JTAE

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 11, No. 1, pp. 1-10, 2027

E- ISSN: 2676-4253

https://doi.org/1022034/jtae.11.1.1

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir



Original Research Paper

Asessment of Friction Drag Reduction in Blunt Bodies Using Surface Microstructures

Ramin Kamalimoghadam*, Maral Rastegar , and Mohammad javad kahaliyan

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

ARTICLE INFO

Article History:

Receive 17 August 2025
Revised 06 October 2026
Accepted 13 October 2026
Available Online 17 November 2026

Keywords:

Surface micro-structure
Friction drag reduction
Numerical simulation
Drag optimization

ABSTRACT

The research is the numerical investigation of micro-structure coatings with different geometries (including square, triangular, trapezoidal and semicircular) to reduce friction drag on the channel surface. In the present research, firstly, different microstructure geometries are examined in order to find the optimal shape of the structures for the maximum drag reduction. Then, the parametric study of selected geometries of microstructures has been numerically considered in order to improve drag reduction. These geometric variables include height and width as well as the pitch. The obtained simulation results from the changes of the mentioned geometric parameters are separately examined in the structures with different geometries. By analyzing the velocity and pressure contours and flow stream lines, the total drag and also friction coefficient are extracted and appropriate dimensions are obtained for the microstructure that brings the greatest reduction in friction drag. Based on the results, it is clear that the square structure in a certain dimension has the greatest reduction in friction drag, and this selected structure has been used on a 2-D blunt body geometry. The results showed that among the three cases geometry without microstructure, geometry with microstructure on the cylindrical section, and geometry with microstructure on the entire surface, the highest reduction in friction drag was 67.4% and related to the third case.

* Corresponding Author's E-mail: rkamali@ari.ac.ir

How to Cite this Article:
R. Kamalimoghadam, M. Rastegar, and M. J. kahaliyan, "Asessment of friction drag reduction in blunt bodies using surface microstructures," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-10, 2027, (in Persian), https://doi.org/1022034/jtae.11.1.1.

COPYRIGHTS
© 2027 by the authors. Published by ARI. 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)

Article in Press

فناوری در مهندسی هوافضا

۱۴۰۶، دوره ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱-۱۰

https://doi.org/1022034/jtae.11.1.1

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir

شاپای الکترونیکی: ۴۲۵۳-۲۶۷۶



مقاله پژوهشی

ارزیابی کاهش درگ پوسته‌ای در هندسه‌های سرپخ با استفاده از ریزساختارهای سطحی

رامین کمالی‌مقدم*[۱]، مارال رستگار[۲]، و محمدجواد کحالیان[۳]

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

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

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۶ مرداد ۱۴۰۵

بازنگری ۱۴ مهر ۱۴۰۵

پذیرش ۲۱ مهر ۱۴۰۵

اولین انتشار ۲۶ آبان ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

ریزساختار

کاهش درگ پوسته‌ای

شبیه‌سازی عددی

بهینه‌سازی درگ

چکیده

موضوع مورد نظر تحقیق حاضر، بررسی عددی پوشش‌هایی با ساختارهای منظم در ابعاد میکرو به‌منظور کاهش درگ پوسته‌ای درون کانال و روی جسم سرپخ دارای ریزساختارها با هندسه‌های مختلف شیار (شامل مربع، مثلث، ذوزنقه و نیم‌دایره) می‌باشد. در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی میکروساختارهای مختلف به‌منظور یافتن شکل بهینه ساختارها برای بیشترین کاهش درگ پرداخته می‌شود. سپس مطالعه پارامتریک هندسه‌های منتخب ریزساختارها در راستای بهبود کاهش درگ به‌صورت عددی مدنظر قرارگرفته است. این متغیرهای هندسی شامل ارتفاع و پهنا و همچنین فاصله بین ریزساختارها می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی جریان حاصل از تغییرات پارامترهای هندسی مذکور به‌طور مجزا در ساختارهایی با هندسه‌های مختلف بررسی می‌شود و با تحلیل کانتورهای سرعت و فشار و خطوط جریان، نتایج نهایی شامل درگ پوسته‌ای، کل و همچنین ضریب اصطکاک فیزیک حاکم بر مساله استخراج شده و ابعاد مناسب برای ریزساختاری که بیشترین کاهش درگ پوسته‌ای را به‌همراه می‌آورد، به‌دست می‌آید. بعد از انجام شبیه‌سازی‌های ذکر شده مشخص می‌شود که ساختار مربعی در یک ابعاد مشخص بیشترین کاهش درگ پوسته‌ای را به‌همراه دارد که این ساختار منتخب در یک هندسه سرپخ دوبعدی به‌کار برده شده و نتایج حاصل از حضور ریزساختار با هدف کاهش درگ پوسته‌ای بررسی می‌شود. مطالعه حاضر نشان داد که از بین سه حالت هندسه بدون ریزساختار، هندسه دارای ریزساختار در قسمت استوانه‌ای و هندسه دارای ریزساختار در تمام سطح، بیشترین کاهش درگ پوسته‌ای برابر با ۶۷/۴٪ و مربوط به حالت سوم می‌باشد.

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

How to Cite this Article:

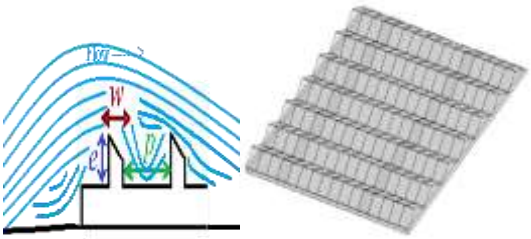
R. Kamalimoghadam, M. Rastegar, and M. J. kahaliyan, "Asessment of friction drag reduction in blunt bodies using surface microstructures," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-10, 2027, (in Persian), https://doi.org/1022034/jtae.11.1.1.

