



Development and Evaluation a Model to Calculate the Skin Friction Coefficient and the Friction Drag Reduction of a Superhydrophobic Flat Plate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Saadatbakhsh M.^{1*},
Sadeghzadeh S.²

How to cite this article

Saadatbakhsh M., Sadeghzadeh S. Development and Evaluation a Model to Calculate the Skin Friction Coefficient and the Friction Drag Reduction of a Superhydrophobic Flat Plate. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(05):281-291.

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

² Smart Micro / Nanoelectromechanical Systems (SMNEMS) Lab, School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

saadatbakhsh@khu.ac.ir

Article History

Received: August 19, 2024

Accepted: April 25, 2024

ePublished: July 27, 2024

ABSTRACT

Superhydrophobic surfaces have gained significant attention as a promising approach for drag reduction of submerged objects. Accurate evaluation and prediction of drag reduction induced by these surfaces require expensive experimental measurements, numerical simulations, or the development of reliable models and correlations. In this paper, a model is proposed for calculating the skin friction coefficient and drag reduction of superhydrophobic flat surfaces. Utilizing previous data on the skin friction coefficient of flat surfaces under no-slip boundary conditions, a model is developed to estimate the skin friction reduction and skin friction coefficient of these surfaces after applying superhydrophobic coatings. The validity of the model is verified by comparing its results with those of computational fluid dynamics (CFD) simulations of flow over a flat plate at different velocities. The results of the model and simulations indicate that for inlet velocities of 1, 5, and 25 m/s and a slip length of 50 μm , drag reductions of 15%, 41%, and 77%, respectively, are expected. Additionally, the skin friction reduction increases with increasing flow Reynolds number. The developed model is validated for flat surfaces and its ability to accurately estimate the skin friction coefficient and drag force of these surfaces is thoroughly examined. However, further investigations are required to assess the model's validity for curved surfaces and variable slip lengths.

Keywords Flat Plate, Drag Reduction, Skin Friction Coefficient, Superhydrophobic, Slip Length

CITATION LINKS

1- Analysis of shear rate effects on drag ... 2- Ansys fluent theory guide. 3- Boundary layer analysis. 4- Slip length measurement of pdms/hydrophobic ... 5- Super-hydrophobic surfaces: from natural to ... 6- Effect of hierarchical structured superhydrophobic ... 7- Natural and biomimetic artificial surfaces for ... 8- Robotic digital microfluidics: a droplet-based ... 9- Experimental and theoretical investigations ... 10- An analysis of superhydrophobic turbulent ... 11- On the mechanism of drag reduction in ... 12- Fluid drag reduction on superhydrophobic ... 13- Sustainable drag reduction in turbulent ... 14- Underwater Restoration and Retention of ... 15- Hydrophobic coating of aluminum flake ... 16- Antifouling activity of superhydrophobic ... 17- Facile, robust and large-scale fabrication ... 18- Robust super hydrophobic surface with ... 19- Fabrication method of large-scale and ... 20- Biomimetic structures for fluid drag reduction ... 21- Experimental study of skin friction drag ... 22- Superhydrophobic turbulent drag reduction as ... 23- Influence of slip on the flow past ... 24- Laminar drag reduction in microchannels ... 25- Effective slip and friction reduction ... 26- A numerical study of the effects of superhydrophobic ... 27- Terminal velocity and drag reduction ... 28- Fundamentals of fluid mechanics.

توسعه و ارزیابی مدلی جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز

محمد سعادت بخش^{۱*}، صادق صادق زاده^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲ دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

سطوح فوق آب گریز به عنوان روشی اساسی جهت کاهش پسای اصطکاک اجسام غوطه ور در آب مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. ارزیابی دقیق و پیش بینی مقدار کاهش پسای ناشی از به کارگیری این سطوح نیازمند اندازه گیری های هزینه بر، شبیه سازی های عددی و یا توسعه مدل ها و روابط قابل اعتماد می باشد. در این مقاله یک مدل برای محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای سطوح تخت فوق آب گریز ارائه می شود. از داده های پیشین مربوط به ضریب اصطکاک پوسته ای سطوح تخت با شرایط مرزی عدم لغزش استفاده شده و مدلی ارائه می شود که به کمک آن بتوان کاهش پسای اصطکاک و ضریب اصطکاک پوسته ای این سطوح را پس از اعمال پوشش های فوق آب گریز محاسبه نمود. با استفاده از شبیه سازی عددی، نتایج مدل با نتایج شبیه سازی جریان سیال روی صفحه تخت در سرعت های مختلف مقایسه شده و اعتبار مدل تایید شده است. نتایج مدل و شبیه سازی نشان دهنده آن است که در سرعت های ورودی ۱، ۵ و ۲۵ متر بر ثانیه و طول لغزش ۵۰ میکرون، کاهش پسای اصطکاک به ترتیب ۱۵، ۴۱ و ۷۷ درصد انتظار می رود. همچنین، با افزایش عدد رینولدز جریان، کاهش اصطکاک پوسته ای افزایش می یابد. مدل توسعه داده شده برای سطوح تخت اعتبارسنجی شده و توانایی آن در محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و نیروی پسای این سطوح به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال برای بررسی اعتبار مدل برای سطوح با انحنا و طول لغزش متغیر، تحقیقات بیشتری نیاز می باشد.

کلیدواژه ها: صفحه تخت، کاهش پسای، ضریب اصطکاک پوسته ای، فوق آب گریز، طول لغزش

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

*نویسنده مسئول: saadatbakhsh@khu.ac.ir

۱- مقدمه

تحقیقات متعددی نشان داده اند که سطوح فوق آب گریز می توانند اصطکاک پوسته ای را در جریان های آرام و آشفته کاهش دهند [5, 6]. با استفاده از این سطوح، می توان شرط متداول "عدم لغزش" را به لغزش تغییر داد که این تغییر منجر به کاهش شیب سرعت بر روی مرز جامد و در نتیجه تنش برشی دیواره می شود. به همین دلیل، نیرو و انرژی مورد نیاز برای حرکت یک جسم غوطه ور در سیال یا انتقال سیال در یک جریان داخلی کاهش خواهد یافت [7, 8]. تلاش های زیادی برای بررسی مقدار قابل دستیابی کاهش پسای اصطکاک ناشی از استفاده از سطوح فوق آب گریز از طریق مطالعات عددی [9-11] و آزمایشگاهی [5, 12-14] صورت گرفته است. ترکیب شیمیایی سطح جامد و ساختار

هندسی مرز مشترک جامد/سیال، مشخصات ترشوندگی یک سطوح فوق آب گریز مانند زاویه تماسی استاتیکی و زاویه لغزش را کنترل می کنند [15, 16]. با این حال، مقدار کاهش پسای اصطکاک به عملکرد این سطوح بستگی داشته و بیشتر تحت تأثیر شرایط جریانی مانند عدد رینولدز و فشار هیدرواستاتیکی جریان قرار می گیرد. بنابراین، بسیاری از روش های پیشنهادی برای ساخت این نوع سطوح در آزمایش های جریانی کاهش اصطکاک پوسته ای ناموفق خواهند بود. به عبارت دیگر، اگرچه ایجاد سطوح با مشخصات عالی فوق آب گریزی با روش های مختلف ممکن است، اما برخی از آن ها برای کاربردهای کاهش پسای اصطکاک کم اثر هستند. علاوه بر این، روش ساخت این سطوح باید انعطاف پذیری کافی برای اجرا بر روی بدنه های با مساحت زیاد را به روشی کارآمد داشته باشد [17-19]. همانطور که گفته شد، تحقیقات گسترده نشان داده است که تنش برشی دیواره ممکن است تحت تأثیر استفاده از آب گریزی به شدت تحت تأثیر قرار گیرد [11, 20]. با این حال، با توجه به تنوع روش های ساخت و پارامترهای موثر زیاد بر رفتار این سطوح، داده های منتشر شده در مورد کاهش اصطکاک پوسته ای در شرایط واقعی جریان سیال اندک است.

