



کاهش درگ اصطکاکی به وسیله حباب‌های هوا در یک سیستم تیلور-کوئت عمودی و در جریان آشفته

رضا مریمی^۱، مرتضی جوادپور^۲، سعید فراहत^{۳*}، محمد حسین شفیعی میام^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
 ۲- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
 ۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
 ۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
 * مشهد، کد پستی ۶۵۹۳۱-۶۵۹۳۱-۹۱۶۴۷ farahat@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

اثر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی در یک سیستم تیلور-کوئت عمودی به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. حباب‌های هوا از قسمت پایینی سیستم به داخل جریان آب تزریق شده‌اند. جریان بین استوانه‌ها کاملاً آشفته است و گردابه‌های تیلور در فضای حلقوی ایجاد شده‌اند. در این آزمایش‌ها بازه تغییرات عدد رینولدز دورانی $10^3 \times 7 \leq Re_{\omega} \leq 5 \times 10^2$ است. تاثیر تزریق حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی با اندازه‌گیری گشتاور اعمال شده روی استوانه داخلی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش عدد رینولدز دورانی تا یک مقدار مشخص منجر به افزایش تاثیر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی می‌شود و برای رینولدزهای بزرگ، این تاثیر عکس می‌گردد. بیشترین کاهش درگ حبابی ثبت شده در این آزمایش‌ها حدود ۵٪ است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۲۷ خرداد ۱۳۹۲
 پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۱۶ بهمن ۱۳۹۲
 کلید واژگان:
 حباب، تیلور-کوئت
 درگ اصطکاکی
 جریان آشفته

Experimental drag reduction by bubbles in a Couette-Taylor system and in turbulent Taylor vortex flow

Reza Maryami¹, Morteza Javad Poor², Saeid Farahat^{3*}, Mohammad Hossein Shafie Mayam⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Sistan & Baluchestan University, Zahedan, Iran.
 2- Department of Mechanical Engineering, Sistan & Baluchestan Univ., Zahedan, Iran.
 3- Department of Mechanical Engineering, Sistan & Baluchestan University, Zahedan, Iran.
 4- Department of Mechanical Engineering, Sistan & Baluchestan University, Zahedan, Iran.
 * P.O.B. 91647-65931 Mashhad, farahat@hamoon.usb.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 17 June 2013
 Accepted 06 August 2013
 Available Online 05 February 2014

Keywords:

Bubbles
 Taylor-Couette
 Skin Friction
 Turbulent Flow

ABSTRACT

The effect of bubbles on frictional drag reduction has been studied experimentally using a vertical Taylor-Couette system. Air bubbles are injected into water flow at the bottom of the system. The flow between cylinders is a fully turbulent flow and Taylor vortices are formed in annulus gap. In these experiments, the variations range of rotational Reynolds number is $5000 \leq Re_{\omega} \leq 7000$. The variations of drag reduction in the presence of bubbles have been investigated by measuring the exerted torque on the inner cylinder. The results show that increasing rotational Reynolds number up to a certain amount leads to enhancement of bubbles effects on drag reduction while the effects are inversed for higher rotational Reynolds number. In this work, the acquired maximum drag reduction is about 5%.

۱- مقدمه

موجی است. از بین این سه نیرو، درگ اصطکاکی بیشترین سهم را در اتلاف انرژی مصرفی به خود اختصاص داده است. بنابراین، در طی چند دهه گذشته تحقیقات زیادی برای کاهش اتلافات ناشی از درگ اصطکاکی صورت پذیرفته است و روش‌های متعددی برای این منظور پیشنهاد شده است. از این روش‌ها می‌توان به کاربرد میکروحباب‌ها، پلیمرها، مواد فعال در سطح، ریبلت‌ها و پوشش‌های موافق نیز اشاره نمود. البته روش‌های دیگری، که بیشتر در به-تاخیر انداختن وقوع لایه مرزی مغشوش و افزایش انحنای منفی پروفیل سرعت در لایه مرزی تمرکز دارند، وجود دارند. این روش‌ها عبارت‌اند از ایجاد

امروزه انرژی در کاربردهای صنعتی و مهندسی متعددی از جمله ماشین‌های هیدرولیکی، عملیات چاه نفت، سیستم‌های پمپاژ، خطوط لوله انتقال نفت، هواپیماها، زیردریایی‌ها، کشتی‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخش زیادی از این انرژی همواره صرف غلبه بر نیروهای مقاوم وارده بر سیال مایع متحرک روی سطح جامد یا جسم جامد متحرک در سیال مایع می‌گردد. مهم‌ترین نیروی مقاوم اتلاف‌کننده انرژی در رابطه با این کاربردها، نیروی درگ است. این نیرو در حالت کلی دارای سه شکل اصطکاکی، فشاری و

Please cite this article using:

R. Maryami, M. Javad Poor, S. Farahat, M.H. Shafie Mayam, Experimental drag reduction by bubbles in a Couette-Taylor system and in turbulent Taylor vortex flow, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 113-122, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گرادین فشار موافق، مکش، سرد کردن گازها و گرم کردن مایعات. از بین تمامی روش‌های اشاره شده در بالا روش کاهش درگ میکروحبابی یا تزریق سیال گازی به لایه مرزی به سبب دارا بودن زمینه مناسب جهت کاربردهای عملی و مزایایی چون ارزان بودن و عدم ایجاد آلاینده‌ی زیست محیطی، به‌عنوان یک روش نویدبخش، مورد توجه جدی محققین قرار گرفته است.

۱-۱- تاریخچه کاهش درگ میکروحبابی

ایده استفاده از سیال گازی جهت روان‌سازی حرکت اجسام شناور به سال‌های ۱۸۸۰ باز می‌گردد، اما اولین مطالعه کاربردی ثبت شده در این زمینه در سال ۱۹۷۳ توسط مک کرمیک و بتاچاریا [۱] انجام پذیرفت. آن‌ها در این مطالعه تجربی، با پیچیدن سیمی مسی (کاتد) به دور یک مدل غوطه‌ور در آب و عبور جریان برق از سیم، آب را الکترولیز کردند که به دنبال آن حباب‌های هیدروژن در اطراف یک هیدروفویل شناور در آب آزاد گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش شدت جریان و در نتیجه افزایش میزان هیدروژن آزاد شده، سرعت مدل نسبت به حالت عادی افزایش یافته است. دلیل این اتفاق تغییر در ویسکوزیته مایع نزدیک دیواره و درهم ریخته شدن زیرلایه ویسکوز توسط حباب‌ها عنوان شد. آزمایش‌هایی پیرامون بررسی اثر غلظت گاز در لایه مرزی روی کاهش درگ توسط بگدویچ و همکاران [۲] در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۷ صورت پذیرفتند. آزمایش‌ها بر روی لایه مرزی مغشوش صفحه تخت و دیواره کانال انجام شدند. حباب‌ها با استفاده از صفحات متخلخل و عبور هوا از میان آن‌ها تولید شدند. در این مطالعه، میزان غلظت حباب‌ها در نزدیکی دیواره عامل بسیار مهمی در کاهش درگ پوسته‌ای به‌وسیله میکروحباب‌ها گزارش شده است. همچنین، کاهش درگ با افزایش فاصله از محل تزریق کاهش می‌یابد تا جایی که مقادیر اولیه درگ پدیدار می‌شوند. اثر سرعت جریان آزاد و نیروی شناوری بر کاهش درگ میکروحبابی توسط مدون و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۴ مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در قسمتی از یک تونل آب با مقطع مستطیلی روی صفحه تختی که روی دیواره بالایی و پایینی کانال نصب گردیده بود، صورت پذیرفت. اندازه‌گیری اصطکاک پوسته به دو صورت اصطکاک پوسته در سراسر یک ناحیه و همچنین اصطکاک پوسته موضعی انجام گرفته است. نتایج نشان داد که به‌ازای یک نرخ تزریق معین کاهش درگ برای سرعت‌های بالاتر کمتر است. همچنین، برای سرعت‌های پایین‌تر کاهش درگ در دیواره بالایی به میزان قابل توجهی از دیواره پایینی بیشتر می‌باشد. اثر توزیع میکروحباب‌ها در لایه مرزی به‌عنوان یکی از چالش‌های بسیار مهم توسط مدون و همکاران [۴] در سال ۱۹۸۵ با استفاده از شبیه‌سازی عددی فرآیند کاهش درگ صورت پذیرفت. در این مطالعه، مدل طول اختلاط مورد استفاده قرار گرفته است که فرم اصلی آن تحت حضور میکروحباب‌ها تغییر نمی‌کند. نتایج به‌دست آمده از این مدل مشخص نمود که مقدار کاهش درگ پوسته‌ای به غلظت حجمی حباب‌ها و موقعیت و توزیع آن‌ها در لایه مرزی بستگی دارد. همچنین، بهترین اثرگذاری حباب‌ها در کاهش درگ پوسته‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که حباب‌ها در لایه بافری واقع شوند. اما آزمایش‌هایی که توسط مرکل و دیوویچ [۵] در سال ۱۹۸۹ در تونل آب صورت گرفت حاکی از اثرگذاری جدی میکروحباب‌ها در کاهش درگ در حالتی است که آن‌ها در لایه بافری واقع شده باشند. نتایج این آزمایش‌ها همچنین حاکی از رشد ضخامت زیرلایه ویسکوز تحت اثر حضور حباب‌ها بوده است. اصطکاک پوسته‌ای کل و گرادین فشار استاتیکی بر روی دیواره یک تونل آب در حضور میکروحباب‌ها توسط کاستانو و دیوویچ [۶] در سال ۱۹۸۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد

