

به نام آفریننده حق و عدالت



دانشکده : کشاورزی

گروه : مهندسی آب و خاک

عنوان پایان نامه ارشد:

شبیه سازی عددی جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی

دانشجو : مهرزاد برزگر کلیجی

اساتید راهنما :

دکتر صمد امامقلی زاده

دکتر خلیل اژدری

استاد مشاور:

دکتر امیرحمزه حقی آبی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار : شهریور ماه ۱۳۹۴

دانشگاه شاهرود

دانشکده : کشاورزی
گروه : مهندسی آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهرزاد برزگر کلیجی به شماره دانشجویی: ۹۲۰۳۲۵۴
تحت عنوان: شبیه سازی عددی جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی

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

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر صمد امامقلی زاده		نام و نام خانوادگی : دکتر امیرحمزه حق آبی	
نام و نام خانوادگی : دکتر خلیل اژدری		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر زهرا گنجی نوروزی		نام و نام خانوادگی : دکتر محمدهادی موحدنژاد	
نام و نام خانوادگی : دکتر روزه موذن زاده			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم

به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را پاس
توانم بگویم.

امروز، سستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

حال کران سنگ‌تراز این ارزان‌داشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کونه غبار
محسنتان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

مشکروقدردانی

پاس بی کران پروردگار یکتا را که، هستی مان بخشد و به طریق علم و دانش، رهنمونان شد و به، هم نشینی رهروان

علم و دانش مفتخران نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

از اساتید کرامیم جناب آقایان دکتر امامعلی زاده، دکتر اژدری و دکتر حتی آبی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون

راهنماییهای ایشان تامین این پایان نامه بسیار مشکل مینمود.

تعهد نامه

اینجانب **مهرزاد برزگر کلیجی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شبیه سازی جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی تحت راهنمایی

دکتر صمد امامقلی زاده و دکتر خلیل اژدری متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

جریان غلیظ یک حرکت نسبی است که بین دو لایه سیال که حتی دارای اختلاف کمی در چگالی هستند ایجاد می‌گردد. از این منظر می‌توان بیان نمود که خصوصیات جریان‌های غلیظ از خصوصیات جریان‌های معمولی کانال باز بسیار متفاوت می‌باشد. توزیع سرعت و چگالی در راستای افقی در جریان‌های غلیظ در توزیع رسوبات در جریان نقش مهم و اساسی داشته و لذا بر بسیاری از جنبه‌های رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق پدیده جریان غلیظ به عنوان عامل انتقال رسوبات به مخازن و کانال‌ها توسط مدل عددی Fluent شبیه سازی شد. برای کالیبره کردن مدل، از نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) استفاده شد. هدف از این تحقیق یافتن بهینه‌ترین ابعاد مش و بهترین مدل آشفتگی می‌باشد تا با استفاده از آن بتوان خصوصیات مختلف جریان غلیظ را پیش بینی نمود. در این تحقیق متوسط سرعت جریان به ترتیب در ۳ فاصله طولی ۱/۶، ۳/۶ و ۵/۶ متری پس از گذشت زمان ۱۶، ۳۴ و ۵۴ ثانیه از شروع مدل‌سازی محاسبه شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در این تحقیق بهینه‌ترین ابعاد مش، ابعاد ۳۰۰×۲۴۰ و بهترین مدل آشفتگی، مدل k-epsilon از نوع RNG تعیین شد. همچنین پیش بینی چگالی در شیب‌های صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصدی انجام شد. خطای مدل عددی در پیش بینی سرعت جریان غلیظ ۱۷، ۱۰، ۸ و ۳ درصد بوده است. در انتها چگالی و متوسط سرعت جریان در شیب ۵ درصد پیش بینی شد. نتایج نشان داد هر چه شیب کف فلوم بیشتر باشد، درصد خطای متوسط سرعت جریان کمتر است. همچنین متوسط سرعت جریان و چگالی با هم رابطه معکوس دارند. ضمن اینکه افزایش شیب فلوم موجب افزایش متوسط سرعت جریان و کاهش چگالی جریان می‌گردد.

کلمات کلیدی: جریان غلیظ، رسوب‌گذاری، مدل عددی Fluent، متوسط سرعت جریان، چگالی.

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱. مقدمه
۳	۲-۱. ضرورت انجام تحقیق
۳	۱-۲-۱. کاهش حجم مخازن سد
۴	۲-۲-۱. تأثیر جریان‌های غلیظ بر فعالیت‌های بیولوژیکی
۴	۳-۲-۱. ایجاد خسارات مالی
۵	۴-۲-۱. جریان غلیظ در اقیانوس‌ها و دریاها
۵	۳-۱. دلایل اهمیت شناخت رفتار هیدرولیکی جریان‌های غلیظ در منابع آب
۶	۴-۱. اهداف
۶	۵-۱. روش انجام تحقیق
۷	فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته
۸	۱-۲. مقدمه
۹	۲-۲. روش‌های فعلی کنترل رسوب‌گذاری و کاهش رسوبات ورودی به مخزن
۹	۱-۲-۲. کاهش رسوبات ورودی به مخزن از طریق احیای پوشش گیاهی حوضه آبریز
۱۰	۲-۲-۲. کاهش رسوبات ورودی به مخزن از طریق ساخت سدها و حوضچه‌های رسوب‌گیر روی شاخه‌های فرعی رودخانه در بالادست
۱۰	۳-۲-۲. روندیابی رسوبات در مخازن سدها
۱۰	۴-۲-۲. رسوب شویی
۱۱	۲-۵-۲. خروج جریان‌های غلیظ از دریچه‌های تحتانی
۱۲	۶-۲-۲. شستشو با جریان سیلاب
۱۳	۳-۲. تعریف جریان غلیظ
۱۸	۴-۲. دلایل اهمیت شناخت رفتار هیدرولیکی جریان‌های غلیظ در منابع آب
۱۹	۵-۲. جنبه‌های مختلف جریان غلیظ
۱۹	۱-۵-۲. عمق نقطه غوطه‌وری
۱۹	۲-۵-۲. سرعت رأس جریان
۲۰	۳-۵-۲. بدنه جریان شامل شدت اختلاط آب ساکن و پروفیل‌های سرعت و غلظت
۲۰	۴-۵-۲. اثر موانع بر کنترل جریان غلیظ
۲۱	۵-۵-۲. پرش هیدرولیکی در جریان غلیظ

۲۱	۶-۲. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه جریان غلیظ
۲۵	۷-۲. مطالعات انجام شده در زمینه جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی Fluent
۲۷	۸-۲. مطالعات انجام شده در زمینه جریان غلیظ با استفاده از سایر مدل‌ها
۲۹	۹-۲. جمع بندی
۳۱	فصل سوم: مواد و روش‌ها
۳۲	۱-۳. مقدمه
۳۲	۲-۳. گام‌های اجرای یک مدل عددی
۳۳	۳-۳. نرم‌افزار Gambit
۳۵	۴-۳. نرم‌افزار Fluent
۳۵	۵-۳. مدل‌های تک فازی یا چندفازی در نرم‌افزار Fluent
۳۶	۶-۳. مدل‌های آشفته‌گی در نرم‌افزار Fluent
۳۸	۷-۳. شرایط آزمایشگاهی مورد استفاده
۳۸	۸-۳. اجرای مدل
۴۱	فصل چهارم: بحث و نتایج
۴۲	۱-۴. مقدمه
۴۲	۲-۴. شرایط اولیه برای مدل سازی عددی
۴۳	۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی
۴۳.	۱-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب صفر درصد
۴۶	۲-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۱ درصد
۴۸	۳-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲ درصد
۵۱	۴-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲/۹ درصد
۵۳	۵-۳-۴. جمع بندی
۵۳	۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی
۵۴	۱-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی در شیب صفر درصد
۵۷	۲-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی در شیب ۱ درصد
۵۹	۳-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲ درصد
۶۲	۴-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲/۹ درصد
۶۵	۵-۴-۴. جمع بندی

۶۶	۴-۵. پیش بینی چگالی با استفاده از مدل عددی در شیب‌های صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصد
۶۷	۴-۶. پیش بینی چگالی و سرعت با استفاده از مدل عددی در شیب ۵ درصد
۶۹	فصل پنجم: نتایج و ارائه پیشنهادات
۷۰	۵-۱. مقدمه
۷۱	۵-۲. نتایج
۷۲	۵-۳. پیشنهادات
۷۳	منابع

۱۳	جدول (۱-۲) طبقه‌بندی روش‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن
۳۷	جدول (۱-۳) ضرایب ثابت مدل RNG
۴۲	جدول (۱-۴) شرایط اولیه برای مدل سازی عددی
۴۵	جدول (۲-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد
۴۷	جدول (۳-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۱ درصد
۵۰	جدول (۴-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲ درصد
۵۲	جدول (۵-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲/۹ درصد
۵۶	جدول (۶-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفستگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب صفر درصد
۵۸	جدول (۷-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفستگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۱ درصد
۶۱	جدول (۸-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفستگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲ درصد
۶۴	جدول (۹-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفستگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲/۹ درصد
۶۶	جدول (۱۰-۴) پیش بینی چگالی در شیب‌های صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصد و سرعت‌های حاصل از مدل‌سازی در شیب-های مذکور
۶۷	جدول (۱۱-۴) پیش بینی چگالی و سرعت در شیب ۵ درصد

۱۴	شکل (۱-۲) شماتیکی از فرآیند جریان غلیظ در مخزن سد
۱۶	شکل (۲-۲) پیشروی جریان غلیظ در مخزن سد
۱۶	شکل (۳-۲) ساختار پیشانی و بدنه جریان غلیظ
۱۷	شکل (۴-۲) شماتیک اجزای جریان غلیظ
۳۴	شکل (۱-۳) نمایی از کانال مورد نظر در نرم افزار Gambit
۴۴	شکل (۱-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد
۴۶	شکل (۲-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۱ درصد
۴۹	شکل (۳-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲ درصد
۵۱	شکل (۴-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲/۹ درصد
۵۵	شکل (۵-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل های آشفته گی مختلف در بهینه ترین مش بندی و شیب صفر درصد
۵۷	شکل (۶-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل های آشفته گی مختلف در بهینه ترین مش بندی و شیب ۱ درصد
۶۰	شکل (۷-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل های آشفته گی مختلف در بهینه ترین مش بندی و شیب ۲ درصد
۶۳	شکل (۸-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل های آشفته گی مختلف در بهینه ترین مش بندی و شیب ۲/۹ درصد

فصل اول

کلیات

۱-۱. مقدمه

رسوب‌گذاری در مخازن سدها مشکلی است که بسیاری از سدهای مخزنی بخصوص در کشورهایی که دارای وضعیت آبخیزداری مناسب نمی‌باشند، با آن مواجه می‌باشند. پی‌آمدهای مخرب رسوب‌گذاری بصورت بالقوه در کلیه کشورهای جهان از جمله کشورهای توسعه یافته اروپایی و آمریکایی نیز وجود دارد (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶). بطوری که بر اساس گزارش کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ، در جهان بیش از ۴۰۰۰۰ سد بزرگ وجود دارد که از آنها به منظور تامین آب، تولید انرژی، کنترل سیلاب و غیره استفاده می‌شود. ولی متأسفانه هر ساله بطور متوسط بین ۵/۰ تا ۱ درصد از حجم کل ذخیره سدهای مذکور در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود. همین گزارش اعلام می‌دارد که برای حفظ حجم ذخیره موجود در جهان نیاز به ساخت ۳۰۰ تا ۴۰۰ سد بزرگ در هر سال می‌باشد (White, 2000).

جهت مدیریت رسوب می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. راه‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن سدها به دو دسته کلی، شامل روش‌های مکانیکی و روش‌های هیدرولیکی تقسیم می‌شوند. روش‌های مکانیکی شامل آبخیزداری، افزایش ارتفاع سد، متروکه کردن سد و تدارک منبع جایگزین و ایجاد سیستم کنارگذر می‌باشند. روش‌های هیدرولیکی شامل عبوردهی جریان غلیظ، سیفون کردن و رسوب‌شویی می‌باشند. بکارگیری مناسب این روش‌ها مستلزم شناخت توانایی و محدودیت‌شان می‌باشد (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶).

با توجه به اینکه ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، حفظ حجم مخازن سد بسیار مهم می‌باشد. بدین منظور عبوردهی جریان غلیظ یکی از روش‌هایی است که می‌توان برای حفظ مخازن سدها مورد استفاده قرار داد، که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

میزان رسوبات ورودی و خروجی، عمدتاً در رودخانه‌های موجود در طبیعت، در تعادل‌اند. مخزن سد این تعادل را به هم می‌زند. کاهش سرعت جریان در مخزن موجب رسوب‌گذاری شده که علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیره مخزن، کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از عوامل مؤثر در

رسوب‌گذاری مخازن پدیده جریان غلیظ می‌باشد. وقتی آب رودخانه حاوی ذرات رسوبی معلق با جرم مخصوص بیشتر وارد مخزن سد حاوی آب زلال و ساکن می‌شود، در اثر غوطه‌وری سیال سنگین‌تر در زیر سیال سبک‌تر، پدیده جریان غلیظ به وجود می‌آید (میرزازاده و همکاران، ۱۳۹۳).

به علت تفاوت دانسیته این جریان با دانسیته سیال محیطی روی آن، در سطح مشترک این جریان با سیال محیطی، گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که خود باعث ورود سیال محیطی به درون جریان چگال می‌گردند. جریان غلیظ یک حرکت نسبی است که بین دو لایه سیال که حتی دارای اختلاف کمی در چگالی هستند ایجاد می‌گردد. از این منظر می‌توان بیان نمود که خصوصیات جریان‌های چگال از خصوصیات جریان‌های معمولی کانال باز بسیار متفاوت می‌باشد. توزیع سرعت و غلظت در راستای قائم در جریان‌های گل‌آلود در توزیع رسوبات در جریان نقش مهم و اساسی داشته و لذا بر بسیاری از جنبه‌های رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۳).

۱-۲. ضرورت انجام تحقیق

جریان‌های غلیظ در رودها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و در منابع عظیم آب به وجود می‌آیند و مشکلاتی را نیز به همراه دارند که در زیر برخی از آنها آورده شده است:

۱-۲-۱. کاهش حجم مخازن سد

با کاهش سرعت جریان، آب رودخانه حامل رسوب با آب ساکن مخزن برخورد کرده و نیروهای هیدرودینامیکی آن کاهش می‌یابد. در نتیجه از قدرت انتقال رسوب آن کاسته شده و مواد جامد آن به تدریج در مخزن ته‌نشین می‌شوند. مواد رسوبی ریزدانه به حالت تعلیق و همراه با جریان غلیظ در مجاورت بستر تا ناحیه عمیق مخزن به نام حجم مرده منتقل شده و در آن جا با آرام شدن جریان آب ته‌نشین می‌شوند. از آن جا که در اثر رسوب‌گذاری، از حجم اولیه مخزن به تدریج کاسته می‌شود، اگر

پیش بینی‌ها و روش‌های کنترل مناسب اعمال نگردد ممکن است اثرات منفی در کارکرد مخزن و عمر مفید آن به وجود آید. بنابراین پیش‌بینی حجم مرده مخزن، مقدار مواد رسوبی و کیفیت توزیع آب در داخل مخزن یکی از اصول مهم هیدرولیک رسوب مخازن می‌باشد (Daly, 1936).

رسوب‌گذاری همواره به عنوان مهمترین عامل در کوتاه کردن عمر مفید سدها مطرح بوده است و سدهای مخزنی زیادی به دلیل پر شدن از رسوب، متروکه شده‌اند. رسوبات تجمع یافته می‌توانند خطر مسدود شدن آبگیر و سازه‌های تخلیه‌کننده تحتانی و یا آسیب رساندن به دریچه‌هایی که برای عبور رسوب طراحی نشده‌اند را به دنبال داشته باشند. یکی از مهمترین پدیده‌ها در رسوب‌گذاری مخازن سدها جریان‌های غلیظ می‌باشند که بایستی نقش این جریان‌ها در فرآیند رسوب‌گذاری مخازن شناسایی شده و با شناخت پارامترهای مختلف این جریان نسبت به مدیریت رسوب مخازن اقدامات مؤثر را انجام داد (سروری نژاد و همکاران، ۱۳۹۰).

۱-۲-۲. تأثیر جریان‌های غلیظ بر فعالیت‌های بیولوژیکی

حرکت جریان‌های غلیظ در داخل منابع آب کدورت را زیاد می‌کند. کاهش نفوذ نور ممکن است فعالیت‌های فتوسنتزی گیاهان را محدود کرده، از دید آبریان جلوگیری کند، تغذیه آبریانی که غذای خویش را به وسیله فیلتر کردن به دست می‌آورند را مختل کند و باعث آسیب رساندن به آبشش ماهی‌ها گردد (Daly, 1936).

۱-۲-۳. ایجاد خسارات مالی

جریان‌های غلیظ ممکن است فرسایشی و یا رسوب‌گذار باشند. دانستن این موضوع دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در بعضی تأسیسات مانند تأسیسات آبگیری، فرایند طبیعی رسوب‌گذاری بسیار مهم است. ته‌نشینی رسوبات بعضاً باعث ایجاد خسارت به تأسیسات مربوطه می‌شود. همچنین در این نوع

تأسیسات، داشتن اطلاعات در مورد جریان‌های غلیظ برای برداشت آب با کیفیت بهتر، ضروری می‌نماید (Daly, 1936).

۴-۲-۱. جریان غلیظ در اقیانوس‌ها و دریاها

در اقیانوس‌ها و دریاها جریان‌های غلیظ تأثیر مهمی در توزیع رسوبات روی کف اقیانوس و شکل‌گیری توپوگرافی زیرین دارند. در دریاها ذرات با اندازه سیلت و رس به صورت بار معلق توسط رودخانه‌ها به ناحیه زیرین دریاها منتقل می‌شوند. وجود بسیاری از دره‌ها در اعماق دریاها و اقیانوس‌ها بدلیل وجود جریان‌های غلیظ و تأثیرات فرسایشی آنها است (Daly, 1936).