همانطور که پیش تر بیان شد، اثر کاهش پسای یک سطح فوق آب گریز به شدت به عدد رینولدز جریان و به طور خاص تنش برشی روی دیواره مرتبط است [21]. بنابراین، ارزیابی پوشش فوق آب گریز در تنش های برشی دیواره مختلف، می تواند زیربنایی استوار برای طراحی این سطوح برای کاربردهای مهندسی ارائه دهد. تحقیقات تجربی محدودی بر روی کاهش اصطکاک پوسته ای در کانال ها [4, 20, 22]، صفحات تخت [21]، استوانه ها [23] و بدنه های با تقارن محوری [9] انجام انجام شده است. بیشتر این مطالعات در میکروکانال ها [20, 24, 25] صورت گرفته است. او و همکاران [24] افت فشار جریان آرام در یک میکروکانال ساخته شده با این سطوح با طول کانال ۵۰ میلی متر را مورد بررسی قرار داده اند. در آن تحقیق، ساختارهای سطحی با فرآیند لیتوگرافی بر روی یک ویفر سیلیکونی ایجاد شد و سپس برای ایجاد آب گریزی شیمیایی، از لایه نشانی یک ارگانوسیلان استفاده شده است. استفاده از سطوح ساخته شده با ساختار سطحی منجر به کاهش افت فشار تا ۴۰ درصد شد، در حالی که برای نمونه های صاف آب گریز هیچ کاهش مقاومتی مشاهده نشد. این یافته اهمیت ساختارهای سطحی در مقیاس میکرون را در مقایسه با ترکیبات آب گریز در مقیاس نانومتری نشان می دهد. چوی و همکاران [25] نیز افت فشار یک میکروکانال با ارتفاع کانال ۲ تا ۱۲ میکرومتر بررسی کرده اند [6]. آن ها از لیتوگرافی تداخلی لیزری همراه با حکاکی یون واکنشی عمیق برای تولید الگوی شبکه نانویی منظم با گام ۲۳۰ نانومتر و عمق ۵۰۰ نانومتر روی نمونه سیلیکونی با ابعاد ۲×۲ سانتی متر مربع استفاده کردند. در

جهت استخراج مقدار پسای سطوح مختلف با شرط متداول عدم لغزش انجام شده و ضریب پسای اصطکاکی سطوح نیز به صورت جدول و رابطه در کتاب ها و مقالات علمی در حوزه مکانیک سیالات منتشر شده اند. هدف از این مقاله توسعه و ارزیابی مدلی جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز بر اساس داده های پیشین مربوط به ضریب اصطکاک پوسته ای با شرایط مرزی متداول عدم لغزش می باشد. بدین منظور ابتدا ضریب اصطکاک پوسته ای سطوح فوق آب گریز بر اساس مقدار آن با شرط مرزی متداول عدم لغزش محاسبه شده و سپس بر اساس مفهوم اعداد بی بعد در مکانیک سیالات مقدار نیروی پسای اصطکاکی نیز تخمین شده می شود. سپس به کمک شبیه سازی عددی مقادیر تخمین شده توسط مدل مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. همچنین اثر اعمال پوشش فوق آب گریز با بیان افزایش سرعت یک صفحه تخت در جریان عرضی و به بیان درصد کاهش پسای اصطکاکی ارائه خواهد شد. در نهایت به کمک شبیه سازی عددی تغییرات سرعت نزدیک دیواره و میزان کاهش پسا در چند عدد طول لغزش مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- توسعه مدل جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز

همان طور که پیش تر بدان اشاره شد ارزیابی تجربی مقدار ضریب اصطکاک پوسته ای و میزان کاهش پسای اصطکاکی سطوح با محدودیت هایی همراه می باشد. به عنوان مثال انجام آزمایش های کاهش پسا در جریان خارجی هزینه بر بوده و اندازه گیری جریان در سیستم های جریان داخلی کانال های آشفته نیز با محدودیت ها و دشواری هایی همراه می باشد. البته که این مشکلات جزئی از ماهیت اندازه گیری های تجربی در حوزه مکانیک سیالات می باشند. در کنار این محدودیت ها از طرفی استخراج اطلاعات دقیق در مورد تغییرات فیزیکی ایجاد شده در جریان عبوری از سطوح فوق آب گریز لازم و ضروری بوده و از طرف دیگر استفاده از آزمایش های تجربی جهت دستیابی به این اطلاعات هزینه بر، مشکل و پیچیده می باشد. تاکنون آزمایش های تجربی زیادی جهت استخراج مقدار پسای سطوح مختلف انجام شده و ضریب پسای اصطکاکی سطوح نیز به صورت جدول و رابطه ارائه شده است [28]. با توجه به این نکته که کلیه تغییراتی که یک سطح فوق آب گریز بر روی میدان جریان اعمال می کند از مرزهای بین جسم جامد و آب شروع شده و از طریق اندرکنش های مولکولی (انتقال مومنتوم توسط لزجت) و سایر شکل های اندرکنش های توده ای سیال (انتقال مومنتوم توسط کلیه ساختارهای آشفتنگی) در میدان جریان منتشر می شود، شاید بتوان مدلی را توسعه داد که بتواند داده های پیشین مربوط به ضریب اصطکاک پوسته ای با شرایط مرزی متداول عدم لغزش

آزمایش ها، فاصله ساختار ایجاد شده زیر ۰/۷ میکرومتر نگه داشته شد تا در برابر فشار جریان تا ۱ بار مقاومت کند. سپس برای ایجاد آب گریزی شیمیایی، محلول تفلون روی نمونه با ساختار سطحی پوشش داده شد. آنها کاهش مقاومت ۲۰ تا ۳۰ درصدی را برای این سطوح گزارش کردند. یانگ و بوشان [7] در مطالعه خود به بررسی کاهش مقاومت در کانالی به ابعاد ۶۰ میلی متر در جهت طولی، ۲۵ میلی متر در جهت عرضی و ۷۰۰ میکرومتر در جهت عمود بر دیواره پرداختند. در آن تحقیق، مشخصات ترشوندگی و کاهش مقاومت یک رزین اپوکسی صاف، یک نانو ساختار، یک میکروساختار و یک سطح با ساختارهای سلسله مراتبی مورد بررسی قرار گرفته است. آنها مقدار کاهش مقاومت ۱۲ درصد در جریان آرام و ۳۰ درصد در جریان آشفته را برای عدد رینولدز تا ۴۲۰۰ گزارش کردند. لیو و همکاران [26] در مطالعه ای بر روی پسای یک صفحه تخت فوق آب گریز، کاهش قابل توجهی در اصطکاک پوسته ای را برای صفحه تخت فوق آب گریز برای اعداد رینولدز کم تر ۲۰۰,۰۰۰ گزارش کردند. آنها از فرآیند آندایزینگ برای ایجاد منافذ سطحی روی ورق آلومینیوم استفاده کردند و از پوشش هپتا دکا فلورو دسیل تری متوکسی سیلان نیز برای ایجاد آب گریزی استفاده شده است. آنها مشاهده کردند که مقدار کاهش مقاومت با افزایش عدد رینولدز به تدریج کاهش می یابد و در نهایت، در عدد رینولدز بالای ۲۶۰,۰۰۰ مقدار کاهش پسا کاملاً از بین می رود. آنها نتیجه گیری کردند که در اعداد رینولدز بالاتر، حباب های هوای به دام افتاده بین دیواره و آب خارج از بین رفته و کاهش پسای مربوط به آنها نیز از بین می رود. در مطالعه ای دیگر، محققان فوق آب گریزی را بر روی یک کره اجرا کردند و با رهاسازی آن در ستونی از آب و اندازه گیری سرعت نهایی کره پوشش داده شده با روش های مختلف، تأثیر این پوشش ها را بر ضریب اصطکاک پوسته ای کره ارزیابی کردند. این آزمایش در اعداد رینولدز بین 3×10^4 و 4×10^4 انجام شد و آنها کاهش مقاومت بین ۵ تا ۱۵ درصد را گزارش کردند [27].

