

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته روی سطوح

هیدروفوبیک

نوروز محمد نوری^۱ و علیرضا مفیدی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱/۲۸)

چکیده

در سال‌های اخیر، تلاش‌های چشمگیری روی تولید سطوحی که موجب کاهش میزان پسای اصطکاکی حاصل از سیال عبوری از روی سطوح می‌شوند، انجام گرفته است. در تحقیق حاضر، تحلیل اثرات سطوح هیدروفوبیک بر جریان مجاور یک سطح به صورت اصلاح شرایط مرزی دیواره و کاهش پسای اصطکاکی و تغییر ساختار آشفتگی جریان مورد توجه می‌باشد. سرعت‌های لغزش، تنش‌های برشی دیواره و تنش‌های رینولدز برای طول‌های لغزش مختلف از سطوح هیدروفوبیک در عدد رینولدز اصطکاکی $Re_{\tau} \cong 180$ که معادل عدد رینولدز ۳,۳۰۰ بر اساس جریان واقعی می‌باشد، بررسی شده است. برای طول لغزش‌های بزرگتر از 10^{-5} متر، سرعت لغزش متوسط بیش از ۱۸٪ سرعت متوسط بوده و تنش برشی دیواره بیش از ۶۰٪ کاهش یافته است. شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای بررسی کارایی کاهش پسای سطوح هیدروفوبیک در یک کانال با جریان آشفته استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که با اعمال شرط مرزی لغزش در جهت جریان، پسای اصطکاکی کاهش یافته و شدت‌های آشفتگی، ساختارهای آشفتگی و به ویژه گردابه‌های نزدیک دیواره در جهت جریان به صورت قابل توجهی ضعیف می‌شوند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که طول لغزش باید از یک مقدار معینی بیشتر باشد تا فقط اثر محسوسی بر آشفتگی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سطح هیدروفوبیک، شرط مرزی لغزش، کاهش پسا اصطکاکی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over Hydrophobic Surfaces

N.M. Nouri and A. Mofidi

Mech. Eng. Dep't.

Iran Univ. of Sci. and Tech.

(Received: June 28, 2010; Accepted: Apr. 17, 2011)

ABSTRACT

In recent years, extensive efforts have been made on the design and fabrication of surfaces having the ability to reduce viscous drag. In this article, the effect of hydrophobic surfaces on viscous drag has been investigated using large eddy simulation of a turbulent channel flow. Hydrophobic surfaces are known by their ability to trap an air layer and by the existence of slip boundary conditions on them. Using slip boundary condition, the viscous drag is reduced and the turbulence intensities and the near-wall eddies are weakened considerably. In this paper, the slip velocities and the shear stresses at the wall for different slip lengths of hydrophobic surfaces, at the viscous Reynolds number of $Re_{\tau} \cong 180$, have been investigated. For slip lengths greater than 10^{-5} m, an average slip velocity of more than 18% of the average velocity has been obtained and the wall shear stress has been reduced by more than 60%. The results show that, the slip length to have a tangible effect on turbulence should be greater than a certain amount.

Keywords: Hydrophobic Surfaces, Slip Boundary Condition, Viscous Drag Reducing, Large Eddy Simulation

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mnouri@iust.ac.ir

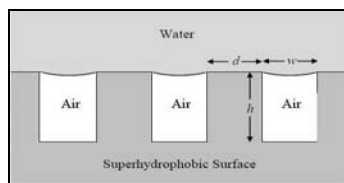
۲- کارشناس ارشد: ar_mofidi@mecheng.iust.ac.ir

۱- مقدمه

انجام گرفته است. این سطوح اغلب سطوح سوپرهیدروفوبیک یا آلترهیدروفوبیک نامیده می‌شوند که اولین بار توسط او^۵ و همکارانش [۸] و جوزف^۶ و همکارانش [۹] استفاده شدند. مطالعات در مورد کاهش پسا در جریان آرام درون میکروکانال‌ها، انگیزه لازم برای تحقیقات جدید در مورد کاهش پسا در جریان آشفته را به وجود آورده است.

۲- سطوح هیدروفوبیک

سطوح هیدروفوبیک به‌عنوان سطوحی شناخته می‌شوند که زاویه تماسی بین سطح و قطره ثابت روی آن از 90° بزرگتر باشد و در سطح سوپر هیدروفوبیک زاویه تماسی بیش از 150° می‌باشد. شکل ۱ یک سطح هیدروفوبیک همراه با میکروساختارها را نشان می‌دهد.



شکل (۱): دیگرام شماتیک از هوای به دام افتاده بین

میکروساختارهای هیدروفوبیک [۱۰].

وقتی سطح هیدروفوبیکی در آزمایشگاه ایجاد می‌شود، انجام کارهای آزمایشگاهی از قبیل اندازه‌گیری مقدار کاهش پسا و میزان سرخوردن آب روی آن، دشوار است که علت آن نیز میکروسکوپی بودن پدیده لغزش، کوچک بودن سایز نمونه در دسترس و گران بودن وسایل آزمایشگاهی است. با آنکه مشاهدات آزمایشگاهی فراوانی وجود دارد و تئوری‌های بسیاری برای مدل کردن مکانیزم لغزش به کار برده شده است، هنوز پذیرش همگانی در این مورد وجود ندارد که بتواند به‌طور کامل و تحلیلی، لغزش و یا مقدار آن را در مرز جامد-مایع پیش‌بینی کند. با این حال اگر طول لغزش شناخته شود، تئوری‌های موجود و کدهای عددی می‌توانند کاهش پسا در جریان آرام و آشفته را پیش‌بینی کند.