COPYRIGHTS

© 2027 by the authors. Published by ARI. 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)

۱. مقدمه

ساخت بیونیک رشته جدیدی از علم ساخت و ساز است که بر اساس تلاقی مکانیک و زیست‌شناسی تعریف شده است. ایده استفاده از ریزساختارها در صنایع مختلف مطرح شده است. در حال حاضر یکی از موضوعات مهم تحقیقاتی در کاهش درگ جریان آشفته، کاهش درگ با استفاده از شیار بیونیک است که به‌عنوان یک روش کنترل غیرفعال، روشی نسبتا ارزان و موثر محسوب می‌شود [۱]. والش [۲– ۵] در مطالعه کاهش کشش توسط سطوح ریبلت پیشگام بود. وی رفتار متفاوت سطوح تیغه، پوسته و مثلثی را بررسی کرد و نشان داد که ساختار متقارن V شکل بهترین اثر را در کاهش درگ دارد. از هر دو منظر عددی و تجربی، تعیین ریزساختارهای بهینه برای حداکثر کاهش نیروی درگ موضوع مورد مطالعه بسیاری از پژوهشگران بوده است. اگرچه این سازه‌ها سطح اصطکاک سیال را افزایش می‌دهند، اما به‌دلیل ایجاد مکانیسم انتقال تکانه و تنش برشی کمتر، کشش پوسته (اصطکاک) روی بدنه را کاهش می‌دهند که از جذب تماس یک سطح جامد با لایه‌های سیال چسبناک مجاور حاصل می‌شود [۶]. در دینامیک سیالات، مشخص شده است که جریان آشفته توسط گردابه‌های تولید شده در لایه‌های بالاتر باعث انتقال سریع‌تر تکانه جریان می‌شود. همچنین باعث افزایش درگ پوسته در مقایسه با جریان آرام می‌شود [۷]. وجود ریزساختارهای پوسته–ریبلت بر روی بدنه به‌طور موثری تشکیل گردابه‌ها را در سطح در لایه سیال پایینی کنترل می‌کند و تشکیل گردابه‌های آشفته کوچک روی سطح را به‌سمت بالای ریبلت‌ها حرکت می‌دهد [۳]. بنابراین انتقال تکانه سیال در جهت عمود بر سطح را کاهش می‌دهد و در نتیجه از درگ می‌کاهد. تحقیقات زیادی برای بهینه‌سازی شکل هندسی، ابعاد و نوع آرایش ریزساختار روی پوسته‌ها انجام شده است. ساختارهای هندسی مورد مطالعه تاکنون به‌صورت تیغه، دندانه و در آرایش‌های پیوسته و ناپیوسته [۸] می‌باشند که هر کدام تاثیر متفاوتی بر میزان کاهش درگ دارند [۹،۱۰]. در صنایع مرتبط با مهندسی هوافضا، تحقیقات مربوطه برای رژیم‌های پروازی مختلف انجام شده است[۱۱–۱۳]. طراحی دستگاه‌های هوافضا مستلزم توجه به ویژگی‌های سطوح و تاثیرات آن‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله آیرودینامیک است. این ویژگی‌ها شامل هندسه [۱۴]، زبری [۱۵،۱۶]، مواد [۱۷]، آب‌گریزی و غیره است. در طیف گسترده‌ای از کاربردها، تلاش‌هایی برای کاهش نیروی درگ انجام می‌شود. کاهش نیروی درگ می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف سوخت منجر به بهره‌وری انرژی شود [۱۸]. بنابراین پیشنهادات زیادی برای کاهش این نیرو ارائه شده است، از جمله استفاده از سطوح مقعر/گودی، دیوارهای نوسانی/ارتعاشی، سطوح سازگار، تولید ریزحباب، افزودنی‌های پلیمری، سطوح میکرومورفولوژیکی، دیوارهای گرمایشی، کامپوزیت، لایه بندی/پوشش روی سطوح، استفاده از منحنی‌های محدب، دمیدن و مکش در لایه‌های مرزی متلاطم، استفاده از سطوح فوق آب‌گریز، نیروی الکتروموتور، تغییر شکل فعال دیوار و غیره [۱۹–۲۲]. استفاده از سطوح ریزساختار نیز یک تکنیک غیرفعال است که می‌تواند منجر به کاهش کشش اصطکاکی، الهام گرفته از ساختار پوست کوسه شود [۲۳،۲۴]. عملکرد سطوح ریزساختار در مدیریت نیروی کشش و همچنین تولید یا جذب نویز تا حد زیادی به متغیرهای طراحی، از جمله مشخصات مقطع، ابعاد و پیکربندی آن‌ها بستگی دارد [۱۷]. سطوح ریزساختاری از نانومتر تا چند صد میکرومتر دارند. این سازه‌ها را می‌توان به‌صورت تصادفی یا به‌صورت منظم و کنترل شده با هندسه‌ها و پیکربندی‌های مختلف روی سطح ایجاد کرد. ریزساختارها عمدتا به‌صورت ریبلت یا شیار هستند و با تاثیر بر جریان گذر غشایی، عملکرد سطح را در زمینه‌های آیرودینامیک، انتقال‌حرارت و آیرواکوستیک تغییر می‌دهند. مقالات مختلفی تاثیر پارامترهای هندسی ریزساختارها را بر نیروی درگ بررسی کرده‌اند [۲۵–۲۷]. بررسی این مقالات نشان می‌دهد که ارتفاع ریزساختار (e)، عرض ریزساختار (w) و گام آن (p) را می‌توان در نظر گرفت. مهم‌ترین پارامترهای هندسی (همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است).



شکل ۱–پارامترهای هندسی مهم در ریزساختارها.

Fig. 1. Important geometric parameters in microstructures.

هندسه، ابعاد و پیکربندی ریبلت‌ها تاثیر فراوانی بر فیزیک جریان گذرنده از روی سطوح ریزساختار می‌گذارد. از این‌رو و از آنجا که ابعاد ریبلت‌ها از یک تا نهایتا چند صد میکرومتر می‌باشد، ساخت این سطوح نیازمند بهره‌گیری از تکنولوژی‌هایی می‌باشد که بتوانند با کمترین تلرانس، ساختارهای مد نظر را روی سطح ایجاد کنند.