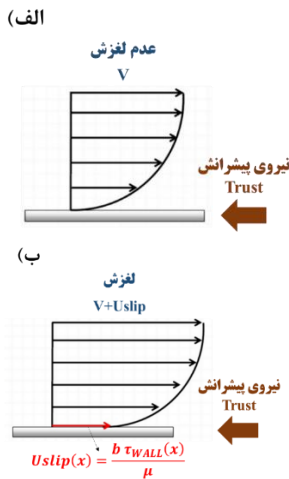
با وجود تحقیقات زیاد انجام شده در مورد ساخت سطوح فوق آب گریز، اطلاعات جامعی در مورد کاهش اصطکاک پوسته ای ناشی از به کارگیری این نوع پوشش ها در دست نیست. علت این موضوع این است که ارزیابی تجربی مقدار ضریب اصطکاک پوسته ای و میزان کاهش پسای اصطکاکی سطوح با محدودیت هایی همراه بوده، روش های متعددی برای ساخت این سطوح وجود داشته و همچنین پدیده های فیزیکی اثرگذار بر رفتار، از نمونه ای به نمونه دیگر متغیر می باشد. در کنار این محدودیت ها از طرفی استخراج اطلاعات کاربردی در مورد تغییرات فیزیکی ایجاد شده در جریان عبوری از سطوح فوق آب گریز لازم و ضروری بوده و از طرف دیگر استفاده از آزمایش های تجربی جهت دستیابی به این اطلاعات هزینه بر، مشکل و پیچیده می باشد. تاکنون آزمایش های تجربی زیادی

روی صفحه تخت) و سرعت صفحه تخت پس از اعمال لغزش به دست خواهد آمد:

$$U_{slip} = V + b \frac{\tau_{WALL}}{\mu} \quad (۶)$$

در صورتی که قرار باشد به این سوال پاسخ داده شود که مقدار پسای اصطکاکی صفحه تخت قبل و بعد از اعمال لغزش به چه صورتی می باشد، پاسخ واضح است؛ با توجه به ثابت بودن نیروی پیشران (شکل ۱)، نیروی پسای اعمالی از سیال به جسم نیز ثابت خواهد ماند. به عبارت دیگر در شرایط ذکر شده در بالا، اثر اعمال فوق آب‌گریزی بر روی صفحه تخت، خود را به صورت افزایش سرعت صفحه تخت (از V به $V + U_{slip}$) نشان داده است. سوال دیگر که می تواند مطرح شود این است که آیا در این شرایط مقدار ضریب پسای اصطکاکی ثابت می ماند و یا تغییر می کند؟ پاسخ این است که با توجه تعریف ضریب اصطکاک پوسته ای، در اثر تغییر سرعت و ثابت ماندن مقدار نیروی پسای، مقدار آن تغییر خواهد کرد. لازم به ذکر است که در این شرایط با توجه به ثابت بودن نیروی پسای، تنش برشی متوسط و گرادیان سرعت متوسط روی سطح نیز ثابت خواهند ماند (شیب نمودار سرعت بر روی دیواره در شکل ۱، قبل و بعد از اعمال لغزش ثابت خواهد ماند). بنابراین مقدار ضریب اصطکاک پوسته ای بعد از اعمال لغزش را می توان برای یک صفحه تخت از طریق روابط زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} Trust_{nostlip} = Trust_{slip} &\Rightarrow Drag_{nostlip} \\ &= Drag_{slip} \Rightarrow \end{aligned} \quad (۷)$$



شکل ۱) طرحواره توزیع سرعت روی صفحه تخت: الف) قبل اعمال لغزش، ب) بعد از اعمال لغزش

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \times \rho \times A \times CD_{nostlip} \times V_{nostlip}^2 \\ = \frac{1}{2} \times \rho \times A \\ \times CD_{slip} \times V_{slip}^2 \end{aligned} \quad (۸)$$

را به شرایط مربوط به سطوح فوق آب‌گریز (لغزش بین سطح جامد و سیال) تعمیم دهد. در صورتی که بتوان چنین مدلی را توسعه داد، به راحتی می توان از کلیه آزمایش های تجربی پیشین با شرایط مرزی متداول عدم لغزش استفاده کرد و نتایج را جهت تخمین ضریب اصطکاک سطوح فوق آب‌گریز و مقدار کاهش پسای، به عنوان دو مشخصه انتگرالی و مهم ناشی از برهمکنش سطح و سیال بازتولید نمود. در این بخش ابتدا مدل مورد نظر توسعه داده شده به شکلی که به کمک آن بتوان با استفاده از داده های تجربی مربوط به شرط مرزی عدم لغزش، و بدون انجام شبیه سازی مجدد مقدار کاهش پسای و یا افزایش سرعت سطوح فوق آب‌گریز را مورد ارزیابی قرار داد. سپس در بخش های بعدی مدل توسعه داده شده به کمک شبیه سازی عددی برای یک صفحه تخت در جریان آشفتنه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

با فرض پروفیل $1/7$ برای سرعت در جریان آشفتنه بر روی یک صفحه تخت با شرط مرزی عدم لغزش روابط مربوط به تنش برشی، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و ضریب پسای کل به صورت زیر خواهند بود [28]:

$$\tau_{WALL}(x) = \frac{0.0288\rho V^2}{Re_x^{1/5}} \quad (۱)$$

$$C_f(x) = \frac{\tau_{WALL}(x)}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{0.0576}{Re_x^{1/5}} \quad (۲)$$

$$C_D = \frac{0.0720}{Re_L^{1/5}} \quad (۳)$$

$$C_D = \frac{\tau_{WALL}}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (۴)$$

