

Original Research Paper

Numerical Study of Drag Reduction Mechanism on Surfaces with Transverse Triangular Microstructures

Mohammad Javad Kahalian, Ramin Kamali Moghadam*, and Iman Bahman Jahromi

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 17 August 2024

Revised 12 November 2024

Accepted 29 December 2024

Available Online 29 December 2024

Keywords:Microstructure
Drag reduction
Transverse flow
Numerical simulation**ABSTRACT**

One of the important passive techniques to reduce the drag force is the use of microstructured surfaces. The structures of these surfaces, which are from the order of nanometers to several hundred micrometers, can be created randomly or in a regular and controlled manner, with different geometries and configurations on the surface, and by affecting the fluid flow, they can change the amount of drag. With the aim of studying the physics governing microstructures, this article will investigate the parameters resulting from air flow passing them, which include drag components, velocity profiles and shear stress. For this purpose, triangular microstructures with the same base and height of 50, 100, 200, 400 and 800 μm have been used, which are transversely exposed to air flow with velocity of 5 m/s and 25 m/s. Due to the emphasis of some articles on the flow slipping over the microstructures, the velocity profiles on these surfaces have been investigated, but finally, the change in the amount and direction of the shear stress has been described as the main mechanism of viscous drag reduction. Then, the effect of the size of the structures and the velocity of the flow has been investigated. The obtained results show that the trapped vortices among the transverse structures can reduce the viscous drag by reducing the amount of shear stress around the peaks and reversing its direction in the valleys. On the other hand, creating a pressure gradient inside and around the structures will lead to creating pressure drag. The sum of these two drag components, which depend on the size of the microstructures and the flow velocity, will finally determine the increase or decrease of the total drag.

*Corresponding Author's E-mail: rkamali@ari.ac.ir**How to Cite this Article:**M. J. Kahalian, R. Kamali Moghadam, and I. Bahman Jahromi, "Numerical study of drag reduction mechanism on surfaces with transverse triangular microstructures," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 24-37, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1498>.**COPYRIGHTS**© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مطالعه عددی مکانیزم کاهش پسا در سطوحی با ریزساختارهای مثلی عرضی

محمد جواد کحالیان^۱، رامین کمالی مقدم^{۲*} و ایمان بهمن جهرمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۳- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های غیرفعال در زمینه کاهش نیروی پسا، استفاده از سطوح ریزساختار می‌باشد. ساختارهای این سطوح که از مرتبه نانومتر تا چند صد میکرومتر می‌باشند می‌توانند به صورت تصادفی و یا به شکل منظم و کنترل شده، با هندسه و چیدمان مختلف بر روی سطح ایجاد شوند و با تاثیر بر جریان گذرنده، پسای تولیدی را دستخوش تغییر قرار دهند. این مقاله با هدف مطالعه فیزیک حاکم بر سطوح ریزساختار، به بررسی پارامترهای حاصل از عبور جریان هوا از روی آن‌ها می‌پردازد که از جمله این پارامترها می‌توان به مولفه‌های پسا، پروفیل‌های سرعت و تنش برشی اشاره نمود. به این منظور از ریزساختارهای مثلی با قاعده و ارتفاعی یکسان و برابر با ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر استفاده شده است که به صورت عرضی در معرض جریانی با سرعت 5 m/s و 25 m/s قرار گرفته‌اند. این ریزساختارها بر روی صفحه‌ای به طول 60 mm ایجاد شده‌اند که برای انجام مقایسه دقیق تر، 10 mm از ابتدا و انتهای صفحه در مقایسه‌ها لحاظ نگردیده است. با توجه به تاکید برخی مقالات بر لغزش جریان از روی ریزساختارها، پروفیل‌های سرعت بر روی این سطوح بررسی شده است اما در نهایت تغییر در مقدار و جهت تنش برشی به عنوان مکانیزم اصلی کاهش پسای اصطکاکی تشریح گردیده و اثر ابعاد و سرعت جریان بر آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که گردابه‌های مجبوس در میان ساختارهای عرضی این سطوح می‌توانند با کاهش مقدار تنش برشی در اطراف قله‌ها و نیز تغییر جهت آن در دره‌ها منجر به کاهش پسای اصطکاکی گردند. از سوی دیگر ایجاد اختلاف فشار در داخل و اطراف ساختارها منجر به ایجاد پسای فشاری خواهد شد. برآیند این دو مولفه پسا که به ابعاد ریزساختارها و نیز سرعت جریان وابسته‌اند، نهایتاً مقدار افزایش و یا کاهش پسای کل را تعیین خواهد کرد.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ مرداد ۱۴۰۳
بازنگری ۲۲ آبان ۱۴۰۳
پذیرش ۰۹ دی ۱۴۰۳
اولین انتشار ۰۹ دی ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

ریزساختار
کاهش پسا
جریان عرضی
شبیه‌سازی عددی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rkamali@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

M. J. Kahalian, R. Kamali Moghadam, and I. Bahman Jahromi, "Numerical study of drag reduction mechanism on surfaces with transverse triangular microstructures." *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 24-37, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1498>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



علائم و اختصارات

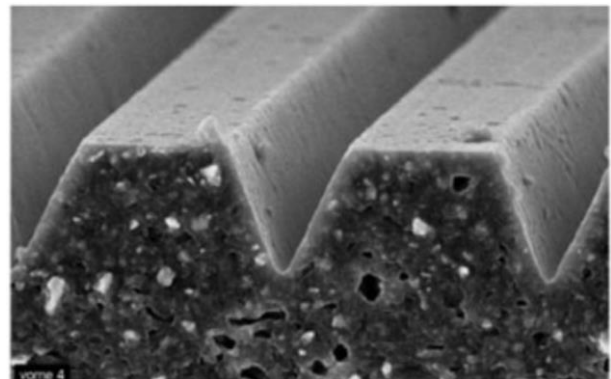
C_D	ضریب پسا
h	ارتفاع ریزساختارها
s	طول گام / قاعده ریزساختارها
RANS	معادلات نویر استوکس متوسط‌گیری شده در زمان
τ_x	مولفه تنش برشی در جهت X

مقدمه

مدیریت نیروی پسا از ابتدایی‌ترین مسائل پیش روی طراحان حوزه سیالات می‌باشد. در موارد معدودی مانند بازگشت کپسول‌های زیستی به جو، افزایش نیروی پسا مطلوب است، اما از آنجا که این نیرو نقش مهمی در اتلاف انرژی ایفا می‌کند، در طیف وسیعی از کاربردها تلاش‌ها در جهت کاهش نیروی پسا صورت می‌گیرد.

بسیاری از روش‌های کاهنده نیروی پسا مبتنی بر تکنیک‌های غیرفعال می‌باشند که عموماً بر اساس توجه به خواص سطوح شکل گرفته‌اند [۱]. این خواص شامل هندسه [۲]، زبری [۳، ۴]، جنس [۵] و غیره می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های مطرح شده در این زمینه، استفاده از سطوح ریزساختار است که می‌تواند منجر به کاهش پسای اصطکاکی گردد [۶].

سطوح ریزساختار، سطوحی هستند که دارای ساختارهایی از مرتبه نانومتر تا چند صد میکرومتر می‌باشند. این ساختارها می‌توانند به‌صورت تصادفی و یا به شکل منظم و کنترل شده، با هندسه و چیدمان مختلف بر روی سطح ایجاد شوند. عملکرد سطوح ریزساختار در مدیریت نیروی پسا تا حد زیادی به متغیرهای طراحی، از جمله پروفیل سطح مقطع، ابعاد و چیدمان ساختارها بر روی سطح بستگی دارد. شکل ۱ سطحی با ریزساختارهای دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد.

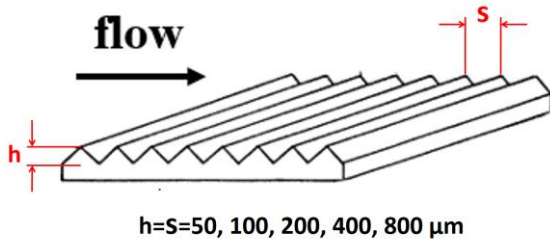


شکل ۱- سطحی با ریزساختارهای دوزنقه‌ای [۵].

Fig. 1. Surface with trapezoidal microstructures [5].