با استفاده از مدل سازی جریان غلیظ سعی بر این شده است که رفتار هیدرولیکی جریان غلیظ تخمین زده شود تا بتوان با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب مشکلات ذکر شده را برطرف کرد.

۳-۱. دلایل اهمیت شناخت رفتار هیدرولیکی جریان‌های غلیظ در

منابع آب

۱. استفاده از جریان‌های غلیظ در تخلیه رسوبات مخازن سدها
۲. تعیین افت ظرفیت ذخیره مخزن بر اثر رسوب‌گذاری مواد معلق
۳. نصب و بهره‌برداری صحیح از دریچه‌ها به منظور جلوگیری از کاهش ظرفیت ذخیره مخزن
۴. پیش‌بینی و مدیریت کیفیت آب مخازن
۵. بهتر شدن بعضی از طرح‌ها از نقطه نظر اقتصادی

۶. ایجاد محیطی بهتر برای گیاهان و آبریان در منابع آب
۷. بهره‌برداری از جریان‌های غلیظ و قدرت حمل‌کنندگی آن‌ها در تخلیه رسوبات موجود
۸. جلوگیری از سایدگی ماشین‌آلات و مجراهای انتقال آب

۴-۱. اهداف

در تحقیق حاضر، هدف، بررسی رفتار جریان غلیظ می‌باشد که شامل موارد زیر است:

۱. شبیه‌سازی عددی جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی Fluent
۲. ارزیابی نرم‌افزار Fluent با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی
۳. تخمین رفتار جریان غلیظ با استفاده از نرم‌افزار مذکور با تغییر شیب

۵-۱. روش انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق از قابلیت و توانایی مدل عددی Fluent در حل معادلات متوسط-رینولدزی ناویر استوکس در جریان غلیظ و شبیه‌سازی عددی جریان غلیظ استفاده شد. بدین منظور از داده‌های آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) استفاده گردید.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱. مقدمه

رسوب‌گذاری در مخازن سدها امری اجتناب ناپذیر می‌باشد که آثار سوء آن در کاهش عمر مفید مخزن و تأسیسات سد بر کسی پوشیده نیست. لذا اهمیت موضوع و پیچیدگی آن ایجاب می‌نماید که برای هر سد، مطالعات جامعی در این خصوص صورت گیرد. عدم اطلاعات از وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد و پیش‌بینی روش‌های کنترل آن، موجب کاهش عمر مفید سد و اتلاف سرمایه‌های عظیم ملی می‌گردد. به منظور برآورد یا پیش‌بینی وضعیت رسوب‌گذاری در سال‌های بهره‌برداری از مخزن، استفاده از مدل‌های ریاضی به یک راهکار مناسب تبدیل شده است. مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی موجود برای شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نیاز به اطلاعات قابل توجه مکانی و زمانی دارند که اغلب، چنین داده‌هایی در دسترس نمی‌باشد (باقری، ۱۳۹۳).

شرایط جریان ورودی به مخزن با احداث سد بر روی رودخانه به دلیل قطع انتقال رسوب، کاملاً تغییر می‌یابد. حجم مفید مخزن در اثر رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد بطوریکه تجمع رسوبات در مخازن سدها، سالانه یک درصد از حجم ذخیره آنها را کاهش می‌دهد (Parker and Toniolo, 2007) و هر ساله تقریباً ۲۰ میلیارد تن رسوبات توسط رودخانه‌های جهان انتقال یافته و در آب‌های ساکن ته نشین می‌گردد (ترین، ۱۳۸۳). حجم خاک فرسایش یافته در ایران حدود ۸۰۰ میلیون متر مکعب از حجم مفید سدها را کاهش می‌دهد که این مقدار بیش از ۳ تن رسوب در هر ثانیه است (آشوری و همکاران، ۱۳۹۴). کاهش حجم ذخیره مخزن بر اثر رسوب‌گذاری؛ سبب کاهش ظرفیت ذخیره آب، کاهش توان تولید برق، آسیب به تأسیسات برق‌آبی، تخریب کیفیت آب آشامیدنی، از دست رفتن ظرفیت کنترل سیل و مشکلات دیگری می‌شود که اگر به آنها کمیاب و نایاب بودن محل‌های مناسب برای ایجاد مخازن جدید و هزینه هنگفت ساخت سد را اضافه کنیم کنترل رسوب‌گذاری در مخازن موجود را بصورت امری اجتناب ناپذیر می‌نمایاند (باقری، ۱۳۹۳). تجزیه و تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی می‌تواند آمار معنی داری را برای هر دو ویژگی‌های گذشته و آینده از حوضه بدست

دهد. به خصوص، ضبط و مدل سازی داده اطلاعات ورودی مخزن نقش بسیار قابل توجهی در مطالعات عملیات مخزن دارند (Okkan, 2012).

۲-۲. روش‌های فعلی کنترل رسوب‌گذاری و کاهش رسوبات ورودی به

مخزن

روش‌های جلوگیری از رسوب‌گذاری در مخزن را می‌توان به روش‌های کاهش ورود رسوب به مخزن و روش‌های کاهش رسوب‌گذاری تقسیم کرد. مهمترین این روش‌ها به شرح زیر است:

۱-۲-۲. کاهش رسوبات ورودی به مخزن از طریق احیای پوشش گیاهی

حوضه آبریز

در این روش با ترمیم، احیا و زیاد کردن پوشش گیاهی با فعالیت‌های آبخیزداری برخورد بارندگی و جویبارهای فرعی کوچک را با خاک کاهش داده و به این ترتیب از فرسایش خاک حوضه و در نتیجه رسوبات ورودی به رودخانه می‌کاهند. این روش نه تنها میزان رسوبات ورودی به مخزن را کاسته و در نتیجه عمر مخزن را بیشتر می‌کند، بلکه با کاهش فرسایش خاک‌های گران‌بهای کشاورزی، اثرات مثبت اقتصادی دیگری نیز به همراه دارد. روش فوق کاملاً مؤثر بوده ولی به هیچ وجه درمان نهایی مسئله رسوب‌گذاری در مخازن سدها نمی‌باشد (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۲-۲. کاهش رسوبات ورودی به مخزن از طریق ساخت سدها و

حوضچه‌های رسوب‌گیر روی شاخه‌های فرعی رودخانه در

بالادست

این روش، مؤثر ولی پرهزینه بوده و در صورتی که نتوان از آب ذخیره شده در این سدهای فرعی به نحو احسن استفاده کرد نسبت به روش‌های دیگر، ارزش اقتصادی کمتری دارد (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۲-۳. روندیابی رسوبات در مخازن سدها

در بیشتر مناطق، مقدار رسوبات ورودی در ماه‌های مختلف سال تفاوت دارد. در این حالت می‌توان از ذخیره آب ماه‌هایی که در آنها مقدار رسوبات ورودی بیشتر است، چشم‌پوشی کرده و با باز کردن دریچه سدها؛ کل و یا قسمتی از آب ورودی را خارج نمود. به این ترتیب زمان مانداب حامل رسوب در مخزن کمتر شده و در نتیجه ضریب تله‌اندازی مخزن کاهش می‌یابد، هر چند که این روش چندان مؤثر نیست ولی هزینه آن ناچیز بوده و در نقاطی که نسبت حجم رواناب سالانه ورودی به حجم مخزن زیاد می‌باشد و می‌توان آب از دست رفته را در ماه‌های دیگر جبران کرد، ارزشمند است (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۲-۴. رسوب‌شویی

عملیات رسوب‌زدایی مخزن به دو شکل رسوب‌شویی با جریان آزاد (رسوب‌شویی با تخلیه کامل مخزن) و رسوب‌شویی تحت فشار انجام می‌شود. روش رسوب‌شویی جریان آزاد در مقایسه با رسوب‌شویی تحت فشار دارای راندمان مناسب‌تری بوده، در حالی که بعنوان مثال در سد سفیدرود با روش

رسوب‌شویی تحت فشار، تخلیه کامل مخزن صورت نگرift و فقط رسوب نواحی نزدیک به تخلیه کننده‌ها به پایین دست تخلیه شد. در حالت تحت فشار، در مقابل تخلیه کننده‌ها گوه‌ای شکل گرفته که با گذشت زمان دارای شکلی پایدار شده و تخلیه رسوب خاتمه می‌یابد و در صورت ادامه رسوب-شویی، جریان خروجی از تخلیه کننده‌ها فاقد رسوب خواهد بود (Fan and Jiang, 1980).

در روش خروج سریع آب مخزن با باز کردن کامل دریچه‌های تحتانی سد، آب مخزن را به مقدار زیاد و در زمانی کوتاه خارج می‌کنند. با توجه به مقدار زیاد رواناب خروجی، آب ذخیره شده در مخزن به جریان می‌افتد و سرعت جریان به خصوص در اطراف دریچه‌ها باعث کنده شدن و انتقال رسوبات ته-نشین شده به پایین سد می‌شود. استفاده از این روش در مناطقی که نسبت حجم آب ورودی سالانه به مخزن در مقایسه با حجم ذخیره آن زیاد است، رایج و مؤثر می‌باشد.

عیب این روش این است که با توجه به خروج یکباره رسوبات، جریان آب قادر به ادامه حمل آنها در مسیر رودخانه پایین دست نبوده و مقدار زیادی از این رسوبات در پایین دست ته‌نشین می‌شود. رسوبات ته‌نشین شده ضررهای اقتصادی زیادی را به شبکه‌های آبیاری موجود در پایین دست سد وارد ساخته و عواقب زیست محیطی نامناسبی به همراه دارند (باقری، ۱۳۹۳).

۵-۲-۲. خروج جریان‌های غلیظ از دریچه‌های تحتانی

تحت شرایط خاصی از غلظت رسوب و شکل مخزن، جریان آب حامل رسوب رودخانه پس از ورود به مخزن سد بر اثر اختلاف وزن مخصوص آن با آب ذخیره شده در مخزن به زیر و بستر مخزن کشیده شده و تا مسافت زیادی بدون انحلال در آب مخزن به مسیر خود ادامه می‌دهد. این جریان زیر آبی در صورت برقرار بودن شرایط مناسب حتی تا محل سد نیز ادامه می‌یابد. در صورتی که جریان غلیظ در مخزن وجود داشته باشد با باز کردن دریچه‌های تحتانی سد، مقداری از رسوبات را به همراه جریان

تراکمی از سد می‌توان خارج نمود. راه حل فوق در مورد تمام مخازن عمومیت نداشته و در هر حال بازدهی آن چندان زیاد نمی‌باشد (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۲-۶. شستشو با جریان سیلاب

چنانچه به آب آورده شده با سیلاب برای پر کردن مخزن نیازی نبوده و بتوان آن را از طریق تخلیه کننده‌های عمیقی به پایین دست هدایت کرد، بطور مطلوبی می‌توان بخشی از رسوب‌های آورده شده به مخزن را بدون آنکه به آنها اجازه ترسیب داده شود از مخزن تخلیه کرد (Fan and Jiang, 1980 ; Tolouei, 1989).

مهمترین جنبه‌های قابل بررسی هر یک از روش‌های ارائه شده برای برخورد با مشکل رسوب‌گذاری را می‌توان به شرح زیر معرفی کرد:

۱. بازدهی
۲. هزینه طرح
۳. سازگاری طرح با ساختمان سد
۴. عدم بروز مشکلات در پایین دست سد
۵. قابلیت انطباق طرح در مخازن و سدهای گوناگون
۶. دوام کاربری طرح.

خیلی از روش‌های رسوب‌زدایی بکار گرفته شده از اختلاف رقوم آب در مخزن و پایین دست سد جهت تخلیه رسوبات استفاده می‌کنند، ولی ایده استفاده از اختلاف رقوم آب جهت انتقال رسوبات در لوله به ندرت مورد استفاده قرار گرفته است. در گذشته چینیان از این وسیله جهت لایروبی رسوبات

جمع شده در منطقه کوچکی در پشت سدها بطور محدود استفاده کرده‌اند. در حال حاضر نیز برای تخلیه موضعی رسوب‌گذاری‌های حاد در دریاچه سدها از این وسیله استفاده می‌شود.

تکنولوژی نسبتاً جدیدی که برای مهار آب‌های سطحی بکار گرفته شده تکنولوژی سدهای لاستیکی می‌باشد. تا پیش از این، سد لاستیکی برای مهار و هدایت آب بسوی زمین‌های وسیع و آبروها، از دریاچه‌های فولادی و تخته‌های چوبی استفاده می‌شد (باقری، ۱۳۹۳).

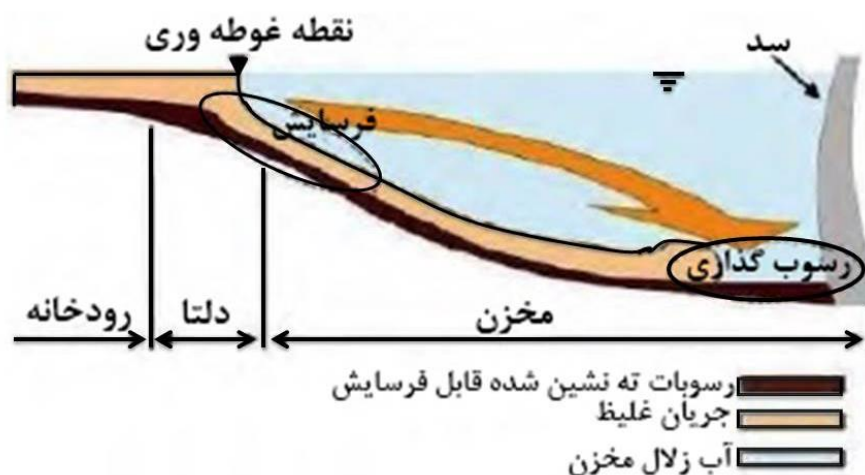
با عنایت به مطالب بیان شده می‌توان روش‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن سدها را در سه بازه مکانی؛ محل سد، مخزن و حوضه آبریز، بصورت جدول (۱-۲) دسته‌بندی نمود (قمشی، ۱۳۹۱):

جدول (۱-۲) طبقه‌بندی روش‌های کنترل رسوب‌گذاری در مخازن

روش‌های کنترل رسوب‌گذاری		
در محل سد	در مخزن	در حوضه آبریز
عبوردهی جریان غلیظ	حجم مرده	حفاظت خاک
عبوردهی رسوبات معلق	جلوگیری از ته‌نشینی رسوبات ریزدانه همراه جریان‌های غلیظ در نقاط مهم توسط ایجاد مانع	حوضه‌های ترسیب
افزایش ارتفاع سد	رسوب‌شویی	محافظت از شیب و کناره‌ها
افزایش تراز آبگیر و سازه‌های تخلیه تحتانی	لایروبی	سازه‌های کنارگذر
	سیفون کردن	مخازن بالادست

۲-۳. تعریف جریان غلیظ

جریان غلیظ از دید محققین مختلف، تعاریف متفاوتی دارد که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است. یکی از مهمترین پدیده‌های مؤثر در رسوب‌گذاری مخازن، جریان‌های غلیظ (شکل ۱-۲) می‌باشند. این جریان‌ها می‌توانند رسوبات همراه خود را تا دیواره سد برسانند. علاوه بر این؛ گاهی اوقات می‌توانند رسوبات نشسته شده در مخزن را از جا کنده و با خود همراه نمایند (قمشی، ۱۳۹۱).



شکل (۱-۲) شماتیکی از فرآیند جریان غلیظ در مخزن سد

احداث یک سد روی یک رودخانه شرایط جریان ورودی به مخزن را کاملاً تغییر می‌دهد. در فصول سیلابی، جریان ورودی به مخزن دارای غلظت بالایی از مواد رسوبی بوده و با کاهش سرعت در مخزن سد، مواد معلق در کف مخزن ته‌نشین شده و به شکل یک جریان گلی به سمت بدنه سد جریان می‌یابد که به آن جریان غلیظ می‌گویند (باقری، ۱۳۹۳).

جریان‌های کدر جریان‌های مملو از رسوب می‌باشند که اغلب در اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها و مخازن سدها اتفاق می‌افتد و مکانیزم مهمی در انتقال رسوب در آب‌های عمیق دارد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). بطوریکه محققین اعتقاد دارند که حتی جریان‌های غلیظ می‌توانند علتی برای ایجاد تنگه‌ها در زیر دریا باشند (Inman et al., 1976).

بنا به تعریف (Elison and Turner (1959)، جریان‌ات غلیظ که به آنها جریان دانسیته، جریان تیره، جریان گل‌آلود و یا جریان ثقلی گفته می‌شود در اثر اختلاف جرم حجمی (دانسیته) بوجود می‌آیند. اصولاً زمانی که سیالی با جرم مخصوص $(\rho + d\rho)$ به درون یک توده سیال با جرم مخصوص (ρ) جریان یابد، پدیده جریان غلیظ اتفاق می‌افتد. (Graf (1983)، وجود یکی از عوامل زیر را بعنوان عامل اختلاف دانسیته ذکر نمود:

۱. اختلاف دما

۲. اختلاف در غلظت دو سیال ناشی از مواد محلول

۳. اختلاف در غلظت دو سیال ناشی از مواد معلق

که موارد ۱ و ۲ جریان دانسیته و مورد ۳ جریان تیره یا غلیظ نامیده می‌شود (قمشی و امیدی، ۱۳۸۸).

