

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری سازه‌های هیدرولیکی

تحلیل عددی و آزمایشگاهی شکل‌گیری میکرو حباب در لوله ونتوری

نگارنده: مهین قنادی

اساتید راهنما

دکتر سید فضل اله ساغروانی

دکتر حمید نیازمند

تیرماه ۱۳۹۸

شماره: ۶۶۱۵۳
 تاریخ: ۹۸/۶/۲۳
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
 (ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم مهین فنادی دانشجوی دکتری رشته عمران به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۹۵۵ ورودی مهر ماه سال ۹۸ در تاریخ ۹۸/۴/۲۳ از رساله نظری / عملی خود با عنوان : تحلیل عددی و آزمایشگاهی شکل گیری میکرو حباب در لوله و توری دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۲۱ به درجه : نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ (ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ (د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
 ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید فضل اله ساغروانی	استاد/ رانما	دانشیار	
۲	دکتر حمید نیازمند	استاد راهنمای دوم	استاد	
۳	دکتر محمود فرزانه گرد	استاد مدعو خارجی	استاد	
۴	دکتر احمد احمدی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر محمود چهارطاقی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر مهدی گلی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم .. مهین فنادی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
 نام و نام خانوادگی دانشیار:
 آموزش تحصیلات تکمیلی

تقدیم نامه:

پدر عزیز و مادر مهربانم، راه آوردی گران سنگ تر از این ارزان ندانستم تا به خاک پیتان شاک کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوند

غبار سختگیتان را بزداید.

تقدیم به همسر عزیزم به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت.

تقدیم به خواهرهای مهربان و بردار عزیزم که همواره در طول زندگی متعل زحمتم بودند، قلمم لبریز از عشق به شماست و خوشبختی تان

منتهای آرزویم.

تقدیم به پسر عزیزم، ماهور زندکیم، امید بخش جانم که آسایش او آرامش من است.

داشته های خود را میون شما هستم، امیدوارم قادر به درک زیبایی های وجودتان باشم.

شکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگاریکتارا که هستی ام بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونم شد و به همشینی رهروان علم و دانش ممتحرم نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیم ساخت و در تمام مراحل زندگیم مراقبت قلب بود.

نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و شکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سرایم، کم گفته‌ام. از استاد فرهیخته و فرزانه ام جناب آقای دکتر سید فضل‌الله ساغروانی که از محضر پر فیض تدریسشان، بهره‌ها برده‌ام و استاد دانشمند و پرمایه ام جناب آقای دکتر حمید نیازمند به پاس مساعدت‌های بی‌شائبه‌شان بسیار سپاسگزارم، چرا که بدون راهنمایی‌های آنها تا این رساله بسیار مشکل می‌نمود. از آقای دکتر محسن محمدزاده کیلار لوبه دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان شکر و قدردانی می‌نمایم.

از پدر بزرگوارم و مادر دلسوز و مهربانم که سجده‌ی ایشان گل محبت را در وجودم پروراند و بدون حضور آنها این رساله پایان نمی‌یافت شکر و قدردانی می‌کنم. از همسر عزیزم که با عشق و مهربانی، صبورانه در کنارم بود بسیار سپاسگزارم. از خواهرها و برادر مهربانم کمال شکر را دارم که در تمام مراحل زندگی یار و همراهم بودند. از پسر دانه‌ام که حضورش در زندگی ام مایه دلگرمی و امید من است و مشکلات سر راهم با نخلد و بوسه‌های شیرینش آسان می‌شود قدردانی می‌کنم.

تعمیرنامه

اینجانب مهین قنادی دانشجوی دوره دکتری رشته سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه تحلیل عددی و آزمایشگاهی شکل‌گیری میکرو حباب در لوله ونتوری تحت راهنمایی دکتر سید فضل اله ساغروانی و دکتر حمید نیازمند متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این رساله بر روی شکل‌گیری میکرو حباب در لوله ونتوری به روش عددی و آزمایشگاهی مطالعه شده است. میکرو - نانوحباب یکی از فن‌آوری‌های جدید در نانو سیالات است. از جمله کاربردهای آن می‌توان به شناورسازی ذرات در مایع، تصفیه آب و فاضلاب، کاهش نیروی درگ، پزشکی و سلامت، پرورش آبزیان و کشاورزی بخصوص کشت بدون خاک اشاره کرد.

در این تحقیق نمونه‌های مختلفی از لوله ونتوری در نرم‌افزار OpenFOAM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و با بررسی نحوه تشکیل میکرو حباب‌ها، نمونه‌های مناسبی جهت ساخت مدل‌های آزمایشگاهی انتخاب شدند. برای تحلیل عددی از روش K_ε استاندارد استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، با عبور دادن جریان آب و هوا از داخل لوله ونتوری، با استفاده از دوربینی با سرعت بالا، معادل ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه، اقدام به عکس‌برداری و تهیه فیلم از جریان دوفازی داخل لوله ونتوری شد. فیلم‌ها و عکس‌های تهیه‌شده با استفاده از تکنیک پردازش تصویر و کدنویسی در نرم‌افزار متلب مورد پردازش قرار گرفتند. قطر ۱۰۰۰ میکرومتر مرز بین میکرو حباب و ماکرو حباب در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری شبیه رژیم‌های جریان در داخل لوله‌های افقی است و برای داشتن جریان حبابی جهت تشکیل میکرونانو حباب، سرعت جریان فاز هوا باید خیلی کمتر از سرعت جریان فاز آب باشد. با تغییر در ابعاد لوله ونتوری برای تشکیل میکرو حباب ملاحظه شد که حداقل افت فشار در محل اتصال بخش انقباض به بخش گلوگاه اتفاق می‌افتد و با کاهش شیب بخش انتشار و انقباض افت فشار افزایش می‌یابد و زمانی که شیب بخش انقباض و انتشار با هم برابر (بزرگتر از ۲۴ درجه) است نتایج بهتری به جهت تشکیل میکرو حباب حاصل می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با کاهش طول بخش گلوگاه و با افزایش دبی جریان تعداد میکرونانو حباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود. ماکزیمم قطر میکرو حباب‌ها ۱,۶۷۳ برابر قطر میانگین ساتر آنها بدست آمد.

کلمات کلیدی: میکرو حباب، لوله ونتوری، OpenFOAM، پردازش تصویر، نرم‌افزار متلب، K_ε استاندارد، جریان دوفازی، قطر ساتر.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- استفاده از تشابه ابعادی در بررسی تولید میکرو حباب در لوله ونتوری، سومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۵، تهران، ایران، COI: RCEAUD03_185.
- ۲- تحلیل عددی جریان آب و هوا در لوله ونتوری، سومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۵، تهران، ایران، COI: RCEAUD03_184.
- ۳- تحلیل آزمایشگاهی شکل‌گیری میکرو-نانو حباب در لوله ونتوری به کمک عکس‌برداری پرسرعت و پردازش تصویر، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹ شماره ۱۲، ۱۳۹۸.
- 4- Study of a single bubble inside the venturi tube, 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, 28 February, 2019, Tehran, Iran.
- 5- Dimensional analysis in the Study of Micro-Bubble Production Inside Venturi Tube, Trans. Phenom. Nano Micro Scales, [Volume 7, Issue 1](#), Winter and Spring 2019, Page 53-61, DOI: 10.22111 /tpnms. 2018. 23378. 1139.

فهرست مطالب

ج	فهرست جداول
ح	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ ضرورت انجام تحقیق
۳	۱-۳ اهداف انجام تحقیق
۴	۱-۴ روش انجام تحقیق
۴	۱-۵ فرضیات تحقیق
۵	۱-۶ معرفی ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲: مبانی تحقیق و مروری بر تحقیقات گذشته
۸	۲-۱ مقدمه
۸	۲-۲ کلیاتی درباره جریان دوفازی
۹	۲-۳ الگوهای جریان در خطوط لوله افقی
۱۰	۲-۳-۱ جریان های حبابی
۱۰	۲-۳-۲ جریان توپی یا قالبی
۱۰	۲-۳-۳ جریان لایه ای
۱۰	۲-۳-۴ جریان موجی
۱۱	۲-۳-۵ جریان لخته ای

۱۱	۲-۳-۶ جریان حلقوی
۱۱	۲-۳-۷ جریان قطره‌ای یا افشانه‌ای
۱۲	۲-۴ الگوهای جریان در خطوط لوله قائم
۱۲	۲-۴-۱ جریان حبابی
۱۳	۲-۴-۲ جریان لخته‌ای
۱۳	۲-۴-۳ جریان کف‌آلود یا انتقالی
۱۳	۲-۴-۴ جریان حلقوی باریک
۱۴	۲-۴-۵ جریان حلقوی
۱۵	۲-۵ الگوهای جریان در خطوط لوله شیب‌دار
۱۵	۲-۶ کلیاتی درباره میکرو-نانوحباب‌ها
۱۶	۲-۶-۱ مقایسه میکرو-نانوحباب‌ها و حباب‌های معمولی
۱۸	۲-۶-۲ ویژگی‌های میکرو-نانوحباب‌ها
۲۲	۲-۶-۳ روش‌های تولید میکرو حباب‌ها
۲۵	۲-۶-۴ کاربردهای میکرو-نانوحباب‌ها
۲۷	۲-۷ پردازش تصویر
۲۸	۲-۸ معرفی نرم‌افزار اپن فوم (OpenFOAM)
۳۱	۲-۸-۱ حل گر اینترفوم و معادلات حاکم بر جریان
۳۲	۲-۹ مروری بر روش تشابه ابعادی
۳۵	۲-۱۰ مروری بر تحقیقات گذشته
۴۱	فصل ۳: مواد و روش‌ها
۴۲	۳-۱ مقدمه

۴۲	..... روش عددی
۴۲	..... ۳-۲-۱ تجهیزات محاسباتی و نرم افزار
۴۳	..... ۳-۲-۲ شبیه سازی جهت بررسی رژیم های جریان در داخل لوله ونتوری
۴۴	..... ۳-۲-۳ شبیه سازی جهت بررسی اثر استفاده از روش تشابه ابعادی
۴۶	..... ۳-۲-۴ شبیه سازی لوله های ونتوری با ابعاد مختلف جهت تشکیل میکرو حباب
۴۷	..... ۳-۳ روش آزمایشگاهی
۴۷	..... ۳-۳-۱ مواد و تجهیزات
۴۷	..... ۳-۳-۲ ساخت مقطع آزمایش
۴۹	..... ۳-۳-۳ شرح انجام آزمایش
۵۰	..... ۳-۳-۴ پردازش تصاویر

فصل ۴: نتایج و بحث

۵۳	
۵۴	..... ۴-۱ مقدمه
۵۴	..... ۴-۲ نتایج حاصل از تحلیل عددی و بحث و بررسی آنها
۵۴	..... ۴-۲-۱ نتایج حاصل از بررسی رژیم های جریان در داخل لوله ونتوری
۶۱	..... ۴-۲-۲ نتایج حاصل از بررسی استفاده از روش تشابه ابعادی
۷۲	..... ۴-۲-۳ نتایج حاصل از شبیه سازی لوله های ونتوری با ابعاد مختلف جهت تشکیل میکرو حباب
۷۸	..... ۴-۳ نتایج حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و بحث و بررسی آنها
۸۸	..... ۴-۴ مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۷	
۹۸	..... ۵-۱ مقدمه
۹۸	..... ۵-۲ جمع بندی

۹۹ ۵-۳ پیشنهادات

۱۰۰ پیوست

۱۱۵ مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. ثابت های روابط توربولانسی ۳۲
- جدول ۱-۳. سرعت جریان فازهای آب و هوا برای بررسی رژیم های جریان ۴۳
- جدول ۲-۳. سرعت جریان فازهای آب و هوا برای بررسی اثر تشابه ابعادی ۴۵
- جدول ۳-۳. ابعاد مختلف لوله ونتوری جهت بررسی تشکیل میکرو حباب ۴۶
- جدول ۴-۳. مشخصات آب شهری (رفعتی، ۱۳۹۵) ۴۷
- جدول ۵-۳. دبی ها و سرعت های متوسط متناظر جریان آب ۴۹
- جدول ۱-۴. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۱-۳، برای مدل های ۱ تا ۱۰ .. ۶۰
- جدول ۲-۴. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۱-۳، برای مدل های ۱ تا ۱۰ .. ۶۹
- جدول ۳-۴. نتایج آزمون کلموگروف-اسمینورف ۷۱
- جدول ۴-۴. نتایج آزمون همبستگی غیر پارامتریک ۷۱
- جدول ۵-۴. متغیرهای مدل های ۱ تا ۱۰ بر حسب اعداد بی بعد ۷۶
- جدول ۶-۴. نتایج رگرسیون خطی برای متغیرهای مستقل a و b و c و متغیر وابسته P ۷۷
- جدول ۷-۴. نتایج رگرسیون خطی برای متغیرهای مستقل β و γ و متغیر وابسته P ۷۷
- جدول ۵-۴. نتایج آزمون کلموگروف-اسمینورف برای اندازه حباب ها ۸۶
- جدول ۷-۴. متغیرهای مدل ۱ و مدل ۲ بر حسب اعداد بی بعد. **Error! Bookmark not defined.** ۸۶
- جدول ۶-۴. آزمون کلموگروف - اسمینورف برای سرعت های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در مدل شماره ۱ ۹۴
- جدول ۷-۴. آزمون کلموگروف-اسمینورف برای سرعت های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در مدل شماره ۲ ۹۴
- جدول ۸-۴. آزمون همبستگی برای سرعت های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی ۹۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. الگوهای جریان دوفازی در خطوط لوله افقی (Alves,1954) ۱۲
- شکل ۲-۲. الگوهای جریان دوفازی رو به بالا در خطوط لوله قائم (Collier and Thome,1996) ... ۱۴
- شکل ۳-۲. سرعت بالا آمدن حباب برحسب شعاع حباب (Ohnari, 2005; Takemura, 2004; Tsuge, 1982; Ueyama and Miyamoto, 2006) ۲۰
- شکل ۴-۲. مولد میکرو حباب نوع جریان دورانی (Tatsumi,2004) ۲۳
- شکل ۵-۲. مولد میکرو حباب نوع کاویتاسیونی (لوله ونتوری) (Fujiwara 2006) ۲۴
- شکل ۱-۳. شماتیکی از لوله ونتوری مورد بررسی ۴۳
- شکل ۲-۳. شماتیکی از لوله ونتوری جهت بررسی تشکیل میکرو حباب ۴۶
- شکل ۳-۳. الف) شکل شماتیک دستگاه: (۱- مدل، ۲- شیر by pass، ۳- پمپ آب، ۴- مخزن آب، ۵- تزریق هوا)، ب) نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۱، ج) نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۲ ۴۸
- شکل ۴-۳. نمایی از ستاپ آزمایشگاهی ۴۹
- شکل ۴-۳. الف: تصویر اولیه ب: تصویر باینری ج: تصویر پردازش شده در مدل شماره ۲ تحت دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه ۵۱
- شکل ۵-۳. ردیابی حبابها در مرکز لوله ونتوری برای محاسبه سرعت در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه ۵۲
- شکل ۱-۴. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۵۵
- شکل ۲-۴. توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۵۷
- شکل ۳-۴. بردارهای سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۵۸
- شکل ۴-۴. توزیع فشار در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۵۹
- شکل ۵-۴. منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1=p_1-p_2$, $\Delta p_2=p_1-p_3$ and $\Delta p_3=p_3-p_2$ در سرعت های مختلفی از جریان آب و هوا در داخل لوله ونتوری ۶۱
- شکل ۶-۴. توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۶۴
- شکل ۷-۴. توزیع فشار در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۶۵
- شکل ۸-۴. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری الف) مدل های اصلی ب) مدل های کوچک شده ۶۶
- شکل ۹-۴. منحنی تغییرات فشار در مرکز لوله ونتوری الف) مدل های اصلی ب) مدل های کوچک شده ۶۷
- شکل ۱۰-۴. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰ ۶۸

شکل ۴-۱۱. منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1=p_1-p_2$, $\Delta p_2=p_1-p_3$ and $\Delta p_3=p_3-p_2$ برحسب جریان آب در داخل لوله ونتوری الف) مدل‌های اصلی ب) مدل‌های کوچک‌شده ۷۰

شکل ۴-۱۲. منحنی تغییرات فشار در مرکز لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ ۷۲

شکل ۴-۱۳. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ ۷۳

شکل ۴-۱۴. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ ۷۵

شکل ۴-۱۵. تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در زمانهای مختلف در مدل شماره ۲، الف: $Q=0.16lit/s$ ب: $Q=0.29lit/s$ ج: $Q=0.42lit/s$ ۷۹

شکل ۴-۱۶. تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در زمانهای مختلف در مدل شماره ۱، الف: $Q=0.16lit/s$ ب: $Q=0.29lit/s$ ج: $Q=0.42lit/s$ ۸۰

شکل ۴-۱۷. ماکزیمم تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در دبی‌های مختلف برای مدل‌های شماره ۱ و ۲ ... ۸۱

شکل ۴-۱۸. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری تحت دبی‌های مختلف در مدل شماره ۲۱ ۸۲

شکل ۴-۱۹. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری تحت دبی‌های مختلف در مدل شماره ۲۲ ۸۲

شکل ۴-۲۰. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه .. ۸۴

شکل ۴-۲۱. شکستن و تغییر شکل حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه (Zhao et al, 2017) ۸۴

شکل ۴-۲۱. توزیع اندازه حباب‌ها برای مدل‌های ۱ و ۲ تحت دبی‌های مختلف ۸۵

شکل ۴-۲۲. قطر میانگین ساتر حباب‌ها برای مدل‌های ۱ و ۲ تحت دبی‌های مختلف ۸۶

شکل ۴-۲۳. رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم حباب‌ها ۸۷

شکل ۴-۲۴. رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم حباب‌ها (Andriy et all, 2015) ۸۷

شکل ۴-۲۴. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری مدل شماره ۱، حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه ۹۰

شکل ۴-۲۵. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری مدل شماره ۲، حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه ۹۱

شکل ۴-۲۶. مقایسه سرعت جریان حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و تحلیل عددی برای مدل شماره ۱ در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه ۹۲

شکل ۴-۲۷. مقایسه سرعت جریان حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و تحلیل عددی برای مدل شماره ۲ در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه ۹۳

شکل ۵-۱. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه (Num.11) ۱۰۱

شکل ۵-۲. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه (Num.12) ۱۰۲

شکل ۳-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰,۹ متر بر ثانیه (Num.13) ۱۰۳

شکل ۴-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۲، در سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه (Num.21) ۱۰۴

شکل ۵-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۲، در سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه (Num.22) ۱۰۵

شکل ۶-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۲، در سرعت جریان آب ۰,۹ متر بر ثانیه (Num.23) ۱۰۶

شکل ۷-۵. توزیع سرعت در لوله ونتوری مدل شماره ۱: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه ۱۰۷

شکل ۸-۵. توزیع سرعت در لوله ونتوری مدل شماره ۲: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه ۱۰۷

شکل ۹-۵. توزیع فشار در لوله ونتوری مدل شماره ۱: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه. ۱۰۸

شکل ۱۰-۵. توزیع فشار در لوله ونتوری مدل شماره ۲: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه ۱۰۸

شکل ۱۱-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه ۱۰۹

شکل ۱۲-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه ۱۱۰

شکل ۱۳-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰,۴۲ لیتر بر ثانیه ۱۱۱

شکل ۱۴-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه. ۱۱۲

شکل ۱۵-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه ۱۱۳

شکل ۱۶-۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۴۲ لیتر بر ثانیه. ۱۱۴

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

نانو یک پیشوند به معنی یک میلیارد است. در حوزه‌های علوم و مهندسی، نانو فناوری به تولید و کاربردهای موادی که حداقل در یک بعد، طولی کمتر از میلیارد متر داشته باشد اطلاق می‌شود. عموماً فرآیندهای منتهی به چنین ابعادی نیازمند تغییراتی در محدوده نزدیک به ابعاد مولکول‌ها ممکن است. در این شرایط، مواد، نسبت به ابعاد بزرگ خود، رفتاری غیرمتعارف از خود به نمایش می‌گذارند. از دلایل این امر می‌توان به افزایش تعداد و سطح ویژه مواد در اندازه نانو نسبت به حالت بزرگ مقیاس آن‌ها اشاره کرد.

فناوری نانو رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که موضوع آن تولید ماده یا دستگاه‌هایی در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. اندازه ذرات در فناوری نانو بسیار مهم است، زیرا این موضوع در خصوصیات ماده حاصل بسیار تأثیرگذار است. این اندازه در مواد مختلف متفاوت است، اما به طور معمول مواد نانو به موادی که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر باشد گفته می‌شود (Nanomaterials Database, STATNANO; 2018).

نانو فناوری یک دانش میان‌رشته‌ای است. با توجه به نو بودن این فناوری، هر سال کاربردهای جدیدی از آن در صنایع مختلف معرفی می‌شود. فناوری نانو منجر به تغییرات شگرف در استفاده از منابع طبیعی، انرژی و آب شده است. به کمک این فناوری می‌توان پساب و انواع آلودگی‌ها را با صرف مقادیر اندک ماده نانو و صرف انرژی کمتر از مواد و روش‌های معمول کاهش داد. یکی از شاخه‌های بنیادین نانو فناوری، نانو سیالات است. نانو سیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت در نانو سیال می‌شود؛ بنابراین نانو سیال‌ها گزینه‌های مناسبی برای استفاده در کاربردهای انتقال حرارت به شمار می‌روند (Saidur et al, 2011).

میکرو - نانوحباب یکی از فناوری‌های جدید در نانو سیالات است که با توجه به یافته‌های فعلی، انتظار می‌رود که در آینده کاربردهای بسیار زیادی داشته باشد. از جمله کاربردهای آن می‌توان به شناورسازی ذرات در مایع^۱، تصفیه آب و فاضلاب، پزشکی و سلامت، پرورش آبزیان و کشاورزی بخصوص کشت بدون خاک^۲ اشاره کرد.

^۱ Flootation

^۲ Hydroponic

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی نانو سیالات و کاربردهای و سیع میکرو-نانوحباب‌ها در علوم مختلف از جمله عمران و محیط‌زیست، پزشکی، مکانیک، شیمی و بیوشیمی، صنایع و غیره اهمیت تولید اقتصادی و مطمئن میکرو-نانوحباب‌ها بیشتر به چشم می‌آید. از آنجاکه یکی از روش‌های مرسوم و شناخته شده تولید میکرو-نانوحباب استفاده از فرآیند ونتوری است، لذا در این تحقیق نحوه تشکیل میکرو حباب‌ها در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است.

تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده برای بررسی حباب‌ها در لوله‌های افقی و عمودی می‌باشد و بر روی میکرو-نانوحباب‌های ایجاد شده توسط لوله ونتوری تحقیقات چندانی صورت نگرفته است و مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بیشتر بر روی تغییرات سرعت و فشار و بررسی افت فشار در داخل لوله ونتوری بوده و مطالعات چندانی بر روی نحوه تشکیل میکرو-نانوحباب‌ها و بررسی تغییرات نسبت هوا به آب (آلفا) صورت نگرفته است. مطالعات صورت گرفته بر روی مولدهای نوع ونتوری میکرو حباب هم بیشتر در جهت استفاده از این نوع مولدها جهت کاهش نیروی درگ و جهت تصفیه آب و فاضلاب و غیره می‌باشد و جای مطالعه ای که هم به جهت عددی و هم آزمایشگاهی شکل گیری میکرو حباب‌ها را در لوله ونتوری بررسی کند خالی به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق به بررسی عددی و آزمایشگاهی شکل گیری میکرو حباب در لوله ونتوری پرداخته می‌شود.

۳-۱ اهداف انجام تحقیق

در این تحقیق هدف کلی عبارت است از: تحلیل عددی و آزمایشگاهی شکل گیری میکرو حباب در لوله ونتوری.

- در این تحقیق اهداف جزئی زیر دنبال می‌شود:
- پیدا کردن الگوی جریان در داخل لوله ونتوری
 - دستیابی به ابعاد مناسبی از لوله ونتوری به جهت تشکیل میکرو حباب
 - اثر تشابه ابعادی در بررسی تولید میکرو حباب در لوله ونتوری
 - دستیابی به سرعت های آب و هوای مناسب برای داشتن جریان حبابی جهت تشکیل میکرو حباب

۴-۱ روش انجام تحقیق

در این تحقیق سعی شده است تا با مطالعه عددی و آزمایشگاهی، با استفاده از نرم‌افزار اپن فوم^۱ و عکس‌برداری پرسرعت و تکنیک پردازش تصویر^۲، بر روی لوله‌های ونتوری در ابعاد و اندازه‌های مختلف و تحت دبی‌های مختلف، نحوه شکل‌گیری میکرو حباب‌ها در لوله ونتوری و سرعت و قطر حباب‌ها بررسی شود و ابعاد مناسبی از لوله ونتوری جهت تولید میکرو حباب انتخاب گردد.

در این تحقیق نمونه‌های مختلفی از لوله ونتوری با ابعاد و اندازه‌های مختلف توسط نرم‌افزار گمبیت^۳ شبیه‌سازی و مش بندی شده و سپس توسط نرم‌افزار متن‌باز اپن فوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم‌افزار پاراوو^۴ به صورت گرافیکی مشاهده شده است. با استفاده از نتایج تحلیل عددی نمونه‌های مناسبی جهت ساخت مدل آزمایشگاهی انتخاب گردیده است. پس از انتخاب جنس مناسب برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، دو نمونه لوله ونتوری با ابعاد و اندازه‌های مختلف ساخته شده و با استفاده از دوربین عکاسی با سرعت بالا، در محیط آزمایشگاه از نمونه‌ها عکس و فیلم تهیه گردیده است. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار متلب^۵ و روش پردازش تصویر، به بررسی حباب‌ها پرداخته شده است. سپس نتایج حاصل از مطالعات عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از کامپیوترهای سریع موجود در مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین از سیستم‌های سریع مرکز ابررایانش شیخ بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان با پردازنده AMD Opteron، با ۱۰ هسته پردازشی در سرعت ۲/۲ گیگاهرتز و ۲۰ گیگابایت حافظه موقت^۶ استفاده شده است. برای انجام مطالعات آزمایشگاهی از آزمایشگاه تحقیقاتی آشکار سازی و ردیابی دانشگاه صنعتی شاهرود بهره برده شده است، در این مطالعه از دوربین پرسرعت dimax S1 کارخانه سازنده pco ساخت کشور آلمان با حداکثر سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است.

۵-۱ فرضیات تحقیق

در این رساله فرضیه‌های زیر در نظر می‌باشد که تحقق یا عدم تحقق آنها در این تحقیق بیان خواهد شد:

۱- الگوی جریان در داخل لوله ونتوری می‌تواند شبیه الگوی جریان در داخل لوله‌های افقی باشد.

^۱ OpenFOAM

^۲ Image Processing

^۳ Gambit

^۴ Paraview

^۵ Matlab

^۶ RAM

- ۲- جهت صرفه جویی در زمان و هزینه ها می توان از تشابه ابعادی استفاده کرد.
- ۳- با افزایش دبی جریان تعداد میکرونانو حباب ها افزایش می یابد.
- ۴- با افزایش دبی جریان قطر میکرونانو حباب ها کوچکتر می شود.
- ۵- با کاهش طول گلوگاه میکرونانو حباب های بیشتری تولید می شود.
- ۶- با کاهش شیب بخش انتشار و انقباض میکرونانو حباب های بیشتری تولید می شود.

۱-۶ معرفی ساختار پایان نامه

تحقیق حاضر به صورت زیر سازمان بندی شده است:

فصل اول: کلیات

در این قسمت از پایان نامه به بیان مقدمه ای بر اهمیت فناوری نانو و میکرو-نانوحباب ها، ضرورت انجام تحقیق، اهداف تحقیق، روش تحقیق و روند ساختار کلی تحقیق اشاره شده است.

فصل دوم: مبانی تحقیق و مروری بر مطالعات پیشین

در این فصل کلیاتی درباره جریان دوفازی مطرح شده و الگوهای توزیع جریان در خطوط لوله های افقی، قائم و شیب دار بررسی می شود. روش های تولید میکرو حباب ها و ویژگی آن ها و مقایسه با حباب های ماکرو شرح داده می شود و روش پردازش تصویر، معرفی نرم افزار اپن فوم، مروری بر روش تشابه ابعادی و مروری بر سوابق و پژوهش های انجام شده توسط محققین قبلی ارائه می شود.

فصل سوم: مواد و روش ها

این فصل به بررسی مواد و روش های عددی و آزمایشگاهی اختصاص داده شده است.

فصل چهارم: نتایج و بحث

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی پرداخته شده است.

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

در این بخش جمع بندی کلی نتایج و پیشنهادهایی در ارتباط با تکمیل و توسعه تحقیق حاضر ارائه شده است.

فصل ۲: مبانی تحقیق و مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۲ مقدمه

در این تحقیق به تحلیل عددی و آزمایشگاهی شکل‌گیری میکرو حباب در لوله ونتوری پرداخته می‌شود. در این فصل ابتدا کلیاتی درباره‌ی جریان دوفازی مطرح می‌گردد و سپس به انواع الگوهای توزیع جریان در خطوط لوله‌های افقی و قائم و شیب‌دار پرداخته می‌شود. در ادامه ویژگی‌های میکرو- نانوحباب‌ها و مقایسه با حباب‌های معمولی و روش‌های تولید میکرو حباب‌ها و کاربرد میکرو - نانوحباب‌ها شرح داده شده است. سپس به معرفی نرم‌افزار این فوم و مروری بر روش تشابه ابعادی پرداخته شده و به‌طور خلاصه مروری بر سوابق و پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققین قبلی ارائه شده است.

۲-۲ کلیاتی درباره جریان دوفازی^۱

تعداد زیادی از فرایندهائی که در صنعت اتفاق می‌افتد و همچنین طرح‌های مهندسی بستگی به جریان توأم دو یا چند فاز از یک سیال و یا دو یا چند سیال مختلف و یا سیال و جامد دارند. چون در این تحقیق جریان دوفازی آب و هوا استفاده شده است در ادامه به بررسی این نوع جریان دوفازی پرداخته می‌شود.

اندرکنش بین دو فاز سبب می‌شود که الگوهای مختلفی از جریان به‌صورت تصادفی رخ می‌دهد (Martin, 1976). مهم‌ترین علامت مشخصه جریان‌های دوفازی وجود فصل مشترک بین فازهای گاز و مایع است که اشکال مختلفی دارد. از دیدگاه نظری، امکان پیدایش دامنه نامحدودی از فصول مشترک مختلف بین دو فاز وجود دارد، اما عموماً تأثیر کشش سطحی بین دو فاز منجر به پیدایش فصل مشترک‌های منحنی شکل می‌شود و درنهایت تمامی آن‌ها تبدیل به اشکال کروی (نظیر قطره‌ها و حباب‌ها) می‌شوند.

الگوی جریان چگونگی توزیع هر فاز جریان در برابر فاز دیگر، در مجرای حرکت سیال است. در حالت کلی با طبقه‌بندی انواع حالات توزیع فصل مشترک بین دو فاز گاز و مایع که اصطلاحاً رژیم یا الگوی جریان نامیده می‌شوند، می‌توان به توضیح و تفسیر این نوع جریان‌ها پرداخت. باید توجه داشت که این رژیم‌های جریان معمولاً به‌وسیله موقعیت و شکل هندسی خط لوله، جهت جریان، خواص فیزیکی و شدت جریان هریک از فازها و شار حرارتی وارد بر دیواره لوله، تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Hewitt and Taylor, 1970).

هرچند جریان‌های دوفازی نیز از کلیه قوانین حاکم بر مکانیک سیالات تبعیت می‌کنند، اما از آنجاکه عوامل زیادی سبب نامعینی و پیچیدگی این نوع جریان‌ها در مقایسه با جریان‌های تک فازی می‌شوند، سیستم‌های جریان دوفازی به‌شدت پیچیده‌اند (حتی جریان دوفازی یک‌بعدی در مجاری). برای غلبه

^۱ Two Phase Flow

بر این پیچیدگی‌ها، محققین رویکردهای مختلفی را در پیش گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به انجام آزمایش بر روی مدل‌ها فیزیکی ساده که بتوان از آن‌ها در تحلیل مسائل علمی و مهندسی استفاده کرده و به معادلات ساده‌تری دست یافت، اشاره کرد (Mattew et al, 2000).

برای طبقه‌بندی و تحلیل جریان‌های دوفازی مطالعات زیادی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال بیکر و همکاران نقشه‌جریانی برای جریان دوفازی داخل لوله ارائه داده‌اند. کمیت‌های در نظر گرفته‌شده برای محورهای مختصات این نمودار امکان استفاده از آن را برای سیال‌های مختلف فراهم می‌کند (Baker, 1954; 1975). مندهین و همکاران نقشه‌جریانی برای آب - هوا ارائه داده‌اند، آن‌ها از سرعت‌های ظاهری فازها برای محورهای مختصات استفاده کرده‌اند (Mandhane et al, 1974). سندرا و همکاران به شبیه‌سازی الگوهای مختلف جریان موجود در نمودار جریان بیکر با نرم‌افزار FLUENT پرداختند ولی نتایج مطلوبی در مورد رژیم‌های جریان حبابی و اسلاگ به دست نیاوردند (Sandra, 2008). کریشان و همکاران با استفاده از روش VOF و کد تجاری FLUENT به شبیه‌سازی جریان دوفازی در داخل یک مینی کانال پرداختند و تأثیر روش‌های مختلف عددی و چسبندگی دیواره را روی کیفیت جواب‌ها مطالعه کردند (Krishnan, 2010). انصاری و همکاران شرایط وقوع رژیم‌های مختلف در کانال افقی را به‌صورت دوبعدی بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که روش VOF برای بررسی رژیم‌های مختلف مناسب‌تر است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۲؛ Ansari, 1989؛ Ansari and Daramizadeh, 2012).

شایان‌ذکر است که علیرغم کوشش‌های بسیار زیادی که برای طبقه‌بندی انواع رژیم‌های جریان دوفازی به‌عمل آمده است روش‌های پیشنهادی اغلب کیفی و مطابق نقطه نظرات شخصی محققین هستند به‌طوری‌که تاکنون رژیم‌های جریان مختلفی تعریف گردیده و دامنه گسترده‌ای از اسامی برای این منظور، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Levy, 1999). در این نوشته تلاش شده است تا تعاریفی که برای انواع رژیم‌های جریان ارائه می‌شود، به نحوی باشد که مورد قبول عمومی قرار گرفته باشد. در ادامه تعاریفی از انواع رژیم‌های جریان به‌صورت خلاصه آورده شده است.

۳-۲ الگوهای جریان در خطوط لوله افقی

هفت نوع الگوی توزیع، برای جریان‌های دوفازی در خطوط لوله افقی، وجود دارد. شایان‌ذکر است که شیب خط لوله و برخی اعداد بدون بعد نظیر کسر حجمی هوا و عدد فرود مؤثر بر جریان اثرات مهمی بر تغییر فصل مشترک دو فاز ایجاد می‌کنند (سامانی و همکاران، ۱۳۸۵). این الگوهای جریان در شکل ۱-۲ ارائه شده‌اند (Alves, 1954). برای هر رژیم جریان مقادیر تجربی سرعت هر فاز برای مخلوطی از گازهایی با جرم ویژه نزدیک به جرم ویژه هوا و مایعاتی با گرانشی کمتر از صد سانتی پوایز توسط بگز و بریل محاسبه شده است (Beggs and Brill, 1973).

۱-۳-۲ جریان‌های حبابی^۱

در این نوع جریان نرخ حجمی گاز نسبتاً کم بوده و نرخ حجمی مایع نسبتاً زیاد است و جریان حبابی به صورت حباب‌های کوچک گاز تحت تأثیر اختلاف چگالی در قسمت فوقانی لوله ظاهر می‌شود و در این نوع جریان فاز پیوسته مایع و فاز ناپیوسته گاز است. با افزایش نرخ حجمی فاز گاز اندازه‌ی حباب‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. سرعت ظاهری فاز مایع در این نوع رژیم بین ۵ تا ۱۵ فوت بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز بین ۱ تا ۱۰ فوت بر ثانیه است.

۲-۳-۲ جریان توپی یا قالبی^۲

اگر سرعت حباب‌های گازی در جریان حبابی افزایش یابد تعداد حباب‌های فاز گاز افزایش می‌یابد به طوری که حباب‌ها به هم متصل شده و حباب‌های بزرگ و توپی شکل نزدیک جداره بالایی لوله تشکیل می‌دهند و به صورت پلاگ‌هایی درمی‌آیند، به این نوع جریان، جریان توپی یا قالبی گفته می‌شود.

۳-۳-۲ جریان لایه‌ای^۳

اگر سرعت پلاگ‌های گازی در جریان پلاگی افزایش یابد دو فاز مایع و گاز از هم جدا شده و جریان جدا از هم شکل می‌گیرد و فاز گاز که دارای سرعت بیشتری نسبت به فاز مایع است در قسمت بالایی و مایع در قسمت پایینی لوله حرکت می‌کنند و تداخل دو فاز به ندرت اتفاق می‌افتد و فصل مشترک آن‌ها منظم و صاف است. سرعت ظاهری فاز مایع کمتر ۰/۱۵ متربرثانیه (۰/۵ فوت بر ثانیه) و سرعت ظاهری فاز گاز بین ۰/۶ تا ۳ متربرثانیه (۲ تا ۱۰ فوت بر ثانیه) است.

۴-۳-۲ جریان موجی^۴

در این نوع جریان سرعت فاز گازی از سرعت فاز مایع بیشتر می‌شود و بین فازهای گاز و مایع تنش‌هایی ایجاد شده که باعث ایجاد موج‌هایی در فصل مشترک می‌گردد که این امواج در امتداد جریان حرکت می‌کنند. سرعت ظاهری فاز مایع کمتر از ۰/۳ متربرثانیه (۱ فوت بر ثانیه) و سرعت ظاهری فاز گاز حدود ۴/۵ متربرثانیه (۱۵ فوت بر ثانیه) است.

۱ Bubbly Flow

۲ Plug Flow

۳ Stratified Flow

۴ Wavy Flow

۵-۳-۲ جریان لخته‌ای^۱

در خطوط لوله افقی و مواردی که نرخ جریان مایع زیاد باشد، افزایش سرعت گاز منجر به افزایش دامنه موج‌های سطحی مایع در فصل مشترک گاز و مایع می‌شود که ضمن آن، موج‌ها به جداره‌ی فوقانی لوله برخورد کرده و لخته‌های مایع تشکیل می‌شود و در جریان موجی باعث برهم زدگی پیوستگی فاز مایع شده و لخته‌هایی از فاز مایع در فاز گاز به وجود می‌آید. حباب‌هایی بنام حباب تیلور که دارای ابتدا و انتهای گرد شده هستند شکل می‌گیرد. لخته‌هایی مایع در چنین حالتی می‌توانند باعث لرزش‌هایی شدید و در برخی موارد ایجاد خطر درون تجهیزات واقع در مسیر خط لوله و مراکز جمع‌آوری شوند. از ویژگی‌های این نوع رژیم جریان می‌توان از نوسانات منظم در تغییرات فشار و مقدار مایع تجمع یافته نام برد که معیار مناسبی برای تشخیص این نوع رژیم جریان است.

۶-۳-۲ جریان حلقوی^۲

در این جریان چون سرعت فاز گاز خیلی بیشتر از فاز مایع است، فاز مایع به جداره درونی لوله چسبیده و حرکت آرام داشته و فاز گاز از وسط فاز مایع به صورت منظم عبور می‌کند. این جریان دو فاز مایع و گاز به صورت دو استوانه متداخل درون لوله جاری هستند (مایع بر روی جداره داخلی لوله و گاز در مرکز لوله می‌باشد). سرعت ظاهری فاز گاز بیشتر از ۶ متربرثانیه (۲۰ فوت بر ثانیه) است. بررسی دقیق این نوع الگوی جریان به جهت میزان خوردگی سایشی، افزایش بازدهی خط انتقال، پیش‌بینی مقدار مایع تجمع یافته، تعیین ضخامت فیلم مایع روی دیواره لوله و محاسبه‌ی افت فشار سیال، جهت طراحی خطوط لوله انتقال و تجهیزات انتهایی آن، از اهمیت خاصی برخوردار است.

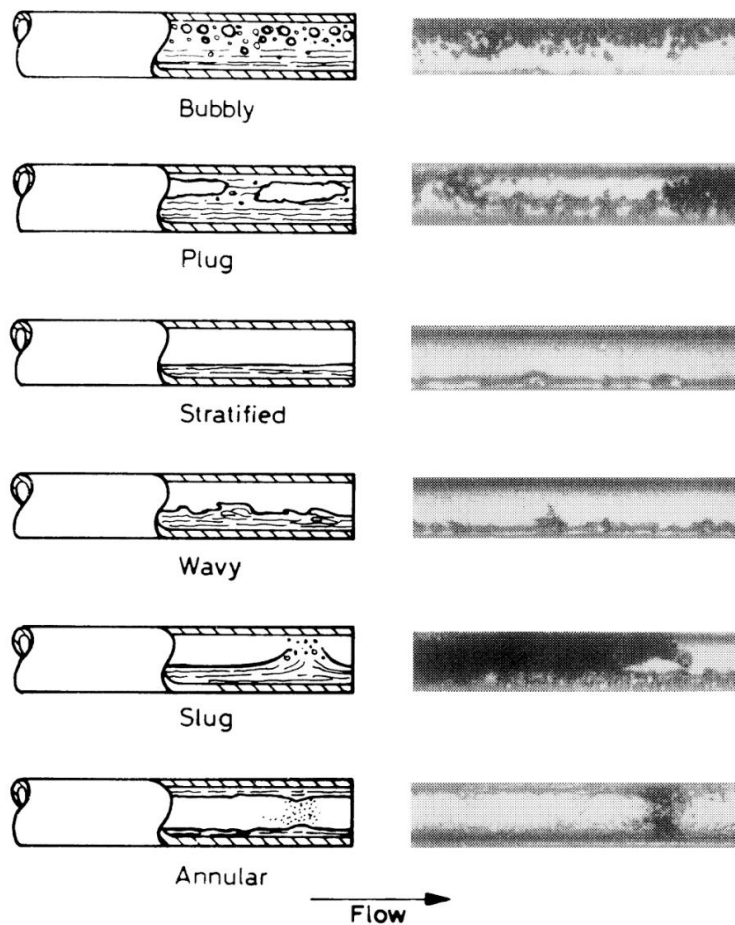
۷-۳-۲ جریان قطره‌ای یا افشانه‌ای^۳

با افزایش نرخ جریان فاز گاز در جریان حلقوی، فاز گاز، فاز مایع را به صورت قطرات ریزی انتقال خواهد داد. احتمالاً چنین جریانی وقتی شکل می‌گیرد که سرعت ظاهری فاز گاز بیش از ۶ متربرثانیه (۲۰ فوت بر ثانیه) باشد. در مواردی که نرخ جریان گاز نسبتاً زیاد و نرخ جریان مایع نسبتاً کم باشد، فاز مایع در داخل فاز گاز به صورت ذرات بسیار ریز و پراکنده تبدیل شده و اصطلاحاً فضایی شبیه مه به وجود می‌آید. در این حالت جریان را مه‌آلود می‌نامند. بعضی از خطوط لوله انتقال سیستم‌های گاز میعانی در مواقع خاصی در این نوع الگوی جریان قرار دارند.

^۱ Slug Flow

^۲ Annular Flow

^۳ Spray Flow



شکل ۱-۲. الگوهای جریان دوفازی در خطوط لوله افقی (Alves, 1954)

۲-۴ الگوهای جریان در خطوط لوله قائم

در خطوط لوله قائم نیز الگوهایی ظاهری شونند که تفاوت چندانی با الگوهای جریان در خطوط لوله افقی ندارند. توزیع فازهای گاز و مایع درون خطوط لوله قائم انتقال جریان دوفازی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. الگوی توزیع فازها در این خطوط لوله به صورت زیر تقسیم بندی می شوند (Collier and Thome, 1996):

۲-۴-۱ جریان حبابی

در جریان حبابی، گاز یا فاز بخار در داخل فاز مایع پیوسته، به صورت حباب پراکنده شده است. در یک قسمت از لوله حبابها ممکن است بسیار کوچک و کروی باشند و در قسمت دیگر بزرگ و کشیده (سر کروی و دم تخت) باشند. این حالت زمانی اتفاق می افتد که دبی فاز گاز نسبت به مایع خیلی کم باشد (Collier and Thome, 1996). سرعت فازها در این نوع جریان به دلیل اختلاف جرم ویژه فازها،

متفاوت می‌باشد. معمولاً حباب‌های ریز گاز با سرعت ظاهری کمتر از 0.6 متر بر ثانیه (2 فوت بر ثانیه) از درون فاز مایع عبور می‌کند (Govier and Aziz, 1972).

۲-۴-۲ جریان لخته‌ای

در جریان حبابی با افزایش سرعت فاز گاز، تعداد حباب‌ها افزایش یافته و از برخورد و به هم پیوستن آن‌ها با یکدیگر چند گنبد چتری شکل گازی به وجود می‌آید که در قسمت‌هایی از لوله، تمام سطح مقطع لوله را اشغال می‌کنند. دماغه حباب‌ها شکل کروی دارد (Collier and Thome, 1996). در عمل، این نوع جریان به صورت منقطع از فازهای مایع و گاز، دارای افت فشار زیاد و همچنین از نظر فرایندی با ایجاد سرو صداهای ناهنجار و آسیب دیدگی تجهیزات، همراه است. در طراحی خطوط لوله جریان دوفازی، سعی می‌شود که حتی الامکان از ایجاد چنین رژیم جریانی، اجتناب شود. در این حالت، سرعت ظاهری فاز گاز 0.6 الی 9 متر بر ثانیه (2 الی 30 فوت بر ثانیه) تغییر می‌کند (Govier and Aziz, 1972).

۲-۴-۳ جریان کف آلود یا انتقالی^۱

این نوع جریان از شکستن حباب‌های بزرگ که در جریان اسلاگ تشکیل شده بودند به وجود می‌آید. گاز یا بخار به صورت بی‌نظم در داخل مایع و دور از دیواره لوله حرکت می‌کند. ماهیت جریان نیز متغیر با زمان است. به این جریان، جریان نیمه حلقوی یا حلقوی اسلاگ نیز اطلاق می‌شود (Collier and Thome, 1996). در خطوط لوله جریان با قطر زیاد، حرکت نوسانی مایع به سمت بالا و پایین رخ خواهد داد در حالی که در لوله‌های باریک، این حرکت نوسانی به وقوع نخواهد پیوست و حرکت انتقالی بین دو نوع جریان لخته‌ای و حلقوی بسیار گذرا خواهد بود (Govier and Aziz, 1972).