والش [۱۰-۷] پیش‌گام مطالعه در مورد کاهش پسا توسط سطوح دارای ریبلت بوده است. او رفتار متفاوت سطوح تیغه‌ای، صدفی و مثلثی را بررسی نمود و نشان داد که ساختار متقارن V شکل بهترین اثر را در کاهش پسا دارد. لوچینی و همکاران [۱۱] از روش المان مرزی برای محاسبه گردابه لزوج روی سطح شیاردار استفاده کردند. این محاسبه برای تحلیل ساختار گردابه در ناحیه دیوار و کشف مکانیزم کاهش پسا مورد استفاده قرار گرفت. بچرت و همکاران [۱۲] خصوصیات آشفتگی شیار مستطیل شکل را مورد مطالعه قرار دادند که منجر به کاهش ۹/۹ درصدی پسا شد. سمنی و همکاران [۱۳] ساختار شیار مستطیل شکل را مطالعه نمودند. ساساموری و همکاران [۱۴] بر روی یک سطح ریبلت سینوسی تمرکز کردند و دریافتند که این ساختار نیز می‌تواند تا ۹/۸ درصد کاهش پسا ایجاد کند. بچرت و همکاران [۱۵، ۱۲] به بررسی عمیق‌تر پیکربندی‌های مختلف ریبلت‌های تیغه‌ای، صدفی و نیز ریبلت‌های مشابه پوست کوسه پرداختند. همچنین آن‌ها یک تحقیق تجربی در مورد روش‌های کاهش اصطکاک با استفاده از سطوح دارای ریبلت انجام دادند. اگرچه میکروشیارهای مختلف اثر کاهش پسای مشخصی دارند، استفاده از شیارهای V شکل به دلیل ساختار ساده و استحکام خوب مطلوب‌تر است [۱۶]. جندی و آنتونیا [۱۷] اثر کاهش پسای شیار V شکل را از طریق آزمایش‌ها اندازه‌گیری نمودند و دریافتند که اثر کاهش پسا با فاصله قله به قله مرتبط است. رتوف‌پناه و همکاران [۱۹، ۱۸] به‌صورت عددی کاهش نیروی پسا را در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده نموده و با مطالعه هندسه‌های مختلف، ۱۰/۷ درصد کاهش برای پسا ثبت نمودند. همچنین صالحی و همکاران [۲۱، ۲۰] با استفاده از ریبلت‌های موازی با جریان بر روی سکان کشتی با مقطع NACA0025، کاهش پسای اصطکاکی را مطالعه نمودند. دبیسچاپ و نیوستاد [۲۲] به‌صورت تجربی اثر شیار را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که در حضور یک گرادیان فشار معکوس، نرخ کاهش پسای ۱۳ درصدی حاصل می‌شود. دوان و چوداری [۲۳] با شبیه‌سازی عددی مستقیم دریافتند که مکانیزم کاهش پسای شیار برای لایه مرزی تراکم‌ناپذیر سرعت بالا نیز موثر است. گارسیا مایورال و جیمنز [۲۴] تاثیر شیار را بر وضعیت جریان تحلیل کردند و دریافتند که اندازه آن رابطه مشخصی با اثر کاهش پسا دارد. چو و کارنیاداکیس [۲۵] اثر کاهش پسای شیارهای عرضی را تحت اعداد رینولدز مختلف مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که کاهش پسا زمانی بیشتر است که عدد رینولدز بزرگتر باشد. ژانگ و چه [۲۶] دریافتند که شدت آشفتگی در ناحیه نزدیک به دیوار به‌طور قابل توجهی کمتر از سطح صاف است. آن‌ها اعتقاد داشتند که این موضوع به دلیل تضعیف تعداد و شدت گردابه‌های جریان می‌باشد. احمدی و همکاران [۲۷] با اندازه‌گیری‌های تجربی، اثر سطح شیار بر آشفتگی را بررسی کردند و دریافتند که اثر شیار منجر به افزایش ضخامت لایه مرزی می‌شود. وانگ و همکاران [۲۸] یک مطالعه مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی و آزمایش بر روی شیارهای عرضی انجام

یکسان و برابر با ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر استفاده شده است. این ساختارها به صورت عرضی در معرض جریان هوا با سرعت ۵ m/s و ۲۵ m/s قرار گرفته و درصد تغییر پسای آن‌ها نسبت به سطح صاف محاسبه گردیده است. در نهایت سازوکار تغییر مولفه‌های پسا مطالعه و اثر ابعاد و سرعت‌های مختلف بررسی گردیده است. شکل ۲ ابعاد ریزساختارهای مورد مطالعه و جهت جریان عبوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ابعاد ریزساختارهای عرضی بررسی شده.

Fig. 2. The size of the investigated transverse microgrooves.

جدول ۱ ارتفاع ریزساختارها را بر اساس عدد بی بعد y^+ نشان می‌دهد. این مقادیر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردیده‌اند که u_τ سرعت اصطکاکی و ν لزجت سینماتیکی می‌باشد.

$$y^+ = h \frac{u_\tau}{\nu} \quad (1)$$

جدول ۱- ارتفاع ریزساختارها بر اساس y^+ .

Table 1. Height of microstructures based on y^+ .

h (μm)	y^+ (u=5 m/s)	y^+ (u=25 m/s)
50	≈ 0.6	≈ 2.2
100	≈ 1.2	≈ 4.4
200	≈ 2.1	≈ 8.9
400	≈ 4.2	≈ 18.6
800	≈ 8.8	≈ 40.4

ارتفاع زیرلایه لزج در لایه مرزی یک صفحه صاف را می‌توان به طور تقریبی برابر با $y^+ = 5$ دانست. همچنین در مراجع مختلف ارتفاع لایه بافر از $y^+ = 30$ تا $y^+ = 60$ ذکر گردیده است [۳۱]. از این رو با توجه جدول ۱، ساختارهای به کار رفته در این مقاله در مقایسه با لایه مرزی یک صفحه صاف در زیرلایه لزج و یا لایه بافر قرار خواهند گرفت.

معادلات حاکم

عدد نادسن معیاری برای پیوستگی جریان می‌باشد که می‌توان آن را از رابطه ۲ محاسبه نمود [۳۲].

دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که یک ساختار گردابه‌ای در داخل شیارهای عرضی به وجود می‌آید. سواتردی و ویدودو [۲۹] با انجام آزمایش تاثیر ساختار شیار را بر ناحیه زیر لایه آرام بررسی کردند و دریافتند که طیف انرژی آشفته صفحه شیاردار به طور قابل توجهی کمتر از سطح صاف است. لی و لی [۳۰] با استفاده از تکنیک‌های تجسم جریان به مطالعه گردابه‌های عرضی در بالای سطوح صاف و نیمه دایره‌ای پرداختند. آن‌ها نحوه رفتار گردابه‌ها را در شرایط کاهش و افزایش پسا، و نیز اثر فاصله بین ریلته‌ها را ثبت نمودند و مشاهده کردند که اگر بیشتر گردابه‌های در جهت جریان در بالای ریلته‌ها باقی بمانند، جریان بالای دره ریلته به اندازه کافی آرام خواهد بود و پسا کاهش می‌یابد. اما اگر فاصله ریلته‌ها به اندازه‌ای بزرگ باشد که اکثر گردابه‌های در جهت جریان در داخل دره ریلته بمانند (جریان‌های با سرعت بالا می‌توانند به دره‌های ریلته نفوذ کنند) پسا افزایش خواهد یافت.

این مقاله با هدف مطالعه فیزیک حاکم بر سطوح ریزساختار، به بررسی و مقایسه پارامترهای حاصل از عبور جریان هوا از روی آن‌ها می‌پردازد که از جمله این پارامترها می‌توان به مولفه‌های پسا، پروفیل‌های سرعت و تنش برشی اشاره نمود. مقالاتی که میکروساختارهای عرضی را مورد مطالعه قرار داده‌اند، عمدتاً از لغزش پروفیل سرعت در بالای ساختارها و یا کاهش مولفه پسای اصطکاکی سخن به میان آورده‌اند. در این مقاله با ترسیم و محاسبه سطح بین نمودار تنش برشی، علاوه بر کاهش مقدار تنش در اطراف قله، منفی شدن مقدار پسای اصطکاکی در دره نیز به عنوان عامل کاهش پسای کل معرفی گردیده است. از سوی دیگر مرور مقالات این حوزه نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده بر روی فیزیک و پارامترهای ریزساختارها به جمع‌بندی کلی نرسیده است و این زمینه همچنان نیازمند تولید داده است، چنانکه تغییر ساختار هندسی و پارامترهای آن، می‌تواند فیزیک جدیدی را بر مساله حاکم نماید؛ از این رو مطالعه پارامتری بر روی ساختارهایی با نسبت منطری یکسان و با ابعاد مختلف دستاورد دیگر این مقاله می‌باشد. به این منظور از ریزساختارهای مثلثی با ابعاد مختلف و با قاعده و ارتفاعی یکسان استفاده شده است که به صورت عرضی در معرض جریانی با سرعت ۵ m/s و ۲۵ m/s قرار گرفته‌اند. در ادامه تاثیر استفاده از سطوح ریزساختار بر پسای فشاری مطالعه شده و در آخر به منظور بررسی اثربخشی سطوح ریزساختار در کاهش پسای کل، برآیند مولفه اصطکاکی و فشاری پسا برای آن‌ها محاسبه و نتیجه حاصل با پسای مربوط به یک صفحه صاف در شرایط مشابه مقایسه گردیده است.