که حضور میکروحباب‌ها اثری بر گرادین فشار محوری و همچنین تقارن میدان جریان حول جسم، ندارد. چند سال پس از این بررسی، در سال ۱۹۹۱، کلارک و دیوویچ [۷] مطالعه‌ای را جهت بررسی اثر گرادین فشار بر کاهش درگ انجام دادند. در این مطالعه، اثرات هر یک از گرادین‌های فشار محوری موافق و معکوس، بر روی جریان خارجی دوفازی حول یک جسم با تقارن محوری، مورد کنکاش قرار گرفت. طبق نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که وجود یک گرادین فشار موافق به‌طریقی از کاهش درگ جلوگیری می‌کند. همچنین، در حالت گرادین فشار معکوس، برخلاف حالت مربوط به گرادین فشار صفر، کاهش درگ چشمگیری (در حدود ۶۰٪) در پایین‌ترین سرعت (۶/۴ m/s) مشاهده شده است. کوداما و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۰، در یک مطالعه، مسأله توزیع میکروحباب‌ها و به‌دنبال آن کاهش درگ را در موقعیت‌های مختلفی از فاصله پایین‌دست و همچنین در فواصل عمودی مختلفی از سطح جسم مورد بررسی قرار دادند. داده‌ها نشان دادند که به‌طور کلی، تحت یک نسبت حجمی ثابت گاز، میزان کاهش درگ در طول جریان تغییر قابل توجهی نداشته است. همچنین، نسبت حجمی موضعی، با افزایش فاصله از دیواره، کاهش جدی یافته است. یک سری شبیه‌سازی‌های عددی روی حباب‌ها در جریان آشفته داخل کانال برای کسر حجمی متوسط ۸٪ توسط ایکس یو و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۲ نیز انجام پذیرفت. آن‌ها شبیه‌سازی مستقیمی را با استفاده از شیوه کوپلینگ نیرویی به‌منظور شبیه‌سازی حضور حباب‌ها و تاثیر آنها روی جریان نیز انجام دادند. نتایج نشان دادند که حباب‌های بزرگ سبب کاهش درگ گذرا و حباب‌های کوچک سبب کاهش درگ پایدار می‌شوند. اثرات نمک و عامل‌های فعال در سطح بر اندازه حباب و کاهش درگ میکروحبابی توسط شن و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ابتدا حباب‌ها با تزریق نیتروژن فشرده به محیط‌های آبی مختلف تولید شدند. سپس با استفاده از یک روش خاص حباب‌های پایدار چربی حامل هوا تولید شدند که کوچک‌تر از حباب‌هایی تولید شده به روش تزریق گاز بودند. نتایج نشان دادند که با افزودن عامل فعال در سطح^۱ و نمک، اندازه متوسط حباب کاهش می‌یابد. همچنین، میزان کاهش درگ به‌وسیله میکروحباب‌ها به نحو مؤثری به نرخ حجمی تزریق گاز و فشار استاتیکی در لایه مرزی وابسته است.

وو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۷، با طراحی یک رشته آزمایش‌ها، مطالعات بسیار مهمی را بر روی مدل‌هایی از سطح، کشتی و جسم مستغرق در آب انجام دادند. آزمایش‌ها در تونل عمودی و افقی با قابلیت بازگردش آب صورت پذیرفتند. نتایج حاکی از آن است که تزریق بیش از اندازه میکروحباب‌ها سبب پدیده انباشتگی خواهد شد که تخریب لایه مرزی را به همراه دارد. در این حالت میزان بازدهی کاهش درگ افت خواهد کرد.

نوری و سررشته‌داری [۱۲] در سال ۲۰۰۹ به‌طور تجربی اثر تزریق حباب‌ها را روی کاهش اتلافات یک جسم دوار بررسی کردند. در این مطالعه، نیروی محرکه جسم دوار توسط آب فراهم شده است و حباب‌های هوا در مجاورت این جسم تزریق شدند. نتایج نشان دادند که افزایش کسر حجمی تا حدکثر مقدار خود در این مطالعه منجر به کاهش تنش برشی اعمالی روی سطح جسم دوار گردیده است. کاهش درگ میکروحبابی در لایه مرزی آشفته توسط ژاکب و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰ بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از تکنیک‌های اپتیکی میدان سرعت فاز مایع و همچنین مشخصات حباب‌ها در سیستم تعیین شد. نتایج نشان دادند که برهم کنش بین حباب‌ها و آشفته‌گی

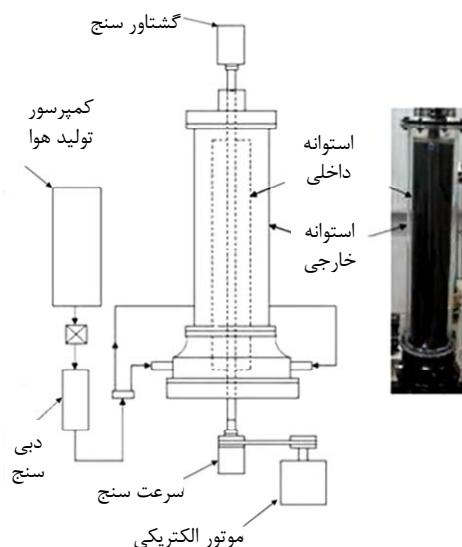
1- Surfactant

اصطکاکی در سیستم‌های تیلور-کوئنت توسط مورای [۱۸] و ون در برگ [۱۶]- [۱۷] به‌طور تجربی و توسط سوگیاما [۱۹] به‌طور عددی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این بازه تغییرات رینولدز دورانی در کار مورای [۱۸] $4500 \leq Re_{\omega} \leq 6000$ بوده است و این پدیده در جریان نسبتاً آشفته بررسی شده است. این در حالی است که بازه تغییرات رینولدز دورانی در کار ون در برگ [۱۶] $10^6 \leq Re_{\omega} \leq 10^7$ و شرایط جریان کاملاً آشفته بوده است. تحقیقی که سوگیاما [۱۹] انجام داد، شبیه‌سازی کار تجربی مورای بوده است. بنابراین، مشاهده می‌شود که کاهش درگ میکروحبابی در جریان‌های تیلور-کوئنت در بازه $70 \times 10^2 \leq Re_{\omega} \leq 5 \times 10^3$ مورد بررسی قرار نگرفته است، یعنی در جریانی که محدوده تغییرات رینولدز دورانی در آن بین بازه‌های $4500 \leq Re_{\omega} \leq 6000$ و $10^6 \leq Re_{\omega} \leq 10^7$ باشد. با توجه به اینکه مطالعه رفتار میکروحباب‌ها روی کاهش درگ از جریان آرام تا جریان کاملاً آشفته مستلزم بررسی این پدیده در بازه $70 \times 10^2 \leq Re_{\omega} \leq 5 \times 10^3$ علاوه بر دو بازه $4500 \leq Re_{\omega} \leq 6000$ و $10^6 \leq Re_{\omega} \leq 10^7$ است، بنابراین در مطالعه حاضر اثر حباب‌ها روی کاهش درگ در جریان تیلور-کوئنت به‌طور تجربی در بازه $5 \times 10^3 \leq Re_{\omega} \leq 70 \times 10^2$ بررسی شده است. در سیستم تیلور-کوئنت به‌کار رفته در این تحقیق حباب‌هایی در ابعاد $1/2$ mm و کمتر از آن از پایین سیستم به داخل فضای حلقوی بین دو استوانه تزریق شده‌اند. تغییرات نسبت ضریب اصطکاک و نرخ اتلاف انرژی کل به‌منظور بررسی اثر میکروحباب‌ها روی کاهش درگ با اندازه‌گیری گشتاور وارده بر استوانه داخلی نشان داده شده است.

۲- دستگاه آزمایشگاهی

شماتیکی از دستگاه آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم متشکل از دو استوانه هم مرکز است که استوانه داخلی متحرک و استوانه خارجی ثابت است. قطر خارجی استوانه داخلی 120 mm است. این استوانه از پلکسی گلاس غیر شفاف ساخته شده است تا از عبور نور به‌منظور تصویربرداری بهتر جلوگیری کند.

قطر داخلی استوانه خارجی 140 mm است و از پلکسی گلاس شفاف ساخته شده است. ارتفاع استوانه داخلی و خارجی به ترتیب 630 mm و 600 mm می‌باشد. استوانه خارجی روی یک نازل همگرا کننده به ارتفاع 100 mm قرار گرفته است. فاصله شعاعی بین دو استوانه 10 mm و ارتفاع موثر محل تست 630 mm است؛ بنابراین نسبت جنبه‌ای در این سیستم 63 است.



شکل ۱ نقشه خلاصه شده دستگاه تیلور-کوئنت

جریان منجر به اصلاح قابل توجه میدان جریان می‌شود. در این حالت کاهش تنش برشی 25% مشاهده شد. تسای و چان [۱۴] در سال 2011 تکنیک کاهش درگ میکروحبابی را روی یک صفحه تخت در یک تونل آب و همچنین یک تانک مورد بررسی قرار دادند. میکروحباب‌ها به‌وسیله مواد متخلخل روی صفحه تولید شدند. با استفاده از مدل اختلاط لایه مرزی پیش‌بینی کاهش درگ میکروحبابی در هر حالت صورت پذیرفت. نتایج نشان دادند که مدل مربوطه کاهش درگ خوبی را برای تزریق میکروحباب‌ها روی صفحه تخت در تونل آب پیش‌بینی می‌کند. در حالی که این مدل کاهش درگ دور از واقعیت را برای میکروحباب‌ها در تانک دارد. بهبود تاثیر تزریق میکروحباب‌ها روی یک مدل قایق تندرو توسط یانار و همکاران [۱۵] در سال 2012 مطالعه شد. علاوه بر این، تاثیر موقعیت تزریق حباب‌ها و همچنین سرعت آن‌ها در جریان مجاور سطح قایق بررسی شد. مدل توسط یک موتور الکتریکی، که سرعت آن قابل تغییر بود، به رکت درآورده شد. نتایج نشان داد که تزریق میکروحباب‌ها در وسط قایق بیشترین تاثیر را در کاهش درگ اصطکاکی دارد. در این حالت مقدار کاهش درگ به‌دست آمده در حدود 6% - 9% بوده است.