۲-۴-۴ جریان حلقوی باریک^۲

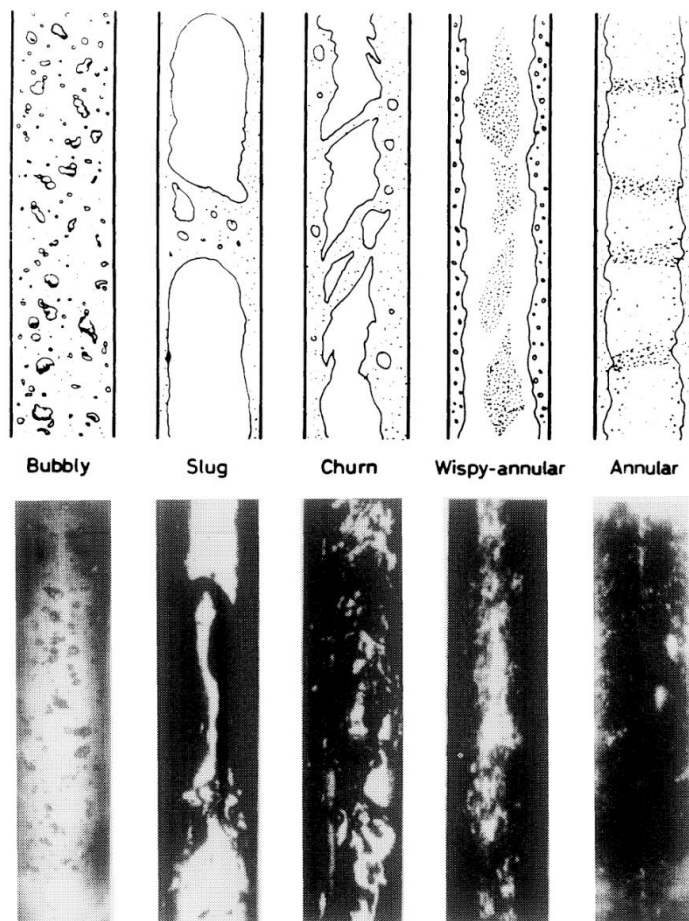
جریان در این ناحیه از یک فیلم مایع ضخیم بر روی دیواره لوله با مقادیر قابل توجهی از مایع که در هسته بخار یا گاز وارد شده است، تشکیل می‌شود. فیلم مایع خود شامل حباب‌های گازی کوچک می‌باشد و قطرات مایع داخل هسته گازی به صورت توده‌ای حرکت می‌کنند. این جریان زمانی اتفاق می‌افتد که دبی جریان گازی زیاد باشد (Collier and Thome, 1996).

^۱ Churn(Transition) Flow

^۲ Wispy-annular

۵-۴-۲ جریان حلقوی^۱

جریان حلقوی از فیلم مایع بر روی دیواره لوله و هسته بخار یا گاز تشکیل می‌شود. بر روی سطح فیلم، امواج با دامنه بزرگ تشکیل می‌شوند که از شکستن این امواج مقادیر قابل توجهی قطره مایع وارد هسته بخار یا گاز می‌شوند. از این حیث، نقطه تمایز این جریان از جریان حلقوی باریک در این می‌باشد که قطرات از هم جدا هستند و به صورت توده‌ای حرکت نمی‌کنند (Collier and Thome, 1996). در این نوع رژیم جریان سرعت ظاهری فاز گاز بیش از ۹ متربرثانیه (۳۰ فوت بر ثانیه) و سرعت ظاهری فاز مایع کمتر از ۰/۶ متربرثانیه (۲ فوت بر ثانیه) می‌باشد (Govier and Aziz, 1972).



شکل ۲-۲. الگوهای جریان دوفازی رو به بالا در خطوط لوله قائم (Collier and Thome, 1996)

^۱ Annular Flow

۵-۲ الگوهای جریان در خطوط لوله شیب‌دار

شیب لوله از حالت افقی حتی به میزان اندک، تأثیر مهمی بر رشد یا از بین رفتن ناپایداری‌ها دارد و این موضوع در مطالعات بسیاری ذکر شده است. بارنی و همکارانش در سال ۱۹۸۰ جریان آب و هوا درون لوله‌های با شیب مثبت ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درجه ولوله‌های با شیب منفی ۱، ۲، ۵ و ۱۰ درجه را مطالعه کردند (Barnea et al, 1980).

اندروسی و پرسن در سال ۱۹۸۷، جریان آب و هوا در لوله با قطر ۵ سانتی‌متر با شیب‌های منفی ۰/۶۵ درجه و ۱/۲ درجه و استنیسلاو و همکاران در سال ۱۹۸۶ لوله‌های با شیب مثبت تا ۹ درجه را مورد مطالعه قرار دادند. گرولمان و همکاران در سال ۱۹۹۶ جریان آب-هوا و تترادکان^۱-هوا را در لوله‌های با قطر ۲/۶ و ۳/۱ سانتی‌متر در شیب‌های مثبت و منفی اندک نسبت به افق مطالعه کردند (Grolman, 1996; Stanislav, 1986; Andreussi, 1987).

تمامی این پژوهشگران بیان کرده‌اند که شیب منفی لوله موجب می‌شود ناپایداری‌های ایجاد شده در جریان لایه‌ای زودتر از بین رود و به پایداری جریان کمک می‌کند و بالعکس شیب مثبت لوله موجب رشد سریع‌تر ناپایداری‌ها و تغییر سریع‌تر رژیم جریان لایه‌ای به رژیم اسلاگ می‌شود. در هنگام اجرای خط لوله باید تا حد امکان از شیب‌دار شدن مثبت لوله جلوگیری نمود و در صورت امکان برای اطمینان از پایداری جریان دوفازی لایه‌ای، به لوله شیب منفی داد (انصاری و کردستانی، ۱۳۸۶).

۶-۲ کلیاتی درباره میکرو-نانوحباب‌ها

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها، حباب‌های بسیار کوچکی از هوا یا گازهای دیگر هستند. میکرو حباب‌ها حباب‌های بسیار کوچکی هستند که قطر آن‌ها حدود چند صد میکرومتر است. محققین هنوز درباره تعریف میکرو حباب‌ها به توافق نرسیده‌اند (Li, 2006). به‌طور کلی در زمینه‌های مختلفی از مطالعه، دامنه قطر میکرو حباب‌ها متفاوت است (Tsuge and Li, 2006). در زمینه فیزیک سیال^۲ حباب‌های با قطر چند صد میکرومتر و کمتر را میکرو حباب می‌نامند ولی در زمینه مطالعات فیزیولوژیکی حباب‌های به قطر ۱۰ تا ۴۰ میکرومتر را میکرو حباب می‌نامند (Tsuge, 2010). لی و همکارانش حباب‌های به قطر چند ده میکرومتر را میکرو حباب می‌نامند (Li et al, 2013). ایشی و همکارانش حباب‌های در محدوده‌ای با قطر چند ده میکرومتر تا چند صد نانومتر را میکرو حباب می‌نامند (Ishii et al 2005). برخی از محققین حباب‌های کوچک با قطر کمتر از چند صد میکرومتر را میکرو حباب می‌نامند (Kawaraha, 2009). کراپ و نیک میکرو حباب‌ها را حباب‌های کروی حاوی گاز تعریف می‌کنند که

^۱ tetradcane

^۲ Fluid physics

بافاصله و جدا از هم قرار می‌گیرند و معمولاً قطره‌هایی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر دارند (Kurup and Naik, 2010). تابعی و همکارانش میکرو حباب‌ها را به صورت حباب‌های بسیار کوچک با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرومتر که می‌توانند در داخل سیال به طور یکنواخت توزیع شوند تعریف می‌کنند (Tabei et al, 2007). در جایی دیگر میکرو حباب به صورت حباب‌های بسیار کوچک با قطری در حدود چند صد میکرومتر که می‌توانند در داخل سیالی مانند خون به طور یکنواخت معلق شوند تعریف شده است (The American Heritage Dictionary of English Language, 2000). اوناری حباب‌های با قطر در حدود ۱۰ میکرومتر را میکرو حباب می‌نامند (Ohnari, 2006).

به طور کلی حباب‌های در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر را میکرو حباب، کمتر از ۱۰ میکرومتر را نانوحباب و بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر را ماکرو حباب می‌نامند (Zimmerman et al, 2013; Prevenslik, 2014).

میکرو حباب‌ها دارای سه جزء اصلی هستند: فاز گاز، مواد پوسته، فاز آبی یا مایع. فاز گاز می‌تواند یک گاز یا ترکیبی از چند گاز باشد. فاز گاز توسط مواد پوسته محصور شده است. انتشار گاز از میکرو حباب‌ها و خواص مکانیکی میکرو حباب‌ها بستگی به مواد پوسته دارد. پوسته نقش مهمی در کپسوله کردن مولکول‌های دارو دارد. اگر انعطاف‌پذیری (الاستیسیته) مواد پوسته بیشتر باشد، انرژی آکوستیک که حباب قبل از شکست تحمل می‌کند بیشتر می‌شود که این امر باعث افزایش زمان اقامت حباب‌ها می‌شود. مایع خارجی اطراف پوسته‌ای که حباب در آن ساکن است بسته به نوع کاربرد می‌تواند همان مواد پوسته باشد یا می‌تواند یک سورفکتانت یا عامل فوم ساز^۱ باشد (Kurup and Naik, 2010).

حضور میکرو حباب‌ها در داخل آب، خواص فیزیکی آب را تغییر می‌دهد. ویسکوزیته و کشش سطحی کاهش می‌یابد در حالی که هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. تجزیه پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب و یونیزاسیون ترکیبات موجود در آب، عامل اصلی این تغییرات است (Himuro, 2007).

۱-۶-۲ مقایسه میکرو-نانوحباب‌ها و حباب‌های معمولی

میکرو-نانوحباب‌ها در مقایسه با حباب‌های معمولی چندین مزیت دارند از جمله:

الف) میکرو-نانوحباب‌ها گستره‌ی بیشتری را پوشش می‌دهند و پایدارند:

حباب‌های معمولی با سرعت به سمت بالا حرکت می‌کنند و ذرات معلق که در مسیر مستقیم سر راه آن‌ها قرار می‌گیرد را می‌توانند با خود به سطح بیاورند، اما نانوحباب‌ها با همان حجم از هوا، به صورت مارپیچی حرکت کرده و محدوده بسیار زیادی را پوشش می‌دهند. یک حباب معمولی (ماکرو حباب) مسیری به سمت بالا را با سرعت زیاد طی می‌کند و پس از رسیدن به سطح متلاشی می‌شود ولی یک

^۱ Foaming Agent

نانوحباب می‌تواند درون آب در جهت‌های مختلفی حرکت کند و برای مدت‌زمان طولانی (مثلاً چند ماه) پایدار بماند و به تدریج حباب کوچک شود تا محو گردد.

ب) نسبت سطح به حجم زیاد میکرو- نانوحباب‌ها:

میکرو- نانوحباب‌ها نسبت سطح به حجم بسیار بیشتری در مقایسه با حباب‌های معمولی دارند در نتیجه ذرات معلق بیشتری با خود حمل می‌کنند.

پ) ارتفاع عملکرد شناورسازی ذرات معلق آب:

عملکرد حباب‌های معمولی بدین‌صورت است که ذرات معلق به سطح خارجی حباب چسبیده تا زمانی که به سطح آب هدایت شوند. در این شرایط ممکن است در میانه راه برخی از ذرات معلق از حباب جدا شوند؛ اما میکرو- نانوحباب‌ها هر ذره معلق را احاطه می‌کنند، به طوری که احتمال رها شدن این ذرات معلق بسیار کم می‌شود.

ت) توانایی پاک‌کنندگی سطوح و منافذ:

میکرو حباب‌ها بیشتر جهت تخریب آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد چراکه زمانی که میکرو حباب در میانه راه متلاشی شده منجر به تولید رادیکال‌های OH و موج شوک در آن ناحیه می‌گردد. ترکیدن میکرو حباب می‌تواند منجر به متلاشی شدن آلاینده‌های آلی محلول در آب مثل آفت‌کش‌ها شود. همچنین ترکیدن میکرو حباب می‌تواند به میکروزدایی آب کمک کرده و نسبت به روش‌های مرسوم مثل کلرزنی آب، کم‌هزینه‌تر بوده و اثرات جانبی ناچیزی خواهد داشت. گاز میکرو حباب در بیشتر موارد هوا و یا نیتروژن می‌باشد اما استفاده از گاز ازن نیز جهت تولید میکرو حباب، تأثیرات قابل توجهی در رفع آلودگی آب خواهد داشت (Takahashi, 2007). نانوحباب‌ها برخلاف میکرو حباب‌ها قدرت تخریبی بالایی ندارند اما ماندگاری بالایی داشته و می‌توانند در همه جهت‌ها حرکت کنند. این ویژگی نانوحباب‌ها این امکان را می‌دهد که برای حمل و جابه‌جایی ذرات معلق و آلاینده‌های موجود در آب بسیار مناسب باشند. نانوحباب‌ها می‌توانند در جهت پاک‌سازی و رفع آلودگی‌های تأسیسات زیرآب مؤثر واقع شوند. نانوحباب‌ها می‌توانند در جهت‌های مختلف (نه تنها پایین به بالا) حرکت کنند و به منافذ ریز نیز ورود پیدا کنند. با این ویژگی، می‌توانند آلودگی‌های متصل به سطوح و درزها در زیر سطح آب را جدا کرده و با خود حمل کنند. این رسوبات و آلودگی‌ها محل مناسبی برای رشد عوامل بیماری‌زا می‌باشد. به صورت ویژه می‌توان نانوحباب‌ها را جهت رفع رسوبات از روی منافذ غشاهای فیبری و یا غشاهای نانو فیلتراسیون مورد استفاده قرار داد. این فناوری به صورت چشمگیری منجر به افزایش طول عمر و کارکرد غشا می‌شود.

۲-۶-۲ ویژگی‌های میکرو-نانوحباب‌ها

در مقایسه با میلی حباب‌ها که قطر آن‌ها در حدود میلی‌متر است، میکرو حباب‌ها دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که از اندازه کوچک آن‌ها حاصل می‌شود (Li, 2006):

۱- سطح مشترک ویژه زیاد^۱:

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها دارای سطح مشترک ویژه بالایی هستند. سطح مشترک ویژه a به صورت نسبت سطح‌رویی حباب‌ها به واحد حجم توزیعی تعریف می‌شود. برای یک حباب کروی به قطر d_b خواهیم داشت:

$$a = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} \varepsilon_G = \frac{3}{r} \varepsilon_g = \frac{6}{d_b} \varepsilon_G \quad (1-2)$$

$$a = \frac{6}{d_{32}} \varepsilon_G \quad (2-2)$$

که ε_G نگهداشت گاز^۲ می‌باشد که به صورت نسبت حجم گاز به حجم سیال توزیع شده تعریف می‌شود و d_{32} قطر میانگین ساتر (متر) حباب‌ها می‌باشد؛ بنابراین با کاهش قطر حباب، سطح ویژه آن افزایش می‌یابد (Li, 2006).

۲- فشار داخلی زیاد:

اختلاف فشار داخلی و بیرونی میکرونانوحباب‌ها خیلی زیاد است (self-pressurizing effect). فشار گاز درون یک حباب، بزرگ‌تر از فشار بیرون آن است که این ناشی از کشش سطحی می‌باشد. فشار داخلی حباب‌ها از معادله یانگ-لاپلاس محاسبه می‌شود (Atkins and de Pauxla, 2007).

$$P_g = P_L + \frac{4\sigma}{d_b} \quad (3-2)$$

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{d_b} \quad (4-2)$$

که در آن P_L و P_g به ترتیب فشار گاز و فشار مایع (Pa)، σ کشش سطحی (N/m) و d_b قطر حباب (m) است. با توجه به رابطه (۳-۲) می‌توان مشاهده کرد که فشار داخلی حباب‌ها با قطر آن رابطه‌ی عکس دارد. به‌عنوان مثال با فرض مقدار کشش سطحی $\sigma=0.072785$ (N/m)، یک ماکرو حباب به قطر یک میلی‌متر، فشار داخلی ۰/۱۰۲ مگا پاسکال در آب دارد، درحالی‌که یک میکرو حباب به قطر ۱۰ میکرومتر فشار داخلی ۰/۱۳ مگا پاسکال دارد (Millero, 2001). با توجه به رابطه (۴-۲) فشار لاپلاس

^۱ Specific Interfacial Area

^۲ Gas Holdup

یک حباب به قطر ۱۰ میکرومتر در دمای ° ۲۵ حدود $۲,۹ \times 10^4$ پاسکال یعنی حدود ۰,۳ برابر فشار اتمسفر، حباب به شعاع ۱ میکرومتر حدود $۲,۹ \times 10^5$ پاسکال یعنی ۳ برابر فشار اتمسفر است (Li, 2006).

جانگرن و اریکسون در سال ۱۹۹۷ از طریق محاسبات برپایه انتقال جرم از گاز در رابطه حباب به حجم مایع و با توجه به معادله‌ی یانگ لاپلاس، دریافتند که عمر یک تک حباب گاز با شعاع ۱۰۰ نانومتر، ۱۰۰ میکروثانیه خواهد بود (Ljuggren and Eriksson, 1997).

۳-سرعت‌بالا آمدن آهسته:

سرعت‌بالا آمدن پایانی میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها بسیار کند است، پس از تشکیل، یک حباب به سرعت، به سرعت نهایی خود می‌رسد (Li and Tsuge, 2006). برای حباب‌های کوچک کروی اندازه سرعت نهایی با استفاده از قانون استوک قابل محاسبه است (Clift et al, 2005).

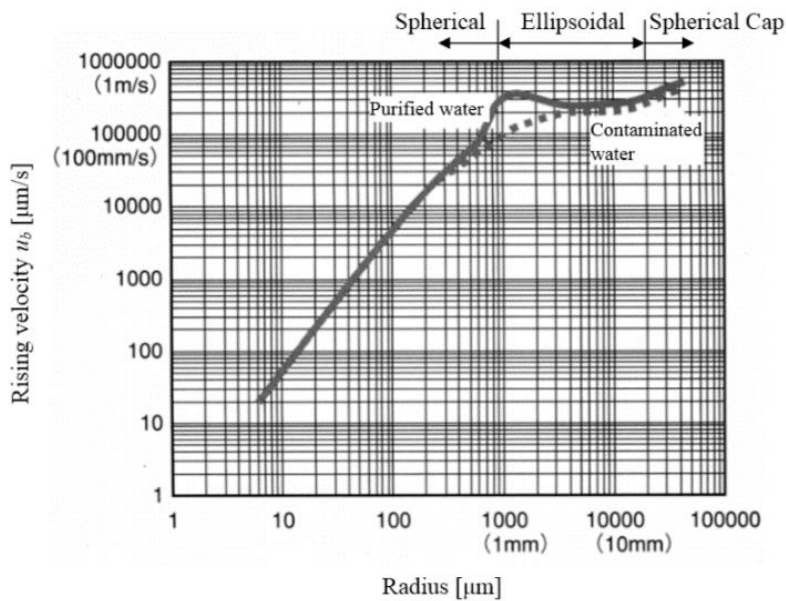
$$u_b = \frac{\rho g d_b^2}{18\mu} \quad (۵-۲)$$

که در آن ρ چگالی مایع (kg/cm^3)، g شتاب گرانش (m/s^2)، μ ویسکوزیته مایع (Pa.s) و d_b قطر حباب (m) است. قانون استوک فقط برای حباب‌های کوچک با سطح ثابت قابل استفاده است. برای مواردی که حباب‌ها دارای سطح متحرک باشند از رابطه‌ی هادامارد رایبچینسکی^۱ استفاده می‌شود:

$$u_b = \frac{\rho g d_b^2}{12\mu} \quad (۶-۲)$$

نمودار تغییرات سرعت‌بالا آمدن حباب‌ها (u_b) برحسب شعاع حباب‌ها برای آب‌های آلوده و تصفیه‌شده در شکل ۲-۳ نشان داده شده است (Ohnari, 2006; Takemura, 2003; Tsuge, 1986; Ueyama and Miyamoto, 2006). یک میکرو حباب با شعاع ۱۰ میکرومتر با سرعت ۵۰ میکرومتر بر ثانیه یعنی حدود ۳ میلی‌متر بر دقیقه بالا می‌آید، این سرعت‌بالا آمدن آهسته میکرو حباب منجر به زمان اقامت بیشتر میکرو حباب در داخل سیال می‌شود که این امر باعث نگهداشت گاز بالا با سطح ویژه زیاد می‌شود. مشخصات فیزیکی مایع بر سرعت‌بالا آمدن میکرو حباب‌ها مؤثر است. عدد رینولدز میکرو حباب‌ها به دلیل کوچک بودن اندازه آن‌ها کمتر است (تقریباً $Re \leq 1$). این حباب‌ها تقریباً مثل حباب‌های کروی عمل می‌کنند و بعضی اوقات مانند کره‌های جامد عمل می‌کنند که در آن جریان در مرز مایع گاز آزاد است. سرعت‌بالا آمدن حباب با مجذور قطر حباب متناسب است بنابراین حباب‌های بزرگ‌تر دارای سرعت‌بالا آمدن بیشتری می‌باشند و مطابق شکل ۲-۳ در زمان خروج به صورت بیضی و یا کلاهک کروی خارج می‌شوند (Li, 2006).

^۱ Hadamard-Rybczynki



شکل ۲-۳. سرعت بالا آمدن حباب بر حسب شعاع حباب (Ohnari, 2005; Takemura, 2004; Tsuge, 1982; Ueyama and Miyamoto, 2006)

۴- سطح باردار منفی

علت دیگری که باعث ثبات حباب میکرو نانو می شود به بار الکتریکی سطح حباب مربوط می شود که در اندازه گیری های پتانسیل زتا قابل مشاهده است. در حقیقت به علت ایستایی بالای میکرو حباب ها مقدار پتانسیل زتا آن ها را می توان به راحتی اندازه گیری کرد. مقدار مطلق بالای پتانسیل زتا می تواند عدم به هم پیوستن حباب ها را از طریق نیروی دافعه یون ها روی سطحشان توجیه کند. انقباض گازهای داخل حباب باعث جذب یون ها بر روی سطح حباب می شود که باعث تعادل نیروهای دافعه کولن با نیروهای کشش سطحی خواهد شد (Ushikubo et al, 2010).

پتانسیل زتا توسط معادله هنری، رابطه (۷-۲)، تعیین می شود. اگر ذرات مورد آزمون حدوداً ۲۰۰ نانومتر و غلظت ۳ تا ۱۰ مولار و دیسپرسانت آبی باشد از تقریب اسمولوچوفسکی^۱ برای تعیین پتانسیل زتا استفاده می شود و تابع هنری را برابر ۱,۵ قرار می دهند. ولی برای ذرات ریزتر و دیسپرسانت های غیرآبی از تقریب هوکل^۲ استفاده می شود و تابع هنری را برابر ۱ قرار می دهند.

$$\xi = \frac{3\mu U_E}{2\epsilon f(Ka)} \quad (7-2)$$

^۱ Smoluchowski

^۲ Huckel

در این رابطه ξ پتانسیل زتا (v)، μ ویسکوزیته سیال، U_E تحرک الکتروفورتیکی ($m^2/s.v$)، ε ثابت دی‌الکتریک نمونه ($S^2.C^2/kg.m^3$) و $f(ka)$ تابع هنری است که برحسب نمونه مورد آزمایش بین ۱ تا ۱/۵ می‌باشد.

پتانسیل زتای حباب‌ها یکی از ویژگی‌های مهم است زیرا تعامل حباب‌ها با مواد دیگر مانند قطرات روغن و ذرات جامد را تعیین می‌کند. تاکاشی پتانسیل زتای میکرو حباب‌ها در محلول آبی را تعیین کرد. او متوجه شده که میکرو حباب‌ها در اثر تغییر پتانسیل الکتریکی سلول، مسیری زیگزاگی را طی می‌کنند. تاکاشی دریافت که در آب مقطر میکرو حباب‌های هوا، زتا پتانسیل را تا حدود ۳۵ - میلی ولت افزایش می‌دهند. او گزارش داد که بین پتانسیل زتا و اندازه قطر میکرو حباب‌ها هیچ رابطه‌ای وجود ندارد. او دریافت که مقدار زتا پتانسیل منفی با افزایش PH محلول افزایش می‌یابد میکرو حباب‌ها در دامنه گسترده‌ای از PH، دارای بار منفی هستند و درواقع قسمتی از ثبات نانوحباب‌ها به بار الکتریکی سطح حباب مربوط است (Takahashi, 2005).

به‌طور کلی پتانسیل زتای میکرو حباب‌ها تحت تأثیر PH می‌باشد (Hasegawa et al, 2008; Han and Yoon and Yordan, 1986) و میکرو حباب‌ها پتانسیل زتای منفی دارند (Oliveira and Rubio, 2011). بار سطحی و سرعت‌بالا آمدن حباب‌ها فاکتورهای اصلی در تشخیص خصوصیات میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها است (Agarwal et al, 2011).

۵- انحلال زیاد گاز و نرخ انقباض بالا:

میکرو حباب‌ها میزان انحلال گاز (سرعت انتقال جرم) بالایی دارند. هنگامی که اندازه حباب از مقیاس میکرو به مقیاس نانو می‌رسد، سرعت انحلال افزایش می‌یابد، زیرا سطح جانبی و فشار داخلی حباب افزایش می‌یابد و سرعت‌بالا آمدن کاهش می‌یابد (Tsuge, 2010). به خاطر فشار بالای داخل حباب، گاز داخل حباب تمایل دارد از محیط داخل با فشار بیشتر به ناحیه بیرون با فشار کم منتشر شود، در نتیجه میکرو حباب‌ها کوچک‌تر شده و در نهایت متلاشی می‌شوند، این باعث می‌شود که نرخ انتقال جرم گاز میکرو حباب به مایع اطراف بیشتر شود؛ بنابراین از آنجایی که با افزایش فشار داخلی انحلال گاز در مایع افزایش می‌یابد، نرخ کوچک شدن میکرو حباب‌ها نسبت به ماکرو حباب‌ها بیشتر است (Tsuge, 2014).

۶- تولید رادیکال‌های آزاد:

اندازه میکرو حباب‌ها به علت انحلال گازهای درونی در آب و ایستایی بالا به تدریج کاهش می‌یابد. در اثر انحلال و متلاشی شدن میکرو حباب‌ها، نانوحباب‌ها به وجود می‌آیند. طبق پدیده آوادرخشش^۱، فروپاشی حباب‌های تولیدشده توسط کایتاسیون باعث ایجاد نقاط داغ آنی و موضعی می‌شود، Gaitan

^۱ Sonoluminescence

(2007). در ابرهایی از حباب‌های کاویتاسیون، این نقاط داغ دارای دمایی معادل تقریباً ۵۰۰۰ کلوین، فشار حدود ۱۰۰۰ اتمسفر و سرعت سرد و گرم شدن در حدود ۱۰۱۰ کلوین بر ثانیه هستند (Suslick, 1992). چنین منطقه‌ای با درجه حرارت بالا و فشار بالا می‌تواند مولکول‌های آب را تجزیه کند و رادیکال‌های آزاد OH را تولید کند که به علت واکنش‌پذیری بالا به‌عنوان ضد باکتری و ضد بو مورد استفاده قرار می‌گیرند (Takahashi, 2009).



۳-۶-۲ روش‌های تولید میکرو حباب‌ها

برای تولید میکرو حباب‌ها به‌طور معمول از نازل و یا روزنه استفاده می‌شود (Terasaka and Tsuge, 1990; Tsuge 1986), حباب‌های ریز معمولاً به‌وسیله‌ی خروجی‌های خلل و فرج دار^۱ (Miyahara and Tanaka, 1997), نازل‌های جریان ثابت^۲ (Terasaka and Tsuge, 1993), غشا^۳ (Yazawa et al, 1988), پخش‌کننده گاز^۴ که با میکس‌کننده‌ها ترکیب شده‌اند (Forrester et al, 1998; Johnson et al, 1982) تولید می‌شوند؛ اما تولید میکرو حباب‌ها با این روش‌های ذکر شده در بالا به علت جلوگیری از به هم آمیختگی حباب‌ها سخت است، به همین علت میکرو حباب‌ها اغلب به‌وسیله‌ی روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که می‌توان آن‌ها را به سه دسته برحسب نوع مکانیزمشان تقسیم کرد (Li and Tsuge, 2006):

-نوع فشاری^۵

-نوع جریان دورانی^۶

-نوع کاویتاسیونی^۷

۱-۳-۶-۲ نوع جریان فشاری

سیستم تولید میکرو حباب نوع فشاری، برپایه قانون هنری استوار است. بر اساس این قانون در فشار بالا گاز بیشتری می‌تواند داخل مایع حل شود. در مولد نوع فشاری، مایع در فشار بالا با گاز اشباع شده و

^۱ Porous Media

^۲ Constant Flow Nozzles

^۳ Membrane

^۴ Gas Spargers

^۵ Pressurization Type

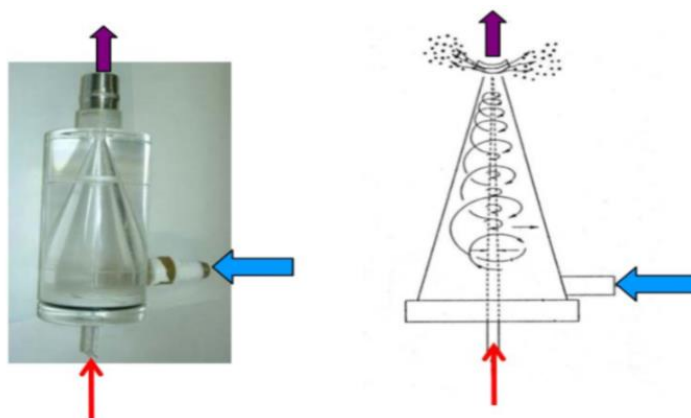
^۶ Rotating-Flow Type

^۷ Cavitation Type

سپس از طریق یک کانال نازل در محیط معمولی با فشار اتمسفر تزریق می‌شود. در فرایند سقوط ناگهانی فشار میکرو حباب‌ها تشکیل می‌شوند. این نوع روش تولید میکرو حباب در سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب به کار می‌رود. سیستم شناورسازی هوای محلول (DAF) از این نوع می‌باشد که در آن هوا در فشار ۰/۴ تا ۰/۵ مگا پاسکال در آب حل شده و سپس از طریق نازل‌های کاهش فشار به یک مخزن آزاد می‌شود. اندازه حباب‌های تولیدشده با استفاده از سیستم نوع فشاری بین ۱۰-۱۰۰ میکرومتر می‌باشد (Viysides et al, 2004). علاوه بر این میانگین اندازه حباب‌ها با افزایش فشار اشباع کاهش پیدا می‌کند؛ اما افزایش فشار در بالاتر از ۰/۵ مگا پاسکال تأثیر خیلی کمی بر اندازه‌ی حباب‌ها دارد (Han et al, 2002).

۲-۳-۶-۲ نوع جریان دورانی

طرح مولد میکرو حباب نوع جریان دورانی در شکل ۲-۴ نشان داده شده است (Tutsumi, 2004). این نوع مولد دارای شکل مخروطی می‌باشد. تولید میکرو حباب با پمپاژ آب از مسیر مماسی به داخل مولد آغاز می‌شود، سیال با یک حرکت دورانی در راستای دیوار داخلی، جریان پیدا می‌کند که منجر به ایجاد یک گردابه می‌شود. مرکز گردابه دارای سطح فشار پایین می‌باشد، به همین دلیل گاز به داخل آن وارد می‌شود. زمانی که سیال هوا را از مولد با سرعت دورانی بسیار بالا خارج می‌کند، هوا تبدیل به حباب‌های میکرو می‌شود.

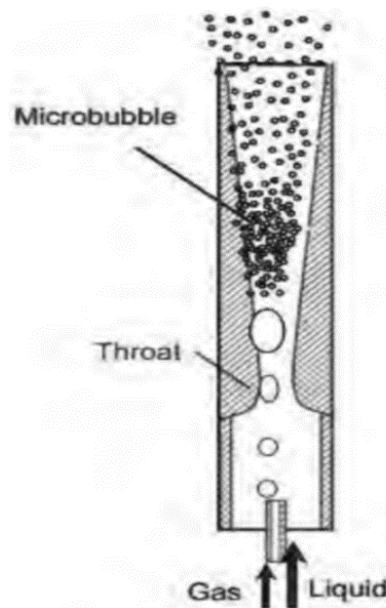


شکل ۲-۴. مولد میکرو حباب نوع جریان دورانی (Tatsumi, 2004)

۲-۳-۶-۳ نوع جریان کاویتاسیونی

زمانی که فشار محیطی در یک نقطه از سیال به زیر فشار بخار می‌رسد، سیال در دمای محیط دچار یک تغییر فاز می‌شود که منجر به تولید فضاهای خالی می‌شود که به آن حباب‌های کاویتاسیون گفته می‌شود. کاویتاسیون در پمپ‌ها، پروانه‌ها و موتورهای رخ می‌دهد که معمولاً در اکثر این موارد فرایندی

نامطلوب و زیان‌آور است. با این حال محققان برای تولید میکرو حباب از این پدیده استفاده می‌کنند. لوله ونتوری یک مثال از همین مورد می‌باشد (Takamura, 2004; Fujiwara et al, 2003). همان‌طور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، لوله‌ی ونتوری دارای یک شکل مخروطی می‌باشد. یک لوله ونتوری از سه قسمت اصلی شامل بخش انقباض، بخش گلوگاه و بخش انتشار تشکیل می‌شود. اگر یک پمپ سیال را به داخل لوله ونتوری منتقل کند در بخش فشرده لوله ونتوری (گلوگاه) افزایش سرعت رخ می‌دهد و هم‌زمان فشار کاهش پیدا می‌کند این پدیده به‌عنوان یک اثر ونتوری شناخته می‌شود که باعث ایجاد خلأ می‌شود و پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد که این امر منجر به مکش گاز از طریق لوله ونتوری می‌شود. میزان مکش هوا غالباً برای تشکیل حباب کافی است. زمانی که فشار در پایین دست (بخش انتشار) دوباره بیشتر می‌شود حباب‌های وارد شده به سیال تجزیه می‌شوند که این مسئله منجر به تولید حباب‌های کوچک‌تر می‌شود (Fujiwara, 2006). از سوی دیگر وجود حباب‌های ریزتری از گازهای حل‌نشده به کاویتاسیون تحت فشار منفی کمک می‌نماید (Finkelstein Y, Tamir, 1964; Flynn H G, 1985). گاز تشکیل‌دهنده حباب نیز بر وقوع کاویتاسیون تأثیر دارد. حال در سال ۱۹۷۰ دریافت کاویتاسیون به‌طور مستقیم به محتوی هوای نامحلول بستگی دارد. کاویتاسیون را می‌توان از طریق افزودن مواد شیمیایی آلی بهبود بخشید، ثابت شده است که بعضی مواد باعث ایجاد تعداد بیشتر فضاهای خالی کوچک‌تر می‌شود که این امر به علت تثبیت این فضاهای خالی و پیشگیری از متلاشی شدن و به هم آمیختگی آن‌ها است (Holl, 1970).



شکل ۲-۵. مولد میکرو حباب نوع کاویتاسیونی (لوله ونتوری) (Fujiwara 2006)

در پژوهش حاضر نیز از نوع کاویتاسیونی استفاده شده است. لوله‌ی ونتوری رایج‌ترین ابزار کاویتاسیون هیدرودینامیکی است. در سال‌های اخیر، لوله‌های ونتوری به‌طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری جریان، انتقال گاز طبیعی، سیستم احتراق داخلی موتور و تصفیه پساب صنعتی و حذف گردوغبار استفاده شده است. به‌عنوان مثال، در انتقال گاز طبیعی، استفاده از جت لوله ونتوری باعث اختلاط بین گاز تولید شده

با فشار کم و گاز طبیعی با فشار بالا می‌شود (Zhou et al, 2015; Wang et al, 2014). در تمیز کردن فاضلاب‌های صنعتی، اسکرابر ونتوری باهدف تخلیه آب توسط یک گاز با سرعت بالا در بخش گلوگاه به‌منظور حذف گردوغبار مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhou et al, 2002). کوپرزو همکارانش به‌طور تئوری در مورد گاز تولیدشده توسط لوله ونتوری در چاه گاز مطالعه کرده‌اند (Quiroz et al, 2014). به عبارت بهتر، استفاده از لوله ونتوری در ترکیب و بهبود واکنش شیمیایی بسیار مفید است و به‌این ترتیب موجب افزایش کارایی می‌شود؛ بنابراین، درک جریان سیال و تغییرات فشار در لوله ونتوری به‌منظور صرفه‌جویی در انرژی صنعتی اهمیت زیادی دارد.

۴-۶-۲ کاربردهای میکرو-نانوحباب‌ها

دستیابی به کارایی میکرو حباب‌های تولیدشده، اخیراً منجر به پیشرفت‌هایی در زمینه‌های مختلف مهندسی شده است که گاهی اوقات به‌عنوان انقلابی در صنعت توصیف شده است. میکرو حباب‌ها دارای پتانسیل باورنکردنی در زمینه‌های مختلف هستند. میکرو حباب‌ها به‌طور گسترده‌ای در فرآیندهای صنعتی زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد میکرو حباب‌ها در فرآیندهای صنعتی عمدتاً به خاطر سه خاصیت اصلی میکرو حباب‌ها شامل مساحت جانبی گاز-مایع زیاد، نگهداشت گاز بالا و سرعت بالا آمدن آهسته است.

تعداد زیادی از فرآیندهای شیمیایی، بیوشیمی و پتروشیمی و فرآیندهای دیگر از حباب‌های گاز پراکنده‌شده در داخل مایع مانند فعال‌کننده‌ها در کنتاکتورها و همچنین در واکنش‌هایی مانند هیدروژناسیون، پلیمریزاسیون، اکسیداسیون، کلرزی، آلکیلاسیون و تخمیر به‌وفور استفاده می‌کنند.

استفاده از میکرو-نانوحباب‌ها در ترکیب و بهبود واکنش شیمیایی بسیار مفید است و به‌این ترتیب موجب افزایش کارایی می‌شود (Quiroz et al, 2014).

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها هر یک رفتار منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و با توجه به این موضوع کاربردهای متفاوتی در زمینه‌های مختلف مخصوصاً در تصفیه آب دارند. اهمیت ویژه میکرو حباب‌ها استفاده از حباب‌های هوا در تصفیه فاضلاب می‌باشد (Zhou et al, 2015; Terasaka et al, 1999; Debellefontaine et al, 2011). در مقایسه با فن‌آوری‌های پیشرفته تصفیه آب، تکنولوژی میکرو حباب‌ها کمتر شناخته‌شده است هرچند نتایجی که تا کنون به دست آمده، امیدوارکننده است. در حقیقت، تکنولوژی میکرو حباب‌ها در دهه ۱۹۲۰ برای تصفیه آب و فاضلاب معرفی شد که برای دور کردن ذرات از آب در فرآیند شناورسازی با هوا^۱ به کار گرفته شد. (Kiuru, 2001)، باین حال تا سال

^۱ Air Flotation

۱۹۹۰ کاربرد آن‌ها تقریباً به جداسازی به روش فلوتاسیون^۱ محدود شده بود. مهم‌ترین پارامتر در سیستم شناورسازی با هوا، اول ویژگی‌های سطحی حباب و ذرات (پتانسیل زتا) و سپس اندازه حباب‌ها و ذرات است (Han et al, 2002b).

با کشف اخیر فعالیت بیولوژیکی میکرو حباب‌ها در پرورش ماهی (Ohnari, 1997;2002;2003,) و تصفیه آب و افزایش رشد موجودات هوازی (Ago et al, 2005)، تکنولوژی میکرو حباب‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند سرعت بالا آمدن آهسته، زتا پتانسیل منفی و غیره، توجه بیشتری را جلب کرد.

از کاربردهای جالب میکرو حباب‌ها به خاطر اثرات کاملاً مکانیکی آن‌ها، در شستشو جهت از بین بردن چربی‌ها (Wataneabe et al, 2013) و جهت کاهش نیروی درگ در جریان آب می‌توان اشاره کرد طوری که به گزارش ماداوان با استفاده از میکرو حباب‌ها نیروی درگ حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد (Madavan, 1984). میکرو حباب‌ها می‌توانند مقاومت سیال روی دیواره کانال را با کاهش ضریب اصطکاک کاهش دهد (Serizawa, 2005; Kodama, 2010).

از مزایای استفاده از میکرو حباب‌ها انتقال اکسیژن به فاضلاب‌های تصفیه شده است (Terasaka et al, 2011) یا تحویل به جلبک‌های تک سلولی در بیوراکتور دی‌اکسید کربن است که برای فتوسنتز نیاز دارند (Zimmerman et al, 2011). میکرو حباب‌ها در جداسازی مواد توسط فلوتاسیون اثرات قابل توجهی دارند و میزان اثربخشی فلوتاسیون را بالا می‌برند. میکرو حباب‌ها با چسبیدن قوی به آلاینده‌هایی مانند روغن‌ها و گریس‌ها، امکان حذف آن‌ها از آب تصفیه شده را به طور سازگار با محیط زیست فراهم می‌کنند. میکرو حباب‌ها همچنین اثرات قابل توجهی در شستشو بدون استفاده از مواد شوینده شیمیایی دارند (Wataneabe, 2013). شی در مورد استفاده از میکرو حباب‌ها در پاک‌سازی ورقه‌های سیلیکونی^۲ تحقیق کرده است. میزان تلفات انرژی ناشی از ریزآلاینده‌ها در این ورقه‌ها ۵۰ درصد است که توسط میکرو حباب قابل برطرف شدن است. (Xi, 2012). در حقیقت میکرو حباب‌ها نشان دادند که می‌توانند حتی در بحث آلودگی هم کارساز باشند (Tsuje et al, 2009).

طیف گسترده‌ای از کاربرد میکرو حباب‌ها در پزشکی یافت شده است. یکی از کاربردهای کمتر شناخته شده میکرو حباب‌ها در التراسوند درمانی^۳ در اعمال جراحی می‌باشد طوری که میکرو حباب‌ها می‌توانند انرژی ارتعاشی اولتراسونیک را به انرژی حرارتی موضعی تبدیل کنند (Kanagawa, 2013). جریان مؤثر بر روی میکرو حباب در میدان التراسونیک می‌تواند سلول‌ها را از بین ببرد (Kooiman, 2011) و می‌تواند غشاء آن‌ها را برای داروها (Oh et al, 2014) به خصوص داروهای ضد سرطان

^۱ flotation separation

^۲ Silicon Wafers

^۳ therapeutic ultrasound

(Watanabe et al, 2008) نفوذپذیر کند. میکرو حبابها همچنین اندازه‌گیری فشارخون مطلق را امکان‌پذیر می‌سازند (Tremblay-Darveau, 2014). در حال حاضر بسیاری از تکنیک‌های توسعه‌یافته استفاده از میکرو حبابها در مقیاس میکروفلوئیدیک (ریز سیالات) هستند. استفاده از آن در دست‌کاری ژن‌ها (Sun et al, 2014)، بیوسنسورها (Kuznetsova and Coakley, 2007)، مخلوط کردن واکنش‌دهنده‌ها (Lee et al, 2012) یا طبقه‌بندی (Wang, 2012) می‌باشد.

با پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینه ریز سیالات نوری^۱ انتظار می‌رود که در آن آرایه‌ای منظم از میکرو حبابها می‌توانند اجزای نوری قابل تنظیم ایجاد کنند (Hashimoto et al, 2006; Allouch et al, 2014).

۲-۷ پردازش تصویر

یکی از روش‌های نسبتاً جدید که در علم هیدرولیک نیز مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از تصاویر دیجیتال و پردازش اطلاعات آنها است. برخلاف چشم انسان که صرفاً قادر به دیدن محدوده‌ی مرئی طیف الکترومغناطیسی نور است، ماشین‌های تصویربرداری تقریباً تمامی طیف الکترومغناطیس که از اشعه‌ی گاما تا امواج رادیویی گسترده است را تشخیص می‌دهند؛ بنابراین پردازش تصاویر کاربردهای گسترده و متنوعی را در برمی‌گیرد. یک تصویر را می‌توان به صورت یک تابع دو-بعدي $f(x,y)$ تعریف کرد که (x,y) مختصات مکانی و f شدت تصویر در آن مختصات مکانی خاص می‌باشد. هنگامی که مقادیر $f(x,y)$ ، x و y به صورت محدود و پیوسته باشند، تصویر را یک تصویر دیجیتالی می‌نامند. با این توصیف، می‌توان هر تصویر دیجیتال با اندازه $M \times N$ را به صورت ماتریس زیر نمایش داد که آن را ماتریس تصویر می‌نامند:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

هر درایه‌ی این آرایه به عنوان المان تصویر یا پیکسل نامیده می‌شود. یک تصویر رنگی RGB آرایه‌ای $M \times N \times 3$ از پیکسل‌های رنگی است که هر پیکسل رنگی یک سه‌تایی متناظر از ترکیب رنگ‌های قرمز، سبز و آبی در مکانی خاص می‌باشد (جعفر نژاد قمی، ۱۳۹۰).

^۱ Opto Fluidics

نرم افزار متلب یک زبان سطح بالا برای محاسبات فنی است و المان اصلی آن، آرایه می باشد. بدین ترتیب در متلب بسیاری از مسائل تکنیکی محاسباتی (مخصوصاً آنهایی که شامل نمایش ماتریسی هستند) در زمان کمتری نسبت به زبانی مانند C یا Fortran^۱ قابل انجام است.

یکی از جعبه ابزارهای بسیار کاربردی متلب، جعبه ابزار پردازش تصویر (IPT) نام دارد. این جعبه ابزار و گویایی زبان متلب باعث شده است تا عملیات پردازش تصویر به صورت فشرده واضح میسر گردد و از این رو متلب را در ردهی نخست نرم افزارهای پردازش تصویر قرار داده است. با توجه به قابلیت های مناسب نرم افزار متلب، از این نرم افزار به منظور انجام عملیات پردازش تصویر استفاده شده است.

۸-۲ معرفی نرم افزار اپن فوم (OpenFOAM)^۲

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۳ شاخه ای از مکانیک سیالات است که با استفاده از رایانه، راه حل های عددی را برای مسائل مکانیک سیالات ارائه می دهند (BAYLAR et al, 2009; WENDT, 2006; Anderson, 1995) و به حل عددی جریان سیال می پردازد. با گسترش رایانه هایی با پردازش سریع و ابررایانه ها، این شاخه از مکانیک گسترش بیشتری یافته است. این تکنیک به طور گسترده ای در مهندسی هیدرولیک مورد استفاده قرار می گیرد.

در کنار نرم افزارهای گسترده تجاری مانند فلونت^۴، سی اف ایکس^۵ و غیره، نرم افزارهای متن باز نیز در این شاخه ارائه شده اند. یکی از مهم ترین نرم افزارهای متن باز در این حیطه اپن فوم است. نرم افزار اپن فوم یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل سازی هر نوع مسئله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده می باشد. از نمونه موارد قابل مدل سازی توسط این نرم افزار می توان مسئله های مربوط به جریان های آرام و آشفته، تک فاز و چند فاز، انتقال حرارت، الکترومغناطیس و مکانیک جامدات و همچنین مسئله های مربوط به معادلات اقتصادی مانند قیمت گذاری و مالی اشاره نمود. نرم افزار اپن فوم به صورت منبع باز و آزاد می باشد، این بدان معناست که کد آن به صورت رایگان در اختیار همه قرار دارد و به سهولت از شبکه جهانی اینترنت قابل دریافت است (www.openfoam.com). هسته انعطاف پذیر و کارآمد اپن فوم از مجموعه ای از کدهای نوشته شده به زبان C++ ایجاد شده است. این نرم افزار دارای حل گرهای^۶ می باشد که قابل توسعه و ویرایش می باشند.

^۱ Fortran

^۲ OpenField Operation and Manipulation

^۳ Computational Fluid Dynamics

^۴ Fluent

^۵ CFX

^۶ Solvers

فرآیند حل یک مسئله در نرم‌افزار این فوم شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است. به طوری که ابتدا تولید هندسه و اعمال شرایط مرزی و شبکه‌بندی مسئله صورت می‌گیرد. سپس به تنظیم حل گر مربوطه پرداخته می‌شود و تنظیمات لازم برای حل هرچه دقیق‌تر مسئله انجام می‌شود و عملیات پردازش صورت می‌گیرد و در مرحله پایانی با حل شدن مسئله اقدام به گرفتن اطلاعات لازم از نرم‌افزار می‌شود و عملیات پس‌پردازش صورت می‌گیرد.