تعریف مسئله

پژوهش حاضر به مطالعه اثر استفاده از ریزساختارهای مثلثی بر مقدار پسا می‌پردازد و نتایج حاصل را برای ابعاد و سرعت‌های مختلف مورد مقایسه قرار می‌دهد. به این منظور از ریزساختارهای مثلثی با قاعده و ارتفاعی

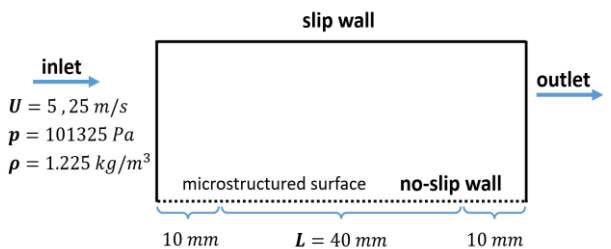
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i\rho\omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_\omega \frac{\partial}{\partial x_j}\omega\right) + P_\omega - \beta\rho\omega^2 + 2\rho(1-F_1)\frac{1}{\omega}\frac{1}{\sigma_{\omega,2}}\frac{\partial}{\partial x_j}k\frac{\partial}{\partial x_j}\omega \quad (7)$$

$$F_2 = \tanh\left[\left[\text{MAX}\left(2\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega(d_\perp)}, \frac{500\mu}{\rho\omega(d_\perp)^2}\right)\right]^2\right] \quad (8)$$

در روابط فوق μ_k و μ_ω لزجت‌های موثر، \bar{P}_k نرخ موثر تولید k ، P_ω نرخ تولید ω ، d_\perp فاصله تا نزدیک‌ترین دیوار، β و β^* و $\sigma_{\omega,2}$ ثابت‌های مدل‌سازی آشفتگی و نهایتاً F_1 تابع ترکیب می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار Ansys Fluent برای حل عددی معادلات فوق استفاده گردیده است.

دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ریزساختارهای نشان داده شده در شکل ۲ بر روی صفحه‌ای به طول ۶۰ mm قرار گرفته است. به منظور حذف اثر شرایط مرزی و انجام مقایسه دقیق‌تر، پسای ۱۰ mm از ابتدا و انتهای صفحه در مقایسه لحاظ نگردیده است و نتایج بیان شده مربوط به طول $L=40$ mm می‌باشد. شکل ۳ دامنه حل و شرایط مرزی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل عددی.

Fig. 3. Computational domain and boundary conditions of numerical solution.

در مقاله حاضر از نرم‌افزار Ansys Meshing برای تولید شبکه استفاده شده است. این شبکه از نوع باسازمان می‌باشد و برای ابعاد مختلف ریزساختارها تقریباً ثابت است. اندازه این شبکه در راستای دیوار برابر با μm ۵ می‌باشد. در راستای عمود بر دیوار نیز ارتفاع اولین سلول مجاور دیوار در پایین‌ترین نقطه شیار μm ۵ می‌باشد و ارتفاع سلول‌های بالاتر با نرخ رشد حدود ۱/۰۵ محاسبه می‌شوند. شبکه تولید شده برای ساختارهای ۱۰۰ میکرومتری در شکل ۴ نمایش داده شده است.

$$Kn = \sqrt{\frac{\pi\gamma}{2}} \frac{Ma}{Re} \quad (2)$$

در این رابطه γ نسبت گرمای ویژه، Ma عدد ماخ و Re عدد رینولدز را نشان می‌دهد. بر اساس ابعاد ریزساختارها، بیشینه مقدار عدد نادسن در پژوهش حاضر برابر با $Kn \approx 1.3 \times 10^{-3}$ می‌باشد؛ در نتیجه با توجه به محدوده کاربرد معادلات نویر استوکس $Kn \leq 10^{-1}$ [۲۳]، می‌توان در این پژوهش از این معادلات استفاده نمود.

لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، کم‌ترین مقدار عدد رینولدز جریان ورودی به کانال برابر با 2×10^4 می‌باشد. از سوی دیگر عامل اصلی کاهش پسا در ریزساختارهای عرضی، ایجاد گردابه در بین ساختارها است که باعث به وجود آمدن آشفتگی موضعی می‌گردد. از این رو با استفاده از شبکه مناسب، روش‌های RANS قادر به مشاهده گردابه‌های موضعی و اثرات آن‌ها می‌باشند که به‌عنوان مثال مراجع [۲۱] و [۲۴-۲۷] نیز از این روش‌ها بهره برده‌اند. با توجه به استفاده از رهیافت RANS، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت به ترتیب عبارتند از [۳۸]:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

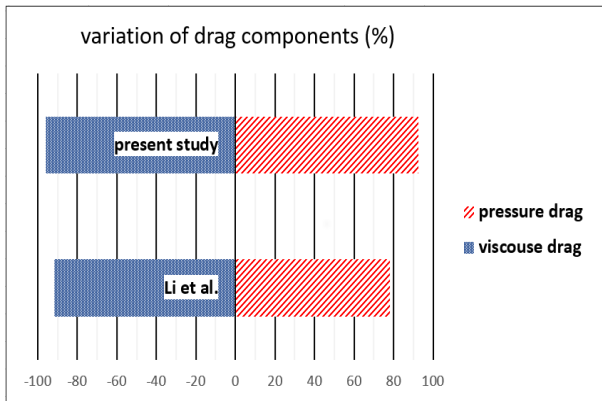
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (4)$$

که u_i مولفه‌های متوسط بردار سرعت، x_i مولفه‌های فضا، P فشار متوسط، k انرژی جنبشی آشفتگی، δ_{ij} دلتای کرونکر، μ لزجت دینامیکی و μ_t لزجت آشفتگی می‌باشد. توسط مدل‌های آشفتگی محاسبه می‌گردد که در مسئله حاضر از مدل $k-\omega$ SST برای محاسبه آن استفاده شده است. مطابق این مدل، لزجت آشفتگی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید [۳۹، ۴۰]:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\text{MAX}\left(a_1 \omega, \sqrt{2S_t F_2}\right)} \quad (5)$$

در این معادله a_1 عدد ثابت، ω نرخ اتلاف آشفتگی ویژه و S_t بزرگی نرخ کرنش می‌باشد. k ، ω و F_2 نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

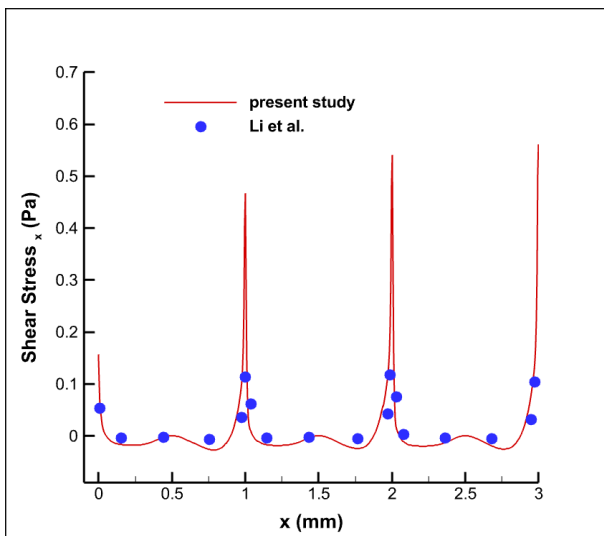
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_k \frac{\partial}{\partial x_j} k \right) + \bar{P}_k - \beta^* \rho \omega k \quad (6)$$



شکل ۶- میزان تغییر مولفه‌های پسای سطح شیاردار نسبت به سطح صاف.

Fig. 6. The amount of variation in the drag components of the grooved surface compared to the smooth surface.

در شکل ۷ نمودار تنش برشی سطح شیاردار در راستای جریان ارائه گردیده است. این نمودار معیار دیگری است که بر اساس آن می‌توان صحت حل را نتیجه گرفت.

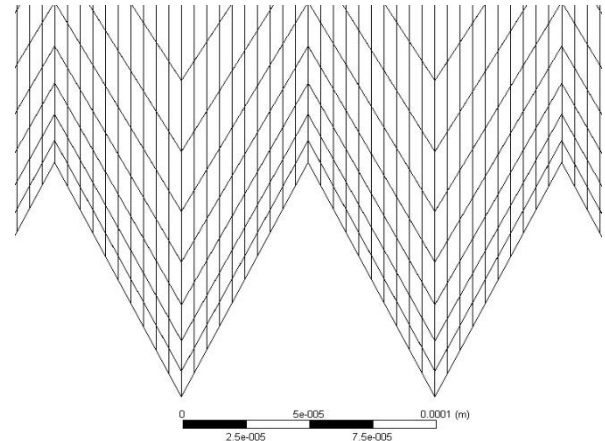


شکل ۷- تنش برشی سطح شیاردار در جهت x.

Fig. 7. Shear stress of grooved surface in x direction.

مقالاتی که به حل عددی جریان عبوری از روی ریزساختارها پرداخته‌اند، از شبکه‌های متفاوتی استفاده نموده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به شبکه‌های باسازمان [۳۶] و [۴۱-۴۵] و شبکه مثلثی بدون لایه مرزی [۴۶، ۳۴، ۱۸] اشاره نمود.

در این پژوهش به منظور انتخاب نوع شبکه و ابعاد مناسب آن، شبکه‌های مختلفی بر روی سطح شیاردار مسئله فوق (شکل ۵) اعمال گردید که نهایتاً با توجه به شکل ۸ از شبکه با سازمان استفاده شد. مشخصات این شبکه در توضیحات شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- شبکه باسازمان استفاده شده در شبیه‌سازی ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری.