استفاده از ریزساختارها ممکن است درگ کل را افزایش دهد اما در شرایطی درگ پوسته‌ای را کاهش خواهد داد. این موضوع هم برای جریان آرام و هم آشفته برقرار است فقط نکته مهم این است که در هرشرایطی کاهش درگ رخ نمی‌دهد و پارامترهای زیادی (مانند ابعاد هندسی ریز ساختارها، نوع جریان آرام یا آشفته، هندسه مورد بررسی و غیره) در اثر کاهش درگ تاثیرگذار هستند. همانطور که در عنوان

Article Preview

مقاله نیز بیان شده است، هدف در این تحقیق کاهش درگ پوسته‌ای می‌باشد و نه درگ کل. نتایج به‌دست آمده نیز بیانگر همین مساله است. در هندسه مورد نظر این مقاله (سرپخ) استفاده از ریزساختارها در جریان آرام نیز باعث کاهش درگ پوسته‌ای شده اما درگ کل را افزایش می‌دهد.

از آنجاکه وجود ریز ساختارهای منظم روی سطح هندسه آیرودینامیکی باعث لغزش سیال روی سطح و تغییر در پروفیل سرعت می‌شود، لذا اصلی‌ترین کاربرد فیزیک بررسی شده کنترل لایه مرزی و جلوگیری از جدایش جریان می‌باشد. میکروساختار می‌تواند لایه مرزی را دست‌کاری کند و باعث شود جریان در بخش‌هایی از سطح انرژی بیشتری نزدیک دیواره داشته باشد. در نتیجه، حتی اگر درگ کل کمی افزایش پیدا کند، ممکن است جدایش جریان به تأخیر بیفتد، ناحیه ویک کاهش یابد، پایداری جریان افزایش پیدا کند، عملکرد آیرودینامیکی در زاویه حمله بالا بهتر شود. بنابراین در بال هواپیما، پره توربین و کمپرسور، روتور و پهپادها قابل بررسی است. این مساله در هندسه‌هایی که تنها کاهش درگ اهمیت ندارد و در کنار آن مسائلی مانند پایداری جریان غالب است کاربرد فراوانی دارد.

در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی میکروساختارهای متفاوت در کانال دارای ریزساختار به‌منظور یافتن شکل بهینه ساختارها برای بیشترین کاهش درگ پرداخته می‌شود. سپس مطالعه پارامتریک هندسه‌های منتخب ریزساختارها در راستای بهبود کاهش درگ به‌صورت عددی مدنظر قرارگرفته است. این متغیرهای هندسی شامل ارتفاع، پهنا و همچنین فاصله بین ریزساختارها می‌باشند.

۱- ۱ فیزیک حاکم بر مسئله کشش اصطکاک

مکانیسم کاهش کشش سطوح دارای ریزساختار به‌طور کلی برای دو موقعیت قابل بررسی است: ۱- ریبلت‌های طولی (جهت جریان موازی با جهت ریبلت‌ها است، ۲- ریبلت‌های عرضی (جهت جریان عمود بر جهت ریبلت است). درگ‌های اصطکاکی یا پوسته‌ای چسبناک ناشی از برهمکنش بین سیال و سطح موازی با جریان و همچنین کشش بین مولکول‌های سیال است. در جریان سیال با نزدیک شدن به سطح جسم، سرعت لایه‌های سیال کاهش می‌یابد تا زمانی‌که سرعت سیال نزدیک سطح جسم صفر شود. در این‌حالت، در سیالی با ویسکوزیته بالاتر، جاذبه بین مولکولی قوی‌تر، اصطکاک بیشتری بین لایه‌های سیال وجود دارد و بنابراین ضخامت لایه سیال (از سطح جسم به لایه با سرعت جریان) افزایش می‌یابد. در نتیجه سیال‌های چسبناک بیشتر کشش بیشتری دارند. با همین استدلال، افزایش سرعت سیال نیز منجر به افزایش درگ می‌شود. کشش اصطکاکی روی یک جسم در واقع انرژی مورد نیاز برای انتقال مقدار حرکت بین سیال و جسم است، به‌منظور ایجاد یک گرادیان سرعت در لایه سیال بین جسم و سیال دست نخورده و دور از سطح جسم. بر اساس عدد رینولدز که بر جریان لایه مرزی حاکم است و انتقال جریان از آرام به آشفته بر اساس انتقال اندازه حرکت، میزان نیروی درگ تغییر می‌کند. این تغییرات را می‌توان بر اساس رابطه تنش برشی حاکم بر جریان بیان کرد.

$$\tau = \frac{du}{dy}\mu \qquad (۱)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی سیال (ویسکوزیته) و $\frac{du}{dy}$ گرادیان سرعت می‌باشد. با توجه به این رابطه، برای کاهش موثر درگ، تغییر وضعیت لایه مرزی به‌منظور کاهش گرادیان سرعت ضروری است. با توجه به دیدگاه اویلر، معادلات ناویر–استوکس زیر بر سیال حاکم است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه ρ، چگالی، p فشار، u سرعت در امتداد محورهای مختلف، و μ ویسکوزیته دینامیکی است.

معادله اساسی دیگر استفاده از یک مدل آشفتگی مناسب است که با فیزیک جریان حاکم بر مسئله سازگار است. مدل‌های دو معادله‌ای (مانند $K-\varepsilon$ و $K-\omega$) به‌عنوان مبنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان آشفته، به‌ویژه در سال‌های اخیر (که در عین داشتن قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتا ساده‌ای نیز هستند) بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر مدل SST-K-ω برای محاسبه آن استفاده شده است [۱۴]. با ترکیب این دو مدل، توانایی بالای مدل $K-\omega$ در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل $K-\varepsilon$ در نواحی با عدد رینولدز بالا در اختیار است. بر اساس این مدل، ویسکوزیته آشفته با استفاده از روابط زیر به‌دست می‌آید. علاوه بر این، دقت بالاتری را برای لایه مرزی تحت تاثیر گرادیان‌های فشار نامطلوب به‌دست می‌آورد.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} - \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right) \qquad (۴)$$

Article in Press

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{MAX(a_1\omega_1\sqrt{2}S_t F_2)} \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i\rho\omega) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu_k \frac{\partial}{\partial x_j}\omega\right) + P_\omega - \beta\rho\omega^2 + 2\rho(1 - F_1)\frac{1}{\omega}\frac{1}{\sigma_{\omega^2}}\frac{\partial}{\partial x_j}k\frac{\partial}{\partial x_j}\omega \quad (۶)$$

$$F_2 = tanh\left[\left[MAX\left(2\frac{\sqrt{k}}{\beta^k\omega(d_{\beta\perp})}\frac{500\mu}{\rho\omega(d_\perp)^2}\right)\right]^2\right] \quad (۷)$$

در روابط فوق، 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. در این معادله a_1 عدد ثابت، ω نرخ اتلاف آشفتگی ویژه و S_t بزرگی نرخ کرنش می‌باشد. در روابط فوق μ_k و μ_ω لزجت‌های موثر، $\tilde{P}_k$ 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 نهایتا F_1 تابع ترکیب می‌باشد.