از مزیت‌های دیگر این نرم‌افزار، پیوند نزدیک آن با سایر برنامه‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش است. برای مثال در این نرم‌افزار ابزار ایجاد هندسه در نظر گرفته شده است اما امکان ورود مش از بسیاری از نرم‌افزارهای مش‌زنی مانند گمبیت^۱، نتگن^۲، سالومه^۳ و مانند آن وجود دارد. یا در کنار پاراوو که نرم‌افزار استاندارد نمایش گر خروجی برنامه‌های این فوم است، امکان نمایش خروجی در بسیاری از نرم‌افزارهای پردازش گر داده مانند تک پلات^۴ و انسایت^۵ وجود دارد.

نرم‌افزار این فوم از روش عددی حجم محدود (FVM)^۶ برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که در آن به هر شبکه‌بندی غیر ساختاریافته سه‌بعدی، سلول‌های چندوجهی نسبت داده می‌شود. موازی‌سازی در حل و بخش‌بندی دامنه حل از مبانی به کار گرفته شده در نرم‌افزار این فوم می‌باشد، بنابراین به‌طور کلی حل گرها بدون نیاز به کد نویسی خاصی برای حل موازی قابل توسعه می‌باشند. حل گرهای این نرم‌افزار برای حل معادلات ناویر – استوکس از الگوریتم‌های مختلف مانند الگوریتم SIMPLE، الگوریتم PISO و الگوریتم PIMPLE استفاده می‌کنند. الگوریتم PIMPLE ترکیبی از الگوریتم‌های SIMPLE و PISO است. این الگوریتم به‌منظور استفاده از خاصیت همگرایی سریع الگوریتم SIMPLE و دقت بالای الگوریتم PISO طراحی شده است طوری که اگر در حل گر مقدار nCorrectors بزرگ‌تر از یک باشد الگوریتم فقط در حالت PISO اجرا خواهد شد، درحالی که اگر مقدار nOuterCorrectors بزرگ‌تر از یک باشد در حالت SIMPLE اجرا خواهد شد.

در حل گرهای این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان آرام و آشفته می‌توان از مدل‌های Laminar برای جریان آرام و از مدل‌های شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز RAS^۷ و روش گردابه‌های بزرگ LES^۸ برای جریان‌های آشفته استفاده کرد.

^۱ GAMBIT

^۲ NETGEN

^۳ SALOME

^۴ Tecplot

^۵ ENSIGHT

^۶ Finite-Volume Method

^۷Raynolds Average Simulation (RAS)

^۸Large Eddy Simulation(LES)

برای تحلیل جریان‌های دو یا چند فازی از مدل حجم سیال (VOF)^۱ استفاده می‌شود. این روش در سال ۱۹۸۱ توسط هیرت و همکارانش ارائه شده است. این روش بر مبنای کسر حجمی سیال است که معمولاً با α بیان می‌شود. α یک تابع اسکالر است که به عنوان انتگرال تابع مشخصه سیال در حجم کنترل، یعنی حجم یک سلول از شبکه محاسباتی تعریف شده است. در این روش کسر حجمی هر فاز در هر سلول از شبکه محاسباتی ردیابی می‌شود و در این مدل تنها نیاز به حل یک دسته معادلات پایستاری برای تمامی فازها می‌باشد و فصل مشترک بین فازها کنترل می‌شود. هنگامی که یک سلول خالی است و سیالی در آن سلول ردیابی نشده است مقدار آلفا صفر می‌باشد و هنگامی که سلول از سیال پر شده باشد مقدار آلفا برابر ۱ می‌باشد و در حالت بینابینی مقدار آلفا بین $0 \leq \alpha \leq 1$ می‌باشد. معادله کسر حجمی سیال برای q امین فاز به صورت زیر است (Hirt and Nichols, 1981):

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (U \cdot \alpha_q) = 0 \quad (9-2)$$

که در این رابطه α_q ، کسر حجمی فاز q ام از سیال می‌باشد.

در حالت دوفازی اگر سلول محاسباتی از سیال فاز یک پر شده باشد مقدار آلفا مساوی یک و اگر از سیال فاز ۲ پر شده باشد مقدار آلفا صفر می‌باشد. در حالت بینابینی مقدار آلفا بین صفر و یک می‌باشد. معمولاً در محاسبات عددی سطح مشترک بین دو فاز را با $\alpha = 0.5$ مشخص می‌کنند. اگر سرعت جریان در راستای x و y به ترتیب با u و v نشان داده شود مقدار کسر حجمی سیال برای سیال فاز یک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \quad (10-2)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} = 0$$

در روش VOF از رابطه هیرت برای محاسبه کسر حجمی سیال استفاده می‌شود. بر اساس یافته‌های راش و کلا سترمن و همکارانش، رابطه هیرت حد بالای $\alpha \leq 1$ را برآورده تضمین نمی‌کند (Rusche, 2002; Klostermann et al 2012)، برای حل این مشکل، از روش فشرده‌سازی سطح^۲ VOF در نرم‌افزار اپن فوم استفاده شده است (Achou, 2016).

رابطه فشرده‌سازی سطح VOF برای α_1 به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (U \cdot \alpha_1) + \nabla \cdot (U_r \cdot \alpha_1 (1 - \alpha_1)) = 0 \quad (11-2)$$

U_r سرعت فشرده‌گی تنها در ناحیه فصل مشترک و در جهت عمود بر آن در نظر گرفته می‌شود تا از انتشار عددی جلوگیری کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

^۱ Volume of Fluid

^۲ Surface Compression VOF Method

$$\vec{U}_r = \min(C_\alpha |\vec{U}|) \cdot \max(|\vec{U}|) \frac{\Delta\alpha}{|\Delta\alpha|} \quad (12-2)$$

که در این رابطه C_α ضریب فشردگی فصل مشترک است و معمولاً مقداری بین ۱ تا ۴ دارد. حالت گسسته رابطه (۱۶-۲) به صورت زیر است:

$$(\alpha_1)_i^{n+1} = (\alpha_1)_i^n - \Delta t (\nabla \cdot [(\alpha_1 U) + U_r \cdot \alpha_1 (1 - \alpha_1)]) \quad (13-2)$$

در این تحقیق برای ایجاد هندسه مدل و شبکه‌بندی از نرم‌افزار GAMBIT 2.4.6، برای تحلیل مدل از نرم‌افزار OpenFOAM 16.06 و برای مشاهده نتایج به صورت گرافیکی از نرم‌افزار ParaView 5.0.0 استفاده شده است.

۱-۸-۲ حل گر اینترفوم^۱ و معادلات حاکم بر جریان

نرم‌افزار این فوم دارای حل گرهای متنوعی است که بسته به هدف موردنظر می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در این تحقیق برای حل جریان از حل گر اینترفوم استفاده شده است. این حل گر یک الگوریتم دوفازی بر پایه روش حجم سیال است و یک مدل تک سیال^۲ است در نتیجه برای هر دو فاز یک معادله اندازه حرکت و معادله پیوستگی تعریف می‌شود و کسر حجمی هر سیال در هر سلول محاسباتی به دست می‌آید.

در این تحقیق در حل گر اینترفوم از شبیه‌سازی RAS و مدل توربولانسی κ - ϵ استاندارد برای مدل‌سازی جریان آشفته و الگوریتم PIMPLE استفاده شده است.

شبیه‌سازی معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز (RANS) در سیستم مختصات کارتزین به صورت زیر می‌باشد (Wilcox, 2006):

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (14-2)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (15-2)$$

^۱ InterFoam

^۲ One Fluid Method

که در این روابط u_i سرعت متوسط در راستای i ، ρ چگالی سیال، P فشار استاتیکی، μ ویسکوزیته و $\overline{\rho u_i u_j}$ ترم مربوط به تنش‌های رینولدز است و $i, j=1, 2, 3(x, y, z)$ می‌باشد. ترم مربوط به تنش‌های رینولدز با استفاده از مدل بوزینسک مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (۱۶-۲)$$

μ_t ویسکوزیته توربولانسی است که در روش $k-\varepsilon$ استاندارد برابر است با:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۷-۲)$$

k انرژی جنبشی توربولانسی و ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی در واحد حجم می‌باشد و برابر است با:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (۱۸-۲)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

معادلات انرژی جنبشی توربولانسی (k) و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی (ε) در روش $k-\varepsilon$ استاندارد به صورت زیر است:

معادله انرژی جنبشی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] - \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \rho \varepsilon \quad (۱۹-۲)$$

معادله نرخ اضمحلال:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] - \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۲۰-۲)$$

$C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ و C_μ مقادیر ثابت و σ_k و σ_ε اعداد پراختل توربولانسی به ترتیب برای k و ε هستند و طبق جدول زیر می‌باشند:

جدول ۲-۱. ثابت های روابط توربولانسی

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_k	σ_ε
۱,۴۴	۱,۹۲	۰,۰۹	۱	۱,۳

۹-۲ مروری بر روش تشابه ابعادی

بسیاری از مسائل کاربردی جریان سیالات بسیار پیچیده‌تر از آن هستند که بتوان به صورت تحلیلی آن‌ها را حل کرد. این مسائل یا باید به صورت آزمایشگاهی حل شوند و یا به صورت تقریبی با استفاده از

دینامیک سیالات محاسباتی حل شوند. این نتایج معمولاً به صورت داده‌های عددی یا آزمایشگاهی، به صورت نقاطی بر روی منحنی‌های هموار شده ارائه می‌شوند. این داده‌ها اگر به صورت فشرده و اقتصادی بیان شده باشند بسیار کلی و عمومی هستند. این موارد انگیزه‌ای برای تحلیل ابعادی هستند. این تکنیک مبنای مکانیک سیالات است و به طور گسترده در همه زمینه‌های مهندسی و علوم فیزیکی، بیولوژیکی، پزشکی و اجتماعی کاربرد دارد. تحلیل ابعادی به کمک نوعی فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن از تعداد متغیرهای تجربی مؤثر روی یک پدیده معین فیزیکی منجر می‌شود. اگر پدیده‌ای به n متغیر با بعد بستگی داشته باشد، تحلیل ابعادی تعداد متغیرها را به k متغیر بی‌بعد کاهش می‌دهد که این کاهش به پیچیدگی مسئله بستگی دارد. به طور کلی $n-k$ ، برابر با تعداد ابعاد مختلف حاضر در مسئله است که گاهی ابعاد پایه، اولیه یا اساسی نامیده می‌شوند. در مکانیک سیالات معمولاً چهار بعد اصلی، عبارتند از جرم (M)، طول (L)، زمان (T)، درجه حرارت (Θ). گرچه هدف تحلیل ابعادی، کاهش متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به صورت بی‌بعد است، اما مزایای جنبی زیادی نیز در بردارد (White, 2011):

الف) اولین مزیت تحلیل ابعادی صرفه‌جویی در وقت و پول است. فرض کنید میدانیم که نیروی F روی یک جسم مشخص شناور در جریان یک سیال، فقط به طول جسم (L)، سرعت جریان (V)، جرم مخصوص (ρ)، لزجت سیال (μ) بستگی دارد.

$$F = f(L V \rho \mu) \quad (21-2)$$

اگر شکل هندسی و شرایط جریان به قدری پیچیده باشند که تئوری‌های انتگرالی و دیفرانسیلی قادر به یافتن نیرو نباشند، آنگاه باید F را به صورت تجربی بیابیم. اگر برای تعریف یک منحنی نیاز به ۱۰ نقطه تجربی باشد. برای مثال باید به ازای ۱۰ طول مختلف ۱۰ آزمایش انجام داد. سپس به ازای هر طول معین ۱۰ مقدار برای V ، ۱۰ مقدار برای ρ و ۱۰ مقدار برای F به دست آورد و در کل ۱۰۰۰۰ آزمایش انجام داد؛ که نیازمند صرف هزینه و وقت بسیار است؛ اما با استفاده از روش تحلیل ابعادی معادله‌ی نیرو به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\left(\frac{F}{\rho v^2 L^2}\right) = g\left(\frac{\rho v L}{\mu}\right) \quad (22-2)$$

$$C_F = g(Re)$$

که در آن ضریب بی‌بعد نیرو $\left(\frac{F}{\rho v^2 L^2}\right)$ فقط تابعی از عدد رینولدز $\left(\frac{\rho v L}{\mu}\right)$ است. به این صورت با انجام تنها ۱۰ آزمایش به ازای تغییرات عدد رینولدز می‌توان به نتیجه مشابه حاصل از ۱۰۰۰۰ آزمایش به صورت عادی رسید.

ب) دومین مزیت تحلیل ابعادی این است که ما را در تعمق برای طرح‌ریزی یک آزمایش یا تئوری یاری می‌کند. تحلیل ابعادی گاهی بعضی از متغیرها را کنار می‌گذارد و گاهی متغیرهایی را که با چند آزمایش ساده، بی‌اهمیت بودن آن‌ها روشن شده است، گردآوری و گروه‌بندی می‌کند.

ج) سومین مزیت تحلیل ابعادی این است که به کمک قوانین تشابه حاصل از تحلیل ابعادی، می‌توان داده‌های مربوط به یک مدل کوچک و ارزان‌قیمت را به داده‌های طراحی یک نمونه واقعی تبدیل کرد. هنگامی که امکان استفاده از قانون تشابه فراهم است، گفته می‌شود که شرایط تشابه بین مدل و نمونه واقعی برقرار است.

اگر تمام پارامترهای بی‌بعد مربوط به مدل و نمونه واقعی یکسان باشند آنگاه شرایط جریان برای آزمایش مدل کاملاً مشابه است. در متون و نوشته‌های مهندسی به‌جای تشابه کامل نمونه‌های خاصی از تشابه بررسی می‌شوند که رایج‌ترین آن‌ها تشابه هندسی، سینماتیکی، دینامیکی و حرارتی می‌باشد. در تشابه هندسی بعد طول $\{L\}$ مهم است و قبل از هر آزمایشی باید از برقراری تشابه هندسی اطمینان حاصل شود. تعریف رسمی و قراردادی برای تشابه ابعادی به‌صورت زیر است (White, 2011):

الف) مدل و نمونه واقعی، دارای تشابه هندسی هستند اگر و فقط اگر تمام ابعاد دو جسم در تمام مختصات سه‌گانه دارای یک نسبت مقیاس خطی باشند. به‌عبارتی دیگر نسبت ابعاد متناظر مدل و نمونه اصلی عدد ثابتی است. تمام زوایا و جهت‌های جریان در تشابه هندسی یکسان‌اند و راستای مدل و نمونه واقعی باید نسبت به محیط اطراف همسان باشند. تشابه هندسی ایجاب می‌کند که تمام نقاط متناظر با یک نسبت تشابه خطی به هم مربوط شوند. این شرط برای شکل هندسی سیال نیز همچون شکل هندسی مدل اعمال می‌شود.

ب) اساس تشابه سینماتیکی داشتن نسبت تشابه طولی و زمانی یکسان است؛ یعنی نسبت تشابه سرعت باید برای هر دو یکسان باشد. این موضوع را لانگهار (Langhaar, 1951) چنین بیان می‌کند که حرکت دو سیستم در صورتی از نظر سینماتیکی شبیه است که ذرات متناظر در زمان‌های متناظر در نقاط متناظر قرار گرفته باشند. اگر دو جریان از لحاظ سینماتیکی مشابه باشند از نظر هندسی هم مشابه‌اند ولی عکس این موضوع الزاماً برقرار نیست. لازمه تشابه سینماتیکی یکسان بودن نوع جریان مدل و نمونه اصلی است. تساوی مقیاس طولی، به‌راحتی تشابه هندسی را نیز در بردارد، ولی تساوی مقیاس زمانی می‌تواند مفاهیم دینامیکی بیشتری مانند تساوی عدد رینولدز و ماخ را الزامی سازد.

ج) بین مدل و نمونه واقعی هنگامی تشابه دینامیکی وجود دارد که نسبت مقیاس طول (L) ، زمان (t) و نیرو (F) (یا مقیاس جرم) برای آن‌ها مساوی باشد. در اینجا نیز تشابه هندسی شرط اول است و فقط هنگامی تشابه دینامیکی هم‌زمان با تشابه سینماتیکی برقرار خواهد بود که ضرایب فشار و نیرو برای مدل و نمونه واقعی یکسان باشد. برای برقراری تشابه دینامیکی بین دو جریان باید هر دو تشابه هندسی و سینماتیکی برقرار باشد. اهمیت وجود تشابه دینامیکی این است که اگر در سرتاسر جریان نسبت بین نیروهای متناظر دو جریان یکسان باشد انتگرال توزیع این نیروها (که می‌تواند مثلاً نیروی دراگ، شناوری، ... را به دست دهد) نیز برای جریان مدل و نمونه اصلی دارای همان نسبت بوده و می‌توان از نتایج حاصل از آزمایش استفاده کرد. برای تشابه دینامیکی باید کلیه اعداد بدون بعد برای مدل و نمونه

اصلی برابر باشند. در اکثر مسائل برقراری تساوی همه اعداد بی‌بعد لازم نیست چون برخی از نیروهای ممکن است تأثیر نداشته باشند یا بزرگی‌شان ناچیز باشد و یا در جهات مختلف چنان اثر کنند که متقابلاً حذف شود. تشابه دینامیکی در صورتی برقرار است که:

۱- برای جریان تراکم پذیر:

بایستی عدد رینولدز و عدد ماخ و نسبت گرمای ویژه مدل و نمونه واقعی یکسان باشند.

۲. برای جریان تراکم ناپذیر:

الف) بدون سطح آزاد: بایستی اعداد رینولدز مدل و نمونه واقعی مساوی باشند.

ب) با سطح آزاد: بایستی اعداد فرود و رینولدز و در صورت نیاز اعداد وبر و کاویتاسیون مدل و نمونه واقعی یکسان باشند.

در قوانین تحلیل ابعادی ذکر شده است که رابطه‌ای که از لحاظ ابعادی هم‌خوانی نداشته باشد لزوماً غلط است (Ratha krishnan, 2007) و از مهم‌ترین نظریه‌های آن نظریه پی باکینگهام است (Shames,2003; Halliday et al, 1992).

۱۰-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

بسیاری از محققان به صورت عددی و آزمایشگاهی درباره تأثیر پارامترهای ساختاری لوله ونتوری بر روی فشار و سرعت در داخل لوله مطالعه نموده‌اند. گابارد یک مولد حباب نوع ونتوری را برای استفاده در سیستم حذف زنون طراحی کرد. در حین بررسی عملکرد آن، یک همبستگی بدون بعد یافته شد که وابستگی قطر حجمی میانگین میکرو حباب به عدد رینولدز جریان و کشش سطحی را توصیف می‌کند. با این حال همبستگی خاصی که بیان‌کننده رابطه بین اندازه میکرو حباب با نسبت هوا به آب یا عدد رینولدز هوا باشد، یافت نشد (Gabbard,1972). در این مطالعات پارامترهای متغیر مؤثر بر روی اندازه میانگین حباب بررسی شده است در حالی که در بسیاری از موارد کاربردی (از جمله تصفیه فاضلاب) توزیع اندازه میکرو حباب‌ها مهم‌تر از میانگین اندازه حباب‌ها می‌باشد.

با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی، پارامترهای اسکرابر ونتوری از جمله افت فشار درون گلوگاه، پخش قطرات کوچک^۱ و ضریب جذب گردوغبار را مورد بررسی قرار گرفته است. از میان این پارامترها، افت فشار تابعی از نسبت گاز-مایع، سرعت گاز در گلوگاه و مساحت گلوگاه می‌باشد (Pulley, 1997; Talai and Ahmadvand, 2010; Viswanathan, 1998).

^۱ Droplet Dispersion

ژو و همکارانش با استفاده از یک روش عددی پیشنهاد کردند که افزایش زاویه پخش باعث افزایش شار جرمی می‌شود و یک زاویه انتشار مطلوب ۳۰ درجه را به دست آورد (Zhu et al, 2002). با توجه به اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله ونتوری، افزایش فشار ورودی باعث کاهش فشار گلوگاه می‌شود. علاوه بر این، با توجه به فشار ورودی، افزایش اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله ونتوری موجب می‌شود که فشار گلوگاه بیشتر شود. با افزایش اختلاف فشار بین ورودی و خروجی و نسبت انقباض، شار جرمی نیز افزایش می‌یابد (Zhu et al, 2002; Qi and Chen, 2014).

کاواشیما و همکارانش یک مولد حباب نوع ونتوری طراحی کردند تا اثر میکرو حباب‌ها در کاهش درگ را بررسی کنند. توزیع‌های مختلفی از اندازه حباب‌ها به دست آوردند و دریافتند که اندازه میکرو حباب‌ها با نرخ جریان آب نسبت معکوس دارد و با نسبت هوا به آب نسبت مستقیم دارد. توزیع اندازه میکرو حباب‌ها مهم‌ترین عامل در کاهش درگ می‌باشد (Kawashima et al, 2004).

تراساکا و همکارانش کارایی سه نوع مولد حباب متفاوت شامل مولد نوع جریان دورانی طراحی شده توسط اوناری و همکارانش (Ohnari et al, 1999)، مولد حباب نوع ونتوری و نوع اجکتور را در تصفیه فاضلاب بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که مولد حباب نوع جریان دورانی بهترین ضریب انتقال اکسیژن را دارد. در این تحقیق مقایسه‌ها نسبت به مولد با صفحه سوراخ‌دار انجام شده بود. از آنجاکه این مدل مولد حباب نیروی زیادی برای اجرا لازم داشت بنابراین نویسنده پیشنهاد کرد که در هنگام ارزیابی کاربرد یک مولد حباب برای استفاده مطلوب در فرآیندهای صنعتی، مصرف برق و کارایی باید باهم سنجیده شوند (Terasaka et al, 2011).

ساداتومی و همکارانش نوع جدیدی از مولد حباب را با قراردادن یک جسم کروی در لوله جریان سیال پیشنهاد کردند و کارایی آن را بررسی کردند. نسبت بهینه قطر جسم کروی به قطر لوله و موقعیت بهینه قرارگیری سوراخ هوا به دست را به دست آوردند. همچنین دریافتند که این روش در تولید حباب بزرگ‌تر کارایی بهتری دارد (Sadatomi et al, 2005). بعدها ساداتومی و کاواهارا (Sadatomi and Kawahara, 2008) مولد دیگری را طراحی کردند که به جای جسم کروی از یک صفحه متخلخل و یک روزنه استفاده کردند و کارایی آن را بررسی کردند. نسبت بهینه قطر روزنه به قطر لوله را با ماکزیمم کردن نسبت نرخ تولید میکرو حباب به نرخ انرژی مصرفی به دست آوردند. آن‌ها قطر^۱ حباب را در سرعت جریان ۱۰ متر بر ثانیه و نرخ جریان گاز ۱ لیتر بر دقیقه، ۱۲ میکرومتر محاسبه کردند. علاوه بر این دریافتند که تحت این شرایط، اندازه قطر سوراخ‌های صفحه متخلخل تأثیری بر قطر حباب‌های تولیدشده ندارد (Sadatomi et al, 2012). در این تحقیق به توزیع اندازه میکرو حباب‌ها که اهمیت زیادی دارد پرداخته نشده و در عوض آن‌ها بر روی خصوصیتی از قبیل نگهداشت گاز و نسبت تخلخل تمرکز کردند تا عملکرد دستگاه‌های تحت بررسی را توصیف کنند.

^۱ Sauter

اثرات هندسه نازل و شار جرمی جریان بر روی عملکرد جمع‌آوری و اسکراب دود ناشی از سوخت دیزل توسط داس و بیسواس مورد بررسی قرار گرفته است (Das and Biswas, 2006). عملکرد هیدرودینامیکی و انتقال جرم یک راکتور امولسیون لوپ-ونتوری در بالادست و پائین‌دست جریان توسط گوریچ بررسی شده است (Gourich, 2008)

فوجیوارا و همکارانش رفتار حباب‌ها را در مولد نوع ونتوری با مخلوطی از جریان آب و هوا در ورودی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که حباب‌ها تحت تأثیر جریان آشفته شدید در بخش گلوگاه تغییر شکل می‌دهند و پس از آن با ورود به بخش انتشار به دلیل اختلاف فشار زیاد در بالادست و پائین‌دست جریان تقسیم شده و دچار فروپاشی می‌شوند. در واقع حباب‌ها به دلیل ستون جریان پشت سرشان شکسته می‌شوند (Fujiwara et al, 2007). یوزاوا و همکارانش تغییرات نسبت تخلخل^۱ را در یک مولد نوع ونتوری شبیه مدل فوجیوارا اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که با انبساط حباب‌ها نسبت تخلخل به مقدار ماکزیمم می‌رسد و به محض ترکیدن حباب‌ها این نسبت به شدت کاهش می‌یابد (Uesawa et al, 2011). بعدها آن‌ها دریافتند که عدد ماخ بین گلوگاه و نقطه شکستن حباب‌ها بیشتر از ۱ است در حالی که در بالادست گلوگاه و پائین‌دست نقطه شکست کمتر از ۱ می‌باشد (Uesawa et al, 2012). سان و همکارانش با روش عددی اثرات نسبت انقباض و زاویه پخش را در شار جرمی و درجه خلأ در لوله ونتوری را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حداقل فشار در تقاطع بین بخش انقباض و گلو اتفاق می‌افتد (Sun and Niu, 2010).

جیانگ و همکارانش دریافتند که افزایش میزان انقباض، افت فشار در لوله ونتوری را افزایش می‌دهد. آن‌ها پیشنهاد کردند که نسبت انقباض بین ۰٫۲۵-۰٫۵۵ با افت فشار ۶۰-۸۳ KPa متغیر است (Jiang et al, 2014; 2015).

رودیو و کونگدو یک الگوریتم ساده برای ارائه یک مجموعه بهینه شده از پارامترهای مدل کاویتا سیون پیشنهاد کرده‌اند (Rodio and Congedo, 2014).

گوپتا و همکارانش جریان دوفازی آب‌وهوای عبوری از کانال ونتوری در یک راکتور تحت فشار ۷۰۰ مگاواتی هندی^۲ را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند و دریافتند که با افزایش نسبت تخلخل، ضریب جریان دوفازی افزایش می‌یابد (Gupta et al, 2016).

آزوپاردی و هویت دریافتند که قطر ماکزیمم حباب تقریباً ۱/۵ تا ۳ برابر قطر ساتر حباب‌ها می‌باشد (Azzopardi and Hewitt, 1997). اندری و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۶ در تحقیقات خود بر روی قطر میانگین ساتر حباب‌ها، این مقدار را ۱/۶۴۳۲ به دست آورده‌اند (Andriy et al, 2016).

^۱ Void Fraction

^۲ 700 MWe Indian Pressurized Heavy Reactor

مانزانو و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پارامترهای هندسی که بیشترین تأثیر را برافت هد در تزریق کننده‌های ونتوری می‌گذارند مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای هندسی را برای دستیابی به بهترین عملکرد هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گرد کردن گوشه‌های محل اتصال بخش انقباض به بخش گلوگاه و بخش گلوگاه به بخش انتشار در لوله ونتوری باعث کاهش افت می‌شود و وقوع کویتاسیون به تعویق می‌افتد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر روی افت هد ندارد ولی قطر بخش گلوگاه و قطر بخش انقباض و بخش انتشار تأثیر زیادی بر روی افت هد دارند. آن‌ها دریافتند که قطر بزرگ‌تر و درعین حال زاویه پخش کوچک‌تر بهترین عملکرد هیدرولیکی را دارد (Manzano et al, 2016).

ژانگ با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی فشار و سرعت در لوله ونتوری پرداخته است. وی با تغییر دادن نسبت انقباض، زاویه پخش و نسبت طول بخش گلوگاه به قطر لوله ونتوری و تغییر مقادیر فشار ورودی و خروجی در لوله ونتوری، به بررسی تغییرات سرعت و فشار در داخل لوله ونتوری پرداخته است. او فهمید که پارامترهای مهم و مؤثر بر روی فشار و سرعت، نسبت انقباض و اختلاف فشار ورودی و خروجی لوله می‌باشد. نسبت طول بخش گلوگاه به قطر تأثیر کمی بر سرعت در داخل لوله ونتوری دارد ولی با افزایش نسبت انقباض سرعت در لوله ونتوری سریعاً افزایش می‌یابد و طول انتشار کامل سرعت در بخش انتشار کوتاه‌تر می‌شود. وی به این نتیجه رسید که زمانی که نسبت انقباض کمتر از ۰.۲ و زاویه پخش کمتر از ۳۵ درجه باشد سرعت در طول لوله ونتوری توزیع نامتقارن دارد. همچنین وی به این نتیجه رسید که حداقل فشار در محل تقاطع بخش گلوگاه و بخش انقباض در لوله ونتوری اتفاق می‌افتد یعنی دقیقاً در جایی که فشار به شدت تغییر می‌کند. (Zhang, 2017).

ژائو و همکارانش به بررسی حرکت حباب‌های منفرد در داخل لوله ونتوری پرداخته‌اند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که همه حباب‌ها به‌ویژه حباب‌های بزرگ‌تر به محض ورود به بخش انتشار قبل از شکسته شدن تغییر شکل قابل توجهی پیدا می‌کنند و همچنین دریافتند که همه حباب‌ها به‌ویژه حباب‌های بزرگ‌تر در بخش انتشار شکسته و ریزتر می‌شوند و افزایش دبی جریان فروپاشی حباب‌ها را تشدید می‌کند ولی محل فروپاشی حباب را چندان تغییر نمی‌دهد (Zhao et al, 2017).

تعدادی از تحقیقاتی که توسط تکنیک پردازش تصویر به تحلیل جریان دوفازی و تعیین مشخصات حباب پرداخته‌شده در ادامه آورده شده است.

در تحقیق آزمایشگاهی دیگری یک روش جدید به شناسایی خودکار حباب در جریان حبابی-اسلاگی در یک لوله‌ی قائم کوچک پرداخته شد. این روش بر اساس تکنیک پردازش تصویر است (با اعمال فیلتر برای کاهش نویزها، شناسایی لبه‌ها و آستانه گیری). نسبت به روش‌های قدیمی مثل روش اندازه‌گیری نقطه‌به‌نقطه و یا استفاده از جدول دیجیتالی برای رقیق کردن مزیت‌های بسیاری داشت. از جمله اینکه در این روش در زمان خیلی کوتاهی می‌توان چندین مورد را بررسی کرد. این روش به‌طور خودکار

می‌تواند پارامترهای مربوط به حباب از جمله متوسط قطر و طول حباب را به‌طور دقیق شناسایی کند. این پارامترها نقش مهمی را در پیش‌بینی دینامیک توزیع فضای خالی و رفتار فضای خالی در جریان دوفازی بازی می‌کند که در صنایع بسیاری از جمله فرآیندهای شیمیایی و راکتورهای هسته‌ای با آن مواجه می‌شوند (Bui Dinh and Choi, 1999).

در جریان تحقیقی دیگر به مدل‌سازی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب‌وهوا در تونل‌ها و مجاری تحت فشار و بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصاویر به‌منظور تعیین مشخصات ویژه نوسانی جریان دوفازی آب‌وهوا پرداخته شد. طبق بررسی‌ها، با افزایش دبی آب، طول موج امواج نوسانی و ارتفاع امواج کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش دبی هوا، ارتفاع موج و طول آن کوچک‌تر می‌شود. به‌صورت کیفی می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش دبی هوا پیروی امواج نوسانی منظم‌تر می‌شود. ضمن اینکه طول موج و پیروی موج کاهش می‌یابند. بررسی انجام‌شده بر روی اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول موج در امواج لخته‌ای به وجود آمده عموماً در محدوده‌ی ۱۰ تا ۸۵ برابر قطر مجرا است. طول حباب هوا نیز حدوداً یک‌سوم طول موج و حداکثر برابر نصف طول موج می‌باشد. با افزایش شیب مجرا نسبت به افق (شیب منفی) پیروی موج کاهش می‌یابد (کبیری سامانی، ۱۳۸۷). (Kabiri Samani, 2009).

در تحقیقی تکنیک پردازش تصویر برای اندازه‌گیری مشخصات جریان دوفازی در جریان اسلاگ در لوله افقی پرداخته شد. در تحقیقات اغلب به بررسی حالت عمودی پرداخته‌شده است و تعداد کمی بر روی لوله‌های افقی آزمایش کرده‌اند. شناسایی حباب تیلور در میان تعداد زیادی حباب در ناحیه‌ی اسلاگ چالش بزرگی است زیرا برای جداسازی فاز گاز از فاز مایع رفتار خاصی مدنظر است. با تکنیک پردازش تصویر به‌طور خودکار پارامترهای مربوط به حباب از جمله فرکانس، ابعاد و سرعت تخمین زده می‌شود. در تکنیک پردازش تصویر از قطعه‌بندی watershed و فیلتر top-hat و تبدیل H-minima برای شناسایی و تخمین سرعت حباب توسط عکس‌های گرفته‌شده استفاده‌شده است (Amaral et al, 2013).

در تحقیق دیگری از یک ستون حبابی مکعبی در اندازه‌ی آزمایشگاهی استفاده شد و با استفاده از روش عکس‌برداری پرسرعت و ارائه‌ی روش‌های جدید پردازش تصویر، مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان حباب‌ها مانند قطر، سرعت، خطوط جریان فاز گاز و بسامد نوسان توده حباب‌ها اندازه‌گیری شد. ستون ساخته‌شده دارای سطح مقطع 5×2 سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر است. سرعت ظاهری گاز بین $0.1-0.7$ سانتی‌متر بر ثانیه در تغییر است. از سه دوربین گوناگون با سرعت‌های ۲۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ تصویر در ثانیه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های حباب‌ها استفاده شد و برای پردازش تصویرها، تحلیل داده‌ها و محاسبه‌ی ویژگی‌های حباب از نرم‌افزار متلب استفاده شد. بسامد نوسان توده حباب با روشی نو و با دقت ۹۵٪ به دست آمد. اندازه قطر ستر حباب‌ها، در شرایط همپوشانی حباب‌ها از $6/5$ تا $8/5$ میلی‌متر و با دقت $99/8$ ٪ محاسبه شد. سرعت حباب‌ها با استفاده از روش کمترین فاصله با یک حد بالا برای اولین بار در ستونی با این ابعاد به دست آمد و با استفاده از برآیند مومنتوم، روشی

برای به دست آوردن خطوط جریان فاز گاز ارائه گردید (اسدی و هرمزی ۱۳۹۲). (Asadi and Hormozi, 2014).

با توجه به مطالب ذکر شده در این بخش، ملاحظه می شود که تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده برای بررسی حبابها در لولههای افقی و عمودی می باشد و بر روی میکرو-نانوحبابهای ایجاد شده توسط لوله ونتوری تحقیقات چندانی صورت نگرفته است و مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بیشتر بر روی تغییرات سرعت و فشار و بررسی افت فشار در داخل لوله ونتوری بوده و مطالعات چندانی بر روی نحوه تشکیل میکرو-نانوحبابها و بررسی تغییرات آلفا صورت نگرفته است. مطالعات صورت گرفته بر روی مولدهای نوع ونتوری میکرو حباب هم بیشتر در جهت استفاده از این نوع مولدها جهت کاهش نیروی درگ و جهت تصفیه آب و فاضلاب و غیره می باشد و جای مطالعه ای که هم به جهت عددی و هم آزمایشگاهی شکل گیری میکرو حبابها را در لوله ونتوری بررسی کند خالی به نظر می رسد. لذا در این تحقیق سعی شده است تا با مطالعه عددی و آزمایشگاهی، با استفاده از نرم افزار اپن فوم^۱ و عکس برداری پرسرعت و تکنیک پردازش تصویر^۲، بر روی لولههای ونتوری در ابعاد و اندازههای مختلف و تحت دبیهای مختلف، نحوه شکل گیری میکرو حبابها در لوله ونتوری و سرعت و قطر حبابها بررسی شود و ابعاد مناسبی از لوله ونتوری جهت تولید میکرو حباب انتخاب گردد.

^۱ OpenFOAM

^۲ Image Processing

فصل ۳ : مواد و روش ها

۱-۳ مقدمه

با توجه به این که این تحقیق به صورت عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است، لذا این فصل به دو قسمت شامل روش عددی و روش آزمایشگاهی تقسیم شده است. در بخش اول، روش عددی و نرم افزارهای بکار برده شده و نحوه تحلیل عددی و نمونه های مورد بررسی توضیح داده شده است. در بخش دوم، روش آزمایشگاهی، مواد و تجهیزات آزمایشگاهی و همچنین روش ساخت مدل آزمایشگاهی لوله ونتوری تشریح شده است. در ادامه آزمایش های انجام گرفته و روش تهیه فیلم و تصاویر و چگونگی پردازش روی آن ها بیان گردیده است.

۲-۳ روش عددی

۱-۲-۳ تجهیزات محاسباتی و نرم افزار

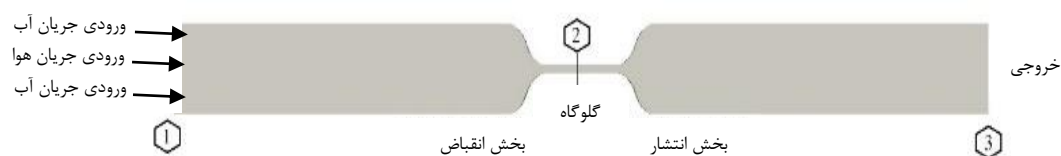
در این تحقیق برای تحلیل عددی از کامپیوترهای سریع موجود در مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین از سیستم های سریع مرکز ابر رایانش شیخ بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان با پردازنده AMD Opteron با سرعت ۲/۲ گیگاهرتز با ۱۰ هسته و ۲۰ گیگ رم استفاده شده است. برای ایجاد هندسه مدل و شبکه بندی از نرم افزار GAMBIT 2.4.6، برای تحلیل مدل از نرم افزار متن باز OpenFOAM 16.06 و برای مشاهده نتایج به صورت گرافیکی از نرم افزار ParaView 5.0.0 استفاده شده است. برای تحلیل آماری از نرم افزار SPSS 22.0.0.0 استفاده شده است. برای پردازش تصویر از نرم افزار MATLAB R2016a استفاده شده است. با استفاده از نتایج تحلیل عددی نمونه های مناسبی جهت ساخت مدل آزمایشگاهی انتخاب گردیده است.

در تحلیل عددی، جریان به صورت دوبعدی شبیه سازی شده است. جریان تراکم ناپذیر و ناپایاست و برای تحلیل از حلگر اینترفوم در نرم افزار این فوم استفاده شده است. از شرط مرزی گرادیان صفر برای فشار در ورودی سیال، و شرط مرزی گرادیان صفر برای سرعت در خروجی استفاده شده است.

در ابتدا برای بررسی رژیم های جریان در داخل لوله ونتوری مدل های مختلفی شبیه سازی و تحلیل شد. سپس با توجه به بزرگ بودن ابعاد مدل ها و ریز بودن اندازه مش ها و زیاد بودن تعداد مدل های مورد بررسی که باعث طولانی شدن زمان تحلیل و افزایش هزینه می شود لذا تصمیم بر این شد که اثر تشابه ابعادی بر روی مدل ها بررسی شود. با استفاده از روش تشابه ابعادی نمونه های مختلفی در اندازه هایی کوچک تر از مقیاس واقعی شبیه سازی شده و با نمونه های واقعی مقایسه شده است. سپس نمونه های مختلفی از لوله ونتوری با ابعاد و دبی های مختلفی از جریان شبیه سازی و تحلیل شده است.

۳-۲-۲ شبیه‌سازی جهت بررسی رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری

رژیم‌های جریان دوفازی معمولاً تحت تأثیر موقعیت و شکل هندسی خط لوله، جهت جریان، خواص فیزیکی و شدت جریان هر یک از فازها و شار حرارتی وارد بر دیواره لوله قرار دارد. اولین گام برای بررسی تولید میکرو حباب در لوله ونتوری شناخت نوع رژیم‌های جریان در آن است. برای بررسی رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری مدل‌های مختلفی مطابق شکل ۳-۱ و جدول ۳-۱، شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نصف مقطع ورودی جریان به فاز آب و نصف دیگر به فاز هوا اختصاص داده شده است. قطر لوله ۱ اینچ و قطر بخش گلوگاه ۰,۱ قطر لوله در نظر گرفته شده است. ابعاد مش در تمامی مدل‌ها ۰,۱ سانتی‌متر است.



شکل ۳-۱. شماتیکی از لوله ونتوری مورد بررسی

جدول ۳-۱. سرعت جریان فازهای آب و هوا برای بررسی رژیم‌های جریان

مدل	سرعت هوا (m/s)	سرعت آب (m/s)
Model 1	۰,۰۵	۰,۵
Model 2	۰,۰۵	۱
Model 3	۰,۰۵	۲
Model 4	۰,۰۵	۵
Model 5	۰,۰۵	۱۰
Model 6	۰,۱	۰,۵
Model 7	۰,۱	۱
Model 8	۰,۱	۲
Model 9	۰,۱	۵
Model 10	۰,۱	۱۰

۳-۲-۳ شبیه‌سازی جهت بررسی اثر استفاده از روش تشابه ابعادی

در این بخش از تحقیق به بررسی نتایج حاصل از جریان آب‌وهوا و تولید میکرو حباب در لوله ونتوری در مدل اصلی و مدل کوچک‌شده با استفاده از تشابه ابعادی پرداخته شده است. تحلیل عددی شکل‌گیری میکرو حباب در لوله ونتوری نیازمند ماشین‌های سریع و فضای ذخیره‌سازی بیشتری است برای این منظور می‌توان از تشابه ابعادی استفاده کرد و با استفاده از روش تشابه ابعادی مدل را کوچک‌تر کرد. برای اطمینان از اینکه آیا نتایج حاصل از مدل اصلی و مدل شبیه‌سازی شده باهم همخوانی دارند یا خیر، به مقایسه نتایج حاصل از این دو مدل پرداخته شده است. طبق مطالب ذکر شده در فصل دوم، جهت استفاده از روش تشابه ابعادی باید اعداد بی‌بعد مؤثر شناسایی شوند. در این تحقیق مشخص شد که اعداد بی‌بعد مؤثر عدد رینولدز و عدد اولر و عدد وبر جریان هستند. ابعاد مش‌ها در مدل‌های اصلی ۰/۱ سانتی‌متر انتخاب شده‌اند؛ بنابراین اگر حباب‌های کوچک‌تر از ۳۰ میکرومتر به‌عنوان میکرو حباب در نظر گرفته شوند، برای ردیابی میکرو حباب‌ها، باید ابعاد شبکه را به ۳۰ میکرومتر کاهش داد. به عبارت دیگر مدل کوچک‌شده باید دارای مقیاس طولی ۳:۱۰۰ باشد با استفاده از تساوی عدد رینولدز در دو مدل می‌توان نوشت:

$$Re_m = Re_p \quad (۱-۳)$$

$$\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_m = \left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_p$$

با توجه به اینکه در هر دو مدل سیال‌ها آب‌وهوا هستند، لذا خواهیم داشت:

$$(VD)_m = (VD)_p \quad (۲-۳)$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{D_p}{D_m} = \frac{0.1}{0.003} = 33.3$$

بنابراین سرعت در مدل شبیه‌سازی شده ۳۳/۳ برابر سرعت در مدل اصلی است.

با استفاده از عدد اوایلر نیز خواهیم داشت:

$$Eu_m = Eu_p \quad (۳-۳)$$

$$\left(\frac{P}{\rho V^2}\right)_m = \left(\frac{P}{\rho V^2}\right)_p$$

$$\frac{P_m}{P_p} = \left(\frac{V_m}{V_p}\right)^2 \quad (۴-۳)$$

$$\frac{P_m}{P_p} = (33.3)^2 = 1108.89$$

بنابراین فشار در مدل شبیه‌سازی شده حدوداً ۱۱۰۰ برابر فشار در مدل اصلی خواهد بود.

چون پایداری حباب‌ها بستگی تام به مقدار کشش سطحی مایع دارد، از عدد وبر استفاده می‌شود:

$$We_m = We_p \quad (۵-۳)$$

$$\left(\frac{L\rho V^2}{\sigma}\right)_m = \left(\frac{L\rho V^2}{\sigma}\right)_p$$

(۶-۳)

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{L_m}{L_p} \left(\frac{V_m}{V_p} \right)^2$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = 0.03 \times \left(\frac{33.3}{1} \right)^2 = 33.2667$$

بنابراین کشش سطحی در مدل شبیه‌سازی شده حدوداً ۳۳/۲۷ برابر کشش سطحی در مدل شبیه‌سازی شده است.

برای بررسی تأثیر استفاده از تشابه ابعادی در لوله ونتوری و با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی رژیم‌های جریان در بخش قبلی، نمونه‌های مختلفی از لوله ونتوری طبق شکل ۱-۳ و جدول ۲-۳ شبیه سازی شده است.

جدول ۲-۳. سرعت جریان فازهای آب و هوا برای بررسی اثر تشابه ابعادی

	مدل	سرعت هوا (m/s)	سرعت آب (m/s)
مدل‌های اصلی	Model 1	۰,۱	۰,۵
	Model 2	۰,۱	۱
	Model 3	۰,۱	۲
	Model 4	۰,۱	۵
	Model 5	۰,۱	۱۰
مدل‌های کوچک شده	Model 6	۳,۳۳	۱۶,۶۵
	Model 7	۳,۳۳	۳۳,۳
	Model 8	۳,۳۳	۶۶,۶
	Model 9	۳,۳۳	۱۶۵,۵
	Model 10	۳,۳۳	۳۳۳

۳-۲-۴ شبیه‌سازی لوله‌های ونتوری با ابعاد مختلف جهت تشکیل

میکرو حباب

در این بخش از تحقیق تحلیل عددی اختلاط آب و هوا در لوله ونتوری و شکل‌گیری میکرو حباب، با تغییر دادن ابعاد لوله ونتوری صورت گرفته است. با تغییر طول بخش گلوگاه و شیب بخش‌های انقباض و انتشار مطابق شکل ۳-۲ و جدول ۳-۳ مدل‌های مختلفی ساخته و مورد تحلیل قرار گرفته‌شده است. در ابتدای بخش گلوگاه در نقطه‌ای به فاصله ۰,۱ سانتی‌متر از محل اتصال گلوگاه به بخش انقباض روزنه‌ای به اندازه ۰,۱ برابر قطر لوله جهت ورود هوا به داخل لوله ونتوری در نظر گرفته‌شده است. ابعاد مش ۰,۵ سانتی‌متر می‌باشد. سرعت آب ورودی به داخل لوله ونتوری ۱ متر بر ثانیه و سرعت هوا ۰,۱ متر بر ثانیه می‌باشد. با تحلیل مدل‌های ذکر شده، مدل‌های مناسبی جهت ساخت نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده است.