جهت توسعه مدل ابتدا فرض می شود که یک صفحه تخت در جریان ساکن سیال با سرعت V و نیروی پیشران ثابت در حال حرکت بوده (شکل ۱-الف) و به طور ناگهانی در شرایط لغزش قرار می گیرد. در اثر اعمال لغزش بر روی صفحه تخت سرعت آن از V به $V + U_{slip}$ (شکل ۱-ب) تغییر یافته که در آن U_{slip} از رابطه زیر به دست می آید [1]:

$$U_{slip}(x) = b \frac{\tau_{WALL}(x)}{\mu} \quad (۵)$$

به عبارت دیگر در این شرایط با توجه به ثابت بودن مقدار نیروی پیشران، لغزش سیال روی سطح باعث افزایش سرعت صفحه تخت خواهد شد. از آنجایی که سرعت لغزش تابعی از طول صفحه تخت (x) می باشد، برای توسعه مدل از مقدار متوسط آن استفاده شده است. بنابراین در این شرایط سرعت لغزش (سرعت سیال بر

کاهش خواهد یافت. در چنین شرایطی می توان گفت که هدف از اعمال پوشش فوق آب گریز افزایش سرعت نبوده بلکه کاهش مقدار نیروی پیشرانش و مصرف انرژی رانشی می باشد. در این شرایط با توجه به کاهش نیروی پسا، تنش برشی و در نتیجه گرادیان سرعت روی دیواره، مقدار آن ها چگونه باید مورد محاسبه قرار گیرد؟ پاسخ روشن است یا باید از اندازه گیری تجربی بهره برد، یا به کمک شبیه سازی عددی مقدار نیرو، تنش و گرادیان سرعت متوسط روی صفحه تخت را محاسبه نمود. البته که هدف از این مقاله توسعه یک مدل جهت تخمین این مقادیر بدون اندازه گیری و شبیه سازی می باشد. بدین منظور از یکی مفاهیم بسیار مهم در حوزه مکانیک سیالات استفاده خواهد شد و آن مفهوم اعداد بی بعد می باشد. اعداد بی بعد اعدادی هستند که در یک دنیای فیزیکی مشخص تعریف شده و در صورت ثابت ماندن آن ها رفتار فیزیکی جریان سیال ثابت خواهد ماند. در مساله مورد بررسی در این مقاله، فیزیک اعمال پوشش فوق آب گریز بر روی یک صفحه تخت بوده که اعداد بدون بعد آن Re و نسبت b/L می باشند که در هر دو حالت مفهوم یکسانی دارند. در هر دو حالت فرض شده جهت توسعه مدل (ثابت بودن نیروی پسا و افزایش سرعت و یا ثابت ماندن سرعت و کاهش نیروی پسا در اثر لغزش) فیزیک جریانی توصیف حرکت سیال روی صفحه تخت با سرعت نسبی بین سیال و سطح V و سپس اعمال پوششی فوق آب گریز با طول لغزش b بوده در حالی دیگر شرایط ثابت می باشند. به عبارت دیگر فارغ از فرض افزایش سرعت و یا کاهش نیرو در توسعه مدل، اعداد بی بعد ثابت مانده اند. آیا در صورتی که اعداد بی بعد موثر توصیف کننده فیزیک جریان ثابت باشند، ضریب اصطکاک پوسته ای، که خود یک پارامتر بی بعد مربوط به مقدار نیرو می باشد، ثابت نخواهد بود؟ پاسخ روش است. پل ارتباطی میان مفهوم افزایش سرعت و مفهوم کاهش پسا ضریب اصطکاک پوسته ای بوده که در رابطه (۱۵) ارائه شد و همچنان معتبر می باشد. برای محاسبه مقدار نیروی پسا پس از اعمال لغزش خواهیم داشت:

$$F_{Drag-nostip} = \frac{1}{2} \rho A C D_{nostip} V^2 \quad (۱۶)$$

$$F_{Drag-stip} = \frac{1}{2} \rho A C D_{stip} V^2 \quad (۱۷)$$

$$C D_{nostip} = \frac{0.0720}{Re_L^{\frac{1}{5}}} = \frac{0.0720}{\left(\frac{V_{nostip} L}{\nu}\right)^{\frac{1}{5}}} \quad (۱۸)$$

$$C D_{stip} = C D_{nostip} \frac{V^2}{\left[V + \frac{b}{2\mu} \rho V^2 C D_{nostip}\right]^2} \quad (۱۹)$$

بنابراین مدل ارائه شده جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز توسط روابط (۱۹)–

$$C D_{nostip} = \frac{0.0720}{Re_L^{\frac{1}{5}}} = \frac{0.0720}{\left(\frac{V_{nostip} L}{\nu}\right)^{\frac{1}{5}}} \quad (۹)$$

$$C D_{stip} = \frac{0.0720}{Re_L^{\frac{1}{5}}} = \frac{0.0720}{\left(\frac{V_{stip} L}{\nu}\right)^{\frac{1}{5}}} \quad (۱۰)$$

$$V_{stip} = V_{nostip} + U_{stip} = V_{nostip} + b \frac{\tau_{WALL}}{\mu} \quad (۱۱)$$

با جایگذاری روابط (۹)–(۱۱) در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$C D_{nostip} \times V_{nostip}^2 = C D_{stip} (V_{nostip} + U_{stip})^2 \Rightarrow \quad (۱۲)$$

$$C D_{nostip} \times V_{nostip}^2 = C D_{stip} (V_{nostip} + b \frac{\tau_{WALL}}{\mu})^2 \Rightarrow \quad (۱۳)$$

$$C D_{nostip} \times V_{nostip}^2 = C D_{stip} (V_{nostip} + \frac{b}{2\mu} \rho V^2 C D_{nostip})^2 \quad (۱۴)$$

$$C D_{stip} = C D_{nostip} \frac{V^2}{\left[V + \frac{b}{2\mu} \rho V^2 C D_{nostip}\right]^2} \quad (۱۵)$$

بر اساس مدل توسعه داده شده می توان به کمک رابطه (۱۵) ضریب اصطکاک پوسته ای متوسط مربوط به صفحه تخت دارای لغزش ($C D_{stip}$) را بر اساس مقدار آن در حالت عدم لغزش ($C D_{nostip}$) محاسبه نمود. بدین منظور کافی است که مقدار طول لغزش سطح مورد نظر را که مشخصه انتگرالی فوق آب گریزی آن محسوب می شود (b)، سرعت صفحه تخت (V)، ضریب اصطکاک پوسته ای قبل از لغزش ($C D_{nostip}$)، و چگالی سیال (ρ) را در رابطه (۱۵) قرار داد.

مدل تخمین ضریب پسای متوسط صفحه تخت با شرط مرزی لغزش، بر این اساس توسعه داده شد که صفحه تخت در حال حرکت با نیروی پیشرانش ثابت بوده و در اثر لغزش صرفاً سرعت حرکت آن افزایش یافته در حالی که تنش برشی متوسط و گرادیان سرعت روی صفحه ثابت خواهند ماند. در این مرحله یک سوال دیگر مطرح می شود. در صورتی که یک صفحه تخت با سرعت V در جریان سیال در حال حرکت باشد و قرار است با اعمال پوشش فوق آب گریز بر روی آن همچنان سرعت قبل را داشته باشد، از نظر فیزیکی و نیرویی چه تغییراتی ایجاد خواهد شد؟ طبیعی است که تحت چنین شرایطی به دلیل آنکه اصطکاک بین سطح و سیال کاهش یافته است، مقدار نیروی پسا و تنش برشی کاهش خواهند یافت. به عبارت دیگر در صورتی که تمایل بر اعمال پوشش فوق آب گریز بر روی یک صفحه تخت و حفظ سرعت قبلی آن مورد نظر باشد، مقدار نیروی پیشرانش

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \bar{P}_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (25)$$

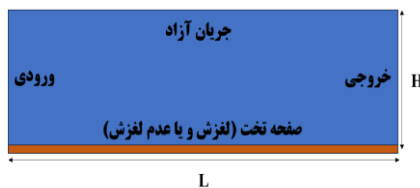
ضرایب مربوط به مدل آشفتگی و سایر روابط مربوط به آن مطابق [2] می باشند.

