

اللَّهُمَّ
الْحَمْدُ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: عمران و معماری

گروه: عمران

عنوان رساله دکتری:

بررسی تانک های تماسی ضد عفونی ماریچ

دانشجو: رضا تقی پور

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

ماه و سال انتشار: مهرماه-۱۳۸۹

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

آنانکه وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر.
توانشان همه رفت تا به توانایی برسم و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند.
آنانکه فروغ نگاهشان گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه های جاودانی من است.
آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.
در برابر وجودشان زانوی ادب بر زمین می نهم و با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بر دستانشان
بوسه می زنم.
سر و جوشان همیشه سرسبز و استوار باد.

سپاس از پدر دانشگاهیم رامین امینی

او که مرا شکفتن داد و روحم را به دانش علم صیقل داد و بردبارانه در این مسیر دشوار راهبر بود

او که جان خسته ام را نفس است و ردای شاگردیش تا همیشه بر دوشم باقیست

چگونه سر ز خجالت برآورم بر دوست

که خدمتی بسزا بر نیامد از دستم

چکیده

در این تحقیق یک مدل عددی سه بعدی بمنظور مدلسازی جریان و انتقال ردگیر در تانک تماسی ضد عفونی تولید گردید. مدل عددی دارای دو ویژگی مدلسازی جریان در حالت‌های آرام و آشفته را دارا می باشد که جریان آشفته بر اساس معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس و توزیع هیدرودینامیکی فشار مدلسازی گردیده شده است. روش عددی بکار رفته بمنظور حل معادلات از لحاظ ساختار به روش مک شباهت دارد. بمنظور مدلسازی سطح آب از فرضیه درپوش صلب استفاده گردیده شده است. برای مدلسازی آشفتگی از دو روش استفاده گردید. روش اول طول اختلاط پراتل که صفر معادله ای می باشد و روش دوم مدل پر کاربرد و کاملاً شناخته شده $k-\epsilon$ می باشد. روش $k-\epsilon$ هم از لحاظ توانایی کامپیوتر های معمول و هم از لحاظ دقت از معمول ترین روشهای مدلسازی آشفتگی می باشد. مدل تولید شده برای مدلسازی مدل آزمایشگاهی تانک تماسی امبسی که توسط کمپانی یورکشایر اجرا گردیده، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق خوب بین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بوده است. همچنین بمنظور بررسی کارایی تانک تماسی، مدل حمل یک ماده بقائی نیز برنامه نویسی گردید. این مدل حمل شامل ترم های انتقال و پخش بوده و نتایج عددی نیز تشابه خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داد. همچنین بمنظور بررسی کارایی تانک حالت‌های مختلف از قرار گیری دیواره ها و اثر تعداد آنها و محل قرار گیری دهانه ورودی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و اندیس های کارایی آنها استخراج گردیده شده اند. نتایج بدست آمده حاکی از اثر چشمگیر تعداد و محل قرار گیری دیواره در کارایی تانک تماسی می باشند و در نهایت با توجه به اثرات فوق یک مدل با ساختار جدید از قرار گیری دیواره پیشنهاد گردیده که از لحاظ شاخص های کارایی و بهبود شرایط حاکم بر جریان از مدل‌های عددی قبلی و مدل اصلی بهتر می باشد. برای مدلسازیها هم از برنامه نویسی و هم از بهترین نرم افزار های موجود استفاده گردید و نتایج این مدلسازیها نیز مشابه بوده است.

کلمات کلیدی: ضد عفونی، مدلسازی سه بعدی آشفتگی، تفاضل محدود، فشار هیدرودینامیکی، شاخص های کارایی، تانک تماسی کلرین

لیست مقالات:

۱. "مدلینگ جریان به صورت سه بعدی در تانک های تصفیه تماسی با کلر" سومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست دانشگاه تهران.
۲. "بررسی مشخصه های مناسب برای یک تانک تصفیه تماسی کلرین" سومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست دانشگاه تهران.
"کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در مدلسازی جریان و انتشار ردگیر بقائی در تانک های ضد عفونی کلرین" سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی مصرف) دانشگاه شهید عباسپور تهران
۳. "بررسی تاثیر تعداد دیواره های داخلی در کارایی تانک های تماسی ضد عفونی کلرین با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی" چهارمین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست دانشگاه تهران.
4. "Numerical assessment of hydrodynamic characteristics in chlorine contact tank" International journal for numerical methods in fluids (2010).Published online in Wiley Online Library. DOI: 10.1002/flid.2394

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱-مقدمه
۷	فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده
۷	۱-۲-مقدمه
۷	۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی
۷	۱-۲-۲- فرآیند های هیدرودینامیکی و کارایی هیدرولیکی تانک های تماسی
۱۳	۲-۲-۲- معایب مدل‌های آزمایشگاهی
۱۴	۳-۲- مطالعات مدل عددی
۱۴	۱-۳-۲- مزایا و معایب مدل‌های عددی
۱۴	۲-۳-۲- تاریخچه دینامیک سیالات محاسباتی
۱۶	۳-۳-۲- طبقه بندی مدل‌های عددی
۱۸	۱-۳-۳-۲- فرمول های هیدرواستاتیک یا غیر هیدرواستاتیک
۱۹	۴-۳-۲- مروری بر مدل‌های عددی
۱۹	۱-۴-۳-۲- مدلسازی حمل ردگیر بقائی در تانک تماسی
۲۲	۲-۴-۳-۲- مدلسازی فرآیند ضد عفونی
۲۳	۵-۳-۲- بسته های تجاری دینامیک سیالات محاسباتی
۲۳	۱-۵-۳-۲- CFX (www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx)
۲۳	۲-۵-۳-۲- PHOENICS (www.cham.co.uk)
۲۴	۳-۵-۳-۲- STAR-CD (www.cd.co.uk/products/cfd-products.htm)
۲۴	۴-۵-۳-۲- Fluent (www.fluent.com)
	فصل سوم: معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان سیال و پارامترهای موثر در
	تعیین کارایی تانک تماسی
۲۵	۱-۳-مقدمه
۲۶	۲-۳- قانون بقای جرم در حالت سه بعدی
۲۷	۳-۳- معادلات مومنوم
۲۸	۱-۳-۳- جریان آرام
۲۹	۲-۳-۳- جریان آشفته

۳۰	۳-۳-۳- نیروهای جسمی
۳۱	۳-۳-۴- فرضیه عمق کم آب
۳۱	۳-۴-۴- مدل آشفتگی
۳۱	۳-۴-۱- مدل لزجت ادی ثابت
۳۲	۳-۴-۲- مدل طول اختلاط
۳۳	۳-۴-۳- مدل $k-\varepsilon$
۳۶	۳-۴-۴- مدلسازی ادی های بزرگ
۳۷	۳-۵-۵- معادله انتقال- پخش
۳۷	۳-۶-۶- بررسی کارایی تانکهای تماسی
۳۸	۳-۶-۱- ملاحظات تئوری
۴۱	۳-۶-۲- خصوصیات منحنی FTC
۴۱	۳-۶-۱-۱- نشانگرهای مدار کوتاه
۴۳	۳-۶-۲-۲- نشانگرهای اختلاط
۴۳	۳-۶-۲-۳- نشانگرهای جریان پلاگ
۴۴	۳-۶-۲-۴- مشخصه های زمانی
۴۵	فصل چهارم: گسسته سازی معادلات حاکم
۴۶	۴-۱-۱- مقدمه
۴۶	۴-۲-۲- ساختار شبکه
۴۶	۴-۳-۳- مدل هیدرودینامیکی عددی
۴۷	۴-۳-۱- روش عددی مورد استفاده در تانک تماسی
۵۰	۴-۳-۲- خطاهای قطع کردن در مدل‌های عددی
۵۱	۴-۳-۳- پایداری مدل‌های عددی
۵۲	۴-۳-۴- مقایسه روش عددی بکار رفته با روشهای موجود دیگر
۵۲	۴-۴-۴- گسسته سازی معادلات مومنوم
۵۲	۴-۴-۱- گسسته سازی ترمهای انتقال
۵۲	۴-۴-۱-۱- نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial u^2}{\partial x}$
۵۳	۴-۴-۱-۲- نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial uv}{\partial y}$
۵۴	۴-۴-۱-۳- نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial uw}{\partial z}$
۵۴	۴-۴-۲- گسسته سازی ترمهای نفوذ

۵۵	۴-۳- گسسته سازی مدل‌های آشفته‌گی
۵۵	۴-۳-۱- مدل <i>Mixing-Length</i>
۵۷	۴-۳-۲- مدل $k-\varepsilon$
۵۷	۴-۵- شرایط مرزی
۵۸	۴-۵-۱- شرایط مرزی دیواره‌ها
۵۹	۴-۵-۲- سرعت ثابت در مرز ورودی
۶۰	۴-۵-۳- فشار در مرز خروجی
۶۱	۴-۵-۴- شرایط مرزی سطح آب
۶۳	فصل پنجم: کاربرد مدل عددی برای تانک تماسی امبسی
۶۴	۵-۱- مقدمه
۶۴	۵-۲- تانک تماسی امبسی
۶۴	۵-۲-۱- خصوصیات مدل آزمایشگاهی بکار گرفته شده برای تانک تماسی امبسی
۶۸	۵-۲-۲- جزئیات مدل عددی برای مدل سازی تانک تماسی امبسی
۶۸	۵-۲-۳- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل $k-\varepsilon$
۸۲	۵-۲-۴- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل <i>Mixing-Length</i>
۹۰	۵-۲-۵- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل جریان آرام
۹۹	۵-۲-۶- بررسی مدل در مقیاس واقعی
۱۰۴	۵-۲-۷- مدل‌سازی حمل ردیاب در مدل تانک امبسی
۱۱۰	۵-۳- بررسی ساختارهای مختلف دیواره‌های داخلی در کارایی تانک تماسی امبسی
۱۱۰	۵-۳-۱- مقدمه
۱۱۰	۵-۳-۲- فرآیند مدل‌سازی
۱۱۵	۵-۳-۳- بررسی کارایی مدلها بر اساس تعداد دیواره‌ها از تانک تماسی امبسی
۱۲۵	۵-۳-۴- بررسی محل قرار گیری دیوارها در کارایی تانک تماسی امبسی
۱۲۹	۵-۳-۵- بررسی محل قرار گیری دهانه ورودی در کارایی تانک تماسی امبسی
۱۳۴	۵-۳-۶- بررسی تاثیر ارتفاع تانک در کارایی هیدرولیکی
۱۳۶	۵-۳-۷- بررسی کارایی تانک تماسی با ساختار جدید محل قرار گیری دیواره‌ها
۱۳۹	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات برای مطالعات آتی
۱۴۰	۶-۱- نتیجه گیری
۱۴۲	۶-۲- پیشنهادات
۱۴۵	

پیوست - الف

پیوست - ب

مراجع

۱۵۰

۱۵۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ مقایسه در دو حالت اختلاط ضعیف و مناسب در یک تانک تماسی ۵
- شکل ۱-۱ (ادامه) مقایسه بین منحنی FTC در دو حالت اختلاط ضعیف و مناسب ۵
- شکل ۱-۲ نمایی از تانک تماسی Embsay ۹
- شکل ۲-۲ نمونه از منحنی FTC ۱۰
- شکل ۳-۲ خصوصیات هندسی تانک Elan ۱۱
- شکل ۴-۲ نمایی از تانک آزمایشگاهی ۱۲
- شکل ۵-۲ نمای افقی از مدل تانک آزمایشگاهی ۱۳
- شکل ۶-۲ طبقه بندی روشهای متفاوت از مدلسازی جریان ۱۸
- شکل ۱-۳ جریان جرمهای ورودی و خروجی از المان سیال و تنش های برشی در جهت X ۲۷
- شکل ۲-۳ سرعت میانگین و لحظه ای از یک جریان آشفته ۲۹
- شکل ۳-۳ منحنی های ایده آل و واقعی FTC ۳۹
- شکل ۴-۳ منحنی های تزریق در ورودی و غلظت در خروجی تانک ۴۰
- شکل ۵-۳ خصوصیات منحنی های منتج شده FTC ۴۳
- شکل ۱-۴ شبکه جابجا شده برای مدلسازی هیدرودینامیکی ۴۷
- شکل ۲-۴ نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial u^2}{\partial x}$ ۵۳
- شکل ۳-۴ نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial}{\partial y}(uv)$ ۵۳
- شکل ۴-۴ نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial}{\partial z}(uw)$ ۵۴
- شکل ۵-۴ نحوه محاسبه ترم دیفیوژن در معادله مومنوم X ۵۵
- شکل ۶-۴ شبکه بکار رفته شده ۵۵
- شکل ۷-۴ نحوه اعمال شرایط مرزی سرعت در دیوارها ۵۸
- شکل ۸-۴ شرایط مرزی در ورودی ۶۰
- شکل ۹-۴ شرایط مرزی در خروجی ۶۱
- شکل ۱۰-۴ شرایط مرزی برای مدلسازی سطح آب ۶۲
- شکل ۱-۵ نمایش شماتیک از سیستم هیدرولیکی ۶۵
- شکل ۲-۵ هندسه تانک تماسی و کانال تقرب آن ۶۶
- شکل ۲-۵ (ادامه) هندسه تانک تماسی ۶۷
- شکل ۳-۵ شبکه محاسباتی برای تانک تماسی امبسی ۷۱
- شکل ۴-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل k-ε در محفظه ۱ ۷۳

- ۷۴ شکل ۵-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۲
- ۷۵ شکل ۶-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۳
- ۷۶ شکل ۷-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۴
- ۷۷ شکل ۸-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۵
- ۷۸ شکل ۹-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۶
- ۷۹ شکل ۱۰-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۷
- ۸۰ شکل ۱۱-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۸
- ۸۱ شکل ۱۲-۵ توزیع لزجت آشفته در تانک امبسی توسط مدل $k-\epsilon$
- ۸۳ شکل ۱۳-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۱
- ۸۴ شکل ۱۴-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۲
- ۸۵ شکل ۱۵-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۳
- ۸۶ شکل ۱۶-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۴
- ۸۷ شکل ۱۷-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۵
- ۸۸ شکل ۱۸-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل Mixing-Length در محفظه ۸
- ۸۹ شکل ۱۹-۵ توزیع لزجت آشفته در تانک امبسی توسط مدل Mixing-Length
- ۹۱ شکل ۲۰-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۱
- ۹۲ شکل ۲۱-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۲
- ۹۳ شکل ۲۲-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۳
- ۹۴ شکل ۲۳-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۴
- ۹۵ شکل ۲۵-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۵
- ۹۶ شکل ۲۵-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۶
- ۹۷ شکل ۲۶-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۷
- ۹۸ شکل ۲۷-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل جریان آرام در محفظه ۸
- ۱۰۱ شکل ۲۸-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل عددی بر اساس مقیاس واقعی در محفظه ۱
- ۱۰۲ شکل ۲۹-۵ مقایسه مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی از مدل عددی بر اساس مقیاس واقعی در محفظه ۲
- ۱۰۳ شکل ۳۰-۵ توزیع لزجت آشفته در تانک تماسی با مقیاس واقعی
- ۱۰۵ شکل ۳۱-۵ معرفی نحوه تزریق غلظت در ورودی مدل عددی از تانک تماسی
- ۱۰۶ شکل ۳۲-۵ منحنی FTC بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۱

- شکل ۳۳-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۲
- شکل ۳۴-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۳
- شکل ۳۵-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۴
- شکل ۳۶-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۵
- شکل ۳۷-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۶
- شکل ۳۸-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۷
- شکل ۳۹-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۸
- شکل ۴۰-۵ شبکه های بکار رفته شده
- شکل ۴۱-۵ میدان سرعت و نمودار غلظت بدست آمده از فلوئنت
- شکل ۴۲-۵ بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف
- شکل ۴۲-۵ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف
- شکل ۴۲-۵ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف
- شکل ۴۳-۵ بردار سرعت در مقطع میانی مدل تانک تماسی با چهار محفظه
- شکل ۴۴-۵ منحنی تابع توزیع تجمعی تانک امبسی با ۲ محفظه
- شکل ۴۵-۵ منحنی تابع زمان حضور در خروجی تانک با تعداد دیوارهای مختلف
- شکل ۴۶-۵ منحنی تابع توزیع تجمعی در خروجی تانک با تعداد دیوارهای مختلف
- شکل ۴۷-۵ مقایسه بین منحنی های ایده آل و منحنی بدست آمده از آنالیز عددی
- شکل ۴۸-۵ تغییرات اندیس موریل بر حسب افزایش تعداد دیواره
- شکل ۴۹-۵ بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف
- شکل ۵۰-۵ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف
- شکل ۵۱-۵ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۲ محفظه
- شکل ۵۲-۵ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۴ محفظه
- شکل ۵۳-۵ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۶ محفظه
- شکل ۵۴-۵ بردارهای سرعت در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.923$
- شکل ۵۵-۵ بردارهای سرعت در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.692$
- شکل ۵۶-۵ بردارهای سرعت در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.4615$
- شکل ۵۷-۵ توزیع ردامین-ب در تانک امبسی (اصلی) با ورودی در تراز $Z/H=0.923$
- شکل ۵۸-۵ توزیع ردامین-ب در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.4615$
- شکل ۵۹-۵ منحنی حضور همسایگی
- شکل ۶۰-۵ تابع توزیع تجمعی

- ۱۳۶ شکل ۵-۶۱ ساختار جدید از تانک تماسی امبسی
- ۱۳۷ شکل ۵-۶۲ تابع توزیع تجمعی ساختار جدید تانک امبسی
- ۱۳۸ شکل ۵-۶۳ بردارهای سرعت تانک تماسی
- ۱۳۸ شکل ۵-۶۴ مقایسه بین منحنی های حضور همسایگی

فهرست جداول

۳۴	جدول ۱-۳ طولهای اختلاط جریان های آشفته دو بعدی
۱۱۵	جدول ۱-۵ مشخصات مدلسازیهای صورت گرفته
۱۲۰	جدول ۲-۵ مهمترین خصوصیات منحنی FTC
۱۲۵	جدول ۳-۵ مشخصات مدلسازیهای صورت گرفته
۱۳۴	جدول ۴-۵ مهمترین خصوصیات منحنی FTC

علائم

C	غلظت
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	ضرایب ثابت در مدل آشفتگی
C_0	غلظت متوسط در تانک
C_r	عدد کوران
D	ضریب اختلاط - نفوذ
e	نرخ تغییر شکل
E	ضریب زبری دیوار
g	شتاب ثقل
H	ارتفاع تانک
i,j,k	نقاط گسسته شده در شبکه
k	انرژی جنبشی آشفته
l_m	طول اختلاط
L	طول تانک تماسی
MI	اندیس موریل
p	فشار
Q	دبی حجمی
R	شعاع هیدرولیکی
Re	عدد رینولدز
t	زمان
T	زمان تاخیر تئوری
u,v,w	مولفه های سرعت در جهات Z,Y,X
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	مولفه های میانگین سرعت در جهات Z,Y,X
u', v', w'	نوسانات سرعت در جهات Z,Y,X
u_*	سرعت برشی
V	حجم تانک تماسی
X,Y,Z	نیروهای جسمی در جهات Z,Y,X
Δt	گام زمانی

ε	نرخ کاهش انرژی جنبشی
ϑ	لزجت سینماتیکی در جریان آرام
ϑ_t	لزجت ادی آشفته
κ	ثابت جهانی فون کارمن
μ	لزجت دینامیکی در جریان آرام
μ_t	لزجت دینامیکی در جریان آشفته
ρ	چگالی آب
θ	نسبت زمان به زمان تاخیر تئوری
$F(\theta)$	تابع توزیع تجمعی
$E(\theta)$	تابع توزیع همسایگی
θ_0	زمان اولیه رسیدن ردگیر به خروجی
θ_{10}	زمانی که ۱۰ درصد ردگیر به خروجی تانک برسد
θ_{90}	زمانی که ۹۰ درصد ردگیر به خروجی تانک برسد
PF	نشانگر جریان پلاگ
θ_{max} و θ_{50}	شاخص های زمانی کارایی تانک

فصل

1

مقدمه

عملیات ضد عفونی کردن آب یکی از روشهای مورد استفاده در تصفیه آب های آشامیدنی و سیستم تصفیه فاضلاب ها با هدف غیر فعال سازی میکرو ارگانیسم ها موجود در آب می باشد که احتمال بیماری زایی دارند و باعث انتقال بیماریها موجود در آب می گردند. در این مسیر اگرچه می توان از روشهایی مانند استفاده از اشعه ماورای بنفش و ازن استفاده نمود، اما رایج ترین روش ضد عفونی کردن آب استفاده از کلر می باشد. در این روش با افزودن کلر به آب عبوری در تانک تماسی باعث ضد عفونی آب می گردند. تانکهای تماسی باید به گونه ای طرح گردند تا مدت زمان کافی برای تماس آب با کلر را برای رسیدن به حد مطلوب از ضد عفونی را فراهم نمایند. سیستم معمول طراحی تانک های تماسی بگونه ای می باشد تا یک اختلاط مطلوب از کلر با آب خالص را با حداقل زمان تماس بمدت ۳۰ دقیقه و غلظت خروجی کلر از تانک به میزان ۰/۱ تا ۰/۲ میلی گرم در هر لیتر را فراهم نمایند.[۱]

یکی از روشهای دستیابی به معیار مطلوب از ضد عفونی آب ، استفاده از کلر با دوز بیشتر می باشد. اما این عمل باعث افزایش هزینه بهره برداری و ایجاد بیماریهای سرطان زای ناشی از آن در آب میگردد که مطلوب نمی باشد. همچنین در نوامبر سال ۱۹۷۴ اداره حفاظت محیط زیست^۱ آمریکا تصاویری را منتشر کرد که آب آشامیدنی شهر نیواورلاند^۲ حاوی مقادیری از مواد کلرین ته نشین شده بوده است که بطور بالقوه سرطان زا می باشد، بوده است.[۲] از آن به بعد نگرانیها در مورد استفاده از کلر به عنوان یک ماده ضد عفونی کننده آب افزایش یافت. بمنظور کاهش نگرانیها تلاش های بسیار زیادی با اهداف زیر از آن سال صورت پذیرفت.

۱. درک بهتر از فرایند شیمیایی که در روند ضد عفونی کردن آب بوجود می آید و همچنین تاثیر آن بر محیط زیست و سلامت انسانها.

۲. بررسی کارایی روشهای دیگر ضد عفونی مانند ازن زایی و اشعه ماورای بنفش.

در تعیین کارایی روشهای گند زدایی آب، عاملی که بصورت گسترده مورد قبول کارشناسان می باشد این است که کارایی روشها به خصوصیات هیدرودینامیکی واحد تصفیه کننده عمیقاً وابسته می باشند.[۳] بنابراین ارزیابی کارایی هیدرولیکی واحدهای تصفیه کننده، پیش از ساخت و پس از آن، اهمیت زیادی دارد بطوریکه کارایی هیدرولیکی بعنوان معیاری برای اندازه گیری شباهتهای بین جریان واقعی و جریان ایده آل برای یک واحد تصفیه کننده می باشد. یکی از فاکتورهای مهم ضد عفونی، زمان تماس کلر با آب می باشد. بهترین شرایط برای ضد عفونی کردن آب آن است که تمام ذرات آب که در یک زمان وارد تانک شده، بصورت جریان موازی تانک را طی کرده و در یک زمان از آن خارج گردند.[۴] این نوع از جریان ایده آل را جریان شاخه ای^۳ می نامند. بدلیل آنکه بسیاری از واکنشهای شیمیایی بطور موثری در

¹ Enviromental Protection Agency(EPA)

² New Orleans

³ Plug Flow

حالت جریان شاخه ای کامل می گردند، بنابراین معیار طراحی در تانکهای تماسی، ایجاد جریان شاخه ای در آن می باشد. [۵]

در شرایط شاخه ای تمام ذرات دارای زمان تماس برابر می باشند. این زمان تماس را می توان با استفاده از فرمول زیر بدست آورد که آنرا به عنوان زمان تاخیر تئوری می شناسند.

$$T=V/Q \quad 1-1$$

که در آن V برابر است با حجم جریان در واحد تصفیه کننده و Q برابر است با نرخ جریان. اما در تانک های تماسی واقعی نمی توان به چنین شرایطی دست یافت که علت آن تغییر گرادینهای سرعت به علت اغتشاش ناشی از وجود لایه های مرزی در امتداد کف تانک و دیواره ها می باشد. [۶] آب در لایه های مرزی با سرعتی کمتر از سرعت میانگین حرکت می کند و در نتیجه زمان حضور در محفظه های^۴ تانک بیشتر از زمان تاخیر تئوری می باشد. از سوی دیگر قسمتهای دیگر جریان که از دیواره های فاصله دارند با سرعتی بیشتر از سرعت میانگین و زمان کمتر از زمان تاخیر تئوری حرکت می کنند. با ترکیب دو حالت فوق، جریانات در لایه های مرزی امکان جدا شدن را پیدا می کنند و باعث ایجاد جریانات چرخشی که حرکت آن در خلاف جهت جریان می باشند، می گردند. معمولاً بمنظور کاهش جریانات چرخشی ناشی از اغتشاش جریان، از دیواره های داخلی^۵ استفاده می کنند، اما دیواره ها خود در ایجاد گرادینهای سرعت تاثیر گذار می باشند. در واقع بدلیل آنکه دیواره ها جریان آب را مجبور به گردش تند در تانک تماسی میکنند، آن قسمت از ذرات آب که در قسمت خارجی گردش قرار می گیرند با سرعت بیشتر نسبت به ذرات ناحیه درونی حرکت می کنند. این گرادینهای سرعت باعث ایجاد زمانهای تاخیر متفاوت و نواحی راکد آب در پشت چرخش می گردد. همچنین ورودی و خروجی کوچک هم می تواند باعث ایجاد گرادینهای سرعت در تانک شود. [۶] با توجه به نکات ذکر شده اثر کلی اغتشاش جریان در تانک تماسی که بصورت اختلاط در تانک می باشد، باعث ایجاد زمان حضور غیر یکنواخت بین کلر و میکرو ارگانیسم های موجود در آب می گردد. [۷] بنابراین قسمتی از جریان در تانک دارای زمان تماس کمتری با کلر از حداقل ممکن می باشند که به نواحی میانبر^۶ شناخته می شود. از سوی دیگر قسمت دیگر جریان دارای زمان تماس بیشتر می باشد که به آن نواحی مرده می گویند^۷. بنابراین در طراحی تانکهای تماسی باید پارامترهایی از قبیل کاهش سرعت در ورودی و خروجی، توزیع یکنواخت سرعت در امتداد محفظه های تانک، و جلوگیری از ایجاد حرکت های گردابه ای^۸ بزرگ و نواحی میانبر را در نظر قرار داد.

⁴ Compartments

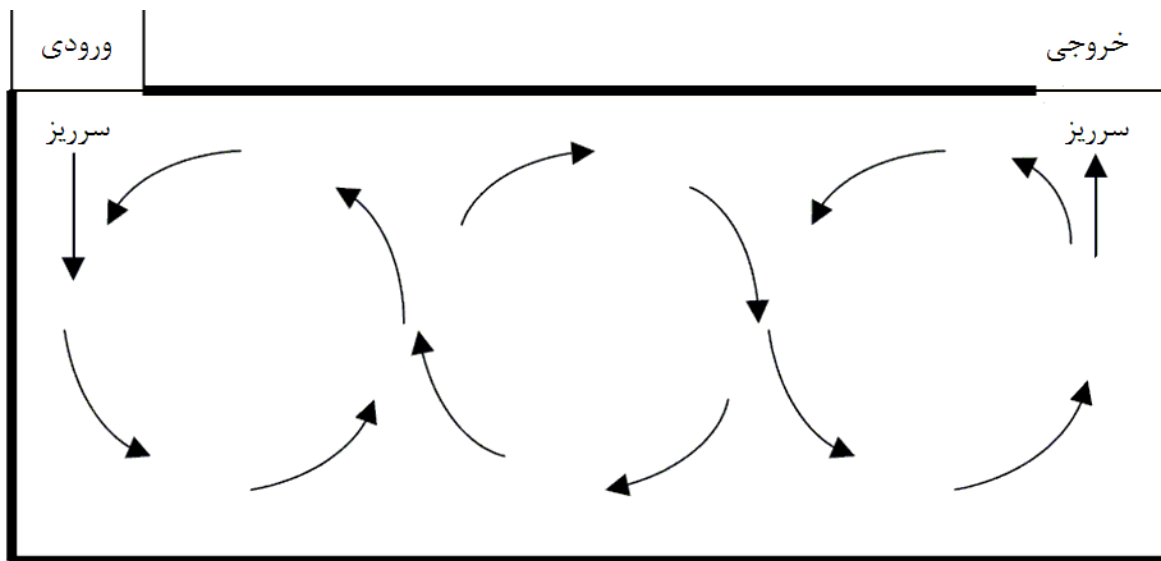
⁵ Baffels

⁶ Short Circuiting

⁷ Dead Zone

⁸ Eddy

یک روش معمول برای تعیین کارایی هیدرولیکی واحدهای ضد عفونی کننده آب، استفاده از تکنیک ردگیری می باشد که در آن منحنی تغییرات غلظت نسبت به زمان در خروجی ایجاد می شود و به منحنی⁹ (FTC) معروف می باشد که بکمک آن، می توان تابع توزیع زمان حضور¹⁰ $E(\theta)$ را تعیین نمود و بصورت کمی توصیف می کند که ذرات سیال دارای چه زمان حضور متفاوت در تانک می باشند. پارامترهای زیادی از این منحنی بمنظور توصیف ساختار جریان بصورت کیفی و کمی استخراج گردیده اند.^[8] منحنی FTC بطور کلی از طریق تزریق یک ردگیر بقایی¹¹ بصورت لحظه ای در ورودی در زمان $t=0$ و اندازه گیری غلظت متناسب با آن در خروجی در لحظات بعد بدست می آید. منحنی بطور کلی بصورت بی بعد نمایش داده می شود. با تقسیم غلظت اندازه گیری شده بر غلظت میانگین C_0 و زمان واقعی بعد از رها سازی بر زمان تاخیر تئوری، منحنی بی بعد می گردد. شکل (۱-۱) نحوه اختلاط ضعیف و مناسب را برای تانک ضد عفونی و منحنی های FTC مربوط به آن را بطور نمونه نشان می دهد. در اختلاط ضعیف بخشی از سیال در بازه زمانی کوتاه به خروجی تانک می رسند و بخشی از آن زمان زیادی در تانک باقی می ماند که مطلوب نمی باشد.



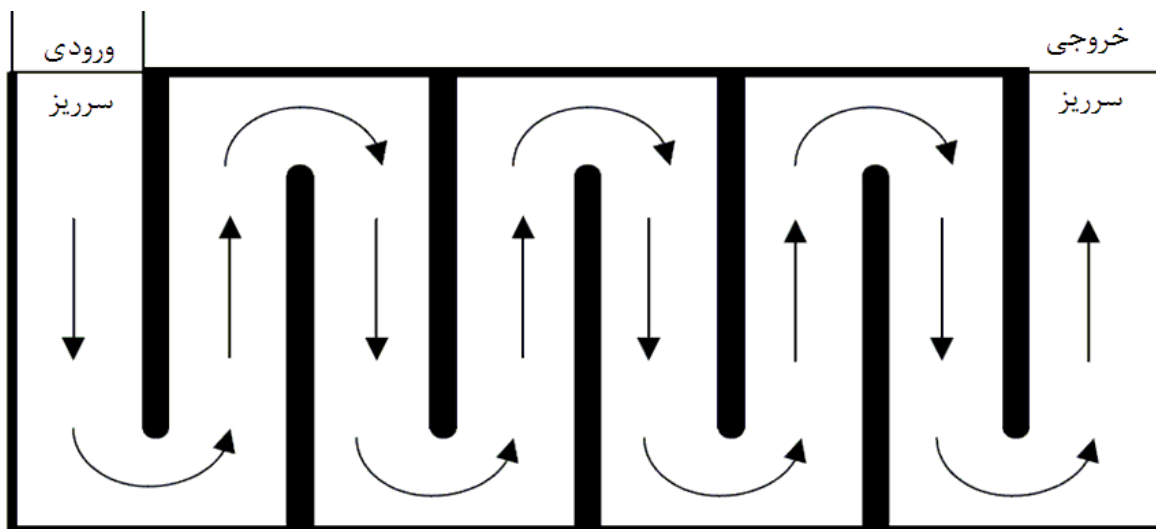
الف) اختلاط ضعیف

شکل ۱-۱-الف) مقایسه در دو حالت اختلاط ضعیف و مناسب در یک تانک تماسی

⁹ Flow Through Curves(FTC)

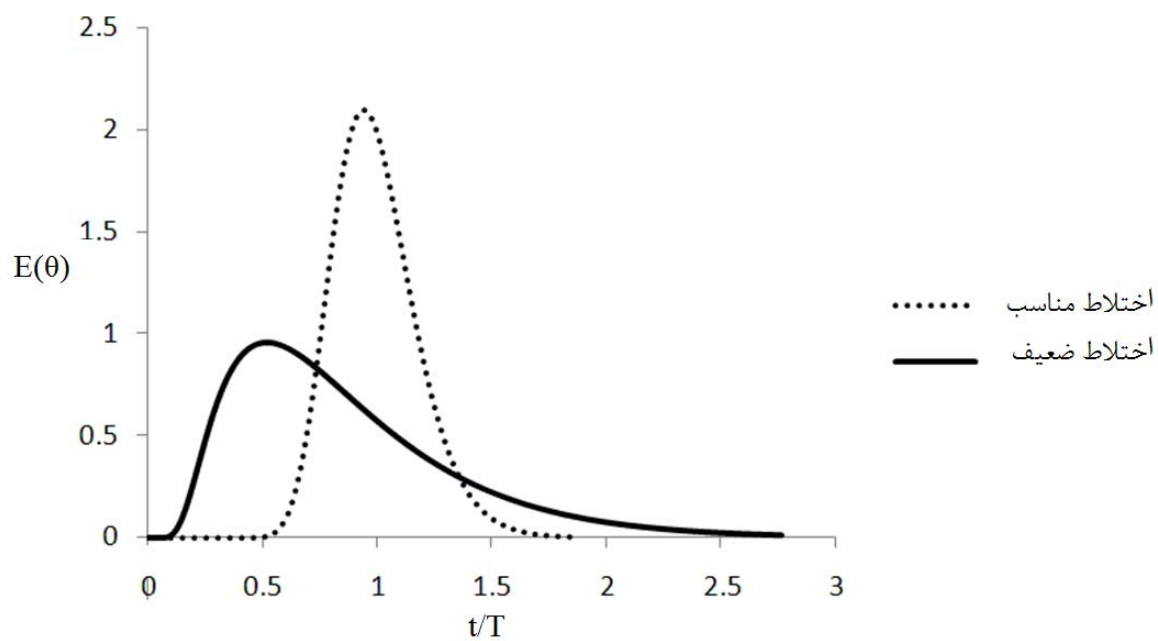
¹⁰ Residence time distribution

¹¹ Conservative Tracer Transport



ب) اختلاط مناسب

شکل ۱-۱-ب) مقایسه در دو حالت اختلاط ضعیف و مناسب در یک تانک تماسی



شکل ۱-۱-ج) مقایسه بین منحنی FTC در دو حالت اختلاط ضعیف و مناسب

اما همانطوریکه رودی^{۱۲} [۹] اشاره کرد تفسیر نتایج بدست آمده از مطالعه انتقال ردیاب و منحنی های FTC بدون در نظر گرفتن جزییات جریان در داخل تانک، تفسیرهایی خام و بعضی مواقع گمراه کننده می باشد، و این نتایج را با انجام یکسری آزمایشات، زمانی می توان استخراج کرد که تانک ساخته شده است که این امر مطلوب نمی باشد و بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشد. بنابراین استفاده از روشهای عددی بمنظور مدلسازی جریان های آشفته و مدل های نرخ کاهش کلر و غیر فعال سازی میکروارگانیسم ها به بهترین روش در طراحی تانک تماسی تبدیل گردیده است. [۱۰]

مهمترین هدفی که در این پایان نامه دنبال می شود، بررسی کارایی تانک های تماسی ضد عفونی ماریچ و ارائه راهکارهای مناسب برای بهبود عملکرد آن و تولید یک مدل عددی سه بعدی بمنظور محاسبه فرآیند های هیدرودینامیکی جریان و تولید منحنیهای FTC می باشد. با بررسی کارائی و آنالیز اجزای تانک تماسی، امکان طراحی تانکهای تصفیه تماسی که دارای عملکرد مطلوب بوده و ایجاد جریان پلاگ نمایند، میسر می گردد. لازم به ذکر می باشد که مدل های عددی قبلی اکثراً بصورت دو بعدی بوده اند و مدلسازی جریان بخصوص در مواردی که گردشهای قائم وجود داشته باشند بصورت صحیح و دقیق نبوده اند و مدل های عددی سه بعدی محدودی به بررسی همزمان فرآیند های هیدرودینامیکی جریان و منحنی FTC پرداخته اند که در فصل بعد بطور مشروح به آن اشاره شده است.

تحقیق حاضر شامل شش فصل می باشد. در فصل اول (در همین فصل) مفاهیم کلی در رابطه با تانک های تماسی و مسائل و مشکلات مربوط به استفاده نادرست از کلر بعنوان یک ماده ضد عفونی کننده ارائه و همچنین اهداف کلی مورد نظر در پایان نامه معرفی گردیده شده است. در فصل دوم به مرور مطالعات انجام شده و مدلسازی های عددی صورت گرفته بروی تانک تماسی کلرین بطور مفصل پرداخته شده است.

در فصل سوم معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان سیال و معادله انتقال ردگیر بقایای معرفی گردیده و پارامترهای مورد نیاز بمنظور تعیین کارایی تانک های تماسی و روند تعیین آنها تشریح گردیده شده است.

فرآیند گسسته سازی عددی معادلات حاکم در فصل چهارم ارائه شده و شرایط مرزی بکار رفته در ورودی، خروجی، دیواره های تانک و سطح آب بیان گردیده است.

در فصل پنجم نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی که بر اساس مدل آزمایشگاهی تانک امبسی که توسط کمپانی یورکشایر در کشور انگلستان ساخته شده است، مورد بررسی قرار گرفته و به بررسی تاثیر محل قرار گیری و تعداد دیواره های داخلی در کارایی تانک تماسی پرداخته شده است.

در فصل ششم پیشنهاداتی جهت مطالعات آتی ارائه گردیده شده است.

¹² Rodi



مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱- مقدمه

در این فصل مطالعات قبلی انجام شده در مورد جریان و فرآیند انتقال ردگیر^۱ در تانکهای تصفیه تماسی و پیشرفتهای بدست آمده در زمینه مدل عددی سه بعدی مورد مطالعه قرار می گیرد. مطالعات مربوط به مدل ضد عفونی کننده جریان و فرآیند انتقال ردگیر در تانک تصفیه تماسی بر اساس تاریخچه آنها در دو رویکرد مجزا مورد بررسی قرار می گیرد. اولین رویکرد بر اساس مدل‌های فیزیکی (آزمایشگاهی) و دومین رویکرد بر اساس مدل‌های عددی می باشد. در این فصل جزئیات مربوط به مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های عددی که در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است را مورد بررسی قرار می دهیم. سپس معایب مربوط به روشهای قبلی را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی

در گذشته یکسری مطالعات آزمایشگاهی در مورد هیدرودینامیک جریان و فرآیند اختلاط بر روی تعدادی از تانکهای تماسی موجود صورت گرفته است که چند نمونه از آنها را در زیر مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۲-۱- فرآیند های هیدرودینامیکی و کارایی هیدرولیکی تانک های تماسی

یکسری مطالعات کلی در مورد فرآیند های هیدرودینامیکی و ساختارهای هیدرولیکی تانکهای تماسی توسط تگزیرا^۲ [۱۱] صورت گرفته است. هدف کلی از این تحقیق بدست آوردن یک درک بهتر از فرآیند هیدرودینامیکی در تانکهای تماسی بوسیله مدل‌های هیدرولیکی فیزیکی بوده است. بمنظور رسیدن به این هدف، خصوصیات هیدرودینامیکی مختلفی از یک تانک تماسی خاص بنام امبسی^۳ که توسط کمپانی یورکشایر^۴ طراحی و اجرا گردید را در نظر گرفت و اطلاعات بدست آمده از مدل آزمایشگاهی تانک امبسی را بطور کامل مورد آنالیز قرارداد. بنابراین مطالعه بر اساس مدلسازی از یک تانک واقعی مشخصی بوده است. او دو مدل آزمایشگاهی با نام های تانک ۱ و تانک ۲ و با مقیاس خطی ۱:۸ برای تانک ۱ و ۱:۴ برای تانک ۲ بر اساس اندازه واقعی تانک امبسی ساخت. این نسبت ها بطور کلی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده بودند که برای کار مدلسازی کفایت کنند و برای بیان شرایط واقعی تانک اصلی استفاده از چنین مقیاسهای بزرگی در مدلسازی تانکها کاملاً کافی می باشد. تانک ۱ دارای ابعادی برابر با ۲۰۰ سانتیمتر طول، ۹۴ سانتیمتر عرض و ۶۰ سانتی متر ارتفاع و دارای ۷ دیواره داخلی^۵ بوده است. شکل (۲-۱) نمایی از تانک را نشان می دهد. سرعتها و غلظتها در سه بعد در تانک اندازه گیری شده بود

¹ Solute Transport

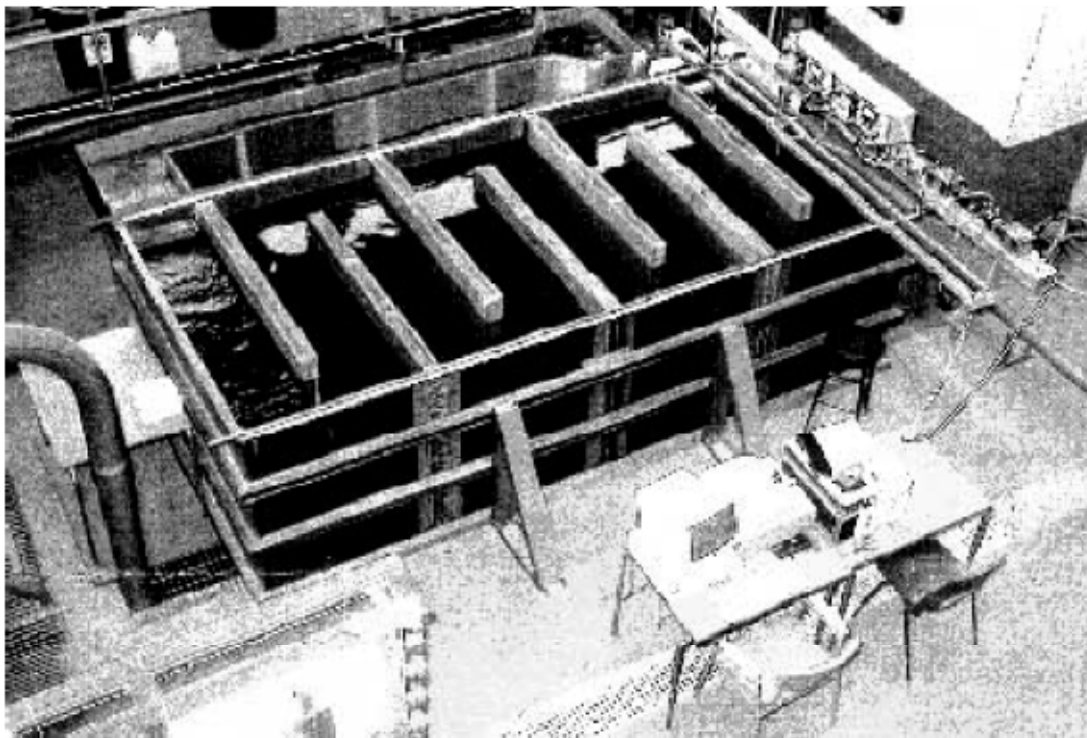
² Teixeira

³ Embsay

⁴ Yorkshire

⁵ Baffels

و نمودارها بر اساس اطلاعات بدست آمده رسم گردید. سرعتهای لحظه ای توسط یک سرعت سنج لیزری داپلری^۶ و یک مدل گردان^۷ برای اندازه گیری غلظت ماده ردامین-ب در چندین نقطه بکار گرفته شده بودند.



شکل ۱-۲ نمایی از تانک تماسی Embsay

مهمترین نتایج بدست آمده از این آزمایش شامل موارد زیر می باشد:

۱. در تانک جریان بصورت سه بعدی و آشفته می باشد.

۲. خصوصیات اختلاط در مسیر تانک و حمل ردگیر^۸.

در این پایان نامه بمنظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی، آنرا با نتایج آزمایشگاهی فوق مورد مقایسه قرار داده ایم. شرح کامل مطالعه آزمایشگاهی در فصول بعد آورده شده است (فصل پنجم). همچنین مطالعات آزمایشگاهی وسیعی توسط فالكونر و تیبات^۹ [۱۲] انجام شده است. مهمترین هدف آزمایش ها، بهبود الگوهای هیدرولیکی جریان از طریق اختلاط بهتر و ایجاد توزیع یکنواخت غلظت با استفاده از دو تانک تماسی کلرین بوده است. غلظتها مهمترین پارامتر اندازه گیری شده برای بررسی

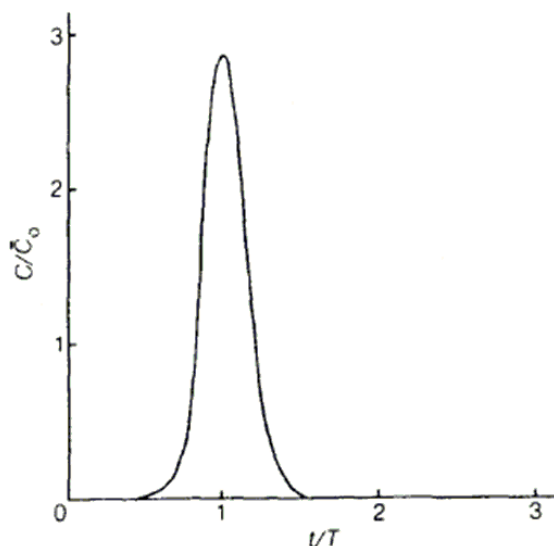
⁶ TSI two component Laser Doppler Anemometer

⁷ Two turner design model

⁸ Tracer

⁹ Falconer and Tebbutt

عملکرد تانک از لحاظ اختلاط بوده اند. در مطالعه آزمایشگاهی، اندازه گیری سرعت و غلظت برای ترکیب های مختلف دیواره ها، هم برای مدل با شکل اصلی و هم مدل با شکل اصلاح شده انجام پذیرفت. رنگ بطور لحظه ای در ورودی مدل به آن تزریق شده و غلظتها در خروجی نسبت به زمان ثبت گردید و منحنی های FTC متعددی محاسبه و رسم گردید. شکل (۲-۲) نشان دهنده یک منحنی توزیع غلظت بر حسب زمان در خروجی می باشد.



شکل ۲-۲- نمونه از منحنی FTC

همچنین در آنالیز منحنی های FTC، مطالعه تحلیلی بمنظور تخمین شکل تئوری منحنی برای پخش خالص صورت گرفت. در مطالعه، یک پروفیل سرعت لگاریتمی در راستای قائم تانک و یک پروفیل سرعت طولی یکنواخت فرض گردید و مقدار ضریب پخش طولی بر اساس فرمول الدر در کانال باز بصورت زیر محاسبه گردید: [۱۳]

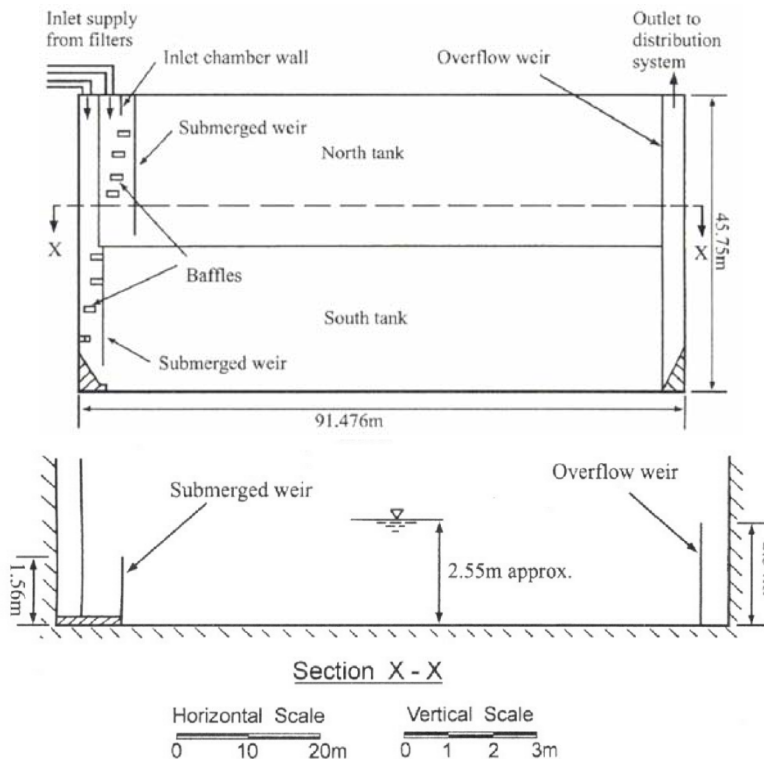
$$D_L = 5.93u_* H \quad 1-2$$

که در آن u_* سرعت برشی در امتداد تانک و H عمق تانک می باشد و بکمک این ضریب منحنی ایده آل FTC با ارزشی برای حالتی که اختلاط خالص وجود داشته باشد در حالت بی بعد بصورت زیر بدست آمد:

$$\frac{\bar{C}(L,t)}{C_0} = \frac{L}{(4\pi D_L t)^{1/2}} \exp\left[-\frac{L^2(1-t/T)^2}{4D_L t}\right] \quad 2-2$$

که در آن $C_0 = \frac{M}{AL}$ برابر با میانگین غلظت اولیه در حجم تانک و M برابر با حجم کلی از ماده تزریق شده و A برابر با مساحت مقطع عرضی از جریان و L برابر با طول متوسط تانک می باشد که حدود ۸۴ متر بوده است. تانک تماسی کلرین دیگری [۵] که مورد بررسی قرار گرفت، تانک تماسی واقعی که

قسمتی از واحد تصفیه خانه فرانکلی^{۱۰} با نام تانک تماسی الن^{۱۱} بوده است و آب آشامیدنی بسیاری از مناطق بیرمنگام را تهیه می کند. این تانک دارای مساحت سطحی به اندازه ۱۰۹۰ متر مربع و دارای دو محفظه مستقل با نامهای شمالی و جنوبی می باشد که هر کدام از آنها دارای دبی عبوری متوسط روزانه در حدود ۱۸۰ ML/d می باشند. شکل (۲-۳) نمایی از تانک را نشان می دهد. حجم تقریبی تانکهای شمال و جنوب به ترتیب ۴۹۰۰ متر مکعب و ۵۱۰۰ متر مکعب می باشد. روند اندازه گیری میدان سرعت بصورتی بوده است که ابتدا دیواره های داخلی جریان به تعدادی که مورد نیاز بود را قرار دادند. پس از آن جریان را با نرخ عبوری مورد نظر در مسیر عبور دادند و اجازه دادند که جریان بمدت ۱ ساعت تا زمانی که جریان پایدار در تانک گسترش پیدا کند، ادامه پیدا کند. پس از آن جسم شناوری را در یکی از نقاط شبکه که قبلا انتخاب شده بود قرار دادند و حرکت آنرا در یک بازه زمانی حدودا ۶۰ ثانیه ثبت کردند. این عمل را برای تمام نقاط باقیمانده شبکه تکرار گردید تا تخمین یک میدان سرعت برای تمام سطوح تانک ممکن گردد. در نهایت مشخص گردید که میدان جریان برای این تانک بخصوص دارای ساختار دو بعدی بوده و تغییرات عمودی نسبتا کوچک بوده است.

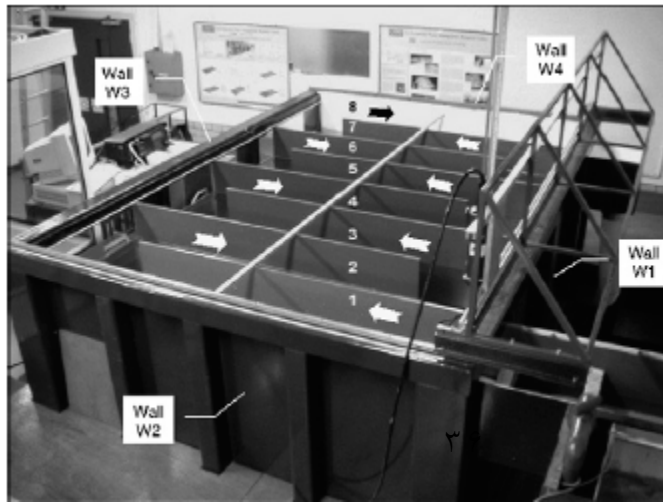


شکل ۲-۳- خصوصیات هندسی تانک Elan

¹⁰ Frankley

¹¹ Elan

در سال ۲۰۰۸، ویلیام^{۱۲} [۱۴] بمنظور بررسی دقیق تر در مورد خصوصیات هیدرولیکی تانک تماسی اقدام به ساخت یک مدل آزمایشگاهی نمود که پارامترهای طراحی واحد آزمایشگاهی دارای خصوصیات مشابه با تانک تماسی امبسی در کشور انگلستان می باشد و دارای ۳ متر طول، ۲ متر عرض، و ۱/۲ متر ارتفاع می باشد. دیواره های داخلی از جنس پی وی سی به ضخامت ۱۲ میلیمتر بوده و دارای هشت محفظه عبور جریان می باشد که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. هر یک از دیواره های داخلی دارای عرضی برابر با ۰/۳۶۵ متر می باشد. بدنه اصلی تانک از جنس فولاد بوده و دیواره های جانبی بمنظور امکان دید از جنس شیشه ساخته شده است.



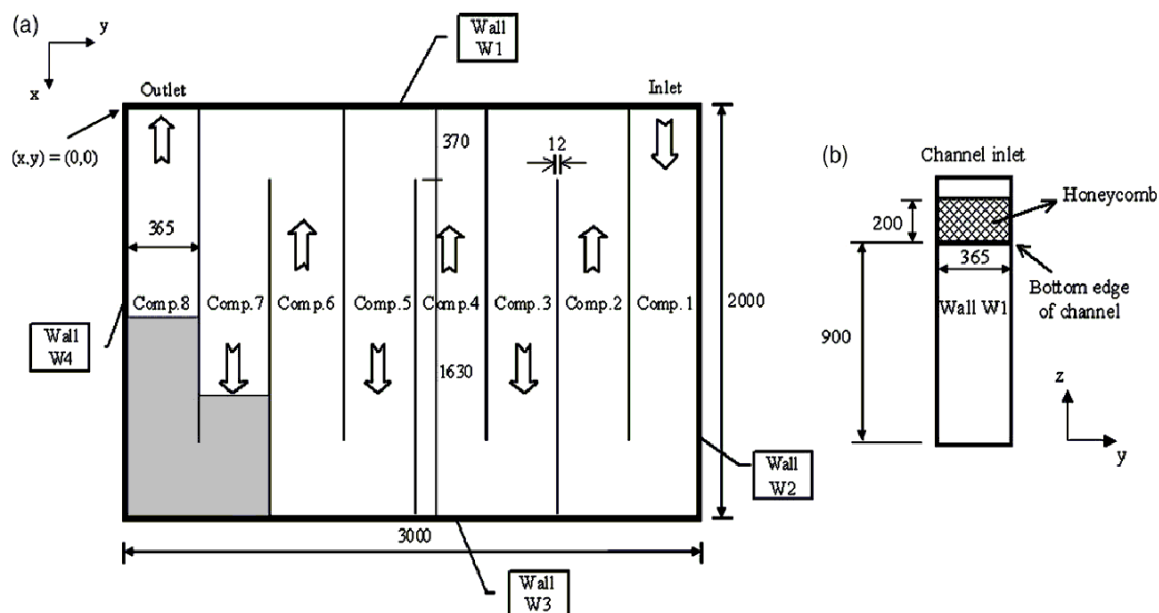
شکل ۲-۴ نمایی از تانک آزمایشگاهی

شکل (۲-۵) نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی را بصورت دو بعدی نشان می دهد. یک کانال رو باز در ورودی به محفظه ۱ اتصال دارد که در امتداد دیوار W1 می باشد. یک سرریز مستطیلی شکل لبه تیز نیز بعنوان خروجی در انتهای محفظه ۸ و در امتداد W1 نصب گردیده است. تانک آزمایشگاهی به یک سیستم هیدرولیکی بسته که دارای دو منبع تامین کننده آب، دو پمپ سانتریفیوژ، یک جریان سنج الکترومغناطیسی و لوله های پلاستیکی می باشند متصل است تا بتوان جریان عبوری مورد نظر در تانک را تامین نمایند. بمنظور اندازه گیری سرعت در تانک از دستگاه سه بعدی سرعت سنج^{۱۳} استفاده گردید. اهداف مورد نظر از آزمایش بهینه سازی پارامترهای طراحی، بررسی فرآیند هیدرولیکی جریان از طریق تعیین سرعتهای میانگین میدان جریان بوده است. همچنین مطالعه آزمایشگاهی مشابهی در رابطه با جریان و اختلاط در تانکهای تصفیه تماسی توسط شیونو و تگزیرا^{۱۴} و تگزیرا در سال های ۱۹۹۲، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ انجام شده است. [۱۵] [۱۶] [۱۷]

¹² William

¹³ acoustic Doppler velocimeter (ADV)

¹⁴ Shiono and Teixeira



شکل ۵-۲ نمای افقی از مدل تانک آزمایشگاهی

۲-۲-۲- معایب مدل‌های آزمایشگاهی

اگرچه استفاده از مدل‌های فیزیکی یک ابزار با ارزشی برای مهندسی‌نی که درگیر مسائل مربوط به طراحی و عملکرد تانک‌های تماسی می‌باشند، را فراهم کرد، اما این مدل‌ها دارای معایبی می‌باشند. هدف اصلی از تانک‌های تماسی ایجاد شرایط اختلاط انتخابی با درجه اختلاط متفاوت می‌باشند که متناسب با عدد رینولدز است و بطور کلی برای جریان‌های با سطح آزاد بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$R_e = \frac{uH}{\nu} \quad ۳-۲$$

که u برابر با خصوصیات سرعت می‌باشد که اغلب برابر با سرعت میانگین (Q/A) برای تانک‌های تماسی در نظر گرفته می‌شود. H پارامتر مربوط به مقیاس طول است که برابر با ارتفاع میانگین در نظر گرفته می‌شود و ν ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. در تانک‌های تماسی عدد رینولدز در یک مدل فیزیکی ممکن است بسیار کوچکتر از اندازه آن در نمونه اصلی باشد. بنابراین طراحی ساختار دیواره‌های داخلی جریان بر اساس مدل فیزیکی نتایجاً دارای مشکلات متعددی می‌باشد که نمونه آن مثل زبری بستر و فرآیند ضد عفونی می‌باشد. اشکال دیگر مدل‌های فیزیکی، هزینه ساخت آنها می‌باشد که نسبتاً گران می‌باشد بطوریکه تغییرات در هندسه یا توپوگرافی بستر مانند عمق جریان و تراز سرریزها براحتی امکان پذیر نمی‌باشند. همچنین آنها قابلیت انطباق ندارند بطوریکه یک مدل خاص از تانک تماسی برای تانک تماسی دیگری با تعداد متفاوت از دیواره‌های داخلی یا محفظه‌ها مناسب نمی‌باشند. برای جزئیات بیشتر از اشکالات مدل‌های آزمایشگاهی می‌توان به [۱۸] مراجعه کرد.

۲-۳- مطالعات مدل عددی

در این قسمت در ابتدا در مورد مزایا و معایب استفاده از مدل‌های عددی بحث و بررسی می‌شود سپس خلاصه‌ای از تاریخچه گسترش استفاده از مدل‌های عددی بیان می‌گردد.

۲-۳-۱- مزایا و معایب مدل‌های عددی

در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، مدل‌های عددی معایب مربوط به مقیاس کردن در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی در تانک تماسی را ندارند. مقیاس‌های مربوط به هندسه، سینماتیک و دینامیک هم در نمونه اصلی و هم در تانک‌های شبیه‌سازی شده برابر می‌باشند دیگر مزایای مربوط به مدل‌های عددی عبارتند از:

۱. بطور کلی در مقایسه با مدل‌های فیزیکی کم هزینه تر می‌باشند.
۲. انعطاف پذیر می‌باشند بطور مثال تغییرات در آرایش دیواره‌های داخلی و توپوگرافی در مدل‌های عددی را براحتی می‌توان اعمال کرد.
۳. قابلیت انطباق دارند بطوریکه می‌توان مدل مشابه را برای تانک‌های تماسی متفاوت بکار برد. بهر حال، مدل‌های عددی هم دارای معایبی می‌باشند. بخصوص که این مدل‌ها یک دسته از معادلات را حل می‌کنند که دقت آنها در به نمایش گذاشتن فرآیند هیدرودینامیکی و شیمیایی در یک تانک تماسی بطور کلی به میزان دقت بکار گرفته شده در معادلات حاکم وابسته می‌باشند. بطور مثال هنوز پارامترهای کلیدی ناشناخته‌ای در مورد مسائل مربوط به آشفتگی و فرآیندهای توزیع و پخش و سینتیک ضد عفونی در تانک‌های تماسی وجود دارد. [۱۸][۱۹] بنابراین روش‌های عددی می‌تواند منجر به اشتباهات در محاسبات گردد و بکارگیری مدل‌ها بطور کلی نیاز به تخصص بالایی دارد.

۲-۳-۲- تاریخچه دینامیک سیالات محاسباتی

در سال ۱۹۱۰ ریچاردسون^{۱۵} با ارائه مقاله‌ای جامع، سنگ بنای آنالیز عددی معادلات دیفرانسیلی را بنا نهاد. او معادله لاپلاس را بصورت یک حل تکرار شونده فرموله کرد. در سال ۱۹۱۸ لیپمان^{۱۶} نشان داد که چگونه می‌توان نرخ همگرایی حل را با استفاده از مقادیر بدست آمده جدید در هر مرحله افزایش دهد. [۲۰] اولین حل عددی شناخته شده معادلات با مشتقات جزئی برای یک مسئله دینامیکی سیال ویسکوز توسط تام^{۱۷} [۲۱] ارائه و توسط ولر^{۱۸} و همکاران تکمیل گردید. [۲۲] آنها روش‌های تابع آزمایشی^{۱۹}، تخفیف خطا^{۲۰}، روش‌های تصحیح فاصله شبکه و برون‌یابی خطا^{۲۱} را گسترش دادند. همچنین

¹⁵ Richardson

¹⁶ Liepman

¹⁷ Thom

¹⁸ Weller

¹⁹ Trial function

جزو اولین کسانی بودند که نرخ همگرایی را آنالیز و بررسی کردند. با گسترش کامپیوتر توجه به مسائل غیر دائمی جلب گردید و استفاده از روشهای تاریخچه زمانی امکان پذیر گردید. بطوریکه روش کرانک نیکلسون اولین بار مطرح گردید که در مورد مسائل چند بعدی و حلهای تکرار شونده بحث میکرد. این روش هنوز یکی از روشهای مشهور می باشد که بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. بسیاری از کارهای مرتبط با دینامیک سیالات محاسباتی در لابراتور علمی لوس آلاموس^{۲۲} انجام گرفت، که در آن ون نیومن در خلال جنگ جهانی دوم نظریه خود را در مورد پایداری معادلات تفاضل محدود سهموی گسترش داد و یک روشی را برای آنالیز یک دسته معادلات خطی ارائه کرد. در اواسط دهه پنجاه پیسمن^{۲۳} [۲۳] داگلاس^{۲۴} و راج فورد^{۲۵} یک روش کارا برای حل به روش ضمنی معادلات سهموی ارائه کردند و استفاده از گام زمانی بزرگ دلخواه امکان پذیر شد که با عنوان روش ضمنی با جهت متغییر (A-دی-آ)^{۲۶} شناخته شده بود. این روش یکی از روشهای مشهوری میباشد که برای جریانهای تراکم ناپذیر مورد استفاده قرار می گیرد و خصوصاً برای حل معادله حمل و رتیسیتی مناسب می باشد. تمام حل های وابسته به زمان که در قسمت قبل اشاره شد با یک محدوده بالایی استفاده از عدد رینولدز در پایداری محاسباتی مواجه شده بودند. تا به یک روش تقریباً نامحدود در پایداری محاسباتی که با استفاده از تفاضل بالادست که بیانگر ترم جابجایی می باشد و توجه ویژه ای به شرایط مرزی دارد دست پیدا کردند. در سال ۱۹۷۲ پاتانکار^{۲۷} واسپالدینگ^{۲۸} [۲۴] الگوریتم سیمپل^{۲۹} را ارائه کردند که بعنوان یک روش شبه ضمنی برای حل توام معادلات سرعت و فشار می باشد. این روش یک روش کارآمد برای مدلسازی فرآیند های هیدرودینامیکی می باشد که پس از آن چند نسخه اصلاح شده مانند سیمپلر، پیزو و سیمپلک^{۳۰} توسط پاتانکار، وندورمال و عیسی پیشنهاد گردید. [۱۹] این دسته از الگوریتمهای مدلسازی امروزه بطور گسترده مورد استفاده قرار میگیرند و بسیاری از بسته های نرم افزاری تجاری بر اساس این مدل کار می کنند. استفاده از الگوریتم سیمپل تا حدودی ساده می باشد و بطور موفقیت آمیزی در تعداد زیادی از کارهای دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده قرار گرفته اند. بطور کلی نسخه های دیگر سیمپل دلیل استفاده از نرخ همگرایی بهتر، باعث صرفه جویی در عملیات محاسباتی می شوند. اگرچه تعداد محاسبات در الگوریتم سیمپلر حدوداً ۳۰ درصد بیشتر از الگوریتم سیمپل می باشد، اما دلیل همگرایی

²⁰ Error relaxation

²¹ Error extrapolation

²² Los Alamos

²³ Peaceman

²⁴ Douglas

²⁵ Rachford

²⁶ Altering direction-implicit

²⁷ Patankar

²⁸ Spalding

²⁹ SIMPLE

³⁰ SIMPLER, PISO, SIMPLEC

سریعتر زمان محاسبات آن ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر می باشد [۲۵]. بنابراین الگوریتم سیمپلر در نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی بعنوان پیش فرض مورد استفاده قرار می گیرند. جزییات بیشتر از الگوریتم سیمپلر و نسخه های دیگر آنرا میتوان در [۱۹] مشاهده کرد. الگوریتمهای سیمپلر و پیرو ثابت شده است که دارای کارایی مناسب مانند الگوریتم سیمپلر برای حالات خاصی از جریان می باشند اما مشخص نمی باشد که آیا از الگوریتم سیمپلر بهتر می باشند یا خیر. مقایسه ها نشان داده اند که کارایی هر یک از الگوریتمها وابسته به شرایط جریان دارد. یک مقایسه کامل بین روشهای پیرو، سیمپلر و سیمپلر برای حالتیهای مختلفی از جریان پایدار توسط ژانگ^{۳۱} [۲۶] انجام گرفته است. نتایج نشان داد برای آندسته از مسائلی که معادلات مومنتوم به یک متغیر اسکالر بسته نشده اند، الگوریتم پیرو دارای رفتار همگرایی قویتر بوده و تلاش محاسباتی کمتری از الگوریتمهای سیمپلر یا سیمپلر نیاز دارد. همچنین مشاهده شد که زمانی که متغیرهای اسکالر به سرعتها همبستگی زیادی داشته باشند، آن وقت الگوریتم پیرو هیچ مزیت قابل توجهی نسبت به دیگر الگوریتمها ندارد. روشهای تکرار شونده سیمپلر و سیمپلر دارای خصوصیات همگرایی در مسائلی که بطور قوی همبسته شده اند را از خود نشان داده اند اما نمی توان مشخص کرد که کدامیک از روشهای سیمپلر یا سیمپلر برتر میباشدند. [۱۹]

۲-۳-۳- طبقه بندی مدل‌های عددی

همانطور که اشاره شد مدل‌های عددی بسیاری مورد مطالعه قرار گرفت در این قسمت مدل‌های عددی موجود بر حسب خصوصیات گوناگون طبقه بندی شده اند. شکل (۲-۶) طبقه بندیهای ممکن از مدل‌های استفاده شده برای پیش بینی فرآیند هیدرودینامیکی را نشان می دهد. همانطور که شکل نشان می دهد، ۸ مرحله از طبقه بندی در فرآیند مدلسازی عددی جریان وجود دارد. در طبقه بندی اول مدل‌های عددی به دو بخش تقسیم می گردند (جریان تراکم پذیر و غیر قابل تراکم). در این تحقیق از جریان غیر قابل تراکم استفاده گردید چون آب بطور کلی بعنوان سیال تراکم ناپذیر شناخته می شود. در طبقه بندی دوم جریان دائمی و غیر دائمی در نظر گرفته شده است. در مدلسازی تانک های تماسی هر دو حالت قابل بررسی می باشد که در این تحقیق نیز هر دو حالت در نظر گرفته شده است. در طبقه بندی سوم مدل‌ها به دو دسته جریان آشفته و آرام تقسیم گردیده اند که در پایان نامه حاضر هر دو حالت در نظر گرفته شده است. در قسمت چهارم جریانها به سه بخش یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم شده اند که در تانکهای تماسی حالتیهای دو بعدی و سه بعدی قابل بررسی می باشند و در این پایان نامه جریان بصورت سه بعدی مدلسازی شده است. در طبقه بندی پنجم مهمترین روشهای گسسته سازی قرار داده شده است که در این پایان نامه از روش تفاضل محدود استفاده شده است. علت انتخاب آن است که در مقایسه با روشهای دیگر ساده تر می باشد. روشهای طیفی از سری فوریه استفاده می کنند و این روش برای

³¹ Jang

مسائل خاص با دامنه های محدود کاربرد دارد. روشهای تفاضل محدود و حجم محدود در بسیاری از موارد که هندسه مسئله منظم می باشند، مشابه می باشند. مهمترین اختلاف بین آنها این است که در روش حجم محدود معادله حرکت در سراسر یک سلول انتگرال گیری می شود. هنگامی که شبکه منظم می باشد، استفاده از روش تفاضل محدود ساده تر می باشد، بدلیل آنکه تمام سلولها دارای شکل مشابهی می باشند و هیچ نیازی به شکل انتگرالی نمی باشد. در این تحقیق از یک مش محاسباتی منظم استفاده گردیده و استفاده از روش تفاضل محدود جذابتر و سریعتر بوده است. در طبقه بندی ششم مسائل به دو بخش معادلات اصلی (اولیه)^{۳۲} یا تابع جریان و معادلات چرخشی تقسیم بندی شده اند. تابع جریان و معادلات چرخشی بطور کلی برای مدلسازی جریان در حالت دو بعدی مفید می باشند اما استفاده از این معادلات برای مسائل سه بعدی ساده نمی باشند. [۲۵] از آنجائیکه در پایان نامه حاضر جریان بصورت سه بعدی مدلسازی شده است لذا تمرکز اصلی بروی حل معادلات اصلی گذاشته شده است. در طبقه بندی هفتم چند روش برای حل عددی معادلات حاکم وجود دارد. این الگوریتمها برای رسیدن به یک حل همگرا مورد استفاده قرار می گیرند. در بین آنها الگوریتم سیمپل و خانواده آن بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند و در نرم افزار های مهم دینامیک سیالات محاسباتی از آن به عنوان روش حل بهره می جویند. در نهایت در طبقه بندی هشتم استفاده از دو نوع شبکه ممکن می باشد. استفاده از شبکه های سازمان یافته، ساده تر و دارای فرمول بندی راحتتر می باشند و برای شرایط مرزی منظم کاربرد دارند و شبکه های بی سازمان را می توان برای هر نوع شرایط مرزی منطبق کرد اما استفاده از آن و فرمول بندی آن سختتر و پیچیده تر می باشد. بدلیل آنکه تانکهای تماسی دارای اشکال منظمی می باشند استفاده از شبکه سازمان یافته راحتتر بوده و در این تحقیق از آن استفاده شده است. با توجه به طبقه بندی فوق استفاده از طبقه بندی های زیر بیشتر مورد توجه می باشند.

