

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

مدل سازی عددی پخش گاز در جریان توربولانت سیال غیر نیوتنی

به روش حل معادلات موازنه جمعیت

نگارش: عرفان نیازی

استاد راهنما: دکتر مهرزاد شمس

استاد مشاور: دکتر کیوان صادقی

پاییز ۱۳۹۰

## Abstract

The main purpose of this numerical simulation is to understand the gas dispersion in non-Newtonian power-law liquid in a turbulent bubble column. Population balance method has been chosen to solve two phase mixture. This method could also simulate interaction between bubbles.

First, a one dimensional numerical code is developed for this simulation. This code is applicable for long distances from the sparger in a bubble column. For simulation of the sparger and improving the accuracy of numerical modeling, a 2D code is developed. In this code momentum, continuity and turbulence equation ( $k-\epsilon$ ) are solved for liquid phase then population balance equation is solved and bubble dispersion is determined. Bubble break up is modeled by "luo and svendson" and "Martinez-Bazan" model. For coalescence modeling, "Lu" model is chosen for 1D simulation and "Prince and Blanch" model is used for 2D simulation. Finally, a 3D, unsteady, CFX model is used for complete simulation of bubble column.

According to this project's result, changing the Rheology of the primary liquid could cause improvement in bubble dispersion which is useful for chemical reaction and mass transfer in bubble columns.

**Keyword:** Gas-Liquid Two Phase Flow, Power-law Non-Newtonian Liquid, Population Balance Equation, Coalescence and Break up Modeling

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## چکیده

هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی عددی پخش حباب‌های گاز در سیال غیرنیوتنی توانی در یک ستون حبابی با جریان مغشوش می‌باشد. برای حل جریان دو فاز مخلوط حباب و مایع از روش موازنه جمعیت استفاده شده است. این روش علاوه بر مدل سازی پخش حباب، تراکنش بین حباب‌ها را نیز مدل‌سازی می‌نماید.

برای این مدل‌سازی ابتدا یک کد عددی یک بعدی توسعه داده شده است. این کد برای فاصله دور از تزریق کننده جواب‌های مناسبی را برای ستون حباب پیش‌بینی می‌نماید. برای مدل سازی تزریق کننده حباب و حل دقیقتر کد عددی دو بعدی توسعه داده شد. در این کد معادلات مومنتوم، پیوستگی و جریان مغشوش (K-ε) برای فاز مایع حل می‌گردند سپس با حل معادله موازنه توزیع حباب مشخص می‌گردد. برای مدل‌سازی ترکیدن حباب‌ها از دو روش "لو و اسوندسون"<sup>1</sup> و "مارتینز-بازان"<sup>2</sup> و برای مدل سازی یکی‌شدن حباب‌ها نیز از روش "پرینس و بلانچ"<sup>3</sup> در کد دو بعدی و روش "لو" در کد یک‌بعدی استفاده شده است. در انتها برای کامل‌تر شدن بحث علاوه بر مدل‌سازی‌های انجام شده توسط کدهای عددی، یک مدل کامل سه‌بعدی و غیردانمی در نرم‌افزار تجاری CFX ساخته شده و نتایج آن ارائه گردیده شده است.

بر اساس نتایج این تحقیق تغییر رئولوژی سیال مایع، توزیع حباب در جریان را می‌تواند افزایش دهد که باعث بهینه سازی بخش حباب برای واکنش‌های شیمیایی و انتقال جرم در این جریان می‌شود.