به عبارت دیگر، جریان غلیظ و یا جریان چگال عبارتست از جریانی که به علت اعمال نیروی ثقل روی اختلاف چگالی دو سیال بوجود می‌آید. این نیرو، شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد که به کمک فرمول (۱-۲) بدست می‌آید (قمشی، ۱۳۹۱):

$$\dot{g} = g \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \quad (1-2)$$

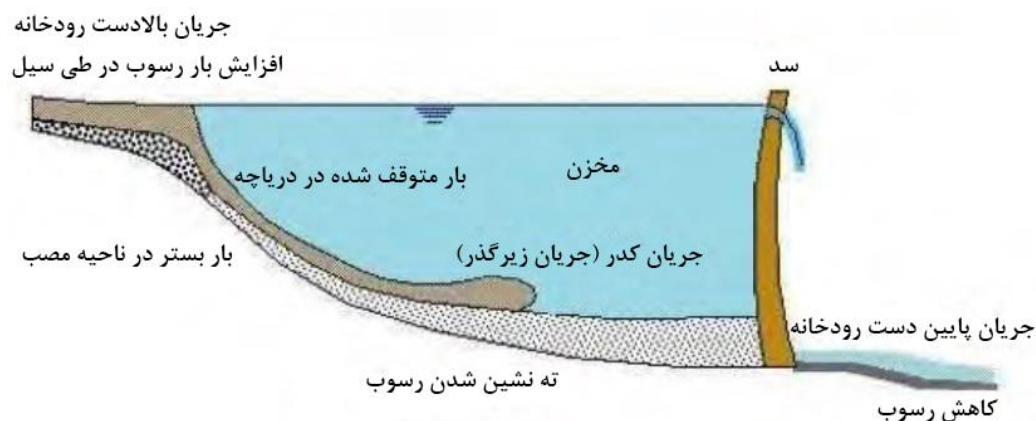
جریان‌های غلیظ به جریان‌های تجزیه‌پذیر و تجزیه‌ناپذیر تقسیم می‌گردند. جریان‌های غلیظ ایجاد شده ناشی از اختلاف دما و یا مواد محلول، شار شناوری تقریباً ثابتی در طول مسیر دارند، بنابراین جریان‌های تجزیه‌ناپذیر می‌باشند. بالعکس جریان‌های کدر که ناشی از تفاوت در غلظت رسوب می‌باشند به دلیل رسوب‌گذاری در طول مسیر، شار شناوری متغیری داشته و جزء جریان‌های غلیظ تجزیه‌پذیر محسوب می‌گردند.

اگر جرم مخصوص سیال ورودی از جرم مخصوص توده سیال محیط کمتر باشد، بصورت یک جریان غلیظ روگذر حرکت می‌کند.

اگر جرم مخصوص سیال ورودی از جرم مخصوص توده سیال محیط بیشتر باشد، جریان غلیظ بصورت تحتانی یا زیرگذر حرکت خواهد کرد. به جریان‌های غلیظ که بصورت زیرگذر حرکت می‌کنند و بالا بودن وزن مخصوص آنها ناشی از مواد معلق باشد، جریان‌های کدر نیز می‌گویند (قمشی، ۱۳۹۱).

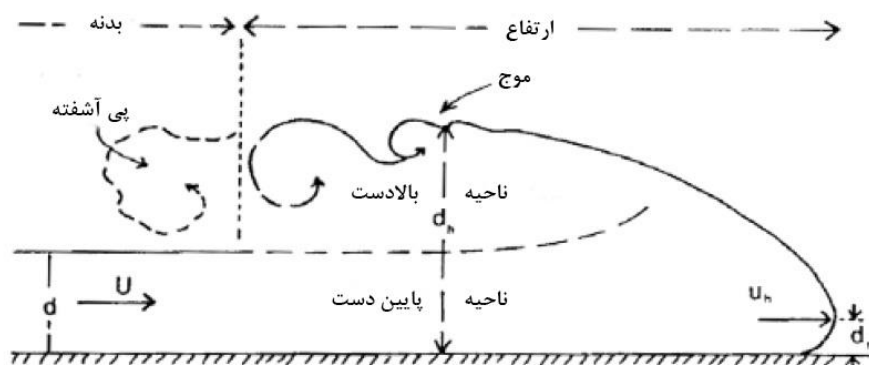
جریان غلیظ در اثر ذرات معلق شده از بستر متحرک و به دنبال تغییر دانسیته به وجود آمده تشکیل می‌شود، که تحت عنوان جریان ثقلی ناپایدار خوانده می‌شود. این نامگذاری به این دلیل است که دانسیته این نوع جریان غلیظ بسته به شرایط، با کندن بستر و یا با ته‌نشینی رسوب در طول حرکت

تغییر می‌نماید (میرزازاده و همکاران، ۱۳۹۳). شکل (۲-۲) پیشروی جریان غلیظ در مخزن سد را نشان می‌دهد (میرزازاده و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل (۲-۲) پیشروی جریان غلیظ در مخزن سد

به طور کلی یک جریان غلیظ از دو بخش اصلی بدنه و پیشانی تشکیل می‌گردد. بر خلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه جریان غلیظ، پیشانی دارای جریان غیردائمی بوده و باعث جابجایی سیال محیطی می‌شود. نیروی جلوبرنده و محرک در پیشانی جریان، گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان پیشانی جریان و سیال محیطی است. در شکل (۳-۲) قسمت‌های مختلف جریان غلیظ به صورت شماتیک نشان داده شده است (میرزازاده و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل (۳-۲) ساختار پیشانی و بدنه جریان غلیظ

از آنجا که در منابع عظیم آب، به دلیل اختلاف دما و یا دلایل دیگر، احتمال دارد لایه‌های زیرین، دارای جرم مخصوص بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی باشند؛ در چنین منابع آبی اگر جرم مخصوص سیال ورودی کمتر از جرم مخصوص لایه‌های زیرین توده سیال ساکن و بیشتر از جرم مخصوص لایه‌های بالایی توده سیال ساکن باشد، در این صورت سیال ورودی دانسیته مناسب محیط خود را پیدا کرده و بصورت یک جریان غلیظ میان‌گذر حرکت می‌کند.

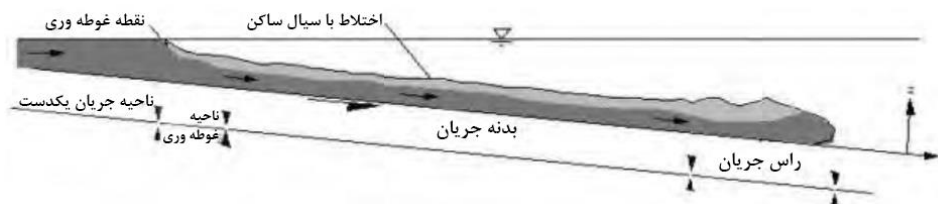
یک جریان غلیظ دارای زیرگذر دارای ۴ ناحیه می‌باشد (شکل ۲-۴):

۱. ناحیه قبل از ورود به مخزن (یا جریان یکدست)

۲. ناحیه غوطه‌وری

۳. بدنه جریان

۴. پیشانی (یا رأس) جریان



شکل (۲-۴) شماتیک اجزای جریان غلیظ

هنگامی که جریان غلیظ وارد مخزن ساکن با چگالی کمتر می‌شود، در ابتدای جریان ورودی، آب پیرامون خود را جابجا می‌کند تا آنجا که نیروها به تعادل برسند. در نقطه تعادل، جریان با دانسیته بیشتر، زیر سطح آب فرو می‌رود، این نقطه را نقطه غوطه‌وری می‌نامند.

هنگامی که جریان غلیظ شروع می‌شود عموماً شامل محدوده وسیعی از اندازه ذرات معلق است. همه این ذرات با اندازه‌های مختلف نمی‌توانند در اثر تلاطم جریان بصورت معلق باقی بمانند. ته‌نشینی ذرات درشت، موجب کاهش تفاوت چگالی و نیروی ثقلی می‌شود که عامل حرکت است و همچنین

باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه متلاشی شدن جریان می‌شود. بنابراین، جریان‌های غلیظی که توسط سیلاب‌های کوچک و یا ذوب برف ایجاد می‌شوند، به ندرت می‌توانند به سد برسند.

برای طی مسافت طولانی، سرعت جریان غلیظ باید به اندازه‌ای باشد که تنش برشی روی کف، قادر به فرسایش رسوبات باشد و شدت آشفته‌گی ایجاد شده نیز به حدی برسد که بتواند ذرات را معلق نگه دارد و در نتیجه نیروی جلو برنده حفظ شود. در شیب‌های تند، چگالی و سرعت جریان حتی می‌تواند در طول مسیر، به علت فرسایش رسوبات کف افزایش یابد. هنگامی که تنش برشی کف افزایش پیدا کند، رسوبات بیشتری را به درون جریان وارد کرده و یک سیکل خود تقویتی ایجاد می‌کند که باعث بوجود آمدن یک جریان خود نگهدارنده می‌شود، که می‌تواند سرعت جریان را تدریجاً بالا ببرد (قمشی، ۱۳۹۱).

۲-۴. دلایل اهمیت شناخت رفتار هیدرولیکی جریان‌های غلیظ در

منابع آب

۱. بهره‌برداری از جریان‌های غلیظ و قدرت حمل‌کنندگی آنها در تخلیه رسوبات موجود در مخازن سدها
۲. بهره‌برداری از روش‌های کنترل جریان غلیظ به منظور کاهش اثرات مخرب رسوب‌گذاری در مخازن سدها
۳. پیش‌بینی صحیح توزیع رسوبات در بستر مخازن سدها و تأثیرات فرسایشی آنها
۴. تعیین افت ظرفیت ذخیره مخزن بر اثر رسوب‌گذاری مواد معلق
۵. نصب و بهره‌برداری صحیح از دریچه‌ها به منظور جلوگیری از کاهش ظرفیت ذخیره مخزن
۶. پیش‌بینی و مدیریت کیفیت آب مخازن

۷. بهتر شدن بعضی از طرح‌ها از نقطه نظر اقتصادی

۸. ایجاد محیطی بهتر برای گیاهان و آبزیان در منابع آب

۹. جلوگیری از سائیدگی توربین‌ها و مجراهای انتقال آب (قمشی، ۱۳۹۱).

۲-۵. جنبه‌های مختلف جریان غلیظ

مطالعات انجام شده در مورد جریان غلیظ؛ تاکنون بر جنبه‌های زیر متمرکز بود:

۲-۵-۱. عمق نقطه غوطه‌وری

در این نقطه، اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب ساکن به تعادل رسیده و جریان غلیظ زیرگذر پس از آن، به زیر سطح آب ساکن رفته و به حرکت خود ادامه می‌دهد. این نقطه معمولاً با عمق نقطه و با h_p بیان می‌شود. در جریان‌های کدر محل تشکیل این نقطه، با تفاوت رنگ جریان کدر و آب ساکن شفاف قابل تشخیص می‌باشد (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۵-۲. سرعت رأس جریان

پیشانی یا رأس جریان غلیظ؛ به قسمت گریزی شکل جلوی جریان اطلاق می‌گردد. مشخصه پیشانی جریان غلیظ ارتفاع زیادتر آن نسبت به بدنه جریان غلیظ می‌باشد.

ترابی‌پوده و امامقلی‌زاده (۱۳۸۶) جریان غلیظ را در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها با جریان نمکی مورد بررسی قرار داد. آنها برای اولین بار از اثر عمق استغراق h_p در روابط بی‌بعد، جهت محاسبه سرعت بی‌بعد پیشانی استفاده نمودند و فرمول (۲-۲) را برای سرعت بی‌بعد پیشانی جریان ارائه نمودند:

$$\frac{u_f}{\sqrt{gh_p}} = 1.248 \frac{q}{\sqrt{gh_p^3}} + 0.12 \ln(s) + 0.342\alpha + 0.727 \quad (2-2)$$

که در آن، α زاویه واگرایی، s شیب کف و h_p عمق استغراق می‌باشد. همچنین عنوان نمودند که سرعت پیشانی جریان غلیظ در واگرایی‌ها بیشتر از مقاطع ثابت و در همگرایی‌ها کمتر از مقاطع ثابت است و با شیب و دبی سرعت پیشانی جریان افزایش می‌یابد (ترابی‌پوده و امامقلی‌زاده، ۱۳۸۶).

۲-۵-۳. بدنه جریان شامل شدت اختلاط آب ساکن و پروفیل‌های سرعت و

غلظت

بدنه جریان به فاصله بین نقطه غوطه‌وری و رأس جریان اطلاق می‌گردد که می‌توان آن را به دو ناحیه متمایز؛ ناحیه دیواره و ناحیه جت تقسیم بندی کرد که ارتفاع نظیر سرعت ماکزیمم h_m ، این دو ناحیه را از هم جدا می‌کند.

لازم به ذکر است که شدت اختلاط، پروفیل سرعت و غلظت، شرایط رسوب‌گذاری و فرسایش در بدنه جریان غلیظ از موارد مهم و تعیین کننده در حرکت جریان می‌باشند (باقری، ۱۳۹۳).

۲-۵-۴. اثر موانع بر کنترل جریان غلیظ

هنگامی که یک جریان غلیظ به یک مانع برخورد می‌کند ممکن است بخشی از جریان، از روی مانع عبور نماید در حالی که یک پرش هیدرولیکی یا موج به طرف بالادست جریان حرکت می‌کند. برای بررسی اثرات عبور جریان غلیظ از روی مانع، تحلیل جریانات کم عمق بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است (قمشی، ۱۳۹۱).

۲-۵-۵. پرش هیدرولیکی در جریان غلیظ

هنگامی که رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تغییر یابد، پدیده پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. در اثر پرش هیدرولیکی در جریان کانال‌های باز، مقداری انرژی تلف می‌شود. به عبارت دیگر انرژی در منطقه آشفتگی به گرما تبدیل می‌شود. مشابه چنین پدیده‌ای در جریان‌های غلیظ رخ می‌دهد (قمشی، ۱۳۹۱).

۲-۶. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه جریان غلیظ

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی بسیاری در زمینه شناخت جریان غلیظ و خصوصیات و رفتار آن در ایران و سایر کشورها صورت پذیرفته است که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است.

- بارانی و همکاران، با استفاده از یک مدل فیزیکی-هیدرولیکی، تغییر غلظت جریان چگال در طول مخزن سد و نرخ رسوب‌گذاری آن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که بیشتر ذرات درشت‌دانه در ناحیه قبل از نقطه غوطه‌وری یا در مسافت کمی در پایین-دست آن رسوب می‌کنند در حالی که ذرات ریزدانه در ناحیه پایین‌دست نقطه غوطه‌وری به سمت دیواره سد قرار می‌گیرند. همچنین، نرخ رسوب‌گذاری به سمت پایین دست مخزن سد کاهش می‌یابد (بارانی و همکاران، ۱۳۸۳).

- حق‌آبی و همکاران، مطالعاتی را در رابطه با خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ ورودی به یک مخزن تحت تأثیر شیب کف انجام دادند. آنها در این مطالعه تأثیر شیب کف را روی رفتار جریان غلیظ، سرعت جبهه جریان و اختلاط در بدنه جریان بطور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آنها آزمایش‌های خود را در یک فلوم با شیب متغیر و با استفاده از

اندازه‌های مختلف رسوبات انجام دادند تا بتوانند برای محدوده وسیعی از متغیرها نتیجه‌گیری نمایند. مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که خصوصیات جریان تحت تأثیر عدد ریچاردسون (عدد ریچاردسون یک عدد بی‌بعد در دینامیک سیالات است که از نسبت انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی حاصل می‌شود و معرف پایداری عمومی جریان غلیظ است که فرمول آن بصورت $Ri = gh \cos \theta / U^2 = 1/Fr^2$ است که در آن g شتاب ثقل مؤثر در یک مقطع مشخص، h ضخامت بدنه، θ زاویه بستر مجرا با محور افق و U سرعت بدنه می‌باشد. اگر عدد ریچاردسون منفی باشد بیانگر حالت ناپایدار در جریان غلیظ است یا به عبارت دیگر چینه‌بندی در جریان غلیظ سبب افزایش اغتشاش می‌شود. اگر عدد ریچاردسون مثبت باشد بیانگر حالت پایداری در جریان غلیظ است؛ و اگر عدد ریچاردسون بزرگتر از 0.25 باشد در این صورت چنانچه اغتشاشی وارد محیط سیال شود این اغتشاش از بین خواهد رفت.) و شیب بستر می‌باشد. آنها روابطی را بین سرعت جبهه جریان غلیظ و شدت جریان غلیظ ارائه نمودند و در نهایت، معادلات رگرسیونی اختلاط در بدنه جریان را بصورت تابعی از عدد ریچاردسون و شیب کف ارائه کردند (حق‌آبی و همکاران، ۱۳۸۶).

- موسوی حکمتی و همکاران، مطالعاتی را تحت عنوان بررسی تجربی ساختار هیدرودینامیکی جریان چگال سه‌بعدی انجام دادند. آنها در این مطالعات تأثیر عوامل مختلف در مشخصه‌های جریان چگال حاوی ذرات را بصورت سه‌بعدی و مغشوش و بطور تجربی مورد بررسی قرار دادند. این عومل شامل ارتفاع جریان، ارتفاع رسوب‌گذاری، سرعت پیشروی پیشانی و پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV می‌باشد. آزمایش‌ها در شیب، غلظت و دبی‌های متفاوت انجام شد و نتایج نشان داد که با افزایش دبی مقدار ارتفاع بدنه همواره افزایش یافته و با افزایش غلظت و شیب کاهش می‌یابد، مگر در مواقعی که درون کشیدگی بیشتر شود. همچنین به دلیل درون کشیدگی شدید طولی و عرضی در ابتدای کانال ارتفاع بدنه افزایش

می‌یابد، اما با پیشروی جریان از ارتفاع کاسته شده و عمدتاً به حالت تثبیت شده می‌رسد. بررسی پروفیل رسوب‌گذاری نشان داد که در عمده دبی‌ها، شیب‌ها و غلظت‌ها در امتداد کانال مقدار رسوب کاهش می‌یابد. شکل پروفیل سرعت در جریان حاوی ذرات نشان می‌داد که به دلیل وجود نیروهای اینرسی در ابتدای کانال، مقدار ماکزیمم و متوسط سرعت در جهت جریان همیشه در ابتدای کانال از انتهای آن بزرگتر است. علاوه بر آن در ابتدای کانال به دلیل کمی اصطکاک، مقدار ماکزیمم از مقدار متوسط سرعت به مراتب زیادتر بوده و به سرعت از مقدار ماکزیمم کاسته می‌شود. با نزدیک شدن به انتهای کانال، به دلیل درون کشیدگی، موقعیت سرعت ماکزیمم در جهت جریان بالاتر از سطح بستر قرار می‌گیرد (موسوی‌حکمتی و همکاران، ۱۳۸۷).