(۱) غیر قابل تراکم (۲) دائمی و غیر دائمی (۳) آرام یا آشفته (۴) دو بعدی یا سه بعدی (۵) تفاضل محدود یا حجم محدود (۶) معادلات اصلی (اولیه) (۷) روش سیمپل و خانواده آن (۸) شبکه سازمان یافته.

همچنین مدلسازی فرآیند هیدرودینامیکی منجر به استخراج سیستم معادلات خطی بزرگی می گردند. روشهای زیادی برای حل چنین سیستمهای خطی وجود دارد که تعدادی از روشهای مهم آن بشرح زیر می باشد.

(الف) حذف گوسی^{۳۳} (ب) حل کننده سریع^{۳۴} (ج) تکرار شونده کلاسیک^{۳۵} (د) چند شبکه ای^{۳۶} (و) پیش شرطی^{۳۷} ...

³² Primitive Equation

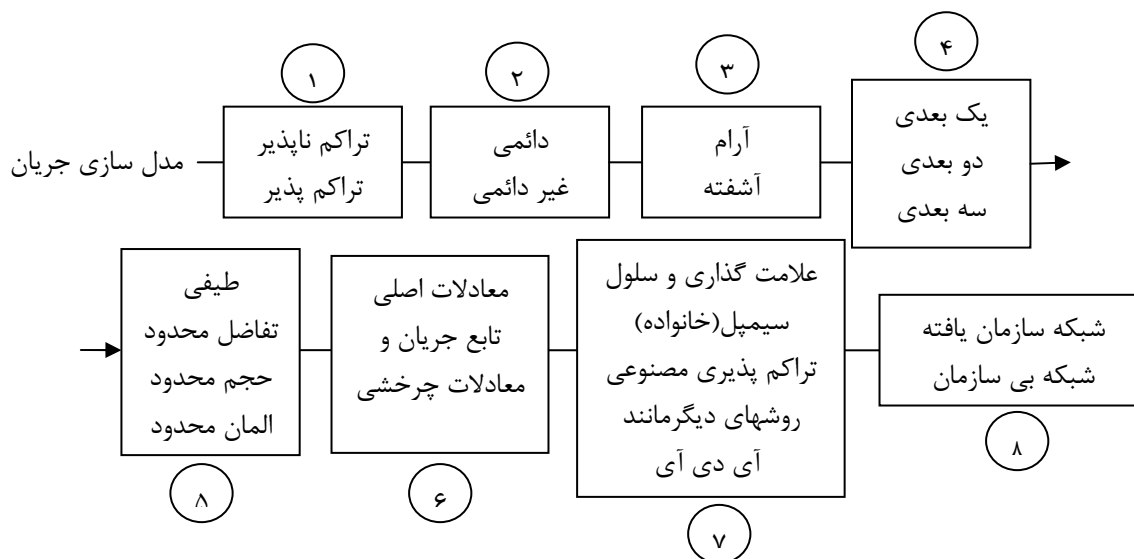
³³ Gaussian elimination for sparse linear systems

³⁴ Fast solver

³⁵ Classical iterative methods

³⁶ Multigrid

دو روش اولی روشهای حل مستقیم میباشند در حالیکه مابقی روشهای تکرار شونده می باشند. روشهای مستقیم موقعی جذاب می باشند که حافظه کامپیوتر برای ذخیره نقاط شبکه فضای کافی را داشته باشد. روش حذف گوسی یک روش مناسب و کارا برای حل بسیاری از سیستم معادلات خطی می باشد مخصوصاً برای حالتی که یک سیستم معادله قطری وجود داشته باشد. اما این روش برای حل دیگر دسته معادلات خطی که ممکن است از حل معادلات مشتقات جزئی بوجود آید آنچنان سریع نمی باشد. بنابراین دقت روشهای حل به سیستم خاص معادلات و روشی که معادلات فرمول بندی شده اند وابسته می باشد. مرتب کردن دوباره معادلات بمنظور جایگذاری ضرایبی که دارای مقادیر بزرگی هستند بروی قطر اصلی، می تواند به افزایش دقت حل بیانجامد. [۲۵] برای اطلاع بیشتر از جزئیات به [۲۷] مراجعه نمایید.



شکل ۲-۶ طبقه بندی روشهای متفاوت از مدلسازی جریان

۲-۳-۱- فرمول های هیدرواستاتیک یا غیر هیدرواستاتیک

در حل معادلات اصلی، در جریانهای با سطح آزاد غالباً فرض می گردد که شتاب قائم در مقایسه با شتاب ثقل کوچک می باشد که اصطلاحاً به آن تقریب هیدرواستاتیکی می گویند. بنابراین معادلات اصلی را می توان بر اساس استفاده از فشار هیدرواستاتیکی یا فشار هیدرودینامیکی به دو گروه تقسیم نمود. با در نظر گرفتن فرضیه فشار هیدرواستاتیکی، معادلات دقیق نبوده و عموماً جوابهای قابل قبولی ارائه نمی کنند مخصوصاً در مواقعی که تغییرات سرعت قائم زیاد بوده و یا ساختارهای چرخشی قائم رخ دهد. در بسیاری از مطالعات صورت گرفته بروی تانکهای تماسی، اغلب چرخشهای قائم در آن وجود دارد بخصوص در محفظه اول تانک و بنابراین فرضیه فشار هیدرواستاتیکی، جوابهای قابل قبولی برای توزیع

سرعت در محفظه اول ارائه نمی دهد. [۱۱] بنابراین در این تحقیق فرضیه فشار هیدرواستاتیکی مورد استفاده قرار نگرفته است و معادله مومنوم کامل در جهت Z برای مدل سازی سه بعدی جریان در تانک استفاده گردیده شده است. روشهای مختلف زیادی برای پیش بینی توزیع سرعت با استفاده از فشار هیدرودینامیکی وجود دارد که یکی از معروفترین و پرکاربردترین آنها، روش سیمپل می باشد. [۱۹]

۲-۳-۴- مروری بر مدل های عددی

در این قسمت تعدادی از مدل های عددی مهمی که در گذشته در مدل سازی تانک های تماسی مورد استفاده قرار گرفته را مورد بررسی قرار می دهیم.

۲-۳-۴-۱- مدل سازی حمل ردگیر بقائی^{۳۸} در تانک تماسی

یکی از مطالعات مدل سازی ردگیر بقائی مهمی که صورت گرفته است توسط فالکونر [۲۸] می باشد که جزئیات آن مربوط به کاربرد یک مدل عددی جامع دو بعدی و تصحیح شده می باشد که برای پیش بینی سرعت متوسط جریان و توزیع غلظت در حوضچه های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد. برای مدل سازی ترم انتقال ردگیر، از مدل تفاضل محدود مرتبه سوم استفاده شده که توسط آن قادر به مدل سازی گرادیانهای زیاد ردگیر می گردد. مدل عددی در یک مطالعه هیدرولیکی آزمایشگاهی برای جریان پلاگ از یک تانک تماسی کلرین مشخص مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مدل عددی با نتایج متناظر آزمایشگاهی آن مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آن حاکی از انطباق قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی داشت. همچنین مطالعه دیگری توسط فالکونر و اسماعیل [۲۹] انجام شده است. در این مطالعه جزئیات یک روش ضمنی زمان شبه مرکزی QUICK دو بعدی برای مدل سازی انتقال ردگیر در یک مدل فیزیکی مقیاس شده از یک تانک تماسی کلرین می باشد که نتایج عددی انطباق قابل قبولی با مدل آزمایشگاهی داشته است. اما در چند محفظه اولیه از مدل عددی بدلیل اینکه تغییرات سرعت در صفحه عمودی بسیار زیاد بود پیش بینی های عددی تطابق خوبی را با اطلاعات آزمایشگاهی نشان نداد. این پیچیدگی هیدرودینامیکی تنها با مدل سازی سه بعدی قابل شبیه سازی می باشد. مطالعات نشان داد که در قسمت اول و یا در دو قسمت اول تانک تماسی سرعت های عمودی نسبتاً بزرگی وجود دارند که نمی توان آنها را با یک مدل دو بعدی نشان داد. بنابراین در مدل سازی چنین جریاناتی نیاز به یک مدل عددی سه بعدی می باشد تا فرآیند های هیدرو دینامیکی را در تانک های تماسی بتوان بصورت دقیق تری پیش بینی کرد.

وانگ و فالکونر [۳۰] به بررسی دقت مدل های بکار رفته در پیش بینی خصوصیات هیدرودینامیکی جریان در ترم های انتقال و تنش برشی در یک مطالعه عددی پرداختند. آنها روش های مدل سازی عددی مختلفی را برای یک تانک تماسی مورد استفاده قرار دادند و با مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی به

³⁸ Conservative Tracer Transport

بررسی و آنالیز آنها پرداختند. نتایج حاکی از وجود جریان سه بعدی در ورودی تانک می باشد در حالیکه مدل عددی بکار رفته دو بعدی بوده است. علیرغم ضعف موجود در مدل سازی، مدل عددی قادر به پیش بینی صحیح نتایج در نواحی انتهایی تانک بوده است جاییکه جریان ماهیت دو بعدی از خود نشان داده است.

هانون و بولوس^{۳۹} در سال ۱۹۹۷ [۳۱] و هانون در سال ۱۹۹۸ [۶] با استفاده از یک مدل عددی به بررسی میدان سرعت و منحنی های RTD با هدف بهبود بخشیدن تانک تماسی موجود با استفاده از دیواره های داخلی پرداخت. مطالعاتی دیگری در انگلستان بروی تانک تماسی امبسی با مقایسه خصوصیات هیدرولیکی بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی انجام گرفت [۳۰][۳۲] در برخی از این مطالعات به بررسی ترکیبات مدل های مختلف آشفتگی و روش های عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود از تانک تماسی امبسی پرداختند. تنش های آشفتگی توسط مدل های ویسکوزیته ادی میانگین و مدل $k-\varepsilon$ مدل سازی گردید. نتایج عددی نشان داد که مدل $k-\varepsilon$ پیش بینی خوبی از چرخش های افقی موجود در محفظه های تانک تماسی را نشان می دهد.

در سال ۲۰۰۶ گوالتیری^{۴۰} [۳۳] در مقاله ای با عنوان مدل سازی عددی منحنی RTD در تانک تماسی با استفاده از نرم افزار مولتی فیزیک^{۴۱} به بررسی فرآیندهای هیدرودینامیکی، انتقال آشفتگی و اختلاط در دو تانک تماسی مختلف پرداخت. دو تانک تماسی دارای کانال های یکسان بوده اما محل قرار گیری دیواره های داخلی آن متفاوت بوده اند. شبیه سازی عددی برای جریان دائمی و غیر دائمی در حالت دو بعدی با استفاده از نرم افزار صورت پذیرفت. میدان جریان با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ بدست آمد و مطالعه انتقال ردگیر با استفاده از آزاد سازی ناگهانی یک ردگیر و حل معادله دو بعدی انتقال- پخش بررسی گردید. همچنین منحنی RTD بمنظور بررسی عملکرد تانک ها استخراج گردید. در همین راستا، گوالتیری [۳۴] در مقاله ای با عنوان مدل سازی عددی جریان و ردگیر در یک تانک تماسی به بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در حالت دو بعدی پرداخت و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط شیونو و تگزیرا^{۴۲} [۱۶] مورد مقایسه قرار داد که انطباق خوب میدان سرعت را نشان داد. همچنین نتایج حاکی از وجود نواحی چرخشی در نزدیکی دیواره ها و گوشه های تانک به علت حضور دیواره های داخلی بوده است. که باعث ایجاد نواحی مرده در تانک تماسی شده و جریان را از شرایط پلاگ دور می کند.

³⁹ Hannoun and Boulous

⁴⁰ Gualtieri

⁴¹ Multiphysics

⁴² Shiono and Teixeira

استامو در سال ۲۰۰۷ [۳۵] با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار CFX به بررسی یک تانک موجود در شبکه تهیه و توزیع آب کشور یونان پرداخته است. مهمترین هدف مورد نظر، افزایش کارایی تانک با در نظر گرفتن منحنی های RTD بدست آمده، بوده است. او مدل های مختلفی را با قرار دادن دیواره در نقاط مختلف بصورت سه بعدی مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاکی از افزایش کارایی تانک بوده و در نهایت یک طرح پیشنهادی برای بهبود کارایی تانک موجود ارائه نمود. تگزیرا در سال ۲۰۰۶ [۳۶] با استفاده از نرم افزار STAR-CD اقدام به مدلسازی سه بعدی تانک امبسی نمود. مهمترین هدفی که او دنبال می کرد نشان دادن این موضوع می باشد که نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی موجود قابلیت مدلسازی صحیح از یک نمونه آزمایشگاهی را دارا می باشند. او با نشان دادن نتایج بدست آمده از مدل عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی به بررسی مدل عددی تولید شده پرداخت. همچنین خاطر نشان کرد که برای اطمینان از صحت کارکرد نرم افزار های موجود باید علاوه بر مقایسه منحنی های FTC می بایست میدان های سرعت را هم مورد مقایسه قرار داد و بیان نمود که برابری منحنی های FTC حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، لزوماً برابری میدان های سرعت در یک تانک را نتیجه نمی دهند.

در سال ۲۰۰۷ گوالتیری [۳۷] با استفاده از مدلسازی دو بعدی در دو حالت دائمی و غیر دائمی به بررسی تاثیر دیواره های داخلی در کارایی تانک تماسی پرداخت. بمنظور تعیین سرعت های جریان از مدل $k-\varepsilon$ استفاده نمود. همچنین به منظور درک بهتر از فرآیند هیدرولیکی به مطالعه یک ردگیر بقائی در جریان پرداخت که توسط یک معادله دو بعدی حمل-نفوذ مدلسازی گردید و منحنی های RTD را استخراج نمود. نتایج حاکی از آن بود که وجود دیواره ها می تواند در کارایی هیدرولیکی تانک تاثیر گذار باشد و لزوم بررسی بیشتر در این زمینه را بیان نمود.

در سال ۲۰۰۸ ویلیام [۱۴] با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی و بکار گیری معادلات تصحیح شده برای جریان های با عدد رینولدز پائین و روش عددی مناسب با دقت بالا به بررسی دقیقتر فرآیند های هیدرولیکی جریان در تانک های تماسی پرداخت. او با پیشنهاد یک مدل تصحیح شده از مدل $k-\varepsilon$ به بررسی جریان پرداخت. تغییرات او در معادله، برای متغیر c_{μ} در معادله اصلی $k-\varepsilon$ بوده است. که در آن c_{μ} تابعی از تولید آشفتگی محلی به میزان اتلاف آن می باشد. نشان داد که با معرفی ضریب جدید، پیش بینی ترم $c_{\mu} f_{\mu}$ در معادله لزجت آشفته نسبت به معادله اصلی دقیق تر می باشد و در نهایت بمنظور صحت عملکرد نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود که انطباق خوبی را نشان داد.

۲-۳-۴-۲- مدلسازی فرآیند ضد عفونی^{۴۳}

ضد عفونی کردن آب توسط کلر که اولین بار در ۸۰ سال پیش برای تصفیه آب مورد قبول قرار گرفت، هنوز هم موثرترین روش برای پیشگیری از بیماریهای همه گیر می باشد. بهر حال از آنجا که کلر یک اکسیدکننده قوی می باشد با مواد آلی طبیعی موجود در آب واکنش داده و تولید ترکیبات خطرناک ناشی از فرآیند ضد عفونی^{۴۴} در آب میکند. یکی از ترکیبات خطرناک تری هالومتان^{۴۵} در آب آشامیدنی می باشد که در سال ۱۹۷۴ بعنوان عامل سرطانهای معده تشخیص داده شده است. تری هالومتان از اولین نوع ترکیبات خطرناک هالوژن شده توسط فرآیند ضد عفونی آب می باشد و دی کلرواسید^{۴۶} و تری کلرواسید^{۴۷} متعاقباً بعنوان دیگر ترکیبات خطرناک موجود در آبهای تصفیه شده محسوب می گردند. [۱] بدلیل آنکه هم آنالیزهای شیمیایی وهم مانیتور کردن ترکیبات بسیار گران می باشد و هنوز بطور وسیع در دسترس نمی باشد، ایجاد یک مدل عددی کارا برای مدلسازی فرآیند ضد عفونی بعنوان یک اولویت مطرح شده است.

یکی از اولین تحقیقات برای مدلسازی عددی فرآیند ضد عفونی در تانک تماسی توسط ژانگ^{۴۸} [۳۸] در سال ۲۰۰۰ صورت گرفته است. در این روش علاوه بر حل معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ در حالت دو بعدی، دو معادله اسکالر اضافی را مورد استفاده قرار داد. یکی از آنها برای مدلسازی نرخ کاهش کلر از طریق حل معادله حمل-پخش با استفاده از یک عبارت چشمه بوده و دیگری برای مدلسازی فرآیند غیر فعال سازی میکرو ارگانسیم های موجود در آب از طریق حل معادله حمل-پخش می باشد که در آن عبارت چشمه تابعی از غلظت کلر و نرخ کاهش میکروب می باشد. نتایج حاکی از آن است که اگر تزریق کلر در ورودی در یک بازه زمانی کوتاه انجام گیرد و غلظت باقیمانده در خروجی را در یک حد مشخص نگه دارند آنگاه مدل قادر به پیش بینی غلظت میکرو ارگانسیم ها و تغییرات آنها در خروجی می باشد.

همچنین وانگ^{۴۹} [۵] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از ترکیب روشهای عددی مختلف با روشهای مدلسازی آشفستگی به حل معادلات حاکم بر جریان و معادله حاکم بر حمل ماده ضد عفونی کننده در تانک الن در حالت دو بعدی پرداخت. و بمنظور تاثیر روشهای گسسته سازی بر کارایی فرآیند ضد عفونی در تانک تماسی، منحنی های RTD بدست آمده از روشهای عددی را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرارداد.

⁴³ Modelling disinfection kinetics

⁴⁴ Disinfection By-Products

⁴⁵ trihalomethanes

⁴⁶ dichloroacetic

⁴⁷ trichloroacetic

⁴⁸ Zhang

⁴⁹ Wang

نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی و روش‌های عددی متفاوت در مدل‌سازی فرآیند ضد عفونی منجر به پیش بینی‌های متفاوت از الگوهای هیدرولیکی جریان می‌گردد.

۲-۳-۵- بسته‌های تجاری دینامیک سیالات محاسباتی

بسته‌های نرم افزاری برای آنالیز جریان سیال و غلظت در انواع مختلفی موجود می‌باشد. بسته‌ها از لحاظ تقریب‌های فیزیکی و تکنیک‌های حل عددی دارای تفاوت‌های زیادی می‌باشند بطوریکه انتخاب یک نرم افزار مناسب تبدیل به یک قضیه بگرنج شده است. بطور کلی ۴ برنامه مشهور تجاری دینامیک سیال محاسباتی با نام‌های PHOENICS, FLUENT, CFX و STAR-CD وجود دارد. تمام این برنامه‌ها برای مدل‌سازی فرآیند‌های هیدرو دینامیکی و اختلاط قابل استفاده می‌باشند. بمنظور ایجاد دسترسی ساده به قدرت حل برنامه‌ها تمام بسته‌های تجاری دینامیک سیالات محاسباتی دارای صفحه ارتباطی با کاربر بمنظور وارد کردن پارامترهای مسئله و بررسی نتایج آن می‌باشند. بنابر این تمام برنامه‌ها حاوی سه بخش عمده مهم می‌باشند. (۱) پیش پردازنده که مش شبکه و اطلاعات ورودی را تولید می‌کند. (۲) حل کننده (۳) پس پردازنده که نمایش گرافیکی از نتایج را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در قسمت بعدی تعدادی از خصوصیات مهم این نرم افزارها را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. [۱۹]

۲-۳-۵-۱- CFX (www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx)

CFX توسط تکنولوژی AEA تولید شده است. کاربرد آن در هوا فضا، خودرو، دریا، محیط زیست، نیروگاه برق می‌باشد. این نرم افزار برای تعدادی از مطالعات گندزدایی با موفقیت بکار گرفته شده است. CFX از مش تتراهدرا ل بی سازمان استفاده می‌کند و معادلات حاکم را بر اساس روش حجم محدود و بر اساس مقادیر ذخیره شده در رئوس سلول حل می‌کند. گسسته سازی فضایی بر اساس مرتبه اول و دوم می‌تواند برای محاسبات معادلات گسسته مورد استفاده قرار گیرد. این نرم افزار هم اکنون توسط شرکت Ansys خریداری گردیده شده است.

۲-۳-۵-۲- PHOENICS (www.cham.co.uk)

PHOENICS یک بسته نرم افزاری با اهداف کلی می‌باشد و از سال ۱۹۷۰ منتشر گردید که بصورت کمی، جریان سیال (هوا، آب، روغن و ...) را می‌تواند در مجاور موتور، ساختمانها، ساختارهای طبیعی محیط زیست و ... پیش بینی کند. همچنین تغییرات وابسته به ترکیبات فیزیکی و شیمیایی، تنش‌های وابسته به اجسام غوطه ور را می‌تواند بررسی کند. PHOENICS امکان استفاده از مدل‌های آشفتگی را مانند مدل ویسکوزیته ثابت، طول اختلاط پرانتل، $\epsilon - k$ ، مدل اسماگورینسکی^{۵۰} را می‌دهد.

⁵⁰ Smagorinsky subgrid-scale

STAR-CD (www.cd.co.uk/products/cfd-products.htm) - ۳-۵-۳-۲

STAR-CD یک برنامه حجم محدود با مشهای غیر سازمان یافته می باشد. STAR-CD در ابتدا بطور وسیعی در طراحی خودرو مورد استفاده قرار گرفت و هم اکنون در ترمودینامیک، بیوشیمیایی و جریانهای مربوط به فضا مورد استفاده قرار می گیرد. قدرت مدلسازی جریان آن شامل جریانهای دائمی و غیر دائمی، آرام نیوتنی و سیالات غیرنیوتنی، آشفته، تراکم ناپذیر، انتقال حرارت با همرفت، رسانای الکتریکی، تشعشع، انتقال جرم، واکنش شیمیایی، جریانهای چند سیالی، چند فزی لاگرانژی، چند فازی اویلری، سطوح آزاد و احتراق سوختها بکار می رود.

Fluent (www.fluent.com) - ۴-۵-۳-۲

اولین نسخه از برنامه فلونت در سال ۱۹۸۳ منتشر گردید. امروزه شرکت فلونت مدعی بزرگترین تولید کننده نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی در جهان می باشد. کمپانی نرم افزار جامع دینامیک سیالات محاسباتی را برای کاربرد وسیعی در صنعت عرضه کرده است. نرم افزار فلونت در بسیاری از صنایع مانند هوا فضا، اتومبیل سازی، بیوشیمیایی، فرآیند های شیمیایی، خنک سازی وسایل الکتریکی، محیط زیست، دریایی و سواحل، اختلاط، روغن و گاز و ... مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد فلونت در صنایع شیمیایی بسیار گسترده می باشد. نرم افزار قادر است شرایط پیچیده هندسی مانند اختلاط تانکها و جریانهای چند فازی مانند گاز، مایعات و بعضی مواقع واکنش جامدات باهم را مورد بررسی قرار دهد. فلونت می تواند برای مطالعه اکثر فرآیند های شیمیایی مانند اختلاط، جدا سازی، احتراق، واکنش، تصفیه مورد استفاده قرار گیرد. این نرم افزار نیز توسط شرکت Ansys خریداری گردیده شده است.



معادلات هیدرودینامیکی
حاکم بر جریان سیال و
پارامترهای موثر در تعیین
کارایی تانک تماسی

۳-۱- مقدمه

در این فصل در ابتدا معادلات حاکم بر جریان سیال بصورت سه بعدی که شامل دو قانون بقای جرم و مومنتوم می باشند استخراج گردیده اند و معادلات را بگونه ای باز نویسی می کنیم که بتوانند فرآیند پیچیده هیدرودینامیکی ضد عفونی را در تانک تماسی مدلسازی نماید. همچنین در ادامه به بررسی مدل های موجود برای مدلسازی جریانات آشفته در تانکهای تماسی با دیواره های داخلی بصورت سه بعدی می پردازیم و معادله حاکم انتقال-پخش^۱ برای حمل یک رد گیر بقایی را بررسی می نمایم. در نهایت به بررسی پارامترهای موثر در تعیین کارایی تانک تماسی کلرین پرداخته و روشهای تعیین آنها معرفی می گردد.

۳-۲- قانون بقای جرم در حالت سه بعدی

قانون بقای جرم بصورت زیر بیان می گردد:

نرخ خالص جریان جرم ورودی به المان سیال = نرخ افزایش جرم در المان سیال
برای محاسبه نرخ خالص جریان، المانی را با ابعاد $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ که دارای سرعت هایی در مرکز المان برابر با u, v, w به ترتیب در جهات x, y, z است را در نظر می گیریم.

با استفاده از بسط سری تیلور برای حجم کنترل شکل (۳-۱) می توان معادله سه بعدی قانون بقای جرم را در حالت کلی (سیال تراکم پذیر، جریان آشفته یا آرام) استخراج نماییم که برابر است با: [۱۹]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad 1-3$$

که در آن ρ برابر با جرم مخصوص و u, v, w برابر با سرعتها در جهات x, y, z و t برابر با زمان می باشد که در حالت برداری بصورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad 2-3$$

برای جریانهای دائمی (تراکم پذیر و غیر قابل تراکم) معادله ۳-۱ بصورت زیر ساده می گردد.

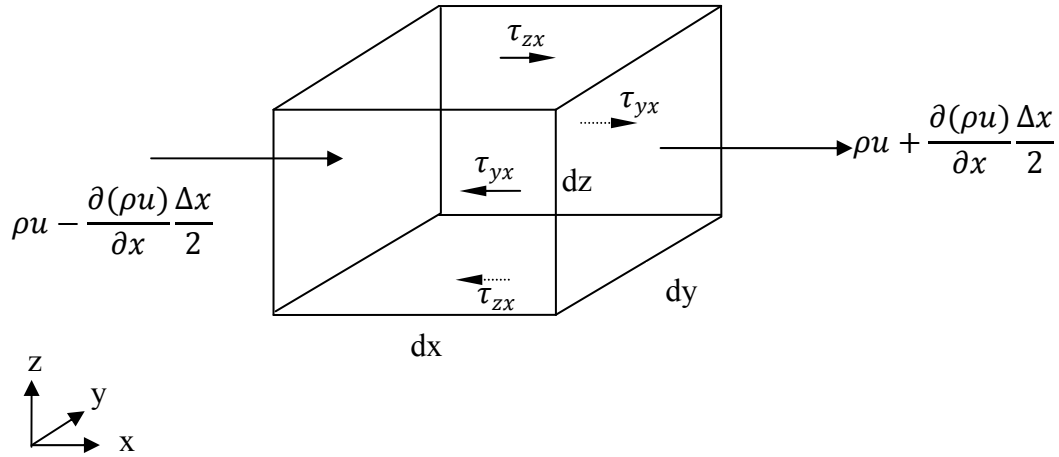
$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad 3-3$$

و یا

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad 4-3$$

که در آن u, v, w تابعی از x, y, z می باشد و مستقل از زمان هستند. برای جریانات غیر قابل تراکم (دائمی و غیر دائمی) معادله ۳-۱ بصورت زیر می باشد.

¹ Advective-Diffusion



شکل ۱-۳ جریان جرمهای ورودی و خروجی از المان سیال و تنش های برشی در جهت x

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 5-3$$

یا

$$\nabla \cdot (U) = 0 \quad 6-3$$

۳-۳- معادلات مومنتوم

قانون دوم نیوتن که در مورد حرکت اجسام می باشد به صورت زیر بیان می گردد.

برآیند نیروهای موثر وارد بر ذره سیال = نرخ افزایش اندازه حرکت ذره سیال

با بکارگیری معادله برای حجم کنترل شکل ۱-۳ معادلات مومنتوم برای جریانات آرام یا آشفته در جهات

x, y و z برابر است با: [۹]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \quad 7-3$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \quad 8-3$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right] \quad 9-3$$

در معادلات فوق Y, X و Z برابر با نیروهای حجمی در واحد جرم در جهات x, y, z و P برابر با فشار و $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{zz}$ برابر با تنشهای عمودی در جهات x, y, z می باشند. همچنین τ_{yx}, τ_{zx} به ترتیب برابر با تنشهای برشی در جهت x در صفحات عمود بر جهات y و z می باشد و بهمین ترتیب می توان مقادیر مشابه را در معادلات ۳-۸ و ۳-۹ را بیان نمود.

همچنین معادلات فوق را می توان به شکل بقایی نوشت. اگر معادله ۳-۵ را در u ضرب نموده و با معادله ۳-۷ جمع نمائیم معادله ۳-۱۰ بدست می آید و با تکرار اینکار برای بقیه معادلات شکل بقائی معادلات فوق را بصورت زیر نتیجه می دهد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \quad 10-3$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \quad 11-3$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right] \quad 12-3$$

۳-۳-۱- جریان آرام

اگرچه جریان در تانکهای تماسی با مقیاس واقعی از نوع آشفته می باشد اما مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می گیرد که در آن جریان با استفاده از مدل آشفتگی ادی ثابت که مشابه جریان آرام است بخوبی قابل مدلسازی است. بنابراین بررسی شرایط جریان آرام در این مرحله ضروری می باشد. برای یک سیال نیوتنی در شرایط جریان آرام، تنش های برشی لزجی تابعی از نرخ تغییر شکل می باشد. تنشهای عمودی می تواند بصورت زیر تعریف گردد. [۳۹]

$$\sigma'_{xx} = \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right] \quad 13-3$$

که در آن μ لزجت دینامیکی می باشد. بهمین ترتیب می توان تنشهای عمودی مشابهی را برای جهات y و z تعریف کرد. تنشهای برشی موجود در معادله ۳-۷ را بر حسب نرخ تغییرات کرنش بصورت زیر می توان بیان نمود.

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad 14-3$$

$$\tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

بطور مشابه می توان تنشهای برشی در جهات y و z را نیز بیان نمود.

با جایگزینی معادلات ۱۳-۳ و ۱۴-۳ در معادله ۱۰-۳ ناویر استوکس را برای جریان تراکم پذیر در جهت x نتیجه می دهد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \gamma \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\gamma}{3} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right] \quad ۱۵-۳$$

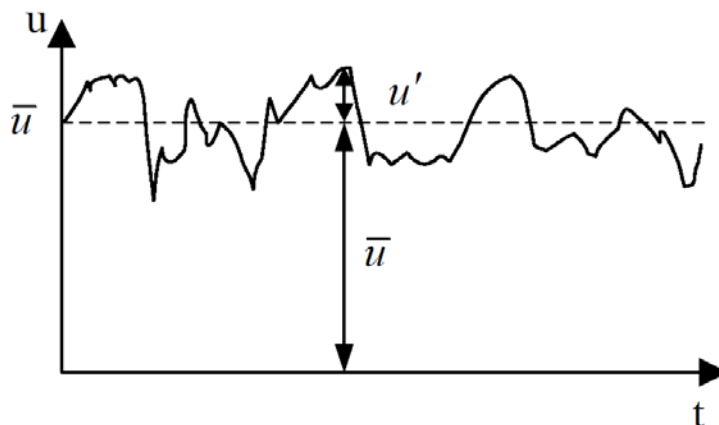
که در آن γ برابر با لزجت سینماتیکی می باشد. برای سیال غیر قابل تراکم معادله پیوستگی ۵-۳ را می توان در معادله ۱۵-۳ قرار داد که در نهایت معادله به صورت زیر خلاصه می گردد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \gamma \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad ۱۶-۳$$

۳-۳-۲- جریان آشفته

برای یک جریان آشفته سرعت جریان را می توان به دو قسمت سرعت میانگین زمانی و سرعت نوسانی تجزیه کرد که شکل (۲-۳) نمونه ای از تجزیه سرعت در جهت x را نشان می دهد. سرعت لحظه ای جریان آشفته را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$u = \bar{u} + u'$$



شکل ۲-۳ سرعت میانگین و لحظه ای از یک جریان آشفته

که در آن \bar{u} برابر با سرعت متوسط زمانی $\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt$ و u' برابر با سرعت نوسانی می باشد که

$$\bar{u}' = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u' dt = 0$$

میانگین آن نسبت به زمان برابر با صفر است

با جایگزینی سرعتهای لحظه ای فوق در معادله ۱۰-۳ و گرفتن میانگین زمانی از معادله ، معادله زیر بدست می آید. [۹]

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \bar{X} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u' u'} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u' v'} \right] \quad ۱۷-۳$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u' w'} \right]$$

همچنین بطور مشابه می توان معادلات حاکم در جهات y و z را بدست آورد. با مقایسه معادله ۱۷-۳ با معادله ناویر استوکس اصلی (۱۶-۳)، مشخص می گردد که مقادیر مربوط به سرعت‌های لحظه ای u, v, w و ترم P با مقادیر متوسط زمانی جایگزین شده اند و همچنین ترم های جدیدی اضافه شده اند که ناشی از گرفتن متوسط زمانی می باشد و بیانگر تنش‌های آشفستگی می باشند. ترم‌های اضافی بصورت زیر بیان می گردند.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho u' u'}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho u' v'}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho u' w'}$$

که ترم‌های $-\overline{\rho u' u'}, -\overline{\rho u' v'}, -\overline{\rho u' w'}$ را بدلیل شباهت آن با تنش های برشی ویسکوز با نام تنش‌های رینولدز می شناسند. این ترم‌ها فقط بعلت وجود آشفستگی در معادلات ظاهر می گردند و در جریانهای آرام برابر با صفر می باشند.

۳-۳-۳- نیروهای جسمی

با صرفنظر از گردش زمین و فرض اینکه z مختصات عمودی می باشد، نیروهای جسمی را می توان بصورت زیر نوشت:

$$X = 0 \quad ۱۸-۳$$

$$Y = 0$$

$$Z = -g$$

که در آن g شتاب ثقل زمین می باشد. اگر گردش زمین در نظر گرفته شود، بعلت حرکت نسبی شتاب اضافی بوجود می آید که با عنوان شتاب کوریولیس^۲ شناخته می شود. شتاب اضافی را در قالب نیروهای جسمی بصورت زیر می باشد [۴۰]

$$X = +2v\omega \sin \varphi \quad ۱۹-۳$$

$$Y = -2u\omega \sin \varphi$$

$$Z = -g$$

که در آن ω برابر با سرعت چرخشی زمین ($7.3 \times 10^{-5} \text{ radssec}$) و φ برابر با عرض جغرافیایی زمین می باشد.

^۲ Coriolis

۳-۳-۴- فرضیه عمق کم آب

در اکثر جریانهای افقی، شتاب قائم ناشی از فرایند هیدرودینامیکی، در مقایسه با اثرات وزن ناچیز می باشند. در نتیجه در معادله ۳-۱۲ مولفه های شتاب قائم و تنشهای برشی در جهت قائم قابل صرفنظر کردن می باشند و معادله ۳-۱۲ بصورت زیر تبدیل می گردد. [۱۲]

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \quad ۲۰-۳$$

رابطه فوق را فرضیه هیدرواستاتیکی نام گذاری می کنند و در مدلسازی جریان آب با عمق کم دارای کاربرد وسیعی می باشد. اما در تحقیق حاضر بعلت وجود چرخشهای قائم که در مطالعات آزمایشگاهی مشاهده گردید، استفاده از این فرضیه معتبر نمی باشد.

۳-۴- مدل آشفتگی

همانطوریکه در بخش ۳-۳-۲ نشان داده شد جریانات آشفته دارای تنشهای اضافی رینولدز در مقایسه با جریانات آرام در فرمول بندیشان می باشند. بر اساس تئوری بوزینسک^۳ تنشهای برشی رینولدز به سرعت های محلی جریان وابسته می باشند که بصورت زیر نشان داده می شوند: [۹]

$$\begin{aligned} -\overline{\rho u' u'} &= \rho \gamma_t \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] \\ -\overline{\rho u' v'} &= \rho \gamma_t \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] \\ -\overline{\rho u' w'} &= \rho \gamma_t \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad ۲۱-۳$$

که در آن γ_t برابر با لزجت ادی^۴ (مانند ν در جریان آرام) می باشد. برای جریانات آشفته لزجت ادی معمولاً از لحاظ مقدار بسیار بزرگتر از لزجت در جریان آرام می باشد. برای تعیین تنشهای رینولدز موجود در معادله ۳-۲۱ روشهای متنوع و فرمول بندیهای پیچیده ای برای محاسبه لزجت ادی وجود دارد که در این بخش به معرفی تعدادی از مدلها بصورت مختصر پرداخته می شود.

۳-۴-۱- مدل لزجت ادی ثابت

مدلهای طول اختلاط و لزجت ادی ثابت بعنوان مدلهای آشفتگی صفر معادله ای شناخته شده اند [۱۹] عبارت دیگر هیچ معادله اضافی برای بیان آشفتگی حل نمی گردد. این فرضیه ساده در مطالعه مدلهای مربوط به دریاچه ها و دریاها مورد استفاده قرار می گیرد. اما استفاده از این روش در بررسی جریانهها در

³ Boussinesq

⁴ Eddy Viscosity

جت ها، دنباله ها^۵ جریانهای نزدیک سواحل مناسب نمی باشد و توزیع لزجت ادی باید در تمامی میدان جریان محاسبه گردد.

۳-۴-۲- مدل طول اختلاط

در بررسی های ابعادی فرض می گردد که لزجت سینماتیکی آشفته v_t (که واحد آن m^2/s می باشد) را می توان نتیجه حاصلضرب مقیاس سرعت آشفته (m/s) و مقیاس طول L بیان کرد. اگر یک مقیاس سرعت و یک مقیاس طول برای تشریح اثرات آشفته کافی باشد، تحلیل ابعادی نشان می دهد:

$$\gamma_t = C_t v_t l_m \quad 22-3$$

که در آن C_t ثابت بی بعد تناسب می باشد. بیشتر انرژی جنبشی آشفته درون ادیهای بزرگتر نهفته است و بنابراین مقیاس طول آشفته l مشخصه این ادیها می باشد که روی جریان متوسط تاثیر مستقیم دارند. اگر بپذیریم که یک رابطه قوی بین جریان متوسط و رفتار بزرگترین ادیها برقرار است، می توانیم رابطه ای بین مشخصه مقیاس سرعت ادیها با خواص جریان متوسط پیدا کنیم. مشخص شده است که این روش برای جریانهای آشفته دو بعدی ساده که تنها تنش رینولدز مهم $-\rho u'v'$ و تنها گرادیان سرعت متوسط چشمگیر $\frac{\partial u}{\partial y}$ است، خوب عمل می کند. برای چنین جریانهایی حداقل از نظر ابعادی صحیح است بگوئیم اگر مقیاس طول ادی l_m باشد، داریم:

$$v = c_t l_m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad 23-3$$

که c_t ثابت بی بعد می باشد. مقدار مطلق شیب سرعت متوسط به این مفهوم است که مقیاس سرعت بدون در نظر گرفتن علامت شیب سرعت همیشه مقدار مثبتی است. با ترکیب معادلات ۲۲-۳ و ۲۳-۳ و حذف ثابتهای C_t و c_t که در این دو معادله ظاهر می شوند، به مقیاس طول جدیدی می رسیم:

$$\gamma_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad 24-3$$

که این همان مدل طول اختلاط پرانتل است. [۹] آشفتهگی تابعی از جریان است و اگر آشفتهگی تغییر کرد لازم است که در مدل طول اختلاط این تغییرات را با تغییر l_m در نظر بگیریم. برای یک دسته اساسی از جریان های آشفته ساده، شامل جریانهای آشفته آزاد و لایه های مرزی دیوار می توان با یک سری فرمولهای جبری ساده این ارتباط را برقرار نمود. بعضی مثالها در جدول (۳-۱) داده شده است [۹] که در آن y ، بیانگر فاصله از دیوار و $k = 0.41$ ثابت فون کارمن می باشد. بدیهی است که طول اختلاط در جریانهایی که خواص آشفتهگی نسبت به مقیاس طول جریان متوسط رشد می کند بسیار مفید است،

⁵ Wakes

بنابراین l_m می تواند با استفاده از یک فرمول ساده جبری بصورت تابعی از مکان معرفی شود. مدل طول اختلاط نظیر آنچه توسط بالدوین^۶ [۴۱] ارائه داده شده است، مدلی است که بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. برای جریان سه بعدی بطور کلی طول اختلاط بصورت زیر بیان می گردد:

$$\gamma_t = l_m^2 \cdot J \quad ۲۵-۳$$

$$J^2 = 2 \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right]^2 + 2 \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right]^2 + 2 \left[\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right]^2$$

که در آن مقدار طول اختلاط را بطور گسترده بر اساس تجربیات و مشاهدات تعیین کرد. مزیت مدل طول اختلاط پیرانتل در آسان بودن و ارزان بودن محاسبات آن می باشد و با انتخاب یک مقدار ثابت طول اختلاط در بسیاری از حالتها، جوابهای قابل قبولی را نتیجه می دهد. بطور مثال طول اختلاط در کانالهای باز بصورت زیر بدست می آید [۹].

$$l_m = L \left[0.14 - 0.08 \left(1 - \frac{y}{L} \right)^2 - 0.06 \left(1 - \frac{y}{L} \right)^4 \right] \quad ۲۶-۳$$

که در آن L برابر نصف عرض کانال و y برابر با فاصله از دیوار می باشد. همچنین فرمولهای مشابهی برای لایه مخلوط، فواره، دنباله ارائه شده است اما دارای معایبی نیز می باشد که مهمترین آنها عبارتند از اینکه مدل در مدلسازی جریانهای با جدایی و چرخش مجدد کاملاً ناتوان است و فقط خواص جریان متوسط و تنش برشی آشفته را محاسبه می کند. [۱۹]

۳-۴-۳ مدل $k-\varepsilon$

مدلهای دو معادله ای به عنوان زیر بنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدلسازی جریانات آشفته بخصوص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در این مدلها با حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن مستقلانه مقیاس سرعت آشفتهگی و مقیاس طول آشفتهگی می شوند. مهمترین اختلاف بین مدلهای دو معادله ای و سایر مدلها آن است که مدلهای دو معادله ای مدلهای کاملی می باشند یعنی از آنها می توان برای پیش بینی خواص یک جریان آشفته بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان و یا هندسه جریان استفاده نمود. در حالیکه هم در معادله صفر معادله ای (جبری) و هم در معادله یک معادله ای، طول مقیاسهایی وجود دارد که برای تعیین اندازه آنها نیاز به دانستن از قبل رژیم جریان و شکل آن می باشد و این امر مدلسازی جریانات آشفته قبل از حل آنها را کمی پیچیده می نماید. [۳۶]

⁶ Baldwin

جدول ۱-۳ طولهای اختلاط جریان های آشفته دو بعدی

جریان	طول اختلاط l_m	L
لایه اختلاط	0.07L	عرض لایه
فواره	0.09L	عرض نصف لایه
دنباله	0.16L	عرض نصف دنباله
فواره با تقارن محوری	0.075L	عرض نصف جت
لایه مرزی ($\frac{\partial p}{\partial x} = 0$) زیر لایه لزج و لایه قانون لگاریتمی ($y/L \leq 0.22$) لایه خارجی ($y/L \geq 0.22$)	$ky(1 - \exp(-y^+ / 26))$ 0.09L	ضخامت لایه مرزی
لوله ها و کانال ها (جریان کاملاً توسعه یافته)	$L \left[0.14 - 0.08 \left(1 - \frac{y}{L} \right)^2 - 0.06 \left(1 - \frac{y}{L} \right)^4 \right]$	شعاع لوله یا نصف عرض کانال

مدل $k-\varepsilon$ یک مدل نسبتاً کامل، عمومی و عملی می باشد که برای تشریح آشفتگی بکار میرود و برای بیان حمل خواص آشفتگی توسط جریان متوسط، پخش، تولید و استهلاک آشفتگی مفید می باشد. در این مدل دو معادله حمل (معادله دیفرانسیل جزئی)، یکی برای انرژی جنبشی آشفته k و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته ε حل می شود. از ترمهای k, ε برای تعیین مقیاسهای سرعت و طول در جریانات آشفته به صورت زیر استفاده می گردد:

$$v = k^{1/2} \text{ and } l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

با استفاده از روش مشابه با مدل طول اختلاط، لزجت ادی بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\gamma_t = C_v l = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 27-3$$

که در آن c_μ یک ثابت بدون بعد می باشد. برای تسهیل در محاسبات بعدی برای ترمهای ε, k و γ_t معمول است که مولفه های نرخ تغییر شکل را بصورت تانسور (ماتریس) می نویسند:

28-3

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{pmatrix}$$

تجزیه نرخ تغییر شکل المان سیال در جریان آشفته به یک مولفه متوسط و یک مولفه نوسانی،
 المان های ماتریس زیر را نتیجه می دهد:

$$e_{xx}(t) = E_{xx} + e'_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x}$$

$$e_{yy}(t) = E_{yy} + e'_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y}$$

$$e_{zz}(t) = E_{zz} + e'_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z}$$

$$e_{xy}(t) = E_{xy} + e'_{xy} = e_{yx}(t) = E_{yx} + e'_{yx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right]$$

$$e_{xz}(t) = E_{xz} + e'_{xz} = e_{zx}(t) = E_{zx} + e'_{zx} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right]$$

$$e_{yz}(t) = E_{yz} + e'_{yz} = e_{zy}(t) = E_{zy} + e'_{zy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right]$$

ضرب اسکالر دو تانسور a_{ij} و b_{ij} بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$a_{ij} \bullet b_{ij} = a_{11}b_{11} + a_{12}b_{12} + a_{13}b_{13} + a_{21}b_{21} + a_{22}b_{22} + a_{23}b_{23} + a_{31}b_{31} + a_{32}b_{32} + a_{33}b_{33} \quad ۲۹-۳$$

مدل استاندارد، معادلات انتقال زیر را که برای k و ε بکار برده شده است، استفاده میکنند: [۹]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial ku}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} + \frac{\partial kw}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + 2\gamma_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \varepsilon \quad ۳۰-۳$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon v}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad ۳۱-۳$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\gamma_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

معادلات دارای پنج ثابت قابل تنظیم $c_\mu, \sigma_K, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ هستند. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مقادیر زیر را

برای این ثابت ها برای یک محدوده وسیع از جریان های آشفته وارد ، بکار می برد: [۱۹]

$$C_\mu = 0.09; \quad \sigma_K = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

لازم بذکر است که مقادیر فوق برای یک تانک تماسی اندازه گیری نشده است. مزیت استفاده از مدل

$k-\varepsilon$ راحتی استفاده از آن می باشد زیرا برای حل مسئله فقط نیاز به شرایط اولیه و مرزی می باشد. مدل

$k-\varepsilon$ را برای مسائل گوناگونی از جریان سیال آزمایش کردند و صحت نتایج آن نشان دهنده کارآمدی این

مدل آشفته می باشد. و مهمترین عیب این مدل طولانی بودن زمان محاسبات آن در مقایسه با روشهای

دیگر می باشد زیرا در این مدل دو معادله دیفرانسیلی باید حل گردد. [۱۹] این مدل همچنین مشکلاتی با جریانهای چرخشی و جریانهای همراه با کرنش های بزرگ، سریع و اضافی (مثلاً لایه های مرزی قوس دار و یا گذرگاههای واگرا) دارد و جریانهای ثانویه در کانال های غیر دایره ای را نمی توان با مدل $k - \varepsilon$ پیش بینی کرد.

۳-۴-۴- مدلسازی ادی های بزرگ^۷

در مدلسازی جریانات آشفته، بطور کلی پذیرفته شده است که ادی های بزرگ تعیین کننده ساختار هیدرودینامیکی حاکم بر جریان می باشند. دلایل آنرا می توان بشرح ذیل بیان نمود.

(الف) ادی های بزرگ بروی جریان متوسط تاثیر مستقیم می گذارند.

(ب) اکثر جابجایی جرم، مومنتوم، انرژی و غلظت بعلت ادی های بزرگ می باشند.

(ج) ساختار ادی های بزرگ بشدت وابسته به هندسه و طبیعت جریان می باشند.

بعلت وابستگی ادی های بزرگ به هندسه جریان، این ادیها غیر ایزتروپ می باشند. همچنین، مقیاس زمانی ادی های بزرگ، مقیاس زمانی جریان متوسط را تقریب می زند. مهمترین دستاورد این خصوصیات، منجر به مفهوم شبیه سازی ادی های بزرگ می گردد. در این روش از معادلات نسبت به محدوده فضایی کوچک متوسط گیری می شود. هدف از این متوسط گیری حذف ادی های کوچک جریان می باشد بطوریکه ساختار بزرگ جریان بطور مستقیم حل گردد و ساختارهای کوچک جریان از طریق مدلسازی بدست می آید. در مدل اسماغورینسکی فرض می گردد لزجت ادی خالص γ_t ، تابعی از عرض فیلتر اندازه \bar{h} ، و نرخ کلی استهلاک انرژی ε در مقیاس زیر شبکه می باشد. با توجه به فرض فوق و با استفاده از آنالیز ابعادی لزجت ادی بصورت زیر بدست می آید:

$$\gamma_t = a\varepsilon^{1/3}\bar{h}^{4/3} \quad ۳۳-۳$$

که در آن a ثابت بی بعد بوده و تابعی از فیلتر اندازه و طیف ادی های بزرگتر می باشد. در تعیین \bar{h} ، از ریشه سوم فیلتر حجم استفاده می گردد که در آن عرض فیلتر برابر با $2\Delta x_i$ انتخاب شده است و بصورت زیر بدست می آید:

$$\bar{h} = [(2\Delta x)(2\Delta y)(2\Delta z)]^{1/3} \quad ۳-۳۳$$

در شبیه سازی ادی های بزرگ تخمین میزان ε کار ساده ای نمی باشد بنابراین اسماغورینسکی معادله ۳۳-۳ را بصورت زیر تبدیل نمود:

$$\gamma_t = a_i\bar{h}^2 J \quad ۳۴-۳$$

⁷ Large eddy simulation of smagorinsky

که در آن J همانند معادله ۳-۲۵ قابل تعیین می باشد که به تانسور تغییر شکل شبکه مرتبط می باشد و a_i یک ثابت بی بعد می باشد. [۴۲]

۳-۵- معادله انتقال - پخش

توزیع غلظت یک ماده در سیال (مانند رنگ غیر قابل واکنش یا ماده واکنش دهنده مثل کلر) را می توان با حل معادله انتقال - پخش بدست آورد. انتقال فرآیندی می باشد که سیال و هر ماده موجود در آن بطور فیزیکی از نقطه ای به نقطه دیگر حرکت کرده و فرآیند پخش، حرکت ماده موجود در سیال نسبت به حرکت متوسط زمانی جریان سیال می باشد. اگر c را بعنوان غلظت یک ماده محلول در نظر بگیریم، معادله حمل بصورت زیر بیان می گردد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] + S_c \quad ۳۵-۳$$

به عبارت دیگر:

نرخ افزایش C در المان سیال + نرخ خالص خروجی C از المان سیال = نرخ افزایش C ناشی از نفوذ + نرخ افزایش C ناشی از چشمه ها

که در آن D برابر با ضریب پخش و S_c نرخ تولید یا کاهش ماده شیمیایی در واحد حجم می باشد. تولید (یا کاهش) بعلت ترکیبات شیمیایی بوجود می آید و می تواند مقادیر مثبت و یا منفی بخود بگیرد. برای مواد بقایی و غیر قابل واکنش S_c برابر با صفر می باشد. معادله ۳-۳۵ به معادله حمل برای پارامتر غلظت شناخته می گردد و بخوبی ترمهای انتقال و پخش ماده مورد نظر را بیان می کند. [۱۹]

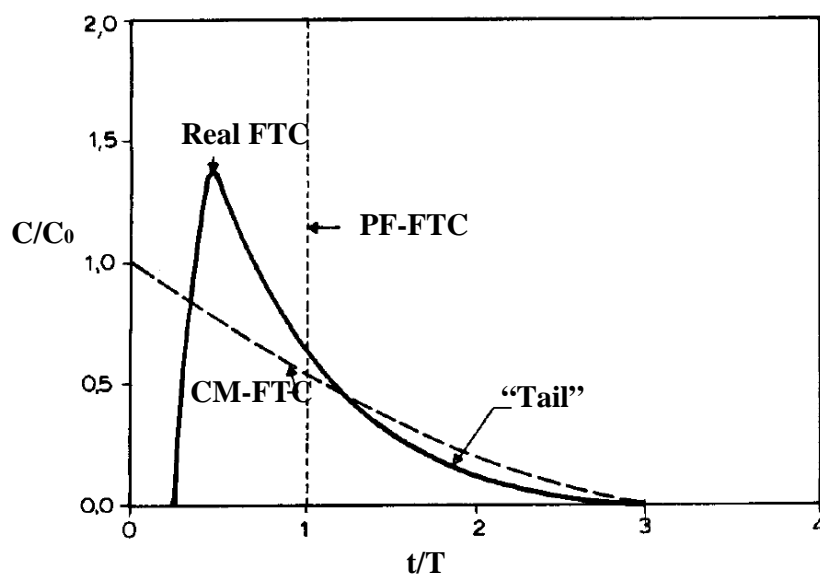
۳-۶- بررسی کارایی تانکهای تماسی

کارایی تانکهای تماسی بطور خیلی زیادی تابعی از خصوصیات هیدرولیکی آنها می باشند. عبارت خصوصیات هیدرولیکی به حرکت جریان و در نتیجه به میدان سرعت در تانکهای تماسی منتسب می گردد. محاسبه سرعتهای محلی کاری سخت، هزینه بر و زمانبر می باشد. [۳۱] بررسی تحلیلی از یک میدان سرعت واقعی، عملیات ساده ای نمی باشد. اما با استفاده از تکنیک ردگیر تولید منحنی FTC امکان پذیر می باشد که از این منحنی می توان اطلاعات مهمی از رفتار هیدرولیکی تانک را استخراج نمود. بمنظور تولید منحنی FTC، یک مقدار مشخص از جرم ردگیر (M) را بصورت لحظه ای در ورودی به تانک تزریق می نماییم و متعاقباً با رسم نمودار غلظت ردگیر (C) نسبت به زمان (t) در خروجی تانک می توان منحنی FTC را رسم نمود. بطور ذاتی این منحنی تابع چگالی احتمال زمان های تاخیر ذرات سیال (یا ماده) در داخل تانک می باشد. منحنی FTC معمولاً در غالب بی بعد بیان می گردد که این امر با تقسیم غلظت به غلظت میانگین ردگیر در تانک (C_0) و تقسیم زمان به زمان تاخیر تئوری محقق

می‌گردد. از منحنی FTC می‌توان برای مقاصد مختلفی از قبیل تعیین زمان تاخیر واقعی، ضریب پخش و غیره استفاده نمود. همچنین از این منحنی برای بررسی صحت مدل‌های ریاضی که توصیف‌کننده حمل ردگیر و میزان اختلاط در تانک می‌باشند بکار گرفته می‌شوند. با بررسی شکل‌های منحنی‌های FTC می‌توان اثر پارامترهایی از قبیل اندازه تانک، ساختارهای ورودی و خروجی و غیره بر روی کارایی تانک‌های تماسی را بررسی نمود. در این تحقیق بمنظور بررسی تاثیر دیواره‌های داخلی و محل قرار گیری آنها و همچنین محل قرار گیری ورودی تانک در کارایی تانک از پارامترهای مذکور استفاده می‌گردد.

۳-۶-۱- ملاحظات تئوری

برای توصیف آماری از یک منحنی ایده آل FTC معمولاً دو حالت ایده آل را که در تانک‌ها معمول می‌باشند را در نظر می‌گیرند. این حالتها عبارتند از منحنی FTC جران پلاگ^۸ و منحنی FTC جریان کاملاً مخلوط^۹ شده. در شرایط جریان پلاگ جرم ردگیر با سرعت ثابت U در تانک حرکت کرده و بدون هیچ‌گونه اختلاطی در زمان تاخیر تئوری به خروجی تانک می‌رسد. در شرایط مخلوط کامل، جرم ردگیر تزریق شده فرض می‌گردد با سرعت و بطور کامل در لحظه $T=0$ با تمام محتویات حجمی موجود در تانک مخلوط گشته و میزان غلظت در خروجی در این زمان برابر با (C_0) می‌گردد و با گذشت زمان میزان غلظت در خروجی بصورت تابع نمایی کاهش می‌یابد. دو حالت مذکور را می‌توان در شکل (۳-۳) مشاهده نمود.

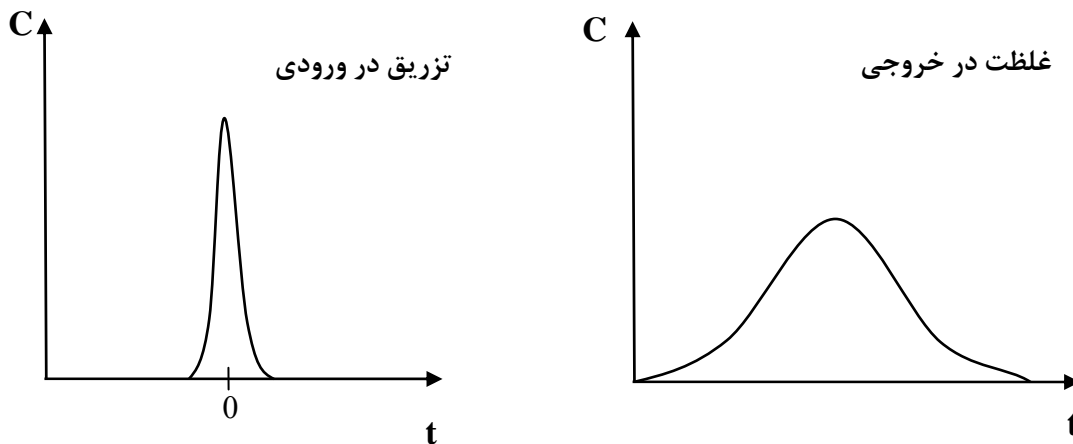


شکل ۳-۳ منحنی‌های ایده آل و واقعی FTC در خروجی تانک

^۸ Plug Flow Condition (PF)

^۹ Completely Mixed (MC)

اما در تانکها بعلت پدیده مدار کوتاه (میانبر) و اختلاط هیچ کدام از آنها بطور کامل اتفاق نمی افتد. مدار کوتاه که از تشابه با مدارها به این نام گذاشته شده اند عبارتند از ظهور (رسیدن) خیلی سریع ردگیر به خروجی تانک و پدیده اختلاط، ناشی از آشفتگی می باشد که در نواحی چرخشی بزرگ بوجود می آید و هر چه این نواحی بزرگتر باشد میزان اختلاط نیز گسترده تر و بیشتر می باشد. بطور کلی مدار کوتاه کنترل کننده زمان اولیه رسیدن ردگیر به خروجی و اختلاط کنترل کننده میزان پراکندگی منحنی FTC می باشد. همانطور که در شکل فوق مشاهده می گردد منحنی FTC واقعی یک حالت میانی از دو حالت ایده آل فوق می باشد که شکل زنگوله ای بخود گرفته و دارای دنباله ای¹⁰ در زمانهای طولانی می باشد. این دنباله بعلت رسیدن با تاخیر مقداری از جرم ردگیر به خروجی می باشد که بعلت وجود نواحی چرخشی در تانک بیشتر از زمان مورد نظر در آن باقی مانده است. بمنظور تعیین اندیس های کارایی تانک یک مقدار مشخص از ردگیر¹¹ (N_0) را مطابق شکل (۳-۴) بطور لحظه ای در ورودی به تانک تزریق می نماییم. در نتیجه غلظت در خروجی بصورت تابعی از زمان قابل اندازه گیری و ترسیم می باشد.



شکل ۳-۴ منحنی های تزریق در ورودی و غلظت در خروجی تانک

مقدار ردگیری که در بازه زمانی t و $t+\Delta t$ از تانک خارج می گردد بصورت زیر بدست می آید:

$$\Delta N = C(t) \cdot Q \cdot \Delta t$$

۳۶-۳

¹⁰ Tail

¹¹ Tracer

که در آن $C(t)$ میزان غلظت ردگیر در خروجی تانک و Q دبی حجمی سیال خروجی می باشد. همچنین ΔN بیان کننده مقدار غلظتی از ردگیر می باشد که دارای زمان حضور t تا $t+\Delta t$ در تانک می باشند. اگر طرفین معادله را بر کل مقدار ردگیر (N_0) که ورودی تزریق شد، تقسیم نمائیم داریم:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{Q.C(t)}{N_0} \cdot \Delta t \quad 37-3$$

معادله فوق نشان دهنده درصدی از ماده می باشد که دارای زمانهای حضور t تا $t+\Delta t$ در تانک می باشد. همچنین در یک تزریق آنی عبارت $E(t)$ بصورت ذیل تعریف می گردد:

$$E(t) = \frac{Q.C(t)}{N_0} \quad 38-3$$

بنابراین داریم:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = E(t) \cdot \Delta t$$

کیمیت $E(t)$ را تابع توزیع همسایگی^{۱۲} می نامند و بصورت کمی توصیف می کند که ذرات سیال دارای چه زمان حضور متفاوت در تانک می باشند. با نوشتن معادله ۳-۳۶ در حالت دیفرانسیلی داریم:

$$dN = C(t) \cdot Q \cdot dt$$

و با انتگرال گیری از طرفین عبارت زیر بدست می آید:

$$N_0 = \int_0^{\infty} Q.C(t) dt \quad 39-3$$

با جایگذاری معادله فوق در ۳-۳۸ و با فرض ثابت بودن دبی حجمی خروجی، تابع توزیع زمان همسایگی تعیین می گردد:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad 40-3$$

بنابراین بطور کلی برای تعیین درصدی از ماده در حال خروج که دارای زمان حضور t_1 تا t_2 در تانک می باشند داریم:

$$\text{Fraction of materials: } \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt$$

همچنین تابع توزیع تجمعی منحنی $E(t)$ از رابطه زیر بدست می آید.

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad 41-3$$

¹² Residence Time Distribution (RTD)

که در آن $F(t)$ برابر است با درصدی از غلظت خروجی که دارای زمان حضور کمتر از t در تانک می باشند.

۳-۶-۲- خصوصیات منحنی FTC

در این بخش مهمترین خصوصیات منتج شده از منحنی FTC را معرفی می نماییم. این خصوصیات را بطور کلی در ۴ دسته مختلف به عنوان نشانگرهای کارایی جریان طبقه بندی می نمایند و عبارتند از :
الف) پدیده مدار کوتاه (میانبر) ب) اختلاط^{۱۳} ج) درجه بندی از شرایط پلاگ^{۱۴} د) کارایی زمانی^{۱۵}
بطور کلی استفاده از این نشانگرها تلاشی است برای تعیین میزان کارایی هیدرولیکی تانک های تماسی بطوریکه هرچه شرایط جریان در تانک به شرایط پلاگ نزدیکتر گردد کارایی تانک تماسی افزایش می یابد.

