نشریه مباحث برگزیده در انرژی

کاهش درگ در جریان آشفته داخل کانال با تزریق میکرو حباب

نوروز محمد نوری[1]، صابر یکانی مطلق[2]، مهرداد ولدی[3*]

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران

۲- استاد یار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران

* نویسنده مسئول (mehrdad.valady@yahoo.com)

چکیده

در این تحقیق اثر حضور میکروحباب‌ها به عنوان فاز دوم در جریان آشفته داخل کانال بررسی شده است. جریان آشفته توسعه یافته حاوی میکروحباب داخل کانال به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ حل شده است. در ادامه، مطالعه ی عددی بر روی اثر میکروحباب ها بر مشخصه های توربولانسی جریان حامل صورت گرفت. در نهایت به بررسی عددی نظریه ارائه شده برای مکانیزم کاهش نیروی درگ اصطکاکی توسط میکروحباب پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده شد که با افزایش کسر حجمی حباب در قطر ثابت میزان درگ اصطکاکی کاهش پیدا کرده است. با بررسی انرژی طیفی مشاهده شد که انرژی در مقیاس‌های کوچک افزایش پیدا کرده است.

کلید واژگان: جریان آشفته، کاهش درگ، میکرو حباب.

Drag reduction in turbulent channel flow by micro bubbles injection

Noruz mohammad Noori [1], Saber Yekani motlagh[2], Mehrdad Valady[3*]

1- mechanical Eng. Department, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, orumie University, orumie, Iran
3- mechanical Eng. Department, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
*Coresponding auther (mehrdad.valady@yahoo.com)

Abstract

In this paper, the impact of micro bubbles as the second phase in the turbulent flow inside the channel flow has been investigated. The developed turbulent flow inside channel containing micro bubbles has been solved using large eddy simulation. Numerical analysis has been done to survey the impact of micro bubbles on turbulent characteristics derived from carrier flow. Finally, the mechanism of reducing frictional drag force was illustrated. According to the results, increasing the volume fraction of bubbles in the constant diameter will decrease the frictional drag force. Also studying the energy spectrum showed that the energy in the small scales has increased and in the large scales decreased.

Keywords: turbulent flow, drag reduction, micro bubbles

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]

۱- مقدمه

یکی از روش های کاهش نیروی درگ توربولانسی، تزریق میکروحباب درون لایه مرزی می باشد. تحقیقات آزمایشگاهی فراوانی در جهت شناخت مکانیزم اثرگذاری میکروحباب بر مشخصه های جریان توربولانس صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود.

مک کرمیک و باتاکاریا [۱] پیشنهاد کردند که حضور میکروحباب‌ها در زیر لایه لزج باعث از بین رفتن ناحیه برشی نزدیک دیواره می‌شود. مداوان [۲] این پدیده را به تغییرات در ویسکوزیته و چگالی نسبت دادند. مرکل و همکاران [۳] این پدیده را بر اثر از بین رفتن نوسانات تولید انرژی در نزدیک ناحیه بافر توسط میکروحباب‌ها دانستند. این موضوع باعث رشد ضخامت زیر لایه لزج می‌شود که کاهش درگ را به دنبال دارد. کانای و میاتا [۴] کاهش در انرژی توربولانسی و نوسانات سرعت در جهت جریان را مشاهده کردند که در تطابق با کار کیتاگاوا [۵] بود. ژو [۶] در سال ۲۰۰۲ کاهش درگ توسط میکروحباب‌ها را به اثرات چگالی، کاهش در انتقال مومنتوم توربولانسی و اثر متقابل جریان آشفته و میکروحباب‌ها نسبت داد. فرانته و الگوباشی [۷] در سال ۲۰۰۴ مکانیزم کاهش اصطکاک را به شکل گیری نواحی کم سرعت و پر سرعت روی دیواره، ایجاد جریان محلی عمود بر دیواره و شکل گیری بیشینه تنش رینولدز دورتر از سطح دیوار در مقایسه با حالت جریان تک فاز نسبت دادند.

