شبیه سازی مستقیم عددی جریان آشفته توسعه یافته در کانال با شرط مرزی لغزش روی یکی از دیوارها

امین موسائی[۱*]، زهرا ضرغامی دهاقانی[۲]

[۱] استادیار/ آزمایشگاه تحقیقاتی توربولانس، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج؛ moosaie@yu.ac.ir
[۲] دانش آموخته کارشناسی ارشد / گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج؛ zahra.zarghami@ymail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
شبیه سازی مستقیم عددی
شرط مرزی لغزش
پوشش دهی هیدروفوبیک
کاهش درگ
جریان کانال توسعه یافته

چکیده

در مقاله حاضر، نتایج شبیه سازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته در جریان کانال توسعه یافته به کمک پوشش دهی هیدروفوبیک در عدد رینولدز برشی اسمی ۱۸۰ با شرط مرزی لغزش بر روی دیوار پایینی و شرط مرزی عدم لغزش روی دیوار بالایی گزارش شده است. برای این منظور، از حل عددی معادلات ناویر- استوکس سه بعدی و وابسته به زمان برای جریان تراکم ناپذیر یک سیال نیوتنی استفاده شده است. در نهایت کمیت‌های آماری جریان آشفته (به طور خاص نمایه سرعت متوسط، مؤلفه‌های ریشه‌های سرعت‌های نوسانی متوسط در جهات مختلف و تنش برشی رینولدز) نشان داده و بحث شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش لغزش روی دیوار پایینی، سرعت متوسط جریان عبوری از کانال افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات متوسط مربع نوسانات سرعت در جهات مختلف در نزدیکی دیوار بالایی کانال از یک الگوی رفتاری تقریباً مشابه پیروی می‌کنند. اما تغییرات کلی آنها بر روی دیوار پایین کانال متفاوت است. همچنین یک تغییر در شکل ظاهری نمودارهای تنش برشی از حالت کمینه در نزدیک دیوار پایین به حالت بیشینه در نزدیک دیوار بالایی کانال مشاهده شده است.

Direct Numerical Simulation of Fully-Developed Turbulent Channel Flow with Slip Boundary Condition on One of the Walls

Amin Moosaie[1*], Zahra Zarghami Dehaghani[2]

[1] Turbulence Research Lab., Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran; moosaie@yu.ac.ir
[2] Department of Chemical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran; zahra.zarghami@ymail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 23 May 2015
Accepted: 21 Aug. 2016

Keywords:
Direct numerical simulation
Slip boundary condition
Hydrophobic coating
Drag reduction
Fully-developed channel flow

ABSTRACT

In this study, the results of a direct numerical simulation of turbulent drag reduction in a channel flow by hydrophobic coating at a nominal shear Reynolds number of Re_τ = 180 are reported. Slip condition is imposed on the lower wall whereas the upper wall has no-slip condition. For this purpose, the use is made of a numerical simulation of three-dimensional, time-dependent Navier-Stokes equations for the incompressible flow of a Newtonian fluid. Finally, statistical quantities of turbulent flow (specifically the mean velocity profile, the root-mean-square of velocity fluctuations in different directions and the Reynolds shear stress are shown and discussed. The results confirm that by increasing the amount of slip on the lower wall, the bulk velocity passing through the channel increases. Also, the variation of root-mean-square of velocity fluctuations shows a similar behavior in the vicinity of the upper wall. But, their general trend is different in the proximity of the lower wall. Moreover, a change in the shape of the Reynolds shear stress profile from a minimum close to the lower wall towards a maximum close to the upper wall is observed.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

۱ - مقدمه

در دینامیک سیالات، درگ اشاره به نیرویی دارد که از طرف جریان به سطح جسم متحرک وارد شده و در مقابل حرکت جسم ظاهر می‌شود. نیروی مقاومت قابل ملاحظه‌ای که از طرف سیال به اجسام در حال حرکت واقع می‌شود و روش‌های کاهش آن یک موضوع پژوهشی مهم و دارای کاربردهای صنعتی فراوان است. بخشی از این نیرو بر اثر ظهور تنش‌های برشی در سطوح تماس جسم با سیال به وجود می‌آید (درگ اصطکاکی) و بخش دیگر آن بر اثر توزیع فشار در اطراف جسم حاصل می‌شود (درگ فشاری). در این مقاله کاهش درگ اصطکاکی در جریان آشفته توسعه یافته در کانال به کمک پوشش سطح با مواد هیدروفوبیک با تکنیک شبیه سازی مستقیم عددی بررسی شده است. اثر پوشش دهی هیدروفوبیک سطح توسط شرط مرزی لغزش در نظر گرفته شده است.

آشفتگی که نوعی ناپایداری جریان است به واسطه اندرکنش بین تنش‌های برشی رینولدز و گرادیان سرعت متوسط تولید می‌شود. در جریان آشفته، نمایه سرعت در نزدیکی دیوار نسبت به جریان آرام مسطح‌تر است. بنابراین گرادیان سرعت متوسط روی دیوار افزایش می‌یابد که این به نوبه خود منجر به افزایش قابل ملاحظه نیروی درگ در جریان‌های آشفته در مقایسه با جریان‌های آرام خواهد شد. نیروی درگ در مجاورت دیوار ارزیابی می‌شود. افزایش نیروی درگ سبب افزایش مصرف انرژی و به تبع آن افزایش هزینه‌ها می‌گردد. لذا تلاش برای کاهش این نیرو حتی الامکان در کمترین مقدار ممکن خود از موضوعات کاربردی و مهم در مکانیک سیالات می‌باشد. روش‌های کاهش درگ از دیر باز مورد توجه محققان واقع شده است. از روش‌های کاهش درگ اصطکاکی می توان به افزودنی‌های پلیمری و فیبری، میکرو حباب‌ها و ریبلت‌ها اشاره کرد. یکی از روش‌های مؤثر کاهش درگ اصطکاکی استفاده از پوشش سطح با مواد هیدروفوبیک است که باعث ایجاد لغزش سیال روی دیواره و به تبع آن کاهش درگ می‌شود.

