خطای شبیه‌سازی عمق رسوبات در این مقطع برای غلظت ۳۵٪ برابر ۱۳.۴۳٪ می‌باشد

۵- به دلیل اینکه در طول میز رسوبگذاری کمترین میزان تغییرات عمق و سرعت جریان رخ می‌دهد، مقادیر شبیه‌سازی عمق رسوبات در محل بیشترین ارتفاع رسوبات با بیشترین دقت و با نزدیکترین مقادیر به نتایج آزمایشگاهی توسط نرم افزار ۳D-Flow شبیه سازی شده است.

۶- حداکثر خطای شبیه سازی سرعت در فاصله ۰.۴۶ متری از محل اتصال کانال به میز رسوبگذاری برای غلظت ۳۵٪ برابر ۱۴.۰۱٪ می‌باشد که می‌تواند به دلیل انبساط سریع جریان و برخورد با جریان ساکن منجر به کاهش ناگهانی سرعت می‌شود، باشد.

۷- حداکثر خطای شبیه سازی سرعت جریان ۰.۴۶ متری از محل اتصال کانال به میز رسوبگذاری برای غلظت ۳۵٪ برابر ۱۰.۱۲٪ می‌باشد، که علت آن را می‌توان در عدم ثبات وضعیت جریان و انبساط سریع جریان و برخورد با جریان ساکن دانست. کمترین اختلاف نتایج عددی و با نتایج آزمایشگاهی در غلظت ۲۹٪ در نزدیکی خروجی تانک مخلوط گر می‌باشد که نشاندهنده مدلسازی صحیح شرایط اولیه ورودی به کانال می‌باشد.

نتایج مدل سازی عددی جریان گل آلود رودخانه بابل ورودی به سد البرز

۸- با حرکت به سمت انتهای مخزن سد به دلیل کاهش سرعت جریان گل آلود ورودی به منطقه، میزان رسوبگذاری افزایش می‌یابد و در ابتدای مخزن پدیده رسوبشویی اتفاق می‌افتد. و اما در انتهای مخزن به دلیل آنکه کمتر تحت تأثیر جریان گل آلود می‌باشد به نسبت سایر نقاط منطقه تغییرات محسوسی در مرفولوژی آن رخ نمی‌دهد.

۹- جریان گل آلود هنگامی که وارد یک مخزن وسیع می شود، همانطور که بار معلق خود را از دست می دهد مومنتوم خود رانیز از دست می دهد. در این مدلسازی ضخامت رسوبگذاری در نزدیکی خروجی کانال برابر ۰.۱۹ متر می باشد که در گامهای مجزا در جهت طولی و عرضی به سرعت کاهش می یابد. در طول خط مرکزی رودخانه، ضخامت بستر در ابتدای ۶ متری از نقطه انبساط (رسوبگذاری) به سرعت کاهش می یابد. سپس تا حدود ۰.۳۹ متر افزایش می یابد و در نهایت به طور نمایی بین ۱.۴ و ۲.۳۰ متری کاهش می یابد. اما شکل اصلی تل رسوبات شبیه یک برآمدگی با شیب جانبی که بالای آن صاف است می باشد.

۱۰- کناره های شیبدار دارای ماکزیمم زاویه ۸.۸ درصد می باشند. مقطع عبوری از انباشت رسوب در ۹.۸۵ متری از نقطه ابتدای مخزن ($x=9.85m$) یک هندسه محدب رو به بالا با ضخامت حداکثر ۰.۳۹ متر در طول خط مرکزی و شیب جانبی تقریبی ۶.۵ درصد دارد.

۱۱- رسوبگذاری شامل کناره های فرو رفته با عمق کم، نزدیک به مبدأ با لبه های باریک و بدنه گوشتی شکل که ضخامت آن به طور نمایی کاهش می یابد، می باشد. شرایط ایجاد شده در تو رفتگی با کناره های بلند، مشابه یک کانال زیر آبی با خاکریز می باشد.

