



ارزیابی پسای هیدروفویل SD7003 با سطح فوق آب‌گریز به کمک شبیه‌سازی عددی

ابراهیم نجفی¹، امیر نجات²، سید فرشید چینی^{3*}

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* صندوق پستی 1417613131، chini@ut.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 مهر 1395

پذیرش: 21 آذر 1395

ارائه در سایت: 19 بهمن 1395

کلید واژگان:

فوق آب‌گریز

هیدروفویل

ضریب پسا

طول لغزش

تنش برشی

چکیده

به علت انرژی سطحی کم و وجود ناهمواری‌ها در ابعاد نانو، سیال بر روی سطوح فوق آب‌گریز می‌لغزد. برای نشان دادن این لغزش از طول لغزش ناویر استفاده می‌شود. برای سطوح معمولی طول لغزش در حدود چند نانومتر است، ولی برای سطوح فوق آب‌گریز می‌تواند تا $500\text{ }\mu\text{m}$ هم برسد. مطالعات فراوانی بر روی طول لغزش و اثر آن بر نیروی پسا انجام شده است. در این مطالعات معمولاً کل سطح فوق آب‌گریز می‌گردد. برای یافتن نواحی بهینه روش‌های عددی می‌تواند مفید باشد ولی مطالعات عددی بیش‌تر بر روی سطوح تخت می‌باشند. بر روی سطوح منحنی (مانند فویل‌ها) به دلیل وجود گرادیان فشار منفی (و 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 ناپذیر و هم‌دما در نظر گرفته شده و هیدروفویل از جنس آلومینیوم با طول وتر 10 cm انتخاب شده است. نتایج ضریب تنش برشی، ضریب فشار و ضریب پسا در دو شرط مرزی بدون لغزش و لغزشی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با افزایش طول لغزش، ضریب پسا نسبت به سطح معمولی کاهش می‌یابد. میزان تأثیرگذاری شرط مرزی فوق آب‌گریز بر ضریب 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 ضریب پسا از 0.7% به 7% می‌رسد.

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 10 cm 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% .

1- مقدمه

دیگر از روش‌ها نیروی پسا توسط یک منبع انرژی خارجی، مانند الکترومغناطیس کردن سطح [3]، کاهش پیدا می‌کند. برای فویل‌ها معمولاً حدود 60 تا 80 درصد کل پسا به پسای اصطکاکی مربوط می‌شود. فوق آب‌گریز کردن سطح بدون تغییر در هندسه هیدروفویل و بدون نیاز به منبع انرژی خارجی، می‌تواند سبب کاهش نیروی پسای اصطکاکی شود، لذا منطقی‌ترین

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 [1] و انحنا هیدروفویل [2] 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:

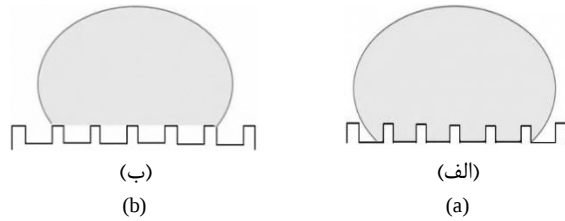


Fig. 3 Drop position on a rough surface is shown in two possible states (a) Wenzel state, (b) Cassie-Baxter state

شکل 3 موقعیت قطره بر سطح زبر در دو حالت ممکن نشان داده شده 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 L_S 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 لغزشی^۸، L_S طول لغزشی^۹ و $\left(\frac{\partial U_S}{\partial n} \right)_{\text{wall}}$ 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 فوق‌آبگریز استفاده کرد [15,14].

مطالعات فراوانی در مورد اثر افزایش طول لغزش بر روی کاهش نیروی پسا انجام گردیده است. برای جریان آرام و به‌صورت تنوری نشان داده شده است که استفاده از سطوح فوق‌آب‌گریز باعث کاهش ضریب پسا می‌شود [17,16]. مطالعات عددی [21-18] و آزمایشگاهی [29-22] نیز این مطلب را تأیید می‌کنند. علت این است که با به 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 پسی اصطکاکی به تغییرات رینولدز نیز بستگی دارد [21-19]. 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 چویی [21]، او [26]، لی [22]، لی و کیم [33] به‌صورت تجربی این وابستگی ضریب پسا به هندسه سطح و شیار را نشان دادند. تمام مطالعاتی که در بالا اشاره شدند مربوط به رژیم جریان آرام بودند. باوجود کاربرد عملی جریان آشفته، مطالعات کمتری پیرامون تأثیر فوق‌آب‌گریزی بر نیروی پسا در رژیم آشفته انجام شده است. او و روتشتاین [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 فوق‌آب‌گریزی اثر مفیدتری در کاهش نیروی پسا در رژیم آشفته می‌گذارد. در مطالعات عددی دیگر نیز این موضوع مشاهده شده است [35,34]. ولی این