با وجود تحقیقات صورت گرفته، تاکنون مکانیزم تاثیرگذاری میکروحباب ها بر مشخصه های جریان به طور کامل مشخص نشده است. به دلیل همین عدم شناخت، مدلسازی و حل عددی این پدیده، دشوار می باشد و نتایج عددی زیادی در این مورد ارائه نشده است.

در جریان آشفته حاوی میکروحباب، بر همکنش حباب ها با ادی های جریان نقش اصلی را در کاهش نیروی درگ دارد. از این رو، روشی که در شبیه سازی جریان حامل آشفته استفاده می شود، باید توانایی حل مستقیم ادی هایجریان را داشته باشد، روش های DNS و LES این مشخصه را دارا می باشند.

در روش DNS کلیه مقیاس های جریان به صورت مستقیم حل می شوند. ژو [۶] برای عدد رینولدز ۳۰۰۰ در جریان داخل کانال، مازیتلی [۸] در توربولانس ایزوتروپ و فرانته [۷] در جریان بر روی صفحه تخت به بررسی اثر میکروحباب ها توسط روش DNS پرداختند. روش DNS هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد و استفاده از آن محدود به جریانات ساده می باشد و فعلا امکان استفاده کردن از این روش در بررسی جریانات رینولدز بالا یا پیچیده وجود ندارد.

روش LES روشی است که در آن بخش عمده ای از ورتکس ها و ادی های جریان حل می شوند. در این روش ادی های بزرگ که وابسته به هندسه هستند به صورت مستقیم حل می شوند و ادی های کوچک که همگن، ایزوتروپ و مستقل از هندسه هستند از میدان حل فیلتر شده و اثر آنها بر روی میدان ادی های بزرگ مدل می شود. این روش دارای هزینه محاسباتی کمتری نسبت به روش DNS می باشد و هم اکنون در جریانات کاربردی پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد.

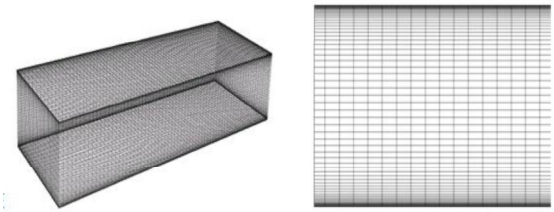
۲- هندسه و مش بندی و تنظیمات عددی مساله جریان کانال آشفته توسعه یافته

در این تحقیق مساله کانال با جریان آشفته با استفاده از شبیه سازی گردابه‌های بزرگ همراه با روش‌های مختلف فیلتراسیون صریح حل شده است. شرایط مربوط به حل مسئله مذکور به صورت زیر می‌باشد:

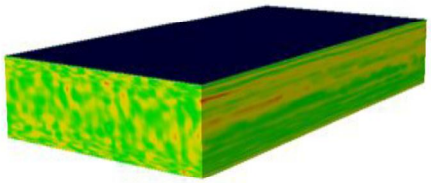
عدد رینولدز جریان بر اساس نصف طول کانال و سرعت اصطکاکی، ۱۸۰ می‌باشد که معادل رینولدز ۲۸۰۰ براساس سرعت واقعی است. جریان بر روی شبکه ریز $65\times65\times65$ در سه راستای x، y و z حل شده است ابعاد کانال در سه جهت: x، y و z کانال $4\pi\delta$ و 2δ، $\frac{4}{3}\pi\delta$ می‌باشد که در این‌جا δ نصف ارتفاع کانال است. در جهت x و z $\Delta x^+ = \Delta x u_\tau / \upsilon \approx 35$ و $\Delta z^+ = \Delta z u_\tau / \upsilon \approx 12$ در جهت عمود بر دیواره نیز از یک مش غیر یکنواخت با تابع $y_j = 0.01(1-\frac{\tanh(\gamma(1-2j/N_y))}{\tanh(\lambda)})$ استفاده شده است. در این رابطه N_y تعداد کل گریدها در راستای y و γ ضریب گسترش مش می‌باشد که با نسبت اندازه آخرین سلول در مرکز کانال به اولین سلول با رابطه $\frac{\cosh^3\gamma}{\sinh\gamma}$ مرتبط است. فاصله اولین مش از دیواره برابر با $y^+ = \Delta x u_\tau / \upsilon \approx 0.5$ و بیشترین اختلاف هم که در وسط کانال است، برابر با ۱۳,۸ می‌باشد، شکل (۲) شرط اولیه، یک میدان با شدت توربولانسی ۲۰٪ به همراه سرعت متوسط ۱۵,۶۳ متر بر ثانیه در جهت جریان می‌باشد. ۲۰٪ اغتشاش برای تحریک جریان و تولید ناپایداری و آشفته شدن جریان می باشد. اگر این مقدار کمتر از ۲۰٪ باشد اغتشاشات دمپ شده و در انتهای حل جریان آرام خواهیم داشت.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]