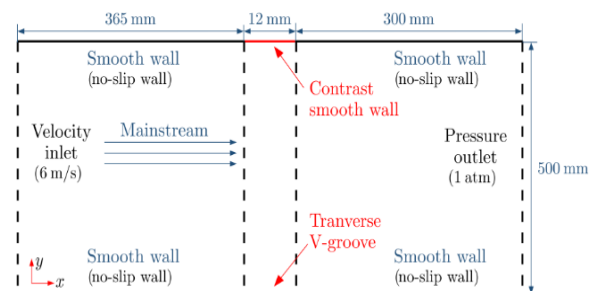
Fig. 4. Structured mesh used in the simulation of microstructures with $h=s=100 \mu\text{m}$.

نتایج

در این بخش ابتدا روش حل عددی مورد اعتبارسنجی قرار خواهد گرفت. در ادامه سازوکار تغییر مولفه‌های پسا بیان و تاثیر ابعاد ریزساختارها و سرعت جریان بر آن‌ها بررسی می‌گردد. در انتها با محاسبه برآیند تغییرات مولفه‌های پسا، اثر ریزساختارها بر مقدار پسای کل محاسبه گردیده و مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی روش حل، پسای ناشی از عبور جریان از روی شیارهای مثلثی با $h=500 \mu\text{m}$ و $s=1 \text{ mm}$ مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه محاسباتی و شرایط مسئله در شکل ۵ آمده است.



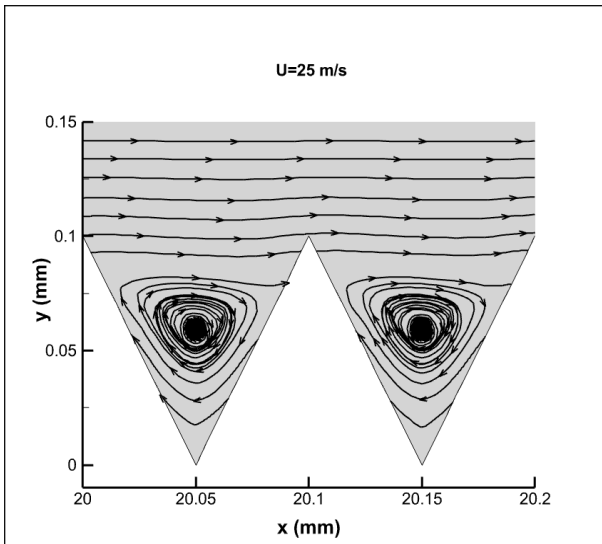
شکل ۵- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی استفاده شده در اعتبارسنجی [۴۱].

Figure 5. Computational domain and boundary conditions used in validation [41].

در این مسئله درصد تغییر مولفه‌های پسای سطح شیاردار نسبت به سطح صاف محاسبه گردیده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، استفاده از سطح شیاردار منجر به کاهش ۹۶/۱ درصدی پسای اصطلاکی و افزایش ۹۲/۷ درصدی پسای فشاری گردیده است که درصد تغییر به دست آمده برای این دو مولفه با دقت خوبی از نتایج مرجع [۴۱] پیروی می‌نماید.

سازوکار کاهش پسای اصطکاکی در سطوح ریزساختار

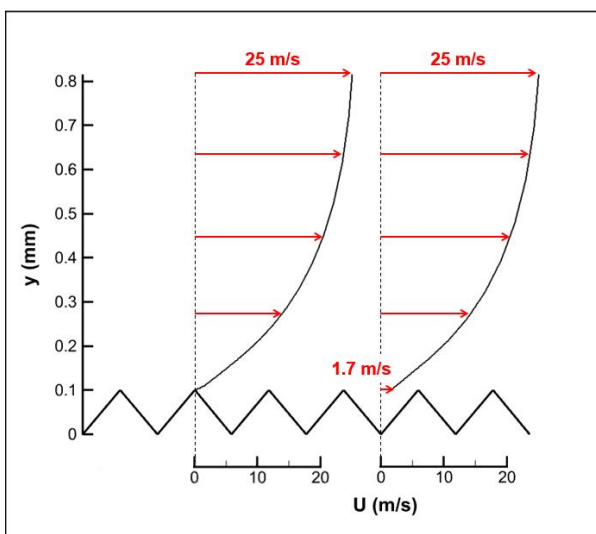
شکل ۱۰ خطوط جریان عبوری با سرعت ۲۵ m/s از روی ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- خطوط جریان در داخل ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری.

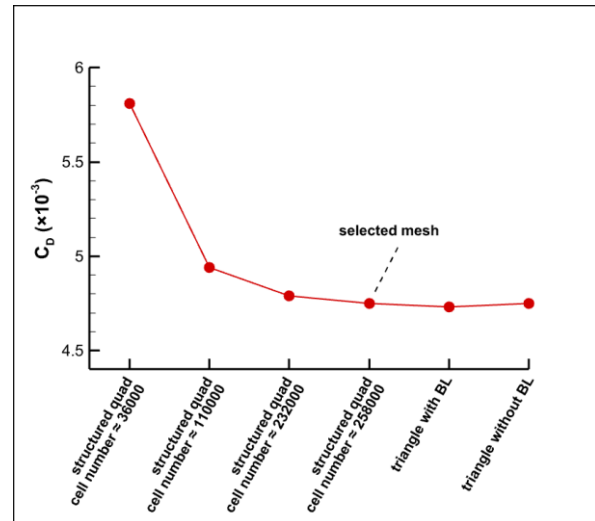
Fig. 10. Streamlines inside the microstructures with $h=s=100 \mu\text{m}$.

تشکیل گردابه در داخل ریزساختار باعث لغزش جریان عبوری از روی گردابه‌ها می‌گردد که این موضوع را می‌توان با مقایسه پروفیل‌های سرعت در شکل ۱۱ مشاهده نمود. مطابق این شکل سرعت لغزش جریان از روی گردابه‌های موجود در شکل ۱۰، $1/7 \text{ m/s}$ می‌باشد.



شکل ۱۱- پروفیل‌های سرعت بر روی ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری.

Fig. 11. Velocity profiles on the top of microstructures with $h=s=100 \mu\text{m}$.

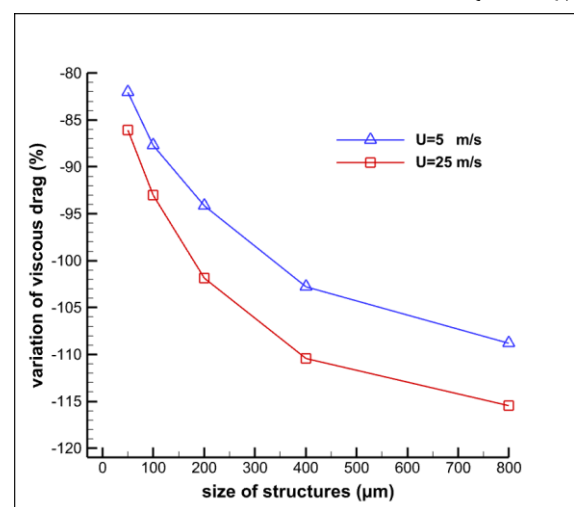


شکل ۸- مقایسه ضریب پسا، به‌منظور بررسی استقلال حل از شبکه.

Fig. 8. Comparison of the drag coefficient, in order to investigate the independence of the solution from the grid.

تاثیر سطوح ریزساختار بر مقدار پسای اصطکاکی

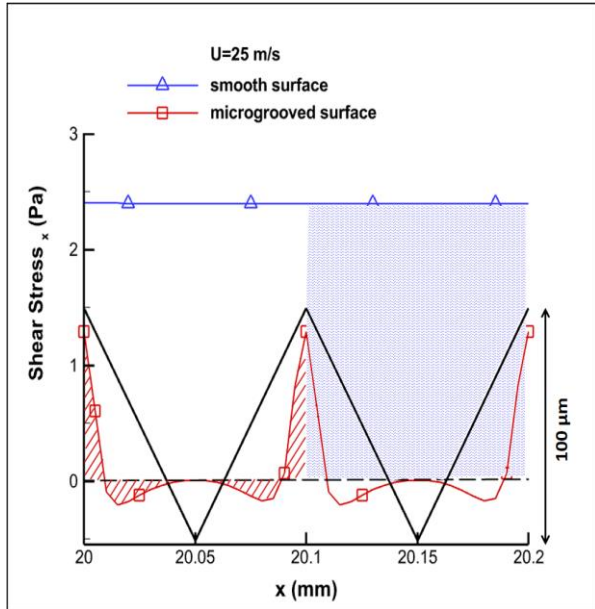
شکل ۹ درصد تغییر پسای اصطکاکی ریزساختارهای عرضی مختلف را نسبت به یک صفحه صاف و در شرایط یکسان نشان می‌دهد. مطابق این شکل استفاده از سطوح ریزساختار منجر به کاهش پسای اصطکاکی گردیده است که میزان این کاهش در سرعت ۲۵ m/s و نیز در ساختارهای بزرگ‌تر بیشتر می‌باشد. دلیل کاهش این مولفه از پسا نسبت به سطح صاف، کاهش مقدار تنش برشی در اطراف قله‌ها و نیز تغییر جهت آن در داخل دره‌ها می‌باشد که در بخش بعدی به‌طور مفصل به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۹- تغییر پسای اصطکاکی سطوح ریزساختار نسبت به سطح صاف، برای جریانی با سرعت ۲۵ m/s و ۵ m/s.

