

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : مکانیک

گروه : مکانیک

شبیه سازی جریان سیال در یک مخزن با سطح زیرین متحرک به روش کسر حجمی

دانشجو : علیرضا خوئینی پورفر

اساتید راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان

استاد مشاور:

دکتر علی جباری مقدم

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۸۸

تقدیم به روح پدرم

تشکر و قدردانی

ستایش شایسته ذات بی همتای آن عزیز مهربان است و تقدیر سزاوار هر آنچه و هر آنکه جلوه گاهی از لطف و محبت اوست. خدا را شاکرم که به من این توان را داد که این مرحله از زندگی را نیز با سلامتی و سربلندی پشت سر بگذارم و سر بر آستان پاک و پر برکت او می سایم که هر چه عزت و نیرو و سرافرازی هست، از اوست. پس از خدای بلند مرتبه، سر تعظیم در برابر مادرم فرود می آورم، بر پایش بوسه می زنم و او را می ستایم که تجلی مهر و لطف خداوندی برای من می باشد و نیز تشکر و قدردانی از برادرم و خواهرم که سپاسگذار آنان تا ابد خواهم بود.

از زحمات بی دریغ اساتید ارجمند و گرامی، جناب آقای دکتر شاه مردان، دکتر جباری مقدم که در مدت زمان تدوین این اثر، همواره مرا یاری و پشتیبانی نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و فراموش نمی کنم که سپاسگزار همچون استادانی هستم که اندیشیدن را به من آموختند و اندیشه ها را.

علیرضا خوئینی پورفر

بهمن ۱۳۸۸

چکیده

در این پایان نامه جریان سیال درون حفره و جریان سیال با سطح آزاد در یک مخزن با سطح زیرین متحرک در حالت دوبعدی بررسی شده است. بدلیل دقت و سرعت بالای همگرایی از روش کسر حجمی استفاده گردیده است. ابعاد مخزن به کار رفته متر ۱×متر ۱ و تعداد مش ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. سیال در مخزن برای حالت‌های آرام و آشفته مورد مطالعه و کانتورهای جریان در بازهای زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و موقعیت و محل گردابها مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهند که جریان حالت آرام در مدت زمان کمتری نسبت به جریان در حالت آشفته به حالت دائمی می‌رسد و چرخشهای ایجاد شده در جریان آرام نسبت به حالت آشفته متقارن تر است. نتایج بدست آمده از تحریک مخزن در شرایط هارمونیک تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی و کد که دقت بالای حل عددی صورت گرفته در این پروژه را مشخص می‌نماید.

کلمات کلیدی:

سطح آزاد- کسر حجمی سیال- جریان آرام- جریان آشفتہ- حل عددی

فهرست مطالب

فصل اول

- مقدمه-----۲
- ۱- تاریخچه-----۳
- ۱-۱ روشهای حل عددی جریان با سطح آزاد-----۴
- ۱-۱-۱ مدل‌های عددی با شبکه ثابت شامل هر دو سیال-----۵
- ۱-۱-۲ مدل‌های عددی با شبکه متغیر برای مایع مورد نظر-----۷

فصل دوم

- ۲- معادلات حاکم-----۱۱
- ۲-۱ معادلات حاکم در دستگاه مختصات کارتزین-----۱۱
- ۲-۲ الگوریتم سورفر-----۱۲
- ۲-۳ الگوریتم پی.ال.ای.سی-----۱۶

فصل سوم

- ۳-۱ تحلیل عددی به کمک نرم افزار فلونت-----۲۱
- ۳-۲ فلونت-----۲۱
- ۳-۲-۱ نرم افزار فیدپ-----۲۱
- ۳-۲-۲ نرم افزار تل مک-----۲۲
- ۳-۲-۳ نرم افزار فلو تری دی-----۲۲
- ۳-۲-۴ نرم افزار سی اف ایکس-----۲۲
- ۳-۳ دلیل انتخاب نرم افزار فلونت-----۲۲
- ۳-۳-۱ معرفی نرم افزار فلونت-----۲۳

- ۲۴-----۳-۳-۲ توانایی های نرم افزار فلوئنت
- ۲۵-----۳-۳-۳ ساختار برنامه
- ۲۶-----۳-۳-۴ محاسبه گر یک دفته و محاسبه گر دو دفته
- ۲۶-----۳-۳-۵ انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل
- ۲۸-----۳-۳-۶ تعیین سطح سیال بوسیله روش حجم سیال
- ۲۸-----۳-۳-۷ محدودیت های مدل کسر حجمی
- ۲۹-----۳-۳-۸ معادله حاکم بر روش کسر حجمی
- ۳۰-----۳-۳-۹ روشهای کسر حجمی موجود در نرم افزار
- ۳۰-----۳-۳-۹-۱ الگوی دهنده و گیرنده
- ۳۲-----۳-۳-۹-۲ الگوی یانگز
- ۳۳-----۳-۳-۹-۳ الگوی صریح اویلر
- ۳۳-----۳-۳-۹-۴ الگوی ضمنی
- ۳۵-----۳-۳-۱۰ مدل های موجود در فلوئنت
- ۳۶-----۳-۳-۱۱ مدل اسپالارت - آلماراس
- ۳۷-----۳-۳-۱۲ مدل $k-\epsilon$ استاندارد
- ۳۸-----۳-۳-۱۳ مدل $k-\epsilon$ حالت ار ان جی
- ۳۹-----۳-۳-۱۴ مدل $k-\epsilon$ محسوس

فصل چهارم

- ۴۳-----۴- روش های انفصال
- ۴۳-----۴-۱ روش های انفصال معادلات
- ۴۴-----۴-۲ روش حجم محدود
- ۴۵-----۴-۳ حل میدان جریان

۴-۴ الگوی سیمپل-----۴۶

۴-۵ الگوریتم حل الگوی سیمپل-----۴۷

فصل پنجم

۵- شبیه سازی جریان سیال در حفره دو بعدی-----۴۹

فصل ششم

۶- شبیه سازی جریان آرام درون مخزن با سطح زیرین متحرک-----۵۶

۶-۱ شبیه سازی جریان آشفته درون مخزن با سطح زیرین متحرک-----۵۷

۶-۲ مقایسه نتایج جریان آرام و آشفته درون مخزن-----۵۸

۶-۳ بررسی جریان آرام مایع درون مخزن تحت شرایط متفاوت-----۶۷

۶-۴ تحلیل نتایج حاصل از مقایسه نتایج جریان آرام و آشفته-----۷۰

۶-۵ تحلیل نتایج جریان آرام در مخزن تحت اثر سرعت و ارتفاع سیال-----۷۲

۶-۶ مقایسه جواب های حل عددی جریان در مخزن تحت تحریک هارمونیک-----۷۴

۶-۷ نتیجه گیری و پیشنهادات-----۷۷

مراجع-----۸۰

چکیده انگلیسی-----۸۳

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) جریان سیال با سطح آزاد درون یک محفظه با شبکه ثابت..... ۵
- شکل (۱-۲) شبکه حل منطبق بر سطح آزاد و محدود به سیال..... ۷
- شکل (۲-۱) نمایش طرح شاری در جهت X..... ۱۴
- شکل (۲-۲) نمونه سلول و سطح آزاد در سلول..... ۱۷
- شکل (۳-۱) ارتباط بین مولفه ها..... ۲۵
- شکل (۳-۲) روشهای بازسازی سطح آزاد..... ۳۴
- شکل (۵-۱) رینولدز ۵۰..... ۵۰
- شکل (۵-۲) رینولدز ۵۰۰..... ۵۰
- شکل (۵-۳) رینولدز ۱۰۰۰..... ۵۱
- شکل (۵-۴) نتیجه مرجع در رینولدز ۱۰۰۰..... ۵۱
- شکل (۵-۵) رینولدز ۵۰۰۰..... ۵۲
- شکل (۵-۶) نتیجه مرجع در رینولدز ۵۰۰۰..... ۵۲
- شکل (۵-۷) رینولدز ۱۰۰۰۰..... ۵۳
- شکل (۱۰-۳) نتیجه مرجع در رینولدز ۱۰۰۰۰..... ۵۳
- شکل (۶-۱) بردارهای سرعت و خطوط جریان آرام و آشفته در زمان های مختلف..... ۵۹
- شکل (۶-۲) نمودار تغییرات مولفه سرعت بر حسب ارتفاع مخزن حالت آرام..... ۶۳
- شکل (۶-۳) نمودار تغییرات مولفه سرعت بر حسب ارتفاع مخزن حالت آشفته..... ۶۳
- شکل (۶-۴) نمودار ضریب درگ بر حسب مکان بر سطح متحرک حالت آرام..... ۶۴
- شکل (۶-۵) ضریب درگ بر حسب مکان بر دیواره سمت چپ حالت آرام..... ۶۴
- شکل (۶-۵-۱) ضریب درگ بر حسب مکان بر سطح زیرین حالت آشفته..... ۶۵

- شکل (۶-۶) ضریب درگ بر حسب مکان بر دیواره چپ حالت آشفته.....۶۵
- شکل (۶-۷) پروفیل سطح آزاد حالت آرام ۶۶
- شکل (۶-۸) پروفیل سطح آزاد حالت آشفته.....۶۶
- شکل (۶-۹) بردار خطوط جریان آرام تحت ارتفاع ۱/۴ سرعت زیرین 2 m/s۶۸
- شکل (۶-۱۰) نمودار مولفه سرعت در وسط مخزن.....۶۹
- شکل (۶-۱۱) پروفیل سطح آزاد در حالت سطح زیرین با سرعت 2 m/s۶۹
- شکل (۶-۱۲) نمودار تنش برشی روی سطح زیرین.....۷۰
- شکل (۶-۱۳) پروفیل سطح آزاد زمان $1,2 \text{ sec}$ در مرجع.....۷۵
- شکل (۶-۱۴) پروفیل سطح آزاد زمان $1,2 \text{ sec}$۷۵
- شکل (۶-۱۵) پروفیل سطح آزاد زمان $3,55 \text{ sec}$ در مرجع.....۷۶
- شکل (۶-۱۶) پروفیل سطح آزاد زمان $3,55 \text{ sec}$۷۶

فهرست علائم

علامت	واحد	کمیت
c	بی بعد	کسر حجمی
ρ	kg/m^3	چگالی
h	m یا ft	ارتفاع مخزن
m	kg	جرم ذره
v	m/s	سرعت
g	cm/sec^2	شتاب گرانشی
R	J/mol K	ثابت گازها
M_w	lb/lb-mole	جرم مولکولی
V	m/s	سرعت
P	psi یا Kpa	فشار
D	m یا ft	قطر مخزن
ν	m^2/s	لزجت سینماتیکی
μ	N.s/m^2	لزجت

فصل اول

مقدمه

مقدمه

عنوان پایان نامه حاضر حل عددی جریان سیال در یک مخزن متحرک به روش کسر حجمی به کمک نرم افزار فلوئنت می باشد.

کاربرد این مساله در مورد بررسی و مطالعه وضعیت سیال درون مخزن کنترلر در خطوط انتقال جریان بوده و همچنین در مواقعی که سطح زیرین مخزن (مخازن نفت، سوخت و...) به هر دلیلی مانند زلزله و یا حرکات ناخواسته دچار شوک و یا تغییرات نوسانی شود می باشد.

تحقیق در مورد این گونه جریانها مثل جریانهای دیگر به دو روش امکان پذیر است. روش اول استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و تجربی است. استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی بسیار مشکل و پرهزینه اند. از طرف دیگر امکانات آزمایشگاهی لازم در دسترس همه افراد نیست. بنابراین استفاده از مدل‌های عددی که رفتار جریان را بتواند شبیه سازی کند، به عنوان روش دوم مطرح می شوند. البته باید متذکر شد که اصولاً مطالعات عددی در زمینه جریانهای با سطح آزاد قدمت کمتری نسبت به مطالعات عددی در زمینه جریانهای بدون سطح آزاد دارند.

بکارگیری مدل‌های عددی برای جریانهای با سطح آزاد در کشور ما سابقه بسیار کمی دارد و به چنین مدل‌های عددی کمتر توجه شده است. با توجه به صنایع نفتی واقع در دریا و سواحل فراوانی که در کشور وجود دارد، لزوم توجه به مدل‌های عددی در این گونه جریانها به وضوح دیده می شود.

با این توضیحات در ادامه، ابتدا مروری بر روشهای حل عددی جریانهای با سطح آزاد خواهیم داشت. سپس به معرفی نرم افزار فلوئنت خواهیم پرداخت.

۱- تاریخچه

برای حل جریانهای با سطح آزاد و پیش بینی الگوی جریان در این گونه مسائل روشهای متفاوتی ارائه شده است که به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول روشهای هستند که از یک شبکه ثابت استفاده می کنند و سطح آزاد جریان درون این شبکه ثابت محاسبه می شود. روش کسر حجمی [۱] معمولترین این دسته از روشهای عددی است.

اما دسته دوم روشهایی هستند که شبکه حل عددی را به مایع محدود می کنند و البته با تغییر سطح آزاد و یا ردیابی آن در روند حل عددی، پیوسته شبکه حل عددی تغییر می کند این روشها از نظر حافظه کامپیوتری از محدودیتهای کمتری برخوردارند و برای جریانهایی که تغییرات سطح آزاد هموار بوده و خیلی بزرگ نیستند، بسیار مفید می باشد. جریانهای با سطح آزاد طیف وسیعی از جریانها را در طبیعت و صنعت تشکیل می دهند از میان آنها به جریان درون کانالها و رودخانه ها و جریانهای اقیانوسی می توان اشاره کرد. این جریانها در زمینه های مختلفی از قبیل مهندسی دریا مهندسی نفت، مهندسی کشاورزی، ریخته گری و بسیاری موارد دیگر مطرح می شود. جریان حول شناورها، سکوهای دریایی و اجسام غوطه ور در دریا نمونه هایی از جریان های با سطح آزاد در مهندسی دریا هستند در زمینه مهندسی کشاورزی هم کانالهای آبیاری و جریانهای سطحی مورد توجه مهندسان این بخش می باشند در زمینه ریخته گیری به طریقه مذاب به درون یک قالب می توان اشاره کرد. در تمام جریانهای سطح آزاد به علت نیروی وزن مایع و کشش سطحی، بین فاز مایع و فاز دیگر که غالباً فاز گازی است. یک سطح مشترک بوجود می آید که به آن سطح آزاد می گویند. شکل این سطح مشترک به نیروهای وارد بر هر دو سیال (به خصوص فاز مایع) بستگی دارد بنابراین تاثیرات متقابل نیروهای درون سیال و شکل سطح آزاد می تواند رفتار جریان سیال را پیچیده کند زیرا در این گونه جریانها اصولاً یکی از مرزهای سیال متغیر بوده و محل مشخصی ندارد.

۱-۱ روشهای حل عددی جریان با سطح آزاد

همانطور که گفته شد منظور از جریان با سطح آزاد، آن دسته از جریانهایی هستند که یک مرز مشترک بین دو سیال مختلف وجود دارد. این دو سیال هر دو مایع و یا یکی مایع و دیگری گاز می توانند باشند. معادلات حاکم بر جریان هر یک از دو سیال همان معادلات ناویر – استوکس هستند. معلوم نبودن این سطح مشترک و پیچیدگی نیروهایی که در این سطح مشترک بین دو سیال مختلف وجود دارد، مدل کردن این گونه جریانها را در مقایسه با جریانهای کلاسیک بدون سطح آزاد مشکل تر می کند. مثلاً وجود نیروی کشش سطحی که به انحناى سطح آزاد بستگی دارد اعمال شرط مرزی را در سطح مشترک دو سیال مشکل تر می کند اگر سیال ماده ای باشد که کشش سطحی در آن بزرگ باشد از اثر این نیرو نمی توان صرفنظر کرد. با این حال در اکثر مطالعات عددی انجام شده با آب از این نیرو به علت کوچک بودن آن نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی در سطح آزاد صرفنظر شده است.

مدلهای عددی را که برای جریانهای با سطح آزاد به کار می برند به دو دسته کلی زیر طبقه بندی می کنند:

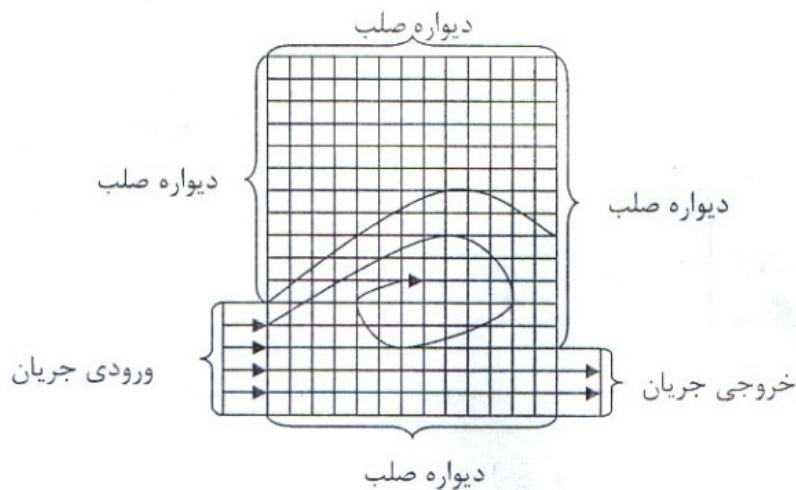
الف) مدل‌های عددی با شبکه ثابت شامل هر دو سیال

ب) مدل‌های عددی با شبکه متغیر شامل سیال اصلی

هر کدام از دو دسته روشهای عددی فوق برای جریانهای خاصی کاربرد دارند و نسبت به هم دارای مزایا و معایبی هستند. به عبارت دیگر دسته (الف) برای گروه خاصی از جریانها به کار می روند، در حالیکه دسته (ب) برای گروه دیگری از آنها مناسب هستند. در ادامه به صورت خلاصه هر یک از دو دسته مدل‌های فوق تشریح شده و زمینه های کاربرد آنها بررسی می شوند.

۱-۱-۱ مدل‌های عددی با شبکه ثابت شامل هر دو سیال

در این روشها یک محدوده از فضا که شامل هر دو سیال می‌شود، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبکه حل در این محدوده ساخته شده و معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان سیال (با سیالات) در این شبکه به صورت عددی حل می‌شوند. مرزهای این شبکه و یا قسمتی از هر کدام از آنها، یکی از موارد معمول در جریانهای سیال می‌توانند باشند. این مرزها شامل دیوارهای صلب، مرز ورودی جریان، مرز خروجی جریان، سطح تقارن و یا مرز جریان دوردست هستند. معمولترین مسائلی که توسط این مدلها بررسی می‌شوند جاری شدن یک مایع در درون یک محفظه با دیوارهای صلب است. در این جریانها که اصولاً تابع زمان هستند، درون محفظه شبکه بندی می‌شود و مرزهای شبکه همان مرزهای محفظه هستند.



شکل ۱ جریان سیال با سطح آزاد درون یک محفظه با شبکه ثابت [۳۲]

این مدلها جزئیات متفاوتی دارند که به نحوه دنبال کردن مرز مشترک دو سیال بستگی دارند. در این روشها با دیدگاه اویلری معادلات در یک فضای معین حل می‌شوند و از یک کمیت اسکالر برای

ردیابی سطح مشترک دو سیال استفاده می شود. این کمیت اسکالر معمولاً یک متغیر مجازی است و اصالت فیزیکی ندارد. در ذیل به معرفی چند نمونه از آنها می پردازیم.

