

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

شبیه‌سازی پمپ بالابر بادی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

دانشجو:

آذر عجمی

استاد راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور:

دکتر علی سر رشته داری

بهمن ماه ۱۳۹۰

تعهد نامه

اینجانب آذر عجمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان شبیه سازی پمپ بالابر بادی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تحت راهنمایی آقای دکتر کیهانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.

- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.

- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .

- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم بہ:

پدر، مادر و ہمسر عزیزم بہ پاس جبران گوشہ ای از زحمات و الطاف و

راہنمائی ہای بی دریغشان

تشکر و قدردانی:

باسپاس فراوان از استاد ارجمند آقای دکتر محمد حسن کیهانی و استاد مشاور محترم آقای دکتر علی سررشته داری که در

کمال صبر و حوصله، در طول انجام این پایان نامه بارها بنیانی های مستمر خود اینجانب را در انجام این تحقیق هدایت نمودند.

از داوران محترم پایان نامه آقایان دکتر چهارطاتی و دکتر جباری مقدم که با ارایه نظرات و پیشنهادات مفید خود

اینجانب را در انجام هرچه کاملتر این تحقیق مورد لطف قرار دادند، کمال تشکر و قدردانی را می نمایم. با تشکر و قدردانی

از همسر عزیزم آقای مهندس مهدی صادقی که با همکاری ها، کمک ها و نقطه نظرات سازنده خود نقش مهم و اساسی را در

تحقیق حاضر دارا می باشد.

چکیده

پمپ‌های بالابر بادی در مکان‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن به دلیل شرایط محیطی و نوع سیال بکاررفته شده نیاز به قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. و پمپ نیاز به نگهداری بالایی ندارد. همچنین در جایی که سیالات رادیواکتیو در کاربردهای هسته‌ای، سیالات خورنده و یا ساینده وجود دارند، از این نوع پمپ استفاده می‌شود.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی پارامترهای موثر در افزایش کارایی پمپ بالابر بادی می‌باشد. بدین منظور، پس از طراحی و ساخت پمپ مذکور، تاثیر پارامترهای اصلی از جمله قطر لوله ورودی هوا، شناوری لوله بالابرنده، تعداد ورودی های هوا و دبی هوای ورودی بر افزایش کارایی پمپ بالابر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان خواهد داد که کارایی بهینه پمپ در بیشترین نرخ جریان آب خروجی رخ نمی‌دهد. شایان ذکر می‌باشد که حداکثر مایعی که پمپ بالابر بادی می‌تواند به سمت بالا پمپ کند در رژیم‌های اسلاگ یا اسلاگ - چارن واقع می‌باشد. نتایج همچنین از افزایش کارایی پمپ در نرخ جریان هوای یکسان در اثر افزایش نرخ شناوری حکایت می‌کند.

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی نیز به منظور مقایسه کیفی الگوهای جریان مشاهده شده در کار آزمایشگاهی و الگوهای جریان حاصل از حل عددی صورت خواهد گرفت. نرم افزار کد باز، بسته‌ی دینامیک سیالات محاسباتی این فوم جهت مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. این نرم افزار شامل روش حجم سیال می‌باشد که برای شبیه‌سازی حرکت حباب در سیال ساکن از آن استفاده شده است. جریان اسلاگ بخش عظیمی از نقشه‌ی رژیم جریان در کاربرد بهینه از پمپ بالابر بادی را در بر می‌گیرد، از این رو به مدل‌سازی عددی این جریان پرداخته شده است. الگوهای جریان حاصل از مدل‌سازی عددی، سازگاری مناسبی را با الگوهای مشاهده شده در کار آزمایشگاهی نشان دادند.

کلمات کلیدی: پمپ بالابر بادی، جریان اسلاگ، بهبود عملکرد، الگوهای جریان و این فوم

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- تعریف موضوع.....
۳	۲-۱- اهمیت موضوع.....
۳	۳-۱- هدف تحقیق.....
۴	۴-۱- روش و مراحل تحقیق.....
۵	۵-۱- ساختار پایان نامه.....
۸	فصل ۲:
۸	مروری بر پیشینه تحقیق
۸	۱-۲- جریان های چندفازی.....
۱۲	۲-۲- پمپ بالابر بادی.....
۱۸	فصل ۳: طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی
۱۹	۱-۳- مقدمه.....
۱۹	۲-۳- پمپ.....
۱۹	۱-۳-۲- مقایسه دامنه کاربر پمپ ها.....
۲۳	۳-۳- پمپ بالابر بادی.....
۲۳	۱-۳-۳- تعریف [۱۶].....
۲۴	۲-۳-۳- قاعده حاکم [۱۶].....
۲۴	۳-۳-۳- اجزاء تشکیل دهنده [۱۶].....
۲۶	۴-۳-۳- یک پارامتر مهم [۱۷].....
۲۷	۵-۳-۳- مزایا [۱۷].....
۲۸	۶-۳-۳- معایب [۲۵].....
۲۸	۷-۳-۳- موارد کاربرد [۲۵].....
۲۹	۴-۳- طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی.....
۲۹	۱-۴-۳- روابط تئوری حاکم [۵۱].....
۲۹	۲-۴-۳- سرعت بالا رفتن گاز در لوله عمودی نسبت به مایع متحرک [۸].....
۳۰	۳-۴-۳- نسبت غوطه وری [۱۷].....
۳۰	۴-۴-۳- تعادل فشار استاتیکی در لوله عمودی [۱۷].....
۳۲	۵-۴-۳- بالابری مفید [۲۵].....

۳۳	۳-۴-۶- کار خالص انجام شده روی مایع [۲۶]
۳۵	۳-۵-۰- مراحل طراحی و ساخت
۳۶	۳-۵-۱- طرح مسئله:
۳۶	۳-۵-۲- الگوریتم طراحی:
۵۹	۳-۶-۱- نتایج آزمایشگاهی:
۵۹	۳-۶-۱- بررسی رژیم های جریان مشاهده شده:
۶۱	۳-۶-۲- بررسی نرخ جریان آب خروجی
۷۰	۳-۶-۳- بررسی کارایی پمپ:

فصل ۴: حل عددی جریان دو فاز ۷۲

۷۳	۴-۱- مقدمه
۷۳	۴-۲- روش شناسی حل سیالات دو فازی
۷۴	۴-۳- فرم کلی معادلات سیال
۷۶	۴-۴- حل عددی جریان دو فاز
۷۷	۴-۴-۱- روش های حل اویلری جریان
۸۰	۴-۴-۲- روش های مستقیم
۸۷	۴-۵-۰- گسسته سازی حجم محدود [۲۸]
۹۰	۴-۵-۲- چیدمان و ذخیره سازی متغیرها
۹۱	۴-۵-۳- گسسته سازی معادله
۱۰۰	۴-۵-۴- معادلات حاکم بر جریان دو فاز همدم
۱۰۲	۴-۵-۵- الگوریتم پیزو برای جریان های گذرا
۱۰۳	۴-۶-۱- مدل سازی عددی
۱۰۴	۴-۶-۲- حل مسأله توسط این فوم
۱۰۶	۴-۶-۳- استقلال از شبکه و دامنه محاسباتی
۱۰۹	۴-۶-۴- شرایط محیطی و خصوصیات هوا

فصل ۵: ۱۱۰

نتایج و تفسیر آنها ۱۱۰

۱۱۱	۵-۱- مقدمه:
۱۱۱	۵-۲- آزمون مطالعاتی کد دو فاز
۱۱۲	۵-۲-۱- آزمون ایستا
۱۱۴	۵-۳- مدل سازی تغییر شکل حباب

- ۱۲۱.....۲-۳-۵- مقایسه با نتایج آزمایشگاهی
- ۱۲۲.....۳-۳-۵- تحلیل مساله
- ۱۲۲.....۴-۵- مدل سازی جریان اسلاگ
- ۱۲۷.....۲-۴-۵- مقایسه یک حباب اسلاگ با کار آزمایشگاهی
- ۱۳۰.....۳-۴-۵- مقایسه سرعت حباب اسلاگ با روابط تجربی

فصل ۶: ۱۳۳

جمع بندی و پیشنهادات ۱۳۳

- ۱۳۴.....۱-۶- مقدمه
- ۱۳۵.....۲-۶- جمع بندی
- ۱۳۶.....۳-۶- نوآوری
- ۱۳۷.....۴-۶- پیشنهادات

مراجع ۱۳۸

پیوست‌ها ۱۴۳

- ۱۴۴.....پیوست الف
- ۱۴۷.....پیوست ب [۵۰]
- ۱۵۱.....پیوست ج

فهرست اشکال

- شکل (۱-۳) یک نمونه ساده پمپ بالابر بادی یا Airlift Pump [۱۶] ۲۳
- شکل (۲-۳) اجزا تشکیل دهنده یک پمپ بالابر بادی [۲۵] ۲۵
- شکل (۳-۳) نمایش درصد غوطه وری [۱۷] ۲۶
- شکل (۴-۳) یک نمونه پمپ بالابر بادی [۲۵] ۳۲
- شکل (۵-۳) اصول کلی در پمپ بالابر بادی [۲۶] ۳۳
- شکل (۶-۳) یک نمونه پمپ بالابر بادی [۲۵] ۳۸
- شکل (۷-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 10.16cm (4in) و لوله ورودی 7.62cm (3in) [۵۱] ۳۹
- شکل (۸-۳) پمپ برای قطر لوله مکنده 12.7cm (5in) و لوله ورودی 10.16cm (4in) [۵۱] ۳۹
- شکل (۹-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 15.24cm (6in) و لوله ورودی 12.7cm (5in) [۵۱] ۴۰
- شکل (۱۰-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 20.32cm (8in) و لوله ورودی 15.24cm (6in) ۴۰
- [۵۱] ۴۰
- شکل (۱۱-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 25.4cm (10in) و لوله ورودی 20.32cm (8in) ۴۱
- [۵۱] ۴۱
- شکل (۱۲-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 30.48cm (12in) و لوله ورودی 25.4cm (10in) ۴۱
- [۵۱] ۴۱
- شکل (۱۳-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 40.64cm (16in) و لوله ورودی 30.48cm (12in) ۴۲
- [۵۱] ۴۲
- شکل (۱۴-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 50.8cm (20in) و لوله ورودی 40.64cm (16in) ۴۲
- [۵۱] ۴۲
- شکل (۱۵-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 66.04cm (26in) و لوله ورودی 50.8cm (20in) ۴۳
- [۵۱] ۴۳
- شکل (۱۶-۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 81.28cm (32in) و لوله ورودی 60.96cm (24in) ۴۳
- [۵۱] ۴۳
- شکل (۱۷-۳) حداقل و حد اکثر محدوده کارکرد پیشنهاد شده برای دبی سیال خروجی (GPM) در پمپ بالابر بادی بر حسب قطر لوله تخلیه (in) [۵۱] ۵۰

۵۳	شکل (۳-۱۸) پمپ هوا مدل AC-۹۹۰۸
۵۴	شکل (۳-۱۹) کمپرسور هوا
۵۴	شکل (۳-۲۰) لوله تخلیه و لوله هوا
۵۴	شکل (۳-۲۱) مخزن پلکسی ۱۶۰ لیتری
۵۵	شکل (۳-۲۲) فلومتر هوا
۵۵	شکل (۳-۲۳) مجموعه فشار سنج و رگولاتور
۵۵	شکل (۳-۲۴) رگولاتور
۵۶	شکل (۳-۲۵) پمپ آب برگشت
۵۶	شکل (۳-۲۶) مخزن اندازه گیری دبی آب خروجی
۵۶	شکل (۳-۲۷) شناور جهت کنترل سطح آب
۵۷	شکل (۳-۲۸) طرح شماتیک
۵۷	شکل (۳-۲۹) مونتاژ نهایی پمپ بالابر بادی
	شکل (۳-۳۰) عکس ها بترتیب نشان دهنده الگو جریان های مشاهده شده هستند: الف) حبابی، ب)
۵۹	حبابی به اسلاگ، ج) اسلاگ، د) اسلاگ به چارن ی) چارن ه) آنیولار
۶۰	شکل (۳-۳۱) الگوی رژیم جریان پیشنهاد شده توسط تایتل (۱۹۸۰)
	شکل (۳-۳۲) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۳۵٪ (قطر لوله هوا ۵
۶۱	میلی متر)
	شکل (۳-۳۳) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۴۵٪ (قطر لوله هوا ۵
۶۱	میلی متر)
	شکل (۳-۳۴) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۴٪ (قطر لوله هوا ۵
۶۲	میلی متر)
	شکل (۳-۳۵) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۶۵٪ (قطر لوله هوا ۵
۶۲	میلی متر)
	شکل (۳-۳۶) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۷۰٪ (قطر لوله هوا ۵
۶۲	میلی متر)
	شکل (۳-۳۷) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۴۰٪ (قطر لوله هوا ۸
۶۳	میلی متر)

- شکل (۳-۳۸) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۰٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)..... ۶۳
- شکل (۳-۳۹) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۴٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)..... ۶۳
- شکل (۳-۴۰) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۶۵٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)..... ۶۴
- شکل (۳-۴۱) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۷۵٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)..... ۶۴
- شکل (۳-۴۲) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۹۳٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)..... ۶۴
- شکل (۳-۴۳) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۴۰٪..... ۶۷
- شکل (۳-۴۴) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۷۵٪..... ۶۷
- شکل (۳-۴۵) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۸۲٪..... ۶۷
- شکل (۳-۴۶) نمودار تغییرات نرخ جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف از نرخ شناوری (برای لوله هوا به قطر ۸ میلی متر)..... ۶۸
- شکل (۳-۴۷) نمودار تغییرات نرخ جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف از نرخ شناوری (برای لوله هوا به قطر ۵ میلی متر)..... ۶۸
- شکل (۳-۴۸) نمودار مقایسه نرخ جریان جرمی آب خروجی در طول زمان با افزایش تعداد ورودی هوا در دبی هوای ثابت ۸ لیتر بر دقیقه..... ۶۹
- شکل (۳-۴۹) نمودار تغییرات بازده پمپ با نرخ جریان حجمی هوا در نرخهای شناوری مختلف ۷۱
- شکل (۳-۵۰) نمودار تغییرات بازده پمپ با نرخ جریان جرمی هوا در شناوری ۵۰٪..... ۷۱
- شکل (۴-۱) سطح مشترک بین دو فاز [۳۰]..... ۷۷
- شکل (۴-۲) آغستگی سطح مشترک..... ۸۶
- شکل (۴-۳) گسسته سازی ناحیه حل [۲۸]..... ۸۸
- شکل (۴-۴) پارامترهای گسسته سازی حجم محدود [۲۸]..... ۸۹

- شکل (۵-۴) دو نوع از ترتیب ذخیره سازی متغیر الف (فیلد حجمی : مقادیر در مراکز سلول ذخیره می شوند. ب) فیلد وجهی : مقادیر در مراکز سطح ذخیره می شوند. [۲۸] ۹۰
- شکل (۶-۴) پارامتر هادر گسسته سازی حجم محدود برای سلولهایی با یک وجه مرزی [۲۸] ۹۹
- شکل (۷-۴) نمای بالایی استوانه مورد نظر ۱۰۳
- شکل (۸-۴) نمودار سرعت در طول زمان ۱۰۷
- شکل (۹-۴) نمایش مش تقارن محوری ۱۰۷
- شکل (۱۰-۴) نمودار باقیمانده خطا برای حل یک استوانه حاوی آب با یک حباب در مرکز آن ۱۰۹
- شکل (۱۱-۵) حباب کروی در سیال نامتناهی ۱۱۲
- شکل (۱۲-۵) مقایسه توزیع فشار از حل عددی معادلات ناویر استوکس و جواب تحلیلی یانگ-لاپلاس ۱۱۳
- شکل (۱۳-۵) شکل هندسی و شرایط مرزی مدل عددی خیزش حباب ۱۱۵
- شکل (۱۴-۵) تغییر مکان مرکز جرم حباب، شیب نمودار با سرعت تعادلی برابر است ۱۱۵
- شکل (۱۵-۵) تغییر شکل حباب در طول حرکت ۱۱۷
- شکل (۱۶-۵) مقایسه بین نتایج مدل سازی (●) و رژیم حباب گریس ۱۱۷
- شکل (۱۷-۵) کانتورهای سرعت حین بالارفتن حباب کروی در سیال ساکن در زمانهای مختلف (حباب شماره ۴ در جدول ۲-۵) ۱۱۸
- شکل (۱۸-۵) کانتورهای کسر حجمی دوفاز در زمانهای مختلف (حباب شماره ۴ در جدول ۲-۵) ۱۱۹
- شکل (۱۹-۵) کانتورهای فشار حین بالارفتن حباب کروی در سیال ساکن (حباب شماره ۴ در جدول ۲-۵) ۱۱۹
- شکل (۲۰-۵) نمودار تغییرات سرعت حباب و کسر فازی حباب در حین بالا رفتن در سیال: نمودار افقی نشان دهنده طول مسیر حرکت حباب و عمودی نشان دهنده سرعت حباب است. ۱۲۰
- شکل (۲۱-۵) کانتور فشار حباب به همراه نمودار فشار در طول لوله در همان لحظه: محور افقی طول مسیر حرکت حباب و عمودی فشار استاتیکی ۱۲۰
- شکل (۲۲-۵) الف) تغییر شکل ناشی از حرکت حباب به همراه کانتورهای فشار و بردارهای سرعت ب) کم شدن اختلاف فشار و شدت جریان ۱۲۱
- شکل (۲۳-۵) نتایج آزمایشگاهی حرکت حباب بین دو سطح موازی [۴۷] ۱۲۱
- شکل (۲۴-۵) از چپ به راست : هندسه متقارن محوری، حباب در لحظه ی صفر و مش یکنواخت ۱۲۴

- شکل (۱۵-۵) کانتورهای کسر فازی حباب اسلاگ (شماره A در جدول ۳-۵)..... ۱۲۵
- شکل (۱۶-۵) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۳-۵)..... ۱۲۵
- شکل (۱۷-۵) کانتورهای فشار در سه زمان مختلف حین بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۳-۵)..... ۱۲۶
- شکل (۱۸-۵) نمودار افزایش فشار در طول مسیر حرکت حباب: محور افقی طول مسیر بالارفتن حباب و عمودی تغییر فشار در طول حرکت است..... ۱۲۶
- شکل (۱۹-۵) کانتورهای سرعت در سه زمان مختلف برای بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۳-۵)..... ۱۲۷
- شکل (۲۰-۵) کانتورهای کسر فازی حباب اسلاگ / چارن (شماره C در جدول ۳-۵)..... ۱۲۸
- شکل (۲۱-۵) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۳-۵)..... ۱۲۸
- شکل (۲۲-۵) کانتورهای فشار در سه زمان مختلف حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۳-۵)..... ۱۲۹
- شکل (۲۳-۵) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۳-۵)..... ۱۲۹
- شکل (۲۴-۵): پارامترهای هندسی حباب..... ۱۳۰
- شکل (۲۵-۵): تغییر شکل حباب تحت تاثیر گرادیان فشار..... ۱۳۰
- شکل (۲۶-۵): مقایسه ی سرعت حباب از حل عددی با نتایج تجربی..... ۱۳۲

فهرست جداول

جدول (۱-۳) برخی ابعاد و اندازه ها تحت قطرهای مختلف لوله مکنده [۲۵].....	۳۸
جدول (۲-۳) دامنه درصد غوطه وری مطلوب برای چاه های با عمق مختلف [۲۷].....	۴۴
جدول (۳-۳) حداقل ، بهترین و حداکثر درصد غوطه وری، درصد بالابری، فشار هوای راه اندازی (Psi)، نسبت دبی آب تحویلی به هوای فشرده مورد استفاده و طول لوله هوای مورد نیاز برای طول های بالابری مختلف [۲۷].....	۴۵
جدول (۴-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۰-۳.....	۴۶
جدول (۵-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۱-۳.....	۴۶
جدول (۶-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۵-۳.....	۴۷
جدول (۷-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۹-۳.....	۴۷
جدول (۸-۳) پارامترهای بی بعد مطرح در پمپ بالابر بادی [۵۱].....	۴۸
جدول (۹-۳) نسبت های بین قطر لوله های تخلیه و هوا [۵۱].....	۴۸
جدول (۱۰-۳) نسبت بین قطر لوله های تخلیه و مکش [۵۱].....	۴۹
جدول (۱۱-۳) نسبت های بین قطر لوله های مکش و هوا [۵۱].....	۴۹
جدول (۱۲-۳) حداقل و حداکثر محدوده کارکرد پمپ بالابر بادی [۵۱].....	۵۰
جدول (۱۳-۳) لوله های هوای موجود در بازار [۵۱].....	۵۲
جدول (۱۴-۳) لیست نمونه ای از پمپ های هوای موجود در بازار [۵۱].....	۵۳
جدول (۱-۴) شرایط محیطی و خصوصیات آب و هوا در مدل سازی محاسباتی.....	۱۰۹
جدول (۱-۵) داده های فیزیکی آزمون ایستا.....	۱۱۳
جدول (۵-) مقایسه ی بین رینولدز از حل عددی و داده های نمودار گریس.....	۱۱۶
جدول (۳-۵) شرایط آماده سازی مدل عددی و نتایج حاصل از حل عددی.....	۱۲۴
جدول (۴-۵) سرعت و ابعاد هندسی حباب.....	۱۳۱

فهرست علائم اختصاری

علائم	توضیحات	علائم یونانی	توضیحات
C	ثابت	μ	لزجت
C_p	گرمای ویژه	σ	تنش سطحی
Ca	عدد کاپیلاری	ρ	چگالی
D	قطر	α	حجم سیال، نسبت پوچی
Eo	عدد اتوس	β	ضریب تبخیر، دبی حجمی جریان
F	نشانگر فاز	$\emptyset$	فاصله از سطح مشترک
g	گرانش	ν	حجم مخصوص
J	سرعت سطحی		
K	هدایت گرمایی، انحنای سطح مشترک	زیر نویس	توضیحات
L	گرمای نهان	b	حباب
M	جرم منتقل شده	eq	معادل
Mo	عدد مورتون	G	گاز
N	بردار عمود بر سطح مشترک	h	هیدرودینامیکی
P	فشار	L	مایع، بزرگ
Q	دبی حجمی	s	کوچک
R	ثابت گازها، شعاع	sat	اشباع
Re	عدد رینولدز	ν	بخار
U	سرعت		
U_t	سرعت تعادلی	بالا نویس	توضیحات
		"	بر واحد سطح
		"	بر واحد حجم

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- تعریف موضوع

پمپ بالابر بادی یک پمپ ساده مبتنی بر یک لوله عمودی است که نیروی محرکه آن هوای فشرده می باشد و برای کاربردهایی نظیر بالا آوردن آب از یک چاه یا یک استخر ته نشینی استفاده می شود. این پمپ ها اغلب در چاه های عمیق که دارای ناخالصی زیاد هستند و این ناخالصی ها به بخش های مکانیکی دیگر پمپ ها آسیب می رسانند، استفاده می شوند. زیرا پمپ بالابر بادی نیاز به هیچ مکانیزم مکانیکی در زیر زمین برای انتقال سیال ندارد. در این مطالعه، پس از مشخص کردن رژیم جریانی که پمپ در آن کارایی بالاتری دارد، به ارزیابی پارامترهای موثر در افزایش کارایی این گونه از پمپ ها بصورت تجربی پرداخته شده است، چند پارامتر مهم، مانند نرخ جریان حجمی هوا، تغییر شناوری لوله بالابرنده، قطر لوله هوا و تاثیر تعداد ورودی هوا بر نرخ جریان آب خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هر مورد به ارایه نمودارهای مربوطه و ذکر دلایلی جهت تاثیر هر کدام از پارامترها در افزایش کارایی پمپ، پرداخته شده است. با توجه به اینکه کارایی بهینه پمپ در رژیم جریان اسلاگ بدست آمد، جهت مدل سازی عددی، رژیم جریان اسلاگ انتخاب گردید.

در بخش مدل سازی عددی، حل عددی جریان غیرقابل تراکم دو فاز گاز- مایع ارایه شده است، سطح مشترک بین دوفاز از روش حجم سیال با مدل نیروی سطحی پیوسته پیگیری می شود. جریان سیال نیوتنی توسط روش گسسته سازی حجم محدود و از طریق الگوریتم پیزو حل می گردد. نتایج یک نمونه مطالعاتی توسط کد عددی بسته دینامیک سیالات محاسباتی اوپن فوم نشان داده شده است. این نمونه مطالعاتی، مدل سازی حباب کروی در سیال ساکن است. فشار اضافی ایجاد شده در حباب با رابطه ی یانگ- لاپلاس مقایسه می شود. سپس به بررسی تغییر شکل یک حباب کروی در سیال بی نهایت پرداخته می شود. عدد رینولدز و شکل حباب از حل عددی با داده های استخراجی از نمودار تجربی گریس برای حرکت یک حباب گازی در سیال ساکن مقایسه می شود. در نهایت به بررسی

جریان اسلاگ پرداخته شده است و شکل حباب با نمونه های آزمایشگاهی مقایسه می شود.

۱-۲- اهمیت موضوع

پمپ های بالابر بادی در جایی استفاده می شوند که قابلیت اطمینان بالا و نگهداری پایین پمپ نیاز است. در جایی که با سیالات خورنده، ساینده، یا سیالات رادیواکتیو در کاربردهای هسته ای سروکار دارد، و هنگامی که کمپرسور هوا به عنوان منبع تجدید شدنی انرژی جهت کاربرد پمپاژ آب، به آسانی در دسترس می باشد، استفاده می شوند. اگرچه پمپ های بالابر بادی کاربردهای زیادی دارند، با این وجود بیشتر مطالعات بر روی آب گیری از معادن یا بالا آوردن نفت از چاه های مرده متمرکز شده است. در سال های اخیر اهمیت پمپ های بالابر بادی بر روی سیالات متحرک در کارخانجات تولید سوخت هسته ای تحقق یافته است. مطالب زیادی در مورد این گونه از پمپ ها وجود دارد. مطالعه حاضر ارتباط مستقیم با کاربرد پمپ بالابر بادی در پمپاژ مایعات دارد. در این مورد، جریان در لوله بالابرنده پمپ، یک جریان دو فازی می باشد. جریان دو فازی در لوله بالابرنده یک پمپ بالابر بادی، کاربرد مستقیم در جریان رو به بالا در یک لوله دایروی عمودی دارد. الگوهای جریان متداول برای جریان رو به بالا، با افزایش جرم هوا تغییر می یابند.

۱-۳- هدف تحقیق

یکی از پارامترهای مهم طراحی این پمپ ها محاسبه نرخ جریان گاز تزریقی مورد نیاز به منظور دستیابی به دبی مایع پمپ شده موردنظر و یا برعکس محاسبه دبی مایع پمپ شده بر حسب مقدار گاز تزریقی مشخص است. به دلیل پیچیدگی مدل سازی جریان دو فاز، بیشتر تحقیق های صورت گرفته به منظور دستیابی به مشخصه های عملکرد این پمپ ها، بصورت تجربی بوده است. در این

هدف تحقیق ارایه مدلی کاراست که از تلفیقی از روابط تجربی، مدل سازی ریاضی و حل عددی برای مدل سازی جریان دو فاز مایع- گاز استفاده نماید. از این مدل سازی می توان به منظور دستیابی به پارامترهای مهم طراحی مورد استفاده در کاربردهای صنعتی این نوع جریان ها، بهره جست. با دانستن این پارامترها می توان به طراحی های پیچیده تر از جمله بهینه سازی عملکرد ایرلیفت پمپ ها دست یافت.

۱-۴- روش و مراحل تحقیق

روش کلی تحقیق بر اساس نتایج آزمایش های تجربی استوار است و جزییات آن شامل برنامه کار به شرح ذیل است:

- ♦ طرح مساله : پمپ جهت چه کاری استفاده می شود و ابعاد محلی (استخر یا چاه یا ...) که پمپ در آنجا نصب خواهد شد چه قدر است.
- ♦ بررسی مساله و جمع آوری اطلاعات.
- ♦ رسم الگوریتم طراحی: تعیین ورودی های مساله
- ♦ تعیین روش مناسب جهت طرح پیشنهادی با توجه ورودی ها.
- ♦ تعیین محدودیت های طراحی: با توجه به وسایل اولیه موجود در بازار، محدودیت هایی برای طراحی معین می شود.
- ♦ تامین قطعات مورد نیاز: تهیه قطعات بر اساس ورودی ها، روش طراحی و محدودیت ها.
- ♦ کالیبره کردن تجهیزات اندازه گیری شامل فلومتر هوا.
- ♦ مونتاژ قطعات.
- ♦ تدوین دستورالعمل کار با دستگاه.

♦ فراهم کردن شرایط محیطی مناسب و سازگار با قطعات.

♦ انجام آزمایشات با توجه به امکانات موجود.

♦ پیگیری آزمایشات تا رسیدن به نتیجه بهینه.

♦ بررسی نتایج حاصله و تجزیه و تحلیل آن‌ها.

♦ نتیجه‌گیری نهایی.

پس از اتمام مراحل آزمایشگاهی نوبت به مدل‌سازی عددی الگوهای جریان مشاهده شده در کار تجربی می‌رسد. مطالعات تجربی در بررسی جامع جریان‌های دو فاز در شرایط آزمایشگاهی دارای محدودیت‌هایی است. از جمله این محدودیت‌ها، عدم توانایی در مشاهده میدان سرعت، وقت گیر بودن آزمایش‌ها و محدود بودن انجام آزمایش‌ها در اعداد رینولدز خاص است. انجام هر گونه تغییر در مدل مورد آزمایش هزینه بر بوده و نیاز به وقت زیادی برای آزمایش‌های مربوط به طراحی، ساخت و کالیبره کردن ابزار اندازه‌گیری مدل جدید دارد. با گزینش نرم افزارهای کامپیوتری نسبت به سیستم‌های آزمایشگاهی به سادگی بیشتر می‌توان با استفاده از روش‌های محاسبات عددی حالت‌های بیشتری از هندسه لوله‌های مختلف و شرایط آزمایشگاهی مختلف را مورد بررسی قرار داد. در بخش عددی، مدل‌سازی جریان دو فاز آب- هوا در یک لوله قائم با استفاده از نرم افزار این فوم تشریح می‌گردد. این نرم افزار رایگان، کد باز و تحت سیستم عامل لینوکس است. پس از مدل‌سازی کامپیوتری، الگوهای رژیم جریان عددی با الگوهای تجربی مقایسه گردیده است.

۱-۵- ساختار پایان نامه

این تحقیق شامل دو بخش کلی طراحی و ساخت پمپ بالابرادی و سپس مدل‌سازی عددی الگوهای جریان مشاهده شده تجربی می‌باشد. به همین خاطر، در این پایان‌نامه علاوه بر چکیده، ۶ فصل گنجانیده شده است.

فصل اول با عنوان مقدمه به معرفی پایان نامه می پردازد و شامل بخش های کلیات، اهداف تحقیق، روش تحقیق و نهایتاً معرفی فصل ها می باشد.

فصل دوم با عنوان مروری بر پیشینه تحقیق، مروری بر پیشینه تحقیقات صورت گرفته در زمینه جریان های دوفازی و پمپ های بالابر بادی می باشد.

فصل سوم با عنوان طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی است که در آن پس از معرفی پمپ ، پمپ بالابر بادی و پارامترهای مطرح در عملکرد این نوع از پمپ ها، پارامترهای بدون بعد موجود استخراج شده، سپس با استفاده از مقادیر بی بعد حاصل از نمونه های تجاری متداول، مراحل طراحی یک نمونه پمپ بالابر بادی انجام شده است. پس از شرح کلیات مربوط به ساخت، نتایج حاصل از عملکرد و آزمایش های انجام شده بر روی نمونه مذکور ارائه شده و با نتایج عملکرد نمونه های موجود مقایسه گردیده است.

فصل چهارم با عنوان مروری بر حل عددی جریان دو فاز است که در این فصل ابتدا درباره ی معادلات سیال صحبت می شود، پس از آن مروری بر روش های حل عددی جریان دو فاز می شود، سپس به معرفی روش های تعقیب سطح^۱ پرداخته می شود. پس از آن روش حجم محدود^۲ معرفی می شود. پس از آن به نحوه ی حل معادلات جریان سیال غیرقابل تراکم با الگوریتم پیرو پرداخته می شود. از آن رو که انجام این پروژه به کمک نرم افزار اوپن فوم مطرح است، به قابلیت ها و محدودیت های این نرم افزار نیز اشاره می شود.

فصل پنجم با عنوان نتایج است که در این فصل مدل سازی عددی جریان دو فاز آب- هوا در یک لوله قائم به منظور دستیابی به الگوهای جریان با استفاده از نرم افزار این فوم تشریح می گردد. این نرم افزار رایگان، کد باز و تحت سیستم عامل لینوکس است. پس از مدل سازی کامپیوتری داده های

^۱ Interface Tracking Method (ITM)

^۲ Finite Volume Method(FVM)

عددی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

فصل ششم، با عنوان جمع بندی و پیشنهادات می باشد که به نتایج حاصل از این تحقیق و تحقیقات دیگر، پیشنهادهایی برای ادامه مطالعات در زمینه استفاده از این نوع پمپ ها اریه می گردد تا بتواند راهگشای تعیین موضوعات تحقیق در آینده باشد.

فصل ۲:

مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱- جریان های چندفازی

فرآیندهای چند فاز کاربرد گسترده‌ای در فرآیندها و دستگاه‌های تبرید و تولید قدرت دارند.

جریان‌های چند فاز می‌توانند بسیار پیچیده بوده و متشکل از فازهای مختلفی باشند. برای مثال می‌توان به جریان‌های جامد-گاز (در توفانهای شن یا انتقال پنوماتیک ذرات جامد در صنایع)، جریان‌های مایع-گاز (باران یا انتقال نفت و گاز در خطوط لوله) جریان‌های مایع-مایع، جریان‌های مایع-جامد (جریان گل ولای)، یا جریان گاز-مایع-جامد اشاره کرد. جریان‌های چند فاز شامل توزیع هندسی متفاوتی از فازها هستند که هر توزیع دارای ویژگی‌های خاصی است. تقسیم جریان‌های چند فاز به رژیم‌های مختلف بسیار معمول است. برای سیستم‌های مایع-گاز، این تقسیم‌بندی بر اساس توزیع فازها در حجم صورت می‌گیرد. جریان دو فاز در لوله قائم عموماً به چهار یا پنج رژیم اصلی تقسیم‌بندی گردیده که در یک حد رژیم جریان حبابی وجود دارد که در آن حباب‌های گاز در مایع پراکنده‌اند، و در سوی دیگر رژیم جریان حلقوی است که در آن ذرات مایع در داخل گاز توزیع شده‌اند. جریان دو فاز گاز-مایع تحت گرانش، دسته‌ خاصی از جریان‌های چندفاز هستند که همه فعالیت‌های صورت گرفته در آنها تحت تاثیر نیروی جاذبه قرار دارد. در مقیاس قطر حباب، جاذبه به دلیل بوجود آمدن نیروی شناوری، باعث بالارفتن یک حباب به تنهایی می‌گردد.

مدل کردن جریان دو فاز، یکی از بزرگترین رقابتها در علوم کلاسیک می‌باشد. همان‌طور که بیشترین مشکل در مهندسی، وابستگی به جریان‌های دو فاز به علت اهمیت بسیار زیاد در کاربرد های صنعتی متنوع می‌باشد.

پاپا دیمیتریو^۱ [۱]، معادله انتقال را جهت محاسبه غلظت سطح مشترک توسعه داد. معادله انتقال، تغییرات دینامیکی غلظت سطح مشترک را به دلیل مبادله جرم و تعادل نیرو در مرز مشترک بیان میکند. مدل کردن تعادل نیرویی، حل معادله مومنتوم در مرز فازی میباشد. محاسبه تغییرات

^۱ Papa dimitriu

دینامیکی غلظت سطح مشترک توسط معادله انتقال، در خصوص هزینه محاسباتی حائز اهمیت است. اعتبار سنجی محاسبات برای جریانات آب / هوا درون لوله عمودی با قطرهای مختلف، با استفاده از این مدل انجام شده است.

کرپر و همکاران^۱ [۲]، جریان حباب را در یک لوله عمودی مدل کردند. به منظور تعیین کدهای دینامیک سیالات محاسباتی، آنها مجبور بودند، با مدل‌های ترکیبی که نشان دهنده فعل و انفعال بین فاز گازی و فاز مایع هستند، مجهز باشند. آنها با بکار بردن روش دو سیال، در کنار نیروهای دراگ، مبادله مومنتوم را در جهت جریان توصیف کردند. نیروهای غیر دراگ عمود بر راستای جریان نقش مهمی را در توسعه ساختار جریان دارند. جریان گاز-مایع درون یک لوله عمودی، هدف بسیار مهمی برای پدیده متناظر هستند. حباب‌ها تحت شرایط مرزی مشخص حرکت می‌کنند، تکامل جریان درون لوله، وابسته به فعل و انفعالات بین نیروهای حباب و شکست و انعقاد حباب‌ها می باشد، که تاثیر زیادی بر توزیع شعاعی حباب‌ها دارد. نتیجه جداسازی حباب‌های کوچک از بزرگ است. اندازه‌گیری‌های آزمایشی گسترده، توزیع کسر حجمی گاز، توزیع اندازه حباب و موقعیت شعاعی حباب‌ها وابسته اندازه‌شان، برای فواصل مختلف از تزریق حباب تعیین شدند.

ساب هاشینی^۲ [۳]، مرز سطح مشترک و پروفیل جریان را در جریان دو فاز درون یک لوله، مدل کرد. دینامیک سیالات محاسباتی توسط مدل اویلر-اویلر و بسته تجاری فلوئنت جهت محاسبه سطح مشترک مایع - گاز درون لوله، بکار گرفته شد. متغیرهای مطالعه شده شامل: سرعت گاز، کسر حجمی مایع و زبری سطح مشترک می‌باشند. سرعت گاز از ۱.۲ متر بر ثانیه تا ۱۲.۵ متر بر ثانیه تغییر میکند. سرعت های مایع ۰.۰۰۶ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه گرفته شدند. نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی اعتبار سنجی شدند. پیش بینی توزیع تنش برشی و مشخصه پروفیل جریان، خطای میانگین ۱۰٪ داشتند. شبیه سازی‌ها، مفهوم زبری سطح مشترک که ناشی از فعل و انفعالات گاز-

^۱ Krepper^۲ Subhashini

مایع می‌باشد، را تصدیق کردند.

گراف^۱ [۴] مدلی را جهت شبیه سازی جریان دو فاز در یک لوله عمودی توسط کد سی تی اف دی^۲ از نرم افزار فلوباکس^۳ ارائه داد. این کد جهت شبیه سازی چند بعدی جریان‌های دو فازی می‌باشد. مدل دو سیال تک فشار، جهت این شبیه سازی استفاده می‌شود. شبیه سازی پدیده جریان‌های دو فاز، علاوه بر معادل‌های انتقال برای هر فاز، به یک معادله انتقال اضافی جهت تمرکز سطح مشترک^۴ نیاز دارد. غلظت سطح مشترک، یک پارامتر مورد نیاز جهت مدل کردن نیروهای اصطکاکی و ترمهای انتقالی بین وجهین می‌باشد. یک معادله انتقال جدید جهت محاسبه غلظت سطح مشترک توسعه داده شد، که تغییرات دینامیکی غلظت سطح مشترک را به دلیل مبادله جرم و بالانس نیرو در مرز فازی، توصیف میکند. هدف اصلی معادله انتقال برای محاسبه غلظت سطح مشترک، جایگزین کردن الگوهای رژیم جریان کدهای ترمو - هیدرالیك می‌باشد. نتایج محاسبات فلوباکس برای آزمایشهای مختلف جریان دو فاز در لوله های عمودی بعنوان بخشی از اعتبار سنجی شرح داده شده است.

ریچارد بنری^۵ و همکاران [۵]، مدل عددی سه بعدی از جریان دو فاز را با استفاده از روش بالانس جمعیت در ستون حباب بیان داشتند. هدف مدل کردن جریان دو فاز در کسرهای فازی بالا بود. نیروهای بین فازی (دراگ، لیفت و جرم ظاهری)، با ترمهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و با یک روش کلاسیک جهت بالانس جمعیت ترکیب شدند، که به منظور پیش بینی توزیع اندازه حباب‌ها در ستون که ناشی از ترکیب، انعقاد و شکست حباب‌ها می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجاییکه این فرآیند در نتیجه توربولنتی می‌باشد، مدل کی-اِپسِلین توربولنتی^۶ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج با داده‌های آزمایشگاهی ادبیاتی که از روش قطر میانگین حباب و روش بالانس جمعیت به همراه

^۱ Graf

^۲ (CTFD) code

^۳ FLUBOX

^۴ interfacial area concentration

^۵ Rachid Bannari

^۶ K-E turbulent model

روابط مناسب برای نیروهای بین فازی استفاده میکنند، مقایسه شدند. مدل‌های بالا توسط نرم افزار اپن فوم بکار برده شدند.

وانگ^۱ [۶]، به شبیه سازی سه بعدی از جریان حبایی آب - هوا پرداخت. معادله انتقال بین فازی جهت ارزیابی تغییرات دینامیکی غلظت سطح مشترک در جریان دو فاز گاز - مایع، مورد توجه قرار گرفت که در مشخص کردن ساختار سطح مشترک جریان، کاربرد اساسی دارد. تلاشهای انجام گرفته توسط دیگر نویسندگان در گذشته، بر روی پیاده سازی معادله انتقال بین فازی در کدهای دینامیک سیالات محاسباتی از جمله فلوئنت، بوده است. با این وجود، اینکه آیا می‌توان ضرایب بدست آمده از مدل معادله انتقال بین فازی یک بعدی را، جهت شبیه سازی سه بعدی بکار برد، نامشخص است. کار اخیر، توسط بررسی پروفیل‌های جانبی توزیع فازی، قابلیت اجرای ضرایب بدست آمده از مدل یک بعدی را جهت استفاده برای مدل کردن سه بعدی جریان حباب در یک لوله، مشخص میکند. بعلاوه اثرهای نیروی بالابر بر روی توزیع جانبی فازی بررسی شدند. یک دستگاه جدید از ضرایب مدل انتقال بین فازی برای شبیه سازی سه بعدی از جریان حباب در لوله، پیشنهاد شد. سازگاری قابل قبولی با ضرایب جدید بین پارامترهای جریان اندازه گیری شده و مورد انتظار بدست آمد.

۲-۲- پمپ بالابر بادی

پمپ های بالابر بادی در جایی استفاده می‌شوند که قابلیت اطمینان بالا و نگهداری پایین پمپ نیاز است. در جایی که با سیالات خورنده، ساینده، یا سیالات رادیواکتیو در کاربردهای هسته ای سروکار

^۱ wang

دارد و هنگامی که کمپرسور هوا به عنوان منبع تجدید شدنی انرژی جهت کاربرد پمپاژ آب، به آسانی در دسترس می باشد، استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر اهمیت پمپ‌های بالابر بادی بر روی سیالات متحرک در کارخانجات تولید سوخت هسته ای تحقق یافته است.

مطالعه حاضر ارتباط مستقیم با کاربرد پمپ بالابر بادی در پمپاژ مایعات دارد. در این مورد، جریان در لوله بالابرنده پمپ، یک جریان دو فازی می باشد. جریان دو فازی در لوله بالابرنده یک پمپ بالابر بادی، کاربرد مستقیم در جریان رو به بالا در یک لوله دایروی عمودی دارد. الگوهای جریان متدوال برای جریان رو به بالا، با افزایش جرم تغییر می یابند.

قوانین پمپ‌های بالابر بادی از حدود سال ۱۸۸۲ استنتاج شدند، اما کاربرد بالابرداری تا آغاز قرن بیستم (۱۹۴۹) آشکار نشد. در مقایسه با سایر پمپ‌ها، ویژگی خاص پمپ بالابر بادی سادگی مکانیکی آن است. علاوه بر آن، می‌توانند در یک محیط خورنده به آسانی استفاده شوند.

استپانف^۱ [۷]، از یک روش ترمودینامیکی جهت بررسی پمپ بالابر بادی استفاده کرد، که قادر به توصیف عملکرد پمپ بصورت فیزیکی بود.

پیکرت^۲ [۸]، عملکرد پمپ‌های بالابر بادی را آنالیز کرد که در راستای مطالعات قبل، توسعه دهنده تئوری جریان‌های دوفاز بود. باید متذکر شد که بیشتر مطالعات بر روی لوله‌های بالابر بزرگ، با قطر ۲۵-۳۰۰ میلی متر و طول ۱۰-۱۰۰ میلی متر بوده است. با این وجود، نیکلین^۳ [۹] حدس زد که افزایش بازده ممکن است با لوله‌هایی با قطر کوچکتر در نرخ جریان کمتر بدست آید. که توسط وایت^۴ و برد مور^۵ (۱۹۶۲) زوکوشی^۶ (۱۹۶۶) تحقق بخشیده شد، قطر لوله به کمتر از ۲۰ میلی‌متر

^۱ Stepanoff

^۲ Pickert

^۳ Nicklin

^۴ White

^۵ Beardmore

^۶ Zukoski

کاهش یافت. در این حالت اثرات کشش سطحی بر روی دینامیک جریان اسلاگ عمودی بسیار مهم می شود. با پیشرفت های صورت گرفته در تفهیم جریان های دوفاز در نیمه دوم قرن حاضر، مدل استنینگ و مارتین^۱ [۱۰]، قوانین بنیادی جریان دو فاز و مومنتوم را جهت بررسی پمپ های بالابر با قطر نسبتاً کوچک و نرخ جریان هوای کم، بیان نمود. مدل استنینگ و مارتین (۱۹۶۸)، نقطه شروع آنالیز دلانو^۲ (۱۹۹۸)، بر روی پمپ های حبابی است. مطالعه بر روی عملکرد پمپ های بالابر بادی در تحقیق استنینگ و مارتین انجام شده است. نرخ جریان حجمی آب (Q_l) در مقابل نرخ جریان حجمی هوا (Q_g) برای نرخ های شناوری مختلف ($\frac{H}{L}$)، بدست آوردند. نشان داده شد که یک نرخ جریان هوای معین جهت ماکزیمم کردن نرخ جریان آب برای یک قطر لوله مشخص وجود دارد. دلانو (۱۹۹۸) در تحقیقش به نمودارهای مشابه رسید و پمپش در بالاترین نرخ جریان آب عمل می کرد. کورمنوس^۳ [۱۱]، تحقیقاتش را بر روی پمپ ها بالابر بادی با قطر زیر ۱۲ میلی متر و بالابری کم در حدود ۱ تا ۳ متر، با نرخ های شناوری بین ۰.۵۵ تا ۰.۷ انجام داد. در مطالعه حاضر قطر لوله بالابر بالاتر از این بوده و محدوده نرخ های شناوری بیشتر می باشد. کورمنوس همچنین آزمایش هایش را جهت بدست آوردن جریان اسلاگ کامل تکمیل کرد. در مطالعه حاضر، رژیم جریان در اصل تحمیلی نبوده با این وجود بعد از انجام آزمایش ها مشخص شد که رژیم جریان موثر در واقع اسلاگ بود.