**کلمات کلیدی:** جریان دوفاز گاز-مایع، سیال غیرنیوتنی توانی، معادله موازنه جمعیت، مدل‌سازی یکی‌شدن و

ترکیدن حباب

---

<sup>1</sup> Luo and Svendsen

<sup>2</sup> Martinez-Bazan

<sup>3</sup> Prince and Blanch

## فهرست مطالب

۱۰	۱. مقدمه
۱۲	۱.۱. تاریخچه
۱۲	۱.۱.۱. تاریخچه جریان مغشوش غیر نیوتنی
۱۴	۱.۱.۲. تاریخچه حرکت حباب در سیال غیرنیوتنی
۱۷	۱.۱.۳. تاریخچه معادله موازنه جمعیت
۲۰	۱.۱.۴. تاریخچه مدل سازی یکی شدن و ترکیدن حباب
۲۲	۱.۱.۵. تاریخچه مدل سازی ستون حبابی و پخش حباب در سیال
۲۵	۱.۲. صورت مسئله
۲۸	۲. معرفی روش موازنه جمعیت
۳۱	۲.۱. معادله موازنه جمعیت
۳۵	۲.۲. مدل سازی ترکیدن حباب
۳۶	۲.۲.۱. مدل لو و اسوندسن (مدل LS)
۳۷	۲.۲.۲. مدل مارتینز-بازان (مدل MB)
۳۸	۲.۳. مدل سازی یکی شدن حباب ها
۳۹	۲.۳.۱. مدلسازی یکی شدن حبابها به روش پرینس و بلانچ [۴۵]
۴۴	۲.۳.۲. مدلسازی یکی شدن حبابها به روش لو [۶۱]

- ۴۵..... ۴.۲ جمع بندی و نتیجه گیری
- ۴۷..... ۳. حباب در سیال غیر نیوتنی
- ۴۹..... ۳.۱. نیروهای وارد بر حباب
- ۴۹..... ۳.۱.۱. نیروی پسای وارد بر تک حباب
- ۵۱..... ۳.۱.۲. نیروی پسا برای دسته حبابها
- ۵۲..... ۳.۱.۳. نیروی برآ
- ۵۲..... ۳.۱.۴. نیروی جرم افزوده
- ۵۳..... ۳.۲. ستون حبابی
- ۵۵..... ۳.۳ جمع بندی و نتیجه گیری
- ۵۷..... ۴. مدلسازی جریان مغشوش غیرنیوتنی تکفاز
- ۵۷..... ۴.۱. سیال غیر نیوتنی مستقل از زمان
- ۵۹..... ۴.۲. معادلات حاکم و کد عددی جریان مغشوش غیرنیوتنی
- ۶۱..... ۴.۳. حل عددی سیال غیرنیوتنی
- ۶۲..... ۴.۴ جمع بندی و نتیجه گیری
- ۶۴..... ۵. مدلسازی پخش حباب
- ۶۵..... ۵.۱. کد یک بعدی موازنه جمعیت
- ۶۷..... ۵.۲. نتایج کدی یک بعدی
- ۷۰..... ۵.۳. کد دوبعدی

۵. ۴. نتایج کد عددی دوبعدی..... ۷۱
۵. ۵. مدل سازی سه بعدی و نتایج آن ..... ۸۳
۵. ۶. جمع بندی و نتیجه گیری ..... ۸۸
۶. جمع بندی و پیشنهادات..... ۹۰
۷. مراجع ..... ۹۳
- پیوست الف : بدست آوردن رابطه نازک شدن سیال توانی در برخورد دو حباب ..... ۱۰۰
- پیوست ب: گسسته سازی معالات حاکم به روش حجم محدود ..... ۱۰۴

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱-۱- چرخش داخلی جریان در حباب ..... ۱۵
- شکل ۱-۲- نمودار ضریب پسا بر حسب رینولدز برای سیال غیر نیوتنی به ترتیب از مرجع [۱] و [۱۲] ..... ۱۶
- شکل ۱-۳- نمونه‌های از شیوه پخش و حرکت دسته حباب [۱۵] ..... ۱۷
- شکل ۱-۴- تاثیر یکی شدن و ترکیدن در سیستم‌های چند فاز [۴۰] ..... ۲۱
- شکل ۱-۵- مخلوط کن و ستون حبابی ..... ۲۲
- شکل ۱-۶- ستون حبابی و شیوه حرکت حباب در ستون حباب [۵۱] ..... ۲۴
- شکل ۲-۱- نمونه‌های از پخش حباب در سیال با قطرهای مختلف ..... ۲۸
- شکل ۲-۲- نمودار عدد چگالی بر حسب قطر (الف) در ارتفاع ۱۰ cm و (ب) در نزدیکی تزریق کننده ..... ۲۹
- شکل ۲-۳- معادله موازنه جمعیت برای قطر  $d_i$  در حجم کنترل ..... ۳۲
- شکل ۲-۴- مقایسه مدل MB (سمت راست) و مدل LS (سمت چپ) [۴۱] ..... ۳۶
- شکل ۲-۵- لوله برخورد حباب در حال حرکت با سرعت نسبی C [۱] ..... ۳۹
- شکل ۲-۶- یکی شدن حباب در جریان مغشوش [۴۱] ..... ۴۰
- شکل ۲-۷- زمانهای کنترل کننده‌ی کارایی یکیشدن دو حباب [۱] ..... ۴۱
- شکل ۳-۱- تشکیل حباب در سیال غیر نیوتنی [۶۸] ..... ۴۷
- شکل ۳-۲- مقایسه ضریب پسا سیال نیوتنی و غیرنیوتنی [۱] ..... ۵۰
- شکل ۳-۳- سرعت صعود حباب هوا در آب بر حسب اندازه حباب و وجود ناخالصی [۱۱] ..... ۵۰
- شکل ۳-۴- شکل جریان در ستون حبابی [۴۱] ..... ۵۴