در روش مک^۱ [۲] رشته ای از ذرات مجازی بدن جرم که در ابتدا بر سطح مشترک دو سیال واقع هستند و با سیال حرکت می کنند ردیابی می شوند. حل معادلات حاکم در طول زمان محل این ذرات را، که معرف سطح مشترک دو سیال است، مشخص می کند. روش مک توسط هارلو و ولج^۲ (۱۹۶۵) برای اولین بار به منظور مشخص کردن سطح آزاد ابداع شد. در این روش از ذرات بدون جرم نشانگری استفاده می شود که به منظور نمایش شکل سیال بکار می رود که ناحیه ای را که توسط سیال اشغال شده است و ناحیه ای را که خالی است را مشخص می نماید. ذرات نشانگر به موقعیت جدیدی حرکت داده می شوند که این کار را به واسطه سرعت محلی سیال انجام می دهند. روش دیگر الگوریتم معادله اسکالر^۳ [۳] است که خیلی به روش کسر حجمی شبیه است. در این روش نیز یک معادله انتقال جا به جایی برای یک کمیت اسکالر به همراه بقیه معادلات حاکم حل می شود. در ابتدا کمیت اسکالر در دو سیال مقادیر متفاوتی دارد. بنابراین در طی زمان و با دنبال کردن کانتورهای این کمیت اسکالر سطح مشترک دو سیال را می توان ردیابی کرد. البته روشهای مشابه دیگری نیز وجود دارند که بسیار شبیه به روشهای فوق هستند و جهت اختصار از ذکر آنها خودداری می شود. روش دیگر ایده کسر حجمی سیال^۴ است که در آن از یک تابع پله ای Φ استفاده می شود. این تابع پله ای در سلولهایی که کاملاً از مایع پر هستند مقدار عددی یک، و در سلولهایی که کاملاً از مایع خالی هستند مقدار عددی صفر را دارد. برای ردیابی سطح آزاد مایع مشتق کامل کمیت Φ در میدان جریان به همراه سایر معادلات حاکم بر جریان انتگرالگیری می شوند. بنابراین در سلولهایی که مقادیر عددی Φ بین صفر تا یک هستند سطح آزاد مایع قرار می گیرد. روش کسر حجمی در ابتدا

¹ Marker and Cell (M.A.C)

² Harlow and Welch

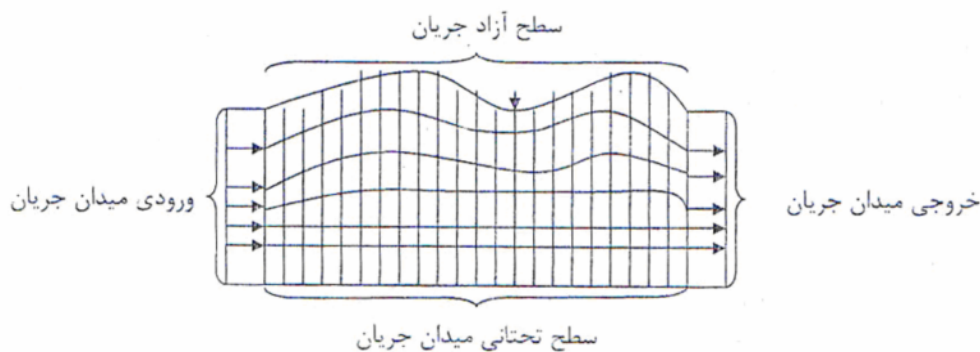
³ Scaler Equation Algorithm

⁴ Volume of Fluid

توسط هارت و نیکولز^۱ در سال ۱۹۸۱ معرفی شد و این روش می تواند برای مسائل چند فازی نیز بکار رود. در روش کسر حجمی یک معادله انتقال کسر حجمی شامل پارامتر F معرفی می شود که مقادیر بین صفر و یک را اختیار می کند، که به منظور مشخص نمودن موقعیت سطح آزاد بکار می رود.

۱-۱-۲ مدل‌های عددی با شبکه متغیر برای مایع مورد نظر

در رده وسیعی از جریانای با سطح آزاد جا به جایی های سطح آزاد مایع خیلی بزرگ نیستند و اثر سیال دوم که عموماً هوا می باشد. صرفاً به صورت یک شرط مرزی هیدرودینامیکی روی مرز مشترک دو سیال که همان سطح آزاد جریان مایع است خلاصه می شود. از طرف دیگر محدوده مورد مطالعه در این جریانها به قدری وسیع است که استفاده از روشهای قبل مقرون به صرفه نیست. در این گونه جریانها تنها میدان جریان مایع مهم بوده و بنابراین فقط این محدوده به صورت عددی حل شده و شبکه حل به فضای اشغال شده توسط مایع منحصر می شود این روشها در مسائل هیدرولیک و جریانهای کانالهای روباز و جریانهای اقیانوسی به کار می روند.



شکل ۱-۲ شبکه حل منطبق بر سطح آزاد و محدود به سیال [۳۲]

¹ Hirt and Nichols

برای حل عددی این گونه جریانها از سه روش لاگرانژی، لاگرانژی - اویلری و اویلری استفاده می شود. در سال ۱۹۹۲ موتین [۴] برای بررسی جریان تزریق مذاب به درون یک قالب از روش لاگرانژی استفاده کرد. مشخصه این روش این است که جمله های جا به جایی در معادلات ناویر - استوکس حذف می شوند و با دنبال کردن جریان به شبکه بندیهای متوالی نیاز است که باید به صورت خودکار در برنامه کامپیوتری انجام شود لذا شرایط مرزی و محل گره ها در طی زمان پیوسته تغییر می کند. بنابراین چنین روشی برای بررسی جریانهایی که اطلاعات در یک یا چند مقطع ثابت و مشخص مورد نظر هستند نمی تواند مناسب باشد. در سال ۱۹۹۸ ناوتی [۵] برای بررسی حرکت موج سطحی از یک روش لاگرانژی - اویلری استفاده کرد. در این روش میدان جریان به صورت اویلری، شبکه بندی و حل شده، و سطح آزاد توسط یک روش لاگرانژی دنبال می شود. شرایط به دست آمده از حل لاگرانژی سطح آزاد در لحظات مختلف به عنوان شرط مرزی برای میدان جریان سیال که به صورت اویلری بررسی می شود به کار می روند. از آنجا که در روشهای لاگرانژی شبکه بندیهای پیاپی مورد نیاز است و این امر در زمانهای مختلف نیاز به حجم زیادی از محاسبات و میانبایی دارد، پایداری آنها زیاد نیست. روش لاگرانژی - اویلری در مقایسه با روشهای لاگرانژی پایداری بیشتری دارد و در ضمن بررسی جریان را در یک محدوده ثابت مشخص امکان پذیر می کند. با این حال به علت میانبایی کمیتها در مرز آزاد بین شبکه اویلری داخلی و شبکه لاگرانژی در سطح آزاد ناپایداری نسبی بوجود خواهد آمد. از روشهای لاگرانژی و لاگرانژی - اویلری بیبیشتر برای جریانهایی که در یک محدوده کوچک حرکت دارند استفاده می شود. از این نوع جریانها به تزریق مذاب به درون قالب می توان اشاره کرد. در میان جریانهای با سطح آزاد معمولترین آنها جریان در رودخانه ها و کانالهای روباز است. روشهای عددی فوق را برای چنین جریانهایی هم می توان به کار برد، اما با توجه به اینکه در این جریانها محدوده بزرگی از میدا جریان مورد نظر است حجم محاسبات و زمان آن به شکل قابل ملاحظه ای زیاد می شود. که از نظر ابزار محاسباتی محدودیتهایی را ایجاد می کند. از طرف دیگر جا به جایی های سطح آزاد و حرکت آن در این جریانها کوچک بوده، به نحوی که با ساده کردن معادلات اعمال

فرضیات مناسبی برای جا به جا سطح آزاد، به بررسی آنها می توان پرداخت. به عنوان مثال تحلیل یک بعدی و بدون اصطکاک جریان درون کانالهای مستقیم یکی از روشهایی است که به ساده ترین شکل ممکن اطلاعاتی کلی از جریان را پیش بینی می کند. اما این روش در کانالهای غیر مستقیم یا طویل که نیروهای اصطکاکی نقش مهمی در الگوی جریان دارند، اطلاعات درستی را نمی تواند ارائه بدهد. بنابراین برای چنین وضعیتهایی باید از روشهای عددی دقیقتری استفاده کرد.

فصل دوم

معادلات حاکم

۲- معادلات حاکم

برای هر پدیده فیزیکی معادلاتی را می توان نوشت که رفتار آن پدیده را توصیف کنند. این معادلات را معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیلی می نویسند که در یک محدوده هندسی باید انتگرالگیری شوند. برای انتگرالگیری از این معادلات به شرایط مرزی در مرزهای محدوده مورد مطالعه نیاز است. معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان یک سیال، معادلات ناویر - استوکس هستند که در این بخش ضمن معرفی آنها به تشریح و معرفی شرایط مرزی لازم برای آنها هم می پردازیم.

۲-۱ معادلات حاکم در دستگاه مختصات کارتزین

با انتخاب دستگاه مختصات کارتزین بعنوان دستگاه مرجع، معادلات حاکم بر یک جریان تراکم ناپذیر سه بعدی را می توان معرفی کرد. این معادلات شامل معادله پیوستگی سه معادله اندازه حرکت در جهت های سه گانه مختصات و معادله کسر حجمی و برای حالت آشفته معادلات مدل اغتشاشی به کار رفته هستند.

دستگاه مختصات کارتزین را به گونه ای انتخاب می کنیم که محورهای X , Y در صفحه قرار گرفته و محور Z در راستای عمودی و در خلاف جهت شتاب ثقل قرار بگیرد. با این اوصاف معادلات حاکم در حالت دائم به صورت زیر نوشته می شوند:

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

معادلات اندازه حرکت:

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + (\mu + \mu_1)(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (2-2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + (\mu + \mu_1)(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (2-3)$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + (\mu + \mu_1)(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (2-4)$$

وقتی که دو سیال ترکیب نشدنی غیر قابل تراکم را در نظر می گیریم دیورژانس سرعت عبارتست از:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2-5)$$

موقعیت دو سیال برای استفاده از کسر حجمی مهم می باشد. برای کانتورهای شامل یک سیال $c=1$ و برای کانتورهای شامل سیال دیگر $c=0$ و برای کانتورهای شامل هر دو سیال c ضربی بین ۰ و ۱ است. معادله کسر حجمی به صورت زیر بیان می شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (uc) = 0 \quad (2-6)$$

راه حل مربوط به طرح موفق کسر حجمی حل معادله کسر حجمی به روشی است که سطح بین این دو سیال را در بر می گیرد. طرح اصلی کسر حجمی توسط هرت و نیکلز که ساختار سطح ما بین را با منحنی شامل خطوط عمودی و افقی در هر سلول این سطح تقریب می زند. معرفی شده است. طرح شاری ترکیبی از روشهای بالا وزش و پایین وزش است. مزیت استفاده از طرح بالا وزش پایداری این روش بوده، اما این روش مفصل بوده و ممکن است در بسیاری از سلولهای سطح مابین گسترده شود. طرح پایین وزش ناپایدار است اما سطح آزاد را شکل داده و در عملکرد سطح مابین بسیار موثر است. روشهای شاری کسر حجمی متفاوتی توسعه یافته اند. بسیاری از آنها هدفشان تعادل بین توسعه پایداری از طرح بالا وزش و مزیت شکل دادن سطح آزاد از روش پایین وزش است.

۲-۲ الگوریتم سورفر^۱

لافوریه در سال (۱۹۹۶) یک طرح شاری را بیان می کند که در آن از بالا وزش و پایین وزش و یا روش تصحیح یافته در جهت یابی ارتباط میان سطوح، در جهت اشاره استفاده شده است. در نتیجه برای جلوگیری از خطای حجمی محسوس، لازم است که جدایی، در الگوریتم جهت یابی شود، لذا

¹ Surfer Algorithm

ابتدا شارها در جهت X برای همه شبکه محاسبه شده و سپس یک جاروب در جهت Y انجام می گیرد. هنگامیکه سطح مابین به صورت عمودی نسبت به جریان قرار گرفته است طرح پایین وزش تصحیح شده و هنگامی که سطح آزاد موازی جریان باشد طرح بالا وزش به کار گرفته می شود. طرح پایین وزش، به منظور جلوگیری از شار سیال بیشتر از ظرفیت سلولها و اطمینان از کافی بودن شرط CFL تصحیح شده است. همچنین او، یک شاخص فلوتسم^۱ را برای اطمینان از آن که فلوتسم (سلولهایی که تقریباً شامل یکی از سیالات است که کاملاً با سلولهای پر از سیال دیگر، احاطه شده است)، در بالا وزش بیشتر از پایین وزش اعتبار دارد، بیان می کند. این طرح در برنامه سورفر اشاره شده است.

طرح دیفرانسیلی سورفر برای تفکیک معادله کسر حجمی با تفکر شبکه بندی محلی برای نمایش شار در جهت X شکل (۲-۱) به کار می رود. معادله کسر حجمی تفکیک شده به صورت زیر می باشد.

$$C^{n+1} = C^n + \sum_{k=1}^{k=K} f_k \quad (2-7)$$

درجاییکه k جهت سلول و k عدد سلولی می باشد. برای یک شبکه معمولی مربعی و ۲ بعدی k=۴ و k=e, w, n, s و f_k شار c روی وجه k از سلول مرزی را نمایش می دهد. بنابراین:

$$C^{n+1} = C^n + f_e - f_w + f_n - f_s \quad (2-8)$$

و شارهای سلولی عبارتند از:

$$f_n = u_k \frac{\delta_1}{\delta_x} C_k \quad (2-9)$$

در جاییکه δ_x, δ_1 مرحله زمانی و سایز شبکه بندی، U_k سرعت در وجه k هستند، مقدار c محاسبه می شود. روش شاری در جهت X در اینجا توضیح داده شده است. روش شاری در جهت Y به صورت مشابه است. اگر $u > 0$ در نظر گرفته، اندیس بالایی مقادیر مراکز سلولها را نشان داده و اندیس پایینی مقادیر وجه سلولی را بیان می کند که شار مربوطه روی وجه شرقی عبارتست از:

¹ Flotsam

$$f_e^{upwind} = \left[u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} \right] C_c \quad (2-10)$$

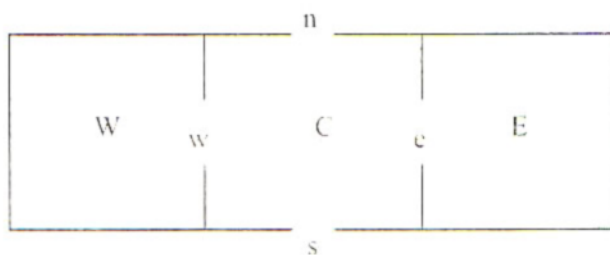
طرح بالا وزش پایدار است، بنابراین هنگامی که شرط CFL ارضا گردد. $(|u| \frac{\delta_t}{\delta_x} < 1)$ سلول بیشتر

از ظرفیتش شار خارجی تحمل نمیکند. طرح پایین وزش برای $U > 0$ به تساوی

$$C = C_w^{downwind} = C_e^{downwind} = C_E$$

استفاده کرده که می تواند مقادیری بیشتر از ظرفیت سلول داشته باشد.

$$f_e^{downwind} = \left[u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} \right] C_E \quad (2-11)$$



شکل ۲-۱ نمایش طرح شاری در جهت [۳۲]

لازمی یک طرح اصلاح شده پایین وزش را معرفی می کند که از جریان شار خارجی بیش از

ظرفیت جلوگیری می کند.

$$\text{if } C_c < f_e^{downwind} \text{ then } f_e^{downwind} = C_c \quad (2-12)$$

$$\text{if } f_e^{downwind} < C < 1 - u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} + f_e^{downwind}, \text{ then } f_e^{downwind} = \left[u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} \right] C_E \quad (2-13)$$

$$\text{if } 1 - u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} + f_e^{downwind} < C_c, \text{ then } f_e^{downwind} = u_e \frac{\delta_t}{\delta_x} - 1 + C_c \quad (2-14)$$

طرح های بالا وزش و پایین وزش اصلاح شده با توجه به زاویه بین وجه تماس نرمال و جهت شار انتخاب شده اند. اگر وجه تماس نسبت به جهت شار قائم باشد، طرح پایین وزش و چنانچه وجه تماس موازی باشد از طرح بالا وزش استفاده می شود. در اینجا شار در جهت X استفاده می شود، بنابراین اگر وجه تماس قائم باشد طرح پایین وزش به کار می رود و اگر سطح تماس موازی باشد.

طرح بالا وزش مورد استفاده قرار میگیرد. زاویه بحرانی θ_c به صورتی تعریف شده است که اگر $\theta < \theta_c$ آنگاه $f_e^{upwind} = f_c$ و طرح اصلاح شده بالا وزش مورد استفاده قرار می گیرد و چنانچه $\theta > \theta_c$ آنگاه $f_e^{downwind} = f_c$ و طرح با پایین وزش مورد استفاده قرار می گیرد. لافوریه دریافت که نتایج برای یک زاویه بحرانی $1 < \theta_c < 1.05rad$ صحیح می باشد.

با فرض $\theta_c = 1$ ، زاویه سطح ما بین با جهت k به صورت:

$$\theta_k = \arccos(n_k) \quad (2-15)$$

است. در جاییکه n_k تقریبی از سطح میانی نرمال و ∇^h یک تقریب المانی دیفرانسیلی برای عملگر گرادیانی می باشد.

$$n = \frac{\nabla^h C}{|\nabla^h C|} \quad (2-16)$$

هنگامی که مقادیر هر وجه به صورت میانگین مقادیر مرکزی سلول مجاور با شرط مرزی گرادیان صفر مورد نیاز برای C محاسبه می شود، گرادیان به صورت زیر به دست می آید:

$$\nabla^h = \frac{c_e - c_w}{\delta_x} + \frac{c_n - c_s}{\delta_y} \quad (2-17)$$

۳-۲ الگوریتم پی ال ای سی ۱

طرح کسر حجمی بالا، سطح مابین را صریحاً از زمانی که حل معادله کسر حجمی برای یافتن موقعیت تقریبی سطح، به کار برده شود، تعریف می کند. سطح مابین ممکن است به روش اس. ال. ای. سی^۲ [۶] و یا با استفاده از روشهای متفاوت پی ال. ای. سی [۷] باز سازی شود.

گیفیر در سال (۱۹۹۹) یک روش پی. ال. ای. سی را توسعه داده و آن را برای شبیه سازی نقاط ۳ بعدی به کار برده است. در هر سلول سطح مابین توسط یک خط مستقیم ۲ بخش مجزا تقسیم شده که هر یک از آنها شامل مقدار صحیح یکی از دو سیال می باشند. این بخش سطح میانی، با جریان تکثیر شده و مقدار سیال موجود، در سلولهای مجاور محاسبه می گردد.

حجم هر سیال، از معادله سطح میانی در یک سلول و به طور عکس معادله سطح میانی، از کسر سیال موجود در سلول تخمین زده می شود، نرمال سطح میانی به صورت زیر است:

$$m = \nabla_C^h \quad (2-18)$$

که مشابه محاسبه بردار نرمال با استفاده از معادله (۲-۸) می باشد. اما در این مورد بردار نرمالایز نبوده و معادله خط مستقیم با m نرمال با m عاقله (۲-۱۹) بیان می شود.

$$m_x x + m_y y = \alpha \quad (2-19)$$

در جاییکه m_x, m_y تقسیمات α, m یک پارامتر مربوط به کوچکترین فاصله بین خط و مبدا است. اگر m یک نرمال واحد باشد، α مساوی با فاصله بین خط و مبدا می گردد. مبدا در گوشه سمت چپ پایین سلول در شکل (۲-۲) تعریف شده است: H, E نقاط تلاقی خط با محورهای X, Y در

ناحیه زیر خط و شامل سلول ABCD به صورت زیر می باشد.

$$Area = \frac{\alpha^2}{2m_x m_y} \left[1 - H(\alpha - m_x \delta_x) \left(\frac{\alpha - m_x \delta_x}{\alpha} \right)^2 - H(\alpha - m_y \delta_y) \left(\frac{\alpha - m_y \delta_y}{\alpha} \right)^2 \right]$$

¹ P.L.I.C (PIECEWISE LINEAR INTERFACE CALCULATION)

² S.L.I.C (SIMPLE LINE INTERFACE CALCULATION)

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x > 1 \end{cases} \quad (2-20)$$

جمله $\frac{\alpha^2}{2m_x m_y}$ مساحت مثلث AEH و ۲ جمله دیگر مساحت هایی هستند که باید از مثلث

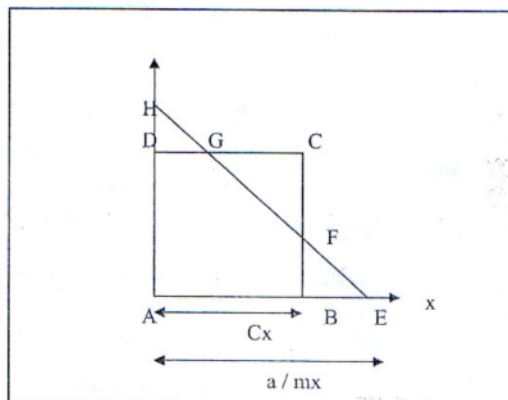
AEH کم شوند همچنین، اگر نقطه E یا نقطه H خارج از سلول کشیده شوند، سطح میانی با جابجایی لاگرانژی از یک مرحله زمانی به مرحله زمانی بعدی تکثیر می شود. محاسبه هر مرحله زمانی به صورت جداگانه در هر فاصله مکانی امکان پذیر است. جز X سرعت هر نقطه روی خط، به صورت یک معادله خطی ساده بین مقادیر u_e, u_w روی وجه سلول تعریف می شود.

$$u(x) = u_w \left(1 - \frac{x}{\delta_x}\right) + u_e \frac{x}{\delta_x} \quad (2-21)$$

در حین جاروب X، مختصات X از خط به مقدار جدید تغییر می یابد.

$$x^* = x^n + u(x^n) \delta_t = \left[1 + \left(\frac{U_e - U_w}{\delta_x}\right) \delta_t\right] x^n + U_w \delta_t \quad (2-22)$$

X مقدار را در زمان n و * برای نمایش مرحله بعد به کار می رود، جاروب X با یک مرحله مشابه در y دنبال می شود. در شکل (۲-۲) خط میانی ab در سلول ABCD به cd، جابجا شده است. حجم جدید سیال موجود در سلول ABCD و سلول EFBA بعد از جابجایی باید محاسبه شود.



شکل (۲-۲) سلول ABCD با خط مستقیم EH بریده شده است، با m نرمال و پارامتر α و شامل سیال

۱ در رژیم ABFGD و سیال ۲ در رژیم FCG می باشد.