۳-۲- محدوده محاسباتی و شرایط مرزی

طرحواره مربوط به دامنه محاسباتی جریان روی صفحه تخت در شکل (۲) نشان داده شده است. شدت آشفتگی ورودی معادل با ۱ درصد و سرعت ورودی جریان معادل با ۱، ۳ و ۵ متر بر ثانیه تنظیم شده است. در مرز خروجی گرادیان سرعت و مقدار فشار معادل با صفر تنظیم شده است. برای سطح معمولی شرط مرزی متداول عدم لغزش استفاده شده درحالی که برای سطح فوق آب‌گریز مدل ناپذیر اعمال شده است:

$$u_{slip} = b \frac{\partial u}{\partial y} \quad (26)$$

اندازه ارتفاع دامنه محاسباتی (H) به نحوی انتخاب شده است که چندین برابر ضخامت لایه مرزی در انتهای صفحه باشد (H/L معادل با ۰/۱۵). از روش حل حجم محدود برای حل جریان در دامنه محاسباتی استفاده شده و کوپلینگ بین میدان‌های فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل حل شده است. برای گسسته سازی جملات جابجایی طرح مرتبه دوم بهره برده شده و همچنین از طرح تفاضل مرکزی برای گسسته سازی جملات دیفیوژن استفاده شده است. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی انجام شده است. دامنه محاسباتی در راستای جریان به ۲۰۰ بخش مساوی یکدیگر تقسیم شده است. فاصله سلول‌ها از دیواره به نحوی تعیین شده است که فاصله بی‌بعد اولین سلول مجاور دیواره از آن حدوداً برابر ۱ باشد.



شکل ۲) طرحواره دامنه محاسباتی جریان روی صفحه تخت

(۱۶) معرفی می گردد. در ادامه به کمک شبیه سازی عددی مدل توسعه داده شده مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۳- شبیه سازی عددی

در بخش قبل مدل محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز توسعه داده شد. در این بخش به منظور ارزیابی مدل توسعه داده شده شبیه سازی جریان آشفته بر روی یک صفحه تخت انجام خواهد شد. جهت انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلونت استفاده شده و جهت مدل‌سازی لغزش، شرط مرزی لغزش ناویر مورد استفاده قرار خواهد گرفت. روش اعمال طول لغزش مشابه با روش استفاده شده در [1] می باشد. ثابت شدن مقدار سرعت لغزش روی دیواره، تنش برشی متوسط دیواره و سرعت لحظه ای یک نقطه در مرز خروجی دامنه محاسباتی (ارتفاع $H/2$) به عنوان معیارهای همگرایی در نظر گرفته شده اند.

۳-۱- معادلات حاکم

معادله پیوستگی و ناویر- استوکس پایا و تراکم ناپذیر به صورت زیر می‌باشند [2]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (20)$$

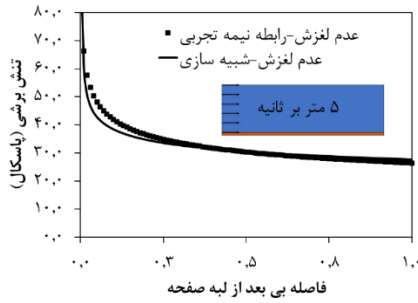
$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (21)$$

پس از اعمال متوسط گیری زمانی از معادلات (۲۰) و (۲۱) و استفاده از فرضیه بوزینسک خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (23)$$

در روابط بالا لزجت آشفتگی ν_t مجهول بوده که در اثر متوسط گیری زمانی به دست آمده و باید به کمک مدل‌های آشفتگی مدل‌سازی شود. با توجه به در نظر گرفتن اهداف تحقیقاتی آینده جهت توسعه مدل برای سطوح دارای گرادیان فشار که در آن‌ها مدل $k - \omega$ یا $k - \varepsilon$ realizable گزینه مناسب تری می باشد، در این مقاله از مدل $k - \omega$ SST استفاده شده است. هرچند برای حل جریان حول صفحه تخت (به علت عدم وجود گرادیان فشار) و در صورت استفاده صحیح از مدل‌های آشفتگی و رعایت اصول مربوط به تولید شبکه در نزدیک دیواره و یونیورسال بودن پروفیل سرعت در مجاورت دیواره پاسخ مدل‌های $k - \omega$ و $k - \varepsilon$ SST مشابه یکدیگر می باشد [3]. در این بخش جهت مدل‌سازی لزجت آشفتگی از مدل اس اس تی-کی امگا ($k - \omega$ SST) استفاده شده است. معادلات مربوط به این مدل به صورت زیر می‌باشند:



شکل ۵) مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه سازی و رابطه $1/7$ سرعت در سرعت ۵ متر بر ثانیه

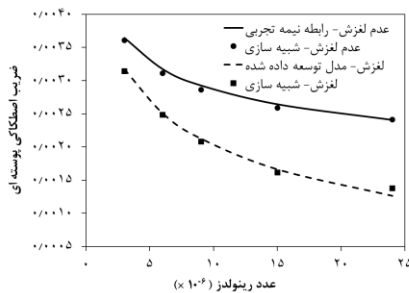
۴- نتایج و بحث

در بخش قبل روش عددی مورد استفاده مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. در ادامه به ارزیابی مدل توسعه داده شده جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز پرداخته خواهد شد.

۴-۱- اعتبارسنجی مدل محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و

کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز

جهت محاسبه مقدار افزایش سرعت یک صفحه تخت پس از اعمال لغزش، در بخش های قبل رابطه ای ارائه شد (رابطه (۱۱)). سپس به کمک رابطه به دست آمده برای سرعت لغزش و ضریب پسای مربوط حالت لغزش (رابطه (۱۵)) و مقدار نیروی پسای اصطکاکی پس از اعمال لغزش (رابطه (۱۷)) تخمین زده شد. در این بخش جهت ارزیابی مدل توسعه داده شده، شبیه سازی جریان سیال آشسته بر روی صفحه تخت دارای پوشش فوق آب گریز به کمک مدل لغزش ناویر (رابطه (۲۶)) و در سرعت های ورودی ۱، ۲، ۳ و ۵ متر بر ثانیه شبیه سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از مدل ارائه شده (روابط (۱۶)) تا (۱۷)) مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. ضریب اصطکاک پوسته ای حاصل از شبیه سازی و مدل توسعه داده شده بر پایه پروفیل $1/7$ سرعت در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین مقدار نیروی پسای اصطکاکی حاصل از شبیه سازی و مدل توسعه داده شد بر پایه پروفیل $1/7$ سرعت نیز در شکل ۷ آمده است. لازم به ذکر طول لغزش مورد استفاده در حالت کاهش پسا معادل ۵۰ میکرون در نظر گرفته شده است [4].