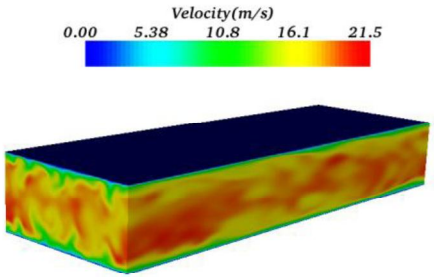
در شکل ۲ میدان اولیه و در ۰شکل ۳ میدان نهایی توسعه یافته و آشفته حاصل از حل عددی قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل۱. مش هیپربولیک کانال سمت راست نمای عرضی- سمت چپ نمای کلی کانال



شکل ۲. میدان اولیه سرعت



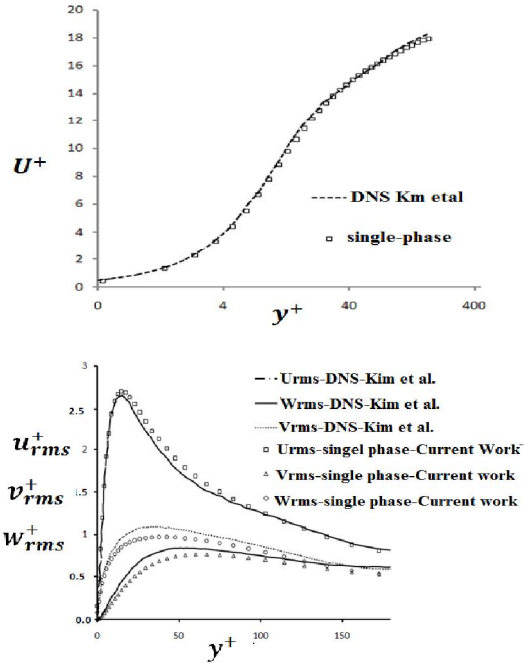
شکل ۳. میدان آشفته بدست آمده در انتهای حل

در مرزها شرط مرزی پریودیک برای جهت جریان (x) و همچنین در جهت عمق (z) جریان اعمال شده است و به منظور ایجاد دبی ثابت در میدان در هر گام زمانی گرادیان فشار ثابتی به صورت ترم معلوم به معادله ناویراستوکس اضافه می‌شود، همچنین شرط عدم لغزش نیز روی دیواره‌ها (y) اعمال شده است. برای گسسته سازی ترم زمان از روش پسرو مرتبه ی دو و برای ترم نفوذ از روش اختلاف مرکزی مرتبه دو استفاده شده است. روش درونیابی ترم جابجایی نقش بسیار مهمی در دقت جواب‌های LES دارد. اگر روش مورد استفاده مرتبه پایین باشد، مانند روش مرتبه یک بالادستی، به علت ایجاد اتلاف عددی شدید گردابه‌های جریان از بین رفته شبیه‌سازی مختل می شود، ولی در صورتی‌که روش مرتبه بالای ناپایدار مانند روش کوئیک استفاده شود ایجاد نوسانات غیر فیزیکی در جریان می‌کند که این نوسانات با نوسانات فیزیکی جریان ادغام شده، حل را ناپایدار و غیر فیزیکی می‌کند. لذا با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه روش اختلاف مرکزی مرتبه دوم برای درونیابی ترم جابجایی مناسب خواهد بود.