معادله (۲-۲۲) شامل n^x با جایجایی عبارت X^* برای محاسبه مقادیر جدید X^* در (۲-۱۹)

جایگزین می گردد:

$$m_x^n \left[\frac{x^* - U_w \delta}{H(U_e - U_w) / \delta_x} \delta_t \right] + m^n y y^n = \alpha^n \quad (2-23)$$

که می تواند به صورت زیر ساده گردد در جایی که α^* و m^* با معادلات (۲-۲۵) و (۲-۲۴) مقدار

دهی می شوند.

$$m_x^* = \frac{m_x^n}{H(CV_e - U_w) / \delta_x} \delta_T \quad (2-24)$$

$$\alpha^* = \alpha^n + \frac{m_x^n U_w \delta_t}{H(CV_e - U_w) / \delta_x} \delta_t \quad (2-25)$$

برای مثال اگر $\delta_x > \frac{\alpha^*}{m_x^*}$ باشد، کسر سیالی که به سمت چپ حرکت می کند محاسبه شده

سپس مقداری از حجم سیال به سمت راست سلول حرکت می کند. این حجم می تواند از معادله

(۲-۱۸) محاسبه شود. بعد از انتقال مختصات از رابطه $x^* = \delta_x + x'$ در جاییکه x' فاصله از وجه

سمت چپ سلول سمت راست است، معادله (۲-۱۷) به صورت معادله (۲-۲۵) در جاییکه رابطه

(۲-۲۶) برقرار است، تبدیل می شود.

$$m_x^* x' + m_y^* y = \alpha' \quad (2-26)$$

$$\alpha' = \alpha^* - m_x^* \delta_x \quad (2-27)$$

در تمامی روشهای فوق از یک کمیت اسکالر برای ردیابی سطح آزاد یا سطح مشترک دو سیال

استفاده می شود و معادلات در تمام شبکه و برای هر دو سیال حل می شوند. بعضی از روشهای فوق

با روشهای ضمنی و بعضی از آنها با روشهای صریح قابلیت های بهتری دارند. جزئیات بیشتر این

روشها در مراجع معرفی شده موجود هستند. اما این روشها مشکلات خاص خود را دارند. به عنوان

مثال در سطح آزاد چون کمیت اسکالر مجازی در سلولهای مجاور هم مقادیر متفاوتی دارند، ممکن است که در سطح آزاد پیش بینی شده گسستگی هایی دیده شود که برای پیوسته کردن شکل سطح آزاد باید از روشهای پیچیده ای استفاده کرد. علیرغم این مشکلات این روشها برای جریان هایی که در محدوده مشخصی از فضا با مرزهای فیزیکی و به صورت گذرا با جابجایی های بزرگی از سطح آزاد اتفاق می افتند، بسیار مناسب هستند.

فصل سوم

آشنائی با نرم افزار

فلوئنت

آشنایی کلی با نرم افزار و قابلیت های آن

۳-۱ تحلیل عددی به کمک نرم افزار

به منظور تحلیل عددی میدان جریان دو گزینه مطرح است:

- نوشتن کد و برنامه

- استفاده از برنامه و نرم افزارهای موجود

نوشتن برنامه و یا کدهای مختلفی که تقریباً هدف های مشترکی را دنبال می کنند از نظر زمانی نمی تواند خیلی مقرون به صرفه باشد ضمن اینکه در بازار نرم افزارهای بسیار قوی تر از آن کدی که قرار است توسط خود ما نوشته شود موجود می باشد که استفاده از این کدها روند و زمان نتیجه گیری از تحلیل را بهینه خواهد کرد به همین دلیل در زیر نمونه هایی از کدهای تجاری موجود در بازار، با کمی توضیح در مورد روش تحلیل آنها آمده است.

۳-۲ نرم افزار فلوئنت

فلوئنت یک نرم افزار حل میدان جریان می باشد که به صورت دو بعدی و سه بعدی بر اساس روش حجم محدود میدان جریان را تحلیل می نماید. ویرایش های جدید این نرم افزار تحلیل شبکه نامنظم را نیز دارد که در ویرایش های قبلی چنین امکانی موجود نبوده است.

۳-۲-۱ نرم افزار فیدپ^۱

فیدپ یک نرم افزار عمومی حل میدان جریان می باشد که به صورت دو بعدی و سه بعدی بر اساس روش المان محدود میدان جریان را تحلیل می نماید. این نرم افزار ابتدا به منظور تحلیل سازه تهیه شده بود اما در ویرایش های بعدی قابلیت آنالیز سیالات نیز به آن اضافه شد. شبکه استفاده شده در نرم افزار می تواند منظم یا نامنظم باشد.

^۱Fidap

۲-۲-۲ نرم افزار تل مک^۱

این نرم افزار قابلیت تحلیل دو بعدی یا سه بعدی میدان جریان را به صورت المان محدود دارا می باشد. این نرم افزار برای مدل کردن بسیاری از رودخانه ها استفاده شده است و در مساله شکست سد نیز از آن بهره گرفته شده است.

۲-۲-۳ نرم افزار فلو تری دی^۲

این نرم افزار قابلیت تحلیل دو بعدی یا سه بعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارا می باشد. این نرم افزار از المان های سه بعدی متعامد استفاده می کند و در ایجاد مانع در برابر جریان قابلیت های ویژه ای دارد. در تعیین، سطح آزاد جریان روش های متفاوتی در نرم افزار دیده شده است و در تعیین شکست سد و حرکت موج به کمک این نرم افزار مدلهای زیادی تحلیل شده است.

۲-۲-۴ نرم افزار سی اف ایکس^۳

از دیگر نرم افزارهای تحلیلی عمومی میدان جریان می باشد که حل میدان را به دو روش حجم محدود انجام می دهد و از شبکه منظم و نامنظم غیر متعامد در آنالیز استفاده می کند. این نرم افزار ابتدا به سی اف ایکس فلو تری دی^۴ دیمعروف بوده است.

۳-۳ دلیل انتخاب نرم افزار فلوئنت

این نرم افزار یکی از قوی ترین نرم افزارهای موجود می باشد که در صنعت به وفور از آن استفاده می گردد. محیطی ساده و قوی برای ورود اطلاعات دارد تمام قسمت ای ورود اطلاعات، حل کننده و دیدن نتایج آن دارای توانایی بالایی می باشد. در گذشته یک نرم افزار مستقل بوده است ولی اخیرا

¹Telemac

²Flow 3D

³ CFX

⁴CFX-Flow3D

توسط شرکت انسیس خریداری شده است و بلحاظ معروفیتی که از گذشته کسب کرده، هنوز هم با همان اسم ولی تحت شرکت انسیس به فروش می رسد.

۱-۳-۳ معرفی نرم افزار فلوئنت

نرم افزار فلوئنت ، اوج هنر برنامه نویسی برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده می باشد. این نرم افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های غیر ساختار یافته برای هندسه های پیچیده را فراهم می سازد. نوع مشهای قابل تولید و دریافت توسط این گروه نرم افزاری شامل شبکه هایی با المان های مثلثی و چهارضلعی (برای هندسه های دو بعدی) و چهار وجهی، شش وجهی، هرمی یا گوه ای (برای هندسه های سه بعدی) می باشد. همچنین فلوئنت به کابر اجازه بهبود شبکه (مثلاً ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان های لازم در هندسه) را می دهد. این بهینه سازی برای حل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می دهد که نتایج را در ناحیه هایی که دارای گرادیان های بزرگ (مثل لایه مرزی و ...) باشند، دقیق تر سازد. این قابلیت ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب احتیاج می باشد در مقایسه با حل در شبکه های ساختار یافته به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می دهد.

این نرم افزار با زبان نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می برد. نتیجتاً این نرم افزار استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده ها و اطلاعات و کنترل انعطاف پذیر محاسبات را ممکن می سازد. بعلاوه از ساختار کلاینت^۱ موجب اجرای کارآمد برنامه، کنترل سیستم و انعطاف پذیری کامل سیستم عامل می گردد. تمامی توابعی که برای انجام محاسبات و نمایش نتایج لازم اند از طرق منوهای برنامه بسادگی قابل دسترسی می باشند. صفحات کاربری برنامه همگی با استفاده از زبان اس چم^۲ که یکی از شاخه های ال.ای.اس.پی^۳ است، برنامه نویسی

^۱Client
^۲Scheme
^۳L.I.S.P

شده اند. البته نرم افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه ای قرار می دهد که بتوانند صفحات کاربری را با تعریف و ماکروهای جدید به دلخواه تنظیم نمایند.

۲-۳-۳ توانایی های نرم افزار فلونت

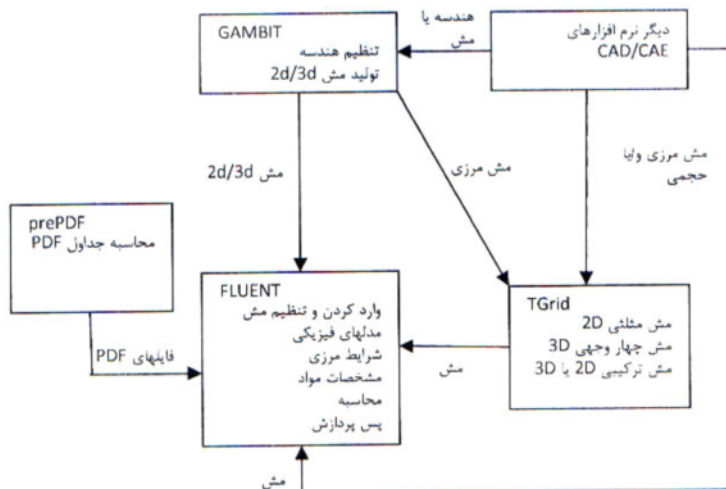
- برنامه فلونت قادر به انجام کارهای زیر می باشد
- جریان حول یا داخل اجسام دو بعدی یا سه بعدی
- جریانات تراکم پذیر و تراکم ناپذیر
- ساختارهای دورانی یا ثابت
- جریانات غیر لزج، لزج، آرام و آشفته.
- محیط های متخلخل
- انتقال حرارت جابجایی (آزاد یا اجباری)
- انتقال حرارت کوپل (شامل هدایت، جابجایی و تشعشع)
- انتقال حرارت تشعشعی
- جریانات دائمی یا غیر دائمی
- احتراق
- سیالات نیوتونی یا غیر نیوتونی
- فنهای یک بعدی
- مبدل های حرارتی
- جریان های چند فازی

۳-۳-۳ ساختار برنامه

گروه نرم افزاری فلوئنت شامل محصولات زیر است:

- فلوئنت: حل کننده^۱
- پری پی.دی.اف: پیش پردازنده برای مدل کردن احتراق در فلوئنت
- تی گرید^۲: پیش پردازنده کمکی که امکان تولید مشهای حجمی را فراهم می کند و فیلترها: برای وارد کردن (یا خارج کردن) فایل ها به (یا از) فلوئنت از مشهایی با المان های سطحی و حجمی از نرم افزارهای کد و کم (مانند نرم افزارهای انسیس ،اتو کد، سولیدورک ، نسترن و....)

هندس و شبکه را می توان توسط نرم افزار پیش پردازنده گمبیت^۴ تولید کرد. همچنین می توان از نرم افزار پیش پردازنده تی گرید برای تولید مشهای مثلثی و مشهای حجمی چهار وجهی و شش وجهی از مشهای مرزی موجود (که توسط نرم افزار گمبیت یا توسط نرم افزارهای کد و کم به وجود آمده اند) استفاده کرد.



شکل (۳-۱) ارتباط بین مولفه ها

¹ Solver
² Prepdf
³ Tgrid
⁴ Gambit

فلونت از مشهای غیر ساختار یافته برای کاهش زمانی که برای حل شبکه مصرف می شود، بهره می برد و نیز مدل سازی هندسی و پروسه تولید مش را ساده می کند و می توان مدل های پیچیده تر را نیز پیاده کرد.

استفاده از مشهای غیر ساختار یافته موجب کاهش زمان ساختار شبکه، با توجه به ساده سازی مدل هندسی و فرآیند تولید شبکه به این نرم افزار می گردد و نیز این روش، پیاده سازی شبکه های پیچیده تر را نسبت به روش قدیمی (مش سازی چند بلوکی ساختار یافته) آسانتر می کند. چنین قابلیت انعطافی این اجازه را به کاربران می دهد که یک توپولوژی شبکه بندی که مناسب کاربرد و مساله مورد نظر باشد را انتخاب نماید.

۳-۳-۴ محاسبه گر یک دفته و محاسبه گر دو دفته

در هر رایانه ای که برنامه فلونت بر روی آن نصب می شود، هر دو انتخاب محاسبه گر یک دفته و دو دفته از فلونت موجود می باشد. برای اغلب موارد محاسبه گر یک دفته از دقت خوبی برخوردار است. اما برای مسائل خاص ممکن است به کارگیری حل کننده دو دفته مفید باشد. اگر هندسه مساله مورد تحلیل دارای مقیاس های طولی نامتقارن بزرگ باشد (مانند لوله های با قطر کم و طول زیاد)، ممکن است محاسبات یک دفته برای بیان کردن مختصات گره ها مناسب نباشد. اگر هندسه مساله مورد تحلیل شامل چند دیوار متصل شونده به لوله های قطری کوچک (مانند منی فولد اتومبیل) باشد، برای اینکه تراز فشار متوسط می تواند در یکی از ناحیه های خیلی بزرگ باشد محاسبه گر دو دفته لازم و ضروری می باشد.

۳-۳-۵ انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل

فلونت سه روش برای فرمول بندی حل کننده تدارک دیده است:

- ۱- سگریتد^۱ ۲- کوپل ایمپلیسیت^۲ ۳- کوپل اکسپلیسیت^۳

^۱Segregated

^۲Coupled implicit

^۳Coupled explicit

این سه نوع فرمول بندی حل کننده نتایج بسیار دقیقی را در بازه وسیعی از انواع سیال ها ارائه می دهد. در بعضی از موارد ممکن است یکی از فرمول بندی ها بهتر باشد (به طور مثال با به کار بردن یکی از شیوه ها بسته به شیوه های دیگر ممکن است حل، سریعتر همگرا شود). روشهای سگریته و کوپل چشم اندازی متفاوت در راه حل معادلات پیوستگی، ممنوم، انرژی و معادلات ترکیبات شیمیایی ارائه می دهند. شیوه سگریته معادلات را پی در پی حل می کند (به عبارتی جدا از همدیگر)، اما شیوه کوپل معادلات را به صورت هم زمان و وابسته به یکدیگر حل می کند صریح یا ضمنی بودن این شیوه راهی است که معادلات خطی می شوند.

شیوه سگریته ترجیحا برای جریان های غیر قابل تراکم و یا به طور ملایم قابل تراکم به کار می رود. اما شیوه کوپل به طور اختصاصی برای جریان های قابل تراکم سرعت بالا طراحی شده است. هر دو شیوه برای کل بازه جریان ها به کار برده می شوند (از غیر قابل تراکم تا خیلی تراکم پذیر). اما استفاده از شیوه کوپل مزیت بسیار زیادی بر استفاده از شیوه سگریته برای جریان های قابل تراکم سرعت بالا دارد.

به صورت پیش فرض فلوئنت، شیوه سگریته را به کار می برد، اما برای جریان های قابل تراکم سرعت بالا و نیروهای شناوری یا چرخشی، بهتر است از شیوه کوپل ایمپلیسیت استفاده شود. این شیوه حل معادلات جریان و انرژی اغلب سریعتر باعث همگرایی و دستیابی به نتایج مورد نظر می شود. لازم به ذکر است که بکار بردن شیوه کوپل ایمپلیسیت ممکن است حافظه بیشتری نسبت به شیوه سگریته اشغال کند (۱,۵ تا ۲ برابر).

در مدل های چند فازی، احتراق، تشعشی، جریان متناوب و تغییر فاز باید از روش سگریته استفاده شود، زیرا شیوه کوپل برای این موارد موثر واقع نمی گردد.

۳-۳-۶ تعیین سطح سیال بوسیله روش حجم سیال

در بسیاری از مسائل هیدرودینامیک و مکانیک سیالات و هیدرولیک تعیین سطح مشترک دو فاز سیال دارای اهمیت بوده و در پدیده های هیدرولیکی نیز تعیین سطح آزاد جریان در حل میدان از اهمیت خاصی برخوردار است. روشهای گوناگونی در تعیین سطح آزاد استفاده می شود که نسبت به دیدگاه حاکم بر حل میدان جریان، متفاوت می باشد.

در میدان جریان با شبکه ثابت، تعیین سطح آزاد بر اساس دیدگاه اوپلری نسبت به جریان مشخص می شود. در روش کسر حجمی برای هر جزء حجم سلول یک معادله دیفرانسیلی حل می شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال در هر دو سلول معین می گردد. نهایتاً در این روش مشخص می گردد که این سلول از کدام فاز سیال می باشد یا به چه درصدهایی از این دو فاز تبدیل شده است. روشهای توسعه یافته بر اساس کسر حجمی با توجه به دیدگاه اوپلری نسبت به میدان جریان کارایی بیشتری دارند.

۳-۳-۷ محدودیت های مدل کسر حجمی

- باید در نرم افزار از روش حل کننده سگریتد^۱ استفاده شود. مدل کسر حجمی در هیچ یک از روش های حل کننده کوپل موجود نیست.
- همه حجم های کنترل باید از یک فاز سیال یا ترکیبی از سیال یا ترکیبی از فازها پر می شوند. مدل کسر حجمی برای مناطق خالی که هیچ سیالی تعریف نشده است مجاز نیست.
- سیال باید تراکم ناپذیر باشد.
- مدلینگ انتقال گرما با مدل کسر حجمی امکان پذیر نیست.
- انواع مخلوط کردن و جریان واکنشی را نمی توان با مدل کسر حجمی مدل کرد.
- مدل آشفستگی ال.ای.اس^۲ را نمی توان با مدل کسر حجمی استفاده کرد.

^۱ Segrated Solver

^۲ L.E.S

- مدل تغییر فاز برای یخ زدن یا ذوب شدن را نمی توان در ترکیب با مدل کسر حجمی استفاده کرد.

۳-۳-۸ معادله حاکم بر روش کسر حجمی

در تعیین سطح آزاد به روش کسر حجمی از یک تابع متغیر به نام f استفاده می شود که جزء حجم سیال نامیده می شود. فرمول بندی کسر حجمی بر این حقیقت تکیه دارد که دو یا چند سیال در یکدیگر نفوذ نمی کنند. برای هر فاز اضافی که به مبدل اضافه می شود، یک متغیر تولید می شود. کسر حجمی فاز در سلول محاسباتی در هر حجم کنترلی، جمع کسرهای حجمی همه فازها به واحد است. بنابراین متغیرها و خصوصیات در هر سلول یا کاملاً معرف یکی از فازهاست یا مخلوطی از فازها. به عبارت دیگر اگر کسر حجمی سیال q ام در سلول با q مشخص شود، بنابراین سه شرط زیر ممکن می شود:

سلول خالی از سیال q ام :

$$\alpha q = 0 \rightarrow \quad (3-1)$$

سلول پر از سیال q ام:

$$\alpha q = 1 \rightarrow \quad (3-2)$$

سلول شامل سطح مشترک بین سیال هاست

$$0 < \alpha q < 1 \rightarrow \quad (3-3)$$

تشکیل این تابع دیفرانسیلی در حالت دو بعدی چنین است

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (3-4)$$

در حل معادلات فوق در سلولی که پر از سیال می باشد مقدار F برابر با ۱ می باشد ولی در سلول خالی از سیال این مقدار برابر صفر است در سلول سطحی این مقدار بین صفر و یک است. به هنگام استفاده از معادلات ناویر استوکس و معادله کسر حجمی پارامترهای لزجت و چگالی سیال در هر سلول طبق روابط زیر معین می گردد، که در سلول های سطحی ترکیب دو فاز سیال در چگالی و لزجت هر سلول دیده می شود.

$$\rho = \sum_{i=1}^n F_i \rho_i \quad (3-5)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n F_i \mu_i \quad (3-6)$$

روشهای متفاوتی از حل معادله کسر حجمی استفاده می شود که به تفصیل در ادامه آورده شده است.

۳-۳-۹ روشهای کسر حجمی موجود در نرم افزار

۳-۳-۹-۱ الگوی دهنده و گیرنده

در این روش که روش اصلی حل معادله کسر حجمی می باشد جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می شود. در سلول سطحی، سطح سیال یا به صورت افقی یا به صورت قائم در نظر گرفته می شود، که نحوه چرخش سطح بستگی به سلول های همسایه دارد. روش استفاده شده بدین صورت است که یک سلول به عنوان بخشنده یا دهنده حجمی معین از سیال می باشد که آن را به سلول مجاور خود که سلول گیرنده منتقل می نماید. در تعیین سطح آزاد هم از پایین دست و هم از بالا دست معادلات حل می گردند.