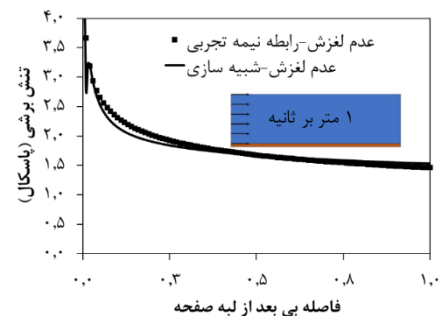
شکل ۶) مقایسه ضریب اصطکاک پوسته ای حاصل از شبیه سازی و مدل توسعه داده شده

۳-۳- اعتبارسنجی روش محاسباتی

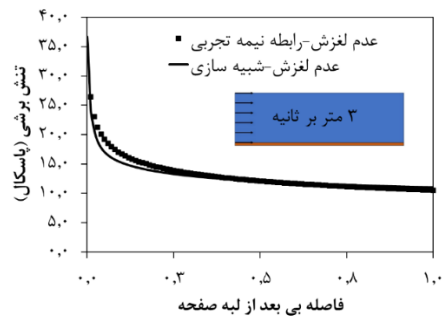
جهت اعتبار سنجی روش محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی ها، ضریب پسای متوسط جریان روی صفحه تخت با شرط عدم لغزش با نتایج حاصل از روابط نیمه تجربی (رابطه (۳)) در جدول (۱) مقایسه شده است. همان طور که از نتایج موجود در جدول (۱) مشخص است، حداکثر اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج حاصل از روابط نیمه تجربی ۲ درصد می باشد. جهت ارزیابی دقیق تر روش محاسباتی توزیع تنش حاصل از شبیه سازی و توزیع به دست آمده از رابطه نیمه تجربی $1/7$ سرعت در شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵، برای سرعت های به ترتیب ۱، ۳ و ۵ متر بر ثانیه آمده است. مقایسه نتایج نشان دهنده آن است که بنابراین تنظیمات و شبکه مورد استفاده جهت شبیه سازی جریان بدون لغزش روی صفحه تخت دقت مناسب را دارا می باشد.

جدول (۱) پارامترها و نتایج مربوط به شبیه سازی جریان روی صفحه تخت با شرط عدم لغزش

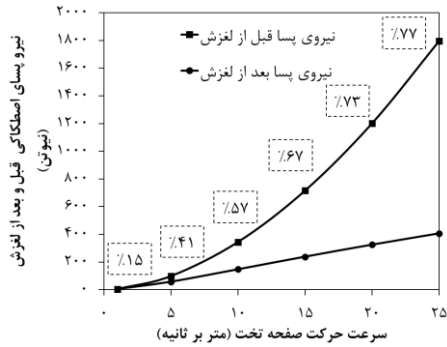
اختلاف ضریب پسای متوسط (شبیه سازی) (%)	ضریب پسای متوسط	عدد رینولدز
۱	۰/۰۰۳۶۱	3×10^6
۲	۰/۰۰۲۸۷	9×10^6
۱/۵	۰/۰۰۲۶۰	15×10^6



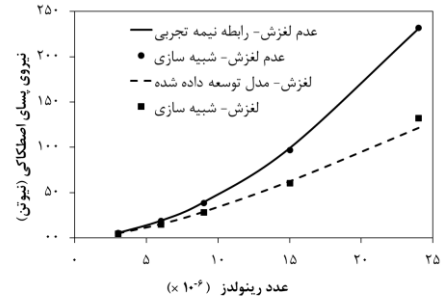
شکل ۳) مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه سازی و رابطه $1/7$ سرعت در سرعت ۱ متر بر ثانیه



شکل ۴) مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه سازی و رابطه $1/7$ سرعت در سرعت ۳ متر بر ثانیه



شکل ۹) تخمین مقدار نیروی پسی اعمال شده بر یک صفحه تخت با طول ۳ متر و طول لغزش ۵۰ میکرون قبل و بعد از اعمال لغزش به همراه درصد کاهش پسا با استفاده از مدل توسعه داده شده



شکل ۷) مقایسه نیروی پسی اصطکاکی حاصل از شبیه سازی و مدل توسعه داده شده

۳-۴- ارزیابی مقدار کاهش پسی اصطکاکی برای سطوح با طول

لغزش های مختلف به کمک شبیه سازی عددی

به توجه به اینکه مدل توسعه داده شده بر مبنای تخمین مشخصه های انتگرالی مثل سرعت جسم، ضریب اصطکاک پوسته ای و مقدار کاهش پسا می باشد، طبیعتاً دسترسی به مشخصه های دیفرانسیلی جریان مثل پروفیل سرعت نزدیک دیواره نیازمند شبیه سازی عددی می باشد. در این بخش مقدار کاهش پسی یک صفحه تخت در جریان آشفته در طول لغزش های مختلف شبیه سازی شده و مقدار کاهش پسا و پروفیل سرعت مجاور دیواره محاسبه شده است.

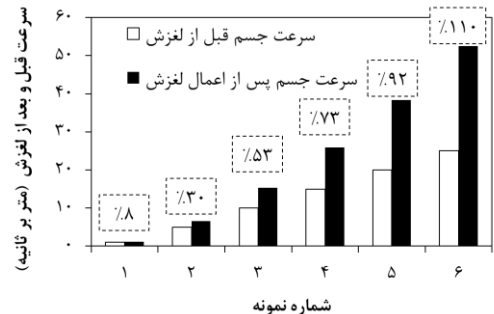
جدول ۲) پارامترها و نتایج مربوط به شبیه سازی

عدد رینولدز	طول لغزش (میکرون)	ضریب اصطکاک پوسته ای	درصد کاهش پسی اصطکاکی
3×10^6	۰	۰/۰۰۳۶۱۳	۰
3×10^6	۲۰	۰/۰۰۳۴۵۹	۴
3×10^6	۵۰	۰/۰۰۳۱۵۹	۱۳
3×10^6	۱۰۰	۰/۰۰۲۷۵۹	۲۴
9×10^6	۰	۰/۰۰۲۸۶۷	۰
9×10^6	۲۰	۰/۰۰۲۶۲	۹
9×10^6	۵۰	۰/۰۰۲۱۴۵	۲۵
9×10^6	۱۰۰	۰/۰۰۱۶۷۱	۴۲
15×10^6	۰	۰/۰۰۲۵۹۴	۰
15×10^6	۲۰	۰/۰۰۲۲۲۶	۱۴
15×10^6	۵۰	۰/۰۰۱۷۱۶	۳۴
15×10^6	۱۰۰	۰/۰۰۱۲۴۱	۵۲

۲-۴- تخمین مقدار افزایش سرعت صفحه تخت با استفاده از

پوشش فوق آب گریز با استفاده از مدل توسعه داده شده

مقدار سرعت پس از کاهش پسا و درصد کاهش پسی اصطکاکی نیز به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) آمده است. این تخمین برای یک صفحه به طول ۳ متر با طول لغزش ۵۰ میکرون و در سرعت های ۱ تا ۲۵ متر بر ثانیه انجام شده است. نتایج حاصل از مدل نشان دهنده آن است که در صورتی که پوشش فوق آب گریز طول لغزشی معادل با ۵۰ میکرون را در سرعت های ۰٫۱ و ۵ و ۲۵ متر بر ثانیه از خود نشان دهد، می توان کاهش پسی اصطکاکی به ترتیب، ۱۵، ۴۱، ۷۷ درصد را انتظار داشت (شکل ۹). مقادیر معادل با افزایش سرعت نیز برابر با ۰٫۸، ۳۰ و ۱۱۰ درصد برای سرعت های ۰٫۱، ۵ و ۲۵ متر بر ثانیه می باشند (شکل ۸). لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده در این بخش با فرض پایداری سطوح فوق آب گریز و حفظ خاصیت خود در تنش های مختلف می باشد. این در حالی است که با توجه به آنکه در سرعت های بالاتر با افزایش تنش برشی امکان افزایش بیش تر طول لغزش وجود دارد، دستیابی به کاهش پسی اصطکاکی بیش تر دور از دسترس نخواهد بود. در مقابل می توان گفت که در صورتی که پوشش فوق آب گریز در سرعت های بالا خاصیت خود را از دست دهند، کاهش مقادیر نشان داده شده و یا حتی عدم کاهش پسا دور از ذهن نخواهد بود.