۱۲- جریان گل آلود پس از گذر از مقطع رودخانه به باز شدگی مخزن می رسد و در این قسمت غلظت رسوبات آورده شده توسط رودخانه به دلیل انحراف قبل از باز شدگی و از دست دادن مومنتوم خود اکثراً نشست کرده و موجی گل آلود از ذرات ریز تر به صورت یک جریان زیر گذر در طول و سطح کف مخزن پخش می شود.

۱۳- جریان غلیظ ناشی از جریان گل آلود پس از رسیدن به بدنه سد اندکی افزایش ارتفاع داده و به صورت موج به سطح آمده و به صورت برگشتی به عقب برمی گردد.

۱۴- با ورود جریان گل آلود سطح مخزن دچار اغتشاش می شود و این به هم ریختگی تا انتها در سطح ادامه خواهد داشت. اما این مقادیر روی شکل جریان غلیظ شکل گرفته بی تاثیر بوده و جریان غلیظ زیر سطحی بدون تاثیر پذیری به حرکت خود ادامه می دهد.

۲-۵ ارائه پیشنهادات

- ❖ بررسی اثر مشخصات هندسی رودخانه ها بر مشخصات هیدرولیکی جریان گل آلود ورودی به مخزن سدها
- ❖ تأثیر بکار گیری تخلیه کننده های تحتانی در بالادست مخازن سدها بر شکل جریان و رسوبات نهشته شده
- ❖ بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر ورود چندین رودخانه با و بدون رسوب بر نحوه پخش جریان گل آلود
- ❖ کالیبراسیون ضرایب تجربی و آزمایشگاهی موجود در مدل های تلاطمی و برازش رگرسیونی یا ارائه روابط و معادلات بیانگر رابطه بین این ضرائب با همبستگی پاسخ های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده

منابع و مراجع:

- [١] Alavian, V. Jiraka, G. H. Denton, R. A. Johnson, M. C. and Stefan, H. G. (١٩٩٢), " Density Current Entering Lakes and Reservoirs". *J. Hydr. Eng*, ١١٨(١١): ١٤٦٤-١٤٨٩.
- [٢] Arora A.K., Ranga Raju K.G. and Garde R.J. ١٩٨٤. Resistance to flow and velocity distribution in rigid boundary channels carrying sediment-laden flow, *Water Resources Research*, ٢٢(٦): ٩٤٣-٩٥١.
- [٣] Baas, J.H., Van Kesteren, W., Postama, G. (٢٠٠٤) "Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture." *International Association of Sedimentologists, Sedimentology* (٢٠٠٤) ٥١, ١٠٥٣-١٠٨٨
- [٤] Bohlen W.P. (١٩٧٠). Experimental studies of turbulence in liquid solid flows, *Transactions of AGU*, ٥١: ١-٦.
- [٥] Cellino M., Graf W.H. (١٩٩٩). Sediment laden flow in open channels under non capacity and capacity condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ١٢٥, No. ٥, May ١٩٩٩, pp. ٤٥٥-٤٦٢
- [٦] Einstein H. A. Chein N. ١٩٥٥. Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution, *MRD Sediment Series No. ٨*. Univ. of California, Institute of Engineering Research, Berkeley, CA.
- [٧] Ellison T.H. and Turner J.S. ١٩٥٩. Turbulent entrainment in stratified flows, *J. Fluid Mech*, ٦: ٤٢٣-٤٤٨.
- [٨] Firoozabadi, B. Farhanieh, B. and Rad, M. "Hydrodynamics of two-dimensional laminar turbid density currents", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. ٤١, No. ٦, pp. ٦٢٣-٦٣٠.
- [٩] Flix, M., Sturton, S., Peakall, J., (٢٠٠٥), "Combined Measurements of Velocity and Concentration in Experimental Turbidity Currents", *Journal of Sedimentary Geology*, V(١٧٩), ٣١-٤٧.
- [١٠] French, R.H, ١٩٨٧ "Open channel hydraulics", McGraw-Hill book company chap.٣, pp. ٧٦- ١٠١.