چنانچه سرعت در جهت X را u بنامیم در این صورت اگر $u > 0$ سلول سمت چپ (بالا دست) به عنوان سلول دهنده مطرح می شود و سلول سمت راست (پایین دست) به عنوان سلول گیرنده در نظر

¹Donor-Acceptor Scheme

گرفته می شود. و چنانچه $u < 0$ ، موقعیت سلول دهنده و گیرنده جابجا می شود. مقدار جریان فلاکس جابجا شده از یک سلول دهنده به یک سلول گیرنده طبق روابط زیر مشخص می شوند. چنانچه میزان فلاکس سیال در سلول $|v|$ باشد و مقدار آن برابر δt باشد و f_A یا f_D بیانگر جزء حجم سیال سلول گیرنده یا دهنده باشد، در این صورت مقدار فلاکس f سلول دهنده یا گیرنده مطابق روابط زیر بدست می آید:

$$FL_A = f_A \times |v| \quad (3-7)$$

$$FL_D = f_D \times |v| \quad (3-8)$$

تغییر فلاکس f در گام زمانی چنانچه برابر (مساحت سطح مورد نظر $\times \delta f$) باشد در این صورت:

$$\delta f = \min\{f_{AD}|v| + CF, f_D \delta x_D\} \quad (3-9)$$

$$CF = \max\{(1 - f_{AD})|v| - (1 - f_D)\delta x_D, 0\} \quad (3-10)$$

منظور از مینیوم استفاده شده در معادله فوق آنست که فلاکس f بیشتری از فلاکس f وجوه سلول دهنده خارج نشود و منظور از ماکسیموم استفاده شده آنست که چنانچه برای سلول مورد نظر فلاکس f بیشتری مد نظر باشد، که این حجم فلاکس f بیش از فلاکس f ورودی باشد، در این صورت این کمبود تامین شود، پس اگر فلاکس f موجود از وجه سلول دهنده بیش از فلاکس f وجه سلول گیرنده باشد آنگاه برای ایجاد تعادل از CF استفاده می گردد و چنانچه فلاکس f موجود از وجه سلول دهنده کمتر از فلاکس f وجه سلول گیرنده باشد آنگاه برای ایجاد تعادل از رابطه دارای مینیوم استفاده می شود.

۳-۳-۹-۲ الگوی یانگز^۱

در این روش جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می شود. در شبکه های غیر منظم این روش دقت مناسبی دارد و نیز در شبکه های منظم رفتار آن قابل قبول است. از آنجا که این روش توسط یانگز ارائه شده است، این روش بنام یانگز معروف می باشد.

در این روش به منظور تعیین سطح مشترک دو سیال از درون یابی خطی استفاده می شود. پس از آن در هر سلول بر اساس شیب سطح بدست آمده از دو سلول مجاور، سرعت محلی تعیین می گردد. انفصال معادله کسر حجمی به روش آپویند مرتبه اول می باشد و با مشخص شدن مقدار جزء حجم سیال $F_{i,j}$ در هر سلول میزان فلاکس F در دیواره سمت راست هر سلول FL_r طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$FL_r = \begin{cases} F_{ij} \times u_r \frac{\Delta t}{\Delta x} & : u_r \geq 0 \\ F_{i+1,j} \times u_r \frac{\Delta t}{\Delta x} & : u_r \leq 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

در تعیین شیب سطح مشترک دو سیال در هر سلول از رابطه زیر برای تعیین β (زاویه بین محور مثبت X و سطح مشترک دو سیال) استفاده می شود

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-n^x}{n^y} \right) \quad (3-12)$$

$$\begin{cases} n_{ij}^x = \frac{1}{\Delta x} (F_{i+1,j+1} + 2F_{i+1,k} + F_{i+1,j+1} - F_{i-1,j+1} - 2F_{i-1,j} - F_{i-1,j-1}) \\ n_{ij}^y = \frac{1}{\Delta x} (F_{i+1,j+1} + 2F_{ij+1} + F_{i-1,j+1} - F_{i+1,j-1} - 2F_{ij-1} - F_{i-1,j-1}) \end{cases} \quad (3-13)$$

¹ Geometric Reconstruction scheme

۳-۳-۹-۳ الگوی صریح اویلر^۱

در این روش جریان به صورت غیر دائمی تحلیل می شود. این روش در اصل یک روش تفاضل محدود می باشد که به صورت صریح مقدار جزء حجم سلول را در گام زمانی جدید بر اساس رابطه زیر معین می کند

$$\frac{f^{n+1} - f_n}{\Delta t} v + \Delta(u_f^n f^n) = 0 \quad (3-14)$$

در رابطه بالا منظور از n گام زمانی قبلی، $n+1$ گام زمانی جدید، u_f فلاکس حجم گذرنده از سطح سلول می باشد. f همان جزء حجم سلول و v حجم سلول مد نظر بوده و اختلاف دو گام زمانی توسط Δt نمایش داده شده است.

منظور از Δ تفاضل پیشرو می باشد که چنین تعریف می گردد

$$\Delta(x) = x_{j+1} - x_j \quad (3-15)$$

۳-۳-۹-۴ الگوی ضمنی^۲

در این روش جریان به صورت غیر دائمی قابل محاسبه می باشد که به صورت ضمنی مقدار جزء حجم سلول را در گام زمانی جدید بر اساس رابطه زیر معین می کند. این روش در اصل یک روش تفاضل محدود می باشد.

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} v + \Delta(u_f^{n+1} f^{n+1}) = 0 \quad (3-16)$$

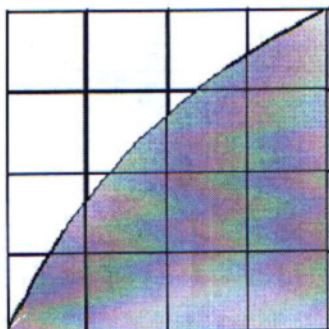
در استفاده از روش های بحث شده در فوق چنانچه سطح تماس واقعی در سلول به صورت شکل زیر باشد، در این صورت با روش های فوق می توان آنرا شبیه سازی نمود که طرح بازسازی هندسی^۳

¹ Euler Explicit Scheme

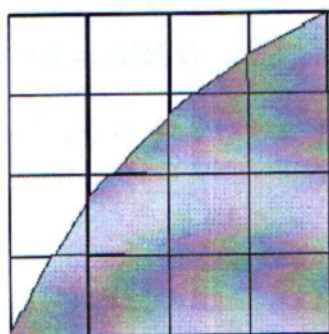
² Implicit Scheme

³ Geometric Reonstrction Scheme

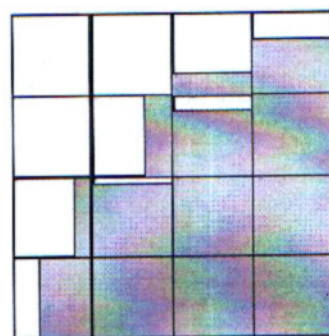
باشد، در این صورت با روش های فوق می توان آنرا شبیه سازی نمود که طرح بازسازی هندسی ۱ که سطح تماسی دو سیال را در هر سلول به صورت افقی یا قائم در نظر می گیرند، دقت قابل قبولی دارن



سطح سیال واقعی



سطح ایجاد شده بوسیله طرح بازسازی هندسی



سطح ایجاد شده بوسیله طرح دهنده - گیرنده

شکل ۲-۳ روشهای بازسازی سطح آزاد

¹ Donor – Acceptor Scheme

۱۰-۳-۳ مدل های موجود در فلوئنت

برنامه فلوئنت قادر به مدلسازی آشفته‌گی به روشهای زیر می باشد:
 فلوئنت مدل های آشفته‌گی زیر را تامین می کند.

۱- مدل اسپالارت - آلماراس^۱

از نوع اران.ای.اس^۲ می باشد و یک معادله ای محسوب می گردد.

۲- مدل $k-\epsilon$ استاندارد

از نوع اران.ای.اس می باشد و دو معادله ای محسوب می گردد.

۳- مدل $k-\epsilon$ اران.اس^۳

از نوع اران.ای.اس می باشد و دو معادله ای محسوب می گردد.

۴- مدل $k-\epsilon$ محسوس

از نوع اران.ای.اس می باشد و دو معادله ای محسوب می گردد.

۵- مدل تنش رینولدز

از نوع اران.ای.اس می باشد و بیش از دو معادله ای می باشد.

۶- مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ

از نوع فیلتر کردن ادی های بزرگ می باشد.

در اینجا مدل های آشفته‌گی به ترتیب از ساده ترین و کم هزینه ترین تا مشکل ترین و پرهزینه

ترین مدل ها مرتب شده اند. که در ادامه بیشتر به مدل $k-\epsilon$ که در پروژه هم بکار رفته می پردازیم.

^۱Spalart – Allmaras model

^۲RANS

^۳R.N.S

۱۱-۳-۳ مدل اسپالارت - آلماراس

مدل اسپالارت - آلماراس یک روش نسبتاً ساده یک معادله ایست که یک معادله انتقال مدل شده را برای ویسکوزیته آشفته جنبشی حل می کند. این یک کلاس جدید از مدل یک معادله ای را در بر دارد که در آن دیگر لازم نیست مقیاس طولی مربوط به ضخامت لایه برشی موضعی محاسبه شود. مدل اسپالارت - آلماراس اختصاصاً برای کاربردهای هوافضایی که شامل جریان‌های مرز دیوار هستند طراحی شده است و ثابت شده است که نتایج خوبی برای لایه های مرزی که در معرض گرادیان های فشار مخالف هستند ارائه می دهد.

این روش تدریجاً دارد برای کاربردهای توربوماشین ها رواج پیدا می کند (توربو ماشین ها، ماشین هایی هستند که انرژی را بین توربین و سیال انتقال می دهند که شامل هم توربین و هم کمپرسور می شود). مدل اسپالارت - آلماراس در شکل اصلی ش یک مدل با عدد رینولدز پایین است، که برای اینکه به طرز مناسبی حل شود نیاز به منطقه تحت تاثیر لایه مرزی دارد. در فلوئنت وقتی که دقت و کیفیت و وضوح مش به اندازه کافی خوب نیست، مدل اسپالارت - آلماراس از توابع دیواره استفاده می کند. این امر ممکن است مدل را برای شبیه سازی نسبتاً خام روی مش های درشت و ضخیم، که محاسبات دقیق جریان آشفته بحرانی نیست، بهترین گزینه سازد. از این گذشته گرادیان های نزدیک دیواره متغیر انتقالی در این مدل، خیلی کمتر از گرادیان های متغیرهای انتقالی در مدل های $k - \epsilon$ است. این امر وقتی که در نزدیکی دیوارها از مش های بی لایه استفاده می شود، مدل را نسبت به خطاهای عددی کمتر حساس می کند. مدل اسپالارت آلماراس هنوز نسبتاً جدید است و هیچ ادعایی در خصوص شایسته بودنش در مورد همه جریان های پیچیده مهندسی ندارد. برای مثال این مدل برای پیش بینی تحلیل آشفتهگی ایزوتروپیک همگن غیر قابل اعتماد است. بعلاوه مدل های یک معادله ای معمولاً به خاطر ناتوانیشان در تطبیق دادن سریع در مقیاس طول، مانند وقتی که جریان به طور ناگهانی از مرز دیوار به جریان برشی آزاد تغییر می کند، مورد انتقاد واقع می شوند.

موضوع اصلی در مدل های آشفتگی که از روش بوسینسک استفاده می کنند، چگونگی محاسبه ویکوزیته گردابه ای است. مدل اصلاح شده بوسیله اسپالارت - آلماراس یک معادله انتقال برای یک کمیت، که شکل اصلاح شده از ویسکوزیته آشفتگی می باشد، حل می کند.

۳-۳-۱۲ مدل $k-\varepsilon$ استاندارد

مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل نیمه تجربی است که بر اساس معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته و نرخ پراکندگی آشفتگی می باشد. در تحلیل جریان های آشفته با مدل $k-\varepsilon$ استاندارد که بیشترین کاربرد را در بین دیگر مدل ها دارند، ثابت های معادلات و نیز استخراج خود معادلات توسط جونز و لاندن^۱ صورت گرفته است. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. در روش $k-\varepsilon$ استاندارد که یک روش نیمه تجربی است، معادله k دقیقاً از ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می شود. اما معادله ε حاکم توسط شواهد تجربی و آزمایشگاهی و روابط ریاضی حاصل می گردد. در استخراج این معادلات ε, k چنان فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت ملکولی بسیار ناچیز باشد.

معادله k به صورت زیر می باشد:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3-17)$$

معادله ε به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma \varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-18)$$

G_k : تولید انرژی جنبشی آشفته بر اثر گرادیان های سرعت متوسط (ترم چشمه)

G_b : تولید انرژی جنبشی آشفته بر اثر نیروی شناوری (ترم چاه)

¹ Jones & Launder

لزجت گردابه ای در معادلات فوق توسط رابطه زیر معین می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-19)$$

	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

جدول (۱-۳) ثابت های معادلات استاندارد $k-\varepsilon$

جدول ضرایب ثابت برای معادلات استاندارد $k-\varepsilon, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ به اعداد پرانتل آشفستگی مشهور

هستند. ثابت $C_{3\varepsilon}$ در معادله ε ، اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می کند.

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad (3-20)$$

بنابراین چنانچه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد در این صورت در لایه برشی این ثابت برابر

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

مقادیر پیش فرض از آزمایش ها بدست آمده اند که برای رنج زیادی از جریان ها خیلی خوب عمل

می کنند.

۳-۳-۱۳ مدل $k-\varepsilon$ حالت ار.ان.جی^۱

مدل $k-\varepsilon$ ار.ان.جی با استفاده از یک تکنیک آماری استخراج شده است. این مدل از لحاظ فرم

شبيه مدل $k-\varepsilon$ استاندارد است ولی موارد زیر را نیز شامل می شود:

- مدل ار.ان.جی یک ترم اضافی در معادله ε دارد که دقت را برای جریان های کرنشی سریع به

طور قابل ملاحظه ای بهبود می بخشد.

¹ R.NG

- در مدل اران.جی اثر چرخش روی آشفتگر لحاظ شده است که دقت را برای جریان های چرخشی بالا برده است.

- عددی اران.جی برای اعداد پرانتل آشفته یک فرمول تحلیلی دارد در حالی که مدل $k-\varepsilon$ استاندارد از مقادیر ثابت تعریف شده توسط کاربر استفاده می کند.

در حالی که مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل برای اعداد رینولدز بالاست، عددی اران.جی یک فرمول دیفرانسیل تحلیلی مشتق شده را برای ویکوزیته موثر داراست که اثرهای اعداد رینولدز پایین را محاسبه می کند. این ویژگی ها مدل $k-\varepsilon$ اران.جی را برای کلاس های گسترده ای از جریان ها نسبت به مدل $k-\varepsilon$ استاندارد، دقیق تر و قابل اعتمادتر می باشد. این روش بر پایه ریاضی و محاسبات بنا شده است. بطوری که در این روش آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق به کمک روابط ریاضی بدست می آید. در این مدل یک ترم اضافی در معادله ε وارد می شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می گردد. این مدل نسبت به مدل $k-\varepsilon$ استاندارد در جریان های چرخشی کارایی بیشتری دارد و بر خلاف مدل استاندارد به منظور تعیین اعداد آشفتگی پرانتل از رابطه تحلیلی استفاده می کند. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان در میدان های دارای انحنا یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می کنند.

۱۴-۳-۳ مدل $k-\varepsilon$ محسوس

دو تفاوت عمده ای که این مدل نسبت به مدل حالت استاندارد دارد تا از ایجاد عدم تعادل در حل معادلات به خصوص در قسمت زیر لایه ناحیه مرزی که میزان کرنش تولیدی در آن زیاد می باشد جلوگیری می شود به شرح زیر است:

۱- تعیین رابطه جدید لزجت گردابه ای (μ_t)

۲- اضافه نمودن یک ترم چشمه به معادله ε که تغییرات چرخش جریان در آن لحاظ شود.

منظور از محسوس این است که این مدل قیود و محدودیت های ریاضی خاصی را روی تنش های رینولدز ارضا می کند که با فیزیک جریان های آشفته سازگار است. یک مزیت مدل $k-\varepsilon$ محسوس این است که بطور دقیق تری نرخ انتشار جت های صفحه ای و مدور را پیش بینی می کند. این مدل در جریان های دارای لایه مرزی، جریان چرخشی، جریان تحت گرادیان معکوس فشار، جدایی جریان، جت های صفحه و دایره ای و نسبت به سایر مدل های رایج $k-\varepsilon$ نتایج بهتری را ارائه نموده است.

معادله k حاکم بر مدل همان رابطه حالت استاندارد می باشد، ولی معادله ε حاکم متفاوت است.

معادله ε :

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-21)$$

لزجت گردابه ای در معادلات فوق توسط رابطه زیر معین می شود که مقدار ضریب C_μ ثابت

نیست و طبق رابطه زیر تعیین می شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-22)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3-23)$$

$$\begin{cases} U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \\ \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \\ \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \end{cases} \quad (3-24)$$

در روابط بالا منظور از ω_k مقدار کل چرخش (سرعت زاویه ای) میدان و $\bar{\Omega}_{ij}$ بیانگر تنسور نرخ

چرخش متوسط می باشند.

$$\begin{cases} A_s = \sqrt{6} \cos \phi \\ \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \\ W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}} \end{cases} \quad (3-25)$$

S بیانگر مدول نرخ کرنش متوسط می باشد که رابطه آن بر حسب نرخ کرنش متوسط چنین است:

$$\begin{cases} \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \\ S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (3-26)$$

فصل چهارم

روشهای گسسته سازی

روشهای انفصال

۴- روش های انفصال معادلات

معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار جریان سیالات که در فصل سوم به آنها اشاره شد، به طوری که مستقیم قابل استفاده برای کارهای عددی نیستند و باید در ابتدا آنها را به شکلی گسسته سازی^۱ نمود. معادلات ناویر - استوکس دارای ترم های انتقالی و پخش می باشد که هر یک از ترم ها را می توان به روش های مختلف و با دقت های متفاوتی گسسته سازی نمود. با گسسته سازی مقادیر مجهول سرعت در جهات مختلف و فشارها فقط روی یک سری از نقاط که روی مش محاسباتی قرار دارند محاسبه می گردند. بنابراین معادله انصالی رابطه ای جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط می سازد.

دو روش عمده بعنوان روش های انفصال میدان جریان مطرح می باشد:

۱- روش اجزاء محدود

۲- روش تفاضل محدود

تفاوت بین روش های تفاضل محدود و اجزاء محدود از نحوه انتخاب پروفیل های میدان های منفصل شده و نحوه بدست آوردن معادلات انفصال حاصل می شود. روش دیگری که این پروژه بر آن متکی می باشد دارای ظاهراً روش تفاضل محدود است ولی بسیاری از ایده های اجزاء محدود را به کار می گیرد. این روش به روش حجم محدود مشهور است. روش حجم محدود به علت مستتر بودن خاصیت بقای جرم در آن در حل میدان جریان سیال نسبت به سایر روش های انفصال ارجح می باشد.

¹ Discretization

۴-۱- روش حجم محدود

این روش ابتدا به عنوان یک فرمول بندی اختلاف محدود ویژه توسعه و در چهار برنامه اصلی تجاری CFD مورد استفاده قرار می گیرد.

الگوریتم های عددی شامل مراحل زیر می باشند:

- انتگرال کلی از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم های کنترل مربوط به میدان حل گسسته سازی، شامل جایگذاری نوعی از تقریب های اختلاف محدود برای عبارت های داخل معادله انتگرالی می باشد، که فرآیندهای جریان مثل جابجایی، نفوذ و چشمه ها را نشان می دهد. این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می کند.

- حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار

قدم اول، یعنی انتگرال گیری از حجم کنترل، حجم محدود را از سایر روش های CFD متمایز می کند. دیدگاه حجم محدود بقاء محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می کند. این رابطه روش بین الگوریتم عددی و قاعده کلی بقاء محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می کند. این رابطه روشن بین الگوریتم عددی و قاعده کلی بقاء اصل فیزیکی، یکی از جاذبه های اصلی روش حجم محدود را تشکیل می دهد و درک مفاهیم آن را برای مهندسين، خیلی ساده تر از روش های عناصر محدود را تشکیل می دهد و درک مفاهیم آن را برای مهندسين، خیلی ساده تر از روش های عناصر محدود و طیفی برای بقاء یک متغیر جریان ϕ مهیا می سازد. برای مثال یک مولفه سرعت در داخل یک حجم کنترل را، می توان به صورت یک تساوی بین فرایندهای متفاو که منجر به افزایش یا کاهش آن می شود، نشان داد.

نرخ تغییر ϕ در حجم کنترل نسبت به زمان =

شار خالص ϕ به دلیل جابجایی به داخل حجم کنترل +

شار خالص ϕ به دلیل نفوذ به داخل حجم کنترل +

نرخ خالص تولید ϕ در داخل حجم کنترل

برنامه های CFD، شامل روش های گسسته سازی مناسب، برای حل پدیده های انتقالی مهم، جابجایی (انتقال بدلیل جریان سیال)، نفوذ (انتقال بدلیل تغییرات ϕ از نقطه ای به نقطه دیگر) و همچنین عبارات چشمه (همراه با تولید یا اتلاف ϕ) و نرخ تغییر نسبت به زمان می باشند. همچنین پدیده های فیزیکی اساسی، پیچیده و غیر خطی می باشند بنابراین یک روش حل تکرار مورد نیاز است.

در روش مانده های وزن دار ابتدا دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیر همپوشان تقسیم شده به نحوی که هر حجم حول یک نقطه ای میدان قرار می گیرد و آنگاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادلات به فرم عددی منفصل می گردند. ایده اصلی در این روش انفصال تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا نمی باشد، بلکه شرط برقراری اصل بقای جرم به صورت ماکروسکوپی دارای اهمیت است. پس از انتگرال گیری روی حجم کنترل مورد نظر مربوط به هر گره، عبارات جابجایی و پخش باید به گونه ای منفصل شوند که فرمول حاصل پایدار و دقیق باشد.