یک روش معمول برای بررسی سطح، اندازه‌گیری زاویه تماسی قطره آب روی سطح است که هر چه زاویه تماسی بیشتر باشد پسا اصطکاکی کمتر می‌شود [۱۱]. از سوی دیگر

جسم با عبور از میان سیال، نیروی پسا را تجربه می‌کند. پسا را می‌توان به صورت اصطکاک بین سیال و جسم تعریف کرد، و این نیروی مستقیماً با میزان نیروی مورد نیاز برای حرکت جسم مرتبط است. هر چه جسم با نیروی پسا کمتری روبرو شود حرکت جسم در سیال ساده تر خواهد بود. غالب اوقات شرایط مطلوب آن است که میزان پسا ناشی از تقابل بین سیال و جسم کاهش یابد، که این جسم می‌تواند یک کانال، لوله یا بدنه یک وسیله آبی باشد. برای نیل به این هدف، منطقی است که ارتباط بین سطح جسم و میزان پسایی که سیال هنگام عبور از این سطح با آن مواجه می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد.

تحقیقات نشان می‌دهند که کاهش پسا هم در رژیم جریان آرام و هم در رژیم جریان آشفته دست‌یافتنی است [۱]. در بسیاری از حالات، کاهش پسا با تغییر در سطح جسمی که سیال از روی آن عبور می‌کند به دست می‌آید. در برخی از روش‌ها، خواص سیال را با استفاده از اضافه کردن زنجیره بلندی از پلیمرها یا حباب‌ها [۲] تغییر می‌دهند و یا از سیستم فعال دمش و مکش استفاده می‌کنند [۳]. این روش‌های آب‌گریز تنها در مقیاس‌های طولی نانومتری اعمال می‌شوند و در تولید کاهش پسا در جریان‌های ماکروسکوپی مؤثر نیستند. در برخی از روش‌ها، هندسه سطح را با استفاده از اضافه کردن ساختارهایی مانند ریبلت‌ها^۱ [۴]، دیواره‌های کامپلینت^۲ [۵]، لبه‌ها و ستون‌ها^۳ تغییر می‌دهند. کاهش پسا در جریان آرام در مقیاس ماکرو با استفاده از مواد فعال در سطح، شارژ الکتریکی سیال و یا از طریق خواص شیمیایی سطح (آبگریزی سطح) امکان‌پذیر است [۶]. تحلیل تئوریک که توسط فوکاگاتا^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ انجام گرفت نشان داد که چگونه یک تغییر کوچک در زیر لایه آرام می‌تواند کل لایه مرزی آشفته را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه پسا را تغییر دهد [۷]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی سطوحی که هم‌زمان خواص شیمیایی و ویژگی‌های هندسی را برای رسیدن به سطح بالایی از کاهش پسا به کار می‌برند،

- 1- Riblet
- 2- Compliant Wall
- 3- Ridge and Posts
- 4- Fukagata

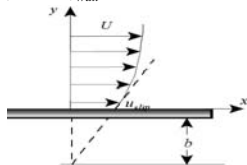
5- Ou

6- Joseph

اثر مستقیم آب‌گریزی در دینامیک سیالات، لغزش سیال بر روی سطح جامد آب‌گریز است (مشابه عبور سیال بر روی سیال). طول لغزش، مقداری میکروسکوپی است که می‌تواند آب‌گریزی را کمی کند و همچنین نشان‌دهنده کاهش پسا است. تاکنون اندازه‌گیری طول لغزش به‌صورت تجربی بسیار مشکل بوده و پیش‌بینی‌های تحلیلی نیز مورد اطمینان نبوده‌اند. در این راستا برای ساده‌سازی در اکثر مراجع از شرط (عدم لغزش) استفاده شده است که به معنی این است که حرکت مولکول‌های سیال نزدیک دیوار، با سرعتی برابر با سرعت دیوار صورت می‌گیرد. با تکیه بر این فرض در مکانیک سیالات مدل‌های میکروسکوپی زیادی در کارهای تجربی به نتیجه رسیدند. در حالی که شرط عدم لغزش به‌طور تجربی برای بسیاری از سیالات میکروسکوپی اثبات شده است، هنوز به‌صورت فرضی باقی مانده است که پایه و اساس فیزیکی نداشته و باعث رفتار منفرد^۱ و یا غیرواقعی در جریان‌هایی مانند پخش شدن (پاشیدن) سیال روی سطح جامد، جریان‌های گوشه و کشش مذاب پلیمر در لوله‌های موئین می‌شود. از طرفی افزایش مشاهدات نشان داده است که سیال عبوری از سطح هیدروفوبیک شرط لغزش را روی مرز (به‌خصوص در حالت‌های میکروسکوپی) ارضاء می‌کند.

ناویر اولین کسی بود که امکان لغزش سیال روی یک سطح جامد را بررسی کرد [۱۳]. در مدل ناویر، که به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار سرعت لغزش متناسب است با مقدار نرخ برش تجربه شده توسط سیال در روی دیواره، که b مبین طول لغزش است. برای یک جریان تک‌سو روی یک دیواره تخت طول لغزش b فاصله‌ای در پایین فصل مشترک جامد-مایع است که در آن، سرعت برون‌یابی صفر می‌شود.

$$u_{slip} = b \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{Wall} \quad (2)$$



شکل (۲): شماتیک طول لغزش روی فصل مشترک جامد-مایع.

طول لغزش یک پارامتر میکروسکوپی است. ارتباط این دو مشخصه آب‌گریزی (طول لغزش و زاویه تماس) در عمل نه تأیید و نه رد شده است. اطلاعات زیادی در مورد زاویه تماسی با توجه به طول‌های لغزش اندازه‌گیری شده وجود دارد. مهمترین مشکل در مورد اندازه‌گیری طول‌های لغزش آن است که اندازه‌گیری در مقیاس میکرو باید دقیق باشد. به‌علاوه در نتایج آزمایشگاهی طول لغزش چندین برابر بزرگتر از پیش‌بینی مدل‌سازی‌ها هستند. شبه‌سازی‌ها این امکان را می‌دهند که طول‌های لغزش را در مقیاس میکرو با هم مقایسه کرده و بتوان ارتباط آن‌ها با زاویه تماسی را محاسبه کرد.