معادلات نیروی درگ، شامل درگ پوسته‌ای و درگ فشاری است برای بررسی اصول زیربنایی که باعث تغییرات در نرخ کاهش درگ می‌شود، لازم است تجزیه شود مقاومت کل با توجه به اجزای آن، کشش کل صفحه شیاردار متشکل از کشش کل اصطکاک F_{GV} و درگ فشار F_{GP} که با معادلات زیر بیان می‌شوند.

$$F_{GV} = \int_0^{l_s} \tau \,.\, e_x \, dl \quad (۸)$$

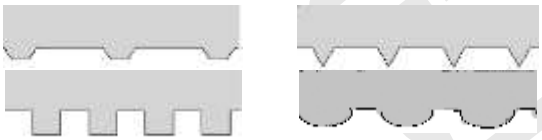
$$F_{GP} = \int_0^{l_s} (p - p_\infty) n \,.\, e_x \, dl \quad (۹)$$

$$F_{t=}F_{GV} + F_{GP} = \int_0^{l_s} \tau \,.\, e_x \, dl + \int_0^{l_s} (p - p_\infty) n \,.\, e_x \, d \quad (۱۰)$$

با محاسبه τ، تنش برشی محلی مربوطه و p، فشار روی دیواره و ادغام آن‌ها، تنش پیش‌بینی شده روی دیوار تعیین می‌شود. e_x، بردار جهت x بوده و p_∞ فشار محیط و l_s عرض کانال در نظر گرفته می‌شود.

۱- ۲ جمع‌بندی مطالعه پارامتر

در این بخش، ابتدا حل عددی بر روی هر دو کانال بدون ریزساختار و کانال‌های دارای ریزساختار اعتبارسنجی می‌شود، سپس تأثیر پارامترهای مهم بر هندسه‌هایی با ریزساختارهایی با اشکال مختلف بررسی می‌شود. برای هر هندسه، پارامترهای اصلی تعریف شده و آن پارامترها در طیف وسیعی از تغییرات شبیه‌سازی و نتایج آن‌ها بررسی می‌شود. در پژوهش حاضر به‌منظور کاهش درگ اصطکاکی، هندسه‌های مختلف ریزساختارها مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه تعیین تأثیر هندسه و پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر کاهش درگ است. شکل زیر انواع هندسه‌های ریزساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۲- هندسه ریزساختارهای مورد مطالعه

Fig. 2. Geometry of the microstructures studied in the present research.

مقایسه نتایج جدول۱، نشان می‌دهد که وجود تمام ریزساختارها روی سطح باعث کاهش درگ پوسته‌ای می‌شود. هندسه ریزساختار مربع و نیم‌دایره نسبت به سایر هندسه‌ها کاهش بیشتری در درگ پوسته‌ای دارند، اما از آنجایی‌که ریزساختار نیم‌دایره‌ای درگ فشاری را بیشتر از ریزساختار مربعی افزایش می‌دهد، درگ کل ریزساختار مربع افزایش بسیار کمتری نسبت به سایر ریزساختارها دارد. بنابراین، با بررسی نتایج راه حل‌های پارامتری مختلف برای تغییرات عرض، ارتفاع و فاصله طول گام ریزساختار مربع‌ها، پاسخی که درگ کل و درگ پوسته‌ای را بیش از همه موارد دیگر کاهش داده است، انتخاب می‌شود. هندسه انتخاب شده برای هندسه نهایی پژوهش حاضر (هندسه سر پخ دوبعدی) استفاده شده و شرایط موجود در آن در مقایسه با حالت بدون ساختار مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- مقایسه درگ‌های فشاری (Dp)، پوسته‌ای (Dv)، درگ کل (DT) و ضریب درگ پوسته‌ای(ΔDv%)، ضریب درگ کل (ΔDT%) در ریزساختارهای هندسه‌های مختلف در طول گام ۳۰۰ میکرون.

Table 1. Comparison of pressure (Dp), shell (Dv), total drag (DT), shell drag coefficient (ΔDv%), and total drag coefficient (ΔDT%) in microstructures of different geometries with a 300-micron pitch.

Microstructure Geometry	Dv	Dp	DT	ΔDv %	ΔDT %
Without -Micro structure	0.11	0	0.11	-	-
-Square Micro structure	0.09	0.02	0.12	-16.7	7.3