۲-۴- حل میدان جریان

حل سه معادله حاکم میدان جریان تراکم پذیر دو بعدی مشکل می باشد، بنابراین در معادله پیوستگی تنها پارامترهای سرعت میدان وجود دارند در حالی که در معادلات ممنتوم در جهت X و Y علاوه بر ترم های سرعت پارامتر فشار نیز حضور دارد که در حل معادلات این غیر یکنواختی، باعث مشکل در کوپل کردن معادلات می شود. اما چنانچه مقدار فشار در میدان محاسباتی مشخص باشد، مشکلی در حل میدان و استفاده از معادلات حاکم وجود نخواهد داشت. در یک میدان جریان واقعی بدلیل مجهول بودن فشار در میدان، معادله پیوستگی به طور غیر مستقیم به معادله تصحیح فشار تبدیل می شود. استفاده از شبکه جابجا شده در انفصال میدان جریان بعضی از مشکلات اولیه حل میدان که ناشی از انتخاب نحوه انفصال میدان می شود و باعث موج شدن مقادیر میدان می گردد، از

بین می رود. بدین ترتیب برای هر پارامتر میدان جریان یعنی u, v, p یک حجم کنترل مخصوص به خود در نظر گرفته شده و معادلات منفصل شده مربوط به آن پارامتر حل می گردد.

در حل معادلات غیر خطی حاکم بر میدان جریان نیاز به تخصیص اولیه جریان می باشد که با مقادیر u^*, v^*, p^* معین می گردند. با توجه به مقادیر حدسی حل میدان چنین خواهد بود:

$$a_e u_e^o = \sum a_{nb} u_{nb}^o + b + (P_P^o - P_E^o) A_e \quad (4-1)$$

$$a_n v_n^o = \sum a_{nb} v_{nb}^o + b + (P_P^o - P_N^o) A_n \quad (4-2)$$

منظور از A_e و A_n سطح عمده بر شار عبوری از وجه سلول مد نظر می باشد. اگر u, v, p مقادیر

واقعی متغیرهای میدان باشند، در این صورت اختلاف حدسی و واقعی با u', v', p' معین می گردد.

$$u' = u - u^* \quad (4-3)$$

$$v' = v - v^* \quad (4-4)$$

$$p' = p - p^* \quad (4-5)$$

۴-۳ الگوی سیمپل ۱

در کوپل کردن متغیرهای u, v, p چنانچه مقادیر حدسی به مقادیر واقعی نزدیک باشند در این

صورت می توان روابط زیر را برای آن نوشت:

$$\begin{cases} \sum a_{nb} u'_{nb} = 0 \Rightarrow u_e = u_n^o + d_e (P'_P - P'_E) \\ \sum a_{nb} v'_{nb} = 0 \Rightarrow v_e = v_n^o + d_e (P'_P - P'_N) \end{cases} \quad (4-6)$$

$$d_e = \left[\frac{A_e}{a_e} \right] \quad (4-7)$$

$$a_p P'_p = \sum a_{nb} P'_p + b \quad (4-8)$$

$$b = \frac{\rho_p^o - \rho_p}{\Delta t} \Delta x \Delta y + [(\rho u^o)_w - (\rho u^o)_e] \Delta y + [(\rho v^o)_s - (\rho v^o)_n] \Delta x \quad (4-9)$$

¹ Simple Implicit Method of Pressure-linked Equation

۴-۴- الگوریتم حل الگوی سیمپل

۱. میدان فشار و سرعت حدس زده می شوند
۲. بر اساس معادله (۴-۱) و (۴-۲) مقادیر حدسی میدان سرعت می آیند
۳. معادله تصحیح فشار p' حل می گردد
۴. تصحیح مقدار فشار بر اساس رابطه $P = P' + P^*$
۵. حل معادلات V, u بر اساس روابط (۴-۶)
۶. سایر معادلات حاکم بر میدان مانند آشفتگی حل می گردند
۷. فشار حدسی جدید جایگزین P^* شده و مرحله ۱ دوباره آغاز می گردد تا جایی که به مقدار همگرایی رسیده شود

فصل پنجم

جریان در حفره

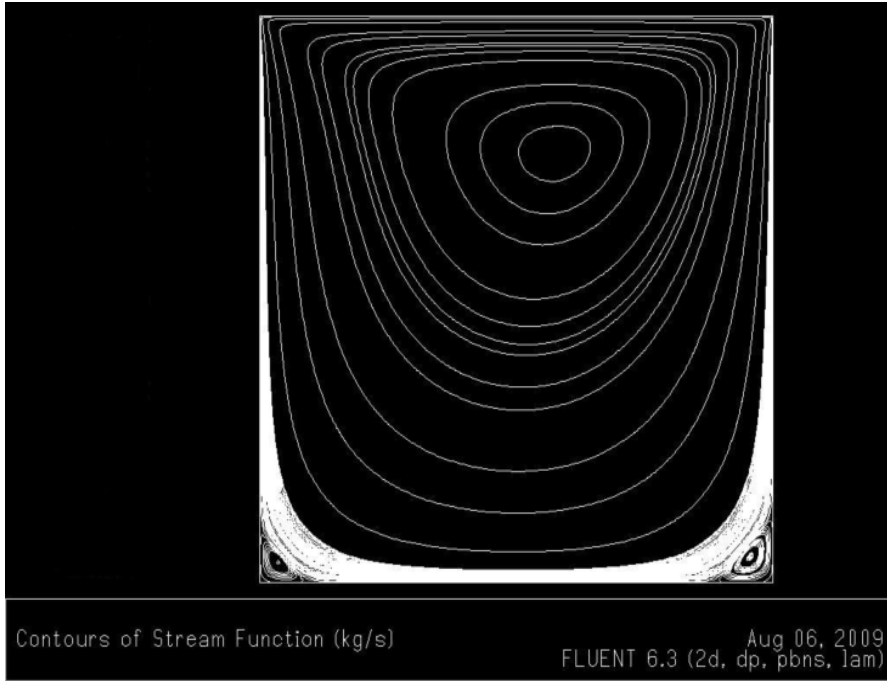
دو بعدی

۵- شبیه سازی جریان سیال در حفره دو بعدی

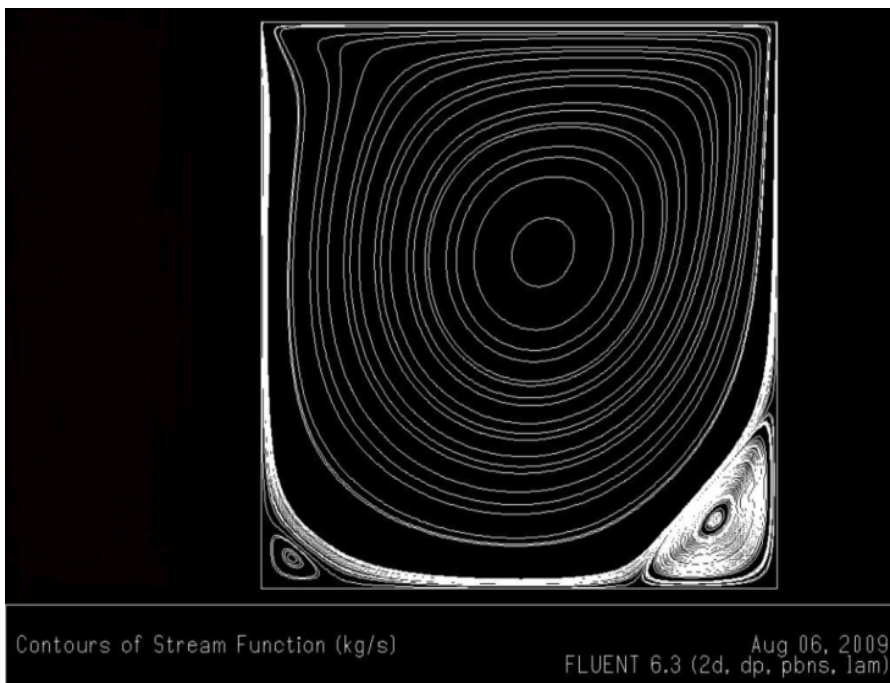
در این فصل ابتدا به بررسی مساله جریان درون محفظه مایع با سطح بالائی متحرک بدون سطح آزاد پرداخته و نتایج حاصله را با نتایج کد مقایسه کرده پس از آن نوبت به حل جریان مایع با سطح آزاد درون مخزن با سطح زیرین متحرک می رسد. در این فصل ما به تفضیل بحث پیرامون جریانهای آرام و آشفته در این مساله خاص را دنبال کرده و همانند حالت قبل تمامی عوامل دخیل بر روند حل را در نظر گرفته و به مقایسه جوابهای بدست آمده با حل عددی پرداخته ایم همانطور که گفته شد جریان در یک حفره دو بعدی به ابعاد $1m \times 1m$ با تعداد مش 100×100 در مقادیر مختلف رینولدز تحت رژیم های جریان آرام و آشفته مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج با نتایج کدنویسی مشابه صورت گرفته در مرجع [۸] مورد تطابق قرار گرفته که تطابق بسیار خوبی را نشان می دهد. در این مطالعه اعداد رینولدز مورد بررسی در محدوده مقادیر $Re < 10000$ صورت گرفته است و از الگوریتم سیمپل در حل معادلات حاکم بر جریان استفاده گردیده است و از روش بالا روش مرتبه دوم جهت گسسته سازی بکار گرفته شده است. اگر چه بهترین مدل اغتشاشی مدل تنش رینولدز بوده ولی چون حل جریان طولانی است برای این مسئله از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استفاده کردیم زیرا سریعتر همگرا شده و نسبتا دقیق می باشد. اگر در آن از تقریب قانون دیواره استفاده کنیم. جریان در گوشه ها اشکار نمی شود ولی با استفاده از تعریف وال ترنمنت^۱ و با در نظر گرفتن گرادیان فشار گردابه ها دیده شده اند. چون جریان نمی تواند خود را با لبه ها هماهنگ کند این جریان ثانویه در گوشه ها ایجاد شده که بر اساس سرعت و لزجت جریان بر عکس حرکت گردابه اصلی حرکت می کنند.

^۱wall treatment

شکل‌های زیر خطوط جریان^۱ را در اعداد رینولدز مورد نظر در حفره دو بعدی نشان می‌دهد.

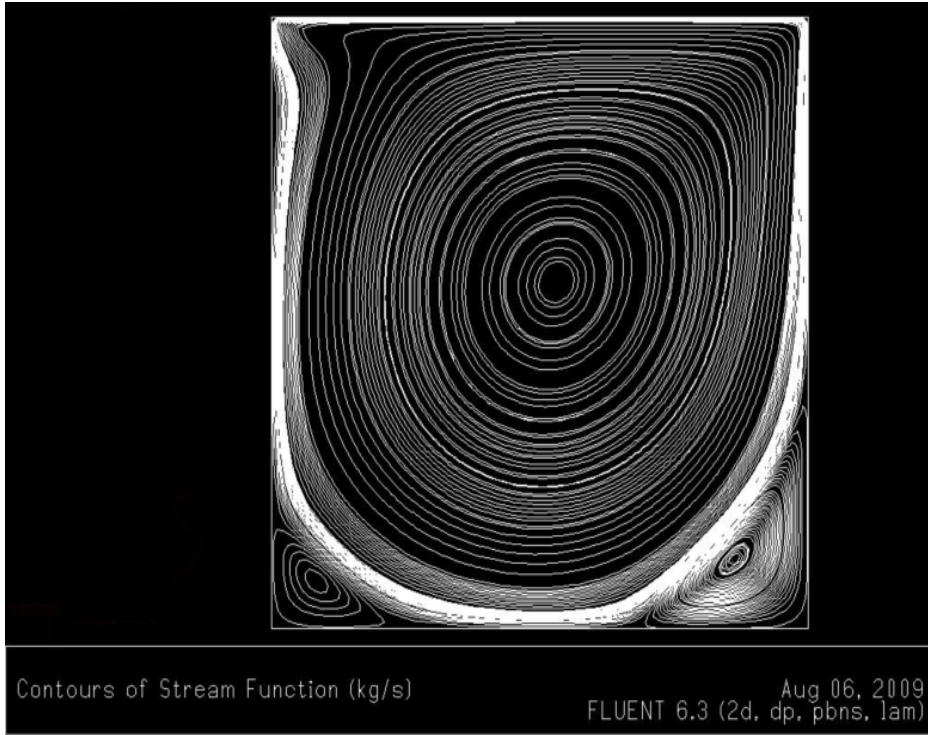


شکل (۵-۱) $Re=50$

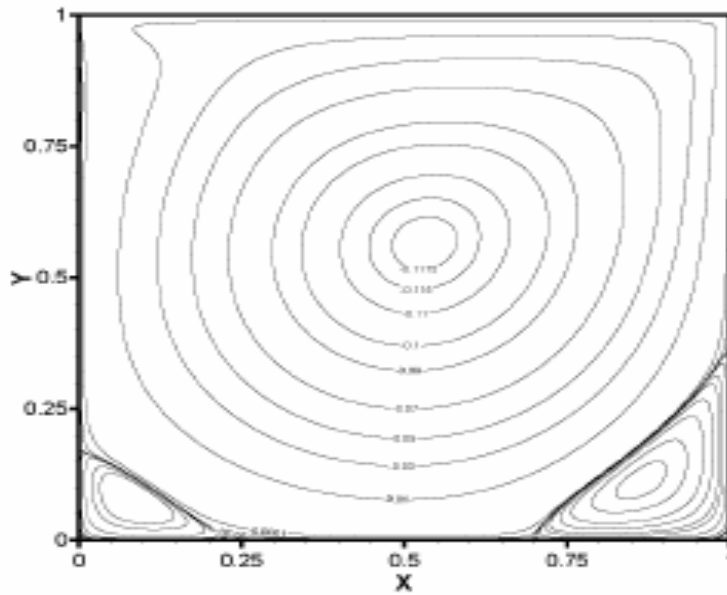


شکل (۵-۲) $Re=5000$

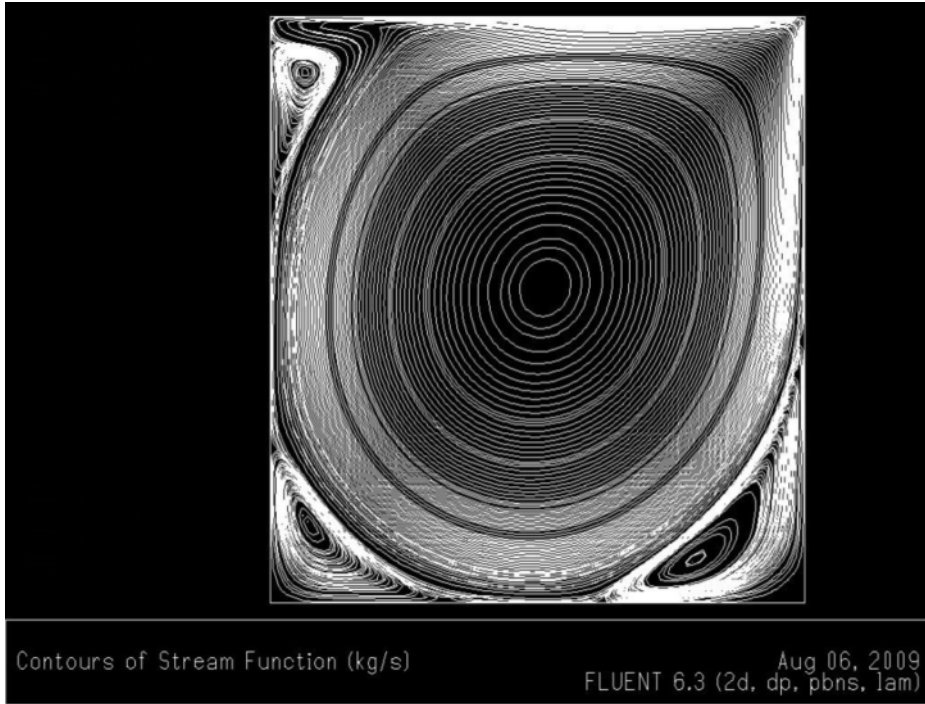
^۱ Streamline



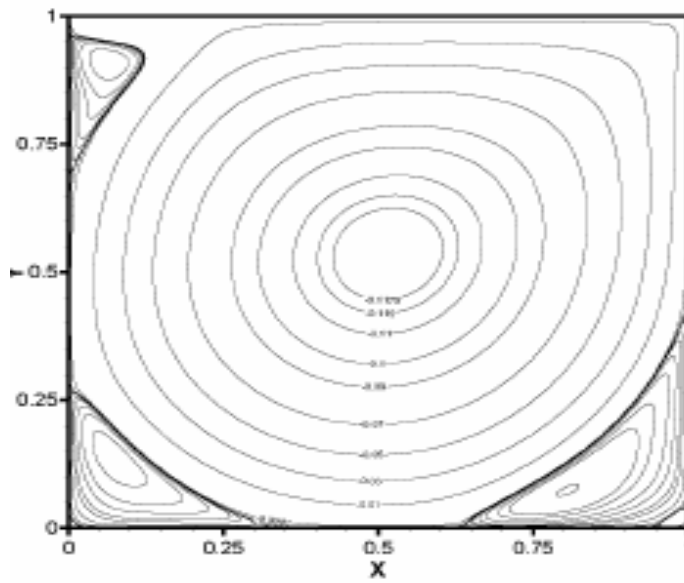
شکل (۵-۳) $Re=1000$



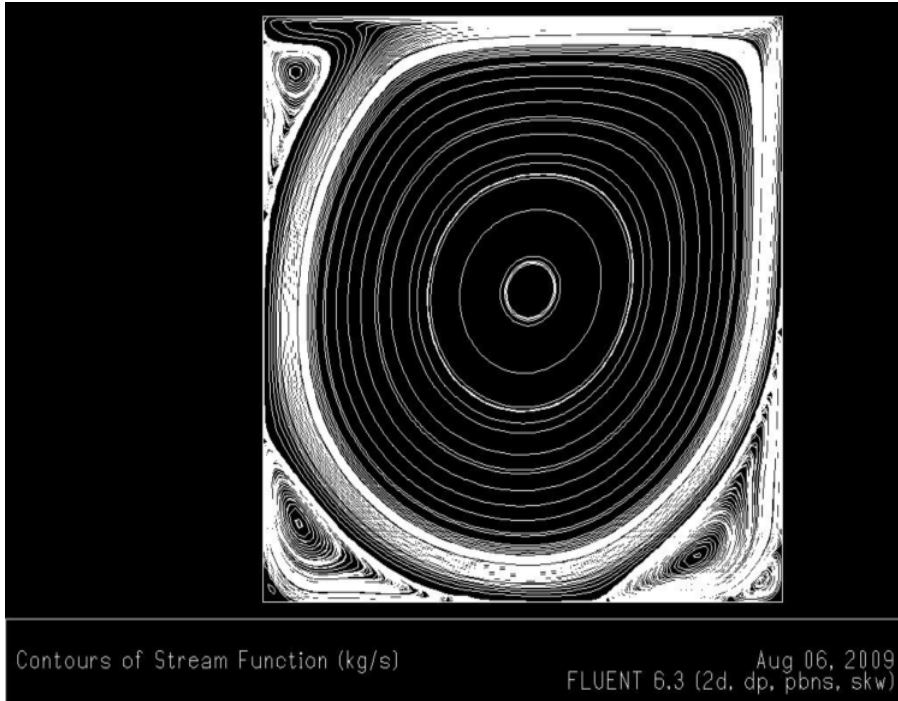
شکل (۵-۴) نتیجه مرجع [۸] در $Re=1000$



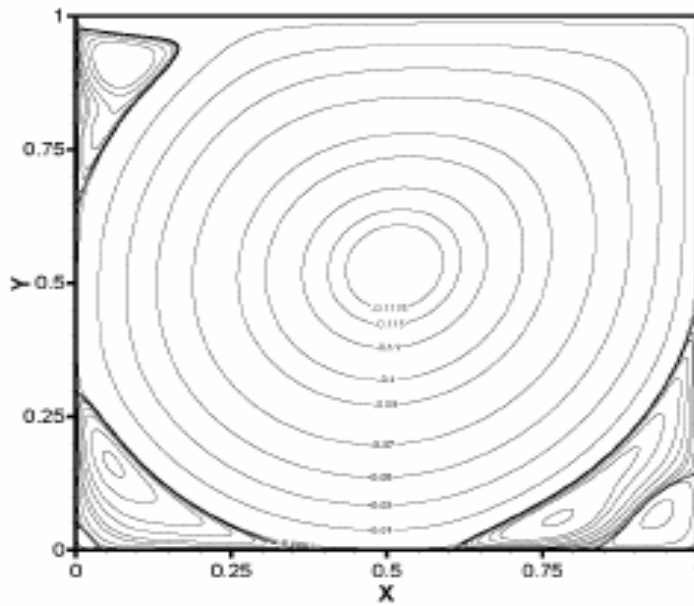
شکل (۵-۵) $Re=5000$



شکل (۵-۶) نتیجه مرجع [۸] در $Re=5000$



شکل (۵-۷) $Re=10000$



شکل (۵-۸) نتیجه مرجع [۸] در $Re=10000$

شکلهای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ خطوط جریان در اعداد رینولدز $Re=50$ و $Re=500$ و $Re=10000$ و $Re=5000$ می باشند. نوع رژیم جریان در این مقادیر رینولدز آرام می باشد. با توجه به نمودار (۱) که مربوط به جریان حفره دو بعدی در رژیم جریان لامینار در عدد رینولدز $Re=50$ می باشد، در گوشه پایین سمت راست و چپ، دو گردابه تشکیل شده اند. با افزایش عدد رینولدز به $Re=500$ ابعاد گردابه ایجاد شده بزرگتر گردیده است در رینولدز $Re=10000$ در گوشه بالا سمت چپ همانطور که از شکل دیده می شود گردابه ای در حال شکل گرفتن می باشد بطوریکه در عدد رینولدز 5000 گردابه سمت چپ گوشه بالایی قابل رویت می باشد و گردابه های ایجاد شده در گوشه پایین سمت راست و چپ به بزرگترین بعد هندسی خود رسیده اند و جهت گردابه در عدد رینولدز 5000 در گوشه پایین سمت راست به سمت چپ تمایل به حرکت دارد و گردابه گوشه پایین سمت راست به جهت بالا تمایل به حرکت و گسترش دارد. شکل ۵ در عدد رینولدز 10000 که مربوط به رژیم جریان توربولانت می باشد در گوشه پایین سمت راست و چپ علاوه بر گردابه های اصلی دیده شده گردابه هایی دیگر نیز که دارای بعد هندسی کوچکتری نیز هستند تشکیل شده است و جهت دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر می باشد.