۳- طول لغزش و سرعت لغزش

یک روش معمول برای اندازه‌گیری اثر میکروسکوپی سطح هیدروفوبیک، سرعت لغزش یا طول لغزش است که روی سطح با آن روبرو می‌شود. قبل از بحث در مورد موضوع مطرح شده، لازم است که تفاوت بین اثرات میکروسکوپی و میکروسکوپی که بر روی سطوح هیدروفوبیک رخ می‌دهد، توضیح داده شود. با تعریف طول لغزش به‌صورت زیر شروع می‌شود [۱۲]:

$$b \equiv \frac{u_{slip}}{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}} \quad (1)$$

که در آن، u_{slip} سرعت متوسط روی سطح هیدروفوبیک است، و $(\partial u / \partial y)_{y=0}$ نرخ برش روی دیواره است که در جهت عمودی در نظر گرفته شده است. تأکید بر استفاده از واژه سرعت متوسط در بالا بسیار مهم است، برای آنکه به‌طور محلی (میکروسکوپی)، تغییر شرایط مرزی ارائه شده توسط سطوح هیدروفوبیک با میکروساختارها، نواحی را به‌وجود می‌آورند که سرعت روی سطح (u_{slip} محلی یا میکروسکوپی) صفر است و در نواحی دیگر که برش محلی $(\partial u / \partial y)$ ضرورتاً صفر است، باعث سرعت لغزش محلی بزرگ و طول لغزش می‌شود. با توجه به این موضوع، تنها یک متوسط سطحی از سرعت‌ها یا گرادیان نرخ برش روی سطح، موجب سرعت لغزش متوسط یا طول لغزش می‌شود. این مفهوم، کلید اصلی در شناخت اعمال شرایط مرزی در شبه‌سازی‌های انجام گرفته شده است.

۴- تحلیل جریان مجاور سطوح هیدروفوبیک

بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند [۱۴] که جریان‌های گذرنده از سطوح هیدروفوبیک را می‌توان توسط معادلات ناویر-استوکس همراه با شرط مرزی لغزش تحلیل کرد. در این مقاله شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای یک کانال با جریان آشفته و دیواره هیدروفوبیک انجام شده است که از شرط مرزی لغزش مطابق زیر استفاده شده است:

$$u_s = L_s \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{wall} \quad (3)$$

که u_s نشان دهنده سرعت لغزش در جهت جریان و L_s بیان کننده طول لغزش است. طول لغزش عموماً به نرخ برش $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{wall}$ بستگی دارد. از دیدگاه ماکروسکوپی، طول لغزش

یک سطح هیدروفوبیک در فضا یکنواخت نیست و این غیریکنواختی ممکن است رفتار پیچیده‌ای از خود به جا بگذارد. در هر صورت، اگر اندازه هر یک از ساختارهای سطح کمتر از مقیاس کولموگروف باشند، طول لغزش در رابطه (۳) را می‌توان به صورت متوسط مکانی از طول لغزش بر حسب دینامیک آشفته در نظر گرفت. بنابراین فرض طول لغزش یکنواخت را می‌توان برای یک سطح با ساختار نانو توجیه کرد. در این مقاله طول لغزش را مستقل از نرخ برش در نظر گرفته شده که برای نرخ‌های برشی متوسط معتبر می‌باشد.

در شبیه‌سازی انجام گرفته عدد رینولدز جریان بر اساس نصف طول کانال و سرعت اصطکاکی 0.98 ، تقریباً 180 می‌باشد که معادل رینولدز $3,300$ بر اساس سرعت واقعی است. جریان بر روی شبکه ریز $65 \times 65 \times 65$ در سه راستای x ، y و z حل شده است. ابعاد کانال در 3 جهت جریان، عمود بر دیواره و در راستای عمق کانال $4/3 \pi \delta \times 2\delta \times 4\pi\delta$ می‌باشد که در این جا δ نصف ارتفاع کانال است. در جهت x و z ، $\Delta x^+ = \Delta x u_\tau / \nu \approx 35$ ، $\Delta z^+ = \Delta z u_\tau / \nu \approx 12$ جهت عمود بر دیواره نیز از یک شبکه‌بندی غیریکنواخت با تابع تائزانت هایپربولیک $y_j = 0.01 \left(1 - \frac{\tanh(\gamma(1-2j/N_y))}{\tanh(\lambda)} \right)$ استفاده شده است. که در این رابطه N_y تعداد کل شبکه‌ها در راستای y و γ ضریب گسترش شبکه 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 شبکه از دیواره

برابر با $y^+ = \Delta y u_\tau / \nu \approx 0.5$ و بیشترین اختلاف هم که در وسط کانال است، برابر با $13/8$ می‌باشد.

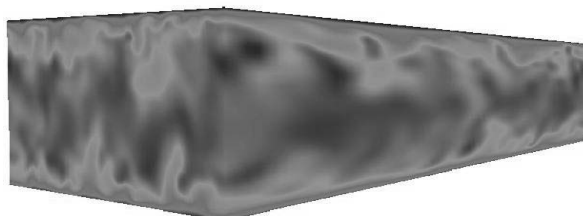
شرط اولیه، یک میدان با شدت آشفتگی 20% به همراه سرعت متوسط $15/63$ در جهت جریان می‌باشد که حل در طول زمان پیش می‌رود تا به شرایط جریان آشفته کاملاً توسعه یافته برسد. در شکل‌های ۳ و ۴ میدان اولیه و میدان نهایی حاصل از حل عددی قابل ملاحظه می‌باشد.



ب

الف

شکل (۳): الف، شبکه بندی مقطعی عرضی کانال ب، نمایی از میدان اغتشاشی اولیه جریان.