با توجه به اینکه پارامترهای متعددی از جمله سرعت جریان، اندازه حباب‌ها، نوع سیال مایع، ناخالصی‌های موجود در مایع، میزان تزریق حباب‌ها، زاویه تزریق حباب‌ها و غیره روی کاهش درگ میکروحبابی تاثیر دارند، بنابراین این پدیده در وضعیت پیچیده‌ای اتفاق می‌افتد و مطالعه مکانیزم آن دشوار است. به‌منظور حل این مشکل در سال‌های اخیر، علاوه بر بررسی کاهش درگ میکروحبابی در جریان‌های داخلی و خارجی، تحقیقات مشابهی در سیستم‌های تیلور-کوئنت انجام شده است. مزیت استفاده از این سیستم‌ها برای بررسی کاهش درگ میکروحبابی آن است که در این سیستم‌ها حالت پایداری آماری^۱ به‌آسانی در دسترس است و دیگر آنکه در این سیستم‌ها می‌توان جریان را دایم فرض نمود.

۲-۱- تاریخچه‌ی کاهش درگ میکروحبابی در جریان‌های تیلور-کوئنت

بررسی اثر میکروحباب‌ها روی کاهش درگ در سیستم‌های تیلور-کوئنت تقریباً اولین بار توسط ون در برگ و همکاران [۱۶] در سال 2005 انجام شد. آن‌ها اثر میکروحباب‌ها روی کاهش درگ را در جریان آشفته و در یک سیستم تیلور-کوئنت بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در اعداد رینولدز دورانی کوچک، کاهش درگ به‌وسیله میکروحباب‌ها کم است و در رینولدز ماکزیمم این مقدار به 20% می‌رسد. اثر زبری سطوح روی کاهش درگ میکروحبابی توسط ون در برگ و همکاران [۱۷] در سال 2007 بررسی شد. نتایج نشان دادند که زبری دیواره از کاهش درگ به‌وسیله میکروحباب‌ها جلوگیری می‌کند. این در حالی است که با افزایش کسر حجمی تا حدود 2% کاهش درگی تا حدود 20% به‌وسیله حباب‌ها برای سطح صاف ثبت شده است. مورای و همکاران [۱۸] در سال 2008 پدیده کاهش درگ میکروحبابی را در سیستم‌های به‌طور مفصل بررسی کردند. در این مطالعه جریان نسبتاً آشفته بوده است. نتایج نشان دادند که تزریق حباب‌ها باعث کشیده شدن گردابه‌های تیلور در راستای محور استوانه‌ها می‌شود. این اتفاق کاهش تعداد گردابه‌ها و در نتیجه کاهش درگ اصطکاکی را به‌همراه دارد. اثر میکروحباب‌ها بر جریان تیلور-کوئنت طی یک شبیه‌سازی عددی مستقیم توسط سوگیاما و همکاران [۱۹] در سال 2008 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از کاهش گشتاور پیچشی تحت اثر میکروحباب‌هاست. همان‌طور که در بالا ذکر شد، اثر میکروحباب‌ها روی کاهش درگ

1- Statistical stationary

جدول ۲ رژیم‌های جریان تیلور-کوئت

حالت جریان	بازه رینولدز دورانی	عدد رینولدز دورانی بحرانی
جریان چرخشی کوئت	$Re_{\omega} < 92$	$Re_{\omega c1} = 92$
جریان گردابه‌ای تیلور	$92 < Re_{\omega} < 138$	$Re_{\omega c2} = 138$
جریان گردابه‌ای موجی	$138 < Re_{\omega} < 1020$	$Re_{\omega c3} = 1020$
جریان گردابه‌ای موجی معتدل شده	$1020 < Re_{\omega} < 1380$	$Re_{\omega c4} = 1380$
جریان گردابه‌ای تیلور آشفته	$Re_{\omega} > 1380$	

با توجه به اینکه شن [۱۰] نشان داد که وجود ناخالصی‌هایی مانند نمک و دیگر محلول‌های فعال در سطح روی اندازه حباب‌ها و کاهش درگ میکروحبابی موثر است؛ بنابراین سعی شده تا خلوص آن در تمامی آزمایش‌ها همواره ثابت باشد.

۳- پارامترهای بی بعد

۳-۱- پارامترهای بی بعد جریان

در این آزمایش‌ها، پارامترهای کنترل‌کننده اصلی عبارت‌اند از: عدد رینولدز دورانی و عدد تیلور. ماهیت جریان از نظر آرام یا معشوش بودن با نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز مشخص می‌شود و این نسبت عدد رینولدز نامیده می‌شود. در جریان‌های تیلور-کوئت ماهیت جریان مماسی ناشی از دوران استوانه داخلی با عدد رینولدز دورانی تعیین می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Re_{\omega} = r_1 \delta \omega / \nu_w \quad (1)$$

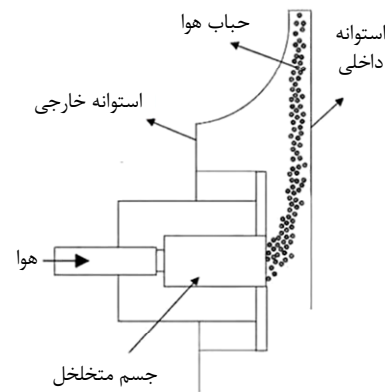
در اینجا ν_w ویسکوزیته سینماتیکی آب بدون حباب است. به خاطر اینکه مورای [۱۸] عنوان می‌کند که در جریان دوفازی در یک سیستم تیلور-کوئت، ویسکوزیته موثر تقریباً تحت تاثیر حباب‌ها نیست، بنابراین از ویسکوزیته سینماتیکی آب بدون حباب برای تعریف عدد رینولدز در این تحقیق استفاده شده است. در جریان تک فاز تیلور-کوئت با تغییر عدد رینولدز دورانی پنج رژیم شکل می‌گیرد (جدول ۲).

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر کوچک‌ترین عدد رینولدز دورانی بزرگ‌تر از $Re_{\omega c4}$ است، یعنی $5000 > 1380$ ، بنابراین رژیم جریان در این آزمایش‌ها گردابه‌ای تیلور آشفته است.

در یک سیستم تیلور-کوئت با استوانه داخلی متحرک، هنگامی که سرعت زاویه‌ای این استوانه از صفر تا یک سرعت زاویه‌ای مشخص افزایش می‌یابد، جریان برقرار شده در فضای حلقوی بین دو استوانه کاملاً آرام است. این جریان برشی است و اصطلاحاً جریان کوئت نامیده می‌شود. هنگامی که سرعت زاویه‌ای بیشتر از این مقدار بحرانی می‌شود، نوسانات سرعت چرخشی، که گردابه‌های تیلور نامیده می‌شوند، بین دو استوانه ظاهر می‌شوند. در این حالت به جریان برقرار شده در سیستم جریان تیلور-کوئت گفته می‌شود. این گردابه‌ها ناشی از تاثیرگذاری نیروی گریز از مرکز روی ذرات سیال مایع است. در سرعت‌های دورانی کم نیروهای اصطکاکی سبب میرا شدن این گردابه‌ها می‌شوند. زمان پیدایش گردابه‌های تیلور با عدد تیلور مشخص می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

از معادله (۲) می‌توان فهمید که زمان پیدایش گردابه‌های تیلور علاوه بر عدد رینولدز دورانی وابسته به فاصله شعاعی بین دو استوانه است. کازلی [۲۰] در سال ۱۹۸۵ 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، بازه تغییرات عدد تیلور در آزمایش‌های حاضر از



شکل ۲ وسیله تزریق کننده هوا به سیستم

هوای لازم برای تولید حباب‌ها و همچنین تامین فشار کافی برای تزریق هوا به سیستم از طریق کمپرسوری با حداکثر فشار ۸۰۰ kpa تامین شده است. فشار هوای تزریقی به سیستم در تمام آزمایش‌ها $98/3 \pm 0/1$ kpas بوده است. حباب‌های هوا از طریق دو وسیله تزریق کننده، که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است، به داخل فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز تزریق می‌شوند. این وسایل روی نازل همگرا کننده و دقیقاً روبه‌روی هم نصب شده‌اند. این وسایل دارای جسمی متخلخل به مساحت $1017/36 \text{ mm}^2$ می‌باشند که قطر اسمی منافذهای آن تقریباً $20 \mu\text{m}$ است. دبی هوای ورودی به سیستم از طریق یک فلومتر هوا با دقت $0/001 \text{ m}^3/\text{min}$ کنترل می‌شود.