شکل ۳-۲. شماتیکی از لوله ونتوری جهت بررسی تشکیل میکرو حباب

جدول ۳-۳. ابعاد مختلف لوله ونتوری جهت بررسی تشکیل میکرو حباب

مدل	طول بخش انقباض X	طول بخش انتشار Y	طول بخش گلوگاه Ln
Model 1	D	D	D
Model 2	D	2D	D
Model 3	D	3D	D
Model 4	2D	2D	D
Model 5	2D	3D	D
Model 6	D	D	0.5D
Model 7	D	D	0.1D
Model 8	2D	3D	0.5D
Model 9	2D	3D	0.1D
Model 10	2D	3D	0.01D

۳-۳ روش آزمایشگاهی

در این بخش به توضیح درباره مواد و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده، نحوه ساخت مدل آزمایشگاهی و آزمایش‌های صورت گرفته و روش تهیه فیلم و تصاویر و پردازش آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱ مواد و تجهیزات

- آب شهری مورد استفاده در آزمایش‌ها، آب شرب شهر شاهرود است که دارای خصوصیات ذکر شده در جدول ۳-۴ است.
- رنگ خوراکی قرمز برای ثبت بهتر تصاویر
- پمپ سانتریفیوژ DAB ساخت ایتالیا با توان ۳۷۵ وات که توانایی گذر دبی ۰/۶ تا ۲/۱۶ مترمکعب بر ساعت را دارد.
- ورق پلکسی گلس به ضخامت ۳ میلی‌متر
- ورق فومیزه (پلی کریبات ضد آب) به ضخامت ۱/۶ سانتی‌متر
- دوربین پرسرعت dimax S1، کارخانه سازنده pco، ساخت کشور آلمان با حداکثر سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه
- رایانه متصل به دوربین جهت ذخیره مستقیم عکس و فیلم‌های تهیه شده توسط دوربین
- چسب آکواریوم
- لوله و اتصالات جهت مونتاژ دستگاه

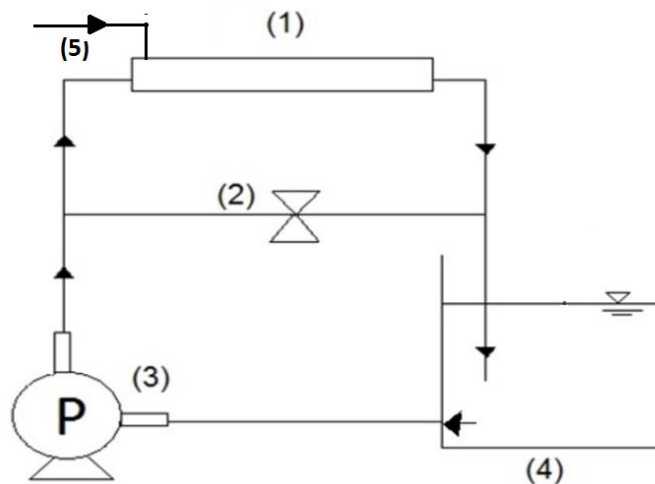
جدول ۳-۴. مشخصات آب شهری (رفعتی، ۱۳۹۵)

pH	کدورت (NTU)	دما (C°)	هدایت الکتریکی (μs)	اکسیژن محلول (mg/L)	جامدات محلول کل (mg/L)
۸,۵۶	۰,۴۱	۲۲	۶۱۷	۳,۰۱	۴۱۱

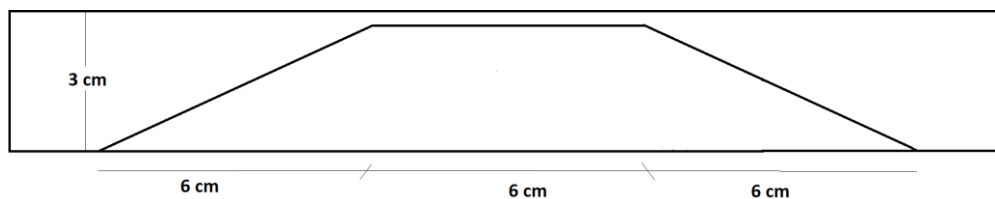
۳-۳-۲ ساخت مقطع آزمایش

در این تحقیق دو نمونه لوله ونتوری با ابعاد مختلف، طبق نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از ورق پلکسی گلس به ضخامت ۳ میلی‌متر، مجرای به مقطع ۱/۶×۳ سانتی‌متر و به طول ۱/۲ متر ساخته شد. طول لوله طولانی انتخاب شد تا از ایجاد جریان یکنواخت اطمینان حاصل شود. اتصالات با استفاده از چسب آکواریوم کاملاً آب‌بندی شد. انتخاب جنس پلکسی گلس به این دلیل است که این ماده سبک و مانند شیشه شفاف است و در عین حال مقاومت

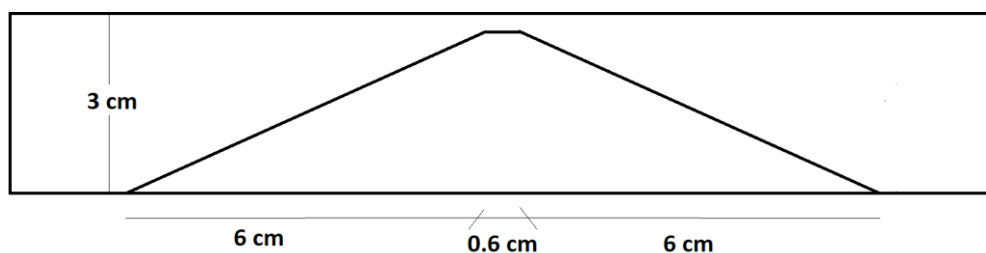
بالایی داشته و در برابر فشار و ضربه مقاوم است. برای ساخت مقطع تنگ‌شده یا ونتوری، از ورق فومیزه به ضخامت $1/6$ سانتی‌متر استفاده‌شده که به هنگام قرار گرفتن در معرض جریان دچار آسیب نگردد. برای برش فومیزه در ابعاد دلخواه از دستگاه برش CNC استفاده‌شده است تا شیب‌ها از دقت کافی برخوردار باشند. در شکل ۳-۳، شکل شماتیک دستگاه و هندسه نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده نشان داده‌شده است. در شکل ۴-۳ نمونه ای از ستاپ آزمایشگاهی آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۳. الف) شکل شماتیک دستگاه: (۱- مدل، ۲- شیر by pass، ۳- پمپ آب، ۴- مخزن آب، ۵- تزریق هوا)، ب) نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۱، ج) نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۲



شکل ۳-۴. نمایی از ستاپ آزمایشگاهی

۳-۳-۳ شرح انجام آزمایش

در ابتدا جهت تهیه عکس و فیلم‌های مناسب و ردیابی بهتر حباب‌های هوا، آب درون مخزن با استفاده از رنگ قرمز خوراکی، رنگین شده است. پس از سرهم کردن دستگاه مطابق شکل ۳-۳ الف، آب مخزن توسط پمپ به داخل لوله ونتوری فرستاده می‌شود. در مسیر جریان آب پس از پمپ یک جریان برگشتی در نظر گرفته شده است که با تنظیم شیر آن میزان آب ورودی به سیستم کنترل می‌شود. در این تحقیق هر کدام از مدل‌های ساخته شده طبق شکل ۳-۳ ب و شکل ۳-۳ ج، تحت سه دبی مختلف از جریان آب مطابق جدول ۳-۵ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و در کل ۶ نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. پس از روشن کردن پمپ و گذشت چند دقیقه به منظور یکنواخت شدن جریان، تزریق هوا از قسمت ورودی جریان به داخل سیستم انجام گرفت و از رفتار جریان و حباب‌های ایجاد شده تصویربرداری گردید.

جدول ۳-۵. دبی‌ها و سرعت‌های متوسط متناظر جریان آب

دبی جریان (lit/s)	سرعت متوسط جریان (m/s)
۰,۱۶	۰,۳۳۳
۰,۲۹	۰,۶
۰,۴۲	۰,۹

جهت ردیابی حباب‌های ایجادشده، شرایط آزمایشگاهی مانند نورپردازی، فاصله‌ی دوربین از مدل و سایر پارامترها به نحوی تنظیم شدند تا حباب‌ها و حرکت آن‌ها به خوبی شناسایی شوند. فاصله دوربین و تمرکز بر نمونه به گونه‌ای انتخاب شد تا در پردازش دیجیتال تصاویر، وضوح کافی برای تفکیک فازها حاصل شود. نورپردازی توسط دو پروژکتور صورت گرفت. برای تفکیک پذیری بهتر فازها از هم نور در پشت مدل به صفحه‌ای سفید تابانیده و انعکاس آن با گذر از مقطع توسط دوربین دریافت شد. برای کم کردن تأثیر سایر منابع روشنایی، آزمایش در اتاق تاریک آزمایشگاه تحقیقاتی آشکارسازی و ردیابی واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. رزولوشن تصاویر $1008 * 1008$ پیکسل می‌باشد. تنظیمات دوربین روی حالت حداکثر ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه انتخاب گردید تا رفتار حباب‌ها، علی‌رغم بالا بودن سرعت جریان، قابل ثبت و بررسی باشد.

۳-۳-۴ پردازش تصاویر

تمامی تصاویر تهیه شده، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2016a مورد پردازش قرار گرفتند. با کمک کد نوشته شده برای متلب، حباب‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر که مرز بین میکرو حباب و ماکرو حباب است حذف شد و حباب‌های کوچک‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر شناسایی و شمارش شدند و نمودار تغییرات سرعت جریان در داخل لوله رسم شد. برای نمونه یکی از عکس‌های اولیه و پردازش شده برای مدل شماره ۲ تحت دبی ۰/۲۹ لیتر بر ثانیه در شکل ۳-۵ آورده شده است.

برای به دست آوردن سرعت از ردیابی حباب در فریم‌های مختلف استفاده شده است. با توجه به ابعاد مدل و رزولوشن دوربین استفاده شده، هر پیکسل $0/014$ سانتی‌متر می‌باشد. اگر دوربین با سرعت m فریم بر ثانیه عکس برداری کند و حباب فاصله ΔX را بعد از n فریم طی کند، سرعت در نقاط مختلف از رابطه (۳-۷) محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Delta X}{\frac{n}{m}} = \frac{\Delta X \cdot m}{n} = \frac{(X_2 - X_1) \cdot m}{n} \times 0.014 \quad (7-3)$$

برای نمونه، ردیابی حباب‌ها در فاصله دو گام زمانی یعنی معادل $0/444$ میلی‌ثانیه در دبی $0/16$ لیتر بر ثانیه برای مدل شماره ۲ در شکل ۳-۶ آورده شده است.



(الف)

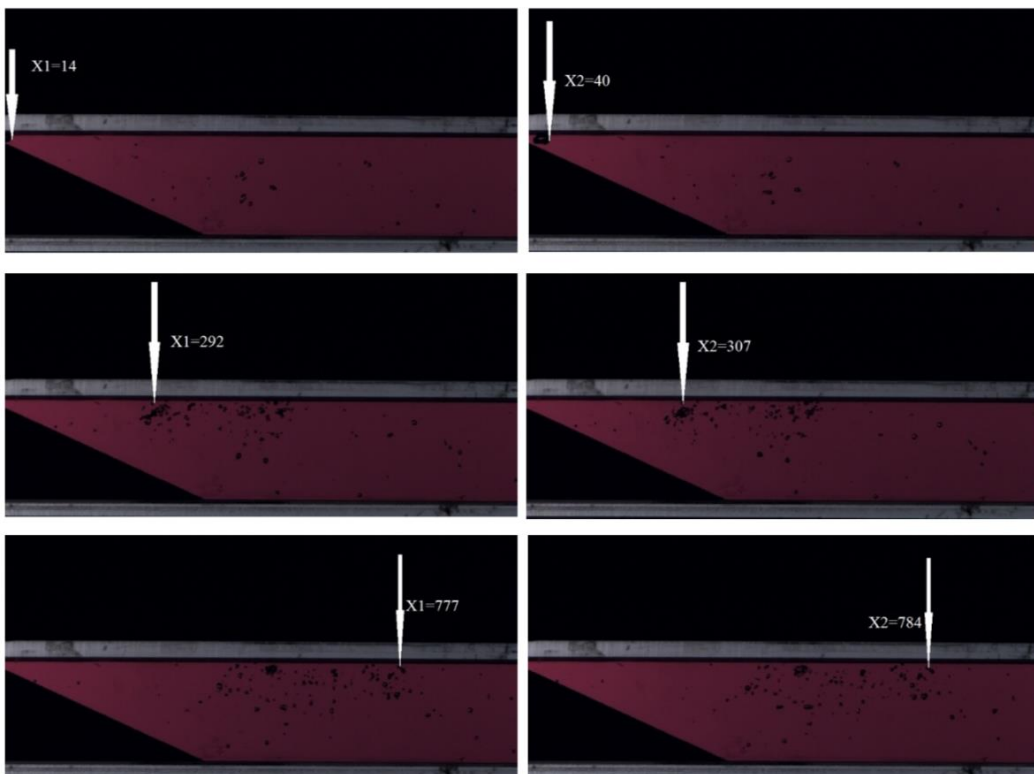


(ب)



(ج)

شکل ۳-۵. الف: تصویر اولیه ب: تصویر باینری ج: تصویر پردازش شده در مدل شماره ۲ تحت دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه



شکل ۳-۶. ردیابی حباب‌ها در مرکز لوله ونتوری برای محاسبه سرعت در مدل شماره ۲ با دبی ۰٫۱۶ لیتر بر ثانیه

فصل ۴ : نتایج و بحث

۱-۴ مقدمه

در این بخش به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. این بخش به سه قسمت تقسیم شده است. بخش نتایج حاصل از تحلیل عددی و بحث و بررسی آن‌ها، بخش نتایج حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و بحث و بررسی آن‌ها، بخش مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی.

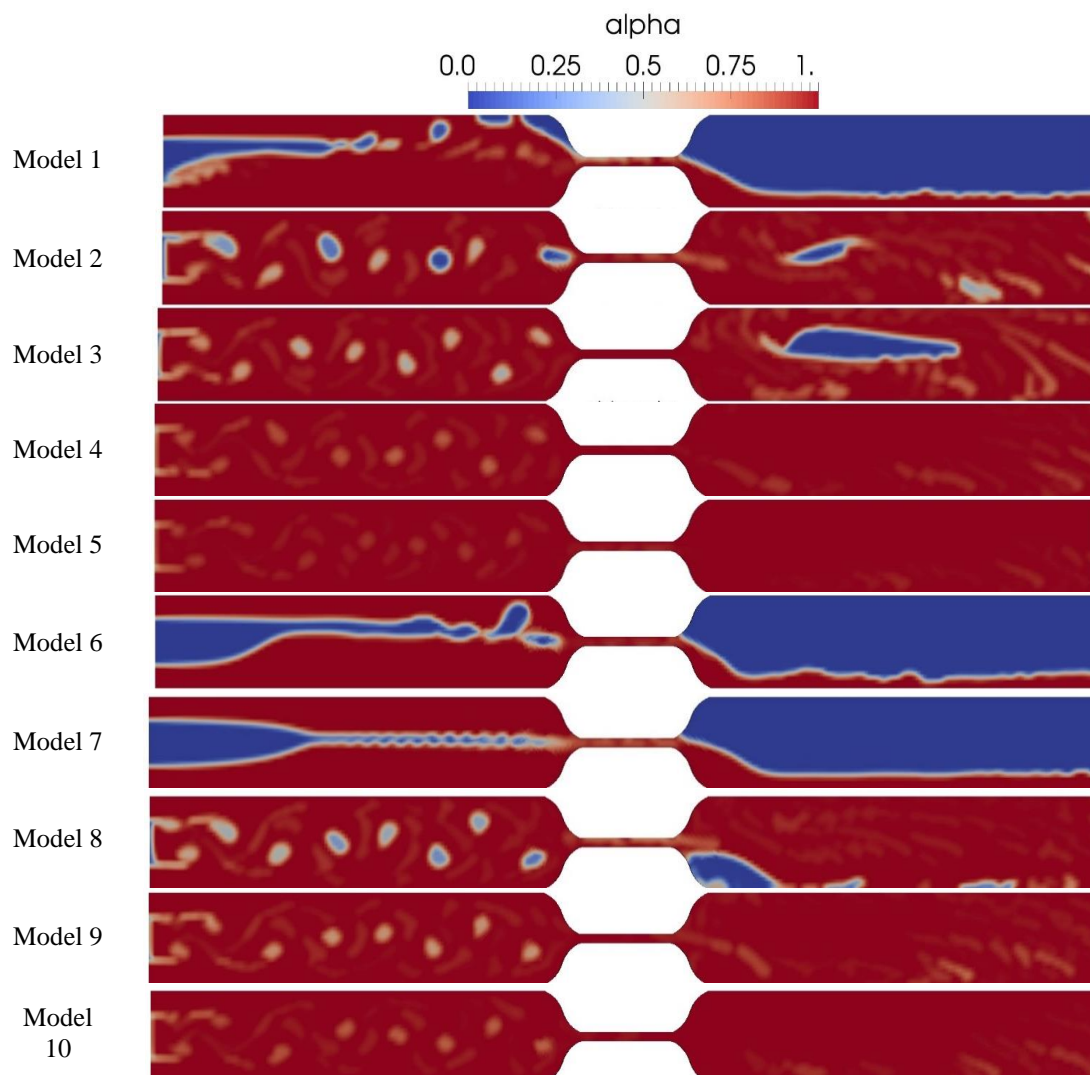
۲-۴ نتایج حاصل از تحلیل عددی و بحث و بررسی آن‌ها

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی انجام گرفته ذکر شده است. سپس به بررسی نتایج حاصل پرداخته شده و با نتایج حاصل از مطالعات پیشین صورت گرفته توسط محققین دیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در فصل سوم ذکر شده است، در این تحقیق تحلیل عددی شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از شناخت رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری، اثر استفاده از تشابه ابعادی و شبیه‌سازی عددی جهت بررسی تشکیل میکرو حباب در لوله ونتوری. لذا بخش نتایج حاصل از تحلیل عددی نیز به سه بخش تقسیم می‌شود که در ادامه ذکر شده است.

۱-۲-۴ نتایج حاصل از بررسی رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری

در این بخش به بررسی و شناخت رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری پرداخته شده است. برای بررسی تشکیل میکرو حباب در لوله ونتوری اول باید شناختی از رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری داشته باشیم. برای این منظور و دانستن اینکه آیا رژیم‌های جریان در داخل لوله ونتوری نیز مشابه لوله‌های افقی است یا خیر، نمونه‌های مختلفی از لوله ونتوری طبق جدول ۱-۳ و شکل ۱-۳ شبیه‌سازی شده است. شکل ۱-۴ نتایج حاصل از تغییرات مقدار آلفا یعنی کسر حجمی سیال را برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ نشان می‌دهد. شکل ۲-۴ نتایج حاصل از توزیع سرعت در طول لوله ونتوری و شکل ۳-۴ نتایج مربوط به بردارهای سرعت در داخل لوله ونتوری را برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ نشان می‌دهند. شکل ۴-۴ توزیع فشار در داخل لوله ونتوری را برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ نشان می‌دهد.

در جدول ۱-۴ اختلاف فشار نقاط ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده در شکل ۱-۳، یعنی ورودی، خروجی و گلوگاه لوله ونتوری آورده شده است. با استفاده از نتایج ذکر شده در جدول ۱-۴ منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1 = p_1 - p_2$ ، $\Delta p_2 = p_1 - p_3$ و $\Delta p_3 = p_3 - p_2$ در سرعت‌های مختلفی از جریان آب‌وهوا در داخل لوله ونتوری در شکل ۵-۴ رسم شده است.



شکل ۴-۱. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

نتایج تغییرات آلفا نشان داده شده در شکل ۴-۱ بیان می‌کند که زمانی که سرعت جریان آب ۰٫۵ متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا کمتر از ۰٫۱ متر بر ثانیه است جریان موجی تشکیل می‌شود. زمانی که سرعت جریان آب ۱ متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا ۰٫۱ متر بر ثانیه است جریان لایه‌ای تشکیل می‌شود. زمانی که سرعت جریان آب بیشتر از ۲ متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا کمتر از ۰٫۱ متر بر ثانیه است جریان حبابی تشکیل می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که رژیم جریان در داخل لوله‌های ونتوری نیز شبیه رژیم‌های جریان در لوله‌های افقی است و برای داشتن جریان حبابی جهت تشکیل میکرو حباب در لوله ونتوری باید سرعت جریان آب خیلی بیشتر از سرعت جریان هوا باشد.

مطابق نتایج ذکر شده در شکل ۴-۲ برای توزیع سرعت، ملاحظه می‌شود که توزیع سرعت در داخل لوله‌های ونتوری حالت نامتقارن دارد و این با یافته‌های ژانگ (Zhang, 2017) تطابق کامل دارد. او با تحقیقات خود دریافت که اگر نسبت تنگ شونده در لوله ونتوری کمتر از ۰٫۲ باشد توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری حالت نامتقارن دارد ولی باین حال بسیاری از محققین در مطالعات خود آن را متقارن

فرض می‌کنند. در این تحقیق نسبت تنگ شوندگی ۰,۱ است یعنی قطر بخش گلوگاه ۰,۱ قطر لوله است که این مقدار کمتر از ۰,۲ است و به همین دلیل توزیع سرعت در داخل لوله‌های ونتوری شبیه‌سازی شده حالت نامتقارن دارد.

نتایج نشان داده شده در شکل ۳-۴ برای توزیع بردارهای سرعت در داخل لوله ونتوری نشان می‌دهد که بعد از عبور جریان از بخش گلوگاه و ورود به بخش انتشار، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود و حباب‌های تشکیل شده در محل گردابه‌ها به دور خود می‌چرخند و محبوس می‌شوند و نمی‌توانند حرکت کنند و از لوله ونتوری خارج شوند. باید طراحی لوله ونتوری طوری باشد که حباب‌ها تا حد امکان به دور خود نچرخند و داخل لوله محبوس نشوند و بتوانند از داخل لوله ونتوری خارج شوند.

نتایج نشان داده شده در شکل ۴-۴ برای توزیع فشار در داخل لوله ونتوری نشان می‌دهد که همانند توزیع سرعت، توزیع فشار نیز در داخل لوله ونتوری حالت نامتقارن دارد. مطابق نتایج ذکر شده در جدول ۱-۴ و شکل ۴-۵، ملاحظه می‌شود که زمانی که سرعت جریان آب کمتر از ۲ متر بر ثانیه است افت فشار بین نقاط ۱، ۲ و ۳ با شیب کمتری اتفاق می‌افتد؛ بنابراین برای داشتن جریان حبابی به همراه حداقل افت فشار، بهتر است که سرعت جریان آب کمتر از ۲ متر بر ثانیه باشد.

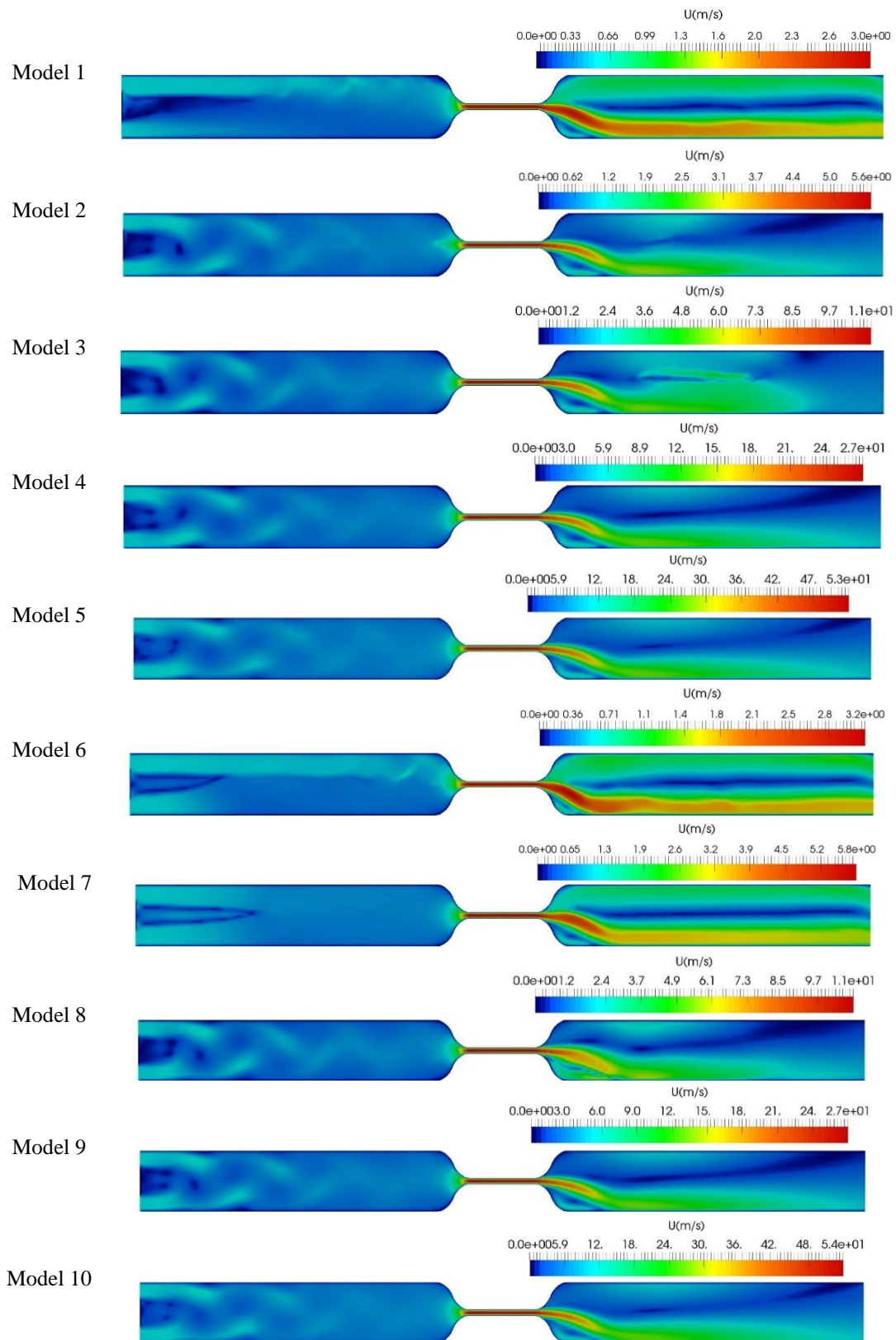
به‌طور کلی نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که:

۱- برای داشتن جریان حبابی جهت تشکیل میکرو حباب در داخل لوله ونتوری باید سرعت جریان فاز هوا خیلی کمتر از سرعت جریان فاز آب باشد.

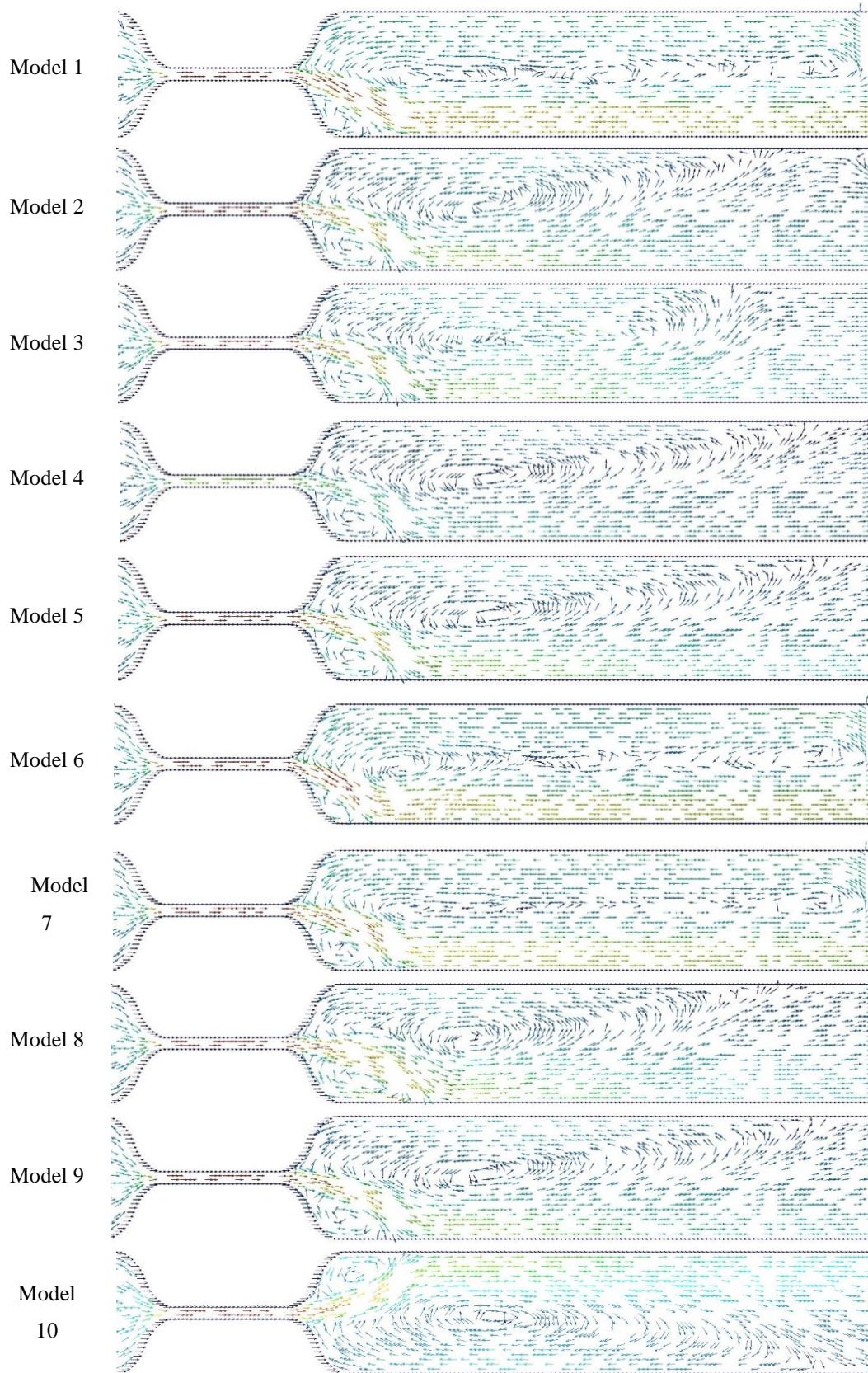
۲- برای جلوگیری از صدمات احتمالی به خاطر انرژی جریان و افت فشار در بخش گلوگاه و بخش انتشار، بهتر است که سرعت جریان آب کمتر از ۲ متر بر ثانیه باشد، از طرفی برای داشتن جریان حبابی بهتر، لازم است که سرعت جریان آب بیشتر از ۱ متر بر ثانیه باشد؛ بنابراین بهتر است سرعت جریان آب به ۱ تا ۲ متر بر ثانیه محدود شود.

۳- چون در این تحقیق نسبت تنگ شوندگی کمتر از ۰,۲ است (۰/۱)، بنابراین توزیع فشار و سرعت و آلفا در داخل لوله ونتوری متقارن نیست و جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه و فضای ذخیره‌سازی، نمی‌توان سازه را به‌صورت متقارن شبیه‌سازی کرد. ولی با این حال بسیاری از محققان با علم به این موضوع بازهم جریان را متقارن فرض می‌کنند و اختلاف نتایج را قابل اغماض می‌دانند.

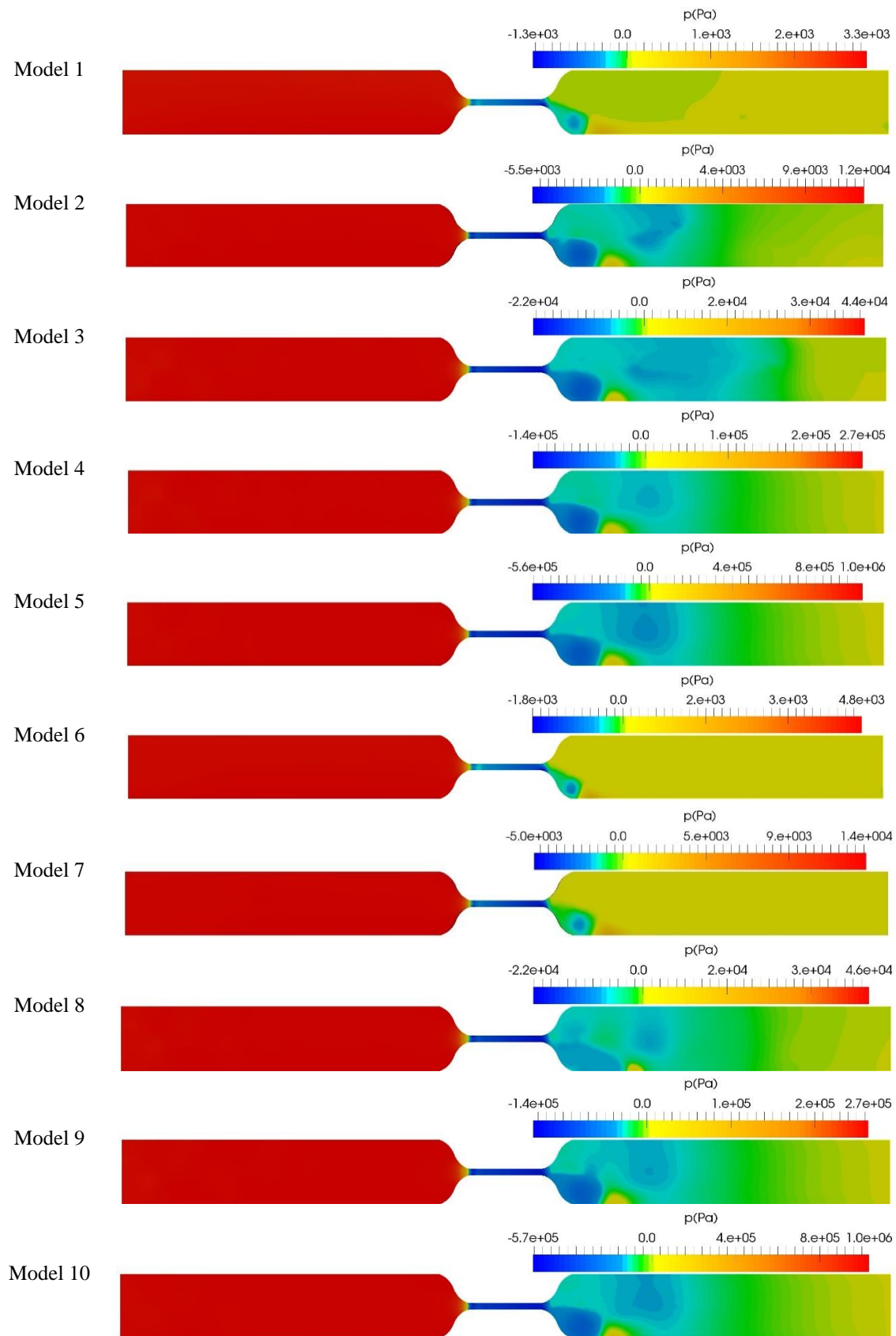
۴- نتایج نشان می‌دهد که جهت تشکیل میکرو حباب بهتر است مقطع ورودی جریان هوا کوچک‌تر از مقطع ورودی جریان آب باشد تا با ورود هوا به داخل آب در بخش انقباض و قبل از آن حباب‌های کوچک‌تری ایجاد شود و این حباب‌های کوچک با ورود به بخش گلوگاه و بخش انتشار شکسته و ریزتر شوند و میکرو حباب تشکیل شود.



شکل ۴-۲. توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰



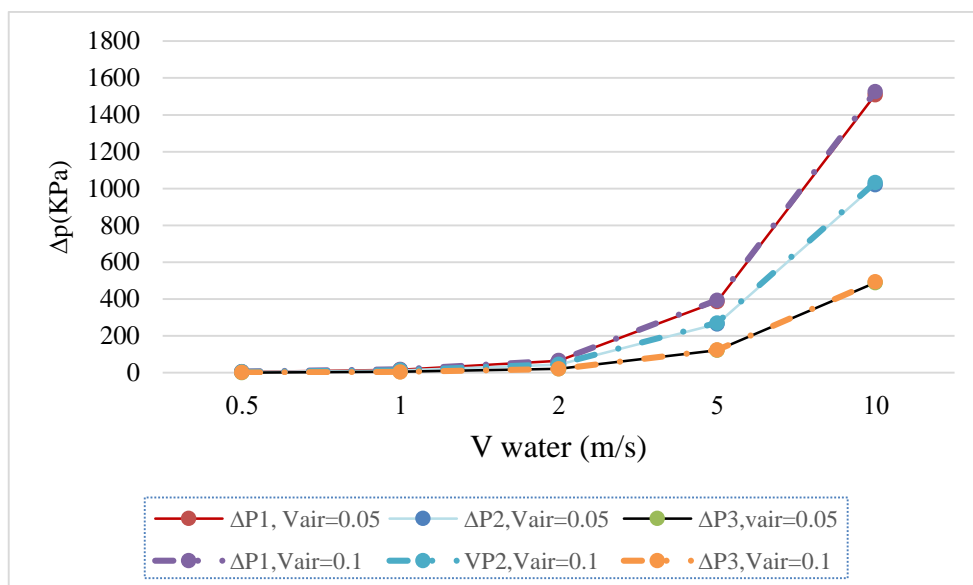
شکل ۳-۴. بردارهای سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰



شکل ۴-۴. توزیع فشار در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

جدول ۱-۴. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۱-۳، برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

Models	Vair (m/s)	Vwater (m/s)	p1 (Pa)	p2 (Pa)	$\Delta p1=$ p1-p2	$\Delta p2=$ p1-p3	$\Delta p3=$ p3-p2
Model 1	0.05	0.5	3151.05	-847.582	3998.632	3151.05	847.582
Model 2	0.05	1	11454.5	-5111.06	16565.56	11454.5	5111.06
Model 3	0.05	2	44019.9	-20722.3	64742.2	44019.9	20722.3
Model 4	0.05	5	263993	-122473	386466	263993	122473
Model 5	0.05	10	1019610	-488455	1508065	1019610	488455
Model 6	0.1	0.5	4646.6	-1190.97	5837.57	4646.6	1190.97
Model 7	0.1	1	13510.5	-4294.15	17804.65	13510.5	4294.15
Model 8	0.1	2	45342.7	-20589.2	65931.9	45342.7	20589.2
Model 9	0.1	5	270252	-123505	393757	270252	123505
Model 10	0.1	10	1032760	-494102	1526862	1032760	494102



شکل ۴-۵. منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1=p_1-p_2$, $\Delta p_2=p_1-p_3$ and $\Delta p_3=p_3-p_2$ در سرعت‌های مختلفی از جریان آب و هوا در داخل لوله ونتوری

۲-۲-۴ نتایج حاصل از بررسی استفاده از روش تشابه ابعادی

در این بخش از تحقیق به بررسی نتایج حاصل از جریان آب و هوا و تولید میکرو حباب در لوله ونتوری در مدل اصلی و مدل کوچک شده با استفاده از تشابه ابعادی پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر استفاده از تشابه ابعادی در لوله ونتوری و با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی رژیم‌های جریان در بخش قبلی، نمونه‌های مختلفی از لوله ونتوری طبق شکل ۳-۱ و جدول ۳-۲ شبیه سازی شده است.

پنج نمونه اول مربوط به مدل‌های اصلی و پنج نمونه بعدی مربوط به مدل‌های کوچک شده هستند. شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ به ترتیب توزیع سرعت و توزیع فشار در مدل‌های اصلی و مدل‌های کوچک شده را نشان می‌دهد و شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ به ترتیب منحنی تغییرات سرعت و تغییرات فشار در مرکز لوله ونتوری را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۰ تغییرات آلفا در لوله ونتوری را در مدل‌های اصلی و مدل‌های کوچک شده نشان می‌دهد. در جدول ۴-۲. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۳-۱، برای مدل‌های ۱ تا ۱۰، یعنی ورودی، خروجی و گلوگاه لوله ونتوری آورده شده است. با استفاده از نتایج ذکر شده در جدول ۴-۲. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۳-۱، برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1=p_1-p_2$ ، $\Delta p_2=p_1-p_3$ و $\Delta p_3=p_3-p_2$ بر حسب سرعت جریان آب در داخل لوله ونتوری در شکل ۴-۱۱ رسم شده است.

برای بررسی اینکه آیا نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های اصلی و مدل‌های کوچک شده باهم همخوانی دارند یا خیر، از روش‌های تحلیل آماری نیز بهره برده شده است. جدول ۴-۳ نتایج آزمون کلموگروف-

اسمینورف^۱ را جهت بررسی نرمال بودن یا نبودن داده‌ها نشان می‌دهد. نتایج آزمون همبستگی غیر پارامتریک در جدول ۴-۴ آورده شده است.

با توجه به نتایج ذکرشده برای توزیع سرعت، توزیع فشار و توزیع آلفا در داخل لوله ونتوری، به ترتیب در شکل ۴-۶، شکل ۴-۷ و شکل ۴-۱۰، ملاحظه می‌شود که چون نسبت تنگ شونده در این مدل‌ها نیز ۰,۱ است و چون این مقدار کمتر از ۰,۲ می‌باشد، توزیع فشار و سرعت و آلفا در داخل لوله ونتوری نامتقارن می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در مدل‌های کوچک‌شده نیز این نتایج با یافته‌های ژانگ کاملاً تطابق دارد.

بر اساس رابطه (۲-۳) سرعت در مدل‌های کوچک‌تر شده باید ۳۳,۳ برابر سرعت در مدل‌های اولیه باشد. نتایج به‌دست‌آمده برای توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری و منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری، مطابق شکل ۴-۶ و شکل ۴-۸، کاملاً گویای این تطابق هستند. بر اساس نتایج ذکرشده در جدول ۴-۲، ماکزیمم مقدار سرعت در مدل‌های اولیه ۱ تا ۵ و مدل‌های کوچک‌شده متناظر آن‌ها یعنی مدل‌های ۶ تا ۱۰، کاملاً با رابطه (۲-۳) تطابق دارد. برای مثال ماکزیمم مقدار سرعت در مدل ۱ برابر با ۳,۱۲ متر بر ثانیه است و ماکزیمم مقدار سرعت در مدل ۶ که مدل کوچک‌تر شده متناظر آن است برابر با ۱۰۴ متر بر ثانیه می‌باشد یعنی سرعت ماکزیمم در مدل کوچک‌شده ۳۳,۳۳ برابر سرعت ماکزیمم در مدل اولیه است که کاملاً منطبق بر رابطه (۲-۳) می‌باشد.

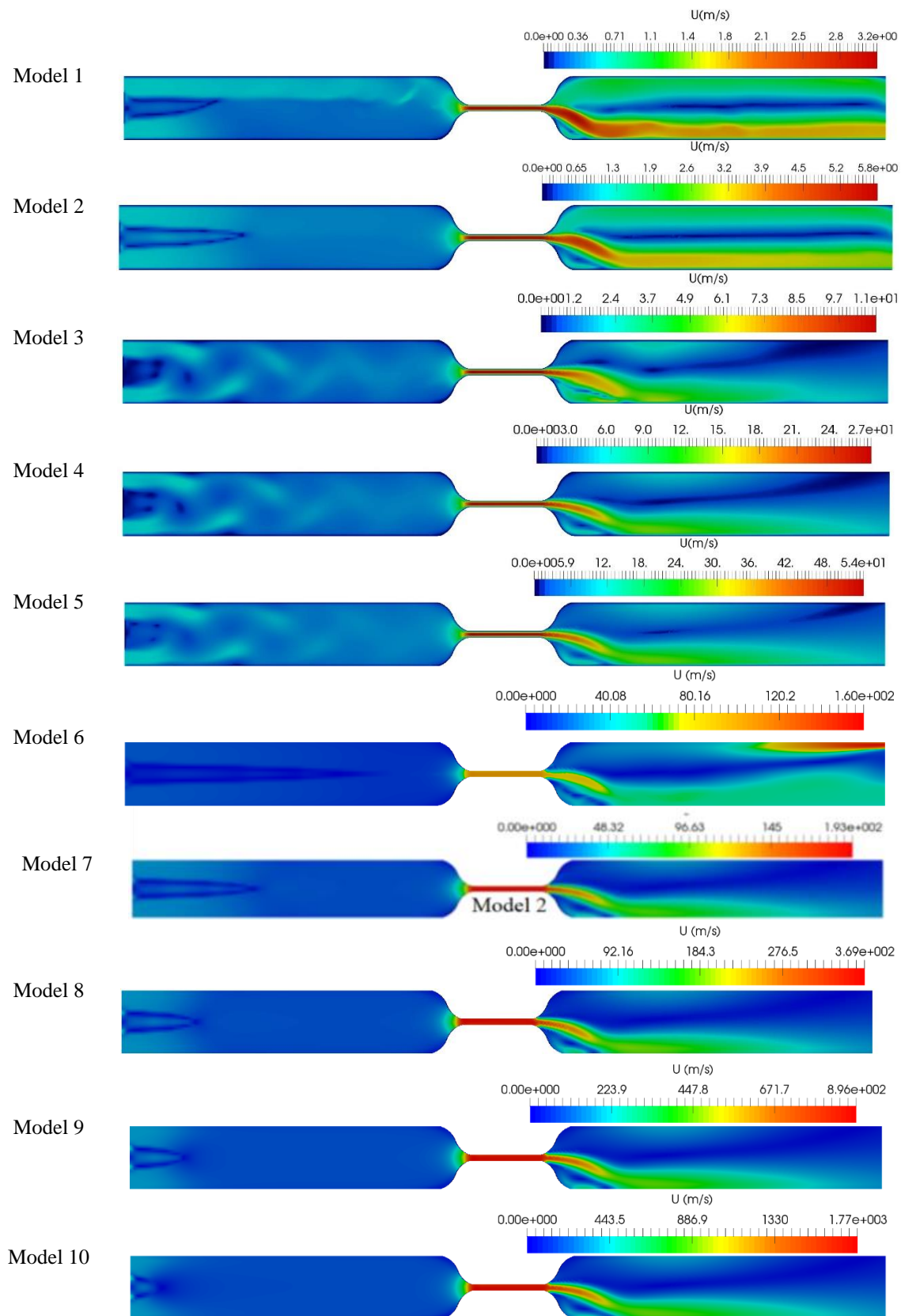
طبق جدول ۴-۲ حداقل مقدار سرعت در مدل‌های ۱ و ۲ و مدل‌های کوچک‌تر شده متناظر آن‌ها یعنی مدل‌های ۶ و ۷ منطبق بر رابطه (۲-۳) نیست ولی حداقل مقدار سرعت در مدل‌های ۳-۵ و مدل‌های کوچک‌تر شده متناظر آن‌ها یعنی مدل‌های ۸-۱۰ کاملاً منطبق بر رابطه (۲-۳) است. برای نمونه حداقل مقدار سرعت در مدل ۳ برابر با ۰,۱ متر بر ثانیه است و حداقل مقدار سرعت در مدل ۸ که مدل کوچک‌شده متناظر آن است برابر با ۳,۳۳ متر بر ثانیه می‌باشد یعنی سرعت در مدل کوچک‌تر شده ۳,۳۳ برابر سرعت در مدل اولیه می‌باشد. ملاحظه می‌شود زمانی که سرعت جریان آب بیشتر از ۲ متر بر ثانیه است سرعت و رژیم جریان در مدل اولیه و مدل کوچک‌تر شده کاملاً بر هم منطبق هستند.