۳-۶-۲-۱- نشانگرهای مدار کوتاه

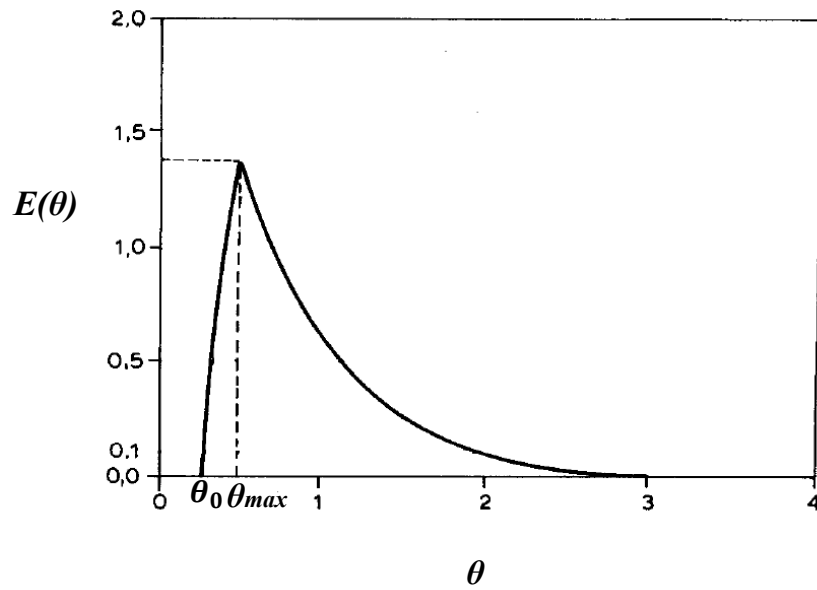
این نشانگرها عبارتند از زمان اولیه رسیدن ردگیر به خروجی (t_0) و زمانی که ۱۰ درصد از ردگیر به خروجی تانک برسد (t_{10}) و همچنین عبارت HBP که در شکل (۳-۵) مشاهده می گردد. بمنظور تعیین پدیده مدار کوتاه معمولاً از نشانگر t_{10} بیشتر استفاده می گردد زیرا از نظر آزمایشگاهی اندازه گیری آن از نشانگر t_0 راحتتر می باشد. بطور کلی مقادیر بزرگتر t_0 و t_{10} دارای پدیده مدار کوتاه کوچکتری می باشند و در نتیجه جریان به شرایط پلاگ نزدیکتر می گردد. معمول است که نشانگرهای مورد نظر را در حالت بی بعد نمایش می دهند که از تقسیم زمانهای مورد نظر بر زمان تاخیر تئوری بدست می آید و با θ نشان میدهند. بعنوان مثال منحنی FTC برای حالت کاملاً مخلوط شده دارای مقدار $\theta_0 = 0$ می باشد که خود به معنای وجود پدیده مدار کوتاه خیلی بزرگ می باشد به عبارت دیگر ردگیر در زمان خیلی سریع به خروجی می رسد که مطلوب نمی باشد و بر عکس آن در شرایط جریان پلاگ، θ_0 دارای مقدار یک بوده و آن بمعنای صفر بودن پدیده مدار کوتاه می باشد. این مثال روشن می سازد که پدیده مدار کوتاه همیشه همراه با پدیده اختلاط می باشد. همچنین عبارت HBP برابر است با سطح زیر نمودار منحنی $F(t)$ در بازه زمانی $\theta=0$ تا $\theta=1$ که بصورت زیر نمایش می دهند:

$$HBP = \int_0^1 F(\theta) d\theta \quad ۴۳-۳$$

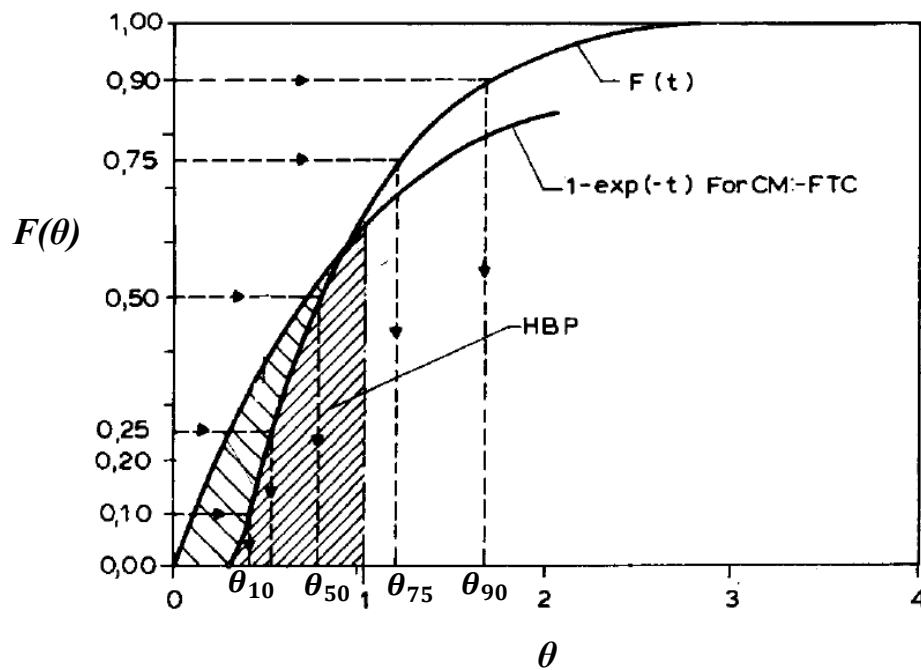
¹³ Mixing

¹⁴ Degree of plug flow

¹⁵ Efficiency times



شکل ۳-۵ الف) منحنی $E(\theta)$



شکل ب) منحنی $F(\theta)$

شکل ۳-۵ خصوصیات منحنی های منتج شده FTC

مقادیر بزرگ HBP نشان دهنده آن می باشد که بیشتر مقدار غلظت ردگیر از طریق یک مسیر کوتاه به خروجی تانک رسیده اند که باعث می گردد کارایی تانک از شرایط جریان پلاگ دور گردد.

۳-۶-۲-۲- نشانگرهای اختلاط

اندیسهای اختلاط اندازه عرض منحنی FTC و در نتیجه میزان اختلاط در تانک را نشان می دهند و عبارتند از اختلاف زمانهای $(\theta_{75} - \theta_{25})$ و $(\theta_{90} - \theta_{10})$ و نسبت θ_{90}/θ_{10} و واریانس منحنی $E(\theta)$ که بصورت زیر بدست می آید:

$$V_{ar} = \int_0^1 (\theta - 1)^2 E(\theta) d\theta \quad ۴۳-۳$$

نسبت θ_{90}/θ_{10} را اندیس موریل^{۱۶} می نامند. اندیس موریل نسبت به پدیده مدار کوتاه حساس می باشد زیرا ترم θ_{10} در مخرج آن قرار دارد. در حالت ایده آل و شرایط پلاگ که جریان در تانک بدون هیچ اختلاطی می باشد اندیس موریل برابر با ۱ می باشد اما از آنجائیکه این حالت بطور کامل ایجاد نمی گردد بنابراین هرچه اندیس موریل به عدد ۱ نزدیکتر گردد کارایی تانک افزایش می یابد.

۳-۶-۲-۳- نشانگرهای جریان پلاگ

نشانگرهای جریان پلاگ (PF) بمنظور تعیین درصد میزان نواحی با اختلاط کامل و نواحی پلاگ بکار برده می شود. بر اساس نظریه ربهون و آرگامان [۳۱] شرایط حاکم بر جریان در تانک می تواند ترکیبی از شرایط مختلف جریان پلاگ، اختلاط کامل و نواحی مرده^{۱۷} باشند و بر اساس این فرضیه منحنی توزیع $F(\theta)$ بصورت زیر تقریب زده می شود:

$$F(\theta) = 1 - \exp[-\alpha(\theta - \beta)] \quad ۴۴-۳$$

که α و β برابر است با:

$$\alpha = \frac{1}{(1-p)\gamma}, \beta = p\gamma$$

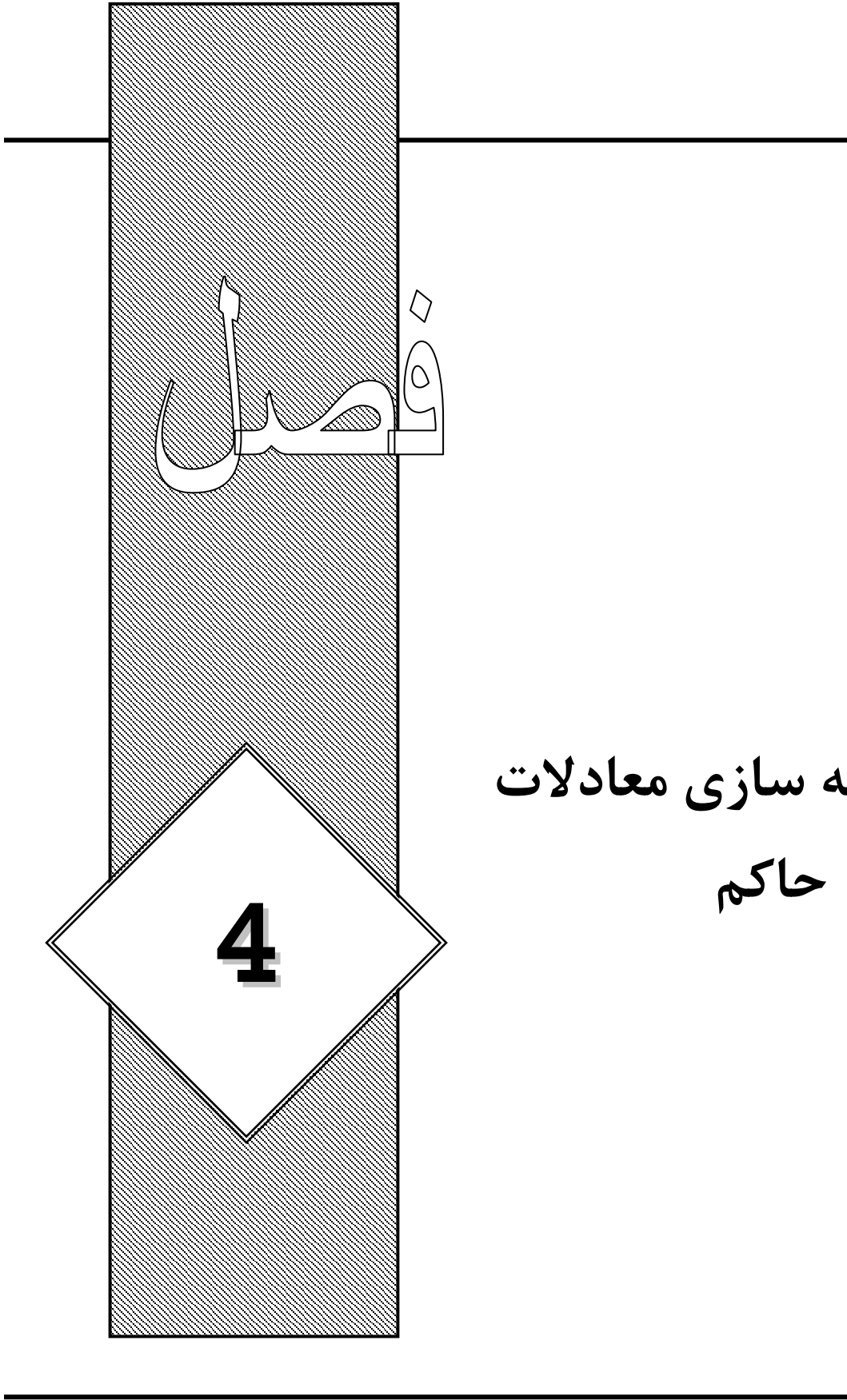
که در آن p برابر است با اینکه چند درصد از حجم تانک در شرایط پلاگ قرار دارند و $1-p$ نیز بیانگر درصد میزان اختلاط کامل در تانک می باشد و γ برابر است با ضریبی که درصد نواحی موثر در تانک را بیان می نماید. مقادیر α و β را می توان از رسم منحنی $F(\theta)$ تعیین نمود. هرچند نواحی مرده که در آن سیال هیچ حرکتی ندارد، بطور عام وجود ندارد اما بکمک آن می توان مقایسه ای از شرایط مختلف جریان در تانک را بدست آورد.

¹⁶ Morill Index

¹⁷ Dead space

۳-۶-۲-۴- مشخصه های زمانی

در اکثر مدل‌های آزمایشگاهی و تئوری‌های مربوط به آن زمان تاخیر تئوری بعنوان یکی از پارامترهای تعیین کارایی تانک مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر زمان تاخیر تئوری می‌توان از θ_{50} و θ_{max} بعنوان شاخص زمانی کارایی تانک استفاده نمود. θ_{max} بیانگر حداکثر زمان محتمل و یا عبارتی دیگر زمانیست که حداکثر غلظت ردگیر در منحنی $E(\theta)$ به خروجی می‌رسد و θ_{50} زمانیست که در آن ۵۰ درصد از غلظت ردگیر به خروجی تانک رسیده‌اند و از منحنی $F(\theta)$ بدست می‌آید و در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. اندیس‌های فوق می‌تواند به نوعی نشان دهنده کارایی تانک‌ها از لحاظ زمانی باشند بطوریکه با افزایش آنها جریان به شرایط حالت پلاگ نزدیکتر می‌گردد. در این تحقیق سعی شده است که با توجه به اندیس‌های کارایی مورد اشاره، کارایی تانک‌های تماسی را مورد بحث و بررسی قرار داده و تفسیری از فرایند توزیع ردگیر در تانک ارائه گردد که شرح آن در فصول بعد آورده شده است.



گسسته سازی معادلات
حاکم

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان سه بعدی بروش عددی پرداخته می شود. در ابتدا به ساختار شبکه مورد استفاده پرداخته و مراحل گسسته سازی ترمهای انتقال و پخش در معادلات به تفصیل بررسی می گردد و در انتها به بررسی روند مدلسازی شرایط مرزی و نحوه حل معادلات فشار پرداخته می شود.

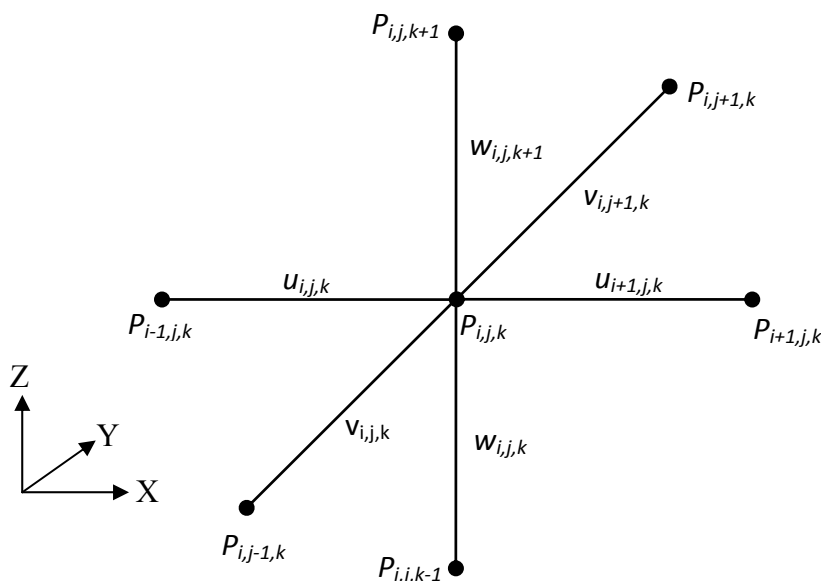
۴-۲- ساختار شبکه

در ایجاد شبکه، ابتدا لازم است جایی برای ذخیره کردن سرعتها تعیین کنیم. منطقی بنظر می رسد که این سرعتها را در همان مکانهایی که متغیرهای اسکالر مانند فشار قرار دارند، تعریف نماییم. ولی اگر سرعتها و فشارها هر دو در گره های یک حجم کنترل اصلی تعریف شده باشند، یک میدان فشار بشدت غیر یکنواخت می تواند شبیه یک میدان یکنواخت در معادلات اندازه حرکت گسسته شده عمل نماید. بنابراین اگر سرعتها در همان گره های شبکه اسکالر تعریف شده باشند، تاثیر فشار در معادلات گسسته اندازه حرکت بخوبی ظاهر نمی شود. یک راه حل برای این مشکل، استفاده از یک شبکه جابجا شده^۱ برای مولفه های سرعت می باشد. [۱۹] در این ایده متغیرهای اسکالر از جمله فشار و چگالی در نقاط گرهی اصلی محاسبه می گردند و مولفه های سرعت روی شبکه جابجا شده در اطراف متغیرهای اسکالر تعیین می گردند. ترتیب قرار گیری پارامترهای مذکور در یک جریان سه بعدی در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. متغیرهای اسکالر شامل فشار، در گره ها ذخیره می شوند و سرعتها بین گره ها تعریف می شوند.

۴-۳- مدل هیدرودینامیکی عددی

گسسته سازی معادلات حاکم معمولاً به دو روش تفاضل محدود و حجم محدود صورت می گیرد. که در مورد روشها و تاریخچه آنها در فصل سوم به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. قوانین کلی گسسته سازی در هر دو روش یکسان می باشد اما در جزئیات میتوانند با یکدیگر تفاوت داشته باشند. بدلیل آنکه سرعت های جریان در تانک تماسی معمولاً کوچک و عدد رینولدز کم می باشد [۱۱] می توان فرض کرد که جریان در تانک تماسی از نوع آشفته با ادی ویسکوزیته ثابت می باشد. اما در حالت کلی جریان آشفته برقرار می باشد بهمین دلیل در این تحقیق جریان در تانک تماسی به چند روش آشفته مدلسازی گردیده شده است. در این بخش فرآیند گسسته سازی را برای جریان آشفته با ادی ویسکوزیته ثابت پیگیری می نمائیم و برای سایر مدلها آشفته نیز با کمی تغییرات از همین معادلات استفاده خواهد شد.

¹ Staggered grid



شکل ۴-۱ شبکه جابجا شده برای مدل‌سازی هیدرودینامیکی

۴-۳-۱- روش عددی مورد استفاده در تانک تماسی

برای مدل هیدرودینامیکی معادلات زیر باید در هر نقطه موجود در دامنه تانک تماسی صدق نمایند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 1-4$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \gamma \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad 2-4$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \gamma \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad 3-4$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \gamma \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - g \quad 4-4$$

ترمهای موجود در معادلات فوق در فصول قبل معرفی شده‌اند. اولین معادله، معادله پیوستگی بوده و بقیه معادلات، معادلات مومنتوم در جهات X, Y و Z می‌باشند. در ابتدا معادله پیوستگی بشکل زیر گسسته می‌گردد:

$$\frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = 0 \quad 5-4$$

همچنین معادله مومنتوم در جهت X بصورت زیر گسسته می‌گردد:

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x}$$

$$= \left(-\frac{\partial u^2}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n$$

که با مرتب سازی معادله بر حسب $u_{i,j,k}^{n+1}$ داریم:

$$u_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1})$$

$$+ u_{i,j,k}^n + \Delta t \left(-\frac{\partial u^2}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n$$

$$u_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1}) + RHSU_{i,j,k} \quad ۶-۴$$

که در معادلات فوق اندیسهای $n+1$ بمعنای مقادیر پارامترها در گام زمانی $(t + \Delta t)$ میباشد و عبارات RHS بمعنای تمام ترمهایی می باشند که در سمت راست معادله قرار می گیرند. معادلات مومنوم در جهات Y, Z نیز بطریق مشابه می توانند بصورت زیر گسسته شوند:

$$\frac{v_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y}$$

$$= \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial v^2}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j-1,k}^{n+1}) + v_{i,j,k}^n$$

$$+ \Delta t \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial v^2}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j-1,k}^{n+1}) + RHSV_{i,j,k} \quad ۷-۴$$

$$\frac{w_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z}$$

$$= \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uw) - \frac{\partial}{\partial y}(vw) - \frac{\partial w^2}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n - g$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k-1}^{n+1}) + w_{i,j,k}^n$$

$$+ \Delta t \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uw) - \frac{\partial}{\partial y}(vw) - \frac{\partial w^2}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k}^n$$

$$- \Delta t \cdot g$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k-1}^{n+1}) + RHSW_{i,j,k} \quad ۸-۴$$

معادلات مومنوم ۴-۶ تا ۴-۸ بین نقاط i و $i-1$ ، j و $j-1$ ، k و $k-1$ از شبکه نوشته شده است. اگر روند مشابهی را برای نقاط i و $i+1$ ، j و $j+1$ ، k و $k+1$ نیز طی نماییم معادلات مومنوم در جهات X, Y, Z بصورت زیر بدست می آیند:

$$u_{i+1,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + u_{i+1,j,k}^n + \Delta t \left(-\frac{\partial u^2}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial w^2} \right) \right)_{i+1,j,k}^n$$

$$u_{i+1,j,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSU_{i+1,j,k} \quad ۹-۴$$

$$v_{i,j+1,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + v_{i,j+1,k}^n + \Delta t \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial v^2}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j+1,k}^n$$

$$v_{i,j+1,k}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSV_{i,j+1,k} \quad ۱۰-۴$$

$$w_{i,j,k+1}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + w_{i,j,k+1}^n + \Delta t \left(-\frac{\partial}{\partial x}(uw) - \frac{\partial}{\partial y}(vw) - \frac{\partial w^2}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right)_{i,j,k+1}^n - \Delta t \cdot g$$

$$w_{i,j,k+1}^{n+1} = -\frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSW_{i,j,k+1} \quad ۱۱-۴$$

حال اگر در معادله ۴-۵ بجای ترمهای $w_{i,j,k}^{n+1}$ ، $w_{i,j,k+1}^{n+1}$ ، $v_{i,j,k}^{n+1}$ ، $v_{i,j+1,k}^{n+1}$ ، $u_{i,j,k}^{n+1}$ ، $u_{i+1,j,k}^{n+1}$ مقادیر معادل آنرا که از معادله ۴-۶ تا ۴-۱۱ می باشند جایگزین نماییم خواهیم داشت:

$$\frac{1}{\Delta x} \left(-\frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSU_{i+1,j,k} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i+1,j,k}^{n+1}) - RHSU_{i,j,k} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\Delta y} \left(-\frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSV_{i,j+1,k} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j-1,k}^{n+1}) - RHSV_{i,j,k} \right) \\
& + \frac{1}{\Delta z} \left(-\frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}) + RHSW_{i,j,k+1} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k-1}^{n+1}) - RHSW_{i,j,k} \right) = 0
\end{aligned}$$

که پس از مرتب کردن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
& \frac{P_{i-1,j,k}^{n+1} - 2P_{i,j,k}^{n+1} + P_{i+1,j,k}^{n+1}}{\rho \Delta x^2} + \frac{P_{i,j-1,k}^{n+1} - 2P_{i,j,k}^{n+1} + P_{i,j+1,k}^{n+1}}{\rho \Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k-1}^{n+1} - 2P_{i,j,k}^{n+1} + P_{i,j,k+1}^{n+1}}{\rho \Delta z^2} \\
& = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{RHSU_{i+1,j,k} - RHSU_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{RHSV_{i,j+1,k} - RHSV_{i,j,k}}{\Delta y} \right. \\
& \left. + \frac{RHSW_{i,j,k+1} - RHSW_{i,j,k}}{\Delta z} \right)
\end{aligned}$$

که با کمی عملیات جبری در نهایت بصورت زیر می توان نوشت:

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{2}{\rho \Delta x^2} + \frac{2}{\rho \Delta y^2} + \frac{2}{\rho \Delta z^2} \right) P_{i,j,k}^{n+1} \\
& = \frac{1}{\rho \Delta x^2} P_{i-1,j,k}^{n+1} + \frac{1}{\rho \Delta x^2} P_{i+1,j,k}^{n+1} + \frac{1}{\rho \Delta y^2} P_{i,j-1,k}^{n+1} + \frac{1}{\rho \Delta y^2} P_{i,j+1,k}^{n+1} \\
& + \frac{1}{\rho \Delta z^2} P_{i,j,k-1}^{n+1} + \frac{1}{\rho \Delta z^2} P_{i,j,k+1}^{n+1} \\
& - \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{RHSU_{i+1,j,k} - RHSU_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{RHSV_{i,j+1,k} - RHSV_{i,j,k}}{\Delta y} \right. \\
& \left. + \frac{RHSW_{i,j,k+1} - RHSW_{i,j,k}}{\Delta z} \right)
\end{aligned}$$

اگر ضرائب فشار مرکزی و همسایگان آنرا در جهات X, Y, Z و طرف راست (ترمهای RHS) معادله فوق را بترتیب با a_p , a_x , a_y , a_z و b_p جایگذاری نمایم آنگاه داریم:

$$\begin{aligned}
a_p P_{i,j,k}^{n+1} & = a_x P_{i-1,j,k}^{n+1} + a_x P_{i+1,j,k}^{n+1} + a_y P_{i,j-1,k}^{n+1} + a_y P_{i,j+1,k}^{n+1} + a_z P_{i,j,k-1}^{n+1} + a_z P_{i,j,k+1}^{n+1} - b_p
\end{aligned} \quad ۱۲-۴$$

همانطور که معادله فوق نشان میدهد میتوان در نظر گرفت که ضریب فشار مرکزی در این معادله برابر جمع ضرایب فشار همسایگانش می باشد.

۴-۳-۲- خطاهای مقطع کردن در مدل‌های عددی

در روش تفاضل محدود، مشتقات جزئی در معادلات حرکت با ترم‌های مناسبی از تفاضل محدود جایگزین می گردند. خطا قطع کردن برابر است با اختلاف ترمهای مشتقات جزئی با ترم‌هایی که توسط تفاضل محدود جایگزین می گردند. معمولاً تفاضل محدود نشان دهنده بسط سری مشتقات می باشند. بعنوان مثال ترم $\frac{\partial u}{\partial t}$ در معادله مومنتوم در جهت X می تواند توسط بسط سری تیلور بصورت زیر بیان گردد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) \frac{\Delta t}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial t^3}\right) \frac{\Delta t^2}{6} - \dots \quad ۱۳-۴$$

که ترم اول آن برای تقریب ترم $\frac{\partial u}{\partial t}$ بکار برده شده و بقیه ترمها برابر است با خطای مقطع کردن عبارت $\frac{\partial u}{\partial t}$. خطای قطع کردن در معادله ۴-۱۳ نشان می دهد که چه پارامترهایی در روش تفاضل محدود حذف گردیده شده است. در معادله فوق پایین ترین مرتبه Δt که در خطای قطع کرن وجود دارد از مرتبه اول می باشد، بنابراین تفاضل محدود بکار رفته شده بمنظور تقریب ترم $\frac{\partial u}{\partial t}$ از مرتبه اول می باشد. بهمین ترتیب می توان خطای قطع کردن را برای بقیه ترمهای موجود در معادلات حرکت بدست آورد.

۴-۳-۳- پایداری مدل‌های عددی

پایداری یک مدل عددی به روشی که خطاها از یک گام زمانی تا گام زمانی دیگر گسترش پیدا می کند و همچنین خطای گرد گردن که خاصیت کامپیوتر می باشد، وابسته می باشد. بعبارت دیگر اگر خطای عددی از یک گام زمانی به گام زمانی دیگر افزایش پیدا کند، آنگاه رشد خطا محاسبات را ناپایدار خواهد کرد. اگر خطا از یک گام به گام دیگر گسترش نیابد و بخصوص کاهش یابد آنگاه محاسبات معمولاً دارای یک رفتار پایدار از خود نشان می دهند. خطای موجود در معادلات تفاضل محدود را می توان بصورت زیر نوشت:

$$N = D + \varepsilon \quad ۱۴-۴$$

که در آن N حل عددی در یک گام زمانی مشخص، D مقدار دقیق در همان نقطه و ε خطای ناشی از محاسبات می باشد. اگر معادله فوق را در معادلات تفاضل محدود قرار داده و با استفاده از سریه فوریه کمی عملیات جبری نیز انجام دهیم آنگاه معادله ای که فقط دارای خطاها می باشد بدست می آید و اگر عبارت $1 \leq \left| \frac{\varepsilon^{n+1}}{\varepsilon^n} \right|$ در تحلیل معادله صدق نماید آنگاه حل پایدار خواهد بود. بمنظور اطلاعات بیشتر در مورد پایداری محاسبات با استفاده از این تکنیک به [۲۵] مراجعه نمایید. با توجه بروش بکار رفته شده در این تحقیق صریح بودن ترمهای انتقال شرایط پایداری روش عددی را بیان می نماید. اگر محاسبات مربوط به پایداری به روش فوق برای ترمهای انتقال معادله حرکت صورت پذیرد آنگاه می توان نشان داد که محدودیت زیر برای پایداری روش عددی بکار برده می شود:

$$C_r = u \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad ۱۵-۴$$

که در آن C_r عدد کورانت، u مشخصه سرعت، Δx اندازه شبکه می باشد. برای مطالعه بیشتر به [۴۳] مراجعه نمایید.

۴-۳-۴- مقایسه روش عددی بکار رفته با روشهای موجود دیگر

این روش زمانیکه با روشهای دیگر مورد مقایسه قرار می گیرد دارای قواعد کلی مشابهی می باشد اما از لحاظ ساختاری با روش سیمپل و خانواده آن متفاوت می باشد. همانطور که در فصول قبل اشاره گردید روش سیمپل (و خانواده آن) روشهای معروف و کارآمدی می باشند و در بسیاری از بسته های نرم افزاری مانند فلونتت بمنظور مدلسازی فرآیند هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می گیرند. در بین روشهای پیشنهاد شده، روش سیمپلر با روش مورد استفاده در این تحقیق ارتباط بیشتری دارد. ساختار مورد استفاده در این تحقیق شباهت هایی با روش سیمپلر دارد اما معادلات مومنتوم گسسته شده در روش سیمپلر ضمنی تر می باشد. [۱۹] بعنوان مثال عبارت RHS در معادله (۴-۶) بطور کلی صریح می باشند و از مقادیر بدست آمده در گام زمانی قبلی استفاده می گردد. اما در روش سیمپلر ترم $u_{i+1,j,k}^{n+1}$ در ترمهای نفوذ و جابجایی بصورت ضمنی نوشته شده و بنابراین باید بسمت چپ معادله (۴-۶) منتقل گردد و در نتیجه ضرایب موجود در معادله (۴-۱۲) می بایست تغییر یابد. اگر ضرایب موجود در معادله (۴-۱۲) که در این تحقیق بکار برده شده است را در نظر بگیریم، نیازی به تغییر با گذشت زمان ندارند در حالیکه در روش سیمپلر این ضرایب در پایان هر گام زمانی به مقدار جدیدی تغییر می یابند. با در نظر گرفتن اینکه این ضرایب برای هر نقطه موجود در تانک با گذشت زمان ثابت می باشند لذا باعث کاهش کل زمان مدلسازی فرآیند هیدرودینامیکی در تانک تماسی می گردند.

۴-۴- گسسته سازی معادلات مومنتوم

در این بخش به فرآیند گسسته سازی ترمهای نفوذ و انتقال که در قسمت RHS معادلات مومنتوم وجود دارد می پردازیم.

۴-۴-۱- گسسته سازی ترمهای انتقال

در محاسبه ترمهای انتقال معادلات مومنتوم در جهت X ترمهای غیر خطی مانند $-\frac{\partial uv}{\partial y}$ ، $-\frac{\partial u^2}{\partial x}$ ، $-\frac{\partial uw}{\partial z}$ در معادله (۴-۶) وجود دارند که باید گسسته گردند. در بخش بعد روند گسسته سازی مورد استفاده در این تحقیق شرح داده شده است.

۴-۴-۱-۱- نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial u^2}{\partial x}$

این ترم بطرق بسیار متنوعی قابل محاسبه می باشد. ساده ترین روش محاسبه بشکل مرکزی است، ولی مرکزی محاسبه کردن آن سبب می گردد که مقدار Δt بلحاظ پایداری بسیار کوچک گردد. روش مرکزی در [۴۴] آورده شده است. روشهای دیگری مثل آپ ویند مرتبه اول، دوم، سوم و مک کورمک و غیره

موجود است که در زیر نحوه محاسبه این ترم بروش آپ ویند مرتبه اول توضیح داده می شود و مقادیر مورد استفاده در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

$$u_{i-2,j,k} \text{ --- } u_{i-1,j,k} \text{ --- } u_{i,j,k}$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} \text{ شکل ۲-۴ نحوه محاسبه ترم}$$

$$ua_2 = (u_{i-1,j,k} + u_{i,j,k})/2$$

$$\text{if}(ua_2 > 0)u_2 = u_{i-1,j,k} \text{ else } u_2 = u_{i,j,k}$$

$$ua_1 = (u_{i-2,j,k} + u_{i-1,j,k})/2$$

$$\text{if}(ua_1 > 0)u_1 = u_{i-2,j,k} \text{ else } u_1 = u_{i-1,j,k}$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} = \frac{ua_2 \cdot u_2 - ua_1 \cdot u_1}{\Delta x}$$

۱۷-۴

$$\frac{\partial uv}{\partial y} \text{ -۲-۱-۴-۴ نحوه محاسبه ترم}$$

این ترم نیز بروش آپ ویند مرتبه اول مطابق شکل (۳-۴) و بصورت زیر گسسته می گردد.

$$\begin{array}{ccc} & & u_{i-1,j+1,k} \\ & & | \\ v_{i-1,j+1,k} & & v_{i,j+1,k} \\ & & | \\ & & u_{i-1,j,k} \\ & & | \\ v_{i-1,j,k} & & v_{i,j,k} \\ & & | \\ & & u_{i-1,j-1,k} \end{array}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (uv) \text{ شکل ۳-۴ نحوه محاسبه ترم}$$

$$va_2 = \frac{v_{i,j+1,k} + v_{i-1,j+1,k}}{2}$$

$$\text{if}(va_2 > 0)u_2 = u_{i-1,j,k} \text{ else } u_2 = u_{i-1,j+1,k}$$

$$va_1 = \frac{v_{i,j,k} + v_{i-1,j,k}}{2}$$

$$\text{if}(va_1 > 0)u_1 = u_{i-1,j-1,k} \text{ else } u_1 = u_{i-1,j,k}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (uv) = \frac{va_2 \cdot u_2 - va_1 \cdot u_1}{\Delta y}$$

۱۸-۴

۴-۱-۳- نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial uw}{\partial z}$

این ترم نیز بروش آپ ویند مرتبه اول مطابق شکل (۴-۴) و بصورت زیر گسسته می گردد.

$$\begin{array}{c}
 u_{i-1,j,k+1} \\
 \left. \begin{array}{c} w_{i-1,j,k+1} \\ \\ w_{i-1,j,k} \end{array} \right| \begin{array}{c} w_{i,j,k+1} \\ \\ w_{i,j,k} \end{array} \\
 u_{i-1,j,k} \\
 \left. \begin{array}{c} w_{i-1,j,k} \\ \\ w_{i-1,j,k-1} \end{array} \right| \begin{array}{c} w_{i,j,k} \\ \\ w_{i,j,k-1} \end{array} \\
 u_{i-1,j,k-1}
 \end{array}$$

شکل ۴-۴ نحوه محاسبه ترم $\frac{\partial}{\partial z}(uw)$

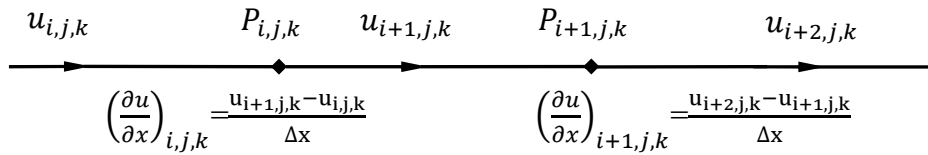
$$\begin{aligned}
 wa_2 &= \frac{w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1}}{2} \\
 \text{if } (wa_2 > 0) \ u_2 &= u_{i-1,j,k} \ \text{else } u_2 = u_{i-1,j,k+1} \\
 wa_1 &= \frac{w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k}}{2} \\
 \text{if } (wa_1 > 0) \ u_1 &= u_{i-1,j,k-1} \ \text{else } u_1 = u_{i-1,j,k} \\
 \frac{\partial}{\partial z}(uw) &= \frac{wa_2 \cdot u_2 - wa_1 \cdot u_1}{\Delta z}
 \end{aligned}$$

۱۹-۴

بطور کلی روند فوق را می توان برای دیگر ترمهای انتقالی موجود در معادلات مومنتوم در جهات Z,Y بکار برد.

۴-۲- گسسته سازی ترمهای نفوذ

یکی از ساده ترین و پر کاربردترین تقریب های بکار رفته برای ترمهای نفوذ روش تفاضل مرکزی می باشد [۴۴]. شکل (۴-۵) روش تفاضل مرکزی را نشان می دهد. بنابراین گسسته سازی ترمهای نفوذ موجود در معادلات (۴-۶) تا (۴-۱۱) بهمین صورت انجام می گیرد. بعنوان مثال گسسته سازی ترم $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ موجود در معادله (۴-۶) بصورت زیر نوشته می شود.

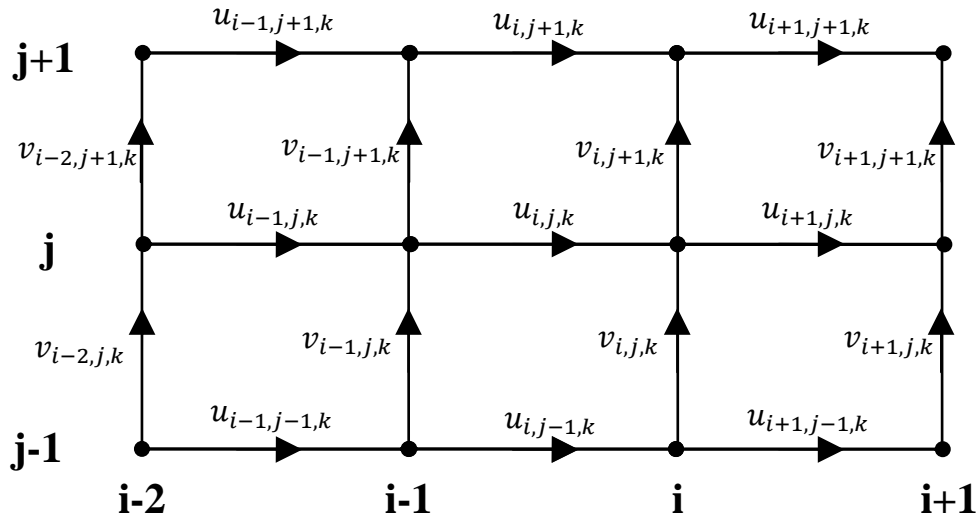


شکل ۴-۵ نحوه محاسبه ترم دیفیوژن در معادله مومنوم X

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i+1,j,k} - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j,k}}{\Delta x} = \frac{u_{i+2,j,k} - 2u_{i+1,j,k} + u_{i,j,k}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad ۲۰-۴$$

۴-۳-۳- گسسته سازی مدل‌های آشفتگی

در بخش‌های پیشین فرآیند گسسته سازی معادلات حاکم در جریان آرام بطور مشروح بیان گردید. در این قسمت با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی و شباهت روند گسسته سازی به ارائه فرمول‌های گسسته شده بصورت مختصر در مدل‌های Mixing-Length و $k-\epsilon$ با توجه به شبکه نشان داده شده در شکل (۴-۶) اکتفا می‌گردد.



شکل ۴-۶ شبکه بکار رفته شده

۴-۳-۱- مدل Mixing-Length

در این مدل بمنظور تعیین لزجت آشفتگی از معادله (۳-۲۵) استفاده می‌گردد با توجه بشکل فوق بعنوان نمونه ترم‌های $\frac{\partial u}{\partial x}$ ، $\frac{\partial v}{\partial x}$ و $\frac{\partial w}{\partial y}$ بصورت زیر گسسته می‌گردند. مابقی ترم‌ها بطرق مشابه قابل تعیین می‌باشند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{dx}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{i+1,j+1,k} - v_{i+1,j-1,k} + v_{i+1,j,k} - v_{i-1,j,k}}{4 \times dx}$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{w_{i,j+1,k+1} + w_{i,j+1,k} - w_{i,j-1,k+1} - w_{i,j-1,k}}{4 \times dy}$$

همچنین ترمهای نفوذ معادله مومنتوم در جهت X بدلیل وجود لزجت آشفتگی بصورت زیر اصلاح شده و گسسته می گردند:

$$\text{div}(\vartheta \cdot \text{grad } u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad ۲۱-۴$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\vartheta_{i,j,k} \times \left(\frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{dx} \right) - \vartheta_{i-1,j,k} \times \left(\frac{u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}}{dx} \right)}{dx}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\left(\frac{\vartheta_{i-1,j,k} + \vartheta_{i-1,j+1,k} + \vartheta_{i,j,k} + \vartheta_{i,j+1,k}}{4} \times \frac{u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k}}{dy} \right)}{dy} -$$

$$\frac{\left(\frac{\vartheta_{i-1,j,k} + \vartheta_{i-1,j-1,k} + \vartheta_{i,j,k} + \vartheta_{i,j-1,k}}{4} \times \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{dy} \right)}{dy}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\left(\frac{\vartheta_{i-1,j,k} + \vartheta_{i-1,j,k+1} + \vartheta_{i,j,k} + \vartheta_{i,j,k+1}}{4} \times \frac{u_{i,j,k+1} - u_{i,j,k}}{dz} \right)}{dz} -$$

$$\frac{\left(\frac{\vartheta_{i-1,j,k} + \vartheta_{i-1,j,k-1} + \vartheta_{i,j,k} + \vartheta_{i,j,k-1}}{4} \times \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j,k-1}}{dz} \right)}{dz}$$

بهمین ترتیب ترمهای نفوذ معادلات مومنتوم در جهات Z, Y نیز قابل استخراج می باشند.

۴-۳-۲-مدل $k-\varepsilon$

در این مدل بمنظور تعیین لزجت آشفتگی در هر نقطه از دامنه تانک از معادلات (۳-۳۰) و (۳-۳۱) استفاده می گردند که ترمهای انتقال به روش آپ ویند مرتبه اول و ترمهای نفوذ نیز بروش مرکزی گسسته شده اند که بعنوان نمونه ترمهای $\frac{\partial}{\partial x}(Ku)$ و $\frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial K}{\partial y}\right)$ از معادله k در زیر آورده شده است. بهمین ترتیب معادله ε و معادله انتقال- نفوذ ردگیر بقایای نیز گسسته می گردند که بدلیل شباهت از ارائه آن صرفنظر می گردند.

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ku) = ?$$

$$IF(u_{i+1,j,k} > 0) \quad k1 = k_{i,j,k}; \quad else \quad k1 = k_{i+1,j,k}$$

$$IF(u_{i,j,k} > 0) \quad k2 = k_{i-1,j,k}; \quad else \quad k2 = k_{i,j,k}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ku) = \frac{k1 \times u_{i+1,j,k} - k2 \times u_{i,j,k}}{dx}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial K}{\partial y}\right) = \frac{\left(\frac{v_{i,j+1,k} + v_{i,j,k}}{2} \times \frac{k_{i,j+1,k} - k_{i,j,k}}{dy}\right) - \left(\frac{v_{i,j-1,k} + v_{i,j,k}}{2} \times \frac{k_{i,j,k} - k_{i,j-1,k}}{dy}\right)}{dy}$$

۴-۵- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای حل معادلات گسسته بسیار مهم هستند و درست اعمال نکردن شرایط مرزی سبب بسیاری از ناموفقیت ها در روشهای عددی میباشد. در واقع جوابهای داخل یک حوزه نتیجه اعمال شرایط مرزی میباشند و روشهای عددی را میتوان بنوعی یک انترپوله دانست که جوابهای داخلی را برحسب مقادیر مرزی تعیین می نماید و روابطی که کار انترپوله را انجام میدهند در واقع روابط مومنتوم و پیوستگی میباشند. برای شرایط مرزی موجود در تانک های تماسی در محدوده محاسباتی چهار شرایط مرزی در نظر گرفته شده است که به قرار زیر می باشد:

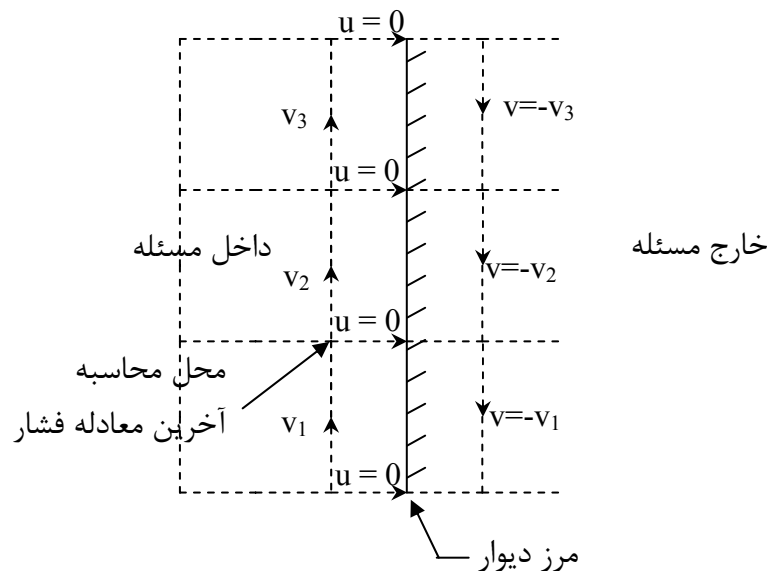
۱. شرایط مرزی دیوار هم برای دیوار های عمودی و هم دیوار های مماسی
۲. شرایط مرزی ورودی
۳. شرایط مرزی خروجی

۴. شرایط مرزی سطح آزاد آب

در بررسی جریانها در تانکهای تماسی، معمولاً دبی در ورودی مشخص می‌گردد یا بعبارت دیگر سرعت بعنوان شرایط مرزی ورودی و سطح آب (یا فشارها) بعنوان شرط مرزی خروجی در نظر گرفته می‌شود. جزئیات بیشتر در بخش های بعدی آورده شده است.

۴-۵-۱- شرایط مرزی دیواره ها

جریان در دیوارهای صلب لغزش^۲ ندارد. بنابراین میتوان گفت سرعت جریان برابر سرعت دیوار است که معمولاً برابر صفر میباشد مگر آنکه دیوار نیز در حال حرکت باشد. شکل (۴-۷) نشان دهنده نحوه اعمال شرایط مرزی برای دیواری عمود بر جهت محور X می باشد



شکل ۴-۷ نحوه اعمال شرایط مرزی سرعت در دیوارها

همانطور که این شکل نشان میدهد، سرعت در جهت عمود به دیوار $u=0$ در نظر گرفته شده است. سرعت مماسی v نیز به طریقی برابر صفر گرفته شده است. برای انجام اینکار پس از هر پله زمانی مقادیر سرعت در خارج از مرز منفی مقدار آن در داخل مرز گرفته میشود تا به این ترتیب سرعت مماسی در مرز نیز برابر صفر گردد. این نحوه اعمال شرایط مرزی برای حل مسئله بصورت جریان آرام مناسب است برای جریانهای آشفته در مرزها از قانون پروفیل سرعت لگاریتمی^۳ استفاده میگردد. آخرین معادله مومنوم در جهت X از مقدار $u=0$ در مرز به صورت مستقیم برای محاسبه طرف راست این معادله استفاده مینماید.

² No-slip condition

³ Log- low velocity profile

معادله فشار (معادله ۴-۱۲) در این قسمت بصورت ساده ای تغییر میابد. اگر معادله (۴-۵) را که برای تعیین معادله فشار به کار رفت مجدداً در نظر بگیریم.

$$\frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = 0$$

برای دیوار نشان داده شده در شکل فوق میتوان مقدار $u_{i+1,j}^{n+1} = 0$ قرار داد و به جای سایر مقادیر سرعت از روابط (۴-۶)، (۴-۱۰)، (۴-۷)، (۴-۱۱) و (۴-۸) استفاده نمود. اگر کل این عملیات انجام گیرد مفهوم نهائی آنستکه در معادله، فشار $P_{i+1,j,k}^{n+1}$ دیگر ظاهر نمیگردد و همچنین ضریب فشار مرکزی باز هم برابر جمع سایر ضرایب فشار های همسایگانش خواهد بود. بنابراین در برنامه نویسی فقط ضریب فشار $P_{i+1,j,k}^{n+1}$ را برای معادله فشاری که در کنار مرز واقع شده برابر صفر میگیریم، و ضریب فشار مرکزی مطابق معمول برابر جمع ضرایب فشار همسایگانش خواهد بود و RHSU برای معادله مومنتوم X ای که مرکزش بر روی مرز واقع است برابر صفر در نظر میگیریم تا شرایط مرزی به خوبی اعمال گردد.

اعمال شرایط مرزی دیوار در جریانهای آشفته با تعریف رابطه زیر شروع می شود: [۱۹]

$$y^+ = \frac{\Delta y}{\gamma} \sqrt{\tau_w / \rho} \quad 22-4$$

که در آن Δy فاصله گره نزدیک دیوار تا سطح جامد می باشد و γ برابر با لزجت آشفتگی و τ_w برابر با تنش برشی در دیوار می باشد. در یک جریان نزدیک دیوار اگر $y^+ \leq 11.63$ باشد، جریان آرام است. تنش برشی دیوار با این فرض که سیال کاملاً لزج می باشد، بدست می آید. اگر $y^+ \geq 11.63$ باشد، جریان آشفته است و از روش تابع دیواره استفاده می شود. و تنش برشی بر اساس قانون لگاریتمی بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$\frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}} = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad 23-4$$

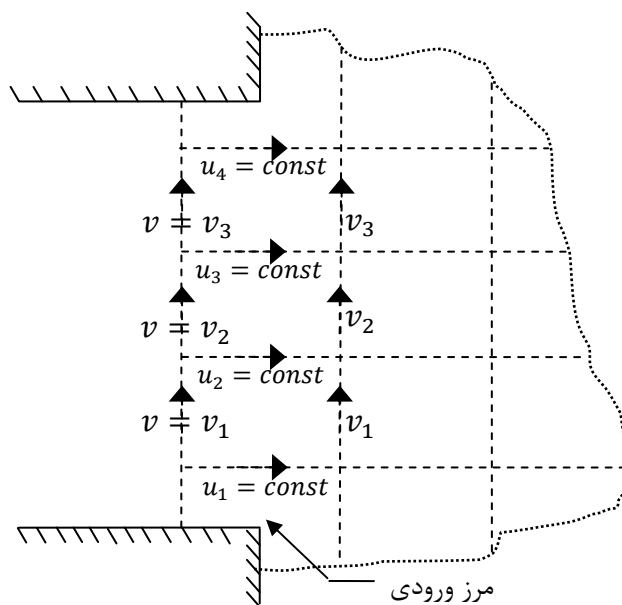
که در آن k ثابت فون کارمن^۴ (۰/۴۱۸۷) و E زبری دیواره می باشد که برای دیواره های صاف مقدار ۹/۸ می باشد. با آزمون و خطا، امکان محاسبه تنش برشی در دیوار با استفاده از این فرمول می باشد.

۴-۵-۲- سرعت ثابت در مرز ورودی

بمنظور مدل سازی جریان در یک تانک تماسی برای یک نرخ جریان، باید دبی یا سرعت های عمودی در شرایط مرزی ورودی مشخص گردد. شکل (۴-۸) حالتی که سرعت های مرزی در ورودی مدل سازی می گردد را نشان می دهد. [۱۹] در این شکل سرعت های ثابت در جهت X نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سرعتها در جهت Y در خارج از بازه محاسباتی مساوی با مقادیر آن در

⁴ Von Karmans

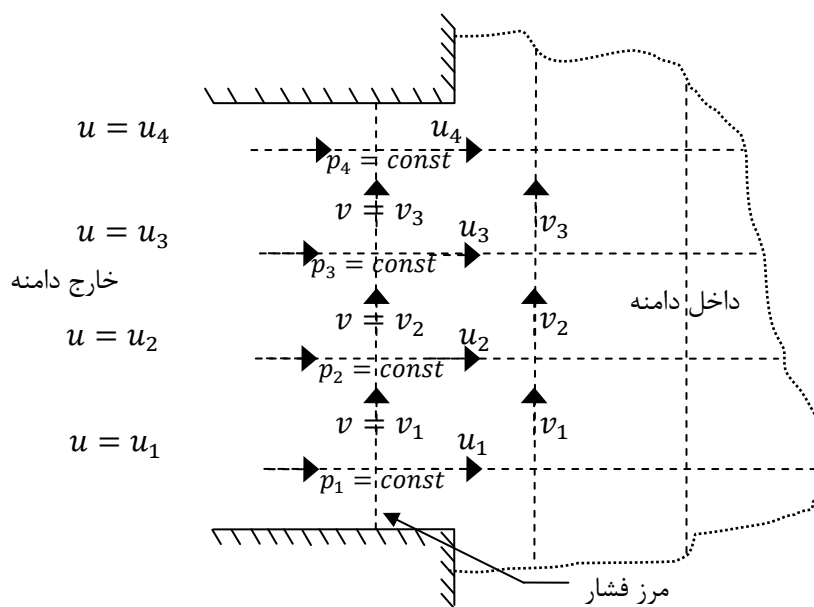
نزدیکترین مقدار در داخل بازه در نظر گرفته شده است. برای یک مقطع عمودی همین تکنیک در نظر گرفته می شود بعبارت دیگر سرعتهای W در جهت Z خارج از بازه محاسباتی برابر با مقدار W در نزدیک ترین سلول مجاور آن در داخل بازه می باشد.



شکل ۴-۸ شرایط مرزی در ورودی

۴-۵-۳- فشار در مرز خروجی

بمنظور مدل سازی جریان در یک تانک تماسی برای یک عمق مشخص از آب، معمولاً فشار سیال بعنوان شرایط مرزی در خروجی در نظر گرفته می شود. شکل (۴-۹) فرضیه فشار ثابت در مرز خروجی را نشان می دهد که عمود بر جهت X می باشد. همانطور که مشاهده می شود سرعتهای u و v در خارج حوزه برابر با مقادیر متناظرشان در داخل بازه محاسباتی در سلول مجاورشان می باشد. همچنین برای W در خارج بازه برابر با مقادیر متناظرشان در داخل بازه در نظر گرفته می شود.



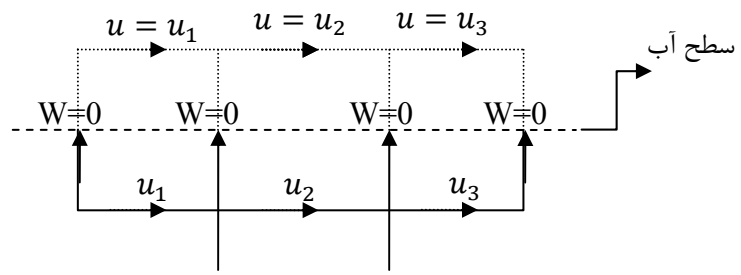
شکل ۴-۹ شرایط مرزی در خروجی

۴-۵-۴- شرایط مرزی سطح آب

روشهای مختلفی برای تعیین سطح آب وجود دارد. چند روش معروف برای تعیین سطح مایع عبارتند از ۱- درپوش صلب^۵ ۲- استفاده از معادلات ناویر استوکس انتگرال گیری شده در ارتفاع که این معادلات دو بعدی می باشند و می توانند سطح مایع را تعیین نمایند و سپس استفاده از معادلات سه بعدی ناویر استوکس برای حل جریان ۳- روش حجم جریان^۶. در جائیکه تغییرات سطح مایع ناچیز است روش سطح صلب می تواند بسیار مفید باشد. در این روش در نظر گرفته می شود که یک درپوش صلب روی سطح مایع قرار گرفته و اجازه تغییر سطح مایع را نمی دهد. اگر محور در جهت عمق مایع را Z در نظر بگیریم، از لحاظ ریاضی روش درپوش صلب بمعنی آنست که در محل سطح مایع سرعت در جهت Z برابر صفر است ($w=0$). همچنین برای ایجاد شرایط مشابه با فیزیک مسئله در نظر می گیرند که این درپوش هیچ اصطکاکی با مایع ایجاد نمی نماید که از لحاظ ریاضی به معنی $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0$ در محل سطح مایع می باشد. [۳۱] در تانک های تماسی تغییرات سطح آب در جهت قائم بسیار ناچیز است و در نتیجه روش درپوش صلب بهترین شرایط مرزی را برای سطح می تواند ایجاد نماید و شکل (۴-۱۰) شرایط مرزی در سطح آب در جهت X را نشان می دهد برای مقاطع عمودی در جهت Y نیز از همین تکنیک استفاده می گردد.

⁵ Rigid Lid

⁶ Volume of Fluid (VOF)



شکل ۴-۱۰ شرایط مرزی برای مدل‌سازی سطح آب



کاربرد مدل عددی برای تانک
تماسی امبسی

۵-۱- مقدمه

در این فصل جزئیات کاربرد مدل عددی را برای یک تانک تماسی بررسی می‌نماییم. بدلیل در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی از تانک تماسی امبسی [۱۱] مدل عددی را برای مدلسازی تانک تماسی امبسی مورد استفاده قرار می‌دهیم. برای مدلسازی جریان در تانک از دو مدل آشفتگی Mixing-Length و $k-\epsilon$ استفاده گردیده شده است. بمنظور بررسی کارایی تانک تماسی امبسی منحنی های FTC آن تولید گردیده و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین اندیس های کارایی آن توسط پارامترهایی که در فصول قبل بیان گردیده استخراج شده است. در ادامه بمنظور بررسی تاثیر تعداد دیواره های داخلی و محل قرار گیری آنها در تانک، مدل های عددی دیگری تولید شده و اندیس های کارایی آنها استخراج و مورد بررسی قرار گرفته شده است. تاثیر محل قرار گیری ورودی در کارایی تانک بررسی گردیده و در نهایت به ارائه یک مدل با ساختار جدید محل قرار گیری دیواره های داخلی برای تانک تماسی امبسی پرداخته شده است که از نظر کارایی، بهتر از تانک تماسی موجود می باشد.

۵-۲- تانک تماسی امبسی

تانک تماسی امبسی توسط کمپانی یورکشایر^۱ در کشور انگلستان ساخته شده است و دارای شکل مایچی و هشت محفظه عبور جریان می باشد. تگزیرا^۲ [۱۱] تست های آزمایشگاهی وسیعی بر اساس یک مدلی از تانک با مقیاس ۸:۱ انجام داده است. این مطالعات به بررسی توزیع سرعت و غلظت در تانک تماسی بوده است. در این قسمت مدل عددی ارائه شده در فصل قبل را برای این تانک بکار برده و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

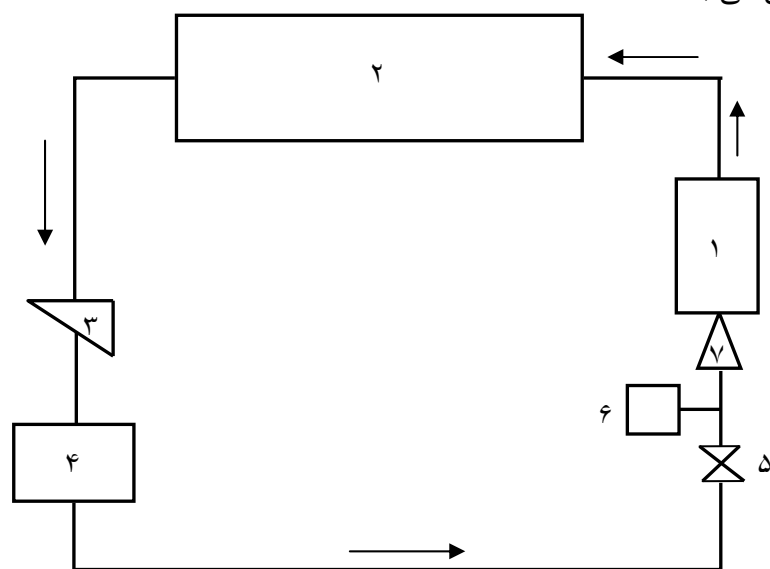
۵-۲-۱- خصوصیات مدل آزمایشگاهی بکار گرفته شده برای تانک تماسی امبسی

سیستم هیدرولیکی بکار گرفته شده را می توان در شکل (۵-۱) مشاهده کرد که دارای یک سیستم چرخشی با هفت قسمت مجزا می باشد. سیستم شامل یک تانک تماسی مستطیلی با ابعاد ۱/۱ متر عرض، ۱/۱۵ متر عمق و ۱/۸ متر طول، مخزن زیر زمینی، سیستم پمپ، تانک با هد ارتفاعی ثابت به ابعاد ۱/۶ متر عمق، ۳/۸ متر طول و ۳/۶ متر عرض، کنترل کننده جریان، جریان سنج و یک کانال تقرب می باشد. تانک با هد ارتفاعی ثابت آب مورد نیاز تانک مورد آزمایش را توسط یک لوله یا کانال تقرب تامین می کند. برای رسیدن به نرخ جریان مورد نظر در تانک تماسی از وسیله کنترل کننده جریان و جریان سنج استفاده شده است. در کانال تقرب جریان از شبکه های مشبک که در انتهای پائین جریان قرار دارد عبور کرده و پس از آن از یک سرریز لبه تیز مستطیلی شکل که در ابتدای ورودی جریان به

¹ Yorkshire

² Teixeira

تانک تماسی قرار دارد عبور میکند. (شکل ۵-۲) و در نهایت با عبور از سرریز لبه تیز مستطیلی دوم توسط پمپ از تانک زیر زمینی به تانک با هد ارتفاعی ثابت منتقل می گردد. تانک تماسی از چوب تخته سه لا به ضخامت ۰/۰۱۷ متر ساخته شده، و دارای ابعادی به عرض ۰/۹۴، عمق ۰/۶ و طولی برابر با ۲ متر می باشد. کانال تقرب دارای شکل ال (L) می باشد و دارای طولهای به اندازه ۱/۲۸ و ۰/۳۳ متر می باشد. سطح مقطع مستطیل شکل آن در ابعاد ۰/۱۲۵ در ۰/۱۹ متر و ۰/۲۱ در ۰/۱۹ متر می باشد. دبی عبوری برای تانک مورد آزمایش برابر با ۰/۰۱۱۷ متر مکعب بر ثانیه می باشد که مقیاسی از دبی واقعی از تانک تماسی امبسی می باشد. نسبت مقیاس هندسی بین تانک امبسی و تانک مورد آزمایش برابر با ۸:۱ بوده است. نسبت مقیاس به حدی بزرگ در نظر گرفته شده است تا خصوصیات جریان در تانک مورد آزمایش نمایش دهنده خصوصیات واقعی از تانک اصلی باشد و در نتیجه خصوصیات جریان نشان دهنده خصوصیات اصلی در تانک واقعی می باشد.

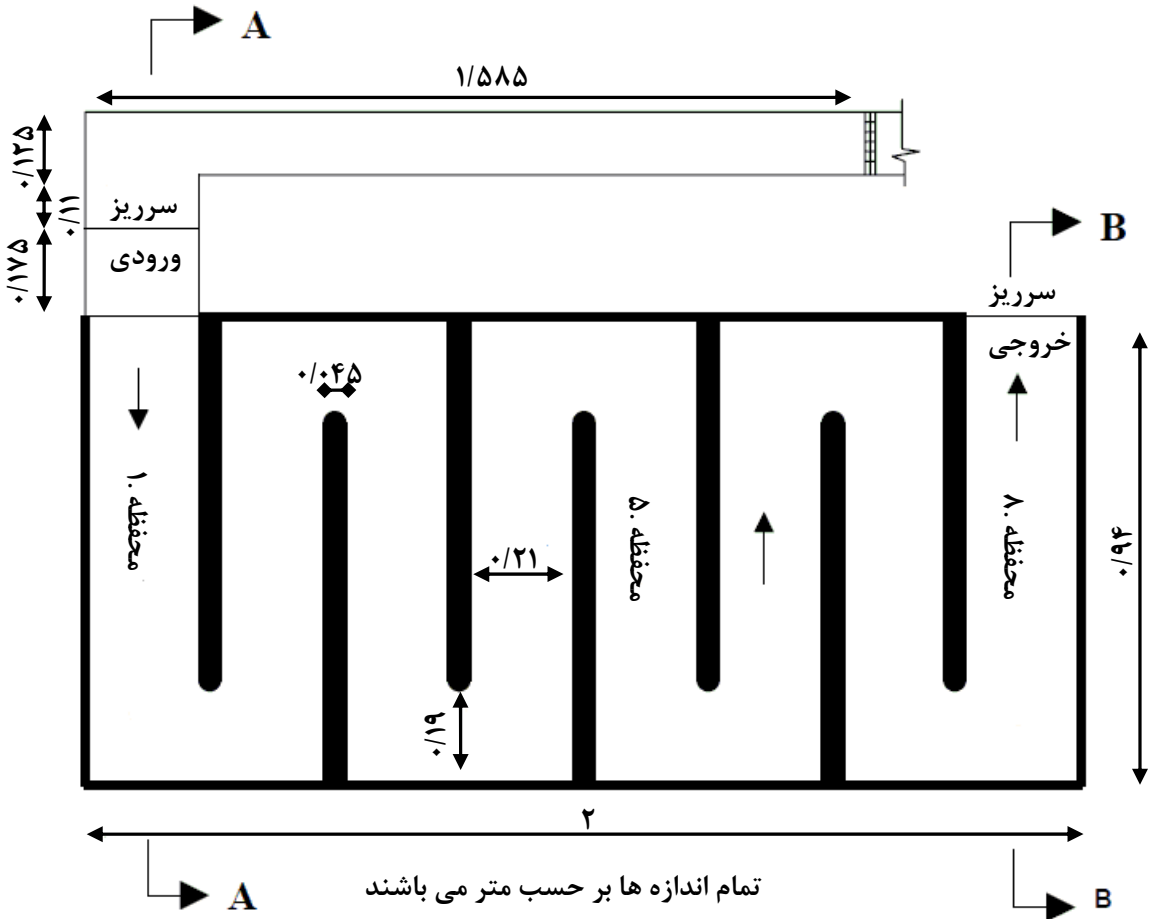


- | | |
|-------------------|----------------------|
| ۱. تانک تماسی | ۵. کنترل کننده جریان |
| ۲. مخزن زیر زمینی | ۶. جریان سنج |
| ۳. پمپ | ۷. ورودی کانال |
| ۴. مخزن در ارتفاع | |

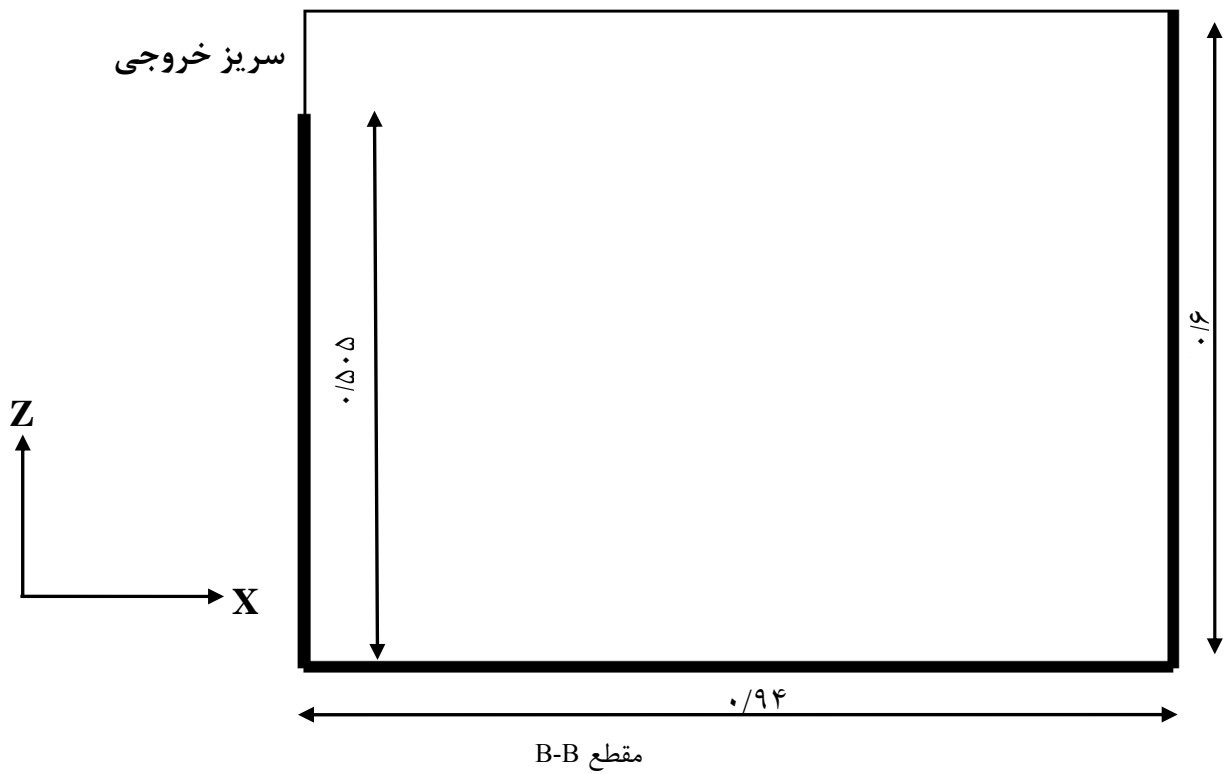
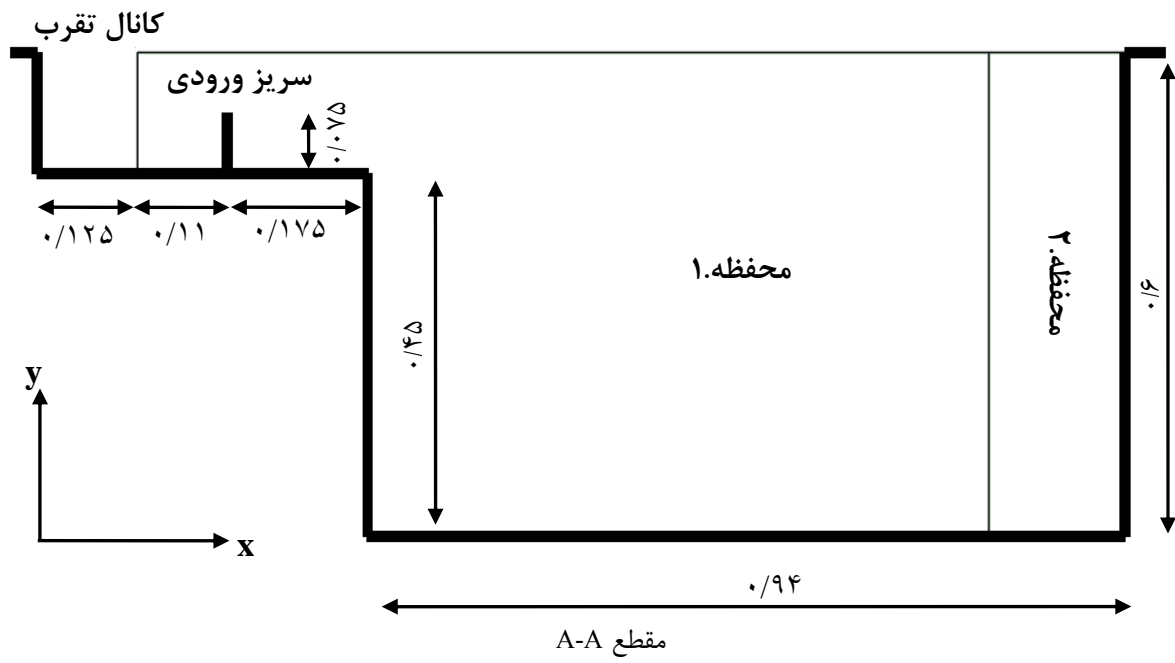
شکل ۵-۱ نمایش شماتیک از سیستم هیدرولیکی

همچنین هفت دیواره داخلی^۳ بطور مناسبی در تانک قرار داده شد (شکل ۵-۲) که ابعاد آن برابر است با ۰/۷۵ متر طول، ۰/۶ متر ارتفاع، ۰/۴۵ متر ضخامت و جنس دیواره از چوب تخته سه لا به ضخامت ۰/۰۱۲ متر ساخته شده است. بمنظور جلوگیری از نفوذ آب و ردگیر در بدنه چوبی سیستم هیدرولیکی، چوبها توسط مواد محافظ عایق بندی شده اند.

