



بررسی تجربی کاهش اتلاف هد به وسیله‌ی حباب‌های هوا در جریان تیلور-کوئت آشفته

رضا مریمی^{۱*}، سعید فراهت^۲ و سید مرتضی جوادپور^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۳ استادیار مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

در این تحقیق، اثر تزریق حباب‌های کوچک روی اتلاف هد جریان محصور در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌محور (سیستم تیلور-کوئت)، بطور تجربی بررسی شد. به منظور تعیین اتلاف هد، اختلاف فشار جریان بین دو نقطه‌ی معین در راستای محور استوانه‌ها اندازه‌گیری گردید. طبق تغییرات عدد رینولدز دورانی و محوری، جریان تیلور-کوئت ایجاد شده کاملاً آشفته بود و گردابه‌های تیلور در فضای حلقوی ظاهر شدند. آب به عنوان سیال عامل و هوا با شرایط اتاق برای تولید حباب‌ها استفاده شدند که از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی تزریق شدند. به منظور تعیین قطر و آرایش حباب‌ها، در جریان تکنیک مجسم سازی جریان استفاده شد. نتایج اولیه نشان دادند که حباب‌های هوا می‌توانند در بهترین حالت، اتلاف هد را تا ۶۰٪ کاهش دهند. با افزایش عدد رینولدز دورانی، اتلاف هد افزایش یافت؛ پدیده‌ای که با تجمع حباب‌های کوچک در هسته‌ی گردابه‌های تیلور و افزایش انتقال مومنتم توجیه شد. گرچه در اعداد رینولدز دورانی کوچک، کاهش چگالی جریان توسط حباب‌ها پارامتر اصلی در کاهش اتلاف هد مطرح شده است. در این رژیم مشاهده شد که افزایش عدد رینولدز محوری، افت اتلاف هد را افزایش می‌دهد که نشان از میرا شدن گردابه‌ها توسط جریان محوری است.

کلمات کلیدی: حباب‌های هوا؛ تیلور-کوئت؛ اتلاف هد؛ جریان آشفته.

Experimental Investigation of Head Resistance Reduction by Air Bubbles in Turbulent Couette-Taylor Flow

R. Maryami^{1*}, S. Farahat², S. M. Javadpour³

¹ Ph.D Student, Dept. Mech. Eng, Yazd University, Yazd, Iran.

² Prof, Dept. Mech. Eng, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

³ Assis Prof, Dept. Mech. Eng, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

Abstract

The effect of small bubbles injecting on the head resistance of the flow closed between co-axial cylinders (Couette-Taylor system) was experimentally investigated. In this research, the pressure difference of flow between two certain points along axis cylinders was measured to determine head resistance. According to variations of rotary and axial Reynolds numbers, the made Couette-Taylor flow was fully turbulent and Taylor vortices appeared in the annulus gap. Water as working fluid and the air with room condition were used to produce small bubbles which were injected into annulus gap at the bottom of system. Flow visualization technique is used to determine diameters and distribution of bubbles in flow. The preliminary results showed that the air bubbles can reduce the head resistance up to up to 60% in the best case. Head resistance is increased as the rotary Reynolds number is increased, a phenomenon which can be explained in terms of the accumulation of bubbles into Taylor vortex cores and enhancement of momentum transfer. However, in the small rotary Reynolds numbers, the reduced fluid density by air bubbles plays a major role in head resistance reduction. In this regime, it was observed that increasing axial Reynolds number promotes head resistance reduction, which is due to damping vortices by axial flow.

Keywords: Air Bubbles; Taylor-Couette; Skin Friction; Turbulent Flow.

۱- مقدمه

هنگامی که سیالی روی جسم جامدی در حرکت است و یا شی جامد در سیالی حرکت می‌کند، نیروی مقاومی در خلاف جهت حرکت سیال و یا شی وارد می‌شود که نیرو درگ نامیده می‌شود. این نیرو، برآیند دو نیروی درگ اصطکاکی و درگ فشاری است. هر روز به منظور حفظ تداوم حرکت‌های ذکر شده در بالا انرژی مصرف می‌شود که بخش زیادی از آن صرف غلبه بر نیروی مقاوم درگ می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش قیمت انرژی و همچنین آلودگی‌های ناشی از اتلاف انرژی، تلاش‌های بسزایی در جهت کاهش تاثیر نیروی درگ صورت پذیرفته است. این تلاش‌ها، معطوف به یافتن روش‌هایی با بازدهی زیاد و هزینه‌ی کم بوده است. کاهش درگ میکروحبابی، از جمله‌ی این روش‌ها است. در این روش، حباب‌های هوا و یا گازها دیگر به داخل جریان یا روی جسم متحرک در جریان تزریق می‌شوند. این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پیشنهاد شده در طی سال‌های اخیر، ارزان‌تر است و علاوه بر این، آلودگی‌های زیست محیطی ایجاد شده در پی استفاده از آن کمتر است.

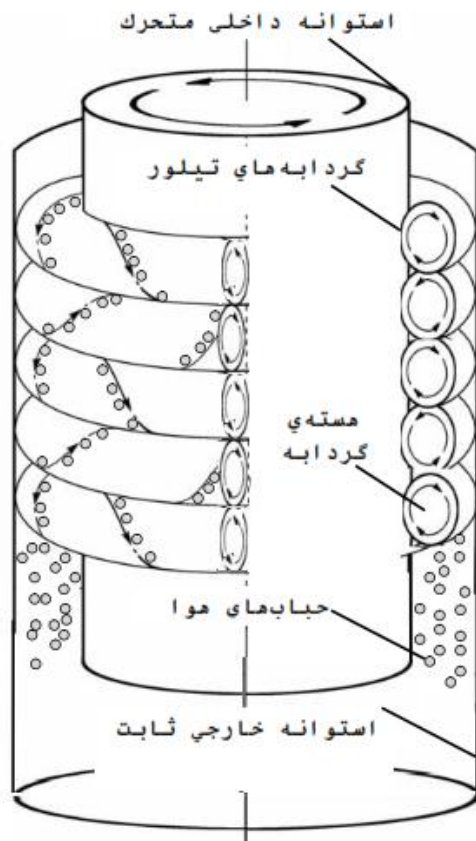
کاهش درگ بوسیله‌ی میکروحباب‌ها، اولین بار توسط مک کرمیک و بتاچاریا [۱]، بطور عملی مورد استفاده قرار گرفت. آنها از شیوه‌ی الکترولیز، به منظور تولید میکروحباب‌های هیدروژن حول یک مدل شناور و متحرک در تانک آب استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بازدهی تزریق حباب‌ها روی کاهش درگ، وابسته به سرعت حرکت مدل و نرخ تولید حباب‌ها در آب است. با شروع تحقیقات در زمینه‌ی کاهش درگ میکروحبابی، آزمایشات متعددی در کانال یا تونل آب به منظور تعیین پارامترهای موثر روی کارایی این روش انجام شدند (بگوویچ و همکاران [۲]، مدون و همکاران [۳ و ۴]، مرکل و همکاران [۵]، دیوتیچ و کاسانو [۶]، کیت و همکاران [۷]، گوین و همکاران [۸]).

بگوویچ و همکاران [۲]، اثر اشباع گازی روی کاهش درگ پوسته‌ای ایجاد شده توسط میکروحباب‌ها را روی یک صفحه تخت و همچنین دیواره تونل آب بررسی کردند. آنها گزارش کردند که حداکثر کاهش درگ در حد معینی از انباشتگی حباب‌ها صورت می‌گیرد. بررسی تغییرات خواص لایه مرزی مغشوش با گرادیان فشار صفر، در حضور میکروحباب‌ها توسط مدون و همکاران [۳]، در قسمتی از

یک تونل آب انجام شد. نتایج نشان دادند که نیروی شناوری، نقش موثری در کاهش درگ میکروحبابی دارد. مساله‌ی توزیع میکروحباب‌ها در لایه مرزی، با استفاده از شبیه‌سازی عددی فرآیند کاهش درگ، توسط توسط مدون و همکاران [۴] انجام شد. نتایج نشان دادند که مقدار کاهش درگ پوسته‌ای، به غلظت حجمی حباب‌ها و توزیع آنها در لایه‌ی بافری بستگی دارد. این موضوع توسط مرکل و همکاران [۵]، با انجام آزمایشاتی در تونل آب نیز اثبات شد. علاوه بر این آنها نشان دادند که رشد ضخامت زیرلایه‌ی ویسکوز، تحت تاثیر حباب‌ها است. لگنر [۹] و ماری [۱۰]، مکانیزم‌های کاهش درگ میکروحبابی را بطور تئوری بررسی کردند. آنها نشان دادند که کاهش چگالی مخلوط دوفازی و اصلاح ویسکوزیته‌ی موثر در لایه مرزی، یکی از دلایل مهم برای کاهش درگ در حضور حباب‌ها است.