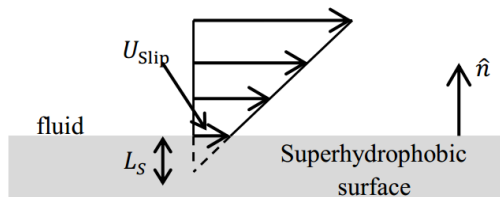


Fig. 4 Slip velocity and slip length on a superhydrophobic

شکل 4 سرعت لغزشی و طول لغزش بر روی یک سطح فوق‌آب‌گریز

راهکار ممکن کاهش نیروی پسا خواهد بود. به‌دلیل وجود ناهمواری‌ها در سطوح فوق‌آبگریز، سطح تماس آب با سطح به‌شدت کاهش می‌یابد. از آن‌جا که هنوز مساله دوام سطوح فوق‌آب‌گریز به‌طور کامل حل نشده است، این سطوح برای اژدهای 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 علاوه بر کاهش اصطکاک، دارای خواص مقاومت در برابر خوردگی سطح، خود تمیزشوندگی و در بعضی موارد یخ‌گریزی می‌باشند و می‌توان کاربردهای متنوعی برای این سطوح متصور شد. برای نشان دادن میزان فوق‌آب‌گریزی از پارامتر زاویه تماس^۱ استفاده می‌شود [5,4]. برای اندازه‌گیری زاویه تماس از روش قطره‌گذاری روی سطح^۲ 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 آب‌دوست^۳ و در صورتی که زاویه تماس بیش‌تر از 90° باشد سطح آب‌گریز^۴ و وقتی زاویه تماس بیش‌تر از 150° باشد سطح فوق‌آبگریز^۵ است [7]. لازم به‌ذکر است که سطوح فوق‌آب‌گریز 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 فوق‌آبگریز علاوه بر زاویه تماس بالا، باید زاویه تماس پسماند^۶ کوچک داشته باشد. زاویه تماس پسماند اختلاف زاویه تماس پیش‌روندگی (θ_A) و پس‌روندگی (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 مدخل [6] گفته شده، و یا بر روی زبری‌ها بماند، که مدل کسی-بکستر [11] نامگذاری می‌شود، (شکل 3). برای ایجاد زاویه تماس پسماند کوچک و لغزش آسان قطره، حالت کسی-بکستر ایده‌آل است [12].

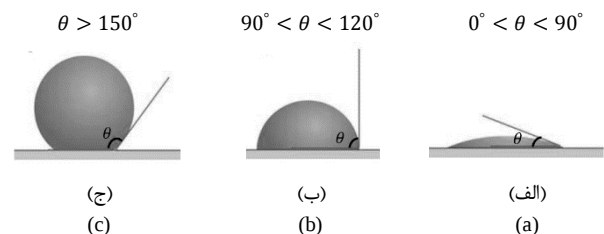


Fig. 1 A water drop on a solid surface is shown where the surface is (a) hydrophilic, (b) hydrophobic, and (c) superhydrophobic.

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

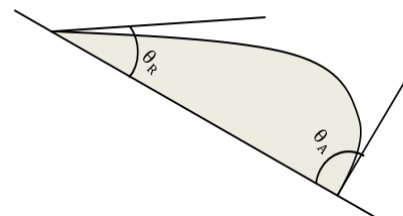


Fig. 2 Advancing and receding contact angles

شکل 2 زاویه پیش‌روی و پس‌روی

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

⁷ Navier-Slip
⁸ Slip velocity
⁹ Slip length

$$-\rho \overline{u_i u_j} = 2\mu_t \left(\frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

در معادله (6)، μ_t ویسکوزیته آشفته است و برای یافتن ویسکوزیته آشفته از مدل آشفته $SST k - \omega$ با پیش‌فرض رینولدز 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 آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند مدل $k - \omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k - \varepsilon$ در نواحی دور از دیواره ارائه شده است. معادلات مربوط به مدل آشفته $k - \omega$ 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 $k - \varepsilon$ در نواحی دور از دیواره به صورت معادلات (9) و (10) تعریف می‌شوند.