- [11] Fukushima, Y., and Hayakawa, N., (1990), "Dynamic of three Dimensional Inclined Thermal ", *J. Hydr. Eng., ASCE*, V. 121, N. 8.
- [12] Garcia, M.H. and Parker; G. 1993; "Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current", *Journal of Geophysical Research*, VOL. 98, NO. C3, pp 4793-4807.
- [13] Hino M. 1963. Turbulent flow with suspended particles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 89(4): 171-180.
- [14] Khullar, N. K, Kothiyari, U.C. and Ranga Raju. K.G, 2002. "The effect of suspended sediment on flow resistance", 9th International conference on hydro science and engineering, septamber, 18-21, Warsaw, Poland.
- [15] Kikkawa H., Fukuoka S. (1969). The characteristics of flow with wash load, Proc 13th Congress, IAHR, 2:233-240.
- [16] Kokubo, T., Ltakura, M., Harada, M. (1997) "Predicting Methods and Actual Results on Flushing of Accumulated Deposits from Dashidaira Reservoirs" 14th. ICOLD, QV4, R. 47, Florence, I Conference, San Fransisco, California, July 26-30.
- [17] Lee, H. Y, Yu, W. S., (1997), "Experimental Study of Reservoir Turbidity Current ", *J. Hydr. Eng, ASCE*, V(123), N6, 520-528.
- [18] Liu, M., Rajaratnam, N. & Zhu, D. , (2004) , "Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers", *J. of Hyd. Eng., ASCE*, 130, 511-520.
- [19] Kostic , Parker,(2000) , "The Response of Turbidity Currents to a Canyon-Fan Transition: Internal Hydraulic Jumps and Depositional Signatures", National Center for Earth-surface Dynamics, St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 55414, USA.
- [20] Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin; H.M.; (1986); "Self-accelerating turbidity currents"; *Journal of Fluid Mech*, Vol. 171, pp. 140-181.
- [21] Paul D Komar, (1971). "Hydraulic jump in Turbidity Currents", *Geological Society of America, GSA Bulletin*, Vol. 82, No. 6, PP. 1477-1488
- [22] Rajaratnam, N., (1968). "Hydraulic Jumps on Rough Beds" *Trans. Engineering Inst. Canada*, 11(a-2), 1-8.
- [23] Rajaratnam, N. , (1960). "The Hydraulic Jump as a Wall Jet" *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineering*, 91(5). Pp. 107-132.

[۲۴] Simons D.B., Richardson E.V. and Haushid W.L. (۱۹۶۳). Some effects of fine sediments on flow phenomenon, Water Supply Paper no. ۱۴۹۸G. United States Geological Survey, Washington DC.

[۲۵] Vanoni V.A. and Nomicos G.N. ۱۹۶۰. Resistance properties of sediment laden streams, Trans ASCE, ۱۲۵:۱۱۴۰-۱۱۷۵.

[۲۶] White, W. R. (۱۹۹۰), "Reservoir Sedimentation and Flushing." In: Hydrology in Regions. Artificial Reservoirs; Water and Slopes, Proc. Of Two Symposia, IAHR, Pub. Lousanne., No. ۱۹۴, pp. ۱۲۹-۱۳۹

[۲۷] بنی هاشمی، م.ع. بهرنگ، ف. پورحاجیان، ع. و امینی، م.م. (۱۳۸۸) "مقایسه نتایج مدل عددی HEC-RAS با مقادیر واقعی در رسوبگذاری مخزن سد لتیان" هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه.

[۲۸] بنی هاشمی، م.ع. خسروپور، ح. و صفی یاری، ا. (۱۳۸۷) "مقایسه نتایج پیشروی دلتای رسوب در مخزن سد در مدل آزمایشگاهی با مدل عددی مشابه با استفاده از نرم افزار HEC-RAS"، دومین کنفرانس ملی نیروگاههای آبی کشور.