کلارک و دابلت^۴ [۱۲]، مدلی را جهت پیش بینی ارتفاعی که در آن یک پمپ بالابر بادی در رژیم جریان اسلاگ عمل کرده و می تواند نرخ معینی از جریان حجمی مایع را بالا ببرد، پیش بینی کرد. کچاردودلهای^۵ (۱۹۹۶)، به کاربرد پمپ بالابر بادی در پروسه های سوخت هسته ای پرداختند. توسعه

^۱ Stenning and Martin

^۲ Dellano

^۳ Kouremenos

^۴ Clark and Dabolt

^۵ Cachard and Delhay

کاوش در جزئیات جریان سیال دوفاز در اطراف حباب تیلور در لوله بالابر جهت بدست آوردن افت فشار اصطکاکی از حوزه این مطالعه خارج است.

کساب وهمکاران [۱۳]، به بررسی تحلیلی و تجربی پمپ های بالابر بادی با جریان های سه فازی پرداختند که مبنی بر روش حجم کنترل است و یک مدل تئوری جهت پیش بینی پمپ بالابر بادی که در سیستم سه فاز مایع - جامد - گاز عمل میکند، می باشد. اثر نرخ شناوری و اندازه ذرات جامد بر روی عملکرد پمپ مورد بررسی قرار گرفته است.

اسیماکوپلس^۱ [۱۴] پمپ بالابر بادی را برای چاه هایی با عمق متوسط طراحی کرد که می توانست نرخ جریان آب را به ازای نرخ جریان هوای معین پیش بینی کند یا نرخ جریان هوای مورد نیاز را برای نرخ جریان آب مطلوب پیش بینی کند. پیش بینی های انجام شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند که سازگاری قابل قبولی داشت.

حمدی کندیل^۲ [۱۵]، به بررسی پمپ بالابر بادی تحت جریان دو فاز پرداخت. هدف تخمین عملکرد پمپ تحت شرایط از پیش تعیین شده و بهینه سازی پارامترهای مربوطه می باشد. به همین خاطر پمپ بالابر بادی طراحی و تست شد. آزمایشهای برای نه نرخ شناوری و سه طول مختلف از لوله بالابرنده با فشارهای تزریق هوای مختلف، انجام شدند. علاوه بر آن، پمپ تحت رژیم های مختلف جریان نیز تست شد. یک مدل تئوری جهت تعیین الگوی جریان در بهترین محدوده بازده از عملکرد پمپ تعیین شد. نتایج نشان داد که ظرفیت و بازده پمپ تابعی از نرخ جریان جرمی هوا، نرخ شناوری و طول لوله بالابرنده هستند. بهترین محدوده عملکرد پمپ بالابر بادی در رژیم جریان اسلاگ^۳ و اسلاگ - چارن^۴ بدست آمد. مدل پیشنهاد شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که سازگاری خوبی

^۱ D. ASSIMACOPOULOS

^۲ Hamdy A. Kandil

^۳ slug

^۴ slug-churn

با نتایج آزمایشگاهی داشت و فلاکس حجمی مایع را برای الگوهای جریان مختلف شامل آگوهای حبابی، اسلاگ و چارن پیش بینی می‌کرد. نتایج، نرخ جریان آب را بعنوان تابعی از نرخ جریانی هوا در شناوری ۰.۴ نشان داد.

پدرام حنفی زاده^۱ [۵۲] جریان دوفاز مایع-گاز را در یک لوله قائم شبیه سازی کردند. این مدل بر اساس توازن مومنتوم بنا شده و در آن با استفاده از روابط تجربی حاکم بر اصطکاک رژیم‌های مختلف جریان دو فاز آب-هوا و همچنین انتگرال‌گیری و حل عددی معادلات حاصل از تعادل مومنتوم در هر سلول می‌توان به دبی خروجی فازها و همچنین توزیع فشار در راستای محور لوله دست یافت. این مدل بصورت عملی برای طراحی پمپ ایرلیفت ارائه شده که با استفاده از آن می‌توان نرخ جریان هوا یا آب را برای سیستم ایرلیفت تعیین نمود. همچنین، از این مدل می‌توان برای بهینه سازی قطر لوله، دبی جریان و عملکرد پمپ‌های دو فازی استفاده کرد. این مدل به دایل قابلیت تشخیص الگوی جریان و استفاده از رابطه اصطکاکی مناسب با هر الگو نسبت به روش جزء حجمی میانگین دارای دقت بیشتری بوده و محدودیت‌های موجود در آن روش را مرتفع ساخته است. از آنجایی که این روش نیمه تحلیلی نیمه عددی است، لذا نسبت به روش‌های صرفاً عددی که کل میدان جریان را حل میکنند، ساده تر و کارا تر است. نمودار مقایسه توزیع فشار در طول لوله برای نودهای مختلف ترسیم شده است و نشان میدهد که افزایش نودها از ۵۰ به بالا تاثیر زیادی در افزایش دقت جوابها نخواهد داشت. بدین معنی که نتایج وابستگی به تعداد نودها نخواهند داشت. نمودار انحراف توزیع فشار از توزیع خطی در طول لوله ترسیم شده است. که نشان میدهد توزیع فشار از توزیع خطی در ورودی و خروجی لوله فاصله میگیرد که این امر را می‌توان ناشی از اثرات ورودی و خروجی در لوله دانست. مدل‌سازی صورت گرفته به روش انتگرالی نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته که نشان میدهد پیش بینی‌های حاصل از این روش از دقت مناسب و مطلوبی برخوردار است.

^۱ P. Hanafizadeh

این روش برای رژیم های اسلاگ و بهم خورده مناسبتر از رژیم آنیولار است. با استفاده از فرضهای دقیقتر می توان دقت روش را افزایش داد.

فصل ۳:

طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی

۳-۱- مقدمه

در این فصل، پس از معرفی پمپ، پمپ بالابر بادی و پارامترهای مطرح در عملکرد این نوع از پمپ ها، پارامترهای بدون بعد موجود استخراج شده، سپس با استفاده از مقادیر بی بعد حاصل از نمونه های تجاری متداول مراحل طراحی یک نمونه پمپ بالابر بادی انجام شده است. پس از شرح کلیات مربوط به ساخت، نتایج حاصل از عملکرد و آزمایش های انجام شده بر روی نمونه مذکور ارائه شده و با نتایج عملکرد نمونه های موجود مقایسه گردیده است.

۳-۲- پمپ

به طور کلی پمپ به دستگاهی گفته می شود که انرژی مکانیکی را از یک منبع خارجی می گیرد و به سیالی که از آن عبور می کند می دهد. در نتیجه انرژی سیال بعد از خروج از پمپ افزایش می یابد. از پمپ برای انتقال سیال به یک ارتفاع معین و یا حرکت سیال در مدارهای مختلف هیدرولیکی و سیستم های لوله کشی و به طور کلی انتقال سیال از یک نقطه به نقطه دیگر استفاده می شود. پمپ ها بر مبنای نحوه انتقال انرژی به سیال، به دو دسته کلی زیر تقسیم بندی می شوند:

دسته اول: پمپ های دینامیکی که در آن ها انتقال انرژی به سیال به طور دائمی انجام می گیرد.

دسته دوم: پمپ های جابجایی مثبت که در آن ها انتقال انرژی به سیال به صورت متناوب می باشد.

۳-۲-۱- مقایسه دامنه کاربر پمپ ها

پمپ های سانتریفوژ یا توربو پمپ ها منطقه وسیعی از کارکرد را در بر می گیرند، به همین علت

بیشتر در صنعت از آنها استفاده می شود. پمپ های جابجایی مثبت عملاً برای ارتفاعات تولیدی فوق العاده بالا و یا برای پمپاژ سیالات با لزجت زیاد مورد استفاده قرار می گیرند.

❖ پارامترهای اصلی در پمپ ها

۱. دبی

مقدار موثر حجم سیال که در واحد زمان از دهانه خروجی خارج می شود. مقادیری از دبی که دارای اهمیت بیشتری هستند به صورت زیرند:

- دبی اسمی
- دبی بهینه
- دبی حداقل
- دبی حداکثر

۲. ارتفاع کل

مقدار قدرت مفیدی است که توسط پمپ به واحد وزن سیال منتقل می شود و مستقل از وزن مخصوص سیال می باشد.

$$H = \left(\frac{P_d - P_s}{\gamma} \right) + (Z_d - Z_s) + \left(\frac{V_d^2 - V_s^2}{2g} \right) \quad (۱-۳)$$

۳. توان مصرفی و توان مفید

توان مصرفی: توانی است که ماشین محرک روی محور پمپ قرار می دهد.

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta \times 1000} \quad (۲-۳)$$

که در آن Q بر حسب لیتر بر ثانیه است.

توان مفید: توانی که توسط پمپ به سیال داده می شود.

$$P = \rho g Q H \quad (3-3)$$

۴. کارایی کل پمپ

نسبت بین توان مفید به توان مصرفی می باشد.

۵. ارتفاع مثبت خالص مکش

فشار کل سیال در دهانه مکش پمپ که نسبت به فشار تبخیر سیال در درجه حرارت پمپاژ سنجیده

می شود. واحد آن بر حسب متر است (در دستگاه متریک).

دو ارتفاع مثبت خالص مکش تعریف می شود:

الف- در دسترس: فشار موجود سیال در دهانه مکش پمپ است.

$$NPSH_{avail} = \frac{P_o}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g} + \frac{P_v}{\rho g} \quad (4-3)$$

که P_o فشار استاتیک سیال در دهانه ورودی و P_v فشار تبخیر سیال در درجه حرارت کاری می باشد.

ب- **مورد نیاز** : که حداقل فشار مورد لزوم سیال در دهانه مکش است تا از بروز کاویتاسیون

جلوگیری به عمل آورد.

$$NPSH_{req} = \frac{P_{o \min}}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g} + \frac{P_v}{\rho g} \quad (5-3)$$

برای اینکه در هیچ شرایطی پمپ دچار کاویتاسیون نشود همواره باید به ازای تمام دبی ها، نامساوی

زیر برقرار باشد.

$$NPSH_{avail} \geq NPSH_{req} \quad (۶-۳)$$

۶. سرعت مخصوص

سرعت مخصوص یک پمپ در نقطه کارایی ماکزیمم، سرعت دورانی پمپی است از همان خانواده که در دبی برابر واحد (یک متر مکعب در ثانیه) با ارتفاع واحد (یک متر) را در نقطه ماکزیمم خود تولید می کند.

$$N_s = N \times \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}} \quad (۷-۳)$$

در این رابطه:

Q : دبی در نقطه کارایی ماکزیمم

H : ارتفاع در نقطه کارایی ماکزیمم

N : سرعت دورانی پمپ

سرعت مخصوص یک پمپ در نقطه کارایی ماکزیمم، سرعت دورانی پمپی است از همان خانواده که در دبی برابر واحد (یک متر مکعب در ثانیه) با ارتفاع واحد (یک متر) را در نقطه ماکزیمم خود تولید می کند.

$$N_s = N \times \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}} \quad (۸-۳)$$

در این رابطه:

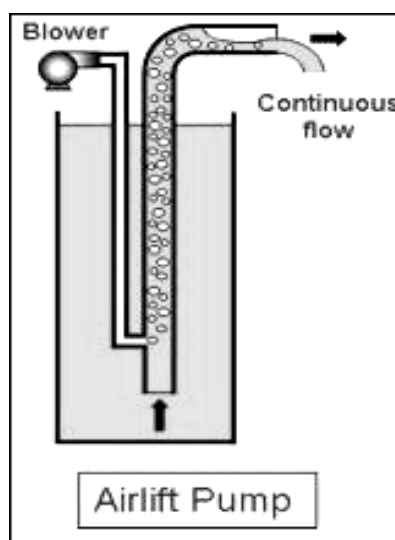
Q : دبی در نقطه کارایی ماکزیمم

H : ارتفاع در نقطه کارایی ماکزیمم

N : سرعت دورانی پمپ

۳-۳- پمپ بالابر بادی

در بخش قبل مطالبی کلی راجع به پمپ ها (چیستی، انواع، مزایا و معایب هر نوع، پارامترهای اصلی) مرور گردید. در این بخش به صورت مشخص به یکی از پمپ های خاص به نام پمپ بالابر بادی^۱ پرداخته می شود. در شکل ۳-۱ یک نمونه پمپ بالابر بادی مشاهده می شود.



شکل (۳-۱) یک نمونه ساده پمپ بالابر بادی یا Airlift Pump [۱۶]

۳-۳-۱- تعریف [۱۶]

پمپ بالابر بادی یک پمپ ساده مبتنی بر یک لوله عمودی است که نیروی محرکه آن هوای فشرده می باشد. و برای کاربردهایی نظیر بالا آوردن آب از یک چاه یا یک استخر ته نشینی استفاده می شود.

^۱ Airlift Pump

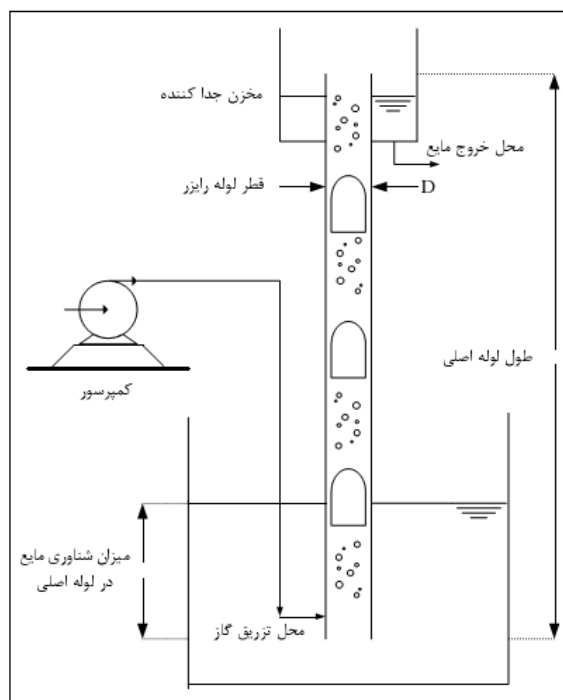
۳-۳-۲- قاعده حاکم [۱۶]

این پمپ ها اغلب در چاه های عمیق که دارای ناخالصی زیاد هستند و این ناخالصی ها به بخش های مکانیکی دیگر پمپ ها (از قبیل پمپ های سانتریفوژ) آسیب می رسانند، استفاده می شوند. زیرا پمپ بالابر بادی نیاز به هیچ مکانیزم مکانیکی در زیر زمین برای انتقال سیال ندارد. وقتی که هوای فشرده به لوله تخلیه تزریق می شود، مخلوطی از آب (سیال مورد نظر) و هوا تشکیل می شود و بنابراین حباب ها شکل می گیرند. این حباب های تشکیل شده دارای چگالی کمتر از چگالی آب خالص می باشند، بنابراین ستونی کوچک از آب خالص می تواند با ستونی بزرگ از مخلوط آب و هوا در تعادل باشد و مخلوط آب و هوا را به بیرون هدایت کند. پس اصول استفاده از پمپ بالابر بادی در تفاوت بین چگالی آب و هوا است.

۳-۳-۳- اجزاء تشکیل دهنده [۱۶]

۱. کمپرسور یا پمپ هوا
۲. لوله هوا
۳. فوت پیس یا چند نازل
۴. لوله تخلیه
۵. محفظه آزاد کننده هوا

در شکل زیر اجزا تشکیل دهنده یک پمپ بالابر بادی نشان داده شده است.



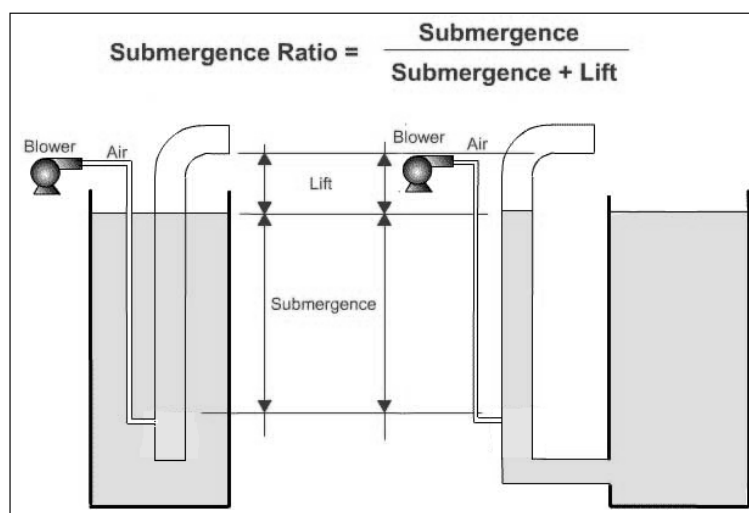
شکل (۲-۳) اجزا تشکیل دهنده یک پمپ بالابر بادی [۲۵]

هوای فشرده در پایین لوله هوا به یک یا بیشتر نازل یا فوت پیس هدایت می شود (این وسیله هوا را در مجراهایی کوچک می شکند). (برای این که حباب های شکل گرفته به کوچکترین اندازه مقدور در بیایند). باید توجه شود که نازل یا فوت پیس درون لوله تخلیه که در حقیقت در بدنه قرار دارد، معلق شده است. لوله تخلیه در کف درست بعد از فوت پیس باز است. وقتی که هوای فشرده در میان فوت پیس تخلیه می شود یک ستون هوا بالای فوت پیس در لوله تخلیه تشکیل می شود. ستون آب داخل بدنه چاه در بالای فوت پیس و ورودی لوله تخلیه که ساکن است هم اکنون وزن بیشتر یا فشار استاتیکی بیشتر دارد. تحت تاثیر این نیروی داده شده، مخلوط هوا و آب در لوله تخلیه به طرف بالا می رود تا جایی که از میان خروجی لوله تخلیه به اتمسفر می ریزد. این جریان تا زمانی که هوای فشرده سیستم تامین شود ادامه پیدا می کند. مخلوط هوا و آب در بالای لوله تخلیه وارد محفظه آزاد کننده هوا می شود و در آنجا به یک منحرف کننده جریان برخورد کرده و هوا را از این مخلوط آب و هوا آزاد می کند و آب باقی مانده را در یک مخزن ذخیره می کند.

پمپ های بالابر بادی در وضعیت شرح داده شده می توانند مقدار قابل توجهی آب را تحویل دهند. پمپ های بالابر بادی نمی توانند برای تخلیه مستقیم در سیستم های توزیع آب استفاده شوند ، زیرا فشار تخلیه نسبتا پایین است و این پمپ ها فشارکافی برای توزیع آب به طور افقی در روی زمین را تامین نمی کنند. سیال تخلیه شده فقط می تواند در یک مخزن ذخیره شود.

۳-۳-۴- یک پارامتر مهم [۱۷]

ظرفیت پمپ های بالابر بادی تا حد زیادی به درصد غوطه وری وابسته است. برای بدست آوردن درصد غوطه وری نسبت غوطه وری (در زیر توضیح داده می شود) را در عدد صد ضرب می کنیم. نسبت غوطه وری برابر است با ارتفاعی که لوله تخلیه در چاه فرو برده شده است (از لبه ورودی هوای فشرده تا سطح آب) تقسیم بر همین ارتفاع به علاوه ارتفاعی که مخلوط پمپاژ شده از سطح آب بالا برده می شود. در شکل ۳-۳ این نسبت به وضوح مشخص شده است.



شکل (۳-۳) نمایش درصد غوطه وری [۱۷]

برای غوطه وری های بزرگتر، آب تحویلی از لوله تخلیه در واحد زمان بیشتر است. از جهت دیگر، یک ستون آب بزرگتر (در لوله تخلیه) بالای فوت پیس وزن زیادتر یا فشار بیشتری در فوت پیس اعمال می کند. در نتیجه فشار هوای بیشتری هم برای برانگیختن هوا با آب مورد نیاز است.

فشار هوای راه اندازی همیشه بزرگتر از فشار هوای کارکرد است. وقتی که پمپ راه اندازی می شود، سطح ساکن آب تا حدودی به سمت پایین برای پمپاژ کشیده می شود. در نتیجه ستون آب بالای فوت پیس کاهش می یابد و در حقیقت فشار هوای مورد نیاز برای برانگیختن آب با هوا کاهش می یابد. در کارکرد پمپ های بالابر بادی هوای فشرده نقش تنظیم کردن صحیح را بر عهده دارد. مقدار هوای فشرده باید، حداقل هوای فشرده مورد نیاز برای تولید یک جریان پیوسته آب باشد. هوای کم سبب تخلیه به صورت ناگهانی می شود، هوای زیاد هم باعث افزایش در حجم تخلیه اما در فشار تخلیه پایین تر می شود.

۳-۳-۵- مزایا [۱۷]

۱. این پمپ ها دارای هیچ قسمت متحرک و مکانیکی نمی باشند.
۲. تعمیر و نگهداری آنها نسبت به پمپ های معمول خیلی کمتر است.
۳. ساده و قابل اطمینان هستند.
۴. لوله تحویل دهنده یا تخلیه می تواند به وسیله گل ولای ، شن و ماسه و آب دارای ریگ و شن در جای خود محکم شود.
۵. پمپ های بالابر بادی می توانند برای پمپاژ چاه های خمیده و چاه هایی که محتوی شن و ماسه و دیگر ناخالصی ها همراه با سیال مورد نظر می باشند نیز مورد استفاده قرار گیرند.
۶. برای پمپاژ سیالات پرخطر مثل سیالات حاوی مواد پرتوزا مناسبند.
۷. آن ها همچنین به آسانی می توانند چاه های محتوی آب داغ را پمپاژ کنند.

۳-۳-۶- معایب [۲۵]

۱. وقتی که مخارج انرژی در متراکم کردن هوا در نظر گرفته می شود کارایی پایین (حدود ۲۰ تا ۳۰٪ کارایی کاربردی) دارند. (بازده کمپرسور هوا مهمترین فاکتر در تعیین کارایی کلی پمپ بالابر بادی است).
۲. برای بدست آوردن فشار استاتیکی کافی، چاه لوله ای باید خیلی عمیق سوارخ کاری شود، اگر عمق سوارخ خیلی نباشد تخلیه کمتر می شود و احتمالا هیچ تخلیه ای انجام نمی شود. سوراخکاری به طور قابل ملاحظه یک عملیات پر خرج است.
۳. این پمپ ها دارای فشار تخلیه پایین هستند.
۴. اکسیژن موجود در مخلوط هوا و آب بالارونده مستعد برای خوردگی لوله ها است.

۳-۳-۷- موارد کاربرد [۲۵]

- این پمپ ها علی رغم کارایی پایین شان ، در خیلی نواحی که استفاده از پمپ های معمول مشکل است استفاده می شود. پمپ بالابر بادی در موارد زیر کاربرد دارد:
۱. حوزه های نفتی
 ۲. جابجایی بعضی سیالات پر خطر (مثل سیالات پرتو زا)
 ۳. تاسیسات فاضلاب
 ۴. استخراج معادن دریایی عمیق
 ۵. بازیافت مصنوعات باستان شناسی
 ۶. بدست آوردن توده های منگنز از کف اقیانوس ها
 ۷. طراحی بیوراکتور
 ۸. استفاده در استخرهای آبی پروری

۳-۴- طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی

در قسمت قبل شرح داده شد که پمپ بالابر بادی چگونه پمپی است و چگونه کار می کند، در این فصل مراحل طراحی و ساخت یک پمپ بالابر بادی بررسی خواهد شد. در ابتدا روابط تئوری حاکم بر این پمپ را مرور می کنیم.

۳-۴-۱- روابط تئوری حاکم [۵۱]

بعضی از روابط تئوری حاکم بر سیال در یک پمپ بالابر بادی در زیر آورده شده است.

۳-۴-۲- سرعت بالا رفتن گاز در لوله عمودی نسبت به مایع متحرک [۸]

سرعت بالا رفتن گاز در لوله عمودی نسبت به مایع متحرک (سرعت بالا رفتن حباب):

$$V_T = C_O V_m + V_{TS} \quad (۹-۳)$$

که در رابطه بالا؛

V_T = سرعت بالا رفتن حباب (m/s)

V_{TS} = سرعت بالا رفتن حباب در سیال ساکن (m/s)

C_O = ضریب شکل سرعت مایع

V_m = سرعت متوسط اسلاگ مایع (دارای جریان اسلاگ ، که از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_m = \frac{Q_L + Q_G}{A} \quad (۱۰-۳)$$

که در رابطه بالا؛

$$QL = \text{دبی مایع (m}^3/\text{s)}$$

$$QG = \text{دبی گاز (m}^3/\text{s)}$$

$$A = \text{سطح مقطع لوله (m}^2\text{)}$$

۳-۴-۳- نسبت غوطه وری [۱۷]

در شکل ۳-۱ یک نمونه پمپ بالابر بادی مشاهده می شود. نسبت غوطه وری (α) با توجه به شکل

۳-۲ برابر است با:

$$\alpha = \frac{Z_s}{Z_l + Z_s} \quad (۳-۱۱)$$

$$Z_l = \text{ارتفاع بالابری (m)}$$

$$Z_s = \text{ارتفاع غوطه وری لوله (m)}$$

نسبت غوطه وری با اختلاف فشار متوسط در طول لوله بالابرنده برابر است.

۳-۴-۴- تعادل فشار استاتیکی در لوله عمودی [۱۷]

تعادل فشار استاتیکی در لوله عمودی به صورت رابطه زیر می باشد:

$$\rho g Z_s = \rho g (1 - \varepsilon)(Z_s + Z_l) \quad (۳-۱۲)$$

$$\rho = \text{که، دانسیته سیال (kg/m}^3\text{)}$$

ε = کسر حجمی هوا در ستون مایع

$$\varepsilon = \frac{\text{دانشیته آب} - \text{دانشیته آب و هوا}}{\text{دانشیته آب}} \quad (13-3)$$

اگر سیال در لوله متحرک باشد، یک فشار رها شده اضافی به علت اصطکاک از دست داده شده به رابطه قبل اضافه می شود.

$$P_s = f \frac{(Z_s + Z_l) \rho V_m^2}{2D} \quad (14-3)$$

که، P_s = فشار اصطکاکی رها شده تک فاز (N/m^2)
 f = ضریب اصطکاک، که برابر است با:

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (15-3)$$

$$Re = \frac{DV_m}{\nu} \quad (16-3)$$

که، ν = لزجت سینماتیکی سیال (m^2/s)
 بنابراین داریم:

$$\rho g Z_s = \rho g (1 - \varepsilon) (Z_s + Z_l) + f \frac{(Z_s + Z_l) \rho V_m^2}{2D} (1 - \varepsilon) \quad (17-3)$$

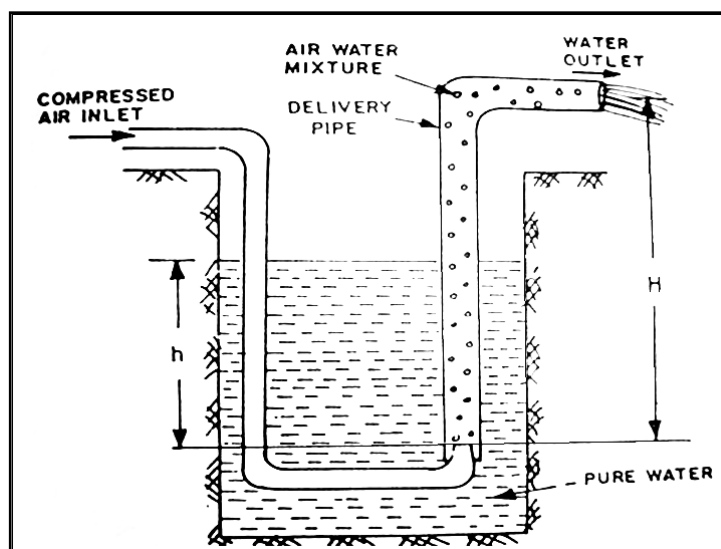
از طرفی بازده (n) برابر می شود با:

$$n = \frac{Q_L Z_l \rho g}{Q_G P_a \ln\left(\frac{P_o}{P_a}\right)} \quad (18-3)$$

که، P_a = فشار اتمسفر (N/m^2)

P_o = فشار در پایه لوله بالابرنده (N/m^2)

۳-۴-۵- بالابری مفید [۲۵]



شکل (۳-۴). یک نمونه پمپ بالابر بادی [۲۵]

شکل ۳-۴ را ملاحظه می فرمایید، که در آن:

h = ارتفاع استاتیک (ایستا) از سطح آب تا بالای نوک نازل دمش هوا

H = ارتفاع نوک نازل تا خروجی پمپ می باشد.

$H-h$ به عنوان بالابری مفید^۱، شناخته می شود. اگر بالابری مفید ($H-h$) کمتر از ارتفاع استاتیک آب

بالای نوک نازل (h) باشد نتایجی که بدست می آیند، بهینه هستند. بنابراین برای بدست آوردن

بهترین نتایج از این سیستم باید نامساوی زیر برقرار باشد:

$$(H-h) < h$$

نسبت ($h / H-h$) معمولا از ۱ تا ۴ تغییر می کند. مثلا وقتی که $h = ۳۰\text{m}$ است نسبت ($h / H-h$)

در حد ۴ است و وقتی که $h = ۹۰\text{m}$ نسبت ($h / H-h$) در حدود ۱ است.

^۱ useful lift

$$h = 30 \text{ m},$$

$$h / H - h = \xi$$

$$30 / H - 30 = \xi$$

$$30 = \xi H - 120$$

$$\xi H = 150$$

$$H = 37.5 \text{ m}.$$

$$h = 90$$

$$h / H - h = 1$$

$$90 / H - 90 = 1$$

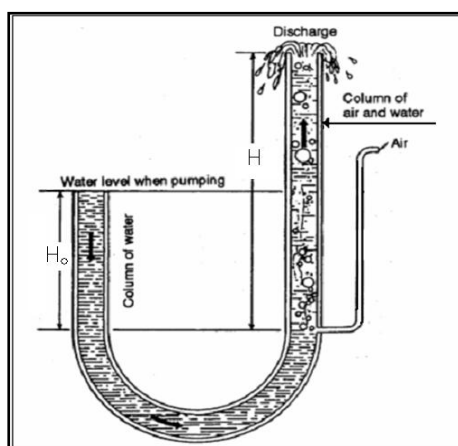
$$90 = H - 90$$

$$H = 180 \text{ m}$$

بنابراین پیداست که وقتی h افزایش می یابد H نیز افزایش می یابد.

۳-۴-۶- کار خالص انجام شده روی مایع [۲۶]

شکل ۳-۵ اصول کلی در پمپ بالابر بادی را نشان می دهد.



شکل (۳-۵) اصول کلی در پمپ بالابر بادی [۲۶]

اگر مقدار مایع (M) به اندازه ارتفاع خالص ($H - H_0$) توسط مقدار هوای (m) بالا کشیده شود، کار خالص انجام شده روی مایع برابر است با:

$$W = Mg(H - H_0) \quad (19-3)$$

اگر فشار هوای ورودی P باشد، کار خالص انجام شده (W) توسط هوا در انبساط هم دما با فشار اتمسفر P_a ، از رابطه زیر تعیین می شود:

$$W = \int PdV = -\int VdP \quad (20-3)$$

بنا به قرارداد، کاری که سیستم روی محیط انجام می دهد، دارای علامت منفی است. علامت منفی در عبارت بالا به همین خاطر ظاهر شده است. در اینجا ما دارای حجم ثابتی برای کار انجام شده هستیم، پس نمی توانیم از رابطه $W = \int PdV$ برای کار استفاده کنیم چون ترم $dV=0$ است. پس کار انجام شده برابر $W = -\int VdP$ است. برای تحول هم دما داریم:

$$PV = \text{constant}, V = nRT / P \quad (21-3)$$

بنابراین:

$$W = -nRT \int dP / P = -P_a V_a \ln(P / P_a) \quad (22-3)$$

با جانشین سازی V_a توسط وزن (m) و چگالی (ρ_a) هوا داریم:

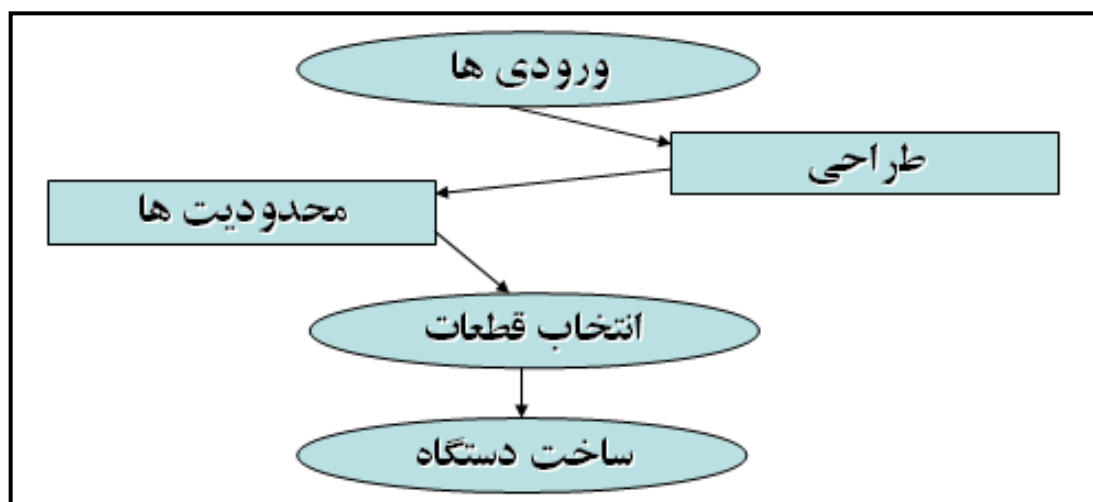
$$W = -P_a (m / \rho_a) \ln(P / P_a) \quad (23-3)$$

به خاطر تماس نزدیک بین هوا و مایع، انبساط تقریباً هم دما خواهد بود. به نظر می رسد که چنانچه

H_0 افزایش یابد (غوطه وری افزایش می یابد). جرم هوای مورد نیاز به جرم مایع بالا برده شده (m/M) کاهش می یابد. چون که وقتی H_0 افزایش یابد و H ثابت است پس نیروی بالابری مفید کاهش می یابد و چون ارتفاع خالص ما که همان $H - H_0$ است کاهش یافته است پس مقدار کمتری هوای فشرده (m) برای بالابردن مخلوط آب و هوا نیز لازم است و بنابراین جرم هوای فشرده مورد نیاز به جرم مایع بالا برده شده (m/M) کاهش می یابد. واضح است که اگر H_0 صفر باشد، m/M بی نهایت است بنابراین پمپ کار نخواهد کرد. پس در کارکرد این نوع از پمپ ها شرایط مطلوب، غوطه وری زیاد است.

۳-۵- مراحل طراحی و ساخت

برای ساخت یک نمونه پمپ بالابر بادی ابتدا باید طرح مسئله کرد. یعنی ابتدا باید معین کرد که پمپ برای چه کاری استفاده خواهد شد و ابعاد محلی (استخر یا چاه یا ...) که پمپ در آنجا نصب خواهد شد چه قدر است. سپس باید الگوریتم طراحی را مشخص نمود. یعنی ابتدا ورودی های مسئله مشخص می شود بعد با توجه به ورودی های مسئله یک روش برای طراحی پیشنهاد شده ، در مرحله بعد با توجه به وسایل اولیه موجود در بازار، محدودیت هایی برای طراحی معین می شود و در پایان بر اساس ورودی ها، روش طراحی و محدودیت ها، قطعات تهیه شده و سپس سرهم بندی (مونتاژ) می شوند.



۳-۵-۱- طرح مسئله:

مطلوب است تخلیه آب درون یک مخزن به حجم ۱۳۰ لیتر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر.

۳-۵-۲- الگوریتم طراحی:

❖ ورودی های مسئله:

- ۱- درصد غوطه وری: با توجه به هندسه مسئله حداقل فاصله دهانه خروج سیال از لوله تخلیه تا سطح آب حدود ۶ سانتی متر است، که درصد غوطه وری در حدود ۹۰٪-۸۵ را موجب می شود.
- ۲- دبی تخلیه سیال: برای دبی تخلیه سیال از پمپ بالابر بادی، از نمونه هایی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد استفاده می کنیم. نمونه ای از موارد استفاده از پمپ بالابر بادی در صنعت، در یکی از شهر های ایالت ویرجینیا در آمریکا است. در شهر باتتورت^۱ ایالت ویرجینیا در آمریکا یک واحد صنعتی توسط سازمان امور عام المنفعه این شهر به بهره برداری رسید. این واحد صنعتی، اولین واحد صنعتی تصفیه فاضلاب بود که برای تصفیه فاضلاب از پمپ بالابر بادی استفاده می کرد. دبی تخلیه در این واحد صنعتی ۲۰۰۰۰ گالن در روز، معادل ۵۲ لیتر بر دقیقه است.
- برای استفاده در یک نمونه آزمایشگاهی، برای اولین بار از نصف این مقدار برای دبی تخلیه سیال از پمپ بالابر بادی استفاده می کنیم. پس دبی تخلیه سیال برابر است با: ۲۶ LPM (لیتر بر دقیقه).

❖ طراحی : پارامترهای بی بعد طراحی

برای طراحی یک پمپ بالابر بادی به پارامتر هایی بی بعد نیاز است که بتوان در همه شرایط از آن برای طراحی استفاده کرد. این پارامتر ها از روابط تئوری زیر حاصل می شوند.

^۱ Botetourt

$$F_w = f(F_a, D, d, H, h)$$

$$\left[\frac{L^3}{T} \right] = \left[\frac{L^3}{T} \right] [L][L][L][L]$$

$$n - m = 3$$

$$\pi_1 = \frac{F_w}{F_a}$$

$$\pi_2 = \frac{D}{d}$$

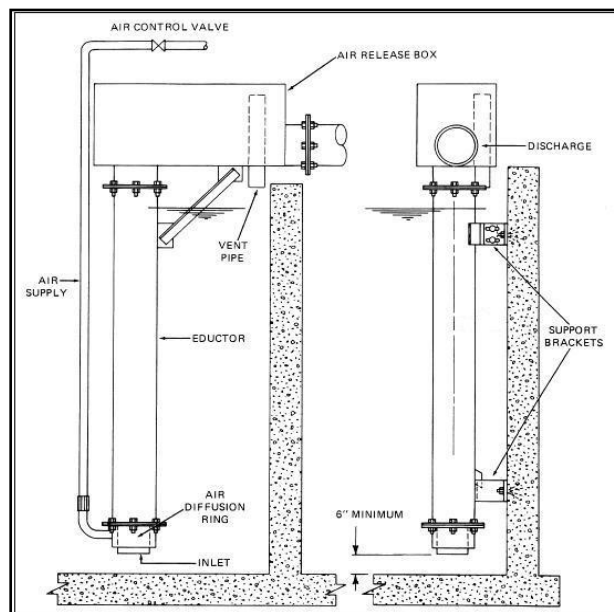
$$\pi_3 = \frac{H}{h}$$

برای بدست آوردن مقدار این پارامتر ها از کاتالوگ شرکت های صنعتی که در این زمینه فعالیت می کنند استفاده شد. نمونه ای از این کاتالوگ ها در زیر آورده شده است.

۳-۲- کاتالوگ های شرکت ها [۲۵]

شکل ها و جداول زیر قطر های مختلف لوله های ورودی، مکنده (تحویل دهنده)، هوای فشرده تغذیه کننده، لوله مکش و برخی از ابعاد وسایل به کار رفته در یک پمپ بالابر بادی را نشان می دهد و در پایان برای هر کدام از این قطر ها، دبی هوای فشرده لازم و دبی سیال خروجی را تحت غوطه وری های مختلف در منحنی هایی نمایش داده است. این شکل ها، جداول و منحنی ها از کاتالوگ های شرکت سانیتایر^۱ استخراج شده است. در شکل زیر یک پمپ بالابر بادی در دو نما دیده می شود. در شکل سمت چپ، لوله تغذیه هوا، لوله مکنده (تخلیه) و محفظه آزاد کننده هوا به خوبی دیده می شود. در شکل سمت راست نیز گیره های نگه دارنده لوله تخلیه قابل رویت می باشد. قطر لوله های هوا و مکش تحت قطر های مختلف لوله مکنده (تخلیه) در جدول زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ Sanitaire ITT Industries



شکل (۳-۶) یک نمونه پمپ بالابر بادی [۲۵]

جدول (۳-۱) برخی ابعاد و اندازه ها تحت قطرهای مختلف لوله مکند [۲۵]

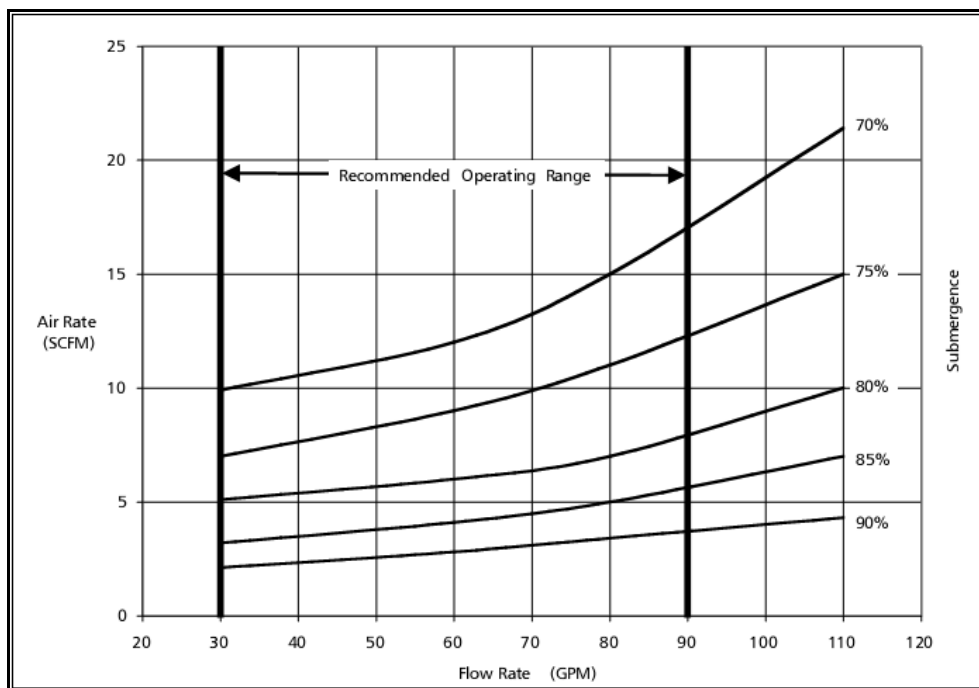
Eductor Diam.	Suction Diam.	Air Supply Diam.		D Minimum
		Submergence >75%	<75%	
4 in.	3 in.	3/4"	1"	1 ft.
5 in.	4 in.	1"	1 1/4"	1 ft.
6 in.	5 in.	1 1/4"	1 1/2"	1 ft.
8 in.	6 in.	1 1/2"	2"	1.5 ft.
10 in.	8 in.	2"	2 1/2"	1.5 ft.
12 in.	10 in.	2 1/2"	3"	1.5 ft.
16 in.	12 in.	2 1/2"	3"	2 ft.
22 in.	16 in.	3"	5"	2.5 ft.
26 in.	20 in.	5"	6"	2.5 ft.
32 in.	24 in.	6"	8"	3 ft.

در زیر منحنی های پمپ بالابر بادی در قطر های مختلف لوله های مکند و ورودی و تحت درصد غوطه

وری های مختلف مشاهده می شود. در این منحنی ها بنا به پیشنهاد شرکت سانتایر برای هرمنحنی یک

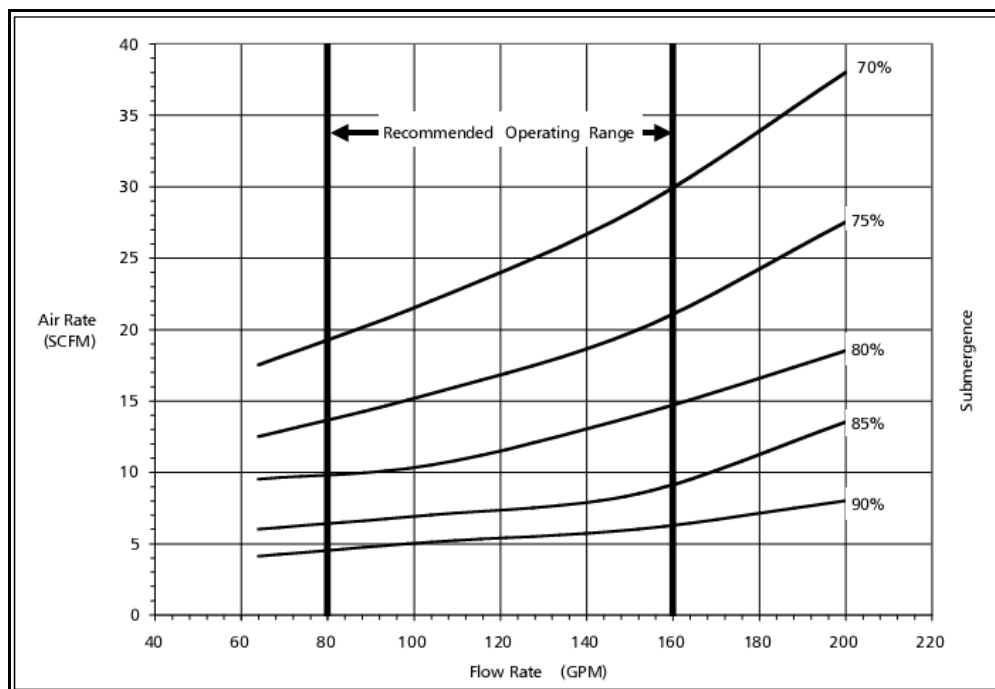
دامنه عملکرد مشخص شده است. که پمپ در این محدوده دارای بهترین کارکرد و بازده است.