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

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

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 معرف 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، $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ضرایب ثابت می‌باشند؛ σ_k و σ_ε اعداد پراشتل آشفته هستند [46]. معادلات (3) تا (10) به همراه شرایط مرزی به روش حجم محدود توسط نرم‌افزار فلونت حل می‌شود. روش حل جریان بر مبنای فشار² بوده و مدل سیال به صورت حجم محدود انتگرال‌گیری شده و معادلات انتگرالی، گسسته‌سازی شده و سپس حل می‌گردند. 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.

2-2- 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 غیر صفر مطابق معادله (1)، روی سطح فویل جابجا می‌شود. شرط مرزی لغزشی به صورت UDF برای نرم‌افزار فلونت⁵ 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 $\partial v / \partial y$

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

اکثر مطالعات عددی و آزمایشگاهی چه در رژیم آرام و چه در رژیم آشفته برای جریان درون کانال صورت گرفته است [38-42]. بررسی فوق آب‌گریزی بر روی سطوح منحنی به دلیل 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 هیدروفویل¹ خاص اشاره کرد [44] که البته هر دو مطالعه به صورت تجربی می‌باشند. به عنوان مثال در [44] یک هیدروفویل جوکوفسکی در محدوده رینولدز 1500 تا 11000 و زاویه حمله صفر درجه بررسی شده است و مشاهده شده که فوق آب‌گریز کردن سطح باعث کم شدن نیروی پسا تا 10% می‌شود. از آنجا که میزان فوق آب‌گریزی و دیگر شرایط می‌تواند متفاوت باشد، بهتر است که روشی عددی برای بررسی هیدروفویل‌های فوق آب‌گریز توسعه داده شود. برای این منظور در این مقاله و در گام نخست به طور عددی یک هیدروفویل فوق آب‌گریز مدل شده است و اثر میزان فوق آب‌گریزی، زاویه حمله و رینولدز جریان بر پسای وارد بر فویل بررسی شده است.

در مقاله حاضر به بررسی عددی یک فویل SD7003 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 آشفته‌گی به کار گرفته شده در [45] روش $SST k - \omega$ با پیش‌فرض رینولدز 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 به دست آورد.

2- حل عددی میدان جریان

2-1- معادلات حاکم

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

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

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

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

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

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

با استفاده از رابطه اساسی بوزینسک (معادله 6) به محاسبه فاکتور $-\rho \overline{u_i u_j}$ پرداخته می‌شود. رابطه بوزینسک [44] به صورت معادله (6) تعریف می‌شود:

² Pressure base

³ Simple

⁴ Upwind second order

⁵ Fluent

¹ Joukovsky hydrofoil

از نرم‌افزار گمبیت¹ جهت شبکه‌بندی و از نرم‌افزار فلوئنت برای حل عددی استفاده شده است. دامنه مدل‌سازی به صورت C-mesh انتخاب شده و مطابق "شکل 7"، شبکه به صورت چهار ضلعی و سازمان یافته تشکیل شده است. به هدف این‌که سلول‌های چسبیده به دیواره جزو زیر لایه لزج محسوب شود، شبکه‌های مجاور دیواره هیدروفویل، بسیار کوچک انتخاب شده‌اند. شبکه با 354120 گره به عنوان مبنا انتخاب شد.

2-4- استقلال از شبکه

به منظور مطالعه اثر تراکم شبکه، شبکه‌هایی با 196000، 354120، 544122 و 784000 المان انتخاب شد. شبکه‌ها در رینولدز 6×10^4 و در زاویه حمله صفر درجه بررسی شده و همگرایی ضرایب پسا مقایسه گردید. نتایج مربوط به تأثیر تعداد المان‌ها بر y^+ (فاصله بی‌بعد از دیواره) و ضریب پسا (C_D) در جدول 1 مشخص شده است. شبکه با 354120 المان جهت انجام محاسبات انتخاب شده است. در این وضعیت فاصله اولین سلول تا دیواره 1 mm 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 لزج محسوب شده و از توابع سرعت مجاور دیواره استفاده نشود؛ برای نیل به این مقصود، باید عدد بی‌بعد y^+ کمتر از 1 باشد [46]. در شبکه با 354120 المان تعداد گره روی فویل 712 است و $0.76 y^+$ می‌باشد.