Article in Press

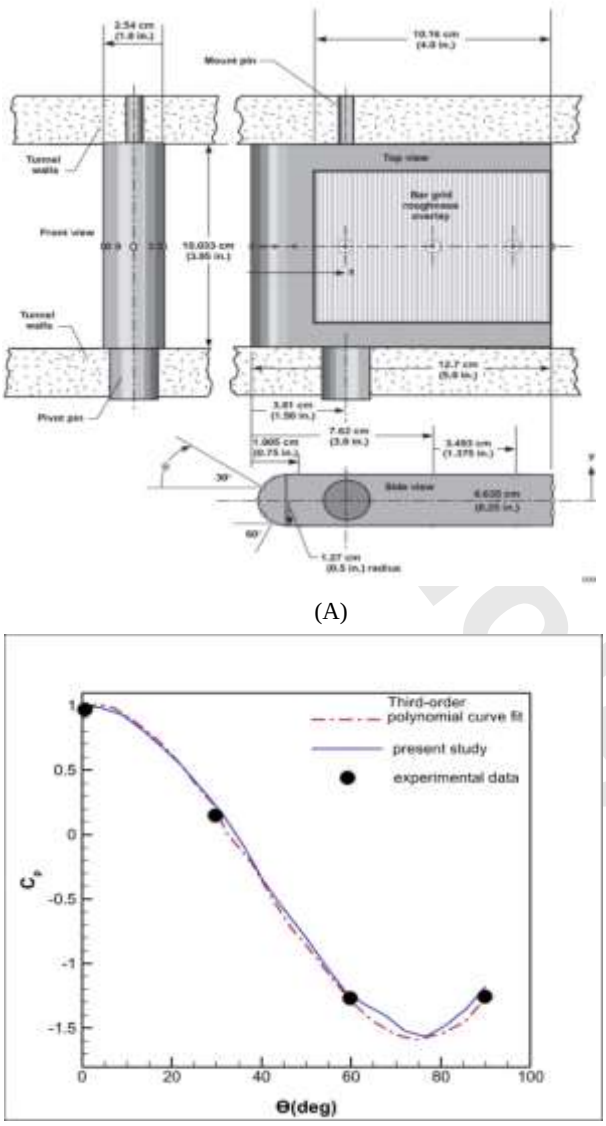
Triangle -Micro structure	0.10	0.03	0.11	-3.9	25.0
Trapezoidal Micro-structure	0.10	0.03	0.13	-3.6	25.6
Semicircular Micro-structure	0.069	0.12	0.19	-35.3	78.5
Micro-structure on Blunt Body	0.04	0.09	1	-54.0	28.0

۱-۳ مطالعه کاهش درگ پوسته‌ای در هندسه سر پخ دوبعدی با ریزساختار

با توجه به نتایجی که تاکنون به‌دست آورده شد و مقایسه‌هایی که بین حل هرکدام از انواع هندسه‌های مختلف ریزساختارها در مراحل مختلف انجام شد، مشخص شد که ریزساختار مربعی کاهش درگ مناسب‌تری نسبت به سایر هندسه ها ایجاد می‌کند. از طرفی با مقایسه نتایج حاصل در بخش تحلیل پارامتریک ساختار مربعی، مشاهده شد که ریزساختار مربعی که عرض آن دارای ابعاد ۴۰۰ میکرون، ارتفاع ۱۰۰ میکرون و طول گام ۶۰۰ میکرون بود دارای شرایط مناسب‌تری برای کاهش درگ می‌باشد. بنابراین در هندسه نهایی سر پخ دوبعدی از ریزساختارهایی با ابعاد ذکر شده استفاده می‌شود تا حد امکان بتوان درگ پوسته‌ای را در حل نهایی تحقیق حاضر کاهش داد.

برای اعتبارسنجی، حل جریان با سرعت ۲۸ متر بر ثانیه، عدد رینولدز ۲۵۰۰۰۰، عدد ماخ ۰/۰۸ و عدد نادسن 1.59×10^{-7} روی یک هندسه سر پخ دوبعدی با زاویه مخروط صفر درجه مطابق با شرایط مقاله مرجع [۲۸] مد نظر قرار گرفته است. هندسه این جسم در شکل ۳ قسمت الف آورده شده است. در این بخش، جریان حول هندسه مذکور با ابعاد و شرایط ذکر شده در مقاله شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی مقایسه می‌شود که صحت حل اثبات شود. در این مساله، سیال هوا بوده و شرایط جریان آشفته در نظر گرفته شده است. در حل نهایی، نتایج توزیع فشار حاصل از حل عددی را با نمودار تجربی تطبیق داده تا از صحت نتایج به‌دست آمده اطمینان حاصل شود

برای مقایسه نتایج و اعتبارسنجی حل، مقایسه ضریب فشار روی بخش استوانه‌ای هندسه مذکور حاصل از شبیه‌سازی و حل تجربی در شکل ۳ قسمت ب آورده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، نتایج حاصل از دقت مناسبی برخوردار است.



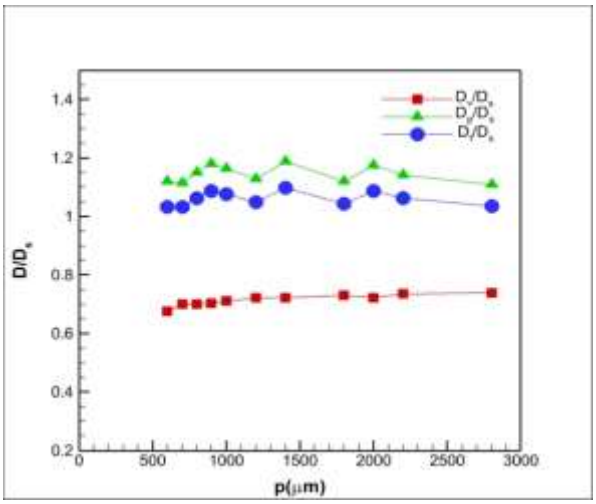
(A)

(B)

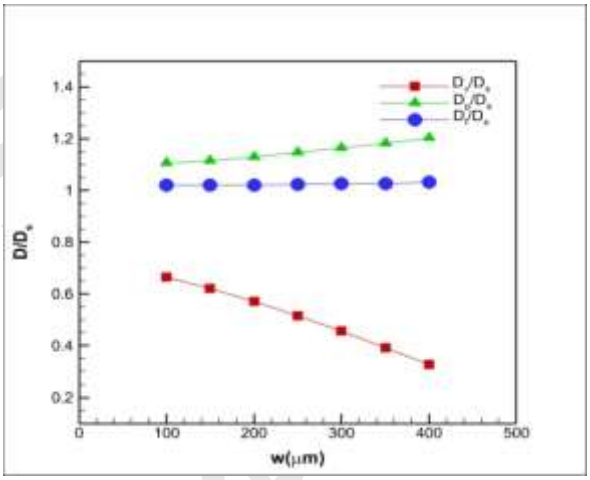
شکل ۳- هندسه و اعتبارسنجی هندسه سر پخ دوبعدی.

Fig. 3. Geometry, and validation of microstructure on 2-D blunt body.

