



ارزیابی پسا هیدروفویل SD7003 با سطح فوق آب گریز به کمک شبیه‌سازی عددی

ابراهیم نجفی^۱, امیر نجات^۲, سید فرشید چینی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۱۷۶۱۳۱۳۱

chini@ut.ac.ir

چکیده

بعد از ارزیابی سطحی کم وجود ناهمواری‌ها در ابعاد ناتو، سیال بر روی سطوح فوق آب گریز می‌لغزد. برای نشان دادن این لغزش از طول لغزش ناوبر استفاده می‌شود. برای سطوح معمولی طول لغزش در حدود چند نانومتر است، ولی برای سطوح فوق آب گریز می‌تواند $500\text{ }\mu\text{m}$ هم برسد. طلالات فراوانی بر روی طول لغزش و اثر آن بر نیروی پسا انتقام شده است. در این طلالات معمولاً کل سطح فوق آب گریز می‌گردد. برای یافتن نواحی بینه روش‌های عددی می‌تواند مفید باشد ولی مطالعات عددی بیشتر بر روی سطوح تحت می‌باشد. بر روی سطوح منحنی (مانند فویل‌ها) به دلیل وجود گرانیان فشار منفی (او امکان به وجود آمدن جدایش) بررسی مسئله پیچیده می‌شود. در این مقاله به صورت عددی به بررسی تأثیر طول لغزش هیدروفویل SD7003 در رینولدزهای مختلف پرداخته شده است. جریان آرام، تراکم تاندیز و همدما در نظر گرفته شده و هیدروفویل از جنس الومینیوم با طول وتر 10 cm انتخاب شده است. نتایج ضربی پشن برشی، ضربی فشار و ضربی پسا در دو شرط مرزی بدون لغزش و لغزشی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با افزایش طول لغزش، ضربی پسا نسبت به سطح معمولی کاهش می‌باشد. میزان تأثیرگذاری شرط مرزی فوق آب گریز بر ضربی پسا با افزایش عدد رینولدز جریان زیاد می‌شود. با افزایش رینولدز از 4.5×10^4 به 7.5×10^4 در طول لغزش $50\text{ }\mu\text{m}$ ، کاهش ضربی پسا از 0.7% به 0.7% می‌رسد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۲۸ مهر ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۱ اذر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۹ بهمن ۱۳۹۵

کلید واژگان:

فوق آب گریز

هیدروفویل

ضریب پسا

طول لغزش

تشش برشی

Effect of Superhydrophobic Surface on Drag Coefficient of SD7003 Foil: A Numerical Approach

Ebrahim Najafi, Amir Nejat, Seyed Farshid Chini*

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
*P.O.B. 1417613131, Tehran, Iran, chini@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 October 2016

Accepted 11 December 2016

Available Online 07 February 2017

Keywords:

Superhydrophobic

Hydrofoil

Drag coefficient

Slip length

Shear stress

ABSTRACT

Due to low surface energy and hierarchical roughness, fluids on superhydrophobic surfaces are mobile. The slip velocity on these surfaces is formulated using Navier's slip length. On regular surfaces, slip length is only a few nano-meters. On superhydrophobic surfaces, slip length can be as large as $500\text{ }\mu\text{m}$. Literature studies usually make the entire surface superhydrophobic which may not be the optimum situation. To find the desirable regions, the problem should be analyzed numerically. Most of the numerical studies are for flat plates. On curved surfaces (e.g. foils), due to the adverse pressure gradient and possibility of separation, analysis is more complicated. Here, the effect of using superhydrophobic surface for a SD7003 hydrofoil is studied numerically and at different Reynolds numbers and slip lengths. The flow pattern is considered laminar, incompressible and isothermal and a hydrofoil made of aluminum with a chord length of 10cm is selected. Results of the shear stress, pressure coefficient and the drag coefficient on the typical boundary condition were compared with the case of slip boundary condition. It was found that by increasing the slip length, the drag coefficient decreases. It was also found that the effectiveness of using superhydrophobic surfaces in decreasing the drag coefficient improves at higher Reynolds numbers. By increasing the Reynolds number from 4.5×10^4 to 7.5×10^4 and at the slip length of $50\text{ }\mu\text{m}$, the drag coefficient reduction increases from 0.7% to 7% .

دیگر از روش‌ها نیروی پسا توسط یک منبع انرژی خارجی، مانند الکترومغناطیس کردن سطح [۳]، کاهش پیدا می‌کند. برای فویل‌ها معمولاً حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کل پسا به پسای اصطکاکی مربوط می‌شود. فوق آب گریز کردن سطح بدون تغییر در هندسه هیدروفویل و بدون نیاز به منع انرژی خارجی، می‌تواند سبب کاهش نیروی پسای اصطکاکی شود، لذا منطقی‌ترین

۱- مقدمه
نیروی پسا به عنوان عاملی ناخواسته در مقابل حرکت زیرآبی‌ها مقاومت می‌کند. به این منظور تحقیقات فراوانی در جهت کاهش نیروی پسا صورت گرفته است. در برخی از روش‌ها تغییراتی در هندسه هیدروفویل، مانند تغییر ضخامت حداکثر [۱] و انحنای هیدروفویل [۲] داده شده است و در دسته‌ای

Please cite this article using:

E. Najafi , A. Nejat, S. F. Chini, Effect of Superhydrophobic Surface on Drag Coefficient of SD7003 Foil: A Numerical Approach, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 126-134, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

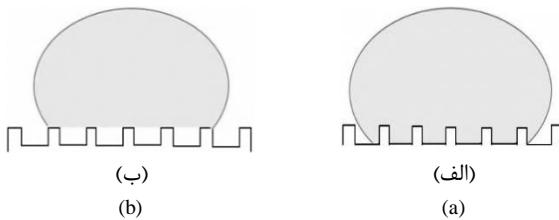


Fig. 3 Drop position on a rough surface is shown in two possible states
(a) Wenzel state, (b) Cassie-Baxter state

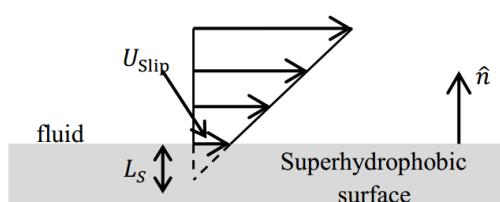
شکل 3 موقعیت قطره بر سطح زیر در دو حالت ممکن نشان داده است (الف)
ونزل، (ب) کسی-باکستر

با فوق آب‌گریز کردن سطح، سیال بر روی سطح جامد می‌لغزد [13]. معمولاً برای بررسی سرعت لغزش از تعریف طول لغزش نویر⁷ استفاده می‌شود [14]:

$$U_{\text{Slip}} = L_S \left(\frac{\partial U_S}{\partial n} \right)_{\text{wall}} \quad (1)$$

در معادله (1)، U_{Slip} سرعت لغزشی⁸، L_S طول لغزشی⁹، $\left(\frac{\partial U_S}{\partial n} \right)_{\text{wall}}$ معرف تغییرات سرعت مماسی نسبت به بردار عمود بر سطح دیواره است (شکل 4). رابطه فوق را می‌توان جهت محاسبه سرعت لغزشی آب بر روی سطوح فوق آب‌گریز استفاده کرد [15,14].