از یک الکتروموتور با حداکثر سرعت 3000 rpm و توان $1/5 \text{ hp}$ برای دوران استوانه داخلی استفاده شده است. به منظور کاهش ارتعاشات سیستم هنگام دوران استوانه داخلی، الکتروموتور از طریق یک مکانیزم تسمه و پولی به شفت متصل به استوانه داخلی متصل شده است. علاوه بر این، شفت استوانه داخلی از بالا و پایین از طریق دو بلبرینگ حمایت می‌شود تا میل به دوران را برای این استوانه افزایش دهد. یک گشتاورسنج با دقت $0/1 \text{ kg/cm}$ برای اندازه‌گیری گشتاور وارده بر استوانه داخلی دقیقاً روی شفت متصل به این استوانه نصب شده است. تغییرات سرعت زاویه‌ای استوانه داخلی توسط یک سرعت‌سنج با دقت $0/1 \text{ rpm}$ اندازه‌گیری شده است.

فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز با آب به‌عنوان سیال کاری پر شده است. خصوصیات فیزیکی آب و همچنین دیگر شرایط آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ شرایط آزمایش

پارامتر	مقدار
چگالی آب	$\rho_w = 996/95 \text{ kg/m}^3$
ویسکوزیته سینماتیکی آب	$\nu_w = 0/9025 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
دمای آب	25°C
تنش سطحی آب	$0/072 \text{ N/m}$
شدت آشفتنگی	$i \approx 0/06$
سرعت دورانی	$50 < \omega < 975 \text{ rpm}$
دبی جریان هوا	$0 \leq Q_a \leq 6/280 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
عدد رینولدز دورانی	$5 \times 10^3 < Re_{\omega} < 70 \times 10^3$
عدد تیلور	$41/66 \times 10^5 < Ta < 81/66 \times 10^7$
عدد وبر	$0/236 < We < 2/387$
عدد فرود	$0/409 < Fr < 7/98$
قطر حباب	$1/2 \text{ mm}$

مقدار خطا در تعیین قطر حباب‌ها تقریباً ± 1 پیکسل، یعنی $60 \mu\text{m}$ بوده است. به منظور کاهش مقدار خطای مربوط به قطر حباب‌ها، در هر تصویر به-طور میانگین 500 حباب انتخاب شده است.

برای تعیین سرعت صعود حباب‌ها، هر فرم از فیلم سرعت بالا به عکس تبدیل شده است. به‌طور میانگین هر یک دقیقه فیلم به 280 عکس تبدیل شده است. این تصاویر پست سر هم در یک کد تحلیل شده و موقعیت یک حباب که به طور تصادفی انتخاب شده در تمامی تصاویر جستجو شده است. در نهایت با داده‌های به‌دست آمده سرعت صعود حباب اندازه‌گیری شده است. مقدار خطای نسبی در تعیین سرعت صعود حباب‌ها تقریباً 10% و مقدار عدم قطعیت آن 0.13 mm/s می‌باشد.

۵- روش انجام آزمایش‌ها

در این مطالعه سعی شده تا شرایط جریان هنگام اندازه‌گیری پارامتر هدف (گشتاور وارده بر استوانه داخلی) و همچنین تصویربرداری برای تعیین قطر و سرعت صعود حباب‌ها مستقل از زمان (دایم) باشد؛ یعنی اندازه‌گیری و تصویربرداری در جریانی با شرایط یکنواخت صورت پذیرفته است. بنابراین برای دست یافتن به چنین شرایطی، آزمایش‌ها به‌صورت زیر انجام شده است. ابتدا هوا با نرخ از پیش تعیین شده به سیستم تزریق شده است (فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز با آب پر می‌باشد). سپس استوانه داخلی در سرعتی مشخص (کمترین سرعت دورانی در بازه $975 < \omega < 50$ rpm) دوران داده شده است. قبل از اندازه‌گیری پارامتر هدف، برای مدتی صبر شده تا شرایط سیستم کاملاً یکنواخت گردد. سپس گشتاور مورد نظر اندازه‌گیری شده و تصاویر لازم گرفته شده است. با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه داخلی در همان نرخ تزریق هوای قبلی دوباره، تحت شرایط ذکر شده، اندازه‌گیری گشتاور و تصویربرداری‌های لازم انجام شده است. تمامی این فرایندها با تغییر نرخ تزریق هوا دوباره تکرار شده است.

۶- تعریف ضریب اصطکاک

در یک سیستم تیلور-کوئنت، بزرگ‌ترین مولفه تنش برشی اعمال شده روی استوانه داخلی، مولفه وارده بر دیواره جانبی این استوانه و گذرنده از صفحه عمود بر محور استوانه‌هاست؛ یعنی بیشترین اتلافات در جریان‌های تیلور-کوئنت در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز رخ می‌دهد. در مقایسه با این مولفه می‌توان از دیگر مولفه تنش برشی (مولفه مماسی) گذرنده از صفحه عبوری از محور استوانه‌ها و همچنین تنش برشی وارده بر سطوح دایره‌ای شکل بالا و پایین استوانه داخلی صرف‌نظر کرد. تنش برشی میانگین وارده بر دیواره جانبی استوانه داخلی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_w = T / (2\pi r_1^2 L_1) \quad (6)$$

در اینجا T گشتاور وارده بر دیواره جانبی استوانه داخلی است. این گشتاور، گشتاور اندازه‌گیری شده توسط گشتاورسنج نیست. در حقیقت، با استفاده از گشتاورسنج، گشتاور کل وارده بر استوانه داخلی اندازه‌گیری می‌شود. گشتاور کل علاوه بر گشتاور وارده بر دیواره جانبی استوانه داخلی شامل گشتاور وارده بر سطوح دایره‌ای شکل بالا و پایین استوانه داخلی و گشتاور وارد شده از طریق کاسه ندها و بلبرینگ‌ها به شفت متصل به استوانه داخلی می‌باشد. برای اندازه‌گیری گشتاور T ، کلیه گشتاورهای اشاره شده در بالا ابتدا اندازه‌گیری شده و از گشتاور کل اندازه‌گیری شده توسط گشتاورسنج کم شده‌اند. به‌خاطر اینکه تنش برشی وارده بر سطوح دایره‌ای شکل بالا و پایین

کاهش درگ اصطکاکی به وسیله حباب‌های هوا در یک سیستم تیلور-کوئنت عمودی و در جریان آشفته

1.0×10^{-4} تا 1.0×10^{-7} است. بنابراین با توجه به آنچه که گفته شد و همچنین بازه تغییرات عدد تیلور در کار حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که گردابه‌های تیلور در تمام رنج تغییرات عدد رینولدز دورانی در جریان ظاهر می‌شوند.

۳-۲- پارامترهای بی‌بعد حباب‌ها

برای اینکه بزرگی برهم کنش بین حباب‌ها و گردابه‌های ایجاد شده در جریان مشخص شود، از عدد بی‌بعد کسرحجمی استفاده می‌شود. این عدد برای جریان‌های تیلور-کوئنت به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha = Q_a / (\pi(r_2^2 - r_1^2) U_b) \quad (3)$$

در این رابطه U_b میانگین سرعت صعود حباب‌ها در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز است. این سرعت با استفاده از شیوه پردازش تصویر و دنبال کردن ذره اندازه‌گیری شده است. با توجه به مقدار عدم قطعیت سرعت صعود حباب‌ها، که در قسمت ۴ به آن اشاره خواهد شد و همچنین مقدار خطای نسبی دبی جریان هوا که $5/10\%$ است، مقدار عدم قطعیت کسر حجمی تقریباً $1/10\%$ است.

برای مقایسه بزرگی نیروهای گریز از مرکز با نیروی شناوری وارده بر حباب‌ها، از عدد بدون بعد فرود استفاده می‌شود. در حقیقت با استفاده از این عدد می‌توان نحوه حرکت حباب‌ها و توزیع آنها را در سیال مایع توصیف کرد. این عدد نسبت شتاب گریز از مرکز به شتاب گرانش است و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Fr = \omega(r_1/g)^{0.5} \quad (4)$$

تراکم‌پذیری حباب‌ها روی اغتشاشات ایجاد شده در جریان و در نهایت روی کاهش درگ میکروحبابی موثر است. لو و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۵ با انجام یک شبیه‌سازی مستقیم نشان داده‌اند که حباب‌های تغییرشکل‌پذیر می‌توانند با ازبین بردن گردابه‌های موجود در جهت جریان، کاهش چشمگیری در اصطکاک دیواره ایجاد کنند. اما حرکت حباب‌هایی با تراکم‌پذیری پایین توسط زیرلایه لزج کند شده و افزایش درگ را در پی داشته است. همچنین ننگر [۲۲] در سال ۱۹۸۴ نشان داد که حضور میکروحباب‌ها و تراکم‌پذیری آن‌ها منجر به ایجاد یک ویسکوزیته حجمی می‌گردد که اغتشاشات را میرا می‌کند. تراکم‌پذیری و تغییر شکل حباب‌ها با عدد بدون بعد وبر مشخص می‌شود. این عدد به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

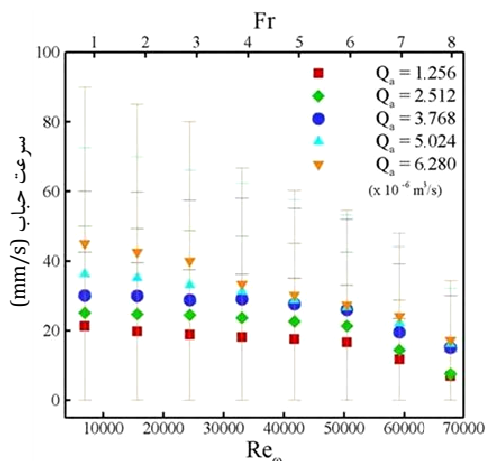
$$We = (\rho_w / \delta_w) (v_w^2 r_b / (r_2 - r_1)^2) i^2 Re_w^2 \quad (5)$$

در اینجا i و σ به ترتیب شدت آشفته‌گی جریان و تنش سطحی آب است. به خاطر اینکه بازه تغییرات عدد رینولدز دورانی در کار حاضر $1.0 \times 10^3 \leq Re_w \leq 1.0 \times 10^4$ است، بنابراین طبق نتایج لوئیس [۲۳] در سال ۱۹۹۹ مقدار $i \approx 0.06$ در نظر گرفته شده است.