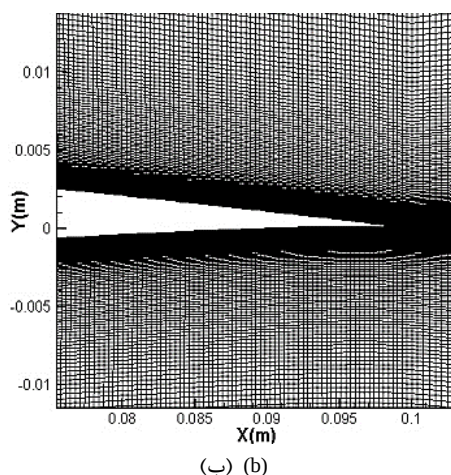
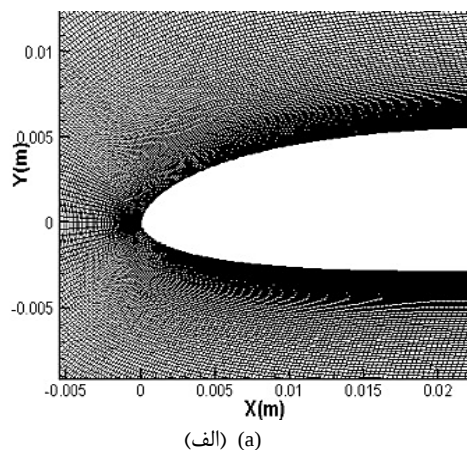


Fig. 7 Hydrofoil meshing is in the (a) front and (b) back of the foil

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

u, v را به عنوان خروجی فلوئنت استخراج نمود، ضروری است که مشتق سرعت مماسی (U_s) در راستای بردار نرمال ($\hat{n}$) سطح را بر حسب خروجی نرم‌افزار 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 کارترین گسسته‌سازی کرد.

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

U_s مطابق فرمول (12)، بر حسب u و v 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 مورد نیاز را از نرم‌افزار فلوئنت به دست آورد.

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

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

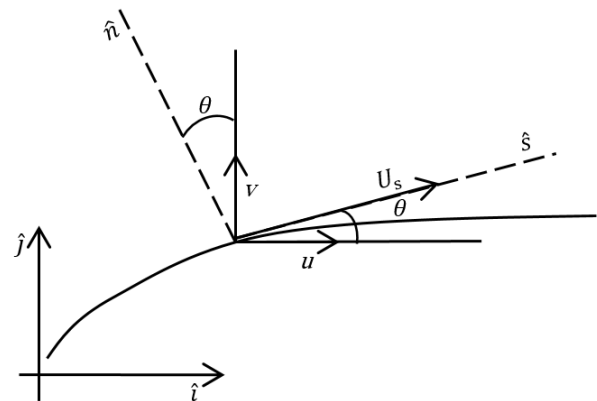


Fig. 5 Velocity components on a curved surface

شکل 5 مؤلفه‌های سرعت بر روی یک سطح منحنی

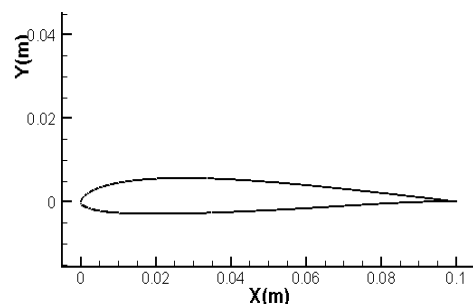


Fig. 6 Geometry of SD7003 Foil.

شکل 6 هندسه هیدروفویل SD7003.