- شکل ۴-۱- تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برشی جهت برخی از سیالها [۷۵]..... ۵۸
- شکل ۵-۱- تاثیر ارتفاع بر روی قطر حبابها..... ۶۸
- شکل ۵-۲- مقایسه مدل MB (سمت چپ) و LS (سمت راست) از نظر توزیع قطرات در مقاطع مختلف..... ۶۸
- شکل ۵-۳- مقایسه مدل LS و MB از نظر پخش حبابها در اندازه‌های مختلف..... ۶۹
- شکل ۵-۴- مقایسه قطر معادل در ارتفاع ۶۷.۷ سانتیمتر برای مدل‌های MB و LS با نتایج تجربی..... ۶۹
- شکل ۵-۶- شبکه بندی استفاده شده برای مدلسازی..... ۷۲
- شکل ۵-۸- جریان مورد استفاده در کد جفت شده یک طرفه..... ۷۳
- شکل ۵-۹- پخش حباب در جریان تزریق به همراه سیال برای کلاسهای ۷، ۱۰ و ۱۲ (از راست به چپ)..... ۷۴
- شکل ۵-۱۰- شکل جریان مایع موجود در ستون حباب..... ۷۴
- شکل ۵-۱۱- نسب حجمی فاز مایع در حوزه حل..... ۷۵
- شکل ۵-۱۲- قطر معادل حباب در حوزه حل..... ۷۶
- شکل ۵-۱۳- نرخ اتلاف انرژی در جریان مغشوش..... ۷۷
- شکل ۵-۱۴- پخش حباب در کلاسهای متفاوت (از کلاس کوچکتر به کلاس بزرگتر)..... ۷۹
- شکل ۵-۱۵- مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج بوهل و همکاران [۷۰] (نمودارهای سرعت سیال و نسبت حجمی گاز)..... ۸۱
- شکل ۵-۱۶- نسبت حجمی گاز در مقطع  $X=0/37$  برای رئولوژیهای مختلف مایع..... ۸۲
- شکل ۵-۱۷- سرعت جریان مایع در مقطع  $X=0/37$  برای رئولوژیهای مختلف مایع..... ۸۲
- شکل ۵-۱۸- خط جریان فاز گاز برای شبیهسازی سه بعدی..... ۸۵

- شکل ۵-۱۹- مقایسه نتایج تجربی ستون حبابی [۷۱] با نتایج مدلسازی ..... ۸۶
- (نمودارهای سرعت سیال و نسبت حجمی گاز)..... ۸۶
- شکل ۵-۲۰- تاثیر خواص رئولوژی بر روی سرعت سیال در مدل سه بعدی ..... ۸۷
- شکل ۵-۲۱- تاثیر خواص رئولوژی بر روی نسبت حجمی گاز در مدل سه بعدی ..... ۸۷
- شکل الف-۱- پارامترهای هندسی مدلسازی برخورد دو حباب ..... ۱۰۰
- شکل (ب-۱) حجم کنترل یک بعدی مورد استفاده جهت گسسته سازی معادلات [۷۶]..... ۱۰۵
- شکل (ب-۲) تقریب بالادست در صورت مثبت بودن جهت جریان [۷۶]..... ۱۰۷
- شکل (ب-۳) تقریب بالادست در صورت منفی بودن جهت جریان [۷۶]..... ۱۰۷
- شکل (ب-۴) رابطه حس انتقال یابندگی با عدد پکلت [۷۶]..... ۱۰۸
- شکل (ب-۵) شبکههای محاسباتی جهت محاسبه مؤلفه افقی سرعت  $u$ ، و مؤلفه قائم سرعت  $v$  [۷۶]..... ۱۰۹
- شکل (ب-۶) حجم کنترل مورد استفاده جهت حل معادله فشار ..... ۱۱۲
- شکل (ب-۷) قرار گرفتن گره پارامتر مورد نظر بر روی مرز [۷۶]..... ۱۱۵
- شکل (ب-۸) عدم قرار گیری گره پارامتر مورد نظر بر روی مرز [۷۶]..... ۱۱۶
- شکل (ب-۹) محاسبه شرایط مرزی در خروج ..... ۱۱۷