بطور موازی با تحقیقات تئوری، مطالعاتی عددی انجام شدند که بیشتر معطوف به کاهش درگ در حضور حباب‌های کروی کوچک بودند. (بلتون و لوس [۱۱]، فرانت و الگوباشی [۱۲]، اکس یو و همکاران [۱۳]). لو و همکاران [۱۴]، تاثیر حباب‌های نسبتاً بزرگ را روی کاهش درگ اصطکاکی دیوار-های کانال کوچک بررسی کردند. آنها با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، نشان دادند که حباب‌های انعطاف پذیر با سرکوب کردن گردابه‌های جریان، سبب کاهش درگ قابل توجهی می‌شوند. روش تابع چگالی مشخص (MDF) به منظور شبیه‌سازی جریان آشفته‌ی حامل حباب در یک کانال و همچنین بررسی اندرکنش بین حباب‌ها و آشفته‌گی جریان در مجاورت دیوار، توسط کانا و همکاران [۱۵] بکار گرفته شد. نتایج نشان دادند که حضور حباب‌ها در نزدیکی دیوار و در لایه‌ی بافری، سبب کاهش انرژی اغتشاشات و ایجاد رفتار لایه‌ای می‌شوند.

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی و عددی، اثر تزریق حباب‌های گازی در کاهش اتلافات اصطکاکی روی نمونه‌های واقعی مانند، بدنه‌ی کشتی‌ها و همچنین قایق‌ها بررسی شد (یانار و همکاران [۱۶]، تاکاهاشی و همکاران [۱۷] و لاتور و همکاران [۱۸]). نوری و سررشته داری [۱۹]، بطور تجربی اثر تزریق حباب‌ها را روی کاهش اتلافات یک جسم دوار بررسی کردند. آنها نشان دادند که افزایش کسر حجمی،



شکل ۱- نمایی از تشکیل گردابه های تیلور در فضای حلقوی

در سال های اخیر، علاوه بر موضوعات مطرح شده در بالا، اثر میکروحباب ها روی کاهش اتلافات ناشی از اصطکاک در فضای حلقوی سیستم های تیلور-کوئت، توسط محققانی نظیر، ون در برگ [۳۲ و ۳۳] بررسی شد. بررسی اثر میکروحباب ها روی کاهش درگ و همچنین تعیین الگوهای توزیع حباب ها در سیستم های تیلور-کوئت، توسط مورای و همکاران [۳۴] انجام پذیرفت. در این تحقیق نشان داده شد که میکروحباب ها با کاهش چگالی سیال و انبساط گردابه های تیلور در جهت محور استوانه ها، سبب کاهش درگ می شوند. مریمی و همکاران [۳۵ و ۳۶]، بطور تجربی اثر تزریق حباب های هوا و همچنین اثر جریان محوری روی کاهش درگ میکروحبابی را در یک جریان آشفته تیلور-کوئت بررسی کردند. آنها نشان دادند که در بازه مشخصی از تغییرات عدد رینولدز دورانی، حباب ها درگ اصطکاکی را کاهش می دهند. علاوه بر این نتایج نشان دادند که جریان محوری، کارایی

منجر به کاهش تنش برشی اعمالی روی سطح جسم دواری می شود.

طبق تحقیقات اخیر مشخص شده است که کاهش درگ میکروحبابی در جریان های داخلی و خارجی، پدیده ای پیچیده و مطالعه مکانیزم های آن مشکل است. از این رو، سیستم های جدیدی برای چنین مطالعاتی پیشنهاد شده است. یکی از این سیستم ها، سیستم تیلور-کوئت است. سیستم تیلور-کوئت، متشکل از دو استوانه ای هم محور است که یکی ثابت و دیگر متحرک است. در یک چنین سیستمی با استوانه ای داخلی متحرک و استوانه ای خارجی ثابت، تغییر سرعت دورانی استوانه داخلی، ماهیت جریان محصور در فضای حلقوی بین دو استوانه ای را تحت تاثیر قرار می دهد. در حقیقت در سرعت های دورانی کم، جریان در فضای حلقوی آرام است که اصطلاحاً جریان کوئت نامیده می شود و رفته رفته با افزایش سرعت دورانی آشفته می شود. در سیستم های تیلور-کوئت، آشفته شدن جریان متناسب با پیدایش گردابه هایی تحت عنوان گردابه های تیلور است که در شکل ۱، طرحواره ساده ای از آنها نشان داده شده است. در این حالت، جریان ایجاد شده در سیستم، جریان تیلور-کوئت نامیده می شود.

تحقیقات انجام شده در سیستم های تیلور-کوئت، بیشتر معطوف به بررسی شرایط ناپایداری جریان در حالت های مختلف بوده است. کوئت [۲۰]، مالوک [۲۱]، ریلی [۲۲] و تیلور [۲۳]، اولین افرادی بودند که محدوده ناپایداری جریان های تیلور-کوئت را مشخص کردند. تعیین شرایط ناپایداری جریان های تیلور-کوئت در حضور جریان محوری، موضوعی است که با شروع مطالعات در سیستم های تیلور-کوئت مد نظر محققان قرار گرفت. کرونیش [۲۴]، گولدستین [۲۵]، چاندرسکا [۲۶]، دی پریمو [۲۷]، دانلی و فولتز [۲۸]، از جمله افرادی بودند که نشان دادند، جریان محوری می تواند با میرا کردن گردابه های تیلور، پایداری جریان های تیلور-کوئت را افزایش دهد. با پیشرفت سیستم های تصویر برداری، مطالعاتی توسط شیومی و همکاران [۲۹]، آتخن و همکاران [۳۰] و هیوباز و همکاران [۳۱]، در خصوص تعیین الگوهای جریان ایجاد شده در فضای حلقوی بین دو استوانه ای هم محور صورت پذیرفت.

است؛ این در حالی است که سیستم بکار گرفته شده در تحقیق پیش رو و همچنین مرجع [۳۶] مجهز به سیستم بازگردش آب است که در شکل ۲، نشان داده شده است.

در سیستم تیلور-کوئنت مورد نظر استوانه داخلی متحرک بوده، از پلکسی گلاس غیر شفاف ساخته شده است تا از عبور نور به منظور تصویر برداری بهتر جلوگیری کند. استوانه‌ی خارجی در این سیستم ثابت بوده، از پلکسی گلاس شفاف ساخته شده است. استوانه‌ی خارجی روی یک نازل همگرا کننده قرار گرفته است تا ورود جریان دو فازی به فضای حلقوی به سادگی صورت پذیرد.

سیستم باز گردش جریان، سبب برقراری جریانی در جهت محوری در فضای حلقوی بین دو استوانه‌ی هم مرکز می‌شود. این سیستم شامل، یک پمپ جریان مستقیم دور متغییر، فلومتر، صاف کننده و مخزن ذخیره سازی است. در این سیستم هدف، استفاده از صاف کننده آرام کردن جریان ورودی به سیستم است و مخزن علاوه بر ذخیره سازی سیال، سبب خارج شدن حباب‌های وارد شده به سیال قبل از ورود مجدد به سیستم می‌شود. در قسمت بالایی، مخزن غشایی قرار داده شده است که به خارج شدن حباب‌ها از آب کمک می‌کند. هوای لازم برای تولید حباب‌ها و همچنین فشار کافی برای تزریق هوا به سیستم، از طریق کمپرسوری گریز از مرکز تامین شده است. حباب‌های هوا از طریق دو وسیله‌ی تزریق کننده که نمونه‌ای از آنها در شکل ۳ نشان داده شده است، به داخل فضای حلقوی تزریق می‌شوند.

این وسایل روی نازل همگرا کننده و دقیقاً روبه‌روی هم نصب شده‌اند. برای دوران استوانه‌ی داخلی، از یک الکتروموتور AC استفاده شده است. به منظور کاهش ارتعاشات سیستم هنگام دوران استوانه‌ی داخلی، الکتروموتور از طریق یک مکانیزم تسمه و پولی به شفت متصل به استوانه‌ی داخلی متصل شده است. علاوه بر این محور استوانه داخلی از بالا و پایین، از طریق دو بلبرینگ حمایت شده تا دوران این استوانه با اصطکاک کمتری صورت پذیرد.

فضای حلقوی بین دو استوانه‌ی هم مرکز با آب به عنوان سیال عامل پر شده است. خصوصیات فیزیکی آب و همچنین دیگر شرایط آزمایشگاهی، در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این‌که وجود ناخالصی‌هایی مانند، نمک و دیگر محلول‌های فعال در سطح روی اندازه‌ی حباب‌ها و کاهش

حباب‌ها را در کاهش درگ اصطکاکی افزایش می‌دهد. علاوه بر مطالعات تجربی انجام شده در این زمینه، تحقیقاتی هم با استفاده از شبیه سازی عددی توسط سوگیوما و همکاران [۳۷] و مریمی و همکاران [۳۸] انجام شدند.