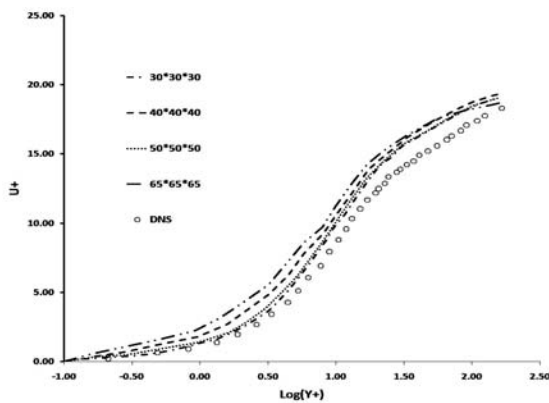
شکل (۴): میدان آشفته به دست آمده در انتهای حل.

کلیه مشتقات مکانی و جمله‌های دیفیوژن با استفاده از طرح اختلاف مرکزی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین طرح کرنک-نیکلسون برای گسسته‌سازی ترم زمانی استفاده شده است.

برای مرزها شرط مرزی پرودیک برای جهت جریان و همچنین در جهت عمق جریان اعمال شده است و به منظور ایجاد دبی ثابت در میدان در هر گام زمانی گرادیان فشار ثابتی به صورت جمله معلوم به معادله ناویر-استوکس اضافه می‌شود. به منظور اعمال شرط مرزی لغزش، معادله (۱)، و اطمینان از اعمال درست شرط مرزی به کد اصلی استفاده شده در تحلیل جریان، ابتدا روی مرز سرعت ثابت در نظر گرفته شد و در مرحله بعدی سرعت به صورت معادله خطی از ابتدا تا انتهای کانال افزایش پیدا کرد. پس از حصول اطمینان

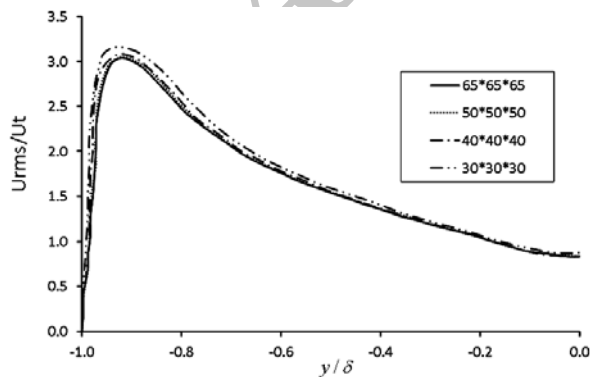
۵- عدم وابستگی حل به شبکه

پروفیل بی‌بعد شدت‌های آشفتگی در جهت عرض جریان و پروفیل بی‌بعد سرعت در جهت جریان برای چهار شبکه $(30^3, 40^3, 50^3, 65^3)$ در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات چشمگیری بین شبکه‌های 50^3 و 65^3 وجود ندارند. همچنین روند مشابهی برای پروفیل‌های شدت آشفتگی در دو جهت دیگر و پروفیل‌های تنش رینولدز مشاهده می‌شود (نتایج در این مقاله ارائه نشده است). بنابراین شبکه 65^3 برای کلیه شبه‌سازی‌های انجام گرفته انتخاب شده است. این شبکه در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی جریان کانال توسط شبه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است، که می‌توان به کارهای انجام شده توسط الهامی و همکارانش اشاره کرد [۱۸].



شکل (۵): پروفیل سرعت متوسط برای چهار شبکه مختلف،

$$\text{پارامترهای بی بعد: } \left(U^+ = \frac{U}{U_\tau}; \frac{u_{rms}}{U_\tau}; Y^+ = \frac{YV}{U_\tau}; \frac{Y}{\delta} \right)$$



شکل (۶): پروفیل شدت‌های آشفتگی برای چهار شبکه

مختلف.

از اعمال شرط مرزی، حال نوبت به اعمال شرایط مرزی لغزش جزیبی (که هدف اصلی در انجام این مقاله می‌باشد) رسید. برای این منظور لازم بود که به‌توان گرادیان سرعت روی دیواره را در طول حل جریان داخل کانال به‌صورت لحظه‌ای محاسبه کرد و این گرادیان سرعت را به معادله (۱) اعمال کرده و در نتیجه سرعت لغزشی روی دیواره هیدروفوبیک در طول حل محاسبه شود. بنابراین کد رایانه‌ای برای این منظور تدوین شد که قابلیت‌های بیان شده را در بر می‌گیرد. به منظور بررسی اثرات سطوح هیدروفوبیک بر جریان، شبه‌سازی‌ها، برای محدوده‌ای از طول‌های لغزش انجام شد که با طول‌های لغزشی‌ای که در شبه‌سازی عددی مستقیم انجام گرفته توسط کیم و مین، متناسب باشد. طول‌های لغزش در محدوده $2 \times 10^{-4} m - 10^{-6} m$ در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که طول لغزش به‌دست آمده توسط عملیات شیمیایی بر روی سطوح معمولاً کمتر از $1 \mu m$ است، در حالی که ترکیب سطوح هیدروفوبیک به همراه میکرونانو ساختارها، طول‌های لغزش از مرتبه $10 - 100 \mu m$ را ممکن می‌سازد که در بسیاری از آزمایش‌های تجربی چنین طول لغزش‌هایی برای سطوح هیدروفوبیک مشاهده شده‌اند.

در این مقاله از کد منبع باز^۱ دینامیک سیالات محاسباتی، OpenFOAM^۲، که بر اساس کار انجام گرفته توسط ولر^۳ و همکارانش می‌باشد [۱۵]، برای شبه‌سازی جریان استفاده شده است. بسته دینامیک سیالات محاسباتی OpenFOAM می‌تواند جریان‌های سیال پیچیده را شبه‌سازی کند. دسترسی به این بسته، آزاد می‌باشد و فن‌آوری اصلی OpenFOAM شامل دسته‌ای از ماژول‌های C++ می‌باشد. OpenFOAM از روش حجم محدود همراه با یک حل‌گر جداکننده^۴ بر روی شبکه بی‌سازمان سه بعدی از سلول‌های چند وجهی^۵ استفاده می‌کند. این کد دارای کتابخانه‌ای از کدهای C++ است که برای نوشتن کدهای دینامیک سیالات محاسباتی به کار می‌رود [۱۶].