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- کارهای تجربی انجام شده بر روی جریان مغشوش برای سیال غیر نیوتنی [۱]..... ۱۴
- جدول ۱-۲- مدلسازیهای انجام شده با استفاده از روش موازنه جمعیت..... ۱۸
- جدول ۱-۳- سیال غیر نیوتنی انتخابی [۶۷]..... ۴۸
- جدول ۱-۴- روابط تغییرات تنش و نرخ برشی جهت سیالهای مختلف [۷۵]..... ۵۸
- جدول ۲-۴- مشخصات کد عددی توسعه داده شده..... ۵۹
- جدول ۱-۴- مشخصات حساب ها در شرط مرزی..... ۶۶
- جدول ۱-ب- پارامترهای معادله انتقال جهت معادلات مختلف..... ۱۰۴

# فصل ۱:

## مقدمه

## ۱. مقدمه

سیالات زیادی در زندگی روزمره ما هستند که دارای خواص غیرنیوتنی می‌باشند. از این جمله مواد می‌توان مواد خوراکی همچون ماست، سوپ، خمیر نان و مواد صنعتی همچون رنگ‌های ساختمانی و مواد پلیمری را نام برد. این مواد معمولاً به صورت آرام و با رینولدزهای پایین جریان دارند اما در هنگام پروسه تولید به دلیل ابعاد بزرگ دستگاه‌های صنعتی و سرعت تولید این مواد در حجم زیاد، شاهد رفتار جریان مغشوش خواهیم بود.

برای داشتن یک تولید سریع نیاز است مواد واکنش دهنده با بیشترین بازده با هم در تماس باشند. به همین دلیل مدل سازی این جریان‌ها و استفاده از این مدل سازی جهت افزایش سطح تماس مواد واکنش دهنده اهمیت بسیاری می‌یابد. جریان حباب در سیال، نمونه‌ای از جریان دو فاز گاز-مایع است که در پروسه تولید مواد خوراکی و شیمیایی امروزه کاربرد بسیاری دارد. به عنوان مثال می‌توان ستون حباب<sup>۱</sup>، مخزن های همزن<sup>۲</sup>، بیو راکتورها و تزریق هوا برای تمیز کردن آلومینیوم مایع در صنعت را برای کاربرد این جریان نام برد. برای طراحی و بهینه سازی این وسایل در صنعت نیاز به شناخت دقیق این جریان دو فاز می‌باشد. که در این تحقیق سعی به شناخت و معرفی آن شده است.

هدف اصلی این مدل سازی عددی، شبیه‌سازی پخش حباب‌های گاز در سیال غیرنیوتنی توانی در یک ستون حبابی با جریان مغشوش می‌باشد. در این تحقیق شیوه پخش حباب‌ها و اندازه آنها دارای اهمیت زیادی می‌باشد، بنابراین برای حل جریان دو فاز مخلوط حباب و سیال مایع، از روش موازنه جمعیت استفاده شده است. این روش می‌تواند علاوه بر مدل سازی پخش حباب، تراکنش بین حباب‌ها را نیز مدل سازی نماید.

برای این مدل سازی ابتدا یک کد عددی یک بعدی توسعه داده شده است. این کد برای فاصله دور از تزریق کننده جواب‌های مناسبی را برای ستون حباب پیش بینی می‌نماید. در این کد ساده‌سازی‌های بسیاری برای حل