لوله مکنده ۱۰.۱۶cm (۴in) و لوله ورودی ۷.۶۲cm (۳in)



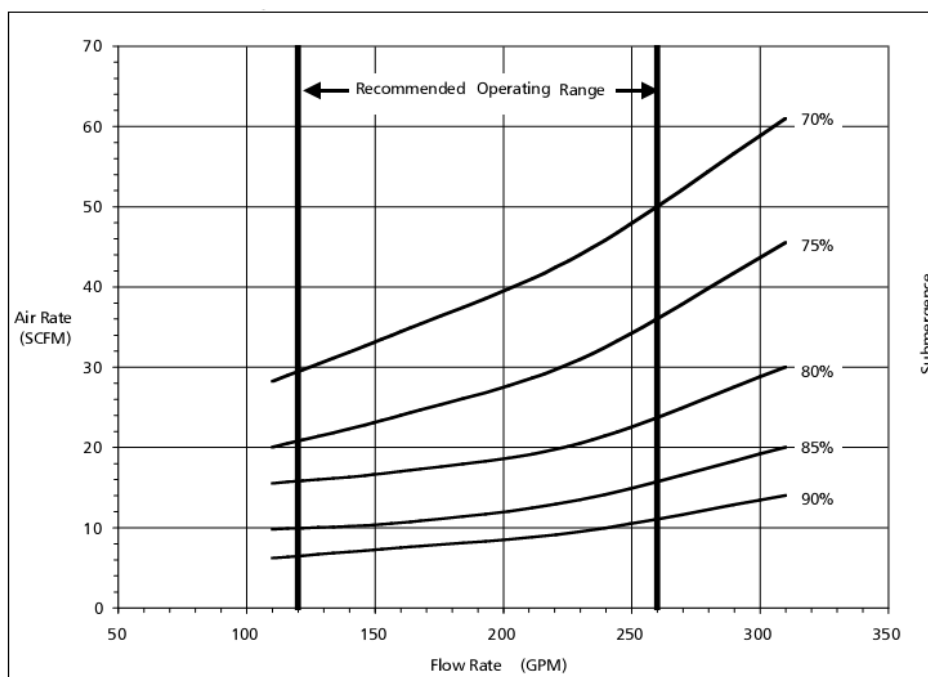
شکل (۷-۳). منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده ۱۰.۱۶cm (۴in) و لوله ورودی ۷.۶۲cm (۳in) [۵۱]

لوله مکنده ۱۲.۷cm (۵in) و لوله ورودی ۱۰.۱۶cm (۴in)



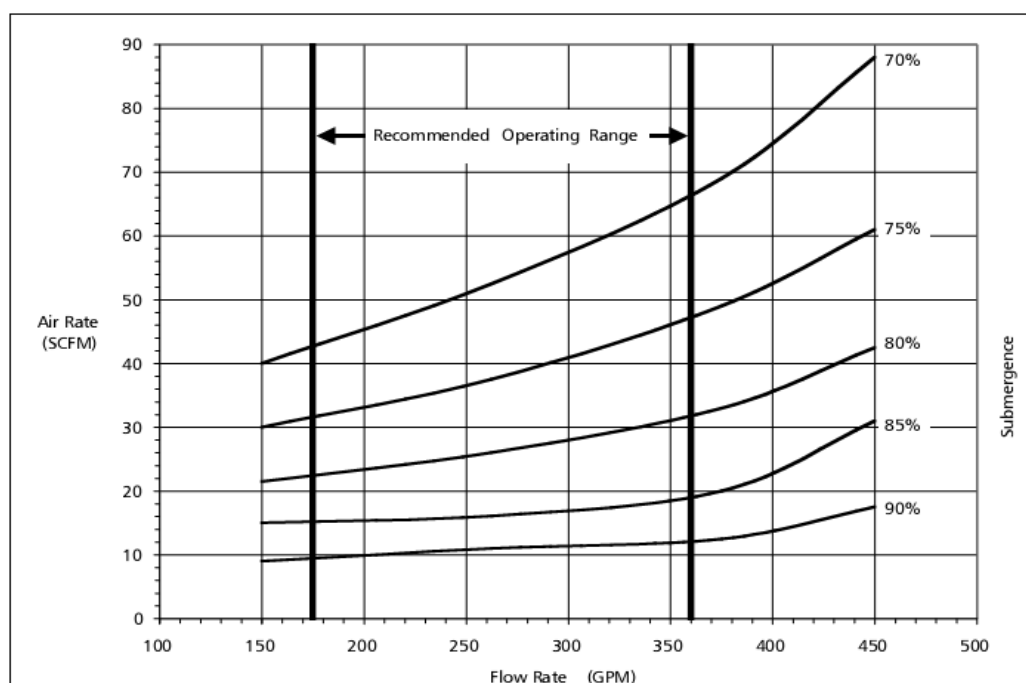
شکل (۸-۳). پمپ برای قطر لوله مکنده ۱۲.۷cm (۵in) و لوله ورودی ۱۰.۱۶cm (۴in) [۵۱]

لوله مکنده (۶in) ۱۵.۲۴cm و لوله ورودی (۵in) ۱۲.۷cm



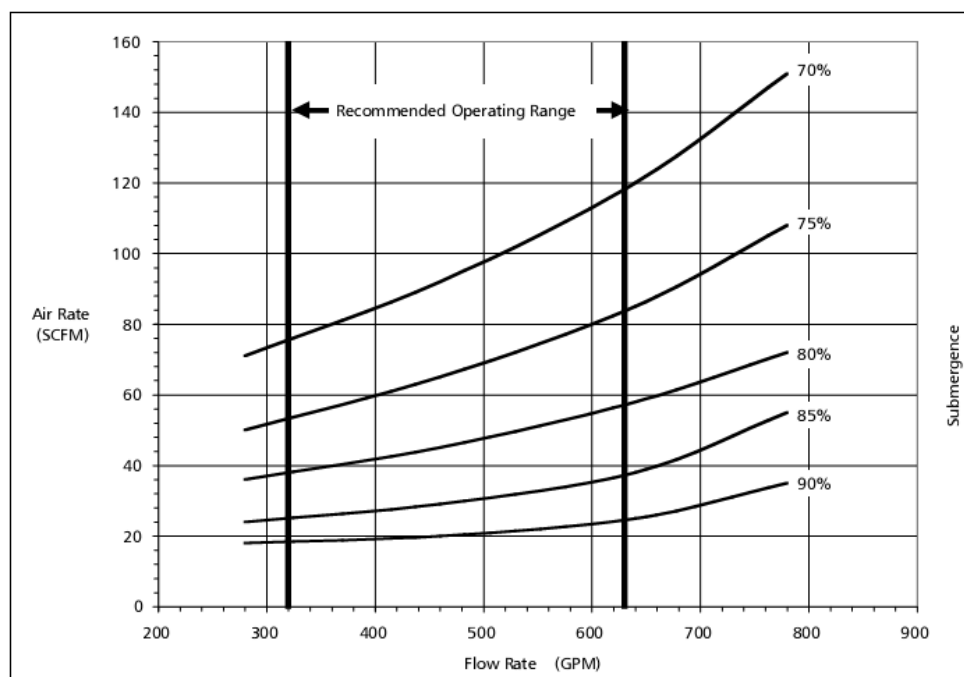
شکل (۳-۹) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده (۶in) ۱۵.۲۴cm و لوله ورودی (۵in) ۱۲.۷cm [۵۱]

لوله مکنده (۸in) ۲۰.۳۲cm و لوله ورودی (۶in) ۱۵.۲۴cm



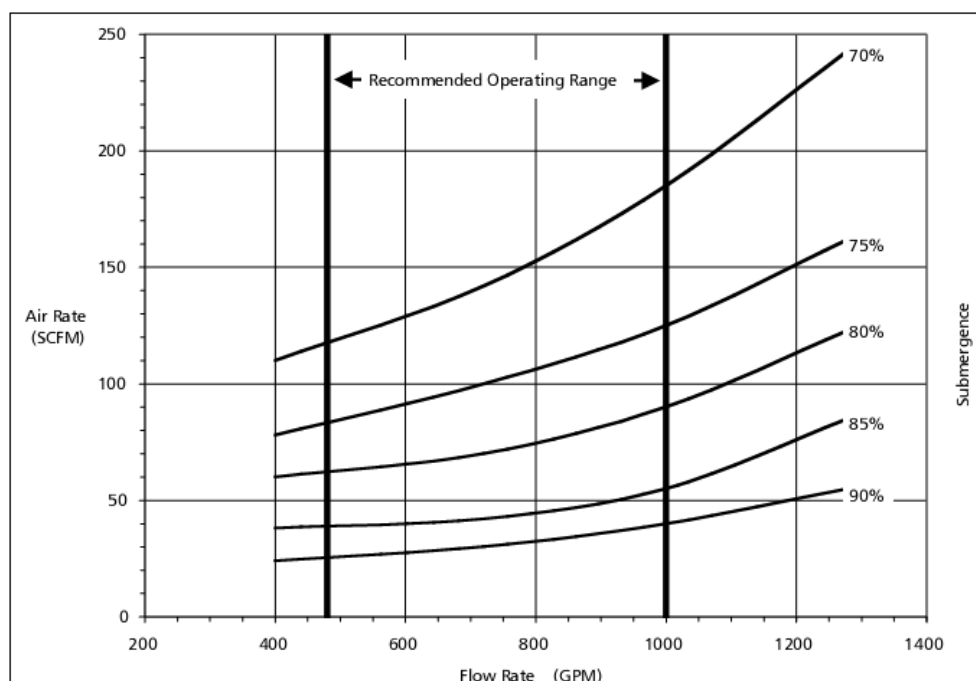
شکل (۳-۱۰) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده (۸in) ۲۰.۳۲cm و لوله ورودی (۶in) ۱۵.۲۴cm [۵۱]

لوله مکند ۲۵.۴۰ cm (۱۰ in) و لوله ورودی ۲۰.۳۲ cm (۸ in)



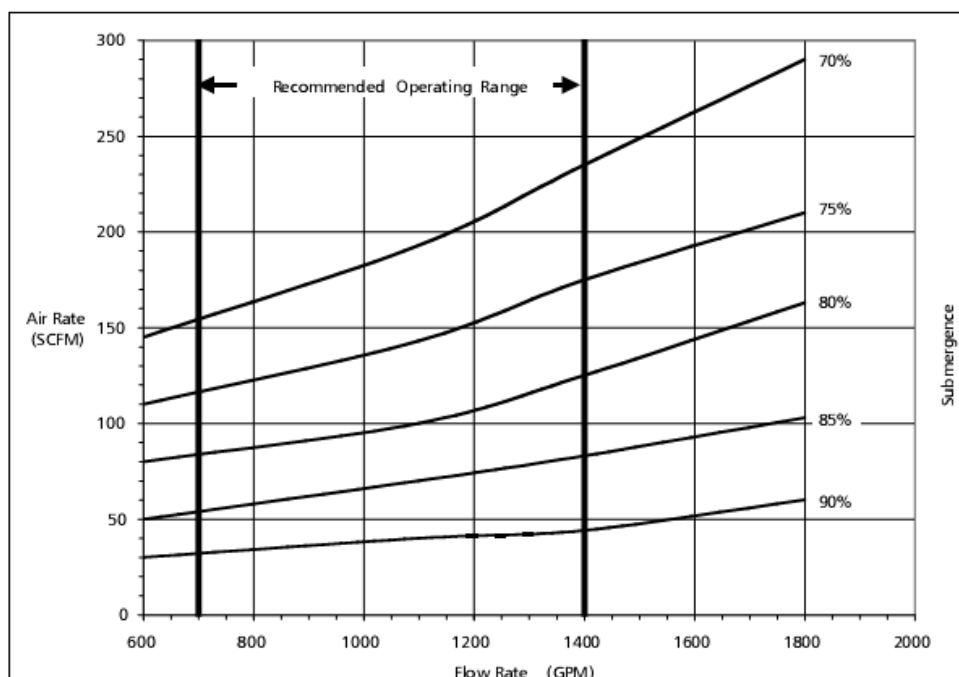
شکل (۳-۱۱) منحنی پمپ برای قطر لوله مکند ۲۵.۴۰ cm (۱۰ in) و لوله ورودی ۲۰.۳۲ cm (۸ in) [۵۱]

لوله مکند ۳۰.۴۸ cm (۱۲ in) و لوله ورودی ۲۵.۴۰ cm (۱۰ in)



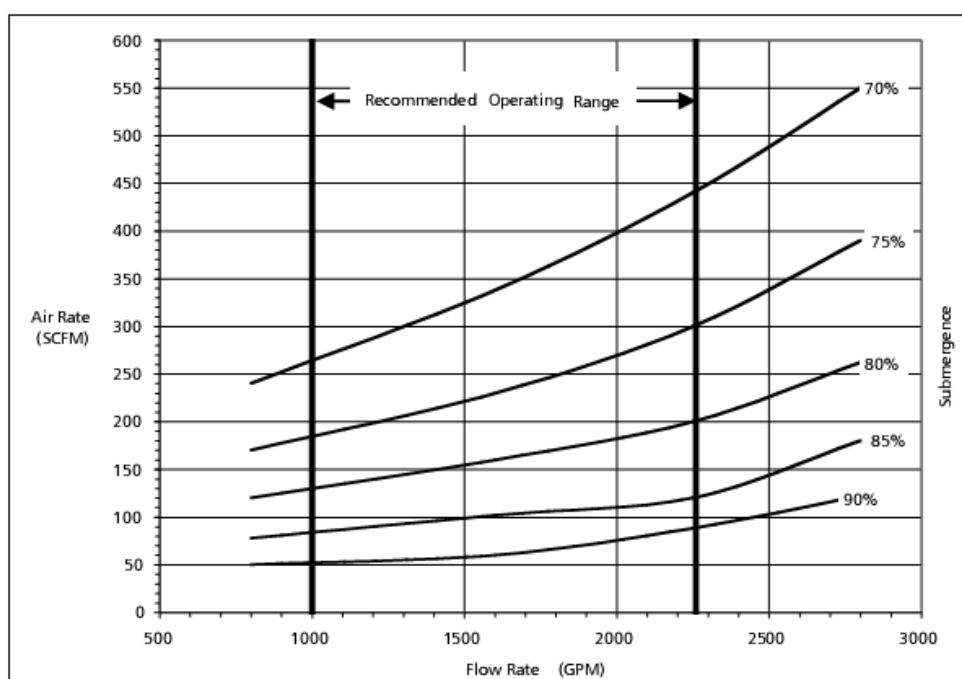
شکل (۳-۱۲) منحنی پمپ برای قطر لوله مکند ۳۰.۴۸ cm (۱۲ in) و لوله ورودی ۲۵.۴۰ cm (۱۰ in) [۵۱]

لوله مکنده (۱۶in) ۴۰.۶۴cm و لوله ورودی (۱۲in) ۳۰.۴۸cm



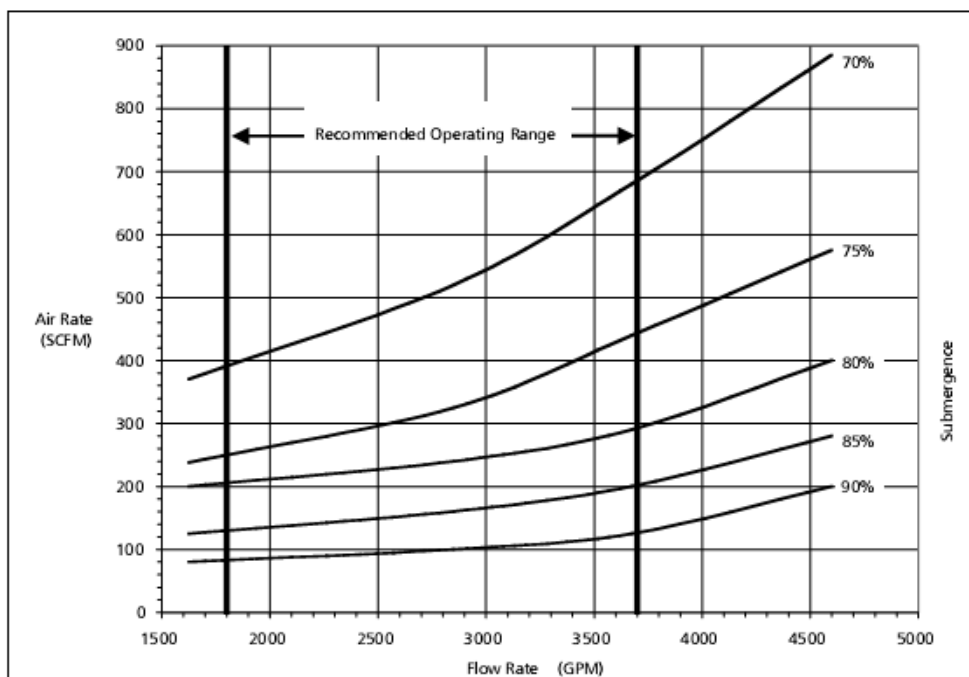
شکل (۳-۱۳) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده (۱۶in) ۴۰.۶۴cm و لوله ورودی (۱۲in) ۳۰.۴۸cm [۵۱]

لوله مکنده (۲۲in) ۵۵.۸۸cm و لوله ورودی (۱۶in) ۴۰.۶۴cm



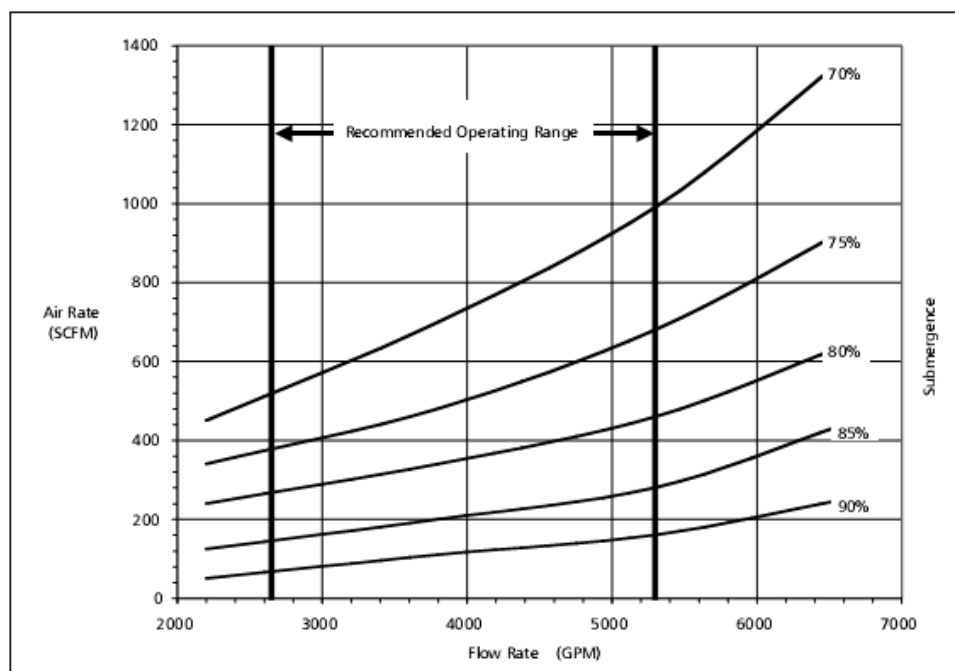
شکل (۳-۱۴) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده (۲۲in) ۵۵.۸۸cm و لوله ورودی (۱۶in) ۴۰.۶۴cm [۵۱]

لوله مکنده 66.04 cm (۲۶in) و لوله ورودی 50.80 cm (۲۰in)



شکل (۳-۱۵) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 66.04 cm (۲۶in) و لوله ورودی 50.80 cm (۲۰in) [۵۱]

لوله مکنده 81.28 cm (۳۲in) و لوله ورودی 60.96 cm (۲۴in)



شکل (۳-۱۶) منحنی پمپ برای قطر لوله مکنده 81.28 cm (۳۲in) و لوله ورودی 60.96 cm (۲۴in) [۵۱]

بازده و کارایی در عملیات استخراج با هوای فشرده در یک سیستم پمپ بالابر بادی، با درصد غوطه وری به طور نسبتاً زیاد نوسان می کند. به طور کلی غوطه وری ۶۰٪ و بیشتر از آن، خوشایند است. اگر یک چاه عمق زیادی داشته باشد درصد غوطه وری کمتری استفاده می شود. به هر حال اگر غوطه وری خیلی پایینی استفاده شود، هوای فشرده نمی تواند برای ما کاری انجام دهد. در جدول ۲-۳ درصد غوطه ورری های مطلوب برای عمق های مختلف چاه داده شده است. [۲۷]

جدول (۲-۳) دامنه درصد غوطه وری مطلوب برای چاه های با عمق مختلف [۲۷]

Total Depth (feet)	Submergence (percent)
Up to 50	66 to 70
50 to 100	55 to 66
100 to 200	50 to 55
200 to 300	43 to 50
300 to 400	40 to 43
400 to 500	33 to 40

در جدول ۳-۳ نیز برای طول های بالابری مختلف، حداقل، بهترین و حداکثر درصد غوطه وری، درصد بالابری، فشار هوای راه اندازی (Psi)، نسبت دبی آب تحویلی به هوای فشرده مورد استفاده و طول لوله هوای مورد نیاز مشخص شده است. [۲۷]

جدول (۳-۳) حداقل ، بهترین و حداکثر درصد غوطه وری، درصد بالابری، فشار هوای راه اندازی (Psi)، نسبت دبی آب تحویلی به هوای فشرده مورد استفاده و طول لوله هوای مورد نیاز برای طول های بالابری مختلف [۲۷]

Lift (feet)	Submergence (percent)	Lift (percent)	Rating	Submergence (feet)	Starting Air Pressure (psi)	Gallons of Water (per cubic foot of air)	Cubic Feet of Air (per gallon of water)	Total Length of Air Line (feet)
25	54	46	Minimum	29	13	4.55	0.22	54
	68	32	Best	53	23	8.34	0.12	78
	76	24	Maximum	79	34	14.30	0.07	104
50	51	49	Minimum	52	23	2.50	0.40	102
	65	35	Best	93	40	4.35	0.23	143
	72	28	Maximum	129	56	6.57	0.15	179
100	47	53	Minimum	89	38	1.43	0.70	189
	60	40	Best	150	65	2.70	0.37	250
	67	33	Maximum	203	88	3.70	0.27	303
150	43	57	Minimum	113	49	1.05	0.95	263
	55	45	Best	183	79	2.04	0.49	333
	62	38	Maximum	245	106	2.70	0.37	395
200	41	59	Minimum	139	60	0.85	1.18	339
	52	48	Best	216	94	1.54	0.65	416
	59	41	Maximum	288	125	1.89	0.53	488
250	39	61	Minimum	160	69	0.71	1.41	410
	49	51	Best	240	104	1.21	0.83	490
	56	44	Maximum	318	138	1.45	0.69	568
300	37	63	Minimum	176	76	0.60	1.67	476
	47	53	Best	266	115	0.96	1.04	566
	53	47	Maximum	339	147	1.18	0.85	639
350	36	64	Minimum	197	85	0.53	1.88	547
	46	55	Best	287	124	0.80	1.25	637
	50	50	Maximum	350	151	0.94	1.06	700
400	35	65	Minimum	215	93	0.48	2.07	615
	43	57	Best	302	130	0.69	1.45	702
	48	52	Maximum	369	160	0.79	1.26	769
450	34	66	Minimum	232	100	0.44	2.27	682
	42	58	Best	326	141	0.61	1.65	776
	47	53	Maximum	399	173	0.68	1.48	849
500	34	66	Minimum	258	112	0.41	2.46	758
	41	59	Best	348	150	0.54	1.85	848
	46	54	Maximum	426	184	0.60	1.66	926
550	34	66	Minimum	283	123	0.38	2.65	833
	40	60	Best	367	159	0.49	2.05	917
	45	55	Maximum	450	195	0.54	1.86	1,000
600	33	67	Minimum	296	128	0.36	2.81	896
	40	60	Best	400	173	0.45	2.25	1,000
	44	56	Maximum	471	204	0.49	2.06	1,071
650	33	67	Minimum	320	139	0.34	2.94	962
	39	61	Best	416	180	0.42	2.40	1,066
	43	57	Maximum	490	212	0.44	2.26	1,140
700	33	67	Minimum	345	149	0.33	3.00	1,045
	39	61	Best	448	194	0.39	2.55	1,148
	43	57	Maximum	528	228	0.42	2.40	1,228

اندازه طول لوله تخلیه را می توان از جدول ۳-۳ تقریب زد.

حال که کاتالوگ شرکت ها ارایه گردید برای بدست آوردن مقدار پارامترهای بی بعد، با توجه به اینکه منحنی های پمپ شکل های ۳-۷ تا ۳-۱۶ در محدوده های تقریباً خطی تغییر می کنند، بررسی شد که آیا نسبت دبی های ورودی به خروجی و بالعکس از مقدار ثابتی پیروی می کند یا نه. که اگر

چنین بود بتوان از این نسبت ها به پارامترهای بی بعدی رسید. برای بررسی این موضوع از شکل های ۷-۳ ، ۸-۳ ، ۱۲-۳ و ۱۶-۳ داده های زیر بدست آمدند و با متوسط گیری از آن ها، این پارامترهای بی بعد حاصل شدند. در هر درصد غوطه وری دو نقطه به تصادف انتخاب شد.

نکته: برای تبدیل SCFM به GPM ، آن را در عدد $7/48$ ضرب می کنیم.

داده های گرفته شده از شکل ۷-۳:

جدول (۴-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۰-۳

درصد غوطه وری	نقطه ۲		نقطه ۱	
	دبی سیال ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)	دبی سیال ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)
۷۰	۸۹/۷۶	۶۰	۱۱۲/۲	۸۰
۷۵	۷۴/۳۵	۷۰	۸۳/۰۲	۸۰
۸۰	۳۲/۳۸	۴۰	۴۴/۸۸	۶۰
۸۵	۲۷/۳۷	۵۰	۳۶/۶۵	۷۰
۹۰	۱۹/۸۹	۵۰	۲۳/۵۶	۷۰

داده های گرفته شده از شکل ۸-۳:

جدول (۵-۳) داده های گرفته شده از شکل ۱۱-۳

درصد غوطه وری	نقطه ۲		نقطه ۱	
	دبی سیال ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)	دبی سیال ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)
۷۰	۱۶۰/۸۲	۱۰۰	۱۸۷	۱۲۰
۷۵	۱۱۲/۲	۱۰۰	۱۴۸/۸۵	۱۴۰
۸۰	۹۳/۵۰	۱۲۰	۹۷/۲۴	۱۴۰
۸۵	۵۹/۰۹	۱۲۰	۵۹/۸۴	۱۴۰
۹۰	۳۷/۰۲	۱۰۰	۴۴/۸۸	۱۴۰

داده های گرفته شده از شکل ۳-۱۲:

جدول (۳-۶) داده های گرفته شده از شکل ۳-۱۵

درصد غوطه وری	نقطه ۲		نقطه ۱	
	دبی هوای ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)	دبی هوای ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)
۷۰	۱۱۲۲	۷۷۵	۱۲۱۱/۷۶	۸۰۰
۷۵	۷۴۸	۷۲۵	۸۳۷/۷۶	۸۰۰
۸۰	۵۱۲/۳۸	۶۰۰	۵۲۳/۶۰	۷۰۰
۸۵	۲۹۹/۲۰	۶۰۰	۳۸۵/۲۲	۸۰۰
۹۰	۲۲۴/۴۰	۶۰۰	۲۶۱/۸۰	۸۰۰

داده های گرفته شده از شکل ۳-۱۶:

جدول (۳-۷) داده های گرفته شده از شکل ۳-۱۹

درصد غوطه وری	نقطه ۲		نقطه ۱	
	دبی هوای ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)	دبی هوای ورودی (GPM)	دبی سیال خروجی (GPM)
۷۰	۵۷۹۷	۴۰۰۰	۶۸۸۱/۶۰	۵۰۰۰
۷۵	۳۰۲۹/۴۰	۳۰۰۰	۴۷۸۷/۲۰	۵۰۰
۸۰	۲۲۴۴	۳۰۰۰	۲۸۰۵	۴۰۰۰
۸۵	۱۱۹۶/۸۰	۳۰۰۰	۱۷۵۷/۸۰	۴۰۰۰
۹۰	۶۳۵/۸۰	۳۰۰۰	۱۲۳۴/۲۰	۵۰۰۰

جدول زیر پارامتر بی بعد نسبت دبی هوا به سیال خروجی و بالعکس می باشد [۵۱]

جدول (۸-۳) پارامترهای بی بعد مطرح در پمپ بالابر بادی [۵۱]

دبی هوا / دبی سیال خروجی	دبی سیال خروجی / دبی هوا	در صد غوطه وری
۰/۶۷۲	۱/۴۸	۷۰
۰/۹۸۶	۱/۰۱۳	۷۵
۱/۳۵۰	۰/۷۴۰	۸۰
۲/۲۲۳	۰/۴۴۹	۸۵
۳/۳۹۵	۰/۲۹۴	۹۰

از جدول ۸-۳ نیز می توان برای طراحی دبی هوای فشرده مورد نیاز و دبی سیال پمپاژ شده از یک پمپ بالابر بادی در غوطه وری های ۷۰ تا ۹۰ درصد با تقریب نسبتا خوبی استفاده کرد. از طرفی برای بدست آوردن پارامترهایی بی بعد برای طراحی قطر لوله های موجود در یک پمپ بالابر بادی به طور مشابه از داده های جدول ۱-۳ استفاده شد. در جداول زیر نسبت بین قطر لوله های تخلیه یا تحویل دهنده^۱، مکش^۲ و هوای فشرده مورد نیاز^۳ به صورت ضرایبی بی بعد ارائه شده است.

جدول (۹-۳) نسبت های بین قطر لوله های تخلیه و هوا [۵۱]

قطر لوله تخلیه / قطر لوله هوا		قطر لوله هوا / قطر لوله تخلیه	
<۷۵٪	>۷۵٪	<۷۵٪	>۷۵٪
۰/۲۵	۰/۱۹۶	۴	۵/۰۹۸

^۱ Discharge Pipe Delivery or Eductor or

^۲ Suction Pipe

^۳ Air Supply Pipe

برای طراحی یک پمپ بالابر بادی در ابعاد صنعتی باید قطر لوله مکش از قطر لوله تخلیه کوچک تر باشد. شاید دلیل این کار این باشد که چون سیال برای عبور خود مسیر کم مقاومت تر را انتخاب می کند، قطر لوله مکش کمتر از قطر لوله تخلیه گرفته می شود تا سیال به داخل چاه برگردد.

برای طراحی یک پمپ بالابر بادی در ابعاد آزمایشگاهی، اندازه قطر لوله های مکش و تخلیه با هم برابر است. پس نیازی به پارامتر های دو جدول ۳-۱۴ و ۳-۱۵ برای طراحی یک پمپ بالابر بادی در ابعاد آزمایشگاهی نیست.

جدول (۳-۱۰) نسبت بین قطر لوله های تخلیه و مکش [۵۱]

قطر لوله مکش / قطر لوله تخلیه	قطر لوله مکش / قطر لوله تخلیه
۰/۷۷۵	۱/۲۸۹

جدول (۳-۱۱) نسبت های بین قطر لوله های مکش و هوا [۵۱]

قطر لوله مکش / قطر لوله هوا		قطر لوله مکش / قطر لوله هوا	
<۷۵٪	>۷۵٪	<۷۵٪	>۷۵٪
۰/۳۱۵	۰/۲۵	۳/۱۷	۴

همانطور که از جداول ۳-۱۳ ، ۳-۱۴ و ۳-۱۵ مشخص است با داشتن یکی از قطر های لوله های مکش، تخلیه و هوای مورد نیاز می توان قطر دو لوله دیگر را نیز به دست آورد.

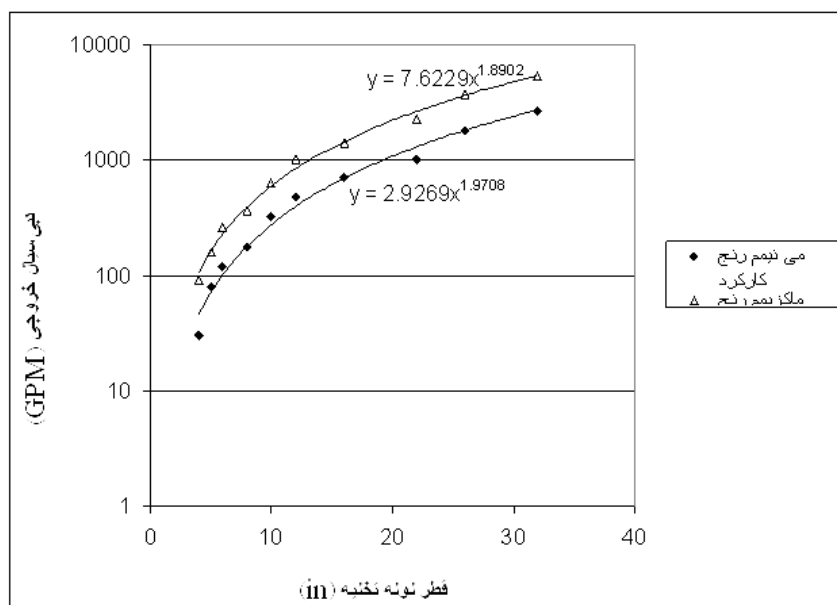
در منحنی های ۳-۷ تا ۳-۱۶ برای هر منحنی یک محدوده کارکرد پیشنهاد شده است. حداقل و حداکثر این محدوده کارکرد در قطر های مختلف لوله تخلیه در جدول ۳-۱۶ نشان داده شده است.

جدول (۳-۱۲) حداقل و حداکثر محدوده کارکرد پمپ بالابر بادی در قطر های مختلف لوله تخلیه [۵۱]

قطر لوله تخلیه (in)	Min (GPM)	Max (GPM)
۴	۳۰	۹۰
۵	۸۰	۱۶۰
۶	۱۲۰	۲۶۰
۸	۱۷۵	۳۶۰
۱۰	۳۲۰	۶۳۰
۱۲	۴۸۰	۱۰۰۰
۱۶	۷۰۰	۱۴۰۰
۲۲	۱۰۰۰	۲۲۶۰
۲۶	۱۸۰۰	۳۷۰۰
۳۲	۲۶۵۰	۵۳۰۰

حال می توان برای قطر های مختلف لوله تخلیه با درون یابی و یا برون یابی از جدول ۳-۱۲ محدوده کارکرد پمپ را با تقریب نسبتا خوبی بدست آورد و بالعکس.

در نمودار شکل ۳-۲۰ این محدوده بر حسب قطر لوله تخلیه رسم شده است.



شکل (۳-۱۷) حداقل و حداکثر محدوده کارکرد پیشنهاد شده برای دبی سیال خروجی (GPM) در پمپ بالابر بادی بر حسب قطر لوله تخلیه (in) [۵۱]

حال که پارامترهای بی بعد طراحی بدست آمد می توان بر اساس آن ها طراحی را انجام داد.

❖ روش طراحی و محدودیت های طراحی:

۱- قطر لوله تخلیه: برای بدست آوردن قطر لوله تخلیه از نمودار شکل ۳-۱۷ استفاده می شود. برای استفاده از این نمودار نیاز به یک محدوده برای دبی تخلیه می باشد. این محدوده ۲۰-۳۲ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته می شود (چون در ابتدای این فصل دبی تخلیه ۲۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد). با توجه به محدوده در نظر گرفته شده برای دبی سیال خروجی (۲۰-۳۲ لیتر بر دقیقه) و استفاده از نمودار شکل ۳-۱۷، قطر لوله تخلیه محاسبه می شود. عملیات محاسبه قطر لوله تخلیه به صورت زیر می باشد:

$$Min.FlowRate = 20LPM = 5.28GPM$$

$$y = 2.9269x^{1.9708}$$

$$y = 5.28GPM$$

$$\Rightarrow x = 1.35in = 34.29mm$$

$$Max.FlowRate = 32LPM = 8.45GPM$$

$$y = 7.6229x^{1.8902}$$

$$y = 8.45GPM$$

$$\Rightarrow x = 1.05in = 26.67mm$$

$$Avrage.Diameter = 30.48mm$$

با توجه به محدودیت های موجود در بازار و قطر بدست آمده برای لوله تخلیه (۳۰/۴۸ میلی متر)، قطر ۳۰ میلی متر برای لوله تخلیه انتخاب می شود.

۲- قطر لوله هوا: اکنون با استفاده از قطر بدست آمده برای لوله تخلیه، جدول ۳-۷ و قطر لوله های

هوای موجود در بازار (جدول ۳-۱۳) می توان قطر لوله هوا را نیز بدست آورد.

جدول (۳-۱۳) لوله های هوای موجود در بازار [۵۱]

ردیف	قطر (میلی متر)	جنس
۱	۵	لوله شفاف پلاستیکی
۲	۸	لوله شفاف پلاستیکی
۳	۱۰	شلنگ شفاف
۴	۱۲	شلنگ شفاف
۵	۱۵	شلنگ شفاف
۶	۲۰	شلنگ شفاف

نسبت قطر لوله هوا به قطر لوله تخلیه در غوطه وری های بالای ۷۵ درصد (جدول ۳-۱۳) برابر است با:

$$۰/۱۹۶، \text{ پس قطر لوله هوا برابر است با: } ۶/۲۷ \text{ میلی متر.}$$

حال با توجه به جدول ۳-۱۳ و عدد ۶/۲۷، قطر لوله هوا برابر می شود با: ۸ میلی متر

۳- دبی هوای مورد نیاز: با توجه به دبی تخلیه سیال از لوله خروجی (۲۶ لیتر بر دقیقه) و جدول

۳-۱۲ می توان دبی هوای فشرده مورد نیاز برای پمپ را نیز مشخص کرد.

در جدول ۳-۱۲، نسبت دبی هوا بر دبی سیال خروجی برای غوطه وری ۹۰٪ برابر است با: ۰/۲۹۴

پس دبی هوای مورد نیاز برای پمپ برابر می شود با: ۷/۶۴ لیتر بر دقیقه

۴- انتخاب پمپ هوا: برای ساخت یک پمپ بالابر در ابعاد آزمایشگاهی با توجه به اینکه نیاز به

هوای فشرده زیادی نیست بهتر است از پمپ هوا به جای کمپرسور استفاده کرد.

نمونه ای از پمپ های هوای موجود در بازار در جدول ۳-۱۴ آمده است.

جدول (۳-۱۴) لیست نمونه ای از پمپ های هوای موجود در بازار [۵۱]

مدل	تعداد دهانه خروجی هوا	دبی در خروجی هر دهانه (LPM)
AC-۹۹۰۱	۱	۱/۸
AC-۹۹۰۲	۲	۴
AC-۹۹۰۳	۳	۴/۵
AC-۹۹۰۴	۴	۹
AC-۹۹۰۶	۶	۱۴
AC-۹۹۰۸	۸	۲۰

با توجه به دبی هوای فشرده مورد نیاز (۷/۶۴ لیتر بر دقیقه) و جدول ۳-۱۴ ، پمپ هوای مدل AC-۹۹۰۴ برای پمپ بالابر بادی انتخاب می شود.

❖ قطعات انتخاب شده

با توجه به روش های طراحی و محدودیت هایی که برای خرید قطعات وجود داشت، قطعات زیر از بازار تهیه شد و سرهم بندی (مونتاژ) اولیه بر روی آن ها صورت گرفت. در شکل های زیر این قطعات مشاهده می شوند.

پمپ هوا مدل AC-۹۹۰۸



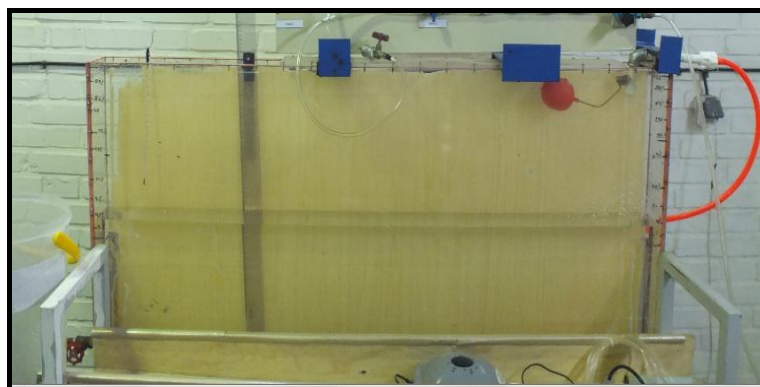
شکل (۳-۱۸) پمپ هوا مدل AC-۹۹۰۸



شکل (۳-۱۹) کمپرسور هوا



شکل (۳-۲۰) لوله تخلیه و لوله هوا



شکل (۳-۲۱) مخزن پلکسی ۱۶۰ لیتری



شکل (۳-۲۲) فلومتر هوا



شکل (۳-۲۳) مجموعه فشار سنج و رگولاتور



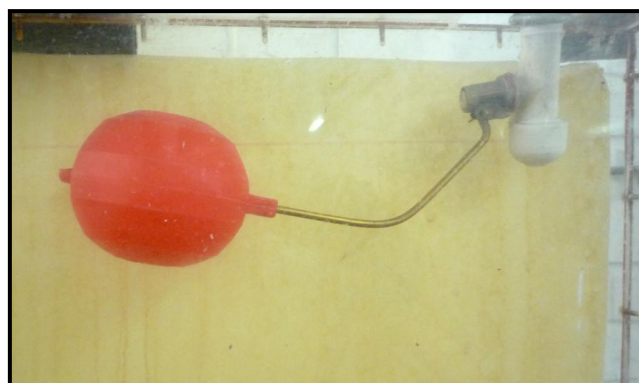
شکل (۳-۲۴) رگولاتور



شکل (۳-۲۵) پمپ آب برگشت



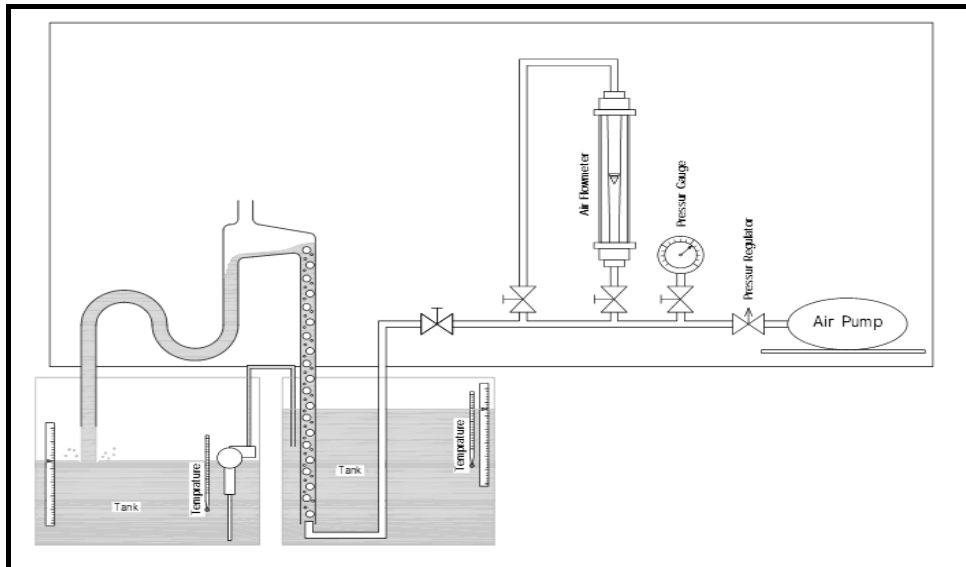
شکل (۳-۲۶) مخزن اندازه گیری دبی آب خروجی



شکل (۳-۲۷) شناور جهت کنترل سطح آب

❖ طرح شماتیک

قبل از مونتاژ نهایی قطعات لازم بود که یک طرح شماتیک از کار طراحی شود تا مونتاژ نهایی به درستی انجام پذیرد. طرح زیر برای این منظور طراحی شده است.



شکل (۳-۲۸) طرح شماتیک

❖ ساخت

بعد از رسم شماتیک کار، می توان با توجه به آن، مونتاژ نهایی را انجام داد.



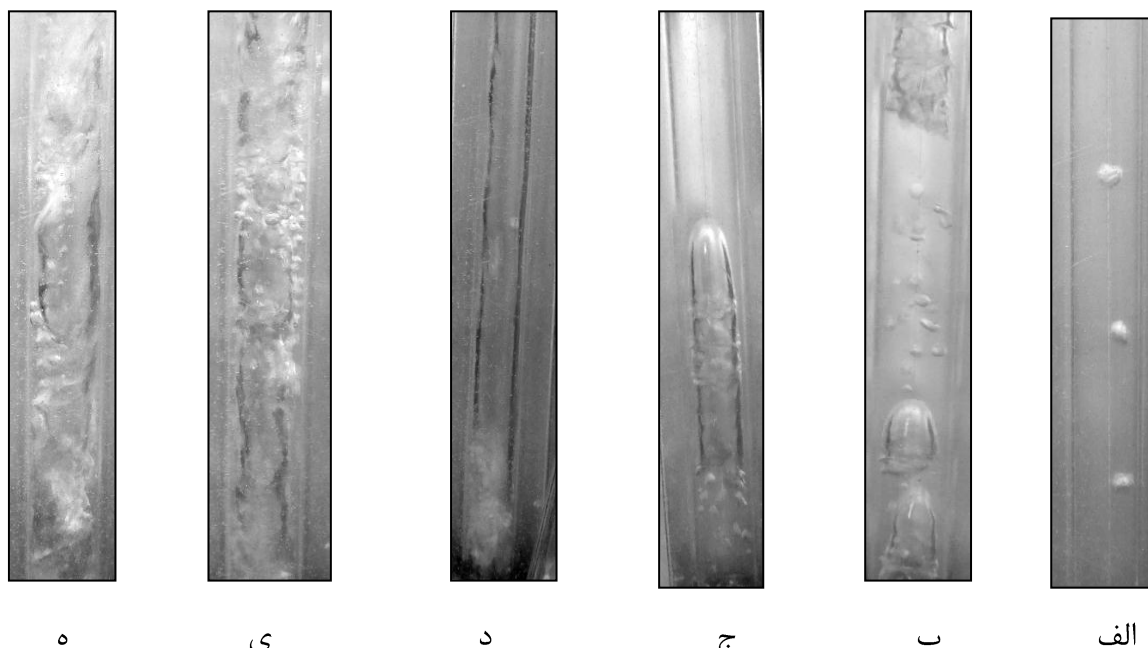
شکل (۳-۲۹) مونتاژ نهایی پمپ بالابر بادی

دستگاه آزمایش مورد استفاده در شکل (۳-۲۹)، شامل یک لوله تخلیه عمودی از جنس پلکسی به طول ۴۸ میلی متر و قطر ۳۰ میلی متر میباشد که درون یک مخزن پلکسی به ابعاد ۱۵۰*۷۰*۱۲ سانتی متر بصورت عمودی غوطه ور می باشد. جهت تغییر شناوری لوله تخلیه از یک پایه آلومینیومی استفاده می شود که توسط گیره هایی که به آن متصل می باشد، می توان لوله تخلیه را در عمقهای مختلف از آب درون مخزن ثابت نگه داشت و به شناوری مورد نظر دست پیدا کرد. جهت تامین هوای مورد نظر از پمپ هوا (مدل ۹۹۰۸ AC) برای دبی های کمتر استفاده می شود. جهت دستیابی به دبی های بالاتر، از یک کمپرسور هوا به قدرت ۵۵ کیلووات که شامل مخزنی به ظرفیت ۳ مترمکعب می باشد که در هر دقیقه ۸.۲ مترمکعب هوای تازه را تا فشار حداکثر ۷ بارتحویل می دهد، استفاده می شود. جریان هوای کمپرسور از داخل لوله هوا به قطر ۸ میلی متر از یک شیر دروازه ای عبور کرده وارد رگولاتور (ولو کاهش فشار) می شود. تا فشار را به اندازه مطلوب کاهش داده و فشار را در محدوده مورد نیاز آزمایش (حداکثر یک بار) ثابت نگه دارد. هوا در فشار ثابتی که توسط فشار سنج اندازه گیری می شود، به درون لوله تخلیه تزریق می شود. از یک دماسنج جیوه ای جهت اندازه گیری دمای آب استفاده می شود. جریان حجمی هوا توسط روماتر هوا که کالیبره می باشد، اندازه گیری می شود. جهت بررسی میزان تاثیر کاهش قطر لوله تزریق هوا در افزایش کارایی پمپ از یک لوله هوا به قطر ۵ میلیمتر نیز استفاده می شود. همچنین به منظور بررسی تاثیر افزایش تعداد ورودی هوا بر دبی خروجی آب، سه مکان مختلف بر روی لوله تخلیه تعبیه گشته که لوله هوا به هر سه مکان وارد می گردد و توسط شیرهایی که در ورودی هر سه مکان تعبیه گشته، می توان ورود هوا را کنترل و یا مانع عبور هوا شد. نرخ های مختلف شناوری از ۳۰ درصد تا ۹۰ درصد، در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفتند. برای هر نرخ شناوری، نرخ جریان هوا تغییر داده شد و نرخ جریان آب خروجی متناظر با آن اندازه گیری شد. به منظور دستیابی به اندازه های خاص و مورد نظر برای هر تست یک رویه خاص بکار برده شد. بعد از مونتاژ پمپ، باید پارامترهای پمپ اندازه گیری و با مقادیر طراحی مقایسه شود.