- بهرامی و همکاران، با ایجاد شکست شیب بستر به مطالعه تغییرات ایجاد شده در اثر جریان غلیظ بر روی خصوصیات جریان ورودی پرداختند. در این راستا، آنها یک مدل فیزیکی (فلومی به طول ۸ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۸ متر) ساختند تا اثر شیب‌های متفاوت، تغییرات دبی و غلظت جریان غلیظ ورودی بر مشخصه‌های جریان غلیظ را مطالعه نمایند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که بیشترین تغییر در خصوصیات جریان غلیظ در قسمت شیب-دار می‌باشد، بطوری‌که سرعت جریان در انتهای این ناحیه بین ۴۰ تا ۶۲ درصد نسبت به ابتدای آن افزایش می‌یابد. ارتفاع جریان نیز به دلیل کشش آب ساکن در طول فلوم همواره دارای روند افزایشی بوده و بیشترین افزایش در ناحیه شیب‌دار در حدود ۲ تا ۳/۵ برابر می‌باشد. همچنین نتیجه گرفتند که میزان کشش آب ساکن علاوه بر عدد ریچاردسون (که در محدوده ۰/۶ تا ۴/۷ متغیر بود) به تغییرات ارتفاع آب مخزن نیز حساسیت زیادی دارد و رابطه‌ای نمایی را نیز در این خصوص نیز پیشنهاد نمودند (بهرامی و همکاران، ۱۳۸۸).

- مرادی و همکاران، به بررسی و مطالعه تأثیر تغییرات پارامترهای دبی، شیب و غلظت، روی شدت اختلاط جریان غلیظ در مقاطع همگرا پرداختند و آزمایش‌های خود را در یک فلوم با شیب کف قابل تغییر، عرض ۰/۷۲۵ متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۶ متر در ۳ زاویه همگرایی ۸، ۱۶ و ۲۵ درجه در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه شهیدچمران اهواز انجام دادند. نتایج مطالعات نشان داد که با افزایش پارامترهای دبی و شیب، شدت اختلاط جریان غلیظ افزایش یافته و با افزایش غلظت، از مقدار آن کاسته می‌شود (مرادی و همکاران، ۱۳۹۰).

- Torabi Poudeh et al.، به مطالعه اثرات درجه همگرایی و واگرایی بر هد سرعت جریان غلیظ پرداختند. آزمایشات آنها در فلومی با طول ۶ متر، عرض ۰/۷۲ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. آنها هد سرعت را در ۳ درجه همگرایی (۸-، ۱۲- و ۲۶-)، ۳ درجه واگرایی (۸، ۱۲ و ۲۶) و ۲ شیب (۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۶) با دبی‌های مختلف اندازه‌گیری کردند. هد سرعت جریان غلیظ اندازه‌گیری شده را با هد سرعت جریان غلیظ در کانال با سطح مقطع ثابت مقایسه کردند. براساس آنالیزهای آماری و بی بعد، روابطی را بصورت رگرسیون خطی چندگانه برای پیش بینی هد سرعت جریان غلیظ در کانال با مقطع همگرا، واگرا و ثابت ارائه کردند. همچنین نتایج تحقیقات آنها نشان داد که برای شیب و دبی ثابت، هد سرعت جریان غلیظ به ترتیب در کانال همگرا و واگرا بیشتر و کمتر از هد سرعت در کانال با مقطع ثابت می‌باشد (Torabi Poudeh et al., 2014).

۷-۲. مطالعات انجام شده در زمینه جریان غلیظ با استفاده از مدل

عددی Fluent

تاکنون مطالعات بسیاری با استفاده از مدل عددی Fluent در زمینه شناخت جریان غلیظ و خصوصیات و رفتار آن در ایران و سایر کشورها صورت پذیرفته است که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است.

- برهمند و موسوی، از نرم‌افزار Fluent جهت شبیه‌سازی پرش چگال با توجه به آزمایش‌های چگال شور گارسیا (۱۹۹۳) استفاده نمودند. نتایج مدل‌سازی آنها نشان داد که استفاده از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ از نوع RNG نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی به تخمین دقیق‌تری از پروفیل‌های قائم سرعت و نیز غلظت موضعی در رژیم فوق‌بحرانی ماقبل پرش و نیز در رژیم زیربحرانی مابعد پرش، منجر می‌گردد. ضمناً دقت مدل $k - \varepsilon$ از نوع RNG در برآورد سرعت‌های موضعی نیز بیشتر از غلظت‌های موضعی است (برهمند و موسوی، ۱۳۹۱).

- حسینی و همکاران، مطالعاتی را تحت عنوان شبیه‌سازی عددی رفتار جریان چگال در کانال محدود با انحنای ۱۸۰ درجه با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف آشفتگی با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام دادند. در مطالعات آنها جهت شبیه‌سازی ۲۴ حالت مختلف با تغییر غلظت، شیب بستر و عدد فرود در نظر گرفته شده که از ۶ نوع مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ از نوع RNG، $k - \varepsilon$ از نوع Realizable، $k - \varepsilon$ از نوع Standard، $k - \omega$ از نوع SST، $k - \omega$ از نوع Standard و RSM از نوع Linear و ۴ نوع مش بندی $۸۸ \times ۱۳ \times ۳۸$ ، $۱۰۵ \times ۱۵ \times ۴۵$ ، $۱۴۰ \times ۲۰ \times ۶۰$ و $۱۷۵ \times ۲۵ \times ۷۵$ که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y و z می‌باشد جهت رسیدن به مش و مدل آشفتگی بهینه استفاده شده و در نهایت به

بررسی و مقایسه پروفیل‌های کانتور سرعت، غلظت، چگالی و ... پرداخته شده است. نتایج مطالعات آنها نشان داد که بهینه‌ترین شبکه مش‌بندی، مش $105 \times 15 \times 45$ و بهترین مدل آشفتگی، مدل $k - \varepsilon$ از نوع RNG می‌باشد. همچنین در ارتفاع نزدیک بستر، هر چه غلظت-ها افزایش یابد، چگالی جریان چگال نیز افزایش و سرعت جریان کاهش می‌یابد و با افزایش عدد فرود جریان چگال، سرعت و چگالی جریان چگال در نزدیکی بستر افزایش می‌یابد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲).

- حسینی و همکاران، مطالعاتی را تحت عنوان شبیه‌سازی سه‌بعدی خصوصیات جریان‌های غلیظ در کانال مستقیم سیلاب دشت همراه با شیب عرضی با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام دادند. در مطالعات آنها از ۶ نوع مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ از نوع RNG، $k - \varepsilon$ از نوع Realizable، $k - \varepsilon$ از نوع Standard، $k - \omega$ از نوع SST، $k - \omega$ از نوع Standard و RSM از نوع Linear و ۴ نوع مش بندی $88 \times 13 \times 13 - 88 \times 56 \times 25$ ، $105 \times 15 \times 15$ ، $105 \times 68 \times 30$ ، $140 \times 20 \times 20 - 140 \times 90 \times 40$ و $175 \times 15 \times 10 - 175 \times 112 \times 50$ که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x، y و z می‌باشد جهت رسیدن به مش و مدل آشفتگی بهینه استفاده شده است. نتایج مطالعات آنها نشان داد که بهینه‌ترین شبکه مش-بندی، مش $88 \times 13 \times 13 - 88 \times 56 \times 25$ و بهترین مدل آشفتگی، مدل $k - \varepsilon$ از نوع RNG می‌باشد. همچنین با افزایش عدد فرود جریان چگال، سرعت و ضخامت جریان چگال افزایش می‌یابد و هر چه غلظت‌ها افزایش یابد، چگالی جریان چگال افزایش می‌یابد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۸. مطالعات انجام شده در زمینه جریان غلیظ با استفاده از سایر

مدل‌ها

تاکنون مطالعات بسیاری با استفاده از مدل‌های عددی در زمینه شناخت جریان غلیظ و خصوصیات و رفتار آن در ایران و سایر کشورها صورت پذیرفته است که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است.

- ترابی‌پوده و همکاران، در زمینه تأثیر تغییرات دبی جریان غلیظ، شیب کف و زاویه واگرایی و همگرایی روی سرعت پیشانی جریان غلیظ با استفاده از مدل فیزیکی و مدل سه‌بعدی Flow-3D مطالعاتی را انجام دادند. در این مطالعه ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر را استخراج نمودند، سپس تعداد ۱۴۶ آزمایش را در یک فلوم با طول ۶ متر، عرض ۰/۷۲۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در شیب‌ها و دبی‌های مختلف و در ۳ زاویه واگرایی ۸، ۱۲،۵ و ۲۶ درجه و ۳ زاویه همگرایی ۸، ۱۲،۵ و ۲۶ درجه و مقاطع ثابت با عرض ۰/۲ متر و ۰/۷۲۵ متری انجام دادند. در نهایت مدل سه‌بعدی جریان دوفازی مذکور را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که سرعت بی‌بعد پیشانی جریان غلیظ در واگرایی بیشتر و در همگرایی کمتر از مقاطع ثابت می‌باشد (ترابی‌پوده و همکاران، ۱۳۸۷).

- Afshin et al، مطالعاتی را تحت عنوان آنالیز هیدرودینامیکی جریان غلیظ انجام دادند. آنها در این تحقیق جریان آب-نمک را بصورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نتایج حل عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که شکل پروفیل سرعت به شدت شار شناوری و عدد ریچارسون ورودی وابسته است. همچنین با

افزایش دبی جریان ورودی، حداکثر سرعت و ارتفاع جریان افزایش می‌یابد. با کاهش غلظت ورودی نیز ارتفاع جریان افزایش می‌یابد. آنها در شبیه سازی عددی جریان چگال، از مدل آشفتگی $k - \omega$ استفاده کردند. آنها ترم شناوری را در معادلات مومنتوم وارد کردند و ضریب ثابت را با نتایج تجربی کالیبره نمودند (Afshin et al., 2008).

- ترابی پوده و امامقلی زاده، تغییرات پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ را توسط مدل فیزیکی و مدل سه بعدی Flow-3D مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های آنها در یک فلوم با طول ۶ متر، عرض ۰/۷۲۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متری انجام پذیرفت و به منظور اندازه‌گیری سرعت در بدنه جریان غلیظ از دستگاه سرعت‌سنج لیزری استفاده نمودند. آنها مدل سه بعدی جریان دوفازی مذکور را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج مدل فیزیکی و عددی آنها نشان داد که مدل متلاطم RNG از نتایج بهتری نسبت به مدل‌های $k - \varepsilon$ ، LES و طول اختلاط پرناتل برخوردار می‌باشد (ترابی پوده و امامقلی زاده، ۱۳۸۸).

- گلیج و همکاران، مطالعاتی را تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی ارتفاع نقطه غوطه‌وری و شبیه‌سازی عددی آن با استفاده از مدل Flow-3D انجام دادند. آنها در تمامی آزمایش‌های خود ارتفاع نقطه غوطه‌وری را در دبی‌های مختلف از سیال غلیظ و تفاوت دانسیته ۶، ۹، ۱۳ و ۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب برای ۳ شیب ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد اندازه‌گیری کردند. سپس با استفاده از مدل Flow-3D ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شرایط آزمایشگاهی موجود را شبیه‌سازی کردند. بررسی مقایسه‌ای آنها نشان داد که عمق نقطه غوطه‌وری برآورد شده با استفاده از Flow-3D نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر است به گونه‌ای که بطور متوسط برای شیب ۱۲ درصد مدل ریاضی حدود ۳۰ درصد نتایج را بیشتر پیش‌بینی می‌نماید و این در

حالی است که برای کلیه شیب‌ها بطور متوسط نتایج حاصل از مدل، ۲۷ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد (گلیچ و همکاران، ۱۳۹۰).

- میرزازاده و همکاران، مطالعاتی را تحت عنوان مدل‌سازی عددی جریان رسوبی غلیظ در کانال با استفاده از Flow-3D انجام دادند. آنها جهت صحت‌سنجی پارامترهای بدست آمده از این مدل عددی، از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی برای پارامترهای سرعت جریان، خطای جزئی با نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌داد که بخشی از این خطاهای عددی مربوط به محدودیت توان محاسباتی نرم‌افزار با افزایش تعداد سلولها بود (میرزازاده و همکاران، ۱۳۹۳).

۹-۲. جمع بندی

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه جریان غلیظ و شناخت آن انجام پذیرفته است که اهمیت شناخت رفتار جریان غلیظ را نشان می‌دهد.

مطالعاتی که در زمینه جریان غلیظ و شناخت آن با استفاده از مدل عددی Fluent انجام پذیرفته است نشان داد که بهترین مدل آشفتگی مدل $k - \varepsilon$ از نوع RNG می‌باشد. همچنین دقت مدل $k - \varepsilon$ از نوع RNG در برآورد سرعت‌های موضعی بیشتر از غلظت‌های موضعی است. همچنین سرعت، ضخامت و چگالی جریان غلیظ با افزایش عدد فرود جریان غلیظ افزایش می‌یابد و هر چه غلظت‌ها افزایش یابد، چگالی جریان غلیظ افزایش و سرعت جریان غلیظ کاهش می‌یابد.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱. مقدمه

در این تحقیق جهت حل معادلات متوسط-رینولدزی ناویر استوکس در جریان چگال از یک بسته نرم‌افزاری (نرم‌افزار Fluent) که مبنای آن بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی است استفاده خواهد شد. به وسیله این نرم‌افزار از روش احجام محدود جهت حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم استفاده خواهد شد. با استفاده از این روش میدان جریان به تعدادی حجم کنترل تقسیم خواهد شد و معادلات دیفرانسیلی حاکم بر روی هر حجم کنترل را با استفاده از انتگرال‌گیری به یک سری معادلات جبری گسسته تبدیل کرده و سپس معادلات به فرم ساده‌تری حل خواهند شد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین به منظور اجرای مدل از نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) که در یک فلوم آزمایشگاهی با دیواره‌های پلکسی گلاس با شیب کف قابل تغییر، عرض ۰/۲۵ متر، عمق ۰/۵ متر و طول ۱۰ متر (که در آن ۲ متر ابتدایی ماده غلیظ و ۸ متر انتهایی کانال مورد آزمایش می‌باشد) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز بدست آمده است استفاده خواهد شد (حقی‌آبی و همکاران، ۱۳۸۶).

۳-۲. گام‌های اجرای یک مدل عددی

گام اول اجرای مدل عددی، تعیین فضای محاسباتی می‌باشد.
گام دوم، تعیین معادلات حاکم بر جریان می‌باشد که شامل معادلات ناویر استوکس، انتقال حرارت و ... می‌باشد.

گام سوم، ساخت شبکه جریان و گسسته سازی شبکه جریان در فضای محاسباتی می‌باشد.

گام چهارم، تعیین شرایط مرزی در فضای محاسباتی می‌باشد.

گام پنجم، گسسته سازی معادلات در فضای محاسباتی می‌باشد.

گام ششم، وارد کردن مقادیر و شرایط اولیه می‌باشد.

گام هفتم، حل دستگاه معادلات حاکم بر جریان در فضای محاسباتی می باشد.

گام هشتم و آخر، تعیین مقدار متغیر در هر نقطه از فضای محاسباتی می باشد.

برای انجام گام های اول و دوم اجرای مدل عددی از خود صورت مسئله استفاده می شود.

برای انجام گام های سوم و چهارم اجرای مدل عددی از یک نرم افزار پیش محاسبه گر استفاده می شود

که در این تحقیق از نرم افزاری به نام Gambit استفاده خواهد شد.

برای انجام گام های پنجم تا هفتم اجرای مدل عددی از یک نرم افزار محاسبه گر استفاده می شود که در

این تحقیق از نرم افزاری به نام Fluent استفاده خواهد شد.

برای انجام گام هشتم و پایانی اجرای مدل عددی نیز از یک نرم افزار پس محاسبه گر استفاده می شود

که در این تحقیق از نرم افزاری به نام Tecplot استفاده خواهد شد.

۳-۳. نرم افزار Gambit

نرم افزار Gambit یک نرم افزار پیش محاسبه گر می باشد که در این تحقیق برای ترسیم شبکه جریان و

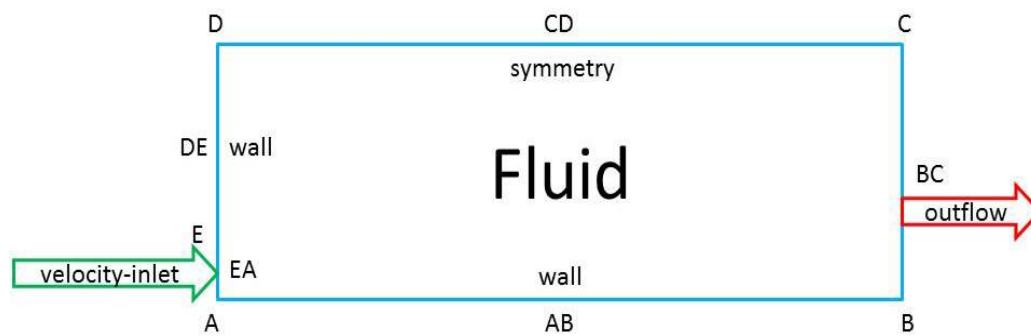
مشخص نمودن شرایط مرزی از آن استفاده شده است. در این تحقیق فلومی با طول ۸ متر، عرض

۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر وجود دارد که به دلیل اینکه عرض فلوم در طول فلوم ثابت می باشد و

تأثیری در مقادیر متغیر مورد نظر ندارد لذا به منظور ساده تر نمودن محاسبات و کاهش حجم

محاسبات از مدل سازی آن صرف نظر شده و مدل دوبعدی با طول ۸ متر و ارتفاع ۰/۵ متر اجرا شده

است که در شکل (۱-۳) آن را مشاهده می نمایید.