فصل ششم

تحليل سطح آزاد

تحلیل عددی سطح آزاد

در ادامه به بررسی جریان سیال در یک مخزن با سطح زیرین متحرک در حالت دو بعدی می پردازیم. ایجاد مخزن به کار گرفته شده در این مطالعه $1m \times 1m$ می باشد و تعداد مش به کار گرفته شده 100×100 است. شرایط رژیم جریان سیال در مخزن را در حالت های آرام و توربولانت مورد مطالعه قرار داده ایم و کانتورهای جریان را در بازهای زمانی مختلف بررسی نموده ایم و موقعیت و محل گردابه ها را مشخص نموده ایم در ادامه با تغییر سرعت سطح زیرین و میزان ارتفاع سیال درون مخزن، اثرات این پارامترها را در هر کانتور جریان بررسی نموده ایم سپس نتایج به دست آمده از ترکیب مخزن در شرایط هارمونیک را با نتایج آزمایشگاهی و کد مورد تطابق قرار داده ایم که نشان دهنده دقت بالای تحلیل می باشد در این مقاله از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. این نرم افزار توانایی مدل کردن مسائل مکانیک سیالات را با روش ها و مدل های مختلف دار می باشد.

۶- شبیه سازی جریان آرام درون محفظه با سطح زیرین متحرک

برای این منظور حفره ای به صورت $1m \times 1m$ با شبکه بندی 100×100 با تعریف شرایط مرزی به صورت دیواره های مجانب ساکن و دیواره زیرین متحرک با سرعت $1 \frac{m}{s}$ و سطح بالایی دارای شرایط اتمسفری^۱ در نظر گرفته، آن را تا نیمه از مایعی با لزجت سینماتیکی ($\mu = 0.01$) و دانسیته ($\rho = 10$) به عبارتی $Re = 1000$ پر می کنیم. با حل جریان به صورت آرام به طور غیر دائمی و $Timestep = 0.1$ بعد از گذشت زمان $30/01$ ثانیه جریان به حالت دائمی رسیده و تغییری در مکان سیرکولاسیون مشاهده نمی شود. که برای رسیدن به این منظور، باید زمانی برابر با $Cputime = 186500s$ حل مسأله سپری گردد. با توجه به نتایج به دست آمده همان گونه که می بینیم سطح آزاد در گوشه بالایی سمت راست بالا آمده و سیرکولاسیون به گوشه سمت راست

¹ Pressure Outlet

نزدیک شده و سطح جریان در قسمت وسط کاملاً مقعر است. در این مدل سازی از سیستم چند فازي و از روش کسر حجمی استفاده گردیده است. مدل استفاده شده برای شبیه سازی جریان توربولانت مدل $k-\varepsilon$ استاندارد می باشد و روش کنترل حل پیرو^۱ استفاده شده است.

۶-۱ شبیه سازی جریان آشفته درون محفظه مایع با سطح زیرین متحرک

برای حل جریان در حالت توربولانس، فیزیک مسأله را مانند حالت آرام در نظر می گیریم باین تفاوت که مایع مورد استفاده در این قسمت آن با $(\mu = 0.001)$ و $(\rho = 998)$ یعنی $Re = 10^6$ می باشد. توجه به این نکته ضروری است که مش بندی در این حالت مناسب وضعیت توربولانس می باشد و مدل اغتشاشی مورد استفاده $(k-\varepsilon)$ بوده که روش تعیین آن نسبت شدت ویسکوزیته است.

Backflow Turbulent Viscosity Ratio=10

Backflow Turbulent Intensity Ratio=10%

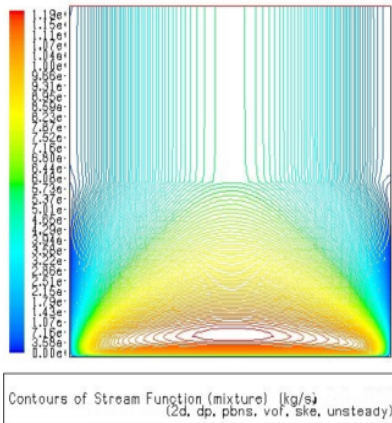
حل معادلات مومنتوم با روش بالاوزش مرتبه دوم. معادلات کسر حجمی با روش بازسازی سطح آزاد و معادلات انرژی جنبشی و اتلافی اغتشاشی از روش بالاوزش مرتبه اول انجام شده است در شکل (۶-۱) می بینیم که با حل غیر دائمی با $Timestep=0.1$ با گذشت زمان $127/7$ ثانیه مسأله به حالت دائمی نزدیک شده و در شکل (۶-۱) سیرکولاسیون بعد از طی مسیری معین همانند مسأله قبل نزدیک به گوشه سمت راست بدون تغییر باقی می ماند، بنابراین گوشه سمت راست سطح بالا آمده ولی فرو رفتگی وسط پروفیل به خوبی آشکار نیست.

¹ P.I.S.O

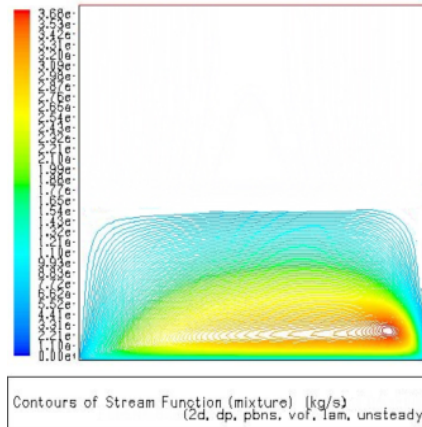
۲-۶ مقایسه نتایج جریان های آرام و آشفته در مخزن مایع با سطح زیرین متحرک

در این قسمت جواب های به دست آمده از حل جریان درون مخزن با سطح زیرین متحرک با سرعت $1 \frac{m}{s}$ را از ابتدا تا زمان رسیدن به حل پایدار در زمان های مساوی برای دو حالت جریان آرام و جریان آشفته بررسی می کنیم هدف از انجام این مقایسه رسیدن به یک استنتاج منطقی برای بیان تفاوت های بین این دو جریان و نمایش لحظات گذرا برای هر دو جریان می باشد.

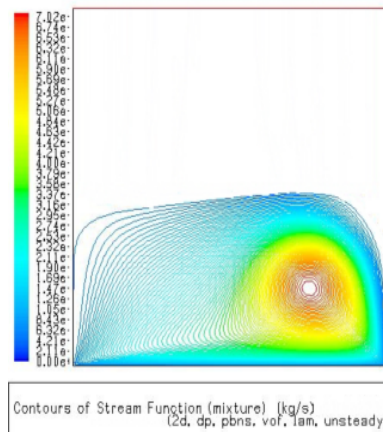
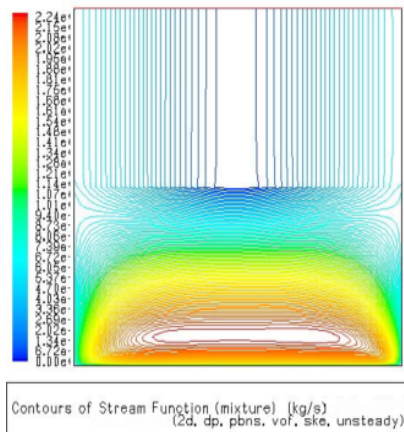
جریان آشفته



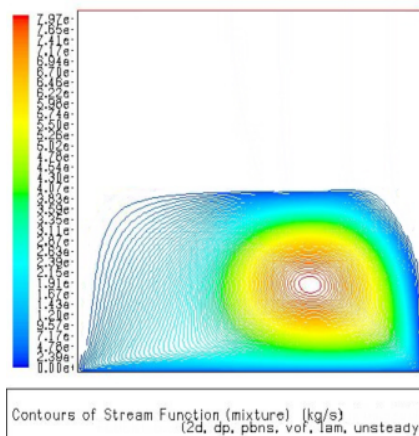
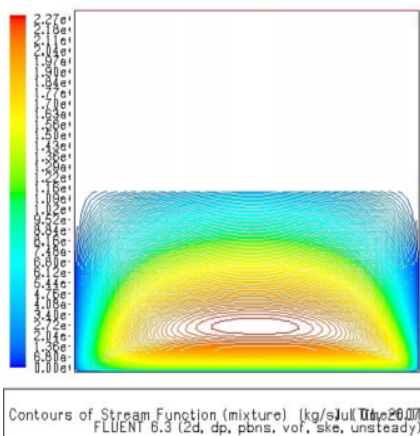
جریان آرام



زمان : 1.1sec

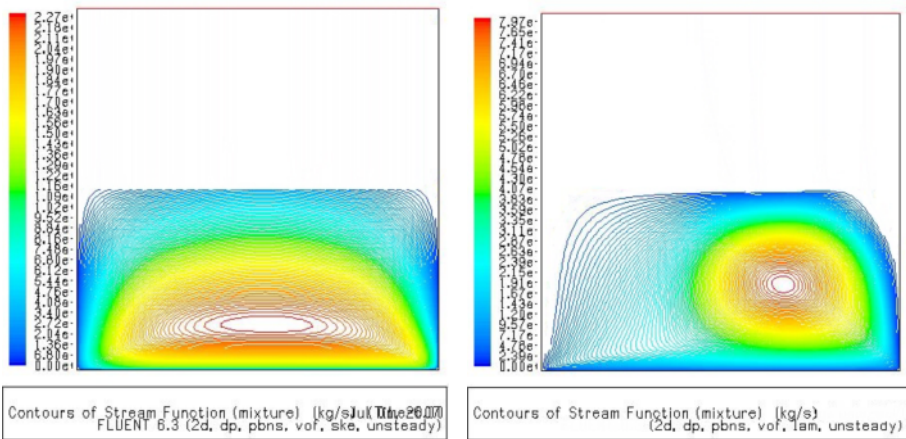


زمان : 3.6sec

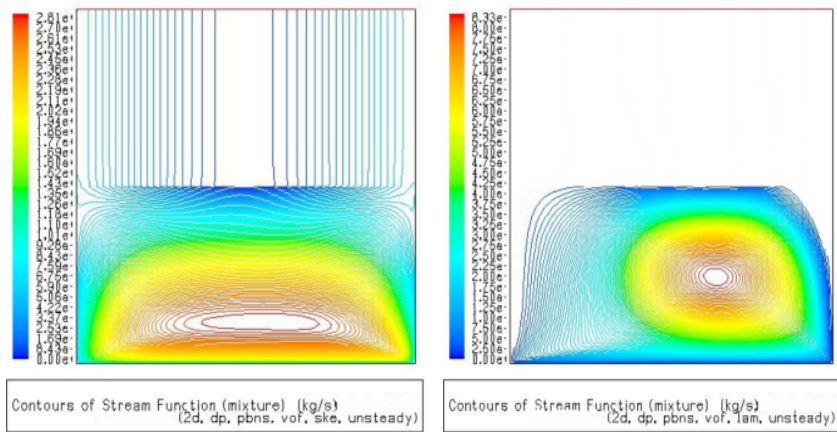


زمان : 4.9sec

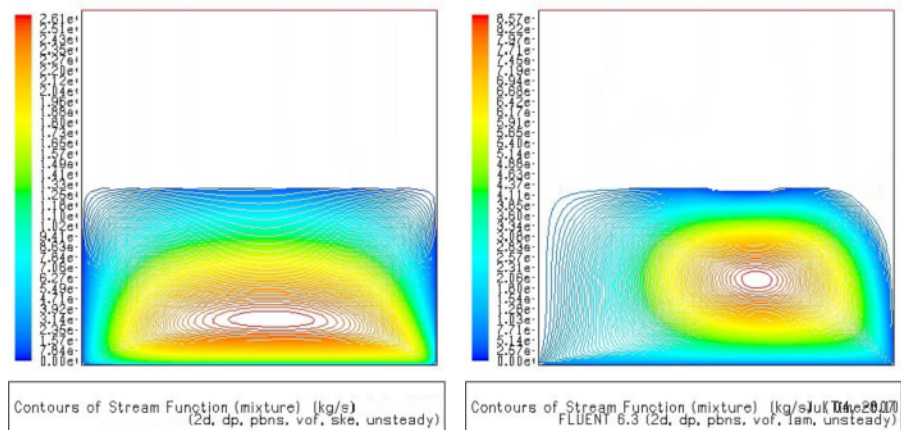
شکل ۶-۱ بردارهای سرعت و خطوط جریان آرام و آشفته در زمان های مختلف



زمان: 6sec

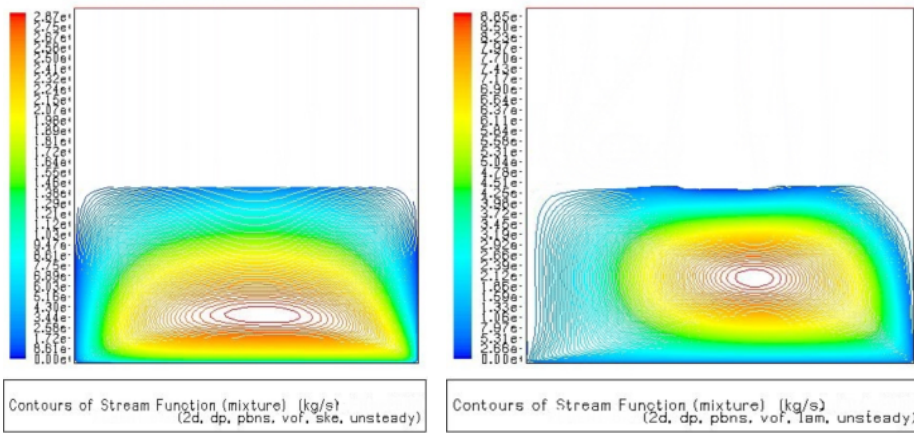


زمان: 7.2sec

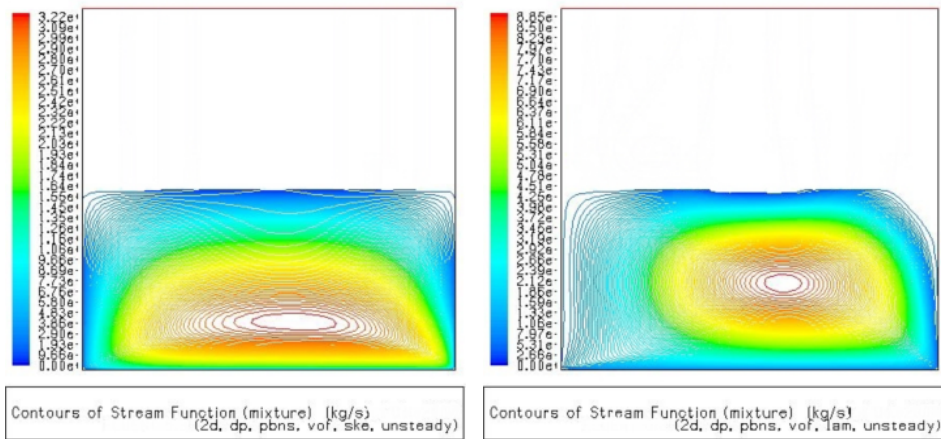


زمان: 8.1sec

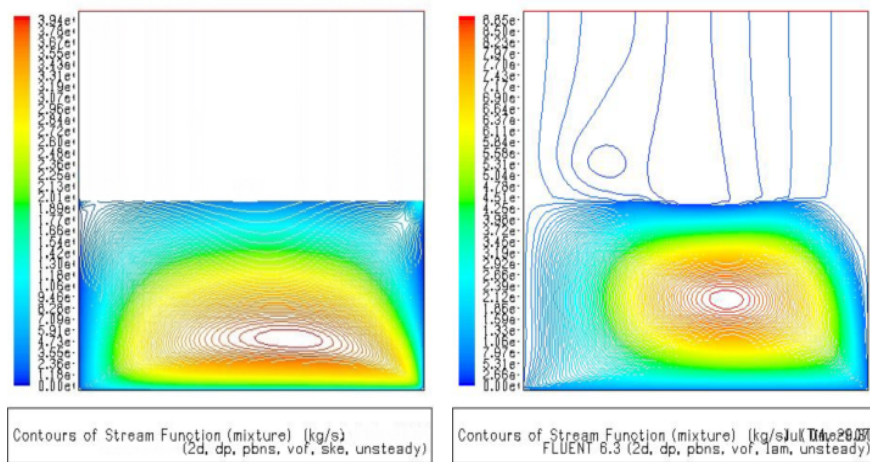
شکل ۶-۱ بردارهای سرعت و خطوط جریان آرام و آشسته در زمان های مختلف



زمان: 9.3sec



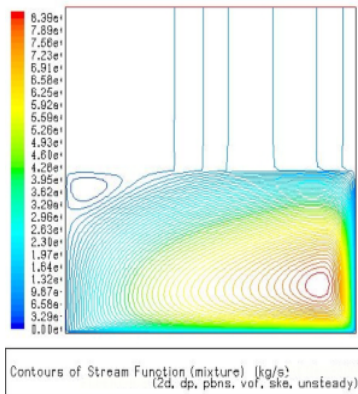
زمان 10.7sec



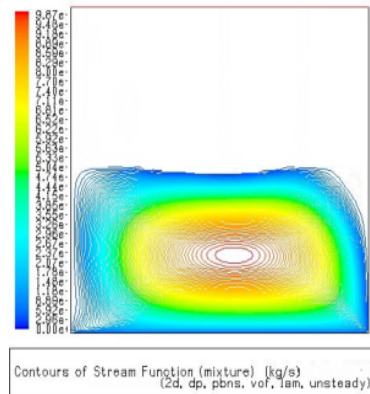
زمان 13.4sec

شکل ۶-۱ بردارهای سرعت و خطوط جریان آرام و آشسته در زمان های مختلف

جریان آشفته

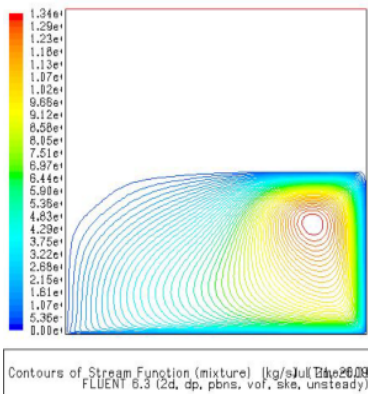


جریان آرام (حالت پایدار)