---

<sup>1</sup> Bubble column

<sup>2</sup> Stirred tank

جریان فاز حاکم (سیال مایع) انجام شده است، در نتیجه برای مدل سازی تزریق کننده حباب و حل دقیقتر کد عددی دو بعدی توسعه داده شد. در این کد معادلات مومنوم، پیوستگی و جریان مغشوش (K-ε) برای فاز مایع حل می گردند و سپس با حل معادله موازنه جمعیت، توزیع حباب مشخص میگردد. این کد به دلیل اینکه با معادلات حل جریان جفت نمی باشد فقط برای جریان هایی که عامل اصلی حرکت فشار می باشد<sup>1</sup> کاربرد دارد. برای اینکه بتوان ستون حبابی را مدل کرد، نیاز به جفت نمودن این معادلات دیده شد. برای جفت کردن نیاز می باشد که نیروی عکس العمل پسای حبابها به صورت جمله چشمه ای و مقدار نسبت حجمی سیال مایع در معادلات وارد گردد. کد نهایی این تحقیق حل دائمی پخش حباب را در ستون حباب دو بعدی مدل سازی می نماید.

نکته مورد اهمیت در مورد حل معادله موازنه جمعیت شیوه مدل سازی ترکیدن و یکی شدن حبابها می باشد. در این تحقیق برای ترکیدن حباب از دو روش متفاوت استفاده شد. "لو و اسوندسون"<sup>2</sup> و "مارتینز-بازان"<sup>3</sup> روش هایی با دیدهای کاملاً متفاوت برای ترکیدن حباب را ارائه داده اند. به همین دلیل حل های انجام شده برای هر دو روش بررسی می شود. برای مدل سازی یکی شدن حبابها نیز از دو روش استفاده شده است. روش "پرینس و بلانچ"<sup>4</sup> روش اصلی مورد استفاده در کد دو بعدی در نظر گرفته شده است زیرا تاثیر غیرنیوتنی بودن سیال را می تواند مدل کند. اما روش "لو و اسوندسون" فقط برای کد یک بعدی در نظر گرفته شده است، که در آن سیال نیوتنی فرض شده است.

نیروهای اصلی در نظر گرفته شده در این تحقیق، پسا، جاذبه و شناوری می باشد. برای بدست آوردن ضریب پسا از رابطه تجربی ارائه شده برای حرکت دسته حبابها در سیال غیرنیوتنی استفاده شده است و برای بدست آوردن جمله چشمه ابتدا معادله موازنه جمعیت حل می شود و برای هر سلول محاسباتی نیروی درگ وارده به

---

<sup>1</sup> Pressure Driven

<sup>2</sup> Luo and Svendsen

<sup>3</sup> Martinez-Bazan

<sup>4</sup> Prince and Blanch

حباب با استفاده از قطر معادل ساتر<sup>۱</sup> بدست می‌آید و به عنوان جمله چشمه در معادلات مومنتوم جایگذاری می‌شود.

در انتها برای کامل تر شدن بحث علاوه بر مدل‌سازی‌های انجام شده توسط کد عددی یک مدل کامل ۳ بعدی و غیر پایا در نرم‌افزار تجاری CFX ساخته شده و نتایج آن ارائه گردیده شده است. علت اضافه نمودن این مدل بررسی تاثیر نیروهای در نظر نگرفته شده در مدل می‌باشد. نکته مورد اهمیت در مورد این نیروها این می‌باشد که تاثیر آنها فقط در حل ناپایای جریان قابل دیدن می‌باشد.

## ۱.۱. تاریخچه

در این بخش تاریخچه کارهای انجام شده بیان می‌گردد. برای بیشتر باز کردن بحث تاریخچه ارائه شده در پنج بخش مختلف بیان می‌گردد. بخش اول مربوط به جریان سیال غیر نیوتنی مغشوش تک فاز می‌باشد. بخش دوم به بررسی کارهای انجام شده بر روی حرکت حباب در سیال غیرنیوتنی می‌پردازد. در بخش سوم به بررسی پخش حباب و حل معادله موازنه جمعیت در سیال پرداخته می‌شود، پس از آن تاریخچه کوتاهی از مدل‌سازی‌های انجام شده برای یکی شدن و ترکیدن حباب معرفی می‌گردد و در آخر نیز کارهای انجام شده بر روی ستون حبابی معرفی می‌گردند.