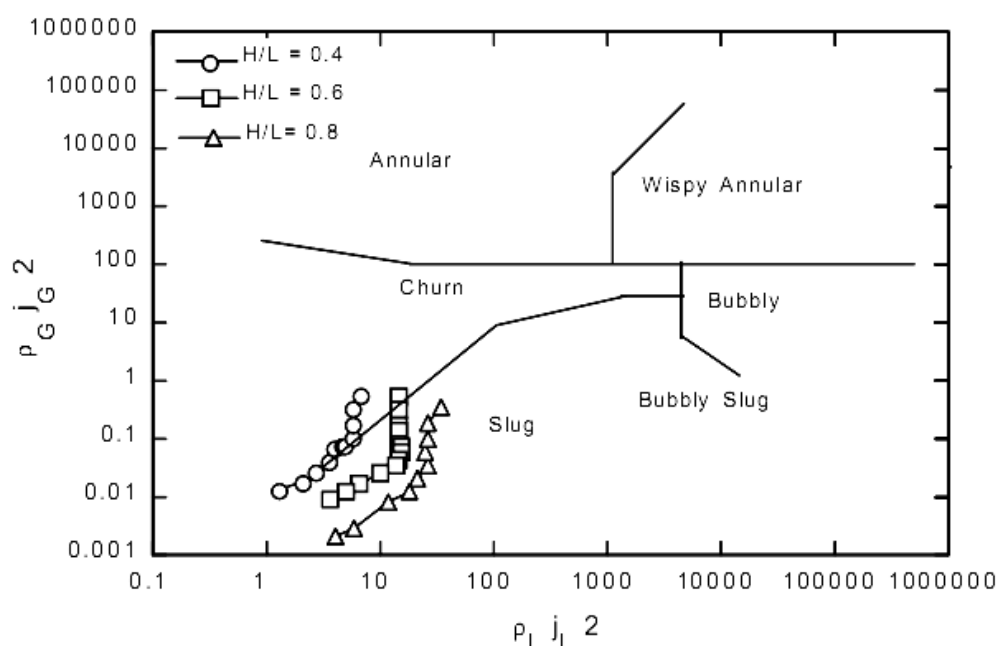
۳-۶- نتایج آزمایشگاهی:

۳-۶-۱- بررسی رژیم های جریان مشاهده شده:

اولین مرحله جهت بررسی نتایج آزمایشگاهی، تشخیص الگوی جریان است که به دو صورت، مشاهده چشمی و دیگری توسط نقشه الگو جریان مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳-۳۰)، نشان دهنده رژیم های جریان مشاهده شده در حین آزمایش است که بصورت چشمی مشاهده شده است. شکل (۳-۳۱) توزیع داده های آزمایشگاهی را با نقشه الگوهای جریان پیشنهاد شده توسط تایتل (۱۹۸۰) نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود، ناحیه اشغال شده توسط نقاط آزمایشگاهی سازگاری خوبی با مشاهدات دارند. بعضی از اندازه های آزمایشگاهی از محدوده بازده بالا، در نرخهای شناوری مختلف بر روی نقشه الگوهای جریان نشان داده شده در شکل ۳-۳۱، ترسیم شده اند. که ممکن است توضیح دهد که چرا مطالعات تحلیلی مبنی بر الگوهای جریان اسلاگ یا اسلاگ - چارن می باشد.



شکل (۳-۳۰) عکسها بترتیب نشان دهنده الگو جریانهای مشاهده شده هستند: الف) حبابی، ب) حبابی به اسلاگ، ج) اسلاگ، د) اسلاگ به چارن ی) چارن ه) آنیولار

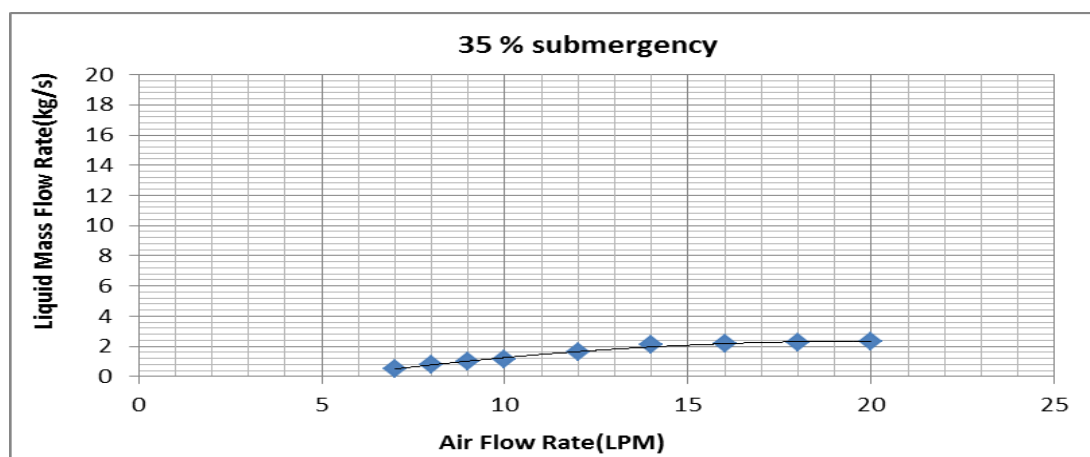


شکل (۳-۳۱) الگوی رژیم جریان پیشنهاد شده توسط تایتل (۱۹۸۰)

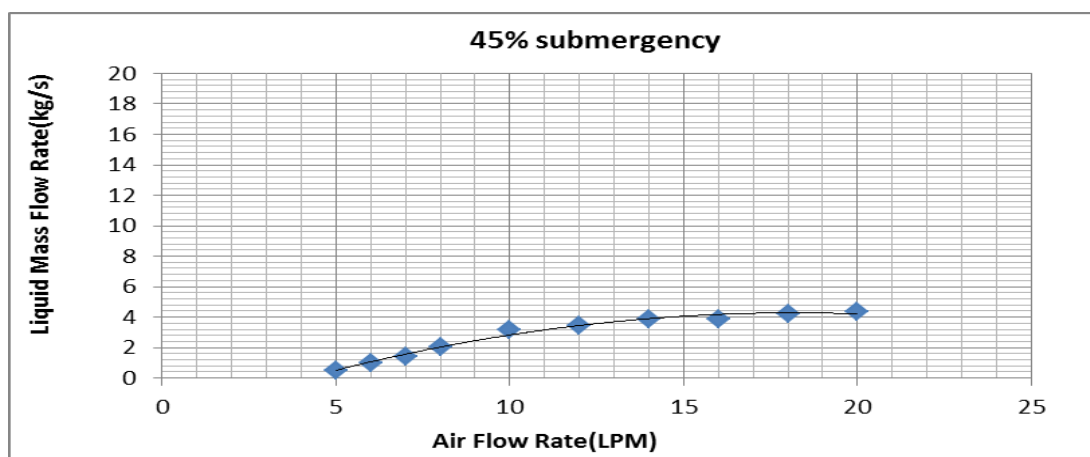
چندین رژیم جریان در آزمایشهای مطالعه حاضر مشاهده شد. در نرخ جریان هوای خیلی کم، جریان حبابی مشاهده شد، اما این جریان اصلاً نمی‌توانست مایع را به سمت بالا پمپ کند. با افزایش کمی در نرخ جریان هوا، حباب‌های تیلور (حباب‌هایی به شکل گلوله که تقریباً کل قطر لوله را اشغال می‌کردند) شروع به شکل‌گیری کردند و مایع را به سمت بالا و بالاتر هدایت کردند تا اینکه مایع به خارج لوله تخلیه پمپ شد، که این رژیم، جریان اسلاگ بود. با این وجود می‌توانست اسلاگ / چارن نیز باشد، زیرا به شدت تناوبی بود. با افزایش خیلی بیشتر در نرخ جریان هوا، جریان به چارن تحول پیدا کرد. در نهایت در نرخ جریان هوای بالاتر، جریان ویسپی آنیولار، مشاهده شد، اما این الگوی جریان ناپایدار بود. زیرا با هر اختلال کوچک در نرخ جریان هوا تمایل به تحول به سمت جریان چارن داشت. آنچه که از این آزمایشها نتیجه شد، این است که پمپ بالابر بادی در رژیم اسلاگ کارایی بالاتری دارد. به همین خاطر رژیم جریان اسلاگ جهت مدل کردن پمپ بالابر بادی در بخش مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود. با این وجود ناحیه عملکرد بهینه نزدیک به تحول از اسلاگ به چارن است.

۳-۶-۲- بررسی نرخ جریان آب خروجی

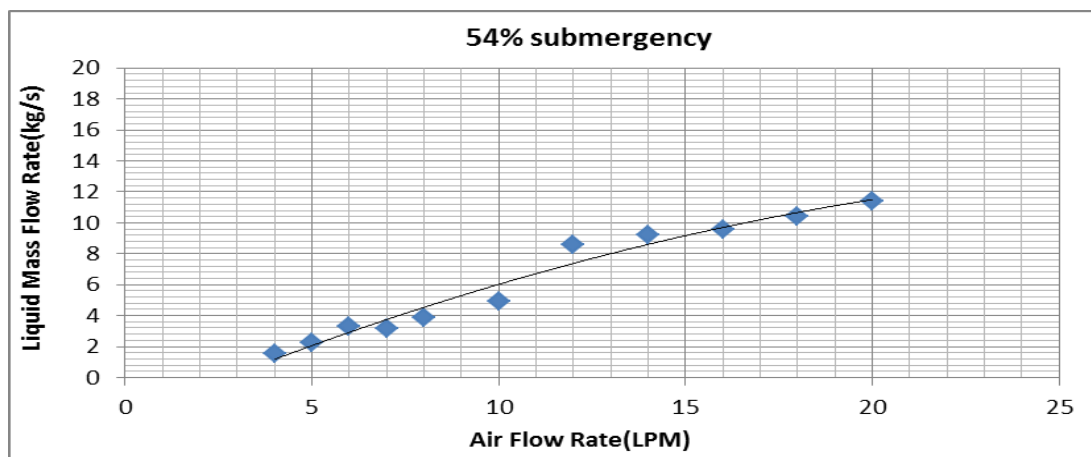
نمودارهای زیر نشان دهنده نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جرمی جریان آب در شناوری های مختلف هستند که برای لوله هوا به قطر ۵ میلی متر اندازه گیری شده اند.



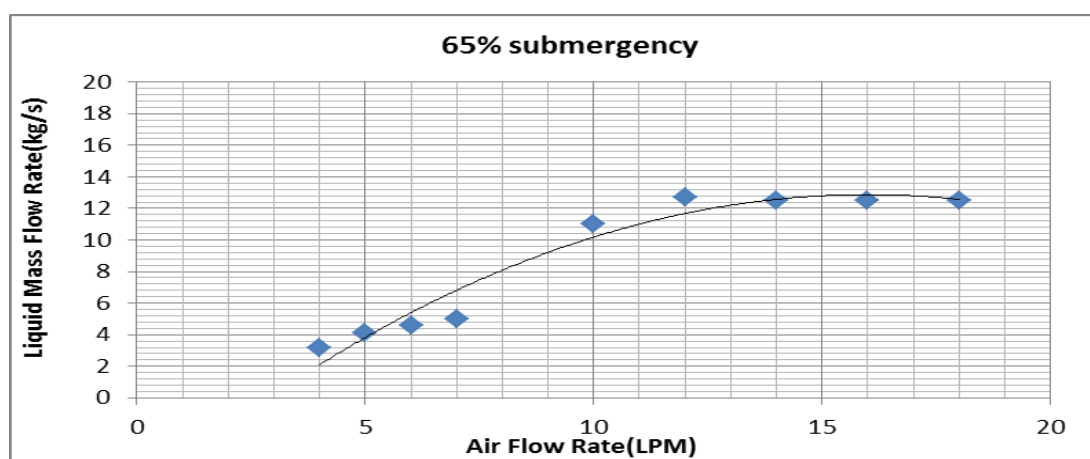
شکل (۳-۳۲) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۳۵٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی متر)



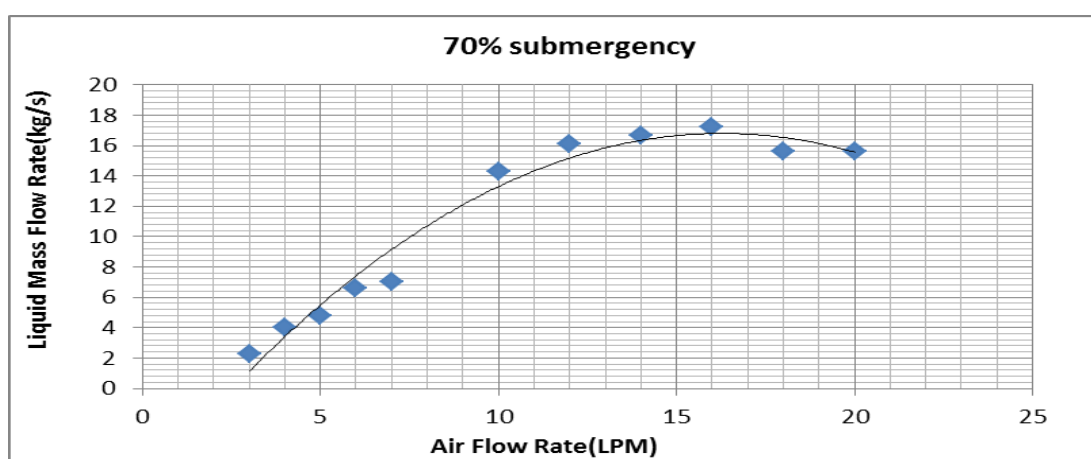
شکل (۳-۳۳) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۴۵٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی متر)



شکل (۳-۳۴) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۴٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی متر)

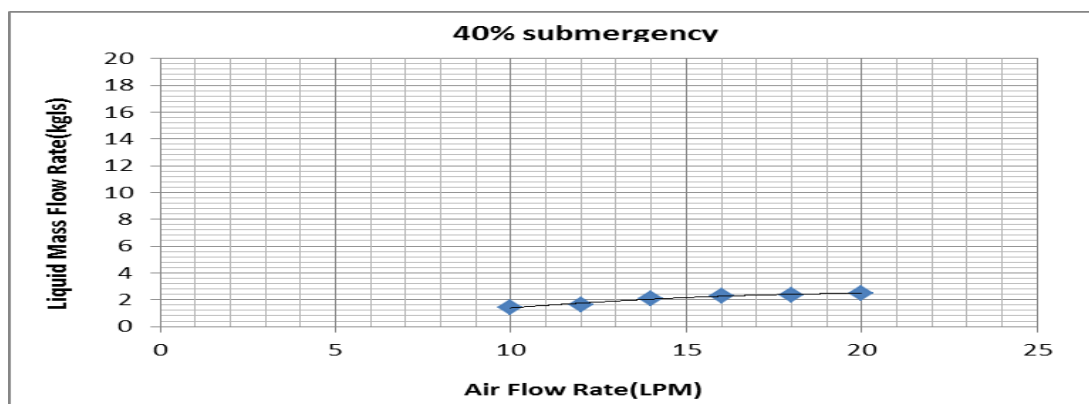


شکل (۳-۳۵) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۶۵٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی متر)

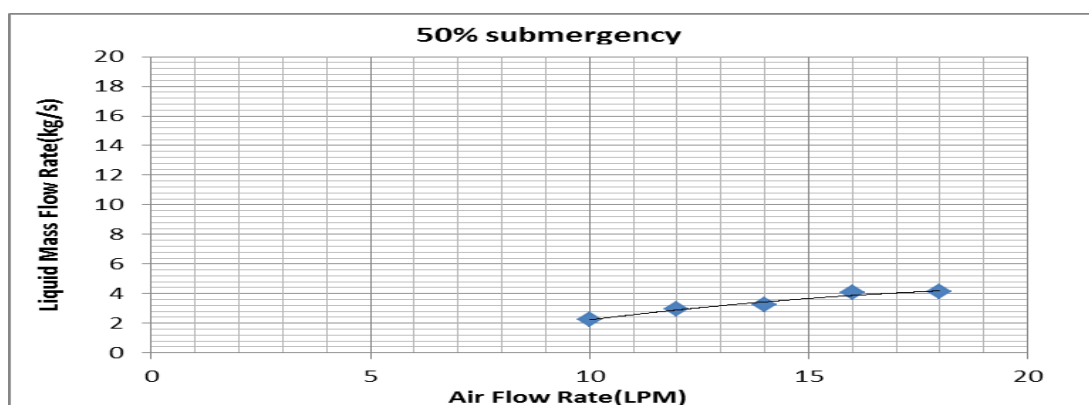


شکل (۳-۳۶) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۷۰٪ (قطر لوله هوا ۵ میلی متر)

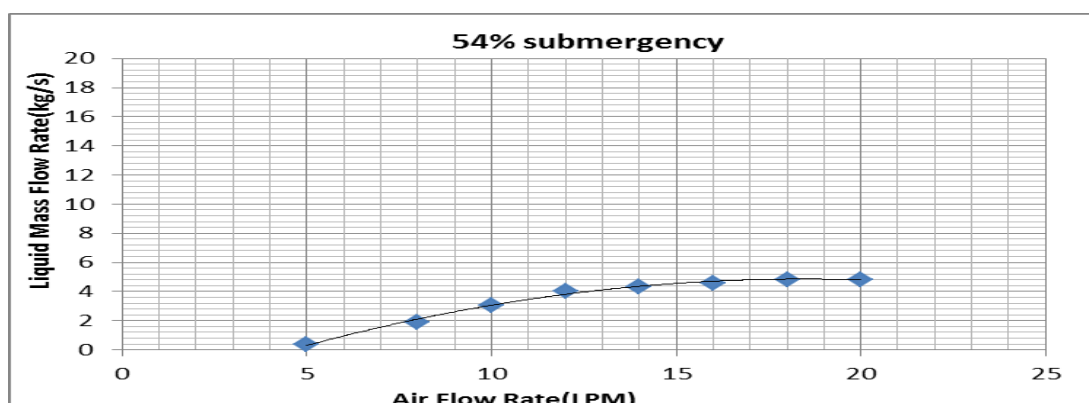
نمودارهای زیر نشان دهنده نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جرمی جریان آب در شناوری های مختلف هستند که برای لوله هوا به قطر ۸ میلیمتر اندازه گیری شده اند.



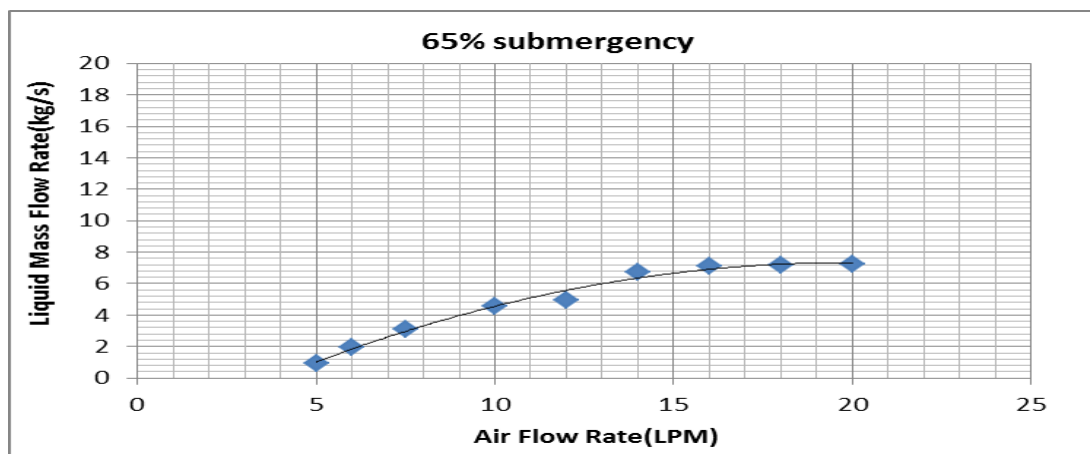
شکل (۳-۳۷) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۴۰٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)



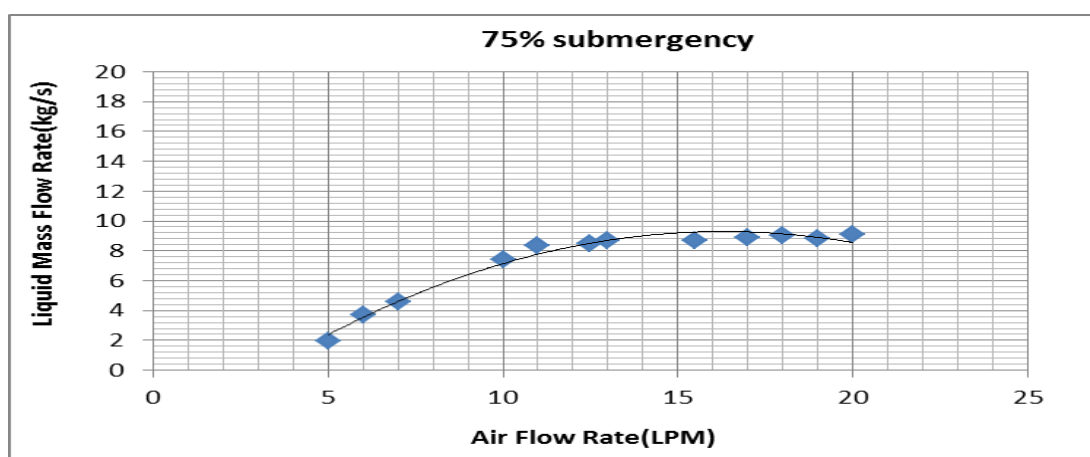
شکل (۳-۳۸) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۰٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)



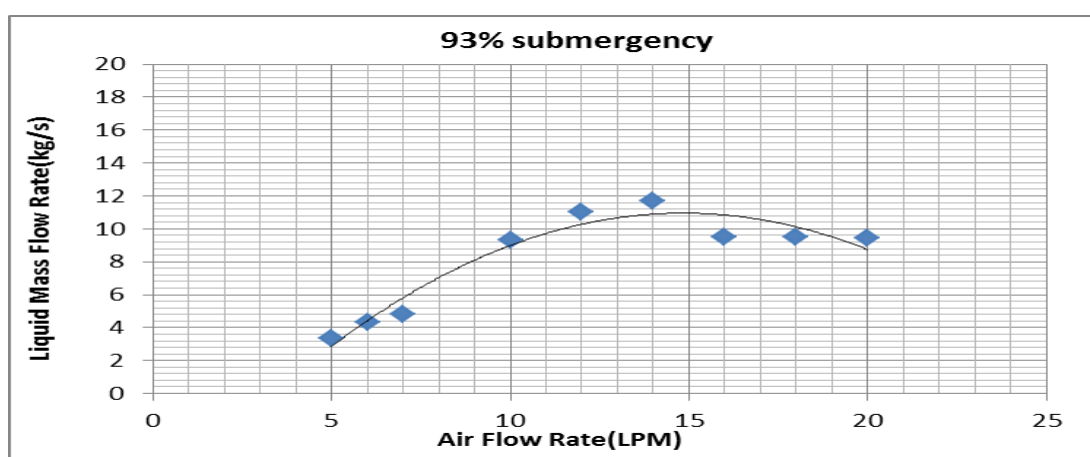
شکل (۳-۳۹) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۵۴٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)



شکل (۳-۴۰) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۶۵٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)



شکل (۳-۴۱) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۷۵٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)

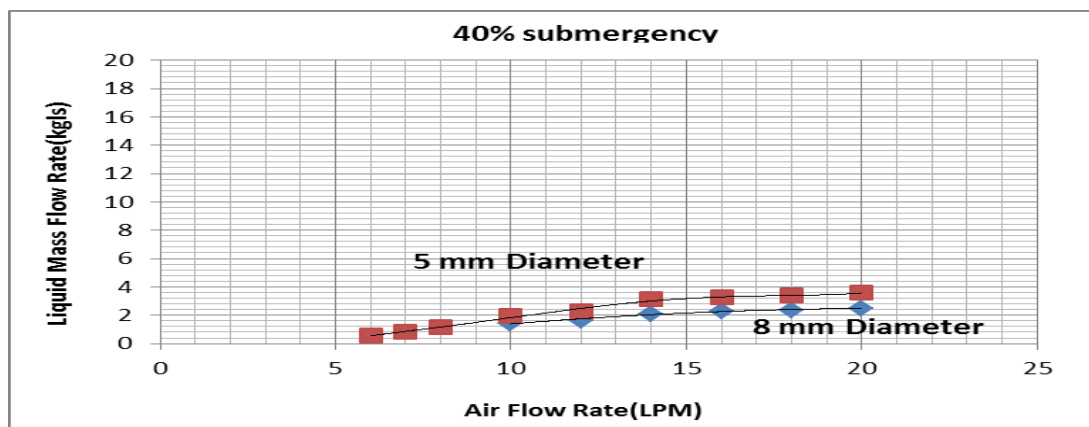


شکل (۳-۴۲) نمودار نرخ جریان هوا در مقابل نرخ جریان آب برای شناوری ۹۳٪ (قطر لوله هوا ۸ میلی متر)

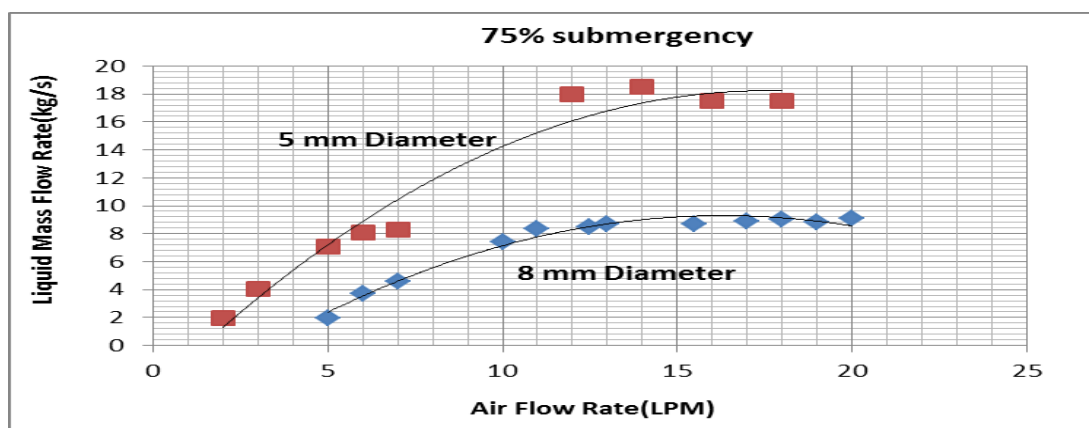
با استفاده از مشاهده جریان و نتایج آزمایشگاهی، ملاحظه شد که برای مقادیر کم از نرخ جریان حجمی هوا بین ۰ تا ۲ لیتر بر دقیقه، وابسته به نرخ شناوری هیچ مقدار آبی بالا نمی‌رود، زیرا نیروی شناوری حباب‌های هوای اعمال شده، برای بالابردن آب کافی نمی‌باشد. با افزایش نرخ جریان هوا، رشته حباب اسلاگ در لوله شروع به شکل‌گیری میکند که شامل چندین اسلاگ کوچکتر بطول ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر است که در طول لوله توزیع شده است. بزرگترین حباب در قسمت بالای لوله واقع می‌باشد، حال آنکه کوچکترین حباب در قسمت پایین لوله است. رشته حباب اسلاگ به آرامی به طرف بالا حرکت می‌کند، برای چند ثانیه هیچ حبابی از لوله خارج نمی‌شود، زیرا هوا برای مدت کوتاهی در قسمت پایین لوله انباشته می‌شود. توزیع حباب‌ها دوباره پس از چند ثانیه تکرار می‌شود. مشاهده شده است که فشار هوا در نقطه تزریق بین یک تا دو کیلوپاسکال نوسان میکند و این بخاطر انباشتگی هوا تا شکل‌گیری اسلاگ است که به قدرت کافی جهت نفوذ در ستون آب برسد و به طرف بالا حرکت کند. سپس نرخ جریان جرمی هوا به آرامی تا ۷ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد. سپس جریان مایع شروع می‌شود. ساختار جریان اسلاگ در لوله می‌تواند توسط توالی یک اسلاگ هوای بزرگ با یک اسلاگ مایع که شامل چندین حباب هوای کوچکتر است، و سپس اسلاگ‌های آب و هوای کوچکتر، توصیف شود. دوباره سیکل تکرار می‌شود. دلیل انتقال رژیم جریان از حبابی به اسلاگ، این است که همانطور که جریان گاز افزایش می‌یابد، حباب‌ها به یکدیگر نزدیکتر شده و برخورد رخ میدهد. بنابراین تعدادی از برخوردها منجر به انعقاد شده و سرانجام به شکل‌گیری اسلاگ می‌شود. برای نرخ شناوری ۷۵ درصد، بالارفتن آب بصورت قابل توجهی برای نرخ جریان حجمی هوا نزدیک به ۱۲ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد. هر افزایش کوچکی در نرخ جریان هوا، سبب می‌شود نرخ جریان آب به سرعت افزایش یابد. باید متذکر شد که در ناحیه ای که نرخ جریان جرمی آب افزایش پیدا میکند (از ۱۰ تا ۱۴ لیتر بر دقیقه)، رژیم جریان اسلاگ - چارن است. بعلاوه ماکزیمم نرخ جریان آب، هنگامی که الگوی جریان اسلاگ - چارن است، روی می‌دهد. همانطور که در شکل‌های بالا می‌بینید، نرخ جریان آب با افزایش نرخ جریان هوا افزایش می‌یابد تا هنگامی که به ماکزیمم

مقدار میرسد. باید متذکر شد، در ناحیه ای که نرخ جریان آب افزایش می یابد، الگوی جریان از اسلاگ به اسلاگ - چارن تغییر می یابد. می توان به این صورت توضیح داد که: همانطور که حباب اسلاگ در طول مایع بالا می رود، جهت سرعت گاز درون اسلاگ به طرف بالاست، درحالیکه جهت سرعت مایع درون فیلم نازک اطراف اسلاگ هوا به سمت پایین است، در بعضی از سرعت های بحرانی از نرخ جریان جرمی هوا، سرعت گاز ناگهان فیلم مایع را از هم گسیخته خواهد کرد. بنابراین جریان اسلاگ شکسته شده و به سمت جریان چارن با الگوی بسیار ناپایدار میرود، همانطور که نیکلین (۱۹۶۳) اشاره کرده بود. باید متذکر شد که ناحیه جریان اسلاگ - چارن ناحیه مهمی است که پمپ بایستی در آن ناحیه عمل کند. مقدار آب بالارونده برای یک محدوده کوچک از نرخ جریان هوا (۱۶ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه) تقریباً ثابت باقی می ماند. افزایش جریان هوا باعث اندکی کاهش در نرخ جریان آب می شود، و رژیم جریان از اسلاگ - چارن به آنیولار تغییر می یابد. این انتقال به دلیل این است که سرعت گاز جهت اینکه مایع را بصورت فیلم نازکی بر روی دیواره لوله نگه دارد، به اندازه کافی بالاست. و نیز به خاطر این است که افت فشار از نیروی شناوری تجاوز میکند. در شکل (۳-۳۰ ه) الگوی جریان آنیولار و نیز اینکه چطور آب از لوله بالابر بالا میرود، نشان داده شده است. مقدار کمی از آب بصورت فیلم نازک بر روی دیواره لوله جابجا می شود. درحالی که قسمت دیگر قطرات کوچک آب تزریق شده در هسته لوله بطرف بالاست.

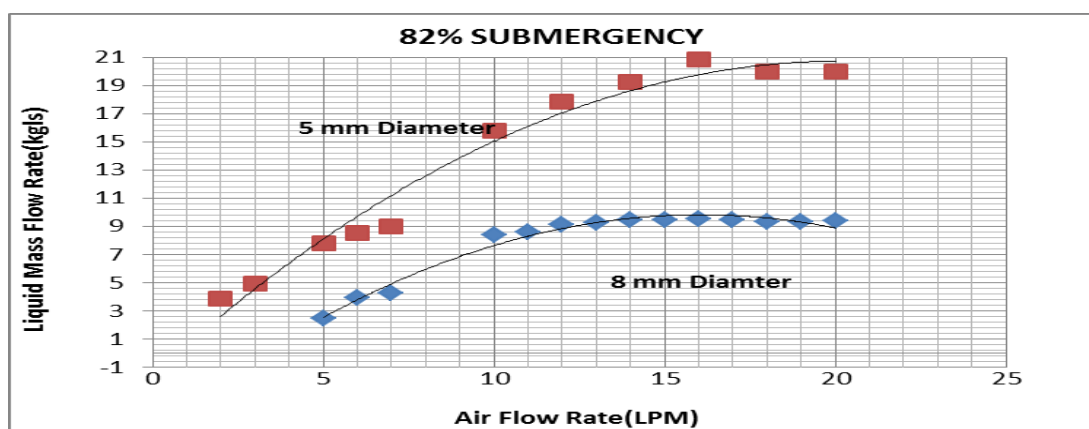
جهت بررسی تاثیر قطر هوای تزریقی بر افزایش کارایی پمپ بالابر بادی، از دو قطر هوای ورودی مختلف ۸ میلی متر و ۵ میلی متر استفاده شده است. همانطور که در شکل های (۳-۴۳) تا (۳-۴۵) نشان داده شده است. مشاهده می شود که کاهش قطر هوا باعث افزایش در دبی خروجی شده است که این امر را می توان ناشی از تاثیر کوچکتر شدن قطر حباب های هوای تزریق شده به دلیل (کاهش قطر ورودی هوا) در برقرار بودن رژیم اسلاگ در ناحیه بیشتری از لوله دانست. همچنین مشاهده می شود که با افزایش نرخ شناوری تاثیر کاهش قطر هوای ورودی بر افزایش نرخ آب خروجی، افزایش می یابد.



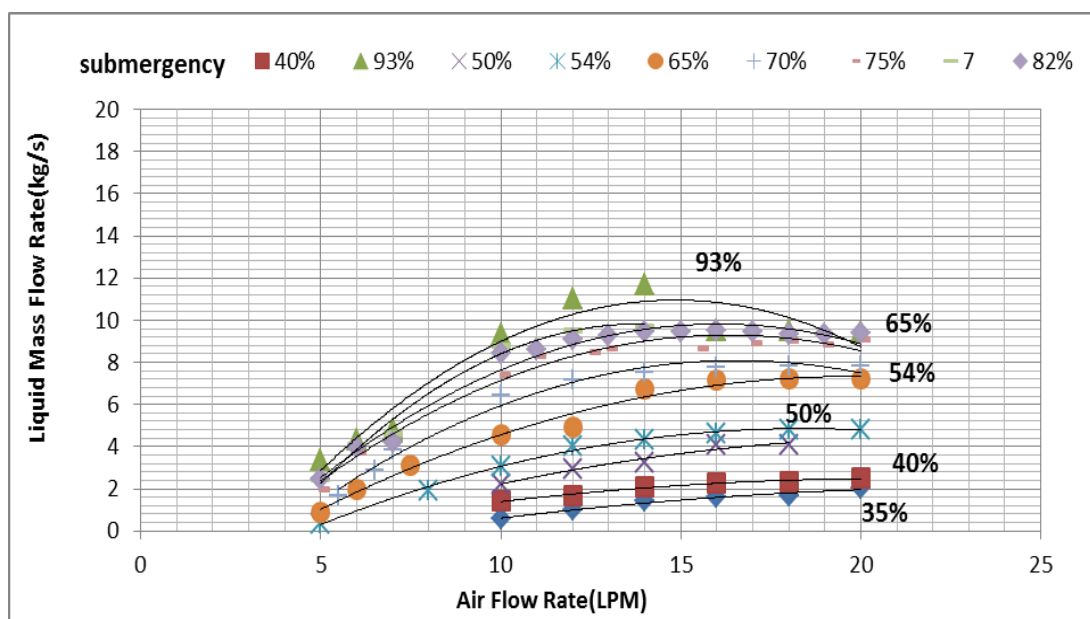
شکل (۳-۴۳) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۴۰٪.



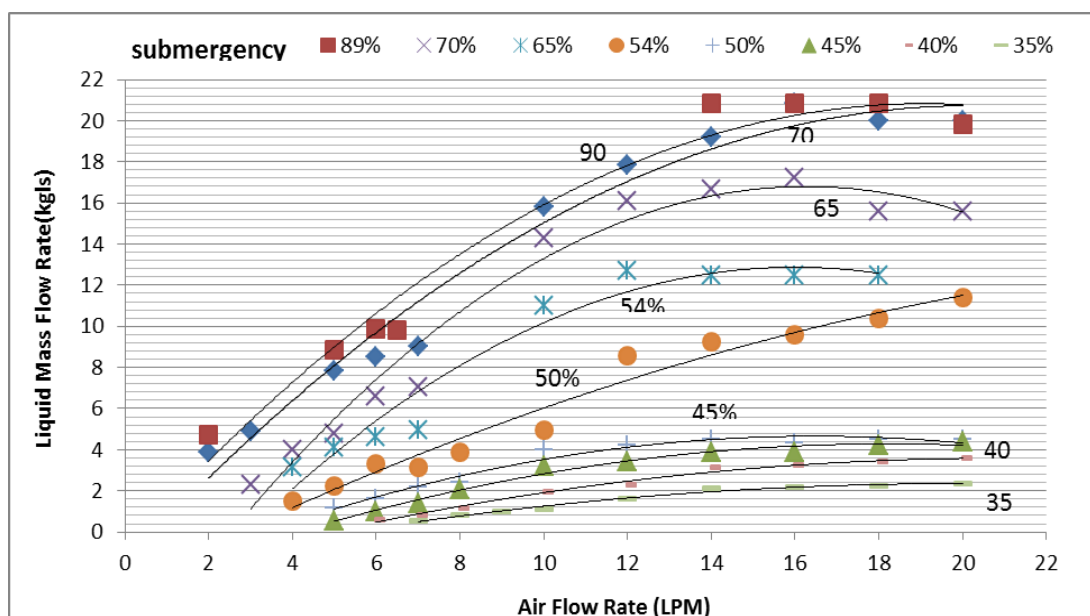
شکل (۳-۴۴) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۷۵٪.



شکل (۳-۴۵) نرخ جریان هوا در برابر نرخ جریان جرمی آب برای دو قطر ورودی هوای مختلف برای نرخ شناوری ۸۲٪.



شکل (۳-۴۶) نمودار تغییرات نرخ جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف از نرخ شناوری (برای لوله هوا به قطر ۸ میلی متر)



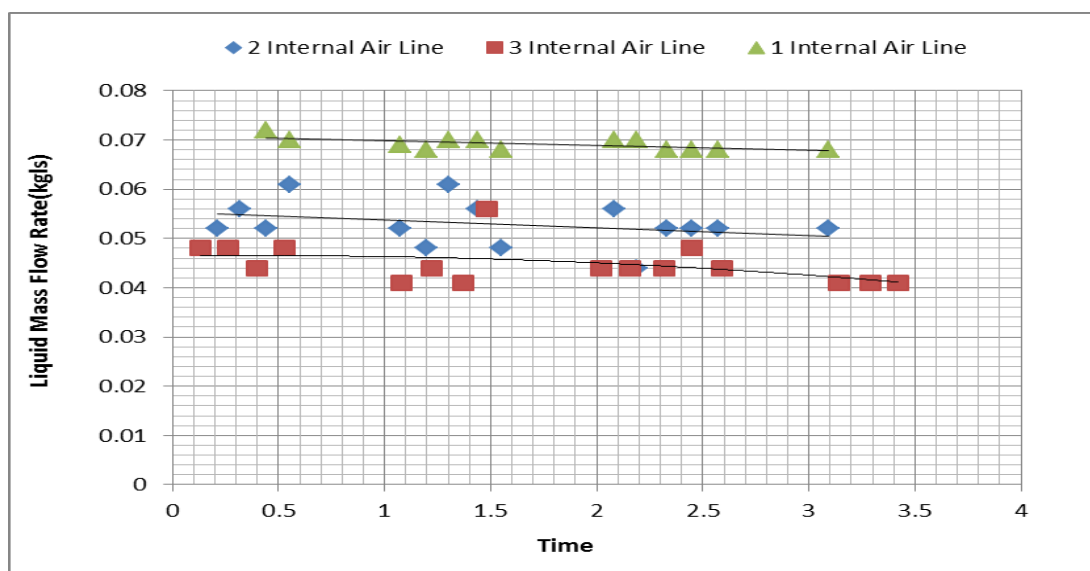
شکل (۳-۴۷) نمودار تغییرات نرخ جریان جرمی آب با جریان هوا در مقادیر مختلف از نرخ شناوری (برای لوله هوا به قطر ۵ میلی متر)

اندازه گیری ها در مقادیر مختلف از نرخ شناوری بدست آمد، همان طور که در شکل های (۳-۴۳) و

(۳-۴۴) نشان داده شده است. واضح است که منحنی های عملکرد پمپ بالابر بادی هنگامی که نرخ

شناوری افزایش می یابد، به سمت بالا شیفیت پیدا می کند. همه منحنی های عملکرد در نرخ های مختلف شناوری روند یکسانی دارند. همچنین در طول آزمایش ممکن است الگوی جریان تغییر یابد، همانطور که پیشتر ذکر شد، همچنین شکلها نشان می دهند که برای یک مقدار ثابت از نرخ جریان هوا، نرخ جریان آب با افزایش نرخ شناوری، افزایش می یابد. همچنین همانطور که در شکلهای ۳-۴۶ و ۳-۴۷ ملاحظه می شود کاهش قطر ورودی هوا، باعث افزایش زیادی در نرخ جریان آب خروجی شده است که با افزایش نرخ شناوری اختلافشان بیشتر نیز می شود.

همچنین جهت بررسی تاثیر افزایش تعداد ورودی هوا بر کارایی پمپ بالابر بادی، سه جایگاه مختلف بر روی لوله تخلیه جهت ورود هوا تعبیه گشته که هر سه جایگاه توسط شیرهای کنترلی ورود هوا را به لوله تخلیه تامین میکنند. همانطور که در نمودار شکل (۳-۴۸) مشخص است، با افزایش تعداد ورودی از یکی به سه تا، کاهش در دبی آب خروجی مشاهده می شود. بالاترین دبی آب خروجی مربوط به یک ورودی هوا می باشد. همچنین مشخص است که تغییرات دبی در طول زمان تقریباً ثابت باقی می ماند به خصوص هرچه زمان افزایش می یابد ثابت ماندن دبی آب خروجی مشهودتر است، بنابراین می توانیم جریان را با تقریب خوبی حالت پایدار فرض نماییم.