- 1- Open Source
- 2- Open FOAM (Open Source Field Operation and Manipulation)
- 3- Weller
- 4- Segregated Solver
- 5- Polyhedral

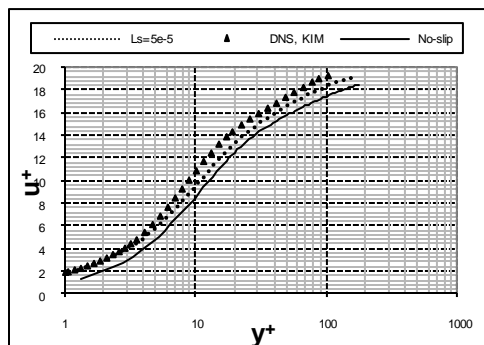
۶- نتایج و بحث

از نتایج به دست آمده از حل همگرا شده کانال با شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیواره به عنوان شرایط اولیه مسئله کانال با شرط مرزی لغزش بر روی دیواره استفاده می‌شود. شبیه-سازی جریان با شرط مرزی لغزش به ترتیب برای طول‌های لغزش $2 \times 10^{-4} m$ و $10^{-4} m$ ، $5 \times 10^{-5} m$ ، $2 \times 10^{-5} m$ انجام شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش طول لغزش، افزایش در سرعت لغزش و کاهش سرعت اصطکاکی قابل مشاهده است. نتایج در شکل‌های ۱۰-۷ و همچنین جدول ۱ ارائه شده است. همچنین این نتایج با نتایج شبیه-سازی عددی مستقیم انجام گرفته توسط کیم و مین مقایسه شده است که نشان می‌دهد نتایج کار با نتایج DNS [۱۷]، از تطابق قابل قبولی برخوردار هستند.

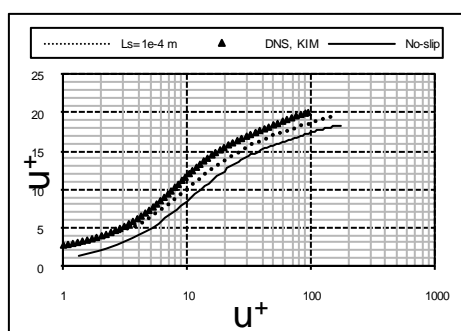
جدول (۱): تغییرات سرعت لغزش با طول‌های لغزش

$$2 \times 10^{-5} m, 5 \times 10^{-5} m, 10^{-4} m, 2 \times 10^{-4} m$$

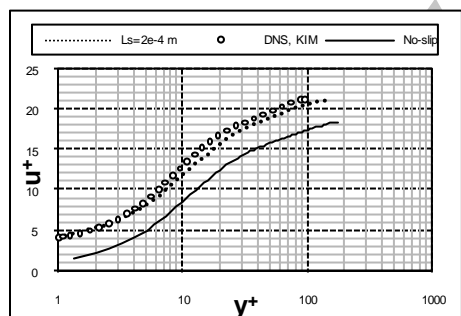
L_s	L_s^+	u_s	u_s^+
0.002 δ	0.353	0.544	0.545
0.005 δ	0.88	0.91	0.978
0.01 δ	1.766	1.47	1.62
0.02 δ	3.532	2.70	3.26



شکل (۸): پروفیل سرعت متوسط برای لغزش در جهت جریان با طول لغزش $5 \times 10^{-5} m$.

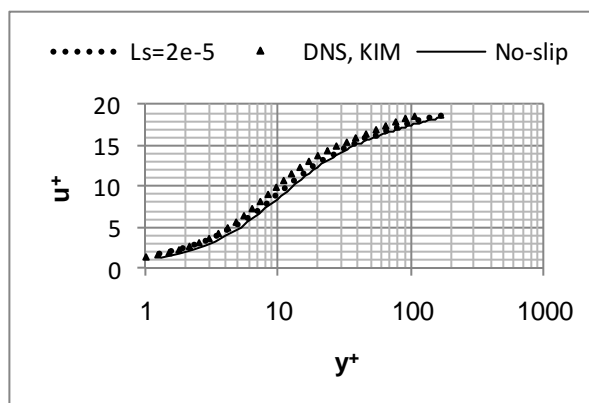


شکل (۹): پروفیل سرعت متوسط برای لغزش در جهت جریان با طول لغزش $10^{-4} m$.

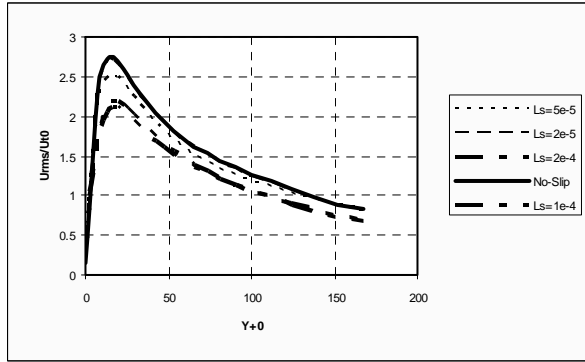


شکل (۱۰): پروفیل سرعت متوسط برای لغزش در جهت جریان با طول لغزش $2 \times 10^{-4} m$.

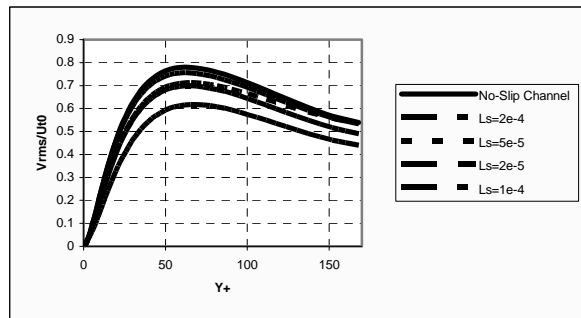
شکل ۱۱ پروفیل‌های سرعت لغزشی در جهت جریان، که توسط سرعت برشی دیواره u_τ بی‌بعد شده‌اند، را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به کانال با شرط مرزی دیواره عدم-لغزش هم برای مقایسه آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، انتقال رو به بالای پروفیل‌های سرعت لغزش با افزایش طول لغزش رخ می‌دهد. برای بیان اثر سرعت متوسط لغزشی



شکل (۷): پروفیل سرعت متوسط برای لغزش در جهت جریان با طول لغزش $2 \times 10^{-5} m$.