Fig. 9. Variation of viscous drag of microstructured surfaces compared to a smooth surface, for flow velocities of 5 m/s and 25 m/s.

سطح زیر نمودار (تا محور x) مثبت، و سطح بالای نمودار (تا محور x) منفی در نظر گرفته می‌شود، کاهش اندازه تنش برشی در اطراف قله و نیز افزایش اندازه آن در داخل دره ریزساختار منجر به کاهش پسای اصطکاکی خواهد شد.



شکل ۱۳- تنش برشی در جهت x برای سطح صاف و سطحی با ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری.

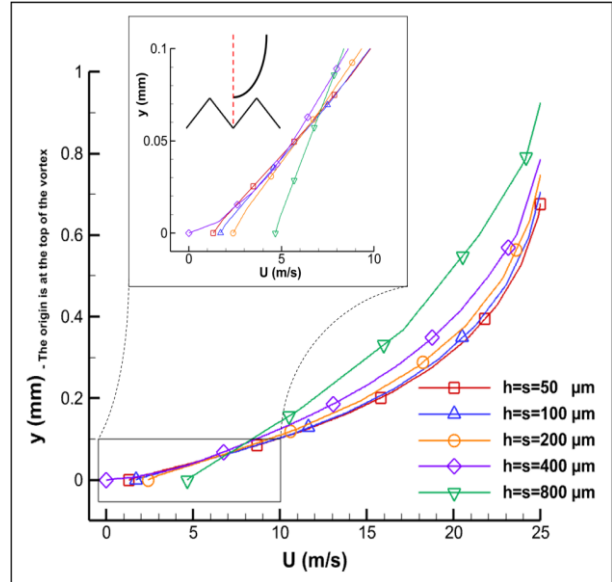
Fig. 13. Shear stress in x direction for smooth surface and $100 \mu\text{m}$ microstructured surface.

تاثیر ابعاد ریزساختارها بر مقدار پسای اصطکاکی

شکل ۱۴ گردابه‌های تشکیل شده در ریزساختارهای با ابعاد مختلف را نشان می‌دهد.

مطابق این شکل با افزایش ابعاد ریزساختار از $50 \mu\text{m}$ تا $800 \mu\text{m}$ حالت کلی خطوط جریان حفظ می‌گردد، از این رو تفاوت محسوسی در فیزیک جریان مشاهده نمی‌گردد. تفاوت مشاهده شده مربوط به تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر و نیز گردابه‌های ثانویه می‌باشد. گردابه‌های بزرگ‌تر باعث ایجاد تنش برشی منفی در سطوح بزرگ‌تری می‌گردند و گردابه‌های ثانویه باعث تغییر جهت تنش برشی در داخل ریزساختار می‌شوند. این موارد باعث می‌شود که با بزرگ شدن ابعاد ریزساختار، اختلاف سطوح مثبت و منفی (سطح خالص) محصور در نمودار تنش برشی (شکل ۱۳) کوچک‌تر شود، تا جایی که اندازه سطح منفی نمودار بزرگ‌تر شده و نهایتاً سطح خالص منفی می‌گردد.

با بزرگ‌تر شدن ابعاد ساختار، گردابه بزرگتری در داخل آن تشکیل می‌شود و در نتیجه سرعت لغزش جریان بیشتر می‌گردد که این موضوع در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



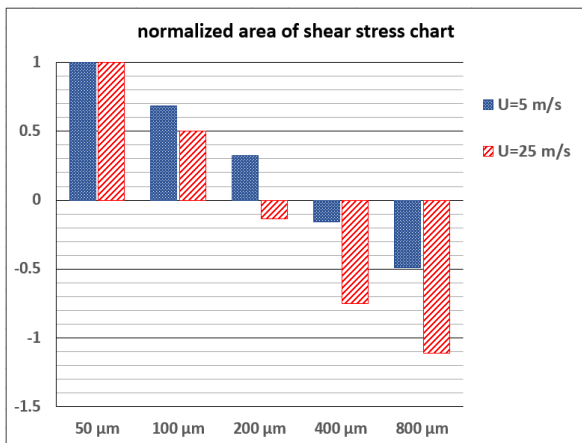
شکل ۱۲- پروفیل‌های سرعت روی گردابه در ریزساختارهای مختلف.

Fig. 12. Comparison of velocity profiles on the top of vortex in different size microstructures.

در تشریح مکانیزم کاهش پسای اصطکاکی، برخی از مقالات بر لغزش جریان بر روی گردابه تاکید کرده‌اند. در این مقاله تغییر در مقدار و جهت تنش برشی به‌عنوان مکانیزم کاهش پسا شرح داده شده است. رابطه محاسبه پسای اصطکاکی در مسئله دوبعدی حاضر عبارت است از: [۴۷]:

$$D_{viscous} = \int_{x_1}^{x_2} \tau_x dx \quad (9)$$

در این رابطه τ_x تنش برشی در جهت جریان ورودی است و مقدار آن بر روی ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری در شرایط عبور جریان با سرعت 25 m/s مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. در این شکل مقادیر تنش برشی سطح ریزساختار به مراتب کم‌تر از سطح صاف می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه جهت گردابه محبوس در داخل ساختار مخالف جهت جریان در بالای ساختار است، تنش برشی در این ناحیه منفی می‌گردد. با توجه به رابطه ۹، پسای اصطکاکی از سطح محصور در بین نمودار تا محور x (شکل ۱۳) حاصل می‌گردد، در نتیجه پسای اصطکاکی سطح ریزساختار نشان داده شده بسیار کوچک‌تر از پسای سطح صاف می‌باشد. به عبارت دقیق‌تر از آنجاکه

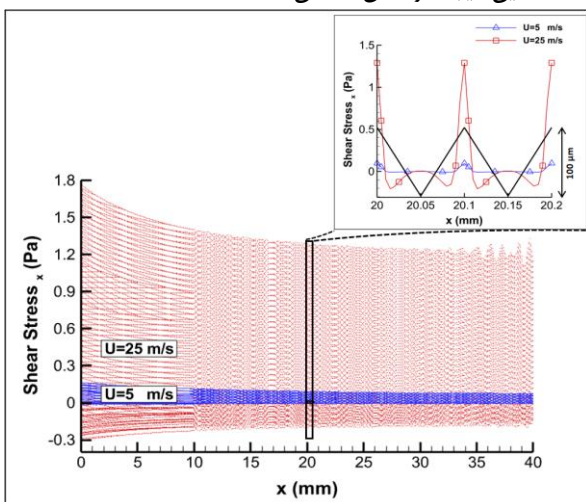


شکل ۱۵- سطح محصور در نمودار تنش برشی (در جهت جریان) برای ابعاد مختلف ریزساختار.

Fig. 15. The surface of shear stress (in the direction of flow) diagram for different size of microstructures.

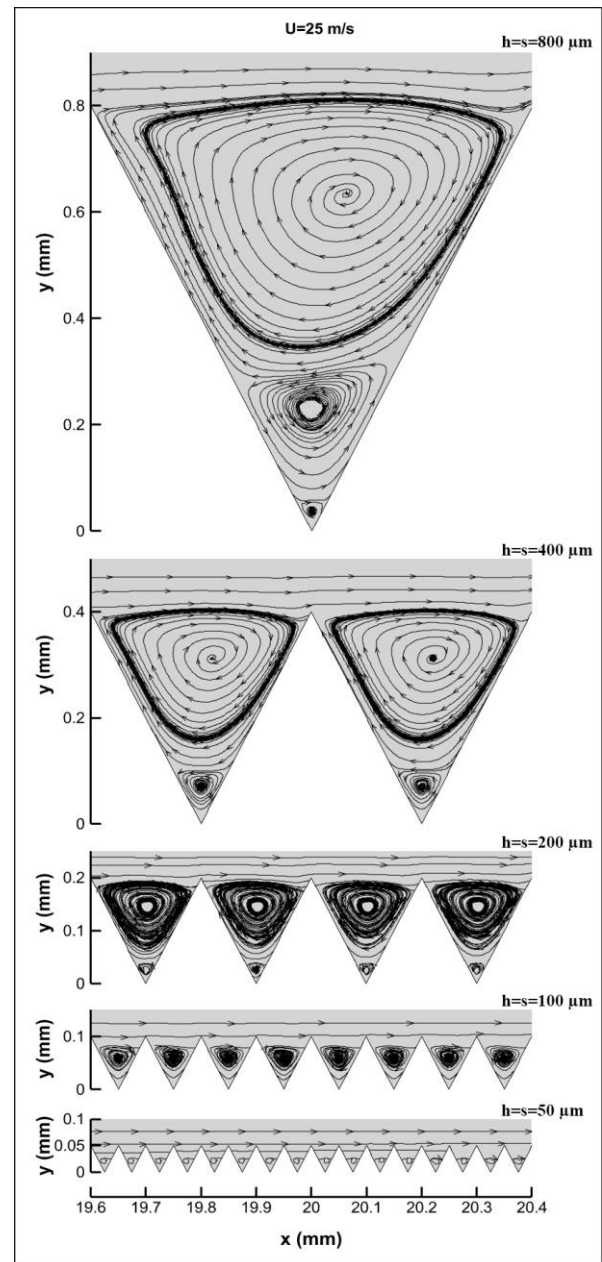
تأثیر سرعت بر مقدار پسای اصطکاکی سطوح ریزساختار