مطالعات فراوانی در مورد اثر افزایش طول لغزش بر روی کاهش نیروی پسا انجام گردیده است. برای جریان آرام و به صورت تئوری نشان داده شده است که استفاده از سطوح فوق آب‌گریز باعث کاهش ضربی پسا می‌شود [17,16] مطالعات عددی [18–21] و آزمایشگاهی [22–29] نیز این مطلب را تائید می‌کنند. علت این است که با وجود آمدن سرعت لغزشی بر روی سطح، گرادیان سرعت و در نتیجه تنش برشی بر روی سطح کاهش می‌یابد. مطالعاتی بعدی نشان دادند که کاهش پسای اصطکاکی به تغییرات رینولدز نیز بستگی دارد [19–21]. چنگ [29] و خو [30] شیارهای مختلف درون کانال و در جهت‌گیری‌های مختلف را بررسی کردند. آن‌ها به همراه فیلیپ [31] و لاوگا و استون [16] نشان دادند که میزان کاهش پسا به هندسه شیار سطح نیز وابسته است. لی [22] و پارک [32] روابطی جهت بیان ارتباط هندسه شیار و طول لغزش ارائه کردند، سپس چوبی [21]، او [26]، لی [22]، لی و کیم [33] به صورت تجربی این وابستگی ضربی پسا به هندسه سطح و شیار را نشان دادند. تمام مطالعاتی که در بالا اشاره شدند مربوط به رژیم جریان آرام بودند. با وجود کاربرد عملی جریان آشفته، مطالعات کمتری پیرامون تأثیر فوق آب‌گریزی بر نیروی پسا در رژیم آشفته انجام شده است. او و روشتاین [24] با تغییر رژیم جریان از آرام به آشفته نشان دادند که کاهش افت فشار از 3.5% به بیشتر از 30% می‌رسد. این بدان معناست که فوق آب‌گریزی اثر مفیدتری در کاهش نیروی پسا در رژیم آشفته می‌گذارد. در مطالعات عددی دیگر نیز این موضوع مشاهده شده است [35,34]. ولی این



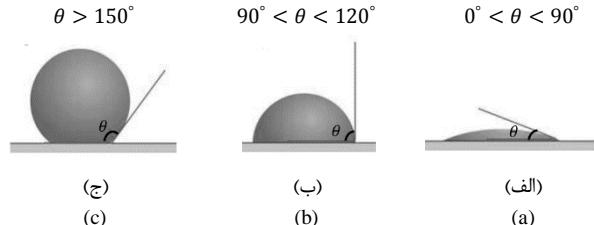
شکل 4 سرعت لغزشی و طول لغزش بر روی یک سطح فوق آب‌گریز

⁷ Navier-Slip
⁸ Slip velocity
⁹ Slip length

راهکار ممکن کاهش نیروی پسا خواهد بود. بهدلیل وجود ناهمواری‌ها در سطوح فوق آب‌گریز، سطح تماس آب با سطح به شدت کاهش می‌یابد. از آن جا که هنوز مساله دوام سطوح فوق آب گریز به طور کامل حل نشده است، این سطوح برای ازدراهای دریایی که با سرعت بالا حرکت می‌کنند نمی‌تواند مناسب باشد. لذا در حال حاضر موارد استفاده بالقوه این سطوح در صنعت دریایی در محدوده سرعت‌های پایین می‌باشد. این سطوح علاوه‌بر کاهش اصطکاک، دارای خواص مقاومت در برخوردگی سطح، خود تمیزشوندگی و در بعضی موارد یخ گریزی می‌باشند و می‌توان کاربردهای متعددی برای این سطوح متصور شد. برای نشان دادن میزان فوق آب گریزی از پارامتر زاویه تماس¹ استفاده می‌شود [5,4]. برای اندازه‌گیری زاویه تماس از روش قطره‌گذاری روی سطح² استفاده می‌شود [6]. زاویه تماس عبارت است از زاویه بین سطح جامد و مماس بر قطره در نقطه تماس سه فاز مایع، جامد و گاز (شکل 1). وقتی زاویه تماس کوچک‌تر از 90° باشد سطح آب‌دوست³ و در صورتی که زاویه تماس بیشتر از 90° باشد سطح آب‌گریز⁴ و وقتی زاویه تماس بیشتر از 150° باشد سطح فوق آب‌گریز⁵ است [7]. لازم به ذکر است که سطوح فوق آب‌گریز دارای شیارهایی در ابعاد نانو و میکرو با انرژی سطح پایین می‌باشند [8] و برای ساخت این سطوح از طبیعت الهام گرفته شده است [9,8].

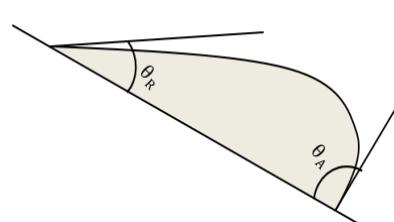
سطح فوق آب‌گریز علاوه بر زاویه تماس بالا، باید زاویه تماس پسماند⁶ کوچک داشته باشد. زاویه تماس پسماند اختلاف زاویه تماس پیش‌روندهای⁷ (θ_A) و پس‌روندهای⁸ (θ_R) قطره در آستانه حرکت است (شکل 2) [10].

برحسب نوع و شکل زبری سطح، قطره ممکن است در داخل زبری‌ها نفوذ کند، که به آن مدل ونzel [6] گفته شده، و یا بر روی زبری‌ها میاند، که مدل کسی-باکستر [11] نامگذاری می‌شود، (شکل 3). برای ایجاد زاویه تماس پسماند کوچک و لغزش آسان قطره، حالت کسی-باکستر ایده‌آل است [12].



شکل 1 یک قطره آب با سطح (الف) آب‌دوست، (ب) آب‌گریز، و (ج) فوق آب‌گریز نشان داده شده است.

شکل 2 زاویه پیشروی و پس‌روی



شکل 2 زاویه پیشروی و پس‌روی

¹ Contact angle
² Sessile drop method
³ Hydrophilic
⁴ Hydrophobic
⁵ Super Hydrophobic
⁶ Contact angle hysteresis

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = 2\mu_t \left(\frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

در معادله (6)، μ_t ویسکوزیته آشفته است و برای یافتن ویسکوزیته آشفته از مدل آشفته $SST k - \omega$ با پیش‌فرض رینولذ کم استفاده شده است. مدل $SST k - \omega$ عملکرد مناسبی در جریان‌هایی که شامل کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس هستند دارد [45]. این مدل توسط منتر [46] به منظور آبیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند مدل $k - \omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $\epsilon - k$ ، در نواحی دور از دیواره ارائه شده است. معادلات مربوط به مدل آشفته $\omega - k$ مجاور دیواره و لایه مرزی در زیر مشخص شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (8)$$

معادلات مربوط به مدل آشفته $\epsilon - k$ در نواحی دور از دیواره به صورت معادلات (9) و (10) تعریف می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \times (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (10)$$

در معادلات (7) و (8) کمیت G_k بیان‌گر تولید انرژی جنبشی آشفته به واسطه تغییرات سرعت، G_ω تولید مربوط به ω ، Γ_k و Γ_ω به ترتیب معروف تأثیر نفوذ مربوط به انرژی جنبشی، Y_k بیان‌گر اتلاف انرژی جنبشی و Y_ω معرف اتلاف مربوط به ω در جریان آشفته است. S_k و S_ω به ترتیب بیان‌گر کمیت منبع تولید مربوط به انرژی جنبشی و ω است [46]. در معادلات (9) و (10)، G_b بیان‌گر تولید انرژی جنبشی بر مرزها است، Y_M بیان‌گر گسترش نوسان در جریان تراکم‌پذیری آشفته بوده، $C_{1\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ ضرایب ثابت می‌باشند؛ σ_k و σ_ϵ اعداد پرانتل آشفته هستند [46]. معادلات (3) تا (10) به همراه شرایط مرزی به روش حجم محدود توسط نرم‌افزار فلوئنت حل می‌شود. روش حل جریان برمبانی فشار² بوده و مدل سیال به صورت حجم محدود انتگرال‌گیری شده و معادلات انتگرالی، گسسته‌سازی شده و سپس حل می‌گردد. برای کوپل کردن گرادیان‌های سرعت و فشار از روش سیمپل³ [47] و برای گسسته‌سازی معادله مومنتوم و انرژی جنبشی آشفته از روش مرتبه دوم⁴ استفاده شده است [47]. که، دلیل به کارگیری از این روش کاستن خطای محاسبات عددی است.