شکل (۱-۳) نمایی از کانال مورد نظر در نرم افزار Gambit

در شکل (۱-۳) شرایط مرزی بصورت زیر معرفی شده است:

(۱) ورودی (Input):

برای شرط مرزی ورودی از velocity-inlet یا سرعت ورودی استفاده شده است که در شکل (۳-۱)

(۱) از دریچه EA که دارای ارتفاع 0.25 متر می باشد وارد کانال می شود معرف ورودی می باشد.

(۲) خروجی (Output):

برای شرط مرزی خروجی از outflow یا دبی 100 درصد خروجی استفاده شده است که در شکل

(۳-۱) از قسمت BC که دارای ارتفاع 0.5 متر می باشد از کانال خارج می شود معرف خروجی می باشد.

(۳) دیوار (Wall):

برای دیواره داخلی و خارجی که از جنس پلکسی گلاس می باشد شرط مرزی wall در نظر گرفته

می شود که در شکل (۳-۱) خطوط AB که دارای طول 8 متر و DE که دارای ارتفاع 0.475 متر می -

باشد معرف این دیواره ها می باشند.

۴) سطح (Surface):

برای سطح آب، شرط مرزی symmetry قرار داده شده است که در آن سرعت عمودی در سطح آب، صفر در نظر گرفته می‌شود که در شکل (۳-۱) خط CD که دارای طول ۸ متر می‌باشد معرف سطح آب می‌باشد.

ضمن اینکه نوع گره‌های بکار برده شده چهارضلعی و شبکه از نوع ساختار یافته می‌باشد و انتخاب این نوع مش بندی کمک می‌کند انحنا گره‌ها در جهت انحنا جریان بوده و در نتیجه پخشودگی عددی به مقدار حداقل برسد. کل فضای محاسباتی نیز بعنوان سیال (Fluid) معرفی شده است.

۳-۴. نرم‌افزار Fluent

نرم‌افزار Fluent به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است و یکی از نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی در جهان می‌باشد. بطور کلی این نرم‌افزار، دارای مدل‌های آشفتگی متنوع‌تری نسبت به سایر نرم‌افزارها می‌باشد و از این منظر می‌تواند نسبت به سایر نرم‌افزارها برتری داشته باشد. علاوه بر این، نرم‌افزار مذکور می‌تواند جریان را در شبکه‌های بی‌سازمان و باسازمان برای هندسه‌های پیچیده شبیه‌سازی و تحلیل نماید. مزیت مهم دیگر این نرم‌افزار، منوی Adapt آن می‌باشد که به کاربر اجازه تطبیق و بهبود شبکه مش‌بندی را می‌دهد (برهمند و موسوی، ۱۳۹۱).

۳-۵. مدل‌های تک فازی یا چندفازی در نرم‌افزار Fluent

در نرم‌افزار Fluent جریان‌ها به دو دسته تک‌فازی و چندفازی تقسیم می‌شوند که برای حالت چندفازی انواع مختلف مدل‌ها وجود دارند که به سه زیرشاخه Volume of Fluid، Mixture و Eulerian تقسیم می‌شوند که بنا به نیاز مسئله از هر کدام استفاده می‌شود.

مدل چندفازی Volume of Fluid هنگامی استفاده می‌شود که هدف اندازه‌گیری و مشاهده مرز بین فازها باشد در حالی که اگر مرز بین فازها چندان اهمیتی نداشته باشد می‌توان از هر کدام از مدل‌های Mixture و Eulerian استفاده کرد.

ضمن اینکه اگر جریان چندفازی باشد، دارای یک فاز اصلی (primary-phase) و یک یا چند فاز ثانویه (secondary-phase) می‌باشد.

۳-۶. مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Fluent

نرم‌افزار Fluent برای اجرا و شبیه‌سازی الگوی سه‌بعدی و دوبعدی جریان در حالت دائم (Steady) یا غیردائم (Unsteady) می‌باشد. مدل‌های مختلف آشفتگی در این نرم‌افزار وجود دارند که هر یک از این مدل‌ها دارای انشعابات می‌باشند.

مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Fluent به سه بخش k -epsilon، k -omega و Reynolds Stress Model (RSM) تقسیم می‌شوند که در زیر به تفصیل به هر کدام پرداخته خواهد شد.

الف) مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای k -epsilon موجود در نرم‌افزار خود به سه انشعاب Standard، RNG و Realizable تقسیم می‌شود.

مدل RNG که از جدیدترین مدل‌های آشفتگی بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز است، از بسط و توسعه مدل k -epsilon مبتنی بر روش تجدید نرمال‌سازی گروهی RNG بدست آمده است، بصورتیکه ثابت‌هایی که بطور تجربی در معادله استاندارد k -epsilon بدست آمده‌اند، بطور صریح در معادله RNG استخراج شده‌اند. عموماً مدل RNG قابلیت اجرایی وسیع‌تری از مدل استاندارد k -epsilon دارد، خصوصاً برای توصیف جریان‌های با شدت تلاطمی کمتر و جریان‌های که نواحی برشی قوی‌تری دارند از دقت بالاتری برخوردار است. مدل RNG در مقایسه با معادله استاندارد k -epsilon دارای یک ترم ϵ اضافی است که بطور معنی‌داری دقت آن را برای جریان‌های پیچیده افزایش می‌دهد.

تئوری RNG یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی اشتقاقی را برای ویسکوزیته مؤثر و یک فرمول تحلیلی را برای اعداد پرانتل تلاطمی فراهم می‌کند. این خصوصیات مدل RNG را دقیق‌تر می‌کند و برای کلاس وسیع‌تری از جریان‌ها در مقابل مدل استاندارد k-epsilon قابل اعتمادتر می‌کند. در مدل k-epsilon استاندارد معادلاتی که تلاطم را مدل می‌کنند شامل دو معادله می‌باشد. معادله اول که معادله انرژی جنبشی تلاطمی است، به شکل معادله (۱-۳) می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x k)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y k)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z k)}{\partial z} = \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t - \rho \varepsilon$$

معادله (۱-۳) که نرخ افت انرژی تلاطمی نامیده می‌شود بصورت معادلات (۲-۳) و (۳-۳) می‌باشد. ترم $\emptyset$ موجود در روابط مربوط به تنش برشی بوده و مقادیر پیش‌فرض در مدل RNG برای ثابت‌های بکار گرفته شده در معادلات، در جدول (۱-۳) آورده شده است (Launder & Spalding, 1974).

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z \varepsilon)}{\partial z} = \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot \mu_t \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \emptyset + C_{2\varepsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$C_{1\varepsilon} = 1/42 - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_\infty})}{1+\beta\eta^3} \quad (3-3)$$

جدول (۱-۳) ضرایب ثابت مدل RNG

β	C_2	C_μ	σ_k	σ_t	σ_ε	η_∞
۰/۱۲	۱/۶۸	۰/۰۸۵	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۷۲	۴/۳۸

ب) مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای k-omega موجود در نرم‌افزار خود به دو انشعاب Standard و SST تقسیم می‌شود.

ج) مدل‌های آشفتگی پنج معادله‌ای تنش رینولدزی Reynolds Stress Model(RSM) یکی دیگر از سری مدل‌های RANS یا متوسط گیری زمانی موجود در نرم‌افزار می‌باشد که به سه انشعاب Linear

۷-۳. شرایط آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق جهت مدل سازی و صحت‌سنجی از نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی-هیدرولیکی حقی-آبی و همکاران (۱۳۸۶) استفاده شده است که در آن طول فلوم مورد آزمایش ۸ متر، عرض فلوم ۰/۲۵ متر (که به دلیل مؤثر نبودن در نتایج مورد بحث و همچنین کاهش حجم محاسبات از آن صرف نظر شده است) و ارتفاع فلوم ۰/۵ متر که ارتفاع دریچه ورودی جریان غلیظ به فلوم ۰/۰۲۵ متر می-باشد. در این مدل جنس دیواره‌های فلوم از نوع پلکسی گلاس بوده و در ۴ شیب کف فلوم صفر، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۹ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ و سرعت جریان غلیظ اولیه 0.2 m/s می‌باشد.

همچنین به ترتیب ۴ نوع دانسیته آب ساکن (1001 kg/m^3 ، 1001.1 ، 1001.2 و 1001.7) با ۴ نوع ویسکوزیته آب ساکن (0.0010058 kg/m.s ، 0.0010059 ، 0.001005 و 0.0010055) و به ترتیب ۴ نوع دانسیته جریان چگال ورودی (1005.5 kg/m^3 ، 1005.8 ، 1006.6 و 1004) با ۴ نوع ویسکوزیته جریان چگال ورودی (0.00108 kg/m.s ، 0.001083 ، 0.0010812 و 0.0010784) در این آزمایش‌ها استفاده شده است.

۸-۳. اجرای مدل

در مدل سازی حاضر از نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) که در بخش (۷-۳) آمده، استفاده شده است. در این مدل سازی جریان غیردائمی در نظر گرفته شده است، بدین صورت که در زمان صفر، آب درون کانال ساکن و با غلظت چگال صفر می‌باشد. با شروع حل، جریان چگال ورودی

از طریق مرز ورودی به داخل محدوده حل (محدوده آب ساکن) وارد می‌شود و با گام‌های زمانی که توسط کاربر تعیین می‌گردد، حل مساله پیشروی می‌کند. همچنین جریان چندفازی می‌باشد که از مدل چندفازی Eulerian استفاده شده است.

در این مدل ۵ نوع مش بندی با تعداد تقسیمات ۱۰۰×۴۰ ، ۱۴۰×۸۰ ، ۲۲۰×۱۶۰ ، ۳۰۰×۲۴۰ و ۳۴۰×۲۸۰ که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y می‌باشد، استفاده شده است.

لازم به ذکر است که از ۵ نوع مدل آشفتگی (مدل k -epsilon، Standard، RNG و Realizable) و مدل RSM (LPS و QPS) استفاده شده است.

فصل چهارم

بحث و نتایج

۴-۱. مقدمه

پس از جمع آوری اطلاعات از نتایج مدل عددی، بر روی پارامترهای مختلف مؤثر بر مدل سازی جریان غلیظ و به منظور بررسی اهداف تحقیق، آنالیزهای متفاوتی انجام شد که نتایج مربوط به آن به تفصیل در این بخش ارائه گردید.

۴-۲. شرایط اولیه برای مدل سازی عددی

به منظور انجام مدل سازی نیاز به معرفی شرایط اولیه به مدل می‌باشد که در جدول (۴-۱) شرایط اولیه مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول (۴-۱) شرایط اولیه برای مدل سازی عددی

شماره	شیب	ρ_W (kg/m^3)	ϑ_W ($kg/m.s$)	ρ_D (kg/m^3)	ϑ_D ($kg/m.s$)	$V_{1.6m,16s}$ (m/s)	$V_{3.6m,34s}$ (m/s)	$V_{5.6m,54s}$ (m/s)
۱	۰	۱۰۰۱	۰/۰۰۱۰۰۵۸	۱۰۰۵/۵	۰/۰۰۱۰۸	۰/۰۵۸۵	۰/۰۷۴۴	۰/۰۶۲۳
۲	۰/۰۱	۱۰۰۱/۱	۰/۰۰۱۰۰۵۹	۱۰۰۵/۸	۰/۰۰۱۰۸۰۳	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۴۸	۰/۰۶۷۲
۳	۰/۰۲	۱۰۰۰/۲	۰/۰۰۱۰۰۵	۱۰۰۶/۶	۰/۰۰۱۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۷۷۴	۰/۰۸۴۵
۴	۰/۰۲۹	۱۰۰۰/۷	۰/۰۰۱۰۰۵۵	۱۰۰۴	۰/۰۰۱۰۷۸۴	۰/۰۵۴۷	۰/۰۶۱۴	۰/۰۵۹۳

در جدول فوق ρ_W چگالی آب ساکن، ϑ_W ویسکوزیته آب ساکن، ρ_D چگالی جریان غلیظ ورودی، ϑ_D ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی، $V_{1.6m,16s}$ سرعت متوسط در فاصله طولی ۱/۶ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه از شروع آزمایش، $V_{3.6m,34s}$ سرعت متوسط در فاصله طولی ۳/۶ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه از شروع آزمایش و $V_{5.6m,54s}$ سرعت متوسط در فاصله طولی ۵/۶ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه از شروع آزمایش می‌باشد.

عوامل متعددی بر نتایج مدل سازی تأثیر گذار هستند که از جمله آنها می‌توان مش بندی و مدل‌های آشفتگی را نام برد که در این قسمت ابتدا به بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی پرداخته

شده و بهینه‌ترین مش انتخاب شده، سپس به بررسی تأثیر مدل‌های آشفته‌گی بر نتایج مدل سازی پرداخته شده و بهترین مدل آشفته‌گی نیز انتخاب شد.

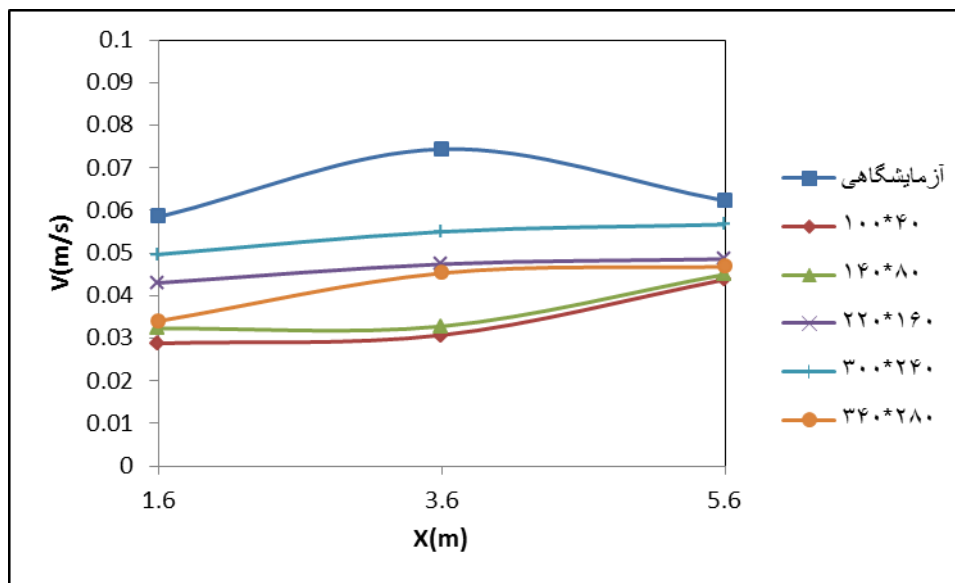
۴-۳. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی

از آنجایی که در مدل سازی با مدل‌های عددی مش بندی شبکه محاسباتی می‌تواند روی نتایج مدل تأثیر بگذارد در این قسمت به بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا در شیب صفر درصد ۱۲ نوع مش بندی مختلف استفاده شد که با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی‌ها، به منظور کاهش حجم محاسبات ۵ نوع مش بندی با تعداد تقسیمات 100×40 ، 140×80 ، 220×160 ، 300×240 و 340×280 که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y می‌باشد جهت استفاده در همه مدل سازی‌ها به منظور بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی استفاده شده است. همچنین جریان غیردائمی چندفازی از نوع Eulerian در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۱. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب صفر درصد

آزمایشات در شیب صفر درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1001 kg/m^3$ ، ویسکوزیته آب ساکن $0.001005 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1005 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.00108 kg/m.s$ بوده است. به منظور بررسی تأثیر مش‌های مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله

طولی ۳/۶ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی ۵/۶ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۱-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۱-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد

همان طوری که در شکل (۱-۴) نشان داده شده است مش ۳۰۰×۲۴۰ بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش تعداد تقسیمات مش بندی، مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه‌ترین مش بندی (مش ۳۰۰×۲۴۰) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.

همچنین در جدول (۲-۴) درصد خطای مش بندی‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۲-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد

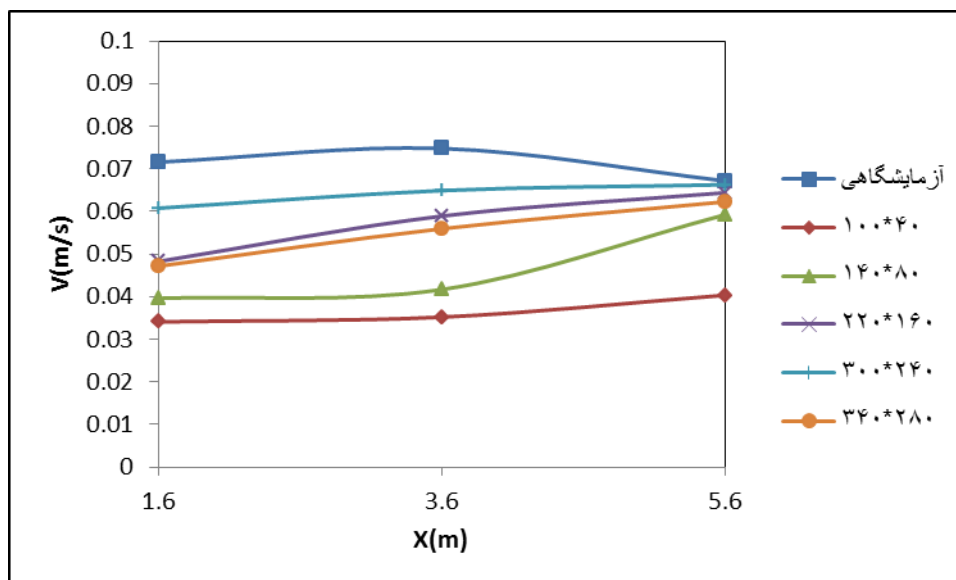
ابعاد مش	۱۰۰×۴۰	۱۴۰×۸۰	۲۲۰×۱۶۰	۳۰۰×۲۴۰	۳۴۰×۲۸۰
$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵
$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$	۰/۰۲۸۸	۰/۰۳۲۳	۰/۰۴۳۰	۰/۰۴۹۷	۰/۰۳۴۱
درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۵۱	۴۵	۲۶	۱۵	۴۲
$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴
$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$	۰/۰۳۰۸	۰/۰۳۲۸	۰/۰۴۷۴	۰/۰۵۵۰	۰/۰۴۵۳
درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۵۹	۵۶	۳۶	۲۶	۳۹
$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳
$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$	۰/۰۴۳۸	۰/۰۴۵۰	۰/۰۴۸۶	۰/۰۵۶۷	۰/۰۴۶۸
درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۳۰	۲۸	۲۲	۹	۲۵
میانگین درصد خطای سرعت	۴۶	۴۳	۲۸	۱۷	۳۵
مدل مش بندی قابل قبول	۳۰۰×۲۴۰				

همان طوری که در جدول (۲-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مش‌های ۱۰۰×۴۰، ۱۴۰×۸۰، ۲۲۰×۱۶۰، ۳۰۰×۲۴۰ و ۳۴۰×۲۸۰ متوسط خطای مش بندی ۴۶، ۴۳، ۲۸، ۱۷ و ۳۵ درصد بوده است که بدین ترتیب مش ۳۰۰×۲۴۰ دارای کمترین خطای مش بندی است، لذا بهینه ترین مش، مش ۳۰۰×۲۴۰ می‌باشد. از دلایل خطای بیشتر مش ۳۴۰×۲۸۰ نسبت به مش ۳۰۰×۲۴۰ با وجود تعداد تقسیمات بیشتر، می‌توان خطای ناشی از حجم بالای محاسبات دانست. بنابراین بطور کلی می‌توان در مورد انتخاب تعداد مش‌های لازم جهت شبکه محدود مورد نظر به مقدار ۳۰۰×۲۴۰ اکتفا کرد. بعد از مش انتخابی، مش ۲۲۰×۱۶۰ در اولویت بعدی قرار دارد. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می‌توان از مش ۳۴۰×۲۸۰، مش ۱۴۰×۸۰ و مش ۱۰۰×۴۰ چشم پوشی کرد.