جریان توربولانس ذاتا ناپایا می‌باشد و در جریان در هر لحظه گردابه‌هایی متولد ویا از بین می‌روند. این گردابه‌ها دارای عمر مشخصی می‌باشند، لذا در حل عددی نیاز است گام زمانی که انتخاب می‌شود از عمر کوچکترین ادی جریان کوچکتر باشد و از طرف دیگر به اندازه‌ای باشد که شرط پایداری عددی را ارضا نماید. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این مورد گام زمانی باید به اندازه‌ای باشد که عدد کورانت محلی ماکزیمم از مرتبه‌ی ۰/۰۱ و کوچکتر باشد. عدد کورانت محلی به صورت $Co=\frac{Udt}{dx}$ تعریف می شود، که در این رابطه U سرعت محلی، dt گام زمانی و dx اندازه محلی مش می‌باشد.

۳- نتایج حل جریان آشفته داخل کانال

این قسمت به حل جریان آشفته داخل لوله در عدد رینولدز ۱۸۰ (بر اساس سرعت اصطکاکی) که دارای نتایج DNS است، پرداخته است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی توسط مدل اسماگرونیسکی دینامیکی با نتایج ارائه شده توسط کیم و همکاران مقایسه شده است. نتایج پروفیل سرعت و شدت های توربولانسی در جهات جریان، عمود بر دیواره و عمق در شکل ۴ مشاهد می شود.



شکل ۴. پروفیل‌های سرعت بی بعد شده در جهت جریان برای مدل دینامیکی اسماگورینسکی

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]

همانطور که مشاهده می شود نتایج همخوانی نسبتا خوبی با نتایج DNS کیم و همکارانش دارد.

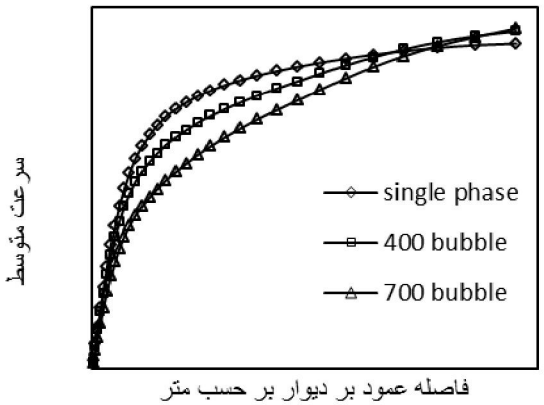
۳-۱- شبیه سازی عددی جریان دو فاز آشفته توسعه یافته داخل کانال

نتایج روشی که حاصل از ترکیب مدل نیروی ناپایستار، برای مدل‌سازی نیروی بازخورد حباب بر سیال، و روش توزیع تصادفی حباب[۲]، به منظور تعیین مکان حباب‌ها در لایه مرزی توربولانس، برای شبیه سازی جریان حاوی حباب در کانال آشفته توسط یکانی ارائه شده است را به کمک پارامترهای آماری مورد بررسی قرار می‌دهیم.

همان طور که در جدول مشاهده می‌گردد. با افزایش کسر حجمی حباب ($\alpha_{mean} = \frac{N_B V_b}{V_b + V_f}$) درگ اصطکاکی کاهش می‌یابد.

جدول۱. افزایش کاهش درگ با افزایش کسر حجمی حباب

میزان کاهش درگ	کسر حجمی حباب	تعداد حباب	حالت
٪۸,۳	۳,۶۸	۴۰۰	۱
٪۲۶,۱	۶,۹۸	۷۵۸	۲



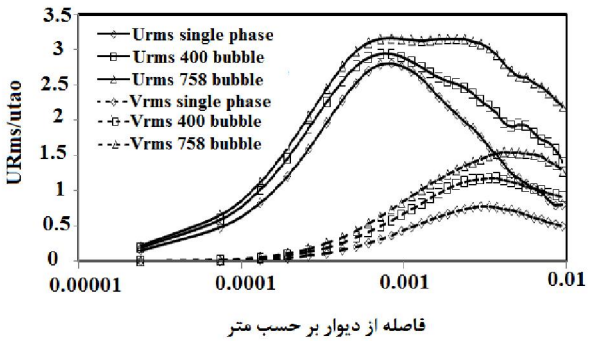
شکل ۵. مقایسه پروفیل سرعت متوسط برای حالت تک فاز و دو فاز