بر اساس رابطه (۴-۳) فشار در مدل‌های کوچک‌تر شده باید تقریباً ۱۱۰۰ برابر فشار در مدل‌های اولیه باشد. نتایج به‌دست‌آمده برای توزیع فشار در داخل لوله ونتوری و منحنی تغییرات فشار در مرکز لوله ونتوری، مطابق شکل ۴-۷ و شکل ۴-۹، کاملاً گویای این تطابق هستند. بر اساس نتایج ذکرشده در جدول ۴-۲ و منحنی رسم شده در شکل ۴-۱۱ ملاحظه می‌شود که اختلاف فشار بین نقاط ۱، ۲ و ۳ و همچنین شیب تغییرات اختلاف فشار در مدل‌های اولیه و مدل‌های کوچک‌تر شده کاملاً بر هم منطبق هستند. تغییرات فشار در مدل‌های کوچک‌تر شده تقریباً ۱۱۰۰ برابر تغییرات فشار در مدل‌های

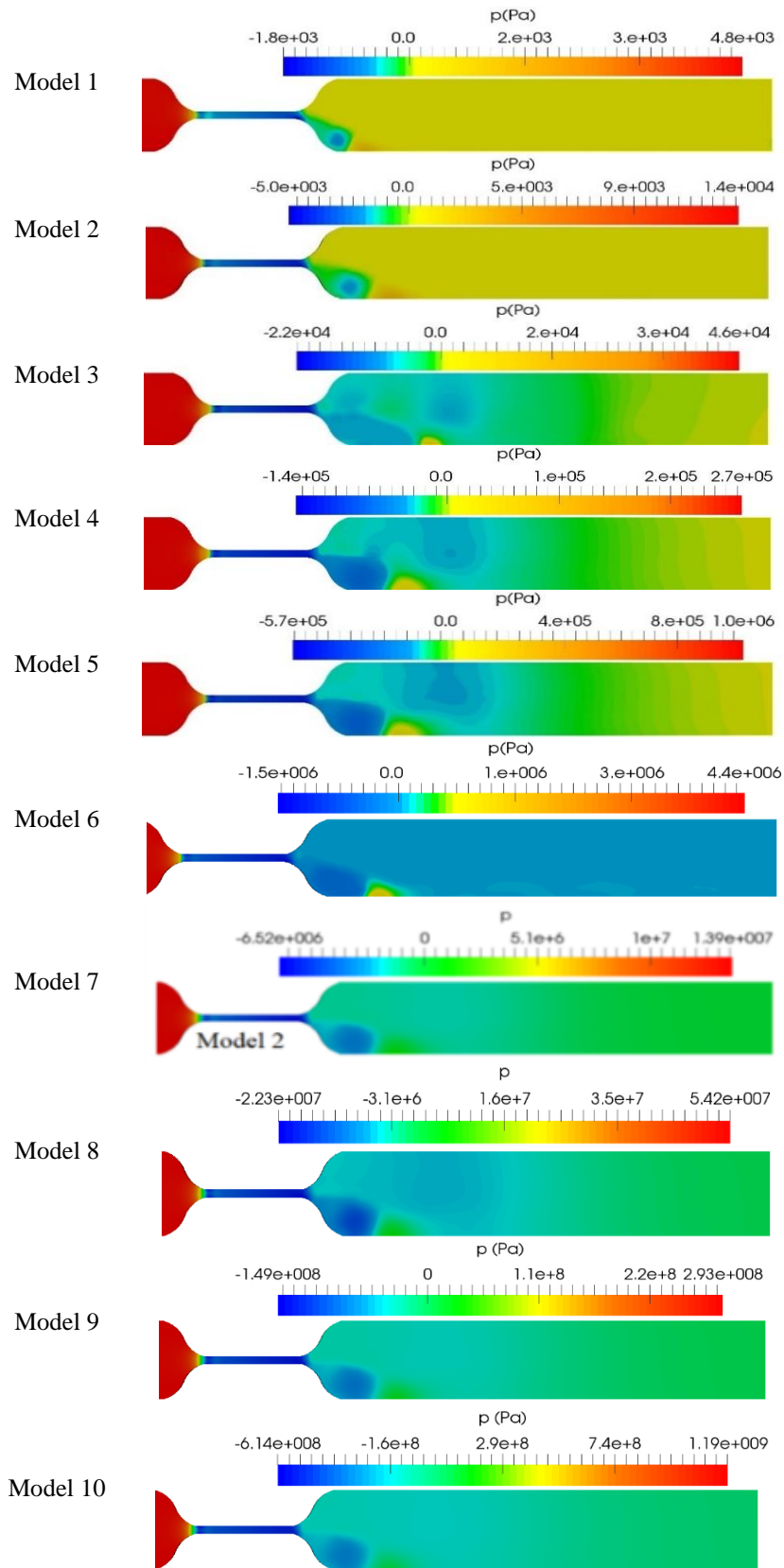
^۱ One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

اولیه متناظر می‌باشد. برای مثال $\Delta P1$ در مدل ۴ برابر با $10^5 \times 3,94$ پاسکال است و $\Delta P1$ در مدل ۹ یعنی مدل کوچک‌تر شده متناظر آن برابر با $10^8 \times 4,32$ پاسکال می‌باشد یعنی اختلاف فشار بین نقاط ۱ و ۲ یعنی بین ورودی و گلوگاه لوله و نتوری در مدل کوچک‌تر شده 10^9 برابر مدل اولیه می‌باشد که با رابطه (۳-۴) تطابق دارد. به همین ترتیب با مقایسه بقیه نتایج نیز ملاحظه می‌شود که نتایج فشار در مدل‌های اولیه و مدل‌های کوچک‌تر شده متناظر، کاملاً بر هم منطبق هستند.

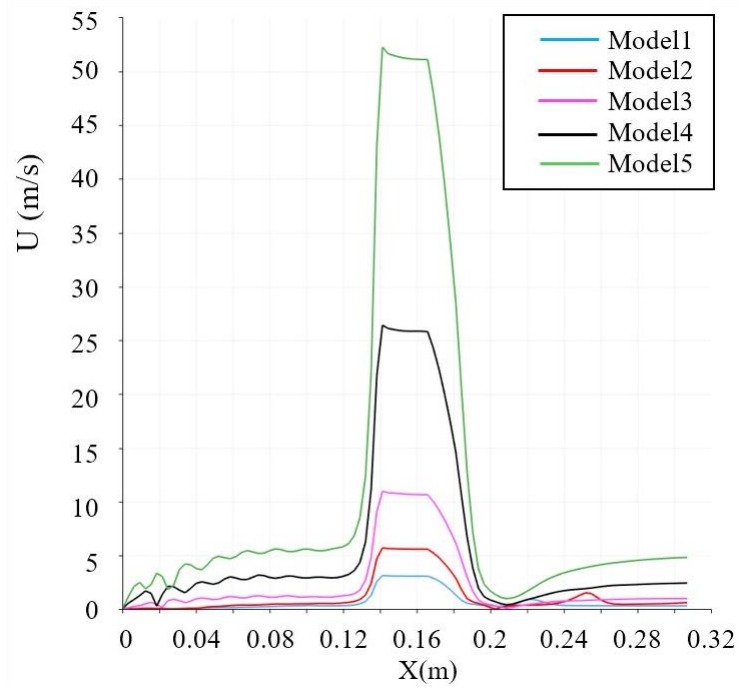
همانطور که در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ ملاحظه می‌شود، در مدل‌های کوچک‌تر شده سرعت در بخش گلوگاه تقریباً به عدد ماخ رسیده و فشار مقادیری غیرواقعی و غیرطبیعی را نشان می‌دهد (به خصوص زمانی که سرعت جریان آب بیشتر از ۵ متر بر ثانیه است)، که در عمل امکان پذیر نیستند و با وجود تطابقی هم که به جهت تئوری بین نتایج مدل‌های واقعی و کوچک‌تر شده برقرار است ولی در واقعیت و به جهت عملی امکان پذیر نیست و نمی‌توان در عمل از مدل‌های کوچک‌تر شده استفاده نمود.



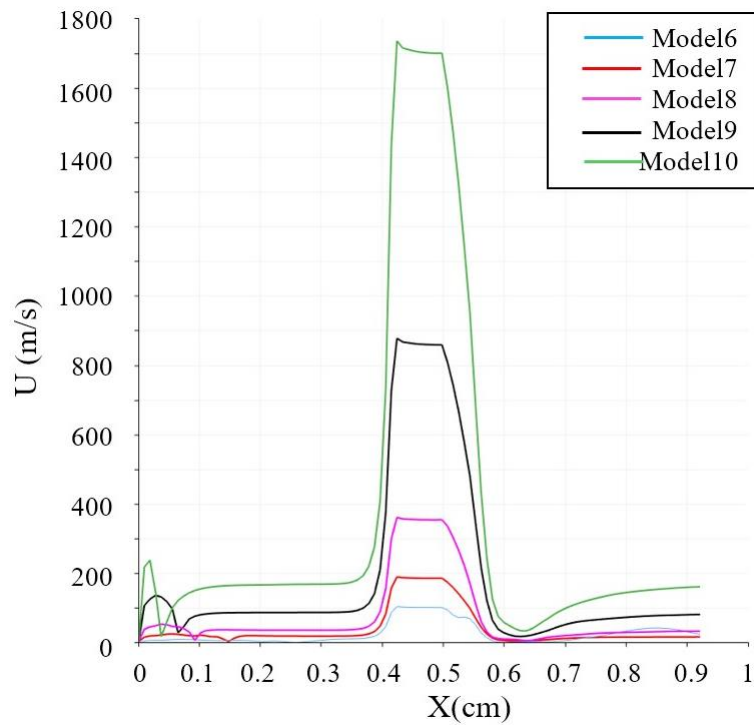
شکل ۴-۶. توزیع سرعت در داخل لوله ونتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰



شکل ۴-۷. توزیع فشار در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

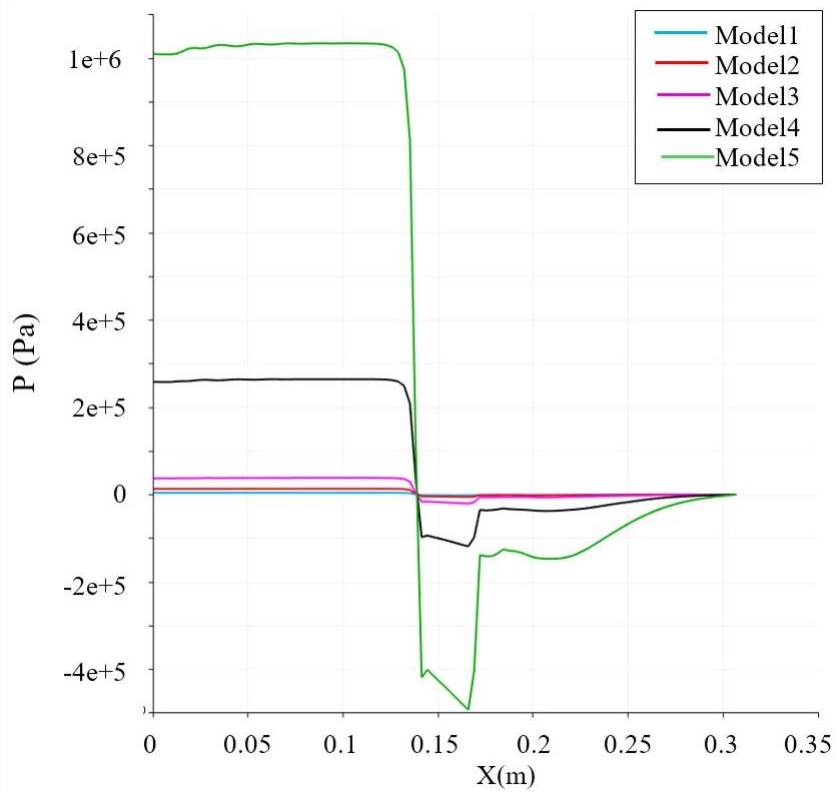


(الف)

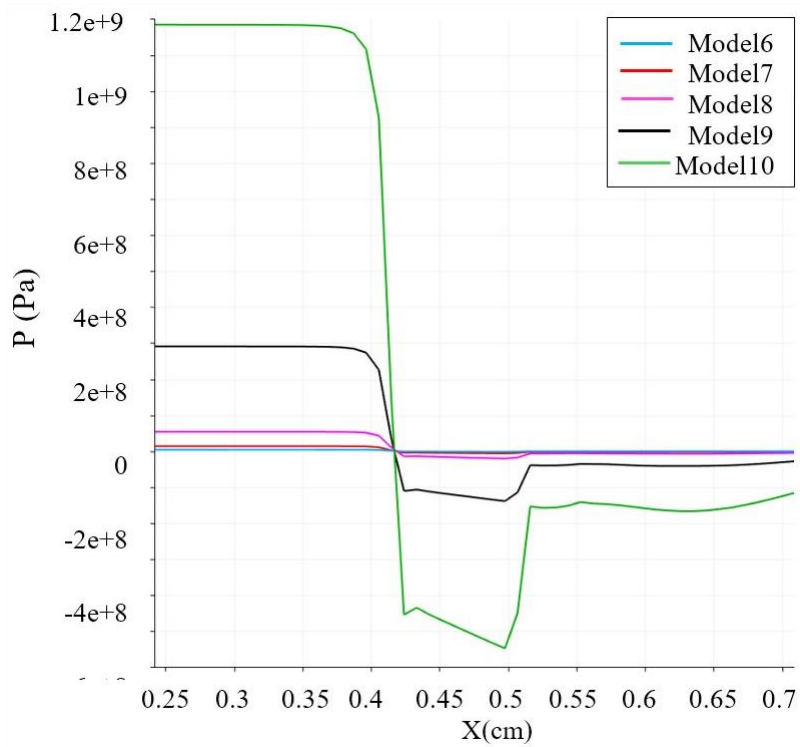


(ب)

شکل ۴-۸. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری (الف) مدل‌های اصلی (ب) مدل‌های کوچک‌شده

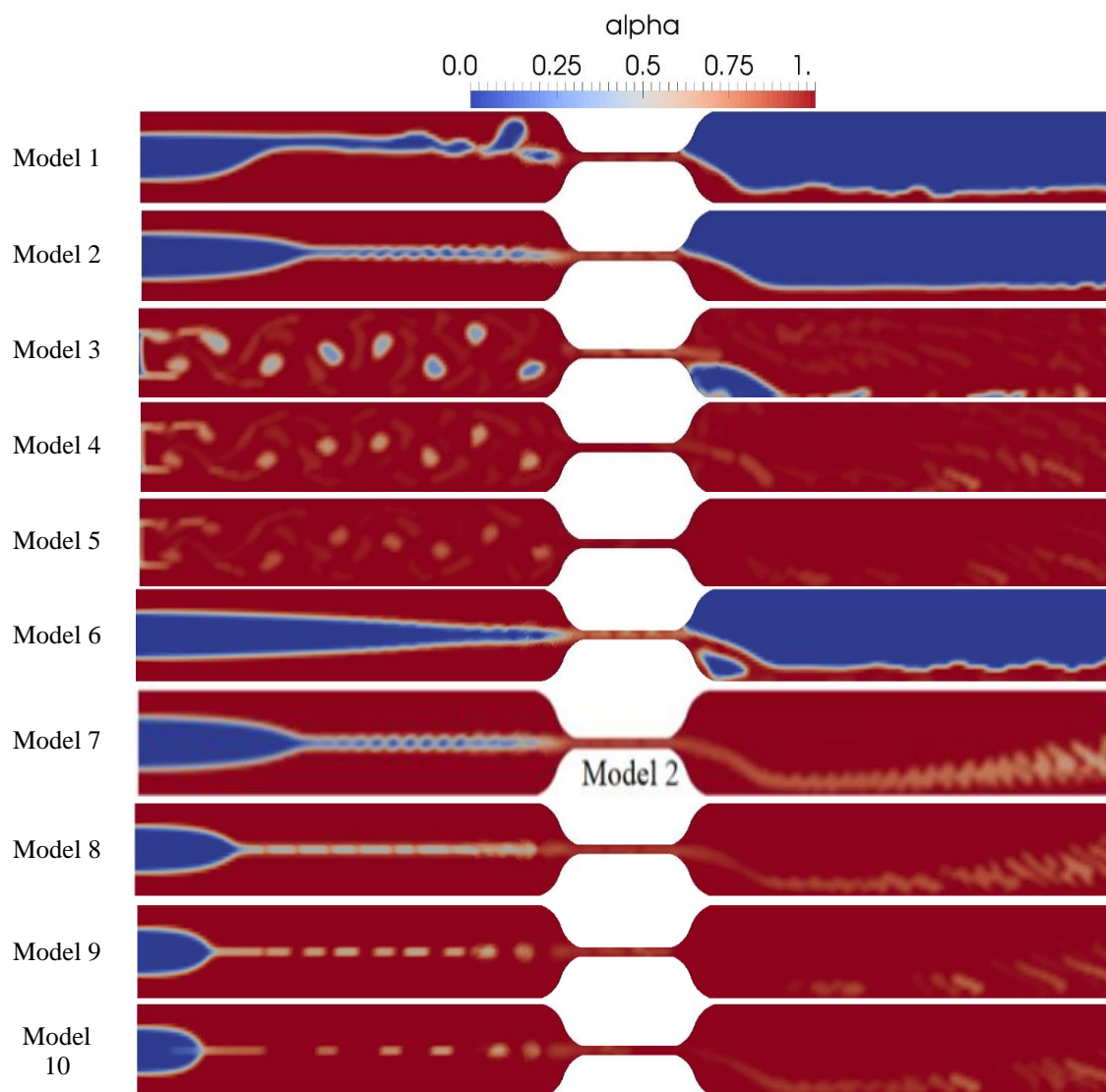


(الف)



(ب)

شکل ۴-۹. منحنی تغییرات فشار در مرکز لوله و نتوری الف) مدل‌های اصلی ب) مدل‌های کوچک‌شده



شکل ۴-۱۰. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

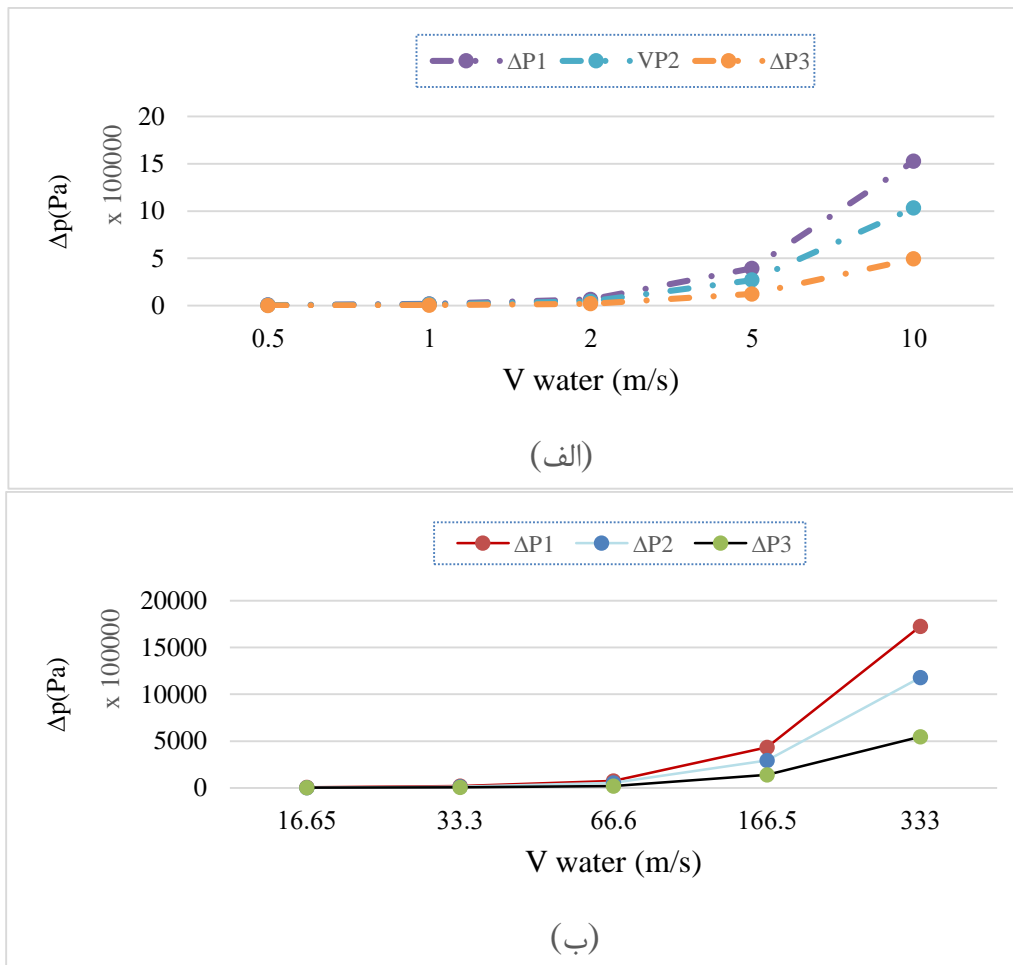
شکل ۴-۹ نشان می‌دهد که حداقل فشار در محل تقاطع بخش انقباض و بخش گلوگاه اتفاق می‌افتد و این کاملاً با یافته‌های سان و همکارانش (Sun and Niu, 2010) و همچنین با یافته‌های ژانگ تطابق دارد (Zhang, 2017).

شکل ۴-۱۰ رژیم‌های جریان و تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های کوچک‌تر شده و مدل‌های اولیه را نشان می‌دهد. برای آنالیز تغییرات آلفا از نرم‌افزار آماری SPSS بهره برده شده است. میانگین، انحراف معیار و آزمون کلموگروف-اسمینورف برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ در جدول ۴-۳ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که هیچ‌کدام از مدل‌ها دارای توزیع نرمال نیستند و برای بررسی همبستگی بین مدل‌های اولیه و مدل‌های کوچک‌تر متناظر باید از آزمون همبستگی غیر پارامتریک استفاده کرد. نتایج آزمون همبستگی غیر پارامتریک در جدول ۴-۴ آورده شده است. ضریب همبستگی عددی در بازه ۱-

تا ۱ دارد. ضریب همبستگی ۱ یا ۱- بیان کننده همبستگی قوی بین دو پارامتر مورد بررسی می باشد. مطابق نتایج به دست آمده از آزمون همبستگی و ذکر شده در جدول ۴-۴، ملاحظه می شود که بین مدل ۱ و مدل ۶ یعنی مدل کوچک تر شده متناظر آن همبستگی با ضریب ۰,۷۸۹ برقرار است بین مدل ۲ و مدل ۷ ضریب همبستگی ۰,۱۸۳، بین مدل ۳ و ۸ ضریب همبستگی برابر با ۰,۱۲۲، بین مدل ۴ و ۹ برابر با ۰,۱۸۳ و بین مدل ۵ و ۱۰ ضریب همبستگی برابر با ۰,۲۳۱ می باشد. از آنجایی که در همه مدل ها مقدار Sig کوچک تر از ۰,۰۵ است بنابراین تمامی مدل ها دارای همبستگی معناداری هستند. ملاحظه می شود که فقط بین مدل ۱ و ۶ همبستگی خوبی برقرار است و بین بقیه مدل ها همبستگی خوبی برقرار نیست که این نتیجه از شکل ۴-۱۰ نیز قابل درک می باشد.

جدول ۴-۲. اختلاف فشار در نقاط ۱، ۲ و ۳ مشخص شده در شکل ۳-۱، برای مدل های ۱ تا ۱۰

Models	Vmax (m/s)	Vmin (m/s)	p1 (Pa)	p2 (Pa)	$\Delta p1 =$ p1-p2	$\Delta p2 =$ p1-p3	$\Delta p3 =$ p3-p2
Model 1	3.12	0.02	4646.6	-1190.97	5.84E+03	4.65E+03	1.19E+03
Model 2	5.7	0.048	13510.5	-4294.15	1.78E+04	1.35E+04	4.29E+03
Model 3	10.86	0.1	45342.7	-20589.2	6.59E+04	4.53E+04	2.06E+04
Model 4	26.39	0.1	270252	-123505	3.94E+05	2.70E+05	1.24E+05
Model 5	52	0.1	1032760	-494102	1.53E+06	1.03E+06	4.94E+05
Model 6	104	0.2	4.34E+06	-1.27E+06	5.61E+06	4.34E+06	1.27E+06
Model 7	189	2.9	1.38E+07	-6.12E+06	1.99E+07	1.38E+07	6.12E+06
Model 8	361	3.33	5.32E+07	-2.07E+07	7.39E+07	5.32E+07	2.07E+07
Model 9	877	3.33	2.93E+08	-1.39E+08	4.32E+08	2.93E+08	1.39E+08
Model 10	1735	3.33	1.18E+09	-5.47E+08	1.73E+09	1.18E+09	5.47E+08



شکل ۴-۱۱. منحنی تغییرات اختلاف فشار $\Delta p_1=p_1-p_2$, $\Delta p_2=p_1-p_3$ and $\Delta p_3=p_3-p_2$ برحسب جریان آب در داخل لوله ونتوری الف) مدل‌های اصلی ب) مدل‌های کوچک‌شده

نتایج حاصل از این بخش از تحقیق بیان می‌کند که اگر هدف از تحقیق، بررسی سرعت و فشار در داخل لوله ونتوری باشد می‌توان برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه و فضای ذخیره‌سازی اطلاعات از روش تشابه ابعادی فقط به صورت تئوری استفاده کرد زیرا نتایج حاصل از مدل‌های کوچک‌تر شده به لحاظ تئوری کاملاً منطبق بر مدل‌های اولیه است ولی در عمل چون، به خصوص در سرعت‌های بالا، در مدل‌های کوچک‌تر شده سرعت در بخش گلوله‌گاه تقریباً به عدد ماخ رسیده و فشار مقادیری غیرواقعی و غیرطبیعی را نشان می‌دهد که در عمل امکان پذیر نیستند و با وجود تطابقی هم که به جهت تئوری بین نتایج مدل‌های واقعی و کوچک‌تر شده برقرار است ولی در واقعیت و به جهت عملی امکان پذیر نیست و نمی‌توان در عمل از مدل‌های کوچک‌تر شده استفاده نمود.

اگر هدف بررسی رژیم‌های جریان و تغییرات آلفا یعنی کسر حجمی سیال باشد نمی‌توان از روش‌های تشابه ابعادی چه به لحاظ تئوری و چه به لحاظ عملی استفاده نمود و مدل‌ها را کوچک‌تر از

مدل‌های واقعی مورد بررسی قرارداد؛ بنابراین چون هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات آلفا و نحوه شکل‌گیری میکرو حساب در داخل لوله ونتوری است، نمی‌توان از روش تشابه ابعادی استفاده نمود.

جدول ۴-۳. نتایج آزمون کلموگروف-اسمینورف

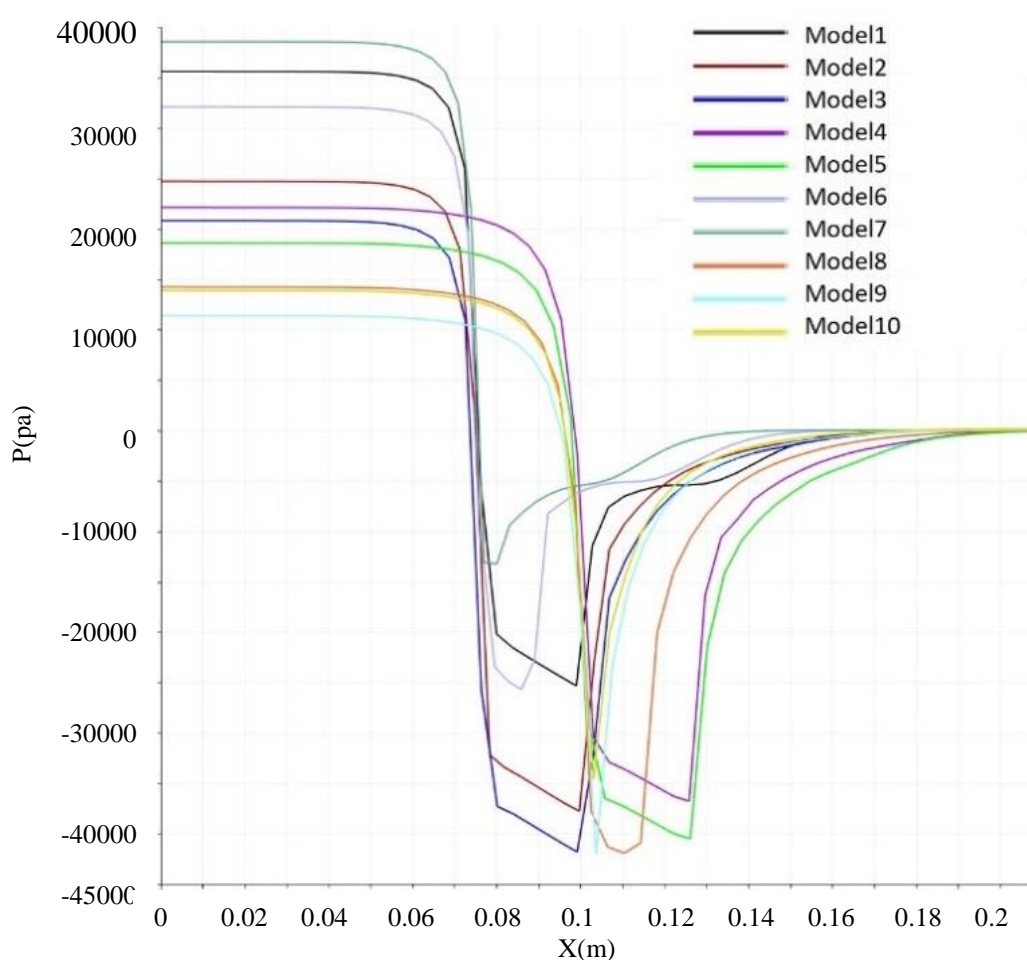
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
N		6739	6739	6739	6739	6739	6739	6739	6739	6739	6739
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.4746	.5066	.9339	.9834	.9917	.4347	.8807	.9274	.9534	.9722
	Std. Deviation	.48557	.48462	.20057	.05825	.03312	.47853	.28506	.22695	.19192	.13784
Most Extreme Differences	Absolute	.303	.289	.412	.388	.401	.320	.395	.404	.466	.456
	Positive	.303	.289	.371	.388	.401	.320	.338	.375	.404	.420
	Negative	-.274	-.286	-.412	-.339	-.368	-.244	-.395	-.404	-.466	-.456
Test Statistic		.303	.289	.412	.388	.401	.320	.395	.404	.466	.456
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction.											

جدول ۴-۴. نتایج آزمون همبستگی غیر پارامتریک

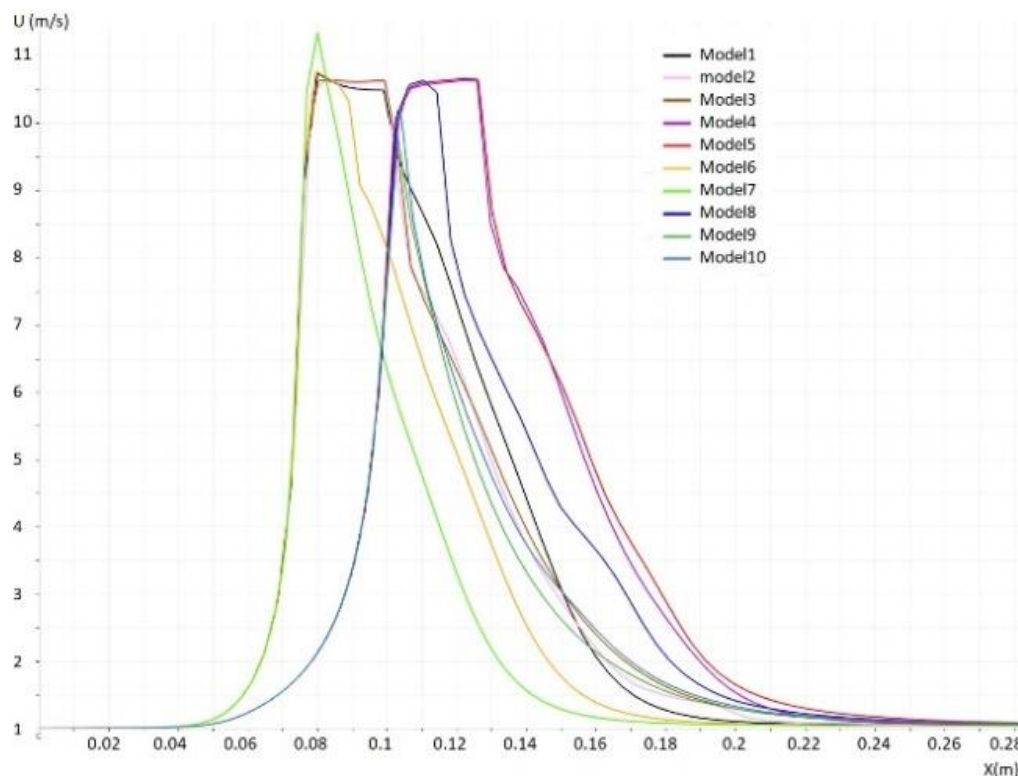
Spearman's rho		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Model 6	Correlation Coefficient	.789	.875	.099	.109	.008
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.529
Model 7	Correlation Coefficient	.192	.183	.072	.233	.318
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000
Model 8	Correlation Coefficient	.341	.385	.122	.163	.146
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000
Model 9	Correlation Coefficient	.262	.217	.020	.183	.271
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.107	.000	.000
Model 10	Correlation Coefficient	.194	.098	.015	.151	.231
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.217	.000	.000

۳-۲-۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی لوله‌های ونتوری با ابعاد مختلف جهت تشکیل میکرو حباب

در این بخش از تحقیق به بررسی نتایج تحلیل عددی اختلاط آب و هوا در لوله ونتوری و شکل‌گیری میکرو حباب، با تغییر دادن ابعاد لوله ونتوری پرداخته می‌شود. با تغییر طول بخش گلوگاه و شیب بخش‌های انقباض و انتشار مطابق شکل ۳-۲ و جدول ۳-۳ مدل‌های مختلفی ساخته و مورد تحلیل قرار گرفته است. منحنی تغییرات فشار و سرعت در مرکز لوله ونتوری به ترتیب در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۲ رسم شده است. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲. منحنی تغییرات فشار در مرکز لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰



شکل ۴-۱۳. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله و نتوری برای مدل های ۱ تا ۱۰

با توجه به شکل ۴-۱۲، با مقایسه نتایج مربوط به مدل های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ که طبق داده های جدول ۳-۳ در این مدل ها طول بخش گلوگاه ثابت و برابر با قطر لوله است، $L_n = D$ و طول بخش های انقباض و انتشار، x و y ، تغییر کرده است. ملاحظه می شود که مدل ۱ در بین این مدل ها دارای کمترین افت فشار می باشد یعنی زمانی که شیب بخش انقباض و انتشار باهم برابر است افت فشار کمتر می باشد. نتایج آلفا در شکل ۴-۱۴ نیز نشان می دهد که مدل ۱ بهتر از مدل های ۲، ۳، ۴ و ۵، به لحاظ تشکیل میکرو حباب است و در واقع حباب های ریزتری تشکیل شده است.

در شکل ۴-۱۲، با مقایسه نتایج فشار در مدل های ۱، ۶ و ۷ که بر اساس داده های جدول ۳-۳، در این مدل ها طول بخش انقباض و انبساط ثابت و برابر با قطر لوله است، $X = Y = D$ و طول بخش گلوگاه، L_n ، تغییر کرده است، ملاحظه می شود که در بین این مدل ها، مدل ۷ دارای حداقل افت فشار است یعنی با کاهش طول بخش گلوگاه افت فشار کاهش می یابد. نتایج آلفا در شکل ۴-۱۴ نیز نشان می دهد که عملکرد هر سه مدل به جهت تشکیل میکرو حباب تقریباً یکسان است و تغییر طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر روی ریزتر شدن حباب ها ندارد.

در شکل ۴-۱۲ با مقایسه نتایج فشار در مدل های ۵، ۸، ۹ و ۱۰ که بر اساس داده های جدول ۳-۳، $X = 2D$ ، $Y = 3D$ و طول متغیر است، L_n متغیر است، ملاحظه می شود که در بین این مدل ها مدل ۱۰ دارای

حداقل افت فشار است. نتایج آلفا در شکل ۴-۱۴ نیز نشان می‌دهد که مدل ۱۰ بهتر از مدل‌های ۵، ۸ و ۹ به لحاظ تشکیل میکرو حباب عمل می‌کند.

به‌طور کلی با مقایسه مدل‌های ۱-۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که حداقل افت فشار در مدل ۷ اتفاق افتاده است که طول بخش گلوگاه کمترین مقدار را دارا می‌باشد و شیب هر دو قسمت بخش انقباض و انتشار باهم برابر و حدود ۲۴ درجه است. نتایج نشان می‌دهد که کوچک‌تر شدن شیب بخش انقباض و بخش انتشار باعث افزایش افت فشار می‌شود.

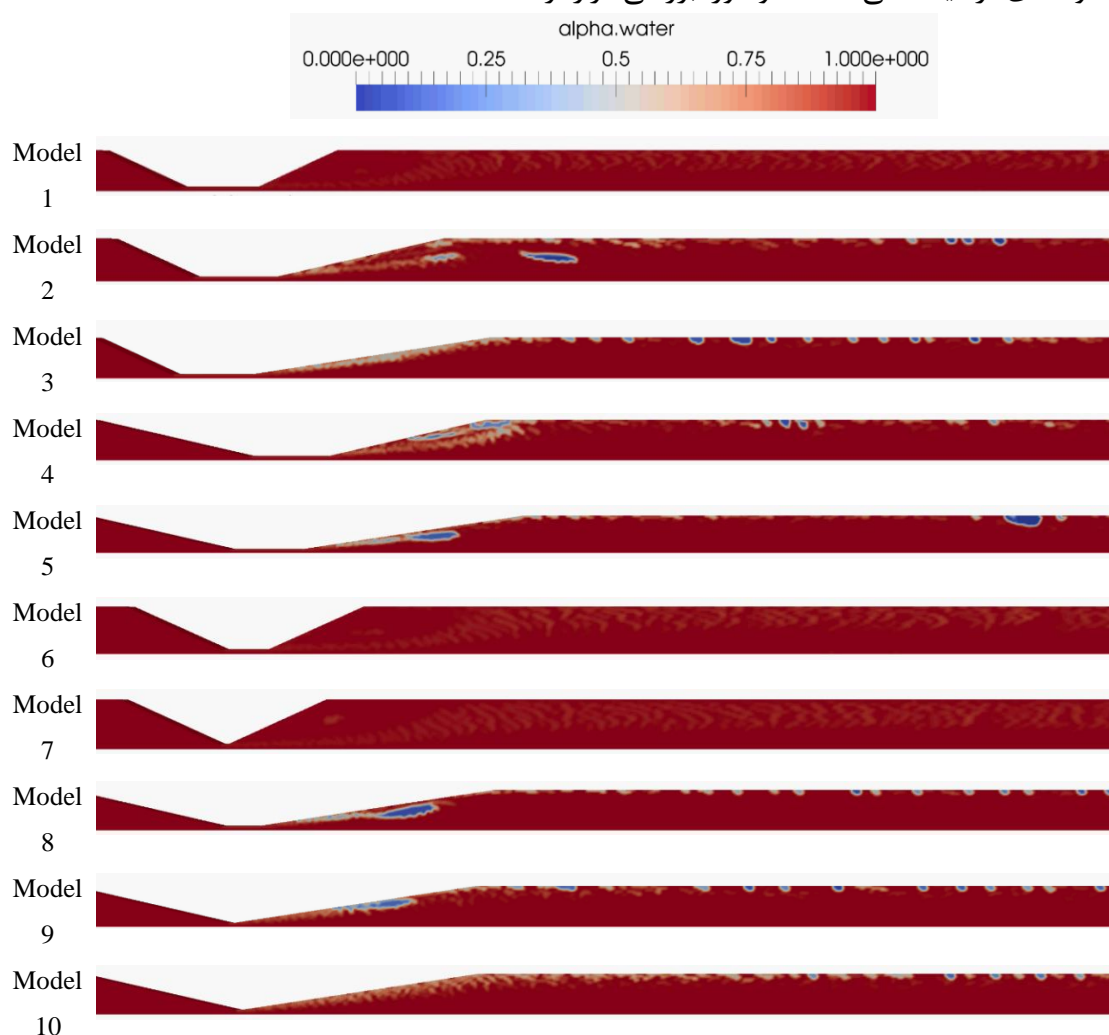
نتایج سرعت نشان داده‌شده در شکل ۴-۱۳ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار سرعت در مدل ۷ و حداقل مقدار سرعت در مدل ۱۰ اتفاق افتاده است ولی به‌طور کلی تغییرات سرعت در تمامی مدل‌ها از یک الگو پیروی می‌کند به این صورت که با ورود جریان به بخش انقباض و کوچک‌تر شدن سطح مقطع، سرعت جریان افزایش می‌یابد و در محل تقاطع بخش انقباض و گلوگاه سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در طول بخش گلوگاه چون سطح مقطع ثابت است سرعت جریان نیز تقریباً ثابت می‌ماند و با ورود جریان به بخش انتشار و بزرگ‌تر شدن سطح مقطع سرعت جریان شروع به کم شدن می‌کند و در نهایت با سرعت جریانی برابر با سرعت جریان در ورودی مقطع از لوله خارج می‌شود.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه مدل‌های ۱ و ۷ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که به‌طور کلی کمترین مقدار افت فشار در مدل ۷ اتفاق افتاده است و با توجه به شکل ۴-۱۴ ملاحظه می‌شود که در مدل ۷ حباب‌ها ریزتر شده‌اند. ملاحظه می‌شود که تغییرات طول بخش انقباض و بخش انتشار تأثیر چندانی در شکل‌گیری میکرو حباب و ریزتر شدن حباب‌ها ندارد بلکه با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه حباب‌ها ریزتر می‌شوند.

بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مدل ۷ مدل انتخابی برای ساخت نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. جهت مقایسه نتایج آزمایشگاهی مدل ۱ نیز به‌عنوان مدل مبنا انتخاب شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها حداقل افت فشار در محل اتصال بخش انقباض به بخش گلوگاه اتفاق می‌افتد و این با یافته‌های ژانگ در سال ۲۰۱۷ و نیو و سان در سال ۲۰۱۰ کاملاً تطابق دارد. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر روی افت فشار ندارد و این کاملاً با یافته‌های مانزانو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ تطابق دارد. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش شیب بخش انقباض و انتشار افت فشار افزایش می‌یابد که کاملاً با یافته‌های جیانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ تطابق دارد. به‌طور کلی تحقیقات و بررسی‌های این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل در نرم‌افزار OpenFOAM با نتایج حاصل از نرم‌افزارهای دیگر که در روش CFD استفاده می‌شود تطابق کامل دارد. نتایج نشان داد که تغییر طول بخش انقباض و بخش انتشار تأثیر چندانی در ریزتر شدن حباب‌ها و تشکیل میکرو حباب ندارد ولی با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه حباب‌ها ریزتر می‌شوند و می‌توان به هدف خود یعنی تشکیل میکرو-نانوحباب در لوله ونتوری

رسید. با استفاده از یافته‌های این تحقیق مدل‌های ۱ و ۷ جهت ساخت نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده و نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته و مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۱۴. تغییرات آلفا در داخل لوله ونتوری برای مدل‌های ۱ تا ۱۰

برای اینکه نتایج تحلیل عمومیت داشته باشد و برای محقق دیگر نیز به راحتی قابل استفاده و قابل درک باشد، و همچنین جهت دستیابی به رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل موجود در مساله مورد تحلیل، در ادامه نتایج تحلیل برحسب اعداد بی بعد نیز بیان می شود. جدول ۴-۵ برای بی بعد سازی متغیرهای مورد استفاده ارائه شده است.

در این جدول a بیانگر طول بخش انقباض به قطر لوله، b بیانگر طول بخش انتشار به قطر لوله، و c بیانگر طول بخش گلوگاه به قطر لوله می باشد و زاویه β و γ به ترتیب بیانگر زاویه بخش انقباض و زاویه بخش انتشار بر حسب درجه می باشد.

جدول ۴-۵. متغیرهای مدل های ۱۰ بر حسب اعداد بی بعد

Models	a=X/D	b=Y/D	c=Ln/D	β زاویه انقباض (درجه)	γ زاویه انتشار (درجه)
Model1	1	1	1	24.22775	24.22775
Model2	1	2	1	24.22775	12.68038
Model3	1	3	1	24.22775	8.530766
Model4	2	2	1	12.68038	12.68038
Model5	2	3	1	12.68038	8.530766
Model6	1	1	0.5	24.22775	24.22775
Model7	1	1	0.1	24.22775	24.22775
Model8	2	3	0.5	12.68038	8.530766
Model9	2	3	0.1	12.68038	8.530766
Model10	2	3	0.01	14.30555	8.530766

برای دستیابی به رابطه بین متغیرهای a، b و c و P (حداقل افت فشار) در لوله ونتوری از رگرسیون خطی در نرم افزار SPSS استفاده شده است و نتایج طبق **Error! Not a valid bookmark self-reference.** ارائه شده است.

نتایج نشان می دهد که رابطه $P = -6713.757 - 396.694a - 7686.708b - 7985.523c$ بین متغیرها برقرار است. این رابطه نشان می دهد که چون ضریب متغیرهای a و b و c علامت یکسانی دارند و منفی هستند بنابراین با افزایش طول بخش انتشار و انقباض و گلوگاه افت فشار افزایش می یابد.

ضریب متغیر a در مقایسه با ضریب متغیرهای b و c ناچیز است و این بیانگر این مطلب است که تغییرات طول بخش انقباض تاثیر کمی بر روی افت فشار در لوله ونتوری دارد و تغییرات افت فشار بیشتر متأثر از تغییرات طول بخش انتشار و گلوگاه است و هرچقدر طول بخش انتشار و گلوگاه کوچکتر باشد افت فشار کمتر اتفاق می افتد.

برای بدست آوردن رابطه بین متغیرهای β ، γ و P که به ترتیب بیانگر زاویه بخش انقباض، زاویه بخش انتشار بر حسب درجه و حداقل افت فشار در لوله ونتوری هستند نیز از رگرسیون خطی استفاده شده و نتایج طبق جدول ۴-۷ در زیر آورده شده است.

نتایج نشان می دهد که رابطه $P = -41322.108 - 182.665\beta - 1104.79\gamma$ بین شیب بخش انتشار و انقباض و حداقل افت فشار برقرار است. ملاحظه می شود که ضریب متغیر β در مقابل ضریب متغیر γ ناچیز است و افزایش شیب بخش انتشار تاثیر بیشتری بر روی حداقل افت فشار در لوله ونتوری دارد و با افزایش شیب بخش انتشار و انقباض، حداقل افت فشار در لوله ونتوری افزایش می یابد.

جدول ۴-۶. نتایج رگرسیون خطی برای متغیرهای مستقل a و b و c و متغیر وابسته P

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.930 ^a	.865	.797	3756.62961	.865	12.807	3	6	.005

a. Predictors: (Constant), c, b, a

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-6713.757	4672.813		-1.437	.201
	A	-396.694	3404.516	-.025	-.117	.911
	B	-7686.708	1898.280	-.846	-4.049	.007
	C	-7985.523	3034.162	-.411	-2.632	.039

a. Dependent Variable: P

جدول ۴-۷. نتایج رگرسیون خطی برای متغیرهای مستقل β و γ و متغیر وابسته P

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.870 ^a	.757	.687	4669.60015	.757	10.875	2	7	.007

a. Predictors: (Constant), gama, beta

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-41322.108	5117.370		-8.075	.000
	beta	-182.665	359.284	-.130	-.508	.627
	gama	1104.790	296.053	.953	3.732	.007

a. Dependent Variable: P

۳-۴ نتایج حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و بحث و بررسی آن‌ها

در این تحقیق دو نمونه لوله ونتوری با ابعاد مختلف، طبق نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی، مطابق شکل ۳-۳ ب و شکل ۳-۳ ج ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، میکرو حباب‌ها شناسایی شدند. نمودار تغییرات تعداد میکرو-نانوحباب‌ها نسبت به زمان برای مدل شماره ۱ و ۲، در سه دبی مورد آزمایش به ترتیب در شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. جهت مقایسه بهتر، نمودار ماکزیمم تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در دبی‌های مختلف برای مدل‌های شماره ۱ و ۲ در شکل ۴-۱۷ رسم شده است.