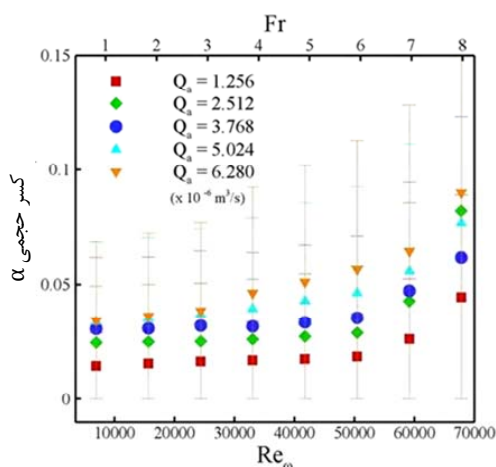
۴- تصویربرداری و پردازش تصویر

برای اندازه‌گیری سرعت صعود حباب‌ها و قطر آن‌ها از تصویربرداری و پردازش تصویر استفاده شده است. برای این منظور از دوربین فیلم‌برداری دیجیتال با سرعت بالا کاسیو مدل EX-F1 و مجهز به سنسور CMOS و پردازنده سرعت بالای LSI استفاده شده است. برای تعیین قطر حباب‌ها از عکس‌برداری و برای تعیین سرعت حباب‌ها از فیلم‌برداری با سرعت بالا استفاده شده است و داده‌ها مستقیماً به کامپیوتر منتقل گردیده است.

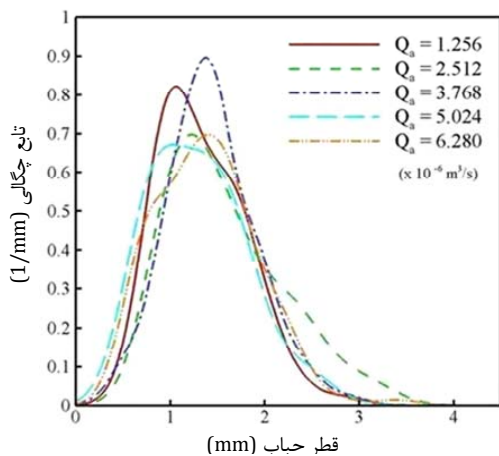
برای پردازش تصویر، ابتدا نویزهای موجود در تصاویر حذف شده است و سپس با استفاده از الگوریتم تعیین لبه مرز حباب‌ها مشخص شده است.



شکل ۳ تغییرات سرعت صعود حباب‌ها برحسب عدد رینولدز دورانی



شکل ۴ تغییرات کسر حجمی برحسب عدد رینولدز دورانی



شکل ۵ تغییرات قطر حباب‌ها برحسب نرخ تزریق هوا

برای تعیین این توزیع از تابع احتمال چگالی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که حباب‌هایی با قطر 1/2mm بیشترین احتمال وجود را بین تمام حباب‌هایی که ممکن است در هر نرخ تزریق در سیستم وجود داشته باشند، دارا هستند. یعنی حباب‌هایی با چنین قطری بین تمامی حباب‌ها بیشترین تعداد را دارند.

علاوه بر این، تقریباً با افزایش نرخ هوای تزریقی به سیستم، بیشترین احتمال برای وجود حباب‌هایی با قطر 1/2mm کاهش می‌یابد. در حالت کلی بازه تغییرات قطر حباب‌ها در تمام حالت‌ها بین 0/1mm تا 4/05mm است (جدول ۳).

استوانه داخلی، همان‌طور که قبلاً اشاره شده، در مقایسه با تنش برشی عمودی وارده بر دیواره جانبی این استوانه کوچک می‌باشند، می‌توان از گشتاور وارده بر این دو سطح صرف‌نظر کرد. گشتاور وارده توسط کاسه نمدها و بلبرینگ‌ها به شفت استوانه داخلی، در حالتی که سیستم خالی از آب است، اندازه‌گیری شده‌اند.

ضریب اصطکاک با محاسبه τ_w از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_f = 2\tau_w / (\rho_w r_1 \omega) \quad (7)$$

برای بررسی اثر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی، نسبت ضریب اصطکاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\eta = (C_{f0} - C_f) / C_{f0} \quad (8)$$

در اینجا زیراندیس صفر مربوط به حالتی است که در سیستم تزریق حباب‌ها صورت نپذیرفته است، یعنی برای جریان تیلور-کوئنت تک‌فاز.

اعمال تنش برشی عمودی به دیواره جانبی استوانه داخلی در حین دوران آن موجب اتلاف مقداری از کل انرژی ورودی برای دوران این استوانه در یک سیستم تیلور-کوئنت می‌گردد. همان‌طور که قبلاً عنوان شد، این مقدار اتلاف انرژی بیشتر مقداری است که در یک سیستم تیلور-کوئنت ممکن است به وقوع بپیوندد. برای بررسی تاثیر حباب‌ها روی این انرژی اتلاfi، تغییرات نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم مورد ارزیابی قرار گرفته است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varepsilon = T\omega / (2\pi\rho_w L_1 (r_2^2 - r_1^2)) \quad (9)$$

در اینجا ρ_w دانسیته آب بدون حباب است.

۷- نتایج و بحث

تغییرات سرعت صعود حباب‌ها در جریان تیلور-کوئنت پس از تزریق هوا به سیستم برحسب عدد رینولدز دورانی و عدد فرود در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هر عدد رینولدز دورانی یا هر عدد فرود، با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم، سرعت صعود حباب‌ها در راستای محور استوانه‌ها افزایش می‌یابد. در ضمن مشاهده می‌شود که هر چه عدد رینولدز دورانی افزایش می‌یابد، در هر نرخ تزریق هوا سرعت صعود کاهش می‌یابد. دلیل کاهش سرعت صعود حباب‌ها با افزایش عدد رینولدز دورانی، افزایش سرعت دورانی استوانه داخلی است. در حقیقت با افزایش سرعت دورانی استوانه داخلی نیروی گریز از مرکز موثر روی حباب‌ها افزایش می‌یابد و حباب‌ها بیشتر به سمت استوانه داخلی کشیده می‌شوند، در نتیجه سرعت صعود آن‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر افزایش سرعت دورانی استوانه داخلی منجر به کاهش اثر نیروی شناوری اعمالی روی حباب‌ها می‌شود که با بزرگ شدن عدد فرود همراه است.

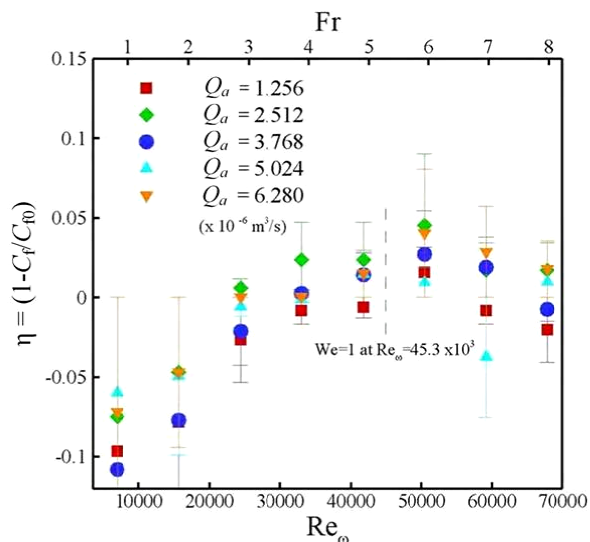
در واقع افزایش سرعت دورانی باعث بزرگ شدن عدد فرود می‌شود و چون این عدد نسبت نیروی گریز از مرکز به نیروی شناوری است، بنابراین اثر نیروی شناوری وارده بر حباب‌ها کاهش می‌یابد. کاهش سرعت صعود حباب‌ها با افزایش عدد رینولدز دورانی منجر به افزایش کسر حجمی می‌شود، چرا که بر طبق معادله (۳) این سرعت با کسر حجمی رابطه عکس دارد.

تغییرات کسر حجمی برحسب عدد رینولدز دورانی و عدد فرود در نرخ تزریق‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مشابه تغییرات سرعت صعود حباب‌ها با افزایش نرخ تزریق هوا، کسر حجمی با افزایش نرخ تزریق هوا در هر عدد رینولدز دورانی افزایش می‌یابد. در معادله (۳) کسر حجمی با نرخ تزریق هوا رابطه‌ای مستقیم دارد.

شکل ۵ توزیع قطر حباب‌ها را در نرخ تزریق‌های متفاوت نشان می‌دهد.