البته توجه داشته باشید که افزایش کسر حجمی حباب در قطر ثابت حباب می‌باشد. در این صورت تنها اثر تغییر کسر حجمی حباب بر میزان درگ اصطکاکی بر جریان آشفته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ۵۰ سرعت متوسط در جهت جریان بر حسب فاصله‌ی از دیواره برای جریان تک فاز توربولانس و دو فاز مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به این نکته که در شبیه سازی عددی میزان دبی جریان در حالت تک فاز و دو فاز ثابت باقی مانده است و با توجه به کاهش در میزان درگ اصطکاکی، شیب پروفیل سرعت در نزدیکی دیوار کاهش می‌یابد و ماکزیمم سرعت در مرکز کانال افزایش پیدا کرده است در نتیجه پروفیل سرعت متوسط به پروفیل سرعت در جریان آرام شبیه‌تر شده است.

۳-۲- شدت توربولانسی

در ۶۰ مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی حباب و کاهش میزان درگ مقدار بی بعد شدت توربولانسی هم در جهت جریان و هم در جهت عمود بر جریان در حال افزایش است. اما افزایش در میزان شدت توربولانسی در جریان‌های کاهش درگ ارتباط مستقیمی با کاهش درگ ندارد چرا که در برخی از جریان‌های کاهش درگ مقدار شدت توربولانسی کاهش می‌یابد مثل جریان بر روی ریبلت که توسط چوی و همکاران در ۱۹۹۳ بررسی شد و در برخی از جریان‌های کاهش درگ افزایش می‌یابد مثل کنترل فعال به کمک مکش و دمش که توسط چوی و همکاران در ۱۹۹۴ انجام گرفت.



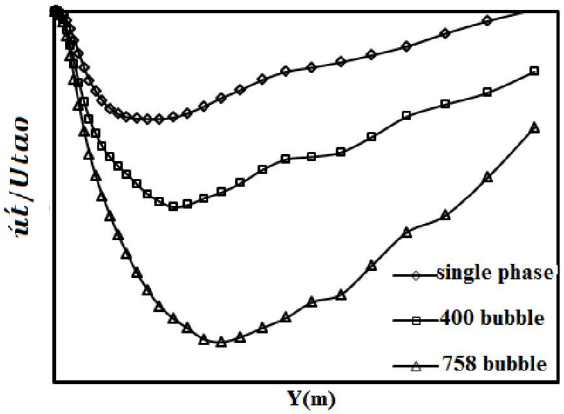
شکل ۶. مقایسه شدت آشفتگی توربولانسی در دو حالت تک فاز و دو فاز

۳-۳- تنش رینولدز

میکرو حباب‌ها با تغییر در نوسانات سرعت علاوه بر اثر گذاری بر شدت توربولانس میدان تنش‌های رینولدزی نیز را نیز تغییر می-دهد. نتایج تغییر در میزان تنش رینولدز در شکل نشان داده شده است.

[۲] *Bubble Random Distribution*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]

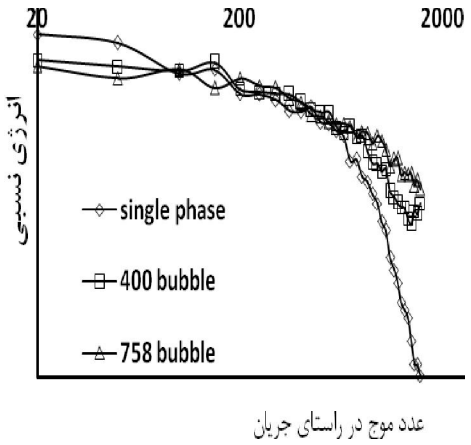


شکل ۷. مقایسه تنش برشی رینولدز بی بعد برای جریان تک فاز و دو فاز

همان طور که در ۷۰ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان کسر حجمی حباب میزان تنش‌های رینولدزی افزایش می‌یابد. به علاوه، پیک نمودار به سمت فاصله دورتر از دیواره منتقل شده است. این نکته می‌تواند مبین این موضوع باشد که فرایندهای تولید آشفتگی در فاصله‌ی بیشتری از دیوار اتفاق می‌افتد. این فرآیندها می‌تواند برهمکنش میان پدیده سویپ و اجکشن باشد که آن‌ها عامل اصلی در تولید آشفتگی می‌دانند.