2- مدل‌سازی شرط مرزی لغزشی

در شرط مرزی عدم لغزش، سرعت سیال بر روی دیواره صفر است. با اعمال شرط مرزی لغزشی، سیال با سرعت لغزشی غیرصفر مطابق معادله (1)، روی سطح مرزی جابجا می‌شود. شرط مرزی لغزشی به صورت UDF برای نرم‌افزار فلوئنت⁵ تعریف شده است. در این معادله سرعت لغزشی برابر حاصل ضرب طول لغزش در تغییرات سرعت مماسی در جهت بردار عمود بر سطح است. با توجه به این که می‌توان پارامترهای $\partial u / \partial x$ ، $\partial u / \partial y$ ، $\partial v / \partial x$ و $\partial v / \partial y$ را بازگیری از این روش

روند دائمی نیست. روتشتاین [37,36] دریافت که مادامی که زیر لایه لزج از طول لغزش بیشتر باشد ضریب پسا با افزایش رینولذ کاهش می‌باید (با افزایش عدد رینولذ، ضخامت زیر لایه لزج کاهش می‌باید).

اکثر مطالعات عددی و آزمایشگاهی چه در رژیم آرام و چه در رژیم آشفته برای جریان درون کانال صورت گرفته است [42-38]. بررسی فوق آب‌گریزی بر روی سطوح منحنی بدليل وجود گرادیان فشار منفی (و امکان به وجود آمدن جدایش) پیچیده می‌شود. از محدود مطالعات انجام گرفته می‌توان به بررسی فوق آب‌گریز کردن سطح بیضی [43] و یک هیدروفویل⁶ خاص اشاره کرد [44] که البته هر دو مطالعه به صورت تجربی می‌باشند. به عنوان مثال در [44] یک هیدروفویل جوکووسکی در محدوده رینولذ 11000 تا 15000 و زاویه حمله صفر درجه بررسی شده است و مشاهده شده که فوق آب‌گریز کردن سطح باعث کم شدن نیروی پسا تا 10% می‌شود. آن‌جا که میزان فوق آب‌گریزی و دیگر شرایط می‌تواند متفاوت باشد، بهتر است که روشی عددی برای بررسی هایدروفویل‌های فوق آب‌گریز توسعه داده شود. برای این منظور در این مقاله و در گام نخست به طور عددی یک هایدروفویل فوق آب‌گریز مدل شده است و اثر میزان فوق آب‌گریزی، زاویه حمله و رینولذ جریان بر پسای وارد بر فویل بررسی شده است.

در مقاله حاضر به بررسی عددی یک فویل در طول لغزش‌ها و سرعت‌های مختلف پرداخته می‌شود. دلیل انتخاب این فویل این است که نتایج مربوط به این فویل در حالت بدون لغزش (سطوح معمولی) در مطالعات گذشته وجود دارد (مانند [45]). مدل آشفته شده در روش $k - \omega SST$ با پیش‌فرض رینولذ کم است که مناسب برای جریان سیالی است که از رژیم آرام به گذرا و آشفته تبدیل می‌شود. با بررسی تأثیر فوق آب‌گریز کردن سطح فویل SD7003 بر ضریب پسا در طول لغزش و سرعت‌های مختلف به صورت عددی می‌توان به طور تقریبی محدوده مؤثر بودن فوق آب‌گریز کردن فویل را بدست آورد.

2- حل عددی میدان جریان

2-1- معادلات حاکم

در رینولذ‌های کم، امکان تغییر رژیم جریان از آرام به آشفته وجود دارد. مدلی که می‌تواند علاوه‌بر حل معادلات آشفته، معادلات مربوط به جریان آرام را محاسبه کند، مدل $k - \omega SST$ است. معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم برای جریان تراکم‌ناپذیر در حالت آرام، به صورت معادلات (2) و (3) بیان شده‌اند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -P_{i,j} + \mu (u_{i,j}) \quad (3)$$

معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم برای جریان تراکم‌ناپذیر در حالت آشفته، به صورت معادلات (4) و (5) بیان شده‌اند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -P_{i,j} + B_i + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

با استفاده از رابطه اساسی بوزینسک (معادله 6) به محاسبه فاکتور $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ پرداخته می‌شود. رابطه بوزینسک [44] به صورت معادله (6) تعریف می‌شود:

¹ Joukovsky hydrofoil

² Pressure base

³ Simple

⁴ Upwind second order

⁵ Fluent

از نرم افزار گمبیت^۱ جهت شبکه‌بندی و از نرم افزار فلوئنت برای حل عددی استفاده شده است. دامنه مدل سازی به صورت C-mesh انتخاب شده و مطابق "شکل 7"، شبکه به صورت چهار ضلعی و سازمان یافته تشکیل شده است. به هدف این که سلول‌های چسبیده به دیواره جزو زیر لایه لرج محسوب شود، شبکه‌های مجاور دیواره هیدروفویل، بسیار کوچک انتخاب شده‌اند. شبکه با 354120 گره به عنوان مینا انتخاب شد.

2-4- استقلال از شبکه

به منظور مطالعه اثر تراکم شبکه، شبکه‌هایی با 354120، 196000 و 544122 در زاویه حمله 6 در رینولدر⁴ 10×6 و 784000 المان انتخاب شد. شبکه‌ها در رینولدر⁴ 6 و در زاویه حمله 10×6 همگرایی ضرایب پسا مقایسه گردید. نتایج مربوط به صفر درجه برسی شده و همگرایی ضرایب پسا مقایسه گردید. نتایج مربوط به تأثیر تعداد المان‌ها بر y^+ (فاصله بی بعد از دیواره) و ضریب پسا (C_D) در جدول 1 مشخص شده است. شبکه با 354120 المان جهت انجام محاسبات انتخاب شده است. شبکه با این وضعیت فاصله اولین سلول تا دیواره $1 \text{ m}\mu$ است. به لحاظ امکان وجود گرادیان فشار حول هیدروفویل، جدایش جریان، و همچنین به دلیل اعمال شرط مرزی لغزشی، لازم است سلول‌های چسبیده به دیواره جزو زیر لایه لرج محسوب شده و از توابع سرعت مجاور دیواره استفاده نشود؛ برای تیل به این مقصود، باید عدد بی بعد y^+ کمتر از 1 باشد [46]. در شبکه با 354120 المان تعداد گره روی فویل 712 است و y^+ 0.76 می‌باشد.

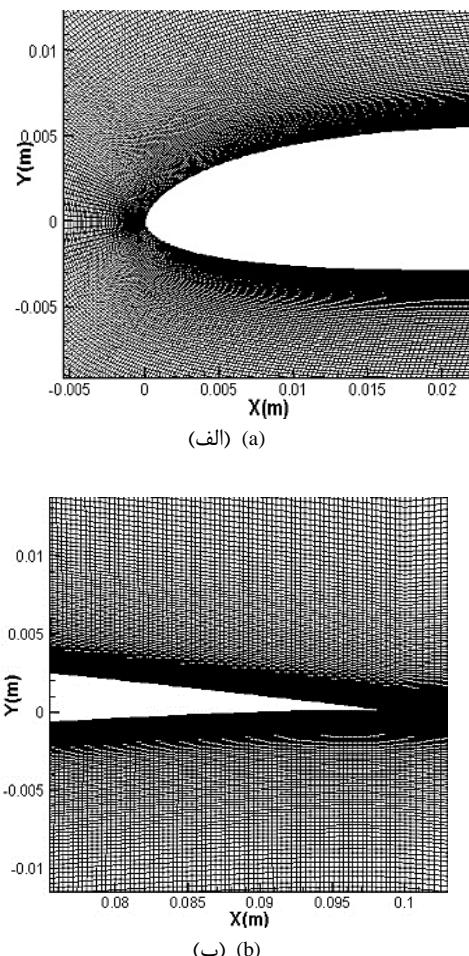


Fig. 7 Hydrofoil meshing is in the (a) front and (b) back of the foil

شکل 7 شبکه‌بندی هیدروفویل: (الف) جلوی فویل، (ب) پشت فویل

¹ Gambit

v ، u را به عنوان خروجی فلوئنت استخراج نمود، ضروری است که مشتق سرعت مماسی (U_s) در راستای بردار نرمال (\hat{n}) سطح را برحسب خروجی نرم افزار نوشت.