³ Baffles



شکل ۲-۵ هندسه تانک تماسی و کانال تقرب آن



شکل ۲-۵ (ادامه) هندسه تانک تماسی

۵-۲-۲- جزئیات مدل عددی بکار گرفته شده برای مدل سازی تانک تماسی امبسی

در این بخش جزئیات مدل عددی مورد مطالعه بیان شده و نتایج بدست آمده از آنرا با نتایج آزمایشگاهی تگزیرا مورد مقایسه قرار می دهیم. بمنظور بررسی فرآیند هیدرولیکی تانک تماسی مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های مورد مطالعه شامل (۱) مدل‌سازی جریان آرام (۲) مدل‌سازی جریان آشفته توسط (Mixing-Length ۳) مدل‌سازی جریان آشفته توسط $k-\epsilon$. در تمام مدل‌های عددی با استفاده از فرضیه درپوش صلب، سطح آب مدل‌سازی گردید. برای مدل‌سازی جریان، معادلات مومنوم بطور کامل استفاده گردید. عبارت دیگر از فرضیه فشار هیدرواستاتیکی برای میدان جریان استفاده نشد و معادله مومنوم در جهت Z بطور کامل برای تمام دامنه مسئله حل گردید. تنش‌های برشی از طریق سرعت‌های نزدیک دیواره تعیین گردید. بدین صورت که اگر سرعت نزدیک دیواره کم باشد یا $\frac{yu_\tau}{g} < 11.63$ آنگاه جریان نزدیک دیواره در ناحیه زیر لایه مرزی قرار گرفته و تنش‌های برشی بر اساس تئوری جریان لزج محاسبه می گردد. اما اگر سرعت نزدیک دیواره زیاد باشد یا $\frac{yu_\tau}{g} > 11.63$ باشد جریان آشفته بوده و تنش‌های برشی بر اساس قانون توزیع سرعت لگاریتمی^۴ بصورت زیر بدست می آید:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{k} \log\left(\frac{Eyu_\tau}{g}\right)$$

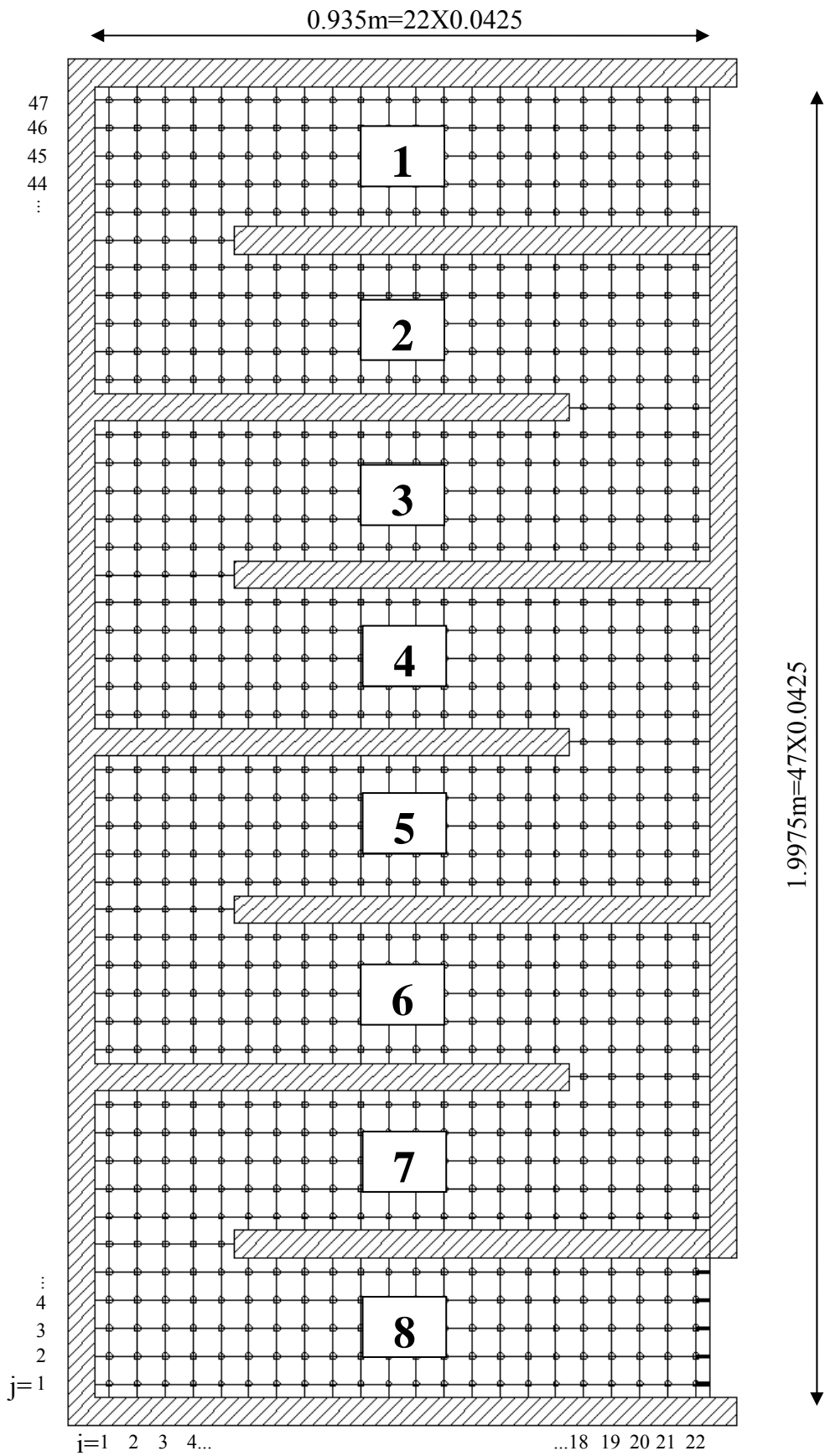
که در آن E برابر با زبری دیوار، y فاصله از دیوار، u_τ برابر با سرعت برشی و θ برابر با لزجت سینماتیکی می باشد. در مدل آزمایشگاهی دیوارها از جنس تخته سه لا بوده است بنابراین سطح آن صاف و مقدار E برای این نوع از شرایط مرزی برابر با $9/8$ در نظر گرفته شد. [۳۹] همچنین توزیع یک ردگیر بقایای که بصورت لحظه ای به تانک اضافه گردید بصورت عددی مدل‌سازی گردیده و نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادیم. همچنین در آنالیز جریان به روش های عددی، اولین قدم انتخاب یک شبکه محاسباتی می باشد. شکل (۵-۳) شبکه مورد استفاده را نشان می دهد. شبکه دارای مقدار ثابت از $\Delta y, \Delta x$ و Δz در تمام نقاط مدل می باشد.

۵-۲-۳- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل $k-\epsilon$

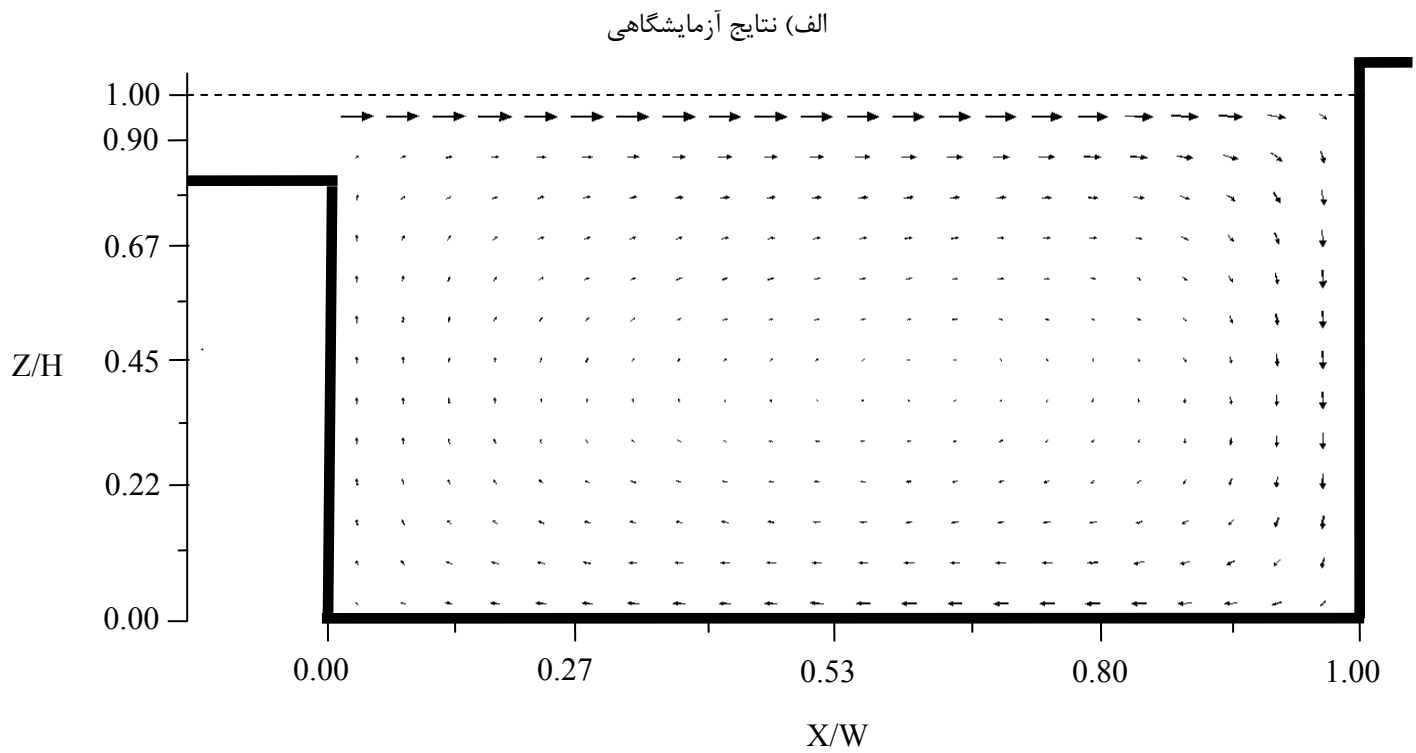
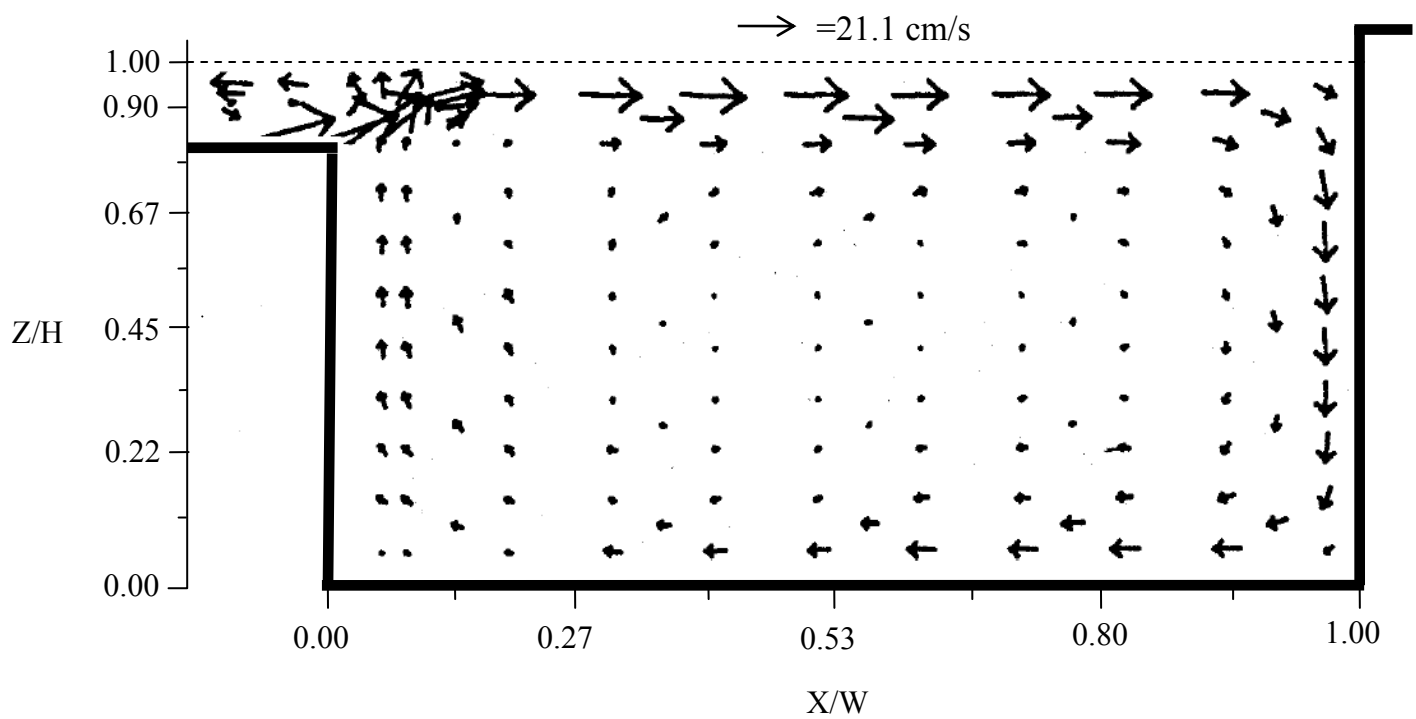
در این بخش به بررسی میدان سرعت پیش بینی شده توسط مدل $k-\epsilon$ می پردازیم. این مدل عددی مبنای تحقیق می باشد و چون از دقت خوبی برخوردار می باشد، سایر مدل‌های آشفتگی با این مدل مقایسه می شوند. همانطور که اشاره گردید مدل $k-\epsilon$ یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در زمینه مدل‌سازی جریانات آشفته می باشد. اگرچه در مطالعات مدل آزمایشگاهی، سرعتها آنقدر پایین بود که جریان در ناحیه جریان انتقالی بین آرام و آشفته قرار داشت و مدل‌سازی جریان آرام نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می

⁴ Log-Law Velocity Distribution

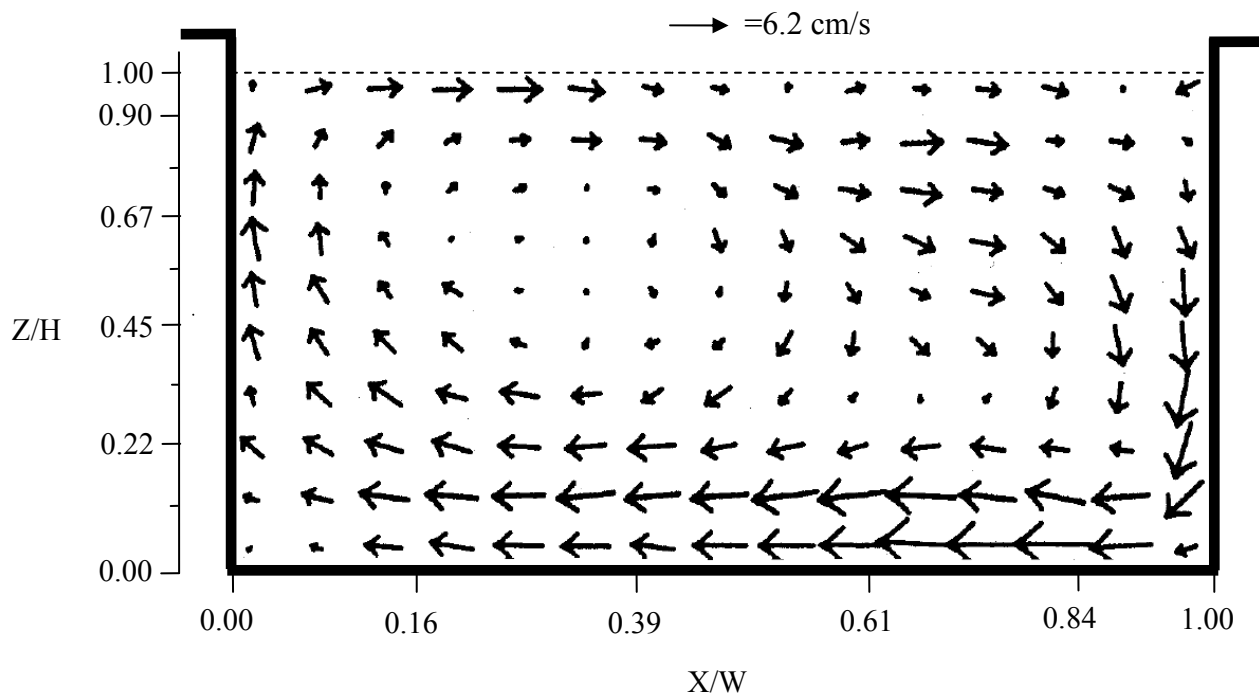
دهد اما در حالت کلی مدلسازی جریان آشفته برای اعداد رینولدز بالاتر در مدل اصلی بسیار مناسب تر می باشد. در این مطالعه بمنظور مدل سازی سطح آب از روش درپوش صلب استفاده گردید. در محاسبه تنشهای برشی نزدیک دیواره، E برابر با $9/8$ فرض گردید. برای ترمهای انتقال از روش آپ ویند بقائی و ترمهای پخش بصورت مرکزی محاسبه گردیدند.



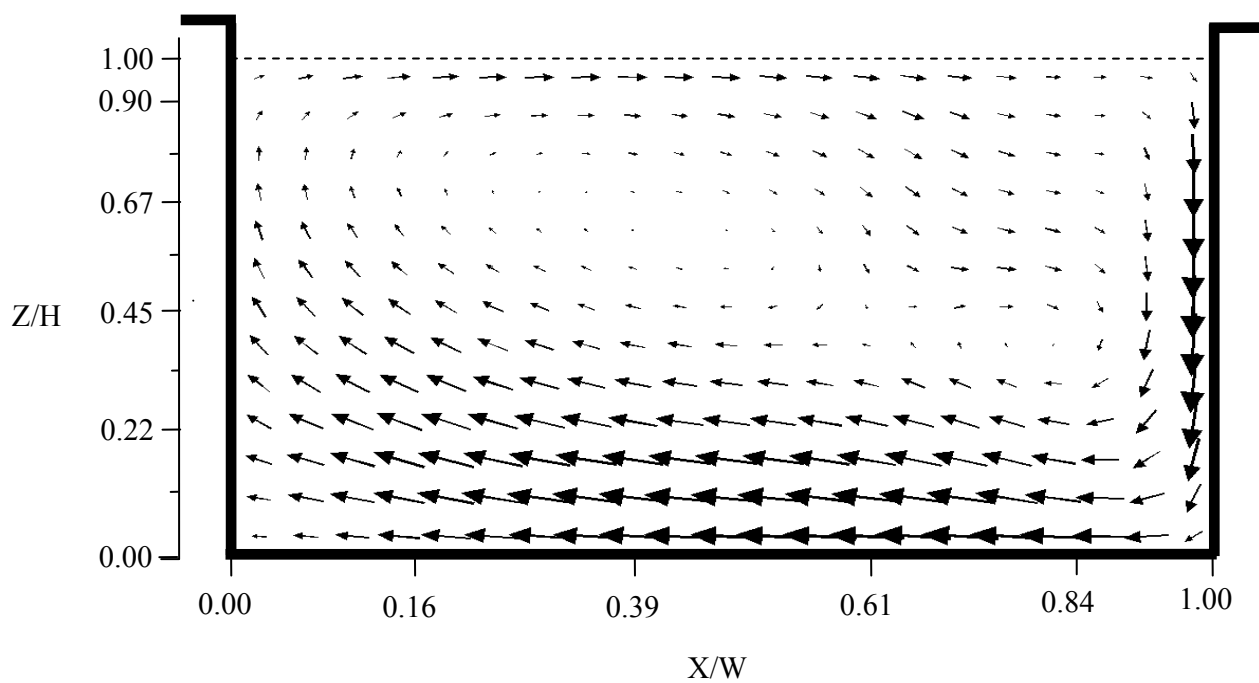
لزجت آشفته بیشتری را نتیجه میدهد که در محفظه اول این موضوع آشکار می باشد. همانطور که مشاهده می کنید نتایج عددی بدست آمده از مدل $k - \varepsilon$ با نتایج آزمایشگاهی از تانک تماسی امبسی انطباق قابل قبولی را نشان می دهد. از آنجائیکه مدل $k - \varepsilon$ بعنوان یک ابزار پر کاربرد در اکثر مدلسازی جریانات آشفته بکار می رود، بنابراین این دسته از نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی را بعنوان نتایج عددی پایه از تانک تماسی امبسی در نظر گرفته و نتایج عددی روشهای دیگر را با این نتایج مورد مقایسه قرار می دهیم.



شکل ۴-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل k-ε در محفظه ۱

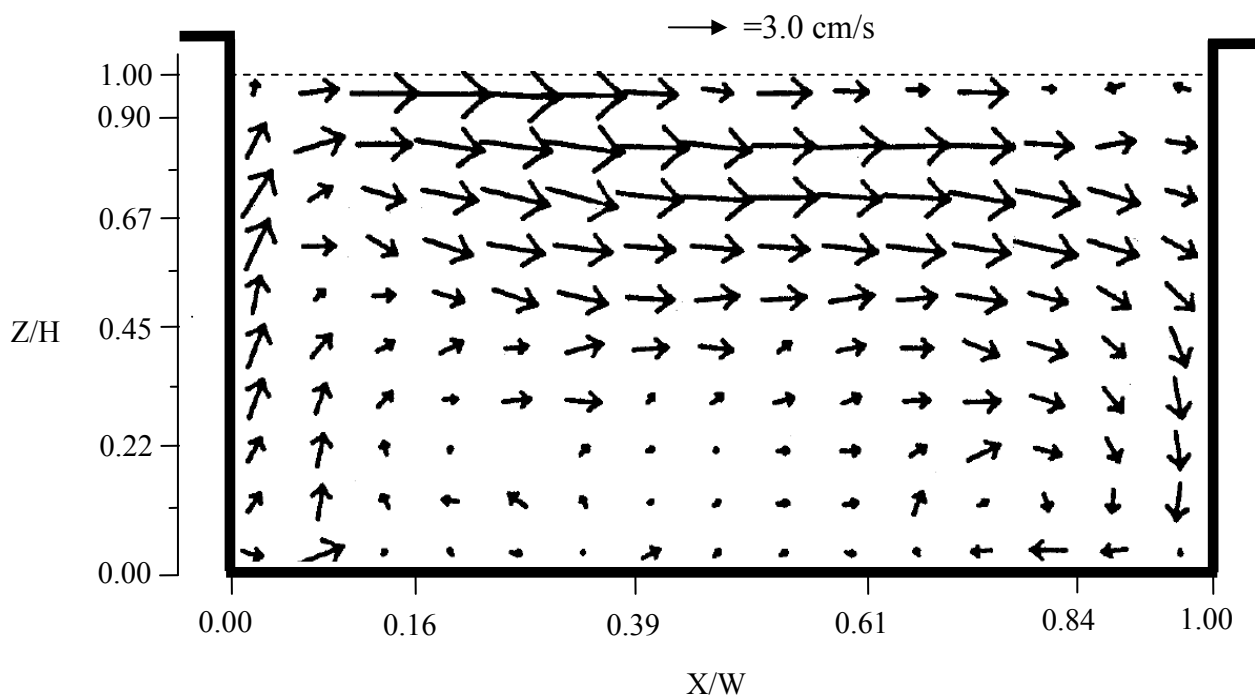


الف) نتایج آزمایشگاهی

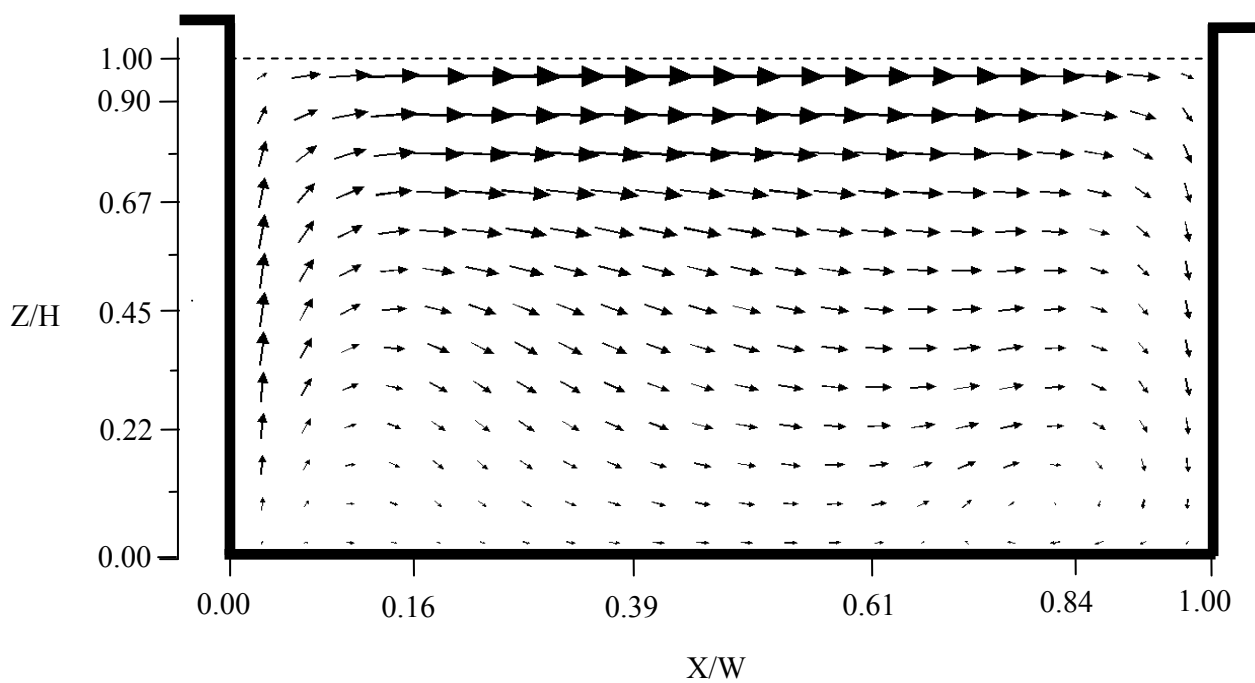


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل k-ε در محفظه ۲

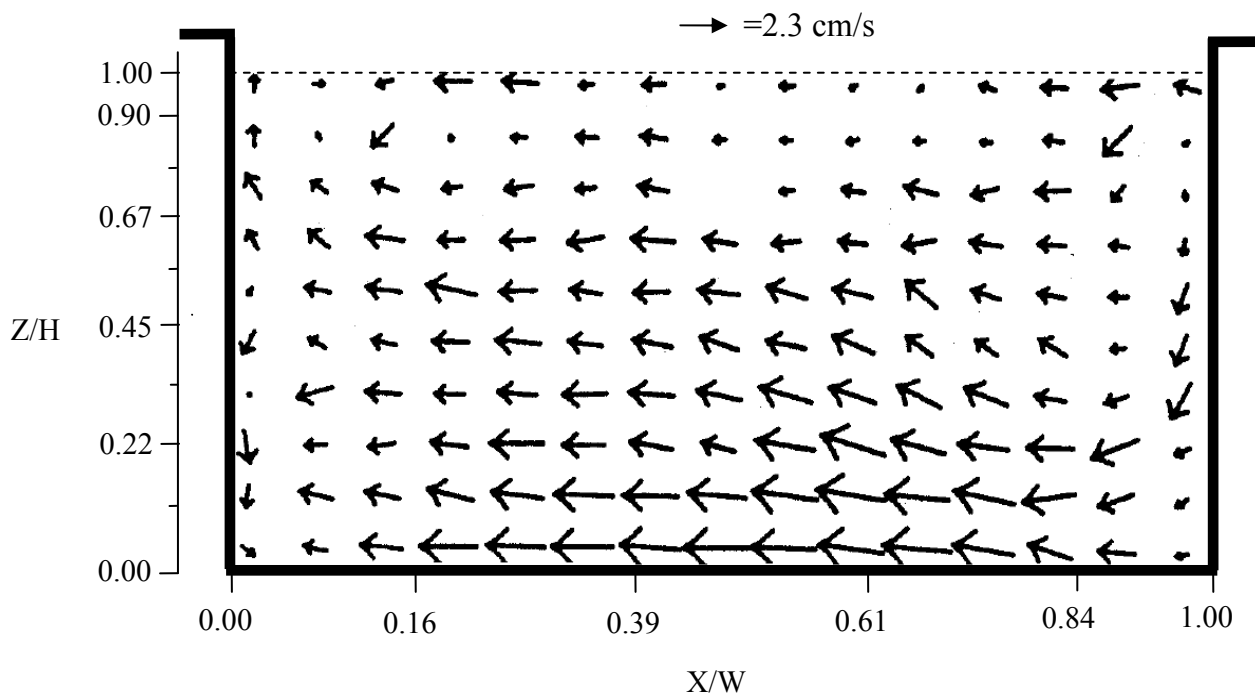


الف) نتایج آزمایشگاهی

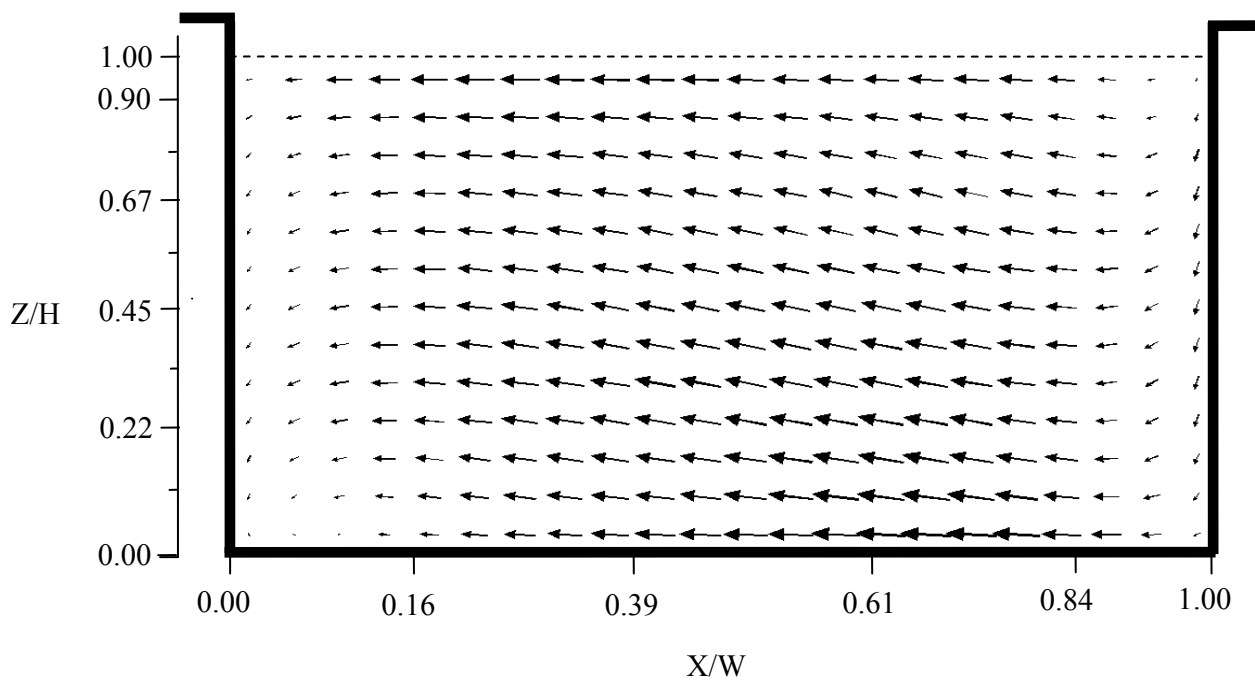


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۶ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۳

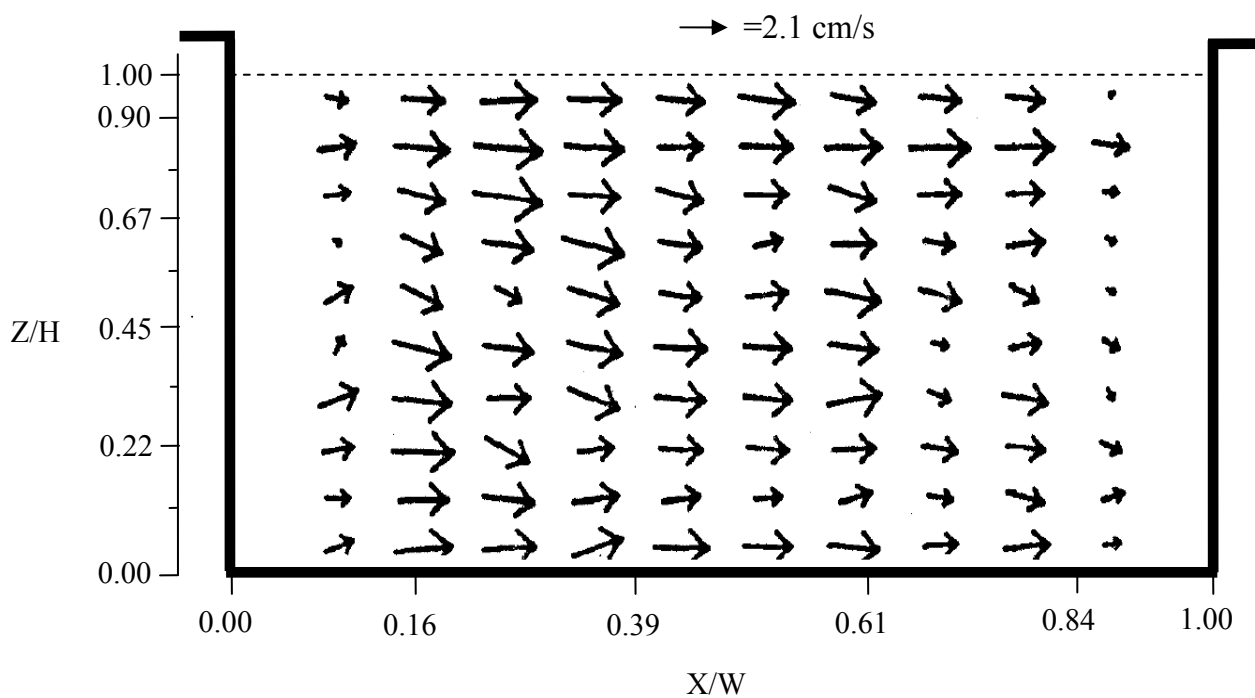


الف) نتایج آزمایشگاهی

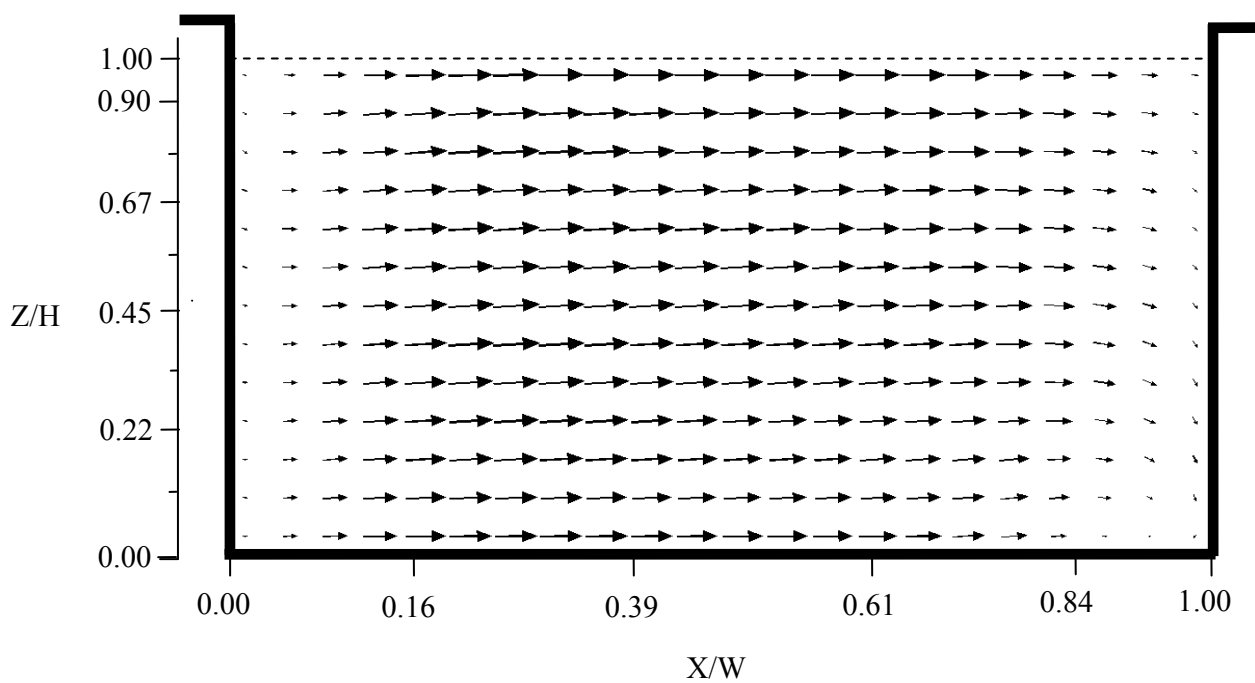


ب) نتایج عددی

شکل ۷-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل k-ε در محفظه ۴

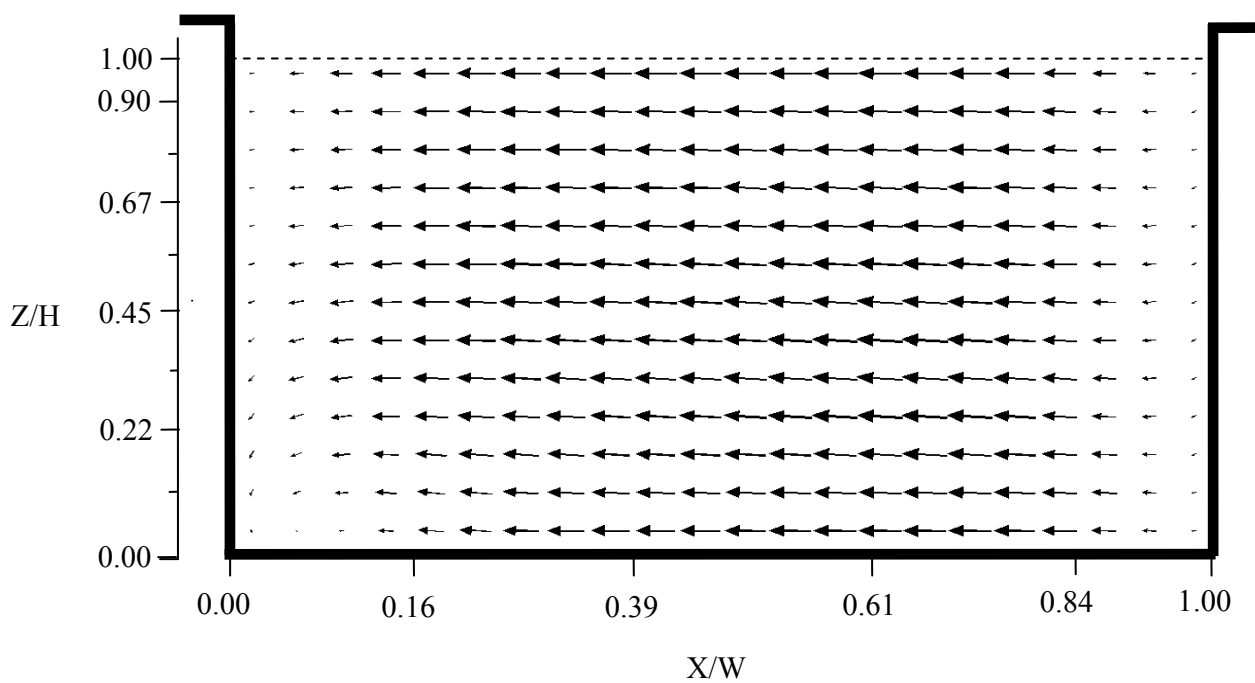
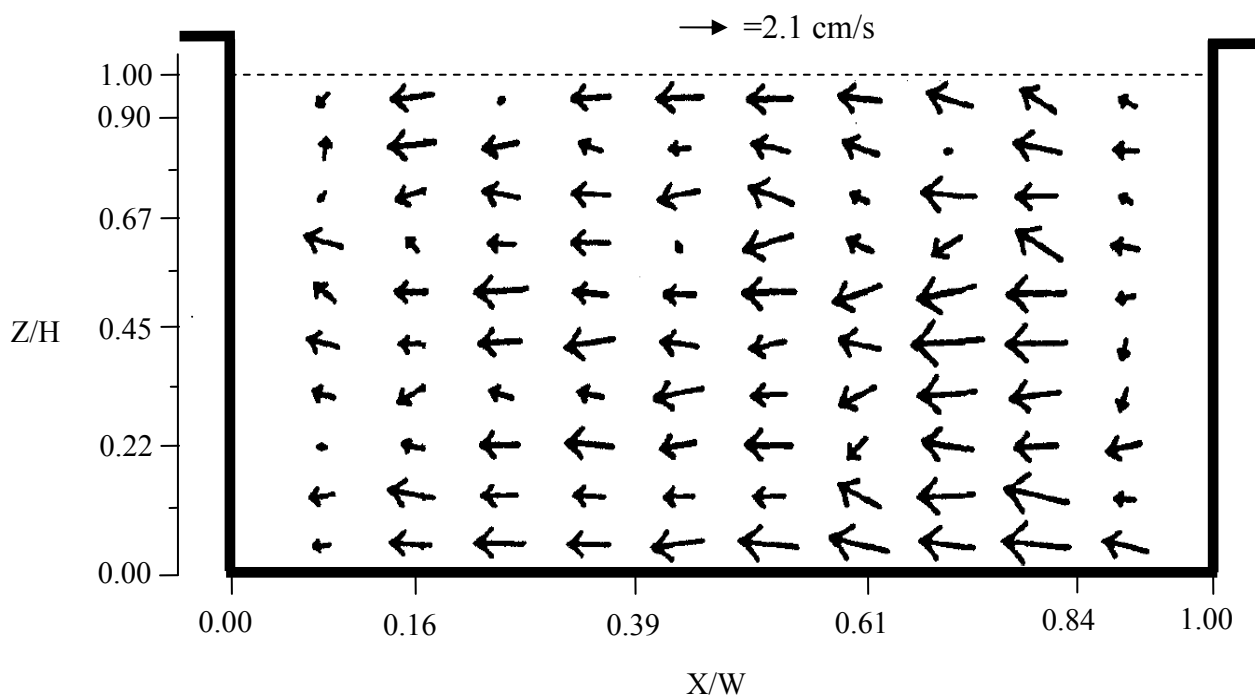


الف) نتایج آزمایشگاهی

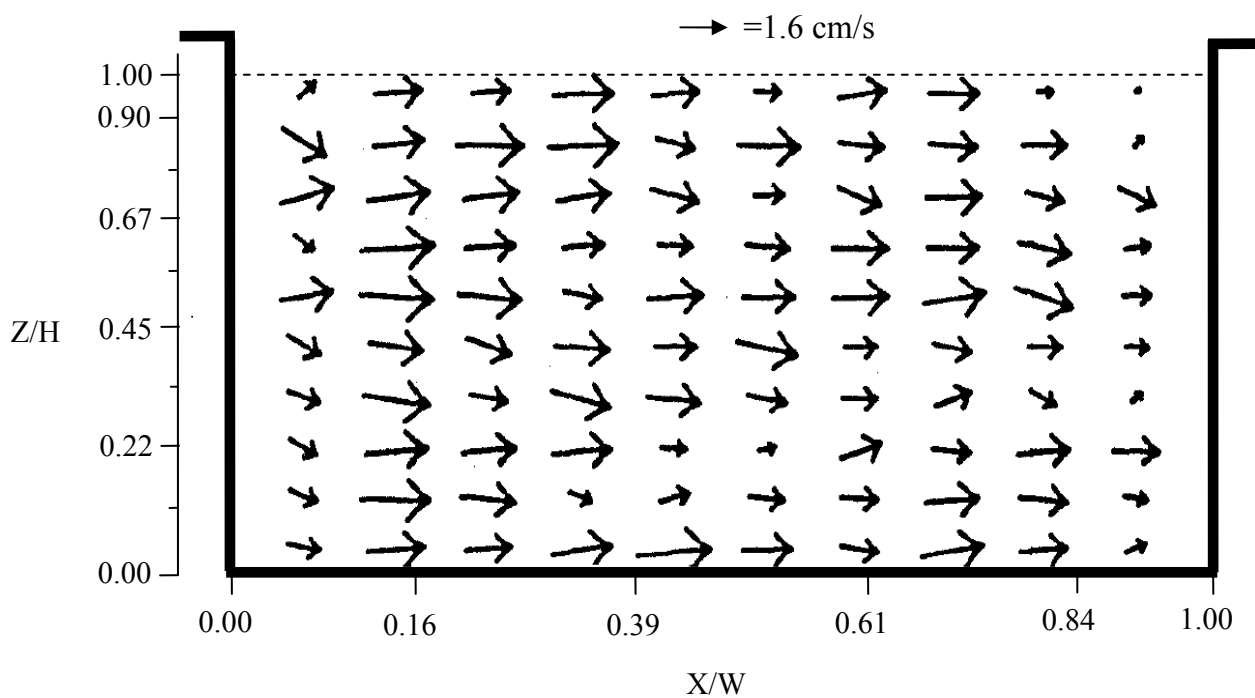


ب) نتایج عددی

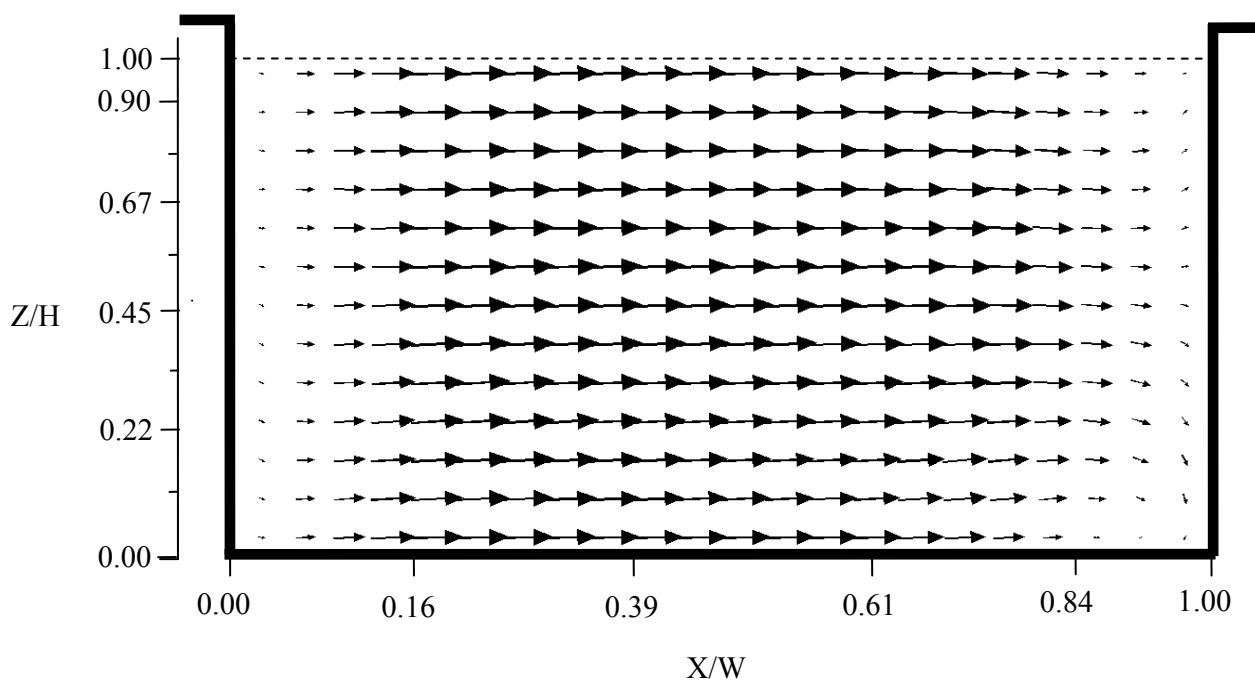
شکل ۵-۸ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۵



شکل ۹-۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل k-ε در محفظه ۶

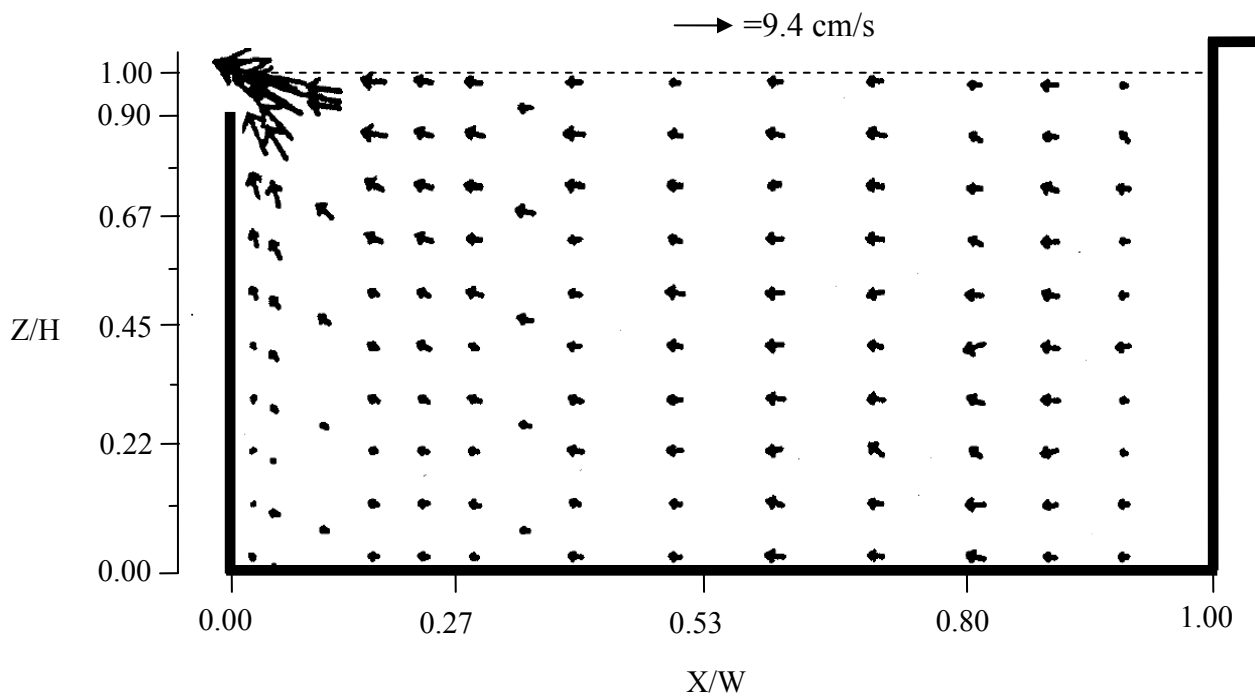


الف) نتایج آزمایشگاهی

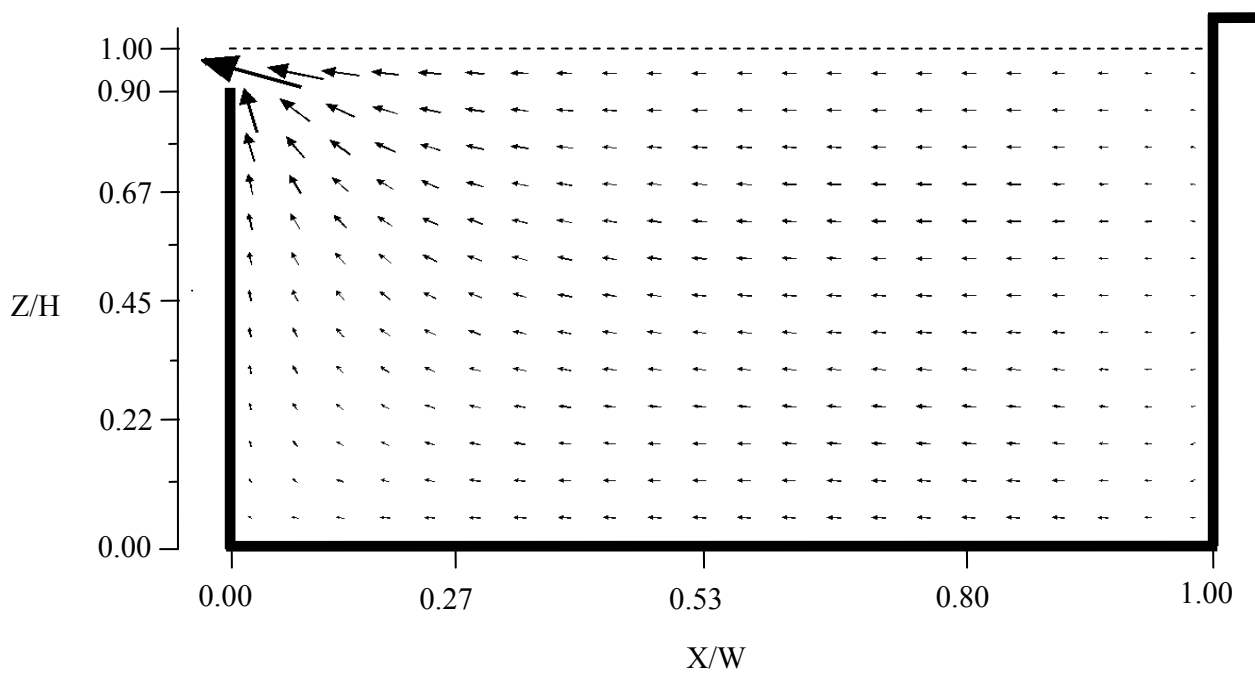


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۱۰ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۷

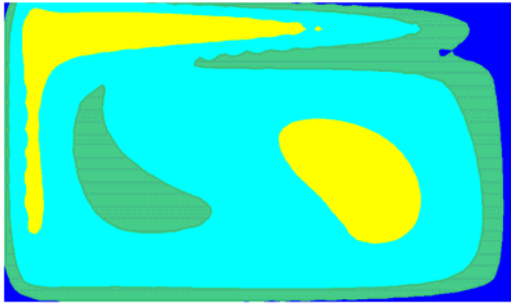
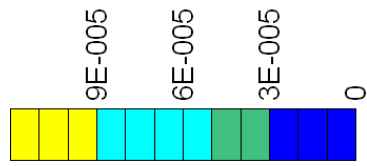


الف) نتایج آزمایشگاهی

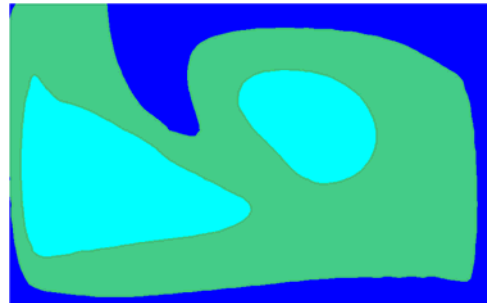


ب) نتایج عددی

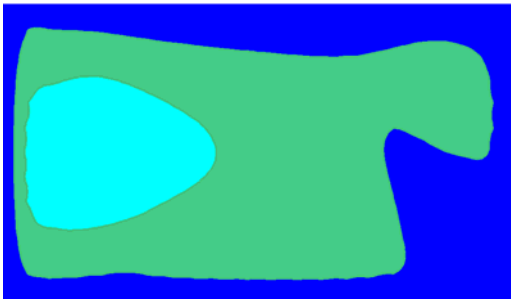
شکل ۵-۱۱ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ در محفظه ۸



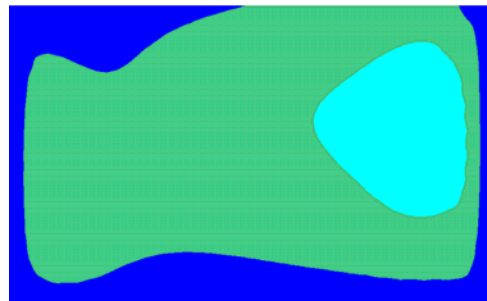
محفظه اول



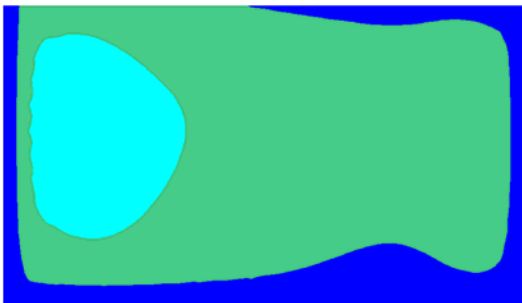
محفظه دوم



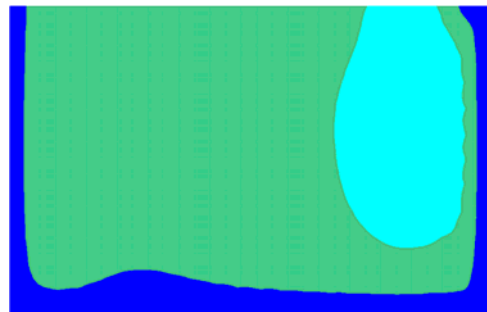
محفظه سوم



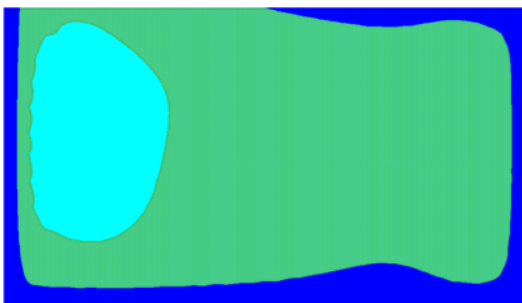
محفظه چهارم



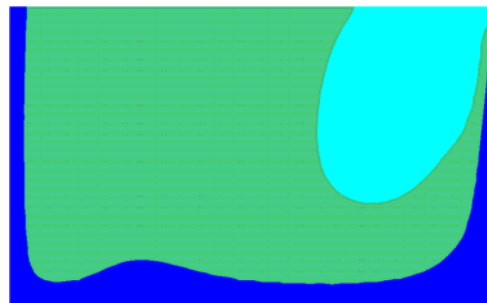
محفظه پنجم



محفظه ششم



محفظه هفتم

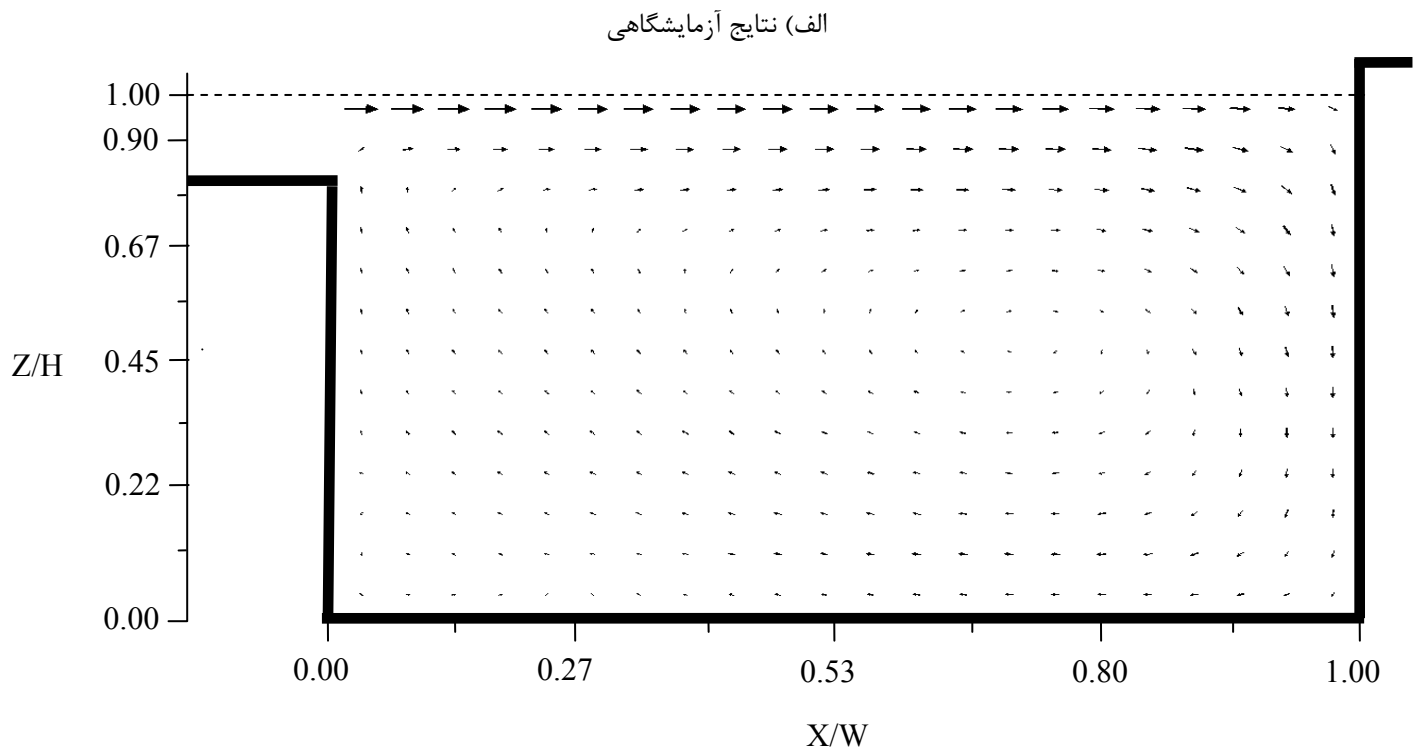
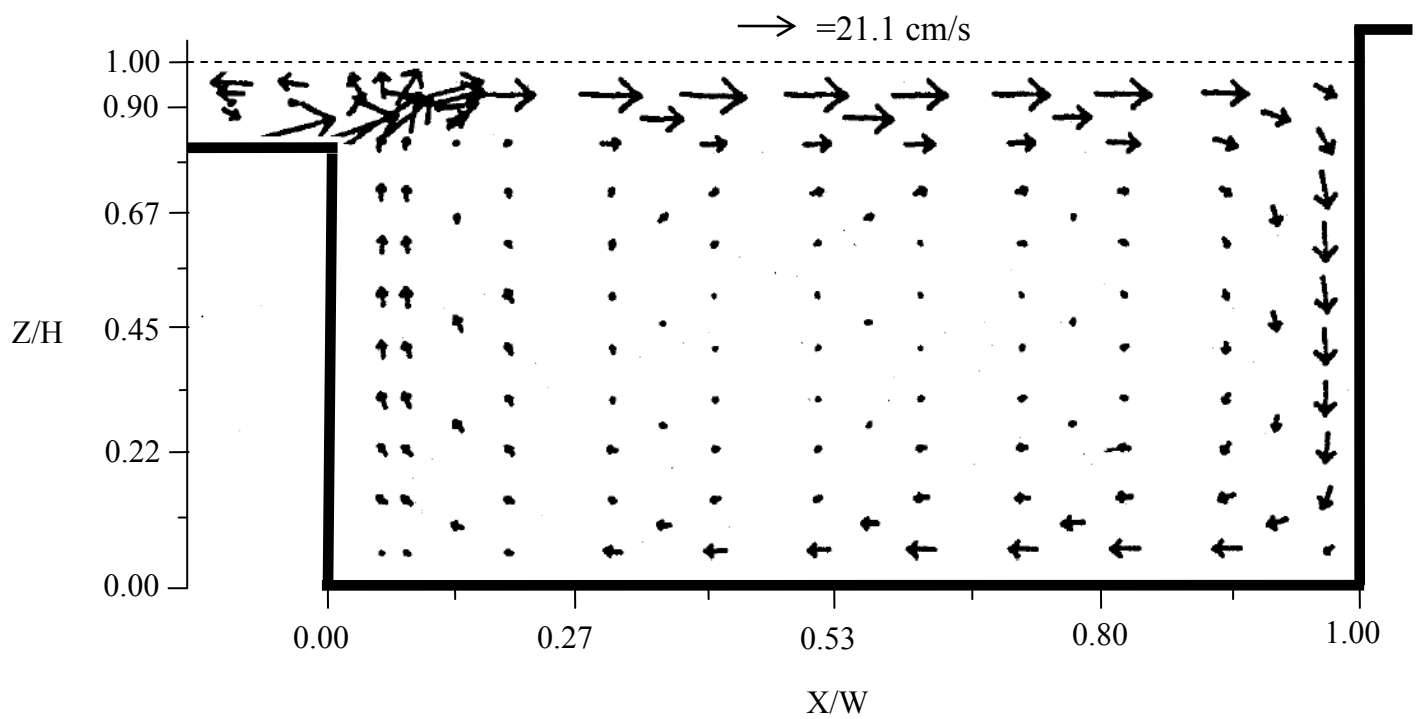


محفظه هشتم

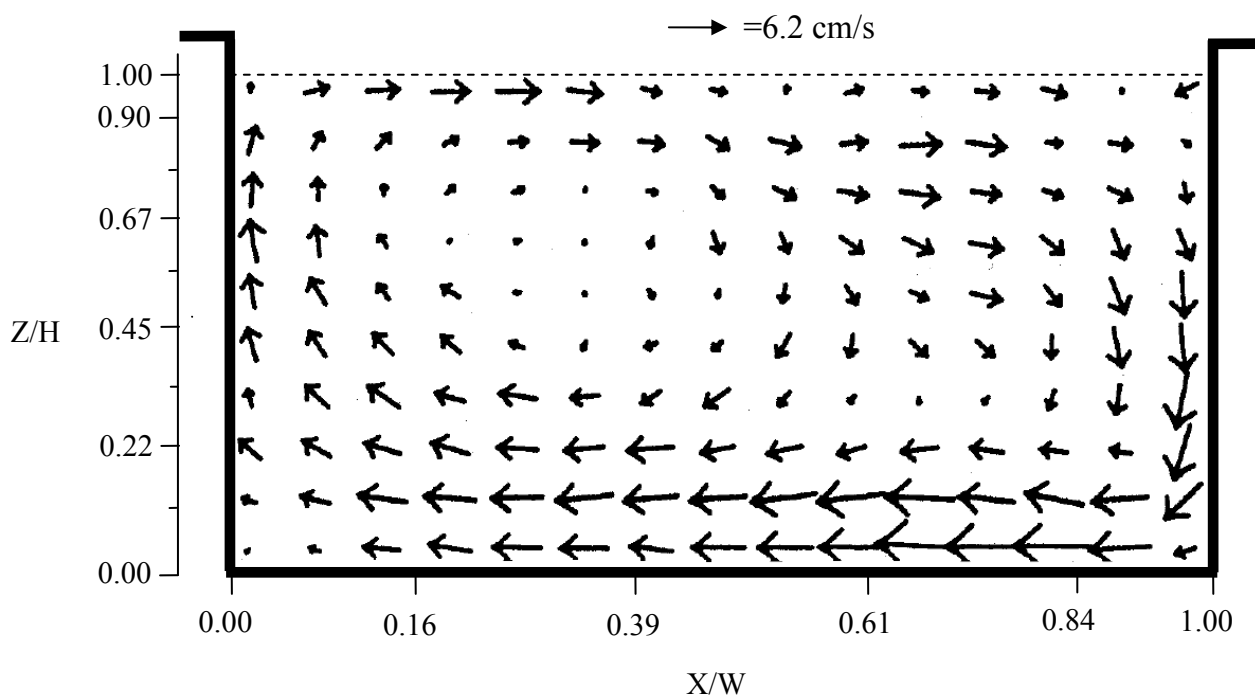
شکل ۵-۱۲ توزیع لزجت آشفته در تانک امبسی توسط مدل $k-\epsilon$

۵-۲-۴- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل *Mixing-Length*

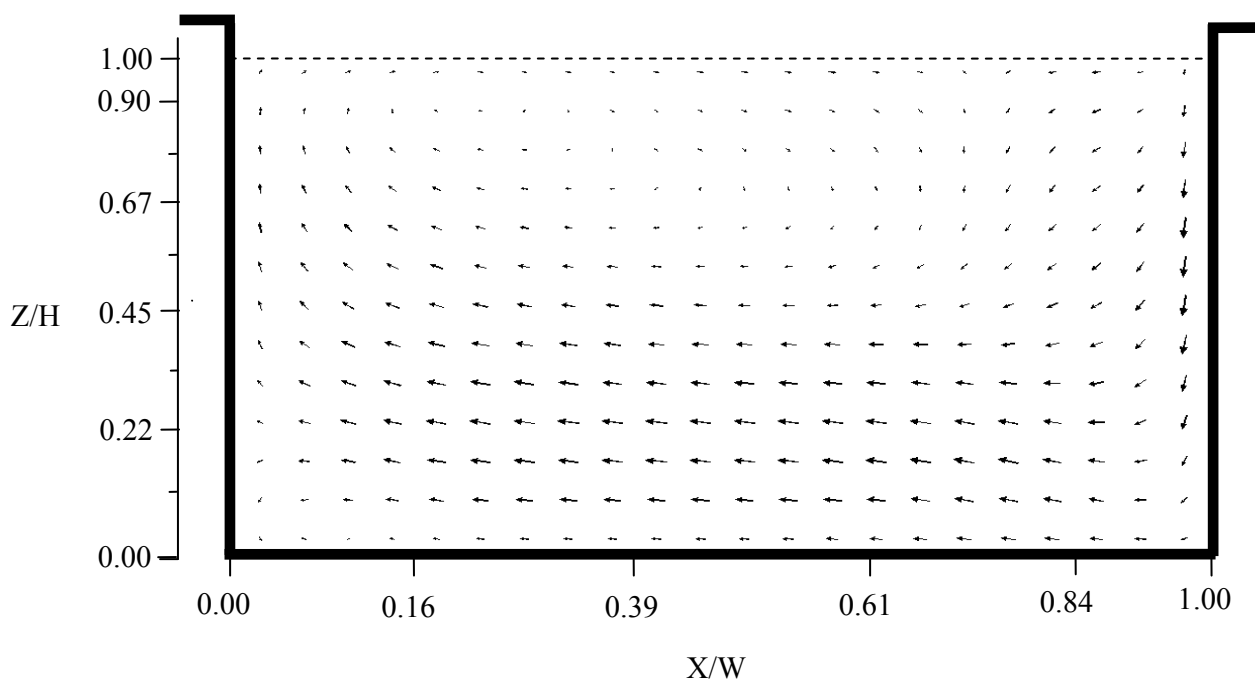
در این قسمت جریان در تانک امبسی توسط مدل *Mixing-Length* مدل‌سازی گردید. مدل *Mixing-Length* در دسته معادلات آشفتگی صفر معادله ای قرار گرفته است و بمعنای آن می باشد که هیچ معادله اضافی حل نمی گردد و لزجت آشفتگی در هر نقطه توسط یک فرمول ساده که بر اساس گرادیان های سرعت می باشد بدست می آید. همچنین بیانگر آنست که محاسبه لزجت آشفتگی از روند محاسباتی و زمان مصرفی کمتری در مقایسه با مدل $k-\epsilon$ برخوردار می باشد. بطور کلی آشفتگی در نواحی مرزی بوجود آمده و سپس به دیگر نقاط داخل جریان منتقل می گردد. ضعف روش *Mixing-Length* در مقایسه با $k-\epsilon$ آن می باشد که نمی توان آشفتگی را از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل نماید در حالیکه $k-\epsilon$ قادر است که آشفتگی را از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل کرده و ساختار آشفتگی یکنواخت تری را در مقایسه با آن بوجود آورد. شکل های (۵-۱۳) تا (۵-۱۸) نتایج بدست آمده از مدل‌سازی تانک تماسی امبسی را توسط مدل *Mixing-Length* نشان می دهند. در این مدل‌سازیها شرایط مدل‌سازی جریان به همان صورتی می باشد که در قسمت قبل بیان گردید بجز آنکه برای مدل‌سازی آشفتگی از *Mixing-Length* استفاده گردید. از شرایط اصطکاکی یکسان در نزدیکی مرز استفاده شده است و همچنین بمنظور مدل‌سازی سطح آب نیز فرضیه درپوش صلب بکار برده شده است. همانطور که مشاهده می شود انطباق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین این نتایج بسیار شبیه با نتایج بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ بوده که در قسمت قبل اشاره گردید و نیز شباهت زیادی با مدل‌سازی جریان در حالت آرام دارد که در بخش بعدی به آن اشاره خواهد شد. دلیل آنرا می توان در این موضوع بیان نمود که سرعتها در تانک تماسی امبسی بسیار پایین می باشند که حتی مدل‌سازی جریان آرام ما را نیز به جوابهای قابل قبولی سوق می دهند. سرعتهای کم موجود در تانک منجر به تولید آشفتگی زیاد در مرزها نشده و بنابراین آشفتگی کمی از مرزها به داخل دامنه منتقل می گردند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در مقیاس آزمایشگاهی تانک تماسی آشفتگی مهم نبوده است. همچنین در شکل (۵-۱۹) لزجت آشفتگی در تانک محاسبه و ترسیم شده است. دوباره نتایج نشان می دهند که لزجت آشفتگی در اکثر نقاط تانک کم می باشند. همانطور که در شکل مشاهده می کنید آشفتگی فقط در نقاطی که گرادیانهای سرعت زیاد می باشند بطور نسبی زیاد می باشند.