۲-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۱ درصد

آزمایشات در شیب ۱ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1001 kg/m^3$ و ویسکوزیته آب ساکن $0.0010059 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1005 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.001083 kg/m.s$ بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مش‌های مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریاچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریاچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریاچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۲-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۲-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۱ درصد

همان طوری که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است مش 300×240 بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) می باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش تعداد تقسیمات مش بندی، مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه ترین مش بندی (مش 300×240) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.

همچنین در جدول (۳-۴) درصد خطای مش بندی های مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۳-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۱ درصد

ابعاد مش	100×40	140×80	220×160	300×240	340×280
$V_{1.6m,16s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶
$V_{1.6m,16s}^{model} (m/s)$	۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۹۶	۰/۰۴۸۳	۰/۰۶۰۸	۰/۰۴۷۲
درصد خطای سرعت در $1/6$ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۵۲	۴۵	۳۳	۱۵	۳۴
$V_{3.6m,34s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸
$V_{3.6m,34s}^{model} (m/s)$	۰/۰۳۵۲	۰/۰۴۱۷	۰/۰۵۸۹	۰/۰۶۴۹	۰/۰۵۶۰
درصد خطای سرعت در $3/6$ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۵۳	۴۴	۲۱	۱۳	۲۵
$V_{5.6m,54s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲
$V_{5.6m,54s}^{model} (m/s)$	۰/۰۴۰۴	۰/۰۵۹۲	۰/۰۶۴۴	۰/۰۶۶۳	۰/۰۶۲۳
درصد خطای سرعت در $5/6$ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۴۰	۱۲	۴	۱	۷
میانگین درصد خطای سرعت	۴۸	۳۴	۱۹	۱۰	۲۲
مدل مش بندی قابل قبول	300×240				

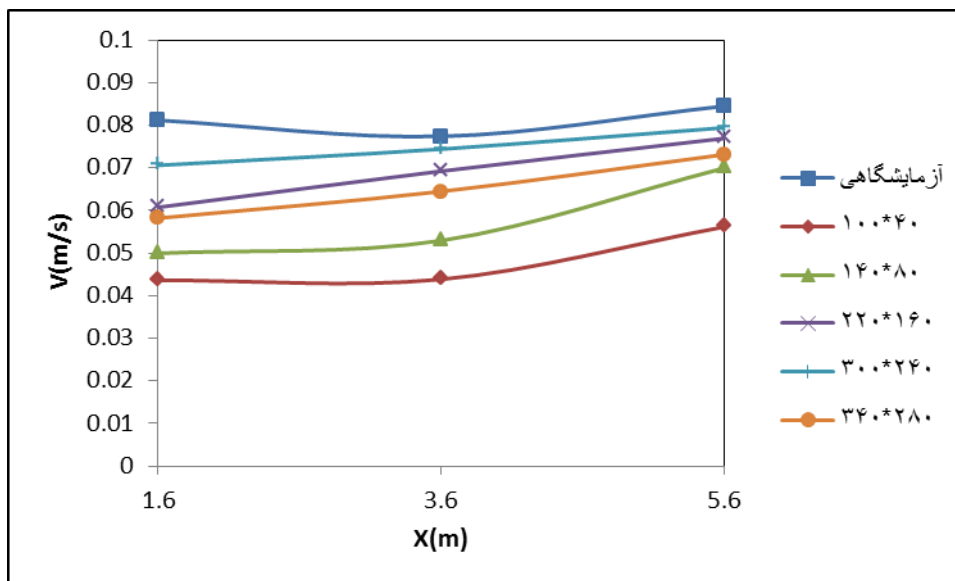
همان طوری که در جدول (۳-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مش های 100×40 ، 140×80 ، 220×160 ، 300×240 و 340×280 متوسط خطای مش بندی ۴۸، ۳۴، ۱۹، ۱۰ و ۲۲ درصد بوده

است که بدین ترتیب مش 300×240 دارای کمترین خطای مش بندی است، لذا بهینه ترین مش، مش 300×240 می باشد. از دلایل خطای بیشتر مش 340×280 نسبت به مش 300×240 با وجود تعداد تقسیمات بیشتر، می توان خطای ناشی از حجم بالای محاسبات دانست. بنابراین بطور کلی می توان در مورد انتخاب تعداد مش های لازم جهت شبکه محدود مورد نظر به مقدار 300×240 اکتفا کرد. بعد از مش انتخابی، به ترتیب مش 220×160 و مش 340×280 در اولویت بعدی قرار دارند. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می توان از مش 140×80 و مش 100×40 چشم پوشی کرد.

۳-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲ درصد

آزمایشات در شیب ۲ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1000 kg/m^3$ و ویسکوزیته آب ساکن $0.001005 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1006 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.0010812 kg/m.s$ بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مش های مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۳-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۳-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲ درصد

همان طوری که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است مش 300×240 بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش تعداد تقسیمات مش بندی، مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه‌ترین مش بندی (مش 300×240) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.

همچنین در جدول (۴-۴) درصد خطای مش بندی‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۴-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲ درصد

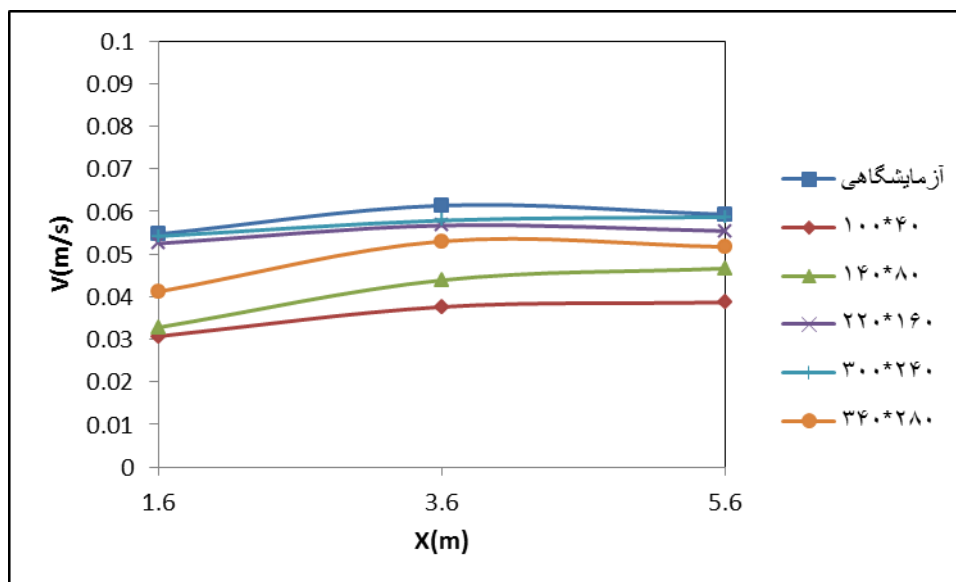
۳۴۰×۲۸۰	۳۰۰×۲۴۰	۲۲۰×۱۶۰	۱۴۰×۸۰	۱۰۰×۴۰	ابعاد مش
۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$
۰/۰۵۸۲	۰/۰۷۰۶	۰/۰۶۰۷	۰/۰۴۹۹	۰/۰۴۳۶	$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$
۲۸	۱۳	۲۵	۳۸	۴۶	درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه
۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$
۰/۰۶۴۵	۰/۰۷۴۴	۰/۰۶۹۲	۰/۰۵۲۹	۰/۰۴۳۸	$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$
۱۷	۴	۱۱	۳۲	۴۳	درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه
۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$
۰/۰۷۳۱	۰/۰۷۹۴	۰/۰۷۶۹	۰/۰۶۹۹	۰/۰۵۶۱	$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$
۱۳	۶	۹	۱۷	۳۴	درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه
۲۰	۸	۱۵	۲۹	۴۱	میانگین درصد خطای سرعت
۳۰۰×۲۴۰			مدل مش بندی قابل قبول		

همان طوری که در جدول (۴-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مش‌های ۱۰۰×۴۰، ۱۴۰×۸۰، ۲۲۰×۱۶۰، ۳۰۰×۲۴۰ و ۳۴۰×۲۸۰ متوسط خطای مش بندی ۴۱، ۲۹، ۱۵، ۸ و ۲۰ درصد بوده است که بدین ترتیب مش ۳۰۰×۲۴۰ دارای کمترین خطای مش بندی است، لذا بهینه ترین مش، مش ۳۰۰×۲۴۰ می‌باشد. از دلایل خطای بیشتر مش ۳۴۰×۲۸۰ نسبت به مش ۳۰۰×۲۴۰ با وجود تعداد تقسیمات بیشتر، می‌توان خطای ناشی از حجم بالای محاسبات دانست. بنابراین بطور کلی می‌توان در مورد انتخاب تعداد مش‌های لازم جهت شبکه محدود مورد نظر به مقدار ۳۰۰×۲۴۰ اکتفا کرد. بعد از مش انتخابی، به ترتیب مش ۲۲۰×۱۶۰، مش ۳۴۰×۲۸۰ و مش ۱۴۰×۸۰ در اولویت بعدی قرار دارند. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می‌توان از مش ۱۰۰×۴۰ چشم پوشی کرد.

۴-۳-۴. بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲/۹ درصد

آزمایشات در شیب ۲/۹ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1000/7 kg/m^3$ ، ویسکوزیته آب ساکن $0.0010055 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1004 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.0010784 kg/m.s$ بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مش‌های مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۴-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۴-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب ۲/۹ درصد

همان طوری که در شکل (۴-۴) نشان داده شده است مش 300×240 بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) می باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش تعداد تقسیمات مش بندی، مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه ترین مش بندی (مش 300×240) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.

همچنین در جدول (۴-۵) درصد خطای مش بندی های مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۴-۵) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقی آبی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب $2/9$ درصد

ابعاد مش	100×40	140×80	220×160	300×240	340×280
$V_{1.6m,16s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷
$V_{1.6m,16s}^{model} (m/s)$	۰/۰۳۰۷	۰/۰۳۲۸	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۴۲	۰/۰۴۱۲
درصد خطای سرعت در $1/6$ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۴۴	۴۰	۴	۱	۲۵
$V_{3.6m,34s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴
$V_{3.6m,34s}^{model} (m/s)$	۰/۰۳۷۶	۰/۰۴۳۹	۰/۰۵۶۷	۰/۰۵۷۹	۰/۰۵۳۰
درصد خطای سرعت در $3/6$ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۳۹	۲۹	۸	۶	۱۴
$V_{5.6m,54s}^{exp} (m/s)$	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳
$V_{5.6m,54s}^{model} (m/s)$	۰/۰۳۸۶	۰/۰۴۶۶	۰/۰۵۵۴	۰/۰۵۸۷	۰/۰۵۱۷
درصد خطای سرعت در $5/6$ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۳۵	۲۱	۷	۱	۱۳
میانگین درصد خطای سرعت	۳۹	۳۰	۶	۳	۱۷
مدل مش بندی قابل قبول	300×240				

همان طوری که در جدول (۴-۵) نشان داده شده است به ترتیب برای مش های 100×40 ، 140×80 ، 220×160 ، 300×240 و 340×280 متوسط خطای مش بندی ۳۹، ۳۰، ۶، ۳ و ۱۷ درصد بوده است

که بدین ترتیب مش 300×240 دارای کمترین خطای مش بندی است، لذا بهینه ترین مش، مش 300×240 می باشد. از دلایل خطای بیشتر مش 340×280 نسبت به مش 300×240 با وجود تعداد تقسیمات بیشتر، می توان خطای ناشی از حجم بالای محاسبات دانست.

بنابراین بطور کلی می توان در مورد انتخاب تعداد مش های لازم جهت شبکه محدود مورد نظر به مقدار 300×240 اکتفا کرد. بعد از مش انتخابی، به ترتیب مش 220×160 ، مش 340×280 و مش 140×80 در اولویت بعدی قرار دارند. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می توان از مش 100×40 چشم پوشی کرد.

۵-۳-۴. جمع بندی

با توجه به مدل سازی های انجام شده بطور کلی می توان نتیجه گرفت که مش 300×240 بهینه ترین مش است. از دلایل خطای بیشتر مش 340×280 نسبت به مش 300×240 با وجود تعداد تقسیمات بیشتر، می توان خطای ناشی از حجم بالای محاسبات دانست.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش تعداد تقسیمات مش بندی، مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه ترین مش بندی (مش 300×240) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.

همچنین هر چه شیب بیشتر باشد درصد خطای سرعت متوسط جریان کمتر است.

۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفته گی بر نتایج مدل سازی

از آنجایی که در مدل سازی با مدل های عددی نوع مدل آشفته گی می تواند روی نتایج مدل تأثیر بگذارد در این قسمت به بررسی تأثیر نوع مدل آشفته گی بر نتایج مدل سازی پرداخته شده است.

در همه مدل سازی‌ها جهت بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی، ۵ مدل آشفتگی که شامل مدل $k\text{-epsilon(Realizable)}$ ، $k\text{-epsilon(RNG)}$ ، $k\text{-epsilon(Standard)}$ ، $RSM(LPS)$ و $RSM(QPS)$ می‌باشد در نظر گرفته شده است.

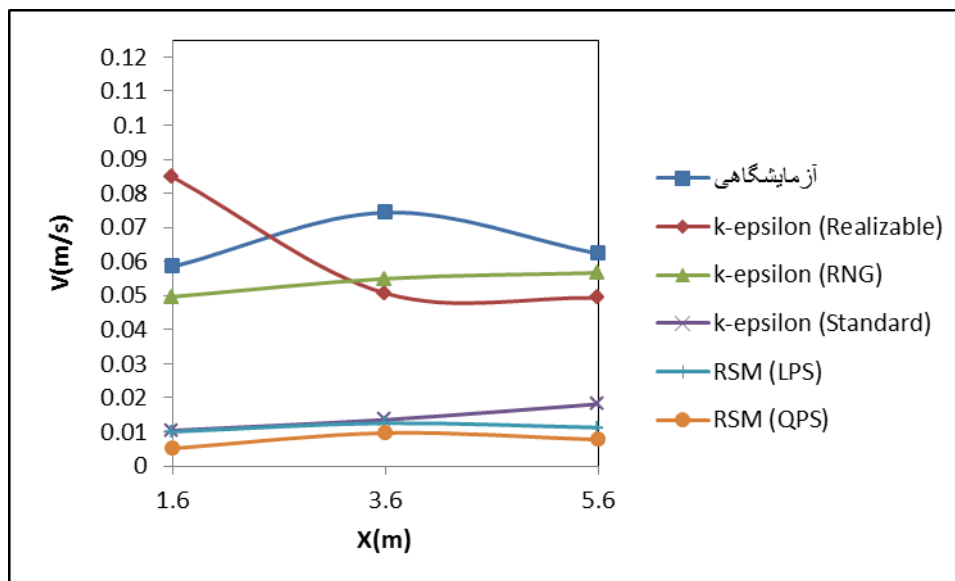
همچنین در مدل سازی جریان غیردائمی چندفازی از نوع Eulerian در نظر گرفته شده است و بهینه‌ترین مش بندی که در آن تعداد تقسیمات 300×240 می‌باشد در نظر گرفته شده است.