¹ Gambit

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 فشاری و ضریب پسای اصطکاکی

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 پسا 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، زیاد شدن 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

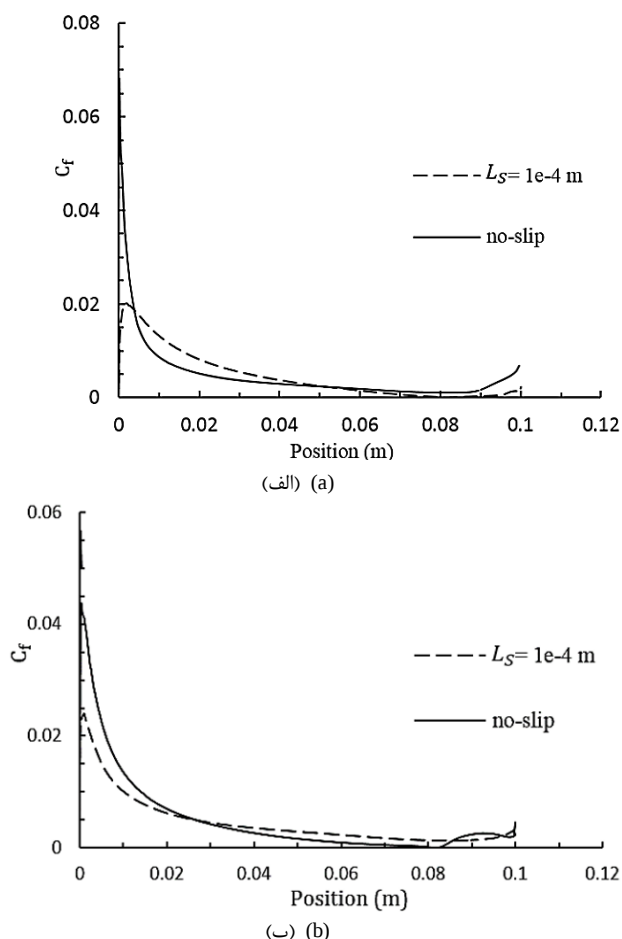


Fig. 9 The slip boundary condition effect on friction coefficient at different slip lengths at Reynolds of 60000 and angle of attack of zero (a) top of foil, and (b) bottom of foil

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

شبکه	y^+	عدم لغزش C_D	لغزش $5 \mu m$ C_D
196000	8.5	0.0142	0.0141
354120	0.76	0.0144	0.0143
544122	0.15	0.0144	0.0143
784000	0.025	0.0144	0.0143

5-2- 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 $k-\omega SST$ (گذرا) با پیش‌فرض رینولدز کم، با نتایج آزمایشگاهی [48] مطابق "شکل 8" مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که شبکه و مدل انتخاب‌شده برای حل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

3- نتایج

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

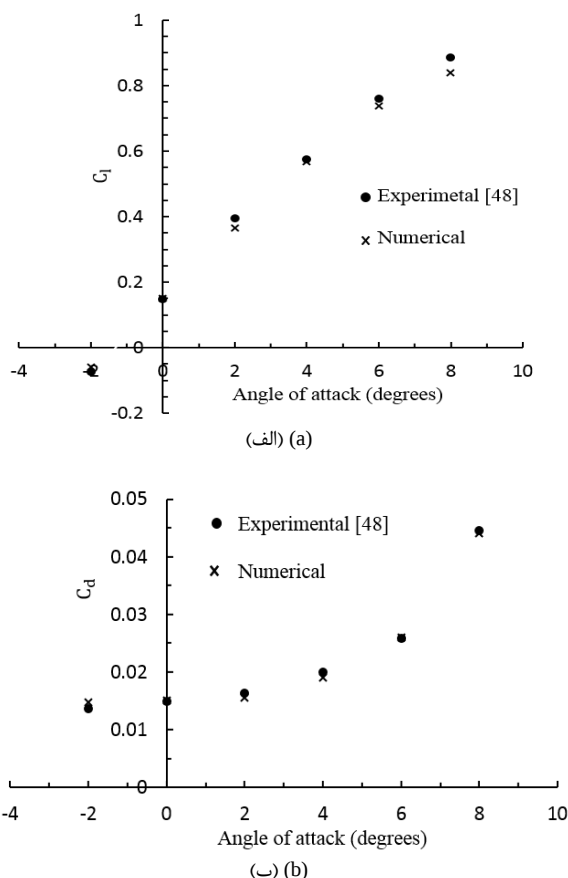


Fig. 8 Comparison of (a) Lift coefficients, (b) Drag coefficients calculated using numerical results in this study with experimental results in [48] are shown at different angle of attacks. Reynolds number is 6×10^4 and foil is SD7003

شکل 8 مقایسه (الف) ضریب برا. (ب) 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