معادله (11) تغییرات سرعت مماسی در راستای بردار عمود بر سطح را به صورت ضرب داخلی بیان می‌کند. در رابطه (11) ضروری است که ∇U_s و \hat{n} را نسبت به دستگاه کارتزین گسسته‌سازی کرد.

$$\frac{\partial U_s}{\partial n} = \nabla U_s \cdot \hat{n} \quad (11)$$

U_s مطابق فرمول (12)، برحسب v و u نوشته شده است. "شکل 5"، سرعت مماسی بر سطح فویل را نشان داده است.

$$U_s = u \cos \theta + v \sin \theta \quad (12)$$

u مؤلفه سرعت در راستای x ، v مؤلفه سرعت در راستای y و θ شیب سطح است. نهایتاً سرعت لغزشی به صورت معادله (13) تعریف می‌گردد و می‌توان کمیت‌های موردنیاز را از نرم افزار فلوئنت به دست آورد.

$$\frac{\partial U_s}{\partial n} = \left(\frac{\partial (u \cos \theta + v \sin \theta)}{\partial x} i + \frac{\partial (u \cos \theta + v \sin \theta)}{\partial y} j \right) \cdot (n_x \hat{i} + n_y \hat{j}) \quad (13)$$

برای یافتن زاویه θ از معادله هیدروفویل مشتق گرفته شده است. معادله از نوع فوریه و تا جمله 6 بسط داده شده است. معادله به صورت رابطه (14) تعریف می‌شود:

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^6 a_n \sin(nwx) + b_n \cos(nwx) \quad (14)$$

2-3- هندسه و شبکه‌بندی

فویل با طول و تر 10 cm در نظر گرفته شده است. در "شکل 6" نمایی از SD7003 نشان داده شده است.

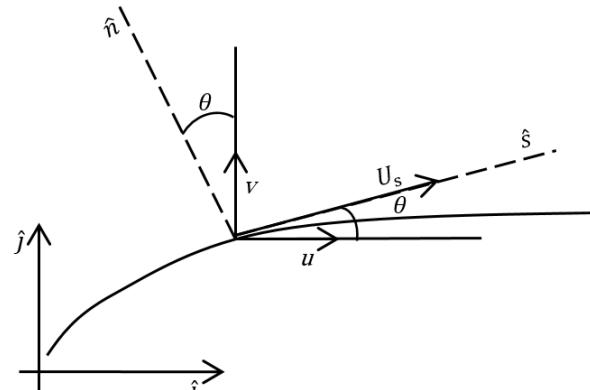


Fig. 5 Velocity components on a curved surface

شکل 5 مؤلفه‌های سرعت بر روی یک سطح منحنی

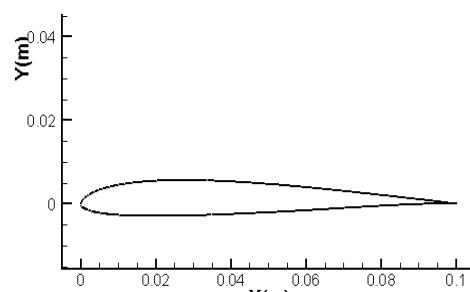


Fig. 6 Geometry of SD7003 Foil.

شکل 6 هندسه هیدروفویل SD7003

ضریب پسا (C_D)، ضریب پسای اصطکاکی (C_f) و ضریب پسای فشاری (C_p) وارد بر هیدروفویل SD7003 با اعمال شرط مرزی لغزشی بررسی شده است.

3-1- تأثیر تغییرات طول لغزشی بر ضریب پسا، ضریب پسای اصطکاکی و ضریب پسای فشاری

در "شکل 9" اثر افزایش طول لغزشی در رینولدز 6×10^4 و در زاویه حمله صفر درجه مطالعه شده است. افزایش طول لغزش سبب افزایش سرعت لغزشی می‌گردد. همان‌طور که در "شکل 9" مشاهده می‌شود، افزایش طول لغزش (آب‌گریز کردن) در ابتدا و انتهای فویل باعث کاهش پسای اصطکاکی می‌شود.

برای توجیه مقدار بالای ضریب پسای اصطکاکی در قسمت جلویی فویل باید دقت شود زیاد بودن پسای اصطکاکی به معنای زیاد بودن گرادیان سرعت در جهت عمود بر سطح است. از آن‌جا که در حالت عدم لغزش، سرعت روی تمام سطح فویل صفر است، زیادشدن سرعت در مجاورت سطح فویل معادل زیاد شدن ضریب پسای اصطکاکی در آن ناحیه است. در نقطه سکون مؤلفه مماس بر سطح سرعت سیال مجاور فویل صفر است. با حرکت بر روی قسمت بالایی و پایینی لبه حمله، سرعت سیال در مجاورت فویل به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب پسای اصطکاکی بسیار زیاد

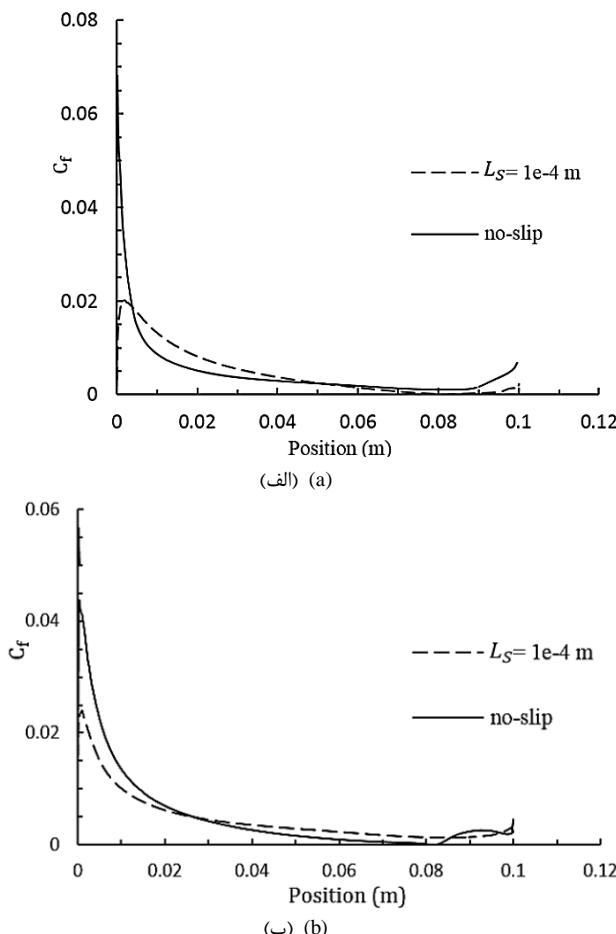


Fig. 9 The slip boundary condition effect on friction coefficient at different slip lengths at Reynolds of 60000 and angle of attack of zero (a) top of foil, and (b) bottom of foil

شکل 9 تأثیر اعمال شرط مرزی لغزشی بر ضریب پسای اصطکاکی در طول لغزش‌های مختلف در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر (الف) قسمت فوقانی هیدروفویل، و (ب) قسمت تحتانی هیدروفویل

جدول 1 تأثیر اندازه شبکه بر نتایج ضریب پسا با اعمال شرایط مرزی لغزشی و غیر لغزشی

Table 1 The effect grid size on drag coefficient by applying the slip and no-slip boundary conditions

$C_{D\text{--}} 5 \mu\text{m}$	$C_{D\text{--}} \text{عدم لغزش}$	y^+	شبکه
0.0141	0.0142	8.5	196000
0.0143	0.0144	0.76	354120
0.0143	0.0144	0.15	544122
0.0143	0.0144	0.025	784000

2- اعتبارسنجی

شرط مرزی تأثیر بسزایی در نتایج ضرایب هیدرودینامیکی دارد. شرط مرزی سرعت ورودی برای ورود سیال و شرط مرزی فشار برای خروجی سیال انتخاب شده است. برای سطح هیدروفویل شرط مرزی دیوار انتخاب گردید. شبکه مستقل در رینولدز 6×10^4 و در زاویه حمله‌های -2, 0, 2, 4, 6 و 8 درجه و با استفاده از مدل ($\omega SST - k$) با پیش‌فرض رینولدز کم، با نتایج آزمایشگاهی [48] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که شبکه و مدل انتخاب شده برای حل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