شکل ۵-۱۳ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۱

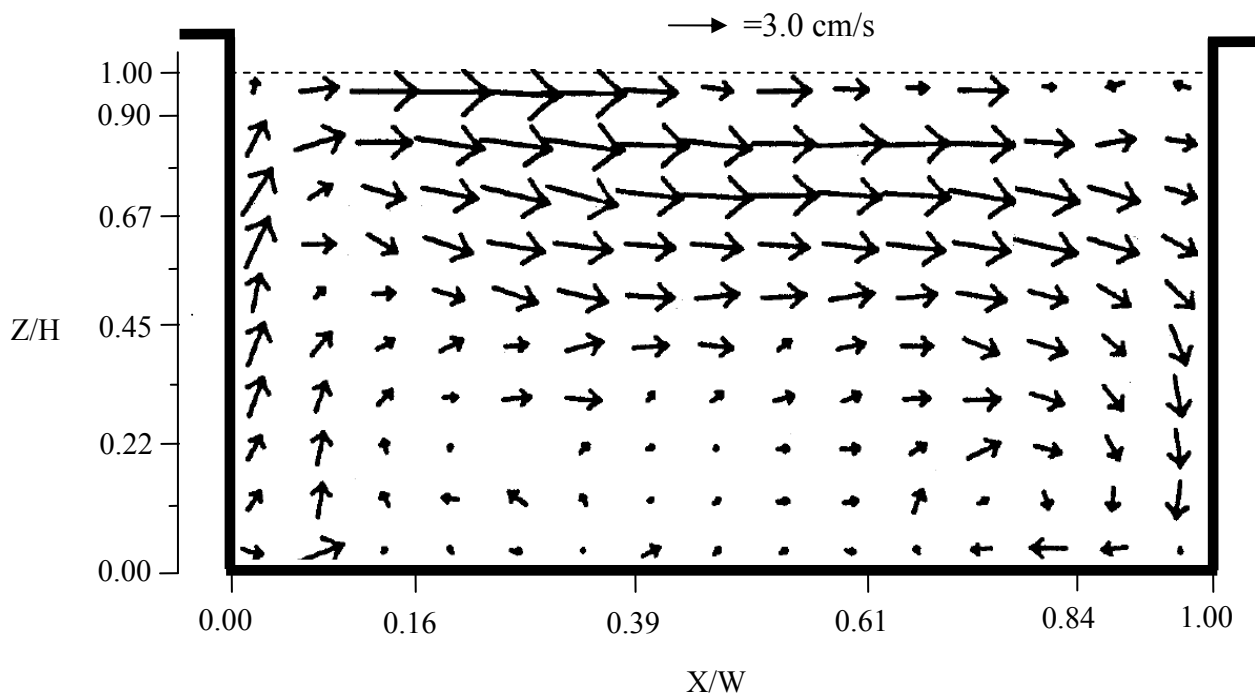


الف) نتایج آزمایشگاهی

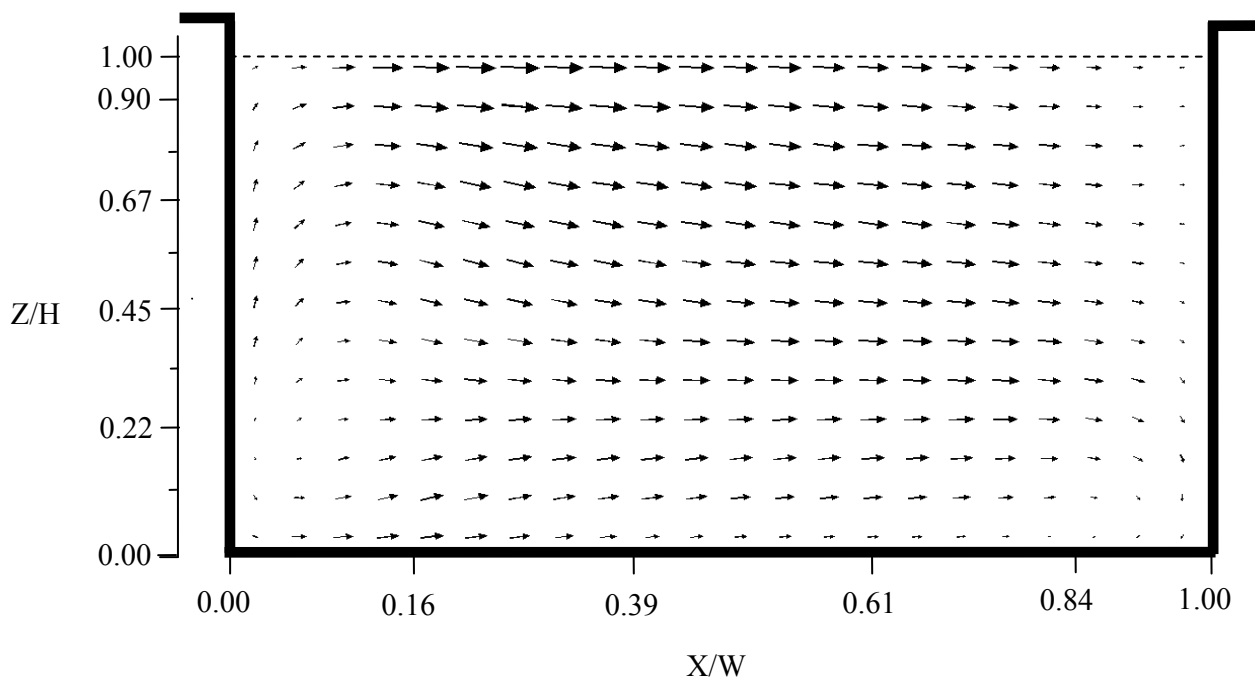


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۱۴ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۲

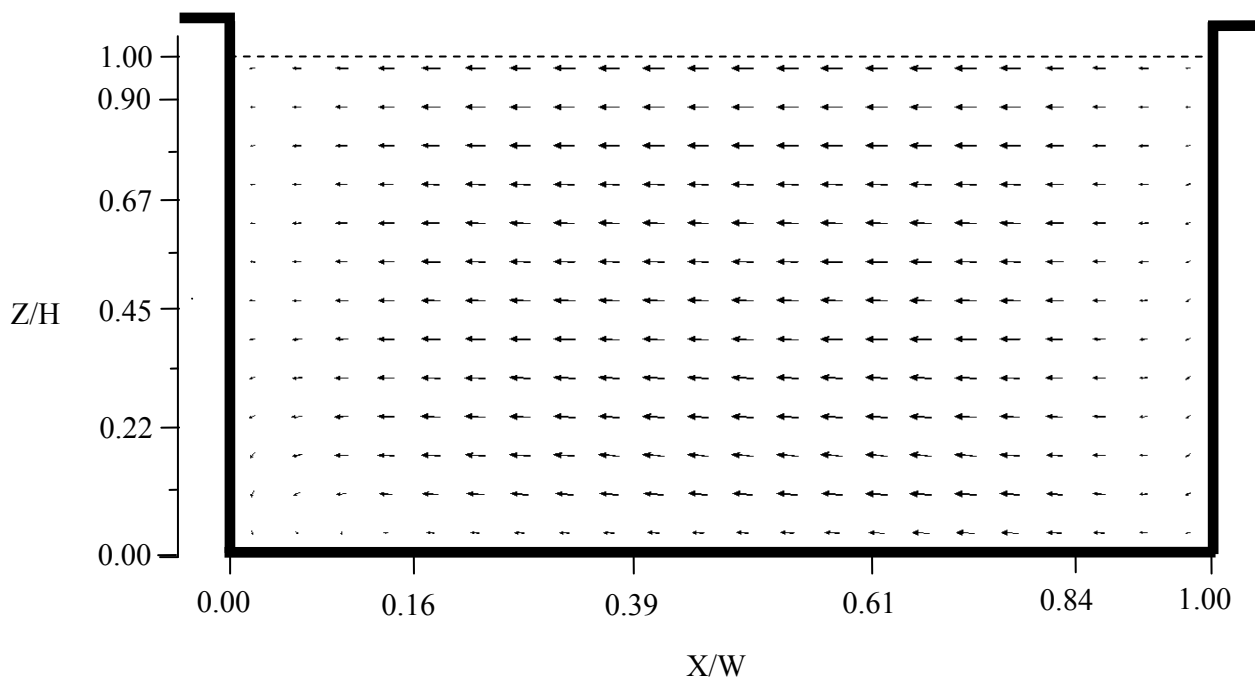
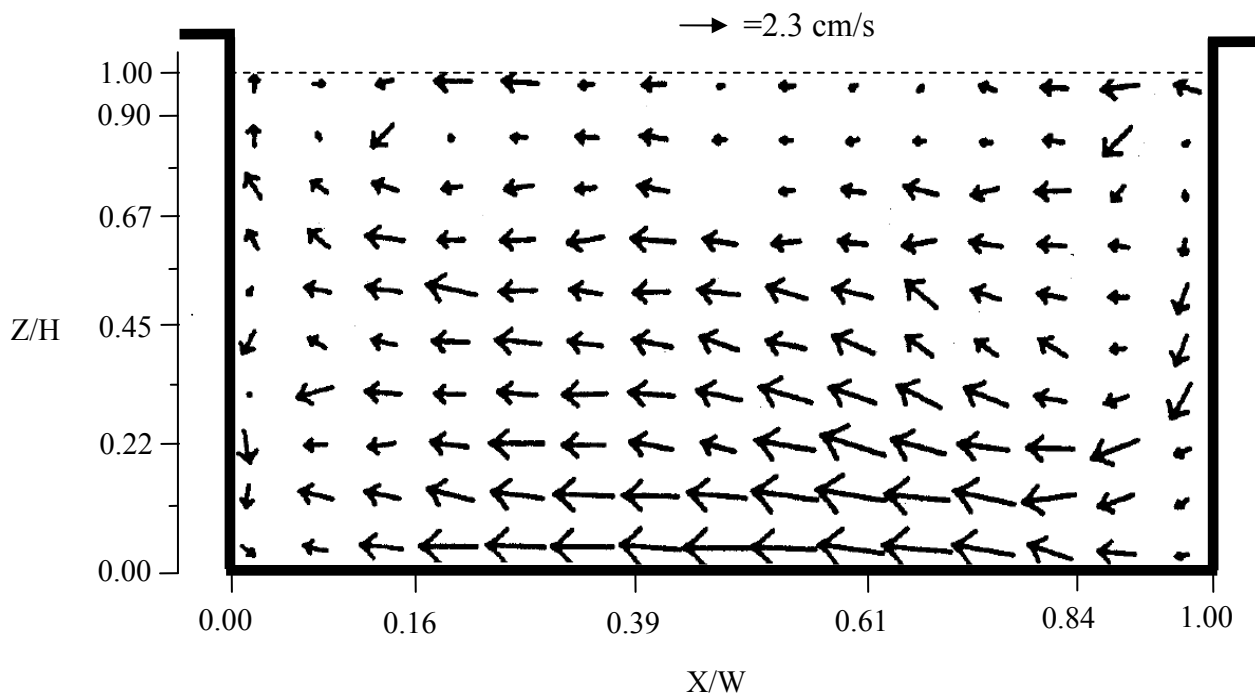


الف) نتایج آزمایشگاهی

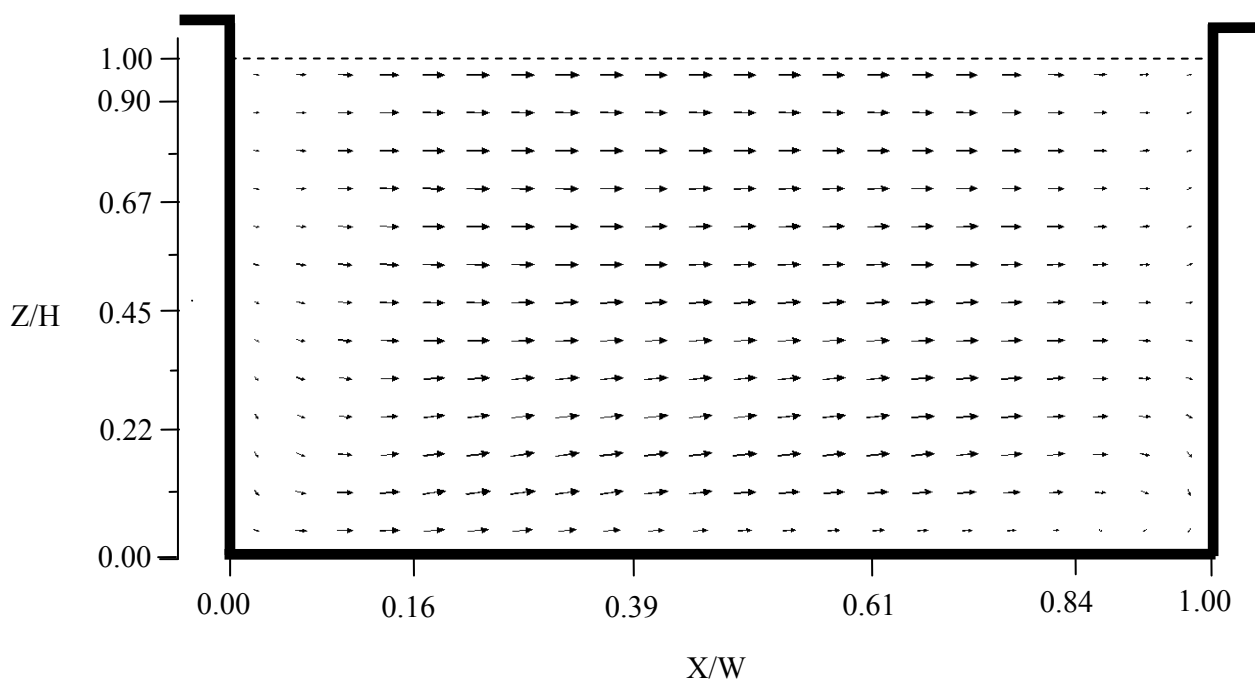
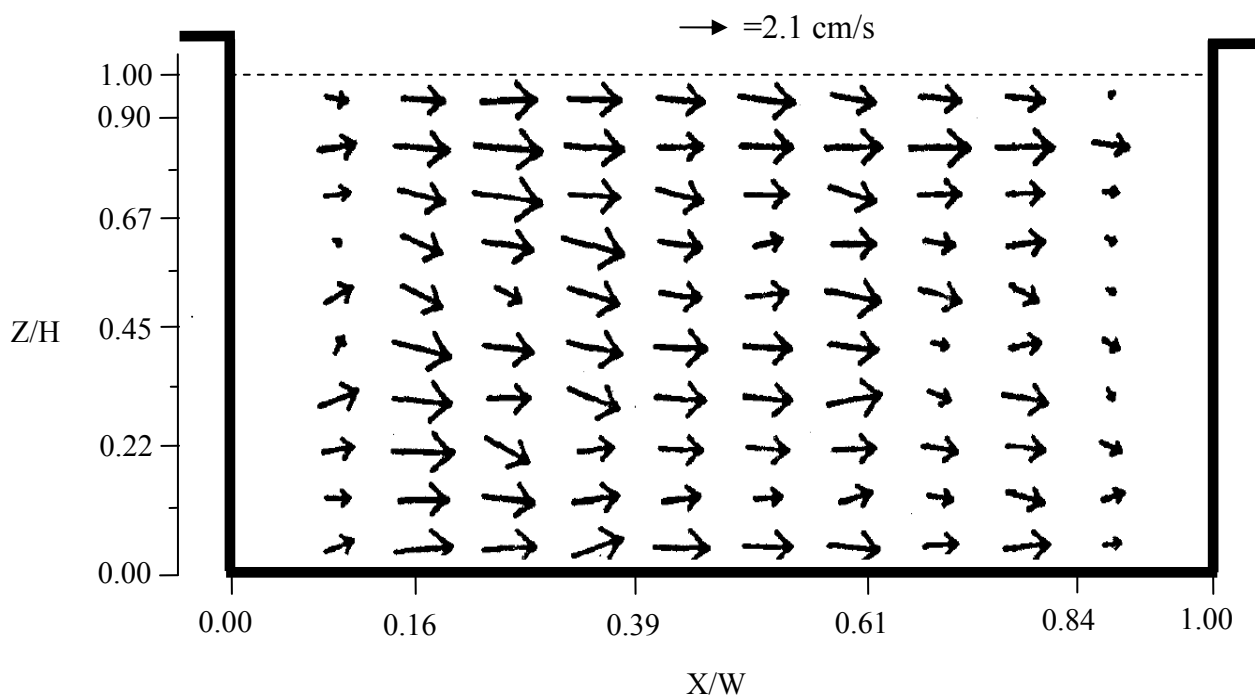


ب) نتایج عددی

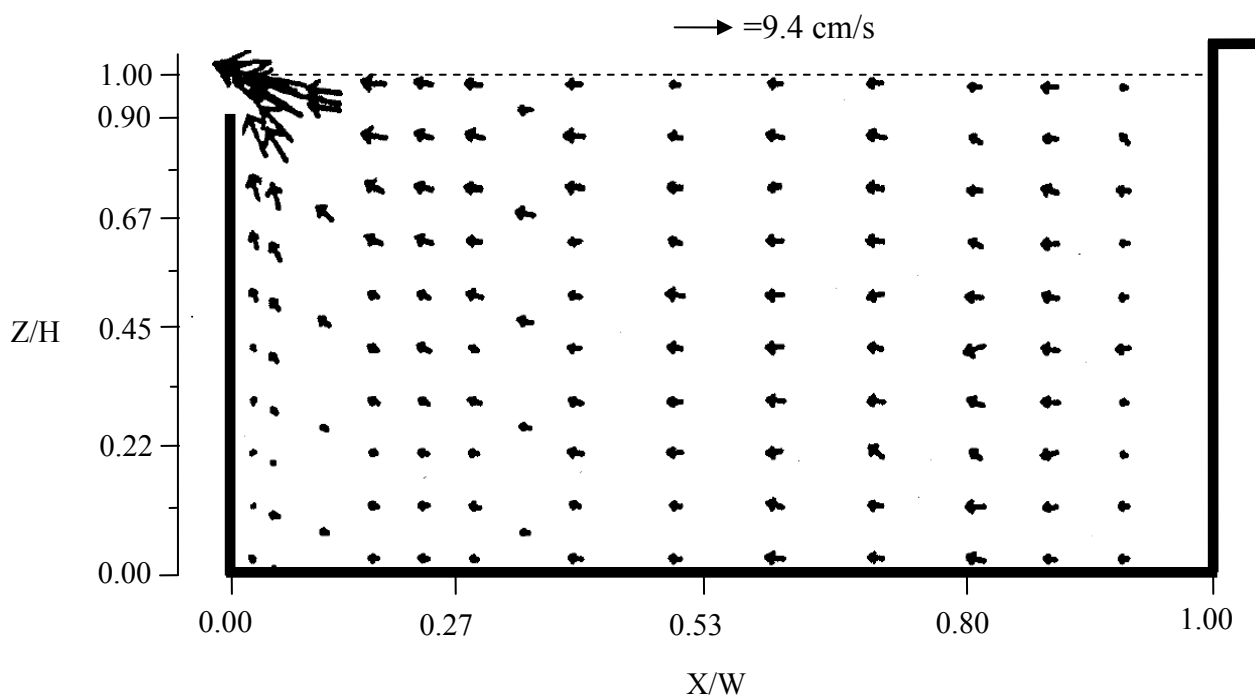
شکل ۵-۱۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۳



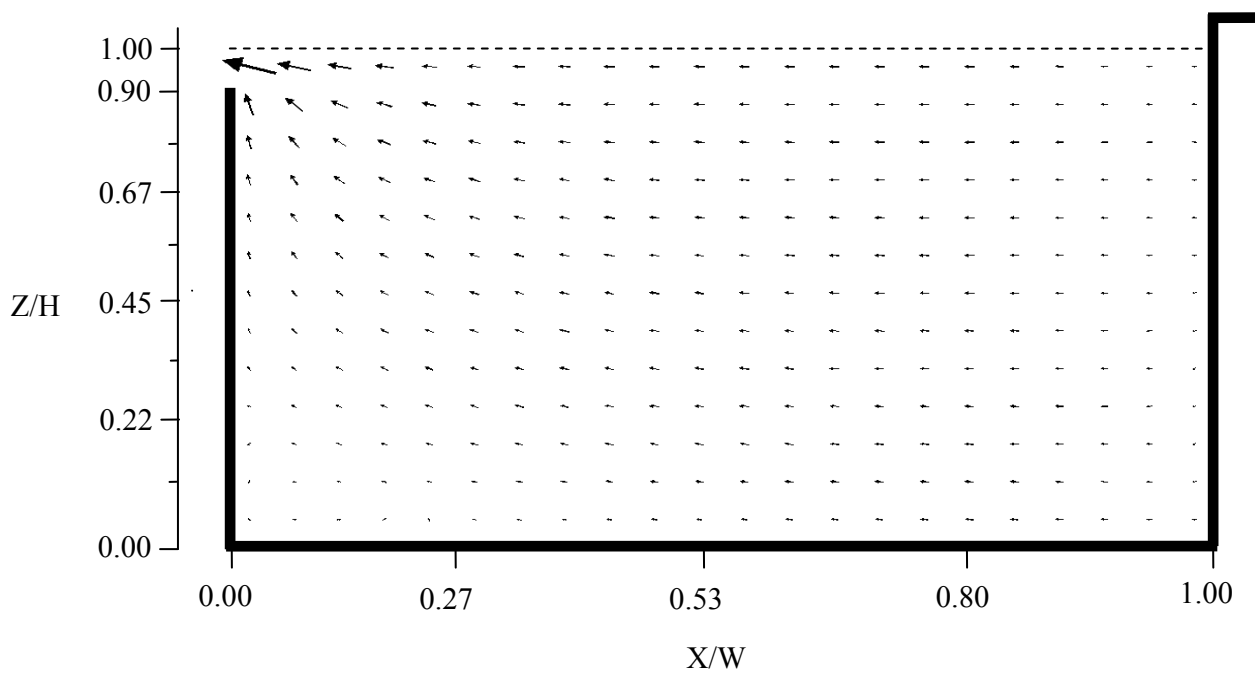
شکل ۵-۱۶ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۴



شکل ۵-۱۷ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۵

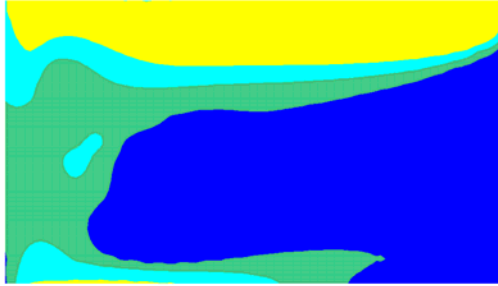
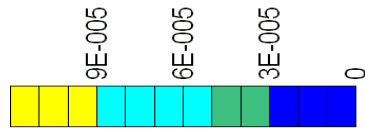


الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۵-۱۸ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل *Mixing-Length* در محفظه ۸



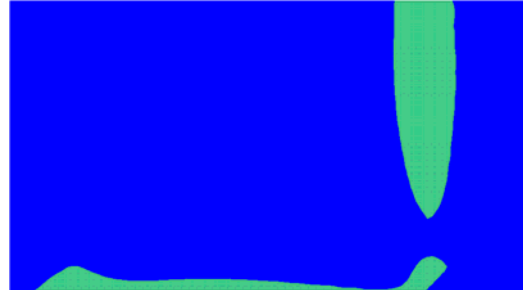
محفظه اول



محفظه دوم



محفظه سوم



محفظه چهارم



محفظه پنجم



محفظه ششم



محفظه هفتم



محفظه هشتم

شکل ۵-۱۹ توزیع لزجت آشسته در تانک امبسی توسط مدل *Mixing-Length*

۵-۲-۵- مدل‌سازی تانک امبسی با استفاده از مدل جریان آرام

در این تحقیق محاسبات جریان بطور کلی به دو روش آرام و آشفته محاسبه گردید. بمنظور تعیین نوع جریان ابتدا باید عدد رینولدز را مشخص نمود. بدلیل آنکه لزجت آب پائین می باشد، معمولاً طبیعت جریان بصورت آشفته می باشد. اما در تانک آزمایشگاهی مورد مطالعه سرعتها بسیار پائین گزارش شده است و باید نوع جریان در تانک را تعیین نمائیم. در تانک مدل‌سازی شده، دبی جریان برابر با ۱/۱۷ لیتر بر ثانیه و عمق و ارتفاع تانک به ترتیب برابر با ۵۵/۲۵ و ۲۱/۲۵ سانتی متر بوده است. بنابراین مساحت و سرعت متوسط در کانال بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$A=bh=0.2 \times 0.5525=0.117m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1.17 \times 10^{-3}}{0.117} = 0.01m/s = 1cm/s$$

شعاع هیدرولیکی کانال بر اساس محیط مرطوب و مساحت کانال بصورت زیر بدست می آید:

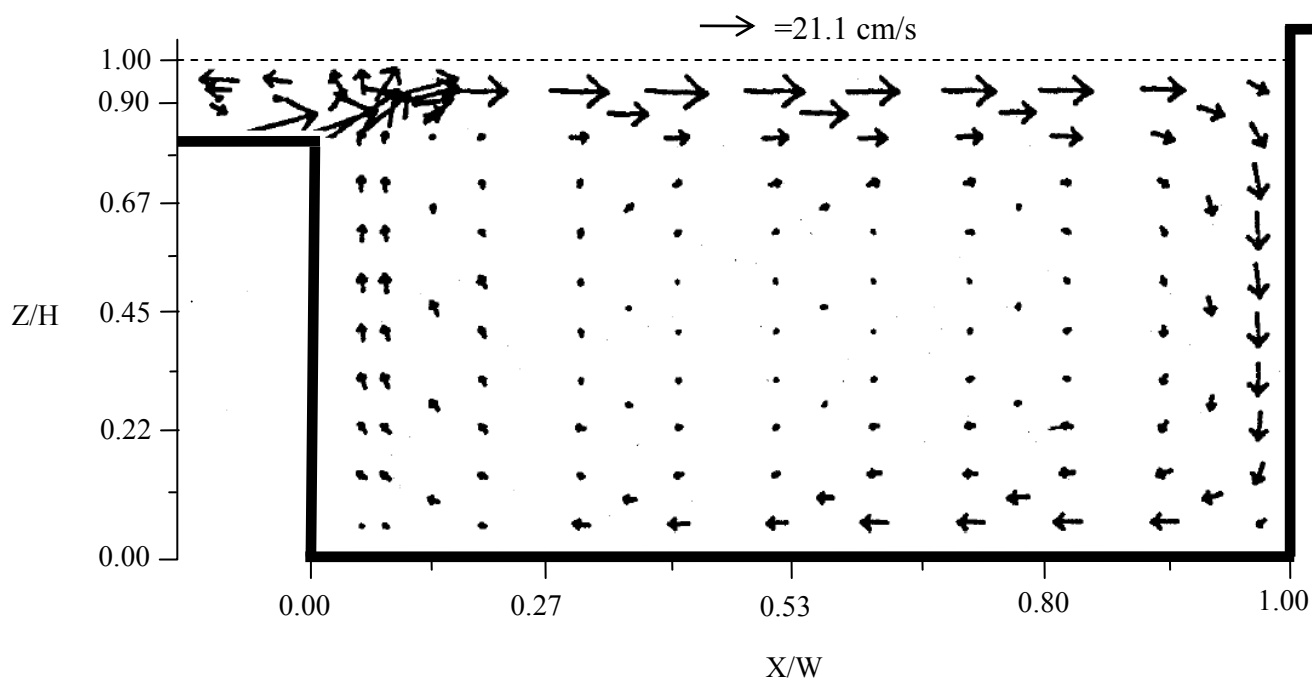
$$P = \text{Wetted perimeter} = b + 2h = 0.2125 + 2 \times 0.5525 = 1.3175m$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0.117}{1.3175} = 0.0888m$$

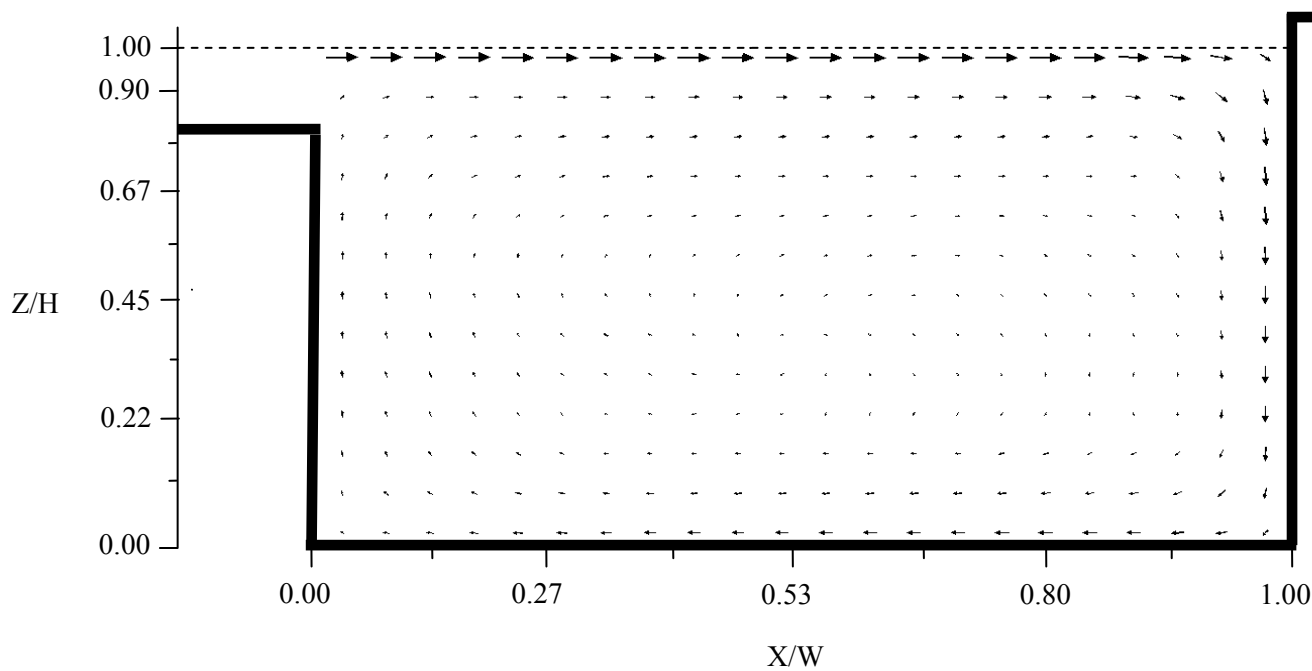
و در نهایت عدد رینولدز بر اساس فرمول زیر بدست می آید:

$$Re = \frac{VR}{\nu} = \frac{0.01 \times 0.0888}{1 \times 10^{-6}} = 888$$

که در آن ν برابر با لزجت سینماتیکی آب می باشد. مطالعات بروی کانال ها نشان داده است که اگر عدد رینولدز کمتر از ۵۰۰ باشد، جریان آرام و اگر عدد رینولدز بزرگتر از ۲۰۰۰ باشد جریان آشفته در کانال حاکم می باشد. برای اعداد رینولدز در محدوده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ جریان را انتقالی در نظر می گیرند. بنابراین در تانک تماسی امبسی در اکثر نقاط عدد رینولدز در محفظه ها بسیار پائین بوده و جریان از نوع آرام یا انتقالی می باشند و استفاده از شرایط جریان آرام در مدل‌سازی می تواند مد نظر قرار بگیرد. اما در قسمتهایی از تانک، سرعت ها از سرعت میانگین استفاده شده برای تعیین عدد رینولدز بیشتر بوده و در نتیجه عدد رینولدز در این نواحی بیشتر می باشند. در محاسبات، ویسکوزیته سینماتیکی آب برابر با $1 \times 10^{-6} m^2/s$ و شرط مرزی عدم لغزش در دیواره ها در نظر گرفته شده است. تقریب درپوش صلب بمنظور مدل‌سازی سطح آب در نظر گرفته شده است. اشکال (۵-۲۰) تا (۵-۲۷) نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود بار دیگر انطباق خوبی بین نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. همانطور که انتظار می رفت این نتایج صحت درستی استفاده از مدل جریان آرام را برای پیش بینی شرایط هیدرودینامیکی در مدل آزمایشگاهی تانک امبسی را نشان می دهد.

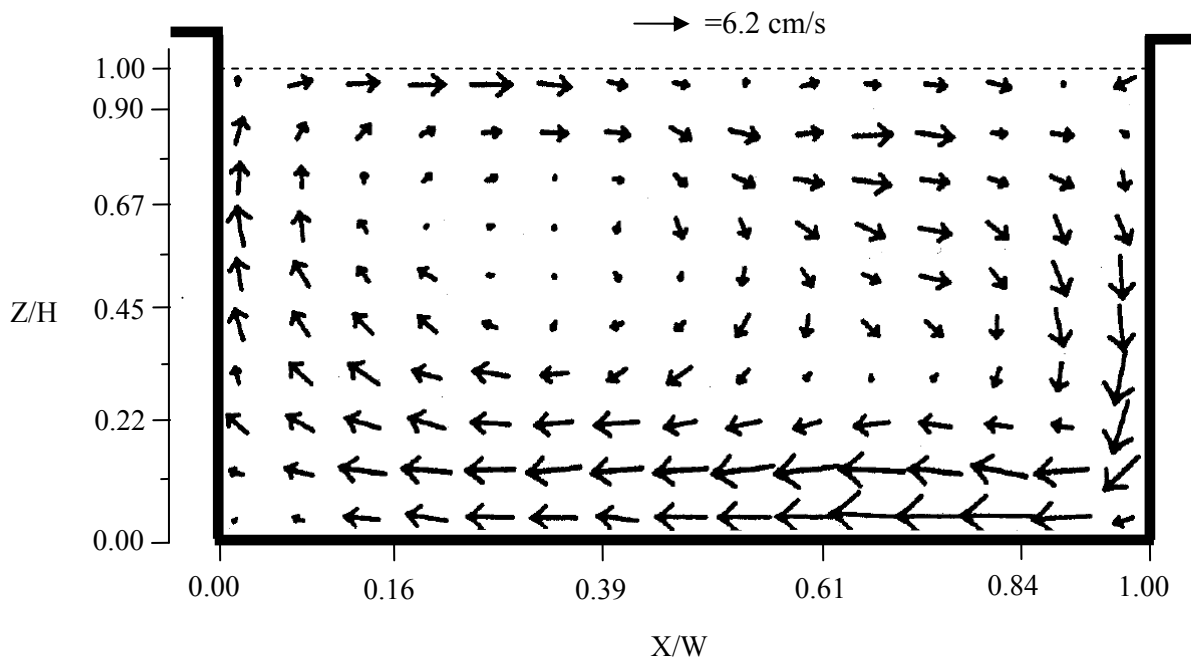


الف) نتایج آزمایشگاهی

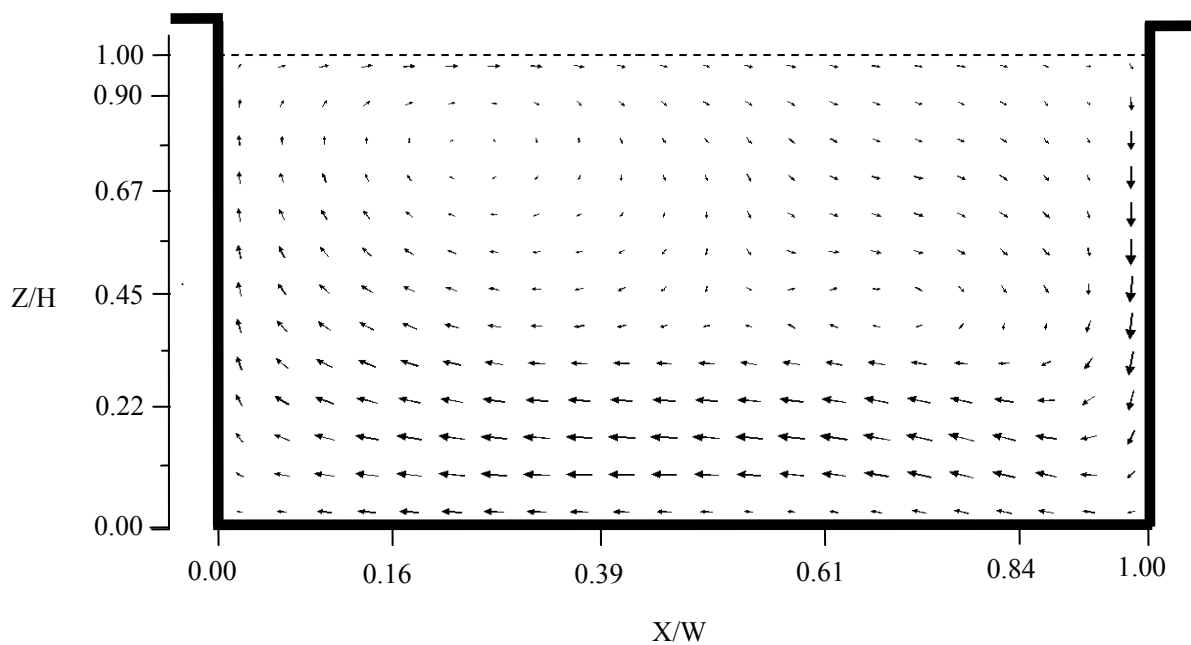


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۰ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۱

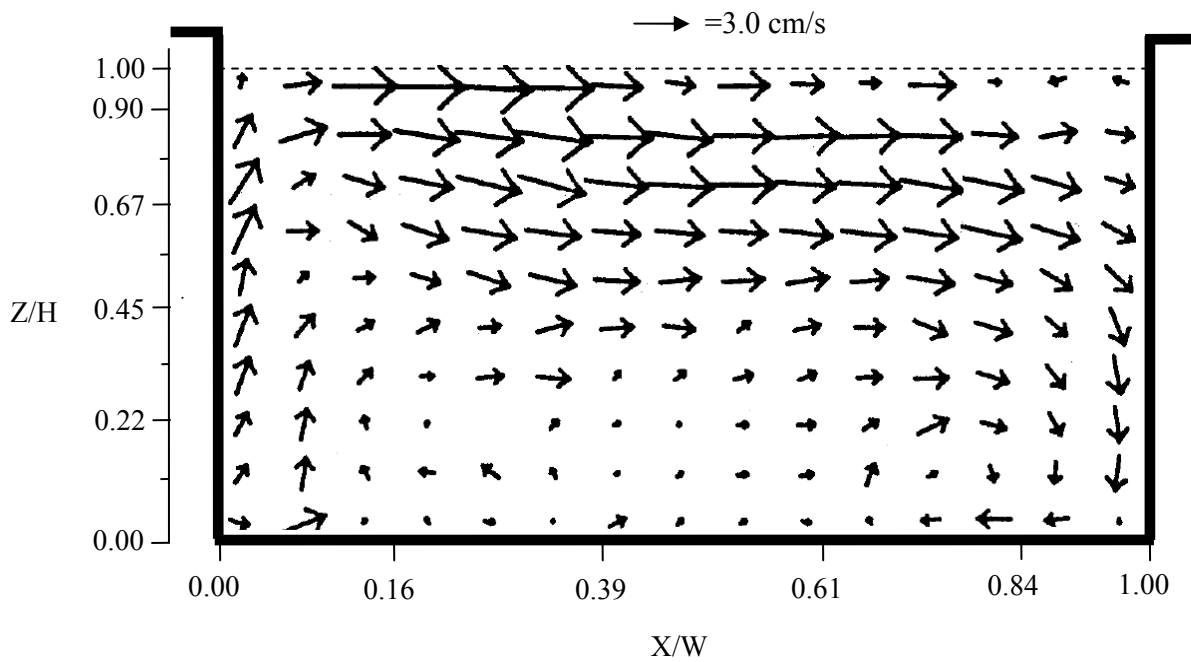


الف) نتایج آزمایشگاهی

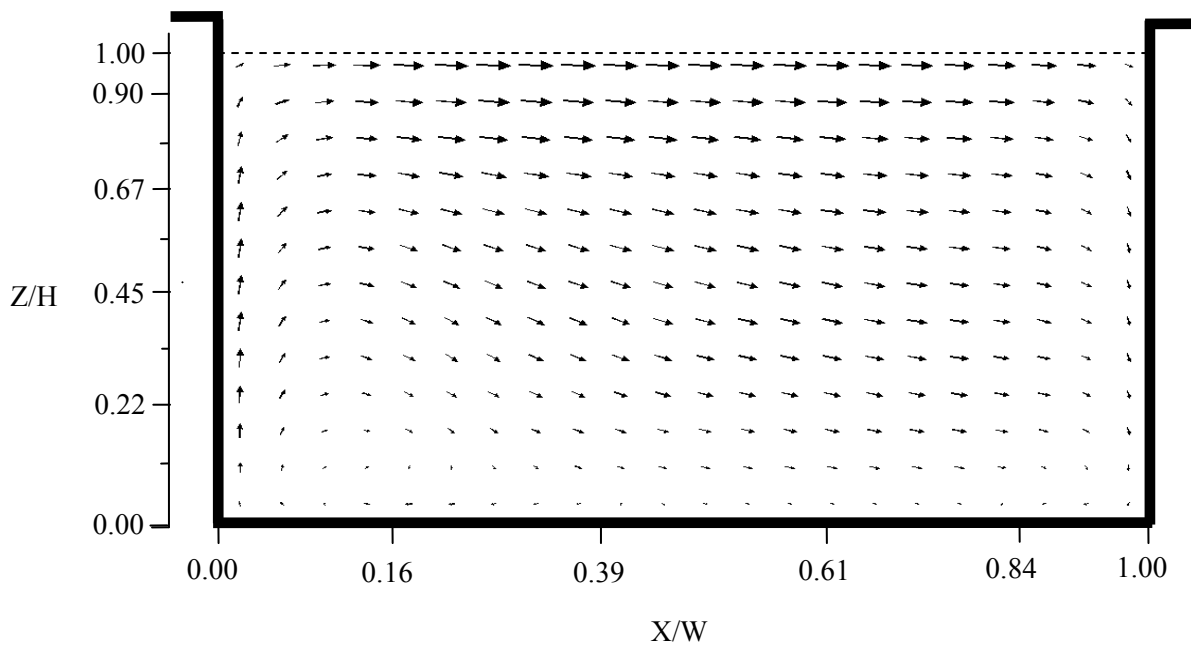


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۱ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۲

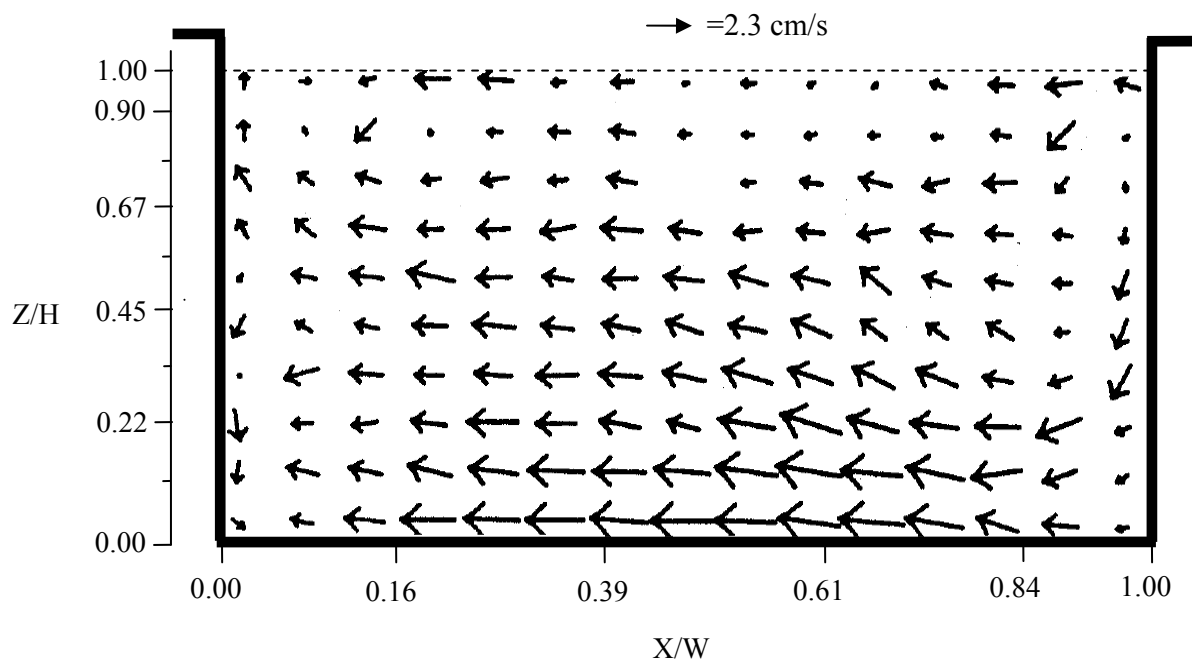


الف) نتایج آزمایشگاهی

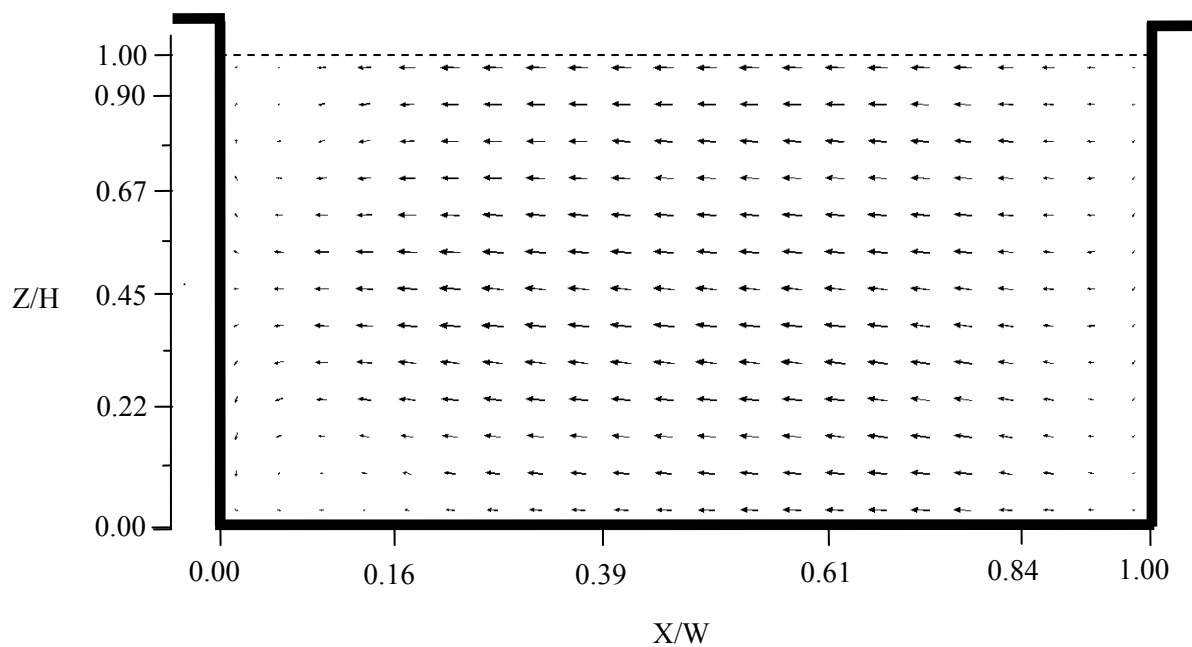


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۲ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۳

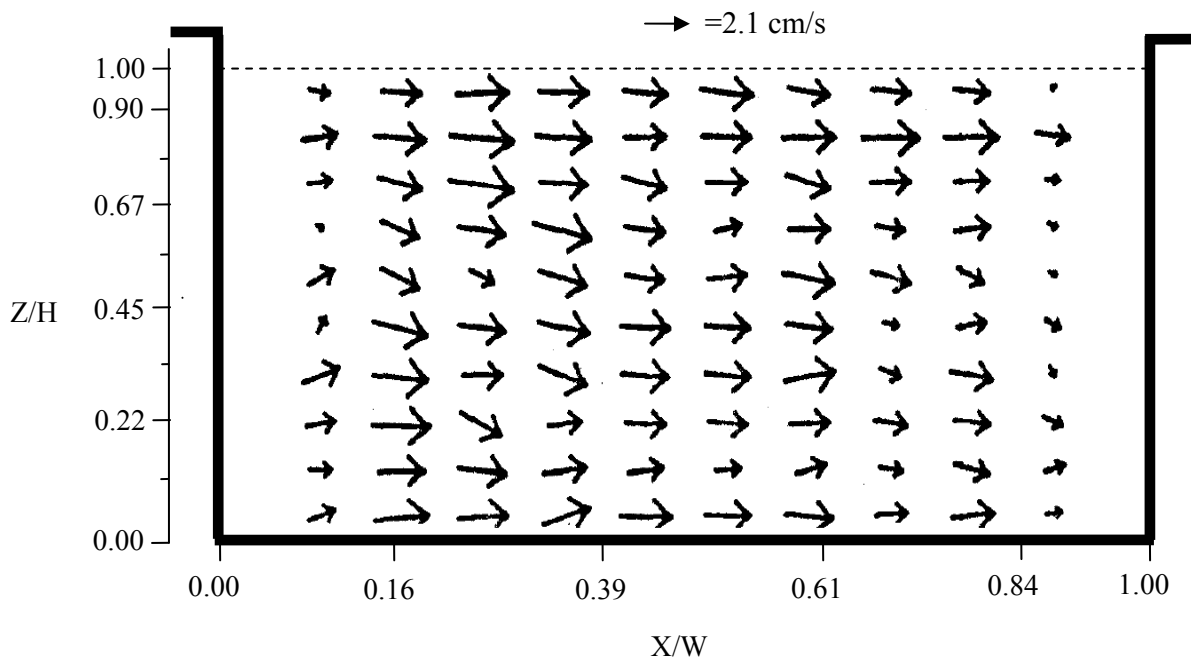


الف) نتایج آزمایشگاهی

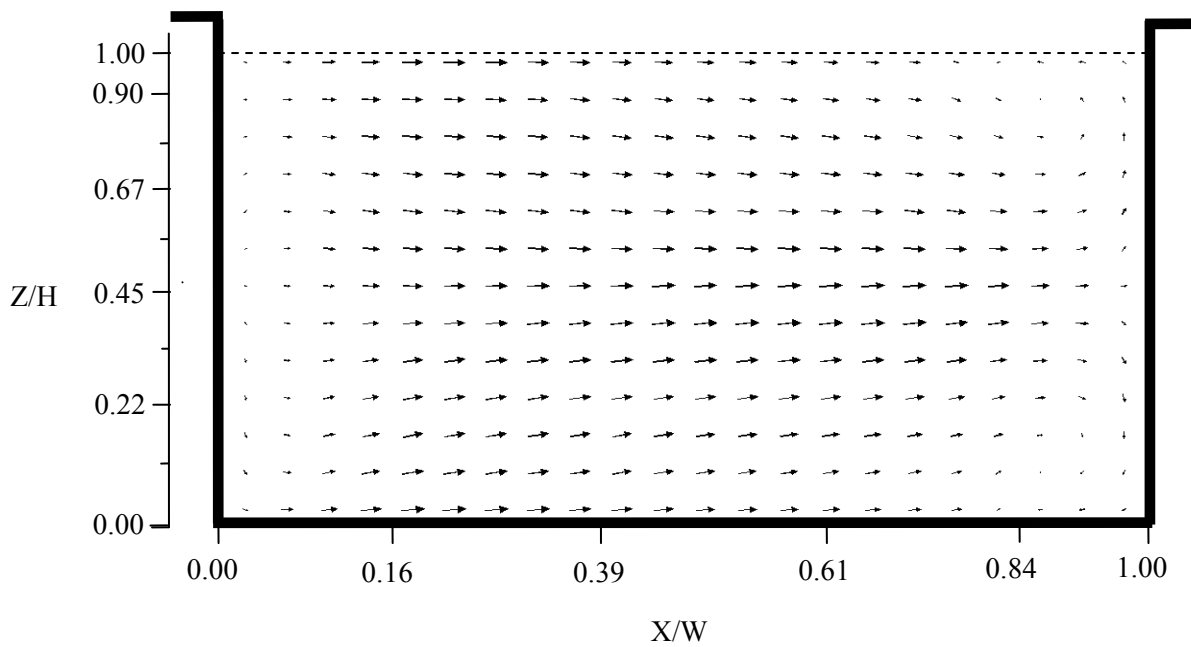


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۳ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۴

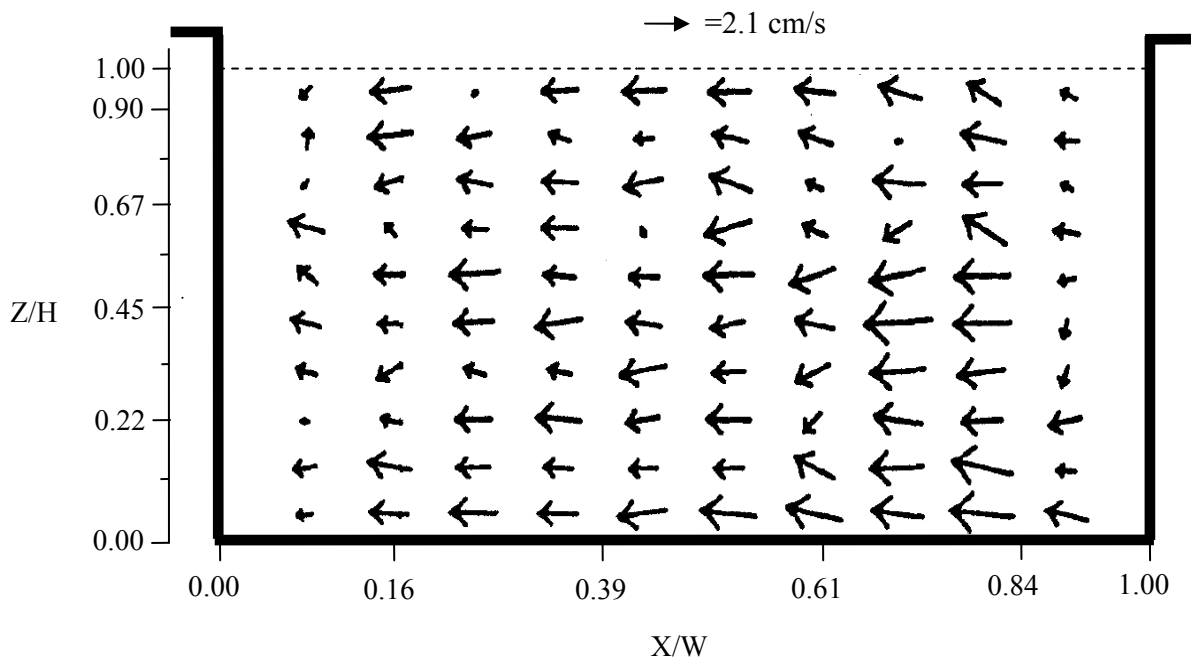


الف) نتایج آزمایشگاهی

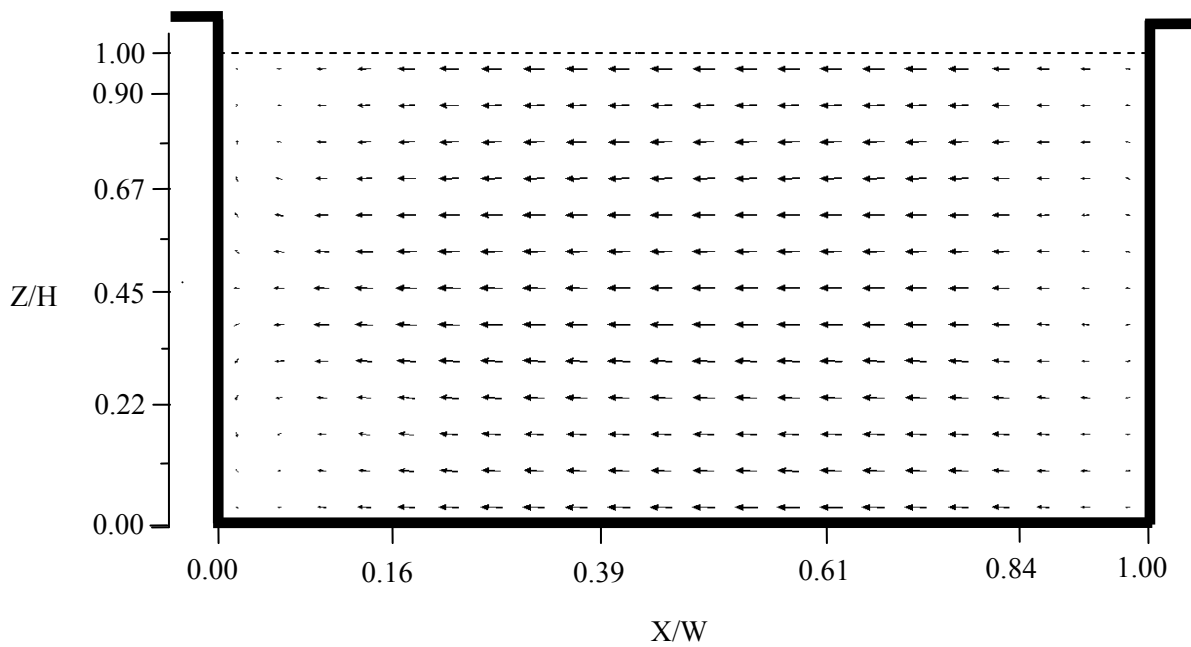


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۵

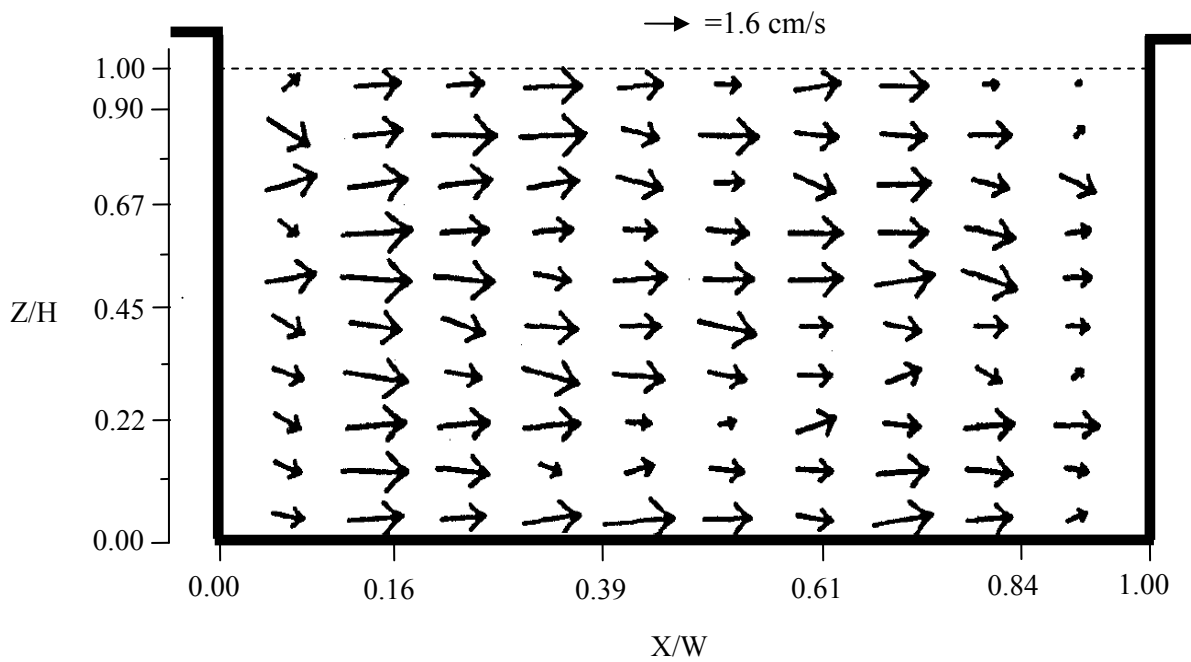


الف) نتایج آزمایشگاهی

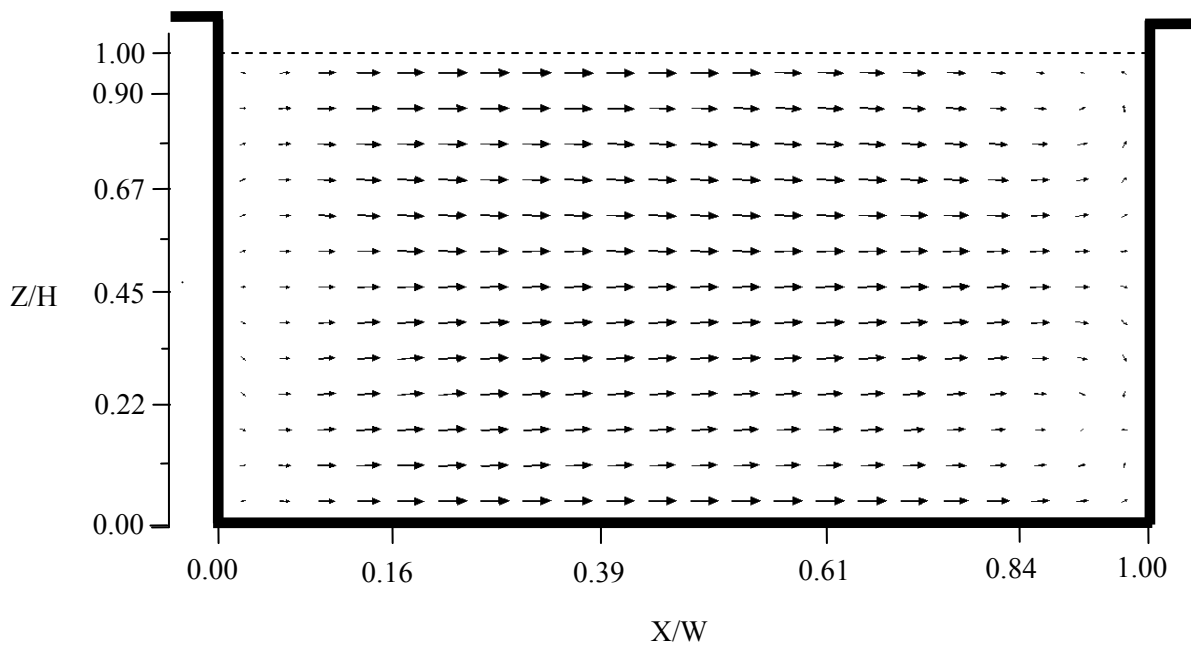


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۵ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۶

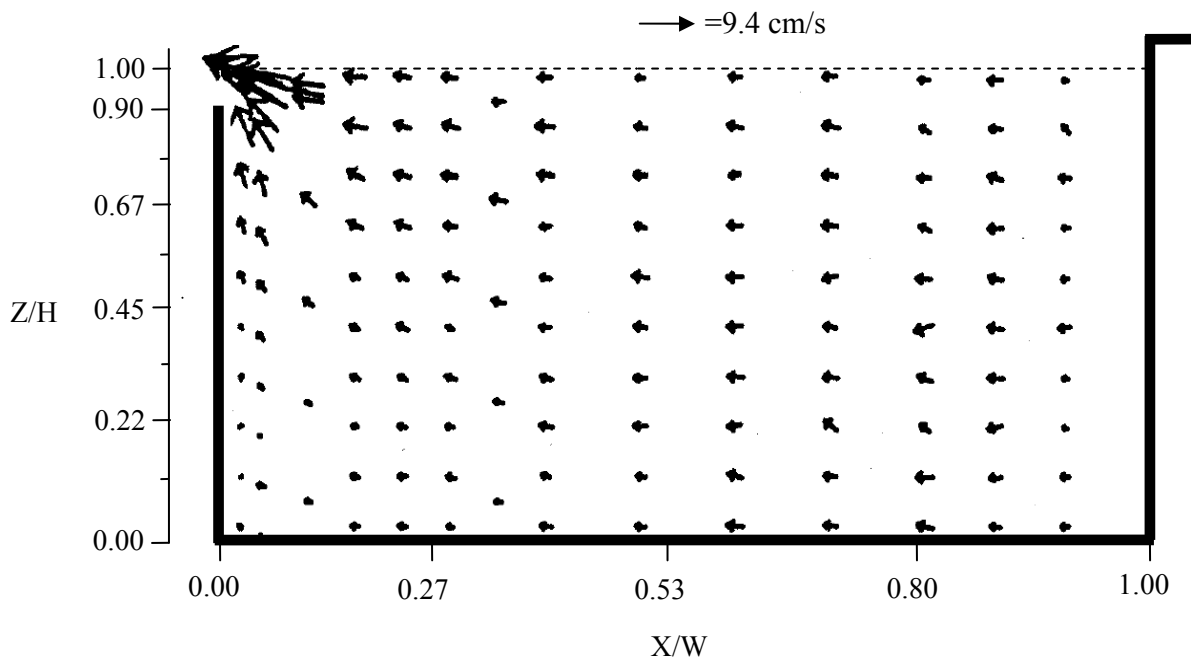


الف) نتایج آزمایشگاهی

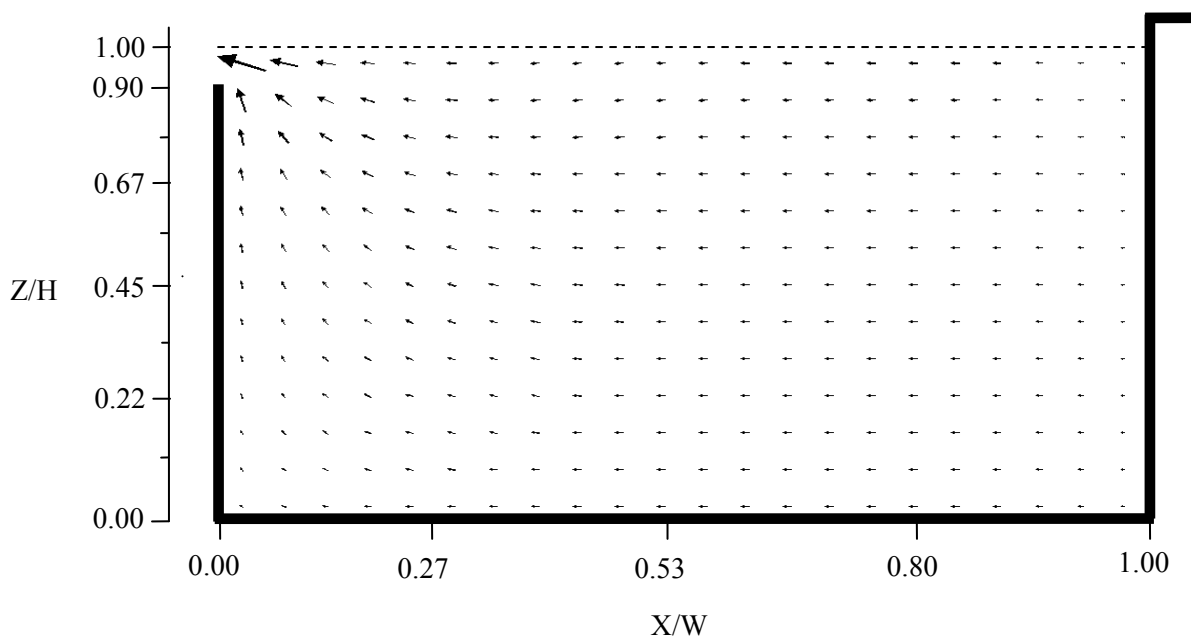


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۶ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۷



الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۷ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج عددی بدست آمده از مدل جریان آرام در محفظه ۸

۵-۲-۶- بررسی مدل در مقیاس واقعی

در بخشهای قبلی مشاهده گردید که آشفتگی در مطالعه مدل آزمایشگاهی از تانک امبسی مهم نبوده است و جریان آرام نیز نتایج قابل قبولی را از خود نشان داده است. بمنظور بررسی تاثیر آشفتگی در مقیاس اصلی تانک، آنالیز عددی در مقیاس واقعی تانک صورت گرفته است. روند مدلسازی همانند شرایط اشاره شده در مدل k-ε برای مقیاس آزمایشگاهی می باشند. مدل آزمایشگاهی بر اساس مقیاس ۱:۸ از مدل واقعی آن ساخته شده است که در نتیجه ابعاد تانک واقعی هشت برابر بزرگتر از مدل آزمایشگاهی آن می باشند. بنابراین در مدل واقعی $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.34m$ می باشند. همچنین طراحی مدل آزمایشگاهی بر اساس عدد فرود بوده است و سرعتها در مقیاس واقعی بصورت زیر قابل تعیین می باشند.