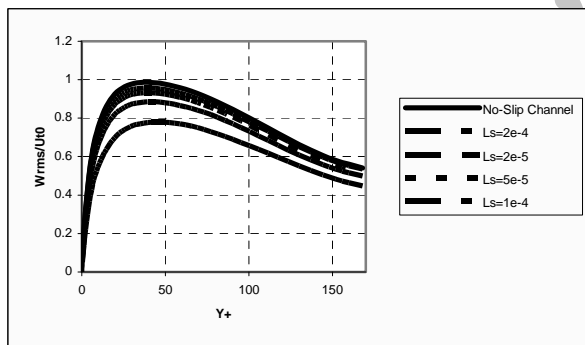


شکل (۱۳): نوسانات سرعت U_{rms} بی‌بعد شده توسط $u_{\tau 0}$.



شکل (۱۴): نوسانات سرعت V_{rms} بی‌بعد شده

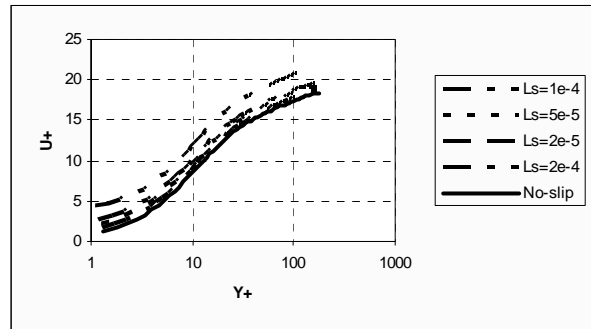
توسط $u_{\tau 0}$.



شکل (۱۵): نوسانات سرعت W_{rms} بی‌بعد شده توسط $u_{\tau 0}$

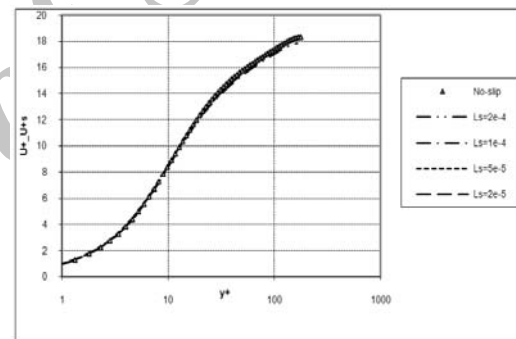
جریان آشفته به وسیله پارامترهای زیادی مشخص می‌شود که از این بین عدد رینولدز متناظر با جریان و تنش رینولدز همراه با جریان می‌باشند، که متناظر با اندازه نیروهای برشی و نرمال تجربه شده در سیال هستند. در واقع تنش‌های رینولدز از مشخصه‌های آشفته مرتبه دوم هستند. ساختارهای آشفته کانال توسط سطوح هیدروفوبیک تحت تأثیر قرار می‌گیرند، که توسط تغییر در تنش‌های رینولدزی و پروفیل‌های

غیرصفر u_s^+ ، نمودار $u^+ - u_s^+$ در شکل ۱۲ رسم شده است. با رسم پروفیل‌های سرعت به این روش، کلیه پروفیل‌های سرعت به یک پروفیل تبدیل می‌شوند که متناظر با پروفیل سرعت برای کانال عدم-لغزش است.



شکل (۱۱): پروفیل سرعت متوسط برای لغزش در جهت

جریان با طول لغزش مختلف.

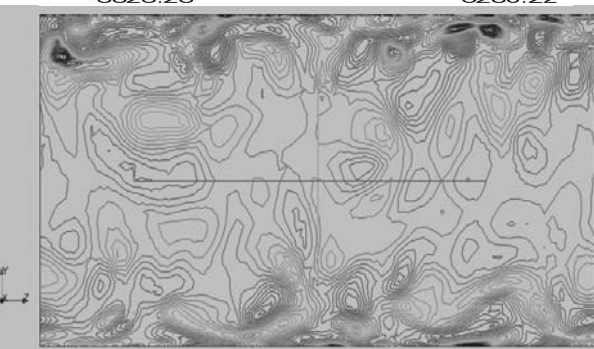
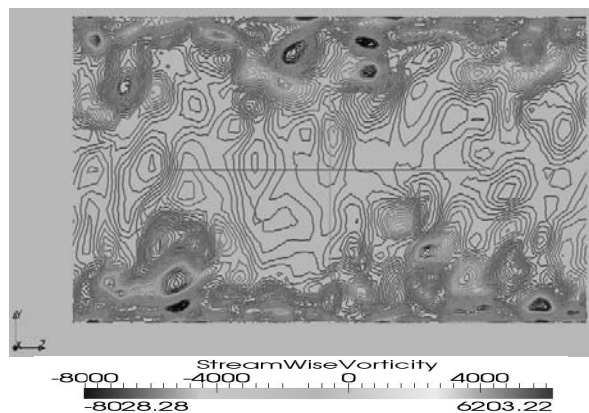


شکل (۱۲): پروفیل‌های سرعت متوسط، $u_s^+ - u^+$.

حال به بررسی اثر پارامتر طول لغزش بر نوسانات آشفته در جهت جریان، عمود بر جریان و در جهت عمق جریان پرداخته خواهد شد. نوسانات آشفته بخشی از مشخصه‌های آشفته مرتبه اول به حساب می‌آیند که به نوعی شدت آشفتگی را نشان می‌دهند. شکل‌های ۱۳-۱۵ جذر متوسط مربع سرعت‌های نوسانی که توسط سرعت اصطکاکی دیواره عدم-لغزش بی‌بعد شده‌اند را نشان می‌دهد. نوسانات U_{rms} ، V_{rms} و W_{rms} بطور قابل توجهی با افزایش طول لغزش کاهش می‌یابند. این موضوع بیان‌گر این نکته است که با افزایش طول لغزش، نوسانات آشفته به شدت کاهش یافته و ساختارهای آشفته نزدیک دیواره ضعیف می‌شوند.