مواد آب گریز (هیدروفوبیک) و آب دوست توسط هندسه و شکل قرارگیری قطره آب روی سطح صاف تعریف می‌شوند. زاویه‌ای که لبه قطره آب با سطح زیرین خود می‌سازد، زاویه تماس نام دارد. در صورتی که زاویه تماس بزرگ‌تر از ۹۰ درجه باشد، صفحه هیدروفوبیک یا آب گریز نامیده می‌شود. هر چقدر این زاویه به ۱۸۰ درجه نزدیک‌تر شود، سطح آب گریزتر است. به عبارت دیگر، سطوحی که قطره بر روی آن‌ها تقریباً به شکل کره می‌ایستد، آب گریزهای خوبی هستند. برعکس، قطره آب بر روی سطوح آب دوست تشکیل زاویه‌ای کمتر از ۹۰ درجه می‌دهد.

سطوح هیدروفوبیک به واسطه خاصیت لغزش بر روی سطح باعث کاهش درگ اصطکاکی می‌شوند. این لغزش منجر به کاهش درگ اصطکاکی در جریان‌های داخلی و خارجی در رژیم‌های جریان آرام و آشفته می‌شود. از کاربردهای مواد هیدروفوبیک که بطور مصنوعی در سال ۱۹۴۰ برای اولین بار ساخته شد می‌توان به جریان در میکروکانال‌ها، فیلتراسیون، انتقال مایعات با اتلاف کم، سطوح ضد مه و غبار، و نیز صنایع دریایی و زیر سطحی اشاره کرد.

واتانابه و همکاران [۱] با اندازه‌گیری افت فشار درون کانال‌هایی با سطح مقطع مربعی و مستطیلی به بررسی کاهش درگ سیال در تماس با دیواره‌های آب گریز پرداختند. سیال مورد مطالعه آب معمولی و محلول آبی گلیسیرین با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد بود. در این مطالعه تجربی، نسبت بیشترین کاهش درگ برای محلول گلیسیرین به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد بیش از مقدار کاهش درگ برای آب معمولی بدست آمد. کیم و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۲ به کاهش درگ قابل توجهی با اعمال نانو و میکرو ساختارها به سطوح هیدروفوبیک در مقیاس‌های بزرگ و کاربردی مانند بدنه کشتی‌ها دست یافتند. کروپنکین و کلدنر [۳] با استفاده از سطوح سوپر هیدروفوبیک، کاهش درگ ۵۰ درصدی را برای جریان آرام و سطح پایین‌تری از کاهش درگ برای سرعت‌های بالاتر و جریان آشفته مشاهده کردند. شنگ و دینگ [۴] با استفاده از سطوح تختی که دارای خواص زبری و مرطوب شوندگی متفاوتی بودند، با اندازه‌گیری‌هایی شامل سرعت و درگ در لایه مرزی جریان آرام گذرنده از صفحه تخت، به مطالعه تجربی بر روی مکانیزم فیزیکی کاهش درگ مواد هیدروفوبیک در جریان آرام پرداختند. معین و یو [۵] اثر سطوح هیدروفوبیک بر روی نیروی درگ و لیفت را در دو عدد رینولدز ۳۰۰ و ۳۹۰۰ روی یک سیلندر چرخان توسط شبیه سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند.

نوری و همکاران [۶] در سال ۱۳۸۸ تحقیقات مختلف و نظریه‌های مطرح شده در پدیده کاهش درگ به وسیله سطوح هیدروفوبیک را گردآوری کردند. نوری و همکاران [۷] به منظور کاهش درگ اقدام به ایجاد سطوح هیدروفوبیک و سوپرهیدروفوبیک با روش‌های مختلف پوشش‌دهی سطوح مانند روش بخار- پلاسما- سندبلاست و شیمیایی کردند و تأثیر آنها بر میزان هیدروفوبیک کردن سطح را مورد مقایسه قرار دادند. در مراحل بعد از پوشش، از حرارت‌دهی با تشعشع استفاده کردند که به نتایج مطلوب‌تری نسبت به روش‌های دیگر دست یافتند. جهانمیری و بحرینی [۸] به بررسی روش‌های نوین کاهش درگ در اجسام غوطه‌ور در سیال پرداختند. بدین جهت ابتدا انواع نیروی وارد بر اجسام شناور را برشمردند و با توجه به سهم بالای مقاومت اصطکاکی، روش‌های کاهش این مقاومت را بیان کردند. همچنین معایب و مزایای هر کدام از روش‌های کاهش درگ را به اختصار شرح دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که رنگ‌های آب گریز به عنوان مطلوب‌ترین گزینه برای کاهش درگ در شناورهای تجاری می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

مواد آب گریز منجر به لغزش سیال روی سطح شده و بنابراین اثر آنها بر جریان را می‌توان توسط شرط مرزی لغزش نشان داد. از زمان آغاز علم دینامیک شاره‌ها، این پرسش که چه شرایطی در مرز یک میدان جریان برقرار است مورد بحث و مجادله بود. اختلاف بین بعضی از نتایج محاسباتی با نتایج تجربی، دانیل برنولی [۹] را به سوی این واقعیت سوق داد که یک سیال واقعی نمی‌تواند روی مرز یک سطح جامد بلغزد. به این فرضیه، فرض چسبندگی سیال بر روی یک مرز گفته می‌شود. دوبوآت [۱۰] اولین کسی بود که فرضیه‌ی چسبندگی را فرموله نمود. وی بیان کرد که وقتی سرعت متوسط جریان در یک کانال کوچک باشد، سیال بر روی مرز می‌چسبد.

اولین آزمایش برای پاسخ به حالت جریان در مرز توسط کولمب [۱۱] انجام گرفت. او حالت نوسان یک دیسک فلزی پاندولی غوطه‌ور را با سطح پرداخت شده، با سطح چرب و بار دیگر با شنی که با چربی به سطح چسبانده بود، مورد بررسی قرار داد و اختلافی در رفتار نوسان آنها مشاهده نکرد. بنابراین، نتیجه گرفت که وضعیت سطح اثری روی مقاومت ندارد. وی در مشاهده تئوری ارتعاشات چرخشی یک استوانه در محیط لزج دریافت که سیال روی سطح سرعت سطح را دارد و کم شدن سرعت در یک قشر نازک انجام می‌گیرد.