توجه به این نکته ضروری است که اتلاف انرژی در سیستم‌های تیلور-کوئنت، فقط ناشی از درگ اصطکاکی نیست. در حقیقت، افت فشار در جهت جریان علاوه بر درگ اصطکاکی، می‌تواند روی اتلاف انرژی در فضای حلقوی موثر باشد. اتلاف انرژی ناشی از افت فشار در سیستم‌های تیلور-کوئنت، معمولاً به اتلاف هد معروف است [۳۹]. همانطور که قبلاً اشاره شد، در سال‌های اخیر تاثیر میکرو حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی، بطور تجربی و عددی در جریان‌های تیلور-کوئنت بررسی شده است؛ این در حالی است که کارایی حباب‌ها در یک چنین جریان‌هایی روی کاهش اتلاف هد، مورد مطالعه قرار نگرفته است. با توجه به اینکه تحقیقات صورت گرفته تاثیر مثبت تزریق حباب‌ها را روی کاهش درگ اصطکاکی نشان می‌دهند، می‌توان پیش بینی کرد که تزریق حباب‌ها روی کاهش اتلاف هد در جریان‌های تیلور-کوئنت موثر است؛ بنابراین در تحقیق پیش رو سعی شد تا تاثیر تزریق حباب‌های کوچک روی کاهش اتلاف هد در یک سیستم تیلور-کوئنت عمودی، بطور تجربی مورد بررسی قرار گیرد. در این سیستم، حباب‌های هوا به همراه جریان آب بطور هم‌زمان از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شدند. با استفاده از جسم متخلخل حباب-هایی با قطری کوچک‌تر یا در حدود $1/7\text{mm}$ در سیستم ایجاد گردیدند. به منظور مطالعه تغییرات اتلاف هد در حضور حباب‌ها، اختلاف فشار بین دو مقطع مشخص از سیستم نیز اندازه‌گیری شد.

۲- سیستم آزمایشگاهی

شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی در شکل ۲، نشان داده شده است. مشخصات مربوط به این سیستم آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده و این سیستم تیلور-کوئنت، بطور مفصل در مرجع [۳۵ و ۳۶] توضیح داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در سیستم آزمایشگاهی به کار رفته در مرجع [۳۵]، ورود و خروج جریان آب وجود ندارد؛ یعنی حجم آب محصور در فضای حلقوی سیستم همواره ثابت

جدول ۱- مشخصات سيستم آزمايشگاهی

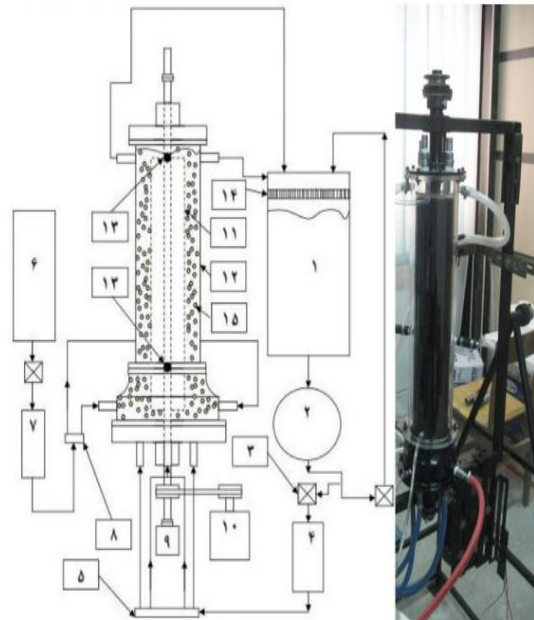
پارامتر	مقدار
قطر استوانه داخلی	$d_1=120\text{ mm}$
قطر استوانه خارجی	$d_2=140\text{ mm}$
طول استوانه داخلی	$L_1=630\text{ mm}$
طول استوانه خارجی	$L_2=600\text{ mm}$
طول نازل هم گرا کننده	$L_n=100\text{ mm}$
فاصله شعاعی	$\delta=10\text{ mm}$
ارتفاع محل تست	630 mm
نسبت جنبه ای	۶۳
حداکثر فشار کمپرسور	80 kPa
فشار هوای تزریقی	$98.3 \pm 0.1\text{ kPa}$
مساحت جسم متخلخل	101736 mm^2
قطر اسمی منافذهای جسم متخلخل	$20\text{ }\mu\text{m}$
قدرت الکترو موتور	$1/5\text{ hp}$

جدول ۲- شرایط آزمايش

پارامتر	مقدار
چگالی آب	$\rho_w=996/95\text{ kg/m}^3$
ویسکوزیته سینماتیکی آب	$\nu_w=0.01025 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$
دمای آب	$25\text{ }^\circ\text{C}$
سرعت دورانی	$50 < \omega < 975\text{ rpm}$
دبی جریان هوا	$0 \leq Q_a \leq 6/280 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$
	$5.51 \times 10^{-5} \leq Q_w \leq 7.07 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$
عدد رینولدز دورانی	$7 \times 10^2 < Re_\omega < 70 \times 10^2$
عدد رینولدز محوری	$299.15 < Re_a < 384.18$
عدد تیلور	$4166 \times 10^5 < Ta < 8166 \times 10^7$
عدد وبر	$0.224 < We < 2387$
کسر حجمی	$0 < \alpha < 10$
قطر حباب	$D_b \leq 1/7\text{ mm}$

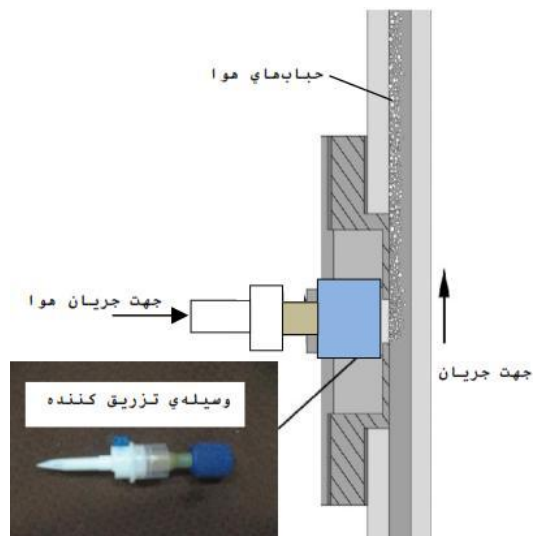
همانطور که قبلا ذکر شد، اتلاف در فضای حلقوی بین دو استوانه‌ی هم محور وابسته به تغییرات فشار در راستای محور استوانه‌ها است. علاوه بر این فشار در هر مقطع وابسته

درگ میکرو حبابی موثر است [۴۰]؛ سعی شده تا خلوص آب در تمامی آزمایشات ثابت باشد.

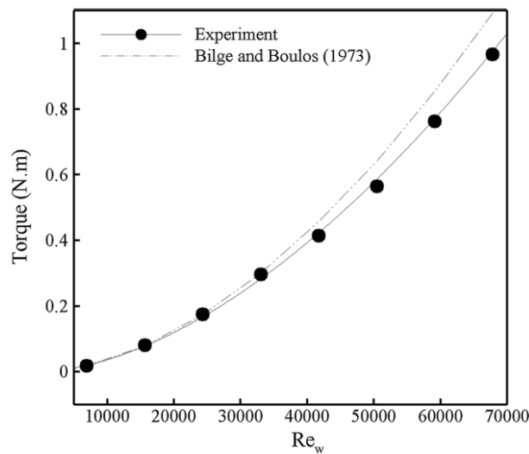


شکل ۲- نقشه‌ی خلاصه شده‌ی سيستم آزمايشگاهی:

۱- تانک، ۲- پمپ، ۳- شیر، ۴- دبی سنج آب، ۵- توزیع کننده‌ی آب، ۶- کمپرسور، ۷- دبی سنج هوا، ۸- توزیع کننده‌ی هوا، ۹- سرعت سنج، ۱۰- موتور، ۱۱- استوانه‌ی داخلی، ۱۲- استوانه‌ی خارجی، ۱۳- نقاط سنجش فشار، ۱۴- صاف کننده‌ی آب، ۱۵- حباب هوا



شکل ۳- وسیله‌ی تزریق کننده‌ی هوا به سيستم



شکل ۴- اعتبارسنجی سیستم تیلور-کوئت در جریان‌های تک فاز

۳- شیوه‌ی انجام آزمایشات

در این تحقیق اختلاف فشار، اصلی‌ترین فاکتور برای ارزیابی تغییرات اتلاف هد در حضور حباب‌های هوا است که باید در حالت دائم اندازه‌گیری شود. برای این منظور سعی شده پس از تعیین پارامترهای ورودی در هر مرحله از آزمایش، اندازه‌گیری فشار در جریان‌های یکنواخت رخ دهد.