جدول ۳ تغییرات قطر حباب (mm)

دبی هوا ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)	بیشترین تابع چگالی ($1/\text{mm}$)	قطر حباب (mm) در بیشترین تابع چگالی	بزرگترین قطر حباب (mm)	کوچکترین قطر حباب (mm)	میانگین قطر حباب (mm)
۱/۲۵۶	۰/۸۲	۱/۱۰	۳/۵۰	۰/۰۲	۱/۷۰
۲/۵۱۲	۰/۷۰	۱/۲۳	۴/۰۵	۰/۰۳	۲/۰۰
۳/۷۶۸	۰/۹۰	۱/۴۰	۳/۴۴	۰/۰۱	۱/۶۵
۵/۰۲۴	۰/۸۰	۱/۰۱	۳/۴۴	۰/۰۲	۱/۶۲
۶/۰۲۸	۰/۷۰	۱/۴۰	۴/۰۱	۰/۰۳	۲/۰۰



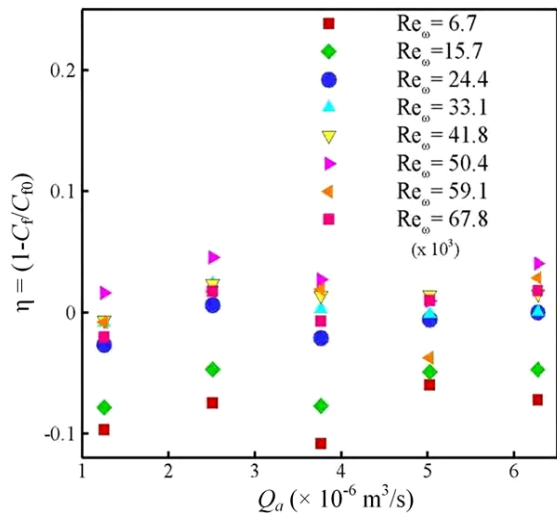
شکل ۶ تغییرات نسبت ضریب درگ برحسب عدد رینولدز دورانی در نرخ تزریق‌های مختلف

افزایش اثر حباب‌ها روی کاهش درگ با افزایش عدد رینولدز دورانی در بازه اول می‌تواند به‌خاطر جذب انرژی نوسانات جریان با الاستیسیته حباب‌ها باشد. در حقیقت، با افزایش عدد رینولدز دورانی در این بازه، عدد وبر افزایش می‌یابد، که این منجر به افزایش الاستیسیته و تراکم‌پذیری حباب‌ها می‌گردد. در این حالت حباب‌ها می‌توانند در برهم کنش با نوسانات موجود در جریان برقرار شده در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز، انرژی نوسانات را بیشتر جذب کنند. در این شرایط انتقال مومنت، که عامل اصلی ایجاد اغتشاشات و اتلافات اصطکاکی در سیستم تیلور-کوئنت است، بیشتر کاهش می‌یابد؛ در نتیجه کاهش درگ حبابی افزایش می‌یابد. البته، به‌خاطر اینکه در بازه $Re_{\omega} \leq Re_{\omega c}$ عدد وبر $We < 1$ است، ایجاد یک دیورژانس محلی مثبت در نزدیکی دیواره برای سرعت سیال توسط حباب‌ها می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش درگ اصطکاکی در این بازه از اعداد رینولدز باشد. در حقیقت این دیورژانس مثبت با دور کردن گردابه‌های طولی در جهت جریان سبب افزایش اثر حباب‌ها روی کاهش درگ می‌شود. این واقعیت توسط فرانت و الگوباشی [۲۴] در سال ۲۰۰۴ اثبات شده است. اما اثر منفی حباب‌ها روی کاهش درگ با افزایش عدد رینولدز دورانی در بازه $Re_{\omega} > Re_{\omega c}$ می‌تواند به‌خاطر تجمع حباب‌ها در نزدیکی استوانه داخلی و ایجاد ابرهای حبابی باشد. چون تغییرات سرعت زاویه‌ای استوانه‌ی داخلی در محدوده‌ای است که عدد فرود همواره در هر عدد رینولدز دورانی بزرگ‌تر از یک است، می‌توان فهمید که در تمام رنج عدد رینولدز دورانی نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تر از نیروی شناوری است. بنابراین، تمایل حباب‌ها برای نریز شدن به دیواره استوانه داخلی هنگام دوران این استوانه بیشتر از تمایل به حرکت رو به بالاست. به‌خاطر اینکه در بازه $Re_{\omega} > Re_{\omega c}$ نیروی گریز از مرکز خیلی بزرگ‌تر از نیروی شناوری است، بنابراین، با افزایش عدد رینولدز دورانی، حباب‌ها به‌سرعت

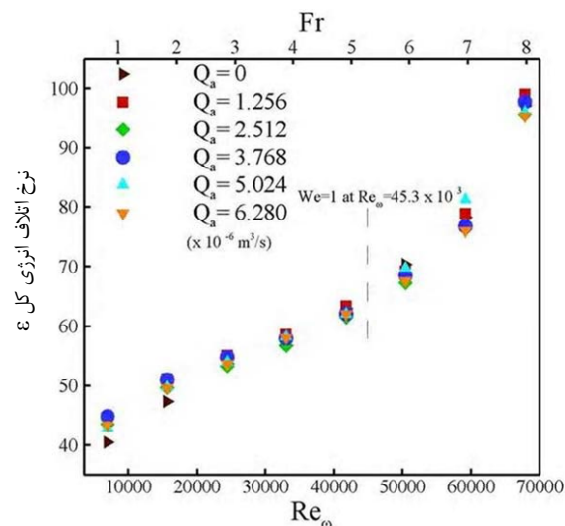
مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم قطر میانگین حباب‌ها تقریباً کاهش می‌یابد. شاید دلیل این اتفاق افزایش سرعت حباب‌ها و وارد شدن نیروی شناوری قوی‌تر بر آن‌ها باشد. حباب‌ها تحت یک چنین نیرویی شکسته شده و به چندین حباب کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. توجه به این نکته ضروری است که حباب‌هایی با قطری در محدوده ۰/۱mm بیشتر در اعداد رینولدز دورانی کوچک وجود دارند و با افزایش عدد رینولدز دورانی، قطر حباب‌ها تقریباً افزایش می‌یابد. این اتفاق به‌خوبی منطبق بر روند تغییرات عدد وبر است. در حقیقت، در اعداد رینولدز دورانی کوچک، عدد وبر کوچک است و در اعداد وبر کوچک، به‌خاطر اینکه نیروی کشش سطحی بسیار زیاد است، حباب‌ها به‌صورت کروی شکل و تقریباً صلب هستند. چون حباب‌های کروی شکل حباب‌هایی با قطر کوچک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که در اعداد رینولدز کوچک حباب‌ها دارای قطر کوچکی هستند. اما با افزایش عدد وبر، که متناسب با افزایش عدد رینولدز دورانی است، تراکم‌پذیری و قابلیت تغییر شکل حباب‌ها افزایش می‌یابد که این اتفاق به‌خاطر کاهش نیروی کشش سطحی است. با توجه به اینکه حباب‌های تراکم‌پذیر معمولاً حباب‌های بزرگ هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد رینولدز دورانی قطر حباب‌ها افزایش می‌یابد. برای اثبات چنین اتفاقاتی می‌توان دلیل دیگری هم ذکر نمود و آن این است که با افزایش عدد رینولدز دورانی نیروی گریز از مرکز وارده بر حباب‌ها افزایش می‌یابد (عدد فرود بزرگ) و آنها با حرکت به‌سمت دیواره استوانه داخلی به یکدیگر می‌پیوندند و حباب‌های بزرگ‌تر را به‌وجود می‌آورند. اما با کاهش عدد رینولدز دورانی، چون اثر نیروی شناوری روی حباب‌ها افزایش می‌یابد (عدد فرود کوچک)، آنها با توزیع و پراکندگی بیشتر در جریان، به‌سختی به یکدیگر می‌پیوندند و بنابراین به‌صورت تک و کوچک باقی خواهند ماند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، بزرگ شدن نیروی شناوری موثر روی حباب‌ها ممکن است باعث شکستن حباب‌ها و تبدیل آنها به حباب‌های کوچک‌تر شود که در اعداد رینولدز کوچک همانند افزایش نرخ تزریق هوا این امر محقق می‌شود.

شکل ۶ تغییرات نسبت ضریب درگ را برحسب عدد رینولدز دورانی و به‌ازای نرخ تزریق‌های مختلف هوا نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم نسبت ضریب درگ تقریباً در هر عدد رینولدز دورانی افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که در هر نرخ تزریق هوا، با افزایش عدد رینولدز دورانی تا یک مقدار مشخص ($Re_{\omega c} = 5/4 \times 10^3$)، نسبت ضریب درگ افزایش می‌یابد و به‌ازای رینولدزهای بزرگ‌تر از این مقدار این نسبت کاهش می‌یابد. در حقیقت، به‌ازای $Re_{\omega} \leq Re_{\omega c}$ اثر حباب‌ها روی کاهش درگ با افزایش عدد رینولدز دورانی افزایش می‌یابد و برای $Re_{\omega} > Re_{\omega c}$ این پروسه عکس می‌شود؛ یعنی حباب‌ها سبب افزایش درگ می‌شوند و تاثیر منفی روی کاهش این پدیده دارند.



شکل ۷ تغییرات نسبت ضریب درگ برحسب نرخ تزریق در اعداد رینولدز دورانی مختلف



شکل ۸ تغییرات نرخ اتلاف انرژی کل برحسب عدد رینولدز دورانی در نرخ تزریق‌های مختلف

هنگامی که سرعت دورانی استوانه داخلی بیشتر از سرعت صعود حباب‌ها می‌شود (عدد فرود بزرگ‌تر از یک)، حباب‌ها در لایه‌های پایینی آب برقرار شده در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز باقی می‌مانند و لایه‌های بالایی آب را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند. بنابراین حباب‌ها نمی‌توانند روی تنش برشی وارد شده از طرف آب در مقابل دوران استوانه داخلی در قسمت‌های بالایی سیستم تاثیر داشته باشند.