شکل ۱۶ تنش برشی در راستای جریان را برای ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری و در سرعت‌های ۵ m/s و ۲۵ m/s نمایش می‌دهد. مطابق این شکل با این که سطح منفی محصور در نمودار برای سرعت ۲۵ m/s چندین برابر این مقدار در سرعت ۵ m/s می‌باشد، اما به دلیل بالا بودن مقدار تنش برشی آن در اطراف قله، در مجموع پسای اصطکاکی بر روی ریزساختار ۱۰۰ میکرومتری در سرعت ۲۵ m/s حدود ۹/۵ برابر این مقدار در سرعت ۵ m/s می‌باشد. با این حال در مقایسه با مقدار پسای اصطکاکی صفحه صاف، کاهش پسای اصطکاکی در سرعت ۲۵ m/s مقدار بزرگ‌تری خواهد داشت که این نتیجه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- مقایسه تنش برشی (در راستای جریان) ریزساختارهای ۱۰۰ میکرومتری در دو سرعت ۵ m/s و ۲۵ m/s.

Fig. 16. Comparison of shear stress (in the direction of flow) of 100 μm structures, between velocities of 5 m/s and 25 m/s.

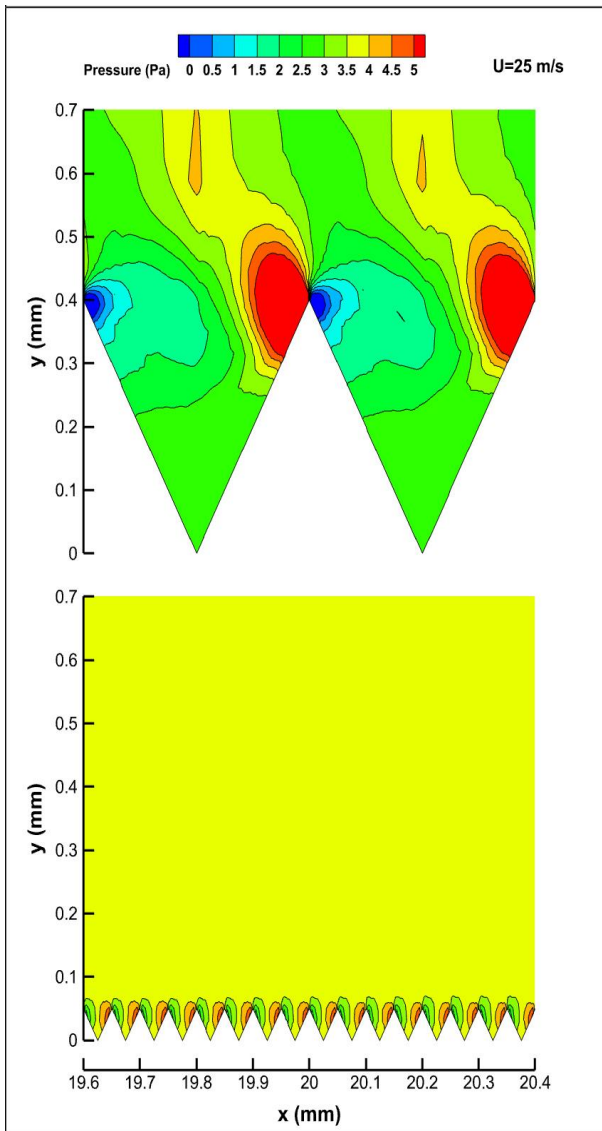


شکل ۱۴- مقایسه گردابه‌های تشکیل شده در ریزساختارهای با ابعاد مختلف.

Fig. 14. Comparison of vortices formed in microstructures with different sizes.

شکل ۱۵ نسبت سطح خالص نمودار تنش برشی را برای ریزساختارهای با ابعاد مختلف نشان می‌دهد. مساحت‌های نشان داده شده در این شکل با مساحت سطح خالص محصور در نمودار تنش برشی ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری بی‌بعد شده است. در این شکل کاهش سطح خالص به معنی کاهش پسای اصطکاکی، و منفی شدن سطح به معنی تغییر جهت پسای اصطکاکی می‌باشد. از این رو در شکل ۹ با بزرگ‌تر شدن ریزساختارها، پسای اصطکاکی کاهش یافته است.

تاثیر سطوح ریزساختار بر مقدار پسای فشاری

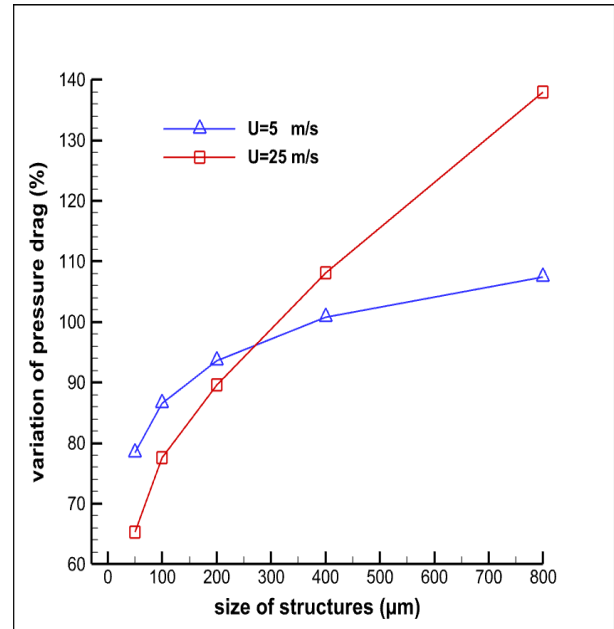


شکل ۱۸- مقایسه کانتور فشار روی ریزساختارهای ۵۰ و ۴۰۰ میکرومتری.

Fig. 18. Comparison of the pressure contour on the top of the microstructures with $h=s=50 \mu\text{m}$ and $h=s=400 \mu\text{m}$.

تاثیر سطوح ریزساختار بر مقدار پسای کل

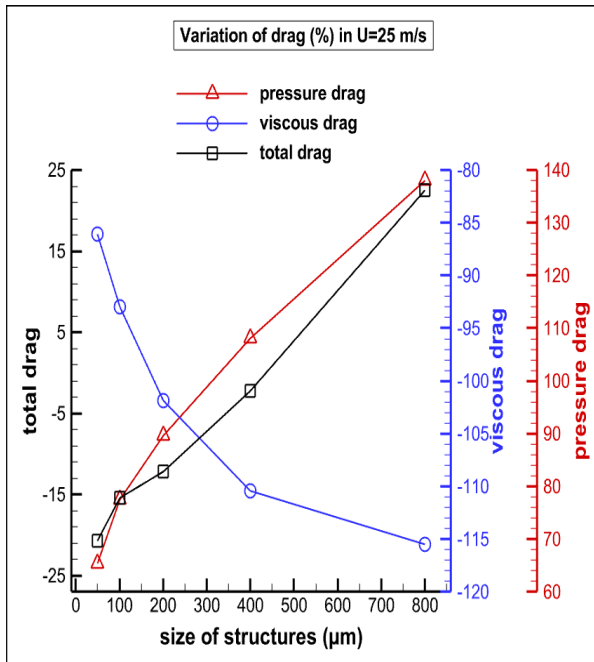
شکل ۱۹ درصد تغییرات مولفه‌های پسای ناشی از عبور جریان هوا با سرعت ۵ m/s از روی ریزساختارهای عرضی مختلف را نسبت به یک صفحه صاف و در شرایط یکسان نشان می‌دهد. پسای ناشی از جریان عبوری از روی صفحه صاف اصطکاکی می‌باشد و مولفه فشاری آن صفر است. مطابق این شکل و همانطور که قبلاً ذکر شد با اضافه نمودن ریزساختار، مولفه اصطکاکی پسا به مقدار زیادی کاهش یافته است ولی تولید پسای فشاری باعث شده است تا نهایتاً پسای کل به مقدار ناچیزی کاهش یابد.



شکل ۱۷- تغییر پسای فشاری سطوح دارای ریزساختار نسبت به سطح صاف، برای جریان با سرعت ۵ m/s و ۲۵ m/s.