در حالت کلی آزمایشات به این شیوه انجام شدند که در مرحله‌ی اول، دبی جریان آب ورودی به سیستم از طریق فلومتر آب اندازه‌گیری شد و سپس جریان آب از قسمت زیرین سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شد. در مرحله دوم، دبی جریان هوای مورد نیاز برای ایجاد حباب‌ها در سیستم توسط دبی سنج هوا تعیین گردید و به داخل آب تزریق شد. در مرحله سوم، استوانه‌ی داخلی در سرعت زاویه‌ای از پیش تعیین شده به حرکت در آورده شد. در نهایت، پس از گذشت مدت زمانی مشخص و وقوع شرایط جریان تقریباً یکنواخت در سیستم، فشار در مقاطع مورد نظر اندازه‌گیری شد. این آزمایشات با تغییر سرعت دورانی استوانه‌ی داخلی در نرخ‌های مختلفی از هوا و جریان آب تکرار شدند. توجه به این نکته ضروری است که زمان دست یافتن به شرایط یکنواخت قبل از اندازه‌گیری فشار، در تمامی آزمایشات ثابت بوده است.

پس از اندازه‌گیری اختلاف فشار (ΔP) بین دو مقطع مورد نظر ضریب اتلاف هد (λ) با رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$h = \Delta P / \gamma_w = \lambda l V_m^2 / 4 \delta g \quad (1)$$

به پارامترهایی مانند، سرعت متوسط جریان محوری، سرعت دورانی استوانه داخلی، فاصله‌ی شعاعی بین دو استوانه و شعاع استوانه داخلی است [۳۹]. در سیستم تیلور-کوئت، طراحی شده در این مطالعه، فاصله‌ی شعاعی بین دو استوانه و شعاع استوانه‌ی داخلی ثابت است و سرعت متوسط جریان محوری و سرعت دورانی استوانه‌ی داخلی به ترتیب، با تغییر دبی جریان محوری و گشتاور اعمال شده روی استوانه‌ی داخلی تغییر می‌کنند؛ بنابراین به منظور اعمال هم زمان اثرات جریان محوری و سرعت دورانی روی اندازه‌گیری فشار، پورتی با طراحی خاص استفاده شده است. این پورت شامل، دو لوله با قطر ۵mm است که یکی از آنها به موازات محور استوانه‌ها و دیگری عمود بر صفحه گذرنده از محور استوانه‌ها است. در حقیقت این پورت شامل، دو لوله عمود برهم است که دقیقاً وسط فضای حلقوی قرار گرفته‌اند و هر دو به سنسورهای فشار متصل شده‌اند.

همانطور که در شکل ۳ مشهود است، در سیستم تیلور-کوئت طراحی شده در این تحقیق، فشار در دو مقطع و توسط دو پورت فشار اندازه‌گیری می‌شود که پورت‌ها روی بدنه استوانه‌ی خارجی نصب شده‌اند.

دقت کلیه سیستم‌های اندازه‌گیری استفاده شده در این تحقیق، بر مبنای تحلیل عدم قطعیت در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر این برای ارزیابی دقت سیستم تیلور-کوئت مورد نظر، مقایسه‌ای بین نتایج گشتاور اعمالی روی استوانه داخلی در این تحقیق و نتایج ارائه شده توسط بیلگن و بولوز [۴۱] صورت پذیرفته است. این مقایسه در جریان‌های تک فاز و در غیاب هرگونه حبابی صورت پذیرفته است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، گشتاور در تمام محدوده رینولدز دورانی، از تطابق خوبی با نتایج مرجع [۴۱] برخوردار است.

جدول ۳- دقت سیستم‌های اندازه‌گیری

پارامتر	مقدار
سنسورهای فشار	۰/۰۱ Pa
دبی سنج هوا	۰/۰۰۰۱ m ³ /min
دورسنج	۰/۱ rpm

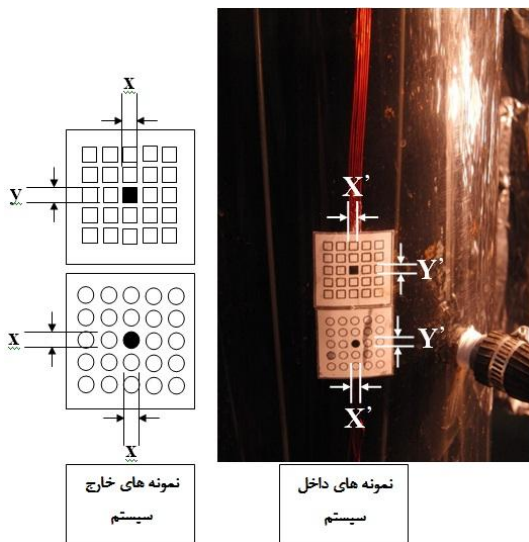
با هدف مشخص شدن بزرگی برهم کنش بین حباب‌ها و گردابه‌های ایجاد شده در جریان از عدد بی بعد کسر حجمی استفاده شده است. این عدد برای جریان‌های تیلور-کوئت، بصورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\alpha = Q_d / (Q_a + Q_w) \quad (5)$$

در معادله ی ۵، Q_a دبی جریان هوا و Q_w دبی جریان آب است. در این مطالعه، آنالیز عدم قطعیت برای کسر حجمی نشان می‌دهد که عدم قطعیت چنین پارامتری تقریباً ۰.۷٪ است.

۴- تصویر برداری و پردازش تصویر

برای اندازه‌گیری قطر حباب‌ها، از تصویربرداری و پردازش تصویر استفاده شده است. برای این منظور، از دوربین دیجیتال کاسیو مدل EX-F1 استفاده شده که مجهز به سنسور CMOS و پردازنده سرعت بالای LSI است. برای تعیین قطر حباب‌ها، از عکس برداری سرعت بالا استفاده شده است و داده‌ها مستقیماً به کامپیوتر منتقل گردیده است. برای این منظور، ابتدا دوربین مورد نظر کالیبره شده است. برای کالیبره کردن دوربین، ابتدا نمونه‌هایی در ابعاد و اندازه مشخص تهیه شده که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- نمونه هایی برای کالیبره کردن دوربین

از معادله ۱ می‌توان اتلاف هد (h) را برای جریان محصور در فضای حلقوی بین استوانه‌های هم محور محاسبه کرد. در این معادله l, V_m, δ, γ_w و g به ترتیب، فاصله‌ی بین پورت‌های سنجش فشار، سرعت متوسط جریان محوری، وزن مخصوص آب، فاصله‌ی شعاعی بین دو استوانه‌ها و شتاب جاذبه زمین است.

جریان برقرار شده در فضای حلقوی، ترکیبی از جریان محوری و جریان چرخشی است، بنابراین اصلاح اتلاف هد از طریق تزیق حباب‌های کوچک با تغییر دو عدد رینولدز در این آزمایشات، مورد بررسی قرار گرفته است. جریان چرخشی، به خاطر دوران استوانه داخلی شکل می‌گیرد و آشفتگی این جریان با عدد رینولدز دورانی توصیف می‌شود که بصورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Re_{\omega} = r_1 \delta \omega / \nu_w \quad (2)$$

در اینجا ν_w ویسکوزیته‌ی سینماتیکی آب بدون حباب است. به خاطر این‌که در جریان دوفازی ایجاد شده در یک سیستم تیلور-کوئت، ویسکوزیته‌ی موثر تقریباً تحت تاثیر حباب‌ها نیست [۳۴]؛ بنابراین از ویسکوزیته سینماتیکی آب بدون حباب برای تعریف عدد رینولدز در این تحقیق، استفاده شده است. علاوه بر این r_1 و ν_w به ترتیب، شعاع استوانه‌ی داخلی و سرعت زاویه‌ای هستند.