### ۱.۱.۱. تاریخچه جریان مغشوش غیر نیوتنی

جریان مغشوش طبیعت پیچیده‌ای دارد در سال‌های گذشته تلاش‌های تجربی و تئوری بسیاری برای شناخت این پدیده انجام گرفته شده است و کتاب‌ها و مقالات بسیاری در مورد جریان مغشوش تا کنون منتشر شده است. اما این تحقیقات معمولاً در مورد سیال نیوتنی صورت گرفته و در کتاب‌های کلاسیک جریان مغشوش یا به صورت کلی از آن صرفه نظر شده است و یا در حد اشاره‌ای کوتاه مورد توجه قرار گرفته است. اما با توجه به

---

<sup>1</sup> Sauter mean diameter

همین اشارات می‌توان این موضوع را فهمید که تغییر خواص رئولوژی مواد تاثیر زیادی بر روی جریان مغشوش ندارد و اگر با اعداد بی‌بعد همانند رینولدز در سیال کار شود همان خواص مغشوش‌گی که در مواد نیوتنی دیده می‌شود باید مشاهده گردد [۱]. تاونست<sup>۱</sup> [۲] در کتاب خود اشاره کرده است که برای جریان‌هایی با رینولدزهای بالا که جریان مغشوش باشد، با هندسه مشابه سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک توانی ساختارهای یکسانی را تشکیل می‌دهند. البته انتظار می‌رود در مورد بعضی از سیالات غیرنیوتنی خاص این انتظار غلط باشد اما در مورد سیال توانی که موضوع بحث این تحقیق است، این فرض درست در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق مدل‌سازی جریان مغشوش، با استفاده از معادلات نویراستوکس متوسط‌گیری<sup>۲</sup> شده انجام می‌پذیرد. می‌توان برای حل این معادلات و بدست آوردن جمله‌هایی که از جریان مغشوش ناشی می‌شوند یکی از روش‌های معمول را برای مدل‌سازی انتخاب نمود. این روش‌ها عبارتند از:

- ۱- روش‌های جبری (صفر معادله‌ای) ۲- روش‌های تک معادله‌ای ۳- روش‌های دو معادله‌ای همانند  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$
- ۴- روش چند معادله‌ای Reynolds Stress ۴- روش LES<sup>۳</sup> ۵- روش DNS<sup>۴</sup>

مثال‌هایی از این روش‌ها را می‌توان در مرجع [۳] پیدا نمود. به دلیل اینکه در این تحقیق مدل‌سازی ترکیب حساب نیز انجام می‌پذیرد و در این مدل‌سازی نیاز به دانستن نرخ تغییرات انرژی گردابه است پس فقط از روش دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  و روش Reynolds Stress می‌توان استفاده نمود. که در این تحقیق به دلیل سادگی هندسه از روش  $k-\epsilon$  انتخاب شده است. کارهای تجربی صورت گرفته که معمولاً به صورت مرجع برای حل‌های عددی جریان‌های مغشوش غیرنیوتنی انتخاب می‌شود در جدول ۱ نشان داده شده است. پیشنهاد می‌شود برای اطلاعات بیشتر به مراجع منبع [۱] رجوع شود.

---

<sup>1</sup> Townsend

<sup>2</sup> Reynolds Average Navier-Stokes equations

<sup>3</sup> Large eddy simulation

<sup>4</sup> Direct numerical simulation



جدول ۱-۱- کارهای تجربی انجام شده بر روی جریان مغشوش برای سیال غیر نیوتنی [۱]

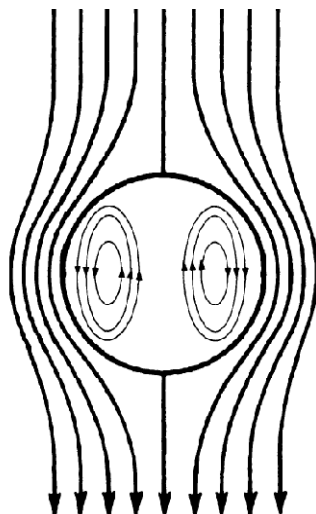
هندسه	انجام شده توسط	نوع سیال	شاخص سیال
لوله	Frieh and Schwarz 1970[4]	توانی	0.56,0.64,0.75,0.90
لوله	Pinho and Whitelaw 1990[5]	توانی	0.48,0.80
لوله	Escudier et al 1992[6]	کارو <sup>۱</sup>	0.64,0.66,0.73
لوله خمیده	Pereira and Pinho 1994[7]	توانی	0.76,0.90
حلقه های متحدالمرکز	Takami 1990[8]	توانی	0.75
حلقه های متحدالمرکز	Nouri et al. 1993[9]	کراس <sup>۲</sup>	0.45
انبساط ناگهانی	Castro et al. 1994[10]	کارو	0.66,0.73