افزایش سرعت صعود حباب‌ها، علاوه بر آنچه که در بالا ذکر شد، باعث رخداد چند پدیده دیگر در سیستم می‌شود که هر یک به‌نحوی روی تاثیر مثبت حباب‌ها در کاهش درگ موثرند. یکی از این پدیده‌ها افزایش پراکندگی حباب‌ها در آب است؛ یعنی حباب‌ها به‌آسانی در تمامی نقاط آب توزیع می‌شوند و در هر قسمتی از فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز وجود دارند. در این شرایط آن‌ها با نوسانات ایجاد شده در هر نقطه‌ای از جریان برهم کنش انجام می‌دهند و به‌خاطر دارا بودن الاستیسیته تقریباً بالا در این آزمایش‌ها (عدد وبر در بیشتر سرعت‌های زاویه‌ای بزرگ‌تر از یک است)، انرژی آن‌ها را جذب می‌کنند. بنابراین، با کاهش انتقال مومنت، اغتشاشات جریان و درگ اصطکاکی را کاهش می‌دهند.

پدیده دیگر ناشی از افزایش سرعت صعود حباب‌ها افزایش توزیع منفرد آن‌ها در آب است. به‌خاطر اینکه در کار حاضر عدد فرود همواره بزرگ‌تر از

به‌سمت استوانه داخلی می‌آیند و در مجاورت دیواره آن جمع می‌شوند. در این ناحیه چندین ابر حبابی ایجاد می‌شوند که در راستای محوری استوانه‌ها توزیع می‌شوند. این حباب‌ها با تخریب لایه مرزی ایجاد شده روی دیواره باعث افزایش نوسانات جریان و همچنین افزایش انتقال مومنت می‌شوند. در نتیجه اغتشاشات جریان و کاهش درگ حبابی به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند.

توجه به این نکته ضروری است که در $Re_{\omega} < Re_{\omega c}$ اثر نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تر از نیروی شناوری است و حباب‌ها در مجاورت استوانه داخلی به‌صورت ابر جمع می‌شوند، ولی چون اختلاف این دو نیرو در این بازه زیاد نیست، تراکم ابرها چندان زیاد نمی‌باشد و آن‌ها خیلی در تخریب لایه مرزی موثر نیستند.

در شکل ۶ بیشترین کاهش درگ ثبت شده در حدود ۵٪ است. این مقدار کاهش درگ کم است. اما نکته قابل ذکر این است که در چنین جریان مغشوشی تزریق هوا، در مقایسه با حالت عدم تزریق، سبب کاهش درگ اصطکاکی شده است و این تاثیر با افزایش عدد رینولدز دورانی در یک بازه نسبتاً بزرگ افزایش می‌یابد. برای چنین کاهش درگی، علاوه بر دلایلی که قبلاً ذکر شد، چندین سناریو دیگر مطرح است. اول اینکه تزریق هوا به داخل مایع و ایجاد حباب در یک سیستم تیلور-کوئت سبب ایجاد لایه نازکی از هوا در مجاورت سطح استوانه‌ها می‌شود. این لایه با کاهش دانسیته سیال مایع مجاور سطوح سبب کاهش تنش‌های برشی و کاهش اتلافات انرژی می‌شود. دوم اینکه در یک چنین جریان آشفته‌ای حباب‌ها مانع انتقال تنش‌های برشی ویسکوز از ناحیه آشفته لایه مرزی به نواحی نزدیک سطح می‌شوند. در حقیقت حباب‌ها به‌خاطر داشتن ویسکوزیته کم از انتقال تنش‌های برشی ویسکوز به داخل لایه مرزی جلوگیری می‌کنند. علاوه بر مکانیزم‌های اشاره شده در بالا، مهم‌ترین دلیل برای کاهش درگ در سیستم‌های تیلور-کوئت تاثیر حباب‌ها روی گردابه‌های تیلور ایجاد شده در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز است. در حقیقت تزریق حباب‌ها به داخل سیستم باعث کشیدگی گردابه‌ها در راستای محور استوانه‌ها می‌شود که موای [۱۸] به این موضوع اشاره می‌کند. با کشیده شدن گردابه‌های تیلور در این راستا، تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. کاهش تعداد گردابه‌ها سبب کاهش انتقال مومنت و در نتیجه کاهش اغتشاشات ایجاد شده در جریان می‌گردد. توجه به این نکته ضروری است که انتقال مومنت ناشی از جابجایی گردابه‌ها در راستای محور استوانه‌هاست.

شکل ۷ تغییرات نسبت ضریب درگ را برحسب نرخ هوای تزریقی به سیستم در اعداد رینولدز دورانی مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن هستند که با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم، نسبت ضریب درگ تقریباً در هر عدد رینولدز دورانی افزایش می‌یابد؛ یعنی تاثیر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی زیاد می‌شود. این اتفاق می‌تواند به‌خاطر افزایش سرعت صعود حباب‌ها در آب باشد (شکل ۳).

توجیه دلیل ذکر شده در بالا به این صورت است که هنگامی که در یک عدد رینولدز دورانی مشخص نرخ هوای تزریقی به سیستم افزایش می‌یابد، تاثیر نیروی گریز از مرکز وارده بر حباب‌ها در حین دوران استوانه داخلی کاهش می‌یابد و به‌عکس تاثیر نیروی شناوری روی آن‌ها زیاد می‌شود.

در این حالت حباب‌ها سریع‌تر در آب به‌سمت قسمت‌های بالایی سیستم حرکت می‌کنند. در نتیجه، علاوه بر قسمت‌های پایینی سیستم، قسمت‌های بالایی آن را هم تحت تاثیر قرار می‌دهند.

پیدایش این گردبدها و جابه‌جایی آن‌ها در راستای محور استوانه‌ها سبب انتقال مومنتم می‌شود. این انتقال مومنتم سبب افزایش نوسانات جریان و افزایش آشفته‌گی آن خواهد شد. در نتیجه مقدار اتلاف انرژی در سیستم و جریان نیز افزایش می‌یابد.

برای بررسی اثر حباب‌ها روی نرخ اتلاف انرژی کل، در شکل ۹، تغییرات نرخ اتلاف انرژی کل برحسب نرخ تزریق هوا در اعداد رینولدز دورانی مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم در هر عدد رینولدز دورانی مقدار ε تغییر چندانی نمی‌کند. یعنی حباب‌ها روی کاهش یا افزایش نرخ اتلاف انرژی کل در این بازه از نرخ تزریق هوا و همچنین عدد رینولدز دورانی تاثیر ندارند.

۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر اثر تزریق حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی در یک سیستم تیلور-کوئنت عمودی به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در این سیستم استوانه داخلی متحرک و استوانه خارجی ثابت بوده است. رژیم جریان کاملا آشفته و شامل گردابه‌های تیلور در تمام رنج اعداد رینولدز دورانی به‌کار رفته در این مطالعه بوده است. تزریق حباب‌ها از قسمت انتهایی سیستم به داخل آبی که فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز را پر کرده بود، انجام پذیرفت. در حالت‌های مختلفی از نرخ تزریق هوا و سرعت دورانی استوانه داخلی، برای بررسی اثر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی، تغییرات نسبت ضریب درگ اصطکاکی و نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای ذکر شده در بالا با اندازه‌گشتاور اعمال شده روی استوانه داخلی محاسبه شده‌اند. نتایج نشان داد که تقریباً با افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم در هر عدد رینولدز دورانی نسبت ضریب درگ افزایش می‌یابد که این اتفاق به افزایش سرعت صعود حباب‌ها نسبت داده شد. همچنین، مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز دورانی تا Re_{oc} اثر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی در هر نرخ تزریق هوا افزایش می‌یابد و برای رینولدزهای بزرگ‌تر از Re_{oc} این اثر کاهش می‌یابد. عنوان شد که افزایش نسبت ضریب درگ در بازه اول ممکن است به‌خاطر چند مکانیزم از جمله جذب انرژی اغتشاشات با الاستیسیته زیاد حباب‌ها، کاهش دانسیته جریان مجاور سطوح و کشیده شدن گردابه‌های تیلور باشد. همچنین، کاهش نسبت ضریب درگ در بازه دوم به‌خاطر به‌هم پیوستن حباب‌ها به یکدیگر و ایجاد ابرهای حبابی است.