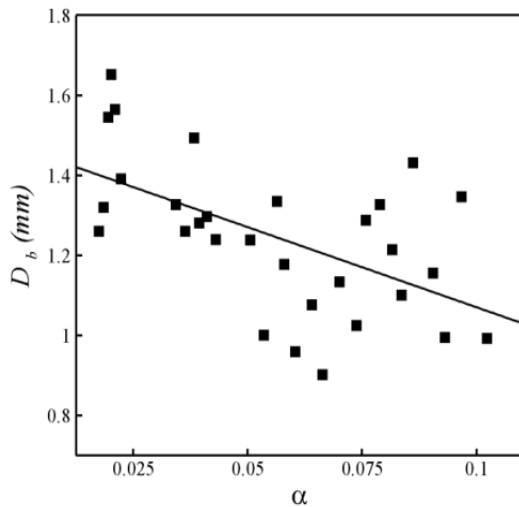
ماهیت جریان محوری، از طریق عدد رینولدز محوری تعیین می‌شود که بصورت رابطه (۳) اندازه‌گیری می‌شود:

$$Re_n = V_m 2\delta / \nu_w \quad (3)$$

در جریان‌های تیلور-کوئت، زمان پیدایش گردابه‌های تیلور با عدد بی بعد تیلور مشخص می‌شود که بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$Ta = Re_{\omega}^2 (\delta / r_1) = (\omega^2 r_1 \delta^3 / \nu_w^2) \quad (4)$$

از معادله ۲، می‌توان فهمید که زمان پیدایش گردابه‌های تیلور علاوه بر عدد رینولدز دورانی، وابسته به فاصله‌شعاعی بین دو استوانه است. کازلی [۴۲]، عنوان می‌کند که در یک سیستم تیلور-کوئت ساده، گردابه‌های تیلور در $Ta > 1/7 \times 10^3$ ظاهر می‌شوند. طبق تغییرات عدد رینولدز دورانی که در جدول ۱ آورده شده است، بازه‌ی تغییرات عدد تیلور در این تحقیق، از $41/66 \times 10^5$ تا $81/66 \times 10^7$ است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گردابه‌های تیلور در جریان محصور شده در فضای حلقوی در تمام رنج تغییرات عدد رینولدز دورانی ظاهر می‌شوند.



شکل ۶- تغییرات قطر حباب برحسب کسر حجمی

شکل ۷، تغییرات λ را برحسب تابعی از Re_a در مقادیر مختلفی از Re_w و Q_a نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش Re_a ، λ بتدریج کاهش می‌یابد. تاثیر جریان محوری روی گردابه‌های تیلور می‌تواند دلیل چنین تغییراتی باشد. در یک سیستم تیلور-کوئنت با اعمال جریان محوری سه نیروی اصلی هر المان سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این نیروها شامل، نیروی محوری، نیروی گریز از مرکز و نیروی اصطکاکی هستند. هنگامی که Re_a در مقدار مشخصی از Re_w افزایش می‌یابد، نیروی محوری در مقایسه با نیروی گریز از مرکز بر جریان غالب خواهد شد. در این حالت، تاثیر نیروی اصطکاکی بین المان‌های سیال افزایش می‌یابد؛ بنابراین شکل‌گیری رژیم‌هایی از جریان که شامل گردابه‌های تیلور هستند، به تاخیر می‌افتد. در حقیقت جریان محوری با تقویت نیروی‌های اصطکاکی، گردابه‌های تیلور را میرا می‌سازد و شکل‌گیری آنها را تا اعداد تیلور بزرگتر به تاخیر می‌اندازد. تاخیر در شکل‌گیری گردابه‌های تیلور، سبب کاهش انتقال مومنتم در جریان می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج نشان داده شده در شکل ۷ می‌توان فهمید که با افزایش Re_w در هر مقداری از Re_a ، λ افزایش می‌یابد. در این شرایط، تاثیر هر چه بیشتر نیروی گریز از مرکز روی المان‌های سیال و پیدایش گردابه‌های تیلور دلیل افزایش λ است.

پس از تهیه‌ی نمونه، دوربین روی سه پایه و در مکانی مشخص قرار گرفته و سعی شده تا حدالامکان مکان دوربین تا پایان آزمایشات تغییر نکند.

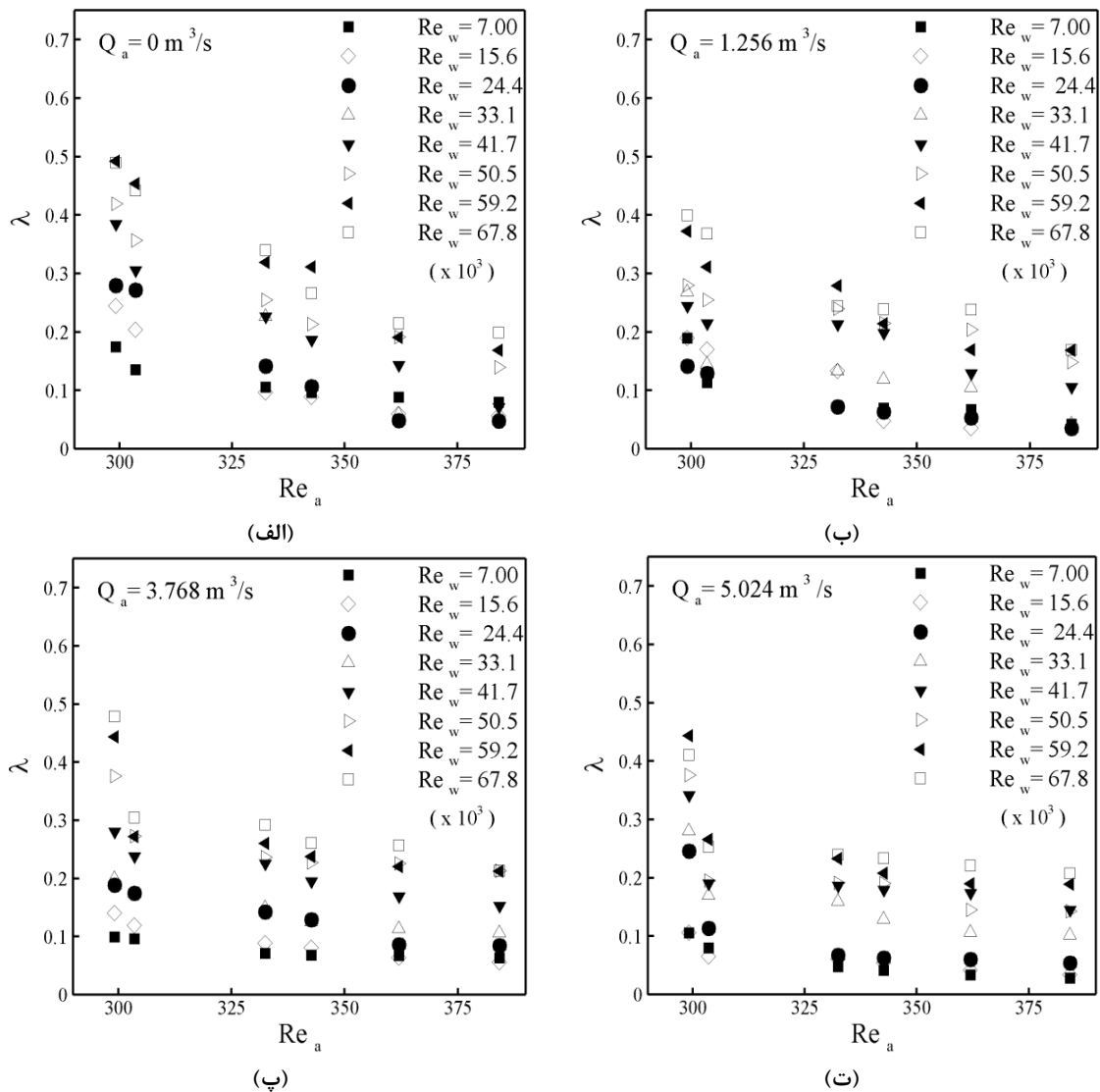
پس از این مرحله، نمونه داخل سیستم و در مکانی مشخص قرار داده شده است (شکل ۵). در ادامه با استفاده از دوربین و تحت حالت عکس‌برداری از نمونه چندین عکس گرفته شده است. توجه به این نکته ضروری است که در سیستم مورد نظر هنگام عکس‌برداری آب وجود دارد.

حال با استفاده از یک نرم افزار، اندازه نمونه در تصاویر گرفته شده از طریق دوربین با اندازه واقعی آن مقایسه شده است و میزان خطا در عکس‌برداری مشخص گردیده است. به عبارتی دیگر، اختلاف x و X' و همچنین اختلاف y و Y' برای هر دو نمونه مربعی و دایره‌ای که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند، محاسبه شده است. مقدار خطا بر مبنای تحلیل عدم قطعیت، حدوداً $58/8 \mu m$ بوده است.

برای پردازش تصویر، ابتدا نویزهای موجود در تصاویر حذف شده است و سپس با استفاده از الگوریتم تعیین لبه، مرز حباب‌ها مشخص شده است. مقدار خطا در تعیین قطر حباب‌ها تقریباً ± 1 پیکسل، یعنی $60 \mu m$ بوده است. به منظور کاهش مقدار خطا مربوط به قطر حباب‌ها، در هر تصویر بطور میانگین 500 حباب انتخاب شده است.