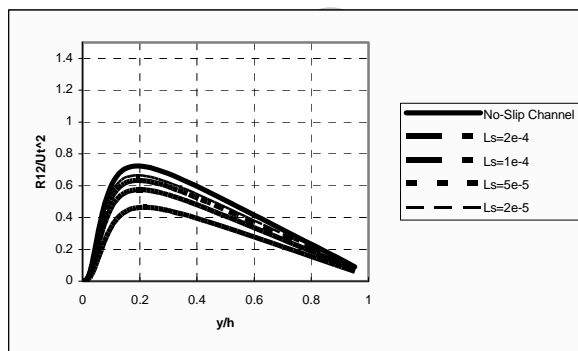
افزایش داده شده است. به عنوان نمونه، با اعمال طول لغزش $2 \times 10^{-4} m$ ضخامت زیر لایه آرام تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد که این خود دلیلی بر کاهش پسا اصطکاکی هنگام استفاده از سطوح هیدروفوبیک می‌باشد. این موضوع به این معنی می‌باشد که با دستکاری در زیر لایه آرام توسط استفاده از سطوح هیدروفوبیک می‌توان ساختارهای آشفته نزدیک دیواره را تغییر داد.

شکل ۱۹ تغییرات پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره هیدروفوبیک را به ازای طول‌های لغزش مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش طول لغزش، شیب پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که تنش برشی روی دیواره با افزایش طول لغزش، کاهش خواهد یافت به طوری که تنش برشی روی دیواره با بیشترین طول لغزش، بیش از ۶۰٪ کاهش را نسبت به حالت عدم لغزش نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): کانتورهای ورتیسیته در جهت جریان و در صفحه $y-z$. شکل بالایی کانال با شرط عدم لغزش، شکل پایینی کانال با شرط لغزش.

سرعت قابل مشاهده هستند. همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود با افزایش طول لغزش، نمودار تنش رینولدز به سمت پایین شیف‌ت پیدا می‌کند که این مطلب نشان از تغییر ساختارهای آشفته تحت تأثیر سطوح هیدروفوبیک می‌باشد. شناخت این تغییرات، امکان مدل‌سازی و پیش‌بینی کارایی سطوح هیدروفوبیک برای کاربردهای مختلف را بدون نیاز به مصرف زمان و هزینه‌های اجرای DNS یا آزمایش‌های تجربی را فراهم می‌آورد.



شکل (۱۶): اثر طول لغزش بر تنش‌های رینولدز.

در نمودار فوق تنش‌های رینولدز توسط مربع سرعت برشی دیواره با شرط مرزی لغزش بی‌بعد شده‌اند.

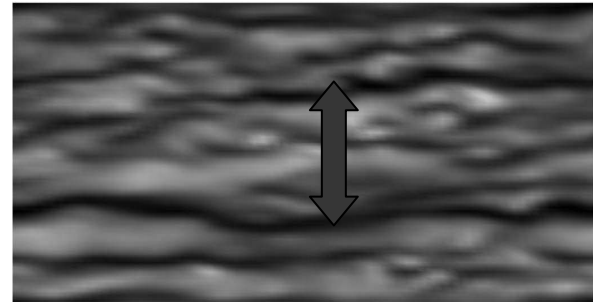
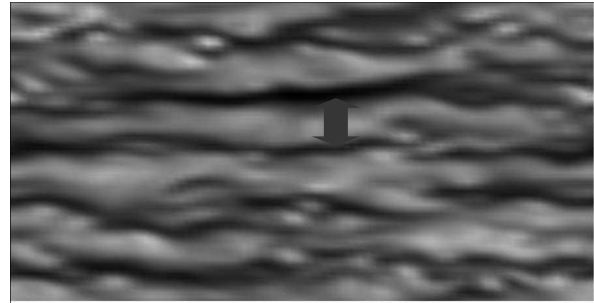
شکل ۱۷ کانتورهای ورتیسیته در جهت جریان را در صفحه $y-z$ نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، گردابه‌های در جهت جریان و نزدیک دیواره به‌طور قابل توجه در مقایسه با کانال عدم-لغزش ضعیف می‌شوند. هم‌چنین با توجه به شکل ۱۸ مشخص می‌شود که قدرت و پیوستگی ساختارهای رگه‌ای جریان به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در حالت عدم-لغزش فاصله بین رگه‌های کم سرعت جریان (خطوط پررنگ)، تقریباً از مرتبه 0.008 می‌باشد ولی در حالت لغزش با طول لغزشی معادل $5 \times 10^{-5} m$ ، این فاصله تا 0.18 افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان به این نکته اشاره کرد که شرط مرزی روی سطح، مانند هیدروفوبیک یا هیدروفیلیک بودن سطح، نقش مهمی را در تعیین طبیعت آشفته نزدیک دیواره بازی می‌کند.