شکل ۸) تخمین سرعت حرکت یک صفحه تخت با طول ۳ متر و طول لغزش ۵۰ میکرون قبل و بعد از اعمال لغزش با استفاده از مدل توسعه داده شده

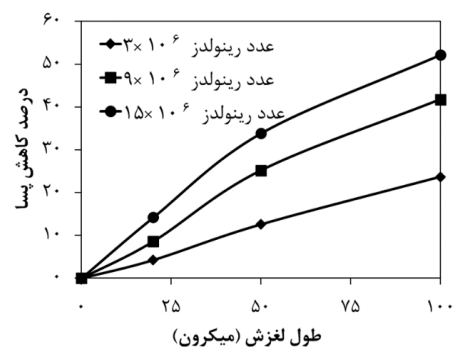
مدل ارائه شده برای ارزیابی سطوح تخت فوق آب گریز مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی این مدل برای سطوح با شکل هندسی دارای انحنا که در آن ها علاوه بر پسای اصطکاکی، پسای شکلی نیز وجود دارد می تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد. از پارامترها و ورودی های مورد نیاز این مدل طول لغزش سطوح فوق آب گریز بوده که بر اساس تجربه نویسندگان مقاله پیشنهاد می گردد که از طریق آزمایش های استاندارد جریان داخلی ارائه شده در [4] اندازه گیری شود. همچنین از محدودیت های مدل ارائه شده در شکل فعلی آن می توان به این موضوع اشاره کرد که در این مدل طول لغزش در طول صفحه تخت ثابت فرض شده است. این در حالی است که سطوح لغزش این سطوح می تواند وابسته به تنش برشی سطح بوده و در صورتی که محدوده تنش برشی روی مرز جامد تغییرات زیادی داشته باشد، طول لغزش نیز تغییرات اثرگذاری را خواهد داشت [4]. اثرات این تغییرات بر مدل ارائه شده می تواند در تحقیقات آینده به تفصیل مورد بررسی قرار گیرد.

۵- نتیجه گیری

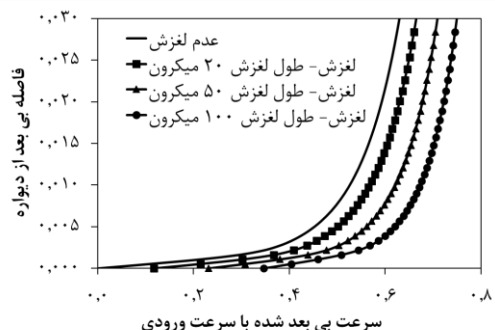
- در این مقاله مدلی جهت محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز بر اساس داده های پیشین مربوط به ضریب اصطکاک پوسته ای با شرایط مرزی متداول عدم لغزش ارائه شد و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت.
- مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از شبیه سازی جریان سیال روی صفحه تخت با طول ۳ متر و با سرعت های ورودی ۱، ۲، ۳ و ۵ متر بر ثانیه در طول لغزش ۵۰ میکرون نشان دهنده اعتبار مدل ارائه شده در تخمین ضریب اصطکاک پوسته ای و کاهش پسای صفحه تخت فوق آب گریز می باشد.
- نتایج حاصل از مدل و شبیه سازی نشان دهنده آن است که در صورتی که پوشش فوق آب گریز طول لغزشی معادل با ۵۰ میکرون را در سرعت های ۱، ۵ و ۲۵ متر بر ثانیه از خود نشان دهد، می توان کاهش پسای اصطکاکی به ترتیب، ۱۵، ۴۱ و ۷۷ درصد را انتظار داشت.
- همچنین نتایج نشان دهنده آن است که برای صفحه تخت با طول ۳ متر و طول لغزش ۵۰ میکرون با افزایش عدد رینولدز جریان (افزایش تنش برشی دیواره) در رینولدزهای 3×10^6 ، 9×10^6 و 15×10^6 مقدار کاهش اصطکاک پوسته ای افزایش یافته و به ترتیب معادل با ۱۳، ۲۵ و ۳۴ درصد خواهد بود.
- همچنین در صورت افزایش طول لغزش این سطوح، که معادل با استفاده از پوشش های با جنس های

مشخصات مربوط به شبیه سازی به همراه نتایج مربوط به کاهش پسای اصطکاکی در جدول ۲ ذکر شده است. همان طور که در این جدول مشخص است شبیه سازی ها برای سه عدد رینولدز 3×10^6 ، 9×10^6 و 15×10^6 انجام شده است. برای مدل سازی لغزش، در هرکدام از اعداد رینولدز، سه طول لغزش مختلف در نظر گرفته شده است.

نتایج مربوط به درصد کاهش پسای اصطکاکی در رینولدزهای مختلف و برای طول لغزش های مختلف در شکل ۱۰ با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که در این شکل مشخص است افزایش طول لغزش باعث افزایش مقدار کاهش پسا شده که علت آن کاهش گرادیان سرعت روی دیواره می باشد (شکل ۱۱). همچنین با افزایش عدد رینولدز مقدار درصد کاهش پسا در اعداد رینولدز بالاتر ریشه در افزایش تنش برشی دیواره دارد به شکلی که با افزایش تنش برشی دیواره سطوح فوق آبگریز موثرتر واقع خواهند شد [11]. پروفیل سرعت بی بعد شده در انتهای صفحه تخت ($x/L = 1$) در عدد رینولدز 15×10^6 و برای طول لغزش های مختلف در شکل ۱۱ آمده است. افزایش سرعت لغزش و کاهش گرادیان سرعت با افزایش طول لغزش در این شکل ها مشخص است.



شکل ۱۰) درصد کاهش پسای اصطکاکی یک صفحه تخت با طول ۳ متر در طول لغزش های مختلف و رینولدزهای 3×10^6 ، 9×10^6 و 15×10^6



شکل ۱۱) پروفیل سرعت مجاور صفحه تخت برای جریان در عدد رینولدز 15×10^6 با شرط عدم لغزش و دیواره فوق آبگریز با طول لغزش های مختلف

علایم یونانی	
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	ν
لزجت آشفتگی (m^2s^{-1})	ν_t
زیرنویس‌ها	
لغزش	<i>slip</i>
عدم لغزش	<i>noslip</i>
راستا	<i>i</i>

منابع

1- Nouri NM, Bakhsh MS, Sekhvat S. Analysis of shear rate effects on drag reduction in turbulent channel flow with superhydrophobic wall. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 2013 Dec 1;25(6):944-53.