[۲۹] حسن پور حیدری، ی. (۱۳۸۶). مطالعه آزمایشگاهی اثر طول مجرای خط القعر بر راندمان تخلیه جریان گل آلود در مخازن سدها. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

[۳۰] شفاعی بجستان، م (۱۳۸۷). هیدرولیک رسوب، «انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۸۷ ص.

[۳۱] شفاعی بجستان، م و بزبز، خ. (۱۳۸۶). «بررسی توزیع عمقی و طولی غلظت و دانه بندی رسوب معلق در کانالهای آبیاری» گزارش نهایی، دفتر تحقیقات و استانداردهای شبکه های آبیاری و زهکشی، سازمان آب و برق خوزستان.

[۳۲] کشتکار، ش. (۱۳۸۷). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عدد فرود چگالی ورودی بر هیدرودینامیک جریان گل آلود در کانال دو بعدی. پایان نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس

[۳۳] مهدیزاده محلی، س.ع. صالحی نیشابوری، (۱۳۹۰) «بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهشی ذرات در نزدیکی بستر کانال» نشریه آب و فاضلاب ص ۹۲-۱۰۰

[۳۴] عظیمیان، ا. (۱۳۷۷) "دینامیک سیالات محاسباتی"، مرکز نشر دانشگاهی اصفهان.

[۳۵] افشار، م. ح. (۱۳۷۵) "فرآیند تقریب و روش اجزاء محدود"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

[۳۶] صباغ یزدی، س. ر. (۱۳۸۴) "جزوه هیدرولیک محاسباتی"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

[۳۷] حقیقی، س. کاویانپور، م. (۱۳۹۰) "بررسی پرش هیدرولیکی در جریان غلیظ"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده عمران

Abstract

Turbid or gravity flow can be described as entering an apparent mass density of the fluid to a fluid with a different mass density.

When the turbidity current of the river flowing into the reservoir behind the dam, due to its heavier weight sinks into the surrounding water, and streams at the bottom of the slope. This phenomenon that is caused by the difference between densities of the fluid layers is called density current. The density current containing suspended solid is called turbid current. If the density of the inlet fluid is more than the bulk density of living environment fluid, it will move as a thick underwater dense current

With the advent of computers and new strategies for solving partial differential equations of motion of water and sediment, numerous mathematical models with varying degrees of accuracy and simplifying assumptions to simulate the deposition of the Reservoir formed. Due to the difficulty of direct measurement of sediment deposited in reservoirs and high costs, and the inefficacy of the experimental methods for all dams, mathematical models and computer tools are very useful as attention and have been used. In this thesis is to evaluate the application and Flow-3D model to simulate the propagation of turbid stream in the reservoir is studied

In this study, the effects of concentration, particle size and flow characteristics such as speed and altitude on the slope sediments accumulated paid. Furthermore, the morphology of the deposits changes in the pattern of investment sediment is considered. The results of the identification of the mutation in the muddy sediments containing fine particles and prediction would be useful in the design

The present study was collected in 6 seasons. After the present introduction the second chapter illustrates the genesis of density and turbidity flow theory. In reference to the previous research in the field of density and turbidity currents is generated. The third chapter describes the governing equations for the flow such as equations of continuity, momentum, RNG and k- ϵ turbulence models. Then the different numerical methods to solve the equations used are

briefly introduced. And the properties and methods of the software used in this project (Flow-3D) have been described in detail

In the fourth quarter, Flow-3D software with the results of the study were validated by experimentally based, and after various tests for validation of the model, morphological changes in precipitation patterns were examined and finally, the best and most calibrated numerical model to simulate the propagation of muddy offered that can be used in future research.

In the last chapter, the results of the simulations were presented and the conclusions, strengths and weaknesses of the model with suggestions have been expressed

Keywords: turbidity current, flood, simulation, Flow-3D, high-density current, sediment



Shahrood University of Technology

Civil Engineering Faculty

**Investigation of Turbidity Current due to flooding entering to Dam
reservoirs**

Seyed Iman Mokhtari

Supervisor:

Dr. Amir abbas Abedini

Date: 01/27/2015