در قرن نوزدهم سه فرضیه برای حالت جریان بر روی مرز وجود داشت. فرضیه اول بیان می‌کند که شاره به مرز می‌چسبد. سرعت در جهت هسته جریان بطور پیوسته تغییر می‌یابد (فرضیه‌ی چسبندگی یا تز عدم لغزش). بر طبق فرضیه دوم، قشری از شاره با ضخامت محدود به دیوار متصل است. مابقی شاره روی این قشر سُر می‌خورد. قشر دارای ضخامت یکسانی است. اما ضخامت قشر تابع انحنای دیوار و نوع مواد است. در حالاتی مانند جیوه در لوله‌های شیشه‌ای، این قشر به طور کامل از بین می‌رود [۱۲]. فرضیه سوم بیان می‌کند که شاره در نزدیکی‌های جسم سخت، می‌لغزد. سرعت لغزش متناسب است با تنش برشی. با این فرض ناویر سعی داشت مشاهدات ژیرارد را رد و تئوری خود را پوشش دهد.

بحث در مورد وضعیت جریان بر روی یک مرز جامد را تروستل [۱۳] در سال ۱۹۸۸ مجدداً پیش کشید. وی با در نظر گرفتن محدوده مرزی که یک قسمت از سیال و یک قسمت از جداره را در بر داشت، به کمک روش‌های مکانیک محیط پیوسته و با نوشتن معادلات بیلان اندازه حرکت و قوانین اول و دوم ترمودینامیک نشان داد که برای فرآیندهای واقعی سیال باید بر روی مرز جامد بلغزد و فرض عدم لغزش برای فرآیندهای ایده‌آل صادق است. همچنین وی به عنوان شرط مرزی لغزش پیشنهاد نمود که تنش برشی روی سطح با سرعت نسبی جداره و سیال متناسب است. عاطفی [۱۴] جریان رینولدز پایین بر روی یک استوانه بی‌نهایت طویل با شرط مرزی لغزش را از طریق حل معادله‌ی اوسین (تقریب خطی ناویر- استوکس) بطور تحلیلی حل کرد. مین و کیم [۱۵] با استفاده از تکنیک شبیه سازی مستقیم عددی (DNS)، جریان آشفته توسعه یافته در کانال با شرط مرزی لغزش روی هر دو دیوار را شبیه سازی نمودند و سپس با استفاده از نتایج این شبیه سازی به مطالعه کاهش درگ اصطکاکی توسط سطوح هیدروفوبیک پرداختند. همچنین مین و کیم [۱۶] پایداری و گذار جریان آرام به آشفته در کانال با شرط لغزش را بررسی کردند. نوری و مفیدی [۱۷] با استفاده از تکنیک شبیه سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به بررسی جریان آشفته در کانال با شرط لغزش پرداختند.

در کار حاضر، با استفاده از تکنیک شبیه سازی مستقیم عددی (DNS)، شبیه سازی جریان آشفته توسعه یافته در کانال با شرط مرزی لغزش روی دیوار پایینی ارائه می‌شود. تکنیک شبیه سازی مستقیم عددی (DNS) که شاخه‌ای از دینامیک سیالات محاسباتی است، به حل جریان‌های آشفته با دقت بالا می‌پردازد. شبیه سازی مستقیم عددی از دینامیک سیالات محاسباتی متداول از آن جهت متفاوت است که در آن آشفتگی به جای آن که توسط یک مدل بستگی و حل معادلات رینولدز (معادلات ناویر- استوکس متوسط‌گیری شده) مدل شود، به طور مستقیم حل می‌شود. بنابراین شبیه سازی مستقیم عددی را می‌توان به عنوان یک شبیه سازی عددی در نظر گرفت که در آن، دسته‌ای از راه حل‌های غیر تجربی گرفته شده از اصول اولیه بر روی یک جریان آشفته مجازی اعمال می‌شود. در نتیجه شبیه سازی مستقیم عددی برای پاسخ‌گویی به سؤالات تحقیقاتی پایه‌ای مربوط به فیزیک آشفتگی و مدل سازی، یک ابزار ایده‌آل می‌باشد.

ادامه این مقاله به ترتیب زیر سازمان یافته است. تئوری و معادلات حاکم در بخش ۲ بحث شده‌اند. بخش ۳ به معرفی روش‌های عددی بکار رفته برای شبیه سازی جریان می‌پردازد. مسأله شبیه سازی شده به همراه جزئیات شبیه سازی در بخش ۴ آمده‌اند. اعتبارسنجی کد عددی در بخش ۵ صورت گرفته است. نهایتاً نتایج در بخش ۶ ارائه شده‌اند.

۲ – تئوری و معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان مغشوش تراکم ناپذیر نیوتنی با فرض تک دما بودن جریان، معادلات ناویر- استوکس (شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم) هستند. شکل معادلات حاکم برای جریان تراکم ناپذیر به شرح زیر می‌باشد:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \qquad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+(\boldsymbol{U}\cdot\nabla)\boldsymbol{U}=-\frac{1}{\rho}\nabla P+\nu\Delta\boldsymbol{U} \qquad (۲)$$

که در آن ∇ اپراتور برداری نابلا، Δ اپراتور لاپلاسین، $\cdot$ اپراتور ضرب اسکالر، ثابت ρ چگالی سیال، $\boldsymbol{U}$ میدان برداری سرعت، P میدان اسکالر فشار و ثابت ν ضریب لزجت سینماتیکی سیال است. این معادلات هم برای جریان‌های آرام و هم برای جریان‌های آشفته معتبر هستند. لیکن برای جریان‌های آشفته، متغیرهای وابسته نظیر سرعت و فشار سه بعدی و وابسته به زمان بوده و دارای دینامیک بسیار پیچیده‌ای هستند.