۴-۴-۱. بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی در شیب صفر

درصد

آزمایشات در شیب صفر درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ و سرعت جریان غلیظ اولیه 0.2 m/s انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن 1001 kg/m^3 ، ویسکوزیته آب ساکن 0.0010058 kg/m.s ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1005/5 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی 0.00108 kg/m.s بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۴-۵) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۴-۵) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب صفر درصد

همان طوری که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است مدل k-epsilon از نوع RNG بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل k-epsilon از نوع Realizable کاهش می‌یابد، در مدل‌های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایش می‌یابد و در مدل‌های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین در جدول (۴-۶) درصد خطای مدل‌های آشفتگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۴-۶) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل‌های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب صفر درصد

مدل آشفتگی	k-epsilon (Realizable)	k-epsilon (RNG)	k-epsilon (Standard)	RSM (LPS)	RSM (QPS)
$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵
$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$	۰/۰۸۴۸	۰/۰۴۹۷	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۵۲
درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۴۵	۱۵	۸۲	۸۳	۹۱
$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۷۴۴
$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$	۰/۰۵۰۷	۰/۰۵۵۰	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۲۶	۰/۰۰۹۷
درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۳۲	۲۶	۸۲	۸۳	۸۷
$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳	۰/۰۶۲۳
$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$	۰/۰۴۹۴	۰/۰۵۶۷	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۷۷
درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۲۱	۹	۷۱	۸۲	۸۸
میانگین درصد خطای سرعت	۳۳	۱۷	۷۸	۸۳	۸۹
مدل آشفتگی قابل قبول			k-epsilon (RNG)		

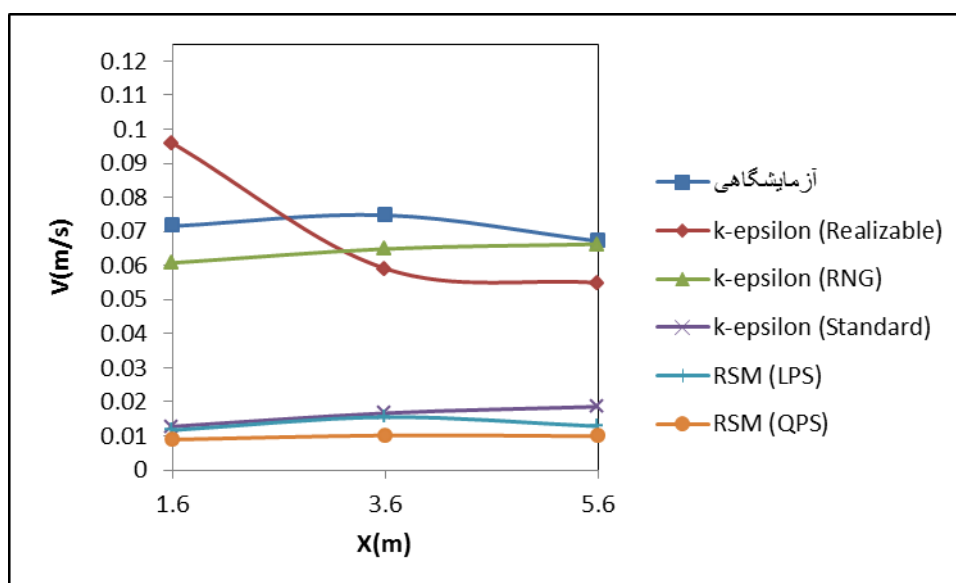
همان طوری که در جدول (۴-۶) نشان داده شده است به ترتیب برای مدل‌های آشفتگی k-epsilon از نوع Realizable، k-epsilon از نوع RNG، k-epsilon از نوع Standard، RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS متوسط خطای مدل آشفتگی ۳۳، ۱۷، ۷۸، ۸۳ و ۸۹ درصد بوده است که بدین ترتیب مدل k-epsilon از نوع RNG دارای کمترین خطا می‌باشد، لذا بهینه ترین مدل آشفتگی، مدل k-epsilon از نوع RNG می‌باشد.

بنابراین بطور کلی می‌توان مدل آشفتگی k-epsilon از نوع RNG را جهت شبکه محدود مورد نظر در نظر گرفت. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می‌توان از مدل k-epsilon از نوع Realizable، مدل k-epsilon از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS چشم پوشی کرد.

۲-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی در شیب ۱ درصد

آزمایشات در شیب ۱ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ و سرعت جریان غلیظ اولیه 0.2 m/s انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن 1001 kg/m^3 و ویسکوزیته آب ساکن 0.0010059 kg/m.s ، چگالی جریان غلیظ ورودی 1005.8 kg/m^3 و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی 0.0010803 kg/m.s بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریاچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریاچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریاچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۶-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۶-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۱ درصد

همان طوری که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است مدل k-epsilon از نوع RNG بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل k-epsilon از نوع Realizable کاهش می‌یابد، در مدل های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایش می‌یابد و در مدل های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین در جدول (۴-۷) درصد خطای مدل های آشفتگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۴-۷) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل های آشفتگی مختلف در بهینه ترین مش بندی و شیب ۱ درصد

مدل آشفتگی	k-epsilon (Realizable)	k-epsilon (RNG)	k-epsilon (Standard)	RSM (LPS)	RSM (QPS)
$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۷۱۶
$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$	۰/۰۹۵۹	۰/۰۶۰۸	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۱۷	۰/۰۰۹۰
درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۳۴	۱۵	۸۲	۸۴	۸۷
$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸	۰/۰۷۴۸
$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$	۰/۰۵۹۱	۰/۰۶۴۹	۰/۰۱۶۷	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۰۲
درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۲۱	۱۳	۷۸	۷۹	۸۶
$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۲
$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$	۰/۰۵۵۰	۰/۰۶۶۳	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۹۹
درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۱۸	۱	۷۲	۸۱	۸۵
میانگین درصد خطای سرعت	۲۴	۱۰	۷۷	۸۱	۸۶
مدل آشفتگی قابل قبول					
k-epsilon (RNG)					

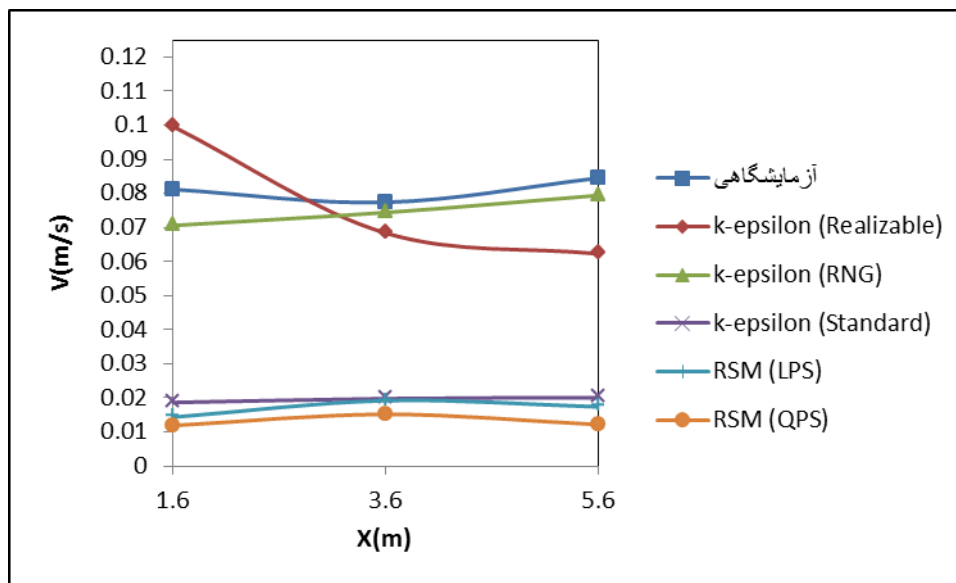
همان طوری که در جدول (۷-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مدل‌های آشفتگی k-epsilon از نوع Realizable، k-epsilon از نوع RNG، k-epsilon از نوع Standard، RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS متوسط خطای مدل آشفتگی ۲۴، ۱۰، ۷۷، ۸۱ و ۸۶ درصد بوده است که بدین ترتیب مدل k-epsilon از نوع RNG دارای کمترین خطا می‌باشد، لذا بهینه ترین مدل آشفتگی، مدل k-epsilon از نوع RNG می‌باشد.

بنابراین بطور کلی می‌توان مدل آشفتگی k-epsilon از نوع RNG را جهت شبکه محدود مورد نظر در نظر گرفت. بعد از مدل انتخابی، مدل k-epsilon از نوع Realizable در اولویت قرار دارد که به دلیل داشتن روند متفاوت با نتایج آزمایشگاهی استفاده از آن توصیه نمی‌شود. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می‌توان از مدل k-epsilon از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS چشم پوشی کرد.

۳-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲ درصد

آزمایشات در شیب ۲ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1000 kg/m^3$ و ویسکوزیته آب ساکن $0.001005 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1006 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.0010812 kg/m.s$ بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۷-۴) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۷-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل- های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲ درصد

همان طوری که در شکل (۷-۴) نشان داده شده است مدل k-epsilon از نوع RNG بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل k-epsilon از نوع Realizable کاهش می‌یابد، در مدل‌های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایش می‌یابد و در مدل‌های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین در جدول (۸-۴) درصد خطای مدل‌های آشفتگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۸-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل‌های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲ درصد

مدل آشفتگی	k-epsilon (Realizable)	k-epsilon (RNG)	k-epsilon (Standard)	RSM (LPS)	RSM (QPS)
$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۱۲
$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$	۰/۰۹۹۷	۰/۰۷۰۶	۰/۰۱۸۷	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۱۹
درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۲۳	۱۳	۷۷	۸۲	۸۵
$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴	۰/۰۷۷۴
$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$	۰/۰۶۸۴	۰/۰۷۴۴	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۵۲
درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۱۲	۴	۷۴	۷۵	۸۰
$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵	۰/۰۸۴۵
$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$	۰/۰۶۲۳	۰/۰۷۹۴	۰/۰۲۰۱	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۲۲
درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۲۶	۶	۷۶	۷۹	۸۶
میانگین درصد خطای سرعت	۲۰	۸	۷۶	۷۹	۸۴
مدل آشفتگی قابل قبول					
k-epsilon (RNG)					

همان طوری که در جدول (۸-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مدل‌های آشفتگی k-epsilon از نوع Realizable، k-epsilon از نوع RNG، k-epsilon از نوع Standard، RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS متوسط خطای مدل آشفتگی ۲۰، ۸، ۷۶، ۷۹ و ۸۴ درصد بوده است که بدین ترتیب مدل k-epsilon از نوع RNG دارای کمترین خطا می‌باشد، لذا بهینه ترین مدل آشفتگی، مدل k-epsilon از نوع RNG می‌باشد.

بنابراین بطور کلی می‌توان مدل آشفتگی k-epsilon از نوع RNG را جهت شبکه محدود مورد نظر در نظر گرفت. بعد از مدل انتخابی، مدل k-epsilon از نوع Realizable در اولویت قرار دارد که به دلیل داشتن روند متفاوت با نتایج آزمایشگاهی استفاده از آن توصیه نمی‌شود. به دلیل داشتن خطای بیش

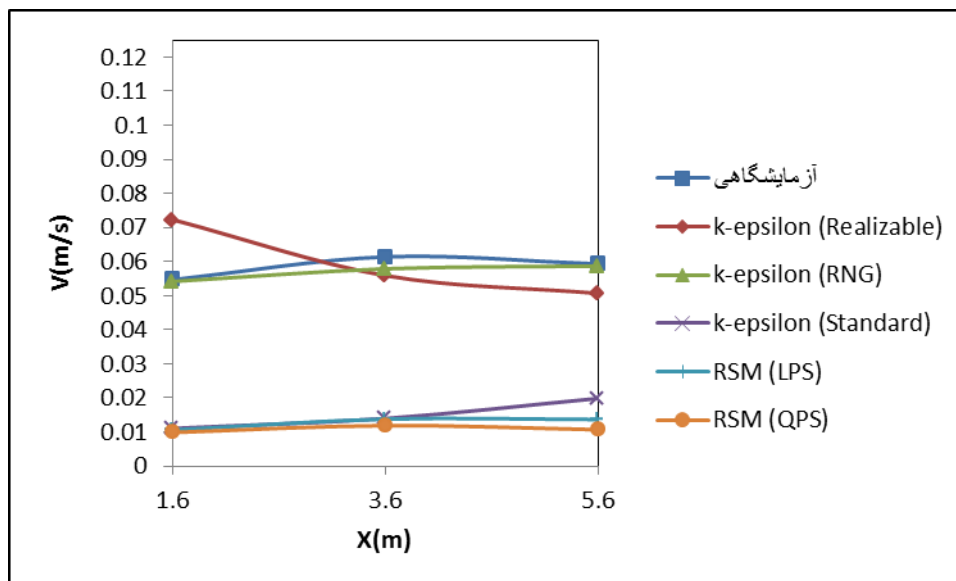
از ۳۰ درصد می‌توان از مدل k-epsilon از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS چشم پوشی کرد.

۴-۴-۴. بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی در شیب ۲/۹

درصد

آزمایشات در شیب ۲/۹ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن دانسیته آب $1000 kg/m^3$ و ویسکوزیته آب $0.0010055 kg/m.s$ ، دانسیته جریان غلیظ $1004 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ $0.0010784 kg/m.s$ بوده است.

به منظور بررسی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف مورد استفاده نتایج حاصل از مدل سازی عددی سرعت جریان در سه مقطع با فاصله طولی $1/6$ متری از دریچه و در زمان ۱۶ ثانیه پس از شروع مدل سازی، با فاصله طولی $3/6$ متری از دریچه و در زمان ۳۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی و همچنین با فاصله طولی $5/6$ متری از دریچه و در زمان ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۴-۸) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی حقی‌آبی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.



شکل (۸-۴) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل-های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲/۹ درصد

همان طوری که در شکل (۸-۴) نشان داده شده است مدل k-epsilon از نوع RNG بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) می‌باشد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل k-epsilon از نوع Realizable کاهش می‌یابد، در مدل‌های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایش می‌یابد و در مدل‌های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین در جدول (۹-۴) درصد خطای مدل‌های آشفتگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است.

جدول (۹-۴) انتخاب و مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) با توجه به مدل‌های آشفتگی مختلف در بهینه‌ترین مش بندی و شیب ۲/۹ درصد

مدل آشفتگی	k-epsilon (Realizable)	k-epsilon (RNG)	k-epsilon (Standard)	RSM (LPS)	RSM (QPS)
$V_{1.6m,16s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷
$V_{1.6m,16s}^{model}(m/s)$	۰/۰۷۲۳	۰/۰۵۴۲	۰/۰۱۱۰	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۹۹
درصد خطای سرعت در ۱/۶ متری از دریچه در زمان ۱۶ ثانیه	۳۲	۱	۸۰	۸۱	۸۲
$V_{3.6m,34s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۶۱۴
$V_{3.6m,34s}^{model}(m/s)$	۰/۰۵۵۹	۰/۰۵۷۹	۰/۰۱۴۰	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۱۹
درصد خطای سرعت در ۳/۶ متری از دریچه در زمان ۳۴ ثانیه	۹	۶	۷۷	۷۸	۸۱
$V_{5.6m,54s}^{exp}(m/s)$	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳
$V_{5.6m,54s}^{model}(m/s)$	۰/۰۵۰۷	۰/۰۵۸۷	۰/۰۱۹۹	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۰۷
درصد خطای سرعت در ۵/۶ متری از دریچه در زمان ۵۴ ثانیه	۱۵	۱	۶۶	۷۷	۸۲
میانگین درصد خطای سرعت	۱۹	۳	۷۵	۷۸	۸۲
مدل آشفتگی قابل قبول		k-epsilon (RNG)			

همان طوری که در جدول (۹-۴) نشان داده شده است به ترتیب برای مدل‌های آشفتگی k-epsilon از نوع Realizable، k-epsilon از نوع RNG، k-epsilon از نوع Standard، RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS متوسط خطای مدل آشفتگی ۱۹، ۳، ۷۵، ۷۸ و ۸۲ درصد بوده است که بدین ترتیب مدل k-epsilon از نوع RNG دارای کمترین خطا می‌باشد، لذا بهینه ترین مدل آشفتگی، مدل k-epsilon از نوع RNG می‌باشد.

بنابراین بطور کلی می‌توان مدل آشفتگی k-epsilon از نوع RNG را جهت شبکه محدود مورد نظر در نظر گرفت. بعد از مدل انتخابی، مدل k-epsilon از نوع Realizable در اولویت قرار دارد که به دلیل داشتن روند متفاوت با نتایج آزمایشگاهی استفاده از آن توصیه نمی‌شود. به دلیل داشتن خطای بیش

از ۳۰ درصد می‌توان از مدل k-epsilon از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS چشم پوشی کرد.

۴-۴-۵. جمع بندی

با توجه به مدل سازی‌های انجام شده بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین مدل آشفستگی، مدل k-epsilon از نوع RNG است. همان طور که مشاهده می‌شود نتیجه این تحقیق با نتیجه تحقیقات برهمند و موسوی (۱۳۹۱)، حسینی و همکاران (۱۳۹۲) و حسینی و همکاران (۱۳۹۳) مشابه می‌باشد و مدل k-epsilon از نوع RNG دارای کمترین خطای محاسباتی می‌باشد. مدل k-epsilon از نوع Realizable جز در شیب صفر درصد که خطای آن بیش از ۳۰ درصد بوده و از آن می‌توان چشم پوشی کرد، در سایر شیب‌ها این مدل بعد از مدل انتخابی (مدل k-epsilon از نوع RNG) در اولویت قرار دارد که به دلیل داشتن روند متفاوت با نتایج آزمایشگاهی استفاده از آن توصیه نمی‌شود. به دلیل داشتن خطای بیش از ۳۰ درصد می‌توان از مدل k-epsilon از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS چشم پوشی کرد.

همچنین در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل k-epsilon از نوع Realizable کاهش می‌یابد، در مدل‌های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایشی و در مدل‌های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایشی و سپس کاهش می‌یابد.

همچنین هر چه شیب بیشتر باشد درصد خطای سرعت متوسط جریان کمتر است.

۴-۵. پیش بینی چگالی با استفاده از مدل عددی در شیب‌های صفر، ۱،

۲ و ۲/۹ درصد

مدل سازی‌ها در دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است. در مدل سازی‌ها جریان غیردائمی چندفازی از نوع Eulerian در نظر گرفته شده است و در بهینه‌ترین نوع مش بندی که در آن تعداد تقسیمات 300×240 می‌باشد و همچنین بهینه‌ترین نوع مدل آشفتگی که مدل k-epsilon از نوع RNG می‌باشد مدل سازی شده است.