### ۱.۱.۲. تاریخچه حرکت حباب در سیال غیر نیوتنی

در طراحی سیستم‌های دوفاز گاز-سیال غیر نیوتنی لازم است که ابتدا رفتار هیدرودینامیکی حباب به صورت کامل شناسایی شود. بر خلاف سیال نیوتنی که شناخت مناسبی نسبت به آن وجود دارد [۱۱] در مورد سیال غیر نیوتنی مقالات محدودی منتشر شده است و اکثراً به کارهای تجربی محدود می‌شود. پارامترهای مهم در این بررسی ضریب پسا، سرعت حرکت و مسیر حرکت می‌باشد. در رینولدزهای بالا چرخش داخلی جریان (شکل ۱-۱) در داخل حباب باعث کاهش ضریب پسا حباب در مقایسه با ذرات جامد می‌شود. بنابراین نمی‌توان از ضرایب پسا موجود در کتاب‌های کلاسیک سیالات برای کره استفاده نمود [۱۲].

<sup>1</sup> Carreau

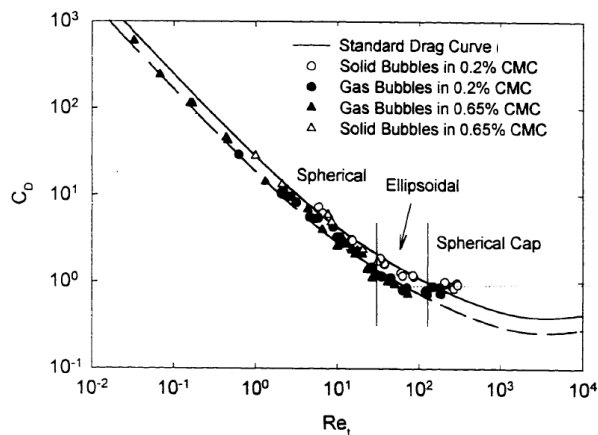
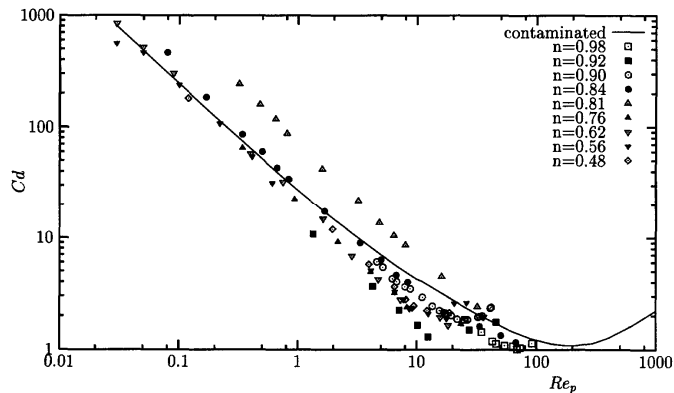
<sup>2</sup> Cross