ناویر [۱۸] در حدود سال ۱۸۲۳ برای اولین بار به بیان لغزش مایع روی سطح جامد پرداخت. در نظریه این محقق، سیال در حال جریان با نیروی مخالفی روبرو خواهد شد که با سرعت نسبی بین لایه اولی سیال و سطح جامد متناسب است. وی با ایجاد نسبت μ/λ به معرفی طول لغزش پرداخت که در ذیل به آن اشاره شده است. شرط مرزی ناویر به شکل ریاضی زیر قابل بیان است:

$$\lambda U_w=\mu\left.\frac{\partial U}{\partial n}\right|_w \qquad (۳)$$

n جهت عمود بر دیوار به سمت خارج، $\partial U/\partial n$ نرخ برش سیال در سطح جامد و λ ضریب اصطکاک یا ضریب لغزش است. وی نسبت μ/λ را ثابت و مستقل از نرخ برش در نظر گرفت که این نسبت را طول لغزش نامیده و با b نشان می‌دهند:

$$b=\frac{\mu}{\lambda} \qquad (۴)$$

طول لغزش که کمیتی میکروسکوپی است، برای جریان برشی ساده، فاصله‌ای در درون دیوار و یا بعد از سطح تماس مایع و جامد است که مؤلفه مماسی سرعت جریان با برون‌یابی خطی به صفر می رسد. اگر سیال بدون لغزش باشد، این طول صفر است. اگر اصطکاک لزج بین مولکول‌های مایع در فصل مشترک قوی‌تر از بین مولکول‌های مایع و مولکول‌های جامد باشد، آن‌گاه مولکول‌ها می توانند روی سطح بلغزند که تحت شرایط مشخص برای سطح مایع دوست معتبر است.

در ادامه به معرفی عدد بی بعد تروستل پرداخته شده و از آن به جای طول لغزش استفاده شده است. همچنین رویدادهای مرزی تحت شرایط گوناگون با استفاده از این ضریب بی‌بعد لغزش تحلیل و بررسی شده است. مطابق تئوری لغزش تروستل، تنش برشی روی دیوار با سرعت لغزشی روی دیوار متناسب است. با معرفی یک ثابت تناسب مانند λ، می‌توان تناسب فوق را به یک تساوی تبدیل نمود:

$$\tau_w=\lambda U_w \qquad (۵)$$

که آن $\lambda\geq 0$ ثابت تناسب بوده و ضریب لغزش نام دارد. از طرفی، طبق رابطه لزجت نیوتن می‌توان نوشت:

$$\tau_w=\mu\left.\frac{\partial U}{\partial z}\right|_w \qquad (۶)$$

بدین ترتیب با ترکیب روابط (۵) و (۶)، شرط مرزی لغزش را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\mu\left.\frac{\partial U}{\partial z}\right|_w=\lambda U_w \qquad (۷)$$

در روابط فوق، کمیات را به شکل زیر بی‌بعد می‌کنیم:

$$U^*=\frac{U}{U_b},\quad z^*=\frac{z}{h} \qquad (۸)$$

که در آن h نصف فاصله بین دو دیوار کانال است. همچنین، U_b سرعت متوسط گذرنده از کانال است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$U_b=\frac{1}{2h}\int_0^{2h}\langle U\rangle(z)dz \qquad (۹)$$

حال می‌توان شرط مرزی لغزش (۷) را به شکل بی‌بعد زیر نوشت:

$$\frac{\partial U^*}{\partial z^*}=\mathrm{Tr}\cdot U^* \qquad (۱۰)$$

که در آن عدد بی‌بعد تروستل Tr به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Tr}=\frac{h\lambda}{\mu} \qquad (۱۱)$$

در اینجا دو حالت حدی قابل توجه هستند. حالت $\mathrm{Tr}=0$ معادل شرط مرزی لغزش کامل (تنش برشی صفر روی دیوار) است. حالت $\mathrm{Tr}\to\infty$ معادل شرط مرزی کلاسیک عدم لغزش (سرعت صفر روی دیوار) است. همچنین عدد تروستل طبق رابطه زیر به طول لغزش مربوط می‌شود:

$$\mathrm{Tr}=\frac{h}{b} \qquad (۱۲)$$

از آنجا که در شبیه سازی مستقیم عددی، شبیه سازی سه بعدی است، در کنار شرط مرزی برای مؤلفه سرعت U در جهت اصلی جریان، به شرط مرزی لغزش برای مؤلفه سرعت V در جهت عرضی نیز نیاز است که مشابه رابطه (۱۱) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial V^*}{\partial z^*}=\mathrm{Tr}\cdot V^* \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

در کار حاضر، شرایط مرزی لغزش (۱۰) و (۱۳) بر روی دیوار پایینی کانال یعنی در $z=0$ اعمال شده‌اند. بر روی دیوار بالایی یعنی در $z=2h$ نیز شرط مرزی کلاسیک عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

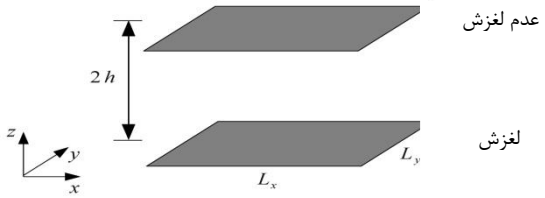
۳ – روش‌های عددی

در مطالعه پیش رو، برای حل عددی معادلات ناویر- استوکس تراکم ناپذیر سه بعدی و وابسته به زمان یعنی معادلات (۱) و (۲) از روش تصویر کردن استفاده می‌شود. برای گسسته سازی فضایی، روش حجم محدود مرتبه دوم بکار برده می‌شود. روش حجم محدود (که گاهی روش حجم کنترل نیز نامیده می‌شود) ناحیه حل را به تعداد محدودی سلول یا حجم‌های کنترلی که هم پوشانی نداشته و کمیت فیزیکی دلخواه را روی دامنه حل پایسته می‌سازند، تقسیم می‌کند. برای انتگرال‌گیری زمانی از روش رونگه-کوتای مرتبه سوم استفاده می‌شود. در هر زیر گام رونگه-کوتا، برای اعمال شرط تراکم ناپذیری و ارضای معادله پیوستگی (۱)، فشار از حل معادله پواسون بدست می‌آید و سپس سرعت‌ها تصحیح می‌شوند. برای حل معادله پواسون، از یک روش حل مستقیم بر مبنای تبدیل فوریر سریع و آلگوریتم توماس (TDMA) استفاده می‌کنیم. در کد کامپیوتری که بدین منظور به زبان فرترن نوشته شده، متغیرهای جریان در یک شبکه محاسباتی جابجا شده ذخیره شده‌اند. بدین ترتیب، فشار در مرکز سلول محاسباتی و سرعت‌ها در وجوه آن ذخیره شده‌اند. کد فوق توسط روش تجزیه دامنه و به کمک کتابخانه MPI برای پردازش موازی آماده شده است. در مرز هر زیر دامنه، شرایط مرزی با استفاده از سلول‌های گاوست تبادل می شوند.