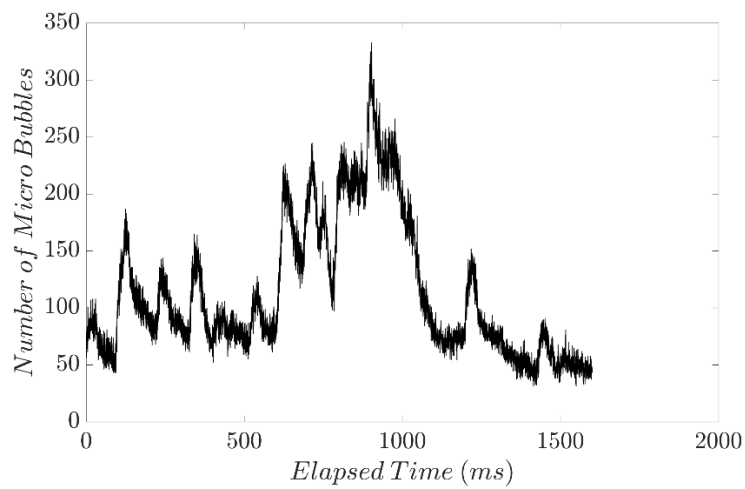
ملاحظه می‌شود که در هر دو مدل، با افزایش دبی جریان تعداد میکرو-نانوحباب‌های تشکیل شده نیز افزایش می‌یابد که این نتیجه کاملاً با یافته‌های ژائو و همکارانش (Zhao et al, 2017) تطابق دارد. نمودارها نشان می‌دهند که در مدل شماره ۲ تعداد میکرو-نانوحباب‌های تشکیل شده در هر سه دبی مورد آزمایش، بیشتر از مدل شماره ۱ است، یعنی وقتی که طول بخش گلوگاه کوتاه‌تر شده است میکرو-نانوحباب‌های بیشتری تشکیل شده است.

زمانی که دبی جریان کمتر است تعداد میکرو نانوحباب‌های تشکیل یافته در هر دو مدل تقریباً یکسان است و کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر شکل‌گیری میکرو نانوحباب نداشته است.

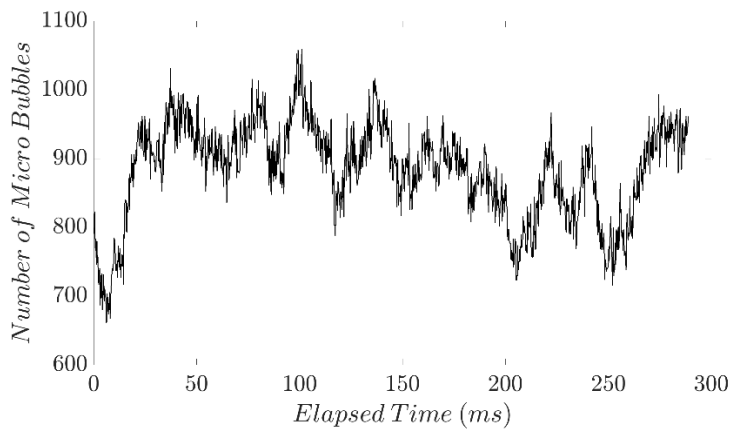
طبق نتایج ثبت شده ملاحظه می‌شود که با گذر زمان تعداد میکرو نانوحباب‌ها کمتر می‌شود یا تقریباً ثابت می‌ماند، به این دلیل است که با گذر زمان میکرو-نانوحباب‌های تشکیل شده حرکت کرده و به جلو رفته‌اند و از محدوده عکاسی خارج شده‌اند.

پس از ردیابی حباب‌ها و محاسبه سرعت در نقاط مختلف، طبق توضیحات داده شده در بخش ۴-۳-۳، نمودار تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری برای تمامی مدل‌ها رسم شده است. نمودار تغییرات سرعت در نقاط مختلف در مرکز لوله ونتوری، برای مدل‌های شماره ۱ و ۲ در سه دبی مورد آزمایش به ترتیب در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ رسم شده است.

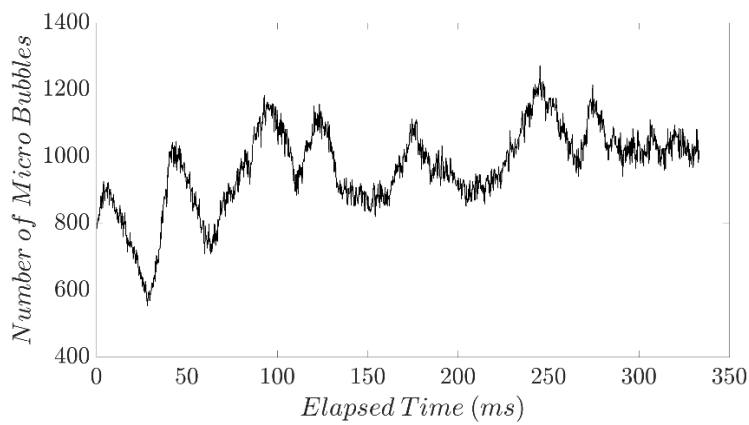
با توجه به نمودار رسم شده در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی در هر دو مدل سرعت نیز افزایش یافته است که این با رابطه تئوری دبی $Q=A.V$ تطابق دارد و صحت نتایج آزمایشگاهی را بیان می‌کند.



(الف)



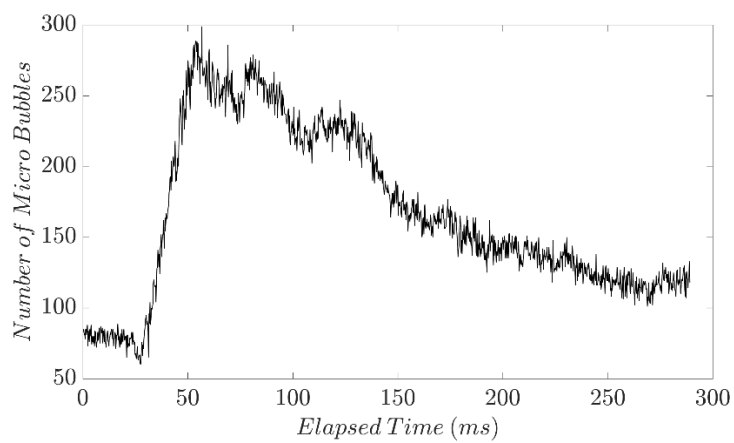
(ب)



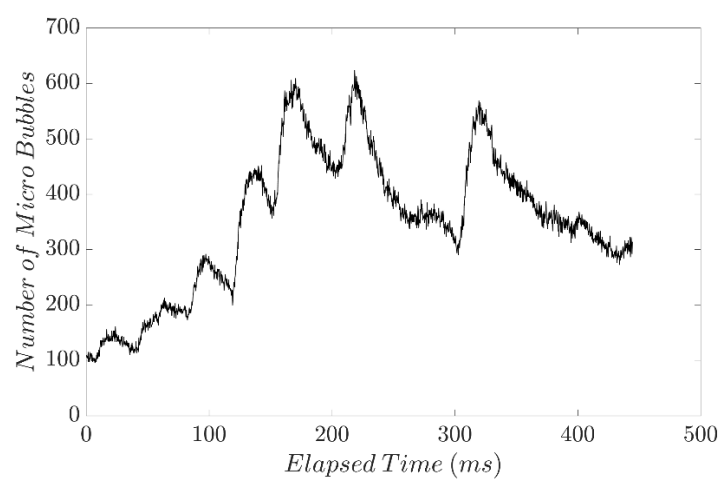
(ج)

شکل ۴-۱۵. تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در زمانهای مختلف در مدل شماره ۲، الف: $Q=0.16\text{lit/s}$: ب:

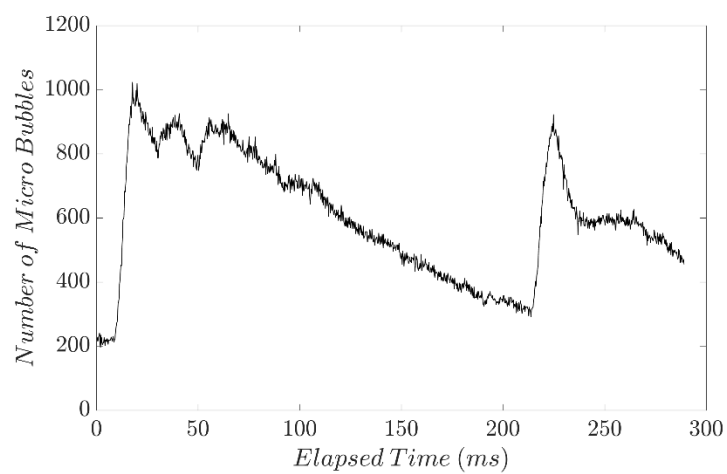
$Q=0.29\text{lit/s}$: ج: $Q=0.42\text{lit/s}$



(الف)

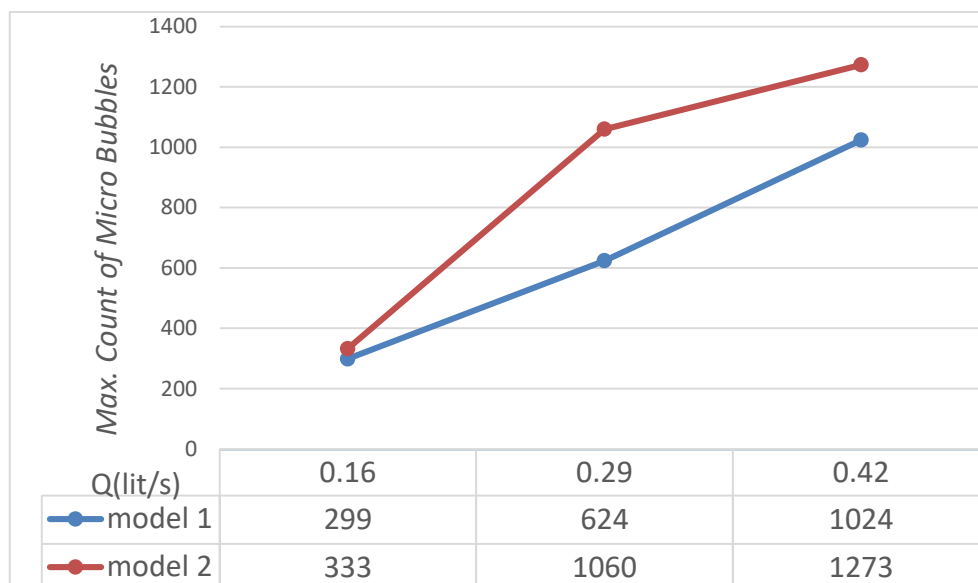


(ب)



(ج)

شکل ۴-۱۶. تعداد میکرو-نانوبابها در زمانهای مختلف در مدل شماره ۱، الف: $Q=0.16\text{lit/s}$ ؛ ب: $Q=0.29\text{lit/s}$ ؛ ج: $Q=0.42\text{lit/s}$



شکل ۴-۱۷. ماکزیمم تعداد میکرو-نانوحباب‌ها در دبی‌های مختلف برای مدل‌های شماره ۱ و ۲

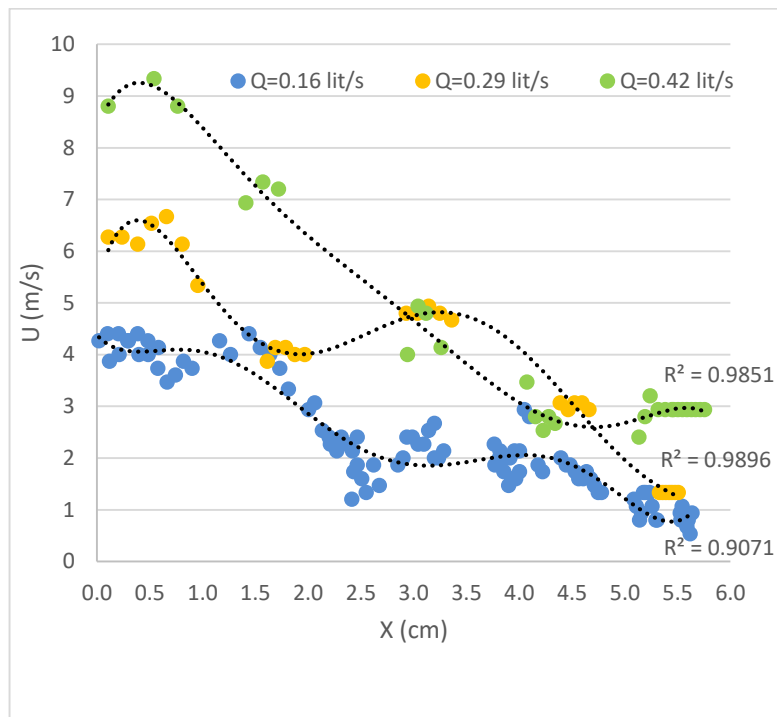
با توجه به نمودارهای رسم شده، ملاحظه می‌شود که در قسمت گلوگاه چون سطح مقطع $0/1$ برابر سطح مقطع در ورودی لوله است، لذا انتظار می‌رود که سرعت در این قسمت تقریباً 10 برابر سرعت در ورودی لوله باشد که این نتیجه نیز از این تحقیق حاصل شده است. برای مثال چون ابعاد سطح مقطع لوله $3 \times 1/6$ سانتی‌متر است بنابراین سرعت در قسمت ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی $0/16$ لیتر بر ثانیه برابر با $0/333$ متر بر ثانیه می‌باشد و مطابق نمودار مربوط به این دبی در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ ملاحظه می‌شود که سرعت در گلوگاه حدوداً 4 متر بر ثانیه به دست آمده است که با تقریب خوبی با $3,33$ متر بر ثانیه برابری می‌کند.

سرعت در ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی $0/29$ لیتر بر ثانیه برابر با $0/6$ متر بر ثانیه است و مطابق نمودارهای رسم شده در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ برای این دبی، ملاحظه می‌شود که سرعت در قسمت گلوگاه برای مدل شماره ۱ در این دبی تقریباً 6 متر بر ثانیه و برای مدل شماره ۲ تقریباً 7 متر بر ثانیه به دست آمده است که با دقت خوبی با سرعت 6 متر بر ثانیه برابری می‌کنند.

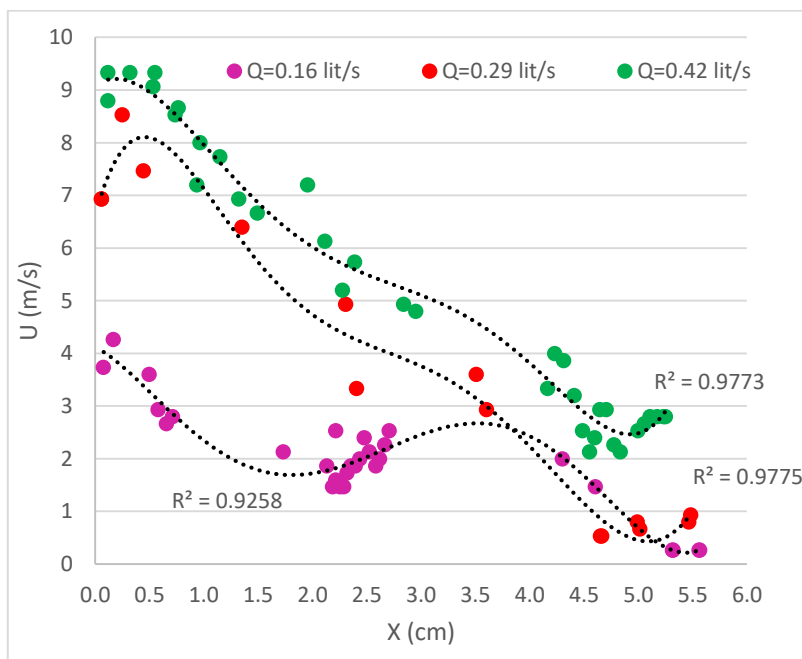
همچنین سرعت در ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی $0/42$ لیتر بر ثانیه برابر با $0/9$ متر بر ثانیه است و مطابق نمودارهای رسم شده در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ برای این دبی، ملاحظه می‌شود که سرعت در قسمت گلوگاه برای مدل شماره ۱ و ۲ در این دبی تقریباً 9 متر بر ثانیه به دست آمده است که با دقت خوبی با سرعت 9 متر بر ثانیه برابری می‌کنند.

با مقایسه شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ ملاحظه می‌شود که با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه، سرعت اندکی کاهش یافته است ولی در کل می‌توان گفت تغییر طول گلوگاه تأثیر چندانی بر روی

تغییرات سرعت ندارد و فقط تغییرات دبی بر روی سرعت تأثیرگذار است. هموار نبودن منحنی تغییرات سرعت در شکل ۱۸-۴ و شکل ۱۹-۴ می‌تواند ناشی از وجود حباب و حرکت حباب باشد.



شکل ۱۸-۴. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری تحت دبی‌های مختلف در مدل شماره ۱



شکل ۱۹-۴. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری تحت دبی‌های مختلف در مدل شماره ۲

در شکل ۴-۲۰، فرآیند خروج حباب از بخش گلوگاه و وارد شدن آن به بخش انتشار و ترکیدن و ریز شدن حباب در فریم‌های متوالی برای مدل شماره ۲ تحت دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است، با توجه به سرعت دوربین مورد استفاده که ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه است، هر فریم با گام زمانی ۰,۲۲۲۲ میلی‌ثانیه می‌باشد. ملاحظه می‌شود حباب بعد از خروج از گلوگاه که وارد بخش انتشار لوله ونتوری می‌شود، به تدریج که سطح مقطع لوله ونتوری در این قسمت بزرگ‌تر می‌شود و سرعت جریان شروع به کم شدن می‌کند و فشار شروع به افزایش می‌کند و حباب بزرگ شکسته شده و تبدیل به حباب‌های ریزتر می‌شود.

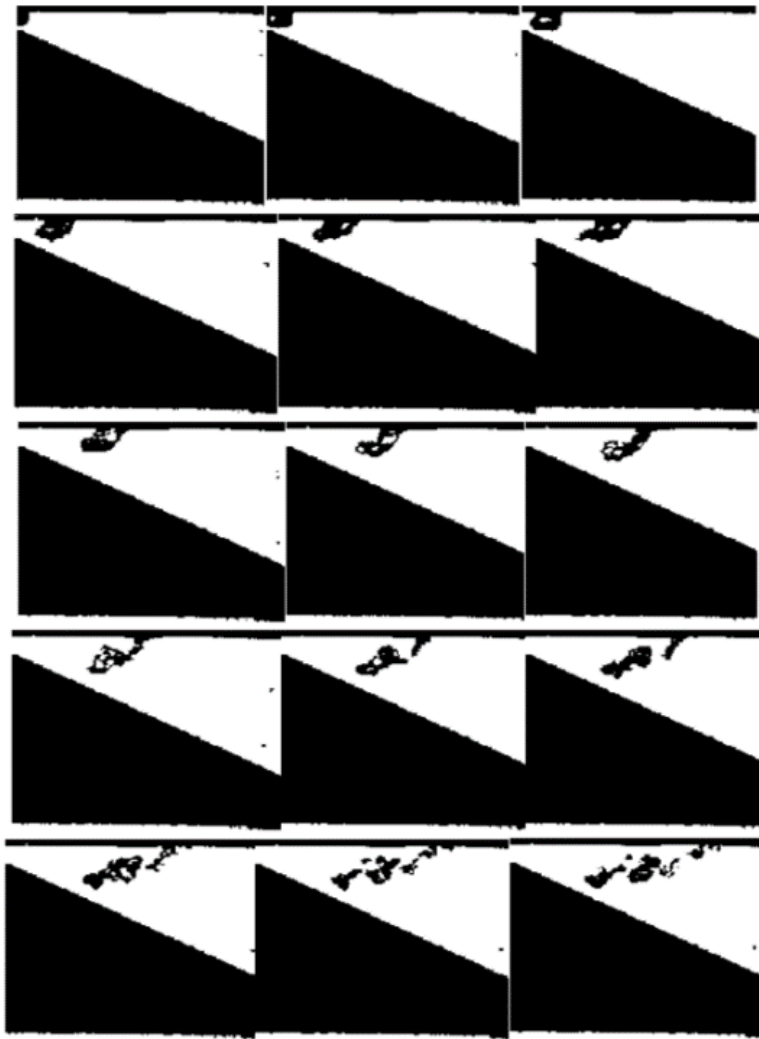
با توجه به شکل ۴-۲۰ ملاحظه می‌شود که به محض ورود حباب به بخش انتشار حباب سریعاً تغییر شکل می‌دهد و پس از ورود به بخش انتشار دچار فروپاشی می‌شود که طبق شکل ۴-۲۱ با نتایج ژائو و همکارانش (Zhao et al, 2017) کاملاً تطابق دارد. فیلم‌های تهیه شده از جریان دوفازی عبوری از لوله ونتوری نیز نشان می‌دهد که حباب بزرگ‌تر در بخش گلوگاه تحت یک جریان توربولانسی شدید قرار می‌گیرد و تغییر شکل می‌دهد و به محض ورود به بخش انتشار دچار فروپاشی شده و متلاشی می‌شود و به حباب‌های ریز تقسیم می‌شود که این کاملاً با یافته‌های فوجیوارا و همکارانش (Fujiwara et al, 2007) تطابق دارد.

شکل ۴-۲۲ توزیع اندازه میکرو حباب‌ها را در مدل‌های شماره ۱ و ۲ تحت دبی‌های مختلفی از جریان آب نشان می‌دهد. با استفاده از توزیع اندازه میکرو حباب‌ها و رابطه (۴-۱) می‌توان قطر میانگین ساتر حباب‌ها محاسبه کرد.

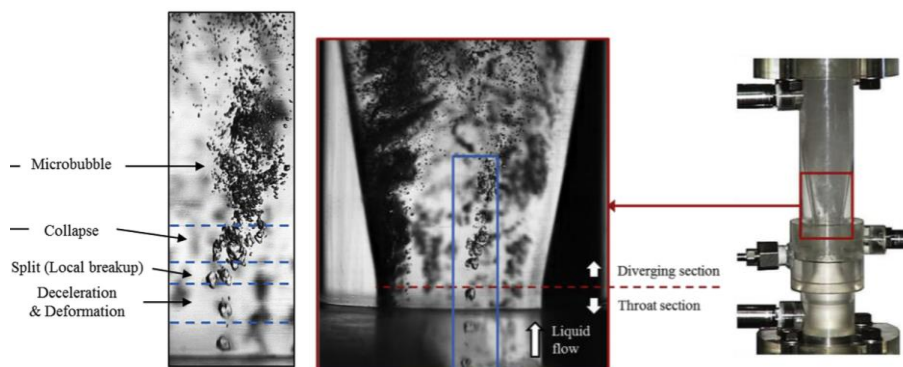
رابطه مورد نیاز برای محاسبه قطر میانگین ساتر حباب‌ها به صورت زیر است (Rodrigues and Rubio, 2003):

$$d_b \text{ or } d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (4-1)$$

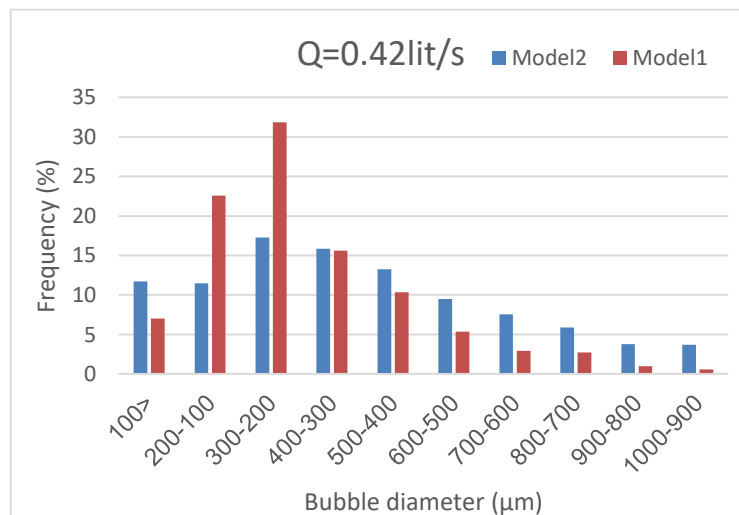
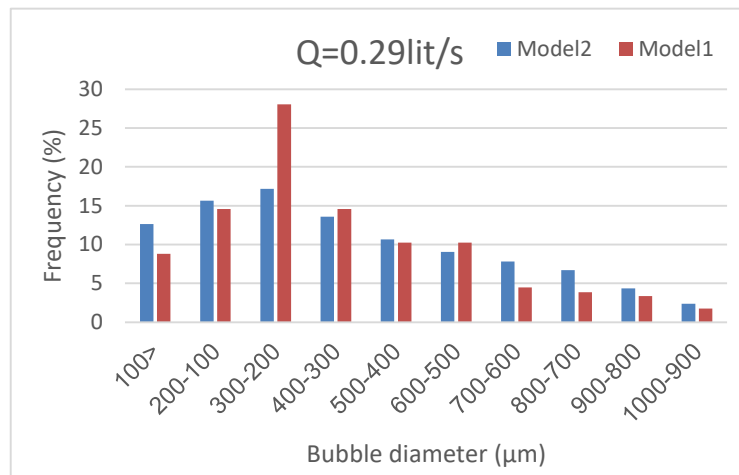
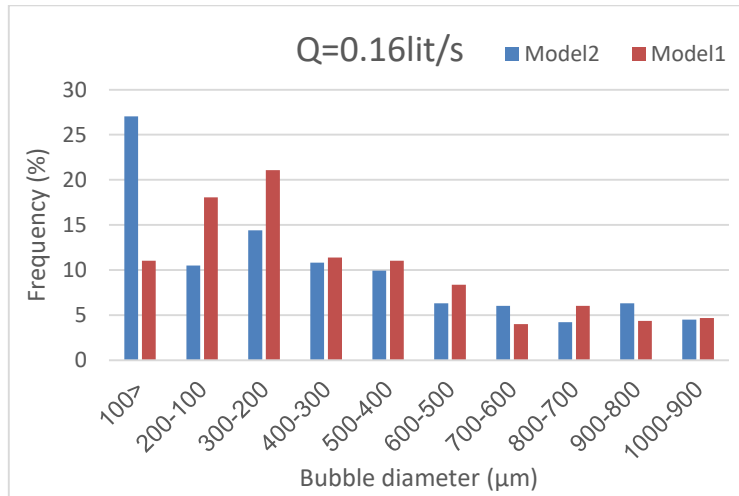
در این رابطه d_b یا d_{32} قطر میانگین ساتر، d_i قطر حباب و n_i فراوانی حباب‌های به قطر d_i می‌باشد. با استفاده از شکل ۴-۲۲ و رابطه (۴-۱)، قطر میکرو حباب‌ها تحت دبی‌های مختلف برای مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲ در شکل ۴-۲۳ رسم شده است. در شکل ۴-۲۴ نیز رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم میکرو حباب‌ها رسم شده و رابطه بین آن‌ها به دست آمده است. رابطه بدست آمده توسط اندری و همکارانش نیز جهت مقایسه در شکل ۴-۲۵ آورده شده است.



شکل ۴-۲۰. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه



شکل ۴-۲۱. شکستن و تغییر شکل حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه (Zhao et al, 2017)

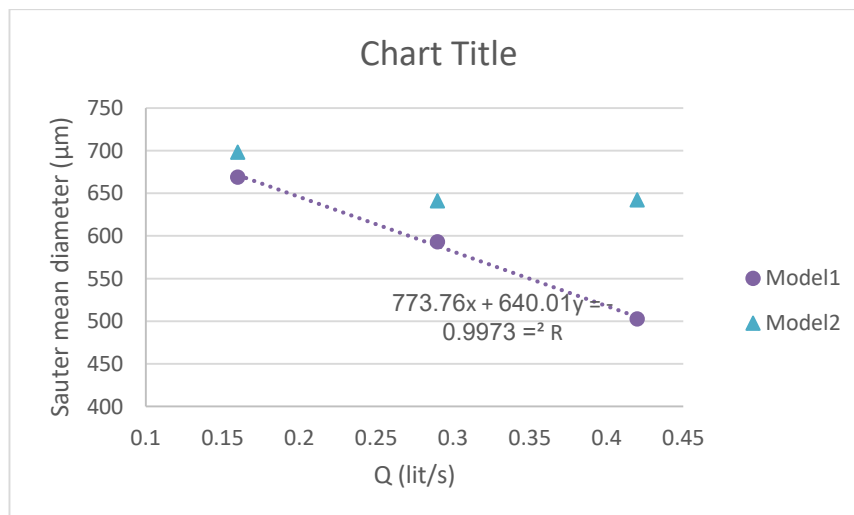


شکل ۴-۲۲. توزیع اندازه حباب‌ها برای مدل‌های ۱ و ۲ تحت دبی‌های مختلف

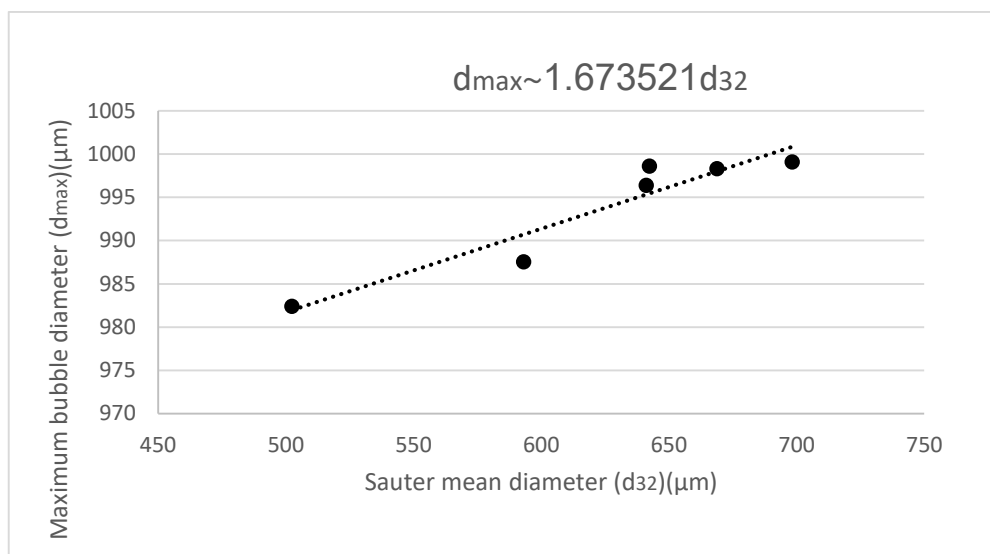
در جدول ۸-۴ نتایج آزمون کلموگروف-اسمینورف برای اندازه میکرو حباب‌ها آورده شده است. ملاحظه می‌شود که توزیع اندازه میکرو حباب‌ها نرمال نیست.

جدول ۸-۴. نتایج آزمون کلموگروف-اسمینورف برای اندازه حباب‌ها

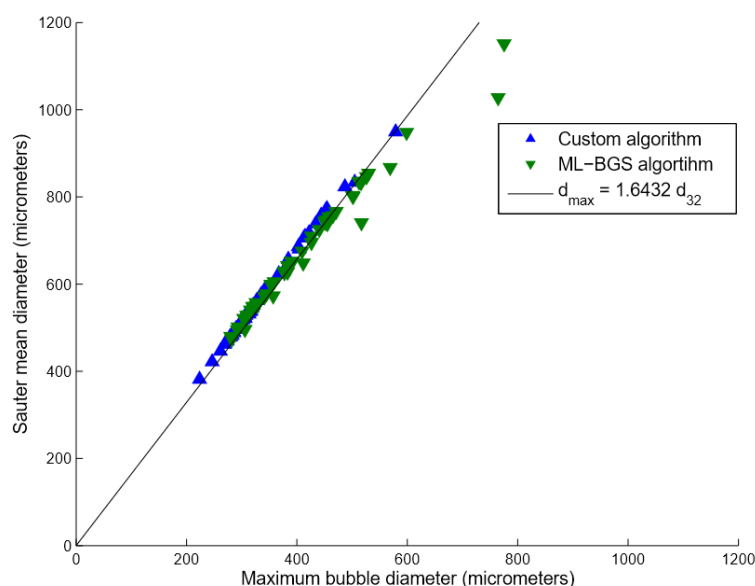
		Model2: Q=0.16 lit/s	Model2: Q=0.29 lit/s	Model2: Q=0.42 lit/s	Model1: Q=0.16 lit/s	Model1: Q=0.29 lit/s	Model1: Q=0.42 lit/s
N		333	1060	1273	299	624	1024
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.35111	.3802	.39369	.374101	.354349	.302193
	Std. Deviation	.279167	.244587	.240344	.252224	.214304	.173516
Most Extreme Differences	Absolute	.124	.085	.071	.119	.118	.120
	Positive	.120	.085	.071	.119	.118	.120
	Negative	-.124	-.076	-.066	-.089	-.068	-.065
Test Statistic		.124	.085	.071	.119	.118	.120
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c	.000 ^c
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction.							



شکل ۴-۲۳. قطر میانگین ساتر حباب‌ها برای مدل‌های ۱ و ۲ تحت دبی‌های مختلف



شکل ۴-۲۴. رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم حباب‌ها



شکل ۴-۲۵. رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم حباب‌ها (Andriy et al, 2015)

شکل ۴-۲۳ نشان می‌دهد که در هر دو مدل با افزایش دبی جریان قطر میانگین ساتر کاهش می‌یابد. نرخ کاهش در مدل شماره ۱ بیشتر از مدل شماره ۲ است. ملاحظه می‌شود که مطابق شکل ۴-۱۷ با وجود اینکه تعداد میکرو حباب‌های تشکیل یافته در مدل شماره ۲ بیشتر از مدل شماره ۱ است ولی مطابق شکل ۴-۲۳ قطر میانگین ساتر در مدل شماره ۱ کمتر از مدل شماره ۲ است یعنی حباب‌های ریزتری در مدل شماره ۱ تشکیل می‌شود. این به آن معنی است که با کاهش طول بخش گلوگاه در لوله ونتوری قطر و تعداد میکرو حباب‌ها افزایش می‌یابد و برعکس.

در شکل ۴-۲۴ رابطه بین قطر میانگین ساتر و قطر ماکزیمم میکرو حباب‌ها به دست آمده است این شکل نشان می‌دهد که بین ماکزیمم قطر میکرو حباب‌ها و قطر میانگین ساتر آن‌ها رابطه $y = 1.67x$

برقرار است که کاملاً با یافته‌های آزوپاردی تطابق دارد. آزوپاردی در طی تحقیقات خود در سال ۱۹۹۷ دریافت که قطر ماکزیمم میکرو حباب‌ها ۱,۵ تا ۳ برابر قطر میانگین ساتر آن‌ها است. اندری و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۵ طبق شکل ۴-۲۵ این مقدار را ۱,۶۴۳۲ بدست آوردند. در این تحقیق نیز این ضریب برابر با ۱,۶۷ به دست آمده است.

به‌طور کلی نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه تعداد میکرو-نانوحباب‌هایی که در لوله و نتوری تشکیل می‌شود افزایش می‌یابد همچنین با افزایش دبی جریان در داخل لوله و نتوری میکرو نانوحباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود ولی نتایج نشان داد که زمانی که دبی جریان کمتر است تغییر طول بخش گلوگاه تأثیر قابل توجهی در تعداد میکرو نانوحباب‌ها ندارد و با افزایش دبی جریان و کوچک‌تر شدن بخش گلوگاه میکرو نانوحباب‌های بیشتری تشکیل شده است. کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر روی تغییرات سرعت در لوله و نتوری ندارد. در بخش بعدی به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد.

۴-۴ مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. برای این منظور نمونه‌هایی در ابعاد و اندازه‌های نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی، یعنی مدل شماره ۱ و شماره ۲ نشان داده شده در شکل ۳-۳ و دبی‌های مورد استفاده در تحلیل آزمایشگاهی مطابق جدول ۳-۵، شبیه‌سازی شده و با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مقایسه شده است. مدل‌های عددی در این بخش از تحقیق دارای مش در ابعاد ۰,۰۱ سانتی‌متر هستند تا میکرو حباب‌های ایجاد شده به خوبی ردیابی شوند. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله و نتوری حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای مدل شماره ۱ و مدل شماره ۲ تحت سرعت‌های مختلف مورد آزمایش، به ترتیب در شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷ رسم شده است.

نتایج تحلیل عددی برای مدل شماره ۱ تحت سرعت‌های جریان آب ۰,۳۳، ۰,۶ و ۰,۹ متر بر ثانیه به ترتیب با علامت Num.11، Num.12 و Num.13 نشان داده شده است به همین ترتیب نتایج تحلیل عددی برای مدل شماره ۲ تحت سرعت‌های جریان آب ۰,۳۳، ۰,۶ و ۰,۹ متر بر ثانیه به ترتیب با علامت Num.21، Num.22 و Num.23 نشان داده شده است. نتایج تحلیل آزمایشگاهی برای مدل شماره ۱ تحت سرعت‌های جریان آب ۰,۳۳، ۰,۶ و ۰,۹ متر بر ثانیه به ترتیب با علامت Exp.11، Exp.12 و Exp.13 نشان داده شده است به همین ترتیب نتایج تحلیل عددی برای مدل شماره ۲ تحت سرعت‌های جریان آب ۰,۳۳، ۰,۶ و ۰,۹ متر بر ثانیه به ترتیب با علامت Exp.21، Exp.22 و Exp.23 نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷ می‌توان گفت که نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی باهم دارند و منحنی‌های حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی تقریباً برهم منطبق هستند.

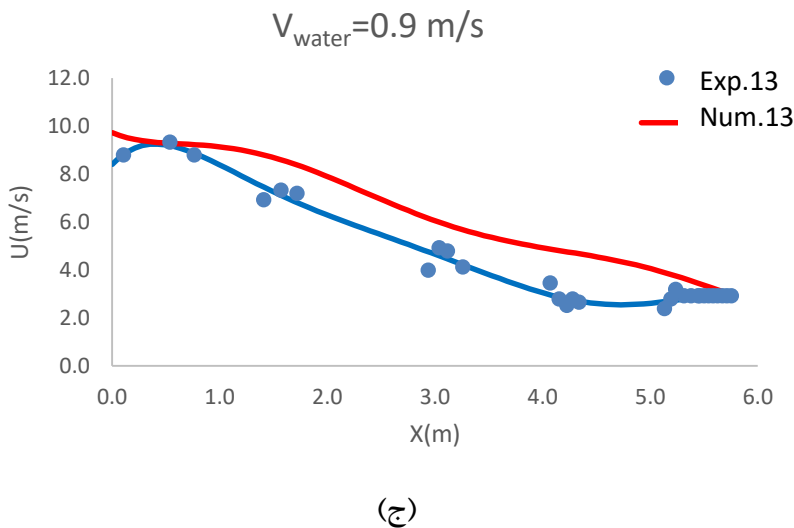
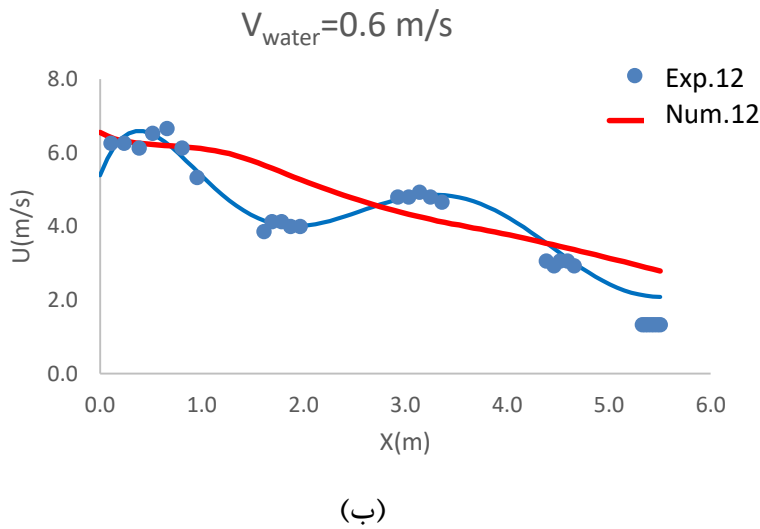
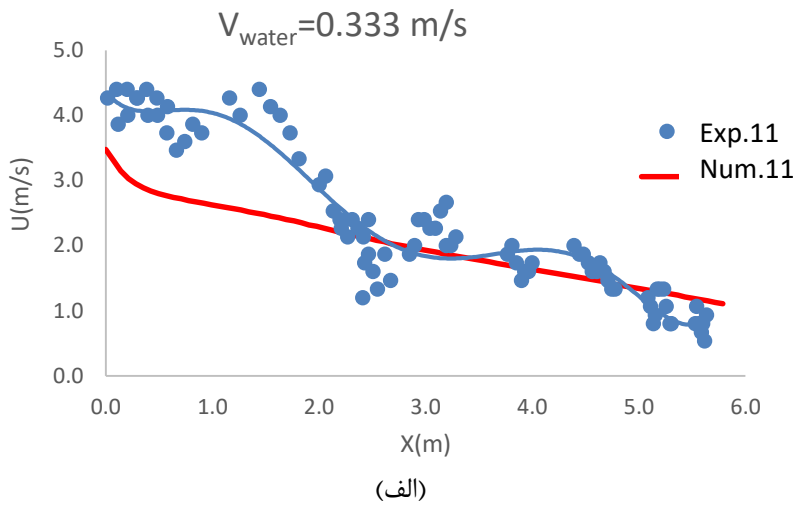
هموار نبودن منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله و نتوری در مدل آزمایشگاهی ناشی از حضور حباب‌های هوا در محل محاسبه سرعت جریان در داخل لوله و نتوری می‌تواند باشد چون برای محاسبه سرعت در روش آزمایشگاهی همان‌طور که در بخش ۴-۳-۳ بیان گردیده است از روش ردیابی حباب‌ها استفاده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر همبستگی بین نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی از تحلیل آماری استفاده شده است و نتایج مربوط به آزمون کلموگروف-اسمینورف و آزمون همبستگی به ترتیب در جدول ۴-۹، جدول ۴-۱۰ و جدول ۴-۱۱ آورده شده است.

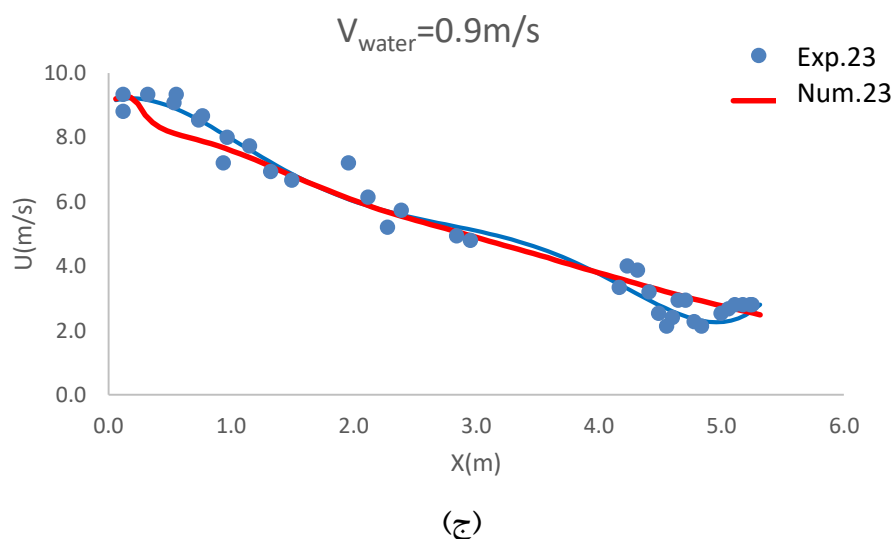
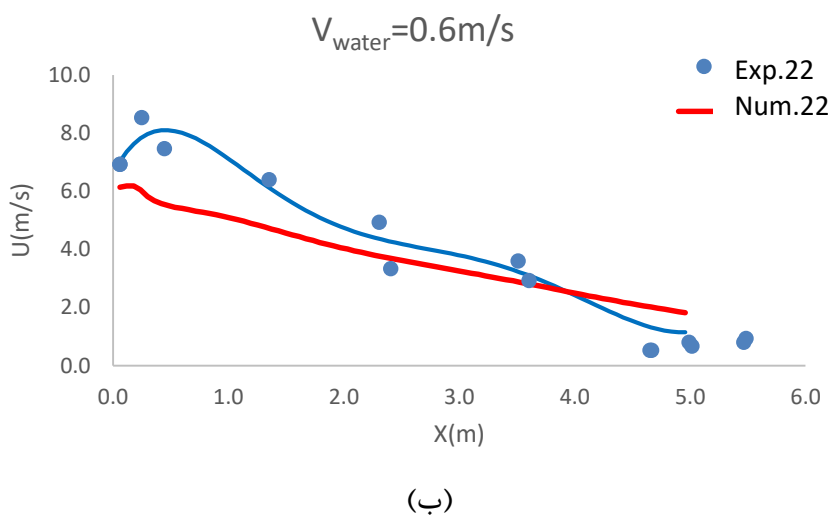
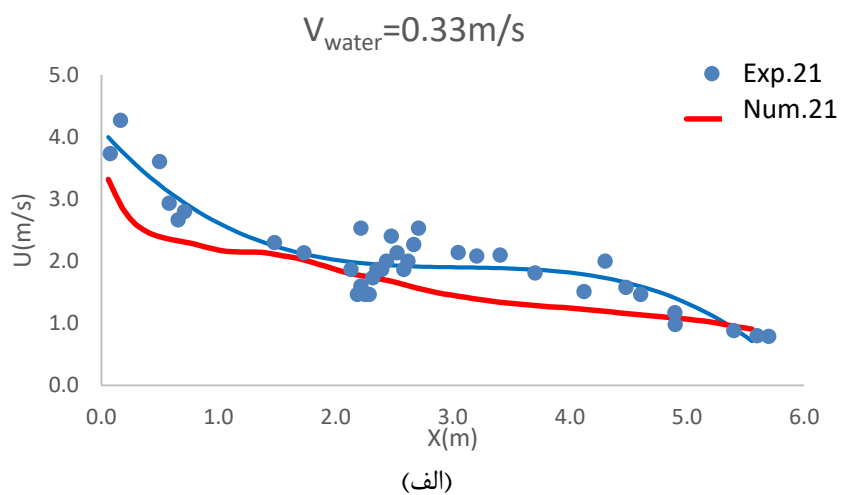
همچنین برای بررسی همبستگی بین نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی و محاسبه اختلاف حاصل از نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی، منحنی سرعت در مدل عددی در برابر سرعت در مدل آزمایشگاهی رسم شده است، این منحنی‌ها در شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ برای تمامی مدل‌های مورد بررسی نشان داده شده است. شکل‌ها نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها سرعت در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی رابطه خطی باهم دارند و تقریباً دارای $R^2 > 0.9$ هستند. میزان انحراف نتایج از خط $y=x$ به‌عنوان اختلاف نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی بیان می‌شود.