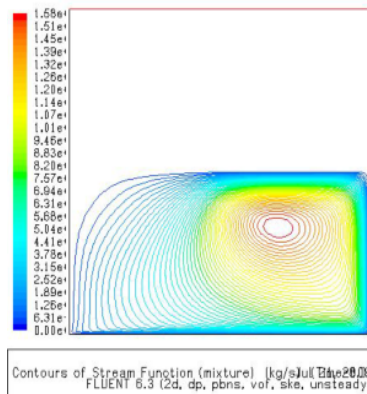


زمان: 30.1 sec

جریان آشفته

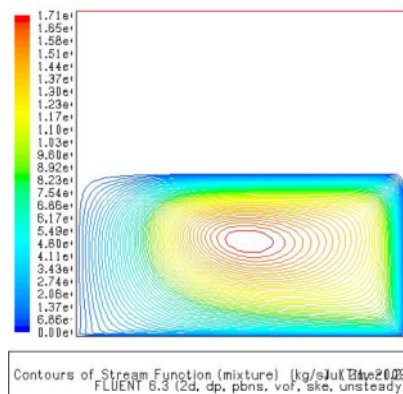


جریان آشفته



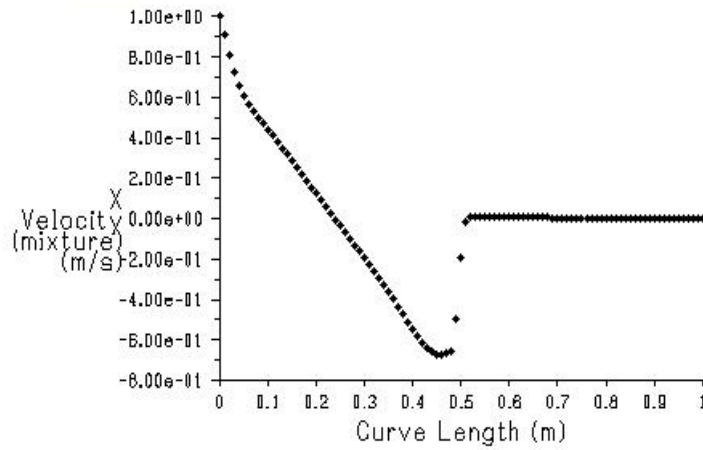
زمان 60sec

زمان: 80sec



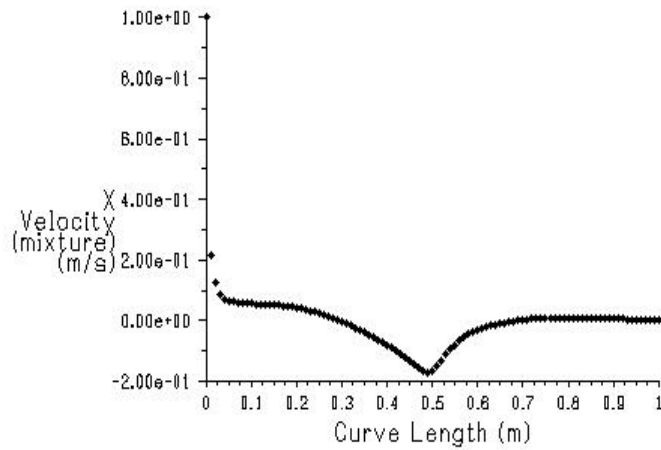
جریان آشفته (حالت پایدار) در زمان 127,7sec

شکل ۱-۶ بردار خطوط جریان آرام و آشفته در زمان های مختلف



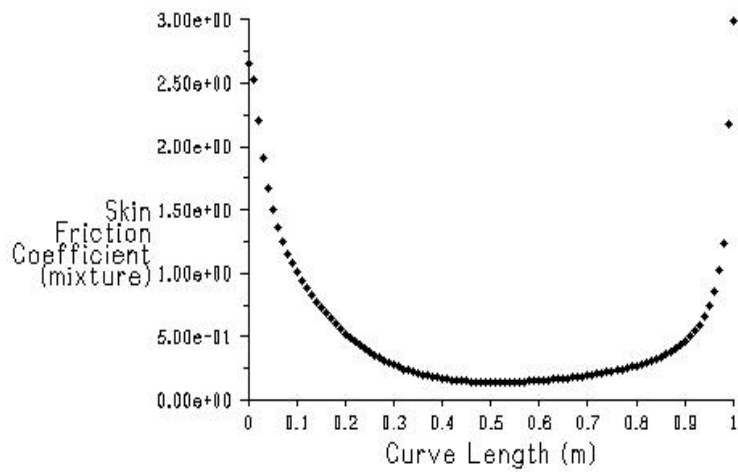
X Velocity (mixture) vs. Curve Length (Time=3.0100e+01) Jul 21, 2009
 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

شکل ۶-۲ نمودار مولفه بردار سرعت در وسط مخزن حالت آرام



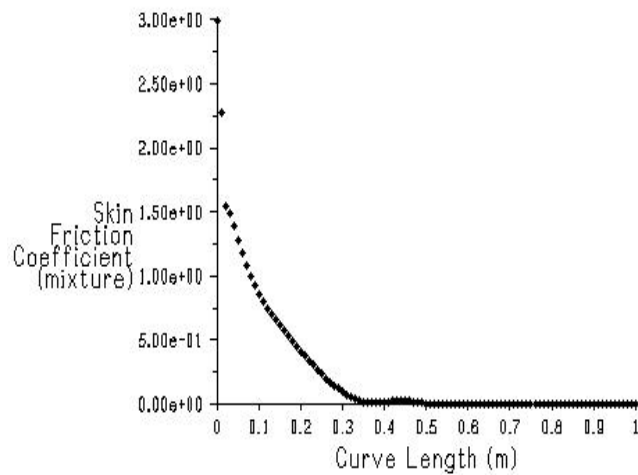
X Velocity (mixture) vs. Curve Length (Time=1.2770e+02) Jul 21, 2009
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

شکل ۶-۳ نمودار مولفه بردار سرعت در وسط مخزن حالت آشفته



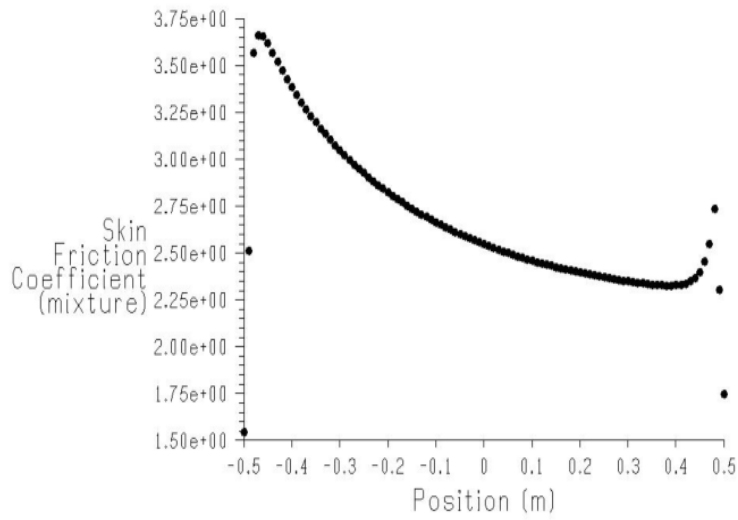
Skin Friction Coefficient (mixture) vs. Curve Length (Time=3.0100e+01 Jul 21, 2009
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady))

شکل ۶-۴ ضریب درگ بر حسب مکان در حالت آرام



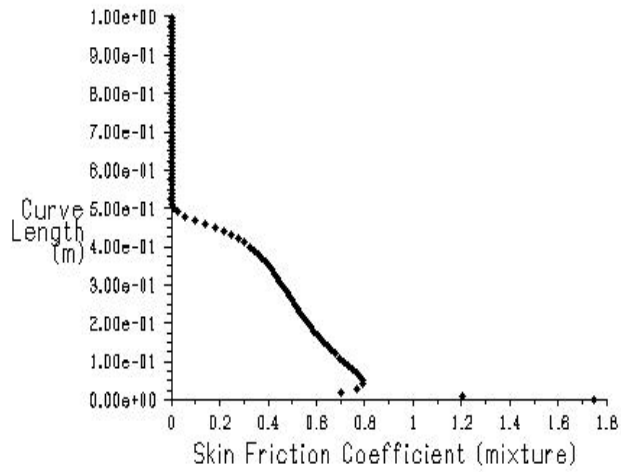
Skin Friction Coefficient (mixture) vs. Curve Length (Time=3.0100e+01 Jul 21, 2009
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady))

شکل ۶-۵ ضریب درگ بر حسب مکان در دیواره چپ حالت آرام

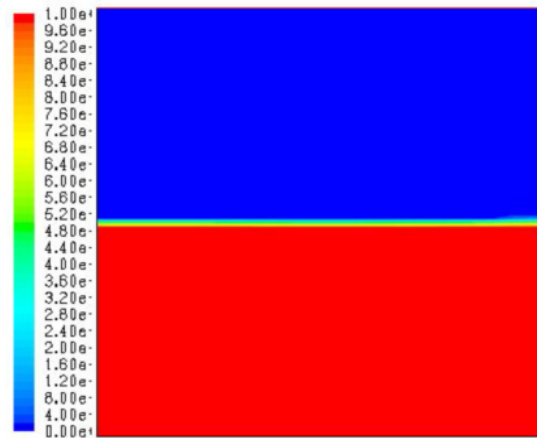


Skin Friction Coefficient (mixture) (Time=1.2770e+02) Jul 22, 2009
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

شکل ۱-۵-۶ ضریب درگ بر حسب مکان در حالت آرام

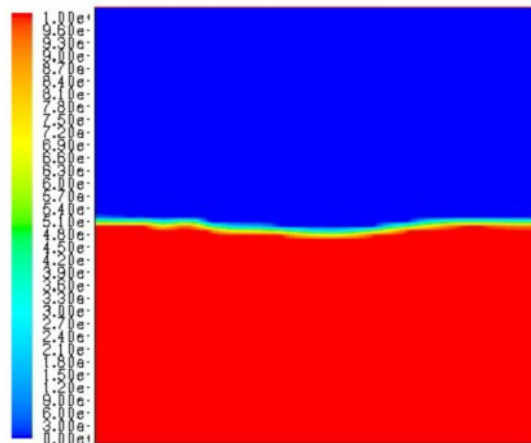


شکل ۶-۶ ضریب درگ بر حسب مکان در دیواره سمت چپ حالت آشفته



Contours of Volume fraction (water) (Time=1.0721e2088
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

شکل ۶-۸ پروفیل سطح آزاد حالت آشفته



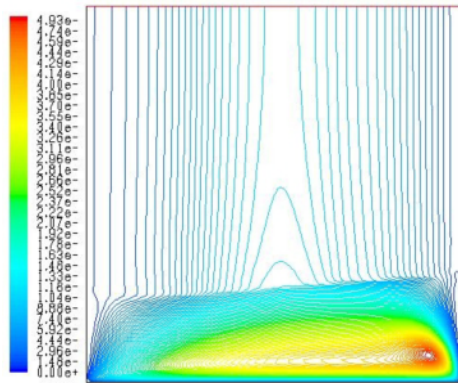
Contours of Volume fraction (liquid)
(2d, dp, pbns, vof, iam, unsteady)

شکل ۶-۷ پروفیل سطح آزاد حالت آرام

۳-۶ بررسی جریان آرام مایع درون مخزن با سطح زیرین متحرک در شرایط متفاوت

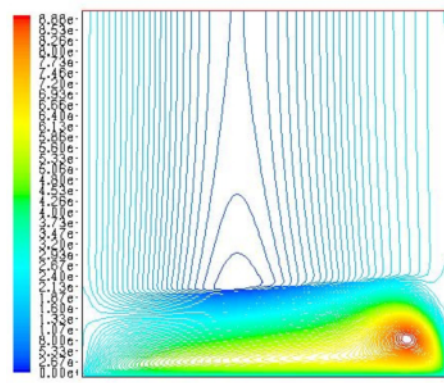
در این قسمت به بحث درباره اثرات تغییر برخی پارامترها نظیر: تغییر خواص مایع و گاز درون مخزن، تغییر سرعت سطح زیرین متحرک و همچنین تغییر ارتفاع سطح مایع در حالت جریان آرام درون مخزن سیال، می پردازیم. باید بدانیم که عدد رینولدز در تمامی این موارد بدون تغییر $Re=2000$ باقی می ماند. ابتدا مخزن را در نظر بگیرید که تا ارتفاع $1/4$ از مایع پر شده و سطح زیرین آن با سرعت 2m/s حرکت می کند، حال تغییرات خواص مایع و گاز داخل مخزن را در دو صورت زیر بررسی می کنیم. برای حل این مسأله شرایط مرزی سایر دیواره ها (دیواره های مجانب، ساکن و سطح بالایی اتمسفری و سایر شبکه بندی مانند حالات قبل است. حل به صورت غیر دائمی با $\text{Timestep}=0.1$ بود، که بعد از گذشت زمان به حالت پایدار می رسند.

در اینجا ابتدا اثرات تغییرات ارتفاع مایع درون مخزن و سرعت سطح زیرین را مانند قسمت های پیشین بررسی کرده. پس از آن نوبت به مقایسه جریان ها تحت تغییرات خواص گاز و مایع درون مخزن می باشد. در شکل (۹-۶) ابتدا بردارهای سرعت و خطوط جریان در هر لحظه در ادامه پروفیل سطح آزاد، نمودار توزیع افقی سرعت در وسط حفره و نمودار بردارهای سرعت در زمان رسیدن به پاسخ پایدار برای هر دو جریان بررسی می شود.



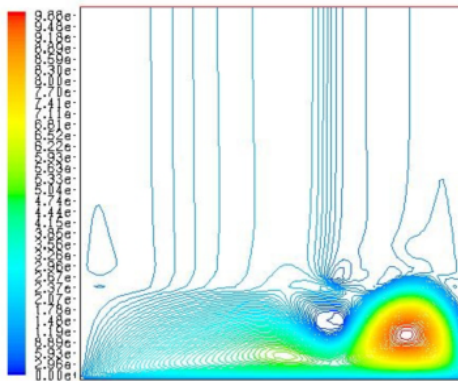
Contours of Stream Function (mixture) (kg/s)
(2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

زمان: 0.6 s



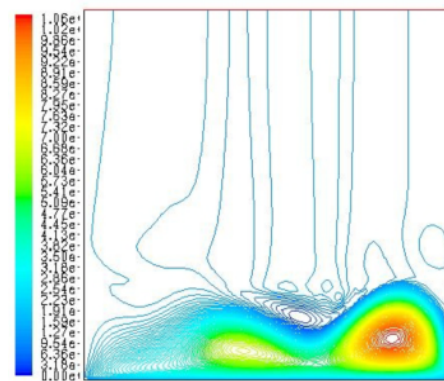
Contours of Stream Function (mixture) (kg/s)
(2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

زمان: 0.9 s



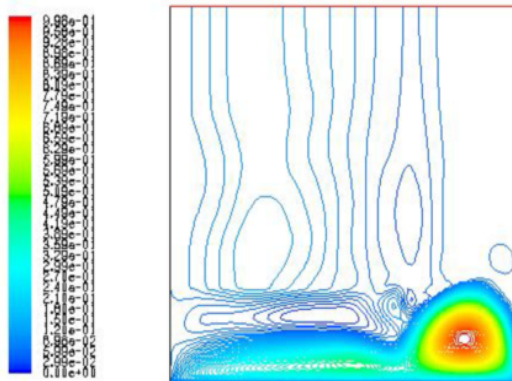
Contours of Stream Function (mixture) (kg/s)
(2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

زمان: 2.4 s



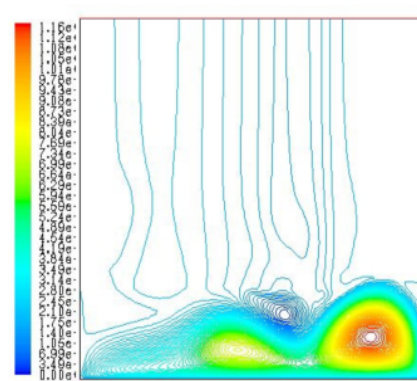
Contours of Stream Function (mixture) (kg/s)
(2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

زمان: 4.9 s



Contours of Stream Function (mixture) (kg/s) (Time=2.5500e+01) Jul 21, 2009
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

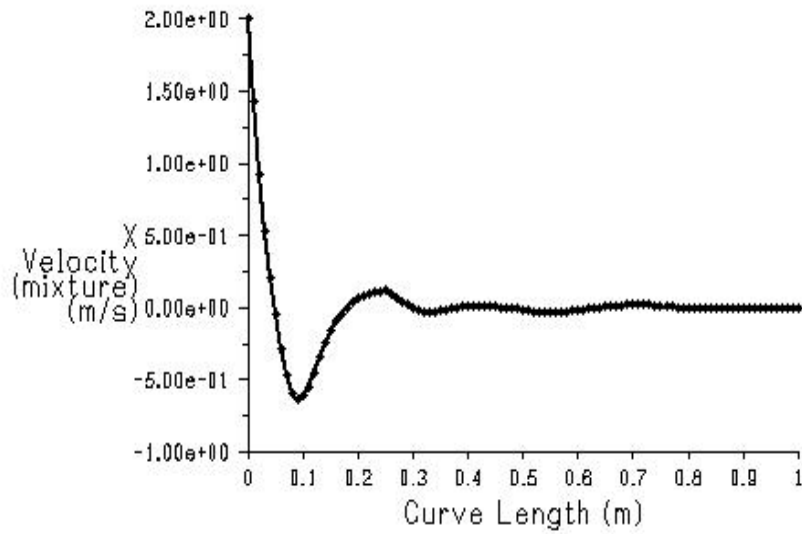
زمان: 25.5 s



Contours of Stream Function (mixture) (kg/s)
(2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

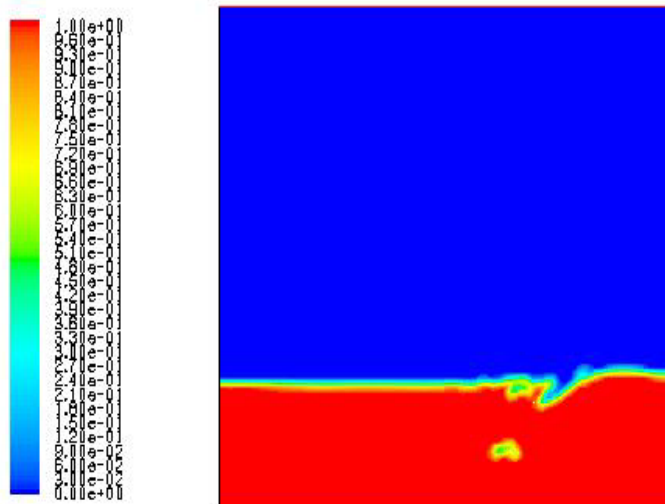
زمان: 9.3 s

شکل ۹-۶ بردار خطوط جریان آرام تحت ارتفاع ۱/۴ سرعت سطح زیرین 2m/s



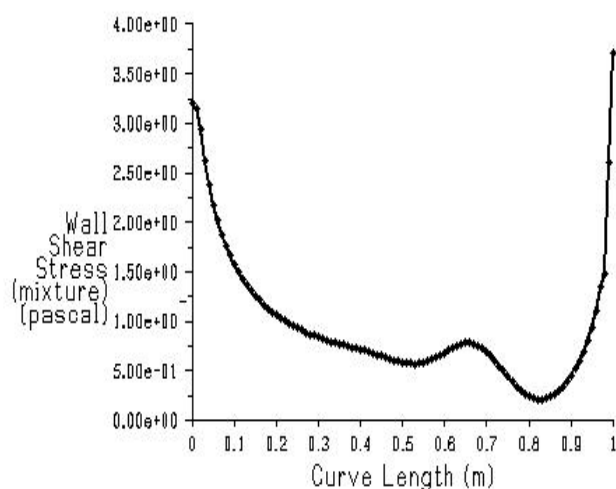
X Velocity (mixture) vs. Curve Length (Time=2.5500e+01) Jul 03, 2007
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

شکل ۶-۱۰ نمودار مولفه سرعت در وسط مخزن



Contours of Volume fraction (liquid) (Time=2.5500e+01) Jul 21, 2009
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

شکل ۶-۱۱ پروفیل سطح آزاد



Wall Shear Stress (mixture) vs. Curve Length, (Time=2.5500e+01) Jul 03, 2007
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, lam, unsteady)

شکل ۶-۱۲ نمودار تنش برشی

۶-۴ تحلیل نتایج حاصل از مقایسه نتایج جریان های آرام و آشفته درون مخزن مایع با

سطح زیرین متحرک

با مقایسه جواب های حاصله شکل (۶-۱) به نتایج زیر دست می یابیم.

۱- جریان آرام مطابق انتظار زودتر (30.1sec) به حل پایدار می رسد شکل (۶-۱) ، حال آنکه

جریان آشفته در زمان مشابه (30.1sec) در بخش میانی حل می باشد.

۲- از مقایسه جواب های حالت های پایدار در می یابیم که سیروکولاسیون حاصله در حالت آرام به

دیواره سمت راست نزدیک تر است و جریان در گوشه پایینی سمت راست تیزتر است.

۳- سیروکولاسیون ایجاد شده در جریان آرام متقارن تر است که این نتیجه از نمودارهای توزیع

مؤلفه افقی سرعت تیز حاصل می شود در شکل های (۶-۲) و (۶-۳) نمودار توزیع مؤلفه افقی سرعت

در وسط حفره با سطح زیرین متحرک با سرعت $1 \frac{m}{s}$ را در جریان های آرام آشفته، مشاهده

می کنیم.

همان گونه که از شکلها برمی آید:

الف) سرعت سطح آزاد در وسط حفره در جریان آشفته به $0.2 \frac{m}{s}$ می رسد در حالی که مقدار

آن در حالت جریان آرام $0.7 \frac{m}{s}$ می باشد، همچنین در حالت آرام سرعت تقریباً به صورت پله ای

به صفر می رسد که این ها نشان دهنده پروفیل سطح آزاد متلاطم تری نسبت به جریان آشفته می باشد.

ب) سرعت سطح آزاد (۳-۶) در حالت آشفته در ارتفاع بیشتری به صفر می رسد.

ج) پیوستگی بیشتر مؤلفه ها در نمودار جریان آشفته (۳-۶) بیانگر پروفیل سطح آزاد یکنواخت تر

آن است.

۴- با توجه به نیمه چپ نمودارها (۱-۶) می توان به این مهم است یافت که تغییرات سرعت در

نزدیکی سطح زیرین در حالت آرام پیوسته تر است و در ارتفاع مشابهی (نزدیکی دیواره) از حالت

مغشوش بیشتر است که این دلیلی برای تیزتر شدن گوشه پایینی سمت راست دیواره و نزدیک تر

بودن آن به دیواره در حالت آرام است.