۴– بیان مسأله و جزئیات شبیه سازی

در مسأله پیش رو، سیال نیوتونی بین دو صفحه موازی جریان دارد. جریان درون کانال از مسایل مورد علاقه محققان است. این نوع از جریان هم خود در صنعت دارای کاربرد بوده و هم مدلی کلی از جریان‌های داخلی سیال است. چون آشفتگی ذاتاً ناپایدار و سه بعدی است، DNS به محاسبات وابسته به زمان در یک محیط سه بعدی نیاز دارد. بنابراین، شرایط مرزی در مسأله حاضر به دلیل سه بعدی بودن هندسه جریان، در سه بعد بیان می‌شود. در جهت اصلی جریان x و در جهت عرضی y، شرط مرزی پریودیک فرض شده است. در جهت عمود بر دیوار z بر روی دیوارها، دو شرط مرزی متفاوت فرض شده است. بر روی دیوار پایینی شرط مرزی لغزش و بر روی دیوار بالایی شرط عدم لغزش برقرار است. عامل محرک جریان، اختلاف فشار ثابتی است که بین ورودی و خروجی کانال برقرار است. همچنین دیوارها غیر قابل نفوذ فرض می‌شوند. هندسه جریان و دستگاه مختصات در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد کانال مکعب مستطیل شکل به صورت ذیل می باشد:

$$(L_x, L_y, L_z) = (4\pi h, 4\pi h/3, 2h) \qquad (۱۴)$$



شکل ۱- هندسه جریان و دستگاه مختصات

برای شبکه‌بندی دامنه حل از یک شبکه بندی یکنواخت در جهات x و y، و یک شبکه بندی غیر یکنواخت در جهت z استفاده شده است. شبکه بندی از نوع کارتزین بوده و تعداد سلول‌های محاسباتی در جهات مختلف به صورت زیر می‌باشد:

$$(N_x, N_y, N_z) = (180, 140, 128) \qquad (۱۵)$$

شبکه محاسباتی در مجموع شامل ۳۲۲۵۶۰۰ سلول محاسباتی است.

عامل محرک جریان در جهت x یک گرادیان فشار متوسط ثابت است. این گرادیان فشار اعمالی مطابق رابطه زیر با تنش برشی متوسط دیوار τ_w برای جریان بدون لغزش متناسب است:

$$\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x} = -\frac{\tau_w}{h} \qquad (۱۶)$$

بنابراین، با داشتن گرادیان فشار متوسط، تنش برشی دیوار تعیین می‌شود. با داشتن تنش برشی دیوار می‌توان سرعت برشی u_τ را بدست آورد:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \qquad (۱۷)$$

اکنون می‌توان عدد رینولدز برشی را بر مبنای سرعت برشی تعریف نمود:

$$\mathrm{Re}_\tau = \frac{\rho u_\tau h}{\mu} = \frac{u_\tau h}{\nu} \qquad (۱۸)$$

در شبیه سازی حاضر، گرادیان فشار اعمالی، ضریب لزجت و چگالی سیال طوری تنظیم شده‌اند که عدد رینولدز برشی $\mathrm{Re}_\tau = 180$ برای جریان بدون لغزش حاصل شود. در تحلیل دینامیک سیالات اغلب از بی‌بعد سازی کمیت‌ها استفاده می‌شود. برای جریان‌های آشفته نزدیک دیوار می‌توان با استفاده از سرعت برشی u_τ کمیات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

جریان آشفته را بی‌بعد کرد که به آن بی‌بعد سازی درونی یا ون دریست گفته می‌شود. به عنوان مثال می‌توان سرعت متوسط را توسط u_τ بی‌بعد کرد:

$$\langle U\rangle^+ = \frac{\langle U\rangle}{u_\tau} \qquad (۱۹)$$

همچنین فاصله از دیوار را می‌توان طبق رابطه زیر بی‌بعد کرد:

$$z^+ = \frac{\rho u_\tau z}{\mu} = \frac{u_\tau z}{\nu} \qquad (۲۰)$$

دیگر طول‌ها را نیز می‌توان بدین ترتیب بی‌بعد نمود. چنانچه فواصل میان نقاط گرهی در مقیاس درونی دیوار نشان داده شوند، می‌توان نوشت:

$$\left(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+_{\min}, \Delta z^+_{\min}\right) = \left(12.56, 5.4, 0.675, 4.98\right) \qquad (۲۱)$$

که در آن $\Delta z^+_{\min}$ و $\Delta z^+_{\max}$ به ترتیب فاصله نزدیک‌ترین گره محاسباتی به دیوار و ماکزیمم فاصله گره‌ها در جهت z است که در مرکز کانال حادث می‌گردد.

۵ – اعتبارسنجی کد

برای اطمینان از آنکه شرط مرزی لغزش در کد کامپیوتری به درستی برنامه نویسی شده است، ابتدا کد برای شبیه سازی یک جریان آرام در کانال با شرط مرزی لغزش بکار می‌رود. برای این حالت، می‌توان مسأله را بطور تحلیلی نیز حل نمود و با مقایسه حل تحلیلی و عددی به صحت حل عددی پی برد.