مدل سازی‌ها در شیب‌های صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصد انجام شده است و چگالی در ۳ فاصله طولی ۱/۶، ۳/۶ و ۵/۶ متری در فواصل زمانی ۱۶، ۳۴ و ۵۴ ثانیه پس از شروع مدل سازی پیش بینی شده است و نتایج حاصل از پیش بینی چگالی در شیب‌های مذکور به همراه سرعت‌های حاصل از مدل سازی در جدول (۴-۱۰) آورده شده است.

جدول (۴-۱۰) پیش بینی چگالی در شیب‌های صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصد و سرعت‌های حاصل از مدل سازی در شیب‌های مذکور

$V_{5.6m,54s}$ (m/s)	$\rho_{5.6m,54s}$ (kg/m ³)	$V_{3.6m,34s}$ (m/s)	$\rho_{3.6m,34s}$ (kg/m ³)	$V_{1.6m,16s}$ (m/s)	$\rho_{1.6m,16s}$ (kg/m ³)	
۰/۰۵۶۷	۹۷۵/۶	۰/۰۵۵۰	۹۸۵/۵	۰/۰۴۹۷	۹۹۵/۴	شیب صفر درصد
۰/۰۶۶۳	۹۷۵/۹	۰/۰۶۴۹	۹۸۵/۸	۰/۰۶۰۸	۹۹۵/۷	شیب ۱ درصد
۰/۰۷۹۴	۹۷۶/۷	۰/۰۷۴۴	۹۸۶/۶	۰/۰۷۰۶	۹۹۶/۵	شیب ۲ درصد
۰/۰۵۸۷	۹۷۴/۲	۰/۰۵۷۹	۹۸۴	۰/۰۵۴۲	۹۹۴	شیب ۲/۹ درصد

همان طوری که در جدول (۴-۱۰) نشان داده شده است با افزایش سرعت جریان، چگالی جریان غلیظ کاهش می‌یابد که این نتیجه با نتایج تحقیقات حسینی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد.

۴-۶. پیش بینی چگالی و سرعت با استفاده از مدل عددی در شیب ۵

درصد

مدل سازی در شیب ۵ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفته است که در آن چگالی آب ساکن $1000/9 kg/m^3$ و ویسکوزیته آب ساکن $0.0010057 kg/m.s$ ، چگالی جریان غلیظ ورودی $1004/6 kg/m^3$ و ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی $0.001079 kg/m.s$ بوده است. در مدل سازی جریان غیردائمی چندفازی از نوع Eulerian در نظر گرفته شده است و در بهینه ترین نوع مش بندی که در آن تعداد تقسیمات 300×240 می باشد و همچنین بهینه ترین نوع مدل آشفتگی که مدل k-epsilon از نوع RNG می باشد - باشد مدل سازی شده است.

در این مدل سازی چگالی و سرعت در ۳ فاصله طولی $1/6$ ، $3/6$ و $5/6$ متری در فواصل زمانی 16 ، 34 و 54 ثانیه پس از شروع مدل سازی پیش بینی شده است و در جدول (۴-۱۱) آورده شده است.

جدول (۴-۱۱) پیش بینی چگالی و سرعت در شیب ۵ درصد

$V_{5.6m,54s}$ (m/s)	$\rho_{5.6m,54s}$ (kg/m ³)	$V_{3.6m,34s}$ (m/s)	$\rho_{3.6m,34s}$ (kg/m ³)	$V_{1.6m,16s}$ (m/s)	$\rho_{1.6m,16s}$ (kg/m ³)
۰/۰۷۰۳	۹۷۴/۸	۰/۰۶۶۴	۹۸۴/۶	۰/۰۶۲۹	۹۹۴/۶

همان طوری که در جدول (۴-۱۱) نشان داده شده است با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، متوسط سرعت جریان در شیب مذکور نیز افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان، چگالی جریان غلیظ کاهش می یابد که این نتیجه با نتایج تحقیقات حسینی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد.

فصل پنجم

نتایج و ارائه پیشنهادات

۵-۱. مقدمه

در این پایان نامه به بررسی رفتار هیدرولیکی جریان‌های غلیظ با استفاده از مدل عددی Fluent پرداخته شده و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی حقیقی و همکاران (۱۳۸۶) مقایسه شده است. مدل سازی در فلومی که طول فلوم مورد آزمایش ۸ متر، عرض فلوم ۰/۲۵ متر (که به دلیل مؤثر نبودن در نتایج مورد بحث و همچنین کاهش حجم محاسبات از آن صرف نظر شده است) و ارتفاع فلوم ۰/۵ متر که ارتفاع دریاچه ورودی جریان غلیظ به فلوم ۰/۲۵ متر می‌باشد انجام شده است. در این مدل جنس دیواره‌های فلوم از نوع پلکسی گلاس بوده و مدل سازی در ۴ شیب کف فلوم صفر، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۹ درصد با دبی جریان غلیظ در واحد عرض اولیه $0.005 m^2/s$ و سرعت جریان غلیظ اولیه $0.2 m/s$ انجام پذیرفت. ضمن اینکه در این مدل جریان غیردائمی و چندفازی می‌باشد که از مدل چندفازی Eulerian استفاده شده است.

در این مدل سازی جهت ایجاد جریان غلیظ به ترتیب از ۴ نوع چگالی آب ساکن ($1001 kg/m^3$)، ۱۰۰۱/۱، ۱۰۰۰/۲ و ۱۰۰۰/۷ با ۴ نوع ویسکوزیته آب ساکن ($0.0010058 kg/m.s$)، ۰/۰۰۱۰۰۵۹، ۰/۰۰۱۰۰۵ و ۰/۰۰۱۰۰۵۵ و به ترتیب از ۴ نوع چگالی جریان غلیظ ورودی ($1005/5 kg/m^3$)، ۱۰۰۵/۸، ۱۰۰۶/۶ و ۱۰۰۴ با ۴ نوع ویسکوزیته جریان غلیظ ورودی ($0.00108 kg/m.s$)، ۰/۰۰۱۰۸۰۳، ۰/۰۰۱۰۸۱۲ و ۰/۰۰۱۰۷۸۴ استفاده شده است.

در این مدل ۵ نوع مش بندی با تعداد تقسیمات 100×40 ، 140×80 ، 220×160 ، 300×240 و 340×280 که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y می‌باشد، استفاده شده است.

همچنین از ۵ نوع مدل آشفتگی (مدل‌های k-epsilon(RNG)، k-epsilon(Realizable)، k-epsilon(Standard)، RSM(LPS) و RSM(QPS) استفاده شده است.

بررسی تأثیر تغییرات مش بندی و مدل آشفتگی بر نتایج مدل سازی دوبعدی جریان غلیظ از جمله موارد مورد بحث در این پایان نامه می باشد. با توجه به تجزیه و تحلیل هایی که بر روی اطلاعات بدست آمده از این تحقیق انجام گرفت بهترین مش بندی و بهترین مدل آشفتگی انتخاب شد.

۵-۲. نتایج

در این قسمت خلاصه نتایج بدست آمده در این تحقیق ارائه گردیده است.

- با توجه به نتایج مدل سازی، استفاده از نرم افزار Fluent به عنوان ابزاری مفید و قدرتمند برای مدل سازی عددی رفتار جریان های غلیظ توصیه می شود.
- شبکه مش بندی مورد استفاده، شبکه بهینه محدود با ابعاد 300×240 که به ترتیب از چپ به راست بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y می باشد. بعد از مش انتخابی، مش 220×160 ، مش 340×280 ، مش 140×80 و مش 100×40 به ترتیب اولویت می باشند.
- در جریان مدل سازی هر چه تعداد تقسیمات مش بندی افزایش یابد مقدار متوسط سرعت جریان تا بهینه ترین مش بندی (مش 300×240) روند افزایشی داشته و پس از آن روند کاهشی دارد.
- با استفاده از معیار سنجش سرعت میانگین، مدل آشفتگی بهینه مدل $k-\epsilon$ از نوع RNG می باشد. بعد از مدل انتخابی، مدل $k-\epsilon$ از نوع Realizable، مدل $k-\epsilon$ از نوع Standard، مدل RSM از نوع LPS و مدل RSM از نوع QPS به ترتیب اولویت می باشند.
- در جریان مدل سازی با افزایش فاصله طولی توام با افزایش گذشت زمان از شروع مدل سازی، مقدار متوسط سرعت جریان در مدل $k-\epsilon$ از نوع Realizable

کاهشی، در مدل‌های k-epsilon از نوع RNG و k-epsilon از نوع Standard افزایشی و در مدل‌های RSM از نوع LPS و RSM از نوع QPS ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است.

- همچنین هر چه شیب بیشتر باشد درصد خطای سرعت متوسط جریان کمتر است.
- چگالی در شیب‌های مورد استفاده (شیب صفر، ۱، ۲ و ۲/۹ درصد) پیش بینی شد.
- سرعت و چگالی در یک شیب جدید (شیب ۵ درصد) پیش بینی شد.
- سرعت جریان و چگالی با هم رابطه معکوس دارند و با افزایش سرعت چگالی کاهش می‌یابد.

۳-۵. پیشنهادات

- از سایر مدل‌های عددی مانند Flow-3D، SSIIM و ... جهت شبیه سازی جریان غلیظ استفاده شود و نتایج حاصله از این مدل‌ها با نتایج استخراج شده از مدل عددی Fluent که در این تحقیق آورده شده است مقایسه شود تا کارآمدترین مدل عددی جهت شبیه سازی جریان غلیظ انتخاب شود.
- از مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و شبکه عصبی-فازی (ANFIS) جهت شبیه سازی جریان غلیظ استفاده شود و نتایج حاصله از این مدل‌ها با نتایج استخراج شده از مدل عددی Fluent که در این تحقیق آورده شده است مقایسه شود تا کارآمدترین مدل جهت شبیه سازی جریان غلیظ انتخاب شود.
- سایر پارامترهای مورد نیاز مانند ارتفاع جریان غلیظ اندازه گیری شود.

منابع

۱. آشوری، م.، ارجمندی، ح.، پیربوداقتی، س.، قمشی، م.، خلیلی، ا. ۱۳۹۴. پیش بینی ارتفاع غوطه-وری جریان غلیظ با استفاده از مدل تلاطمی RNG و شبکه‌های عصبی. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز. صفحات ۸-۱.
۲. امامقلی‌زاده، ص.، بینا، م.، قمشی، م. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن و دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی در میزان تخلیه رسوبات در رسوب‌شویی تحت فشار. مجله علمی کشاورزی. جلد ۳۰. شماره ۴-الف. صفحات ۶۱-۷۶.
۳. بارانی، غ.، خانجانی، م.، عباسی، ص. ۱۳۸۳. مطالعه رفتار جریان چگال در دریاچه سد با استفاده از مدل هیدرولیکی. نشریه دانشکده مهندسی. سال شانزدهم. شماره اول. صفحات ۸۷-۱۰۰.
۴. باقری، م. ۱۳۹۳. جریانهای غلیظ در مخازن سدها. اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری. استان همدان. صفحات ۱-۱۱.
۵. برهمند، ن.، موسوی، س.، ر. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی عددی رفتار جریان چگال در نزدیکی محل شکست شیب. همایش ملی عمران و توسعه پایدار. موسسه آموزش عالی خاوران مشهد. صفحات ۱-۱۱.
۶. بهرامی، ح.، قمشی، م.، کاشفی‌پور، س.، م. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تغییر شکست شیب بستر بر خصوصیات جریان غلیظ. مجله علوم و فنون دریایی. دوره ۸. شماره ۳ و ۴. صفحات ۶۷-۷۶.
۷. ترابی پوده، ح. امامقلی‌زاده، ص.، یونسی، ح. ۱۳۸۷. تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در همگرایی‌ها و واگرایی‌ها و مقایسه آن با مقاطع ثابت. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور). صفحات ۸-۱.
۸. ترابی‌پوده، ح.، امامقلی‌زاده، ص. ۱۳۸۸. ارزیابی پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی. کنفرانس بین‌المللی منابع آب (ICWR). صفحات ۱-۶.

۹. تربن، ع. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی عددی رسوب‌گذاری در مخازن سدها با مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران. سازه‌های هیدرولیکی. دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس.

۱۰. حسینی، م.، برهمند، ن.، حسینی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی رفتار جریان چگال در کانال محدود با انحنای ۱۸۰ درجه با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف آشفتگی با استفاده از نرم‌افزار Fluent. همایش ملی پژوهش‌های محیط زیست ایران. دانشکده شهید مفتح همدان. صفحات ۱-۱۶.

۱۱. حسینی، م.، پایدار، ح.، برهمند، ن. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی سه‌بعدی خصوصیات جریان‌های غلیظ در کانال مستقیم سیلاب دشت همراه با شیب عرضی با استفاده از نرم‌افزار Fluent. اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری. استان همدان. صفحات ۱-۱۱.

۱۲. حق‌آبی، ا.، ح.، قمشی، م.، کاشفی‌پور، س.، م. ۱۳۸۶. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان‌های غلیظ ورودی به مخازن. مجله علمی کشاورزی. جلد ۳۰. شماره ۴-ب. صفحات ۱۷-۳۰.

۱۳. سروری‌نژاد، س.، ب.، قمشی، م.، مرادی، ا.، حقیقی‌پور، ص. ۱۳۹۰. تأثیر زاویه همگرایی مقاطع بر پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان. صفحات ۱-۶.

۱۴. قمشی، م. ۱۳۹۱. شناخت و مدیریت جریان‌های غلیظ در مخازن سدها. وزارت نیرو، سازمان آب-و برق خوزستان. صفحات ۱-۳۱.

۱۵. قمشی، م.، امیدی، ا. ۱۳۸۸. گزارش مرحله نهایی پروژه بررسی جریان غلیظ در مخزن کارون ۳ با استفاده از نرم‌افزار TCM. دفتر تحقیقات و استانداردهای سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان. صفحات ۱-۱۰.

۱۶. گلیج، ح.، قمشی، م.، ارجمندی، ح.، کاهه، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی ارتفاع نقطه غوطه‌وری و شبیه‌سازی عددی آن با استفاده از مدل Flow-3D. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان. صفحات ۸-۱.

۱۷. مرادی، ا.، قمشی، م.، سروری‌نژاد، ب. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای شیب، دبی و غلظت بر شدت اختلاط جریان غلیظ در مقاطع همگرا. فصل‌نامه تخصصی علوم و مهندسی آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان. سال اول. شماره سوم. صفحات ۷۳-۸۸.

۱۸. موسوی‌حکمتی، س.، م.، فیروزآبادی، ب.، راد، م. ۱۳۸۷. بررسی تجربی ساختار هیدرودینامیکی جریان چگالی سه‌بعدی. مجله دانشکده فنی. جلد ۳۵. شماره ۳ (مهندسی عمران). شماره پیاپی ۵۱. صفحات ۱-۱۲.

۱۹. میرزازاده، م.، احمدی، ح.، غزل، ر. ۱۳۹۳. مدل‌سازی عددی جریان غلیظ در کانال با استفاده از Flow-3D. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل. صفحات ۱-۹.

20. Afshin, H., Firoozabadi, B., Rad, M. 2008. Hydrodynamics Analysis of Density Currents. IJE Transactions B: Applications. Vol. 21, No. 3, 211-226.
21. Daly, R. A. 1936. Origin of submarine canyons. American Journal of Science, Vol. 31, pp. 401 – 420.
22. Graf, W. H. 1983. Hydraulics of reservoir sedimentation. International Water Power & Dam Construction, Vol. 35, No.4.
23. Fan, J., Jiang, R. 1980. On methods for the desiltation of reservoirs. International Seminar of Experts on Reservoir Desiltation, Tunis.
24. Inman, D. L., C. E. Nordstrom and R. E. Flick. 1976. Currents in Sumarine Canyons: An Air-Sea-Land Interaction. Annu. Rev. Fluid Mech. 275-310.
25. Launder, B. E., Spalding, D. B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3: 269-289.
26. Okkan, U. 2012. Wavelet neural network model for reservoir inflow prediction. Scientia Iranica. A 19(6), 1445-1455.
27. Parker, G., Toniolo, H. 2007. Note on the analysis of plunging of density flows. J. Hydrual. Eng., ASCE, 133(6), 690-694.

28. Tolouei, E. 1989. Reservoir sedimentation and desiltation. M.Sc. Thesis, University of Birmingham, U.K.
29. Torabi Poudeh, H., Emamgholizadeh, S., Fathi-Moghadam, M. 2014. Experimental study of the velocity of density currents in convergent and divergent channels. *International Journal of Sediment Research* 29, 518-523.
30. White, R. 2000. Flushing of Sediments from Reservoirs. ICOLD, World Register of Large Dams, HR Wallingford, UK, 166 p.

Numerical simulation of density current, using numerical model

Abstract

Density current is a relative movement between the two layers of fluid that even little differences in density are created. From this perspective it can be said that density currents characteristics of the typical characteristics of open channel currents is very different. Distribution velocity and density horizontally in density currents in distribution sedimentation in current a major role and therefore affect many aspects of sedimentation. In this study the phenomenon of density current as sediment transport in reservoirs and canals was simulated by the Fluent numerical model.

For calibration of model the experimental results of Haghiabi et al. (2009) were used. The purpose of this study was to find the most optimal dimensions of mesh and the best turbulence model in order to predict various characteristics of density. In this study, the average current velocity, distances of 1.6 m, 3.6 m and 5.6 m after 16, 34 and 54 seconds from the start of modeling was measured, respectively.

In this study, the most optimal dimensions of mesh and the best of turbulence model was determined 300×240 k-epsilon of type RNG, respectively. Also prediction of the density was conducted in the slopes of 0, 1, 2 and 2/9 percent. the error of numerical model to predict density current velocity was 17, 10, 8 and 3 percent. Finally, density and average current velocity in the slope of 5 percent predicted. The results showed that whatever the bottom slope of flume is greater the error percentage of average current velocity is lower. While the increase in the slope of the flume increases the average current velocity and reduces the density of flow.

KEYWORDS: Density current, Sedimentation, Fluent numerical modeling, Average current velocity, Density.