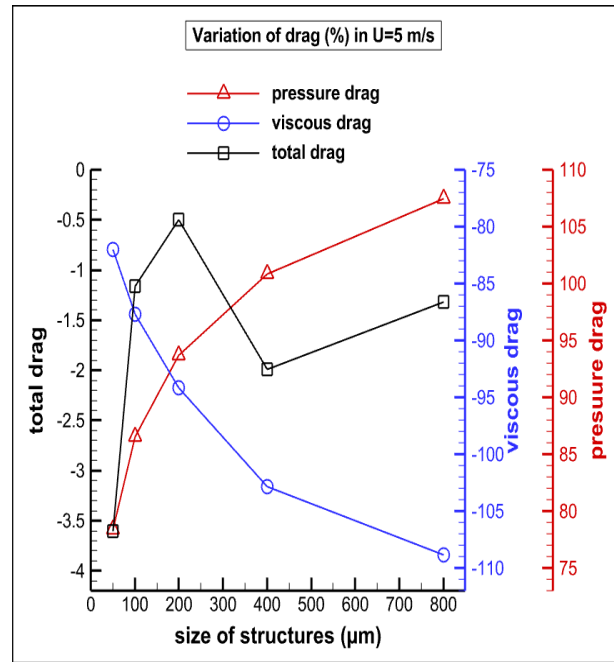
Fig. 17. Variation of pressure drag of microstructured surfaces compared to a smooth surface, for flow velocities of 5 m/s and 25 m/s.

همانطور که قبلاً اشاره شد، ایجاد ریزساختار بر روی یک سطح صاف باعث به وجود آمدن پسای فشاری می‌گردد که دلیل آن ایجاد اختلاف فشار در داخل و اطراف ساختارها و در نهایت به وجود آمدن مقاومت در برابر حرکت سیال می‌باشد. مطابق شکل ۱۷ با افزایش ابعاد ریزساختار، پسای فشاری افزایش خواهد یافت که علت آن را می‌توان در شکل ۱۸ مشاهده نمود. در این شکل کانتورهای فشار در دامنه بالای ریزساختارهای ۵۰ و ۴۰۰ میکرومتری و برای جریانی با سرعت ۲۵ m/s مقایسه شده است. طول و عرض دامنه‌ها در هر دو حالت یکسان می‌باشد. مطابق شکل ۱۸ اختلاف فشار ایجاد شده در اطراف ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری محدود به یک ناحیه کوچک می‌گردد، حال آن که در ریزساختارهای ۴۰۰ میکرومتری، اختلاف فشار در مساحت بسیار بزرگ‌تری از دامنه به وجود می‌آید و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر حرکت سیال وجود خواهد داشت.



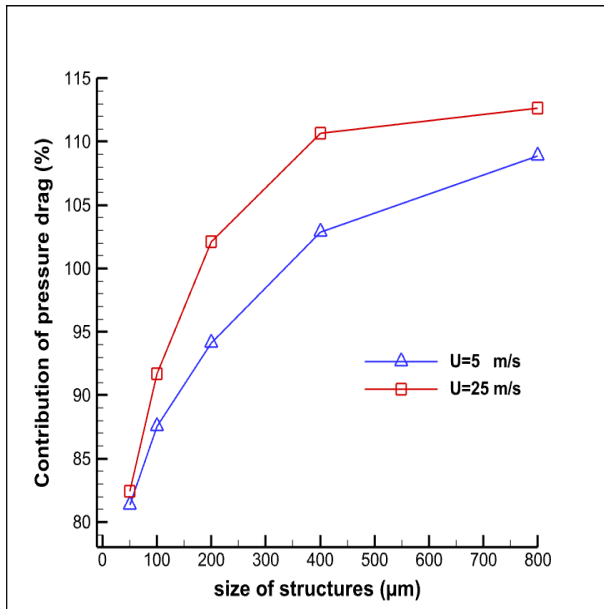
شکل ۲۰- میزان تغییر مولفه‌های پسای سطوح دارای ریزساختار نسبت به سطح صاف، در عبور جریانی با سرعت ۲۵ m/s.

Fig. 20. The amount of variation in the drag components of the microstructured surfaces compared to the smooth surface, in a flow with a velocity of 25 m/s.



شکل ۱۹- میزان تغییر مولفه‌های پسای سطوح دارای ریزساختار نسبت به سطح صاف، در عبور جریانی با سرعت ۵ m/s.

Fig. 19. The amount of variation in the drag components of the microstructured surfaces compared to the smooth surface, in a flow with a velocity of 5 m/s.



شکل ۲۱- سهم پسای فشاری از پسای کل.

Fig. 21. The contribution of the pressure drag to the total drag.

به‌طور مشابه شکل ۲۰ مربوط به درصد تغییر مولفه‌های پسای ناشی از عبور جریانی با سرعت ۲۵ m/s از روی ریزساختارهای عرضی مختلف می‌باشد. به‌طور کلی در این سرعت نیز با افزایش ابعاد ریزساختارها، پسای اصطکاکی کاهش و پسای فشاری افزایش یافته است، اما برآیند این دو مولفه به‌گونه‌ای است که مقدار پسای کل کاهش چشم‌گیری دارد. مطابق این شکل بیشترین درصد کاهش پسای کل مربوط به استفاده از ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری و حدوداً برابر با ۲۰ درصد می‌باشد. در این میان مطابق با شکل ۲۱ سهم بزرگ پسای مربوط به مولفه فشاری است که این سهم با ابعاد ساختار نسبت مستقیم دارد. در ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری مقدار افزایش پسای فشاری (شکل ۱۷) و نیز سهم آن از کل پسای (شکل ۲۱) کمتر از چهار حالت دیگر می‌باشد، از این رو برای هر دو سرعت جریانی بیشترین درصد کاهش پسای کل مربوط به استفاده از ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] M. Perlin, D. R. Dowling, and S. L. Ceccio, "Freeman scholar review: Passive and active skin-friction drag reduction in turbulent boundary layers," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 138, no. 9, 2016, Art. no. 091104, <https://doi.org/10.1115/1.4033295>.
- [2] E. M. Fayyadh and N. M. Mahdi, "Effect of riblets geometry on drag reduction," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Houston, Texas, USA, 2012, pp. 87-100, <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-85228>.
- [3] A. C. Kah Poh, C. See Yuan, A. K. Mat Yamin, A. J. Jalaluddin, A. S. Ishak, and S. Mansor, "Effect of surface roughness on drag of loggerhead carapace," *Jurnal Mekanikal*, no. 26, pp. 37-48, 2008.
- [4] T. S. Surwase and D. R. Vaidya, "Study of effect of surface roughness on drag," in *PG Conference*, MAEER's MIT Group Of Institutions, Pune, India, 2015, pp. 149-154.
- [5] N. West, K. Sammut, and Y. Tang, "Material selection and manufacturing of riblets for drag reduction: An updated review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 232, no. 7, pp. 610-622, 2016, <https://doi.org/10.1177/1464420716641452>.
- [6] G. D. Bixler and B. Bhushan, "Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces," *Advanced Functional Materials*, vol. 23, no. 36, pp. 4507-4528, 2013, <https://doi.org/10.1002/adfm.201203683>.
- [7] M. Walsh, "Turbulent boundary layer drag reduction using riblets," in *20th Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, FL., USA, 1982, <https://doi.org/10.2514/6.1982-169>.
- [8] M. J. Walsh, "Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets," in *Symposium on Viscous Flow Drag Reduction*, Dallas, TX., 1979, pp. 168-184, <https://doi.org/10.2514/5.9781600865466.0168.0184>.
- [9] M. J. Walsh, "Riblets as a viscous drag reduction technique," *AIAA Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 485-486, 1983, <https://doi.org/10.2514/3.60126>.
- [10] M. J. Walsh, "Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance," *Journal AIRCRAFT*, vol. 27, no. 6, pp. 572-573, 1990, <https://doi.org/10.2514/3.25323>.
- [11] P. Luchini, F. Manzo, and A. Pozzi, "Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow,"

مقادیر ضریب پسای کل برای سطوح صاف و سطوح دارای ریزساختار و در سرعت‌های ۵ m/s و ۲۵ m/s در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲- ضریب پسای کل.