برای جریان آرام در حالت پایا و توسعه یافته بین دو صفحه موازی نامحدود، معادلات ناویر- استوکس به معادله زیر کاهش می‌یابند:

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{d^2U}{dz^2} \qquad (۲۲)$$

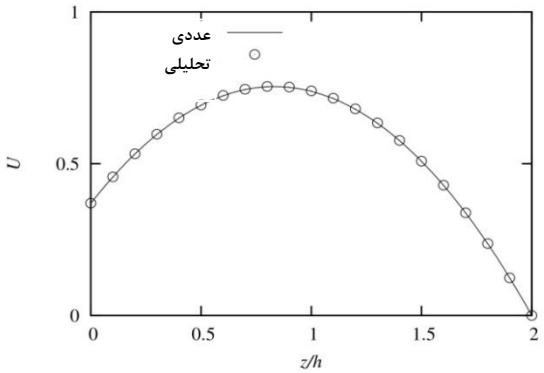
که دارای حل عمومی زیر است:

$$U(z) = -\frac{1}{2\mu}\frac{dP}{dx}\left(z^2 + C_1 z + C_2\right) \qquad (۲۳)$$

با در نظر گرفتن شرط مرزی لغزش روی دیوار پایینی و شرط مرزی عدم لغزش روی دیوار بالایی می‌توان ثابت‌های انتگرال‌گیری C_1 و C_2 را تعیین نموده و بدین ترتیب توزیع سرعت زیر بدست می‌آید:

$$U(z) = -\frac{1}{\mu}\frac{dP}{dx}\left[\frac{1}{2}z^2 + \frac{2h^2}{1+2h\cdot \mathrm{Tr}}z - \frac{2h^2}{1+2h\cdot \mathrm{Tr}}\right] \qquad (۲۴)$$

برای اعتبارسنجی، کد نوشته شده شبیه سازی مستقیم عددی با نتایج بدست آمده از حل تحلیلی فوق برای حالت $\mathrm{Tr}=5$ مقایسه شد و نتیجه حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است. انطباق نمایه سرعت حاصل از کد محاسباتی و حل تحلیلی گویای صحت کارکرد کد می‌باشد.



شکل ۲- نمایه سرعت جریان آرام برای حالت $\mathrm{Tr}=5$ به عنوان تابع فاصله از دیوار بدست آمده از حل تحلیلی معادله (۲۴) و عددی

۶ – نتایج

در این قسمت نتایج مربوط به شبیه سازی مستقیم عددی جریان آشفته کاهش درگ یافته در کانال توسط مواد هیدروفوبیک در عدد رینولدز برشی ۱۸۰ ارائه می‌گردد. نمایه سرعت متوسط و مقدار بی‌بعد آن، مؤلفه‌های شدت آشفتگی بی‌بعد در جهات مختلف و نیز تنش برشی رینولدز بررسی و مقایسه شده‌اند. در شکل ۳، نمایه سرعت متوسط جریان آشفته نیوتنی کاهش درگ یافته در اعداد تروستل مختلف نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش لغزش (کاهش عدد تروستل)، سرعت متوسط جریان افزایش یافته است. با توجه به اینکه شرط لغزش بر روی دیواره پایینی کانال در $z=0$ و شرط عدم لغزش برروی سطح دیواره بالایی کانال در ارتفاع $z=2h$ برقرار است، سرعت متوسط جریان در سطح دیواره بالایی کانال تقریباً بدون تغییر و تغییرات آن بر روی دیوار پایینی کانال کاملاً مشهود است، بطوری‌که سرعت متوسط از مقدار صفر در حالت عدم لغزش $(\mathrm{Tr}\to\infty)$ به مقدار حدود ۱/۶ به ازای $\mathrm{Tr}=1$ افزایش یافته است. سرعت متوسط را می‌توان به کمک سرعت برشی طبق رابطه (۱۹) بی‌بعد نمود. نمایه‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده در مختصات درونی برای اعداد تروستل مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

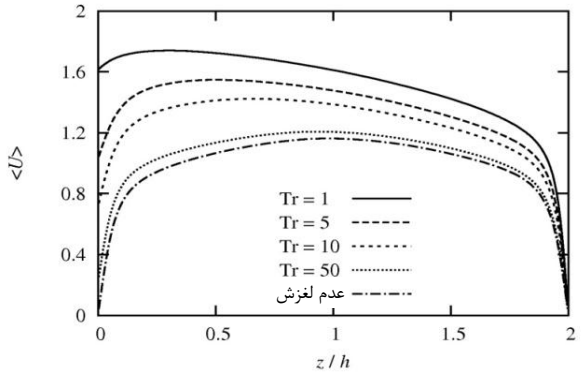
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

مشاهده می‌شود که در نزدیکی دیوار پایینی کانال با افزایش لغزش، سرعت متوسط بطور کلی افزایش یافته است. به طور خاص، در نزدیکی دیوار پایینی با کاهش عدد تروستل سرعت افزایش می‌یابد که در نتیجه افزایش لغزش است. زمانی که عدد تروستل در کمترین مقدار قرار دارد، سرعت متوسط درونی تقریباً به صورت یکنواخت و با تغییرات جزئی در آمده است. هرچه عدد تروستل افزایش می‌یابد سرعت متوسط درونی به حالت بدون لغزش نزدیک‌تر شده است.

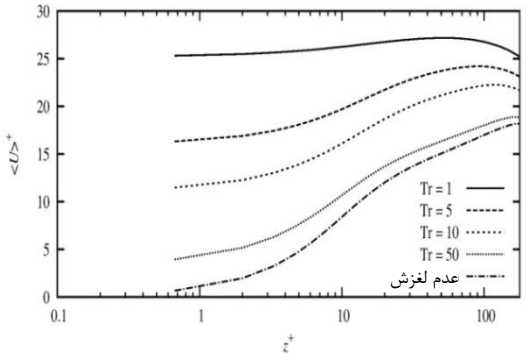
در ادامه، مؤلفه‌های شدت توربولانس بی‌بعد نسبت به فاصله بدون بعد از دیوار برای اعداد تروستل مختلف و نیز حالت عدم لغزش بررسی شده‌اند. بی‌بعد سازی آنها توسط سرعت برشی با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود. این کمیت‌ها در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند.

$$u^+_{rms}=\frac{\sqrt{\langle uu\rangle}}{u_\tau},\ v^+_{rms}=\frac{\sqrt{\langle vv\rangle}}{u_\tau},\ w^+_{rms}=\frac{\sqrt{\langle ww\rangle}}{u_\tau} \qquad (۲۵)$$

با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه u^+_{rms} در نزدیک دیوار پایینی با افزایش لغزش (کاهش عدد تروستل) کاهش یافته است و برعکس در نزدیک دیوار بالایی افزایش یافته است. همچنین دو مؤلفه دیگر ریشه‌های سرعت‌های نوسانی متوسط بی‌بعد در جهت عرضی در شکل ۶ و در جهت عمود بر دیوار در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳- سرعت متوسط به عنوان تابع فاصله از دیوار برای اعداد تروستل مختلف