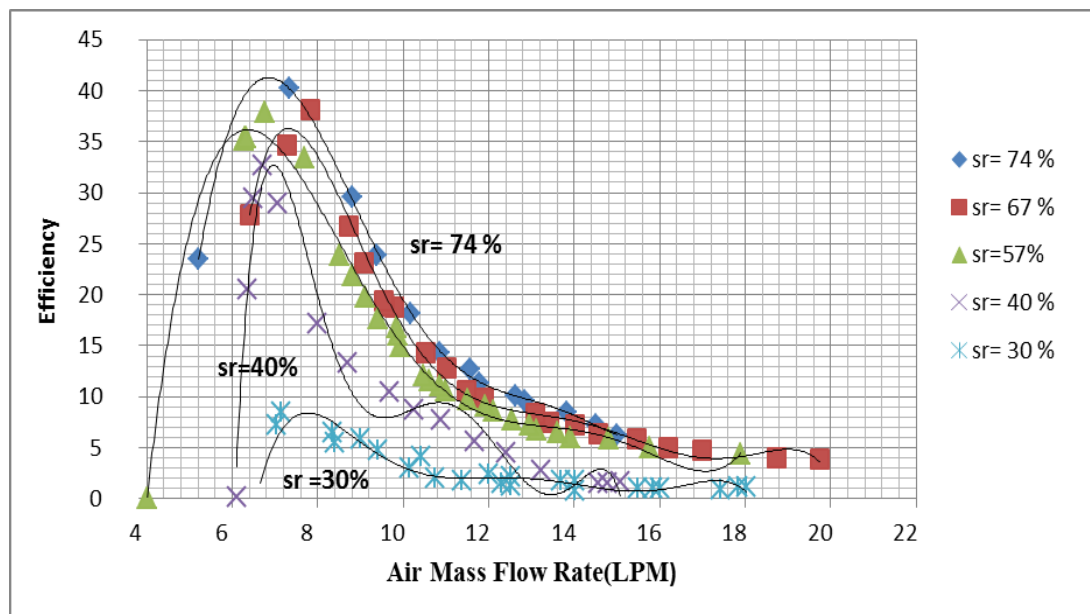
شکل (۳-۴۸) نمودار مقایسه نرخ جریان جرمی آب خروجی در طول زمان با افزایش تعداد ورودی هوا در دبی هوای ثابت ۸ لیتر بر دقیقه

۳-۶-۳- بررسی کارایی پمپ:

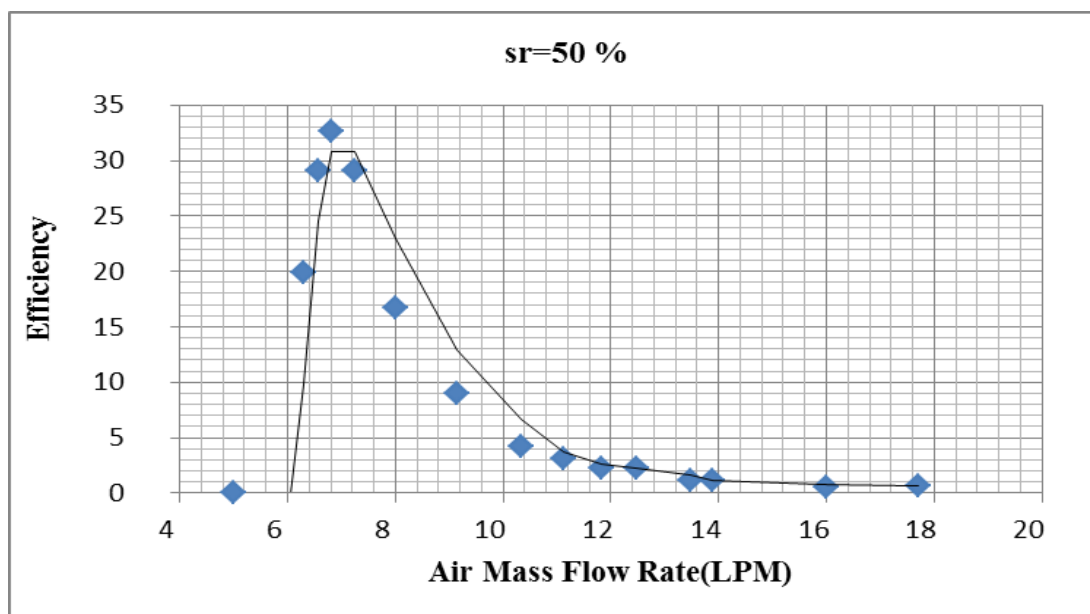
تعریف کارایی پمپ بالابر بادی توسط نیکلین [۹]:

$$\eta = \frac{\rho g Q_L (L - H_S)}{P_a Q_a \ln \frac{P_{in}}{P_a}} \quad (3-24)$$

که Q_L نرخ تخلیه آب است، Q_a نرخ جریان حجمی هواست و P_{in} فشار تزریق هواست، ρ دانسیته مایع و P_a فشار اتمسفر است. منحنی بازده در مقابل نرخ جریان حجمی هوا در مقادیر مختلف از نرخهای شناوری در شکل (۳-۴۹) نشان داده شده است. بازده پمپ در مقابل نرخ جریان حجمی هوا برای نرخ شناوری ۵۰ درصد در شکل (۳-۵۰) نشان داده شده است. همانطور که نرخ جریان حجمی هوا افزایش می یابد، بازده سرعت از صفر تا ماکزیمم مقدار ۳۵.۴٪ در جریان حجمی هوا برابر با ۱۰ تا ۱۳ لیتر بر دقیقه افزایش می یابد و سپس با افزایش نرخ جریان حجمی هوا، کارایی پمپ کاهش می یابد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، منحنی ها در نرخهای مختلف از شناوری روند یکسانی دارند. بعلاوه بهترین محدوده از کارایی پمپ، ناحیه اول از منحنی عملکرد است، که ناحیه جریان اسلاگ می باشد. هنگامی که نرخ شناوری تا ۷۵ درصد افزایش می یابد، بازده ماکزیمم تا ۴۵٪ افزایش می یابد. نتایج نرخ جریان جرمی آب را با نتایج بازده در شکل مقایسه کنید. نکته مهم این است که ماکزیمم بازده در ماکزیمم نرخ جریان جرمی آب برای همه مقادیر از نرخ شناوری رخ نمیدهد.



شکل (۳-۴۹) نمودار تغییرات بازده پمپ با نرخ جریان حجمی هوا در نرخهای شناوری مختلف



شکل (۳-۵۰) نمودار تغییرات بازده پمپ با نرخ جریان جرمی هوا در شناوری ۵۰٪

فصل ۴:

حل عددی جریان دو فاز

۴-۱- مقدمه

معادلات حاکم بر جریان سیال معادلات آشنایی هستند. این معادلات شامل ترم‌هایی با مشتقات جزئی فراوان می‌باشند که تنها با ساده‌سازی‌های بسیار و تنها برای برخی از مدل‌های ساده‌ی جریان دارای حل تحلیلی می‌باشد، بنابراین حل عددی در مدل‌سازی جریان سیال امر جدایی ناپذیری است. در این فصل ابتدا درباره‌ی معادلات سیال صحبت می‌شود پس از آن مروری می‌شود بر روش‌های عددی حل جریان دو فاز، در این بخش به معرفی روش‌های تعقیب سطح^۱ پرداخته می‌شود. پس از آن روش حجم محدود^۲ معرفی می‌شود. پس از آن به نحوه‌ی حل معادلات جریان سیال غیرقابل تراکم با الگوریتم پیرو پرداخته می‌شود. از آن رو که انجام این پروژه به کمک نرم افزار اوپن فوم مطرح است در هربخش به قابلیت‌ها و محدودیت‌های این نرم افزار اشاره می‌شود.

۴-۲- روش شناسی حل سیالات دو فازی

هر روش شناسی شامل یک مدل و یک پروسه حل می‌باشد. یک مدل، نمایشی ریاضی از مجموعه‌ای روابط، فرآیندهای فیزیکی یا شیمیایی شبیه سازی شده، می‌باشد. در مدل‌ها معمولاً از روابط کم اهمیت صرف نظرمی‌شود. پروسه حل، جزئیاتی درمورد چگونگی دستیابی به یک حل تقریبی جهت مدل کردن روابط به صورت عددی می‌باشد. دینامیک بسیاری از جریان‌های دوفاز در کاربرد های مهندسی توسط روابط ناویر-استوکس^۳ به همراه قانون نیوتن و یک معادله حالت کاملاً مدل می‌شوند. از انتقال گرما و جرم و همچنین واکنش‌های شیمیایی و تغییرات

^۱ Interface Tracking Method (ITM)

^۲ Finite Volume Method (FVM)

^۳ Navier-stokes

فازی در این مطالعه صرف نظر شده است. [۲۸]

۴-۳- فرم کلی معادلات سیال

بر جریان سیال سه معادله اصلی: معادله پیوستگی ۴-۱، معادلات ممتم ۴-۲ و معادله انرژی ۴-۳ حاکم است. نحوه استخراج این معادلات که به معادلات پایستار جریان^۱ معروف است در هر کتاب مکانیک سیالات یافت می شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (۴-۱)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = \rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (۴-۲)$$

$$\rho \frac{de}{dt} + \rho (\nabla \vec{U}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (۴-۳)$$

معادلات فوق عمومی ترین شکل معادلات حاکم بر هر نوع سیال می باشند. حل معادلات حاکم بر سیال از دیدگاه عددی بسیار دشوار می باشد زیرا از یک سو دارای ترم های مشتق جزیی فراوان می باشد و از سوی دیگر این معادلات با هم کوپل می باشند. در استخراج این معادلات تنها سه تقریب زیر وجود دارد.

۱. فرضیه پیوستگی^۲
۲. معادله حالت^۳
۳. تقریب در شکل شار

^۱ Flow Conservative Equations

^۲ Continuum Hypothesis

^۳ State Equation

دسترسی به مدل‌های ساده تر با معرفی فرضیات بیشتر امکان پذیر است. در روابطی فوق Φ و τ_{ij} تابع نوع سیال می‌باشند. در حالت کلی چگالی متغیر می‌باشد، بنابراین چگالی، دما، سرعت، فشار و انرژی هفت مجهول جریان سیال هستند. در مقابل این هفت مجهول تنها پنج معادله (یک معادله پیوستگی، سه معادله‌ی ممتم و یک معادله‌ی انرژی) داریم. برای تکمیل دستگاه معادلات به دو رابطه‌ی دیگر نیاز است. این دو رابطه معادلات حالت ۴-۴ هستند که از خواص ترمودینامیکی سیال بدست می‌آیند.

$$\rho = \rho(P, T), \quad e = e(U, T) \quad (4-4)$$

در سیال نیوتنی رابطه‌ی بین تنش و کرنش ۵-۴ خطی است. سیالات غیرنیوتنی این گونه نیستند.

$$\tau_{ij} = \mu(\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) \quad (5-4)$$

در بسیاری از کاربردهای مهندسی می‌توان جریان سیال را غیرقابل تراکم فرض کرد. در جریان سیال غیرقابل تراکم چگالی ثابت می‌باشد. بنابراین کوپل بین چگالی و فشار از بین می‌رود و از طرفی دیگر معادلات انرژی مستقل از معادلات پیوستگی و ممتم می‌گردد.

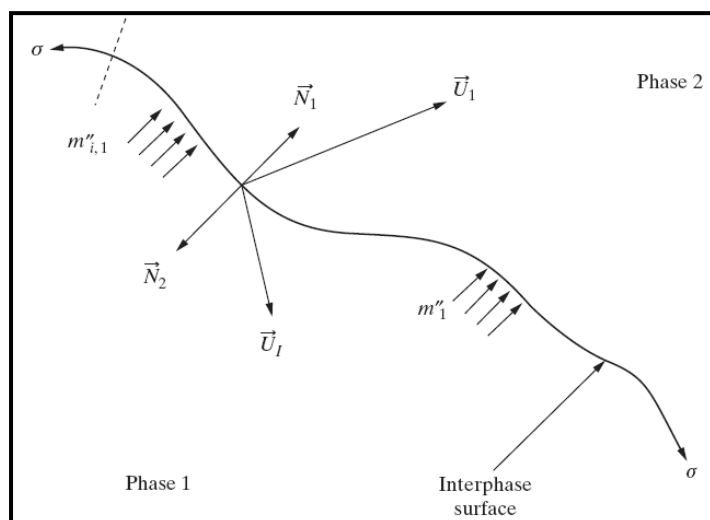
۴-۴- حل عددی جریان دو فاز

طراحی و تحلیل سیستم‌ها معمولاً نیاز به حل معادله‌ی جریان و انتقال حرارت دارد، این معادلات برای جریان تک‌فاز همان معادلات پایستار جریان می باشد که پیشتر در مورد آن صحبت شد. برای جریان دو فاز سیستم جریان کمی پیچیده است و ساده‌سازی جریان برای رسیدن به معادلات پایستاری که هم قابل حل باشند و هم دقیق نیاز به فهم ظریف از فیزیک مسئله و آشنایی با مهارت‌های ریاضی دارد، خوشبختانه مدل‌سازی ریاضی جریان دو فاز دهه‌ها است که مورد بررسی قرار گرفته است و هم اکنون مدل‌های موجود عملکرد خوبی در تخمین نتایج تجربی داشته است. عموماً معادلات پایداری برای جریان دو فاز به دو روش کلی اویلری و اویلری - لاگرانژی ارایه می‌شوند. در روش اول تمامی فازهای موجود در جریان بصورت محیط‌های پیوسته در قاب ثابت (قاب اویلری) در نظر گرفته می‌شود. این مدل کاملاً عمومی بوده و قابل اعمال به همه‌ی رژیم‌های جریان می باشد. در روش دوم یکی از فازها بصورت محیط پیوسته در قاب ثابت^۱ در نظر گرفته می‌شود، در حالی که فاز دیگر بصورت ذرات پراکنده در این محیط پیوسته مدل می‌شود. معادلات حاکم بر محیط پیوسته معادلات پایستار جریان هستند و حرکت ذرات در قاب متحرک (قاب لاگرانژی) صورت می پذیرد. مولفه‌های جریان دوفاز در معادلات اویلری لاگرانژی از حل تکراری معادلات بین این دو قاب صورت می پذیرد [۲۹]. این مدل برای محاسبه رژیم‌های جریانی چون جریان پراکنده‌ی قطرات مایع در گاز قابل اعمال است در این مثال فاز گاز محیط پیوسته و قطرات آب ذرات لاگرانژی می‌باشند.

^۱ Fixed Frame

۴-۱- روش‌های حل اویلری جریان

در سیستم دو فاز گاز و مایع، در هر لحظه در هر ناحیه از میدان محاسباتی حداقل یکی از دو فاز وجود دارد. چنانچه دو سیال مخلوط نشدنی باشند این دو فاز با یک لایه میانی مشخص از هم جدا می‌شوند، که به آن سطح مشترک^۱ گفته می‌شود. دلیلی وجود ندارد که نتوان معادلات پایستار جریان تکفاز را به هریک از این فازها بطور جداگانه اعمال کرد. بنابراین هرگونه فرمول‌بندی جریان دو فاز باید با فرمول‌بندی جریان در تک تک فازها همگون باشد. باید توجه شود که معادلات پایستار جریان تکفاز قابل اعمال به سطح مشترک نیستند. نمونه‌ای از سطح مشترک در شکل ۴-۱ دیده می‌شود.



شکل (۴-۱) سطح مشترک بین دو فاز [۳۰]

سطح مشترک را می‌توان غشایی بسیار نازک با حجم صفر در نظر گرفت، که علی‌رغم همه‌ی انتقال جرم، ممتنم و ... در حالت تعادل است. همچنین فرض می‌شود که سطح مشترک در حالت تعادل مکانیکی، حرارتی است [۳۰]. فرضیات ذکر شده منجر به روابط ساده شده‌ی زیر برای

^۱ Interface

شرایط پرش^۱ در سطح مشترک می‌گردد. رابطه‌ی ۴-۶ پیوستگی جرم را تضمین می‌کند، رابطه‌ی ۴-۷ بیانگر تعادل ترمودینامیکی است که بعداً بیشتر در این مورد صحبت خواهد شد و رابطه‌ی ۴-۸ تعادل ممتم خطی را نشان می‌دهد.

$$m_1'' = \rho_1(\vec{U}_1 - U_I) \cdot \vec{N}_1, \quad m_1'' = m_2'' \quad (6-4)$$

$$T_1 = T_2 = T_I \quad (7-4)$$

$$m_1''(\vec{U}_1 - \vec{U}_2) + (P_1 I - \tau_1 - P_2 I + \tau_2) \cdot \vec{N}_1 - 2\sigma k_{12} \vec{N}_2 = 0 \quad (8-4)$$

معادلات پایستار جریان را می‌توان با روابط بسته^۲ی مناسب که ذکر شد در یک حل مستقیم و با استفاده از هریک از روش‌های عددی گسسته سازی (حجم محدود، تفاضل محدود و المان محدود) حل کرد. در روش حل مستقیم گام‌های زمانی و مکانی باید به اندازه‌ای کوچک باشد که حتی مهم‌ترین نوسانات کوچک جریان را در یک دامنه بزرگ در بر بگیرد. مهم‌ترین دشواری در حل مستقیم جریان دو فاز از آنجا ناشی می‌شود که سطح مشترک دوفاز از ابتدا مشخص نمی‌باشد و تعیین مکان این سطح بخشی از پروسه‌ی حل می‌باشد. حل معادلات پایداری جریان دو فاز با سطح مشترک شکل پذیر جزو زمینه‌های تحقیقاتی فعال می‌باشد، در بخش بعد به روش‌های مستقیم و تکنیک‌های مختلف حل جریان دوفاز به روش مستقیم پرداخته می‌شود. این روش‌ها بسیار نو بوده و هنوز برای طراحی و آنالیزهای معمولی مناسب نیستند [۳۰]. در ادامه به معرفی مختصر دیگر مدل‌های جریان دو فاز پرداخته می‌شود.

مدل‌های جریان دو فاز را می‌توان به سه زیر گروه زیر تقسیم‌بندی کرد [۳۰].

^۱ Jump Condition

^۲ Closure Relation

۱. مدل مخلوط همگن^۱:

در این مدل فرض می‌شود که دو فاز در هر نقطه دارای سرعت مشترک می‌باشند، بنابراین تنها به یک معادله‌ی ممتم نیاز است. همچنین در معادلات دوفاز یک جزئی^۲ همچون آب و بخار، اگر در تمامی نقاط تعادل ترمودینامیکی فرض شود مدل از نوع مخلوط همگن خواهد بود، ولی بطور عمومی نیازی نیست که دو فاز در تعادل ترمودینامیکی باشند. همین که دو ماده بخوبی درهم مخلوط شده باشند که بتوان در هر نقطه برای دو ماده سرعت یکسان در نظر گرفت همچون رژیم جریان پراکنده^۳ این مدل جواب قابل قبول می‌دهد اما زمانی که دو فاز از هم جدا باشند همچون جریان حلقوی جواب مسئله چندان صحیح نمی‌باشد. مدل مخلوط همگن ساده‌ترین مدل جریان دوفاز می‌باشد که به جریان دوفاز همچون جریان تک‌فازی نگاه می‌کند که قابل تراکم است، و ویژگی‌های فیزیکی آن با زمان و مکان بطور عمده تغییر می‌کند.

۲. مدل پخشی^۴:

در این مدل برای دو فاز دو دامنه مجزا در نظر گرفته می‌شود اما تنها به حل یک دسته از معادلات ممتم نیاز است. بین دو فاز شرایط لغزشی وجود دارد در نتیجه سرعت دو فاز یکی نمی‌باشد، و بین دو فاز سرعت نسبی تعریف می‌شود. بردار سرعت یکی از فازها از حل معادله‌ی ممتم و بردار سرعت فاز دیگر از سرعت نسبتی محاسبه می‌شود. سرعت نسبی معمولاً از طریق یک رابطه‌ی جبری که از مدل فیزیکی یا رابطه‌ی تجربی به دست آمده است محاسبه می‌شود. رایج‌ترین مدل پخشی جریان دو فاز، مدل شار توده‌ای^۵ می‌باشد.

^۱ Homogeneous Mixture Model (HEM)^۲ Single Component Flow^۳ Dispersed Flow^۴ Diffusion Model^۵ Drift Flux Model

۳. مدل چند سیال^۱:

در این مدل، میدان جریان حداقل به دو دامنه تقسیم می‌شود و برای هر دامنه یک دسته معادلات پایستاری جریان حل می‌شود. مدل دو سیال^۲، رایج‌ترین مدل برای مدل‌سازی جریان دو فاز است. تعادل ترمودینامیکی بین دو فاز یا در نظر گرفتن حالت اشباع برای یکی از دو فاز منجر به کاهش یکی از معادلات انرژی می‌گردد.

۴-۴-۲- روش های مستقیم

روش‌های مستقیم حل جریان دو فاز به دلیل قابلیت آن‌ها در درک بهتر مکانیزم جریان دو فاز در دهه‌ی اخیر بسیار پرکاربرد شده است. از تکنیک‌های متداول روش مستقیم حل جریان که به روش‌های پیگیری سطح^۳ معروفند می‌توان به روش پیگیری پیشانی^۴ [۳۱]، روش مجموع سطوح^۵ [۳۲] و روش حجم سیال^۶ [۳۳] اشاره کرد. روش پیگیری پیشانی در زیر گروه روش‌های لاگرانژی قرار می‌گیرد از دیگر تکنیک‌های پیگیری سطح که در این زیر گروه جای می‌گیرند می‌توان به روش ذرات نشان دار^۷ اشاره کرد. در روش پیگیری پیشانی همزمان از دو قاب ثابت و متحرک استفاده می‌شود. معادلات پایستار جریان در قاب ثابت حل می‌گردد و از قاب متحرک برای پیگیری سطح مشترک استفاده می‌شود. این روش بسیار دقیق می‌باشد اما مدل‌سازی فرایندهای جدایش و انعقاد فاز در آن دشوار است، هم‌چنین در این روش نیاز به نگاشت^۸ داده‌ها از قاب ثابت

^۱ Multifluid Model^۲ Two Fluid Model^۳ Interface Tracking Method^۴ Front tracking^۵ Levelset method^۶ Volume Of Fluid (VOF)^۷ Particle Marker^۸ Map

به قاب متحرک و بالعکس هستیم که هزینه‌ی زمانی محاسبات را بسیار بالا می‌برد. از آن‌رو روش‌های متنوع حجم سیال و روش مجموع سطوح بیشتر مورد توجهی محققان برای مدل‌سازی جریان دو فاز بوده است. در این روش‌ها از یک تابع اسکالر برای پیگیری سطح مشترک استفاده می‌شود. به این تابع نشانگر فاز^۱ یا تابع رنگ^۲ گفته می‌شود. در قاب ثابت موقعیت سطح مشترک در هر گام زمانی با حل معادله‌ی جابجایی ۴-۹ در همه‌ی سلول‌ها تعیین می‌شود. در روش‌های اویلری انعقاد و جدایش فازها بصورت خودکار صورت می‌پذیرد بنابراین اعمال آن به توپولوژی‌های دشوار راحت‌تر است.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \nabla F = 0 \quad (9-4)$$

در روش مجموعه سطح [۳۲] این تابع اسکالر، تابع فاصله ۴-۱۰ می‌باشد. مقدار این تابع در سطح مشترک صفر می‌باشد. از مزایای این روش استفاده از یک تابع هموار^۳ برای پیگیری سطح و بازسازی دقیق سطح مشترک^۴ می‌باشد.

$$\varphi(\vec{x}) = \min(|\vec{x} - \vec{x}_I|) \quad \varphi = \begin{cases} > 0 & \vec{x} \in \text{phase1} \\ = 0 & \vec{x} \in \text{interface} \\ < 0 & \vec{x} \in \text{phase2} \end{cases} \quad (10-4)$$

روش‌های مجموع سطح اولیه نمی‌توانستند معادله‌ی پیوستگی را ارضا کنند زیرا با گذشت زمان $\varphi(\vec{x})$ دیگر بیانگر فاصله از سطح مشترک نبود. امروزه از تکنیک سوسمان برای تکمیل روش مجموع سطح استفاده می‌شود، در این روش از یک تابع جبری ۴-۱۱ برای باز محاسبه‌ی $\varphi(\vec{x})$

^۱Phase Indicator

^۲Color Function

^۳Smooth Function

^۴Sharp Interface

در هرگام زمانی استفاده می‌شود.^۱ با حل این تابع جبری $\phi(\vec{x})$ همواره نشانگر فاصله از سطح مشترک خواهد بود. روش دیگر ترکیب روش مجموع سطح با روش‌های جرم پایستار همچون روش حجم سیال است که روش CLSVOF را می‌توان به عنوان نمونه ذکر کرد.

$$\begin{aligned}\phi_t + \vec{w} \cdot \nabla \phi &= \text{sign}(\phi_0) \\ \vec{w} &= \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \text{sign}(\phi_0)\end{aligned}\quad (11-4)$$

در روش حجم سیال تابع اسکالر ۴-۱۲ بیانگر حجم سیال از یک فاز به حجم کل سلول است. این روش در سیالات غیرقابل تراکم معادله پیوستگی را ارضا می‌کند.

$$\alpha(\vec{x}) = \frac{V_{\text{phase1}}}{V} \quad \alpha(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \vec{x} \in \text{phase1} \\ 0 < \alpha < 1 & \vec{x} \in \text{interface} \\ 0 & \vec{x} \in \text{phase2} \end{cases} \quad (12-4)$$

تکنیک‌های تکمیل روش حجم سیال بسیار متنوع می‌باشند مراجع [۳۵] و [۳۶] مروری جامع به روش‌های حجم سیال و نحوه تکامل آنها انداخته‌اند. هر الگوریتم حجم سیال از سه بخش اصلی تشکیل شده است.

۱. حل معادله‌ی جابجایی:

برای حل این معادله همچون هر معادله‌ی مشتق پاره‌ی روش‌های متفاوتی وجود دارد اما باید توجه داشت تخمینی که از گسسته‌سازی عددی برای مقدار یک تابع ناپیوسته به دست می‌آید بسیار نادقیق است. نقطه ضعف روش حجم سیال نیز استفاده از یک تابع ناپیوسته به عنوان نشانگر

^۱ Redistance Operation

فاز می‌باشد. به همین دلیل گاه به کوپل روش حجم سیال با روش مجموع سطح نیز می‌پردازند [۳۷].

۲. شیوه‌های بازسازی سطح^۱:

باید متذکر شد که بازسازی سطح می‌تواند بخشی از پروسه الگوریتم حجم سیال نباشد [۳۳] و به آن به عنوان تنها یک ابزار هندسی برای داشتن سطح مشترکی دقیق^۲ بهره برد [۳۸] و [۳۹]. چرا که آنچه در روش حجم سیال پیگیری می‌شود نه سطح مشترک بلکه سلول‌هایی از دامنه‌ی محاسباتی هستند که سطح مشترک را در بر می‌گیرند، از این رو است که به روش حجم سیال روش پیگیری حجم^۳ نیز گفته می‌شود [۳۵]. به هر حال در این مرحله، در هر گام زمانی مشخص می‌شود در هر سلول چه بخشی از آن و توسط کدام سیال پر شده‌است. معمولاً روش‌های برپایه حجم سیال تلاش می‌کنند تا سطح را با یک منحنی تخمین بزنند. یکی از عمده‌ترین تفاوت‌ها بین روش‌های پایه حجم سیال تفاوت در درجه منحنی است که سطح را بازسازی می‌کند، مثلاً در یک دامنه‌ی دو بعدی، روش محاسبه‌ی سطح مشترک با یک خط ساده^۴ و روش محاسبه‌ی سطح مشترک با خطوط قطعه قطعه پیوسته^۵، هر دو از یک خط راست در هر سلول برای بازسازی سطح استفاده می‌کنند. اما امکان استفاده از منحنی‌های مراتب بالاتر، چون سهمی [۴۰] یا منحنی [۴۱] برای بازسازی سطح نیز وجود دارد.

روش محاسبه‌ی سطح مشترک با یک خط ساده، ساده‌ترین روش بازسازی سطح است، در این روش، هر سلول بر حسب حجم هر فاز با یک خط تقسیم می‌شود که این خط به موازات خطوط سلول است، شکلی که از این طریق محاسبه می‌شود معمولاً خام می‌باشد. از مزایای این روش

^۱ Interface Reconstruction

^۲ Sharp Interface

^۳ Volume Tracking Method

^۴ Simple Line Interface Calculation (SLIC)

^۵ Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC)

امکان توسعه راحت تر آن به سه بعد می باشد، همچنین این روش زمانی که بیش از دو فاز وجود دارد راحت تر قابل اعمال است. در روش محاسبه ی سطح مشترک با خطوط قطعه قطعه پیوسته [۴۲] خطی که سطح مشترک را مشخص می کند با توجه به شیب خط نسبت به اضلاع سلول دوران می یابد. این روش پرکاربردترین روش بازسازی سطح می باشد که در بسته های دینامیک سیالات محاسباتی همچون فلوئنت بکار رفته است.

۳. مدل تنش سطحی:

برای اعمال تنش سطح در معادلات جریان دو فاز آن را بصورت نیروی حجمی در معادلات ممنتوم وارد می کنند. همانطور که در رابطه ۳-۸ دیده شد در سطح مشترک تعادل مکانیکی در نظر گرفته می شود. مقدار تنش سطحی در امتداد سطح مشترک یکسان نمی باشد اما برای ساده سازی آن را در تمامی سطح ثابت در نظر می گیرند. معادلات ۴-۱۳ و ۴-۱۴ دو متد رایج برای اعمال تنش سطحی است. در این دو روش برای محاسبه ی تنش سطحی بر روی سطح مشترک تنها به تابع نشانگر فاز نیاز است.

۷. روش تنش سطحی پیوسته^۱

$$f = \sigma \nabla \cdot (|\nabla \alpha| I - \frac{\nabla \alpha \otimes \nabla \alpha}{\nabla \alpha}) \quad (۱۳-۴)$$

۸. روش نیروی سطح پیوسته^۲

$$f = \sigma k n \delta_s, \quad k = -\nabla \cdot n = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right), \quad \delta_s = \nabla \alpha \quad (۱۴-۴)$$

یکی از دشواری های روش حجم سیال اعمال تنش سطحی بر روی سطح مشترک به دلیل ناپیوستگی بر روی سطوح بازسازی شده می باشد. باید توجه داشت که هیچ کدام از دو تعریف فوق

^۱ Continuous Surface Stress (CSS)

^۲ Continuous Surface Force (CSF)

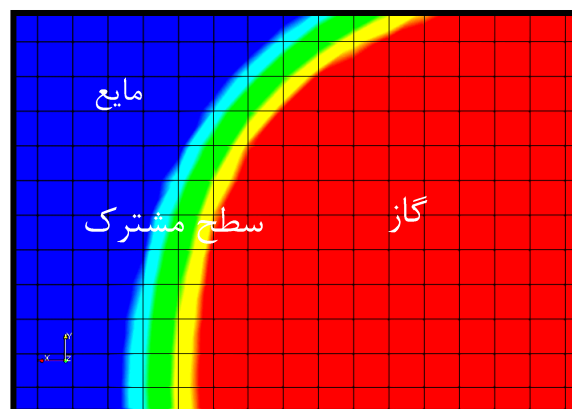
نمی‌تواند تنش سطحی را به درستی تعریف کند بنابراین دو منبع اصلی ایجاد خطا در هنگام مدل‌سازی تنش سطح، روش اعمال تنش سطحی و نحوه‌ی محاسبه‌ی انحنای سطح می‌باشد. این مشکل زمانی که نسبت چگالی دو سیال بزرگ باشد یا زمانی که تنش سطحی (کاپیلاری) ترم حاکم بر مسئله باشد بیشتر رخ می‌نماید. اعمال تنش سطحی بر روی سطح بازسازی شده منجر به ایجاد جریان‌های قلابی^۱ در نزدیکی سطح مشترک می‌شود. یکی از آزمون‌های متداول برای این روش مدل‌سازی یک حباب کروی در جریان صفر و گرانش صفر است، انتظار می‌رود که حباب در تمامی بازه زمانی ثابت باشد اما این‌گونه نیست. باید توجه داشت که این مشکل ناشی از کم دقتی عددی نیست بلکه از محدودیت‌های این روش می‌باشد. جریان قلابی تا هنگامی که عدد انسرگ^۲ ۱۵-۴ بسیار بزرگ باشد مقدار کوچکی است [۴۳].

$$Oh = \left(\frac{Ca}{Re}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۵-۴)$$

جریان قلابی با پلایش شبکه^۳ از بین نمی‌رود و سبب عدم همگرایی این روش می‌شود تنها راه مقابله با این پدیده هموار کردن^۴ سطح مشترک و محاسبه‌ی دقیق انحنا می‌باشد [۴۴]. اکنون درباره روش‌های متنوع حجم سیال سخن گفته شد همان‌طور که پیشتر ذکر شد نیازی به بازسازی سطح به عنوان جزیی از فرآیند اعمال روش حجم سیال نیست. برکبیل^۵ [۴۵] روشی را ارایه کرد که نیاز به بازسازی سطح برای اعمال تنش سطحی را از بین برد این روش به دلیل حذف فرآیند بازسازی سطح و اعمال راحت‌تر آن به سه بعد و نیز پایداری و تخمین مناسب پرش فشار^۶ بسیار مورد توجه قرار گرفته است از این روش برای اعمال تنش سطحی در بسته‌های نرم‌افزاری فلوئنت

^۱ Spurious Current^۲ Ohnesorge^۳ Grid Refinement^۴ Smoothing^۵ Brackbill^۶ Pressure Jump

و اوپن فوم استفاده می‌شود. در نرم افزار اوپن فوم هیچ گونه ابزار هندسی برای محاسبه دقیق سطح مشترک تعبیه نشده است. همچنین در این روش حجم سیال از آغستگی^۱ سطح مشترک رنج می‌برد همانطور که در شکل ۲-۴ سطح مشترک نه یک خط بلکه یک ناحیه است که بین چند سلول (۲ تا ۳ سلول) قرار دارد. برای کاهش آغستگی سطح مشترک از روش انقباض سطح^۲ استفاده می‌شود. کونکلمان و استفان برای داشتن سطح مشترکی تیز^۳ در نرم افزار اوپن فوم، سطح مشترک را به روش مجموع سطوح سوسمان هموار کرده است برای حل معادله‌ی جابجایی تابعی اسکالر (تابع نشانگر فاز) در محدوده‌ی صفر و یک از الگوریتم مولز^۴ استفاده می‌شود.



شکل (۲-۴) آغستگی سطح مشترک

^۱ Interface Smear

^۲ Interface Compression Method

^۳ Sharp Interface

^۴ Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution

۴-۵- گسسته سازی حجم محدود [۲۸]

گسسته سازی عبارت از تقریبی از یک مسئله پیوسته به مقادیر گسسته آن است. روش حجم محدود و روش‌های دیگری مانند روش المان محدود همگی جهت گسسته سازی بصورت زیر عمل میکنند:

❖ گسسته سازی مکانی:

ناحیه مکانی را به چند قسمت با یک سری از سلولها تقسیم کرده، سپس آنها را پر میکند و هنگامی دوتکه بهم متصل می شوند، مرزها را مشخص میکند.

❖ گسسته سازی زمانی:

بیشتر جهت مسائل گذرا استفاده می‌شود. ناحیه زمانی را به تعداد محدودی از فواصل زمانی یا گام های زمانی^۱ تقسیم بندی می‌شود.

❖ گسسته سازی معادله:

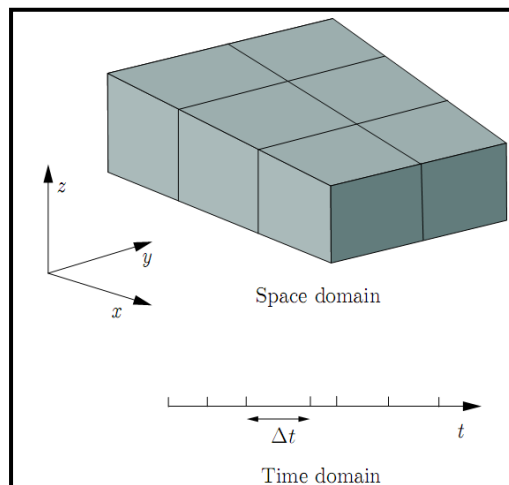
سیستمی از روابط جبری به صورت ترمهایی از مقادیر گسسته که در موقعیت های خاص درون ناحیه تعریف شده اند، ایجاد میکند که مربوط به معادلات حاکم بوده و از مشخصات مسئله هستند.

❖ گسسته سازی ناحیه حل:

گسسته سازی ناحیه حل در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. ناحیه حل شامل یک ناحیه مکانی و یک ناحیه زمانی می باشد. ناحیه مکانی توسط مش محاسباتی تقسیم بندی می‌شود و به دنبال آن معادلات حاکم گسسته می شوند. گسسته سازی زمانی اگر نیاز باشد، آسانتر است. ناحیه به

^۱ time steps

تعدادی گام زمانی ΔT شکسته می شود. گام زمانی ممکن است در طول شبیه سازی عددی تغییر یابد، یا از پیش مشخص شده باشد یا وابسته به برخی شرایط در جریان شبیه سازی محاسبه شود.



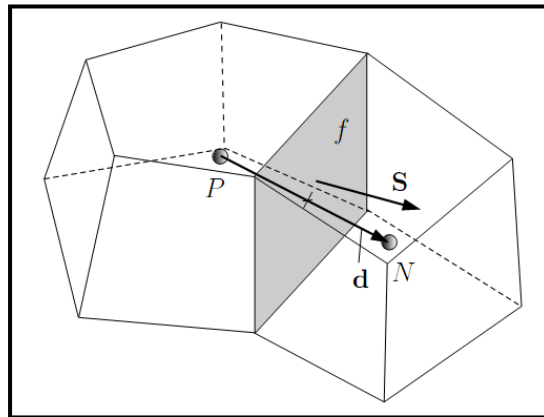
شکل (۳-۴) گسسته سازی ناحیه حل [۲۸]

در گسسته سازی مکانی نیاز به تقسیم ناحیه به تعدادی سلول یا حجم کنترل است. سلولها بهم متصل بوده، یکدیگر را همپوشانی می کنند و بطور کامل ناحیه را پر می کنند. مرز ناحیه مکانی توسط وجه هایی سلولها را بهم متصل می کند. دو نوع سلول در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. یک سلول توسط مجموعه ای از وجه ها محدود می شود که با لیبل f مشخص می شود. وجوه سلول به دو گروه تقسیم می شود: وجوه داخلی (بین دو سلول) و وجوه مرزی که با مرزهای ناحیه مکانی منطبق می شوند. بردار موقعیت یک وجه مسطح X_f به صورت زیر تعریف شده است:

$$\int_s (X - X_f) ds = 0 \quad (۱۶-۴)$$

در این مطالعه همه وجوه مسطح هستند. متغیرهای وابسته و خواص دیگر در مرکز p هر سلول

ذخیره می شود.



شکل (۴-۴) پارامترهای گسسته سازی حجم محدود [۲۸]

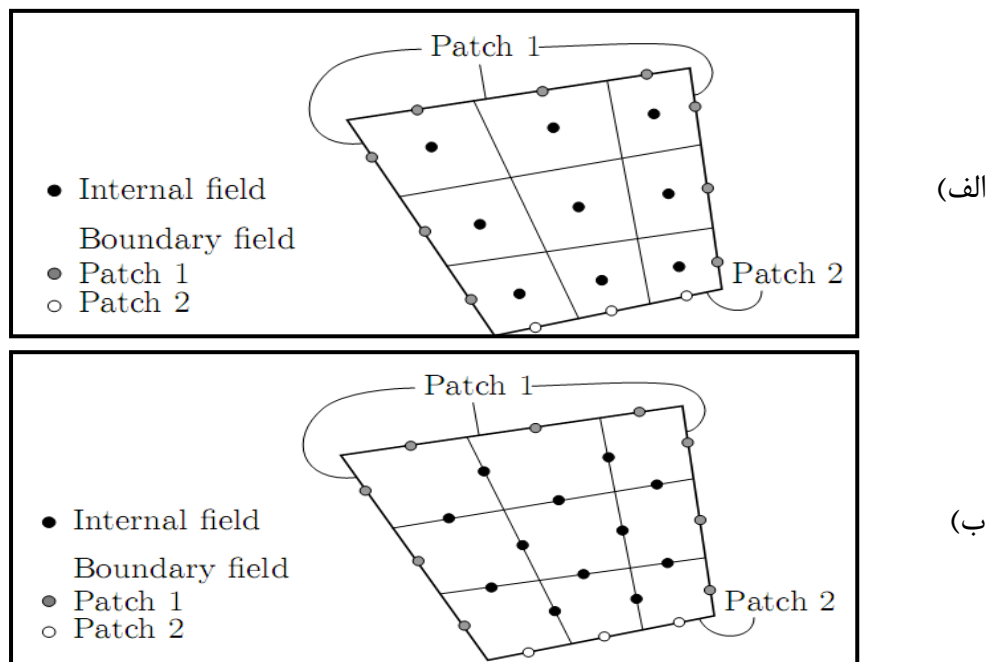
بردار موقعیت مرکز سلول X_p بصورت زیر تعریف می شود:

$$\int_{v_p} (X - X_p) dV = 0 \quad (۱۷-۴)$$

بردار سطحی وجه S عمود بر سطح بوده و اندازه آن برابر مساحت وجه است که از سلول P خارج شده تا نزدیکی سلول N ادامه دارد. بردار واحد n عمود بر وجه بصورت $n = \frac{S}{|S|}$ و d مشخص کننده بردار بین مرکز سلول p به مرکز سلول مجاور N است. $d = X_N - X_p$ وقتی d عمود بر صفحه وجه است مش محاسباتی متعامد است و موازی با S برای هر وجه در مش است.

کتابخانه نرم افزار مورد استفاده در این مطالعه محدودیتی بر روی تعداد وجوه متصل به هر سلول ندارد. فقط نیاز است که هر سلول محدب شود. این نوع از مش اغلب اشاره بر مش "غیر ساختاری" دارد که آزادی زیادی در ایجاد مش و بکارگیری آن به خصوص وقتی هندسه ناحیه مکانی پیچیده است یا با زمان تغییر می کند، دارد. باید متذکر شد که در این مطالعه فقط از مش استاتیک استفاده شده است. هندسه یک مش استاتیکی با توجه به سیستم مختصات محلی با

زمان تغییر نمی کند. با این وجود مرجع مختصات محلی ممکن است بطور نسبی با یک مرجع مختصات غیر متحرک، حرکت کند. در این مورد شتاب مرجع متحرک باید در معادلات حاکم لحاظ شود. که این موردی جهت شبیه سازی حباب یا استفاده از روش تسخیر سطح است.



شکل (۴-۵) دو نوع از ترتیب ذخیره سازی متغیر الف (فیلد حجمی : مقادیر در مراکز سلول ذخیره می شوند. ب) فیلد وجهی : مقادیر در مراکز سطح ذخیره می شوند. [۲۸]

۴-۵-۲- چیدمان و ذخیره سازی متغیرها

موضوع اول هنگام گسسته سازی معادلات حاکم، انتخاب مکان هایی در ناحیه است که مقادیر وابسته و متغیرهای دیگر ذخیره می شوند. چندین راه در روش حجم محدود وجود دارد که دو نوع آن در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در اولی، متغیرها در مرکز هر سلول از ناحیه مکانی و در مراکز وجوه مرزی ذخیره شده است. این چیدمان ذخیره سازی بعنوان "فیلد حجمی"^۱ در

^۱ volume field

ادامه مطالعه نام برده می شود. دومین چیدمان ذخیره سازی "فیلد سطحی"^۱ نامیده می شود که متغیرها در مرکز هر وجه ذخیره می شوند. انتخاب آشکار، ذخیره همه متغیرهای وابسته در مرکز سلولها (در فیلد حجمی) استفاده از حجم کنترل یکسان برای همه متغیرها ست که چیدمان "پهلوی به پهلوی"^۲ نامیده می شود. در چیدمان "شطرنجی"^۳ سرعت ها در وجوه هر سلول (در یک فیلد سطحی) یا رئوس ذخیره می شوند که از سایر متغیرها تفکیک می شوند. چیدمان پهلوی به پهلوی مزیت مهمی دارد: اول اینکه، تعداد ضرایبی که باید محاسبه شود، مینیمم است. زیرا هر معادله حاکم توسط حجم کنترل یکسان گسسته می شود. دوم اینکه، مزیت مهمی در نواحی حل پیچیده دارد، بخصوص وقتی مرزها ناپیوستگی دارند. بخاطر وجود پیچیدگیهایی در کوپلینگ سرعت-فشار و وقوع نوسانات در فیلد فشار، چیدمان پهلوی به پهلوی برای مدت زمان طولانی استفاده نمی شود. یک راه ساده جهت حل این مشکل توسط آقایان رهی و چو^۴ پیشنهاد شده است که سبب شده چیدمان پهلوی به پهلوی توسط بیشتر کدهای سی اف دی شامل کدهای تجاری اقتباس شود. در این مطالعه چیدمان پهلوی به پهلوی استفاده شده است.

۴-۵-۳- گسسته سازی معادله

هدف از گسسته سازی معادله، تبدیل یک یا چند معادله حاکم به یک سیستم متناظر از معادلات جبری است. حل این سیستم، حل معادلات اصلی را دربرخی از مکان های از پیش تعیین شده مکانی و زمانی تقریب می زند. باتوجه به فرم معادله انتقال استاندارد، برای هر مقدار Δ داریم:

^۱ face field

^۲ collocated

^۳ staggered

^۴ Rhie and Chow

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{time derivative}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho U \phi)}_{\text{convection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{diffusion term}} + \underbrace{S_\phi(\phi)}_{\text{source term}} \quad (18-4)$$

در جاییکه ρ دانسیته، U سرعت، Γ ضریب پخش و $S_\phi(\phi)$ نشان دهنده سورس ترم است. ترم های موجود در معادله انتقال استاندارد، نشان دهنده تغییرات واحد حجمی (مشتق زمانی) ، جریان توسط همرفت واحد حجم (ترم جابجایی) ، نرخ انتقال به دلیل ضریب پخش (ترم پخشی) و نرخ تولید / تخریب واحد حجمی (ترم سورس) است. در بخش زیر معادله انتقال استاندارد بعنوان یک مثال جهت گسسته سازی زمانی و معادله بکار رفته است. با این وجود معادلات انتقال بارها در جریان های چند فازی و دیگر کاربردهای فیزیکی پیچیده بکار رفته اند. البته روش حجم محدود، به گسسته سازی معادلاتی مشابه با معادله انتقال استاندارد محدود نمی شوند. گسسته سازی حجم محدود معادله ۴-۱۸ توسط انتگرال گیری سرتاسر حجم کنترل V_p و زمان فرمول بندی شده است :

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{V_p} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{V_p} \nabla \cdot (\rho U \phi) dV \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{V_p} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{V_p} S_\phi(\phi) dV \right] dt \quad (19-4)$$

بیشتر ترم های مشتق مکانی به انتگرال هایی سطحی S که توسط ترم گوس تولید شده ، تبدیل می شوند:

$$\int_V \nabla \otimes \phi dV = \int_S dS \otimes \phi \quad (20-4)$$

که ds مشتق نقطه ای به سمت خارج بردار سطح می باشد. علامت $\otimes$ جهت نمایش هر محصول تانسوری، داخلی ، خارجی یا کراس و مشتق نسبی : دیورژانس $\nabla \cdot \phi$ ، گرادینت $\nabla \phi$ ، و کرل $\nabla \times \phi$ وقتی مشتق گیری نقطه ای انجام می شود. انتگرالهای سطحی و حجمی توسط طرح های مناسب تقریب زده می شوند.

❖ میان‌یابی سطوح

میان‌یابی مقادیر متغیرها بر روی مراکز سطوح حجم کنترل از مراکز حجم کنترل یکی از مسائل بنیادی در روش حجم محدود است. در زیر توضیحی مختصر راجع به روش‌های گسسته‌سازی اختلاف مرکزی^۱ و بالا دست^۲ می‌پردازیم.

۱. روش بالادست

این روش از دقت مرتبه اول برخوردار بوده و میان‌یابی بر روی سطوح حجم کنترل را با توجه به جهت جریان انجام می‌دهد. این روش در زیر ارایه شده است.

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_P & \text{for } F \geq 0 \\ \phi_N & \text{for } F < 0 \end{cases}$$

که در آن $F = S \cdot (\rho U)_f$ بیانگر شار جرمی است. S ، ρ_f و U_f به ترتیب بردار مساحت، چگالی در مرکز سطح مورد نظر و سرعت در مرکز سطح مورد نظر می‌باشند.

۲. روش اختلاف مرکزی

این روش از دقت مرتبه دو برخوردار بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\phi_f = f_x \phi_P + (1 - f_x) \phi_N \quad (۲۱-۴)$$

$$f_x = \frac{|x_f - x_N|}{|x_f - x_N| + |x_f - x_P|} \quad \text{که در آن } f_x \text{ به صورت } f_x = \frac{|x_f - x_N|}{|x_f - x_N| + |x_f - x_P|} \text{ تعریف می‌شود.}$$

روش‌های مرتبه بالای دیگری از قبیل QUICK مرتبه سه و cubic مرتبه چهار نیز در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

^۱ Central Differencing (CD)

^۲ Upwind Differencing (UD)

❖ عبارت گرادیان^۱

عبارت گرادیان $\nabla\phi$ از طرق متفاوتی قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر از دو روش انتگرال گیری گاوس^۲ و گرادیان عمود بر سطح استفاده شده است که در زیر به تشریح هر یک پرداخته شده است.