2- Fluent AN. *Ansys fluent theory guide.* Ansys Inc., USA. 2011 Nov;15317:724-46.

3- Schetz, J.A. and R.D. Bowersox, *Boundary layer analysis.* 2011: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

4- Saadatbakhsh M, Asl SJ, Kiani MJ, Nouri NM. Slip length measurement of pdms/hydrophobic silica superhydrophobic coating for drag reduction application. *Surface and Coatings Technology.* 2020 Dec 25;404:126428.

5- Feng L, Li S, Li Y, Li H, Zhang L, Zhai J, Song Y, Liu B, Jiang L, Zhu D. Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial. *Advanced materials.* 2002 Dec 17;14(24):1857-60.

6- Tian H, Zhang J, Jiang N, Yao Z. Effect of hierarchical structured superhydrophobic surfaces on coherent structures in turbulent channel flow. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2015 Dec 1;69:27-37.

7- Bhushan B, Jung YC. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science.* 2011 Jan 1;56(1):1-08.

8- Kiani MJ, Dehghan A, Saadatbakhsh M, Asl SJ, Nouri NM, Pishbin E. Robotic digital microfluidics: a droplet-based total analysis system. *Lab on a Chip.* 2023;23(4):748-60.

9- Guan N, Liu Z, Jiang G, Zhang C, Ding N. Experimental and theoretical investigations on the flow resistance reduction and slip flow in superhydrophobic micro tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2015 Dec 1;69:45-57.

10- Martell MB, Rothstein JP, Perot JB. An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation. *Physics of Fluids.* 2010 Jun 1;22(6).

11- Saadat-Bakhsh M, Nouri NM, Norouzi H. On the mechanism of drag reduction in fully-developed turbulent channel flow with a streamwise micro-featured superhydrophobic wall. *Journal of Applied Fluid Mechanics.* 2017 Sep 1;10(5):1363-74.

12- Ming Z, Jian L, Chunxia W, Xiaokang Z, Lan C. Fluid drag reduction on superhydrophobic surfaces coated

مختلف می باشد، مقدار کاهش پسا نیز افزایش خواهد یافت به طوری که مقدار کاهش پسای یک صفحه تخت با طول ۳ متر در عدد رینولدز 10×10^1 از مقدار ۱۴ درصد برای طول لغزش ۲۰ میکرون به کاهش پسای ۵۲ درصدی در طول لغزش ۱۰۰ میکرون تغییر خواهد کرد.

- ارزیابی این مدل برای سطوح با شکل هندسی دارای انحنا که در آن ها علاوه بر پسای اصطکاکی، پسای شکلی نیز وجود دارد می تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با سازمانها و اشخاص دیگر ندارد.

فهرست علائم

علایم لاتین	
طول لغزش (m)	<i>b</i>
سرعت جریان بینهایت عبوری از روی صفحه تخت (ms^{-1})	<i>V</i>
طول صفحه تخت (m)	<i>L</i>
ارتفاع محدوده محاسباتی	<i>H</i>
عدد رینولدز جریان عبوری از روی صفحه تخت در موقعیت <i>x</i>	$Re_x = \rho Ux / \mu$
تنش برشی روی صفحه تخت در موقعیت <i>x</i>	$\tau_{WALL}(x)$
تنش برشی متوسط روی صفحه تخت در موقعیت <i>x</i>	τ_{WALL}
ضریب اصطکاک پوسته ای رو صفحه تخت در موقعیت <i>x</i>	$C_f(x)$
ضریب اصطکاک متوسط صفحه تخت	C_D
سرعت لغزش سیال روی مرز جامد (ms^{-1})	$\frac{Uslip(x)}{\mu} = \frac{\tau_{WALL}(x)}{\mu}$
متوسط سرعت لغزش سیال روی مرز جامد (ms^{-1})	<i>Uslip</i>
نیروی پیشران	<i>Trust</i>
نیروی پسا	<i>Drag</i>
سطح مقطع صفحه تخت	<i>A</i>
گردایان سرعت عمود بر دیواره (s^{-1})	$\partial u / \partial y$
فاصله طولی اندازه‌گیری افت فشار (m)	Δx
سرعت سیال روی مرز جامد (ms^{-1})	<i>u</i>
فشار سیال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	<i>p</i>

- 27- McHale G, Shirtcliffe NJ, Evans CR, Newton MI. Terminal velocity and drag reduction measurements on superhydrophobic spheres. *Applied Physics Letters*. 2009 Feb 9;94(6).
- 28- Munson BR, Rothmayer AP, Okiishi TH. *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley Global Education; 2012 Apr 23.
- with carbon nanotube forests (CNTs). *Soft Matter*. 2011;7(9):4391-6.
- 13- Srinivasan S, Kleingartner JA, Gilbert JB, Cohen RE, Milne AJ, McKinley GH. Sustainable drag reduction in turbulent Taylor-Couette flows by depositing sprayable superhydrophobic surfaces. *Physical review letters*. 2015 Jan 9;114(1):014501.
- 14- Lee C, Kim CJ. Underwater Restoration and Retention of Gases on Superhydrophobic Surfaces for Drag Reduction. *Physical review letters*. 2011 Jan 7;106(1):014502.
- 15- Nouri NM, Shamsi M, Saadat Bakhsh M. Hydrophobic coating of aluminum flake particles and application of these particles to produce superhydrophobic surfaces. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Jun 10;16(4):289-96.
- 16- Ansari A, Saadatbakhsh M, Sohrabi M, Asl SJ, Nouri NM. Antifouling activity of superhydrophobic PDMS/hydrophobic silica coating. *Surface Engineering*. 2023 Jan 2;39(1):35-48.
- 17- Saadat-Bakhsh M, Ahadian HR, Nouri NM. Facile, robust and large-scale fabrication method of mechanically durable superhydrophobic PDMS/aerogel coating on fibrous substrates. *Cellulose*. 2017 Aug;24:3453-67.
- 18- MOHAMMAD NN, SAADAT BM, Bagheri R. ROBUST SUPER HYDROPHOBIC SURFACE WITH POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE), MICRO SIZED ALUMINUM PARTICLES AND SIO₂ NANOPARTICLES.
- 19- Nouri NM, Saadat-Bakhsh M. Fabrication method of large-scale and mechanically durable superhydrophobic silicon rubber/aerogel coating on fibrous substrates. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017 Mar;14:477-88.
- 20- Jung YC, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2009 Dec 21;22(3):035104.
- 21- Aljallis E, Sarshar MA, Datla R, Sikka V, Jones A, Choi CH. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow. *Physics of fluids*. 2013 Feb 1;25(2).
- 22- Park H, Sun G. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014 May;747:722-34.
- 23- Muralidhar P, Ferrer N, Daniello R, Rothstein JP. Influence of slip on the flow past superhydrophobic circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011 Aug;680:459-76.
- 24- Ou J, Perot B, Rothstein JP. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Physics of fluids*. 2004 Dec 1;16(12):4635-43.
- 25- Choi CH, Ulmanella U, Kim J, Ho CM, Kim CJ. Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels. *Physics of fluids*. 2006 Aug 1;18(8).
- 26- Park H, Park H, Kim J. A numerical study of the effects of superhydrophobic surface on skin-friction drag in turbulent channel flow. *Physics of Fluids*. 2013 Nov 1;25(11).