شکل ۴- سرعت متوسط به عنوان تابع فاصله از دیوار در مختصات درونی برای اعداد تروستل مختلف

مقدار v^+_{rms} در شکل ۶، رفتاری مشابه دو شکل قبل بر روی دیوار بالایی نشان داده است. اما در نزدیکی دیواره پایین، بیشینه v^+_{rms} با کاهش عدد تروستل کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش در مقدار این مؤلفه در عدد تروستل ۱، با تغییر شکل ظاهری منحنی (ظاهر شدن مقدار کمینه برای v^+_{rms}) همراه بوده است. با توجه به شکل ۷، در نزدیک دیوار پایینی کانال با کاهش عدد تروستل ازحالت عدم لغزش (زمانی که عدد تروستل بی‌نهایت است) تا مقدار ۵، w^+_{rms} کاهش یافته است و زمانی که عدد تروستل به یک می‌رسد، افزایش نسبی در مقدار کمی w^+_{rms} مشاهده شده است. به‌طوری‌که با افزایش فاصله بدون بعد از دیواره، در نزدیک دیوار بالایی کانال مقدار آن ماکزیمم شده است و با کاهش لغزش مقدار بیشینه آن کاهش یافته است. v^+_{rms} و w^+_{rms} زمانی که عدد تروستل بی‌نهایت است (حالت عدم لغزش) به صورت متقارن نسبت به دو لبه بالایی و پایینی کانال تغییر یافته است. با کاهش عدد تروستل (افزایش لغزش) تقارن منحنی‌ها به تدریج از بین می‌رود.

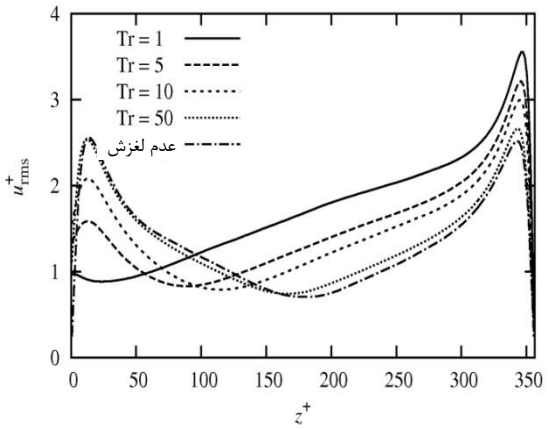
در نهایت، نمایه تنش برشی رینولدز بی‌بعد شده، $\langle uw\rangle^+$ در شکل ۸ نشان داده شده است که در آن تنش برشی رینولدز به کمک سرعت برشی طبق رابطه زیر بی‌بعد شده است:

$$\langle uw\rangle^+=\frac{\langle uw\rangle}{u_\tau^2} \qquad (۲۵)$$

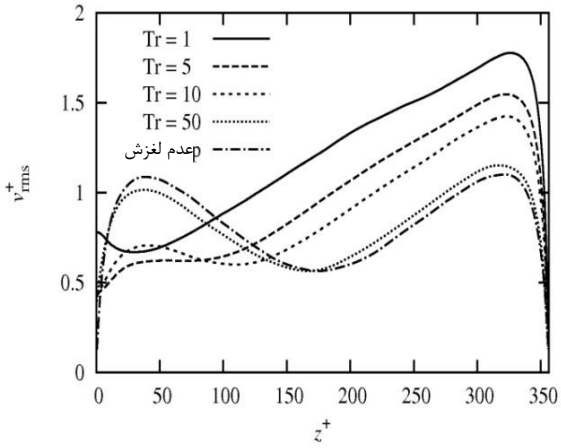
همان طور که مشاهده می‌شود بر روی هر دو دیوار پایینی و بالایی کانال مقدار تنش برشی رینولدز با افزایش عدد تروستل (نزدیک شدن به شرط عدم لغزش) کاهش یافته است، همچنین تغییر در شکل ظاهری نمایه‌های تنش برشی رینولدز بی‌بعد شده، از حالت کمینه در نزدیک دیوار پایین به حالت بیشینه در نزدیک دیوار بالایی قابل مشاهده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

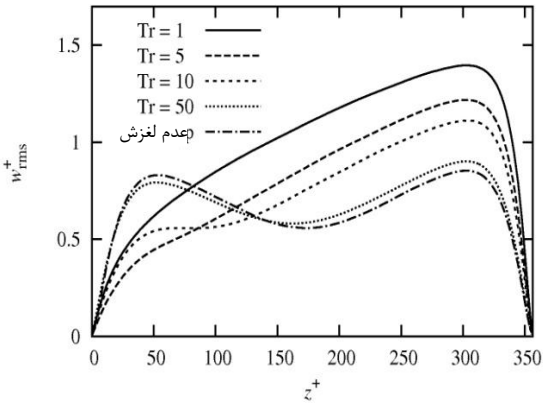
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]



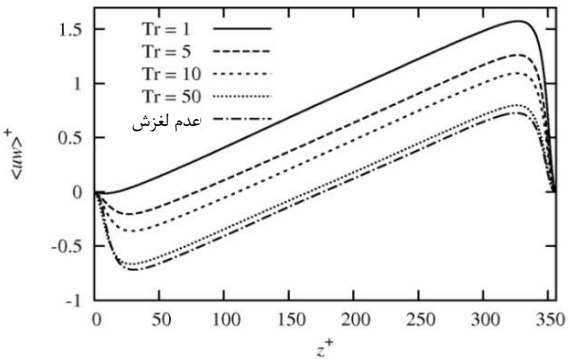
شکل ۵- u^+_{rms} به عنوان تابع فاصله از دیوار برای اعداد تروستل مختلف



شکل ۶- v^+_{rms} به عنوان تابع فاصله از دیوار برای اعداد تروستل مختلف



شکل ۷- w^+_{rms} به عنوان تابع فاصله از دیوار برای اعداد تروستل مختلف



شکل ۸ تنش برشی رینولدز در اعداد تروستل مختلف

همچنین سرعت توده‌ای سیال درون کانال در تروستل‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. در حالت عدم لغزش سرعت توده‌ای سیال در کمترین مقدار خود و زمانی که لغزش بی‌نهایت است، سرعت توده‌ای سیال به بیشترین مقدار خود رسیده است.