۱. انتگرال گیری گاوس

این گسسته سازی با استفاده از تئوری گاوس بر روی انتگرال حجمی و به صورت زیر انجام میپذیرد.

$$\int_V \nabla\phi dV = \int_S dS \phi \approx \sum_f S \phi_f \quad (22-4)$$

که در آن مقدار ϕ_f بر روی سطح f از راههای متفاوتی قابل محاسبه است که از آن جمله می توان به روش اختلاف مرکزی و یا بالادست که در قسمت قبل توضیح داده شد اشاره کرد.

۲. گرادیان عمود بر سطح

گرادیان عمود بر سطح $\nabla_f^\perp\phi$ از حاصل ضرب داخلی گرادیان صفحه ای $\nabla_f\phi$ و بردار یکه عمود بر سطح $\vec{n}$ بدست می آید.

$$\nabla_f^\perp\phi = n \cdot \nabla_f\phi \quad (23-4)$$

در اینجا $\nabla_f\phi$ نمایانگر گرادیان در سطوح حجم کنترل است. گرادیان عمود بر سطح از تقریب زیر قابل محاسبه است.

^۱ Gradient Term^۲ Gauss Integration

$$\nabla_f^\perp \phi = \frac{\phi_N - \phi_P}{|\vec{d}|} \quad (24-4)$$

این تقریب در شبکه بندیهای متعامد از دقت مرتبه دوم برخوردار است.

❖ مشتق زمانی^۱

گسسته سازی عبارت مشتق زمانی $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$ با انتگرال گیری از آن بر روی حجم کنترل مربوطه قابل دستیابی است. روش‌های مختلفی برای گسسته‌سازی این ترم وجود دارد. در زیر به نکاتی از دو روش اولر و پسرو اشاره خواهد شد.

۱. روش ضمنی اولر

این روش از دقت مرتبه اول برخوردار بوده و همواره پایدار است. ای روش به صورت زیر ارایه می‌شود.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV \approx \frac{\rho_P^n \phi_P^n - \rho_P^0 \phi_P^0}{\Delta t} V_P \quad (25-4)$$

که $\phi^n \equiv \phi(t + \Delta t)$ مربوط به مقدار ϕ در پله زمانی حاضر و $\phi^0 = \phi(t)$ مربوط به مقدار ϕ در پله زمانی قبل است.

۲. روش پسرو

این روش از دقت مرتبه دوم برخوردار بوده و مقادیر دو پله زمانی قبل را نیز در پله زمانی حاضر لحاظ میکند. این روش به صورت زیر ارایه می‌شود.

^۱ Time Derivative

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV \approx \frac{3(\rho_P^n \phi_P^n) - 4(\rho_P^0 \phi_P^0) + (\rho_P^{00} \phi_P^{00})}{2\Delta t} V_P \quad (26-4)$$

❖ عبارت جابجایی

گسسته سازی عبارت جابجایی $\nabla \cdot (\rho U \phi)$ با انتگرال گیری بر روی حجم کنترل مورد نظر و استفاده از تئوری گاوس برای تبدیل این انتگرال حجمی به انتگرال سطحی صورت میپذیرد و به صورت زیر نمایش داده می شود.

(27-4)

$$\int_V \nabla \cdot (\rho U \phi) dV = \int_S dS \cdot (\rho U \phi) \approx \sum_f S_f (\rho U)_f \phi_{f(F,S)} = \sum_f F \phi_{f(F,S)}$$

که در آن F شار جرمی عبوری از سطح f بوده و به صورت $F = S_f (\rho U)_f$ تعریف می شود.

❖ عبارت پخش^۱

گسسته سازی عبارت پخش $\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)$ همانند گسسته سازی عبارت جابجایی انجام گرفته و به صورت زیر نمایش داده می شود.

(28-4)

$$\int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \int_S dS \cdot (\Gamma \nabla \phi) \approx \sum_f \Gamma_f (S_f \nabla_f \phi)$$

❖ عبارت چشمه^۲

عبارت چشمه $S_\phi(\phi)$ می تواند یک تابع کلی از متغیر ϕ باشد. لذا قبل از گسسته سازی باید به خطی سازی این عبارت به صورت زیر پرداخت.

$$S_\phi \phi = \phi S_I + S_E \quad (29-4)$$

^۱ Diffusion Term^۲ Source Term

که S_I و S_E توابعی از ϕ هستند. پس از انتگرال گیری از عبارت چشمه خطی شده رابطه زیر بدست خواهد آمد. اهمیت خطی سازی عبارت چشمه در گسسته سازی زمانی نشان داده خواهد شد.

$$\int_V S_\phi(\phi) dV = S_I V_P \phi_P + S_E V_P \quad (30-4)$$

❖ گسسته سازی زمانی

در بخش قبل به گسسته سازی معادلات با انتگرال گیری بر روی حجمهای کنترل محاسباتی و بدست آوردن فرم گسسته شده این معادله در فضای مکانی پرداخته شد.

$$\int_t^{t+\Delta t} [\int_{V_P} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho U \phi) dV] dt = \int_t^{t+\Delta t} [\int_{V_P} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{V_P} S_\phi(\phi) dV] dt \quad (31-4)$$

با توجه به مطالب ارائه شده و با فرض عدم تغییر شکل حجم کنترل در طی زمان می توان معادله ۳۱-۴ را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\int_t^{t+\Delta t} [\rho_P \frac{\phi_P^n - \phi_P^{n-1}}{\Delta t} V_P + \sum_f F \phi_f(F, S)] dt = \int_t^{t+\Delta t} [\sum_f \Gamma_f S_f \nabla_f \phi + S_I V_P \phi_P + S_E V_P] dt \quad (32-4)$$

این رابطه به فرم شبه گسسته^۱ معادله انتقال معروف است. حال میبایستی به انتگرال گیری زمانی معادله ۲۹-۴ پرداخت. عموماً تغییرات ϕ_P در مقادیر مرکز سطح و گرادیانها در طی یک پله زمانی ثابت فرض می شوند. برای گسسته سازی معادله ۲۹-۴ از سه روش صریح^۲، ضمنی^۳ و کرنک نیکلسون^۴ استفاده شده است که در زیر به توضیح هر یک پرداخته می شود.

^۱ Semi-Discretised

^۲ Explicit

^۳ Implicit

^۴ Crank Nicholson

۱. روش صریح

این روش از گسسته سازی صریح عبارات مکانی استفاده کرده و بنابراین از مقادیر پله زمانی قبل ϕ^0 استفاده میکند.

$$\phi_P = \phi_P^0$$

$$\phi_f = \phi_f^0$$

$$S. \nabla_f \phi = S. \nabla_f \phi^* = |\Delta| \nabla_f^\perp \phi^* + K. (\nabla \phi^*)_f \quad (33-4)$$

این روش برای اعداد کورانت^۱ بزرگتر از یک ناپایدار می‌شود. عدد کورانت بر روی سطح یک حجم کنترل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Co = \frac{U_f \cdot S}{d \cdot S} \Delta t \quad (34-4)$$

در آن U_f سرعت جریان در سطح مورد نظر است.

۲. روش ضمنی

این روش از گسسته سازی ضمنی عبارات مکانی استفاده کرده لذا از مقادیر پله زمانی جدید ϕ^n استفاده میکند. این روش همواره پایدار است.

$$\phi_P = \phi_P^n$$

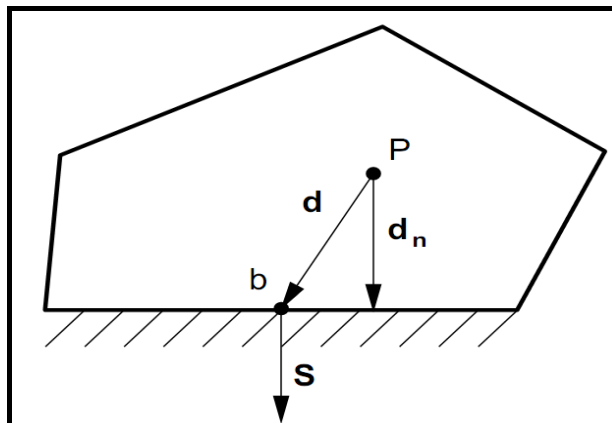
$$\phi_f = \phi_f^n$$

$$S. \nabla_f \phi = S. \nabla_f \phi^n = |\Delta| \nabla_f^\perp \phi^n + K. (\nabla \phi^n)_f \quad (35-4)$$

^۱ Courant Number

شرایط مرزی^۱: [۲۸]

یک مسئله پایستار ، بدون شرایط مرزی و اولیه کامل نمی باشد. شرایط مرزی می تواند شکل های مختلفی داشته باشد ولی بیشتر به دو صورت زیر دیده می شود:



شکل (۴-۶) پارامتر هادر گسسته سازی حجم محدود برای سلولهایی با یک وجه مرزی [۲۸]

❖ دیریکله:

مقدار متغیر وابسته روی مرز را مشخص می کند و به همین جهت "مقدار ثابت"^۲ نامیده می شود.

❖ ون نیومن:

مقدار متغیر نرمال بر مرز را مشخص می کند و به همین جهت "گرادیان ثابت"^۳ نامیده می شود.

^۱ Boundary Conditions

^۲ fixed value

^۳ fixed gradient

۴-۵-۴- معادلات حاکم بر جریان دو فاز همدم

در فرمول‌بندی "یک سیال"^۱ تنها از یک دسته معادلات پایستاری برای مدل‌سازی جریان دو فاز استفاده می‌شود و تغییر در خواص فیزیکی و تنش سطحی از حل معادله‌ی جابجایی ۴-۲۹ محاسبه می‌شود. این نوع فرمول‌بندی در تقابل با فرمول‌بندی "دو سیال"^۲ قرار دارد که همزمان در کل دامنه دو دسته معادلات پایستاری حل می‌شود [۴۶].

خواص فیزیکی دو فاز ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر دو فاز غیرقابل تراکم در نظر گرفته می‌شود. اما انبساط (انقباض) حجم در سطح مشترک به دلیل تبخیر (چگالش) مجاز می‌باشد. هریک از خواص فیزیکی جریان چون چگالی، حجم مخصوص، ویسکوزیته، گرمای ویژه و ضریب گرمایی از رابطه‌ی ۴-۳۶ محاسبه می‌شود. محاسبه‌ی ویسکوزیته از رابطه‌ی ۴-۳۶ مطابق با فیزیک جریان دو فاز نمی‌باشد اما به عنوان یک مدل عددی قابل اعمال است [۴۶]. α همان نشانگر فاز می‌باشد که در روش حجم سیال، نسبت حجم سیال به حجم کل دو فاز می‌باشد. این نوع فرمول‌بندی منجر به پیگیری دقیق سطح مشترک می‌شود.

$$b(x, t) = b_1 + (b_2 - b_1)\alpha \quad (۴-۳۶)$$

البته در نرم افزار اوپن فوم ویسکوزیته از رابطه‌ی (۴-۳۷) محاسبه می‌شود.

$$\mu(x, t) = \frac{\mu_1 \rho_1 \alpha + \mu_2 \rho_2 (1 - \alpha)}{\rho_1 \alpha + \rho_2 (1 - \alpha)} \quad (۴-۳۷)$$

(۱) معادله پیوستگی:

معادله پیوستگی برای کل دامنه فاز از رابطه‌ی (۴-۳۸) محاسبه می‌شود این رابطه هم برای جریان

^۱ One Fluid Method

^۲ Two Fluid Method

متراکم و هم غیرقابل تراکم و هم با تغییر فاز و هم بودن تغییر فاز برقرار است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (38-4)$$

با جایگذاری چگالی از رابطه‌ی (۳۶-۴) و با توجه به رابطه (۳۹-۴) به عبارت (۴۰-۴) بدست می‌آید. در رابطه‌ی ۳۹-۴ S اسکالر و a بردار می‌باشد. لازم به یادآوری است که جریان غیرقابل تراکم

$$\text{می‌باشد بنابراین } \frac{\partial \rho_1}{\partial t} = \frac{\partial \rho_2}{\partial t} = 0 \text{ می‌باشند.}$$

$$\nabla \cdot (Sa) = S \nabla \cdot a + a \cdot \nabla S \quad (39-4)$$

دو ترم سمت راست در معادله‌ی (۴۰-۴) $\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U \cdot \nabla(\alpha)$ همان معادله‌ی حرکت سطح مشترک

۹-۴ است که صفر می‌باشد. بنابراین همان معادله‌ی ساده جریان غیرقابل تراکم $\nabla U = 0$ بدست می‌آید.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U \cdot \nabla(\alpha) + \left(\frac{\rho}{\rho_1 - \rho_2} \right) \nabla U = 0 \quad (40-4)$$

۲) معادلات ممنتوم:

تنش سطحی بصورت ترم چشمه در معادلات ممنتوم ۱۴-۴ در نظر گرفته شده است، از مدل نیروی پیوسته‌ی سطحی ۱۴-۴ برای تنش سطحی استفاده شده است. باز هم تاکید می‌شود که چگالی و ویسکوزیته طبق رابطه‌ی ۳۶-۴ محاسبه شده‌اند.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla U^T + \nabla U)) + \sigma kn \delta(x - x_s) \quad (41-4)$$

۳) معادله انرژی:

برای جریان دو فاز هم دما حل معادلات انرژی بی‌معناست اما در جریان دو فاز دو جزیی (آب و

هوا) که در محدوده‌ی حرارت دهی تغییر فاز روی ندهد معادله انرژی از رابطه‌ی ۴-۴۲ محاسبه می‌شود. چگالی، گرمای ویژه و ضریب هدایت گرمایی از رابطه‌ی ۴-۳۶ محاسبه می‌شوند. که به آن انتقال حرارت جابجایی گفته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p U T) = -\nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4-42)$$

۴-۵-۵- الگوریتم پیزو برای جریان های گذرا

حل توأم معادلات سرعت – فشار در جریان های گذرا دارای مراحل است که به صورت زیر بیان می‌شود.

۱- ابتدا معادله ممنتوم با یک میدان فشار حدسی حل می‌شود. میدان فشار حدسی میتواند از پله زمانی قبل مورد استفاده قرار گیرد. این مرحله به مرحله پیش‌بینی ممنتوم^۱ معروف است. حل معادله ممنتوم، مقادیر جدید سرعت را بدست خواهد داد.

۲- با توجه به سرعت‌های بدست آمده از مرحله قبل، مقدار U قابل محاسبه خواهد بود. و با توجه به آن میتوان به محاسبه میدان فشار پرداخت. این مرحله به مرحله حل معادله فشار^۲ معروف است.

۳- با توجه به میدان فشار بدست آمده سرعت‌ها تصحیح می‌شوند. این مرحله به مرحله تصحیح سرعت صریح^۳ معروف است.

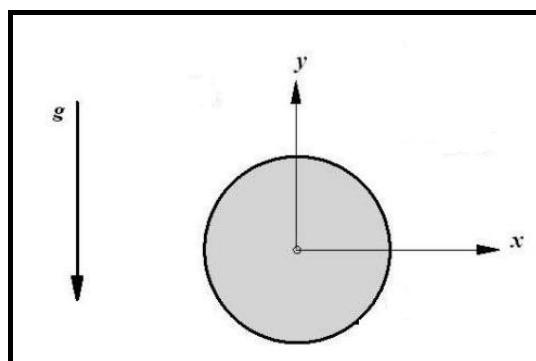
^۱ Momentum Predictor

^۲ Pressure Solution

^۳ Explicit Velocity Correction

۴-۶- مدل سازی عددی

برای مدل سازی در این پروژه از حلگر اینترفوم^۱ موجود در بسته‌ی نرم افزاری اوپن فوم استفاده شده است. این حلگر مبتنی بر روش تعقیب حجم سیال (حجم سیال^۲) می باشد. در بخش اول نتایج، به صحت عملکرد کد عددی در جریان دو فاز هم دما پرداخته می شود. در این بخش با اعمال کد عددی به یک آزمون مطالعاتی و بررسی آن با نتایج تحلیلی و تجربی صحت کارکرد کد عددی موجود در این حلگر تایید می شود، سپس به مدل سازی خیزش حباب کروی در سیال بینهایت پرداخته می شود حرکت حباب بر اثر نیروی شناوری مدل سازی می شود. شکل حباب و عدد رینولدز از حل عددی با داده های استخراجی از نمودار گریس مقایسه می شود، این مدل عددی در دامنه‌ی وسیعی از اعداد رینولدز جواب های قابل قبولی ارائه داد. نرم افزار اوپن فوم مسائل را به صورت پیش فرض غیرپایا حل می کند و برای رسیدن به حالت پایا باید زمان مناسب برای حل معادلات در نظر گرفت تا مقادیر باقیمانده های خطا از مقدار مشخصی کمتر شوند. مدل سازی و شبکه بندی توسط نرم افزار بلاک مش^۳ انجام شده است. در مدل کردن استوانه سعی گردیده تا هندسه و شرایط مرزی به شرایط واقعی نزدیک باشد.



شکل (۴-۷) نمای بالایی استوانه مورد نظر

^۱ interFoam Solver

^۲ VOF Method

^۳ blockMesh

۴-۶-۲- حل مسأله توسط اپن فوم

۱- برای اجرای شبیه سازی ابتدا لازم است با وارد کردن دستور زیر در محیط ترمینال، نمونه مورد نظر از پوشه خودآموز به پوشه "run" انتقال داده شود.

```
cp -r $FOAM_TUTORIALS/interFoam/dambreak $FOAM_RUN
```

۲- برای تغییر پوشه کاری به پوشه "bubble" دستور زیر در ترمینال وارد می شود.

```
Cd $FOAM_RUN/bubble
```

یادآوری! در وارد کردن دستورات در محیط ترمینال به کوچک و بزرگ بودن حروف و فاصله میان آنها دقت شود.

۳- حال باید شرایط مناسب را جهت شبیه سازی ایجاد کنیم. برای این منظور از پوشه "constant" شروع کرده و وارد پوشه "polyMesh" شده و فایل های موجود در آن را پاک کرده و پلی مشی که در مرحله قبل ایجاد کرده ایم، جایگزین می کنیم.

۴- شرایط مرزی موجود در پوشه 0 را مطابق فایل پیوست تنظیم می کنیم. دقت شود که جهت شبیه سازی جریان لخته ای که یک جریان متقارن و متناوب می باشد از هندسه ی متقارن محوری استفاده شده است و شرایط تناوبی^۱ به مرزها اعمال شده است. با اعمال شرایط مرزی تناوبی، مقادیر جریان در خروجی به مقادیر ورودی اعمال می شود. در طول جریان، نیروی ویسکوزیته (اصطکاک) منجر به افت فشار می شود، برای جایگزینی افت فشار بین خروجی و ورودی شرط مرزی فن (پرش فشار) اعمال شده است، بدین ترتیب متوسط گرادیان فشار در طول مدل سازی ثابت مانده است. برای دیواره شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

۵- از پوشه constant فایل transportProperties را باز کرده و خواص هوا و آب را در دمای مورد نظر تنظیم می کنیم.

^۱ Periodic Condition

۶- برای پایداری جواب به روش پیزو بر طبق مرجع پتنکار (۱۹۸۰) باید عدد کورانت^۱ کمتر از یک شود. این ضریب از رابطه زیر بدست می آید :

$$Co = \frac{|U|\delta t}{\delta x}$$

با توجه به مقادیر δx و $|U|$ باید مقداری را برای δt بدست آورد تا عدد کورانت کمتر از یک شود و جواب همگرا شود. البته معمولاً δt از سعی و خطا به دست می آید. مقدار بدست آمده برای δt و تعداد بازه زمانی ذخیره اطلاعات و زمان اجرای برنامه برای رسیدن به حالت پایا را در فایل controlDict که در پوشه system قرار دارد تنظیم می کنیم.

۷- فایل "setFields" موجود در پوشه "system" را پاک کرده و فایل "funkySetFields" موجود در پیوست را جایگزین آن می کنیم.

۸- حل کننده مورد استفاده در این پروژه interFoam نام دارد که مبتنی بر روش حجم سیال می باشد و معادله انتقال در آن برای تعیین کسر حجمی دو فاز برای هر سلول محاسباتی مورد استفاده قرار میگیرد. با اجرای دستور زیر در ترمینال لینوکس مسأله مورد نظر با شرایط ذکر شده شروع به حل می گردد و مقادیر p ، U و γ را در زمان های مختلف در پوشه ای با عنوان شماره همان زمان ذخیره می کند.

```
interFoam > log &
```

دستور فوق مقادیر باقیمانده ها را در یک فایل log ذخیره می کند تا بتوان برای رسم مقادیر باقیمانده ها از آن استفاده نمود.

۱۲- بعد از اتمام حل با اجرای دستور ParaFoam در ترمینال لینوکس می توان نرم افزار Para View را که داده های این مسأله به آن وارد شده اند بالا آورد و از امکانات این نرم افزار در

^۱ Courant Number

پس پردازش داده ها استفاده نمود.

۱۳- خروجی نرم افزار، نتایج سرعت (U)، فشار (p) و گاما (gamma) نقاط مختلف شبکه در زمان های مختلف است. می توان این نتایج را برای پس پردازش به نرم افزارهای معروف ترسیم فرستاد و یا با استفاده از امکانات OpenFOAM، پس پردازش را انجام داد. در این تحقیق، برای بدست آوردن ورتیسیت از یک تابع آماده در OpenFOAM به نام vorticity استفاده شده است. این تابع ورتیسیت ایجاد شده حین بالارفتن حباب را به ازای تمامی زمان ها محاسبه می کند. سپس به کمک تابع دیگری به نام sampleDict مقادیر محاسبه شده شار حرارتی در هر زمان را به تفکیک مختصات نقطه مورد نظر بر روی لوله در یک فایل متنی گزارش داده می شود.

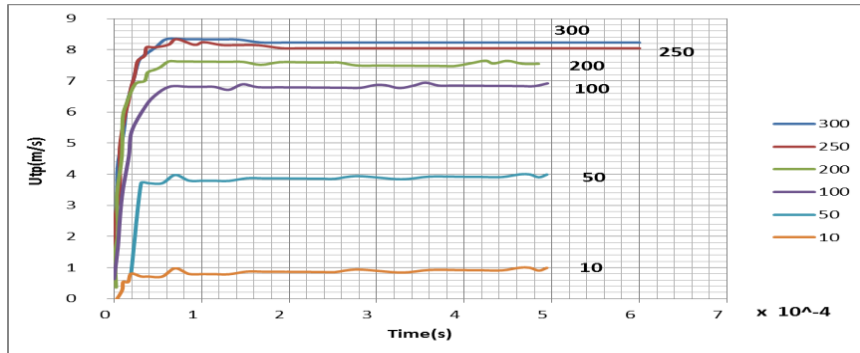
۴-۶-۳- استقلال از شبکه و دامنه محاسباتی

قبل از استخراج هر نتیجه ابتدا باید عدم وابستگی نتایج حاصله از نوع و کیفیت شبکه حل و دامنه محاسباتی مورد بررسی واقع شود. جهت حصول این منظور سرعت حباب در طول زمان حل می نمایم و نتایج را بر حسب تعداد سلول ها در شبکه مورد بررسی قرار می دهیم. مدل سازی بر روی شبکه با سلول های یکنواخت و با تعداد مختلف گره آزموده شده است اندازه سلول ۰/۲۵ میکرومتر که برابر با ۳۵۰ سلول در جهت شعاع می باشد، برای مدل سازی کفایت می کند. مدل سازی تا زمانی که جریان به حالت پایدار برسد ادامه یافته است. همانطور که در شکل ۴-۸ می بینیم جریان اسلاگ در زمانی کمتر از 10^{-4} ثانیه به حالت پایدار می رسد.

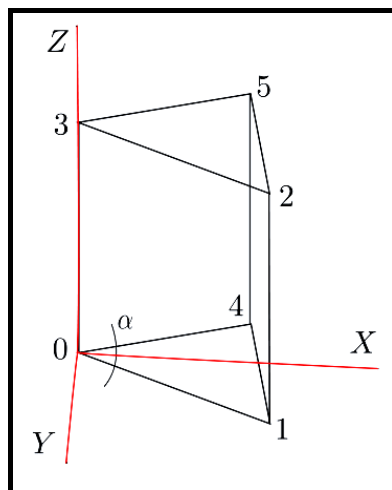
المان بندی مورد استفاده در این تحقیق از نوع شبکه سازمان یافته با المان های هگزاهدرال است. همانند شکل (۴-۹) استفاده شده است که جهت مسایل دو بعدی از و از شبکه متقارن محوری^۱

^۱ Axisymmetric Mesh

آن استفاده می‌گردد. در آن هندسه بصورت یک گوه پنج درجه می باشد و به اندازه یک سلول در طول صفحه تقارن ضخامت دارد. صفحات واقع بر روی گوه با عنوان پچ گوه^۱ تعریف می‌شوند



شکل (۴-۸) نمودار سرعت در طول زمان



شکل (۴-۹) نمایش مش تقارن محوری

که در آن:

```
// *****

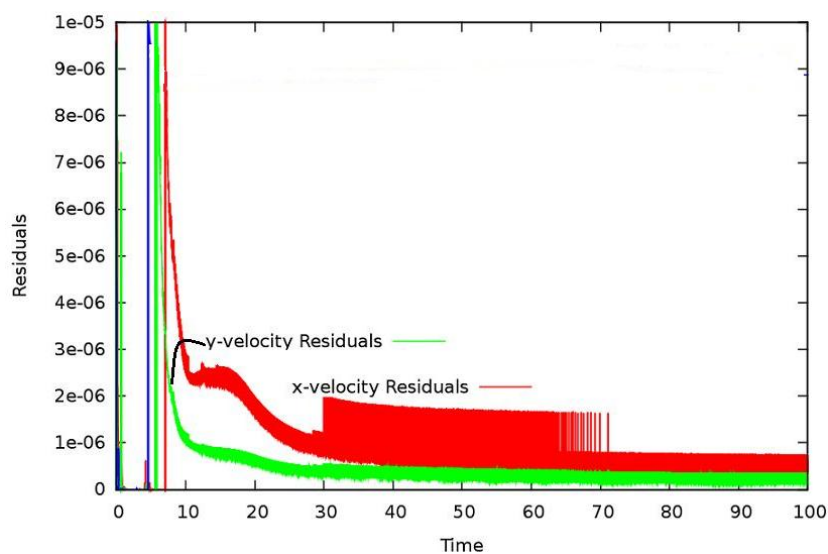
/*Axisymmetric mesh!
  x =R*cos (theta/۲)
  y =R*sin (theta/۲)   theta = angle
  R=۱ , theta= ۰ degree */
// *****
```

^۱ Wedge Type

قسمتی از پوشه پلی مش که در آن هندسه و مش موردنظر تعریف شده، در زیر آورده شده است.

```
convertToMeters ۰.۰۹۳;
vertices
(
  (۰ ۰ ۰) //۰
  (۰.۹۹۹ ۰.۰۴۳۶۲ ۰) //۱
  (۰.۹۹۹ ۰.۰۴۳۶۲ ۵) //۲
  (۰ ۰ ۵) //۳
  (۰.۹۹۹ -۰.۰۴۳۶۲ ۰) //۴
  (۰.۹۹۹ -۰.۰۴۳۶۲ ۵) //۵
);
blocks
(
  hex (۰ ۴ ۱ ۰ ۳ ۵ ۲ ۳) (۴۰ ۱ ۳۰۰) simpleGrading (۱ ۱ ۱)
);
```

حل در این مساله به صورت گذرا می‌باشد. بنابراین برای حل مسائل پایا باید حل تا زمان مناسب ادامه پیدا کند تا به حالت پایا برسد و مقادیر باقیمانده خطا از مقدار مشخصی کمتر شود. برای نمونه مقادیر باقیمانده های خطا جهت سرعت بالارقتن حباب در طول زمان، ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می کنید، در زمان ۱۰۰ ثانیه مقادیر باقیمانده خطای مولفه افقی و عمودی سرعت ثابت بوده و از 10^{-6} کمتر اند. در نتیجه زمان ۱۰۰ ثانیه زمان مناسبی برای رسیدن به حالت پایا است.



شکل (۴-۱۰) نمودار باقیمانده خطا برای حل یک استوانه حاوی آب با یک حباب در مرکز آن

۴-۶-۴- شرایط محیطی و خصوصیات هوا

مدل سازی محاسباتی که برای بالارفتن حباب در سیال ساکن صورت گرفته که مقادیر آن در آورده شده است.

جدول (۴-۱) شرایط محیطی و خصوصیات آب و هوا در مدل سازی محاسباتی

property	فاز دو (هوا)	فاز یک (آب)
nu	1.5×10^{-4}	۰.۰۰۱۴۱۴۳۲
rho	۱.۲	۹۹۸
sigma	۰.۰۶۲۶	

فصل ۵:

نتایج و تفسیر آنها

۵-۱- مقدمه:

مطالعات تجربی در بررسی جامع جریان‌های دو فاز در جریان رو به بالا در یک لوله عمودی در شرایط آزمایشگاهی دارای محدودیت‌هایی است. از جمله این محدودیت‌ها، عدم توانایی در مشاهده میدان سرعت، وقت گیر بودن آزمایشات و محدود بودن انجام آزمایشات در اعداد رینولدز خاص است. انجام هر گونه تغییر در مدل مورد آزمایش هزینه بر بوده و نیاز به وقت زیادی برای آزمایشات مربوط به طراحی، ساخت و کالیبره کردن ابزار اندازه‌گیری مدل جدید دارد. با گزینش سخت افزارها و نرم افزارهای کامپیوتری نسبت به سیستم‌های آزمایشگاهی به سادگی بیشتر می‌توان با استفاده از روش‌های محاسبات عددی حالت‌های بیشتری از هندسه لوله‌های مختلف و شرایط آزمایشگاهی مختلف را مورد بررسی قرار داد. در این فصل مدل‌سازی عددی جریان دو فاز آب - هوا در یک لوله قائم با استفاده از نرم افزار این فوم تشریح می‌گردد. این نرم افزار رایگان، کد باز و تحت سیستم عامل لینوکس است. پس از مدل‌سازی کامپیوتری داده‌های عددی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

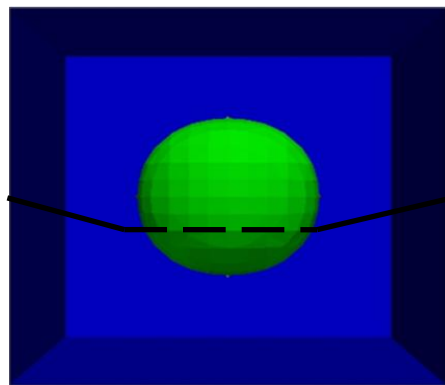
۵-۲- آزمون مطالعاتی کد دو فاز

یکی از پارامترهای مورد توجه در مدل‌سازی به روش پیگیری سطح، نحوه‌ی پیاده‌سازی تنش سطحی بین دو فاز می‌باشد. در این بخش با آزمون استاتیک صحت کد دو فاز و دقت پیاده‌سازی تنش سطحی در کد عددی نشان داده می‌شود.

۵-۲-۱- آزمون ایستا

در شکل ۵-۱ حباب در سیال ساکن نامتناهی با گرانش صفر نشان داده شده است. تنش سطحی، فشار اضافی در داخل حباب ایجاد می‌کند. با حل عددی معادلات پایستار جریان (معادلات ناویر-استوکس) توزیع فشار در کل دامنه محاسبه می‌شود. توزیع فشار در راستای خط عبوری از مرکز حباب در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. اختلاف فشار بین داخل و خارج حباب از رابطه‌ی تحلیلی یانگ-لاپلاس (۵-۱) بدست می‌آید. بدیهی است که هرچه قدر اندازه جواب از حل عددی به حل تحلیلی نزدیک‌تر باشد، پیاده‌سازی تنش سطحی در کد عددی بهتر صورت گرفته است.

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} \quad (۵-۱)$$



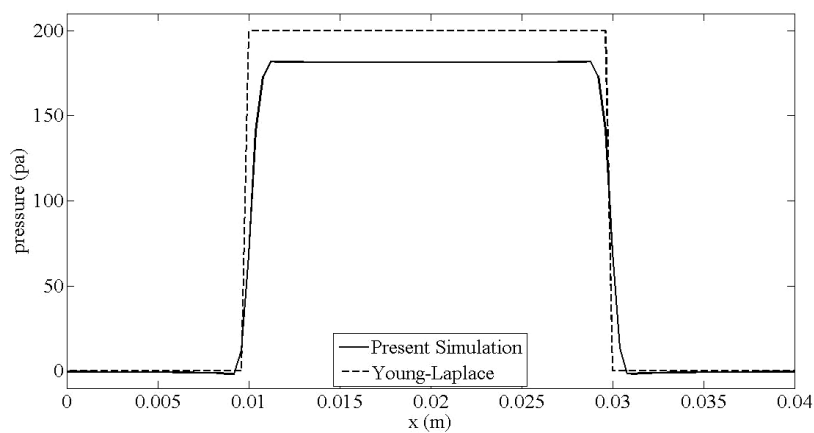
شکل (۵-۱) حباب کروی در سیال نامتناهی

خطا در محاسبه‌ی اختلاف فشار بین داخل و خارج حباب از رابطه‌ی (۵-۱) صورت می‌گیرد. که در آن p_1 و p_2 میانگین فشار در داخل و خارج حباب به شعاع R می‌باشد. مدل‌سازی بر روی مش‌های یکنواخت هگزاهدرال^۱ صورت گرفت، کاهش ابعاد مش اندازه خطا را کاهش می‌دهد و مقدار دقیق‌تری از اندازه‌ی اختلاف فشار ارایه می‌دهد. مدل‌سازی بر روی اندازه‌های مختلف مش

^۱ Hexahedral

صورت گرفت با کاهش اندازه مش از 2 mm به 0.5 mm ، خطای محاسبه‌ی پرش فشار از $14/7$ درصد به $9/4$ درصد کاهش یافته است، که این خطای پایین نشانده ندهی آن است که تنش سطحی بخوبی در کد عددی اعمال شده است.

$$Error = \frac{(p_1 - p_2) - \frac{\sigma}{R}}{\frac{\sigma}{R}}$$



شکل (۵-۲) مقایسه توزیع فشار از حل عددی معادلات ناویر استوکس و جواب تحلیلی یانگ-لاپلاس

جدول (۵-۱) : داده‌های فیزیکی آزمون ایستا

m^3	$0.4 \times 0.4 \times 0.4$	ابعاد شبکه محاسباتی
-	$80 \times 1 \times 400$	تعداد گره
m	0.1	شعاع حباب
m	مرکز دامنه‌ی محاسباتی	مکان اولیه حباب
kg/m^3	1000	چگالی مایع
$kg/m.s$	0.1	ویسکوزیته مایع
kg/m^3	1.2	چگالی گاز
N/m	0.7	کشش سطحی

داده‌های فیزیکی آزمون ایستا در جدول ۵-۱ آمده است. برای آنکه جواب‌ها تحت تاثیر شرایط مرزی دامنه نباشند، کافی است که ابعاد دامنه محاسباتی دو تا سه برابر قطر حباب باشد. شرایط مرزی فشار، سرعت و حجم سیال، گرادیان صفر می‌باشد.

۵-۳- مدل سازی تغییر شکل حباب

پس از بررسی کد با آزمون تحلیلی استاتیک، کد بر روی یک مسئله‌ی واقعی‌تر اعمال شده است. مدل سازی حباب در سیال نامتناهی، یک مسئله‌ی کلاسیک می‌باشد که هنوز مورد توجه است، شاید علت توجه به این مسئله کلاسیک به دلیل وجود حباب در بسیاری از فرآیندهای صنعتی باشد. لزوم مدل سازی فرآیندهای پیچیده‌ی جریان دو فاز همچون جدایش یا برهمکنش حباب‌ها با همدیگر، نیاز به شناخت دقیق دینامیک یک حباب دارد. مرجع [۳۴] مرور جامعی بر روی کارهای آزمایشگاهی در زمینه‌ی رشد حباب در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی داشته است. مدل سازی حباب به دو بخش: رشد حباب و جدایش حباب از دیواره تقسیم می‌شود. در این بخش تنها رشد حباب در یک سیال نیوتنی و در محیط نامتناهی مدنظر است. سرعت تعادل و شکل حباب با نقشه‌ی رژیم گریس^۱ [۳۵] مقایسه شده است. طبق آزمایش‌های تجربی، شکل حباب تحت تاثیر اعداد بی بعد اتوس، مورتون و رینولدز ۵-۶ قرار دارد.

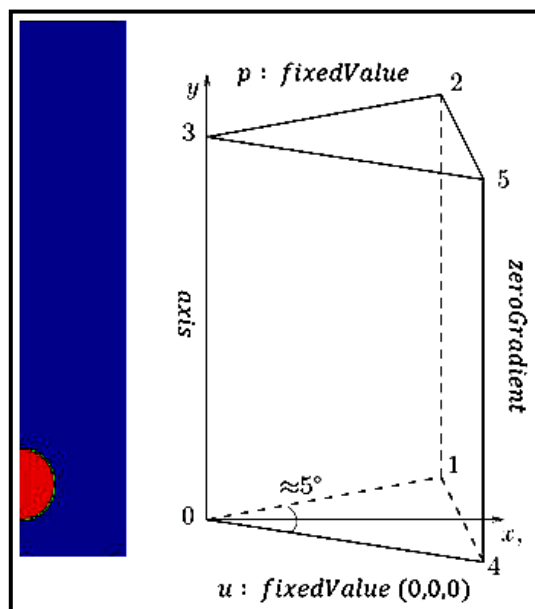
$$E_o = \frac{g \Delta \rho d^2}{\sigma}, M_o = \frac{g \Delta \rho \mu^4}{\rho_L^2 \sigma^3}, Re = \frac{\rho_L du_T}{\mu} \quad (2-5)$$

که d و u_T قطر معادل حباب و سرعت حدی^۲ می‌باشد. در اینجا قطر معادل حباب، قطر کره‌ای

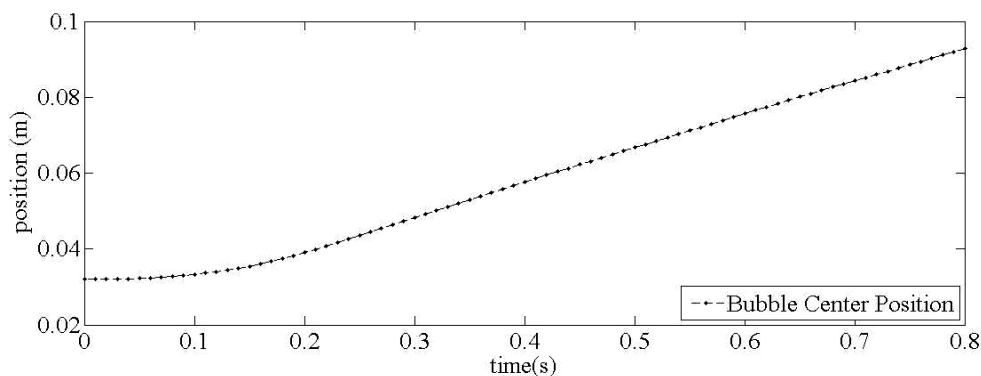
^۱ Grace

^۲ Terminal Velocity

است که حجم آن کره با حجم حباب برابر باشد. حباب خیلی سریع به سرعت تعادلی خود می-رسد. سرعت تعادلی نشانگر بالانس نیروهای وارد بر حباب (نیروی درگ و نیروی شناوری) می-باشد. شبکه متقارن محوری^۱ با تعداد 400×80 گره برای مدل سازی انتخاب شده است. پهنای دامنه محاسباتی $1/5$ برابر شعاع حباب می باشد، این مقدار، شرط مدل سازی در سیال نامتناهی را ارضا می کند، درازای دامنه محاسباتی 4 برابر پهنای می باشد. در شکل ۳-۵ هندسه شبکه و شرایط مرزی نشان داده شده است، در زمان صفر یک حباب کروی در دامنه محاسباتی قرار داده شده است. فاصله ای حباب کروی از دیوار پایینی 2 برابر شعاع می باشد.



شکل (۳-۵) هندسی و شرایط مرزی مدل عددی خیزش حباب



شکل (۴-۵) تغییر مکان مرکز جرم حباب، شیب نمودار با سرعت تعادلی برابر است

^۱ Axisymmetric

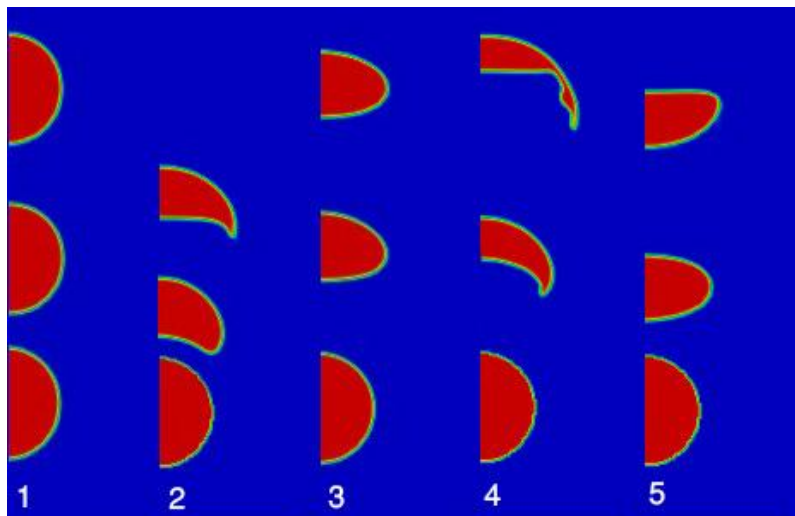
سرعت تعادلی حباب از اندازه‌گیری تغییر مکان مرکز جرم حباب در زمان محاسبه می‌شود. در شکل ۴-۵ تغییرات مرکز جرم حباب (برای یک حباب بیضوی^۱) نشان داده شده است. سرعت تعادلی برابر با شیب خط نمودار تغییر مکان می‌باشد. قطر اولیه‌ی حباب در جدول ۱-۵ آمده است، در این جدول مقدار عدد رینولدز از حل عددی (Re_c) و مقدار رینولدز (Re) از نقشه‌ی رژیم گریس نشان داده شده است. تغییرات شکل حباب در طول حرکت در شکل ۵-۷ نشان داده شده است و با نقشه‌ی رژیم گریس در شکل ۵-۸ مقایسه شده است. در شکل ۵-۵ حباب کلاه کروی^۲ حالت ۶ در جدول ۲-۵ نشان داده نشده است، به دلیل سرعت بزرگ خیزش، این حباب در همان لحظات اول از هم می‌پاشد و به دو حباب کوچکتر تقسیم می‌شود.