3- نتایج

عوامل مختلفی مانند تأثیر افزایش طول لغزش و افزایش سرعت ورودی، بر

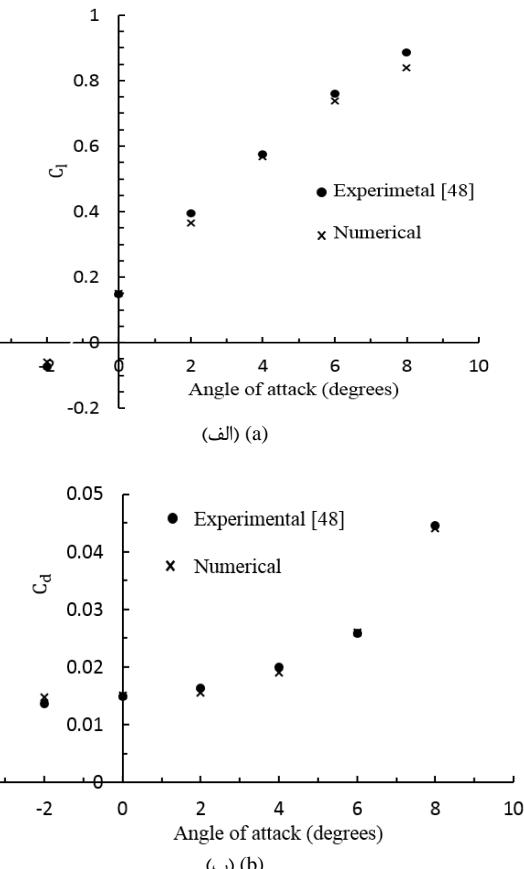


Fig. 8 Comparison of (a) Lift coefficients, (b) Drag coefficients calculated using numerical results in this study with experimental results in [48] are shown at different angle of attacks. Reynolds number is 6×10^4 and foil is SD7003

شکل 8 مقایسه (الف) ضریب پسا حساب شده در این مقاله بهصورت عددی با نتایج تجربی [48] در زاویه حمله‌های مختلف نشان داده شده است. عدد رینولدز 6×10^4 است و فویل SD7003 است

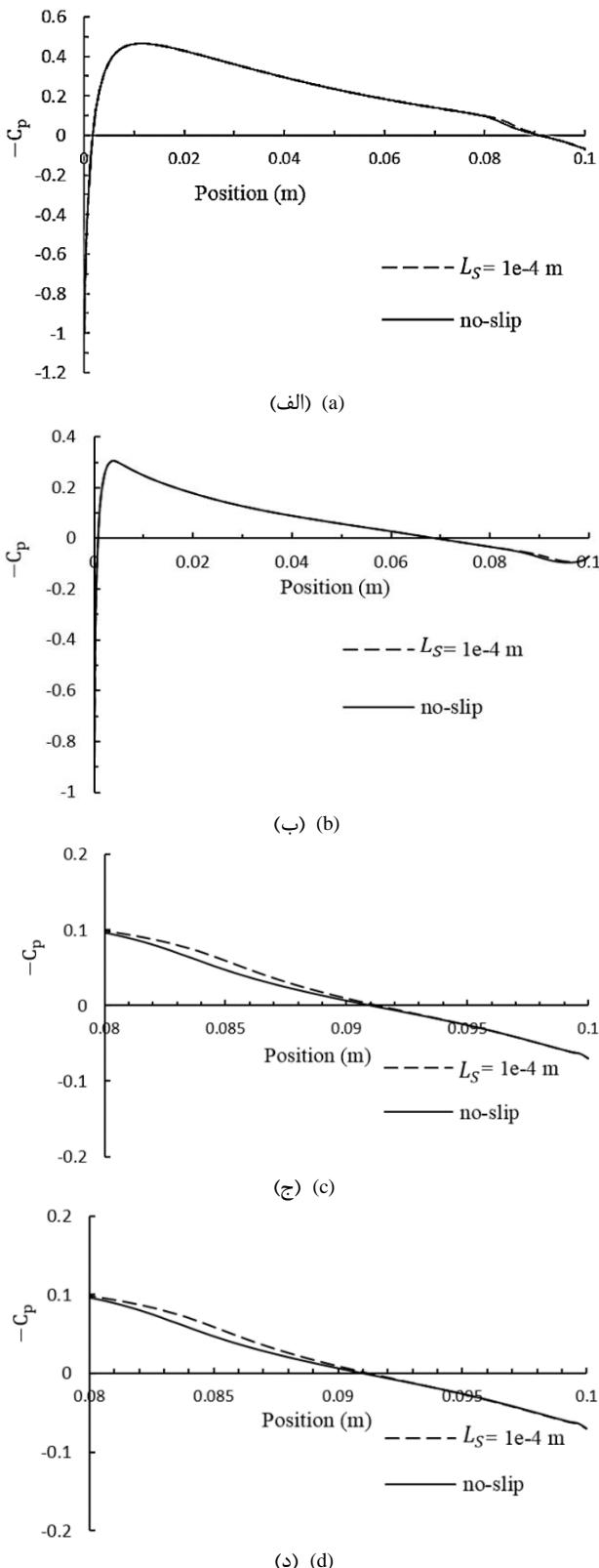


Fig. 10 The slip boundary condition effect on Pressure coefficient at different slip lengths at Reynolds of 60000 and angle of attack of zero. (a) top of foil, (b) bottom of foil, (c) top of foil on the nearby view, and (d) bottom of foil on the nearby

شکل ۱۰ تأثیر اعمال شرط مرزی لغزشی بر ضریب فشار در طول لغزش‌های مختلف در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر. (الف) قسمت فوقانی هیدروفویل. (ب) قسمت تحتانی هیدروفویل. (ج) قسمت فوقانی در نمای نزدیک. (د) قسمت تحتانی در نمای نزدیک

می‌شود. در قسمت انتهایی روند تغییر سرعت در بالا و پایین فویل متفاوت است. در لبه فرار به دلیل الزام شرط پیوستگی سرعت بالا و پایین لبه فرار باهم برابر می‌شود. تلاش سیال در قسمت بالا و پائین هیدروفویل جهت هم سرعت شدن باعث کاهش مومنتوم سیال درون لایه مرزی مجاور هیدروفویل شده و که این کاهش مومنتوم بواسطه اصطکاک و تنش برشی سیال با سطح صورت می‌گیرد (شکل ۹).

در حالتی که بر روی سطح لغزش وجود داشته باشد، گردیان سرعت عمود بر سطح کم شده و درنتیجه تنش برشی کاهش می‌یابد. ولی همین کم شدن تنش برشی در قسمت جلوی فویل باعث انتقال مومنتوم بیشتری به ناحیه بعد از لبه فویل می‌شود که این تا حدی تنش برشی را در قسمت میانی فویل افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر با اعمال فوق آبرگزیزی، اصطکاک سیال با دیواره کاهش یافته و جریان به نسبت قبل (هیدروفویل بدون لغزش) با سرعت بیشتری روی سطح شتاب گرفته و جایجا می‌شود که این افزایش سرعت باعث می‌گردد که تنش برشی بیشتری بر روی سطح تجربه شود. این وضع در هر دو قسمت بالا و پایین فویل رخ می‌دهد (شکل ۹). در لبه انتهایی فویل دوباره لغزش باعث کم شدن گردیان سرعت و در نتیجه کم شدن تنش برشی و ضریب پسای اصطکاکی می‌شود.

مطابق "شکل 10" با افزایش طول لغزش ضریب فشار (C_d) عملأ تغییری نمی‌یابد، چرا که با اعمال فوق آبرگزیزی، گردیان سرعت نزدیک سطح تغییر می‌کند و تأثیرات فوق آب گریزی بر روی سرعت لبه لایه مرزی که فشار سطح جسم را مشخص می‌کند ناجائز است.