Table 2- Total drag coefficient.

h (μm)	C _D ×10 ⁻³	
	U=5 m/s	U=25 m/s
50 μm	9.302	5.078
100 μm	9.537	5.420
200 μm	9.601	5.625
400 μm	9.458	6.261
800 μm	9.522	7.848
Smooth	9.649	6.406

نتیجه گیری

در این مقاله با هدف مطالعه فیزیک حاکم بر سطوح ریزساختار، پارامترهای حاصل از عبور جریان هوا از روی آن‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که از جمله این پارامترها می‌توان به مولفه‌های پسا، پروفیل‌های سرعت و تنش برشی اشاره نمود. به این منظور ریزساختارهای مثلثی با قاعده و ارتفاعی یکسان و برابر با ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر به صورت عرضی در معرض جریانی با سرعت ۵ m/s و ۲۵ m/s قرار گرفتند. مقدار مولفه‌های پسای تولیدی توسط این ریزساختارها با نتایج مربوط به یک صفحه صاف در شرایط مشابه مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که گردابه‌های محبوس در میان ریزساختارهای عرضی با کاهش مقدار تنش برشی در اطراف قله‌ها و نیز با تغییر جهت آن در داخل دره‌ها می‌توانند منجر به کاهش پسای اصطکاکی گردند، به نحوی که در ریزساختارهای بزرگ‌تر، کاهش بیشتری مشاهده می‌گردد. از سوی دیگر به دلیل ایجاد اختلاف فشار در داخل و اطراف ساختارها و در نهایت به وجود آمدن مقاومت در برابر حرکت سیال، استفاده از ریزساختارهای عرضی منجر به تولید پسای فشاری می‌گردد و مقدار این پسا با افزایش اندازه ساختارها، افزایش می‌یابد. نهایتاً برآیند این دو مولفه، مقدار تغییر پسای کل را تعیین می‌نماید. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار پسای کل بسته به شرایط می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد که بیشترین درصد کاهش مشاهده شده حدود ۲۰ درصد و مربوط به استفاده از ریزساختارهای ۵۰ میکرومتری در سرعت ۲۵ m/s می‌باشد.

- [22] J. R. Debisschop and F. T. M. Nieuwstadt, "Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: effectiveness of riblets," *AIAA Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 932-937, 1996, <https://doi.org/10.2514/3.13170>.
- [23] L. Duan and M. M. Choudhari, "Effects of riblets on skin friction and heat transfer in high-speed turbulent boundary layers," in *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, Tennessee, 2012, Art. no. 1108, <https://doi.org/10.2514/6.2012-1108>.
- [24] R. García-Mayoral and J. Jiménez, "Drag reduction by riblets," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, no. 1940, pp. 1412-1427, 2011, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0359>.
- [25] D. C. Chu and G. E. Karniadakis, "A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 250, pp. 1-42, 1993, <https://doi.org/10.1017/S0022112093001363>.
- [26] Y. B. Zhang and D. F. Che, "Turbulence statistics in a rectangular channel flow with one groove-roughened wall," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1376, no. 1, Guangzhou, China, 2011, pp. 90-93, <https://doi.org/10.1063/1.3651843>.
- [27] M. Ahmadi Baloutaki, R. Carriveau, and D. S. K. Ting, "Effect of free-stream turbulence on flow characteristics over a transversely-grooved surface," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 51, pp. 56-70, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.07.001>.
- [28] B. Wang, J. Wang, G. Zhou, and D. Chen, "Drag reduction by microvortexes in transverse microgrooves," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/734012>.
- [29] S. Sutardi and W. A. Widodo, "Analysis of turbulence characteristics in the laminar sub-layer region of a perturbed turbulent boundary layer," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 836, pp. 115-120, 2016, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.836.115>.
- [30] S. J. Lee and S. H. Lee, "Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface," *Experiments in Fluids*, vol. 30, pp. 153-166, 2001, <https://doi.org/10.1007/s003480000150>.
- [31] S. M. Salim and S. C. Cheah, "Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows," in *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, vol. II, Hong Kong, China, 2009.
- [32] S. Varoutis, S. Naris, V. Hauer, C. Day, and D. Valougeorgis, "Computational and experimental study of gas flows through long channels of various cross sections in the whole range of the Knudsen number," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 27, no. 1, pp. 89-100, 2009, <https://doi.org/10.1116/1.3043463>.
- Journal of Fluid Mechanics*, vol. 228, pp. 87-109, 1991, <https://doi.org/10.1017/S0022112091002641>.
- [12] D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J. G. T. Van Der Hoeven, and G. Hoppe, "Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 338, pp. 59-87, 1997, <https://doi.org/10.1017/S0022112096004673>.
- [13] O. A. El-Samni, H. S. Yoon, and H. H. Chun, "Turbulent flow over thin rectangular riblets," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 19, pp. 1801-1810, 2005, <https://doi.org/10.1007/BF02984192>.
- [14] M. Sasamori, O. Iihama, H. Mamori, K. Iwamoto, and A. Murata, "Parametric study on a sinusoidal riblet for drag reduction by direct numerical simulation," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 99, pp. 47-69, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10494-017-9805-2>.
- [15] D. W. Bechert, M. Bruse, and W. Hage, "Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin," *Experiments in Fluids*, vol. 28, no. 5, pp. 403-412, 2000, <https://doi.org/10.1007/s003480050400>.
- [16] Y. Zhang and Y. Yin, "Study on riblet drag reduction considering the effect of sweep angle," *Energies*, vol. 12, no. 17, 2019, Art. no. 3389, <https://doi.org/10.3390/en12173386>.
- [17] L. Djenidi and R. A. Antonia, "Laser doppler anemometer measurements of turbulent boundary layer over a riblet surface," *AIAA Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 1007-1012, 1996, <https://doi.org/10.2514/3.13180>.
- [18] H. safari and A. Raoufpanah, "A numerical investigation of flow drag reduction by riblet surfaces in different geometries and dimensions," *Journal of Energy Conversion*, vol. 9, no. 2, pp. 33-53, 2022, [20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5).
- [19] A. Haji Khan Mirzaei and A. Raoufpanah, "Numerical investigation of drag reduction mechanism in laminar flow regime using rectangular riblets," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 1, pp. 165-173, 2020, <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i1.79677>.
- [20] G. Salehi, S. Niazi, P. Adibi, and T. Zarei, "Optimal selection of riblet dimensions for frictional drag reduction in ship hulls using the chimp optimization algorithm," *Iranian Journal of Marine Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 53-65, 2024, [10.22034/ijmt.2023.544168.1817](https://doi.org/10.22034/ijmt.2023.544168.1817).
- [21] G. Salehi, P. Adibi, S. Niazi, and T. Zarei, "Investigating the effect of riblets on frictional drag reduction on a rudder hydrofoil: A numerical simulation," *Scientific Journal of High Speed Craft*, vol. 22, no. 62, pp. 33-45, 2023.

- Energy*, vol. 56, pp. 412-418, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.050>.
- [41] Z. Li, Y. Zuo, H. Lu, L. He, and B. Meng, "Numerical study on the influence of top and valley shape of the transverse groove on the drag reduction rate," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 61, no. 4, pp. 741-754, 2023, <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/171470>.
- [42] Z. Li, L. He, and Y. Zheng, "Quasi-analytical solution of optimum and maximum depth of transverse v-groove for drag reduction at different reynolds numbers," *Symmetry*, vol. 14, no. 2, 2022, Art. no. 342, <https://doi.org/10.3390/sym14020342>.
- [43] E. Güler, E. Pinar, and T. Durhasan, "The effect of riblets on the aerodynamic performance of NACA 0018 airfoil," *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 119-132, 2024, (in Turkey), <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1459405>.
- [44] X. Yang, J. Wang, B. Jiang, Z. Li, and Q. Xiao, "Numerical study of effect of sawtooth riblets on low-reynolds-number airfoil flow characteristic and aerodynamic performance," *Processes*, vol. 9, no. 12, 2021, <https://doi.org/10.3390/pr9122102>.
- [45] Y. Zhang, H. Chen, S. Fu, and W. Dong, "Numerical study of an airfoil with riblets installed based on large eddy simulation," *Aerospace Science and Technology*, vol. 78, pp. 661-670, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.05.013>.
- [46] M. Zhang, H. Shi, G. Wang, and Y. Yao, "Research on drag reduction characteristics of wind turbine airfoil surface microstructure," *Journal of Aerospace Engineering and Mechanics*, vol. 6, no. 1, pp. 511-523, 2022, <https://doi.org/10.36959/422/462>.
- [47] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1991.
- [33] E. Shirani and S. Jafari, "Application of LBM in simulation of flow in simple micro-geometries and micro porous media," *African Physical Review*, vol. 1, pp. 34-42, 2007.
- [34] Z. Wu, S. Li, M. Liu, S. Wang, H. Yang, and X. Ling, "Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 13, no. 1, pp. 1024-1035, 2019, <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1665101>.
- [35] M. E. Benhamza and F. Belaid, "Computation of turbulent channel flow with variable spacing riblets," *Mechanika*, vol. 79, no. 5, pp. 36-41, 2009.
- [36] Z. Li *et al.*, "A numerical study on the influence of transverse grooves on the aerodynamic performance of micro air vehicles airfoils," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 22, 2023, Art. no. 12371, <https://doi.org/10.3390/app132212371>.
- [37] B. E. Launder and S. P. Li, "On the prediction of riblet performance with engineering turbulence models," *Applied Scientific Research*, vol. 50, no. 3, pp. 283-298, 1993, <https://doi.org/10.1007/BF00850562>.
- [38] S. N. A. Yusof, Y. Asako, N. A. C. Sidik, S. B. Mohamed, and W. M. A. A. Japar, "A short review on RANS turbulence models," *CFD Letters*, vol. 12, no. 11, pp. 83-96, 2020, <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.11.8396>.
- [39] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, *The finite volume method in computational fluid dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*, Springer Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
- [40] P. A. C. Rocha, H. H. B. Rocha, F. O. M. Carneiro, M. E. Vieira da Silva, and A. V. Bueno, "K- ω SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine,"