۵-۶ تحلیل نتایج حاصله از مقایسه جریان های آرام در مخزن مایع با سطح زیرین

متحرک تحت اثر سرعت سطح زیرین و ارتفاع سیال

۱- همان طور که در نمودار (۶-۱۰) مشاهده می کنیم جریان آرام درون مخزن با سطح زیرین

متحرک در (ارتفاع مایع $\frac{1}{4}$ و سرعت سطح متحرک $2\frac{m}{s}$) زودتر به جواب پایدار می رسد که همانا

این نتیجه با توجه به ارتفاع کمتر مایع درون مخزن قابل پیش بینی است.

۲- در این حالت در جریان آرام مقدار گردابه های بیشتری درون مخزن مایع دیده می شود که می

تواند ناشی از افزایش سرعت سطح زیرین باشد.

۳- از مقایسه مراحل تشکیل گردابه تا رسیدن به جواب پایدار می توان ادعا نمود که سیرکولاسیون

تشکیل شده در این حالت مانند سیرکولاسیون شکل گرفته در حالت شکل (۶-۱) مراحل رشد و

پیشرفت و چرخش را به دلیل کمتر بودن ارتفاع سطح مایع طی نکرده و بعد از رسیدن به گوشه

بالایی سمت راست، پس از زمانی کوتاه به حالت پایدار رسیده است.

۴- سیرکولاسیون ایجاد شده در جریان آرام حالت شکل (۶-۲) متقارن تر است که این نتیجه از

نمودارهای توزیع مؤلفه سرعت نیز حاصل می شود.

با مقایسه نمودارهای توزیع مؤلفه افقی سرعت را در وسط حفره با سطح زیرین متحرک که در

شکل های (۶-۲) و (۶-۱۰) آورده شده است می توان به نتایج زیر رسید.

الف) در این حالت شکل (۶-۱۰) مؤلفه های افقی سرعت بعد از تشکیل گردابه و رشد و پیشرفت، با

توجه به چرخش آن در خلاف جهت عقربه های ساعت سیر نزولی خود را تا رسیدن به سطح آزاد طی

می کند، در صورتی که این سیر نزولی سرعت در حالت (سرعت سطح زیرین برابر با $1m/s$ شکل

(۶-۲) تقریباً در وسط مایع تغییر کرده و بسیار سریعتر از حالت اول سیر صعودی خود را آغاز

می کند، که این امر بیانگر آن است و مرکز گردابه در حالت اول به سطح آزاد نزدیکتر است.

ب) پیوستگی بیشتر مؤلفه ها در نمودار حالت شکل (۶-۱۰)، بیانگر پروفیل سطح آزاد یکنواخت تر آن است.

ج) سرعت مینیمم در حالت شکل (۶-۲) در سطح آزاد رخ می دهد $\left(0.7 \frac{m}{s}\right)$ حال آنکه به دلیل

تشکیل سیرکولاسیون هایی با جهت چرخش مخالف جهت سیرکولاسیون ابتدایی، سرعت مینیمم

حالت شکل (۶-۱۰) تقریباً در نیمه مایع رخ می دهد $\left(0.5 \frac{m}{s}\right)$.

۵- با نمایش پروفیل سطح آزاد می توان دریافت، پروفیل سطح آزاد مایع در حالت شکل

(۶-۷) متلاطم تر است و فرورفتگی این پروفیل در حالت شکل (۶-۱۱) در بخش کوچکی در مقایسه

با حالت اول دیده می شود که این مقایسه با توجه به نمودار توزیع مؤلفه های افقی سرعت قابل پیش

بینی بود.

۶- شکل های (۶-۴)، (۶-۵-۱)، (۶-۵)، (۶-۶)، (۶-۷)، (۶-۸) بترتیب نمایش دهنده تغییرات

ضریب درگ در طول صفحه زیرین متحرک (حالت آرام) و تغییرات ضریب درگ در طول صفحه زیرین

متحرک (حالت آشفته) و تغییرات ضریب درگ در طول دیواره جانبی سمت چپ (حالت آرام) و

تغییرات ضریب درگ در طول دیواره جانبی سمت چپ (حالت آشفته) و پروفیل سطح آزاد در حالت

آرام و توربولانت میباشند.

۷- از شکل (۶-۲) نمودار توزیع مؤلفه افقی سرعت در وسط حفره می توان دریافت که شیب نزولی

منحنی مؤلفه های افقی سرعت در حالت اول شکل (۶-۲) کمتر از حالت دوم شکل (۶-۱۰) بوده که

نشان دهنده تغییرات پیوسته تر بردارهای سرعت در این حالت است.

۶-۶ مقایسه جواب های حاصل از حل عددی جریان درون محفظه با سطح زیرین متحرک

تحت تحریک هارمونیک به روش کسر حجمی با حل عددی و تجربی

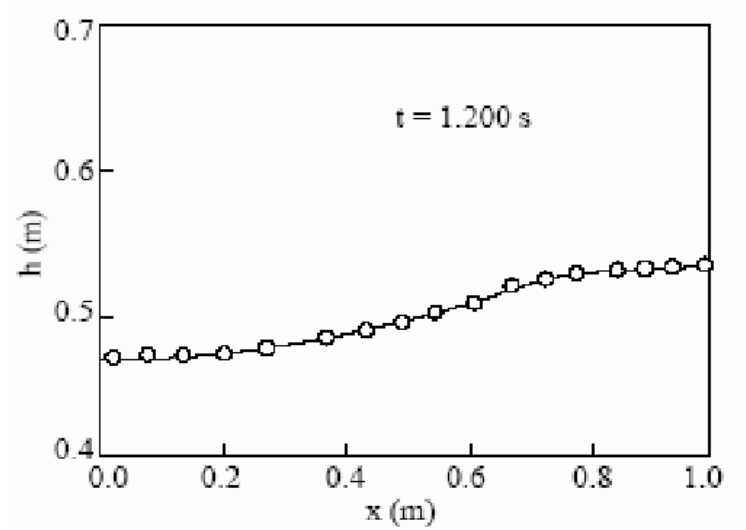
در این حالت مخزن با ابعاد متر ۱× متر ۱ با شبکه بندی 100×100 با تعریف شرایط مرزی به صورت دیواره های مجانب ساکن و دیواره زیرین متحرک با سرعت متغیر $V = 50\text{Sin}(0.1*t)$ بر حسب $\frac{cm}{s}$ و سطح بالای دارای شرط اتمسفری در نظر گرفته و آن را تا نیمه از مایعی با ویسکوزیته سینماتیکی $\mu = 0.001$ و $\rho = 1000$ به عبارتی $Re = 10^6$ پر می کنیم.

نتایج به دست آمده از نرم افزار در زمان $t=1.2 \text{ Sec}$ در شکل (۶-۱۳) و $t= 3.55\text{Sec}$ در

شکل (۶-۱۵) تطابق خوبی بین پروفیل سطح آزاد سیال را در حالت عددی شکل (۶-۱۲) در مرجع

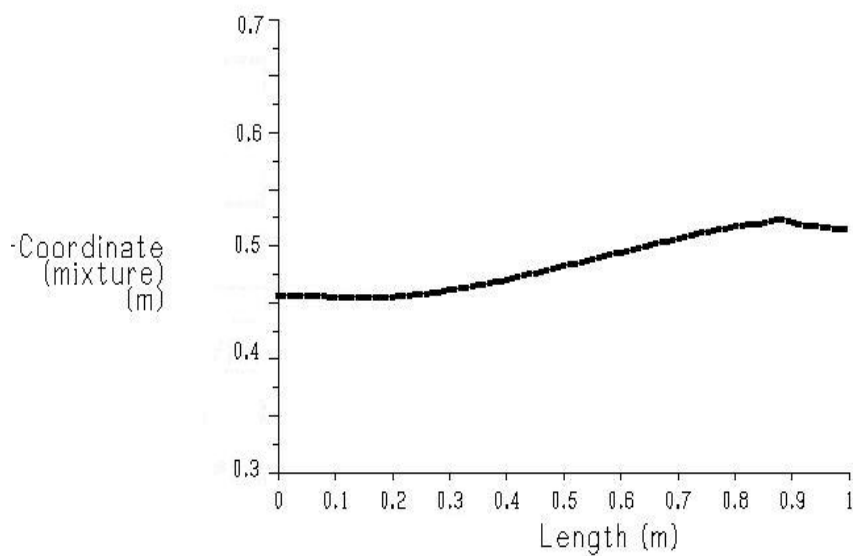
[۱۱] و حالت تجربی شکل (۶-۱۴) در مرجع [۱۰] را نشان می دهد که این دقت بالای حل نرم افزار

فلوئنت در شبیه سازی جریان دوفازی را نشان می دهد.



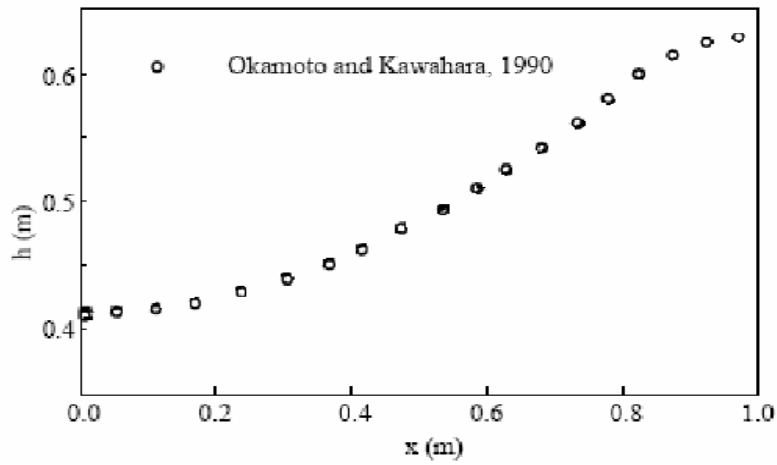
شکل (۶-۱۳) پروفیل سطح آزاد [۱۱]

زمان: 1.2sec

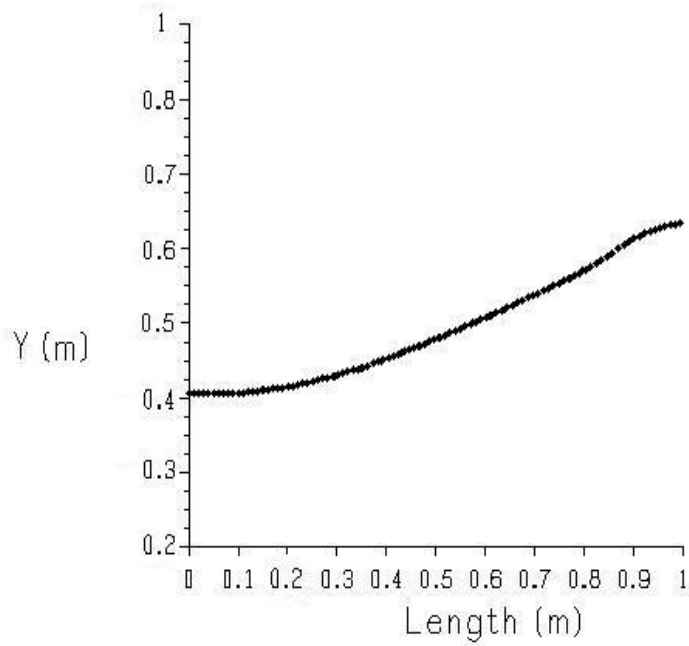


(-Coordinate (mixture) vs. Curve Length (Time=1.2000e+00) Jul 24, 2009
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

شکل (۶-۱۴) پروفیل سطح آزاد زمان: 1.2sec



شکل (۶-۱۵) پروفیل سطح آزاد [۱۰] زمان: 3.55sec



Y-Coordinate (mixture) vs. Curve Length (Time=3.55)
 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, vof, ske, unsteady)

شکل (۶-۱۶) پروفیل سطح آزاد زمان: 3.5sec

۶-۷ نتیجه گیری و پیشنهادات

جریان در حالت آرام، زودتر به حل پایدار رسیده و جواب به دست آمده دارای تقارن بیشتری بوده و اثرات وارد شده، ناشی از سرعت سطح زیرین بر روی پروفیل سطح، بهتر از جریان آشفته نمایان گردیده است.

در ادامه در حالت آرام، با کاهش ارتفاع مایع درون مخزن و افزایش سرعت سطح زیرین، جریان را تا رسیدن به جواب پایدار دنبال کرده و نتیجه حاصله را با حل قبلی جریان مقایسه کردیم. تا به کمتر بودن زمان حل برای این حالت، متذکر شویم.

هدف ما در انجام این پایان نامه بررسی و مقایسه نتایج حاصل از حل جریان درون مخزن با سطح زیرین متحرک با استفاده از روش کسر حجمی، در حالات آرام و آشفته تحت تاثیر تغییرات سرعت سطح زیرین، اندازه ارتفاع مایع درون مخزن، خواص مایع و گاز درون مخزن بوده است

جریان در حالت آرام، با کاهش ارتفاع مایع درون مخزن و افزایش سرعت سطح زیرین، جریان را تا رسیدن به جواب پایدار دنبال کرده و نتیجه حاصله را با حل قبلی جریان مقایسه کردیم تا به کمتر بودن زمان حل برای این حالت، متذکر شویم.

با توجه به قابلیت های برنامه کامپیوتری و نیز مباحثی که در ادامه کار حاضر می توانند دنبال شوند پیشنهاداتی به صورت ذیل مطرح می شوند:

- تغییر فیزیک مساله و بررسی جریان درون مخزن و مشاهده چگونگی قدرت و اندازه و تعداد گردابه ها
- جایگزین کردن شبه سیالات غیر قابل تراکمی همچون شن و ماسه و بررسی جریان درون مخزن با سطح زیرین متحرک
- بررسی پدیده پخش در مخزن با جدا سازی دو مایع مانند آب شیرین و آب شور توسط یک صفحه عمودی و جریان درون مخزن با برداشتن صفحه تماس
- بررسی هندسه های دیگری از مخزن

- بررسی جریان درون مخزن با تزریق و یا مکش سیال
- بررسی جریان درون مخزن با در نظر گرفتن پدیده جدایش حباب از سطح آزاد مایع
- در نظر گرفتن تغییر خواص فیزیکی سیال بر اثر پدیده پخش در مدل عددی
- با توجه به کم بودن دقت مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استاندارد، پیشنهاد می شود که مدل‌های اغتشاشی مرتبه بالاتر به کار گرفته شوند.

مراجع

مراجع:

- 1-Hirt. C. W., and Nichols, B. D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, 39: pp. 201 – 225, 1981.
2. Harlow, F. H., and Welch, J. E., "Numerical Calculation of Time – dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid With Free Surface", Physics of Fluid, 8(12): pp. 2182 - 2289, 1965.
- 3.Pericleos, K. A., Chan, K. S., and Cross, M., "Free Surface Flow and Heat Transfer in Cavities: The SEA Algorithm", Numerical Heat Transfer, Part B, 27: 487 – 507, 1995
- 4.Muttin ,F.,Coupez, T., Bellet, M.,and Chenot,J.L,"Lagrangian Finite Element Analysis Of Time-Dependent Viscous Free Surface Flow Using and Automatic Remeshing Technique",vol
5. Navti, S. E., Lewis, R. W., and Taylor, C., "Numerical Simulation of Viscous Free Surface Flow" , In. J. of Num. Meth. For Heat & Fluid Flow. Vol. 8, No. 4, 1998
- 6- W.F. Noh, P.R. Woodward, SLIC (simple line interface method) in: A. van de Vooren, P.J. Zandbergen (Eds) Lecture Notes in Physics, 59, Spring – Verlag. Berlin / New York, 1976, p.330
- 7- D.L.Youngs, An interface tracking method for a 3D Eulerian hydrodynamics code. Technical report, 44/92/35. AWRE, 1984
- 8-E. Erturk and T.C. Corke” Numerical Solutions of 2-D Steady Incompressibl Driven Cavity Flow at High Reynolds Numbers” Journal for Numerical Methods in Fluids”
- 9-E. DEM`IREL, `I. AYDIN, Total Volume Conservation in Simulation of Unsteady Free-Surface Flows, Turkish J. Eng. Env. Sci.31 (2007),311 – 321.c _ T`UB`ITAK
- 10-Okamoto, T. and Kawahara, M., “Two-DimensionalSloshing Analysis by Lagrangian Finite Element,Method”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 11, 453-477, 1990.
- 11-E. DEM`IREL, `I. AYDIN, Total Volume Conservation in Simulation of Unsteady Free-Surface Flows, Turkish J. Eng. Env. Sci.31 (2007),311 – 321.c _ T`UB`ITAK
- 12- W. Shyy, M. Francois, H.S. Udaykumar, N. N,dri, R. Tran-Son-Tay, Moving boundaries in micro-scale biofluid dynamics, Appl. Mech Rev. 5 (2001) 405-4510
- 13- J.M. Floryan, Numerical methods for viscous flows with moving boundaries, Appl. Mech. Rev. 42 (1989) 323-341.
- 14- Nichols, C.W. Hirt, Methods for calculating multi dimensional, transient free surface flows past bodies, in: Proceedings of the First International Conference on Numerical Ship hydrodynamics, Gaithersburg, MD. 1975.

- 15- S. Osher, J.A. Sethian. Front propagation with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton- Jacobi formulations, *J. Comput. Phys.* 79 (1988)
- 16- C.W. Hirt, B.D.Nichols, A computational method for free surface hydrodynamics, *J. Pressure Vessel Technol.* 103 (1981) 136.
- 17- B.D. Nichols, C.W. Hirt, R.S.Hotchkiss, SOLA – VOF: a solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA – 8355, 1980.
- 18- D.L.Youngs, Time – dependent multi – material flow with large fluid distortion, in: K.W.Morton, M.J. Baines (Eds), *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Academic Press, New York, 1982, pp. 273-285.
- 19- A.J.Chorin, Flame advection and propagation algorithms. *J.Comput. Phys.* 5(1980) 1.
- 20- M.Rudman, Volume – tracking methods for interfacial flow calculations, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 24 (1997) 671-691.
- 21- G. Cerne, S. Petelin, I. Tiseli, Coupling of the interface tracking and the two – fluid models for the simulation of incompressible two – phase flow, *H. Comput. Phys.* 171 (2001) 776-804.
- 22- S.W.J. Welch, J. Wilson, A volume of fluid based method for fluid flows with phase change, *J. Comput. Phys.* 160 (2000) 662-682.
- 23- Y.F.Zhang, W.K.Liu, H.P.Wang, Cast filling simulation of thin – walled cavities, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 128 (1995) 199-230.
- 24-J.M.Hyman, Numerical methods for tracking interfaces. *Physica D* 12 (1984) 396-407.
- 25- D.J. Bemson, Volume of fluid interface reconstruction methods for multi- material problems. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 55 (2002) 151-165.
- 26-R.A.Ibrahim. V.N. Pilipchuk, Recent advances in liquid sloshing dynamics. *Appl. Mech. Rev.* 54 (2001) 133-199.
- 27- H.Tang, L.C. Wrobel, Z. Fan, Numerical evaluation of immiscible metallic Zn-Pb binary alloys in shear- induced turbulent flow, in: 1 st International Conference on Multi – scale Material Modelling, London, June 2002.
- 28- R.I. Issa, A.D. Gosman, A.P. Watking, The computation of compressible and incompressible recirculating flows, by a non-iterative implicit scheme, *J.Comput. Phys.* 93(1991) 388-410
29. Fox, R. W., and McDonald, A. T., "Introduction to Fluid Mechanics", 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1985.

30. کتاب سیالات وایت

31. قاسمی .حجت " بررسی سیال تراکم ناپذیر با سطح آزاد" پایان نامه کارشناسی ارشد . گرایش تبدیل انرژی .

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف و زمستان ۱۳۷۲

32. سلطانی مجید و رحیمی روح ... دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار فلونت انتشارات

طراح ۱۳۸۲

<http://www.wikipedia.org>

Abstract

Free surface flows are of most interest in many engineering or mathematical problems and many methods have been developed for their numerical resolution in various fields of the physics or the engineering. In this thesis the volume of fluid method (VOF) is used for the numerical simulation of free surface flows involving an incompressible liquid and a compressible gas in order to model the flow in a Reservoir with a moving bottom surface with varying with time. The incompressible Navier-Stokes equations are assumed to hold in the liquid domain and have been solved numerically in developed two-dimensional grids, while the dynamical effects in the ideal gas are disregarded. Also all of the vortexes generated in the flow have been modeled and analyzed numerically. in laminar state the resulted circulation is closer to the right wall and the flow in the bottom right corner is sharper and the resulted circulation in the laminar flow is more symmetric. by solving the laminar flow in unsteady state and with Time step=0.1 , after passing a time of about 30.1 seconds the flow reaches to the steady state and no changes are observed in the circulation. in the turbulent state, the liquid reaches to the steady states after 127.7seconds. shear stress magnitude in term of position in turbulent and laminar state are compared with together. As it expected, the laminar flow reaches to the steady state sooner while the turbulent flow, at the same time is in the middle part. Comparisons of the computed results with exact solutions showed that the method is capable of achieving high accuracy and efficiency with minimal computational effort.

Keywords: Free-surface flow; VOF method; Laminar; Turbulent; Numerical simulation