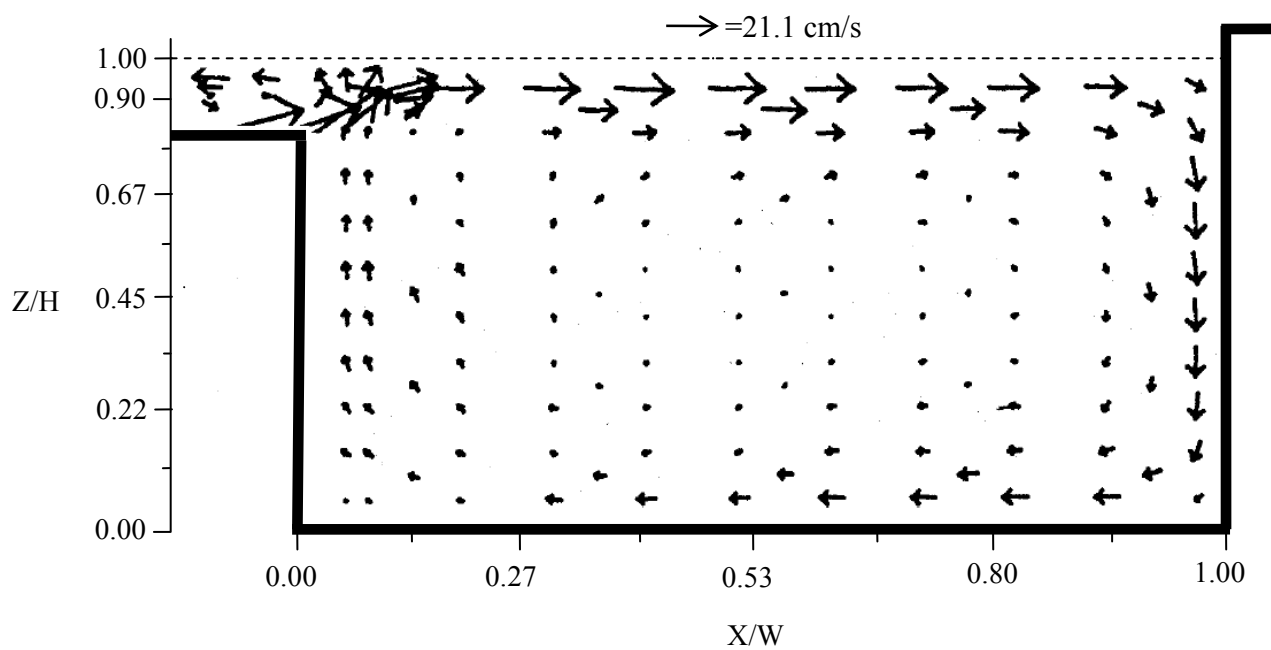
$$Fr_{lab} = Fr_{pro} \rightarrow \frac{u_{lab}}{\sqrt{gD_{lab}}} = \frac{u_{pro}}{\sqrt{gD_{pro}}} \rightarrow \frac{u_{pro}}{u_{lab}} = \sqrt{\frac{D_{pro}}{D_{lab}}} = \sqrt{8}$$

که در آن اندیسهای lab بمعنای آزمایشگاهی و pro بمعنای مقیاس واقعی می باشند. بنابراین سرعتهای ورودی با مقیاس $\sqrt{8}$ بزرگتر می گردند. افزایش اندازه تانک امکان افزایش گام زمانی را می دهد. اما بعلا وجود ترمهای انتقالی می بایست اطمینان حاصل پیدا کرد که عدد کورانت بمنظور پایداری حل کمتر از یک باقی بماند. با افزایش هشت برابری اندازه ها و افزایش $\sqrt{8}$ برابری سرعتها، گام زمانی نیز بصورت زیر بدست می آید.

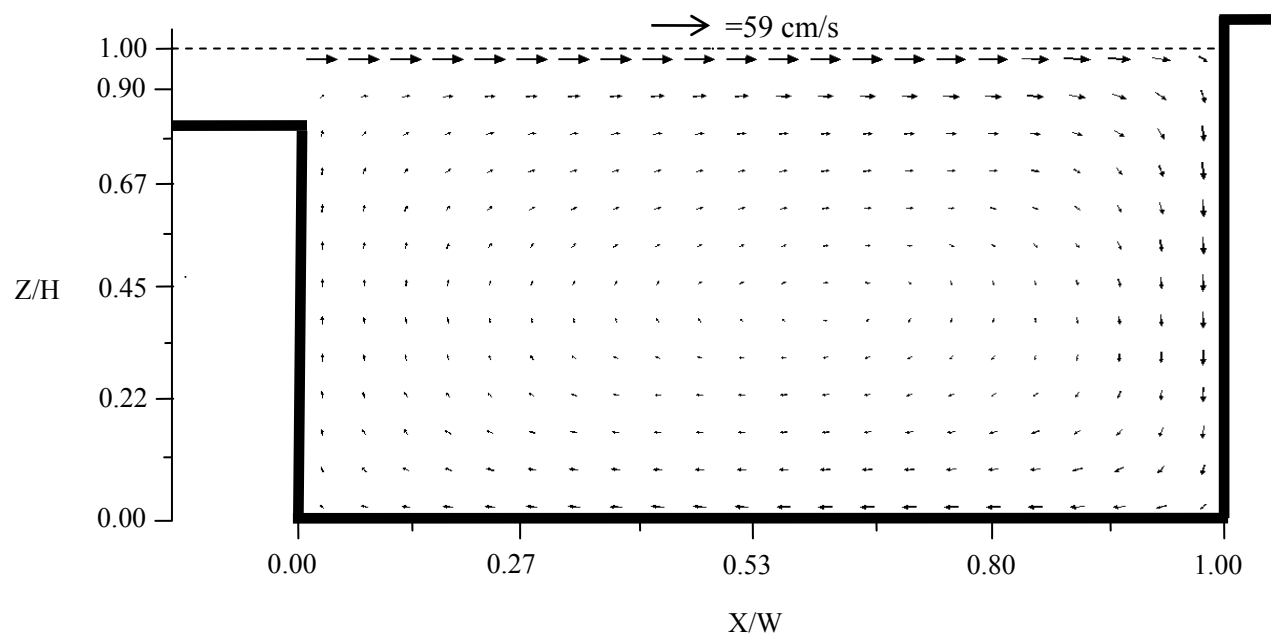
$$\left(\frac{u\Delta t}{\Delta x}\right)_{lab} = \left(\frac{u\Delta t}{\Delta x}\right)_{pro} \rightarrow \frac{\Delta t_{pro}}{\Delta t_{lab}} = \frac{u_{lab}\Delta x_{pro}}{u_{pro}\Delta x_{lab}} = \sqrt{8}$$

اشکال (۵-۲۸) و (۵-۲۹) مقایسه نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند. بمنظور اختصار نتایج را فقط برای محفظه های ۱ و ۲ که در آن آشفتگی بطور خاص مهم می باشند نشان داده ایم. برای بقیه محفظه ها نتایج شبیه نتایج قسمت های قبل می باشد و بنابراین برای اختصار نشان داده نشده اند. صورت تعیین شده است. همانطور که مشاهده می گردد میدان سرعت از انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی برخوردار می باشند. این نتایج می تواند بیانگر این موضوع باشد که مقیاس آزمایشگاهی می تواند فرآیند هیدرولیکی موجود در تانک را نشان دهد و عمل مقیاس کردن تاثیر چندانی در دقت نتایج نمی گذارد. یکی از دلایل عمده پیش بینی مناسب مدل آزمایشگاهی تانک را می توان این طور بیان نمود که مقیاس بکار برده شده در آزمایشگاه نسبتاً بزرگ بوده است بطوریکه مدلسازی در این مقیاس می تواند بیانگر خصوصیات اصلی تانک باشد. اگرچه مدلسازی آشفتگی نشان داده است که لزجت آشفتگی در مقیاس با مدل آزمایشگاهی افزایش یافته است اما نیروهای لزج در مقیاس با نیروهای ثقل یا اینرسی از اهمیت چندانی برخوردار نمی باشند بدلیل آنکه اثرات آنها در نتایج گرافیکی بدست آمده کم بوده است.

شکل (۳۰-۵) توزیع لزجت آسفنگی در محفظه های مختلف تانک را نشان می دهند. در مقایسه با نتایج شکل (۱۲-۵) لزجت آسفنگی افزایش تقریباً ۱۷ برابری داشته است.

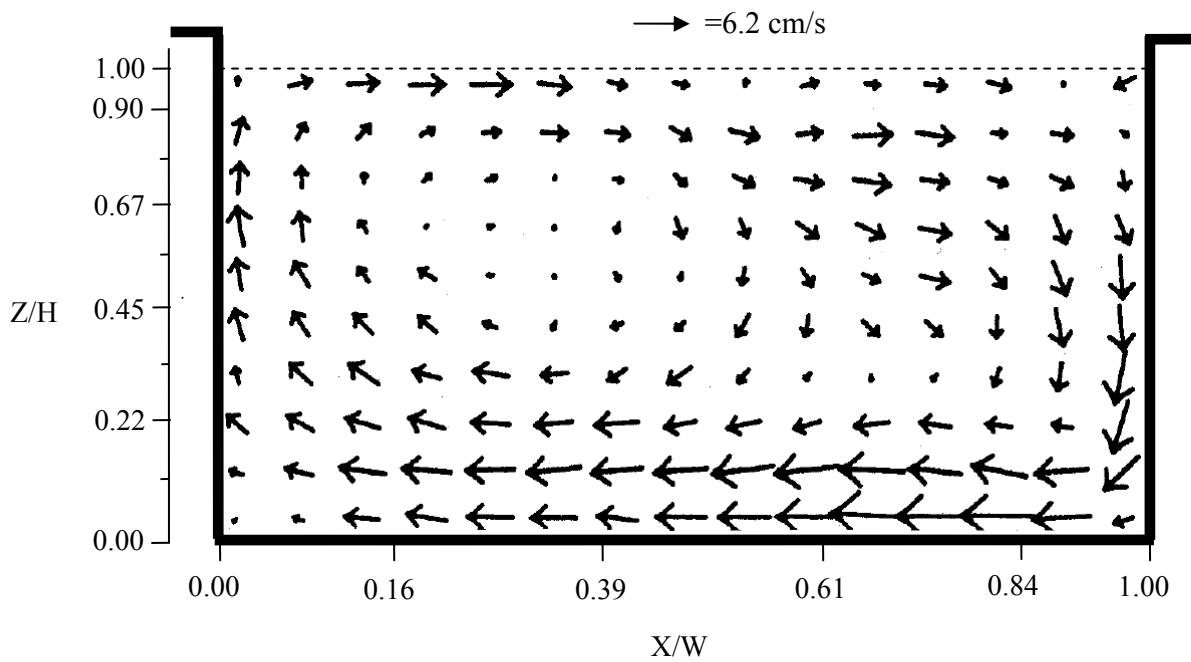


الف) نتایج آزمایشگاهی

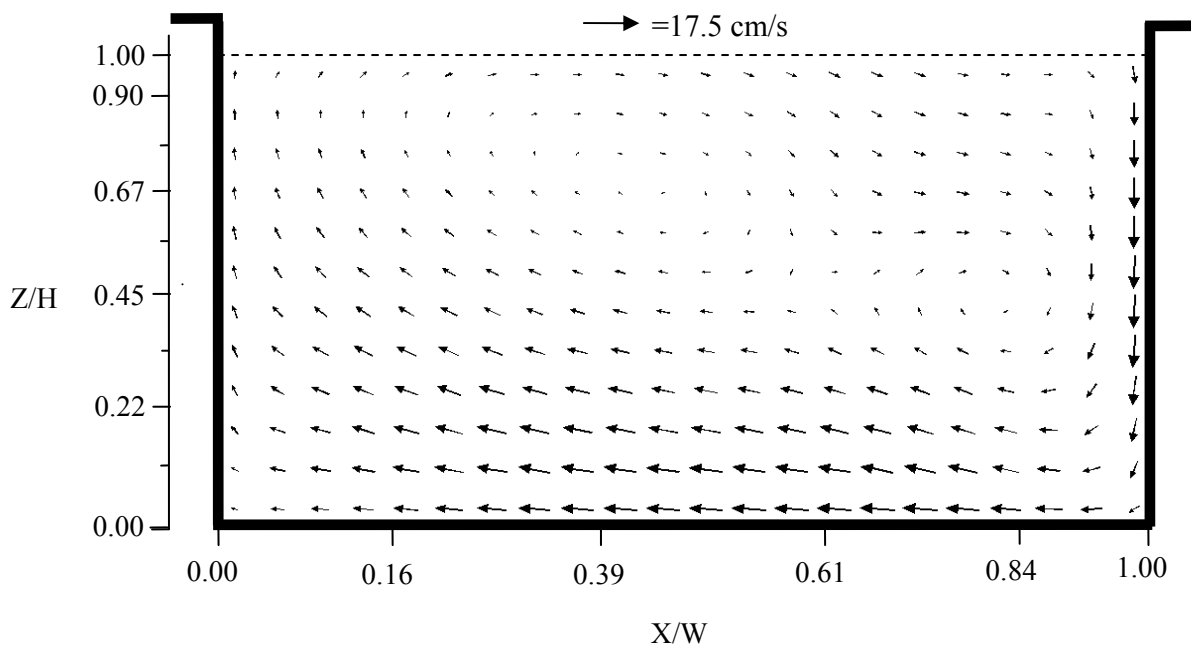


ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۸ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از مدل عددی بر اساس مقیاس واقعی در محفظه ۱

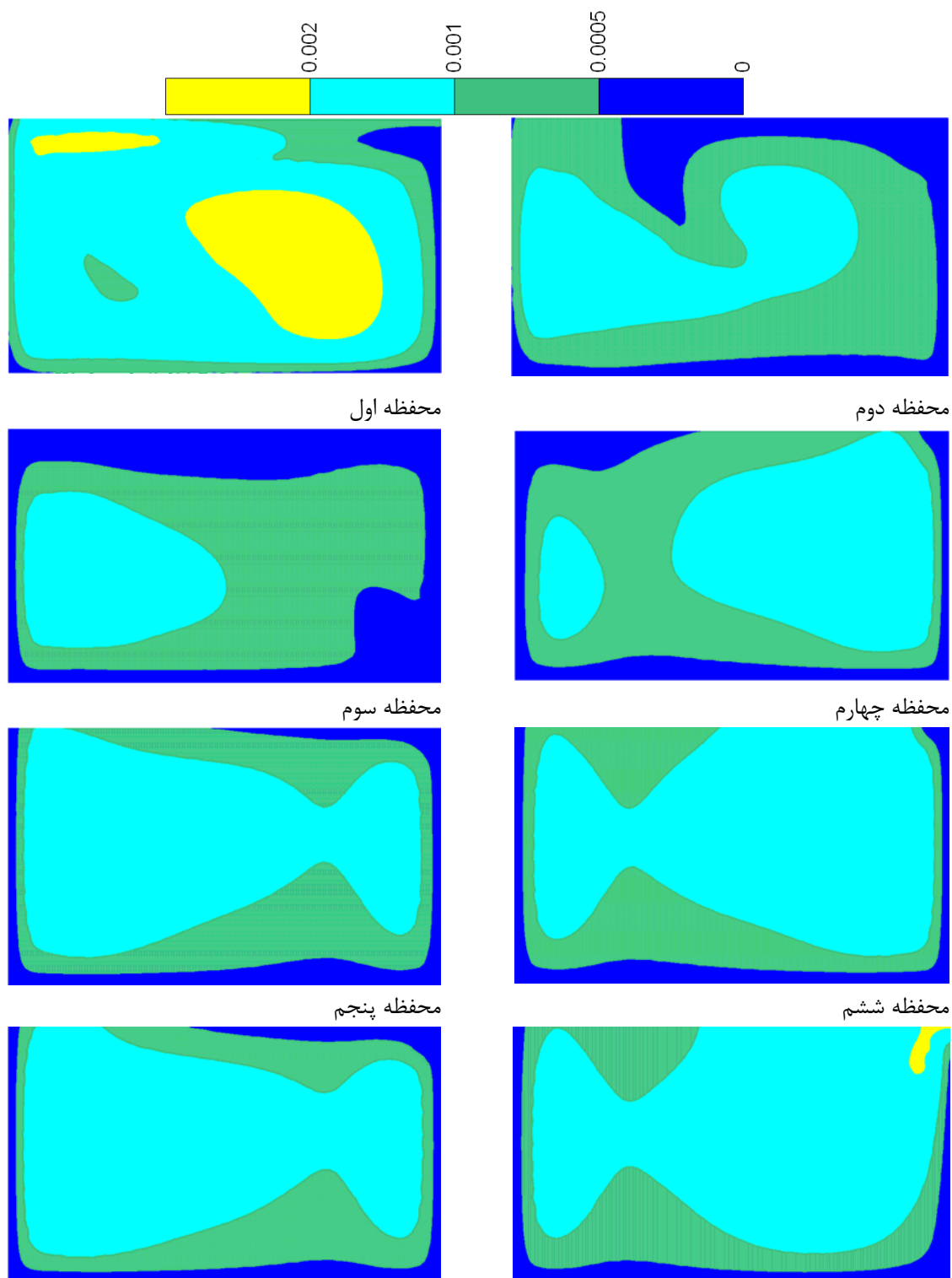


الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۵-۲۹ مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از مدل عددی بر اساس مقیاس واقعی در محفظه ۲



شکل ۵-۳۰ توزیع لزجت آشفته در تانک تماسی با مقیاس واقعی

۵-۲-۷- مدل‌سازی حمل ردیاب در مدل تانک امبسی

مهمترین هدف تانک های تماسی ضد عفونی کردن آب به طرز موثر و کارا می باشد. همانطور که در فصل اول اشاره شد بهترین نوع طراحی از یک تانک تماسی ایجاد شرایطی می باشد که جریان آب در آن در حالت جریان شاخه ای قرار بگیرد. این بدان معنی می باشد که بطور ایده آل تمام ذرات دارای زمان حضور مشابه در داخل تانک می باشند. ساختار جریان ایده آل به شکلی است که در یک سطح مقطع تمام سرعتها مساوی و موازی می باشند. بمنظور بررسی طراحی هیدرولیکی از یک تانک تماسی و کارآمدی آن، ابتدا نیاز به بررسی رفتار یک ردگیر بقائی در تانک تماسی می باشیم. در این بخش مدل‌سازی یک ردگیر بقائی در تانک تماسی را مورد بررسی قرار داده و نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مشابه که توسط تگزیرا^۵ [۱۱] بدست آمد، مورد مقایسه قرار می دهیم. بمنظور مدل‌سازی حمل بقائی در تانک از معادله زیر که در فصل سوم معرفی گردید استفاده می کنیم:

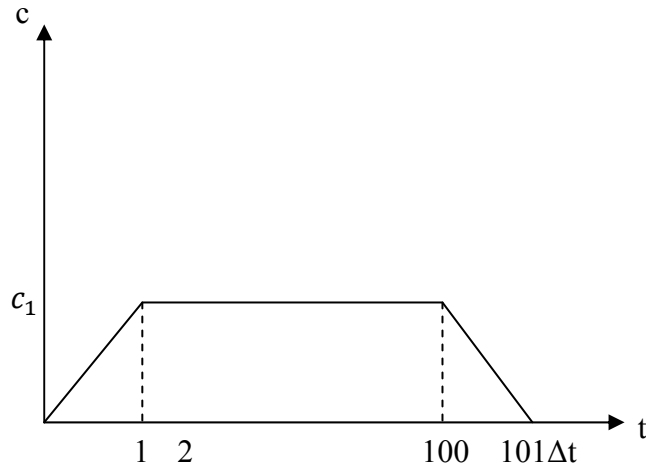
$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] + S_c \quad ۳۵-۳$$

که در آن c برابر با غلظت یک ردگیر بقائی و u, v, w مولفه های سرعت در جهات x, y, z می باشند. D برابر است با پراکندگی طولی و ضریب پخش آشفتگی می باشد. در مطالعات آزمایشگاهی مدل تغییرات غلظت ردگیر نسبت به زمان را در یک نقطه اندازه گیری کردند که اندازه گیری بر اساس تزریق لحظه ای ۵ میلی گرم از رودامین-ب^۶ به کانال تقرب انجام پذیرفت. این میزان از رنگ باعث ایجاد غلظت میانگین C_0 برابر با $5.69 \times 10^{-3} \text{ mg/l}$ در تانک تماسی می گردد که C_0 در آن برابر با جرم تزریق شده ردگیر در واحد حجم تانک می باشد. در مدل‌سازی عددی غلظت اولیه مشابهی در ورودی در نظر گرفته شد که بدان معنی می باشد که ۵ میلی گرم از ردگیر را در یک بازه زمانی تقریباً برابر با ۱۰ ثانیه به مدل تانک امبسی اضافه نمودیم. گام زمانی را برابر با ۰/۱ ثانیه در نظر گرفتیم در نتیجه ردگیر در ۱۰۰ گام زمانی به مدل اضافه گردید. استفاده از روش مرحله ای افزودن رنگ به دو دلیل می باشد: اولاً افزودن آنی تمام رنگ به تانک باعث ایجاد مشکلاتی در پایداری حل عددی می گردد ثانیاً در مدل آزمایشگاهی هم رنگ بطور آنی به مدل اضافه نگردید. شکل ۵-۳۱ روش افزودن غلظت به تانک را نشان می دهد. مساحت زیر نمودار شکل برابر است با:

$$A = 99\Delta t. c_1 + 2 \frac{\Delta t. c_1}{2} = 100\Delta t. c_1$$

⁵ Teixeira

⁶ Rhodamine-B



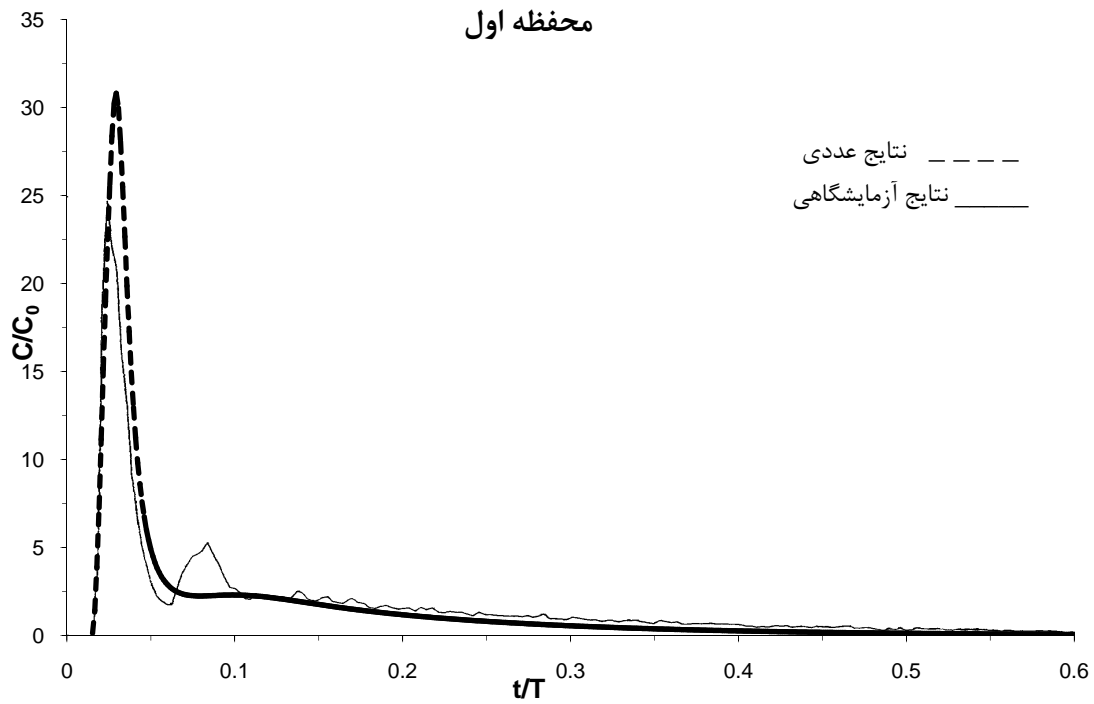
شکل ۵-۳۱ معرفی نحوه تزریق غلظت در ورودی مدل عددی از تانک تماسی

اگر سرعت را در محل تزریق برابر با u و مساحت عمودی محصور به u را $\Delta z \Delta y$ در نظر بگیریم، آنگاه دبی عبوری در این نقطه برابر با $u \Delta z \Delta y$ می شود اگر دبی بدست آمده را در مساحت زیر نمودار شکل فوق ضرب نمائیم آنگاه مقدار کلی ردگیر اضافه شده به مدل برابر است با:

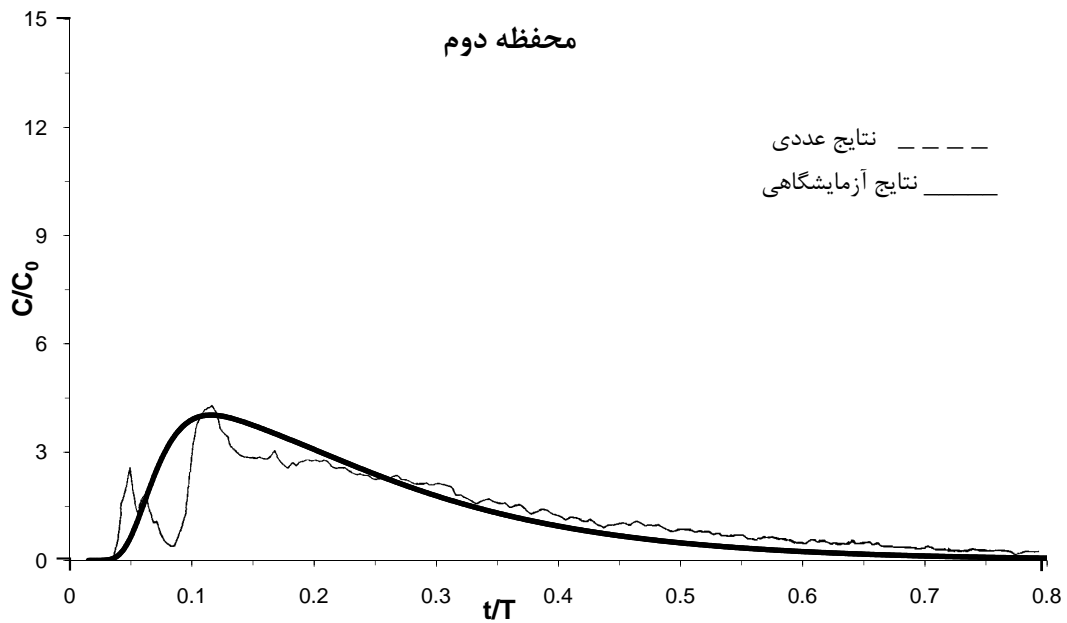
$$(u \Delta z \Delta y) \times (100 \Delta t \cdot c_1) = 5mg \rightarrow c_1 = \frac{1}{20(u \Delta z \Delta y \Delta t)}$$

بنابراین غلظت c_1 در قسمت میانی مقطع ورودی از تانک امبسی برای ۱۰۰ گام زمانی مشخص گردیده و برای مابقی مدت زمان شبیه سازی مقدار غلظت در مقطع ورودی برابر با صفر تعیین گردید. برای شرایط مرزی در دیوارها، سطح آب و خروجی عبارت $\partial c / \partial y$ در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ - پخش در معادله ۳-۳۵ برابر $0.0015 m^2/s$ در نظر گرفته شده است. اشکال (۵-۳۲) تا (۵-۳۹) منحنی های FTC بدست آمده از روش عددی را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می دهند. همانطوری که مشاهده می شود انطباق قابل قبولی بین نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی وجود دارد. در محفظه های ۴، ۵، ۶، ۷ یک سری تفاوت های جزئی وجود دارد. عوامل زیر می تواند دلایل عدم انطباق کامل نتایج آزمایشگاهی و عددی باشد.

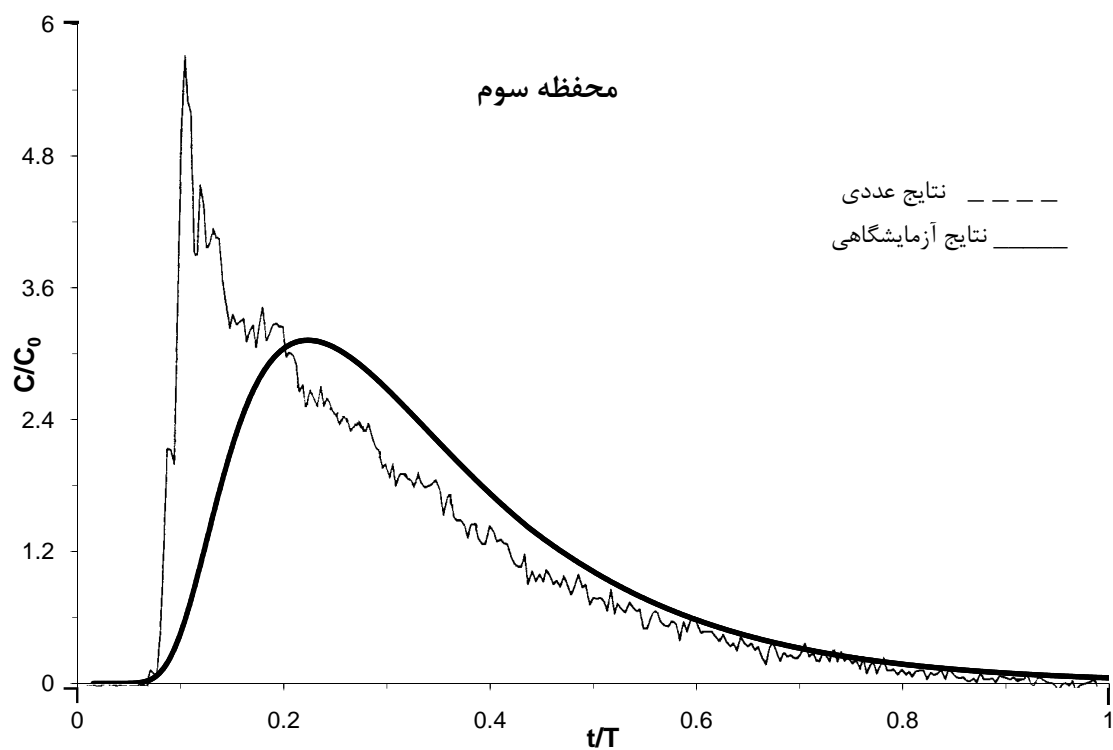
۱. غلظت در مدل آزمایشگاهی در یک نقطه اندازه گیری شد اما در مدل عددی هر غلظت برابر است با میانگین غلظت در یک سلول.
۲. در واقعیت ضرایب نفوذ-پخش در تانک تغییر می نماید که در محاسبات عددی در نظر گرفته نشد.
۳. در اندازه گیریهای آزمایشگاهی نیز خطا وجود دارد.



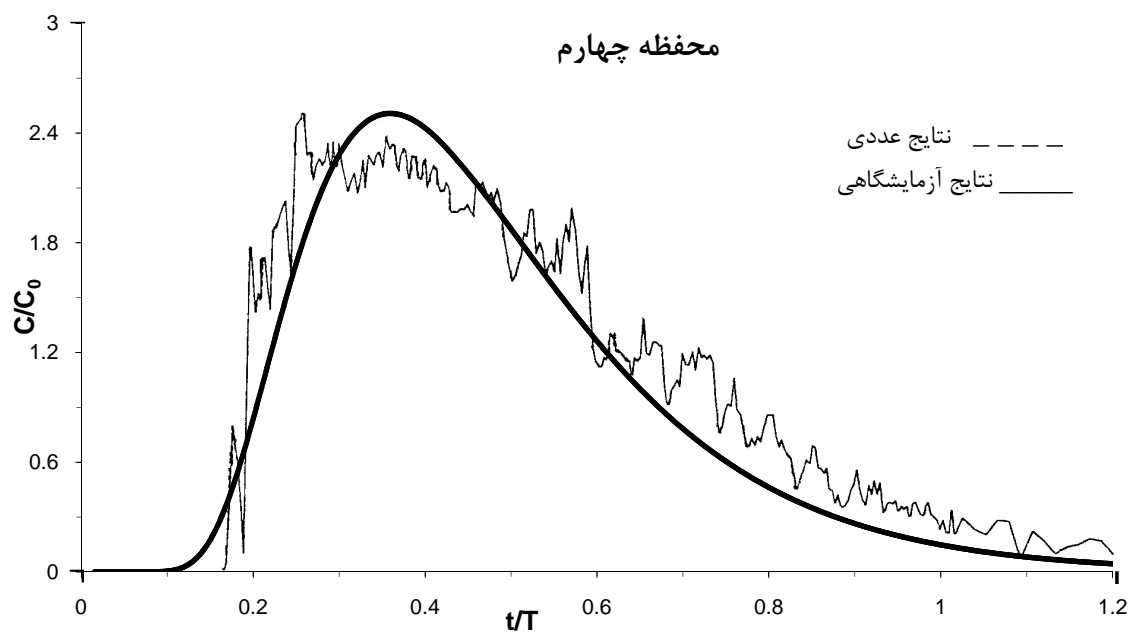
شکل ۳۲-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۱



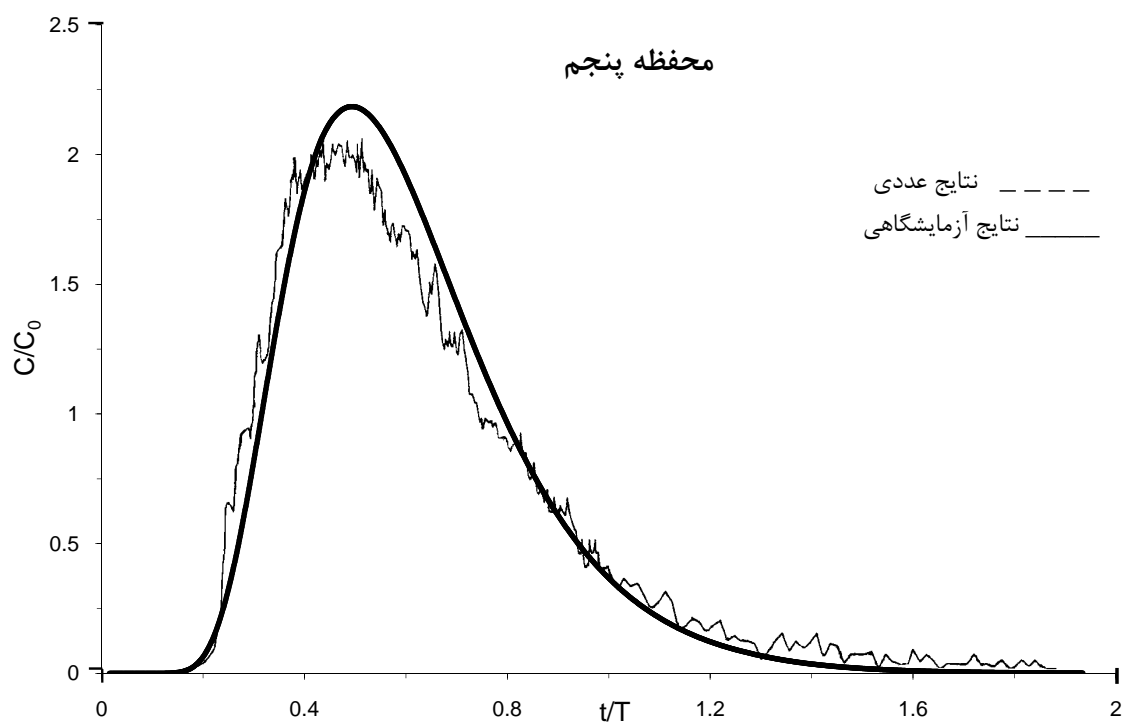
شکل ۳۳-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۲



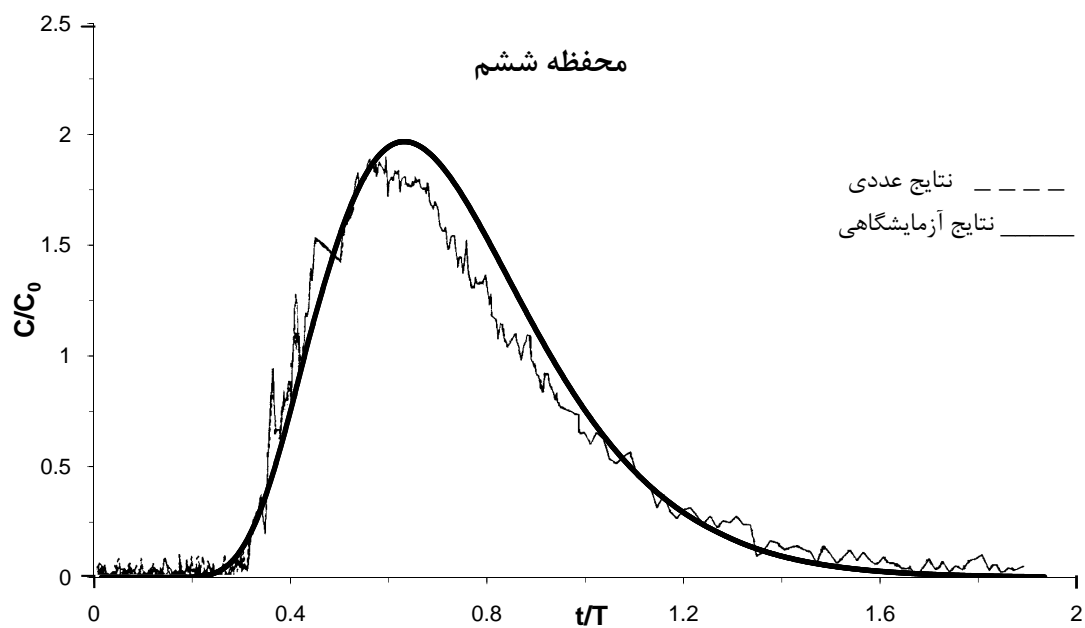
شکل ۳۴-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۳



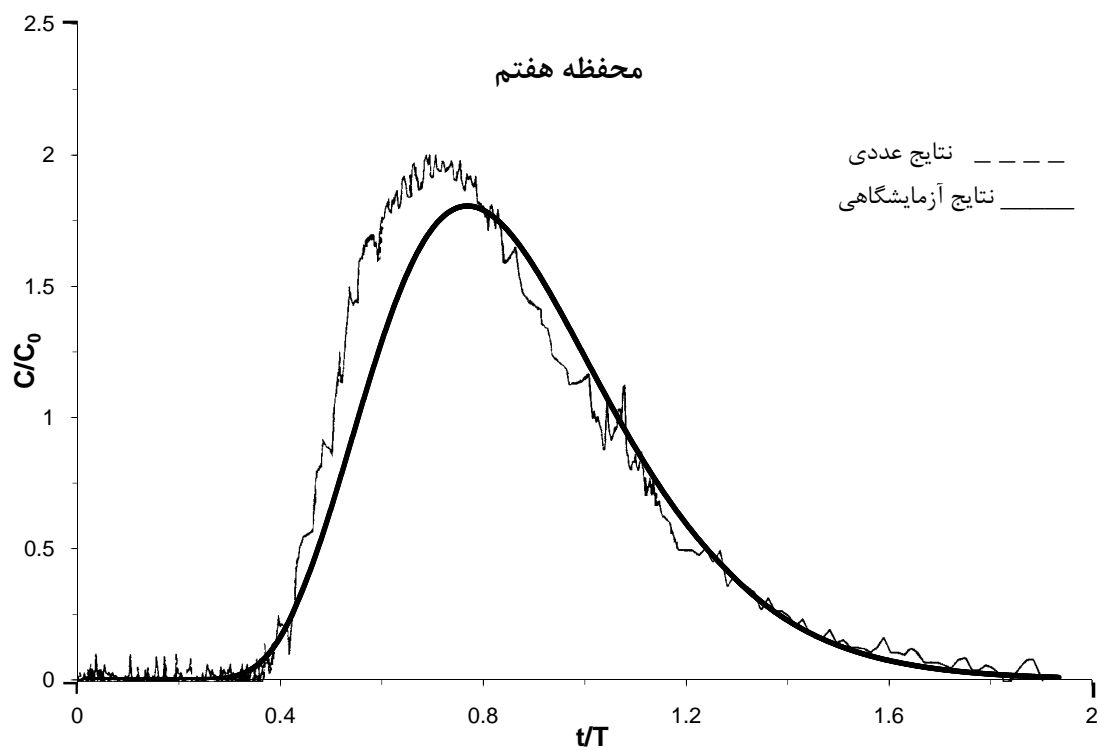
شکل ۳۵-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۴



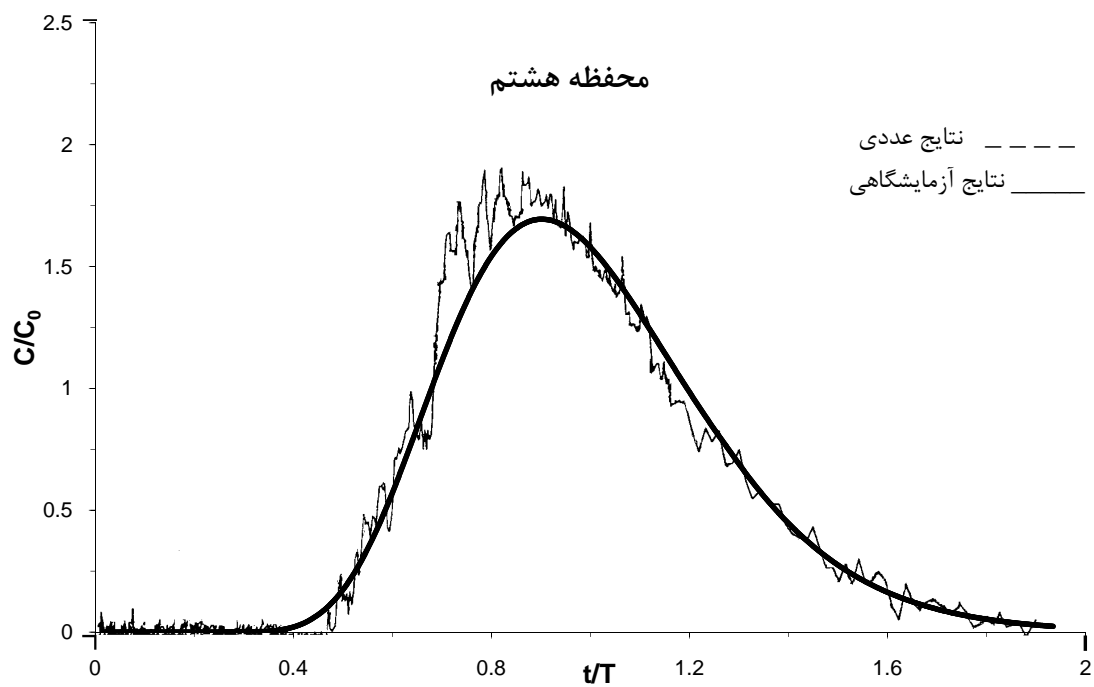
شکل ۵-۳۶ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۵



شکل ۵-۳۷ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۶



شکل ۳۸-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۷



شکل ۳۹-۵ منحنی بدست آمده از نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی محفظه ۸

۵-۳- بررسی ساختارهای مختلف دیواره های داخلی در کارایی تانک تماسی امبسی

۵-۳-۱- مقدمه

در بخشهای قبل تانک تماسی امبسی بر اساس ساختار واقعی خود مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این قسمت کارایی تانک تماسی را بر اساس ترکیبات مختلف دیواره های داخلی مورد بررسی قرار می دهیم. هدف از این مطالعه تاثیر تعداد دیواره های داخلی در کارایی تانک تماسی می باشد و بیان این موضوع که با افزایش و یا کاهش تعداد دیواره ها، جریان به جریان پلاگ نزدیکتر می گردد و یا از آن دور می شود بمنظور تعیین کارایی هر یک از حالت های مذکور از نشانگرهای جریان که مهمترین خصوصیات منحنی FTC می باشند استفاده می گردد.

۵-۳-۲- فرآیند مدلسازی

در این بخش بمنظور مدلسازی حالت های مختلف تانک و محل قرار گیری دیواره ها و تعیین نقش آنها در کارایی تانک از نرم افزار محاسباتی فلوئنت استفاده شده است. در فصول قبل نرم افزار فلوئنت بطور مختصر معرفی گردید. جامع بودن برنامه فلوئنت لزوم دستورات زیادی را در برنامه ایجاد می کند. علیرغم وسعت زیاد دستورات، هنگامی که حل مسئله تانک تماسی مورد نظر باشد، باید مراحل زیر رعایت شود. [۴۵]

۱. تولید شکل (هندسه مسئله)
۲. شبکه بندی در نرم افزار های پیش پردازنده
۳. اجرای برنامه با توجه به هندسه (دو بعدی یا سه بعدی)
۴. انتقال شبکه از پیش پردازنده به نرم افزار محاسبه گر
۵. بررسی شبکه تولید شده
۶. انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل
۷. انتخاب معادلات اساسی که باید حل شوند مثل آرام یا متلاطم (یا لزج)، واکنشها با ترکیب شیمیایی و غیره،
۸. تعیین خواص
۹. تعیین شرایط مرزی
۱۰. تنظیم کردن پارامترهای کنترل کننده حل
۱۱. مقدار دهی اولیه به میدان جریان
۱۲. شروع کردن محاسبات
۱۳. امتحان نتایج محاسبات
۱۴. ذخیره نتایج

۱۵. بهینه سازی شبکه، حل و مدل فیزیکی (اگر نیاز باشد)

مرحله اول و دوم از فرآیند حل، احتیاج به تولید کننده هندسه و شبکه دارد. می توان از نرم افزار پیش پردازنده GAMBIT یا یکی از نرم افزار های گروه CAD/CAE برای تولید هندسه و شبکه استفاده کرد. فرآیند مدلسازی در نرم افزار GAMBIT به دو صورت می باشد:

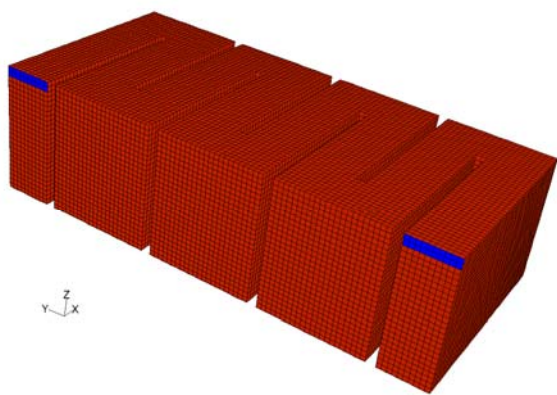
الف) مستقیم (با تعریف گره ها و المانها)

ب) هندسی (با تعریف کل جسم در ابتدا و سپس شبکه بندی آن)

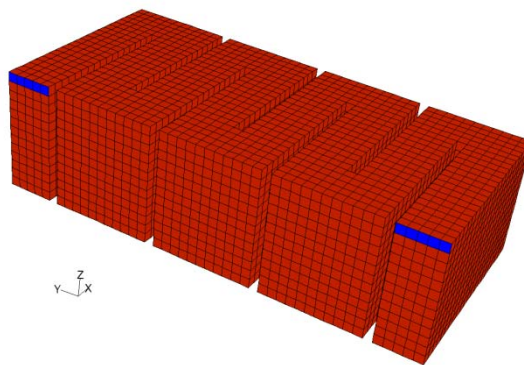
که هر دو پردازشگر هم بصورت گرافیکی و هم بصورت عددی قادر به ارائه خروجی می باشند. این نرم افزار دارای یک زبان مخصوص برای برنامه نویسی (Journal file) در حل مدل های خاص و وارد کردن تغییرات دلخواه در برخی موارد می باشد (این زبان برنامه نویسی جدا از خود نرم افزار GAMBIT می باشد) و این امکان را می دهد که مدل خود را بصورت پارامتریک (با متغیرها) بسازیم که این به نوبه خود باعث تغییرات آسان در طراحی و انعطاف بیشتر کار می شود که در مدل سازی تانک تماسی از آن استفاده شده است. (پیوست الف) همچنین نرم افزار فلونت با دارا بودن قابلیت توابع معرفی شده توسط کاربر^۷ امکان استفاده از کدهای نوشته شده و ارتباط آن با فلونت را فراهم می سازد. UDF به زبان C نوشته شده است و با آشنایی به زبان C می توان از آن استفاده نمود. در این تحقیق با توجه به شرایط مسئله از این قابلیت استفاده شده و شرایط اولیه موجود در تزریق ردگیر را که تابعی از زمان می باشد در آن نوشته شده است. در این تحقیق بمنظور اختصار، از ذکر معادلات حاکم و نحوه بکار گیری آن در فلونت و نحوه نوشتن کد با UDF خودداری شده و برای مطالعه بیشتر به [۴۵] و [۴۶] مراجعه نمایید. در مدلسازی شرایط مرزی از شرایط مرزی معرفی شده در قسمتهای قبل استفاده شده است. (پیوست ب) از روش سیمپل برای کوپل کردن سرعت و فشار استفاده شده و همچنین برای گسسته سازی ترم انتقال از روش آپ ویند مرتبه اول استفاده گردیده شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و سرعت ها در جهات X, Y و Z برابر با 1×10^{-5} در نظر گرفته شده است. همچنین معیار همگرایی برای غلظت برابر با 1×10^{-3} و معادلات k و ϵ برابر با 1×10^{-4} انتخاب شده است. بمنظور مدلسازی ردگیر در تانک معادله انتقال- نفوذ با تزریق آنی ردگیر حل شده است. از آنجائیکه ردگیر بقایای تاثیری در چگالی آب و توزیع سرعت ندارد فرآیند مدلسازی جریان و حمل ردگیر می تواند جداگانه صورت بگیرد. [۱۷] بدین معنا که ابتدا میدان جریان بر اساس مدل k- ϵ و بدون وابستگی به زمان حل شده و پس از بدست آوردن میدان سرعتها، معادله انتقال- نفوذ ردگیر در سراسر تانک و بصورت تابعی از زمان حل می گردد. بمنظور بررسی تاثیر اندازه شبکه، در جوابها نیز آزمایش صورت گرفته است که شبکه های بکار رفته شده را می توان در شکل (۵-۴۰) مشاهده نمایید و در آن شکل

⁷ User-Defined Function

(۵-۴۰-ب) برای حل میدان جریان انتخاب شده است. بدلیل آنکه انتخاب کوچکتر از آن اندازه تاثیر چشمگیری در کاهش خطاهای غلظت و جرم بوجود نیاورده است. بنابراین شبکه انتخاب شده بمنظور مدلسازی دارای ۱۵۲۵۶ گره، ۳۳۲۵۱ صفحه و ۱۱۸۹۵ حجم می باشد و با استفاده از کامپیوتر با مشخصات CPU 2/5GHz و 4Gb RAM زمان مورد نیاز برای هر آنالیز ۳۰ دقیقه می باشد. شکل (۵-۴۱) نتایج بدست آمده از نرم افزار فلونت برای میدان جران در محفظه های ۱ و ۸ و غلظت های متناظر آنرا نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد نتایج از انطباق قابل قبولی برخوردار می باشد. نتایج برای مابقی محفظه ها نیز بهمین صورت استخراج گردیده شده است که بمنظور اختصار از نمایش آن صرفنظر شده است.

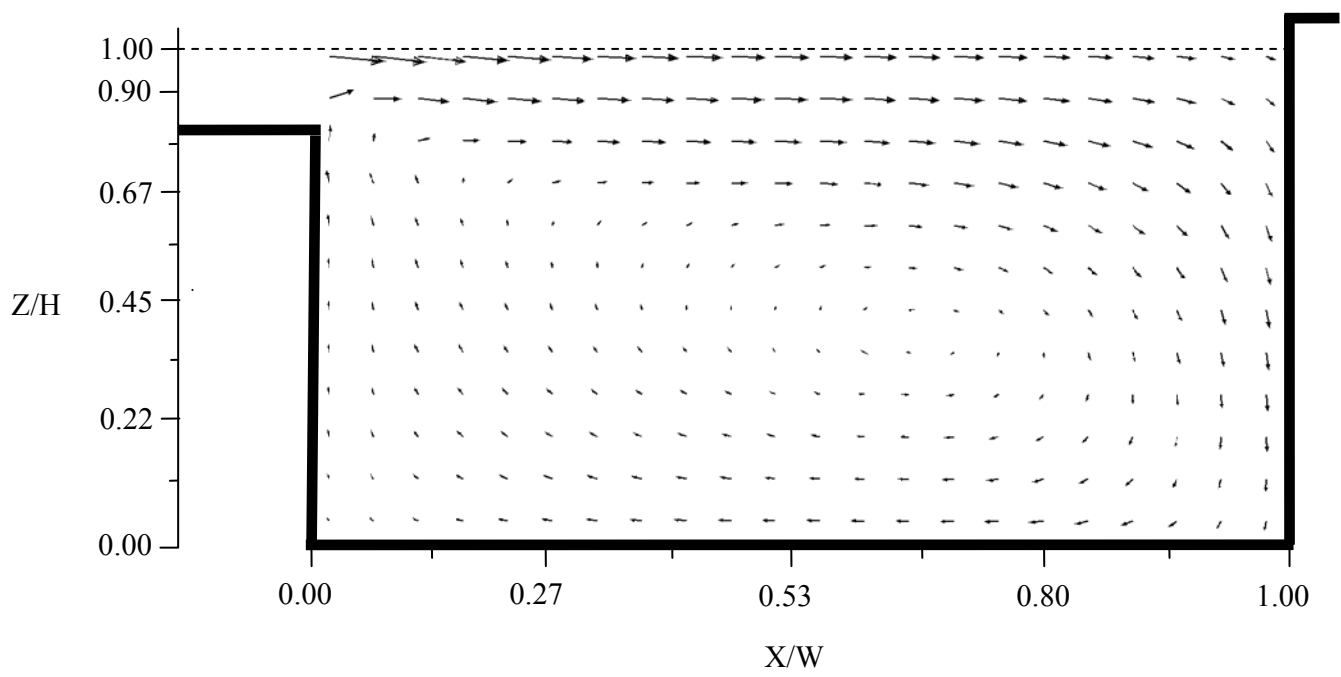


الف) مش ریز شده

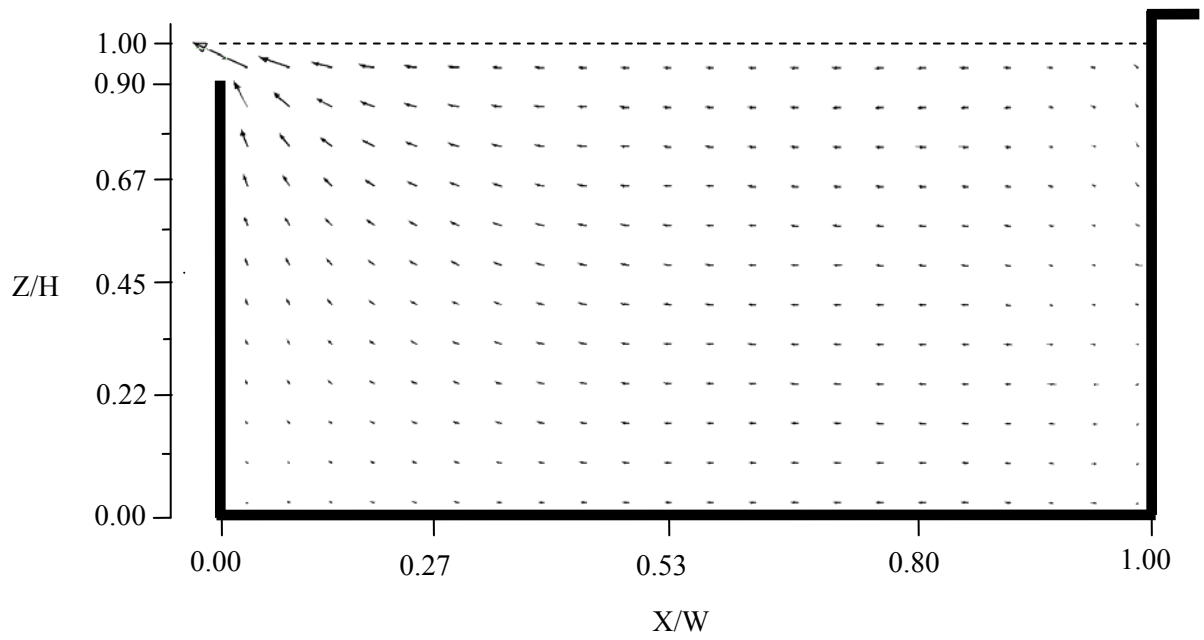


ب) مش اصلی

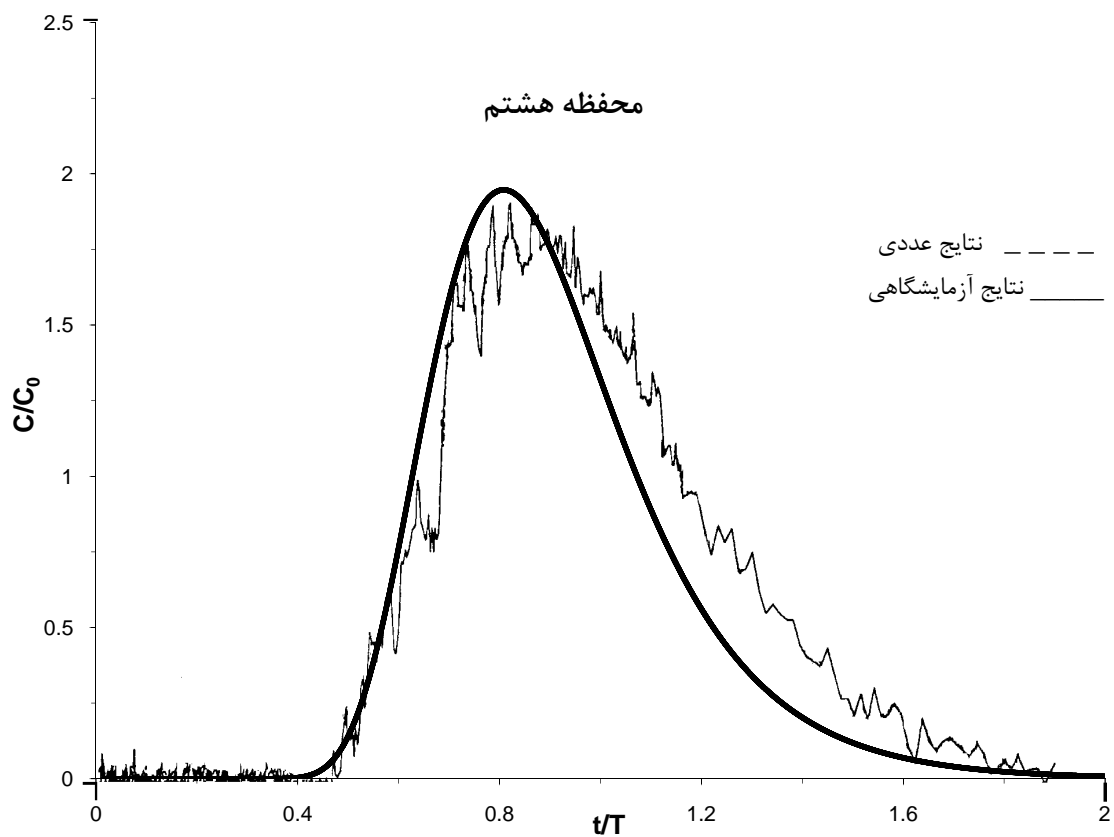
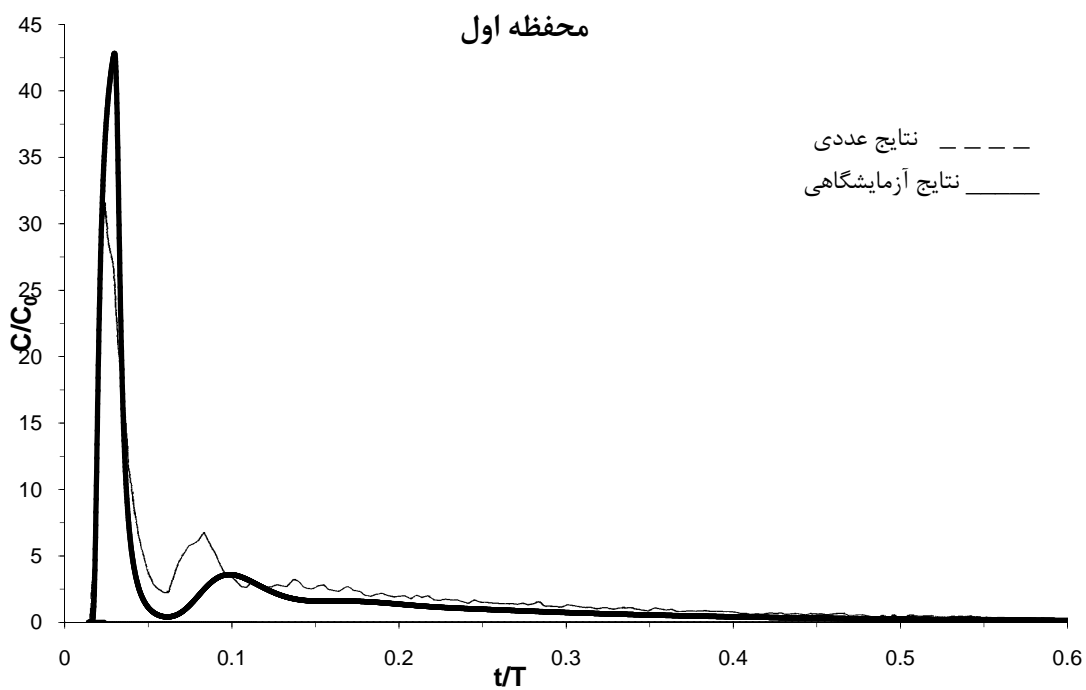
شکل ۵-۴۰ شبکه های بکار رفته شده



محفظه اول



محفظه هشتم



شکل ۵-۴۱ میدان سرعت و نمودار غلظت بدست آمده از فلونت

۵-۳-۳- بررسی کارایی مدل‌های مختلف بر اساس تعداد دیواره های داخلی از تانک تماسی

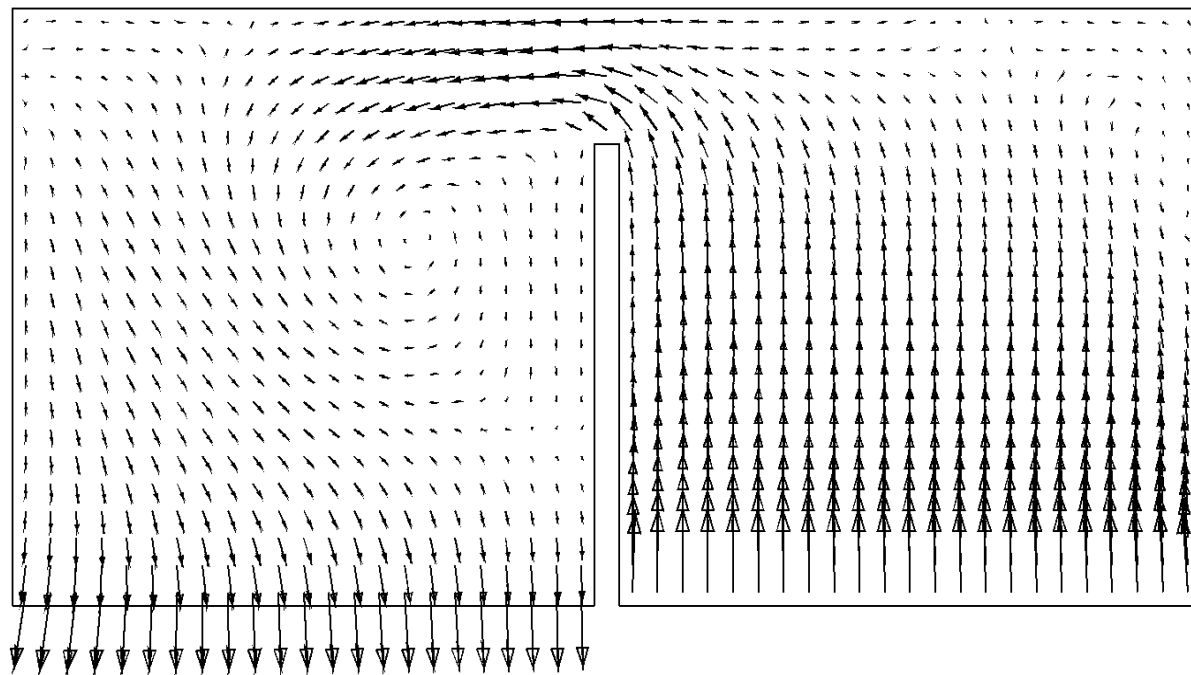
امبسی

پس از مدلسازی موفق تانک تماسی امبسی مدل عددی بدست آمده را با ایجاد تغییرات مناسب در آن برای تعیین کارایی تانک تماسی در اثر افزایش و یا کاهش تعداد دیواره های داخلی مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور پنج ساختار مختلف از دیواره های داخلی را مورد بررسی قرار داده ایم که عبارتند از الف) تانک تماسی امبسی با دو محفظه که شش محفظه کمتر از حالت واقعی خود دارد. ب) تانک تماسی امبسی با چهار محفظه که چهار محفظه کمتر از حالت واقعی خود دارد. ج) تانک تماسی امبسی با شش محفظه که دو محفظه کمتر از حالت واقعی خود دارد. د) تانک تماسی امبسی با ده محفظه که دو محفظه بیشتر از حالت واقعی خود دارد. و) تانک تماسی امبسی با دوازده محفظه که چهار محفظه بیشتر از حالت واقعی خود دارد. در مدل‌های جدید تمام اندازه های تانک ثابت نگه داشته شده است تا بتوان مقایسه ای بین میدان جریان و غلظت های بدست آمده از مدل‌های جدید با تعداد دیواره های داخلی متفاوت با مدل اصلی تانک امبسی صورت پذیرد. بنابراین حجم کلی تانک و تراز قرار گیری ورودی و خروجی مانند حالت اصلی خود می باشند. جدول (۵-۱) مهمترین خصوصیات مدل‌های بکار گرفته شده را مانند تعداد دیواره ها، حجم تانک، سرعت ورودی و زمان تاخیر تئوری را نشان می دهد. باید توجه داشت که بمنظور ثابت نگه داشتن دبی ورودی با افزایش تعداد دیواره های داخلی سرعت ها افزایش می یابند. شکل (۵-۴۲) بردارهای سرعت بدست آمده از مدل‌ها را در تراز $z=0.5525m$ (صفحه XY) نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد سرعت‌های بالاتر در قسمت بیرونی محفظه و سرعت کمتر در قسمت های کناری هر محفظه و در پشت (سمت چپ) دیواره ها وجود دارند. بخصوص برای مدل‌هایی که دارای تعداد کم دیواره ها می باشند. همانطور که مشاهده می گردد جریانهای چرخشی غالباً در این نقاط اتفاق می افتد بطوریکه با افزایش تعداد دیواره ها نواحی چرخشی پشت دیواره ها کاهش می یابند.