نکته مهم دیگری که به آن باید اشاره کرد این است که با اعمال شرط مرزی لغزش، در واقع ضخامت زیر لایه لزج

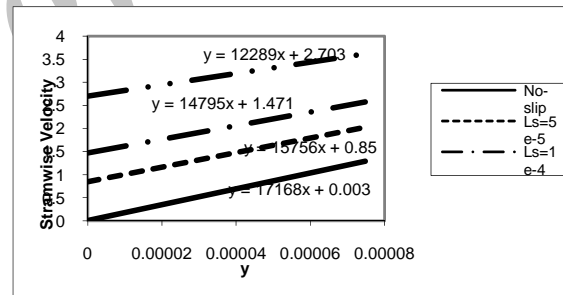
کاهش یافته است. شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای بررسی کارایی کاهش پسا سطوح هیدروفوبیک در یک کانال با جریان آشفته استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که با اعمال شرط مرزی لغزش در جهت جریان، پسا اصطکاکی کاهش می‌یابد و شدت‌های آشفته، ساختارهای آشفته و به ویژه گردابه‌های نزدیک دیواره و در جهت جریان به صورت قابل توجهی ضعیف می‌شوند. همچنین، نتایج نشان دادند که طول لغزش باید از یک مقدار معینی بیشتر باشد تا اثر محسوس بر آشفتگی داشته باشد. استنباط مهمی که از این نتیجه می‌توان داشت این است که، کاهش پسا در لایه‌های مرزی آشفته با سطوح هیدروفوبیک که طول لغزشی از مرتبه زیرمیکرونی دارند غیرمحمول است و برای رسیدن به طول لغزش‌های بالاتر، در این سطوح باید از میکرو/نانوساختارها نیز در کنار خواص شیمیایی خود سطح استفاده کرد.

مراجع

1. Michael, B.M. "Simulation of Turbulence over Superhydrophobic Surfaces", M. Sc. Thesis, Dep't. of Mech. and Indust. Eng., Massachusetts Amherst Univ., 2009.
2. Murai, Y., Oiwa, H., and Takeda, Y. "Frictional Drag Reduction by Bubbles in Taylor-Couette Flow", APS Meeting Abstracts, Nov. 2006.
3. Kim, J. "Active Control of Turbulent Boundary Layers for Drag Reduction", Lecture Notes in Physics, Vol. 529, pp. 142-152, 1999.
4. Davies, J., Maynes, D., Webb, B.W., and Woolford, B. "Laminar Flow in a Microchannel with Superhydrophobic Walls Exhibiting Transverse Ribs", Physics of Fluids, Vol. 18, No. 8, pp. 087110, 2006.
5. Hahn, S., Je, J., and Choi, H. "Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Permeable Walls", J. Fluid Mech., Vol. 450, pp. 259-285, 2002.
6. Tretheway, D.C. and Meinhart, C.D. "Apparent Fluid Slip at Hydrophobic Microchannel Walls", Physics of Fluids, Vol.14, No. 3, pp. 9-12, 2002.
7. Fukagata, K., Kasagi, N., and Koumoutsakos, P.A. "Theoretical Prediction of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow by Superhydrophobic Surfaces", Physics of Fluids, Vol. 18, No. 5, pp. 051703-1:051703-4, 2006.
8. Ou, J., Perot, J.B. and Rothstein, J. "Laminar Drag Reduction in Microchannels, Using



شکل (۱۸): مقایسه خطوط رگه جریان، شکل بالایی کانال با شرط عدم-لغزش، شکل پایینی کانال با شرط لغزش.



شکل (۱۹): تغییرات پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره به ازای طول‌های لغزش مختلف.

۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تحلیل اثرات سطوح هیدروفوبیک بر جریان سیال مجاور سطح به صورت اصلاح شرایط مرزی روی دیواره و کاهش پسا اصطکاکی و تغییر ساختار آشفته جریان مورد توجه قرار گرفت. سرعت‌های لغزش، تنش‌های برشی دیواره و تنش‌های رینولدز برای طول‌های لغزش مختلف از سطوح هیدروفوبیک در عدد رینولدز اصطکاکی $Re_\tau \cong 180$ بررسی شده است. برای طول‌های لغزش بزرگتر از 10^{-5} متر، سرعت لغزش متوسط بیش از ۱۸ درصد سرعت متوسط سیال به دست آمده و تنش برشی دیواره بیش از ۶۰ درصد

- Superhydrophobic Surfaces”, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 12, pp. 4635–4643, 2004.
9. Joseph, P., Cottin-Bizonne, C., Benot, J.M., Ybert, C., Journet, C., Tabeling, P., and Bocquet, L., “Slippage of Water Past Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests in Microchannels”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 97, No. 15, 2006.
 10. Daniello, R., Waterhouse, N.E., and Rothstein, J.P. “Turbulent Drag Reduction, Using Superhydrophobic Surfaces”, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 8, pp. 085103, 2009.
 11. Roman, S., Voronov, A., Dimitrios, V., Papavassiliou, A., and Lloyd, L. L., “Slip Length and Contact Angle over Hydrophobic Surfaces”, *Chemical Physics Letters*, Vol. 441, No’s. 4-6, pp. 273–276, 2007.
 12. Wilcox, D., “Basic Fluid Mechanics”, DCW Industries, CA, 2000.
 13. C.L.M.H. Navier, *Mem. Acad. R. Sci. Inst.*, France, 1, 414, 1823.
 14. Tretheway, D.C. and Meinharta, C.D., “A Generating Mechanism for Apparent Fluid Slip in Hydrophobic Microchannels”, *Physics of Fluid*, Vol. 16, No. 5, pp. 1509-1515, 2004.
 15. Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C.A., “Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics, Using Object-Oriented Techniques”, *Comp. in Physics.*, Vol. 12, No. 6, pp. 620–631, 1998.
 16. Jasak, H., Weller, H.G., and Gosman, A.D., “High Resolution NVD Differencing Scheme for Arbitrarily Unstructured Meshes”, *Int. J. Num. Methods in Fluids*, Vol. 31, pp. 431–449, 1999.
 17. Min, T. and Kim, J. “Effects of Hydrophobic Surface on Skin-friction Drag”, *Physics of Fluids* Vol. 16, No. 7, pp. L55 -L58 , 2004.
 18. Elhami-Amiri, A., Kazemzadeh-Hannani, S., and Mashayek, F. “Large Eddy Simulation of a Turbulent Channel Flow-Effect of Explicit Filtering on Convergence Rate and Near Wall Turbulence Structures”, *J. Aerospace Mech.*, Vol. 2, No. 1, pp 95-109, September, 2006 (In Persian).