۵- نتایج

شکل ۶، تغییرات قطر حباب‌ها را برحسب تغییرات کسر حجمی نشان می‌دهد. نتایج گویای آن است که با افزایش کسر حجمی، قطر حباب‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این تغییرات، افزایش دبی جریان هوا است. با افزایش دبی جریان هوا، مومنتم تزریق و سرعت روبه بالای حباب‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه حباب‌ها پس از خروج از تزریق‌گرها بطور منفرد در جریان توزیع می‌شوند و کمتر به یکدیگر می‌پیوندند. از طرفی دیگر، افزایش مومنتم تزریق منجر به افزایش نیروی اعمالی روی حباب‌ها می‌شود که در شکست حباب‌ها و تبدیل آنها به حباب‌های کوچکتر نیز موثر است.



شکل ۷- تغییرات ضریب اتلاف هد بر حسب عدد رینولدز محوری و در دبی‌های مختلف هوا

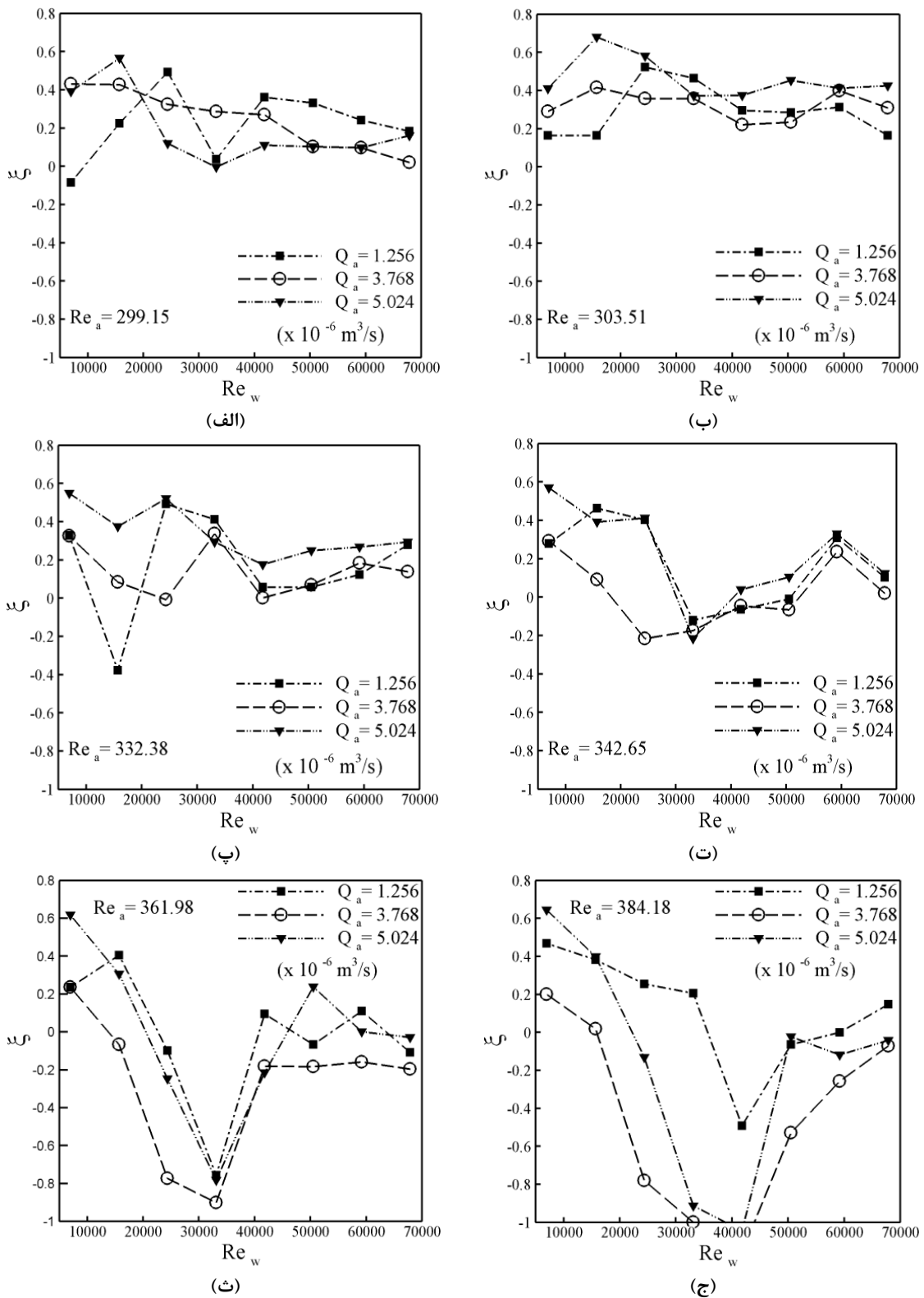
تغییرات ξ در شکل ۸، بر حسب عدد رینولدز دورانی و محوری بصورت زیر توجیه می‌شوند. در اعداد رینولدز دورانی کوچک تاثیر نیروی گریز از مرکز روی حباب‌ها و همچنین المان‌های سیال کم است؛ بنابراین توزیع حباب‌ها بطور منفرد و آهسته در فضای حلقوی رخ می‌دهد. علاوه بر این، جابجایی المان‌های سیال به آهستگی اتفاق می‌افتد و گرده‌های تیلور در جریان ظاهر نمی‌شوند. در این حالت، آشفستگی جریان کم است و حباب‌ها می‌تواند از طریق چند مکانیزم اتلاف هد را در جریان کاهش دهند. مهمترین مکانیزم، کاهش چگالی جریان توسط حباب‌ها است. کاهش آشفستگی جریان از طریق

به منظور مطالعه تاثیر حباب‌ها روی تغییرات λ نسبت ضریب افت هد با معادله ۶ محاسبه می‌شود.

$$\xi = 1 - \lambda / \lambda_0 \quad (۶)$$

در اینجا زیراندیس صفر نشان دهنده، شرایط جریان در غیاب حباب‌ها است.

شکل ۸، رابطه‌ی بین تغییرات ξ و Re_w را در مقادیر مختلفی از Q_a و Re_a نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که حداکثر کاهش اتلاف هد، تقریباً ۶۰٪ است. ξ با افزایش Re_w و Re_a کاهش می‌یابد و حتی منفی می‌شود. منفی شدن ξ به این معنا است که حباب‌ها اتلاف هد را افزایش می‌دهند.



شکل ۸- تغییرات نسبت ضریب اتلاف هد بر حسب عدد رینولدز دورانی و در رینولدزهای محوری مختلف

جهت شعاعی، محوری و محیطی حرکت می‌کنند و از یک لایه سیال به لایه دیگر تغییر مکان می‌دهند. با افزایش عدد رینولدز تا $Re_0 = 34/4 \times 10^3$ ، تاثیر نیروی گریز اعمالی روی حباب‌ها در مقایسه با دیگر نیروها بیشتر خواهد شد؛ بنابراین حباب‌ها در جهت شعاعی به سمت استوانه‌ی داخلی حرکت کرده، در مجاورت سطح این استوانه تجمع می‌کنند (شکل ۹ب و ۹پ). تجمع حباب‌ها در مجاورت استوانه‌ی داخلی با افزایش عدد رینولدز دورانی تا $Re_0 = 52/4 \times 10^3$ افزایش می‌یابد و ابرهای حبابی ایجاد می‌شوند. ابرهای حبابی، کاملاً در جهت محیطی و در مسیرهای حلقوی شکل حرکت می‌کنند (شکل ۹ت). علاوه بر این در شکل ۱۰ نشان داده شده است که ابرها بین هر جفت از گردابه‌های تیلور و در مجاورت استوانه‌ی داخلی قرار می‌گیرند. در این اعداد رینولدز دورانی، قرارگیری ابرهای حبابی در هسته‌ی گردابه‌ها محتمل است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بطور تجربی تاثیر حباب‌های کوچک روی کاهش اتلاف هد جریان (اتلاف ناشی از افت فشار) در یک سیستم تیلور-کوئت بررسی شد. سیستم آزمایشگاهی مجهز به سیستم بازگردش جریان است که در حین دوران استوانه داخلی، جریان را به داخل فضای حلقوی فرستاده و از آن خارج ساخته است. جریان برقرار شده بین دو استوانه‌ی هم‌محور که ترکیبی از جریان محوری و جریان چرخشی است، کاملاً آشفته بوده، گردابه‌های تیلور در تمام بازه‌ی تغییرات عدد رینولدز دورانی در جریان ظاهر شده‌اند. حباب‌های کوچک (حباب‌هایی با قطر کمتر یا در حدود $1/7\text{mm}$) و جریان محوری، از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شده‌اند. به منظور مطالعه تغییرات اتلاف هد، اختلاف فشار بین دو نقطه مشخص در راستای محور استوانه-ها اندازه‌گیری شده است.