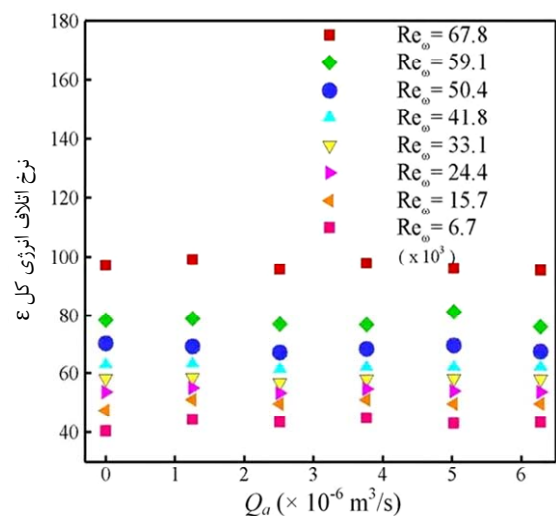
۹- فهرست علائم

C_f	ضریب درگ اصطکاکی
D_b	قطر حباب‌ها (mm)
g	شتاب گرانش زمین (ms^{-2})
i	شدت آشفته‌گی
Q_a	دبی جریان هوا (m^3s^{-1})
L_1, L_2	طول استوانه‌های داخلی و خارجی (m)
r_1, r_2	شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی (m)
T	گشتاور اعمالی روی استوانه داخلی (N.m)
U_b	سرعت حباب‌ها (ms^{-1})
Re_{oc}	عدد رینولدز دورانی
Ta	عدد تیلور
Fr	عدد فرود

یک است، بنابراین، همان‌طور که قبلاً گفته شد، در هر عدد رینولدز دورانی نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تر از نیروی شناوری است، اما در یک سرعت زاویه‌ای مشخص، افزایش نرخ تزریق هوا به سیستم و در نتیجه افزایش سرعت صعود حباب‌ها باعث کاهش تاثیر نیروی گریز از مرکز روی حباب‌ها و افزایش تاثیر نیروی شناوری روی آن‌ها می‌شود. در این شرایط حباب‌ها بیشتر در جهت محور استوانه‌ها حرکت می‌کنند تا در جهت شعاعی. در نتیجه حباب‌ها دیرتر بر اثر دوران استوانه داخلی به‌هم می‌پیوندند و ابرهای حبابی که منجر به تخریب لایه مرزی می‌شوند را تشکیل می‌دهند. یعنی حباب‌ها برای مدت زمان بیشتری در سیستم به‌صورت تک وجود دارند. مورای [۱۸] عنوان می‌کند که وقتی حباب‌ها در سیستم به‌صورت منفرد توزیع می‌شوند، تاثیر آن‌ها روی کاهش درگ بیشتر می‌باشد.

افزایش سرعت صعود حباب‌ها، در افزایش کسرجمی حبابی در سیستم موثر است (شکل ۴). در این شرایط غلظت حباب‌ها در آب افزایش می‌یابد؛ یعنی حباب‌های بیشتری در کاهش اتلاف ناشی از درگ اصطکاکی در سیستم نقش دارند. البته باید به این نکته توجه داشت که افزایش غلظت باید در حدی باشد که در سیستم پدیده انباشتگی ایجاد نشود. چرا که این پدیده هم سبب تخریب لایه مرزی و هم افزایش درگ می‌شود. به‌خاطر اینکه در کار حاضر افزایش نرخ تزریق هوا تا بیشترین دبی کاهش درگ حبابی را افزایش می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که در این مطالعه تجربی افزایش کسرجمی با افزایش سرعت صعود سبب ایجاد پدیده انباشتگی در سیستم نمی‌شود. بنابراین افزایش غلظت سبب افزایش تاثیر حباب‌ها روی کاهش درگ می‌شود. شکل ۸ تغییرات نرخ اتلاف انرژی کل یا نرخ اتلاف انرژی بر واحد جرم را برحسب عدد رینولدز دورانی و به‌ازای دبی‌های مختلفی از تزریق هوا نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز دورانی، در هر نرخ تزریق هوا، مقدار ε افزایش می‌یابد. شاید دلیل این اتفاق افزایش آشفته‌گی جریان باشد.

هنگامی که سرعت استوانه داخلی افزایش می‌یابد، نیروی گریز از مرکز نسبت به نیروهای اصطکاکی وارده بر المان‌های سیال بزرگ‌تر می‌شود. در این حالت گردابه‌های تیلور در فضای حلقوی بین دو استوانه هم‌مرکز ظاهر می‌شوند. به‌خاطر اینکه در کار حاضر، در تمام رنج عدد رینولدز دورانی، عدد تیلور بزرگ‌تر از عدد تیلور بحرانی ($Ta_{cr} = 1/7 \times 10^3$) است؛ بنابراین گردابه‌های تیلور حتماً در هر عدد رینولدز دورانی محدود به رنج اعداد رینولدز مورد استفاده در این تحقیق، بین دو استوانه ظاهر شده‌اند.



شکل ۹ تغییرات نرخ اتلاف انرژی کل برحسب نرخ تزریق در اعداد رینولدز دورانی مختلف

[10] X. Shen, S. L. Ceccio, M. Perlin, Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction, <i>Experiments in Fluids</i> , No. 41, pp. 415-424, 2006.	عدد وبر	We
[11] S. J. Wu, C. H. Hsu, T. T. Lin, Model test of the surface and submerged vehicles with the micro-bubble drag reduction, <i>Ocean Engineering</i> , No. 34, pp. 83-93, 2007.	کسر حجمی	α
[12] N. M. Nouri, A. Sarreshtehdari, An experimental study on the effect of air bubble injection on the flow induced rotational hub, <i>Experimental Thermal and Fluid Science</i> , No. 33, pp 386-392, 2009.	فاصله شعاعی بین دو استوانه (m)	δ
[13] B. Jacob, A. Olivieri, M. Miozzi, E. F. Campana, R. Piva, Drag reduction by microbubbles in a turbulent boundary layer, <i>Phys. Fluids</i> , No. 22, pp. 1-11, 2010.	اتلاف انرژی کل	ε
[14] J. F. Tsai, C. C. Chen, Boundary layer mixture model for a microbubble drag reduction technique, <i>ISRN Mechanical Engineering</i> , Vol. 2011, pp. 1-9, 2011.	نسبت ضریب درگ اصطکاکی	η
[15] Yanuar, Gunawan, Sunaryo, Jamaluddin A., Micro-bubble drag reduction on a high speed vessel model, <i>J. marince Sci. Appl.</i> , No. 11, pp 301-304, 2012.	ویسکوزیته سینماتیکی آب (m^2s^{-1})	ν_w
[16] T. H. Van den Berg, S. Luther, D. P. Lathrop, D. Lohse, Drag reduction in bubbly Taylor-Couette turbulence, <i>Phys. Rev. Lett.</i> , No. 94, pp. 1-4, 2005.	چگالی آب (kgm^{-3})	ρ_w
[17] T. H. van den Berg, D. P. M. van Gils, D. P. Lathrop, D. Lohse, Bubbly turbulent drag reduction is a boundary layer effect, <i>Phys. Rev. Lett.</i> , No. 98, pp. 1-4, 2007.	تنش سطحی (Nm^{-2})	σ
[18] Y. Murai, H. OIwa, Y. Takeda, Frictional drag reduction in bubbly Couette-Taylor flow, <i>Journal of Physics</i> , No. 20, pp. 1-12, 2008.	تنش برشی دیواره (Nm^{-2})	τ_w
[19] K. Sugiyama, E. Calzavarini, D. Lohse, Microbubbly drag reduction in Taylor-Couette flow in the wavy vortex regime, <i>J. Fluid Mech.</i> , pp. 1-30, 2008.	سرعت زاویه‌ای (rpm)	ω
[20] C. Jr. Cazley, Heat trasfer characteristics of the rotational and axial flow between cocentric cylinders, <i>Transactions of the ASME</i> , No. 80, pp.77-90, 1985.		
[21] J. Lu, A. Fernadez, G. Tryggvason, The effect of bubbles on the wall drag in a turbulent channel flow, <i>Phys. Fluids</i> , No. 17, pp. 1-12, 2005.		
[22] H. H. Legner, A simple model for gas bubble drag reduction, <i>Phys of Fluids</i> , No. 27, pp. 2788-2790, 1984.		
[23] G. S. Lewis, H. L. Swinney, Velocity structure functions, scaling, and transitions in high-Reynolds-number Couette-Taylor flow, <i>Phys. Rev.</i> , No. E 59, pp.5457-5467, 1999.		
[24] A. Ferrante, S. Elghobash, On the accuracy of the two-fluid formulation in direct numerical simulation of bubble-laden turbulent boundary layers, <i>Phys of Fluids</i> , No. 19, pp. 1-8, 2007.		

۱۰- مراجع

[1] M. E. McCormick, R. Bhattacharyya, Drag reduction of a submersible hull by electrolysis, <i>Naval Eng. J.</i> , No. 85, pp. 11-16, 1973.		
[2] V. G. Bogdevich, A. R. Evseev, A. G. Mayyuga, G. S. Migirenko, Gas-saturation effect on near-wall turbulence characteristics, <i>In Proc. Second International Conference on Drag Reduction</i> , (ed. H.S. Stephens & J. A. Clark), Cambridge, England. <i>BHRA Fluid Engineering</i> , No. D 2, pp. 25-37, 1977.		
[3] N. K. Madavan, S. Deutsch, C. L. Merkle, Reduction of turbulent skin friction by micro bubbles, <i>Physics of Fluids</i> , No. 27, pp. 356-363, 1984.		
[4] N. K. Madavan, L. C. Merkle, S. Deutsch, Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction, <i>Journal of Fluids Engineering</i> , No. 107, pp. 370-377, 1985.		
[5] C. L. Merkle, S. Deutsch, <i>Microbubble drag reduction</i> , In <i>Frontiers in Experimental Fluid Mechanics, Lecture Notes in Engineering</i> , Ed. M. Gad-el-Hak, Vol. 46, Springer, New York, pp. 291-335, 1989.		
[6] S. Deutsch, J. Castano, Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body, <i>Phys. Fluids</i> , No. 29, pp. 3590-3597, 1986.		
[7] H. Clark, S. Deutsch, Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body under the influence of applied axial pressure gradients, <i>Physics of Fluids</i> , No. A3, pp. 2948-2954, 1991.		
[8] Y. Kodama, A. Kakugawa, T. Takahashi, H. Kawashima, Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction, <i>Int. J. Heat and Fluid Flow</i> , No. 21, pp. 582-588, 2000.		
[9] J. Xu, M. R. Maxey, G. E. Karniadakis, Numerical simulation of turbulent drag reduction using microbubbles, <i>J. Fluid Mech</i> , No. 468. pp. 271-281, 2002.		