شکل ۱-۱- چرخش داخلی جریان در حباب

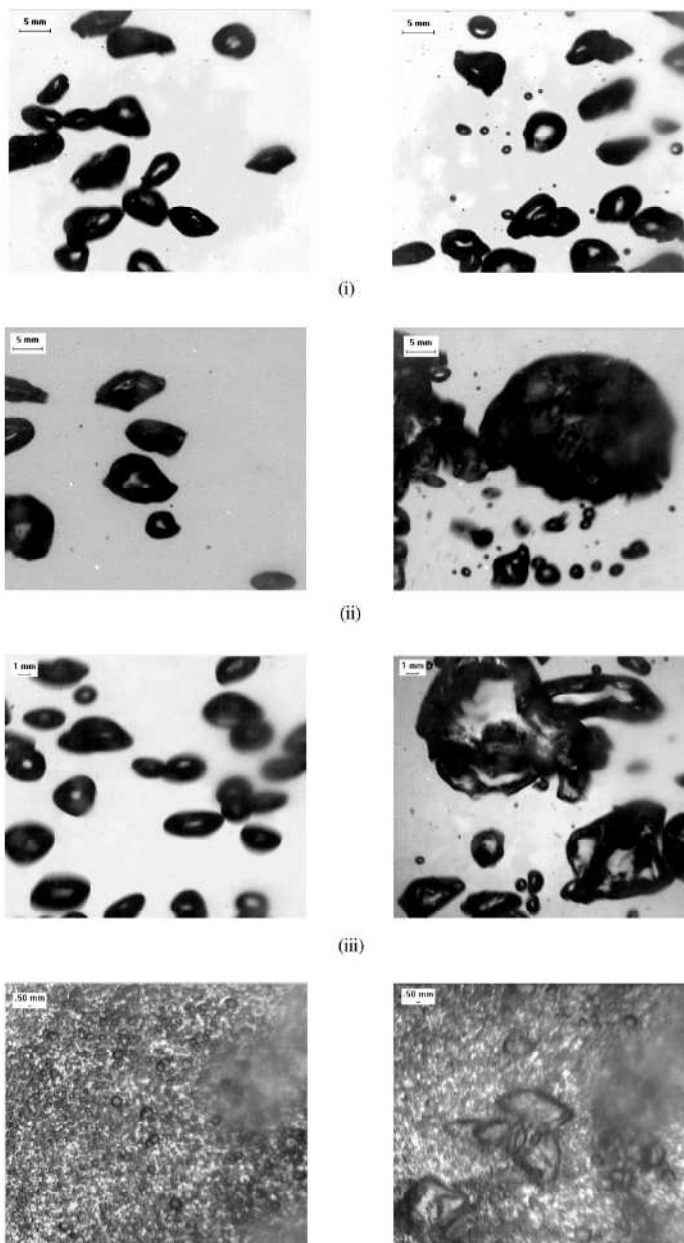
سرعت حباب خود به پارامترهایی همچون شکل حباب، کشش سطحی و غیره بستگی دارد. در رینولدزهای متوسط می‌توان شکل حباب را کروی در نظر گرفت ولی به دلیل چرخش داخلی جریان (شکل ۱-۱) قانون استوکس را برای بدست آوردن ضریب پسا نمی‌توان استفاده کرد [۱۳]. زمانی که رینولدز بالاتر می‌رود حباب شکل کروی خود را از دست می‌دهد و تاثیر چرخش داخلی جریان نسبت به تاثیر تغییر شکل قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در این رینولدزها مسیر حرکت حباب نیز تغییر می‌کند. دلیل این تغییر مسیر گردابه‌های تشکیل شده در پشت حباب و تاثیر آنها بر روی مسیر حباب می‌باشد.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد برای سیال غیر نیوتنی توانی نمودار ضریب پسا در رینولدزهای مختلف رفتاری همانند ضریب پسا استاندارد برای حباب نشان می‌دهد با این تفاوت که موازی آن و با کمی جابه‌جایی نسبت به آن قرار می‌گیرد. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲- نمودار ضریب پسا بر حسب رینولدز برای سیال غیر نیوتنی به ترتیب از مرجع [۱] و [۱۲]

علاوه بر روابط تجربی که برای نمودار بالا بیان می‌شود، روابط دیگری نیز برای دسته حباب در حال حرکت بیان شده است. جوشی [۱۴] بررسی کاملی بر روی حرکت حباب و دسته حباب در حالت سیال نیوتنی انجام داده است و رابطه ایشی [۱۵] را بهترین رابطه برای حرکت دسته حباب معرفی نموده است. نرم افزار CFX [۱۶] نیز برای مدل سازی و بدست آوردن از روابط گریس و مکلف [۱۷] استفاده می‌کند. برای دسته حباب در سیال توانی نیز کیشوره و همکاران [۱۸] رابطه تجربی را ارائه نموده‌اند. در این تحقیق از روابط مربوط به مراجع [۱۲] و [۱۸] استفاده شده است.



شکل ۱-۳- نمونه‌ای از شیوه پخش و حرکت دسته حباب [۱۵]

### ۱.۱.۳. تاریخچه معادله موازنه جمعیت

در مدل‌سازی‌های اولیه صورت گرفته برای مدل‌سازی پخش حباب، فرض شده است که حباب‌ها همگی دارای یک اندازه می‌باشد [۱۴]. در واقعیت معمولاً حباب‌ها در اندازه‌های مختلف در جریان وجود دارد. اندازه حباب در سیال نقش مهمی را در انتقال جرم و انتقال حرارت در سیستم‌های واکنش شیمیایی دارد، زیرا اندازه حباب