۳-۴- طیف انرژی

برای اینکه محتوای انرژی آشفتگی مربوط به مقیاس‌های مختلف جریان آشفته و هم چنین تأثیر کسر حجمی حباب بر روی انرژی مقیاس‌های مختلف بررسی شود طیف انرژی رسم شده است.



شکل ۸. انرژی طیفی بر حسب طول موجهای مختلف در راستای جریان

با توجه به طیف انرژی رسم شده در شکل ۸ با تزریق میکرو حباب و افزایش کسر حجمی این حباب‌ها انرژی مربوط به مقیاس‌های کوچک افزایش می‌یابد. اما در مورد بزرگ‌ترین مقیاس‌های جریان می‌توان گفت که با تزریق میکرو حباب انرژی این مقیاس در راستای جریان افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر حضور میکروحباب‌ها به عنوان فاز دوم در جریان آشفته داخل کانال بررسی شده است. جریان آشفته توسعه یافته حاوی میکروحباب داخل کانال به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ حل شده است. شیب پروفیل سرعت در نزدیکی دیوار کاهش می‌یابد و ماکزیمم سرعت در مرکز کانال افزایش پیدا کرده است در نتیجه پروفیل سرعت متوسط به پروفیل سرعت در جریان آرام شبیه‌تر شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی حباب و کاهش میزان درگ، مقدار بی بعد شدت توربولانسی هم در جهت جریان و هم در جهت عمود بر جریان در حال افزایش است همچنین با افزایش کسر حجمی حباب میزان تنش‌های رینولدزی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج طیف انرژی مشاهده شد که انرژی در مقیاس‌های (عدد موج‌های) بزرگ‌تر با حضور حباب کاهش یافته و با افزایش کسر حجمی حباب کم‌تر می‌شود. همچنین انرژی در مقیاس‌های کوچک‌تر افزایش می‌یابد. پس می‌توان گفت که با تزریق میکرو حباب به جریان آشفته کانال مقدار انرژی مقیاس‌های بزرگ‌تر در مقیاس‌های کوچک‌تری توزیع شده است در نتیجه تعداد مقیاس‌های آشفتگی جریان افزوده شده است.

منابع

[1] M.E., Mc Cormick., R., Bhattacharyya, “Drag Reduction of a Submersible Hull by Electolysis”, Naval Engineers journal, Vol.85, No.2, PP. 11-16, 1973.

[2] N.K. Madavan, C.L. Merkle and S. Deutsch,” Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction”, Journal of Fluids Engineering 107, pp. 370–377, 1985.

[3] C.L., Merkle, S., Deutsch,“ Microbubbles drag reduction. In: Frontiers in experimental fluid mechanics” Lecture Notes in Engineering (ed. Gad-el-Hak, M.) 46, 291-335, Springer- Verlag, 1989.

[4] K., Akihiro, M., Hideaki, ”Direct numerical simulation of wall turbulent flows with

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]

Microbubbles", Int. J. Numer. Meth. Fluids; 35: 593–615, 2001.
[5] Kitagawa, K. Hishida and Y. Kodama, "Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique", Exp. Fluids 38, pp. 466–475, 2005.
[6] X. Jin, R. Martin Maxey, G. E. Karniadakis, "Numerical simulation of turbulent drag reduction using micro-bubbles", J. Fluid Mech., vol. 468, pp. 271-281, 2002.
[7] A., Ferrante, S., Elghobashi, "On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles", J. Fluid Mech 503:345–355, 2004.
[8] Mazzitelli, D. Lohse, and F. Toschi, "The effect of microbubbles on developed turbulence," Phys. Fluids 15, L5, 2003.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-13]