نتایج نشان دادند که کاهش اتلاف هد، تحت تاثیر تزریق حباب‌های هوا است. حباب‌ها در اعداد رینولدز دورانی کوچک با کاهش چگالی جریان، کاهش تعداد گردابه‌های تیلور در راستای محور استوانه‌ها و همچنین کاهش آشفتگی از طریق جابجا کردن ساختارهای گردابه‌ای، منجر به کاهش اتلاف هد می‌شوند. در این حالت، حداکثر کاهش اتلاف هد ثبت شده ۶۰٪ است. علاوه بر این مشاهده شد که در اعداد رینولدز

تاثیر مستقیم تراکم‌پذیری موثر حباب‌ها روی نوسانات جریان، می‌تواند مکانیزم دیگری برای کاهش اتلاف هد باشد. تراکم‌پذیری موثر با جابجا کردن ساختارهای گردابه‌ای جریان به فواصل دور از سطح استوانه‌ی داخلی، سبب کاهش آشفتگی جریان می‌شود. علاوه بر مکانیزم‌های اشاره شده در بالا، انبساط گردابه‌های تیلور در راستای محور استوانه‌ها و همچنین کاهش تعداد آنها در این راستا، فاکتور دیگری برای کاهش اتلاف هد در حضور حباب‌ها است.

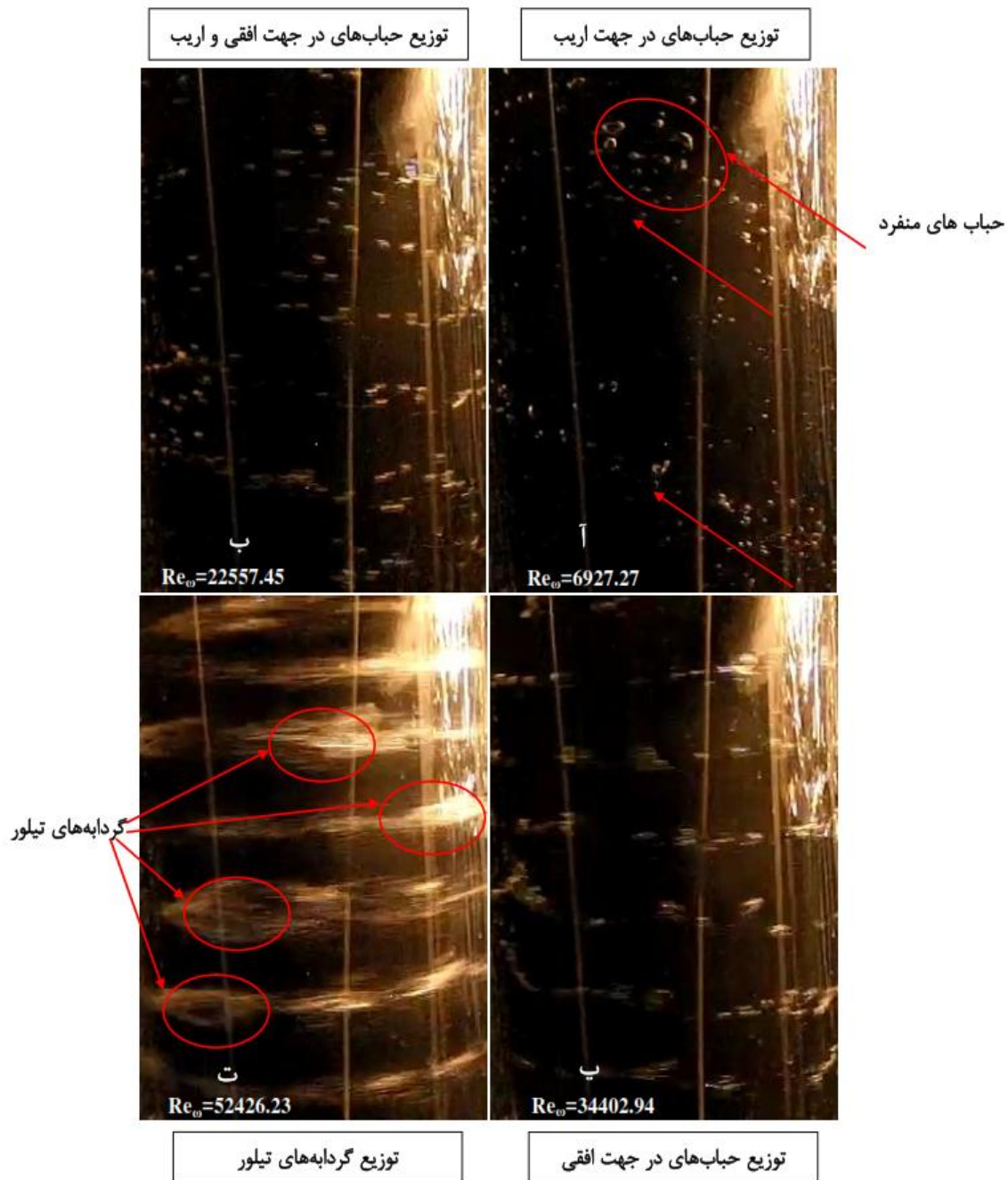
در اعداد رینولدز دورانی کوچک، با افزایش Re_a ، میرا شدن گردابه‌های تیلور و سرعت صعود حباب‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین افزایش Re_a ، کاهش هر چه بیشتر اتلاف هد در جریان را در پی خواهد داشت که در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش Re_0 ، تاثیر نیروی گریز از مرکز روی حباب‌ها افزایش می‌یابد. در این حالت، اغلب حباب‌ها بطور یکنواخت در جریان توزیع می‌شوند و حرکت آنها بیشتر در جهت شعاعی و بطرف استوانه‌ی داخلی رخ می‌دهد. چنین توزیعی، منجر به تجمع حباب‌ها و ایجاد ابرهای حبابی در مجاورت استوانه‌ی داخلی و در هسته‌ی گردابه‌های تیلور خواهد شد. ابرهای حبابی در مجاورت استوانه‌ی داخلی با تخریب لایه مرزی، سبب افزایش انتقال مومنتم و در نتیجه افزایش اتلاف هد می‌شوند. علاوه بر این ابرهای حبابی با قرار گرفتن در هسته گردابه‌های تیلور، منجر به بقای گردابه‌ها و افزایش نوسانات جریان خواهند شد.

در رینولدزهای دورانی بزرگ افزایش Re_a ، تاثیری در میرا کردن گردابه‌های تیلور نخواهد داشت؛ زیرا گردابه‌ها با جابجایی سریع المان‌های سیال و همچنین قرارگیری ابرهای حبابی در هسته آنها بسیار پایدارند. از طرفی دیگر، افزایش Re_a ، منجر به جابجایی ابرهای حبابی می‌شود که در تخریب لایه مرزی و افزایش نوسانات جریان موثر است؛ بنابراین افزایش Re_a ، سبب می‌شود تا حباب‌ها تاثیری منفی روی کاهش اتلاف هد داشته باشند.

شکل ۹، تغییرات توزیع حباب‌ها را در رینولدزهای دورانی مختلف نشان می‌دهد. در اعداد رینولدز دورانی کوچک، نیروی گریز از مرکز ضعیف است، بنابراین حباب‌ها بطور یکنواخت و منفرد در جریان توزیع می‌شوند و در مسیرهای اریب حرکت می‌کنند که در شکل ۹آ نشان داده شده است. در این حالت، حباب‌ها بطور هم‌زمان در سه

مجاورت استوانه‌ی داخلی و هسته‌ی گردابه‌های تیلور، منجر به افزایش نوسانات جریان و در نتیجه افزایش اتلاف هد می‌شوند. در ضمن در اعداد رینولدز دورانی بزرگ، افزایش عدد رینولدز محوری سبب افزایش اتلاف هد می‌شود.