مطابق جدول 2، با فوق آبرگزیز کردن سطح هیدروفویل و در طول لغزش‌های کوچک ضریب پسا مقایسه با سطح معمولی 1% کاهش می‌یابد. یکی از دلایل آن پایین بودن رینولدز جریان است. در جریان‌های آرام طول لغزش‌های کوچک تأثیر چندانی بر ضریب پسا و چسبندگی سیال با سطح ندارد. با افزایش طول لغزش ضریب پسا رفتاره تغییر کرده، تا آن جا که در طول لغزش‌های بیشتر از $50 \mu\text{m}$ این تغییرات بزرگ‌تر می‌شود. درنهایت می‌توان انتظار داشت در طول لغزش‌های بسیار بزرگ ضریب پسا به صفر تمایل می‌کند و شرط لغزش کامل پدید می‌آید.

در مورد نتایج جدول 2، همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش طول لغزش سبب کاهش اصطکاک سیال با سطح هیدروفویل شده و ضریب پسای هیدروفویل کاهش می‌یابد. از آنجایی که زاویه حمله جریان صفر است، جدایش جریانی از سطح هیدروفویل وجود نداشته (مطابق شکل 11) و پسای فشاری در بالا و پایین هیدروفویل اثرات یکدیگر را خنثی می‌کنند و سهم کمتری در اندازه نیروی پسا دارد. مطابق "شکل 12" قسمت عده نیروی پسا در حالت

جدول 2 تأثیر تغییرات طول لغزش بر ضریب پسا ایرفویل SD7003 در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر⁴

Table 2 The effect of slip length on the drag coefficient at Reynolds of 6×10^4 and angle of attack of zero.

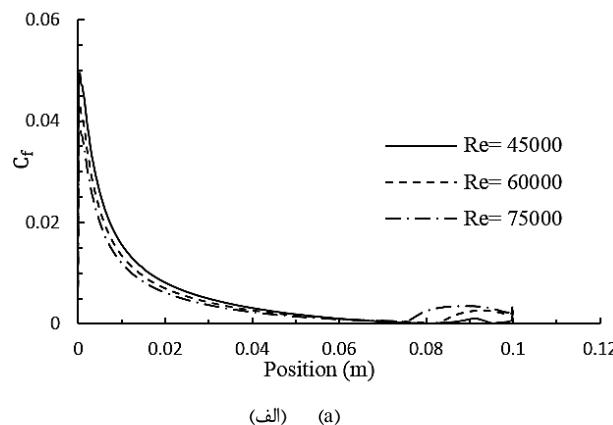
$\frac{Cd_{slip} - Cd_{no-slip}}{Cd_{no-slip}} \times 100 (\%)$	$C_d (\times 10^{-2})$	طول لغزش (m)
-	1.45	0 (عدم لغزش)
0.1	1.45	5×10^{-7}
0.1	1.44	1×10^{-6}
0.5	1.44	5×10^{-6}
1	1.43	1×10^{-5}
4	1.39	5×10^{-5}
6	1.36	1×10^{-4}
30	0.098	1×10^{-2}
98	0.031	1×10^{-1}

غیرلژج شدن جریان تا مرز گذرش از لایه‌مرزی جریان آرام به آشته حفظ شود.

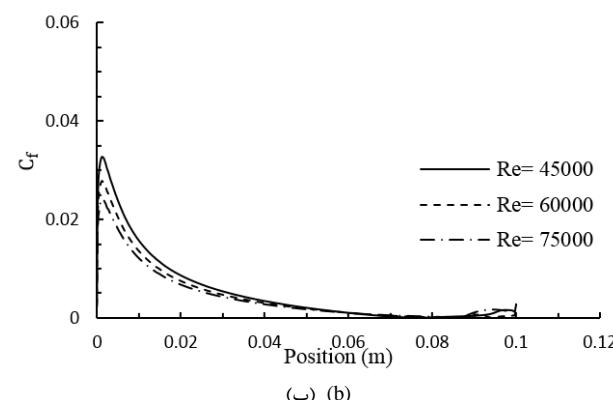
همان‌طور که در 3-1 اشاره گردید، در قسمت انتهایی هیدروفویل، یعنی لبه فرار گرادیان سرعت افزایش یافته و این موضوع سبب افزایش محلی ضریب اصطکاک می‌گردد. این افزایش عدد رینولدز از 4.5×10^4 تا 7.5×10^4 نیز سبب افزایش گرادیان سرعت و درنتیجه ضریب اصطکاک در قسمت انتهایی هیدروفویل گردیده که اثر آن در سطح بالایی هیدروفویل (طبیعتاً به خاطر اثر بیش‌تر گرادیان سرعت نسبت به سطح پایینی) مشهودتر است. مطابق "شکل 13 و 14" با اعمال شرط مرزی لغزشی ضریب اصطکاک لبه کاهش یافته و گرادیان سرعت مجاور سطح هیدروفویل ملائم‌تر می‌شود. در ابتدای فویل نیز سطح لغزشی موجب کاهش قابل توجه در ضریب اصطکاک می‌گردد که همین موضوع باعث کاستن از ضریب پسا و مقاومت جریان در مقابل هیدروفویل می‌گردد.

4- نتیجه‌گیری

با اعمال فوق‌آبگریزی سطح (به عبارت دیگر، شرط مرزی سرعت لغزشی) گرادیان سرعت مجاور سطح کاهش یافته و در نتیجه تنفس برشی روی سطح کم می‌شود. بیشتر مطالعات پیشین این موضوع بر روی سطوح تخت بوده است. بر روی سطوح منحنی (مانند فویل) به علت امکان وجود گرادیان فشار



(الف)



(ب)

Fig . 13 The effect of Reynolds number on friction drag coefficient at angle of attack of zero for the top portion of a SD7003 foil. (a) No-slip, (b) slip (slip length is 50 μm)

شکل 13 تأثیر رینولدز جریان بر ضریب پسا اصطکاک در زاویه حمله صفر برای سطح فوقانی فویل SD7003. (الف) شرط مرزی غیرلغزشی. (ب) شرط مرزی لغزشی طول لغزش 50 μm

غیرلغزشی، از جنس پسا اصطکاکی (70%) بوده که با افزایش طول لغزش پسا اصطکاکی کاهش یافته و با توجه ناچیز بودن تغییرات ضریب فشار، نیروی پسا نیز کاهش می‌یابد و در حالت حدی (افزایش طول لغزش به سمت بینهایت) به جریان غیر لژج می‌رسد که پسا به سمت صفر میل خواهد نمود. البته در عمل تاکنون طول لغزش بیش از 50 μm تجربه نشده است.

3-2- تأثیر تغییرات سرعت ورودی بر ضرایب پسا و فشار و تنفس برشی

در "شکل‌های 13 و 14" تأثیر شرط مرزی لغزشی بر ضریب پسا در طول لغزش 50 μm و در سه رینولدز 4.5×10^4 , 6×10^4 و 7.5×10^4 نشان داده شده است. مطابق "شکل 13 و 14" افزایش عدد رینولدز در تمامی موارد در بخش عمده‌ای از وتر هیدروفویل چه در مورد سطح بدون لغزش و چه در مورد سطح لغزشی همان‌طور که انتظار می‌رفت سبب کاهش ضریب اصطکاک سطحی شده است. بنابراین ضریب پسا کلی هیدروفویل چه در مورد سطح لغزشی و چه در مورد سطح بدون لغزش کاهش می‌یابد. در "شکل 15" کاهش نیروی پسا در طول لغزش 50 μm و در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. هر چه طول لغزش افزایش یابد کاهش ضریب پسا کلی هیدروفویل محسوس‌تر می‌شود. انتظار می‌رود به شرط کوچک بودن زاویه حمله جریان و عدم و یا ناچیز بودن جدایش جریان روی سطوح ایرفویل (همان‌طور که در مورد اثر افزایش طول لغزش در جدول 2 ذکر گردید) با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری فوق آب‌گریزی بر ضریب پسا با به سمت