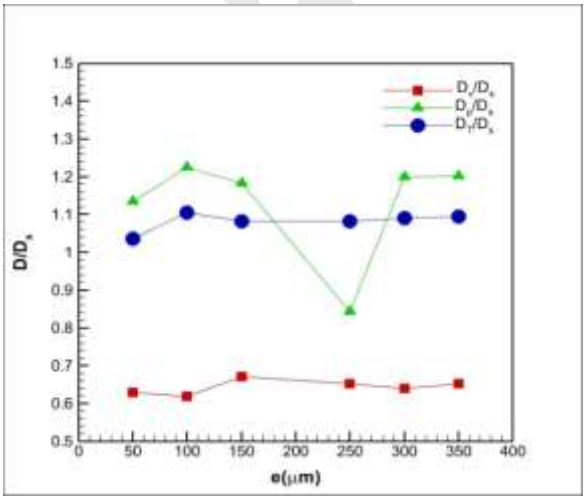
در این بخش، اثر سه پارامتر گام (P)، عرض (w) و ارتفاع (e) در ریزساختارهای مربعی در هندسه سرپخ دو بعدی، در کاهش درگ پوسته‌ای بررسی می‌شود. با این‌کار اطلاعات مشخصی درباره الگوهای جریان، سرعت‌های محلی و توزیع جریان به‌دست می‌آید. این اطلاعات می‌توانند کمک کنند تا نقاطی که جریان بهینه از نظر کاهش درگ پوسته‌ای دارند را شناسایی کرد و طراحی خود را بهبود داد. با تغییر این پارامترها، می‌توان تاثیر طول گام، ارتفاع و عرض ریزساختارها را بر توزیع جریان و سرعت فشار سیال را بررسی کرد. برای تعیین اثر هر پارامتر ابتدا دو پارامتر ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها یک پارامتر در بازه مشخصی تغییر می‌کند.



(A)



(B)



(C)

شکل ۴- تاثیر تغییر پارامترهای گام (P)، عرض (w) و ارتفاع (e) بر نسبت کشش کل بدنه هندسه سر پخ دوبعدی

Fig. 4. Effect of variation of *p*, *w*, and *e* parameters on total drag ratio of microstructure 2-D blunt body.

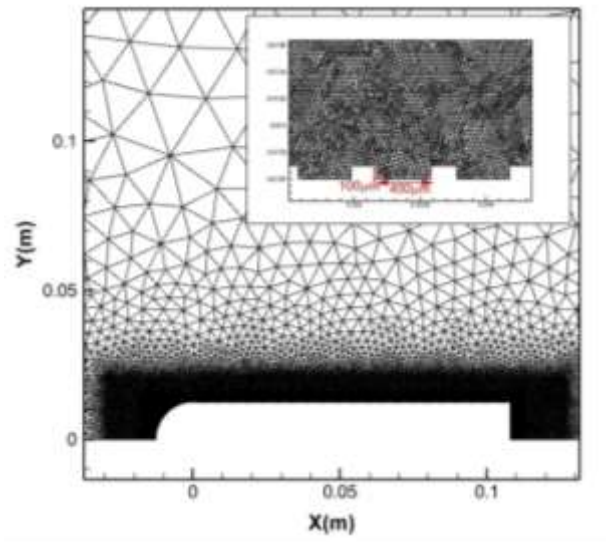
حالت بهینه برای کاهش درگ زمانی اتفاق می‌افتد که پارامتر طول گام ۶۰۰ میکرون باشد و عرض و ارتفاع مربع‌های ریزساختار به‌ترتیب ۴۰۰ میکرون و ۱۰۰ میکرون باشد. نتیجه به‌دست آمده از حالت بهینه در هر سه پارامتر در جدول نشان داده شده است. همانطور که گفته شد در هندسه نهایی سر پخ دوبعدی ریزساختارهایی با ابعاد ذکر شده استفاده می‌شود تا درگ پوسته‌ای در هندسه نهایی تا حد امکان کاهش دهد.

جدول ۲- حالت بهینه در حل پارامتریک ریزساختار مربعی درگ‌های فشاری(Dp)، پوسته‌ای(Dv)، درگ کل(DT) و ضریب درگ پوسته‌ای(ΔDv%)، ضریب درگ فشاری(ΔDp%) ضریب درگ کل(ΔDT%) در هندسه سر پخ دوبعدی.

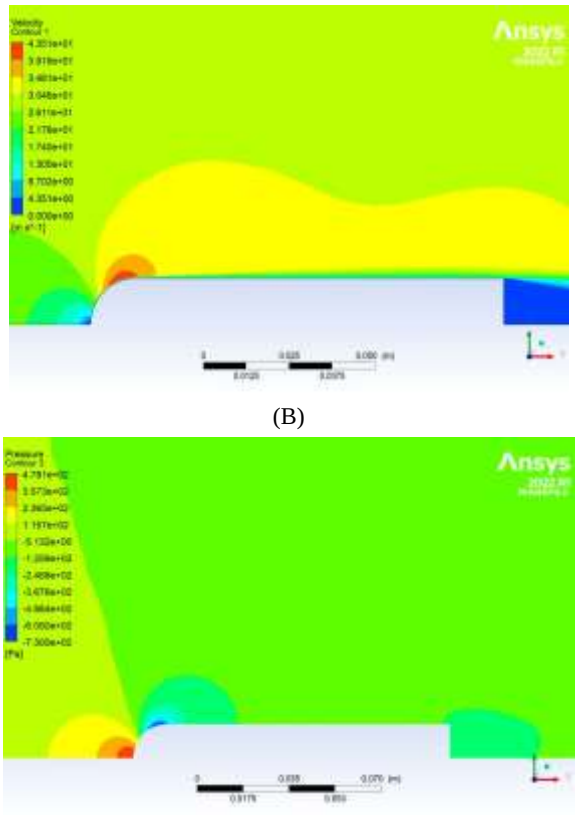
Table 2. Optimal state of parametric solution for Dp, Dv, DT, ΔDv%, and ΔDT% in 2-D blunt body.

Parameters Study	Dv	Dp	DT	ΔDp %	ΔDv %	ΔDT %
p parameter on 600 µm	0.28	1.89	2.17	12.01	-32.32	3.34
w parameter on 400 µm	0.13	2.04	2.17	20.33	-67.35	3.19
e parameter on 100 µm	0.25	2.07	2.32	22.35	-38.17	10.51

نتایج به‌دست آمده از خطوط سرعت و فشار، الگوی جریان را در نقاط مختلف بررسی می‌کند. با استفاده از این نتایج می‌توان به عواملی مانند چگالی جریان، نقاط فشار بالا و پایین و توزیع سرعت در جریان دسترسی پیدا کرد.