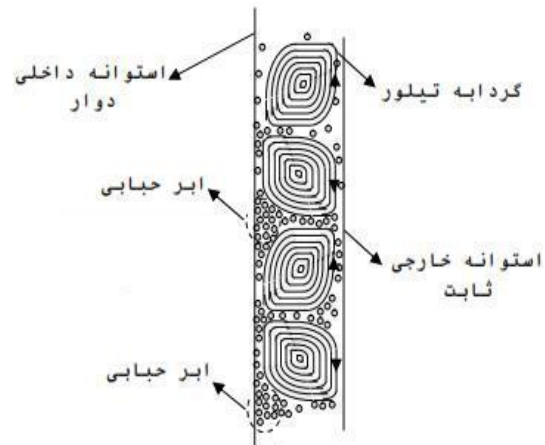
دورانی کوچک، افزایش عدد رینولدز محوری، اتلاف هد را کاهش می‌دهد که این به دلیل میرا شدن گردابه‌های تیلور توسط جریان محوری است. با افزایش عدد رینولدز دورانی، حباب‌ها به یکدیگر پیوسته و با ایجاد ابرهای حبابی در



شکل ۹- تغییرات الگوی جریان محصور در فضای حلقوی نسبت به عدد رینولدز دورانی

۸- مراجع

- [1] McCormick ME, Bhattacharyya R (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. Naval Eng J 85: 11-16.
- [2] Bogdevich VG, Evseev AR, Mayyuga AG, Migirenko GS (1977) Gas-saturation effect on near-wall turbulence characteristics. In Proc. Second International Conference on Drag Reduction, (ed. H.S. Stephens & J. A. Clark), Cambridge, England. BHRA Fluid Engineering, D 2, 25-37.
- [3] Madavan NK, Deutsch S., Merkle CL (1984) Reduction of turbulent skin friction by micro bubbles. Phys Fluids 27: 356-363.
- [4] Madavan NK, Merkle CL, Deutsch S (1985) Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction. J Fluids Eng 107: 370-377.
- [5] Merkle CL, Deutsch S (1989) Microbubble drag reduction. In Frontiers in Experimental Fluid Mechanics. (ed. M. Gad-el-Hak), 291-335. Springer, New York.
- [6] Deutsch S, Castano J (1986) Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body. Phys Fluids 29: 3590-3597.
- [7] Kato H, Miyanaga M, Haramoto Y, Guin MM, (1994) Frictional drag reduction by injecting bubbly water into turbulent boundary layer. In Proc. Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices ASME, 190, 185-194.
- [8] Guin MM, Kato H, Yamaguchi H, Maeda M, Miyanaga M (1996) Reduction of skin friction by micro bubbles and its relation with near wall concentration in a channel. J Mar Sci Technolo 1: 241-254.
- [9] Legner HH (1984) Simple model for gas bubble drag reduction. Phys Fluids 27: 2788-2790.
- [10] Marie JL (1987) A simple analytical formulation for microbubble drag reduction. J Phys-Chem Hydro 13: 213-220.
- [11] Felton K, Loth E (2002) Diffusion of spherical bubbles in a turbulent boundary layer. Int J Multiphas Flow 28: pp. 69-92.
- [12] Ferrante A, Elghobashi S (2004) On the physical mechanism of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles. J Fluid Mech 503: 345-355.
- [13] Xu J, Maxey MR, Karniadakis GE (2002) Numerical simulation of turbulent drag reduction using microbubbles. J Fluid Mech 468: 271-281.
- [14] Lu J, Fernandez A, Tryggvason G (2005) The effect of bubbles on the wall drag in a turbulent channel flow. Phys Fluids 17: 1-12.
- [15] Kanai A, Miyata H (2001) Direct numerical simulation of wall turbulent flows with micro bubbles. Int J Numer Meth Fluids 35: 593-615.



شکل ۱۰- نمای ساده‌ای از تشکیل ابرهای حبابی بین استوانه‌ها

۷- فهرست علائم

قطر استوانه‌های داخلی و خارجی (m)	d_1, d_2
شتاب گرانش زمین (ms^{-2})	g
اختلاف فشار (Nm^2)	ΔP
دبی جریان هوا (m^3s^{-1})	Q_a
دبی جریان آب (m^3s^{-1})	Q_w
فاصله‌ی بین پورتهای سنجش فشار (m)	l
طول استوانه‌های داخلی و خارجی (m)	L_1, L_2
طول نازل همگرا کننده (m)	L_n
شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی (m)	r_1, r_2
سرعت متوسط جریان محوری (ms^{-1})	V_m
عدد رینولدز دورانی	ωRe
عدد رینولدز محوری	Re_a
عدد تیلور	Ta
کسر حجمی	α
وزن مخصوص آب (Nm^{-3})	γ_w
فاصله‌ی شعاعی بین دو استوانه (m)	δ
ضریب اتلاف هد	λ
ویسکوزیته‌ی سینماتیکی آب (m^2s^{-1})	ν_w
نسبت ضریب اتلاف هد	ξ
چگالی آب (kgm^{-3})	ρ_w
سرعت زاویه‌ای (rpm)	ω

- [31] Hubacz R, Wronski S (2004) Horizontal Couette-Taylor flow in a two-phase gas-liquid system: flow patterns, *Exp Therm Fluid Sci* 28: 457-466.
- [32] Van den Berg TH, Luther S, Lathrop D, Lohse D (2005) Drag reduction in bubbly Taylor-Couette turbulence. *Phys Rev* 94: 1-4.
- [33] Van der Berg TH, van Gils DPM, Lathrop DP, Lohse D (2007) Bubbly Turbulent Drag reduction is a boundary Layer effect. *Phys Rev* 98: 084501.
- [34] Murai Y, Oiwa H, Takeda Y (2008) Frictional drag reduction in bubbly Couette-Taylor flow. *Phys Fluids* 20: 1-12.
- [35] Maryami R, Javad Poor M, Farahat S, Shafie Mayam MH (2014) Experimental drag reduction by bubbles in a Couette. *Modares Mech Eng* 9: 1-10. (In Persian)
- [36] Maryami R, Farahat S, Shafie Mayam MH, Javad Poor M (2015) Experimental investigation of the Bubbly drag reduction in the presence of axial flow in a the Couette-Taylor system. *Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)* 47: 33-45. (In Persian)
- [37] Sugiyama K, Calzavarini E, Lohse D (2008) Microbubbly drag reduction in Taylor-Couette flow in the wavy vortex regime. *J Fluid Mech* 1-30.
- [38] Maryami R, Shafie Mayam MH, Farahat S, JavadPoor M (2011) Numerical study of drag reduction using micro bubbles in a vertical Couette-Taylor system. 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition Kish, Iran.
- [39] Yamada Y, (1960) Resistance of a flow through an annulus with an inner rotating cylinder. *Bulletin of JSME* 18: 302-310.
- [40] Shen X, Ceccio SL, Perlin M (2006) Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction. *Exp Fluids* 41: 415-424.
- [41] Bilgen, E, Boulos R (1973) Functional dependence of torque coefficient of coaxial cylinders on gap width and Reynolds numbers. *J Fluid Eng-T ASME* 95(1): 122-126.
- [42] Cazley JC (1985) Heat transfer characteristics of the rotational and axial flow between concentric cylinders. *ASME* 80: 77-90.
- [16] Yanuar, Gunawan, Sunaryo, Jamaluddin A (2012) Micro-bubble drag reduction on a high speed vessel model. *J Marine Sci Appl* 11: 301-304.
- [17] Takahashi T, Kakugawa A, Makino M, Kodama Y (2003) Experimental study on scale effect of drag reduction by microbubbles. using very large flat plate ships. *J Kansai Soc NA Jpn* 239: 11-20.
- [18] Latorre R, Miller A, Philips R (2003) Micro-bubble resistance reduction on a model SES catamaran. *Ocean Eng* 30(17): 2297-2309.
- [19] Nouri NM, Sarreshtehdari A (2009) An experimental study on the effect of air bubble injection on the flow induced rotational hub. *Exp Therm Fluid Sci* 33: 386-392.
- [20] Couette M (1890) Etudes sur le frottement des liquids. *Ann Chim Phys Fluids* 21: 433-510.
- [21] Mallock A (1896) Experiments on fluid viscosity. *Phil Trans R Soc Lond A* 93: 41.
- [22] Rayleigh L (1916) On the dynamics of revolving fluids. *Proc Roy Soc Lond A* 93: 148-154.
- [23] Taylor GI (1923) Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil Trans Roy Soc Lond A* 223: 289-343.
- [24] Cornish JA (1933) Flow of water through fine clearances with relative motion of the boundaries. *Proc R Soc Lond A* 140: 227-240.
- [25] Goldstein S (1937) The stability of viscous fluid flow between rotating cylinders. *Proc Camb Phil Soc* 33: 41-61.
- [26] Chandrasekhar S (1960) The hydrodynamic stability of viscous flow between coaxial cylinders. *Proc Natl Acad Sci* 46: 141-143.
- [27] Di Prima RC (1960) The stability of a viscous fluid between rotating cylinders with an axial flow. *J Fluid Mech* 9: 621-631.
- [28] Donnelly RJ, Fultz D (1960) Experiments on the stability of spiral flow between rotating cylinders. *Proc Natl Acad Sci* 46: 1150-1154.
- [29] Shiomi Y, Kutsuna H, Akagawa K, Ozawa M (1993) Two-phase flow in an annulus with a rotating inner cylinder—flow pattern in bubbly flow region. *Nucl Eng Des* 141(1-2): 27-34.
- [30] Atkhen K, Fontaine J, Wesfreid JE (2000) Highly turbulent Couette-Taylor bubbly flow patterns. *J Fluid Mech* 422: 55-68.