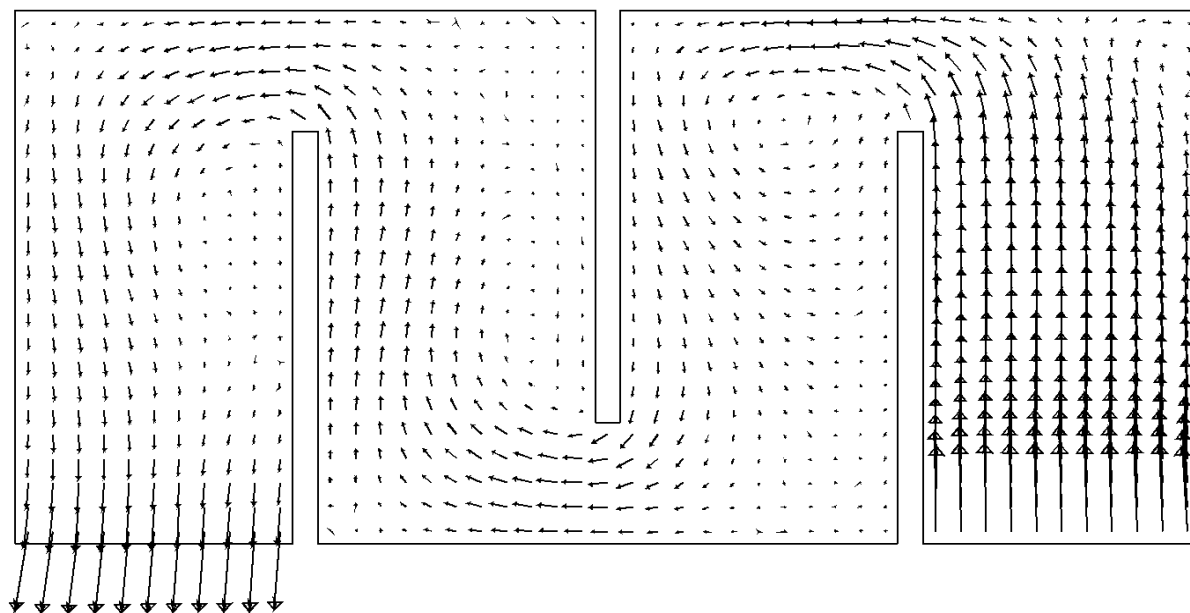
جدول ۵-۱ مشخصات مدلسازیهای صورت گرفته

تعداد دیواره ها	حجم (m^3)	سرعت ورودی (m/s)	زمان تاخیر تئوری (s)
۱	۱/۰۱۴۹	۰/۰۲۸۱	۸۶۷/۴۳
۳	۰/۹۸	۰/۰۵۸۸	۸۳۷/۶
۵	۰/۹۴۷	۰/۰۹۲۵	۸۰۹/۴
۷	۰/۹۱۳	۰/۱۲۹۵	۷۸۰/۹۴
۹	۰/۸۸۳	۰/۱۷۶۵	۷۵۴/۷
۱۱	۰/۸۴۵	۰/۲۱۵۹	۷۲۲/۲۳

انتظار می رود که با افزایش تعداد دیواره ها، جریان به حالت شرایط پلاگ نزدیکتر می گردد که بحث در مورد آن در بخشهای بعدی به تفصیل آورده شده است.

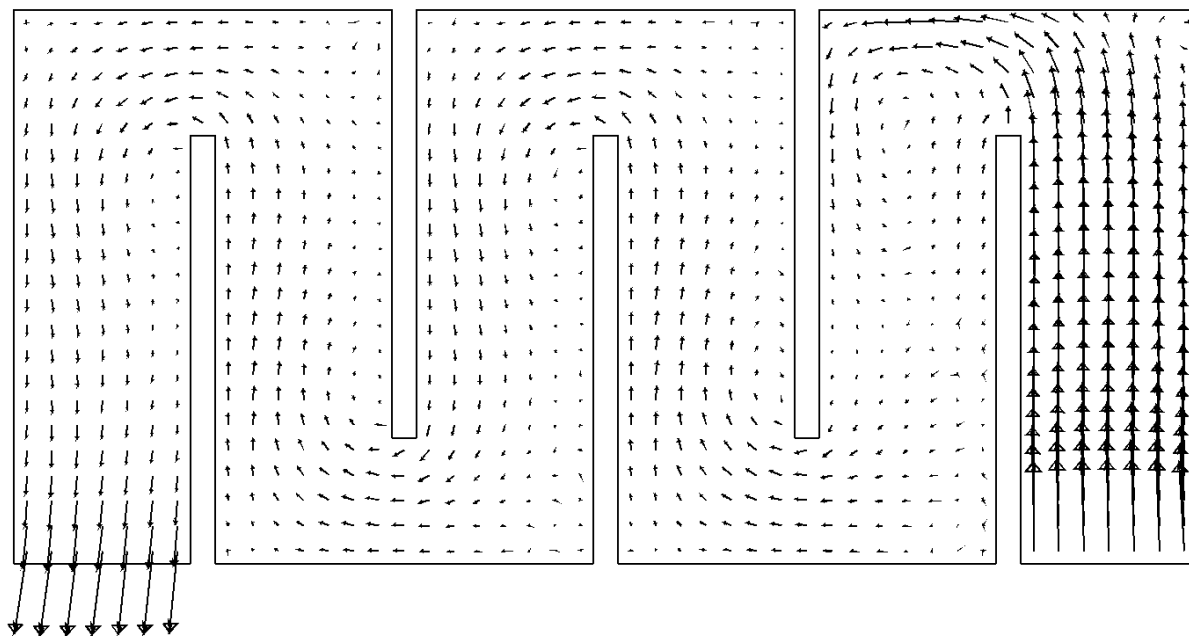


تانک امبسی با ۱ دیواره داخلی

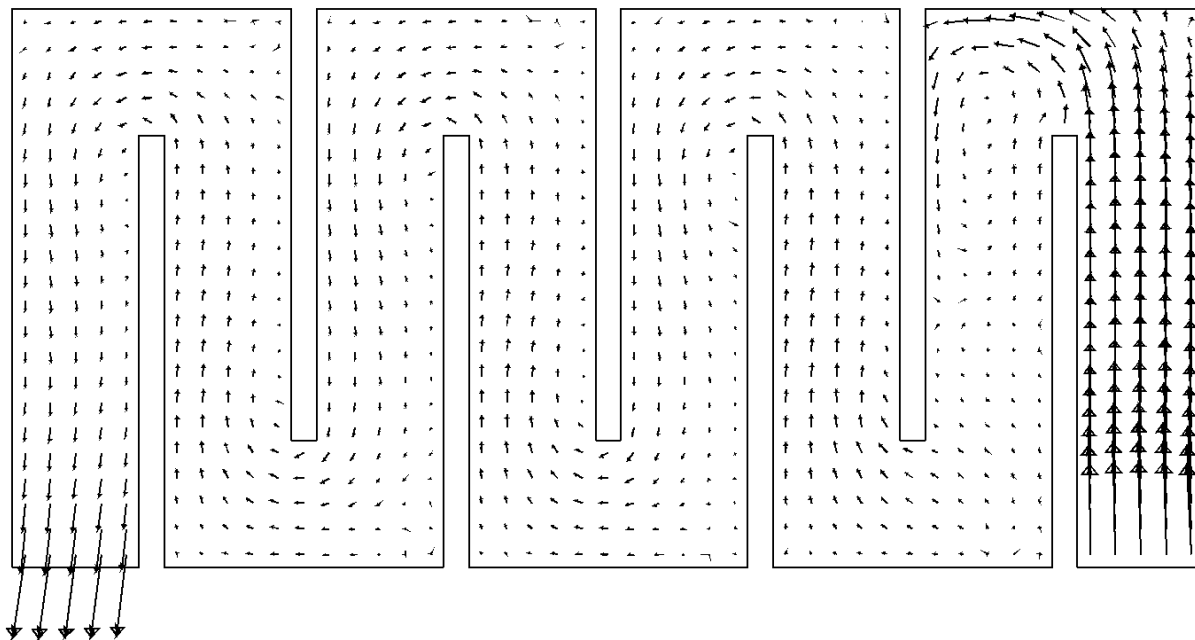


تانک امبسی با ۳ دیواره داخلی

شکل ۴۲-۵ بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف

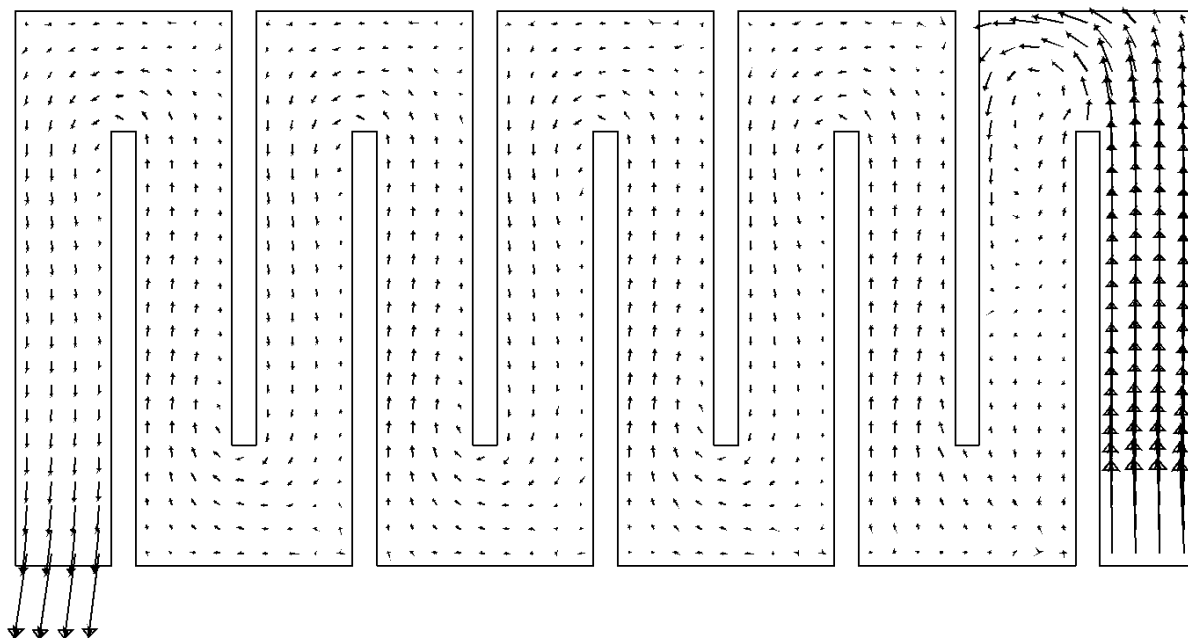


تانک امبسی با ۵ دیواره داخلی

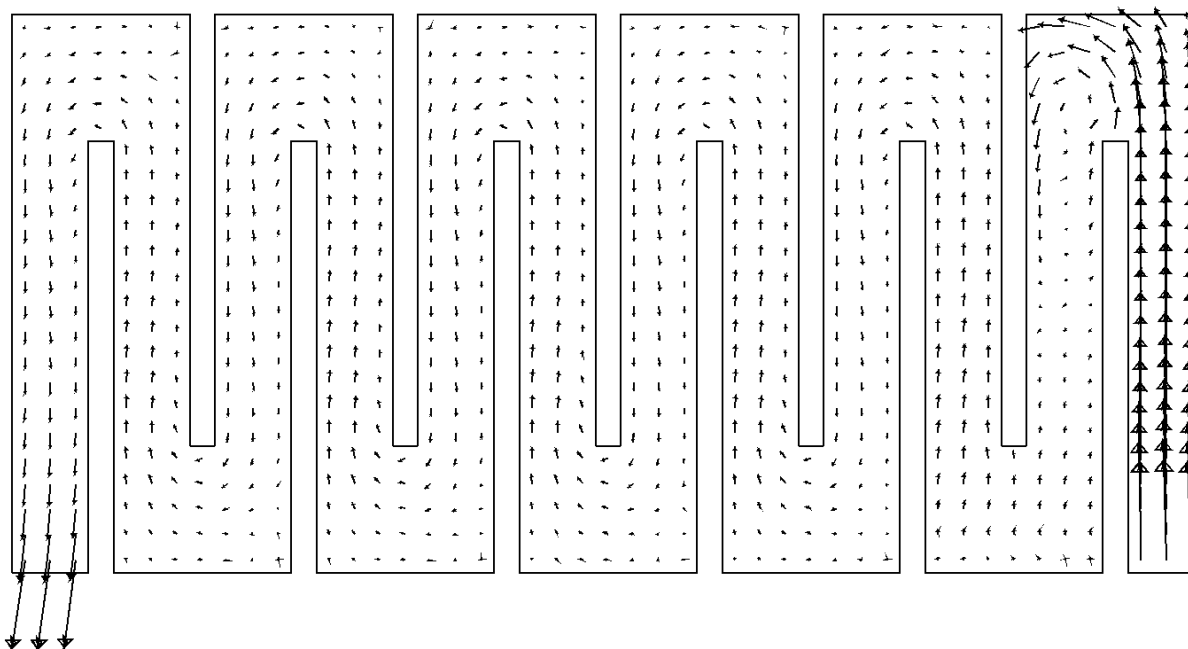


تانک امبسی با ۷ دیواره داخلی (مدل اصلی)

شکل ۴۲-۵ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف



تانک امبسی با ۹ دیواره داخلی (مدل اصلی)

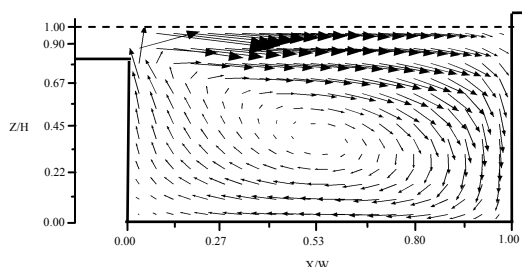


تانک امبسی با ۱۱ دیواره داخلی (مدل اصلی)

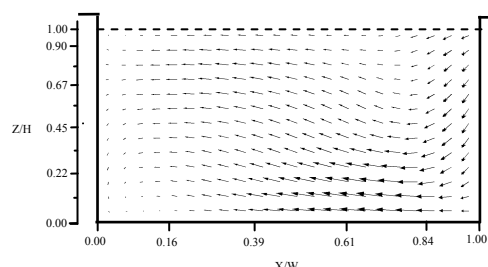
شکل ۴۲-۵ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف

در شکل (۴۳-۵) بردارهای سرعت در صفحه XZ در میانه هر محفظه برای مدل با ۳ دیواره نشان داده شده است. شایان ذکر است که اندازه بردارهای سرعت مقیاس شده نمی باشند تا اشکال نشان داده شده خوانا و قابل قرائت باشند. همانطور که مشاهده می گردد نواحی چرخشی برای مدل در محفظه اول وجود

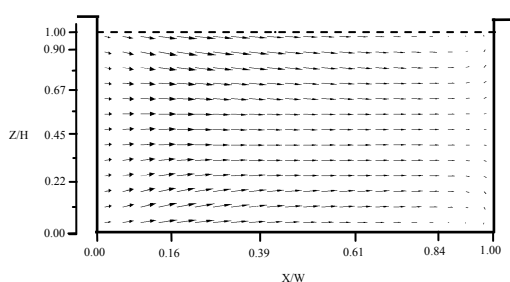
دارند همچنین این حالت در محفظه دوم نیز مشاهده می گردد و از محفظه سوم به بعد شرایط جریان ایده آل مهیا می گردد. این حالت برای مدل‌های با ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ محفظه نیز مشاهده گردیده شده است.



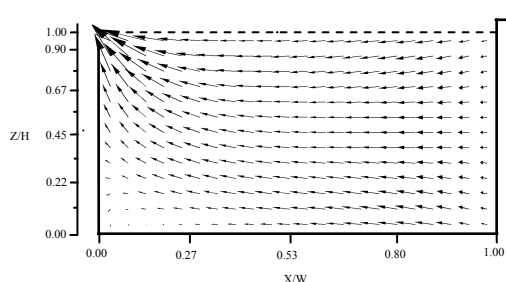
محفظة اول



محفظة دوم



محفظة سوم



محفظة چهارم

۴۳-۵ بردار سرعت در مقطع میانی مدل تانک تماسی با چهار محفظه

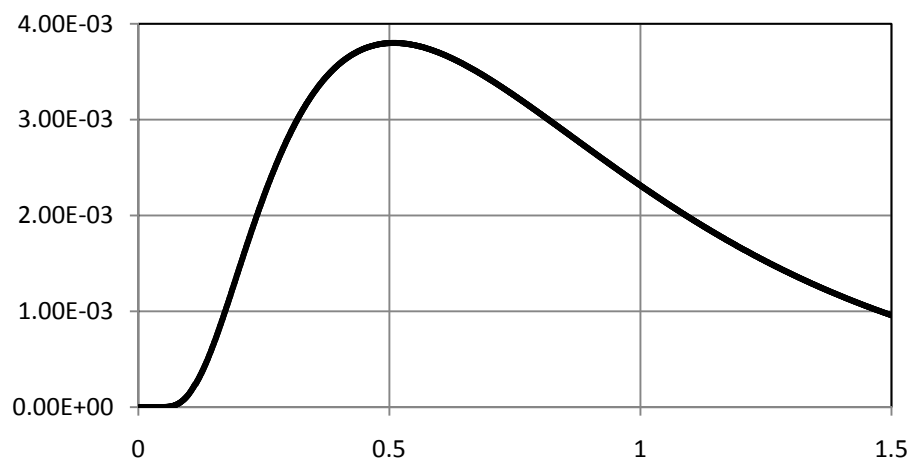
در بخش دوم بمنظور مدل‌سازی حمل ردگیر در تانک تماسی از روندی مشابه با روش مدل‌سازی آن در تانک امبسی استفاده شده است بطوریکه ۵ میلی گرم از ردگیر را در مدت زمان ۱۰ ثانیه به تانک تزریق شده است و منحنی غلظت نسبت به زمان در خروجی تانک بدست آمده است. همچنین برای بررسی کارایی تانک اندیس‌های کارایی که در فصول قبل معرفی شده اند تعیین شده است. جدول (۳-۵) مهمترین خصوصیات منحنی FTC را برای تانک‌های با ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ محفظه را نشان می دهد. نه اندیس بکار رفته در ۴ دسته مختلف تقسیم بندی شده اند و عبارتند از (۱) نشانگرهای میانبر که عبارتند از θ_0 زمان اولیه ظاهر شدن ردگیر در خروجی و θ_{10} برابر با زمانی که ۱۰ درصد از ردگیر تانک را ترک کرده اند (۲) نشانگرهای اختلاط که عرض منحنی FTC را نشان می دهند و عبارتند از اختلاف زمانهای $\theta_{90} - \theta_{10}$ و $\theta_{75} - \theta_{25}$ و نسبت زمانی یا اندیس موریل که عبارتست از θ_{90}/θ_{10} (۳) نشانگر درصد اختلاط که بر اساس تئوری ربهون [۳۱] میزان جریان پلاگ و شرایط کاملاً اختلاط را بر حسب درصد بیان می نماید (۴) مشخصه های زمانی که به عنوان نشانگرهای کارایی مورد استفاده قرار می گیرند و عبارتند از حداکثر زمان ممکن (θ_{max}) و زمانی که ۵۰ درصد از ردگیر تانک را ترک کرده اند. شکل (۴۴-۵) منحنی غلظت بدست آمده $E(\theta)$ در خروجی تانک با ۲ محفظه

(یک دیواره داخلی) را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد منحنی می تواند به دو دسته تقسیم گردد.

جدول ۵-۲ مهمترین خصوصیات منحنی FTC

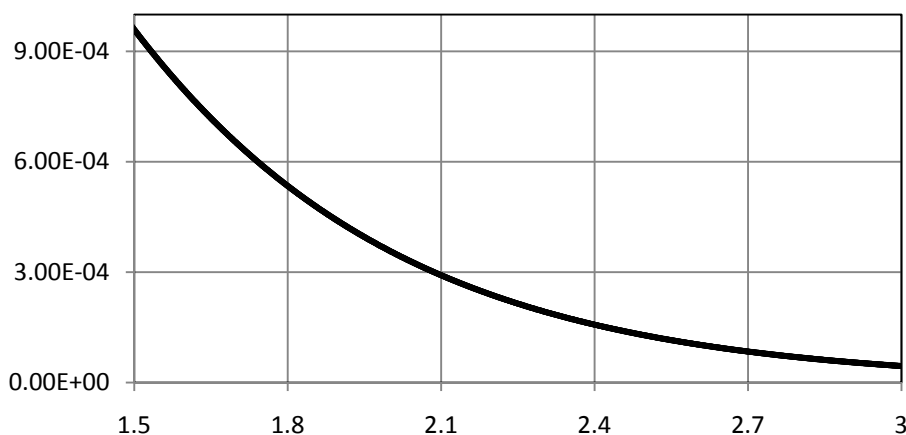
اندیس ها	۱ دیواره	۳ دیواره	۵ دیواره	۷ دیواره	۹ دیواره	۱۱ دیواره	
θ_0	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۲۹۲	۰/۳۷	۰/۴۳۶	۰/۴۷۳	میانبر
θ_{10}	۰/۳۳۲	۰/۵۳۹	۰/۶۴۷	۰/۷۰۵	۰/۷۵۶	۰/۷۶۸	
$\theta_{75} - \theta_{25}$	۰/۶۵۱	۰/۵۳۵	۰/۴۳۱	۰/۳۵۳	۰/۳۰۷	۰/۲۷۱	اختلاط
$\theta_{90} - \theta_{10}$	۱/۲۷۸	۱/۰۲۷	۰/۸۲۸	۰/۶۷۱	۰/۵۸۶	۰/۵۱۹	
θ_{90}/θ_{10}	۴/۸۴۹	۲/۹۰۴	۲/۲۷۹	۱/۹۵۱	۱/۷۷۵	۱/۶۷۵	
p	۵۰/۴	۵۶/۳	۶۲/۱	۵۹/۲	۶۴	۷۵/۴	درصد PF
1-p	۴۹/۶	۴۳/۷	۳۷/۹	۴۰/۸	۳۶	۲۴/۶	
θ_{max}	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۸۸۹	۰/۹۳۲	۰/۹۶۹	۰/۹۶۳	کارایی
θ_{50}	۰/۷۶	۰/۹۳۴	۰/۹۸۳	۰/۹۹۳	۱/۰۱۳	۰/۹۹۸	

E(t)



شکل ۵-۴۴-الف) منحنی تابع توزیع تجمعی تانک امبسی با ۲ محفظه

E(t)

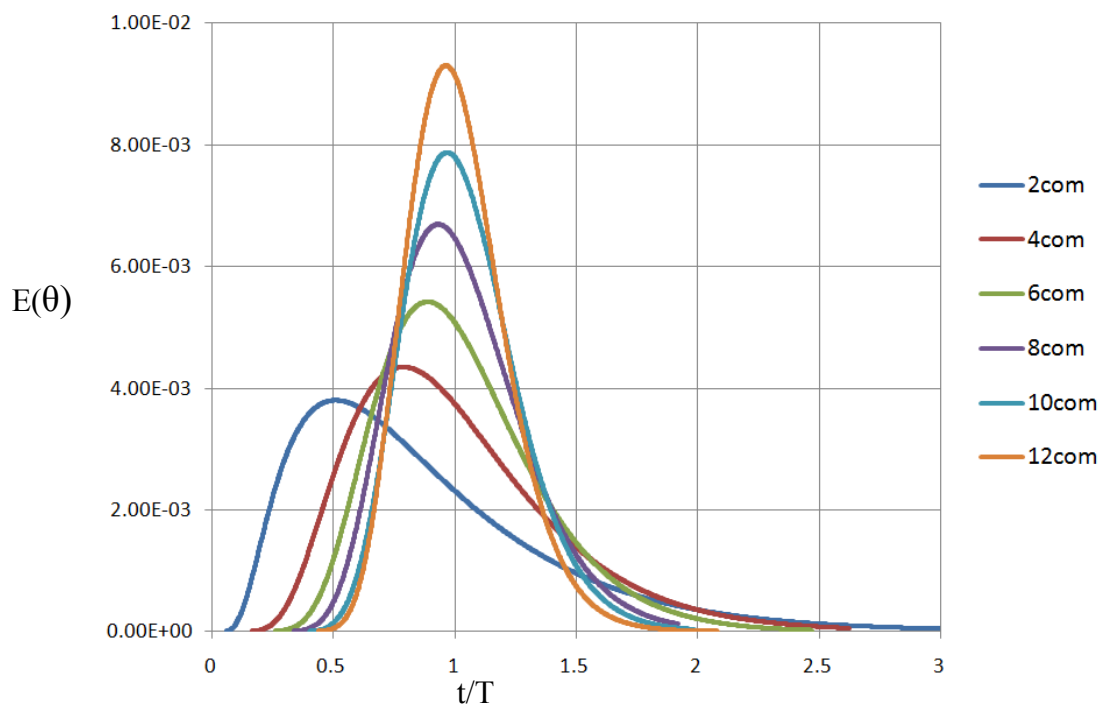


شکل ۵-۴۴-ب) منحنی تابع توزیع تجمعی تانک امبسی با ۲ محفظه

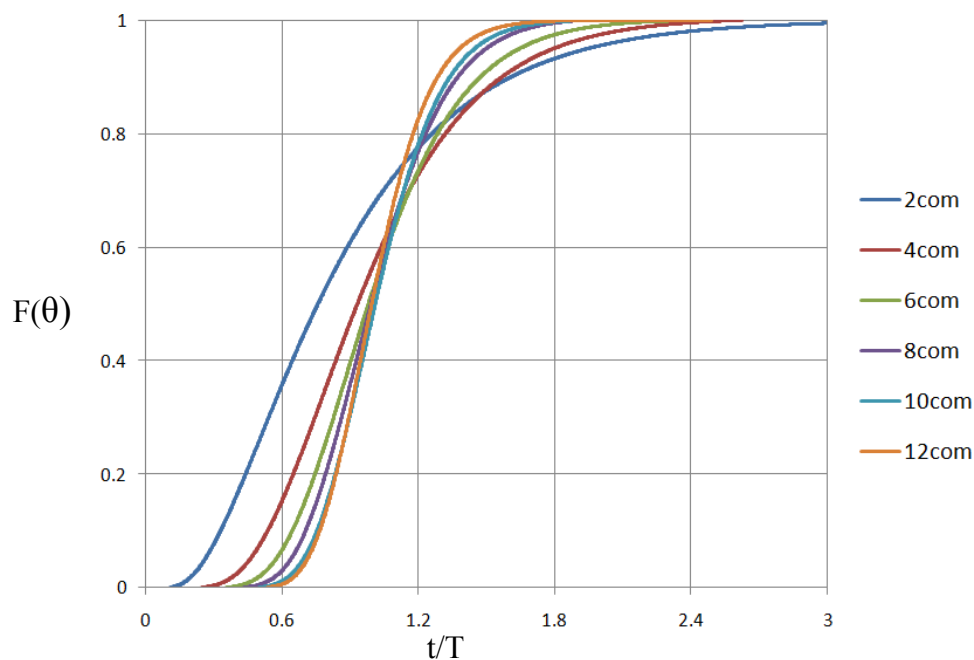
اولین قسمت (از $\theta=0.08$ تا $\theta=1.1$). نشان دهنده حجمی از ردگیر (۷۱ درصد) می باشد که پس از عبور از یک دسته مسیر که توسط میدان جریان بر آن تحمیل شده است، از تانک خارج گردیده شده است و قسمت دوم $\theta > 1.1$ نشان دهنده حجمی از ردگیر (۲۹ درصد) می باشند که پس از باقی ماندن در نواحی دارای سرعت پائین و یا بعبارت دیگر در مراکز نواحی چرخشی در پشت دیواره ها و گوشه های محفظه ها از تانک خارج می گردند و باعث تشکیل دنباله^۸ در منحنی می گردند. بهمین صورت نتایج برای دیگر تانک های مدلسازی شده قابل استخراج می باشند. شکل های (۵-۴۵) و (۵-۴۶) منحنی توزیع زمان حضور و تابع توزیع تجمعی را برای تمام مدلها نشان می دهند. همانطور که مشاهده می گردد تانک با ۱۲ محفظه دارای منحنی بلندتر و باریکتر از منحنی با ۱۰ محفظه می باشد و بهمین ترتیب تانک با ۱۰ محفظه و ۸ محفظه دارای خصوصیات مشابهی می باشد و برای بقیه مدلها نیز همین موضوع برقرار می باشند. این نتیجه در انطباق با نتیجه بدست آمده از منحنی سرعت می باشد که با افزایش تعداد دیواره ها شرایط به حالت جریان پلاگ نزدیکتر می گردد. زیرا در حالت پلاگ منحنی غلظت بصورت خطی مستقیم در زمان $t/T=1$ می باشند و هر چه منحنی غلظت به حالت مذکور نزدیکتر گردد جریان به حالت ایده آل نزدیکتر می شود. [۸] علاوه بر مشخصات فوق از روشی که آقایان فالکونر و تیبات [۱۲] برای بررسی شرایط جریان پلاگ معرفی کرده اند نیز استفاده شده است. آنها با استفاده از یک معادله یک بعدی حمل ردگیر برای جریان پلاگ منحنی ایده آل FTC را در خروجی تانک رسم

⁸ Tail

نمودند. هر چه نمودارهای FTC تولید شده به نمودار فوق منطبق تر باشند جریان به حالت جریان پلاگ نزدیکتری گردد. معادله یک بعدی انتقال ردگیر بصورت زیر تعریف می گردد:



۴۵-۵ منحنی تابع زمان حضور در خروجی تانک با تعداد دیوارهای مختلف



۴۶-۵ منحنی تابع توزیع تجمعی در خروجی تانک با تعداد دیوارهای مختلف

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad ۱-۵$$

که در آن \bar{C} برابر غلظت متوسط در سطح، \bar{U} سرعت متوسط جریان و D_L ضریب پخشیدگی طولی می باشد. با فرض اینکه سرعت متوسط \bar{U} مستقل از زمان باشد و سیال غیر قابل تراکم و چگالی ردگیر با چگالی آب برابر و ضریب نفوذ ثابت باشد آنگاه با حل معادله فوق عبارت زیر بدست می آید: [۳۷]

$$\bar{C}(x, t) = \frac{M}{A(4\pi D_L t)^{0.5}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4D_L t}\right] \quad ۲-۵$$

که در آن M کل حجم تزریق شده ردگیر، A سطح مقطع جریان می باشند. شرایط اولیه و مرزی بکار رفته برای حل معادله دیفرانسیلی بصورت زیر می باشند:

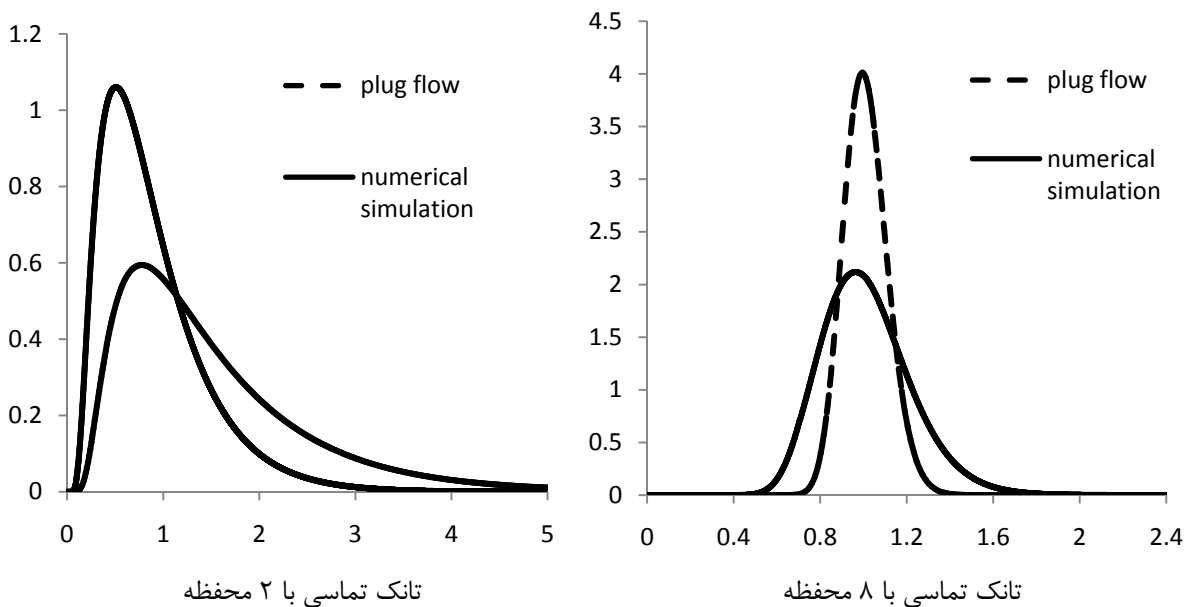
$$\bar{C}(x, 0) = 0 \quad \text{for } x > 0$$

$$\bar{C}(\infty, t) = 0 \quad \text{for } t \geq 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A(x) \bar{C}(x, t) dx = M \quad \text{for all } t$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty$$

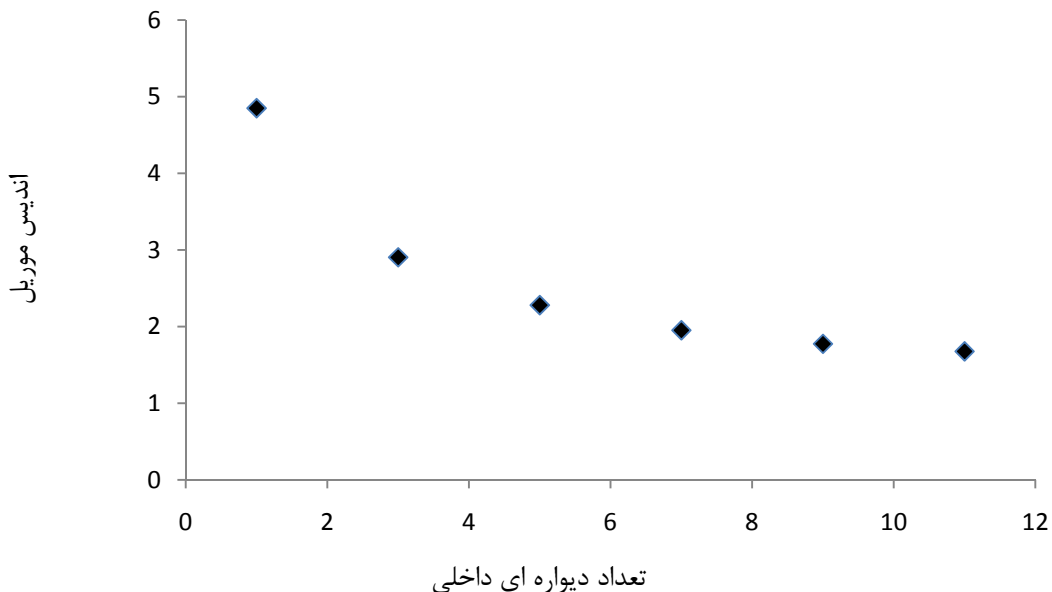
در شکل (۴۷-۵) مقایسه ای بین منحنی های ایده آل و منحنی بدست آمده از آنالیز عددی در مدل های با ۲ محفظه و ۸ محفظه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش تعداد دیواره ها منحنی تولید شده بر منحنی ایده آل انطباق بیشتری پیدا می کند.



شکل ۴۷-۵ مقایسه بین منحنی های ایده آل و منحنی بدست آمده از آنالیز عددی

با توجه به نمودارهای فوق و نتایج نشان داده شده در جدول (۲-۵) مشاهده می گردد که با افزایش تعداد دیواره های داخلی اندیس میانبر از $\theta_0 = 0.08$ و $\theta_{10} = 0.332$ برای تانک امبسی با ۲ محفظه به

مقدار $\theta_0 = 0.473$ و $\theta_{10} = 0.768$ برای تانک امبسی با ۱۲ محفظه رسیده است که نقش دوباره دیواره ها را در کاهش نواحی چرخشی و کاهش پدیده میانبر در تانک نشان می دهد. همچنین در مورد پدیده اختلاط مشاهده می گردد که با کاهش نواحی چرخشی و افزایش دیواره های داخلی اندیس های اختلاط بهتر می گردند. بطور مثال اندیس موریل در جریان پلاگ برابر با یک می باشد و هر چه اندیس موریل به عدد یک نزدیکتر گردد بمعنای بر قراری جریان ایده آل در تانک می باشند و مطلوب می باشد. با توجه به نتایج مشاهده می گردد که درصد جریان پلاگ با افزایش دیواره ها افزایش یافته که نیز بیانگر بهبود کارایی تانک تماسی می باشد. در مورد زمانهای کارایی و با توجه به شکل (۵-۴۵) منحنی توزیع حضور در تانک به سمت راست کشیده شده است که بمعنای افزایش زمانهای تاخیر می باشند اما با توجه به جدول (۵-۲) از تانک با ۸ محفظه به بعد تغییرات چشمگیری در آن مشاهده نمی گردد. با عنایت به مطالب فوق و افزایش کارایی تانک امبسی در اثر افزایش تعداد دیواره های داخلی مشاهده شده است که روند بهبود اندیس های کارایی با افزایش تعداد دیواره ها از یک حد معین چشمگیر نمی باشند. بطور مثال شکل (۵-۴۸) تغییرات اندیس موریل بر حسب افزایش تعداد دیواره را نشان می دهد و مشاهده می گردد تغییرات از محفظه با ۷ دیواره داخلی به بعد چشمگیر نبوده و یا اندیس θ_{10} افزایش تقریباً ۸ در صدی داشته است و با توجه به اینکه مسائل اقتصادی و اجرایی افزایش دیواره ها را ممکن است تحت الشعاع خود قرار دهد بنابراین لزوم تحقیقات بیشتر در این مورد بمنظور ارائه ساختار جدیدی از تانک که از لحاظ کارایی بهتر باشد را نشان می دهد.



شکل ۵-۴۸ تغییرات اندیس موریل بر حسب افزایش تعداد دیواره

۵-۳-۴- بررسی محل قرار گیری دیوار های داخلی در کارایی تانک تماسی امبسی

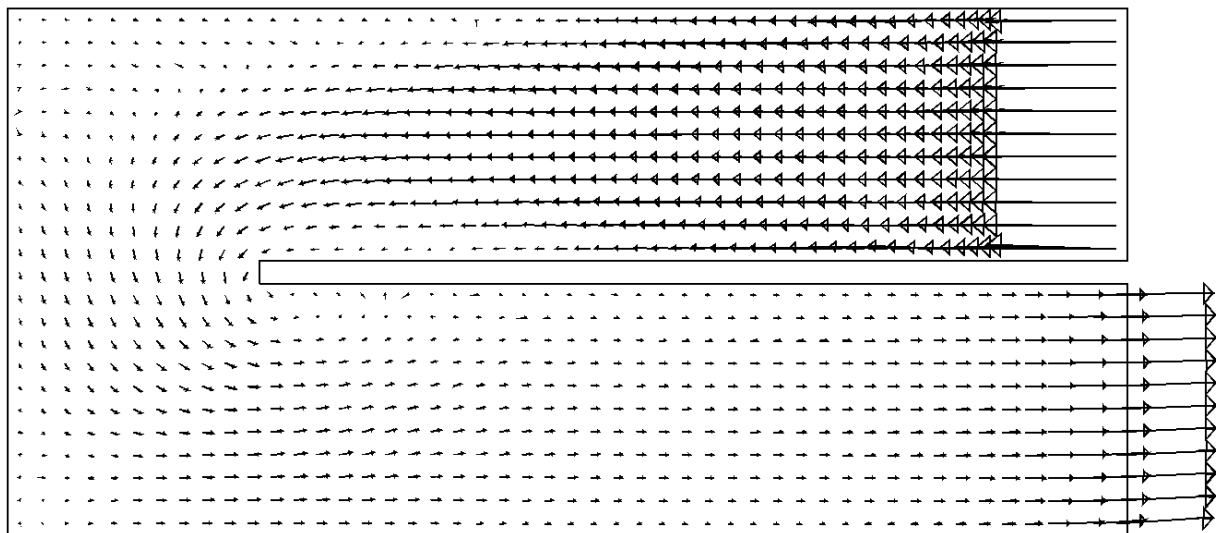
در بخش گذشته تاثیر تعداد دیواره های داخلی و نقش آنها در کارایی تانک مورد تدقیق قرار گرفته شد و مشخص گردیده شده است که افزایش دیواره های داخلی بدلیل کاستن از نواحی چرخشی در تانک، باعث افزایش شاخص های کارایی تانک می گردد. سوالی که مطرح می باشد اینست که آیا محل قرار گیری دیواره ها می تواند باعث بهبود عملکرد تانک تماسی امبسی گردد یا خیر. بدین منظور ۳ مدل مختلف از تانک تماسی امبسی که به ترتیب دارای ۲، ۴ و ۶ محفظه می باشند مورد بررسی قرار گرفته شده است. مشخصات بکار برده شده همانند مشخصات اصلی بکار رفته در تانک تماسی امبسی اصلی می باشند. بعبارت دیگر تمام اندازه های تانک، دبی عبوری و ارتفاع ورودی و خروجی ثابت باقی مانده است و تنها تغییر بوجود آمده در محل قرار گیری دیواره ها می باشد تا بتوان مقایسه ای بین مدل‌های متناظر موجود در بخش قبل صورت پذیرد و بجای قرار گیری آنها در مقطع عرضی تانک دیواره های داخلی در راستای طولی آن جایگذاری شده است. جدول (۵-۳) مهمترین خصوصیات مدل‌های بکار رفته را نشان می دهد. در این مدل‌ها بدلیل قرار گیری دیواره ها در راستای طولی عرض محفظه ها در مقایسه با مقادیر متناظر شان در بخش قبل کاهش یافته اند که با ثابت نگه داشتن دبی عبوری و ارتفاع ورودی باعث افزایش سرعت در ورودی می گردند. همچنین بدلیل افزایش جزیی در طول دیواره های داخلی تغییراتی در حجم تانک و در نتیجه زمان تاخیر تئوری آن مشاهده می گردد.

جدول ۵-۳ مشخصات مدل‌سازیهایی صورت گرفته

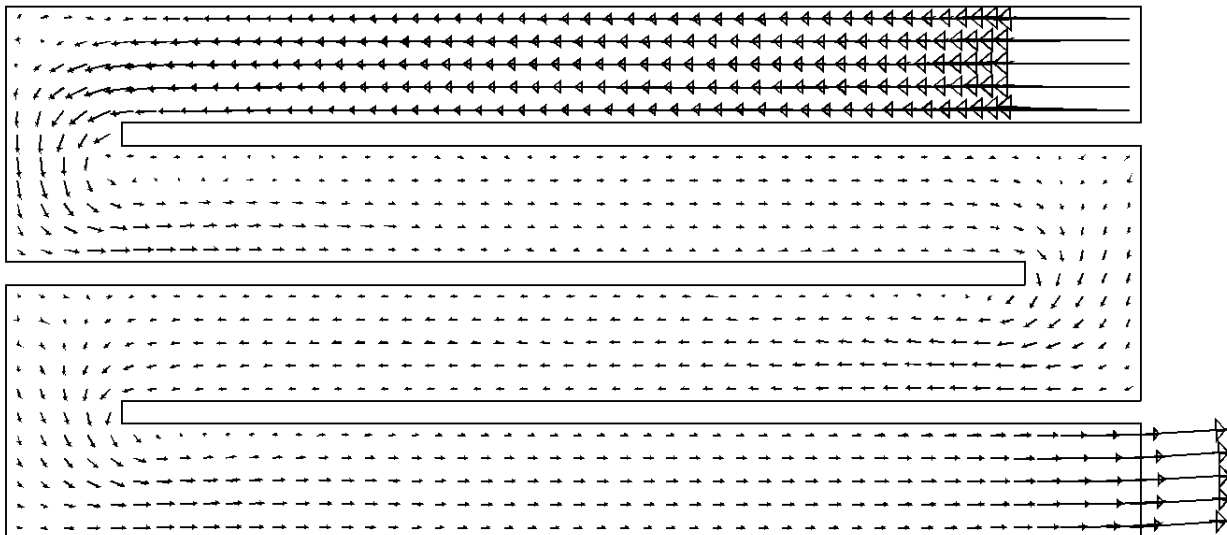
تعداد دیواره ها	حجم (m^3)	سرعت ورودی (m/s)	زمان تاخیر تئوری (s)
۱	۰/۹۹۷	۰/۰۶۴۲	۸۵۱/۸۵
۳	۰/۹۱۰۸	۰/۱۴۱۲	۷۷۸/۴۶
۵	۰/۸۲	۰/۲۳۵	۷۰۱/۶۶

بمنظور مدل‌سازی ردگیر در تانک تماسی همانند روش معرفی شده در قسمتهای قبل عمل شده است بدین ترتیب که ۵ میلی گرم از ردآمین-ب را در مدت ۱۰ ثانیه به ورودی تانک تزریق کرده و منحنی غلظت در خروجی تانک را بدست آورده و با انجام محاسبات مربوطه منحنی توزیع زمان حضور و تابع توزیع تجمعی و در نهایت شاخص های کارایی بدست آمده است. اشکال (۵-۴۹) و (۵-۵۰) تا (۵-۵۳) میدان های سرعت و مهمترین خصوصیات کارایی تانک تماسی امبسی با ساختار جدید از محل قرار گیری دیواره ها را نشان می دهند. لازم بذکر است بدلیل مشابهت ساختار بردارهای سرعت در صفحه XZ با بردارهای نشان داده شده در بخش های قبل از ارائه آنها صرفنظر شده است. همانطور که مشاهده می گردد تمامی اندیس های کارایی بطور چشمگیری بهبود یافته است و با توجه به میدان سرعت، نواحی چرخشی کمتری بوجود آمده است و بیانگر این موضوع می باشد که اگرچه افزایش تعداد دیواره ها می تواند باعث افزایش کارایی تانک تماسی گردد اما این نتایج نمی تواند بطور عام باشد. بدلیل آنکه ۲

تانک با دارا بودن تعداد یکسان از دیواره های داخلی دارای عملکرد هیدرولیکی متفاوت بدلیل طرز قرار گیری دیواره های داخلی آن می تواند داشته باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش و قسمت قبل مشاهده می گردد که قرار گیری دیواره های داخلی در راستای اندازه بزرگتر تانک ارجحتر از قرار گیری دیواره ها در راستای کوچکتر می باشد. این قرار گیری باعث افزایش جریان پلاگ گشته و در کاهش تعداد گردش ها که نواحی چرخشی را بوجود می آورند موثر می باشند.

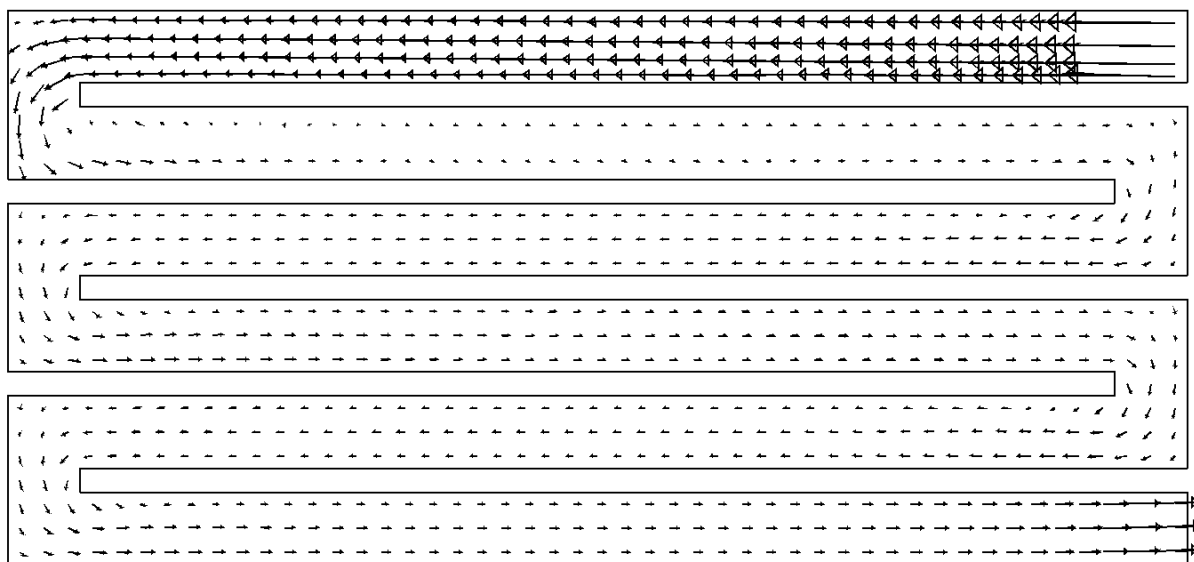


تانک امبسی با ۱ دیواره داخلی در راستای طولی

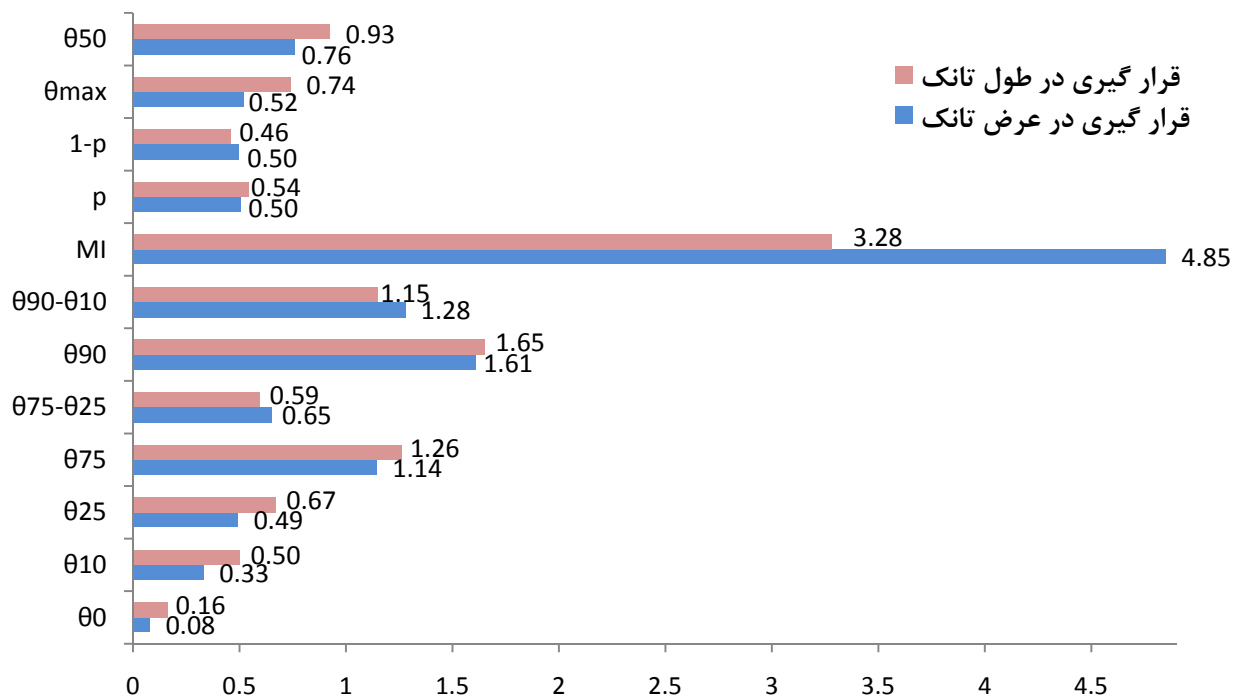


تانک امبسی با ۳ دیواره داخلی در راستای طولی

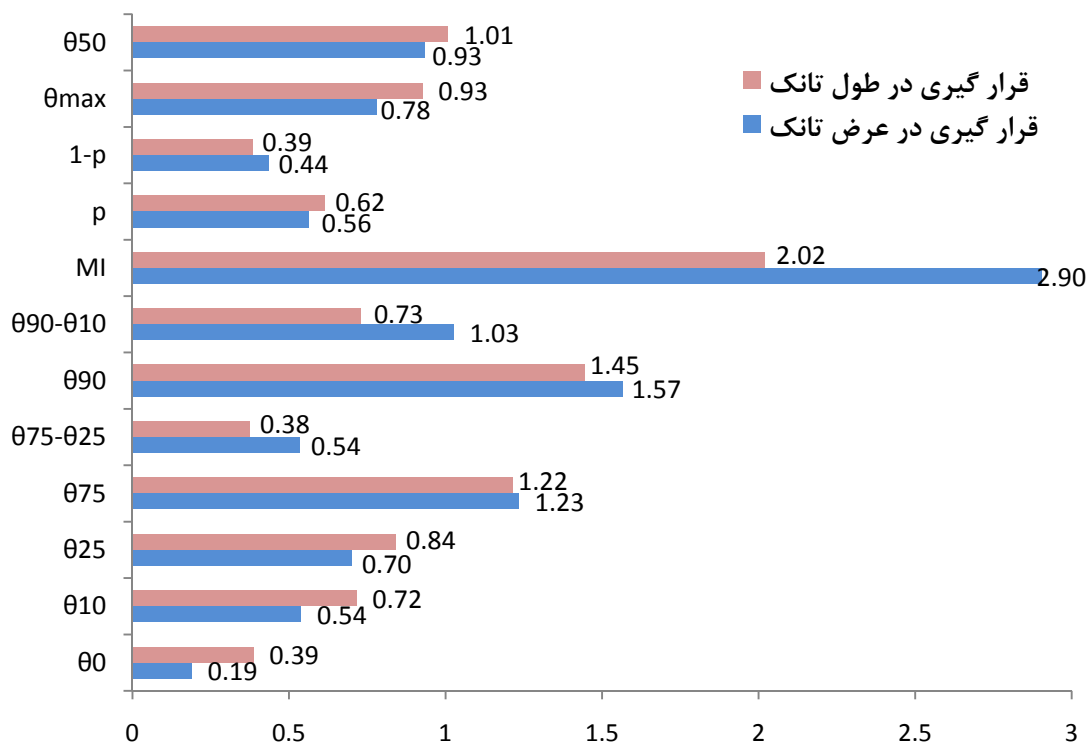
شکل ۵-۴۹ بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل های مختلف



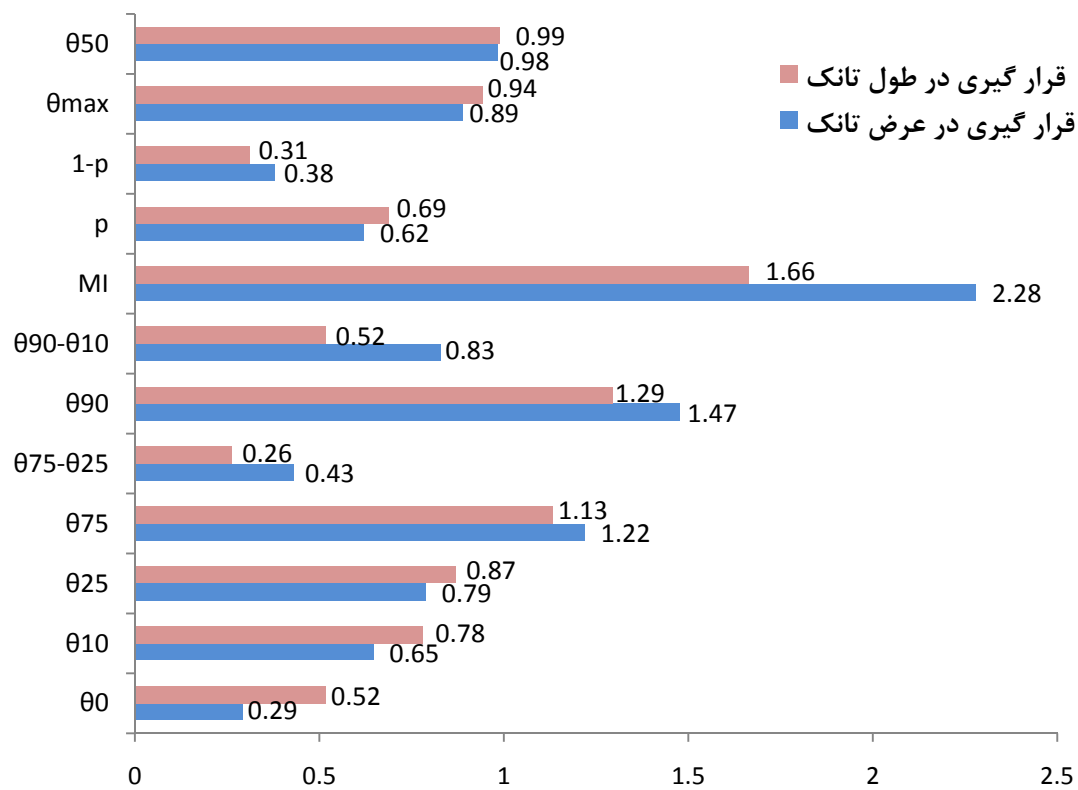
تانک امبسی با ۵ دیواره داخلی در راستای طولی
 شکل ۵-۵۰ (ادامه) بردارهای سرعت در تراز $z=0.5525m$ از مدل‌های مختلف



شکل ۵-۵۱ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۲ محفظه



شکل ۵-۵۲ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۴ محفظه

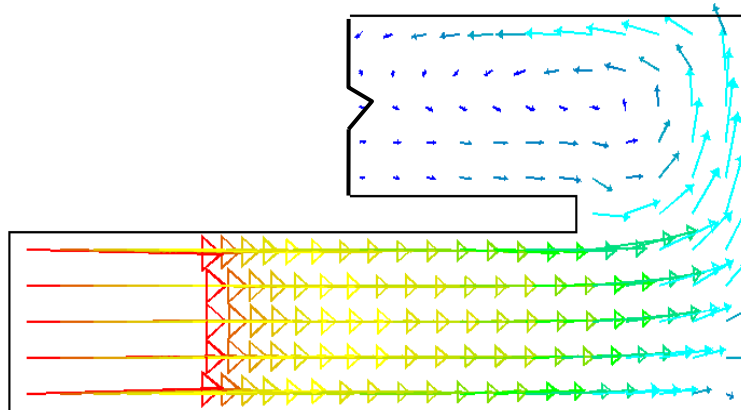


شکل ۵-۵۳ مقایسه خصوصیات کارایی در تانک امبسی با ۶ محفظه

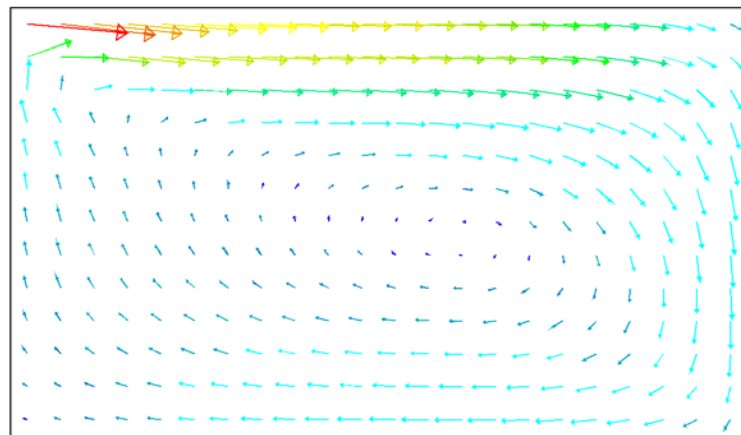
۵-۳-۵- بررسی محل قرار گیری دهانه ورودی در کارایی تانک تماسی امبسی

در این بخش بمنظور بررسی تاثیر ساختارهای ورودی در کارایی تانک تماسی ۲ مدل جدید علاوه بر مدل اصلی تانک امبسی مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور مقایسه بین مدلها تمام خصوصیات بکار گرفته شده در مدل اصلی ثابت باقی مانده است و فقط محل قرار گیری دهانه ورودی با جابجایی تراز ارتفاعی آن در محفظه اولی تانک تغییر یافته است. بمنظور تعیین میدان سرعت از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است و برای بررسی ردگیر ۵ میلی گرم از ردامین-ب را در مدت ۱۰ ثانیه به تانک تزریق نموده و در زمانهای باقیمانده غلظت در ورودی برابر صفر قرار داده شده است. دهانه ورودی در مدل اصلی در تراز $Z/H=0.923$ بوده در حالیکه در دو مدل جدید ترازها به ترتیب در $Z/H=0.692$ و $Z/H=0.4615$ می باشند. با ثابت بودن دبی و مساحت مقطع، سرعت در هر سه مدل برابر می باشند. اشکال (۵-۵۴) تا (۵-۵۶) بردارهای سرعت را در دو نمای متفاوت برای هر یک از مدلها در محفظه اول نشان می دهند. در شکل (الف) نمایی از پلان تانک (صفحه XZ) و شکل (ب) نمای جانبی هر یک از مدلها را در مقطع میانی محفظه اول تانک تماسی (صفحه YZ) نشان می دهند. همانطور که مشاهده می گردد در نمای (الف) ساختار ورودی بردارهای سرعت در هر سه حالت یکسان می باشند و بدلیل وجود دیواره ها با ورود آب به داخل دیواره در جهت عرضی کانال، مسیر مستقیمی را طی می نماید. اما در نمای جانبی در تمام مدلها جریان چرخشی در محفظه اول وجود دارد. در مدل اصلی جریان چرخشی بزرگی مشاهده می گردد که پس از ورود به تانک و طی مسیر تقریباً برابر با عرض تانک با برخورد به انتهای تانک بخشی از جریان به محفظه دوم منتقل گشته و بخشی از جریان به داخل محفظه اول باز می گردد. بردارهای سرعت در واقع بیان کننده نحوه توزیع غلظت در محفظه اول از تانک تماسی می باشند که این موضوع را می توان در شکل (۵-۵۷) مشاهده نمود که نحوه توزیع ردگیر بقایی در محفظه اول (صفحه XZ) تا ۷۰ ثانیه پس از تزریق بصورت گامهای زمانی مختلف نشان می دهد. لازم بذکر می باشد که توزیع یکنواخت غلظت در ورودی تانک می تواند به توزیع یکنواخت تر در بقیه محفظه ها کمک می کند. [۴۷] بنابراین با توجه به بردارهای سرعت در مدلهای جدید مشاهده می گردد که با ورود ردگیر به تانک بعلاوه وجود اختلاط بهتر در جهت قائم تانک توزیع غلظت در محفظه اول یکنواخت تر می گردد و با جابجایی مکان ورودی از تراز $Z/H=0.923$ به تراز $Z/H=0.4615$ انتظار می رود در کارایی تانک تاثیر گذار باشد. شکل (۵-۵۸) روند توزیع ردگیر را بصورت گامهای زمانی در ورودی با تراز $Z/H=0.4615$ نشان می دهد. همچنین جدول (۵-۴) مهمترین خصوصیات مربوط به کارایی تانک را نشان می دهد که نتایج بدست آمده موید مطالب فوق می باشد و اندیس های کارایی در مدلهای جدید در مقایسه با مدل اصلی بهتر شده است اما با توجه به اینکه آب پس از ورود به تانک مسیر از پیش تعیین شده ای را که توسط دیواره های داخلی دیکته می شود طی می نماید و در این مسیر به جریان پلاگ نزدیکتر می گردد بنابراین علیرغم عدم توزیع یکنواخت غلظت در محفظه اول توزیع ردگیر در محفظه های بعدی یکنواخت تر شده

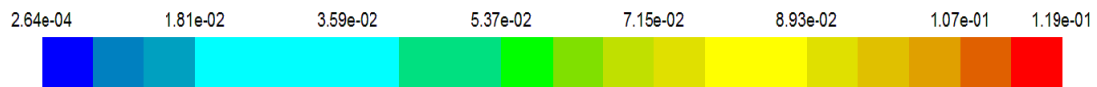
و در نهایت در خروجی نیز همین موضوع مشاهده می گردد و میزان اثر پذیری این موضوع چندان نبوده و بهبود کارایی چشمگیر نمی باشد.