جدول ۱ - سرعت توده‌ای سیال u_b برای اعداد تروستل مختلف

تروستل‌های مختلف	سرعت توده‌ای u_b
Tr=۱	۱/۵۲
Tr=۵	۱/۳۶
Tr=۱۰	۱/۲۵
Tr=۵۰	۱/۰۵
عدم لغزش	۱

۳-نتیجه گیری

در مقاله حاضر، شبیه سازی مستقیم عددی جریان آشفته در یک کانال در عدد رینولدز برشی اسمی ۱۸۰ ارائه شده است و تحلیل اثرات سطوح هیدروفوبیک بر جریان سیال مجاور سطح پایینی کانال و اصلاح شرایط مرزی روی دیواره و تغییر ساختار آشفته جریان مورد توجه قرار گرفت. شرط مرزی لغزش روی دیوار پایینی در $z=0$ و شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیوار بالایی کانال در ارتفاع $z=2h$ در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر جریان مرور شده و با استفاده از روش شبیه سازی مستقیم عددی (DNS) تحلیل شده است. نتایج حاصل برای تغییرات کمیت‌های سرعت متوسط، سرعت متوسط بی‌بعد در مختصات درونی، ریشه‌های سرعت‌های نوسانی متوسط بی‌بعد و تنش برشی رینولدز بی‌بعد شده، همچنین سرعت توده‌ای سیال نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج (DNS) مشاهده شد که با اعمال شرط مرزی لغزش روی دیوار پایین کانال، با افزایش لغزش (کاهش عدد تروستل)، سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. تغییرات ریشه‌های سرعت‌های نوسانی متوسط بدون بعد در جهات مختلف،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]

در نزدیک دیوار بالایی کانال از یک الگوی رفتاری تقریباً مشابه پیروی می‌کنند. اما تغییرات کلی آنها بر روی مرز پایینی کانال متفاوت است. همچنین مشاهده شد v^+_{rms} و w^+_{rms}، زمانی که عدد تروستل بی‌نهایت است (حالت عدم لغزش)، به صورت متقارن نسبت به دیوار پایین و دیوار بالایی کانال تغییر می‌یابد. نتایج بدست آمده از ترسیم پروفایل تنش برشی رینولدز بی‌بعد شده حاکی از آن است که مقدار آن در نزدیکی هر دو دیوار پایینی و بالایی کانال، با افزایش عدد تروستل (نزدیک شدن به شرط عدم لغزش) کاهش یافته است. همچنین یک تغییر در شکل ظاهری پروفایل‌های تنش برشی رینولدز بی‌بعد، از حالت کمینه در نزدیک دیوار پایین به حالت بیشینه در نزدیک دیوار بالایی مشاهده شده است. با بررسی کمیت‌های نام برده شده، همان‌طور که در شکل‌های مختلف مشاهده می‌شود، روند تغییرات کمیت‌ها با کاهش عدد تروستل به صورت صعودی افزایش یافته است.

۶ – مراجع

1- Watanabe, K. Yanuar, K. Okido, H and Mizunuma, (1998), *Drag reduction in flow through square and rectangular ducts with highly water-repellent walls*, JSME J., No. 96, 0213.

2- Kim, C.J. and Ho, C.M., (2002), Nano *Turf: Nano-engineered Low Flow Friction Suefaces*, NSF Nanoscale Science and Engineering Grantees Conference, Grant #: DMI-0103562.

3- Henoch, C., Krupenkin, T.N., Kolodner, P., Taylor, J.A., Hodes, M. S. and Lyons, A.M., (2002), *Turbulent Drag Reduction Using Superhydrophobic Surfaces*, 3rd. AIAA Flow Control Conference, June, San Francisco, California.

4- YU, Y.S. and WEL, Q.D., (2006), *Experimental study on physical mechanism of drag reduction of hydrophobic materials in laminar flow*, Chin. Phys. Lett., Vol. 23, No. 6, 1634.

5- You, D. and Moin, P., (2007), *Effects of hydrophobic surface on the drag and lift of a circular cylinder*, Phys. Fluids, Vol. 19, 081701.

6- Nouri, N.M., Sekhavat, S. and Mofidi, A., (2007), *A review of theory and modeling of frictional drag reduction by surface coating*, in The 11th National Conference on Marine Industries, Kish Island, Iran,. (In Persian).

7- Nouri, N.M. and et al., (2008), *Formation of superhydrophobic surfaces to be used in frictional drag reduction*, in The 1st National Conference on Applied Hydrodynamics, Tehran, Iran, (In Persian).

8- Jahanmiri, M., A. Bahraini, (2011), *Modern techniques for drag reduction of objects immersed in a fluid*, Mech. Eng., Vol. 81, pp. 14-27.

9- Bernouli, D., (1738), *Hydrodynamica*, Strassburg,

1۰- Dubuat, L.G., (1786), *Principes d'Hydraulique*, Paris.

11- Coulomb, Ch.A., (1800), *Memoires de l'Institut National de Science et des Arts*: Sciences Mathematiques et Physiques, 3.

12- Girard, P.S., *Memoires de la Classe Mathematique et Physique de l'Institut de France*, Mathematiques et Physiques Vol. 14, pp. 1813-1815.

13- Trostel, R., (1988), *Gedanken zur Konstruktion mechanischer Theorien II*, Technische Universität Berlin-Forcchungsbericht.

14- Atefi, Gh., (1991), *Quer angeströmter drehender Zylinder bei kleinen Reynoldszahlen und bei Schlupf*, Arch. Appl. Mech., Vol. 61, pp. 488-502.

15- Min, T. and Kim, J., (2004), *Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag*, Phys. Fluids, Vol. 16, pp. L55-L58.

16- Min, T. and Kim, J., (2005), *Effects of hydrophobic surface on stability and transition*, Phys. Fluids, Vol. 17, pp. 108106.

17- Nouri, N.M. and Mofidi, A., (2010), *Large-eddy simulation of turbulent flow over hydrophobic surfaces*, Mech. & Aerospace J., Vol. 7, pp. 77-86, (In Persian).

18- Navier, L.M.H., (1823), *Memoire sur le loi du mouvement des fluids*, Memoires de l'Academie Royale des Sciense de l'Institut de France, Vol. 11, pp. 539.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.4.9]