(A)



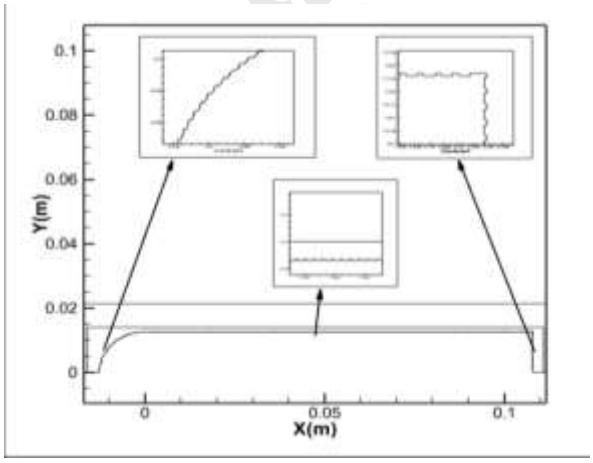
(B)

(C)

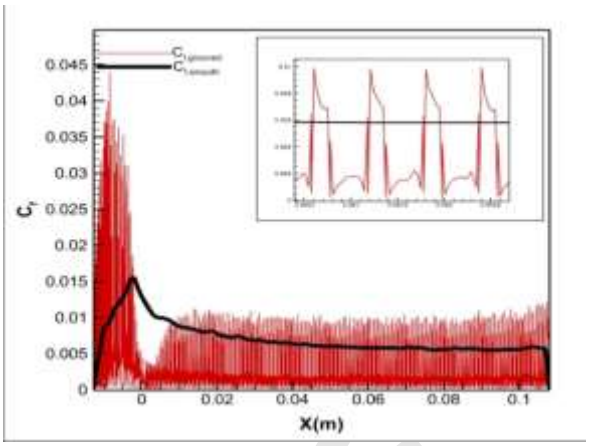
شکل ۵– شبکه‌بندی، کانتور سرعت و فشار در هندسه سر پخ دوبعدی.

Fig. 5. Grid generation, velocity and pressure contours over microstructure 2-D blunt body.

برای مقایسه کمی، نمودار ضریب اصطکاک مربوط به هندسه سر پخ دوبعدی دارای ریزساختار در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک در جایی‌که ریزساختار در کانال وجود دارد به‌شدت کاهش می‌یابد و در جایی‌که کانال صاف می‌شود، دوباره افزایش می‌یابد. این باعث می‌شود که سطح زیر نمودار ضریب اصطکاک کوچک‌تر از بدون ریزساختار باشد، بنابراین درگ پوسته‌ای را کاهش می‌دهد.



(A)



(B)

شکل ۶– هندسه سر پخ دوبعدی و توزیع ضریب اصطکاک پوسته‌ای.

Fig. 6. Blunt body's geometry, and respective skin friction coefficient distribution.

اثر ریزساختارها بر هندسه سر پخ دوبعدی با مقایسه درگ پوسته‌ای و درگ کل بر روی سه نوع هندسه در جدول ۳ بررسی شده است. همچنین وجود ریزساختارها در قسمت استوانه‌ای هندسه تاثیر چندانی در کاهش درگ پوسته‌ای و درگ کل ندارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در صور نیاز به این ریزساختارها فقط بدنه‌های هندسه سر پخ دوبعدی استفاده شود.

جدول ۳– مقایسه درگ‌های فشاری(Dp) ، پوسته‌ای(Dv)، درگ کل(DT) و ضریب درگ پوسته‌ای(ΔDv%) و و ضریب درگ کل(ΔDT%) برای حالت‌های مختلف هندسه سر پخ دوبعدی.

Table 3. Comparison of pressure drag (Dp), friction drag (Dv), Total Drag (DT), friction drag coefficient (ΔDv%), and total drag coefficient (ΔDT%) in 2-D blunt bodies structures.

Types of Geometry	Dp	Dv	DT	ΔDv %	ΔDT %
Without microstructure	1.69	0.41	2.10	-	-
Microstructures on cylindrical section	1.99	0.18	2.18	-55.4	3.30
Microstructures on the entire geometry	2.04	0.13	2.18	-67.4	3.20

۲. نتیجه‌گیری

در نتایج این تحقیق، نمودارهای میزان کاهش درگ پوسته‌ای سطح دارای ریز ساختار را نسبت به کانال بدون ریزساختار به‌صورت درصدی و

همچنین نسبت درگ کانال دارای ریزساختار به درگ کانال بدون ریزساختار آورده شده است. هر دو نمودار گویای این نکته هستند که حضور ریزساختارها به‌طور حتم باعث کاهش درگ پوسته‌ای نمی‌شوند و تنها در شرایط خاصی از پارامترها درگ پوسته‌ای نیز نسبت به کانال بدون ریزساختار کاهش می‌یابد. این امر به‌دلیل افزایش سطح تماسی سیال به‌دلیل حضور ریزساختارها بوده و در واقع اثر زیاد شدن سطح نسبت به اثر لغزش ریزساختارها غالب می‌شود و باعث افزایش درگ پوسته‌ای می‌شود.

ازآنجاکه هدف نهایی در این تحقیق، کاهش درگ پوسته‌ای ناشی از حضور ریزساختارها در کانال هندسه سر پخ دوبعدی می‌باشد، ابتدا شبیه‌سازی‌ها و تحلیل پارامترها روی کانال دوبعدی صورت گرفت. با توجه به نتایج حاصل از آن در هندسه سر پخ دوبعدی تحلیل پارامتریک در ریزساختارهای مربعی در بخش استوانه‌ای هندسه سر پخ دوبعدی اعمال شد. و بهترین حالت هر سه پارامتر به‌دست آمده را برای ریزساختار مربعی انتخاب کرده و در حل هندسه نهایی به کار برده شد. از آنجاکه هندسه‌های ریزساختارها به‌صورت دوبعدی بررسی شد، حضور آن‌ها در هندسه سر پخ دوبعدی که به‌صورت سه بعدی می باشد قابل استفاده نبود و لذا از یک هندسه سر پخ دوبعدی در حل نهایی استفاده شد. ابتدا شبیه‌سازی صورت گرفته روی هندسه سر پخ دوبعدی در حالت بدون ریزساختار با نتایج تجربی مقایسه شده و از صحت حل عددی اطمینان حاصل شد و سپس همین شبیه‌سازی‌ها در حضور ریزساختارهای مذکور در دو سناریو (یکبار ریزساختارها فقط روی بخش استوانه‌ای زده شد و بار دیگر روی تمام سطح هندسه) و نتایج حل هر سناریو با حالت بدون ریزساختار مقایسه شد.