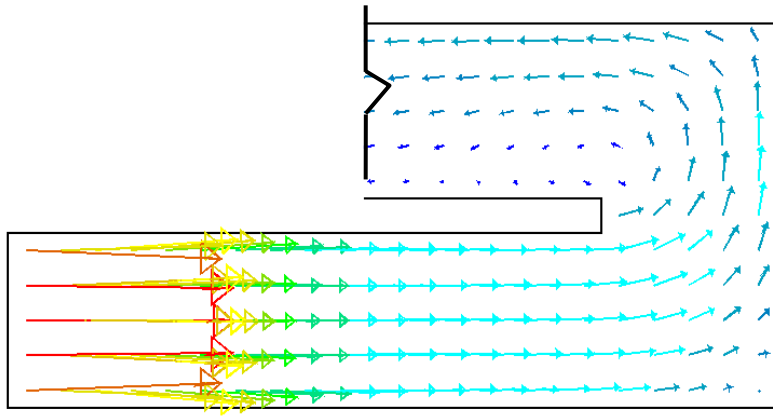
شکل الف) صفحه XZ



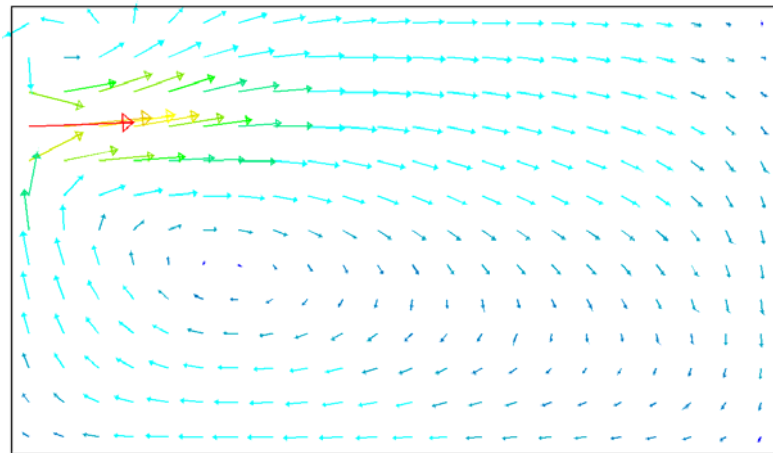
شکل ب) صفحه yz



شکل ۵-۵۴ بردارهای سرعت درتانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.923$



شکل الف) صفحه XZ

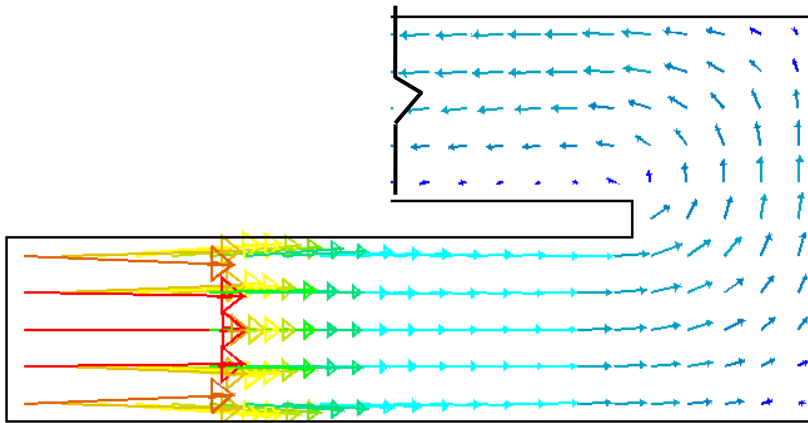


شکل ب) صفحه yZ

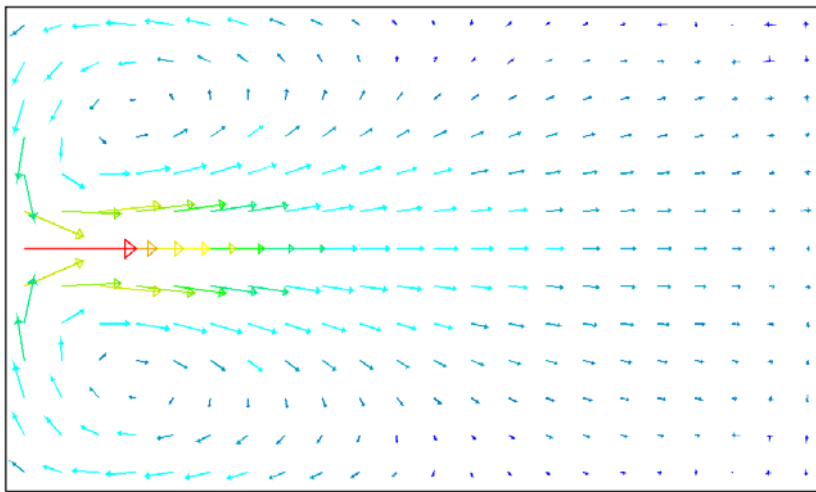
1.56e-04 1.75e-02 3.49e-02 5.22e-02 6.95e-02 8.69e-02 1.04e-01 1.16e-01



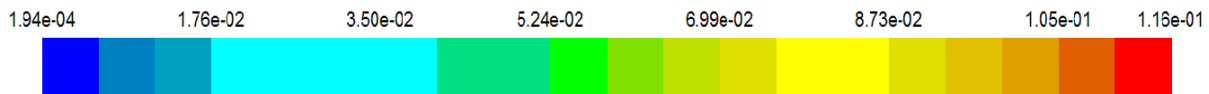
شکل ۵-۵ بردارهای سرعت در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.692$



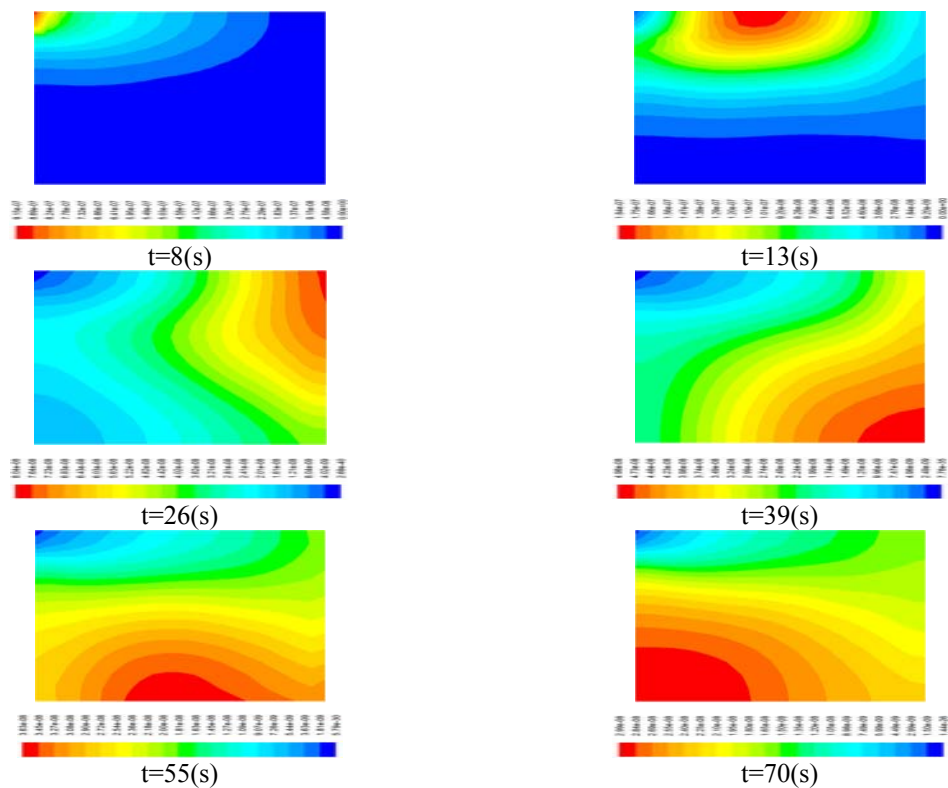
شکل الف) صفحه XZ



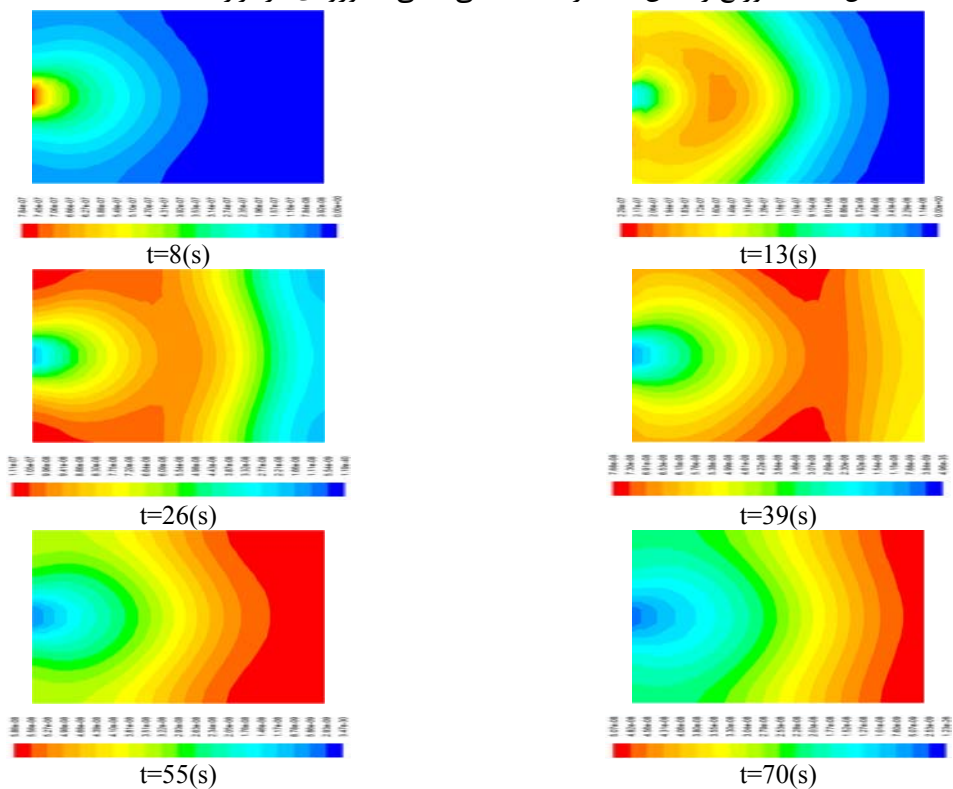
شکل ب) صفحه yZ



شکل ۵-۵ بردارهای سرعت در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H=0.4615$



شکل ۵-۵۷ توزیع ردامین-ب در تانک امبسی (اصلی) با ورودی در تراز $Z/H = 0.923$



شکل ۵-۵۸ توزیع ردامین-ب در تانک امبسی با ورودی در تراز $Z/H = 0.4615$

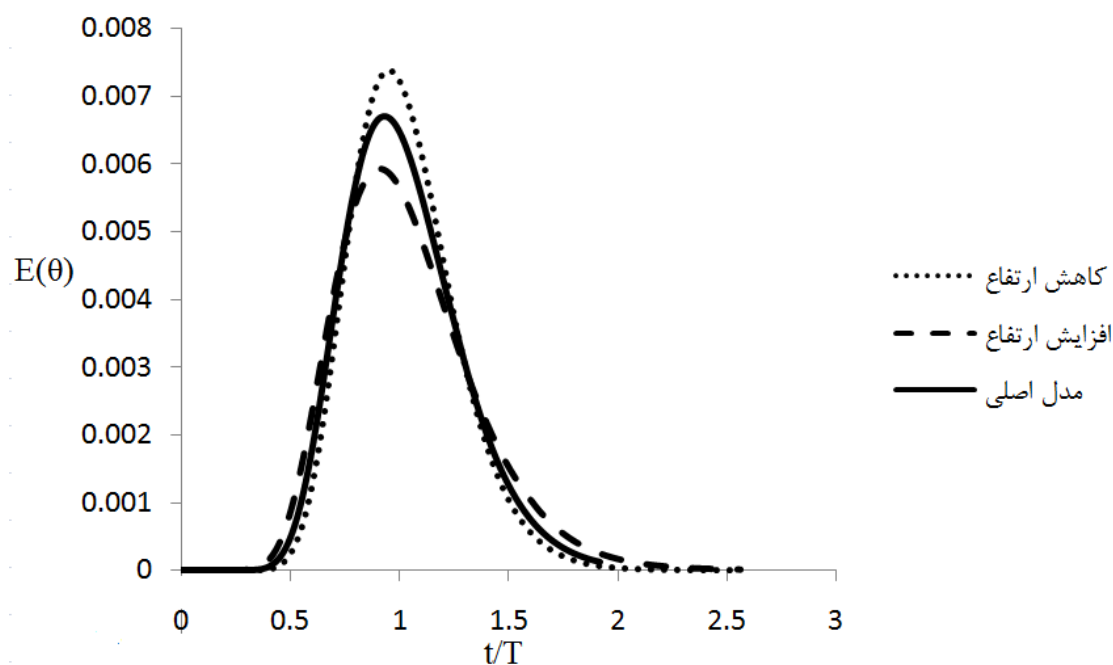
جدول ۴-۵ مهمترین خصوصیات منحنی FTC

اندیس ها	مدل اصلی Z/H=0.923	ورودی در تراز Z/H=0.692	ورودی در تراز Z/H=0.4615
θ_0	۰/۳۷	۰/۳۷۶	۰/۳۸۵
θ_{10}	۰/۷۰۵	۰/۶۹۹	۰/۷۱
$\theta_{75} - \theta_{25}$	۰/۳۵۳	۰/۳۲۶	۰/۳۲۴
$\theta_{90} - \theta_{10}$	۰/۶۷۱	۰/۶۲۱	۰/۶۱۷
θ_{90}/θ_{10}	۱/۹۵۱	۱/۸۸۸	۱/۸۶۹
p	۵۹/۲	۶۱/۹	۶۲
1-p	۴۰/۸	۳۸/۱	۳۸
θ_{max}	۰/۹۳۲	۰/۹۱۹	۰/۹۲۹
θ_{50}	۰/۹۹۳	۰/۹۶۹	۰/۹۸

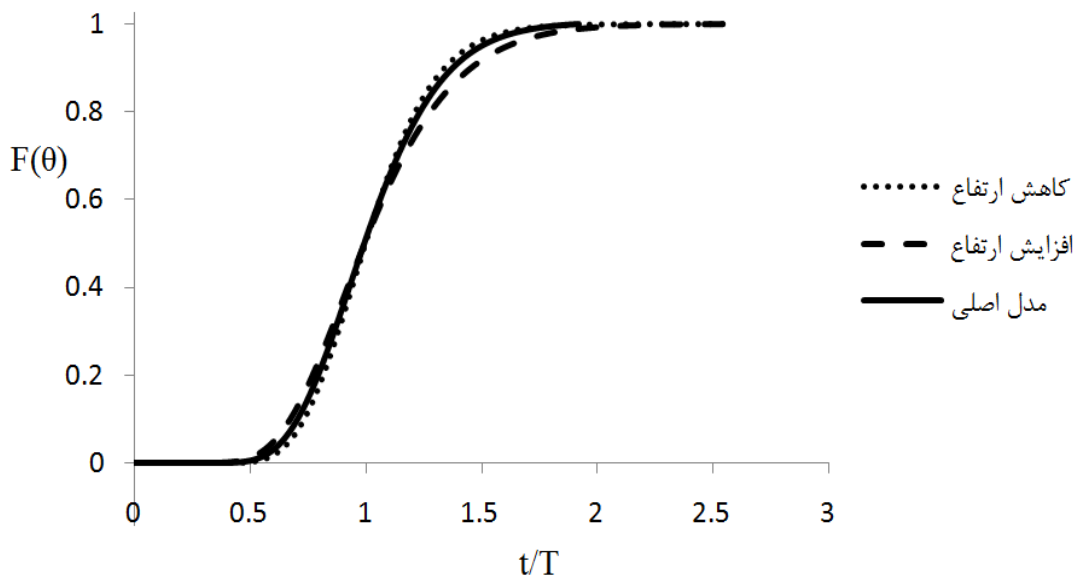
۵-۳-۶- بررسی تاثیر ارتفاع تانک در کارایی هیدرولیکی

در این بخش بمنظور بررسی اثرات افزایش و یا کاهش ارتفاع در کارایی ۲ مدل جدید را مورد بررسی قرار داده ایم. بمنظور مقایسه بین مدلها با مدل اصلی حجم کلی تانک را ثابت نگه داشته ایم. در مدل اول بمنظور افزایش ارتفاع تانک که منجر به افزایش ارتفاع دیواره داخلی می گردد یک محفظه از ۸ محفظه تانک امبسی را حذف کرده و اقدام به افزایش ارتفاع تانک نموده ایم. در این حالت ابعاد تانک برابر است با ۱/۷۴۲۵ متر طول، ۰/۹۳۵ متر عرض و ۰/۶۳۳۴ متر ارتفاع. بدلیل افزایش ارتفاع، حجم دیواره های داخلی تغییر نموده که اثر آن در نهایت در زمان تاخیر تئوری می باشد و برابر با ۷۸۲/۴۷ ثانیه می گردد و در مقایسه با مدل اصلی مقداری از زمان تاخیر تئوری بیشتر می گردد (تقریباً ۲ ثانیه). در مدل دوم با کاهش ارتفاع تانک اقدام به ساخت مدل جدیدی شده است که بدلیل ثابت نگه داشتن حجم تانک یک محفظه به محفظه های مدل اصلی اضافه گردیده شده است. در اینحالت زمان تاخیر تئوری برابر با ۷۷۹/۴ ثانیه می باشد. در هر دو مدل بدلیل ثابت نگه داشتن دبی ورودی، سرعت های ورودی برابر می باشند و روند مدلسازی و استفاده از شرایط مرزی همانند روش مدلسازی در تانک اصلی می باشند. همچنین بمنظور بررسی ردگیر و تولید منحنی های غلظت در خروجی ۵ میلی گرم از ردگیر را در زمان ۱۰ ثانیه در ورودی تانک تزریق نموده ایم. اشکال (۵-۵۹) و (۵-۶۰) منحنی های توزیع حضور [۴۸] و تابع توزیع تجمعی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش ارتفاع دیواره منحنی حضور پهن تر و پایین تر از مدل اصلی می باشد و اندیس موریل برابر است با ۲/۱۵۸ که در مقایسه با مدل اصلی افزایش یافته است و بیان کننده آن است که شرایط از حالت پلاگ دورتر شده است. اما در مدل دوم که با کاهش ارتفاع دیواره و جایگزینی آن با یک دیواره داخلی همراه می باشد، مشاهده می گردد که منحنی توزیع حضور باریکتر و بلند تر گردیده شده است و اندیس موریل در اینحالت برابر است با ۱/۸۲۸

که نشان دهنده بهبود کارایی تانک می باشد. لازم بذکر است همانطور که در شکل مشاهده می گردد زمان رسیدن ماکزیمم های مقادیر منحنی حضور و ترمهای مربوط به اندیس میانبر تقریباً برابر می باشند. بنابراین با کاهش ارتفاع دیواره سرعت متوسط افزایش یافته و باعث اختلاط بهتر در راستای قائم تانک می گردد و با افزودن یک دیواره داخلی کارایی تانک بهبود می یابد که می تواند بیان کننده اثر تعداد دیواره های داخلی در کارایی تانک باشد.



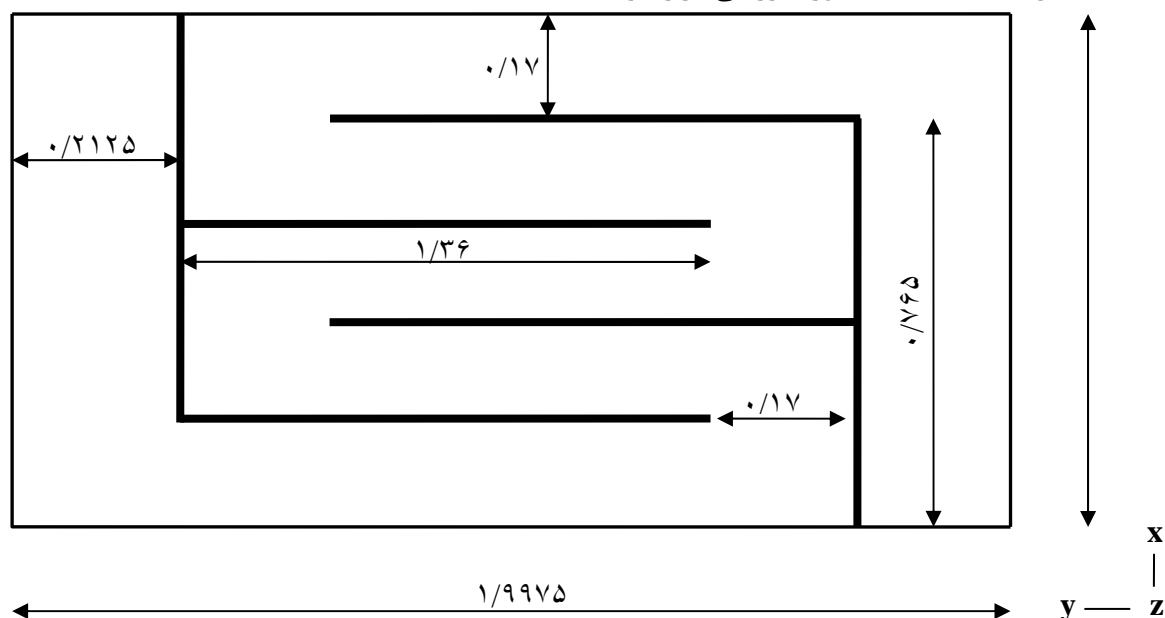
شکل ۵-۵۹ منحنی حضور



شکل ۵-۶۰ تابع توزیع تجمعی

۵-۳-۷- بررسی کارایی تانک تماسی با ساختار جدید از محل قرار گیری دیواره ها

در بخش های پیشین اثر تعداد و محل قرار گیری دیواره های داخلی را در کارایی تانک مشخص و مشاهده گردید که با افزایش تعداد دیواره های داخلی کارایی تانک بهبود می یابد ولی از یک حد مشخص روند بهبود کارایی چشمگیر نمی باشد که در نهایت تانک تماسی امبسی با ۱۰ محفظه می تواند پیشنهاد گردد. اما از آنجائیکه افزایش دیواره ها در تانک تماسی امبسی ممکن است از لحاظ اجرایی و اقتصادی این امکان را تحت الشعاع خود قرار دهد لذا استفاده از تعداد کمتر دیواره های داخلی با ساختار جدید محل قرار گیری و اندیس های کارایی بهتر می تواند گزینه جایگزین مناسبی برای آن باشد. [۴۹][۵۰] همچنین مشخص گردید که قرار گیری دیواره ها در راستای طولی می تواند از کارایی بیشتری در مقایسه با مقادیر متناظر خود در راستای عرضی برخوردار باشد. با توجه به مطالب فوق یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی از تانک امبسی با محل جدید قرار گیری از دیواره ها و با ۶ دیواره داخلی که در شکل (۵-۶۱) نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته است.

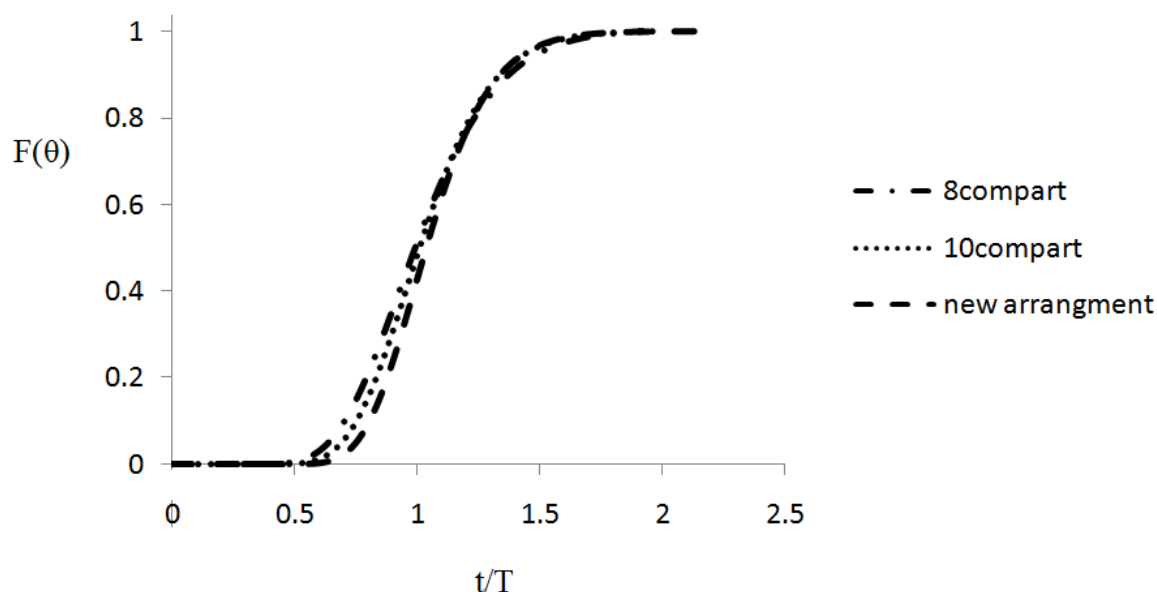


تمام اندازه ها بر حسب متر می باشند

شکل ۵-۶۱ ساختار جدید از تانک تماسی امبسی

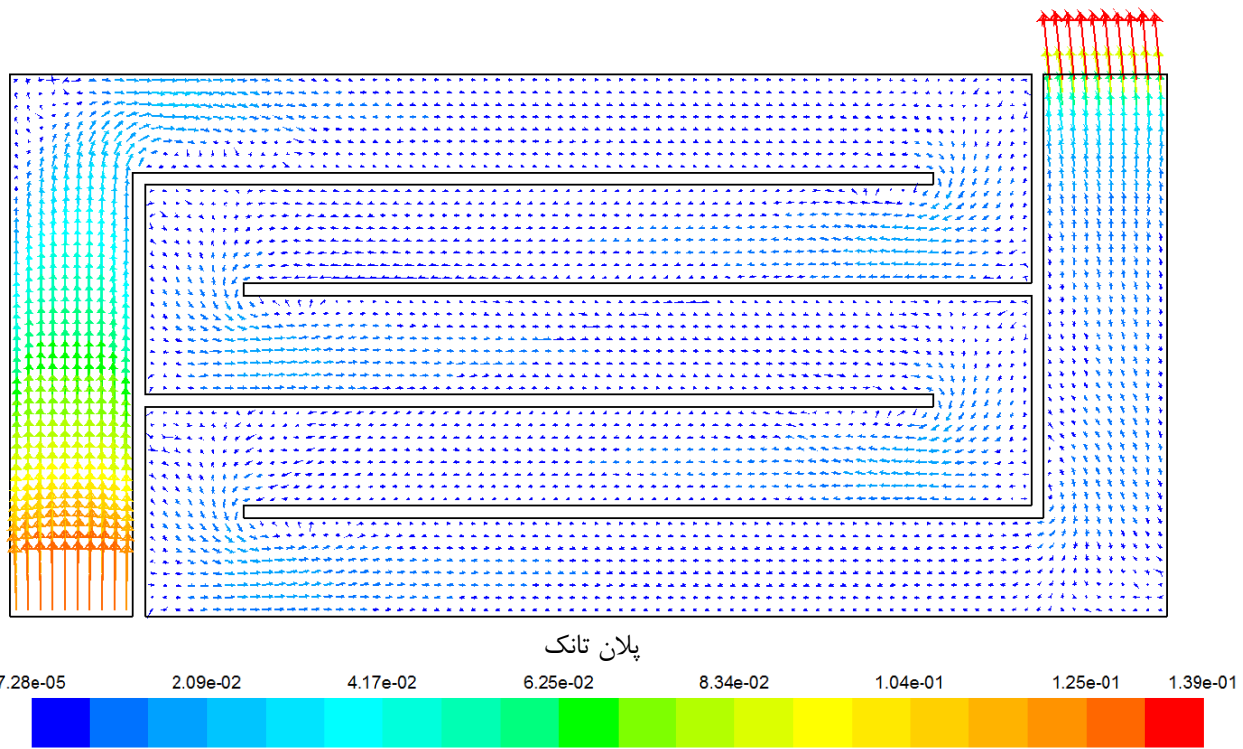
در اینحالت از رد امین-ب بهمان طریقی که در مدل های قبلی استفاده گردید، استفاده شده است. همانطور که در شکل (۵-۶۲) مشاهده می گردد ساختار جدید با ۶ دیواره داخلی دارای مقدار θ_{10} بزرگتر $0/807$ ، و اندیس موریل کمتر $1/653$ ، از مقدار آن در تانک تماسی امبسی و دیگر مدل های آن با تعداد ۹ دیواره داخلی می باشد که بمعنای کاهش نواحی چرخشی در ساختار جدید و بهبود کارایی تانک تماسی می باشد که در شکل (۵-۶۳) بردارهای سرعت را در تراز فوقانی تانک مشاهده می نمایید. این موضوع را

همچنین می توان در شکل (۵-۶۴) می توان مشاهده نمود که مقایسه ای بین منحنی های حضور در مدل اصلی و تعداد بیشتر دیواره ها و مدل جدید مشاهده نمود.

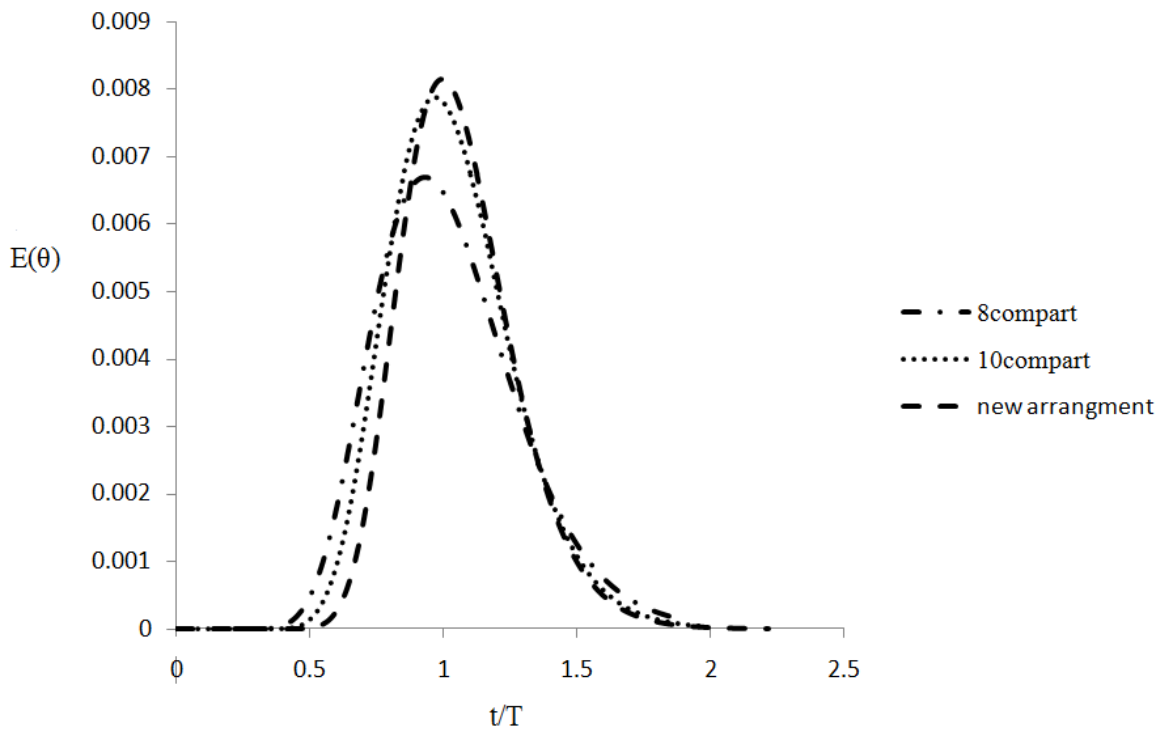


شکل ۵-۶۲ تابع توزیع تجمعی ساختار جدید تانک امبسی

مدل جدید دارای منحنی باریکتر و بلندتر می باشد و همچنین مشاهده می گردد که تغییرات ساختار دیواره های داخلی منجر به جابجایی مقادیر ماکزیمم منحنی های حضور از $t_m/T = 0932$ به $t_m/T = 0993$ می گردد. این مقدار یکی از مشخصه های زمانی کارایی تانک می باشد که مقدار آن در حالت جریان پلاگ برابر با ۱ می باشد و مقادیر بیشتر و یا کمتر از آن بمعنای عدم توزیع یکنواخت جریان در تانک می باشد [۵۱] و در این ساختار جدید مقدار آن به عدد ۱ نزدیکتر می باشد.



شکل ۵-۶۳ بردارهای سرعت تانک تماسی



شکل ۵-۶۴ مقایسه بین منحنی های حضور

فصل

6

نتیجه گیری و پیشنهادات
برای مطالعات آتی

۱-۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل عددی برای جریان و انتقال ردگیر در تانک تماسی ضد عفونی امبسی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. مدل عددی دارای قابلیت مدلسازی جریان آرام و جریان آشفته می باشد که در مدلسازی جریانات آشفته دو روش $k - \varepsilon$ و Mixing length مورد استفاده قرار گرفت. همچنین بمنظور بررسی کارایی تانک مدلسازی انتقال ردگیر در تانک تماسی صورت گرفته است و از اندیس های کارایی استفاده شده که در نهایت نتایج زیر بدست آمده است:

(۱) در این تحقیق جریان حاکم در تانک با توجه به روش عددی معرفی شده مدلسازی گردیده است و مدل عددی معرفی شده بمنظور حل معادلات حاکم دارای ساختار مشابه با روش سیمپلر می باشد. اگرچه میزان ضمنی بودن روش در مقایسه با سیمپلر کمتر می باشد اما نتایج بدست آمده از حل در یک گام زمانی برای دیگر گامهای زمانی مورد استفاده قرار می گیرد و بنابراین سرعت روش عددی بکار رفته از روش سیمپلر بیشتر می باشد. برای جریان آشفته از مدل Mixing length که بعنوان مدل صفر معادله ای و مدل $k - \varepsilon$ که مدل دو معادله ای می باشد استفاده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل های عددی و نتایج آزمایشگاهی حاکی از انطباق قابل قبول بین آنها می باشند.

(۲) استفاده از مدل عددی سه بعدی برای مدلسازی جریانهها در بسیاری از تانکهای تماسی ضروری می باشد. بعنوان مثال در مدل تانک تماسی امبسی جریان دارای ساختار سه بعدی در بعضی از قسمت های تانک می باشد که مدل دو بعدی قادر به مدلسازی چرخشهای قوی در راستای قائم تانک نمی باشند. برای تانک مورد تحقیق چرخشهای قائم در محفظه های ۱ و ۲ مشاهده شده است که مدل های دو بعدی برای مدلسازی مناسب نمی باشند.

(۳) سرعت های اندازه گیری شده در مدل آزمایشگاهی تانک تماسی بسیار کم بوده است و بنابراین مدل جریان آرام نیز علاوه بر مدل های آشفتگی $k - \varepsilon$ و Mixing length جوابهای قابل قبولی را نتیجه داده است و این موضوع نشان دهنده آن است که مدلسازی آشفتگی در مدل آزمایشگاهی تانک تماسی امبسی چندان مهم نبوده است.

(۴) مدلسازی عددی آشفتگی در تانک تماسی امبسی در مقیاس واقعی خود نیز تغییرات چندانی در نتایج بوجود نیاورده است و این نتیجه نشان می دهد که مدل مقیاس شده آزمایشگاهی می تواند بیانگر خصوصیات تانک تماسی با اندازه واقعی خود باشد. اگرچه مقادیر لزجت ادی آشفته در مقیاس واقعی تقریباً ۱۷ برابر مقادیر متناظر آن در مدل آزمایشگاهی شده است اما این افزایش در حدی نبوده است که باعث تغییر در ساختار جریان گردد و ترمهای انتقال و گرادیانهای فشار ترمهای غالب از فرآیندهای هیدرودینامیکی در تانک می باشند.

- (۵) بمنظور بررسی دقیقتر از صحت نتایج بدست آمده از میدان جریان توسط مدل عددی اقدام به مدلسازی ردگیر بقایی در تانک تماسی شده است و نتایج بدست آمده از آن را با نتایج ارائه شده توسط تگزیرا [۱۱] مورد مقایسه قرار داده ایم که از انطباق قابل قبولی بین آنها برخوردار می باشد دلایل اختلاف اندک مشاهده شده در جوابها را می توان ناشی از خطاهای موجود در روش عددی و همچنین اندازه گیری غلظت در آزمایشگاه دانست.
- (۶) بمنظور بررسی اثر تعداد دیواره های داخلی پنج مدل عددی جدید را مدلسازی نموده ایم. در تمام مدلها اندازه تانک و دبی ورودی و ارتفاع سرریز را ثابت نگه داشته تا بتوان مقایسه ای بین مدل اصلی با مدلهای جدید صورت پذیرد. همچنین بمنظور تعیین کارایی از اندیس های کارایی استفاده شده است. اگرچه اندیس های کارایی بطور مستقیم نمی تواند میزان ضد عفونی در تانک را نشان دهند اما بیان کننده خصوصیات هیدرولیکی موجود در تانک می باشند. مشاهده گردید که با افزایش تعداد دیواره های داخلی از میزان جریانهای چرخشی در طول تانک کاسته شده و جریان را به حالت پلاگ نزدیکتر می نماید اما افزایش بیش از یک حد معین، روند بهبود کارایی چشمگیر نمی باشد و لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه مشخص گردید و در نهایت تانک امبسی با ۹ دیواره داخلی پیشنهاد گردیده شده است.
- (۷) همچنین بمنظور تاثیر محل قرار گیری دیواره ها در کارایی تانک سه مدل عددی جدید مورد بررسی قرار گرفت بنحوی که دیواره های داخلی در راستای طولی تانک قرار گرفته اند. نتایج بدست آمده از میدان جریان و اندیس های کارایی نشان داده است که کارایی تانک در این حالت بهبود چشمگیری در مقایسه با مقادیر متناظرشان در حالت قبل داشت و مشخص گردید که در این حالت بعلت کاهش چرخش در تانک جریان به حالت پلاگ نزدیکتر می گردد و برای تانک تماسی امبسی قرار گیری دیواره ها در طول تانک می تواند میزان کارایی آن را افزایش دهد.
- (۸) بمنظور بررسی محل قرار گیری ورودی در کارایی تانک دو مدل جدید با ورودی در ترازهای $Z/H=0.4615$ و $Z/H=0.692$ در نظر گرفته شد و مشخص گردید که با جابجایی ورودی از نیمه بالایی تانک به میانه های تانک توزیع غلظت در محفظه اول یکنواخت تر می گردد و این موضوع می تواند در توزیع یکنواخت تر آن در بقیه محفظه ها و در نهایت در خروجی تانک کمک نماید. نتایج بدست آمده نیز موید همین موضوع بوده است اما با توجه به اینکه جریان در مسیر ورودی به خروجی تانک به حالت پلاگ نزدیک می گردد بنابراین علیرغم عدم توزیع یکنواخت در محفظه اول، توزیع ردگیر در محفظه های بعدی یکنواخت تر شده و میزان اثر پذیری تغییر محل ورودی تانک چندان نبوده. بهبود کارایی چشمگیر نمی باشد.
- (۹) بمنظور بررسی تاثیر ارتفاع در کارایی تانک تماسی امبسی دو مدل جدید را مورد بررسی قرار داده ایم در مدل اول با ثابت نگه داشتن حجم کلی تانک اقدام به افزایش ارتفاع تانک نموده و در

مدل دوم نیز با همین فرضیه ارتفاع تانک را کاهش داده ایم که با کاهش ارتفاع و ثابت نگه داشتن حجم کلی تانک، یک دیواره به دیواره های داخلی تانک افزوده گردید. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع، منحنی حضور پهن تر و پایین تر از مدل اصلی قرار گرفته و اندیس موریل برابر با $2/158$ شده که در مقایسه با مدل اصلی از کارایی تانک کاسته شده است. اما در مدل دوم شاخص کارایی بهتر شده و منحنی حضور به حالت پلاگ نزدیکتر شده است که نشان دهنده آن است که با کاهش ارتفاع دیواره، سرعت متوسط افزایش یافته و باعث اختلاط بهتر در استای قائم می گردد و با افزودن یک دیواره داخلی کارایی تانک بهبود می یابد که می تواند بیان کننده مجدد اثر تعداد دیواره داخلی در کارایی تانک باشد.

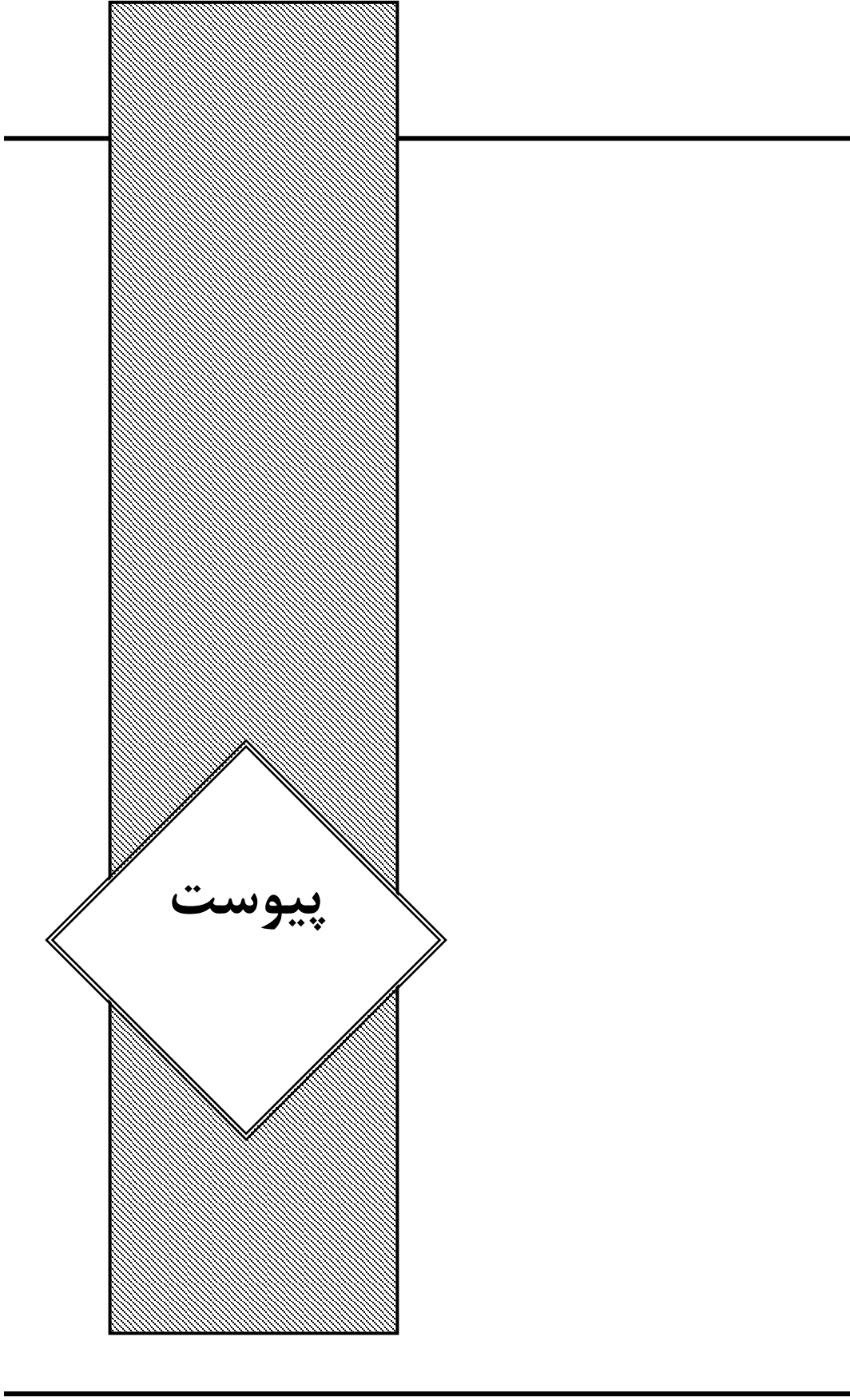
۱۰) با توجه به اثر تعداد دیواره ها و محل قرار گیری آنها در کارایی تانک مشخص گردید اگرچه افزایش تعداد دیواره می تواند در بهبود کارایی موثر باشد اما افزایش آنها از یک حد معین بلحاظ مسائل اجرایی ممکن است میسر نباشد و از طرفی قرار گیری دیواره در طول تانک می تواند در بهبود شاخص های کارایی تاثیر گذار باشد بنابراین اقدام به تولید یک مدل عددی گردیده است که از لحاظ تعداد کمتر از مقادیر فوق بوده (شش عدد) و محل قرار گیری آنها بنحوی بوده است که در ایجاد شرایط پلاگ کمک نماید. با آنالیز مدل جدید مشخص گردید که اندیس های کارایی در مقایسه با مدل اصلی و مدل با نه دیواره داخلی بهتر شده است که بمعنای کاهش نواحی چرخشی در ساختار جدید و بهبود کارایی تانک از لحاظ عملکرد می باشد. مدل پیشنهادی دارای منحنی باریکتر و بلندتر می باشد و همچنین مشاهده گردید که مشخصه های زمانی کارایی تانک بهبود یافته است که در نهایت می توان مدل را برای تانک تماسی امبسی پیشنهاد نمود.

۲-۶- پیشنهادات

بمنظور مطالعات بیشتر در آینده موارد زیر پیشنهاد می گردد:

- ۱) استفاده از شبکه های بی سازمان، بمنظور کاربرد در تانک های نامنظم مانند تانک های دایره ای مفید می باشد. در این تحقیق یک تانک تماسی ساخته شده منظم مورد تحقیق قرار گرفت که شکل تانک استفاده از مش های منظم را مقذور ساخته است اما بطور کلی تانکهای تماسی دیگر (مانند دایره ای شکل) وجود دارد که استفاده از مش های نامنظم مناسب تر می باشد.
- ۲) استفاده از دیگر مدل های آشفتگی مانند LES بمنظور تعیین میدان جریان. مدل LES از لحاظ برنامه نویسی آسانتر از مدل $k - \epsilon$ می باشد اما از لحاظ زمان محاسباتی کمتر می باشد زیرا که این مدل نیاز به شبکه های ریزتر دارد. استفاده از این مدل می تواند در پیش بینی میدان جریان کمک نماید.

- (۳) مطالعات بیشتر در مورد مدل عددی از لحاظ اعتبار مدل و کالیبره کردن آن مفید می باشد. مدل عددی می بایست برای دیگر تانکهای تماسی مورد استفاده قرار گیرد و حساسیت پارامترهای مربوط به مدلسازی مورد تدقیق قرار بگیرد.
- (۴) مدل‌های آزمایشگاهی بیشتری با ساختارهای مختلف از دیواره ها و جریان می بایست ساخته و مورد مطالعه قرار بگیرد تا از این طریق اطلاعات کافی بمنظور صحت عملکرد مدل عددی برای کاربرد بیشتر در اندازه های مختلف تانک و محل قرار گیری ورودی و خروجی و غیره در اختیار قرار گیرد.
- (۵) با مدلسازی واقعی از فرآیند ضد عفونی و بهینه کردن میزان کلر در خروجی تانک می توان اطلاعات مفید از کارایی تانک در اختیار داشت و با توجه به آن اقدام به تولید مدل عددی بمنظور پیش بینی فرآیند ضد عفونی در تانک های تماسی کلرین نمود.



پیوست الف: ایجاد هندسه شبکه در نرم افزار گمبیت

volume create width 0.9361 depth 1.9943 height 0.5525 offset 0.46805 0.99715 ۰.۲۷۶۲۵ \ brick

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.1" offset 0 0.1628 0 axis1 "x" \ "angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset 0.3663 0.02035 ۰.۲۷۶۲۵ \ brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.2" offset 0.9361 0.2035 0 axis1 "\ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset -0.3663 0.02035\0.27625 brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.3" offset -0.9361 0.2035 0 axis1" \ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset 0.3663 0.02035\ 0.27625 brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.4" offset 0.9361 0.2035 0 axis1" \x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset -0.3663 0.02035\ 0.27625 brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.5" offset -0.9361 0.2035 0 axis1" \ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset 0.3663 0.02035\ 0.27625 brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.6" offset 0.9361 0.2035 0 axis1" \ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset -0.3663 0.02035\ 0.27625 brick

volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"

coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.7" offset -0.9361 0.2035 0 axis1"x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z" angle3 0 rotation

```

volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset 0.3663 0.02035\ 0.27625 brick
volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"
coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.8" offset 0.9361 0.2035 0 axis1"\ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z"
angle3 0 rotation
volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset -0.3663 0.02035
volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"
coordinate create cartesian oldsystem "c_sys.9" offset -0.9361 0.2035 0 axis1"\ x" angle1 0 axis2 "y" angle2 0 axis3 "z"
angle3 0 rotation
volume create width 0.7326 depth 0.0407 height 0.5525 offset 0.3663 0.02035\ 0.27625 brick
volume subtract "volume.1" volumes "volume.2"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0.1628 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 1.9943 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 1.8315 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
face split "face.3" virtual vertices "vertex.155" "vertex.156" tolerance\  e-05
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0.0407 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"

```

```

vertex create coordinates 0 0.0407 0.5525
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0.0814 0.5525
coordinate activate "c_sys.10"
vertex create coordinates 0 0.0814 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0.1221 0.5118
coordinate activate "c_sys.10"
coordinate activate "c_sys.1"
vertex create coordinates 0 0.1221 0.5525
coordinate activate "c_sys.10"
face split "v_face.83" virtual vertices "vertex.161" "vertex.162" tolerance\ \ e-05
face split "v_face.90" virtual vertices "vertex.160" "vertex.159" tolerance\ \ e-05
face split "v_face.92" virtual vertices "vertex.157" "vertex.158" tolerance\ \ e-05
edge picklink "edge.25" "edge.27" "edge.34" "edge.32" "edge.48" "edge.50\ "
" edge.53" "edge.55" "edge.69" "edge.71" "edge.78" "edge.76" "edge.92\ "
" edge.94" "edge.99" "edge.97" "edge.115" "edge.113" "edge.122" "edge.120\ "
" edge.136" "edge.138" "edge.143" "edge.141" "edge.157" "edge.159\ "
" edge.180" "edge.182" "edge.164" "edge.166" "edge.185" "edge.187\ "
" edge.201" "edge.203" "edge.208" "edge.210" "edge.4" "edge.12" "edge.9\ "
" edge.1"
edge mesh "edge.1" "edge.12" "edge.4" "edge.210" "edge.208\ "
" edge.203" "edge.201" "edge.187" "edge.185" "edge.166" "edge.164\ "
" edge.182" "edge.180" "edge.159" "edge.157" "edge.141" "edge.143\ "

```

" edge.138"edge.120" "edge.122" "edge.113" "edge.115" "edge.97\ "

" edge.99" "edge.94" "edge.92" "edge.76" "edge.78" "edge.71" "edge.69\ "

" edge.55" "edge.53" "edge.50" "edge.48" "edge.32" "edge.34" "edge.27\ "

" edge.25" successive ratio1 1 size 0.0407

edge picklink "edge.207" "edge.163" "edge.119" "edge.75" "edge.11" "edge.56\ "

" edge.100" "edge.144" "edge.188"

edge mesh "edge.188" "edge.144" "edge.100" "edge.56" "edge.11" "edge.75\ "

" edge.119" "edge.163" "edge.207" successive ratio1 1 size 0.0407

edge picklink "edge.3" "edge.179" "edge.135" "edge.91" "edge.47" "edge.160\ "

" edge.116" "edge.72" "edge.28"

edge mesh "edge.28" "edge.72" "edge.116" "edge.160" "edge.47" "edge.91\ "

" edge.135" "edge.179" "edge.3" successive ratio1 1 size 0.0407

edge picklink "edge.10" "v_edge.216" "edge.204"

edge mesh "edge.204" "v_edge.216" "edge.10" successive ratio1 1 size 0.0407

edge mesh "edge.2" successive ratio1 1 size 0.0407

edge picklink "edge.8" "v_edge.217" "edge.205" "edge.196" "edge.194\ "

" edge.184" "edge.183" "edge.173" "edge.171" "edge.162" "edge.161\ "

" edge.152" "edge.150" "edge.140" "edge.139" "edge.129" "edge.127\ "

" edge.118" "edge.117" "edge.108" "edge.106" "edge.96" "edge.95" "edge.85\ "

" edge.83" "edge.74" "edge.73" "edge.64" "edge.62" "edge.41" "edge.39\ "

" edge.30" "edge.20" "edge.18" "edge.52" "edge.51" "edge.6"

edge mesh "edge.6" "edge.51" "edge.52" "edge.18" "edge.20" "edge.30\ "

" edge.39" "edge.41" "edge.62" "edge.64" "edge.73" "edge.74" "edge.83\ "

" edge.85" "edge.95" "edge.96" "edge.106" "edge.108" "edge.117" "edge.118\ "

" edge.127" "edge.129" "edge.139" "edge.140" "edge.150" "edge.152\ "

" edge.161" "edge.162" "edge.171" "edge.173" "edge.183" "edge.184\ "

```

" edge.194" "edge.196" "edge.205" "v_edge.217" "edge.8" successive ratio1 1\
size 0.0407
edge picklink "v_edge.215" "v_edge.213"
edge mesh "v_edge.213" "v_edge.215" successive ratio1 1 size 0.0407
edge picklink "v_edge.212" "v_edge.226" "v_edge.221\ "
" v_edge.214" "v_edge.222" "v_edge.224" "v_edge.227" "v_edge.229\ "
" v_edge.234" "v_edge.232" "v_edge.233" "v_edge.235"
edge mesh "v_edge.235" "v_edge.233" "v_edge.232" "v_edge.234" "v_edge.229\ "
" v_edge.227" "v_edge.224" "v_edge.222" "v_edge.214" "v_edge.221\ "
" v_edge.226" "v_edge.231" "v_edge.212" successive ratio1 1 size 0.0407
volume mesh "v_volume.2" submap size 1
physics create "lid" btype "WALL" face "v_face.89"
physics create "outlet" btype "PRESSURE_OUTLET" face "v_face.87"
physics create "inlet" btype "VELOCITY_INLET" face "v_face.91" "v_face.94"
physics create "concentration" btype "VELOCITY_INLET" face "v_face.93"
physics create "concentration" btype "VELOCITY_INLET" face "v_face.95"
physics modify "concentration" btype label "concentration3" face "v_face.93"
physics modify "new_concentration" btype label "concentration2" face\ " v_face.95"
export fluent5 "default_id5260.msh"

```

پیوست ب: مدلسازی جریان و ردگیر در نرم افزار فلونت

file read " compart.msh"

grid check

define materials change-create air water yes constant 1000 no no yes constant .001 no yes no no no no no

define materials change-create water rodamin no no no no no no yes no no no no

define models species no mixture-template inlet-diffusion yes no

define materials change-create mixture-template mixture-template no 2 rodamin water 0 0 no no no no yes constant-dilute-appx 1 .0015 no no

define operating-conditions gravity yes 0 0 -9.81

define boundary-conditions velocity-inlet concentration2 no yes yes yes no .1765 no 0 no 0 no 300 no 0

define boundary-conditions velocity-inlet concentration3 no yes yes yes no .1765 no 0 no 0 yes 300 no 0

define boundary-conditions velocity-inlet inlet yes yes yes yes no .1765 no 0 no 0 no 300 no 0

define boundary-conditions wall lid 0 no 0 no no no 0 no yes motion-bc-moving no yes no 1 1 1 0 no yes

define boundary-conditions wall wall 0 no 0 no no no 0 no no no yes

define boundary-conditions fluid fluid no no yes 0 0 0 0 0 0 no no

define boundary-conditions pressure-outlet outlet no 0 no 300 no yes no 0 no yes

surface point-surface p-1 0.46805 0.0814 0.48875

surface point-surface p-2 0.46805 0.2849 0.48875

surface point-surface p-3 0.46805 0.4884 0.48875

surface point-surface p-4 0.46805 0.6919 0.48875

surface point-surface p-5 0.46805 0.8954 0.48875

surface point-surface p-6 0.46805 1.0989 0.48875

surface point-surface p-7 0.46805 1.3024 0.48875

surface point-surface p-8 0.46805 1.5059 0.48875

surface point-surface p-9 0.46805 1.7094 0.48875

surface point-surface p-10 0.46805 1.9129 0.48875

surface point-surface p-11 0.02035 1.9129 0.53215

define models viscous ke-standard no

solve set equations yes ke no temperature no

solve monitors residual plot yes

solve initialize compute-defaults velocity-inlet outlet

solve iterate 200

surface iso-surface y-coordinate compart-1 () () 0.0814()

surface iso-surface y-coordinate compart-2 () () 0.2849()

surface iso-surface y-coordinate compart-3 () () 0.4884()

surface iso-surface y-coordinate compart-4 () () 0.6919()

surface iso-surface y-coordinate compart-5 () () 0.8954()

surface iso-surface y-coordinate compart-6 () () 1.0989()

surface iso-surface y-coordinate compart-7 () () 1.3024()

surface iso-surface y-coordinate compart-8 () () 1.5059()

surface iso-surface y-coordinate compart-9 () () 1.7094()

surface iso-surface y-coordinate compart-10 () () 1.9129()

define user-defined interpreted "initial.c" "cpp" 10000 no

define boundary-conditions velocity-inlet concentration2 no no no yes no .1765 no 0 no 0 no 300 yes no 1 no 1 yes
"udf" "transport"

define models unsteady-1st-order yes

solve set equations flow no ke no species-0 yes temperature no

solve monitors surface set-monitor monitor-1 "Vertex Average" rodamin p-1 () yes 1 no yes "compart-1" 1 yes time-
step

solve monitors surface set-monitor monitor-2 "Vertex Average" rodamin p-2 () yes 2 no yes "compart-2" 1 yes time-
step

solve monitors surface set-monitor monitor-3 "Vertex Average" rodamin p-3 () yes 3 no yes "compart-3" 1 yes time-
step

solve monitors surface set-monitor monitor-4 "Vertex Average" rodamin p-4 () yes 4 no yes "compart-4" 1 yes time-
step

solve monitors surface set-monitor monitor-5 "Vertex Average" rodamin p-5 () yes 5 no yes "compart-5" 1 yes time-
step

solve monitors surface set-monitor monitor-6 "Vertex Average" rodamin p-6 () yes 6 no yes "compart-6" 1 yes time-
step

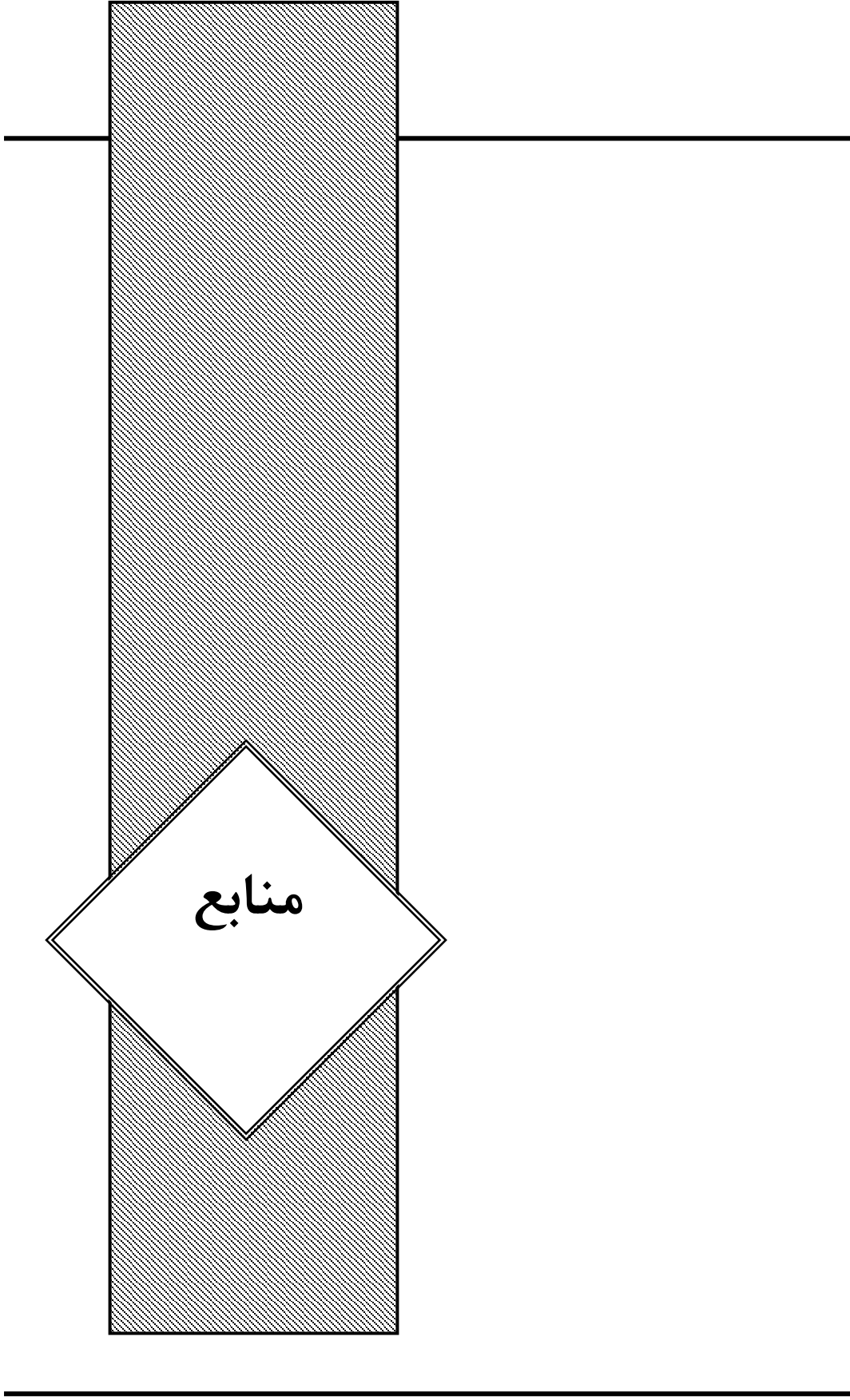
solve monitors surface set-monitor monitor-7 "Vertex Average" rodamin p-7 () yes 7 no yes "compart-7" 1 yes time-step

solve monitors surface set-monitor monitor-8 "Vertex Average" rodamin p-8 () yes 8 no yes "compart-8" 1 yes time-step

solve monitors surface set-monitor monitor-9 "Vertex Average" rodamin p-9 () yes 9 no yes "compart-9" 1 yes time-step

solve monitors surface set-monitor monitor-10 "Vertex Average" rodamin p-10 () yes 10 no yes "compart-10" 1 yes time-step

solve monitors surface set-monitor monitor-11 "Vertex Average" rodamin p-11 () yes 11 no yes "outlet" 1 yes time-step



- [1] Gyurek L.L. and Finch G.R.(1998), “Modeling water treatment chemical disinfection kinetics”, *Journal of Environmental Engineering ASCE*, 124 (9),783-793
- [2] Piecuch, P.J.,(1974),“The chlorination controversy”, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Editorial, Vol.46, No.12, pp. 2637
- [3] McNaughton, J.C. and Gregory, R.,(1977),“Disinfection by chlorination in contact tanks”, *Technical Report TR60*, Water Research Centre, UK
- [4] Collins, H.F. and Deaner, D.G.,(1973), “Sewage chlorination versus toxicity – a dilemma?”, *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, Vol. 99, No. EE6, pp. 761-772
- [5] Wang H., Shao X. and Falconer R.A.(2003), “Flow and transport simulation models for prediction of chlorine contact tank flow-through curves”, *Water Environment Research*, **75** (5), 455-471
- [6] Hannoun I.A., Boulos P.F. and List E.J.(1998), “Using hydraulic modelling to optimize contact time”, *Journal of America Water Works Association (AWWA)*, August, 77-87,
- [7] Greene D.J.(2002), “Numerical simulation of chlorine disinfection process in non-ideal reactors”, *PhD Dissertation*, Drexel University, U.S.A.
- [8] Stamou, A.I.(1994) “Evaluating the effect of inlet arrangement in settling tanks using the hydraulic efficiency diagram”, *Water SA*.vol.20 No. 1 january,77-84
- [9] Rodi,(1993), “Turbulence Models and Their Application in Hydraulics—A State-of-the-Art Review”, 3rd ed., A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield
- [10] Ta C.T. and Brignal W.J.(1998), “Application of computational fluid dynamics technique to storage reservoir studies”, *Water Science Technology*, 37, 2, 219-226
- [11] Teixeira, E.C.,(1993), “Hydrodynamic processes and hydraulic efficiency of chlorine contact”, *PhD Thesis*, University of Bradford, Bradford, UK, pp. 260
- [12] Falconer, R.A. and Tebbutt, T.H.Y,(1986), “A theoretical and hydraulic model study of a chlorine contact tank”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 81, No.2, pp. 255-276
- [13] Elder, J.W.,(1959), “The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 544-560
- [14] William B, Roger A. Falconer(2008),” CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows” *Chemical Engineering Journal* 137, 550–560
- [15] Texeira E.C. and Shiono K.(1992), “An investigation of the hydraulic behaviour of a chlorine contact tank”, *Proceedings of 6th International Symposium on application of laser*

techniques to fluid mechanics and Workshop on computers in flow measurements, Lisbon, Portugal

[16] Shiono K. and Texeira E.C.(2000),“Turbulent characteristics in a baffled contact tank”, Journal of Hydraulic Research (JHR), 38 (6), 403-416

[17] L.A. Khan, E.A.Wicklein, E.C. Teixeira.(2006), “Validation of a three-dimensional computational fluid dynamics model of a contact tank”, J. Hydraul. Eng. 132(7) ,741–746

[18] Falconer, R.A.,(1990), “Engineering problems and the application of mathematical models relating to combating water pollution”, Municipal Engineer, Vol. 7, No. 6, pp. 281-291

[19] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W.,(1995), “An introduction to computational fluid dynamics”, Longman Group Ltd, pp. 257

[20] Liepman,H.(1918),“Die angenaherte ermittebung harmonischer functionen and konformer abbildungen,” Bayer. Akad. Wiss., Math.-phys. Klasse, Sitz

[21] Thom, A.(1933), “The flow past circular cylinders at low speeds,” Proceedings of the Royal Society of London”, A141, pp.651-666.

[22] Shortley, G.H. and Weller, R.,(1938), “The numerical solution of Laplace’s equation”, Journal of Applied Physics, Vol. 9, pp. 334-348

[23] Peaceman, D.W. and Rachford, H.H., Jr.,(1955), “The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations”, Journal of the Society for .Industrial and Applied Mathematics, Vol.3, No.1, March, 1955, pp. 28-41.

[24] Patankar, S. V. and Spalding, D.B.(1972), “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1787

[25] Anderson, D.A., Tannehill, J.C. and Pletcher, R.H.,(1997), “Computational fluid mechanics and heat transfer”, Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 792

[26] Jang, D.S., Jetli, R. and Acharya, S.(1986), “Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLEC algorithms for the treatment of the pressure-velocity coupling in steady flow problems”, Numerical Heat Transfer, Vol. 19, pp. 209-228

[27] Meurant, G.,(1999), “Computer solution of large linear systems”, Elsevier Science Ltd., Netherlands, pp. 753

[28] Falconer, R.A. and Liu, S.Q.,(1988), “Modelling solute transport using the QUICK scheme”, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 114, No.1, pp. 209-228

[29] Falconer, R.A. and Ismail, A.I.B.,(1997), “Numerical modelling of tracer transport in a contact tank”, Environment International, Elsevier Sciences Ltd., Vol.23, No.6, pp. 763-773

- [30] Wang H. and Falconer R.A.(1998),“Numerical modelling of flow in chlorine disinfection tanks”,*Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 124 (9), 918-931
- [31] Hannoun I.A. and Boulos P.F.(1997), “Optimizing distribution storage water quality: a hydrodynamic approach”, *Journal of Applied Mathematical Modeling*, 21, 495-502,
- [32] Wang H. and Falconer R.A.(1998),“Simulating disinfection processes in chlorine contact tanks using various turbulence models and high-order accurate difference schemes”, *Water Research*, 32 (5), 1529-1543
- [33] Gualtieri C.(2006).“Numerical simulation of RTD in contact tanks with Comsol Multiphysics 3.2b”. *Comsol Users Conference 2006*, Milan, Italy, November 14
- [34] Gualtieri C.(2006) “Numerical simulations of flow and tracer transport in a disinfection contact tank”. *iEMSs 2006*, Burlington, Vermont, USA, July 9/12
- [35] Stamou, A.I.(2008) “Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models”, *Chemical Engineering and Processing*,47, 1179-1189
- [36] Kan LA,Wicklein EA, Teixeira EC.(2006)“Validation of a three-dimensional computational fluid dynamics model of a contact tank”. *Journal of Hydraulic E*; 132(7):741–746.
- [37] Gualtieri C. ,(2007),”Analysis of the Effect of Baffles Number on a Contact Tank Efficiency with Multiphysics 3.3” , Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007 Grenoble
- [38] Guichan Zhang, Binliang Lin and Roger A. Falconer,(2000),” Modelling disinfection by-products in contact tanks”,*Journal of Hydroinformatics*
- [39] Schlichting, H., (1979), “Boundary-layer theory”, McGraw-Hill Book Company, New York, pp.747
- [40] Falconer, R.A.,(1988), “Flow and sediment transport modelling in the Humber estuary”, *Proceedings of Humber Ecosystem Conference*, Institute of Estuarine and Coastal Studies, Hull, UK, pp. 19-29
- [41] Baldwin, B.S. and Lomax, H.,(1978), “Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flow”, *AIAA*, pp.78-257
- [42] Abbott, M.B. and Basco,D.R.,(1997),“Computational fluid dynamics – an introduction for engineers”, Longman Scientific and Technical, Harlow, pp. 425
- [43] Fletcher, C.A.J.,(1991),“Computational techniques for fluid dynamics: vol. I, fundamental and general techniques”, Springer-Verlag, London, pp. 401
- [44] Hoffmann,A and Chiang,T “Computational Fluid Dynamic for Engineering” volume one

[45] Fluent6.3 user guide ,(2006)

[46] FLUENT 6.3 UDF Manual,(2006)

[47] Mahas S.Baawain.(2006)”Computational fluid dynamics applications in modeling and improving the performance of a storage reservoir used as a contact chamber for microorganism inactivation” Journal of Environmental Engineering and science ,Mar,5,2;Academic Research Library pg.151

[48] Eran Friedler.(2010).” Performance of UV disinfection and the microbial quality of greywater effluent along a reuse system for toilet flushing” Science of the Total Environment 408 ,2109–2117

[49] Anastasios I. Stamou.(2002).” Verification and application of a mathematical model for the assessment of the effect of guiding walls on the hydraulic efficiency of chlorination tanks” Journal of hydroinformatic, 245-254

[50] M.H. Vakili.(2009).” CFD analysis of turbulence in a baffled stirred tank, a three-compartmentmodel” Chemical Engineering Science , 351 – 362

[51] L.E. Liem.(1999).” Residence time distribution analysis as related to the effective contact time” Can. J. Civ. Eng. 26: 135–144

Abstract

A three-dimensional numerical model has been developed to simulate flow and tracer transport processes in disinfection contact tanks. The model has two options, i.e. for laminar and turbulent flow, which for turbulent flow is based on the time dependent Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, with a hydrodynamic pressure distribution being incorporated in the model. The used numerical method for solving equations is similar to that of MAC structures. For modeling of the water surface, the rigid lid approximation was considered. Two methods were used for simulation of turbulence. The first method involves prandtl's mixing length with zero equation and second method was the widely used $k - \epsilon$ model. The model was applied to laboratory model of Emsay contact tank, which is operated by Yorkshire Water. The results showed good agreement between numerical and experimental data. For model efficiency the computer code were developed for conservative tracer transport in which advection and diffusion terms were considered. Different configuration of baffling and also the inlet arrangement were analyzed and their efficiency indexes were computed. Results showed that the tank efficiency was highly dependent upon the baffle structure. Finally the new configuration was proposed which outperforms other previous numerical model considering better efficiency index.

Keywords: disinfection, three dimensional turbulence modeling, finite difference, Hydrodynamic pressure, efficiency indexes, chlorine contact tanks



Shahrood University of Technology
Department of Civil and Architecture

Investigation of Disinfection contact tank

Reza Taghipour

Supervisor:

Ramin Amini

Date:6/1/2011