با توجه به شکل ۴-۲۸ ملاحظه می‌شود که اختلاف نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در مدل شماره ۱ با سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه برابر با ۱۱,۶ درصد، با سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه برابر با ۴,۸ درصد و با سرعت جریان آب ۰,۹ متر بر ثانیه برابر با ۲۲,۱ درصد است.

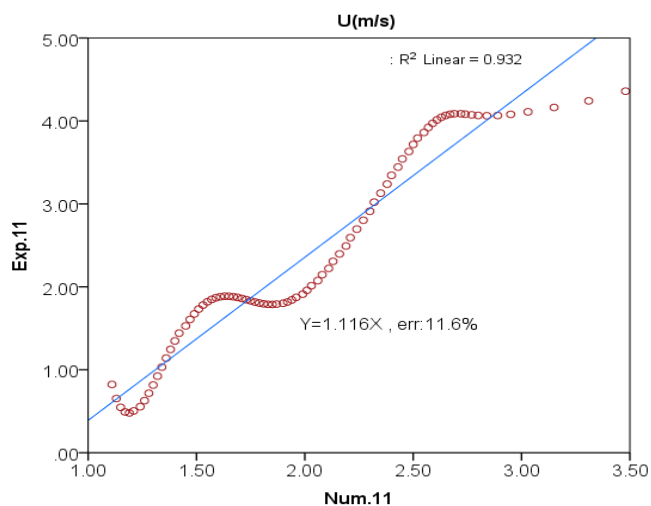
در شکل ۴-۲۹ ملاحظه می‌شود که اختلاف نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در مدل شماره ۲ با سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه برابر با ۲۴,۹ درصد، با سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه برابر با ۱۳,۴ درصد و با سرعت جریان آب ۰,۹ متر بر ثانیه برابر با ۰,۵ درصد است.



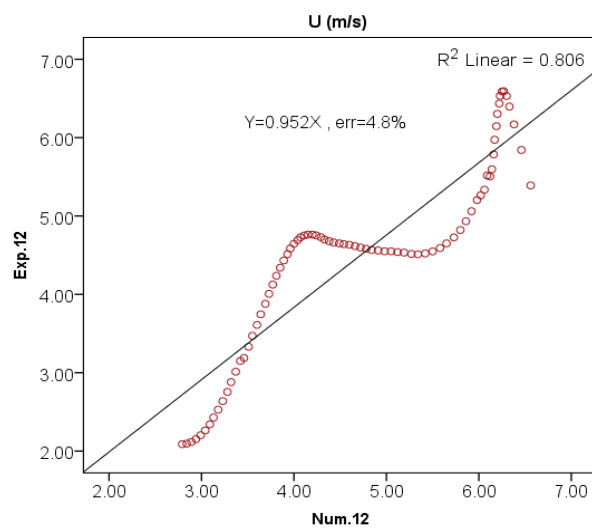
شکل ۴-۲۶. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری مدل شماره ۱، حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در سرعت جریان آب: الف) ۰٫۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰٫۶ متر بر ثانیه، ج) ۰٫۹ متر بر ثانیه



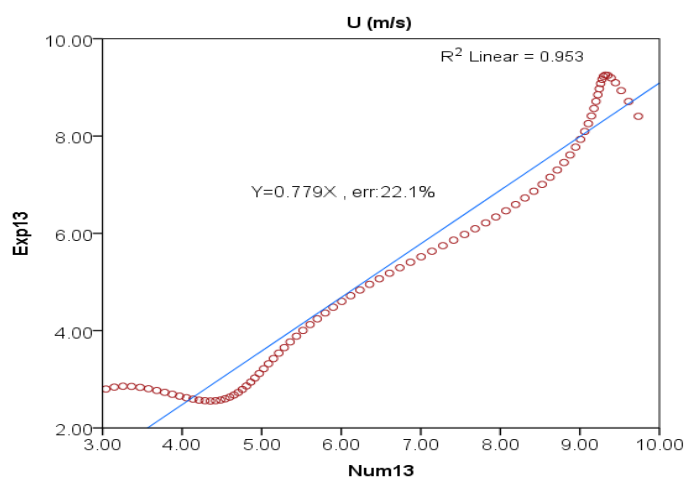
شکل ۴-۲۷. منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری مدل شماره ۲، حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در سرعت جریان آب: الف) ۰٫۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰٫۶ متر بر ثانیه، ج) ۰٫۹ متر بر ثانیه



(الف)

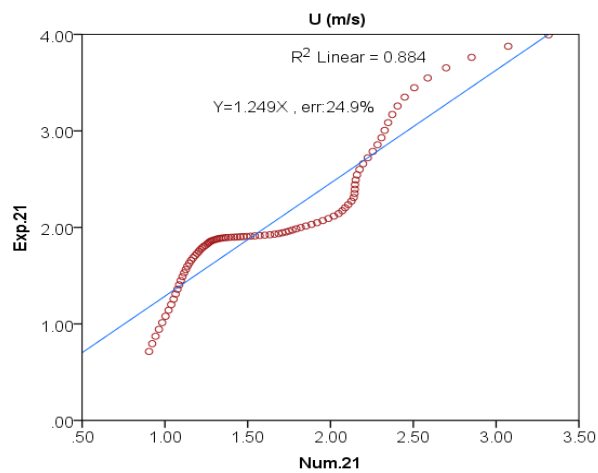


(ب)

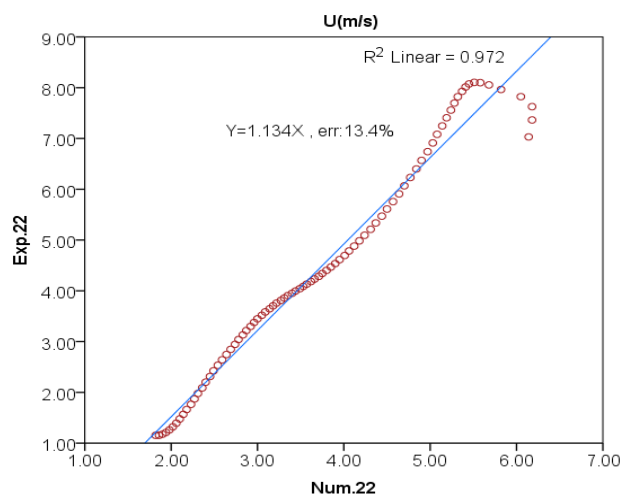


(ج)

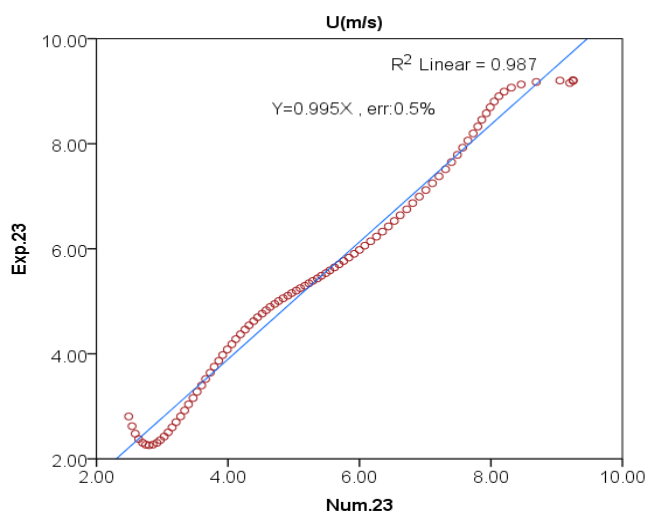
شکل ۴-۲۸. مقایسه سرعت جریان حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و تحلیل عددی برای مدل شماره ۱ در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۲۹. مقایسه سرعت جریان حاصل از تحلیل آزمایشگاهی و تحلیل عددی برای مدل شماره ۲ در سرعت جریان آب: الف) ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) ۰,۹ متر بر ثانیه

جدول ۹-۴. آزمون کلموگروف - اسمینورف برای سرعت‌های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

در مدل شماره ۱

		Exp.11	Num.11	Exp.12	Num.12	Exp.13	Num.13
N		83	83	79	79	82	82
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	2.3987	2.0211	4.3733	4.6863	5.2897	6.5500
	Std. Deviation	1.18522	.58183	1.18059	1.16156	2.38020	2.10883
Most Extreme Differences	Absolute	.177	.065	.129	.110	.138	.118
	Positive	.177	.065	.124	.083	.138	.104
	Negative	-.121	-.059	-.129	-.110	-.125	-.118
Test Statistic		.177	.065	.129	.110	.138	.118
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 ^c	.200 ^{c,d}	.002 ^c	.020 ^c	.001 ^c	.006 ^c
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction.							

جدول ۱۰-۴. آزمون کلموگروف - اسمینورف برای سرعت‌های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

در مدل شماره ۲

		Exp.21	Num.21	Exp.22	Num.22	Exp.23	Num.23
N		93	93	83	83	89	89
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	2.0611	1.6607	4.5041	3.7545	5.4914	5.4275
	Std. Deviation	.67593	.54285	2.15472	1.24835	2.16608	1.92710
Most Extreme Differences	Absolute	.174	.125	.085	.065	.068	.066
	Positive	.174	.125	.073	.065	.062	.066
	Negative	-.087	-.082	-.085	-.064	-.068	-.064
Test Statistic		.174	.125	.085	.065	.068	.066
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 ^c	.001 ^c	.200 ^{c,d}	.200 ^{c,d}	.200 ^{c,d}	.200 ^{c,d}
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction.							

جدول ۹-۴ و جدول ۱۰-۴ نرمال یا غیر نرمال بودن توزیع سرعت در مرکز لوله و نتوری در تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی $Sig > 0.05$ بیان‌گر توزیع نرمال داده‌ها می‌باشد. ملاحظه می‌شود که مدل‌های Num.11، Exp.22، Num.22، Exp.23، Num.23 دارای توزیع نرمال هستند و بقیه دارای توزیع غیر نرمال می‌باشند. برای بررسی داده‌هایی که دارای توزیع غیر نرمال هستند باید از آزمون‌های غیر پارامتریک استفاده کرد. نتایج آزمون همبستگی نشان داده‌شده در

جدول ۱۱-۴ نشان می‌دهد که نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی از همبستگی بالایی برخوردار هستند و $\text{sig} < 0$ نیز نشان می‌دهد که تمامی مدل‌ها دارای همبستگی معناداری هستند.

جدول ۱۱-۴. آزمون همبستگی برای سرعت‌های جریان حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

Models		Correlation	Sig.
Model 1	Exp.11 & Num.11	.966	.000
	Exp.12 & Num.12	.820	.000
	Exp.13 & Num.13	.976	.000
Model 2	Exp.21 & Num.21	.940	.000
	Exp.22 & Num.22	.986	.000
	Exp.23 & Num.23	.993	.000

نتایج این بخش از تحقیق بیان می‌کند که با اطمینان می‌توان نتیجه گرفت که در بررسی سرعت جریان در داخل لوله ونتوری، نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی باهم همخوانی دارند. شکل‌های مراحل خروج حباب از قسمت باریک لوله ونتوری و نحوه تشکیل میکرو حباب‌ها در مدل‌های بررسی شده به‌طور کامل در پیوست آورده شده است.

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این بخش به جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق حاضر پرداخته‌شده و در پایان پیشنهادهایی پیرامون ادامه و تکمیل این تحقیق ارائه گردیده است.

۵-۲ جمع‌بندی

در این تحقیق به بررسی تشکیل میکرو حباب در لوله ونتوری به روش عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که:

۱- الگوی جریان در داخل لوله ونتوری افقی شبیه الگوی جریان در داخل لوله افقی است. برای

داشتن جریان حبابی سرعت جریان فاز هوا باید خیلی کمتر از سرعت جریان فاز آب واردشده به داخل لوله ونتوری باشد. به‌طور کلی برای داشتن جریان حبابی بهتر است سرعت جریان هوا کمتر از 0.1 برابر سرعت جریان آب باشد. برای جلوگیری از صدمات احتمالی ناشی از انرژی جریان و افت فشار در بخش گلوگاه و بخش انتشار و همچنین برای داشتن جریان حبابی بهتر است سرعت جریان آب بین 1 تا 2 متر بر ثانیه باشد. جهت تشکیل میکرو حباب بهتر است سطح مقطع ورودی جریان هوا کوچک‌تر از مقطع ورودی جریان آب باشد تا با ورود هوا به داخل آب در بخش انقباض و قبل از آن، حباب‌های کوچک‌تری ایجاد شود و این حباب‌های کوچک با ورود به بخش گلوگاه و بخش انتشار شکسته و ریزتر شوند و میکرو حباب تشکیل شود. برای این منظور بهتر است سطح مقطع ورودی هوا کمتر از 0.1 برابر سطح مقطع ورودی آب باشد.

۲- در لوله ونتوری اگر نسبت تنگ شونده‌گی کمتر از 0.2 باشد، توزیع فشار و سرعت و آلفا در داخل لوله ونتوری متقارن نیست و جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه و فضای ذخیره‌سازی، نمی‌توان سازه را به‌صورت متقارن شبیه‌سازی کرد. ولی با این حال بسیاری از محققان با علم به این موضوع بازهم جریان را متقارن فرض می‌کنند و اختلاف نتایج را قابل‌اغماض می‌دانند.

۳- با توجه به این که تحلیل‌های عددی نیازمند سیستم‌های پیشرفته هستند و زمان، هزینه و فضای ذخیره‌سازی اطلاعات زیادی می‌طلبند، لذا استفاده از تشابه ابعادی بهترین راهکار برای صرفه‌جویی در آنهاست. تحقیقات نشان داد که اگر هدف از تحقیق، بررسی خصوصیات از جریان از قبیل سرعت و فشار و غیره باشد، به‌راحتی و با اطمینان کامل می‌توان از تشابه ابعادی استفاده کرد. ولی اگر هدف بررسی خصوصیات جریان دوفازی مانند کسر حجمی سیال و تغییرات آلفا باشد، نمی‌توان با استفاده از روش تشابه ابعادی نتایج قابل اطمینانی به دست آورد.

۴- با تغییر در ابعاد لوله ونتوری برای تشکیل میکرو حباب ملاحظه شد که حداقل افت فشار در محل اتصال بخش انقباض به بخش گلوگاه اتفاق می‌افتد. تغییر طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر روی افت فشار ندارد و با کاهش شیب بخش انقباض و انتشار افت فشار افزایش می‌یابد. تغییر طول بخش انقباض و بخش انتشار تأثیر چندانی در ریزتر شدن حباب‌ها و تشکیل میکرو حباب

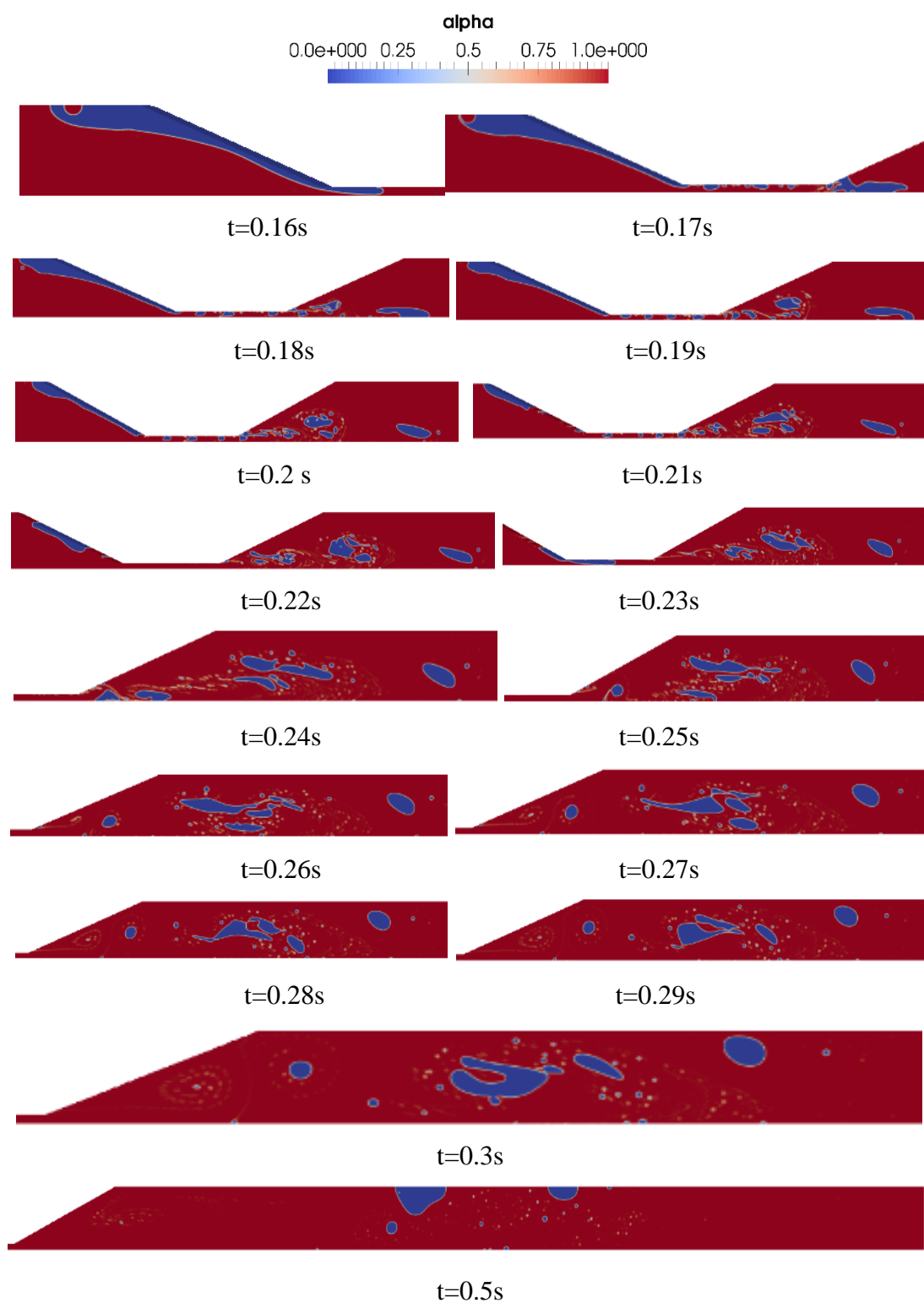
نیز ندارد ولی با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه حباب‌ها ریزتر می‌شوند و تعداد میکرو-نانوحباب‌هایی که در لوله ونتوری تشکیل می‌شود افزایش می‌یابد. با این تمهیدات می‌توان میکرو-نانوحباب در لوله ونتوری را تولید کرد. همچنین با افزایش دبی جریان در داخل لوله ونتوری میکرو نانوحباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود.

۵- به‌طور کلی تحقیقات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل در نرم‌افزار OpenFOAM با نتایج حاصل از نرم‌افزارهای مرسوم دیگر در دینامیک سیالات محاسباتی تطابق کامل دارد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی باهم همخوانی کامل دارند و این امر گویای صحت نتایج به‌دست‌آمده می‌باشد.

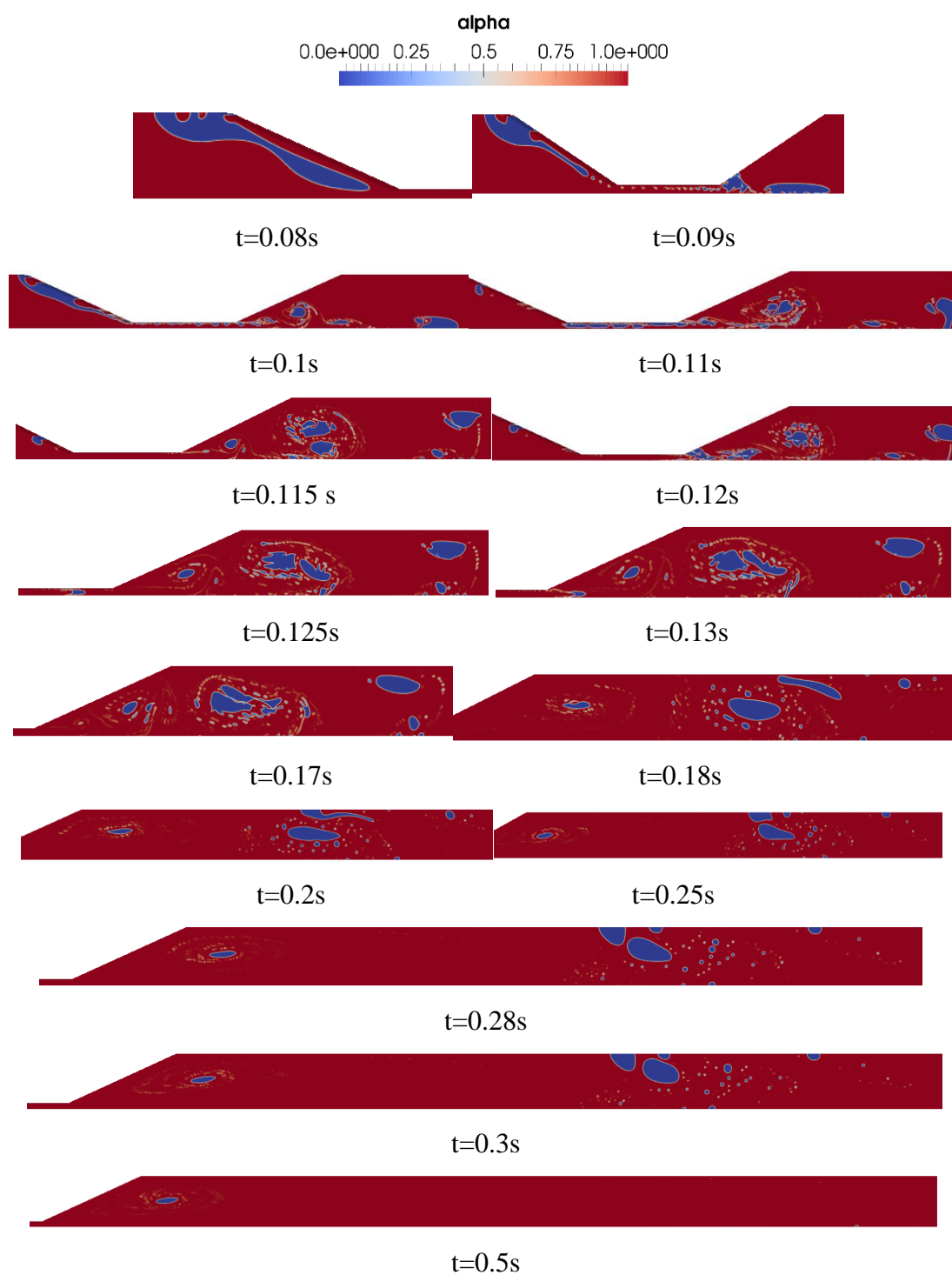
۳-۵ پیشنهادات

- ۱- استفاده از سیالی غیر از آب و هوا برای تولید میکرو حباب با توجه به اینکه کشش سطحی در جریان‌های چندفازی اهمیت ویژه‌ای دارد و با تغییر جنس سیال کشش سطحی تغییر می‌کند، می‌توان سیال‌های دیگری به غیر از آب و هوا را جهت تشکیل میکرو حباب بررسی نمود، چون در عمل، به خصوص جهت تصفیه آب و فاضلاب، از گازهای دیگری مثل ازن بیشتر استفاده می‌شود چنین تحقیقی در عمل می‌تواند مفید باشد.
- ۲- ساخت چندین لوله ونتوری به هم چسبیده و تحلیل آزمایشگاهی و عددی آنها در این تحقیق فقط یک لوله ونتوری مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اینکه حباب‌های بزرگ بعد از خروج از گلولگه شکسته و ریزتر می‌شوند، به نظر می‌رسد اگر چندین لوله ونتوری به هم وصل شوند و رفته رفته نسبت تنگ شوندگی لوله‌های ونتوری کوچکتر شود، حباب‌ها با عبور از گلوگاه‌هایی با قطر کمتر می‌توانند ریزتر شوند که جای تحقیق دارد.
- ۳- استفاده از مواد شیمیایی جهت افزایش مقدار میکرو حباب در این تحقیق بخش پوسته و سیال پیرامونی میکرو حباب از یک جنس هستند و سیال مورد استفاده آب می‌باشد. از آنجایی که با استفاده از سورفکتانت جنس پوسته میکرو حباب می‌تواند متفاوت از جنس سیال پیرامون میکرو حباب شود و با تغییر جنس پوسته میکرو حباب خواص و اندازه آنها می‌تواند تغییر کند، لذا پیشنهاد می‌شود اثر مواد شیمیایی در جهت تولید و خواص میکرو حباب بررسی شود.

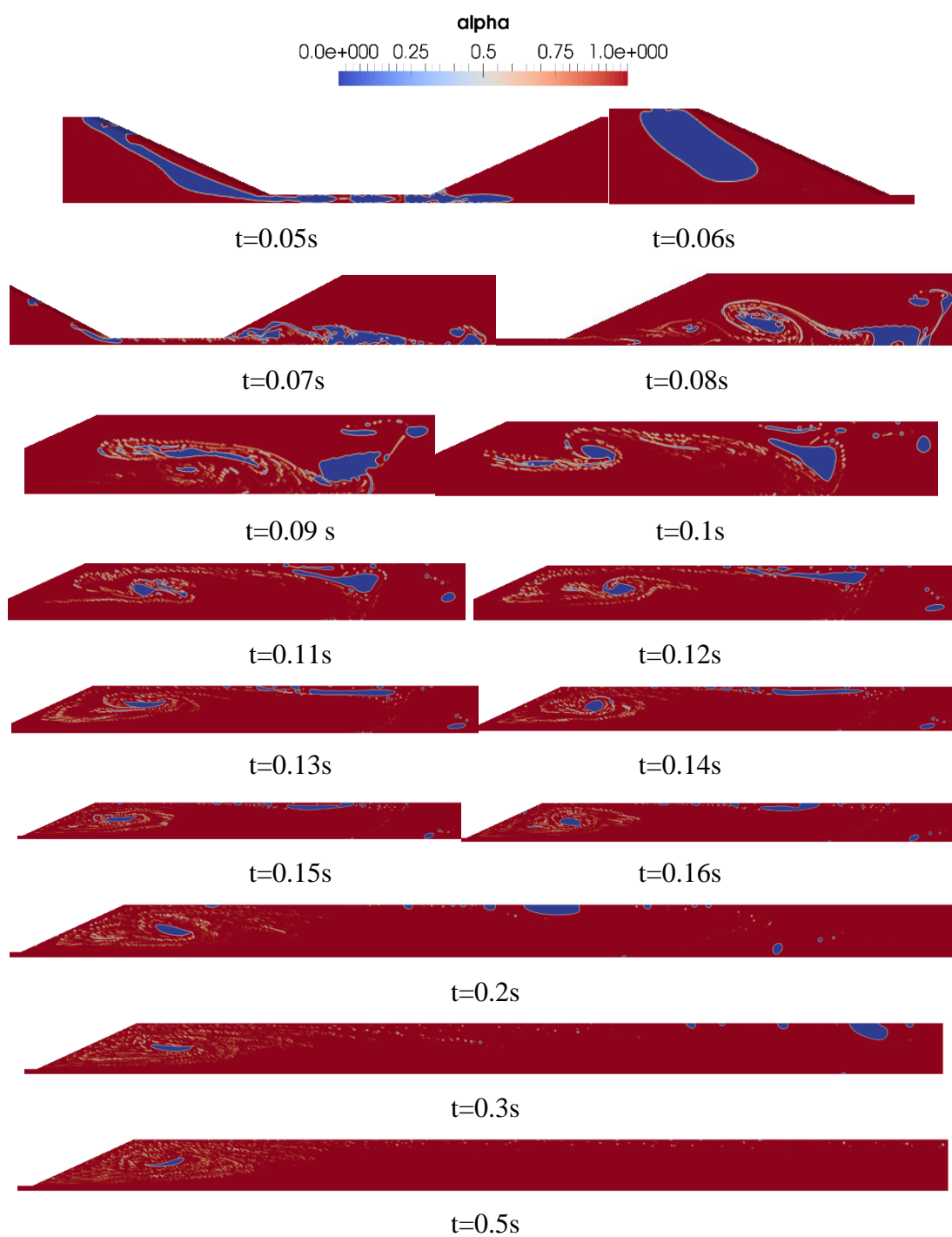
پوست



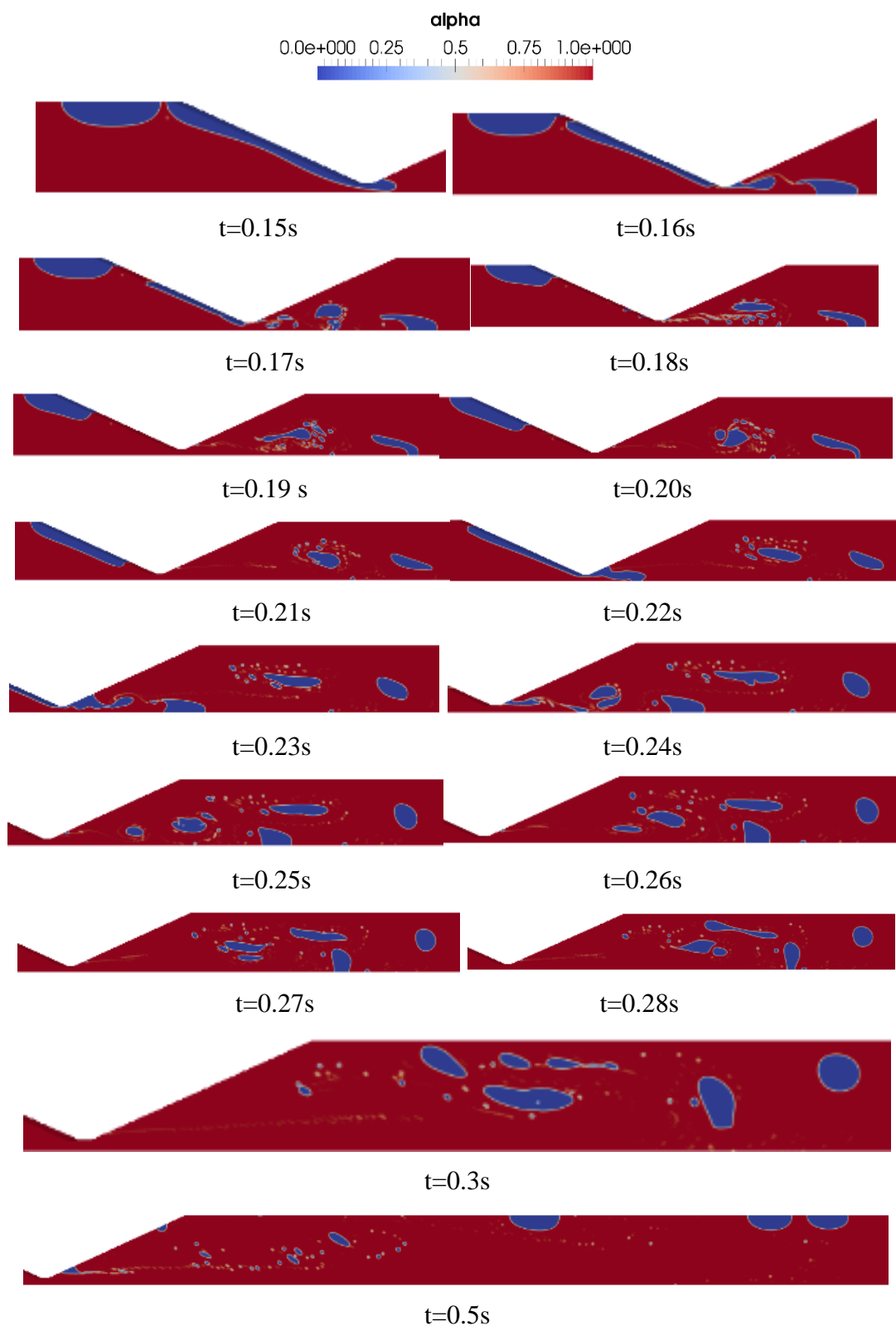
شکل ۱-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه (Num.11)



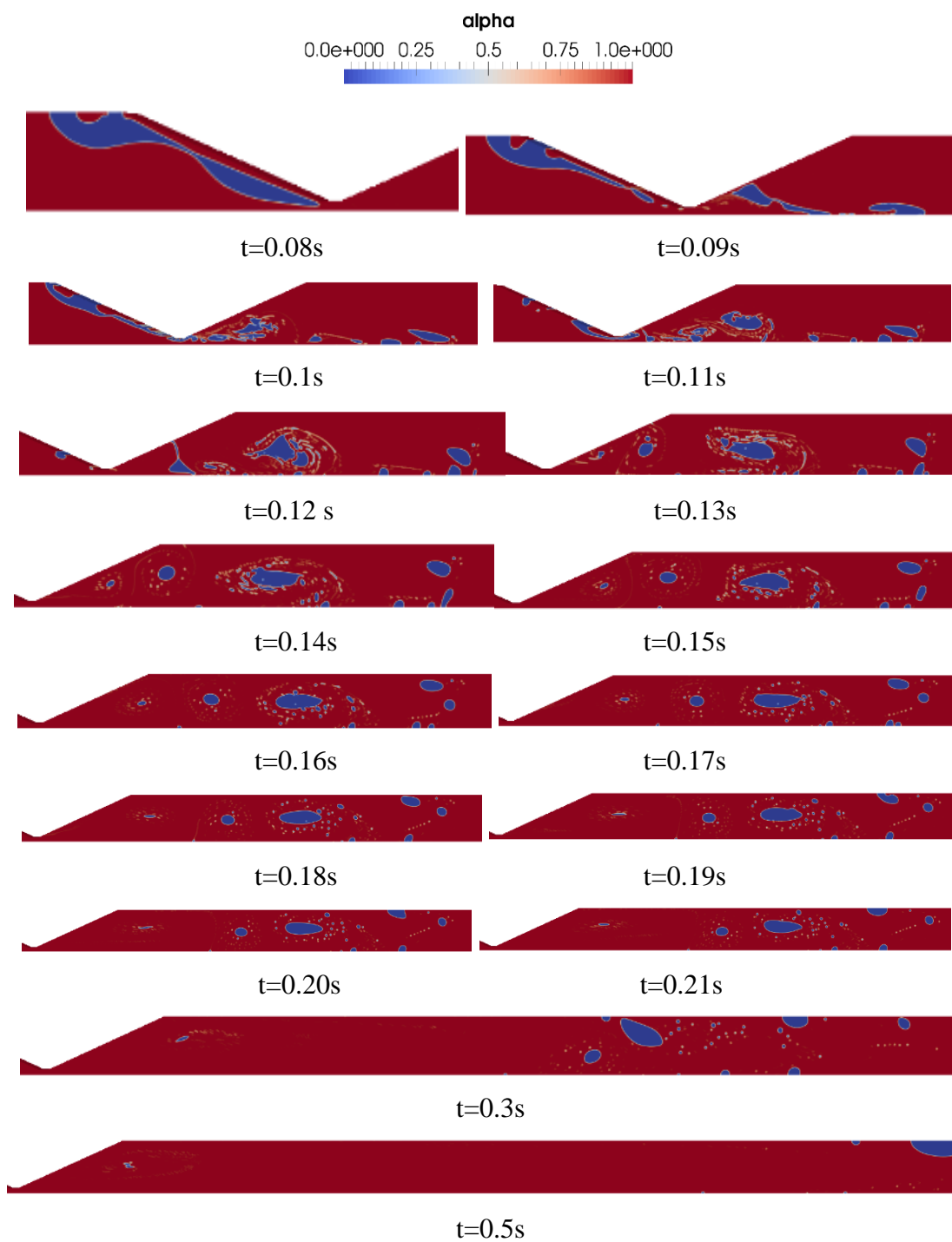
شکل ۵-۲. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه (Num.12)



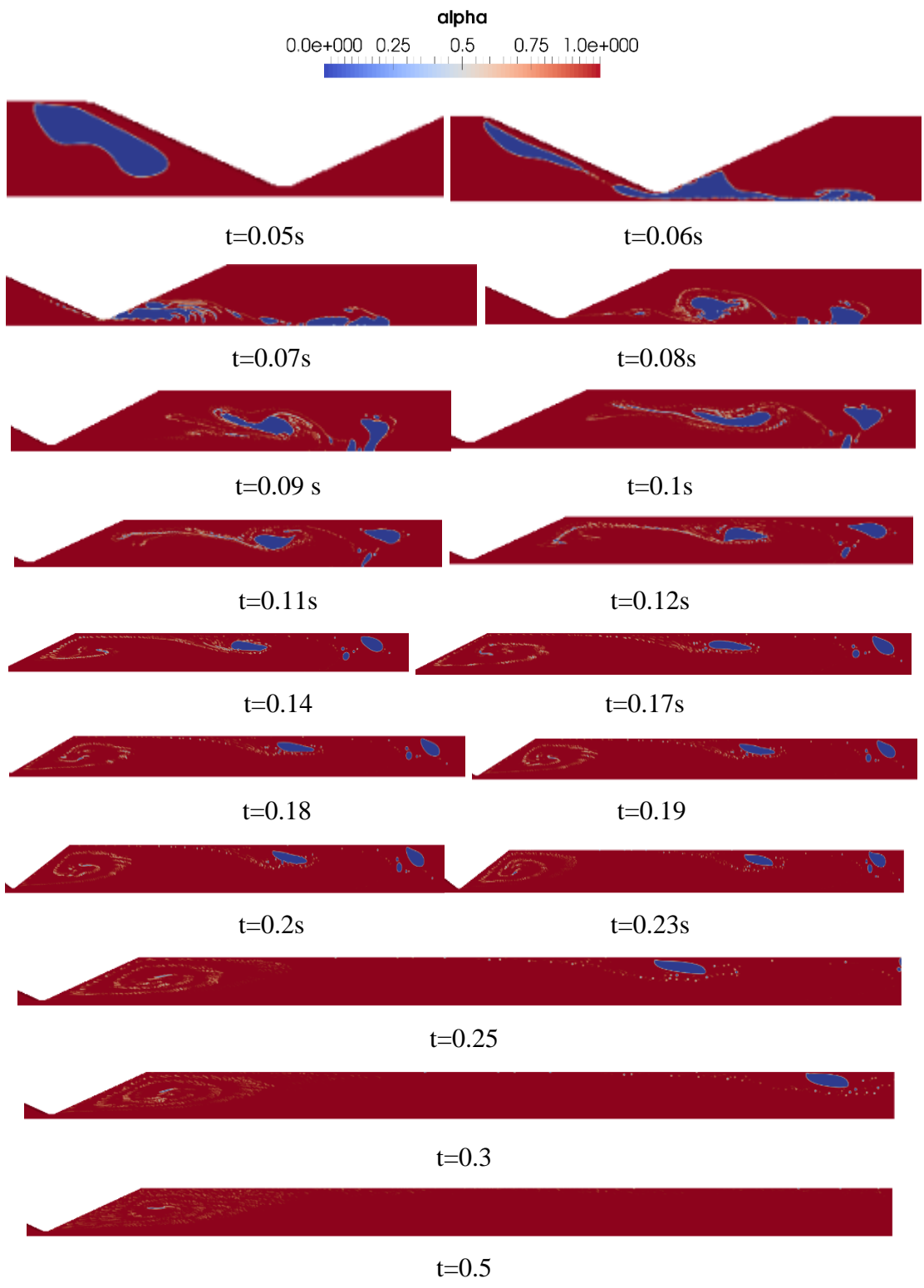
شکل ۵-۳. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره ۱، در سرعت جریان آب ۰٫۹ متر بر ثانیه (Num.13)



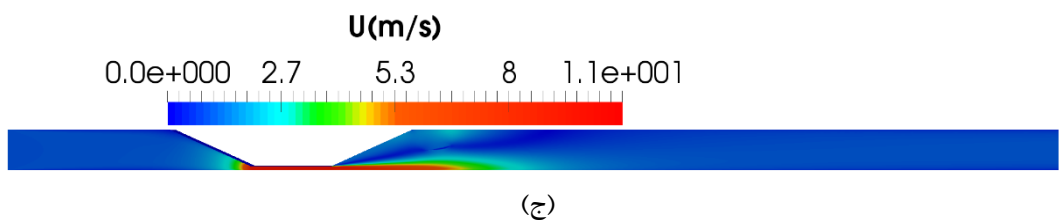
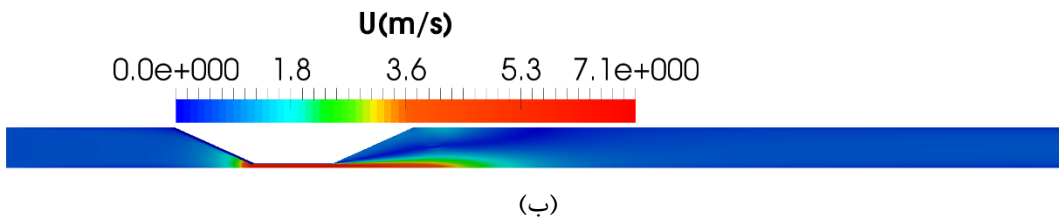
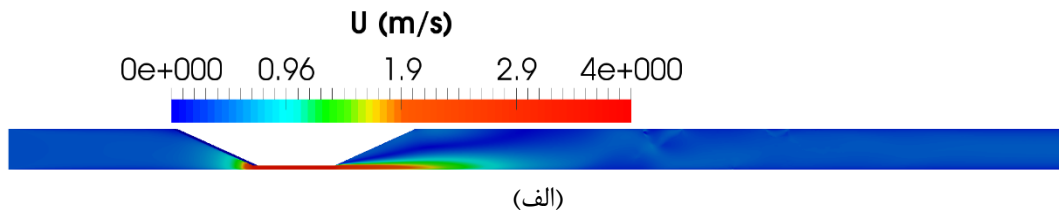
شکل ۴-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره 2، در سرعت جریان آب ۰,۳۳ متر بر ثانیه (Num.21)



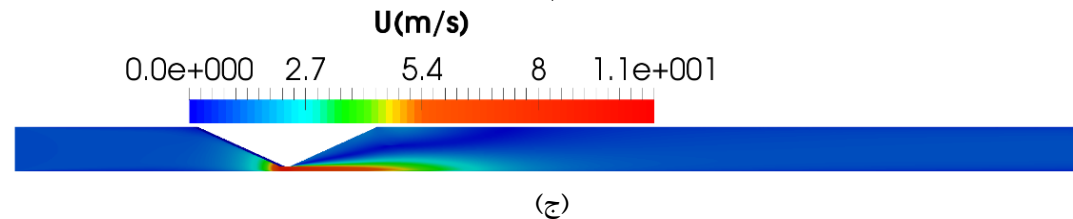
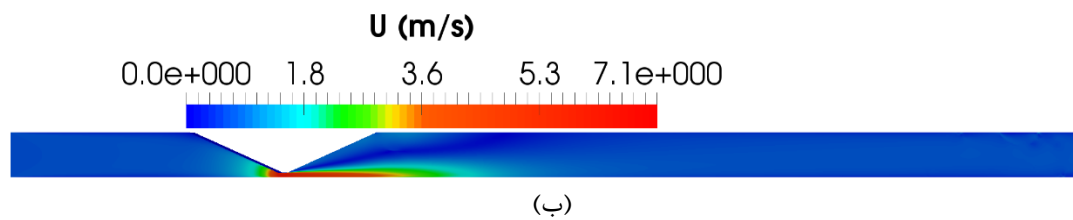
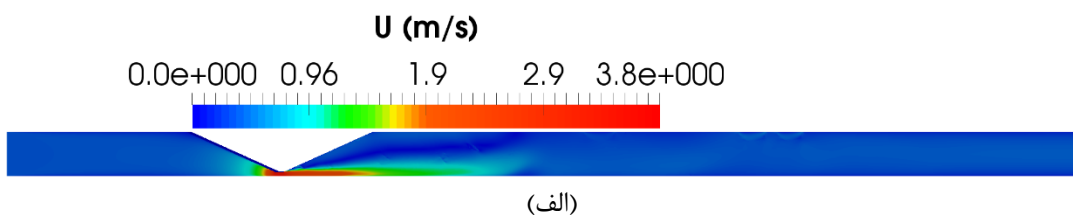
شکل ۵-۵. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره 2، در سرعت جریان آب ۰,۶ متر بر ثانیه (Num.22)



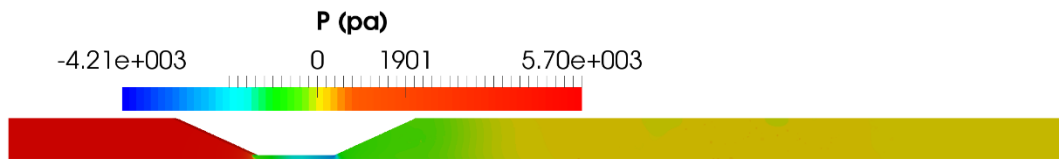
شکل ۵-۶. فرآیند خروج حباب از گلوگاه و فروپاشی و تشکیل میکرو حباب در مدل شماره 2، در سرعت جریان آب ۰,۹ متر بر ثانیه (Num.23)



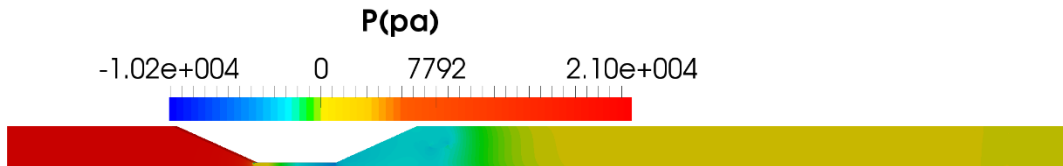
شکل ۵-۷. توزیع سرعت در لوله ونتوری مدل شماره ۱: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه



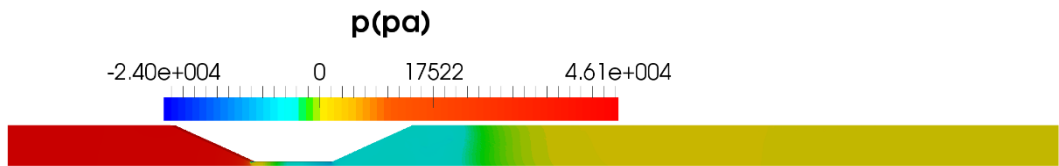
شکل ۵-۸. توزیع سرعت در لوله ونتوری مدل شماره ۲: الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه



(الف)

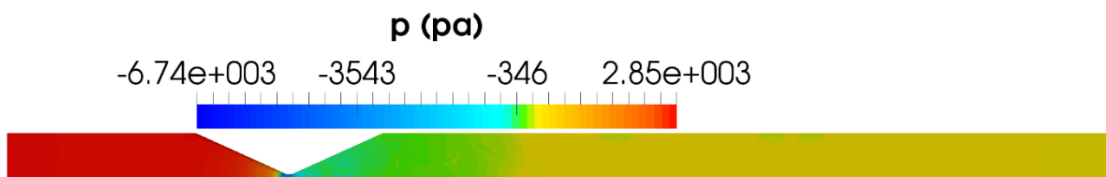


(ب)

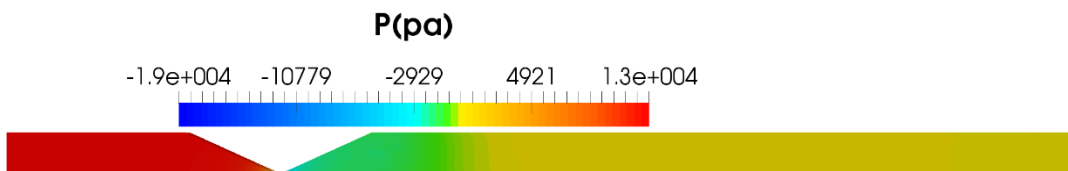


(ج)