جدول (۲-۵) مقایسه‌ی بین رینولدز از حل عددی و داده‌های نمودار گریس

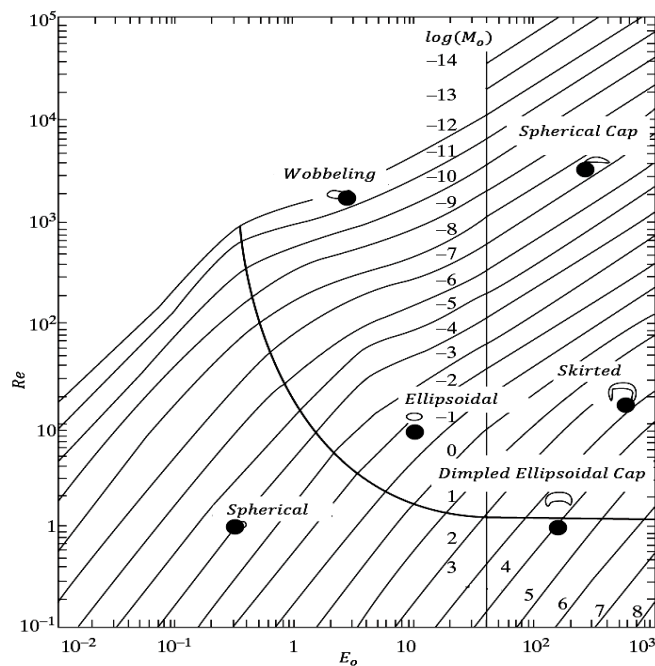
شکل حباب	$d(\text{mm})$	Eo	$\log(M)$	Re	Re_c
۱ Spherical	۱/۵۰	۰/۳۵	-۳/۹	۱	۱/۰۲
۲ Dimpled ellipsoidal	۳۲/۰	۱۶۰	۳/۵	۱/۵	۰/۸۹
۳ Ellipsoidal	۸/۰	۱۰	-۲/۱	۱۲	۸/۳۴
۴ Skirted	۶۲/۰	۶۰۰	۲/۲	۲۳	۱۸/۲۴
۵ Wobbling	۴/۰	۲/۵	-۱۱/۸	۲۰۰۰	۱۸۳۴
۶ Cap Spherical	۴۵/۰	۳۲۰	-۷/۶	۴۲۰۰	۳۷۶۵

^۱ Dimpled ellipsoidal

^۲ Spherical Cap



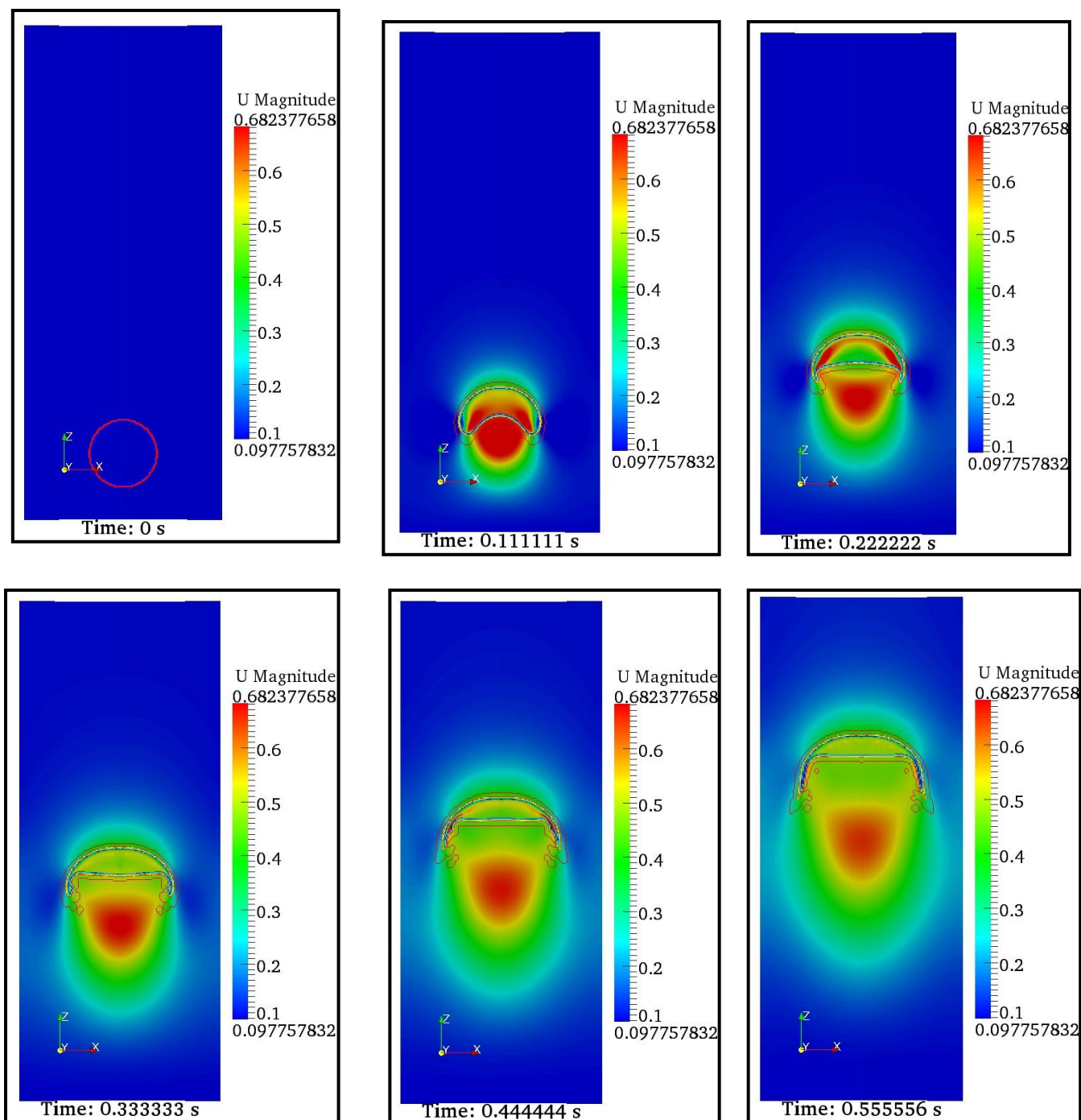
شکل (۵-۵): تغییر شکل حباب در طول حرکت



شکل (۵-۶): مقایسه بین نتایج مدل سازی (●) و رژیم حباب گریس

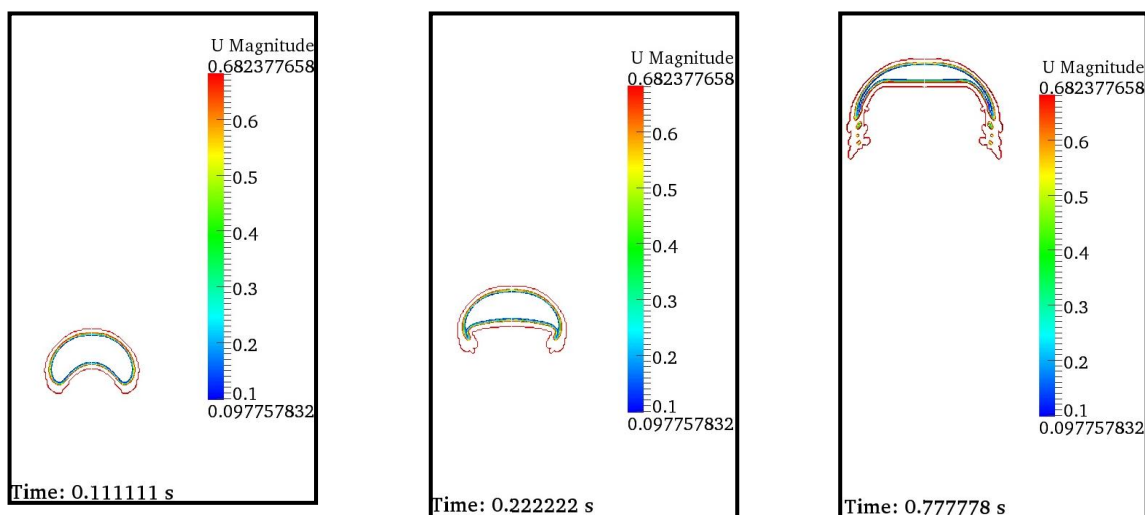
همانطور که از جدول ۵-۲ و شکل‌های ۵-۶ و ۵-۵ استنباط می‌شود، شکل حباب و سرعت تعادلی توافق مناسبی با داده‌های تجربی دارد. اختلاف کمی که بین داده‌های تجربی و عددی وجود دارد را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد، دسته اول خطا در اندازه‌گیری تجربی و اینکه آیا سیالی که در آن آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است خالص بوده یا نه؟ و دسته‌ی دوم خطای

عددی و ضعف در پیگیری صحیح سطح می‌توان دانست. در شکل (۷-۵) توزیع میدان سرعت به همراه مرز مشترک دو سیال در زمان‌های مختلف حل آورده شده است.



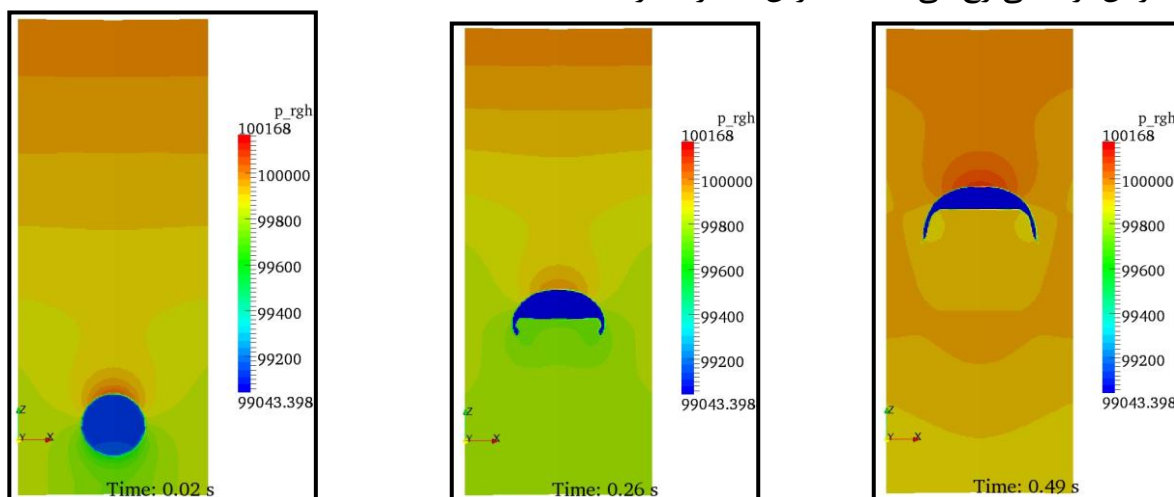
شکل (۷-۵) کانتورهای سرعت حین بالارفتن حباب کروی در سیال ساکن در زمانهای مختلف (حباب شماره ۴ در جدول ۲-۵)

همانطور که مشاهده می شود در حین بالا آمدن حباب، در ناحیه پشت آن مطابق انتظار جریان برگشتی ایجاد شده و ماکزیمم سرعت نیز در این ناحیه رخ داده است. در واقع به دلیل حرکت حباب در ستون آب، اختلاف فشاری بین قسمت جلو و پشت آن ایجاد شده و این گردابه به عنوان یک نیروی مقاوم فشاری در مقابل حرکت حباب عمل می کند. در شکل (۵-۸) مرز مشترک میان دو سیال با وضوح بیشتری آورده شده است.



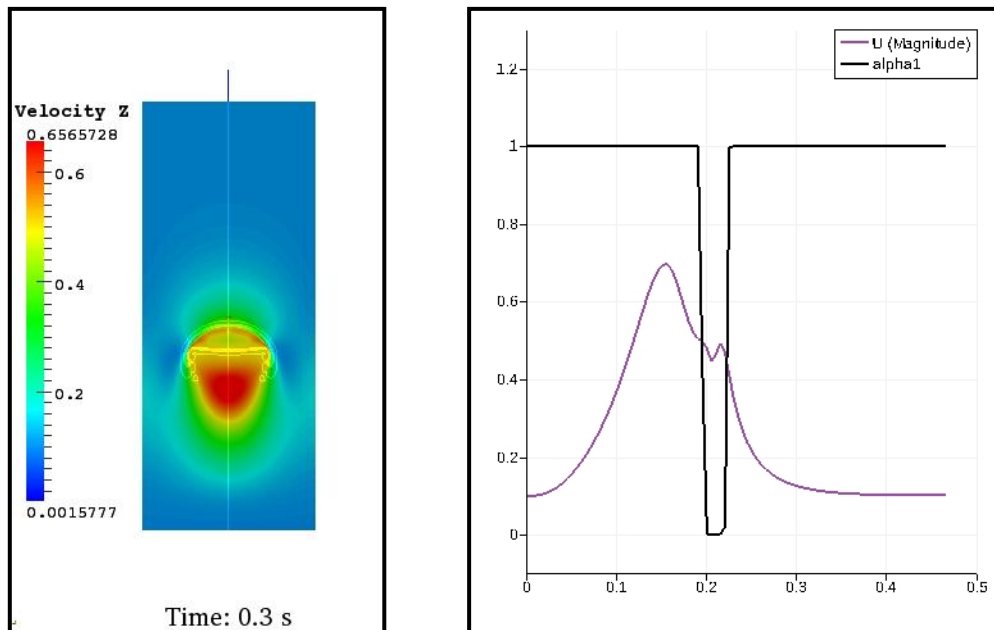
شکل (۵-۸) کانتورهای کسر حجمی دوفاز در زمانهای مختلف (حباب شماره ۴ در جدول ۵-۲)

همانطور که در شکل (۵-۹) پیداست فشار نسبی در قسمت جلوی حباب نسبت به پشت آن در زمان های مختلف حل بیشترین مقدار خود را داراست این در حالی است که در ناحیه پشت آن که جریان برگشتی رخ می دهد کمترین مقدار فشار ایجاد شده است.

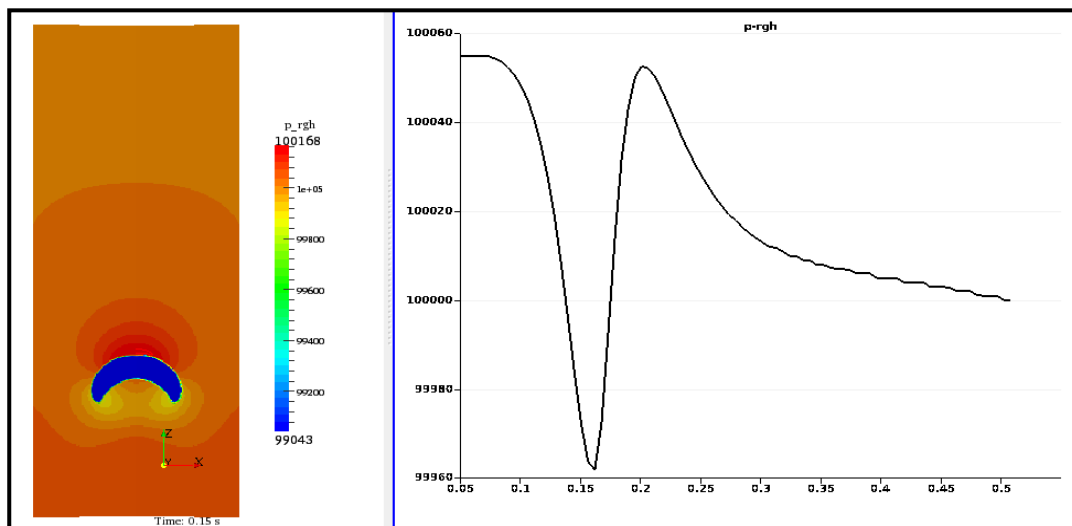


شکل (۵-۹) کانتورهای فشار حین بالارفتن حباب کروی در سیال ساکن (حباب شماره ۴ در جدول ۵-۲)

در شکل (۵-۱۰) توزیع میدان ورتیکال در حین بالا آمدن حباب در ستون مایع به همراه نمودار تغییرات سرعت نمودار حباب و همچنین کسر فازی آن در یک زمان مشخص آورده شده است. از تلاقی دو نمودار نشان داده شده می توان سرعت حباب را تعیین نمود. مقدار سرعت در این لحظه خاص برابر ۰.۴۸ متر بر ثانیه می باشد. ماکزیمم سرعت نیز همانطور که مشاهده می شود قبل از رسیدن به حباب و در ناحیه جریان برگشتی تشکیل شده در پشت آن ایجاد شده است.

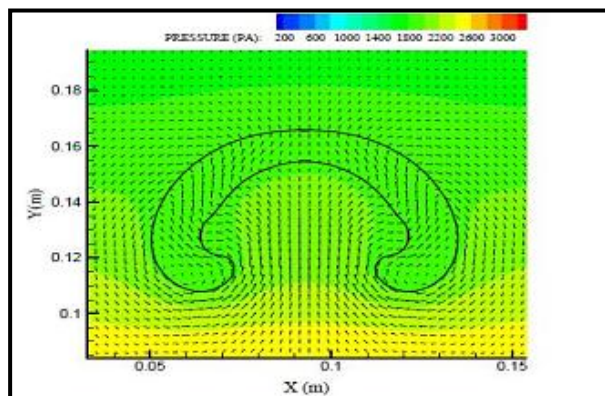


شکل (۵-۱۰) نمودار تغییرات سرعت حباب و کسر فازی حباب در حین بالا رفتن در سیال: نمودار افقی نشان دهنده طول مسیر حرکت حباب و عمودی نشان دهنده سرعت حباب است.

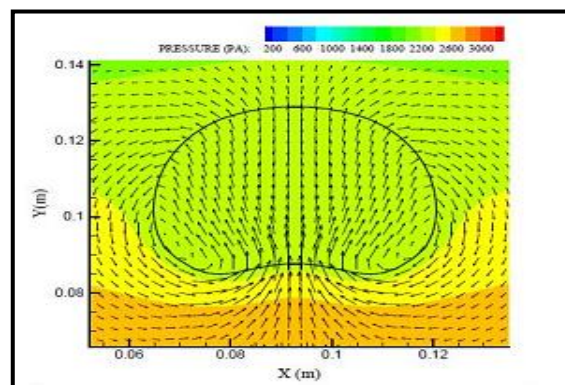


شکل (۵-۱۱) کانتور فشار حباب به همراه نمودار فشار در طول لوله در همان لحظه: محور افقی طول مسیر حرکت حباب و عمودی فشار استاتیکی

۵-۳-۲- مقایسه با نتایج آزمایشگاهی



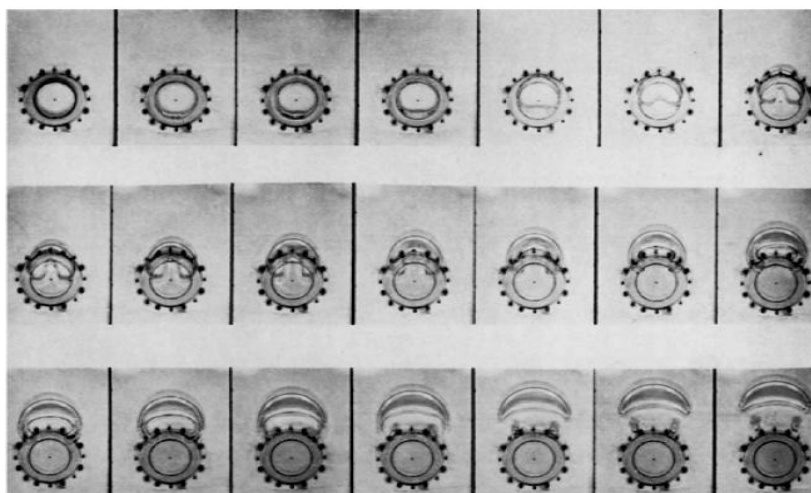
(ب)



(الف)

شکل (۵-۱۲) الف) تغییر شکل ناشی از حرکت حباب به همراه کانتورهای فشار و بردارهای سرعت ب) کم شدن اختلاف فشار و شدت جریان

با دقت در آزمایش صورت گرفته توسط والتر و دیویدسون [۴۷]، با آنچه که از طریق شبیه سازی بدست آمد، مشاهده می شود این نتایج به هم نزدیک هستند و همدیگر را تایید می کنند. والتر و دیویدسون تلاش نمودند تا با استفاده از دو دیواره بلند و فاصله گپ ناچیز بین این دو دیواره، به صورت آزمایشگاهی شرایطی را فراهم کنند تا بتوان حرکت دو بعدی حباب را بررسی کنند. در آزمایش آنان از دو دیواره به ابعاد $1200 \times 254 \text{ mm}$ استفاده شده است که به فاصله 9.5 mm از هم قرار گرفته شده اند. نتایج این آزمایش که قابل مقایسه با نتایج بدست آمده از شبیه سازی می باشد در شکل ۵-۱۳ آورده شده است :



شکل (۵-۱۳) نتایج آزمایشگاهی حرکت حباب بین دو سطح موازی [۴۷]

۵-۳-۳- تحلیل مساله

تغییر شکل حباب معمولاً به صورت فرو رفتگی از ناحیه پایین حباب می باشد. علت این امر آن است که در اثر اختلاف فشار بین سطح پایینی و بالایی حباب نیرویی از مرز پایین حباب به سمت بالا وارد می گردد. در صورتی که مقدار کشش سطحی نتواند از تغییر شکل حباب جلوگیری کند، فرو رفتگی در وسط حباب که بیشترین اختلاف فشار را با سطح بالایی دارد ایجاد می شود. انحنای بوجود آمده در اثر تغییر شکل، مقدار کشش سطحی را به شدت افزایش می دهد و ممکن است بتواند بر اختلاف فشار غلبه کند. در غیر این صورت این رشد انحنای افزایش یافته تا در نهایت مقدار کشش سطحی برابر اختلاف فشار گردیده یا آنکه حباب پاره شود. در داخل حباب نیز به علت اختلاف فشار بین هوای پایینی و بالایی، جریان از سمت پایین حباب به سمت بالای آن ایجاد می گردد، ولی به علت چگالی کمتر هوا نسبت به آب، این حرکت با سرعت بیشتری نسبت به محیط بیرون حباب صورت می گیرد. در نتیجه باعث ایجاد حرکت نسبی در سطح حباب می گردد. از طرفی به علت آنکه کشش سطحی در جهت عمود بر انحنای سطح وارد می شود، این نیرو در ابتدا به علت حالت تحدب حباب، به حرکت سطح مشترک به سمت بالا کمک می کند، در نتیجه سطح پایین حباب به سمت بالا حرکت می کند.

۵-۴- مدل سازی جریان اسلاگ

جریان اسلاگ^۱ شامل جریان متناوب و پیوسته‌ی حباب‌های تقریباً یکسان است که با لایه‌ی نازک سیال از دیواره جدا می‌شوند. جریان لخته‌ای در لوله، را متقارن محوری و متناوب در نظر می‌گیریم. بنابراین برای کاهش حجم محاسبات، هندسه متقارن محوری و شرایط تناوبی^۲ در مرزهای ورودی و خروجی اعمال شده است. با اعمال شرایط مرزی تناوبی، مقادیر جریان در خروجی به

^۱ Slug

^۲ Periodic Condition

مقادیر ورودی نگاشت می‌شود. با عبور جریان از لوله، نیروی لزجت (اصطکاک) منجر به افت فشار در طول مسیر می‌شود برای جایگزینی فشار افت کرده بین خروجی لوله و ورودی به آن پرش فشار اعمال شده است، بدین ترتیب متوسط گرادیان فشار در طول مدل سازی ثابت مانده است.

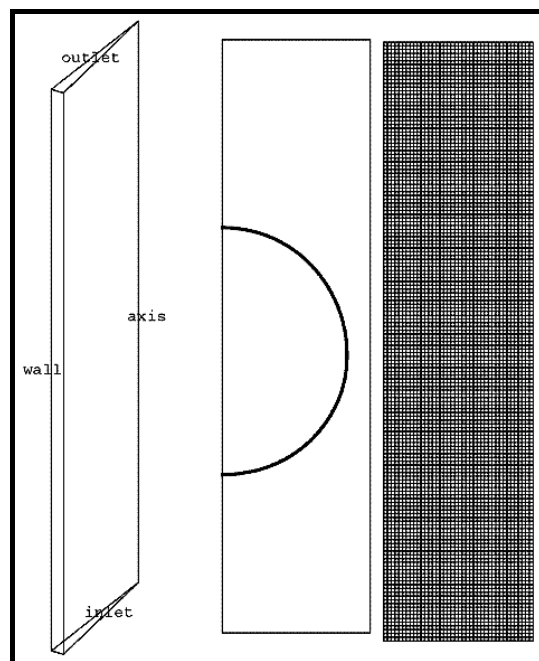
$$P_{outlet}(L) - P_{inlet}(0) = gradp \times L \quad (3-5)$$

برای دیواره شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. در زمان صفر یک حباب طبق رابطه‌ی ۴-۵ در دامنه قرار داده شده است.

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 + \left(\frac{z}{L} - 0.5\right)^2 = (0.75\alpha)^{\frac{2}{3}} \quad (4-5)$$

که α کسر تهی^۱، R شعاع و L طول دامنه محاسباتی است. مقدار گرادیان فشار و کسر تهی در هر شبیه سازی مقدار ثابتی است. مدل سازی تحت شرایط مختلف اولیه، گرادیان فشار، کسر تهی و دوره‌ی حباب صورت پذیرفته است. این مقادیر در جدول ۳-۵ با قلم پر رنگ آمده است. دوره‌ی حباب، نسبت طول به شعاع لوله می‌باشد. جریان در زمان صفر در شرایط سکون قرار دارد.

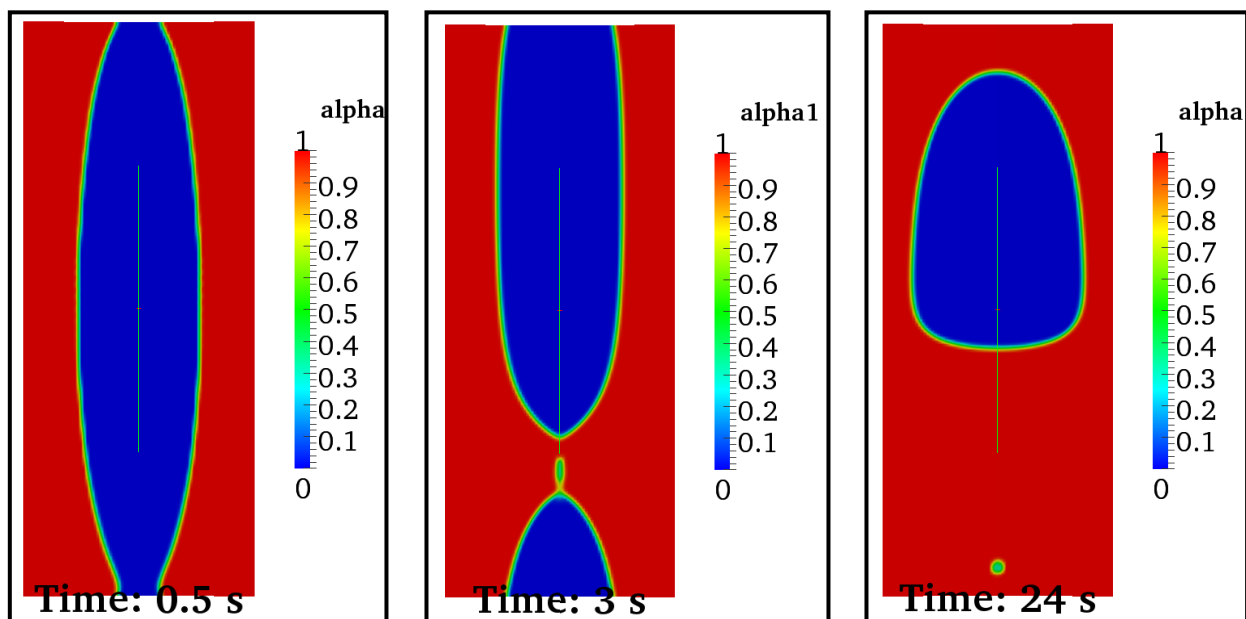
^۱ Void Fraction



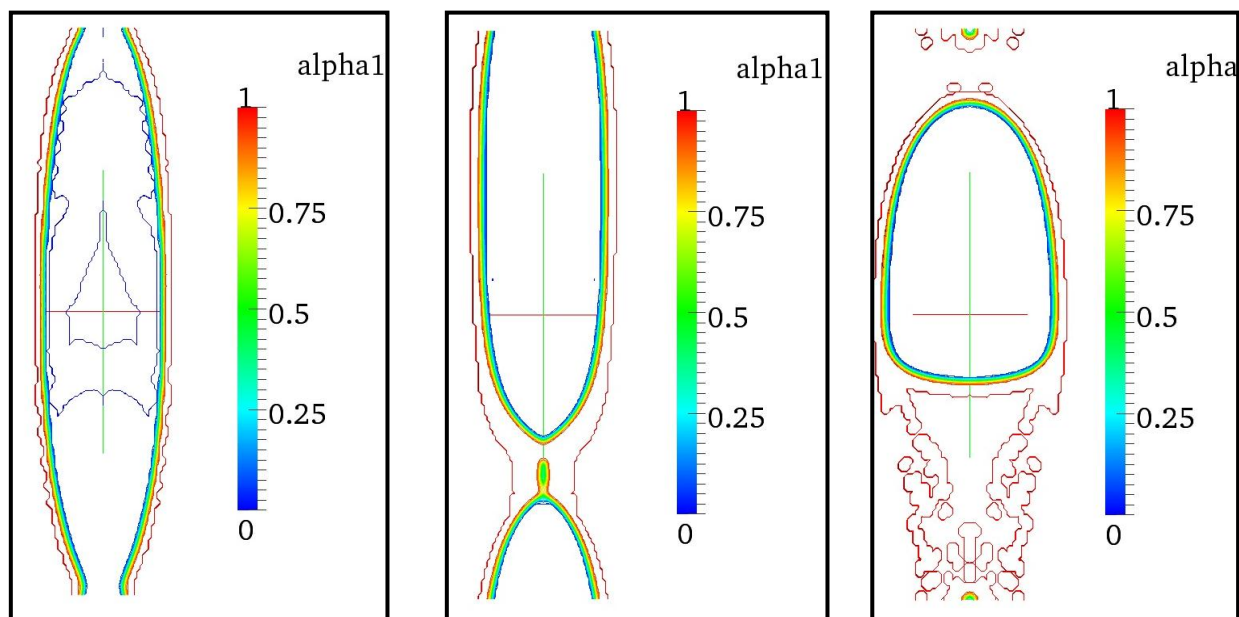
شکل (۵-۱۴) از چپ به راست: هندسه‌ی متقارن محوری، حباب در لحظه‌ی صفر و مش یکنواخت

جدول (۵-۳) شرایط آماده‌سازی مدل عددی و نتایج حاصل از حل عددی

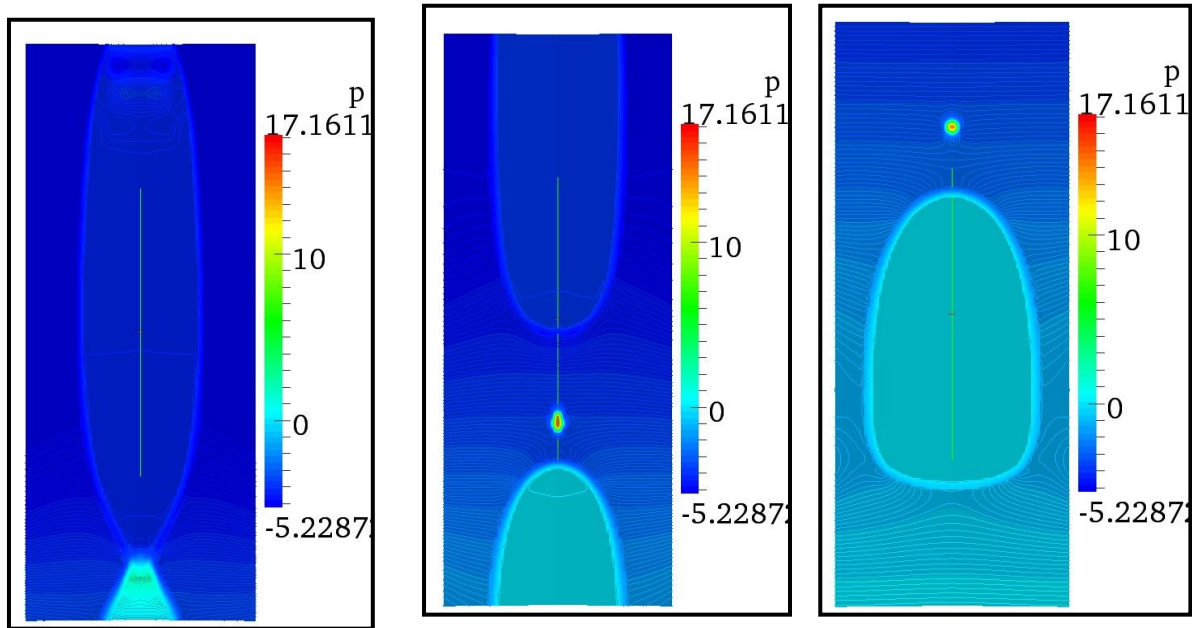
Regime type	initial velocity	Bubble period	Pressure gradient	void fraction	
Slug	۰	۵	۸.۶	۰.۲	A
Slug	۰	۵	۴۳.۰	۰.۲	B
Slug To Churn	۰	۵	۱۲۹.۰	۰.۲	C
Slug	۰	۱۰	۴۳.۰	۰.۲	D



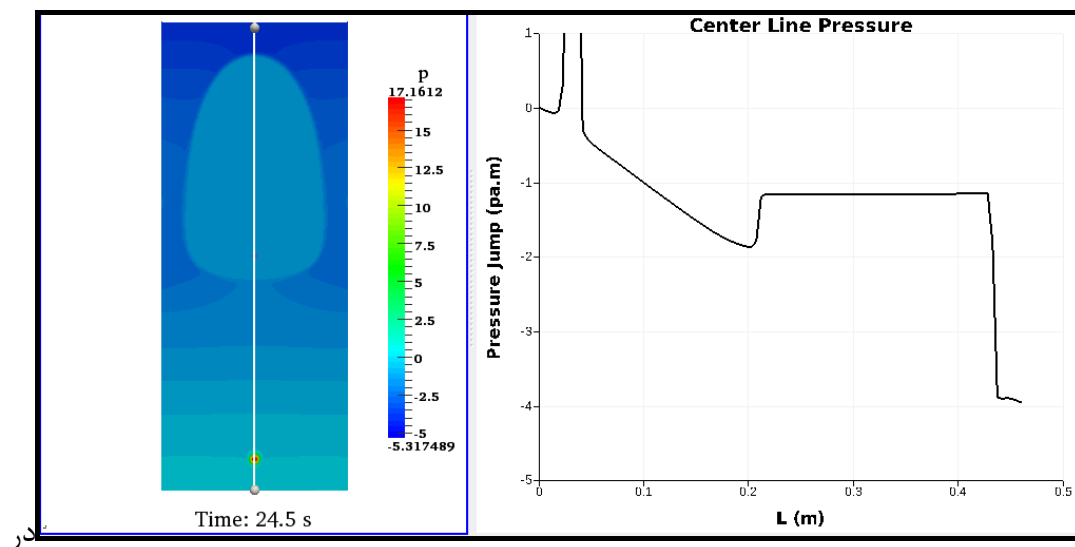
شکل (۵-۱۵) کانتورهای کسر فازی حباب اسلاگ (شماره A در جدول ۵-۳)



شکل (۵-۱۶) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۵-۳)

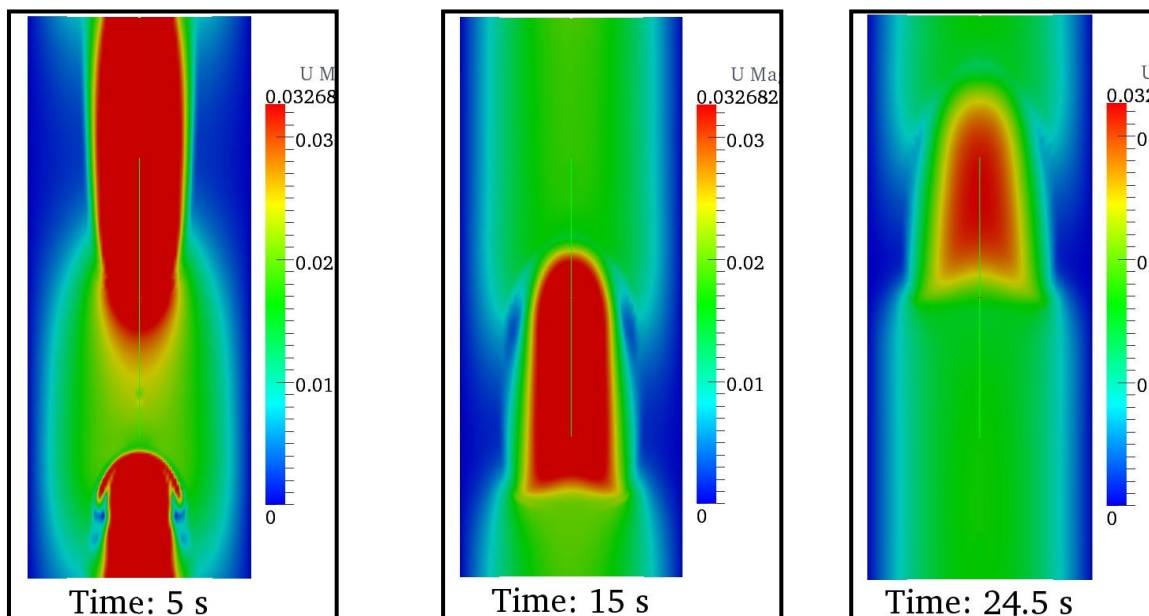


شکل (۵-۱۷) کانتورهای فشار در سه زمان مختلف حین بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۵-۳)



شکل (۵-۱۸) نمودار افزایش فشار در طول مسیر حرکت حباب: محور افقی طول مسیر بالارفتن حباب و عمودی تغییر فشار در طول حرکت است.

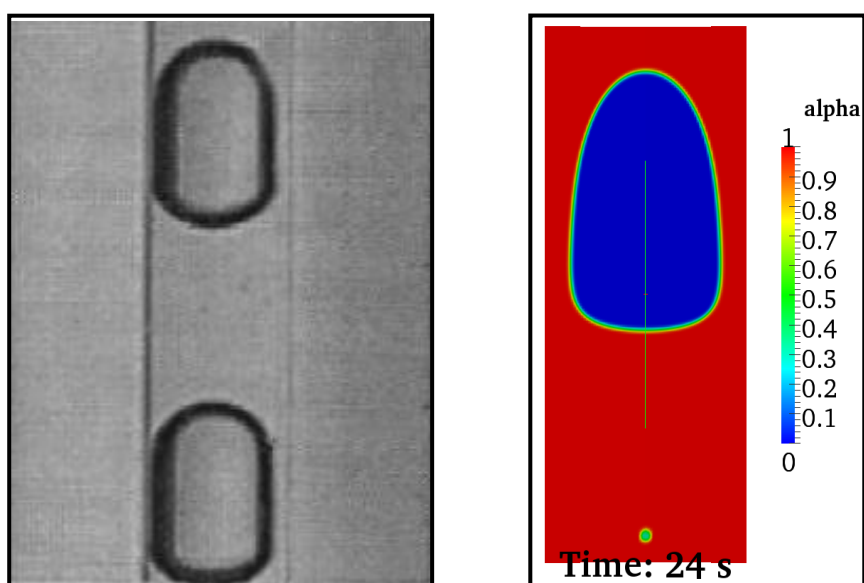
سه شکل بالا، خطوط فشار ثابت و نیز توزیع فشار مشخص هستند. همچنین داخل حباب فشار ثابت می باشد. در شکل بالا نمودار پرش فشار در طول مسیر حرکت حباب می باشد، همانطور که از مقایسه کانتور فشار با نمودار نیز میتوان فهمید فشار داخل حباب ثابت است و پرش جهت به اندازه ۴ پاسکال متر است.

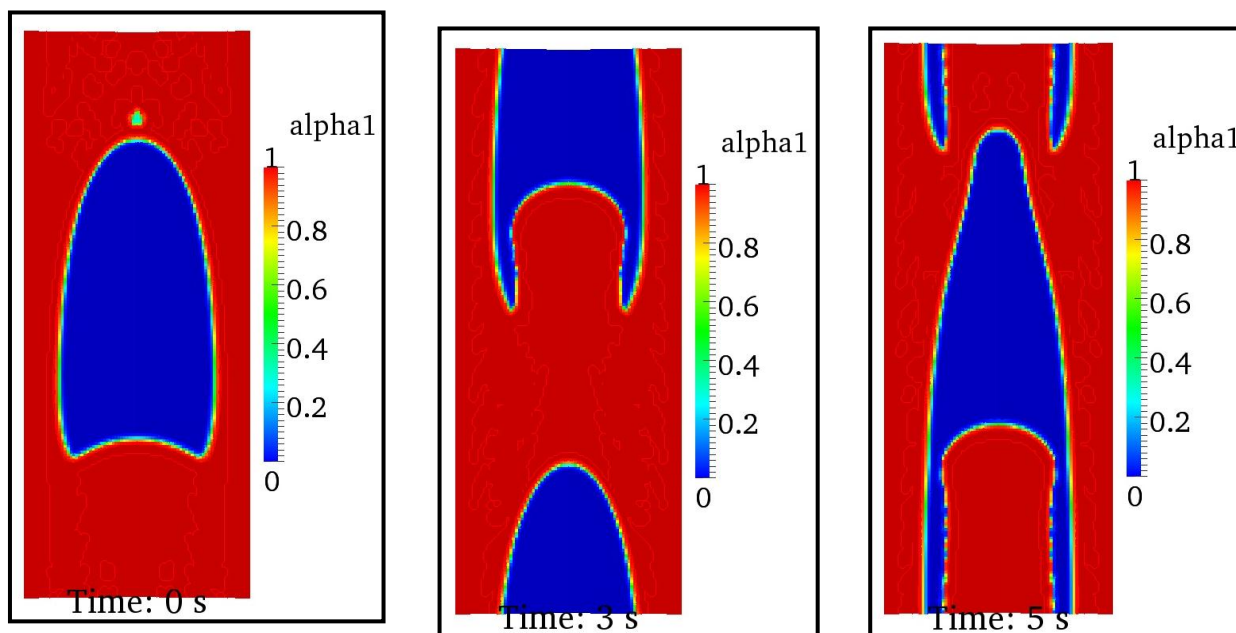


شکل (۵-۱۹) کانتورهای سرعت در سه زمان مختلف برای بالارفتن حباب (شماره A در جدول ۵-۳)

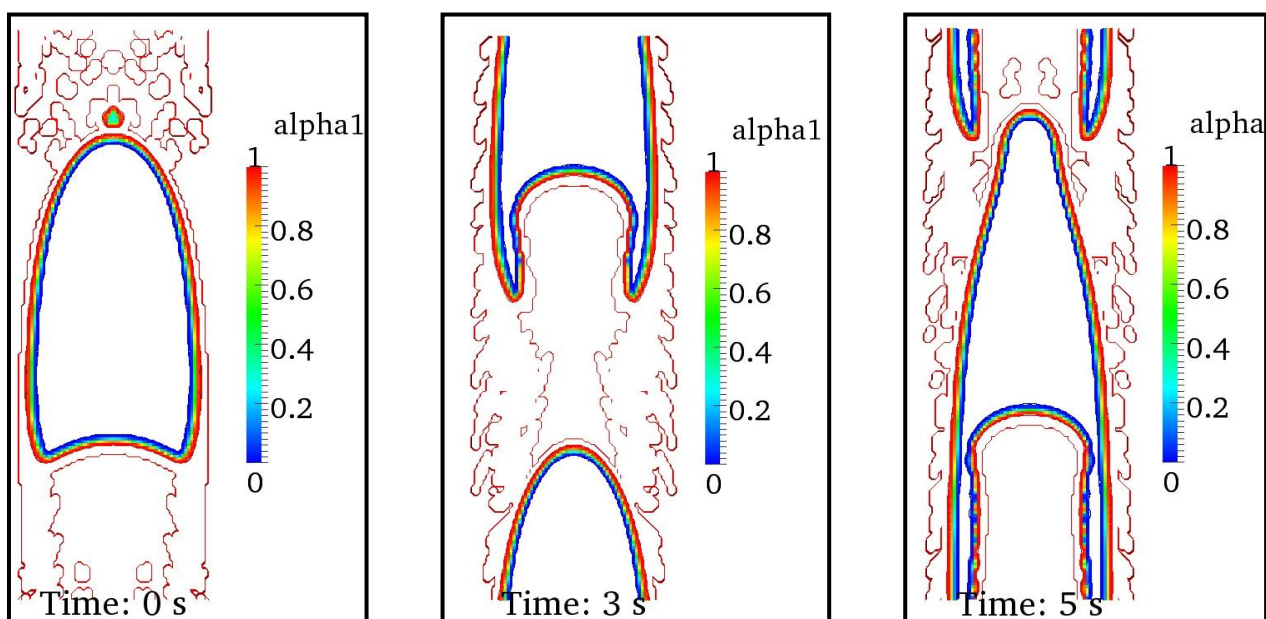
همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده، بیشترین سرعت در پشت حباب ایجاد شده است. همچنین با بالا رفتن حباب در سیال سرعت آن کاهش پیدا کرده است.

۵-۴-۲- مقایسه یک حباب اسلاگ با کار آزمایشگاهی

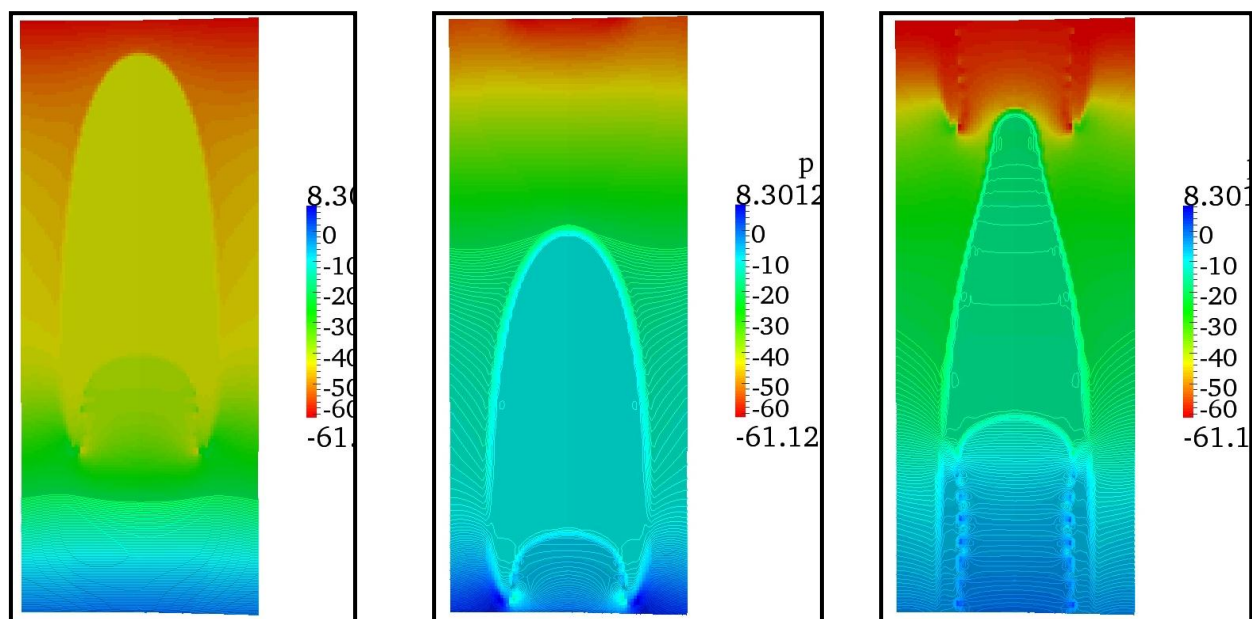




شکل (۲۰-۵) کانتورهای کسر فازی حباب اسلاگ / چارن (شماره C در جدول ۳-۵)

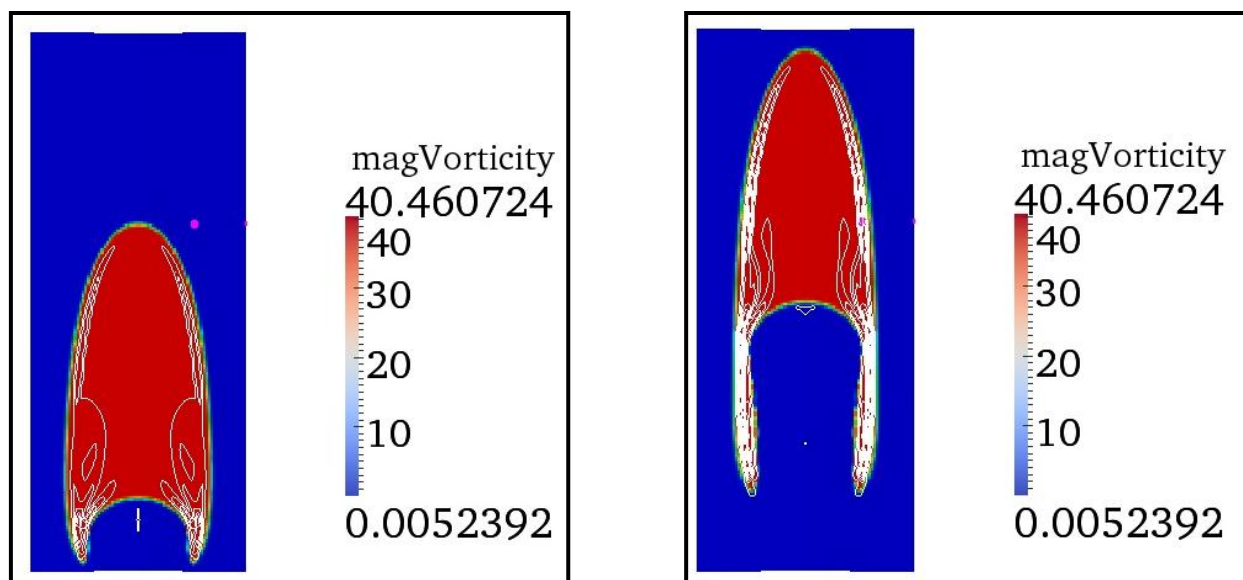


شکل (۲۱-۵) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۳-۵)



شکل (۵-۲۲) کانتورهای فشار در سه زمان مختلف حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۵-۳)

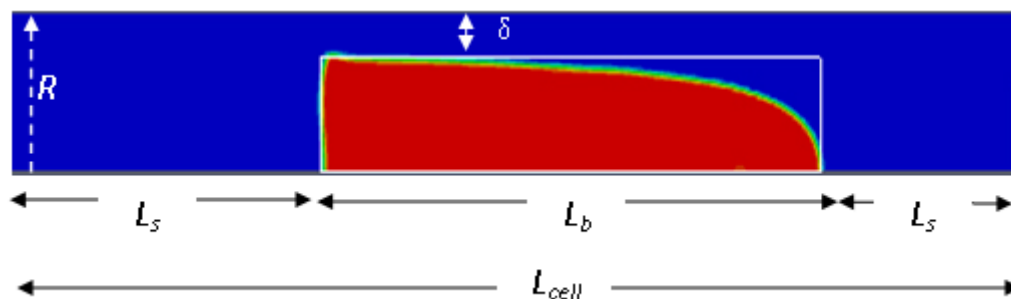
در سه شکل بالا، خطوط فشار ثابت و نیز توزیع فشار مشخص هستند. همچنین داخل حباب فشار ثابت می باشد.