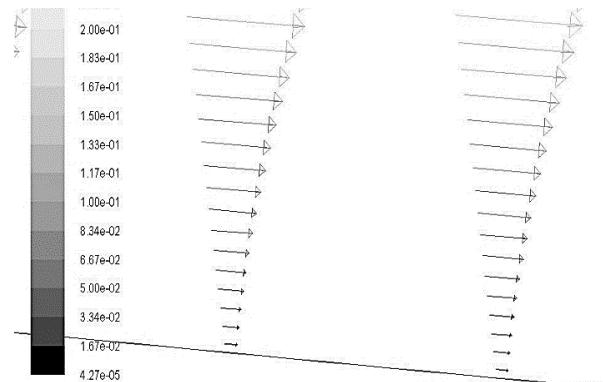


Fig. 11 Velocity vector near the surface at slip lengths of 50 μm at Reynolds of 6×10^4 and angle of attack of zero

شکل 11 بردار سرعت مجاور سطح در طول لغزش 50 μm در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر

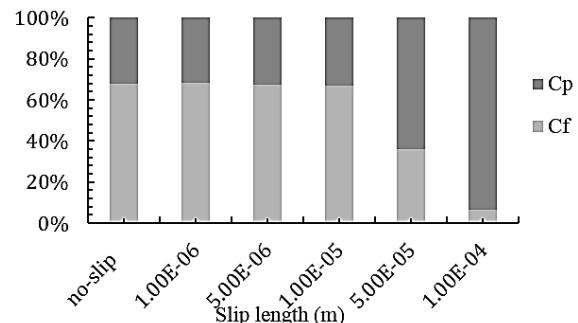


Fig. 12 Drag coefficient components (pressure and friction) are compared at different slip lengths at Reynolds of 6×10^4 and angle of attack of zero

شکل 12 ضریب پسا به تفکیک پسا اصطکاکی و فشاری در طول لغزش‌های مختلف در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر

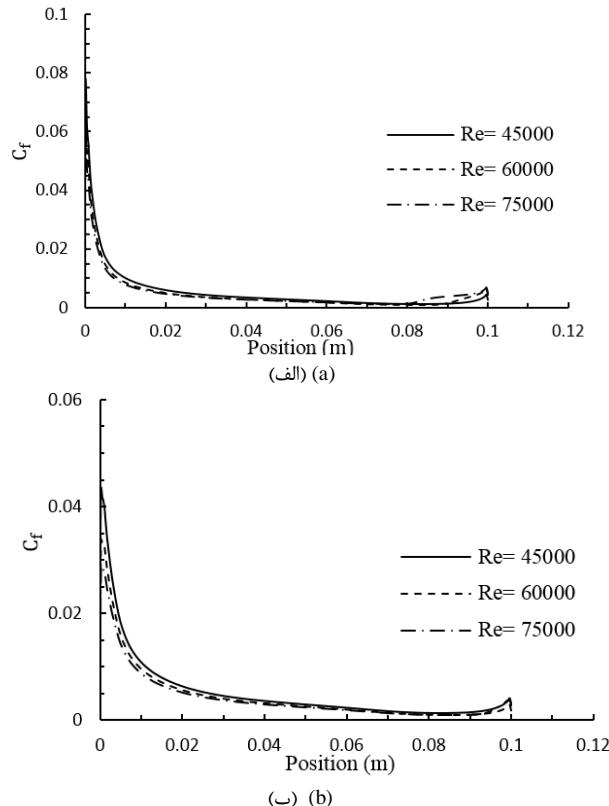
رینولدز از 4.5×10^4 تا 4.5×10^4 در یک طول لغزش ثابت ($50 \mu\text{m}$) نشان داده شد که فوق آب‌گریز کردن در رینولدزهای بالاتر مؤثرer است و کاهش ضریب پسا از کمتر از 1% به 7% می‌رسد.

5- علائم اختصاری

نیروی حجمی (N)	B
بردار یکه در راستای محور X	\hat{i}
بردار یکه در راستای محور Y	\hat{j}
انرژی جنبشی (Nm)	k
طول لغزش (m)	L_s
بردار عمود بر سطح	N
($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) فشار	P
(K) دما	T
(ms^{-1}) سرعت	u_j
(ms^{-1}) سرعت مماسی	U_s
(ms^{-1}) سرعت لغزشی	U_{slip}
(m) مختصات طول	X
(m) مختصات عرض	Y
فاصله بی بعد شده از دیواره	y^+
علائم یونانی	
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
(kgm^{-3}) چگالی	ρ
(°) زاویه	θ
(Nm) نرخ اتلاف ویژه	ω
زیرنویس	
دیواره	wall

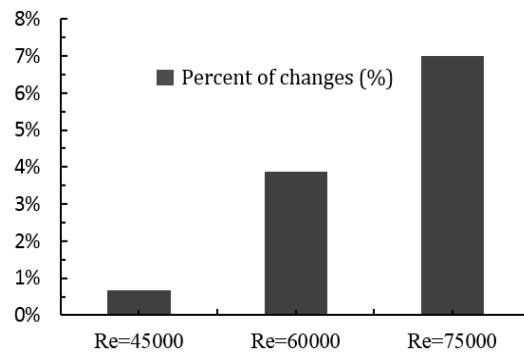
6- منابع

- E. Besnard, A. Schmitz, K. Kaups, G. Tzong, H. Hefazi, O. Kural, H. Chen, T. Cebeci, hydrofoil design and optimization for fast ships, *California State University Long Beach Department of Aerospace Engineering*, Vol 56, No. 1, pp. 1–11, 1998.
- J. E. Kopriva, E. Amromin, R. E. A. Arndt, M. Wosnik, S. Kovinskaya, High-Performance Partially Cavitating Hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 51, No. 4, pp. 313–325, 2007.
- Y. Chen, B. Fan, Z. Chen, H. Li, Flow pattern and lift evolution of hydrofoil with control of electro-magnetic forces, *Sci. China, Ser. G Physics, Mechanics And Astronomy*, Vol. 52, No. 9, pp. 1364–1374, 2009.
- N. J. Shirtcliffe, G. McHale, M. I. Newton, G. Chabrol, C. C. Perry, Dual-scale roughness produces unusually water-repellent surfaces, *Advanced Materials*, Vol. 16, No. 21, pp. 1929–1932, 2004.
- R. J. Daniello, N. E. Waterhouse, J. P. Rothstein, Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 8, 2009.
- S. Devasahayam, P. Yarlagadda, Measurement studies on Superhydrophobic materials, *Advanced Materials Research*, Vol. 988, No 17, pp. 134–142, 2014.
- E. Celia, T. Darmanin, E. Taffin, S. Amigone, F. Guittard, Recent Advances in the Methods for Designing Superhydrophobic Surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol 402, No. 2, pp. 1–18, 2013 .
- B. L. Feng, S. H. Li, Y. S. Li, H. J. Li, L. J. Zhang, J. Zhai, Y. L. Song, B. Q. Liu, L. Jiang, L. Feng, S. H. Li, Y. S. Li, H. J. Li, L. J. Zhang, J. Zhai, Y. L. Song, B. Q. Liu, L. Jiang, D. B. Zhu, Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial, *Advanced Materials Research*, Vol. 14, No. 24, pp. 1857–1860, 2002.
- X. J. Feng, Y. L. Shi, Y. S. Wang, G. R. Yue, W. Yang, Preparation of superhydrophobic silver nano coatings with feather-like structures by electroless galvanic deposition, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 58, No. 16, pp. 1887–1891, 2013.
- R. E. Johnson, R. H. Dettre, D. a. Brandreth, Others, Dynamic contact angles and contact angle hysteresis, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 62, pp. 205–212, 1977.
- T. Koishi, K. Yasuoka, S. Fujikawa, T. Ebisuzaki, X. C. Zeng, Coexistence and transition between Cassie and Wenzel state on pillared hydrophobic



شکل ۱۴ تأثیر رینولدز جریان بر ضریب پسا اصطکاک در زاویه حمله صفر برای سطح فوقانی فویل SD7003. (الف) شرط مرزی غیرلغزشی. (ب) شرط مرزی لغزشی (طول لغزش $50 \mu\text{m}$)