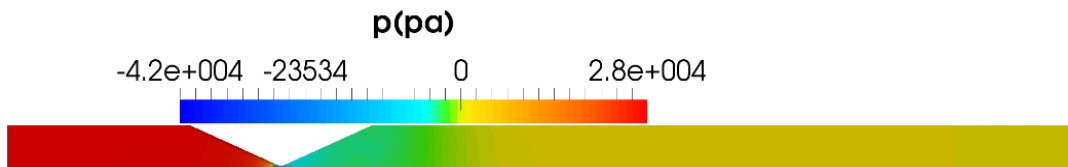
شکل ۵-۹. توزیع فشار در لوله ونتوری مدل شماره ۱ : الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه



(الف)

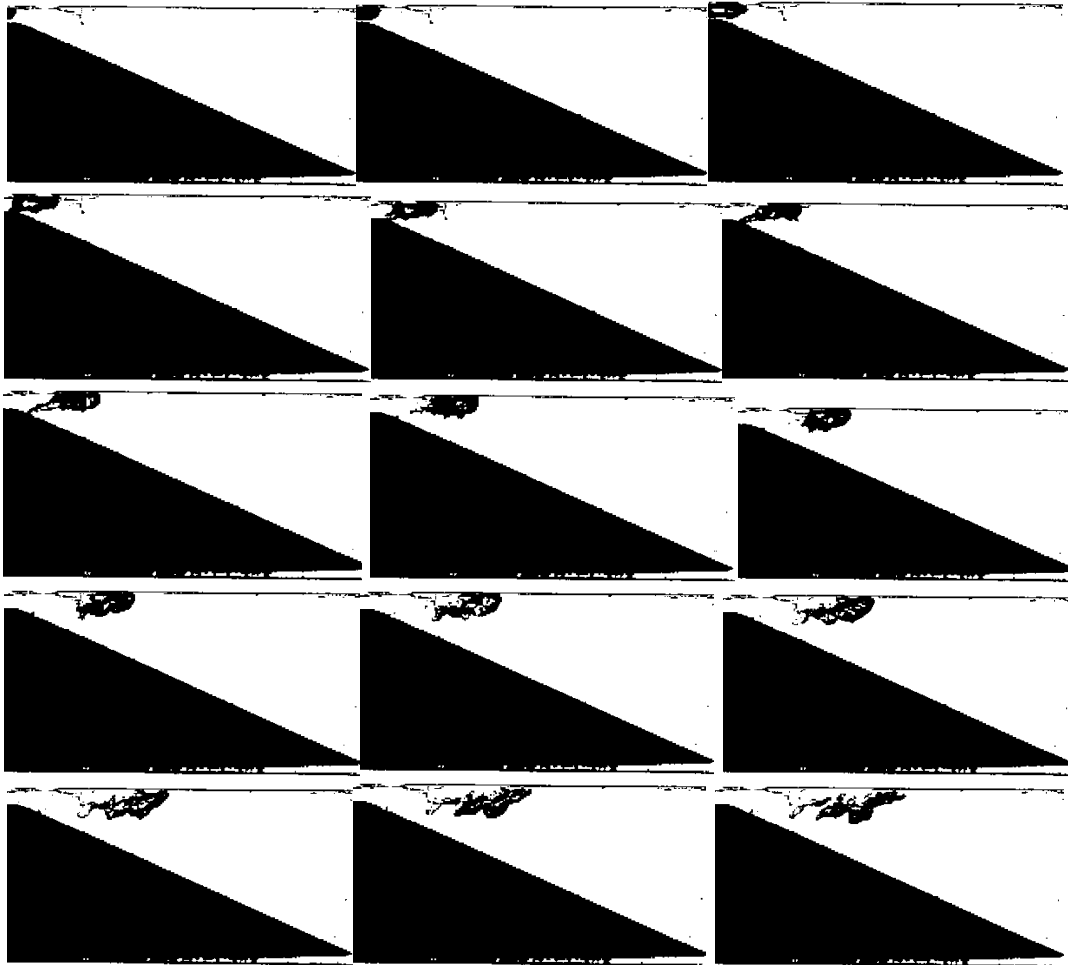


(ب)

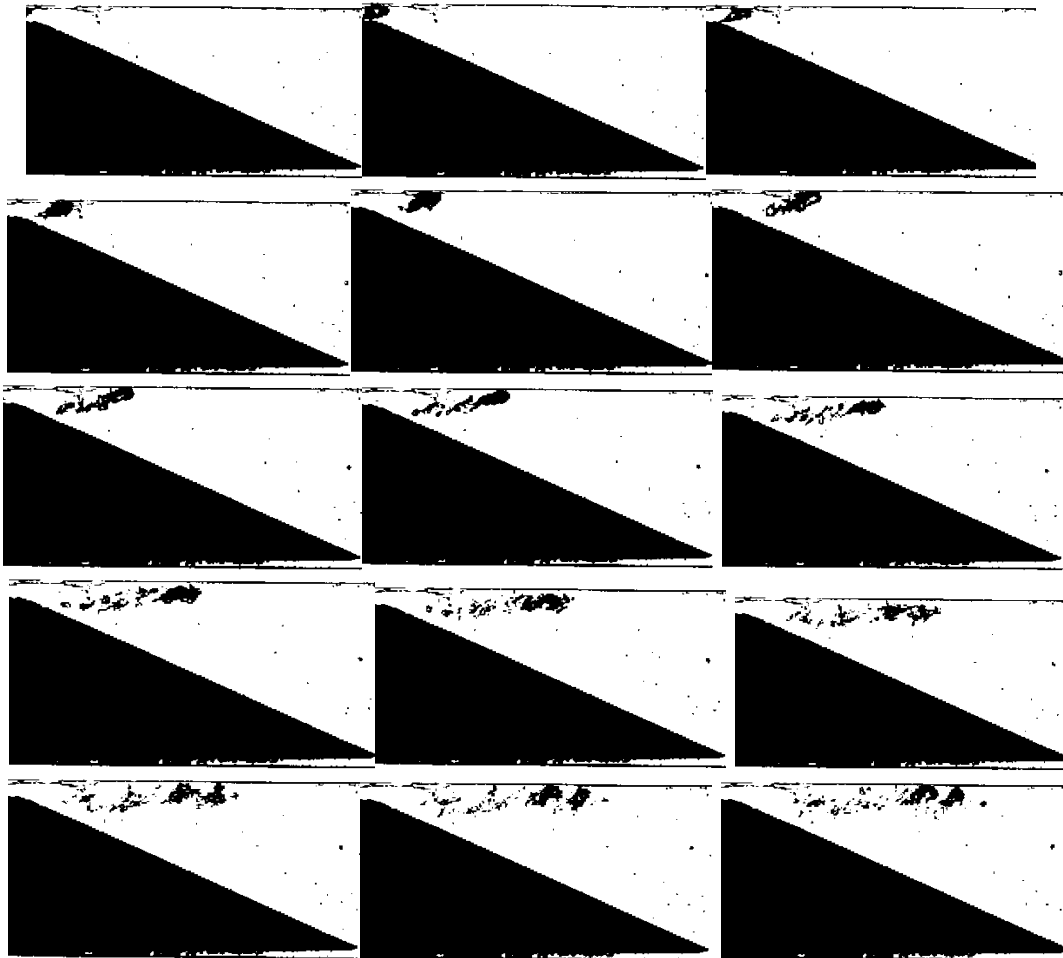


(ج)

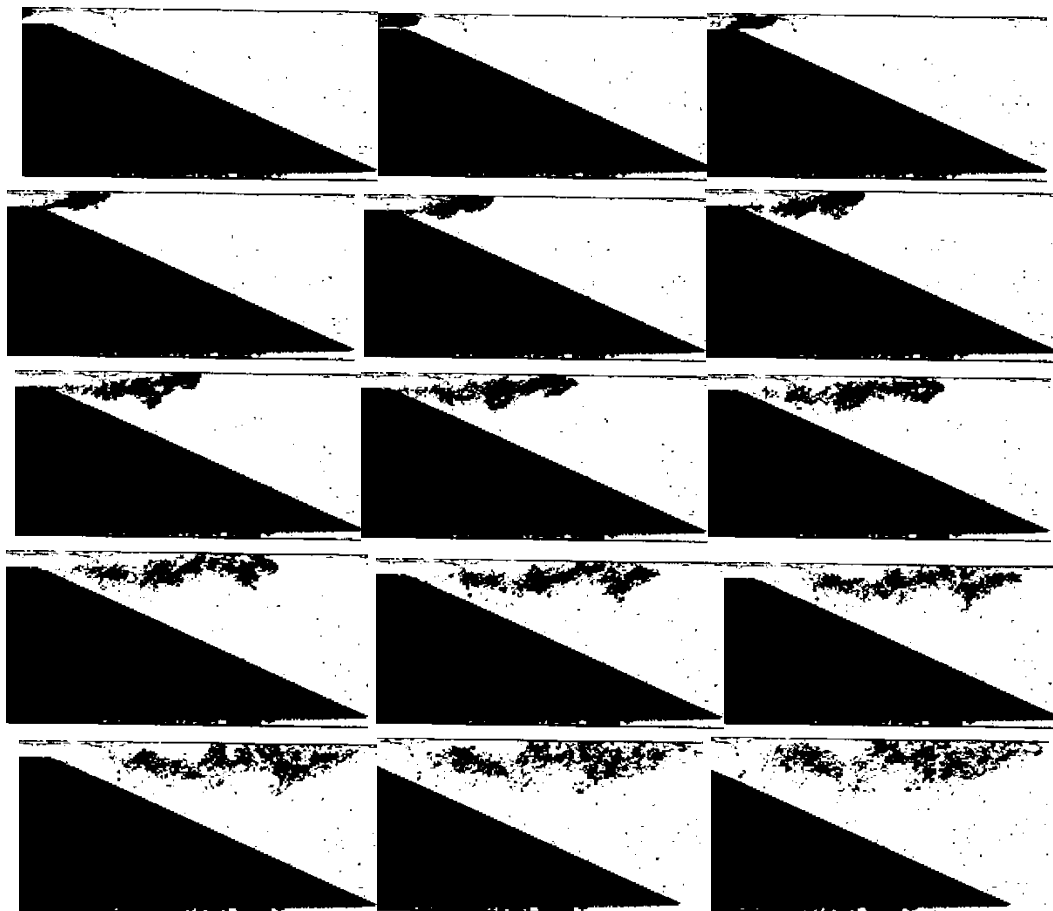
شکل ۵-۱۰. توزیع فشار در لوله ونتوری مدل شماره ۲ : الف) سرعت جریان آب = ۰,۳۳ متر بر ثانیه، ب) سرعت جریان آب = ۰,۶ متر بر ثانیه، ج) سرعت جریان آب = ۰,۹ متر بر ثانیه



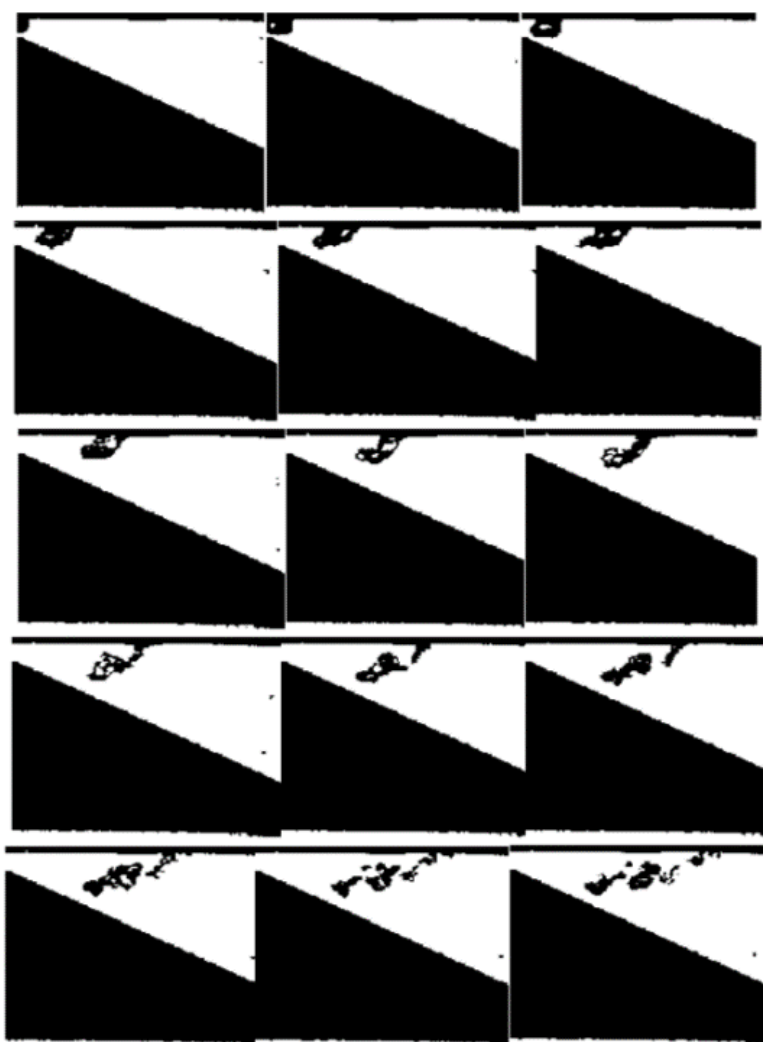
شکل ۵-۱۱. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰٫۱۶ لیتر بر ثانیه



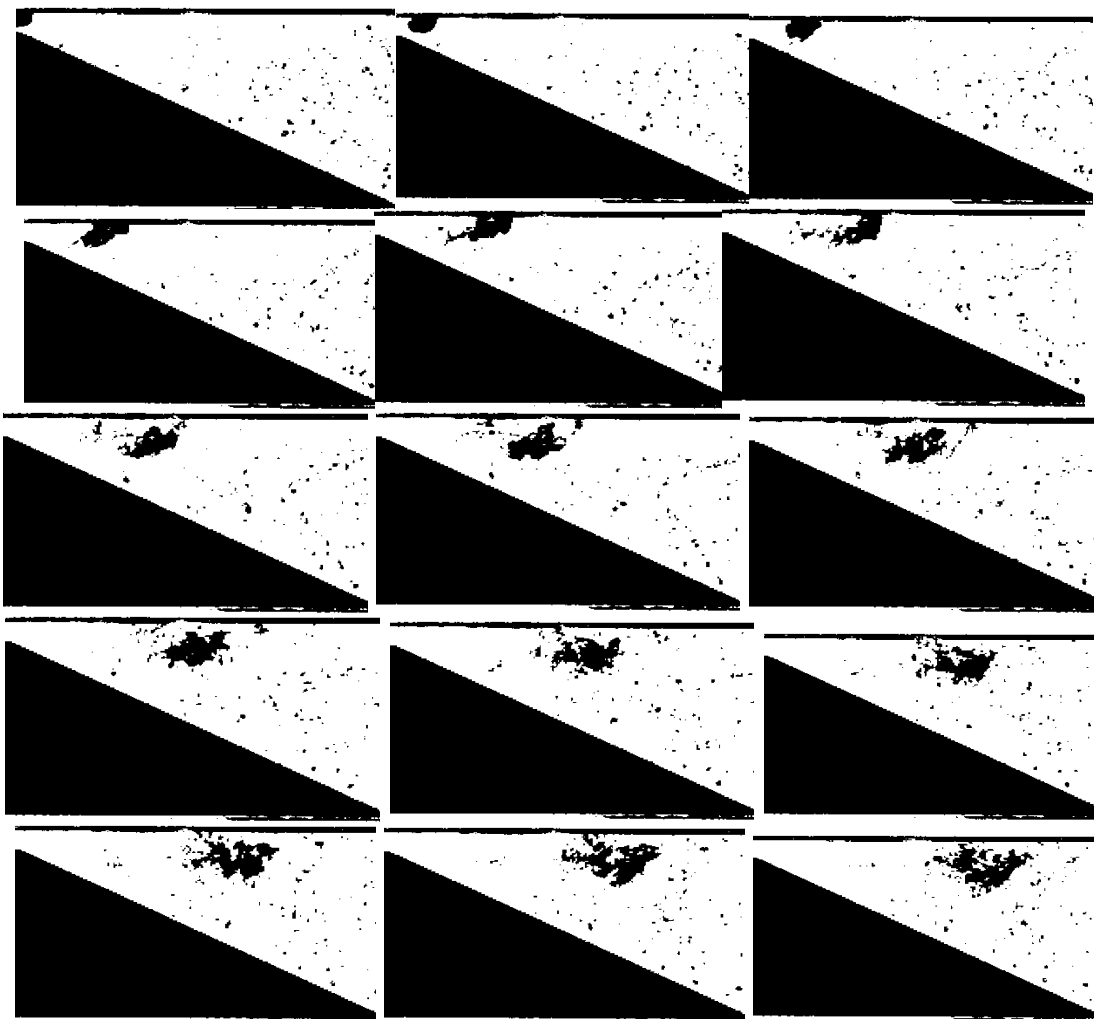
شکل ۵-۱۲. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه



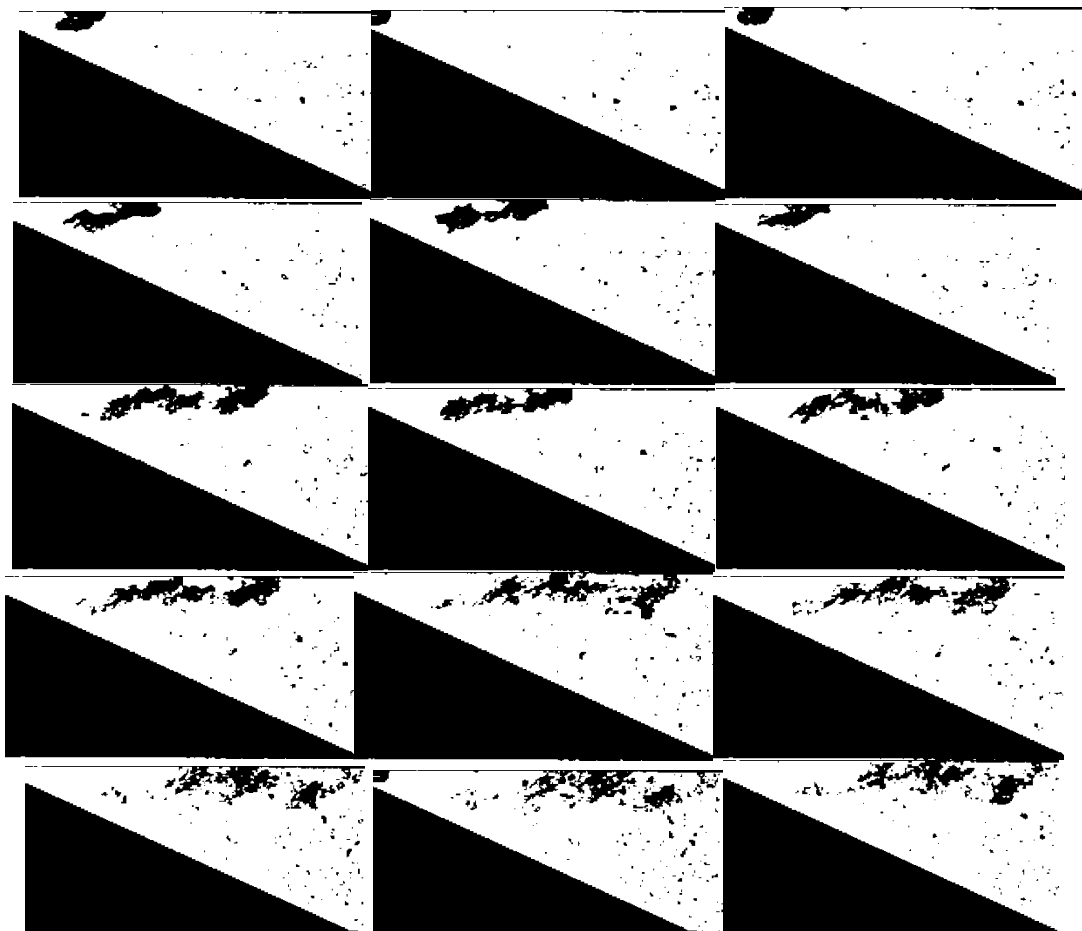
شکل ۵-۱۳. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۱ با دبی ۰,۴۲ لیتر بر ثانیه



شکل ۵-۱۴. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۱۶ لیتر بر ثانیه



شکل ۵-۱۵. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۲۹ لیتر بر ثانیه



شکل ۵-۱۶. شکستن حباب‌ها بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰,۴۲ لیتر بر ثانیه

مرجع

- Achou Y.D., (2016), Master Thesis, "Dispersed Two-Phase Flow Simulation and Parameter Optimisation", Master in Applied Mathematics, University of Oslo.
- Agarwal A., Jern Ng W. and Liu Y. (2011) "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment" *Chemosphere.*, 84, pp 1175–1180.
- Ago K.-i., Nagasawa K., Takita J., Itano R., Morii N., Matsuda K., Takahashi K. (2005) "Development of an Aerobic Cultivation System by Using a Microbubble Aeration Technology" *Journal of Chemical Engineering of Japan.* 38 (9) 757–762.
- Ahmadvand F. and Talaie MR. (2010) "CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber" *Chem.Eng.J.*;160(2):423–431.
- Allouch A. et al. (2014) "Microbubbles for optofluidics: controlled defects in bubble crystals" *Microfluid. Nanofluid.* 1.
- Alves G.E., (1954), " Co-Current Liquide-Gas Flow in a Pipe Line Contactor", *Chem. Prosess. Engng*, 50(9), 449-456.
- Amaral C. E. F. do, Alves R. F., Silva M. J. da, Arruda L. V. R., Dorini L., Morales R. E. M., Pipa D. R. (2013) "Image Processing Techniques for High-Speed Videometry in Horizontal Two-Phase Slug Flow" *Flow Measurement and Instrumentation.* 33, pp 257-264.
- Anderson JD. (1995) "Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications". McGraw-Hill, New York.
- Andreussi P. and Persen L.N. (1987) "Stratified gas-liquid flow in downwardly inclined pipes" *Int. J. Multiphase flow.* 13, pp 565-575.
- Andriy G., Svanera M., Benini S., Poesio P., Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 70, January 2016, Pages 51-60, doi. Org /10.1016/j. expthermflusci.2015.08.014
- Ansari M.R. (1989), Ph.D. Thesis "Slug mechanism in horizontal duct and simulation based on one-dimensional two-fluid dynamics", Tsukuba University, Japan.
- Ansari M.R. and Daramizadeh A. (2012) "Slug type hydrodynamic instability

equations hyperbolic two-pressure, two-fluid model" Ocean analysis using a five Engineering journal, vol. 52, pp 1–12.

Asadi H. and Hormozi F. (2014) "Develop a high speed photography technique and image processing to determine the bubble characteristics in the bubble column" NSMSI .32(4), 71-80 journal,

Atkins P. and de Paula J. (2006) "Atkins Physical Chemistry" Oxford University Press, oxford 8th edition.

Azzopardi B. J. and Hewitt G. F. (1997) "Maximum drop sizes in gas-liquid flows" Multiphase Science Technology., 9(2):109-204. DOI: 10.1615/MultScienTechn.v9.i2.10.

Baker O. (1954) "Simultaneous flow of oil and gas" Oil Gas J., 53, 185–195

Baker O. (1975) "Gas=liquid flow in pipeline, II. Design manual" AGA-API project NX-28.

Barnea D., Shoham O., Taitel Y., Dukler A.E., (1980) "Flow pattern transition for gas liquid flow in horizontal and inclined pipes" Int. J. Multiphase Flow., 6, pp 217-225.

BAYLAR A., AYDIN M. C., UNSAL M., OZKAN F. "Numerical modeling of Venturi flows for determining air injection rates using Fluent" v.

Beggs H.D. and Brill J.P (May, 1973) "A study of two-phase Flow in Inclined pipes" J.pet.Tech. pp 607-617.

Bui Dinh T. and Choi T.S. (1999) "Application of Image Processing Techniques in Air/Water Two Phase Flow" Mechanics Research Communications, Vo. 26, No. 4, pp. 463-468.

Collier J.G., Thome J.R., (1996) " Convective Boiling and Condensation" Third Edition, Clarendon Press Oxford, pp 11-17.

Clift R., Grace J. R. and Weber M. E. (2005) "Bubbles, Drops and particles", Dover publications, Mineola.

Das K., Biswas MN. (2006) "Studies on ejector-venturi fume scrubber" Chem. Eng. J. 119(2): 153–160.

Debellefontaine H., Crispel S., Reilhac P., Périéb F., Foussard J.-N., (1999) "Wetair oxidation (WAO) for the treatment of industrial waste water and domestic sludge. Design of bubble column reactors" Chemical Engineering Science 54 (21) 4953–4959.

Finkelstein Y, Tamir A. (1985) "Formation of gas bubbles in supersaturated solutions

of gases in water” Aiche J., 31, pp 1409-1419

Flynn H. G., (1964), “Physics of acoustic cavitation in liquids”, In: Physical Acoustics, Principles and Methods, Vol. 1 Part B. New York: Academic Press, pp 57-172

Forrester S. E., Rielly C. D. and Carpenter K. J. (1998) “Gas-Inducing Impeller Design and Performance Characteristics”, Chem. Eng. Sci., 53, pp 603-615

Fujiwara A. (2006) “Microbubble generation using venturi tube”. ECO Industry, 11, pp 27-30

Fujiwara A., Okamoto K., Hashiguchi K., Peixinho J., Takagi S., Matsumoto Y., (2007). "Bubble Breakup Phenomena in a Venturi Tube" 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM2007-37243, San Diego, CA, pp. 553e560.

Fujiwara A., Takagi S., Watanabe K. and Matsumoto Y. (2003), “Experimental study on the new micro-bubble generator and its application to water purification system”. 4th Proceeding of the ASME/SME. Honolulu, United States

Gabbard C., Development of a Venturi type bubble generator for use in the molten-salt reactor xenon removal system, ORNL-TM-4122.

Gaitan D. F., Crum L. A., Church C. C. et al. (1992). “Sonoluminescence and Bubble Dynamics for A Single, Stable, Cavitation Bubble,” J. The Acoustical Society of America, 91, 3166-3183.

Gourich B., Vial C., Souلامي M.B., Zoulalian A., Ziyad M. (2008). "Comparison of hydrodynamic and mass transfer performances of an emulsion loop-venturi reactor in cocurrent downflow and upflow configurations. Chem. Eng. J. 140(1–3):439–447.

Govier G.W, Aziz K., (1972) "The flow of complex mixtures in pipes", Van Nostrand Reinhold Co. the University of Michigan.

Grolman E., Commandeur N., de Baat E., Fortuin J., (1996). “Wavy-to slug flow Transition in slightly inclined gas-liquid pipe flow”. AIChE J 42, pp 901-907

Gupta B., Nayak A.K., Kandar T.K. and Nair S. (2016) “Investigation of air-water two phase flow through a venturi,” Exp. Therm. Fluid. Sci 70, 148–154.

Halliday D., Resnick R., Krane K.S. (1992). "Physics", Volume 1, 4th Edition, Wiley.

Han M. and Dockko S. (1998) "Zeta potential measurement of bubbles in DAF process and its effect on the removal efficiency", KSCE Journal of Civil Engineering 2. 446–461.

Han M., Park Y. and Yu T. J. (2002b) “Development of A New Method of Measuring

Bubble Size,” *Water Sci. & Tech.: Water Supply*, 2, 77-83

Han M., Park Y., Lee j. and Shim j. (2002). “Effect of Pressure on bubble size in dissolved air flotation”. *Water Sci. & Tech.; Water Supply*, 2, pp 41-46.

Hasegawa H., Nagasaka Y., Kataoka H., (2008) "Electrical potential of microbubble generated by shear flow in pipe with slits", *Fluid Dynamic and Research* 40. 554–564.

Hashimoto M. et al. (2006). "Flowing lattices of bubbles as tunable", self-assembled diffraction gratings. *Small* 2.

Hewitt G. and Taylor N. S. (1970) “Annular two-phase flow”. Pergamon Press, Oxford

Himuro S., (2007) "Physicochemical characteristics of microbubbles", *Kagaku Kogaku* 71 165–169.

Hirt.C.W and Nicholos.B.D. (1981) "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS* 39, 201-225.

Holl J.William, (1970) “Nuclei and Cavitation”, *J. Basic Eng.* 1970; 92(4):681-688.
 .doi:10.1115/1.3425105

<http://www.sourceforge.net>

Johnson B. D., Gershey R.M., Cooke R.C. and Sutcliffe W.H. Jr. (1982); “A Theoretical Model for Bubble Formation at a Frit Surface in a Shear Field”, *Sep. Sci. Technol.* 17, pp 1027-1039.

Kabiri Samani A., (2009) "Fluctuating Characteristics of Two-Phase Air-Water Slug Flow in Pressurized Pipelines", *Iran water and wastewater association*, 20(2), 62-68.

Kanagawa T. "Focused ultrasound propagation in water containing many therapeutical Micro-bubbles", Paper OS6-04-4, Proc. of FLUCOME 2013, 12th Intern. Conf., Nara, Japan, November 2013.

Kawaraha A, Sadatomi M., Matsuyama F., Matsuura H. (2009) "Prediction of microbubble dissolution characteristics in water and sea water, *Experimental Thermal and Fluid Science* 33. 883–894.

Kawashima H, Fujiwara A., Saitoh Y., Hishida K., Kodama Y. "Experimental study of frictional drag reduction by microbubbles: Laser measurement and bubble generator", *Proceeding of the Fifth Symposium on Smart Control of Turbulence*, Tokyo, Japan, February, 2004.

Kiuru H. J. (2001) "Development of Dissolved Air Flotation Technology from the First Generation to the Newest (Third) One (DAF in Turbulent Flow Conditions)," *Water Science and Technology*, 43, 1-7.

Klostermann J., Schaake K., Schwarze R. (2012) "Numerical simulation of a single rising bubble by VOF with surface compression" *International Journal for Numerical Methods in Fluid*.

Kodama Y. (2007) "Reduction in ship's resistance by microbubbles" *Kagaku Kogaku* 71. 186–188.

Kooiman K., et al. (2011) "Sonoporation of endothelial cells by vibrating targeted microbubbles" *J. Controlled Release* 154, 35.

Krishnan E. R. (2007) "Fluid Mechanics: An Introduction", Prentice-Hall of India.

Krishnan R. N., Vivek S., Chatterjee D., Das S. K. (2010), 'Performance of numerical schemes in the simulation of two-phase free flows and wall bounded mini Science journal, vol. 65, pp 5117–5136 channel flows', *Chemical Engineering*

Kurup N and Naik P. (2010) "Microbubbles: a novel delivery system" *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Health Care* 2. 228–234.

Kuznetsova L.A. and Coakley W.T. (2007) "Applications of ultrasound streaming and radiation force in biosensors" *Biosens. Bioelectron.* 22, 1567.

Langhaar HL. (1951) "Dimensional Analysis and the Theory of Models. Wiley, New York.

Lee J.H. et al. (2012) "Mobile oscillating bubble actuated by AC-electrowetting-ondielectric for microfluidic mixing enhancement" *Sens. Actuators, A* 182, 153.

Levy S. (1999) "Two-phase flow in complex systems". John Wiley & Sons, Inc., New York, pp 159-161

Li H., Hu L. and Xia Z. (2013). "Impact of groundwater salinity on bioremediation enhanced by micro-nano bubbles". *Materials*, 6, pp 3676-3687.

Li P. (2006) "Development of Advanced Water Treatment Technology Using Microbubbles" Dissertation of Keio University, Japan.

Li P. and Tsuge H. (2006) "Water treatment by induced air flotation microbubbles". *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 39(8): pp 896-903.

Li P., Tsuge H., Itoh K., (2009) "Oxidation of dimethyl sulfoxide in aqueous solution using microbubbles", *Industrial and Engineering Chemistry Research* 48, 8048–8053.

Ljuggren S. and Eriksson J.C. (1997) "The lifetime of colloid-sized gas bubble in

water and the cause of hydrophobic attraction". Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects, pp 129-130, pp 151-155

Madavan N.K. et al., (1984) "Reduction of turbulent skin friction by Micro-bubbles" Physics of Fluids, Vol.27, p.356.

Mandhane J.M., Gregory G.A., Aziz K., (1974), 'A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes', Int. J. Multiphase Flow, vol. 1, pp 537-553

Manzano J., Palau C.V., Azevedo B.M. DE., Bomfim G. V. DO., Vasconcelos D. V., (2016) "Geometry and Head Loss In Venturi Injectors Through Computational Fluid Dynamics" Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p482-491>.

Martin CS. (1976), "Entrapped air in pipelines", Proceeding of the second international conference on pressure purges, London, September 22-24, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England

Mattew P., Peramaki P.E., Mark D., And Nelson P.E. (2000) "The significance of two-phase flow regimes in designing multi-phase extractin systems", LBG Article, www.lbgweb.com.

Millero F.J. (2001). "The Physical Chemistry of Natural Waters". Wiley – Interscience,

Miyahara T. and Tanaka A. (1997), "Size of Bubbles Generated from Porous Plates", J. Chem. Eng. Japan, 30, pp 353-355.

Nanomaterials Database | STATNANO, statnano.com.12.06.2018

Oh J.S. et al. (2014) "Drug perfusion enhancement in tissue model by steady streaming induced by oscillating microbubbles" Comput. Biol. Med. 44, 37.

Ohnari H. (1997) "Waste Water Purification in Wide Water Area by Use of Micro-Bubble Techniques," Japanese J. Mutiphase Flow, 11, 263-266.

Ohnari H. (2002) "Water Purification of Ocean Environment and Revival of Fisheries Cultivation Using Micro Bubble Technology," The 21st Symposium on Multiphase Flow, Nagoya, Japan, July (2002)

Ohnari H. (2003) "Application of microbubble technology to fishery," Chemical Engineering, 67, 130-141.(In Japanese).

Ohnari H., (2014) "All about microbubbles", Nihin Jitsugyo Shuppanasha.

Ohnari H., Saga T., Watanabe K., Maeda K. and Matsuo K. (1999) "High Functional Characteristics of Micro-bubbles and Water Purification," Resources Processing, 46, 238-244.

Oliveira C. and Rubio J. (2011) "Zeta potential of single and polymer coated microbubbles using an adapted microelectrophoresis technique, *International Journal of Mineral Processing* 98. 118–123.

OpenFOAM, The open source CFD toolbox, Programmers Guide, GNU Free documentation, 2009.

OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox User Guide. Version 3.0.1 13th December 2015

Prevenslik T. (2014) "Stability of nanobubbles by quantum mechanics", *Proc. of Conf. 'Topical Problems of Fluid Mechanics'*, p. 113, Prague.

Pulley RA. (1997) "Modelling the performance of venturi scrubbers". *Chem. Eng. J.* 67(1):9–18.

Qi L. and Chen L. (2014) "Numerical research on the hydraulic characteristics of venturi tube based on ANSYS-CFX," *Tech. Super. Pet. Ind* 6, 41–45.

Quiroz-Pérez E., Vázquez-Román R., Llesco-Arroyo R., Barragán-Hernández V.M. (2014) "An approach to evaluate Venturi-device effects on gas wells production," *J. Pet. Sci. Eng.* 116(4), 8–18

Rodio M.G and Congedo P.M. (2014) "Robust analysis of cavitating flows in the Venturi tube," *Eur.J.Mech. B/Fluids* 44(2), 88–99.

Rodrigues R.T., Rubio J. (2003) "New Basis for Measuring the Size Distribution of Bubbles", *Miner Eng.*, 16, p. 757.

Rusche H. (2002) PHD thesis "Computational Fluid Mechanics of Dispersed Two Phase Flows at Higher Phase Fraction" University of London.

Sadatom M. and Kawahara A., (2008), Fluids mixer and fluids mixing method, Japanese Patent, JP. 2008–173631.

Sadatom M., Kawahara A., Kano K., Ohtomo A. (2005) "Performance of a new microbubble generator with a spherical body in a flowing water tube" *Experimental Thermal and Fluid Science* 29 (5). 615–623.

Sadatom M., Kawahara A., Matsuura H., Shikatani S., (2012) "Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube", *Experimental Thermal and Fluid Science* 41 (0), 23 – 30.

Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A., (2011) "A review on applications and challenges of nano fluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15,

Issue 3, pp 1646-1668,

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004041>.

Sandra C.K. De Schepper, Heynderickx G.J., Marin G.B., (2008), 'CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the Baker chart', *Chemical Engineering journal*, vol. 138, pp 349-357

Serizawa S., Inui T., Eugchi T., (2005) "Microbubble-containing milky air that rises in a vertical cylinder-flow characteristics and the phenomenon of pseudo-laminar flow of bubbles in an aqueous system", *Konsoryu* 19,335-343.

Shames I.H. (2003) "Mechanics of fluids", 4th edition, McGraw-Hil

Shen S.W., Yang M., Jiang Y.H., and Wang Z.Y. (2015) "The numerical simulation of the influence of Venturi burner's structure on rich/lean separation," *Journal of Engineering Thermophysics* 36(2), 347-350.

Stanislav J.F., Kokal S., Nicholson M.K., (1986), "Intermittent gas-liquid flow in upward inclined pipes". *Int. J. Multiphase Flow* 12, pp 325-335

Sun R.R. et al. (2014) "Development of therapeutic microbubbles for enhancing ultrasound-mediated gene delivery". *J. Controlled Release* 182, 111.

Sun Y.Q. and Niu W.Q. (2010) "Effects of Venturi structural parameters on the hydraulic performance," *J. Northwest. A & F. Uni* 38(2), 211-218.

Suslick K. S., Mcnamara III W.B. and Didenko Y. (1999) "Hot Spot Conditions During Multi-Bubble Cavitation," *Sonochemistry and Sonoluminescence*, Kluwer Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 191-204.

Tabei K., Haruyamu S., Yamaguchi S., Shirai H., Takakusagi F. (2007) "Study of microbubble generation by a swirl jet", *Journal of Environment Engineering* 2,172-182.

Takahashi M. (2005), "Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: Electrical Properties of the gas-water interface". *Journal of Physical Chemistry B*, 190(46): pp21858-21864.

Takahashi M. (2007), "Free Radical Generation from collapsing Micro bubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus". *J.Phys.Chem. B*, V: 111, pp 1343-1347.

Takahashi M. (2009). "Base and technological application of micro-bubble and nanobubble". *Mater. Integer*, 22, pp 2-19.

Takahashi S. (2005) "Engineering applications of microbubbles, in: T. Ishii, T. Tamura, T. Tsukada, K. Tsujii (Eds.)", *Concepts in Basic Bubble and Foam Engineering*, Techno System, Tokyo, pp. 463-474 (in Japanese).

Takamura F. (2004). “Course of Characteristics and Application of Microbubble”. Technical Information Center.

Takemura F. and Matsumoto Y. (2003) “Apparatus and Method for Fine Bubble Generation,” Japan Patent, 230824

Terasaka K. and Tsuge H. (1990) “Bubble formation at a single orifice in highly viscous liquids”. *J. Chem. Eng. Japan*, 23, pp 160-165.

Terasaka K. and Tsuge H. (1993) “Bubble Formation under Constant-Flow Condition,” *Chem. Eng. Sci.*, 48, 3417-3422.

Terasaka K., Hirabayashi A., Nishino T., Fujioka S. and Kobayashi D. (2011). “Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated Sludge”. *Chemical Engineering Science*. 66, pp 3172–3179

The American Heritage Dictionary of English Language. (2000), fourth ed., Houghton Mifflin Company, Boston, USA.

Tremblay-Darveau C., Williams R., Burns P.N. (2014) "Measuring absolute blood pressure using microbubbles". *Ultrasound Med. Biol.* 40, 775.

Tsuge H. (1986) “Hydrodynamics of Bubble Formation from Submerged Orifices,” *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Gulf Publishing Company, pp.191-232.

Tsuge H. (2014). “Micro- and Nano bubbles: Fundamentals and Applications”. CRC press.

Tsuge H. and Li P. (2006) “Water purification using microbubbles, *ECO Industry*, 11, 53-57 (In Japanese).

Tsuge H. (2010) "Fundamental of microbubbles and nanobubbles", *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan* 64, 4–10.

Tutsumi K. (2004), “Water treatment technology and facility in future”, *kagaku soti*, 1. Pp 71-80. (In Japanese)

Uesawa S., Kaneko A., Nomura Y., Abe Y. (2011). "Fluctuation of void fraction in the microbubble generator with a venturi tube" *Proceedings of the ASME-JSMEKSME Joint Fluids Engineering Conference*. AJK2011e10014, Japan.

Uesawa S., Kaneko A., Nomura Y., Abe Y. (2012). "Study on bubble breakup behavior in a venturi tube. *Multiph. Sci. Technol.* 24 (3), 257e277.

Ueyama S. and M.Miyamoto, (2006), “The world of Microbubbles”, *Kogyo Chosakai Publishing*, pp.58 (In Japanese).

Ushikubo F.Y., Forukawa T., Nakagawa R., Enari M., Makino Y., Kawagoe Y.,

Shiina T., Oshita S. (2010) "Evidence of the existence and the stability of nano- bubbles in water". *Colloids and Surface.*, Japan. pp 35-36

Viswanathan S. (1998) "Development of a pressure drop model for a variable throat venture scrubber". *Chem.Eng.J.* 71(2):153–160.

Vlyssides A. G., Mai S. T. and Barampouti E.M.P. (2004), "Bubbles size distribution formed by depressurizing air-saturated water", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, pp 2775-2780.

Wang C. (2012). "Efficient manipulation of microparticles in bubble streaming flows". *Bio micro fluidics* 6, 012801.

Wang X.J., Tang L., and Jiang Z. (2014) "Numerical simulation of venturi ejector reactor in yellow phosphorus purification system," *Nucl. Eng. Des* 268, 18–23.

Watanabe Y. et al. (2008) "Low-intensity ultrasound and microbubbles enhance the antitumor effect of cisplatin" *Cancer Sci.* 99, 2525.

Watanabe K. et al. "Washing effect of Micro-bubbles", Paper OS1-01-1, Proc. of FLUCOME 2013, 12th Intern. Conf., Nara, Japan, November 2013.

WENDT J. F. (2009) "Computational fluid dynamics: an introduction". Chaussee de Waterloo: A Von Karman Institute Book, 333 p.

White F.M. (2011) "Fluid Mechanics". Seventh Edition. McGraw-Hill, p277-279, p301-305

Wilcox DC. (2006) "Turbulence modeling for CFD, third edition", DCW industries, Inc. p130

The open source CFD toolbox, OpenFOAM,[Online], www.openfoam.com

Yazawa T., Nakamichi H., Tanaka H. and Eguchi K. (1988) "Permeation of Liquid through Porous Glass Membrane with surface Modification", *J. Ceram. Soc. Japan.* 96, pp 18-23

Yoon H.R., Yordan J.L. (1986) "Zeta potential measurements on microbubbles generated using various surfactants" *Journal of Colloid and Interface* 113, 430–438.

Zhang J.X. (2017) "Analysis on the effect of venturi tube structural parameters on fluid flow" Citation: *AIP Advances* 7, 065315, doi: 10.1063/1.4991441

Zhao L, Mo Z., Sun L., Xie G., Liu H., Du M., Tang J. (2017) "A visualized study of the motion of individual bubbles in a venturi- type bubble generator", *Progress in Nuclear Energy* 97, 74-89

Zhou Y., Shun Z., Gu H. and Miao Z. (2015) "Injection performance and influencing factors in self-priming Venturi scrubber," *Ciesc Journal* 66(1), 99–103

Zhu Y., Chao M.A. and Zhang X.W. (2002) "Study on flow in Venturi-mixer EGR for a turbo charged diesel engine," Transactions of Csice (6), 546–550

Zimmerman W. B. et al. (2013) "Evaporation dynamics of Micro-bubbles", Chemical Engineering Science, Vol. 101, p. 865.

Zimmerman W.B. et al. (2011). "Design of an airlift bioreactor and pilot scale studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella Salina*". Appl. Energy 88, 335.

اسدی ح؛ و هرمزی ف. (۱۳۹۲) «توسعه روش عکس برداری پرسرعت و پردازش تصویر در تعیین ویژگی‌های جریان حباب در ستون حبابی» نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، شماره ۴، دوره ۳۲. انصاری م؛ و پروین کردستانی ب، (۱۳۸۶) «اثر شیب‌دار بودن لوله بر پایداری جریان دوفازی نفت-گاز» اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته، تهران، موسسه اطلاع‌رسانی نفت، گاز و پتروشیمی، سالن اجلاس سران کشورهای اسلامی.

انصاری، م، ادیبی، پ، سلیمی، ا؛ و حبیب پور، ب. (۱۳۹۲) «شبیه‌سازی رژیم‌های جریان دوفازی گاز-مایع در کانال افقی» پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها.

کبیری سامانی ع. (۱۳۸۷) «بررسی مشخصات نوسانی جریان تپشی دوفازی آب- هوا در مجاری تحت فشار» نشریه آب و فاضلاب، شماره ۲.

کبیری سامانی ع. برقی م؛ و سعیدی م. (۱۳۸۵) «الگوهای جریان دوفازی آب‌وهوا در تونل‌های آب بر افقی و با شیب کم» فصلنامه علمی و پژوهشی شریف، شماره ۳۵.

گونزالس سی. ر، وودز ای، ادینز ال. ا. (۱۳۹۱) «پردازش تصویر با زبان Matlab» ترجمه جعفر نژاد قمی ع، چاپ دوم، موسسه انتشاراتی علوم رایانه، بابل، ص. ۱۰-۱۲.

Abstract

.....

In this thesis, the formation of microbubbles inside venturi tube is studied via numerical and experimental methods. Micro-nano bubble is one of the newest technologies in the field of nano-fluidics. Its applications include flotation of particles in the liquid, water and wastewater treatment, drag reduction, medicine and health, aquaculture and agriculture, especially hydroponic cultivation.

In this research, various samples of venturi tubes were analyzed by OpenFOAM software and by studying microbubble formation, appropriate samples were selected for designation of experimental models. For numerical analysis, the standard κ_ϵ method has been used. Experimental models were prepared and following injection of air and water flow into Venturi tube, the images and films of the two-phase flow inside Venturi tube were recorded by a high-speed camera (4500 frames per second). The prepared images and films were processed by Image processing technique and programming in MATLAB software. The border between micro and macro bubbles diameter is considered 1000 micrometers.

The results suggest that flow regimes inside venturi tube are similar to flow regimes inside horizontal tubes, and for having bubbly flow and consequently formation of microbubbles, air phase flow rate must be very smaller than water phase. By changing venturi tube's dimensions, it was observed that least pressure drop takes place in the junction of the contraction section to the throat section. It was also observed that decreasing the slope of diffusion and contraction sections increases pressure drop and as the slope of contraction and diffusion sections is equal (>24 degrees), better results are achieved regarding microbubbles formation. Experimental results show that by decreasing throat section's length and by increasing flow rate, more micro-nano bubbles form. the maximum bubble diameter is related to the Sauter diameter with coefficient of proportionality 1.673.

Keywords: Micro Bubble, Venturi Tube, OpenFOAM, Image Processing, Matlab, standard κ_ϵ , Two Phase Flow, Sauter diameter



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering

Ph.D. Thesis in Hydraulic Structures

Numerical and Experimental Analysis of Micro Bubble Formation inside Venturi Tube

By: Mahin Ghannadi

Supervisor:
Dr. Seyed Fazlolah Saghravani

Dr. Hamid Niazmand

Jul, 2019