دلیل کار بر روی کانال این است که موضوع تحقیق حاضر کاهش درگ پوسته‌ای و عدم وجود درگ فشاری بر روی صفحه تخت می‌باشد.

نتایج نشان داد که از بین سه حالت هندسه بدون ریزساختار، هندسه دارای ریزساختار در قسمت استوانه‌ای و هندسه دارای ریزساختار در تمام سطح، بیشترین کاهش درگ پوسته‌ای برابر با ۶۷/۴٪ و مربوط به حالت سوم می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] Z. Wu, S. Li, M. Liu, S. Wang, H. Yang, and X. Liang, "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. 10274-1035, 2019, https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1665101.

[2] M. J. 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.

[3] M. J. Walsh, "Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets," in *Symposium on Viscous flow Drag Reduction*, Dallas, TX, US. 1980, https://doi.org/10.2514/5.9781600865466.0168.0184.

[4] 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.

[5] M. J. Walsh, "Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance," *Journal of Aircraft*, vol. 27, no. 6, pp. 572-573, 2012, https://doi.org/10.2514/3.25323.

[6] D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, and R. Meyer, "Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application," *Naturwissenschaften*, vol. 87, pp. 157-171, 2000, https://doi.org/10.1007/s001140050696.

[7] 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. 403-41, 2000, https://doi.org/10.1007/s003480050400.

[8] J. J. Rohr, G. W. Andersen, L. W. Reidy, and E. W. Hendricksl, "A comparison of the drag-reducing benefits of riblets in internal and external flows," *Experiments in Fluids*, vol. 13, no. 6, pp. 361-368, 1992, https://doi.org/10.1007/BF00223243.

[9] E. Coustols and J. Cousteix, "Performances of riblets in the supersonic regime," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 431-433, 1994, https://doi.org/10.2514/3.12002.

[10] 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.

[11] N. Subaschandar, R. Kumar, and S. Sundaram, "Drag reduction due to riblets on a GAW (2) airfoil," *Journal of Aircraft*, vol. 36, no. 5, pp. 890-892, 1999, https://doi.org/10.2514/2.2524.

[12] T. S. Wong *et al.*, "Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity," *Nature*, vol. 477, pp. 443-447, 2011, https://doi.org/10.1038/nature10447.

[13] 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.

[14] E. M. Fayyadh and N. M. Mahdi, "Effect of riblets geometry on drag reduction," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*,

vol. 7, Fluids and Heat Transfer, Parts A, B, C, and D. Houston, Texas, USA. 2012, Paper 87-100, https://doi.org/10.1115/IMECE2012-85228.

[15] A. C. K. Poh, C. S. Yuan, A. K. Mat Yamin, A. J. Jalaluddin, I. Shah Ishak, and Sh. Mansor, "Effect of surface roughness on drag of loggerhead carapace," *Jurnal Mekanikal*, vol. 26, no. 2, 2008.

[16] M. Auinger, P. Ebbinghaus, A. Blümich, and A. Erbe, "Effect of surface roughness on optical heating of metals," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, vol. 9, 2014, Art. no. 14004, https://doi.org/10.2971/jeos.2014.14004.

[17] 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, 2018, https://doi.org/10.1177/1464420716641452.

[18] W. Brostow, "Drag reduction in flow: Review of applications, mechanism and prediction," *Journal of industrial and Engineering Chemistry*, vol. 14, no. 4, pp. 409-416, 2008, https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.07.001.

[19] Y. Luo, L. Wang, L. Green, K. Song, L. Wang, and R. Smith, "Advances of drag-reducing surface technologies in turbulence based on boundary layer control," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 27, no. 4, pp. 473-487, 2015, https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60507-8.

[20] F. Ghanadi, M. Arjomandi, A. C. Zander, and B. S. Cazzolato, "A review of skin friction drag reduction within the turbulent boundary layer," in *7th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 7)*, Adelaide, Australia, 2012.

[21] H. A. Abdulbari, R. M. Yunus, N. H. Abdurahman, and AS. Charles, "Going against the flow—A review of non-additive means of drag reduction," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, no. 1, pp. 27-36, 2013, https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.023.

[22] K. B. Golovin, J. W. Gose, M. Perlin, S. L. Ceccio, and A. Tuteja, "Bioinspired surfaces for turbulent drag reduction," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2073, 2016, Art. no. 20160189, https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0189.

[23] F. Enkelmann, R. Heigl, and D. Hünemohr, "A hybrid model approach for more accurate and reliable assessment of aircraft fuel efficiency," in *AIAA AVIATION 2022 Forum*, Chicago, IL & Virtual, 2022, https://doi.org/10.2514/6.2022-3236.

[24] S. N. A. Yusuf, Y. Asako, N. A. Che Sidik, S. B. Mohamed, and W. M. Arif Aziz 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.

[25] D. W. Bechert, M. Brouse, 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.

[26] R. Grüneberger and W. Hage, "Drag characteristics of longitudinal and transverse riblets at low dimensionless spacings," *Experiments in Fluids*, vol. 50, no. 2, pp. 363-373, 2010, https://doi.org/10.1007/s00348-010-0936-7.

[27] O. S. Manca, S. Nardini, and D. Ricci, "Numerical analysis of water forced convection in channels with differently shaped transverse ribs," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2011, no. 1, 2011, Art. no. 323485, https://doi.org/10.1155/2011/323485.

[28] S. Whitmore, S. Sprague, and J. Naughton, "Wind-tunnel investigations of blunt-body drag reduction using forebody surface roughness," in *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA. 2001, https://doi.org/10.2514/6.2001-252.

Article In Press