شکل ۱۴ تأثیر رینولدز جریان بر ضریب پسا اصطکاک در زاویه حمله صفر برای سطح فوقانی فویل SD7003. (الف) شرط مرزی غیرلغزشی. (ب) شرط مرزی لغزشی (طول لغزش $50 \mu\text{m}$)



شکل ۱۵ تأثیر رینولدز جریان بر کاهش ضریب پسا سطح معمولی به پسا با شرط لغزشی در طول لغزش $50 \mu\text{m}$

شکل ۱۵ تأثیر رینولدز جریان بر کاهش ضریب پسا سطح معمولی به پسا با شرط لغزشی در طول لغزش $50 \mu\text{m}$

تحلیل مسئله پیچیده‌تر می‌شود. در این مطالعه، تأثیر فوق‌آب‌گریزی سطح فویل SD7003 بر ضریب پسا اصطکاکی و فشاری بررسی شده است. با شبیه‌سازی عددی نشان داده شد که افزایش طول لغزش (آب‌گریز کردن) باعث کاهش ضریب پسا اصطکاکی در ابتدا و انتهای فویل می‌شود و چون بخش قابل توجهی از ضریب پسا توسط اصطکاک ابتدا و انتهای فویل اعمال می‌شود، لذا فوق آب‌گریز کردن سطح باعث کم شدن ضریب پسا می‌شود. با افزایش طول لغزش تأثیر فوق‌آب‌گریزی بر ضریب پسا محسوس‌تر شده و مقاومت سیال در مقابل حرکت هیدروفویل کاهش می‌یابد. با افزایش عدد

- to channel height ratio, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 12, pp. 1–12, 2009.
- [30] C. J. Teo, B. C. Khoo, Analysis of Stokes flow in microchannels with superhydrophobic surfaces containing a periodic array of micro-grooves, *Microfluid. Nanofluidics*, Vol. 7, No. 3, pp. 353–382, 2009.
- [31] J. R. Philip, Integral properties of flows satisfying mixed no-slip and no-shear conditions, *Mathematics and Physics*, Vol. 23, No. 6, pp. 960–968, 1972.
- [32] H. Park, H. Park, J. Kim, A numerical study of the effects of superhydrophobic surface on skin-friction drag in turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 25, No. 11, 2013.
- [33] C. Lee, C. J. Kim, Maximizing the giant liquid slip on superhydrophobic microstructures by nanostructuring their sidewalls, *Langmuir*, Vol. 25, No. 21, pp. 12812–12818, 2009.
- [34] R. Tadmor, Line energy and the relation between advancing, receding, and young contact angles, *Physics of Fluids*, Vol. 186, No. eq 1, pp. 7659–7664, 2004.
- [35] K. Jeffs, D. Maynes, B. W. Webb, Prediction of turbulent channel flow with superhydrophobic walls consisting of micro-ribs and cavities oriented parallel to the flow direction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 4, pp. 786–796, 2010.
- [36] M. B. Martell, J. P. Rothstein, J. B. Perot, An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation, *Physics of Fluids*, Vol. 22, No. 6, pp. 1–13, 2010.
- [37] M. B. Martell, J. B. Perot, J. P. Rothstein, Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 620, p. 31, 2009.
- [38] T. Min, J. Kim, Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 1–5, 2004.
- [39] A. Busse, N. D. Sandham, Influence of an anisotropic slip-length boundary condition on turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 24, No. 5, 2012.
- [40] K. Fukagata, N. Kasagi, P. Koumoutsakos, A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 5, pp. 0–4, 2006.
- [41] N. M. Nouri, M. S. Bakhs, S. Sekhavat, Analysis of shear rate effects on drag reduction in turbulent channel flow with, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 25, No. 6, pp. 944–953, 2013.
- [42] N. M. Nouri, S. Sekhavat, A. Mofidi, drag reduction in a turbulent channel flow with hydrophobic, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 3, pp. 458–466, 2012.
- [43] A. K. Balasubramanian, A. C. Miller, O. K. Rediniotis, for hydrodynamic drag reduction, *notes*, Vol. 42, No. 2, pp. 6–9, 2004.
- [44] S. Gogte, P. Vorobieff, R. Truesdell, A. Mammoli, F. van Swol, P. Shah, C. J. Brinker, Effective slip on textured superhydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 5, pp. 1–4, 2005.
- [45] J. N. N. Counsil, K. Goni Boulama, Low-reynolds-number aerodynamic performances of the NACA 0012 and Selig–Donovan 7003 Airfoils, *Journal of aircraft*, Vol. 50, No. 1, pp. 204–216, 2013.
- [46] J Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ Model, Ansys Fluent, 20 September, 2006; <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node487.htm>
- [47] J Y. Lian, W. Shyy, Laminar-turbulent transition of a low reynolds number rigid or flexible airfoil, *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 7, pp. 433–441, 2007.
- [48] M.Selig, S. Guglielmo, J. Broeren, A. P. Giguere, Summary of low speed airfoil data, *Soar Technology Publications*, Vol 1, No. 4, pp. 1234-1239, 1995.
- surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 106, No. 21, pp. 8435–8440, 2009.
- [12] X. Xu, X. Wang, Recent Mathematical Analysis of Contact Angle Hysteresis, *Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Vol. 2, No. 2, pp. 1–12, 2015.
- [13] G. Bracco, B. Holst, Contact Angle and Wetting Properties ,*Surface Science Techniques*, Vol. 51, No. 1, pp. 2–7, 2013.
- [14] E. Wolfram, R. Faust, Liquid drops on a tilted plate, contact angle hysteresis and the Young contact angle, in *Wetting, Spreading and Adhesion*, Academic Press, pp.213–222, 1978 .
- [15] M. J. Davis, E. Lauga, Hydrodynamic friction of fakir-like superhydrophobic surfaces, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 661, No. 1, pp. 402–411, 2010.
- [16] E. Lauga, H. a. Stone, Effective slip in pressure-driven Stokes flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 489, No. 5, pp. 55–77, 2003.
- [17] H. Park, H. Park, J. Kim, A numerical study of the effects of superhydrophobic surface on skin-friction drag in turbulent channel flow, Vol. 25, No. 11, pp. 110815–110825, 2013.
- [18] B. Woolford, D. Maynes, B. W. Webb, Liquid flow through microchannels with grooved walls under wetting and superhydrophobic conditions, *Microfluid. Nanofluidics*, Vol. 7, No. 1, pp. 121–135, 2009.
- [19] J. Davies, D. Maynes, B. W. Webb, B. Woolford, *Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting transverse ribs*, Vol. 18, No. 8, pp. 1063–1073, 2006.
- [20] D. Maynes, K. Jeffs, B. Woolford, B. W. Webb, Laminar flow in a microchannel with hydrophobic surface patterned microribs oriented parallel to the flow direction, *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 9, pp. 93603–93615, 2007.
- [21] C. H. Choi, C. J. Kim, Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface, *Physical Review Letters*, Vol. 96, No. 6, pp. 1–4, 2006.
- [22] C. Lee, C. H. Choi, C. J. Kim, Structured surfaces for a giant liquid slip, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 101, No. 6, pp. 1–4, 2008.
- [23] A. M. J. Davis, E. Lauga, The friction of a mesh-like super-hydrophobic surface, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 661, No. 3, pp. 402–411, 2010.
- [24] J. Ou, J. P. Rothstein, Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 10, pp. 1–10, 2005.
- [25] K. Watanabe, T. Akino, Drag reduction in laminar flow between two vertical coaxial cylinders, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 541–547, 1999.
- [26] J. Ou, B. Perot, J. P. Rothstein, Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 12, pp. 4635–4643, 2004.
- [27] J. Li, M. Zhou, L. Cai, X. Ye, R. Yuan, On the measurement of slip length for liquid flow over super-hydrophobic surface, *Chinese Science Bulletin*..., Vol. 54, No. 24, pp. 4560–4565, 2010.
- [28] Y. C., B. B. Jung, Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows., *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 22, No. 3, pp. 35104–35110, 2010.
- [29] Y. P. Cheng, C. J. Teo, B. C. Khoo, Microchannel flows with superhydrophobic surfaces: Effects of Reynolds number and pattern width