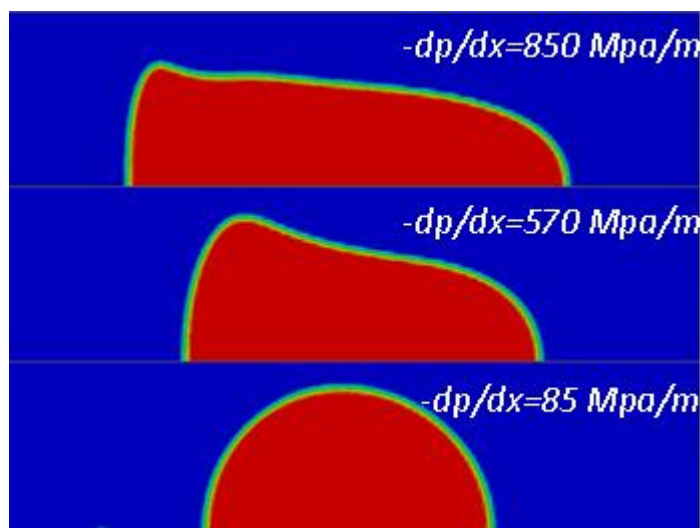
شکل (۵-۲۳) گردابه های ایجاد شده حین بالارفتن حباب (شماره C در جدول ۵-۳)

۵-۴-۳- مقایسه سرعت حباب اسلاگ با روابط تجربی

در این بخش سرعت مطلق حباب با روابط تجربی مقایسه می‌شود. شکل حباب در جریان اسلاگ به نسبت پوچی، گرادیان فشار شکل ۵-۲۵ و طول تناوب حباب بستگی دارد. سرعت اولیه تاثیر ملموسی در جواب پایدار نهایی نداشته است. اما جواب قطعی درباره‌ی تاثیر هریک از پارامترهای فوق بر شکل حباب نیاز به بررسی بیشتر دارد. . سرعت حباب و ابعاد هندسی آن از حل عددی در جدول ۵-۴ آورده شده است.



شکل (۵-۲۴): پارامترهای هندسی حباب



شکل (۵-۲۵): تغییر شکل حباب تحت تاثیر گرادیان فشار

جدول (۴-۵) : سرعت و ابعاد هندسی حباب

حالات	سرعت مطلق حباب U_b	L_b/R	δ_F/R
الف	۱/۴۱	۱/۶۳	۰/۱۸
ب	۹/۶۹	۲/۰۳	۰/۱۸
پ	۱۴/۹۸	۱/۱۷	۰/۲۸
ت	۱۳/۸۲	۱/۷۸	۰/۲۵
ث	۱۹/۱۶	۲/۵۲	۰/۳۰
ج	۱۹/۳۷	۳/۹۳	۰/۲۵
چ	۹/۲۲	۴/۰۸	۰/۱۵
ح	۱۰/۸۰	۵/۲۳	۰/۱۸
خ	۱۰/۸۲	۵/۲۵	۰/۱۸

در جریان اسلاگ حباب سریع‌تر از مایع حرکت می‌کند، آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ضخامت سیال به عدد کاپیلاری ($Ca_b = \mu U_b / \sigma$) بستگی دارد که U_b سرعت مطلق حباب^۱ می‌باشد. بریترتون^۲ [۴۸] فرض کرد که جریان لایه‌ی فیلم سیال، بین حباب و دیواره، خزشی^۳ است. او از تئوری روغنکاری^۴ به رابطه‌ای تحلیلی ۵-۵ برای محاسبه اندازه‌ی فیلم سیال دست یافت.

$$\frac{\delta_F}{R} = 1.34 Ca^{\frac{2}{3}} \quad (5-5)$$

لابوریه و همکاران [۴۹] برای سرعت مطلق حباب رابطه‌ی تحلیلی ۵-۵ را ارائه می‌دهد، که در آن C به عدد اتوس ($Eo = g \Delta \rho d^2 / \sigma$) وابسته می‌باشد. برای مقادیر کوچک عدد اتوس C به مقدار ثابت ۱/۷ میل می‌کند. در مدل‌سازی حاضر عدد اتوس $5/4 \times 10^{-5}$ می‌باشد.

^۱ Bubble Absolute Velocity

^۲ Bretherton

^۳ Creeping Flow

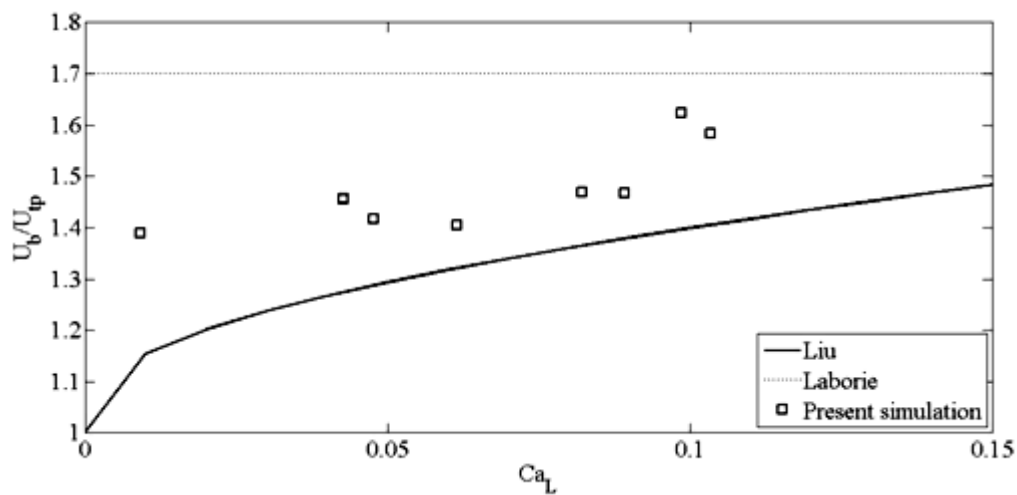
^۴ Lubrication Theory

$$\frac{U_B}{U_{tp}} = C \quad (6-5)$$

لیو و همکاران [۵۰] برای کانال‌های مربعی و دایره‌ای رابطه‌ی ۷-۵ را پیشنهاد می‌کند.

$$\frac{U_B}{U_{tp}} = \frac{1}{1 - 0.61Ca_L^{0.33}} \quad (7-5)$$

در شکل ۲۶-۵ سرعت حباب با روابط تجربی فوق مقایسه شده است. داده‌های مدل‌سازی پایین‌تر از رابطه‌ی لابوریه و بالاتر از رابطه‌ی لیو جای می‌گیرند.



شکل (۲۶-۵) : مقایسه‌ی سرعت حباب از حل عددی با نتایج تجربی

فصل ۶:

جمع بندی و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه

هدف از انجام این تحقیق، بررسی پارامترهای موثر در افزایش کارایی پمپ بالابر بادی است. بدین منظور، پس از طراحی و ساخت پمپ مذکور، تاثیر پارامترهای اصلی از جمله قطر لوله ورودی هوا، شناوری لوله بالابرنده، تعداد ورودی های هوا و دبی هوای ورودی بر افزایش کارایی پمپ بالابر مورد بررسی قرار گرفتند.

در این تحقیق مدل سازی عددی نیز به منظور مقایسه کیفی الگوهای جریان مشاهده شده در کار آزمایشگاهی و الگوهای جریان حاصل از حل عددی صورت گرفت. در این تحقیق از نرم افزار کد باز دینامیک سیالات محاسباتی، اپن فوم، جهت مدل سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت.

بدین منظور، جریان دو فاز (بخار- مایع) در یک لوله قائم به روش تعقیب سطح حجم سیال مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این کار بررسی کیفی الگوهای جریان مشاهده شده در کار آزمایشگاهی که در محدوده رژیم جریان بهینه قرار داشتند، بود. جریان دوفاز، روش های حل، رژیم های جریان و معادلات حاکم بر جریان مورد توجه قرار گرفت و از بین روش های متنوع حل جریان دوفاز همچون مدل پخشی، مدل همگن و...، مدل یک سیال به دلیل آنکه بدون هرگونه پیش فرضی به تعقیب سطح می پردازد، انتخاب گردید. این نحوه ی مدل سازی درک کاملی از فیزیک مسئله ارائه می دهد. در بخش معرفی معادلات درباره ی روش های متنوع تعقیب سطح و اعمال تنش سطحی شرح مختصری آورده شده است. در بخش نتایج ابتدا با یک آزمون مطالعاتی صحت عملکرد جریان دو فاز نشان داده شد. در آزمون یک حباب کروی در سیال نامتناهی قرار داده شد در این حالت انتظار این است که اعمال تنش سطحی بین دو فاز فشار اضافی در درون حباب ایجاد کند این آزمون دقت اعمال ترم تنش سطحی در معادلات ممنتم را نشان می دهد. این آزمون بخوبی صحت عملکرد کد، حل عددی معادلات ممنتم و اعمال تنش سطحی بین دو فاز را نشان داد. پس

از آن در آزمون دوم در مسئله‌ای پیچیده‌تر خیزش حباب در یک سیال نامتناهی مورد توجه قرار گرفت. در آزمون قبلی نیروی شناوری مطرح نبود و جریان دو فاز در محیطی با گرانش صفر قرار داشت اما این بار نیرو شناوری نیز در نظر گرفته شد مقایسه‌ی بین نتایج تجربی و حل عددی توافق مناسبی بین داده‌ها را نشان می‌داد. پس از آن کد عددی بر مسئله‌ی اصلی یعنی مدل‌سازی جریان اسلاگ (لخته‌ای) اعمال شد. از میان رژیم‌های متنوع جریان دوفاز مشاهده شده در پمپ بالابر بادی، از آن رو که بخش عمده‌ای از نقشه‌ی رژیم جریان در لوله بالابرنده پمپ را، جریان لخته‌ای و جریان اسلاگ / چارن تشکیل می‌دهند، این دو رژیم جریان جهت مدل‌سازی انتخاب شدند. در مدل‌سازی این رژیم‌ها از شرایط مرزی تناوبی استفاده شد و میانگین گرادیان فشار ثابت نگه داشته شد، جواب حل عددی سرعت سطحی گاز و سیال به ازای مقادیر مختلف نسبت پوچی، گرادیان فشار و دوره تناوب حباب می‌باشد. سپس به مقایسه‌ی نتایج حل عددی با تعدادی از روابط تجربی پرداخته شد. مقایسه‌ی بین روابط تجربی و حل عددی نشان از توافق مناسب بین حل عددی و نتایج تجربی دارد.

۶-۲- جمع بندی

بطور خلاصه اهم نتایج این تحقیق شامل موارد زیر است:

- ۱- کاهش قطر هوا باعث افزایش در دبی خروجی شده است که این امر را می‌توان ناشی از تاثیر کوچکتر شدن قطر حباب‌های هوای تزریق شده به دلیل (کاهش قطر ورودی هوا) در برقرار بودن رژیم اسلاگ در ناحیه بیشتری از لوله دانست.
- ۲- با افزایش نرخ شناوری تاثیر کاهش قطر هوای ورودی بر افزایش نرخ آب خروجی، افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش تعداد ورودی هوا، میزان آب خروجی کاهش می‌یابد.

- ۴- کاهش قطر ورودی هوا، باعث افزایش زیادی در نرخ جریان آب خروجی شده است که با افزایش نرخ شناوری اختلافشان بیشتر نیز می‌شود.
- ۵- با افزایش نرخ شناوری، بازده ماکزیمم پمپ در نرخ جریان هوای مشابه افزایش می‌یابد.
- ۶- ماکزیمم مایعی که پمپ بالابر بادی میتواند به سمت بالا پمپ کند، در رژیمهای اسلاگ یا اسلاگ - چارن می باشد.
- ۷- ماکزیمم بازده در ماکزیمم نرخ جریان جرمی آب رخ نمی‌دهد.
- ۸- بهترین نقاط بازده همیشه در الگوی اسلاگ یا اسلاگ - چارن واقع می باشند.
- ۹- الگوهای جریان حاصل از مدلسازی عددی سازگاری مناسبی را با الگوهای مشاهده شده در کار آزمایشگاهی نشان دادند.

۶-۳- نوآوری

بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزایش کارایی پمپ های بالابر بادی بر روی تغییر شناوری و تغییر دبی هوای ورودی متمرکز بوده است. در این پروژه، علاوه بر بررسی پارامترهای فوق، برای اولین بار تاثیر عوامل دیگر مانند تعداد ورودی هوا و قطر لوله هوا بر بهبود عملکرد پمپ بالابر بادی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین برای اولین بار الگوهای جریان بدست آمده تجربی و عددی بصورت ظاهری مورد مقایسه قرار گرفتند.

۶-۴- پیشنهادات

پیشنهادهای زیر می‌تواند راهگشای تحقیقات آینده باشد.

- ۱- افزودن به قطر لوله تخلیه در قسمت پایین آن، به منظور افزایش مکش ناخالصی‌ها
- ۲- بررسی اثر تغییر طول لوله بالابرنده بر افزایش کارایی پمپ بالابری
- ۳- بررسی اثر تغییر قطر لوله بالابرنده بر افزایش کارایی پمپ بالابری.
- ۴- بررسی جنس لوله بالابرنده بر افزایش کارایی پمپ
- ۵- افزودن ناخالصی به سیال (آب) و بررسی تاثیر بر عملکرد پمپ
- ۶- تغییر خواص هر کدام از سیالات (آب یا هوا) و بررسی تاثیر بر عملکرد پمپ
- ۷- استفاده از سیالات دیگر (جای آب یا هوا) به منظور بررسی عملکرد پمپ.
- ۸- بهبود روش تعقیب سطح با استفاده از پالایش دینامیکی مش
- ۹- بهبود روش تعقیب سطح با کوپل روش حجم سیال و روش مجموع سطوح
- ۱۰- اضافه کردن یک جعبه ابزار هندسی برای بازسازی سطح، این جعبه ابزار می‌تواند برای هر گونه انتقال جرم از سطح مشترک مفید باشد.
- ۱۰- مقایسه دبی‌های آب خروجی از پمپ بدست آمده از کار آزمایشگاهی و کار عددی
- ۱۱- مقایسه افت فشار در طول لوله بالابرنده از کار آزمایشگاهی و کار عددی

مراجع

- [١] Udo Graf and Pavlos Papadimitriou,(٢٠٠٧),” Simulation of two-phase flows in vertical tubes with the CTFD code FLUBOX”,J. of Nuclear Engineering and Design ٢٣٧ (٢٠٠٧) ٢١٢٠-٢١٢٥
- [٢] Eckhard Krepper and Dirk Lucas and Horst-Michael Prasser,(٢٠٠٤),’ On the modelling of bubbly flow in vertical pipes” ,J of Nuclear Engineering and Design ٢٣٥ (٢٠٠٥) ٥٩٧-٦١١.
- [٣] Subhashini Ghorai and K.D.P. Nigam,(٢٠٠٥),” CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes” J of Chemical Engineering and Processing ٤٥ (٢٠٠٦) ٥٥-٦٥
- [٤] Udo Graf and Pavlos Papadimitriou,(٢٠٠٧),” Simulation of two-phase flows in vertical tubes with the CTFD code FLUBOX”, Nuclear Engineering and Design ٢٣٧ (٢٠٠٧) ٢١٢٠-٢١٢٥
- [٥] Rachid Bannari a, Fouzi Kerdoussb and Brahim Selma,(٢٠٠٧),” Three-dimensional mathematical modeling of dispersed two-phase flow using class method of population balance in bubble columns “ , Computers and Chemical Engineering ٣٢ (٢٠٠٨) ٣٢٢٤-٣٢٣٧
- [٦] Xia Wang and Xiaodong Sun,(٢٠١٠),” Three-dimensional simulations of air-water bubbly flows”, International Journal of Multiphase Flow ٣٦ (٢٠١٠) ٨٨٢-٨٩٠
- [٧] Stapanoff, A.J., (١٩٢٩). “Thermodynamic theory of air-lift pump”. ASME ٥١, ٤٩-٥٥
- [٨] Stenning, A.H., Martin, C.B., (١٩٦٨).” An analytical and experimental study of air lift pump performance”. J. Eng. Power, Trans. ASME ٩٠, ١٠٦-١١٠
- [٩] Nicklin, D.J., (١٩٦٣).” The air lift pump theory and optimization.” Trans. Inst. Eng. ٣٩-٢٩, ٤١ Chem.
- [١٠] Stenning, A.H., Martin, C.B., (١٩٦٨).” An analytical and experimental study of air lift pump performance”. J. Eng. Power, Trans. ASME ٩٠, ١٠٦-١١٠
- [١١] Sekoguchi, K., Matsumura, K., Fukano, T., (١٩٨١). “Characteristics of flow fluctuation in natural circulation air lift pump”. JSME ١٤, ١٩٦٠-١٩٦٦

- [١٢] Clark, N.N., Dabolt, R.J., (١٩٨٦). "A general design equation for air-lift pumps operating in slug flow". AICHE J. ٣٢, ٥٦-٦٤
- [١٣] Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed, W.H., (٢٠٠٧). "Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow". Chem Eng. J. ١٣١, ٢٧٣-٢٨١
- [١٤] A. NENES , D. ASSIMACOPOULOS , N. MARKATOS ..(١٩٩٩)," Simulation of Airlift Pumps for Moderate-Depth Water wells" IGME, Department of Geothermy, Zagoras ١٩, GR ١١٥-٢٧, Athens, Greece
- [١٥] Sadek Z. Kassab Hamdy A. Kandi and Hassan A. Warda.(٢٠٠٨), "Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions" International Journal of Heat and Fluid Flow ٣٠ (٢٠٠٩) ٨٨-٩٨
- [١٦] Reinemann , D.J. , Parlange , J.Y. and Timmons , M.B. , "Theory of small-diameter airlift pumps" , Int.J.Multiphase flow , Vol. ١٩ , No. ١ , PP. ١١٣-١٢٢ ,
- [١٧] Wurts , W.A. , McNeill , S.G. and Overhults , D.G. , "performance and design characteristics of airlift pumps for field applications" , World aquaculture , Vol. ٢٥ , No. ٤ , PP. ٥١-٥٥ , ١٩٩٤
- [١٨] Brennen , Ch.E. , "Hydrodynamics of pumps" , California institute of technology , ١٩٩٤
- [١٩] Hatta , N. , Fugimoto , H. , Isokei , M. and Kang , J.S. , "Theoretical analysis of flow characteristics of multiphase mixtures in a vertical pipe" , Int . J . Multiphase ١٩٩٨, ٥٦١-٥٣٩, PP. ٤, No. ٢٤flow , Vol.
- [٢٠] Imrhch , K.J. , Smith , M.E. and Bickford , D.F. , "DWPF airlift pup life cycle ٢٠٠٣evaluation(U) " , WSRC-TR ,
- [٢١] Kumar , E.A. , Kumar , K.R. and Rammaya , A.V. , "Augmentation of airlift pump performance with tapered upriser pipe – an experimental study" , IE(I) ٢٠٠٣, ١١٩-١١٤, PP. ٨٤Gournal-MC , Vol.
- [٢٢] Kato , H. , Miyazawa , T. , Timaya , Sh. And Iwasaki , T. "A study of an airlift , ٢٩٤-٢٨٩, PP. ١١٧, No. ١٨pump for solid particles" , Bulletin of the JSME , Vol. ١٩٧٥
- [٢٣] Wurts , W.A. , McNeill , S.G. and Overhults , D.G. , "performance and design , ٢٥characteristics of airlift pumps for field applications" , World aquaculture , Vol. ١٩٩٤, ٥٥-٥١, PP. ٤No.

- [۲۴] White , S.J. , "Bubble Pump design and performance" , Georgia institute of
۲۰۰۱ technology ,
- [۲۵] <http://www.brighthub.com/engineering/civil/articles/۴۴۵۹۸.aspx>
- [۲۶] http://www.animatedsoftware.com/pumpglos/air_lift.htm
- [۲۷] [http://energymanagertraining.com/...pumps/.../ComponentsandWorkingofAirLift
Pump.pdf](http://energymanagertraining.com/...pumps/.../ComponentsandWorkingofAirLiftPump.pdf)
- [۲۸] Henrik Rusche, ., (2004), PhD. thesis,” Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-
Phase Flows at High Phase Fractions “ , Department of Mechanical Engineering Exhibition Road,
London
- [۲۹] A. Vallier, Tutorial icoLagrangianFoam /solidParticle, (۲۰۰۹).
- [۳۰] S.M. Ghiaasiaan, Two-Phase Flow, Boiling and Condensation in conventional
and miniature system Cambridge University Press, ۲۰۰۸.
- [۳۱] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, A Front-
Tracking Method for the Computations of Multiphase Flow, Journal of
Computational Physics, ۱۶۹ (۲۰۰۱) ۷۰۸–۷۵۹
- [۳۲] M. Sussman, E. Fatemi, P. Smereka, S. Osher, A Level Set Approach for
Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow ii, in: Computational Fluid
Dynamics, Lake Tahoe, ۱۹۹۵.
- [۳۳] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A Continuum Method for Modeling
Surface Tension, Journal of Computational Physics, ۱۰۰ (۱۹۹۲) ۳۳۵–۳۵۴.
- [۳۴] M. Sussman, E. Fatemi, P. Smereka, S. Osher, A Level Set Approach for
Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow ii, in: Computational Fluid
Dynamics, Lake Tahoe, ۱۹۹۵.
- [۳۵] W.J. Rider, D.B. Kothe, Reconstructing Volume Tracking, in, ۱۹۹۷.
- [۳۶] D. J Benson, Volume of fluid interface reconstruction methods for multi-
material problems, Appl Mech ۵۵ (۲۰۰۲).
- [۳۷] D.L. Sun, W.Q. Tao, A coupled volume-of-fluid and level set (VOSET) method
for computing incompressible two-phase flows, International Journal of Heat and
Mass
- [۳۸] J. Lopez, J. Hernandez, Analytical and geometrical tools for ۳D volume of fluid
methods in general grids, Journal of Computational Physics ۲۲۷ (۲۰۰۸) ۵۹۳۹–۵۹۴۸.
- [۳۹] X. Yang, A.J. James, Analytic relations for reconstructing piecewise linear
interfaces in triangular and tetrahedral grids, Journal of Computational Physics ۲۱۴
(۲۰۰۶) ۴۱–۵۴.
- [۴۰] Y. Renardy, M. Renardy, A Parabolic Reconstruction of Surface Tension for
the Volume-of-Fluid Method, Journal of Computational Physics, ۱۸۳ (۲۰۰۲) ۴۰۰–
۴۲۱.

- [۴۱] J. Lopez, J. Hernandez, P. Gomez, F. Faura, A volume of fluid method based on multidimensional advection and spline interface reconstruction, *Journal of Computational Physics* ۱۹۵ (۲۰۰۴) ۷۱۸-۷۴۲.
- [۴۲] L. D. Youngs, Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, in: *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, in: K.W. Morton, M.J. Baines (Eds.), Academic Press New York, ۱۹۸۲, pp. ۲۷۳-۲۸۵.
- [۴۳] M. Seifollahi, E. Shirani, N. Ashgrizb, An improved method for calculation of interface pressure force in PLIC-VOF methods, *European Journal of Mechanics B/Fluids* ۲۷ (۲۰۰۸) ۱-۲۳.
- [۴۴] M. Meier, G. Yadigaroglu, B.L. Smith, A novel technique for including surface tension in PLIC-VOF methods, *Eur. J. Mech. B/Fluids* ۲۱ (۲۰۰۲) ۶۱-۷۳.
- [۴۵] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *Journal of Computational Physics*, ۱۰۰ (۱۹۹۲) ۳۳۵-۳۵۴.
- [۴۶] D. Lakehal, M. Meier, M. Fulgosi, Interface tracking towards the direct simulation of heat and mass transfer in multiphase flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, ۲۳ (۲۰۰۲) ۲۴۲-۲۵۷.
- [۴۷] Walters, J. and Davison, ۱۹۶۲. "The initial motion of gas bubble formed in an inviscid liquid part ۱: The two dimensional bubbles". *journal of fluid mechanics*, 1(۱۲), pp. ۴۰۸-۴۱۶.
- [۴۸] F.P. Bretherton, The motion of long bubbles in tubes, *J. FluidMech*, ۱۰ (۱۹۶۱) ۱۶۶-۱۸۸.
- [۴۹] C. Laborie, L. Cabassud, Durand-Bourlier, J.M. Laine, Characterisation of gas-liquid two-phase flow inside capillaries, *Chemical Engineering Science*, ۵۴ (۱۹۹۹) ۵۷۲۳-۵۷۳۵.
- [۵۰] H. Liu, C.O. Vandu, R. Krishna, Hydrodynamics of Taylor flow in vertical capillaries: flow regimes, bubble rise velocity, liquid slug length and pressure drop, *Ind. Eng. Chem. Res*, ۴۴ (۲۰۰۵) ۴۸۸۴-۴۸۹۷.
- [۵۰] صداقت م، پایان نامه ارشد، "بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه افقی سرد همدم در بالای یک صفحه عایق"، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۵۱] طاشیان م، پایان نامه کارشناسی، "طراحی و ساخت پمپ بالابر بادی"، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۵۲] حنفی زاده، پ.، سعیدی، م.ح.، "شبیه سازی تحلیلی- عددی یک جریان دو فاز گاز- مایع در یک لوله قائم" نشریه مکانیک و هوا فضا، جلد. ۴، شماره. ۳، صص ۳۳-۴۳، ۱۳۸۷.
- [۵۳] علی سررشته داری، سید رسول واردی (۱۳۹۰)، تالیف کتاب "مدل سازی جریان سیالات و انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار OpenFOAM"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

پیوست‌ها

پیوست الف

نکات ایمنی و دستورالعمل کار با دستگاه

توجه!

۱. از اعمال فشار بیشتر از **1at** و دمای بیش از **20** درجه سانتی گراد جلوگیری شود.
۲. شیر روتامتر را باید تدریجی باز کرد تا احتمال ایجاد موج شوک در سیال کمتر شود و گوی به طور ناگهانی به سقف روتامتر ضربه نزند.
۳. از ضربه زدن به شناور و بدنه روتامتر جدا خودداری شود.
۴. در هنگام کارکرد روتامتر هیچگونه نشتی از روتامتر یا طول لوله ورودی آن نباید وجود داشته باشد.
۵. رفع گیر در روتامتر باید توسط خود سیال با باز و بسته کردن متناوب شیر صورت گیرد .
۶. قبل از اطمینان از مشاهده فشارهای کمتر از **0.4** بار شیرکنترلی فشار سنج دو (**Valve 3**) بسته باشد و فشار هوا با فشار سنج ۱ اندازه گیری شود.

دستورالعمل اندازه گیری فشار و جریان حجمی هوا از مجرای ۱ Regulator :

- گام ۱: شیلنگ ورودی هوا به ورودی رگولاتور ۱ متصل شود .
- گام ۲: شیر کنترلی مربوط به رگولاتور ۲ (**Valve 1**) کاملاً بسته شود .
- گام ۳: شیر کنترلی مربوط به فشار سنج فشار بالا (**Valve 2**) باز شود .
- گام ۴: شیر کنترلی مربوط به فشار سنج فشار پایین (**Valve 3**) بسته شود .
- گام ۵: شیر های ورودی و خروجی روتامتر (**Valve 4**) و (**Valve 7**) بسته شود .
- گام ۶: شیر کنار گذر روتامتر (**By Pass**) (**Valve 5**) باز شود .
- گام ۷: شیر کنترلی خروجی از مدار اندازه گیری (**Valve 8**) باز شود .
- گام ۸: منبع تغذیه هوا (کمپرسور هوا) روشن شود .
- گام ۹: اگر بعد از چند دقیقه کار کردن دستگاه ، نوسانات سطح آب درون مخزن اصلی ، بیش از یک سانی متر نبود ،
- بعبارت دیگر حالت پایدار برقرار گردید ، گام بعدی اجرا گردد .
- گام ۱۰: در صورت مشاهده فشار کمتر از **0.4 bar** در فشار سنج ۱ ، شیر کنترلی فشار سنج ۲ (**Valve 3**) باز شود .
- گام ۱۱: کنار گذر (**Valve 5**) روتامتر بسته و همزمان با آن شیر ورودی روتامتر (**Valve 4**) به آهستگی باز و شیر
- خروجی روتامتر (**Valve 7**) کاملاً باز شود .
- گام ۱۲: شیر تخلیه هوای روتامتر (**Valve 11**) بسته شود .
- گام ۱۳: فشار هوا از **pressur guage 2** خوانده شود. (محدوده اندازه گیری فشار ۰ تا **0.4 bar**)
- گام ۱۴: دبی هوا از **Air Flowmeter** خوانده شود. (محدوده اندازه گیری جریان ۰ تا $20 \frac{\text{lit}}{\text{min}}$)

دستور العمل اندازه گیری فشار و جریان حجمی هوا از مجرای رگولاتور ۲:

گام ۱: شیلنگ ورودی هوا به ورودی رگولاتور ۲ متصل شود.

گام ۲: شیر کنترلی رگولاتور ۲ (Valve 1) باز شود.

گام ۳: شیر رگولاتور ۱ کاملاً بسته شود.

گام ۴: شیرهای ورودی و خروجی روتامتر (Valve 4) و (Valve 7) بسته شوند.

گام ۵: شیرهای کنترلی مربوط به دو فشار سنج فشار بالا و فشار پایین (Valve 2) و (Valve 3) بسته شوند.

گام ۶: شیر کنار گذر روتامتر (By Pass) (Valve 5) باز شود.

گام ۷: شیر کنترلی خروجی از مدار اندازه گیری (Valve 8) باز شود.

گام ۸: منبع تغذیه هوا (کمپرسور هوا) روشن شود.

گام ۹: اگر بعد از چند دقیقه کار کردن دستگاه، نوسانات آب درون مخزن اصلی بیش از یک سانتی متر نبود،

بعبارت دیگر حالت پایدار برقرار گردید، گام بعدی اجرا شود.

گام ۱۰: شیر کنارگذر (Valve 5) بسته و همزمان با آن شیر ورودی روتامتر (Valve 4) به آهستگی

باز و شیر خروجی روتامتر (Valve 7) کاملاً باز گردد.

گام ۱۱: فشار هوا از pressure guage regulator2 خوانده شود.

گام ۱۲: دبی هوا از Air flowmeter خوانده شود. (محدوده اندازه گیری جریان هوا + تا $20 \frac{lit}{min}$ می باشد).

پیوست ب [۵۰]

مروری بر نرم افزار کد باز این فوم

نرم افزار این فوم^۱، یک نرم افزار حل عددی جهت مسایل مختلف شامل دینامیک سیالات محاسباتی^۲، در حوزه مکانیک محیط پیوسته می باشد. این فوم یک نرم افزار منبع باز رایگان تحت لاینوکس که خود یک سیستم عامل منبع باز و رایگان است، می باشد. این نرم افزار شامل یک مجموعه بزرگ از حلگرها^۳ و کاربردهای از پیش نوشته شده قابل بهره گیری در محدوده وسیعی از مسایل می باشد. همچنین با داشتن معلومات پیش نیاز از روش مورد استفاده در فیزیک مسئله و تکنیک های برنامه نویسی مربوطه می توان حلگر جدید به نرم افزار اضافه کرد. این فوم یکی از بهترین مجموعه های علمی نوشته شده به زبان C++ می باشد که توسط شرکت انگلیسی OpenCFD Ltd تولید شده است.

پیش پردازش^۴:

۱- مش بندی: این نرم افزار علاوه بر داشتن ابزارهای توانمندی نظیر blockMesh (که برای ترسیم مش های ساختار یافته بکار میرود.) و snappyHexMesh (که برای تولید مشهای سه بعدی شش وجهی بکار می رود) قابلیت دریافت و تبدیل مش از نرم افزارهای معروف تولید مش نظیر Fluent,CFX,Gambit و غیره را دارا می باشد. همچنین این نرم افزار قابلیت حل اشکالی که دارای مش بندی ساختار یافته ای نیستند نیز دارد، به علاوه این مجموعه شامل chechMesh, MergMesh, autoPatch ... است که جهت بهبود وضعیت

^۱ OpenFoam

^۲ CFD

^۳ solvers

^۴ PreProcessing

مش و کاهش اعواج های شبکه بکار می روند.

۲- اعمال شرایط مرزی: نرم افزار این فوم شامل طیف وسیعی از شرایط مرزی است که قابل اعمال به شرایط گوناگون بوده و از آن جمله می توان به `pressureInletVelocity` (که با دانستن فشار در ورودی با توجه به شار عمودی، سرعت محاسبه می شود) و یا `pressureTransmissiv` (که برای جریان های مافوق صوت بکار میرود) و ده ها شرط مرزی دیگر که در جریان های مختلف قابل استفاده است. مزیت قابل توجه شرایط مرزی این نرم افزار به نرم افزارهای دیگر در این است که به علت باز بودن کد می توان کنترل بیشتری روی شرایط مرزی داشت و علاوه بر نوع، مقدار و جهت هر متغیر را برای آن تنظیم نمود.

پس پردازش^۱:

این نرم افزار قابلیت گسترده ای در پس پردازش داده ها دارد و از آن جمله می توان به محاسبه اعداد پکلت^۲، ماخ^۳ و همچنین محاسبه ورتیسیتی^۴، تنش برشی روی دیواره^۵، خطوط جریان^۶، شار حرارتی روی دیواره^۷ و ده ها قابلیت دیگر اشاره نمود.

برنامه نویسی در اپن فوم:

زبان برنامه نویسی C++ این قابلیت را دارد که به کمک خواص شیئی گرایی خود بین کلاس^۸ های خود ارتباط برقرار کند و OpenFOAM نیز از این خاصیت استفاده کرده و برای معرفی مواردی

^۱ Post Processing

^۲ Pecklet Number

^۳ Mach Number

^۴ vorticity

^۵ Wall shear stress

^۶ SteamFunction

^۷ Wall heat flux

^۸ class

نظیر ماتریس ها ، بردارها، مش و مواردی که در CFD مورد استفاده قرار می گیرد کلاسهایی تعریف کرده است. کدهای این نرم افزار با بقیه کدهای CFD متفاوت است. برای مثال اگر از نرم افزار فلوئنت استفاده شود، برای یک حل مثال خاص تعداد زیادی انتخاب موجود است و باید با انتخاب گزینه های مناسب کد را برای یک مثال خاص اجرا نمود. اما OpenFOAM کتابخانه ای از کلاس ها در اختیار کاربر قرار می دهد که می توان برای نوشتن یک کد CFD از آن استفاده کرد. هر کدام از این کلاس ها یک کار مشخص را انجام می دهد. زبان C++ یک زبان بسیار گسترده است و ابزارهای بسیاری برای برنامه نویسی شیئی گرا ارایه می دهد و یادگیری آن زمان زیادی را صرف می کند با وجود این، کاربران مبتدی OpenFOAM نیاز به دانستن اطلاعات زیادی در مورد این زبان برنامه نویسی برای اجرا و تغییر کدهای OpenFOAM ندارند.

برنامه های C++ از کدهایی تشکیل شده که در فایل هایی با پسوند C و H. نگهداری می شوند و برای اجرا باید به فایل های قابل اجرا کامپایل^۱ شوند. کدهای OpenFOAM نیز فایل هایی با همین پسوند هستند در پوشه ای تحت عنوان applications که در پوشه اصلی OpenFOAM

است نگهداری می شوند. در این پوشه، زیر پوشه های زیر وجود دارد:

Solver: که شامل کدهای CFD برای حل جریان های مختلف است.

Utilities: که معمولاً شامل کد های کوچکی است که یک کار خاص را انجام می دهند. هر کد که کار خاصی را انجام می دهد درون دایرکتوری خودش قرار دارد. برای مثال یک کد با عنوان streamFunction وجود دارد که خطوط جریان هر بردار سرعت را در هر لحظه محاسبه و ذخیره می کند. این کد در آدرس زیر قرار دارد:

`OpenFOAM/ applications/utilities/postProcessing/velocityField /streamFunction`

در این دایرکتوری فایل تحت عنوان streamFunction.C وجود دارد که کد اصلی این برنامه است و در کنار آن یک دایرکتوری با عنوان Make که شامل فایل های files و options است وجود

^۱ Compile

دارد. کامپایل کردن کدهای C++ بسیار پیچیده است و پارامترهای زیادی برای این کار احتیاج دارد. اما OpenFOAM یک سیستم کامپایل کردن تحت عنوان wmake دارد که اطلاعات را از فایل های files و options گرفته و فایل مورد نظر را به راحتی کامپایل می کند.

OpenFOAM محدوده وسیعی از کلاسها را دارد، بعضی از مهمترین آنها عبارتند از: dimensioned numbers: که شامل dimensionedVector , dimensionedScalar است.

اشیائی برای دسترسی به دیکشنری ها (IOobject, dictionary)

کلاسی برای کنترل زمان و بازه های زمانی: این، کلاسی از زمان ها است ولی فقط یکی از آنها قابل استفاده است و معمولاً در header فایلها ساخته می شود و با نام runtime مشخص می شود. کلاسی برای مش های finite volume که تحت عنوان fvMesh شناخته می شوند. مانند حالت قبل اکثر کدهای CFD تنها از یکی از اینها استفاده می کند و آن از یک header فایل با عنوان createMesh.H ساخته می شود و شیء ساخته شده از آن، مش نام دارد.

کلاسی برای میدان های عددی، برداری و تانسوری که هر کدام از آنها مجموعه ای از اعداد (بردار یا ماتریس) در هر سلول مش است. که اینها به ترتیب volScalarField و volVectorField و volTensorField شناخته می شوند. اینها می توانند با هم جمع، تفریق، ضرب و یا تقسیم شوند.

در نتیجه یک کد CFD یک سری از این داده ها را تولید می کند.

پیوست ج

معرفی فایل های مورد نیاز برای هر مسئله

فایل های موجود در کیس اینترنترفوم:



Q



constant



system

۱. فایل ۰ :

این فایل حاوی کدهای معرف شرایط مرزی برای فشار (p)، سرعت (U) و گاما (γ) می باشد



alpha1



alpha1.org



p



U

فایل p (شرط مرزي براي فشار)

```

version      ۲.;
format       ascii;
class        volScalarField;
location     ".";
object       p;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions   [\ -\ -۲ . . . .];

internalField uniform .;

boundaryField
{
    front
    {
        type            wedge;
    }
    back
    {
        type            wedge;
    }
    fixedWall
    {
        type            zeroGradient;
    }

    inletOutlet
    {
        type             fan;
        patchType         cyclic;
        f List<scalar>     \ (\xi);
        value              uniform .;
    }

    axis
    {
        type             empty;
    }
}

```

فایل *gamma* (شرط مرزي براي كسر فاري)

```
FoamFile
{
    version      ۲.۰;
    format        ascii;
    class         volScalarField;
    location      ".";
    object        alpha\;
}
// * * * * *

dimensions      [۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰];

internalField    uniform \;

boundaryField
{
    front
    {
        type      wedge;
    }

    back
    {
        type      wedge;
    }

    fixedWall
    {
        type      zeroGradient;
    }

    inletOutlet
    {
        type      cyclic;
    }

    axis
    {
        type      empty;
    }
}
```

۲. فایل Constant

این بخش شامل فایل های مربوط به هندسه و شبکه بندی فضای محاسباتی (..) و همچنین فایل های مربوط به خصوصیات سیال (transportProperties) و محیط (environmentalProperties) می باشد



transportProperties (خواص سیال)

آن تعداد از خواص فیزیکی سیال که در معادلات حاکم بر جریان یا انتقال حرارت در هر مسئله مورد نیاز است در این قسمت وارد می شود.

```
phase۱
{
    transportModel    Newtonian;
    nu                nu [ ۰ ۲ -۱ ۰ ۰ ۰ ۰ ] ۰.۰۰۱۴۱۴۳۲;
    rho               rho [ ۱ -۳ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ] ۹۹۸;
}

phase۲
{
    transportModel    Newtonian;
    nu                nu [ ۰ ۲ -۱ ۰ ۰ ۰ ۰ ] ۱.۵۱e-۵;
    rho               rho [ ۱ -۳ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ] ۱.
}

sigma                sigma [ ۱ ۰ -۲ ۰ ۰ ۰ ۰ ] ۰.۰۶۲۶;
```

هندسه هر مسأله شامل تعدادی رأس، بلوک و مرز می باشند که مختصات این نقاط و صفحات در فایل blockMeshDict آورده شده است. در فایل boundary نیز نوع مرزها مشخص شده است.

```
convertToMeters ۰.۰۹۳;

vertices
(
  (۰ ۰ ۰) //۰
  (۰.۹۹۹ ۰.۰۴۳۶۲ ۰) //۱
  (۰.۹۹۹ ۰.۰۴۳۶۲ ۵) //۲
  (۰ ۰ ۵) //۳
  (۰.۹۹۹ -۰.۰۴۳۶۲ ۰) //۴
  (۰.۹۹۹ -۰.۰۴۳۶۲ ۵) //۵
);
blocks
(
  hex (۰ ۴ ۱ ۰ ۳ ۵ ۲ ۳) (۴۰ ۱ ۲۰۰) simpleGrading (۱ ۱ ۱)
);
edges
(
);
patches
(
  wedge front
  (
    (۰ ۱ ۲ ۳)
  )
  wedge back
  (
    (۰ ۳ ۵ ۴)
  )
  patch fixedWall
  (
    (۱ ۴ ۵ ۲)
  )
  cyclic inletOutlet
  (
    (۳ ۲ ۵ ۳)
    (۰ ۴ ۱ ۰)
  )
  empty axis
  (
    (۰ ۳ ۳ ۰)
  )
);
```

پوشه System

این پوشه شامل فایل های کنترلی و فایل های مربوط به حل کننده شامل نحوه گسسته سازی معادلات ، الگوریتم حل و تنظیمات می باشد.



controlDict (کنترل)

مقادیر مربوط به گرفتن داده برای کنترل زمان و read و write فایل های اجرایی در این پوشه قابل تنظیم است. ابتدا باید زمان شروع و پایان و بازه زمانی برای هر run تنظیم شود. برای پایان زمان باید به جواب پایا برسیم.

در این پروژه می خواهیم اجرای برنامه را از زمان $t=0$ شروع کنیم بنا براین در قسمت controlDict مقدار startFrom را با latestTime مقداردهی کرده و startTime را ۰ در نظر می گیریم.

$$Co = \frac{\delta t |U|}{\delta x}$$

با محاسبات $\delta t = 1e-9$ به دست می آید.

برای write نتایج در بازهای زمانی مختلف گزینه writeControl گزینه های مختلفی دارد که در اینجا adjustableRunTime را انتخاب کرده و در قسمت writeInterval می خواهیم هر ۰.۲۵ بازه زمانی نتایج را write کنیم

```

application      interFoam;

startFrom        latestTime;

startTime        0;

stopAt           endTime;

endTime          0;

deltaT           1e-9;

writeControl     adjustableRunTime;

writeInterval    0.25;

purgeWrite       0;

writeFormat      ascii;

writePrecision   6;

writeCompression uncompressed;

timeFormat       general;

timePrecision    9;

runTimeModifiable yes;

adjustTimeStep   yes;

maxCo            0.5;

maxDeltaT        1;

```

fvSchemes (گسسته سازی)

نحوه گسسته سازی هر یک از جملات معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت سیال در این قسمت آورده می شود.

```
format      ascii;
class       dictionary;
object      fvSchemes;
}
// * * * * *

ddtSchemes
{
    default          Euler;
}

gradSchemes
{
    default           Gauss linear;
    grad(p)           Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default           none;
    div(phi,U)        Gauss linear;
    div(phi,T)        Gauss upwind;
}

laplacianSchemes
{
    default           none;
    laplacian(nu,U)    Gauss linear corrected;
    laplacian((1|A(U)).p) Gauss linear corrected;
    laplacian(DT,T)    Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default           linear;
    interpolate(HbyA) linear;
}

snGradSchemes
{
    default           corrected;
}

fluxRequired
{
    default           no;
    p;
}
```

در این پوشه الگوریتم و تولرانس حل داده شده است.

```
/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / Operation | Version: 1.5 |
| \ \ / And | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \ \ / Manipulation |
|-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    p PCG
    {
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0;
    };
    T BICCG 1e-07 0;

    U PBiCG
    {
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-05;
        relTol          0;
    };
}

PISO
{
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    pRefCell          0;
    pRefValue         0;
}

// *****
```

Abstact

Airlift pumps are finding increasing used where pump reliability and low maintenance are required, where corrosive, abrasive, or radioactive fluids in nuclear applications must be handled and when a compressed air is readily available as a source of a renewable energy for water pumping applications. The objective of the present study is to evaluate the performance of a pump under predetermined operating conditions and to optimize the related parameters. For this purpose, calculated effects of the main parameters on the performance of an airlift pump, after designing and testing of an air-lift pump, as like as air inlet pipe diameter, submergence ratio of the riser pipe, number of air inlets and air mass flow rate.

The present results showed that The maximum efficiency does not occur at the maximum water mass flow rate, The air-lift pump lifted maximum amount of liquid if operated in the slug or slug-churn regimes and As the submerged ratio increases, the maximum efficiency of the pump increases at the same air-flow rate. In this study, numerical simulation is used for quality comparsion between flow regime maps avservating in experimental work and numerical model. openFOAM CFD package codes used for numerical model. This package is based on Volume of Fluid (VOF) method that is used for simulation bubble rising in stagnant liquid. Slug flow is Choiced for numerical modeling because is the great part of flow regim maps at the optimum performance of the airlift pump. flow regime maps avservating in experimental work gives a good agreement with flow regime maps of numerical model.

Keywords: Airlift pump, Slug flow, Operate Improvement, Flow Maps and OpenFaom.



Shahrood University of Technology
Department of Mechanical Engineering

Air Lift Pump Simulation and Validation Whit Experimental Work

By:
Azar Ajami

Supervisor:
Dr. Mohammad Hassan Kayhani

Consultant:
Dr. Ali SarreshtehDari

January ۲۰۱۲