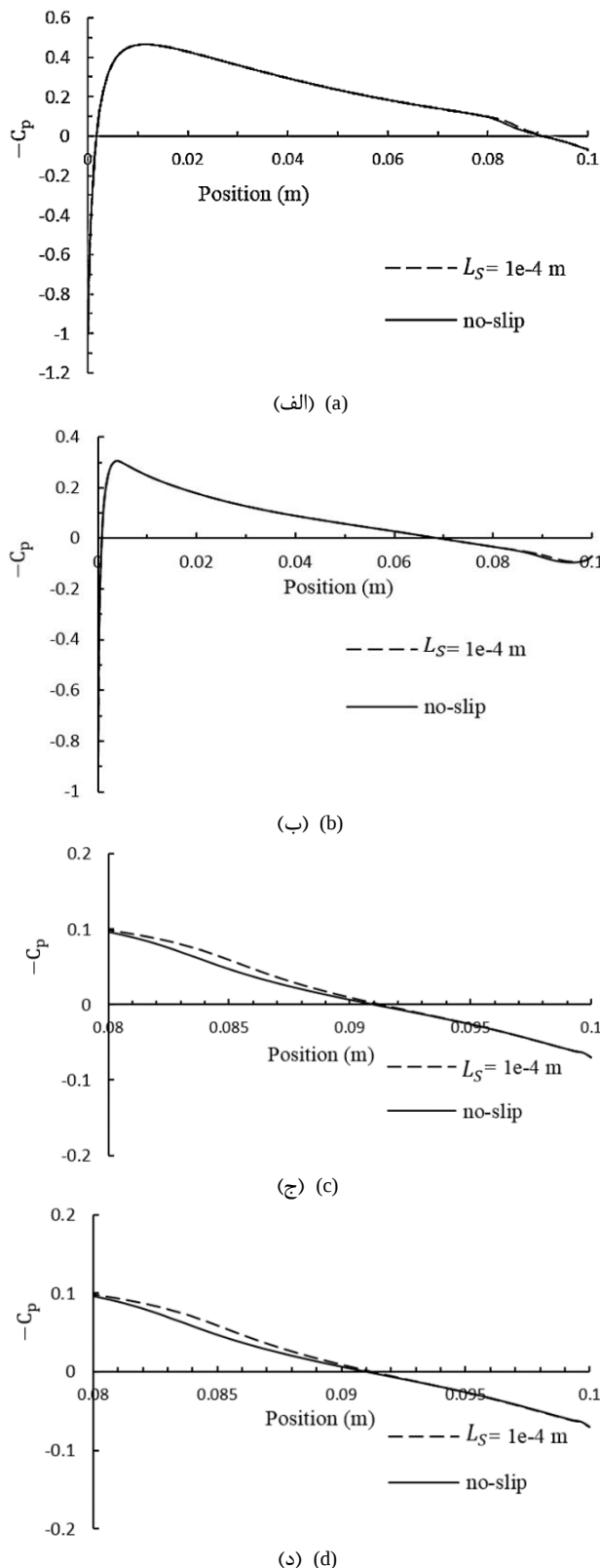


Fig. 10 The slip boundary condition effect on Pressure coefficient at different slip lengths at Reynolds of 60000 and angle of attack of zero. (a) top of foil, (b) bottom of foil, (c) top of foil on the nearby view, and (d) bottom of foil on the nearby

شکل 10 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 9).

در حالتی که بر روی سطح لغزش وجود داشته باشد، گرادیان سرعت عمود بر سطح کم شده و در نتیجه 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 فوق‌آب‌گریزی، اصطکاک سیال با دیواره کاهش یافته و جریان به نسبت قبل (هیدروفویل بدون لغزش) با سرعت بیشتری روی سطح شتاب گرفته و جابجا 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 9). در لبه انتهایی فویل دوباره لغزش باعث کم شدن گرادیان سرعت و در نتیجه کم شدن تنش برشی و ضریب پسای اصطکاکی می‌شود.

مطابق "شکل 10" با افزایش طول لغزش ضریب فشار (C_p) عملاً تغییری نمی‌یابد، چرا که با اعمال فوق‌آب‌گریزی، گرادیان سرعت نزدیک سطح تغییر می‌کند و تأثیرات فوق‌آب‌گریزی بر روی سرعت لبه لایه‌مرزی که فشار سطح جسم را مشخص می‌کند ناچیز است.

مطابق جدول 2، با فوق‌آب‌گریز کردن سطح هیدروفویل و در طول لغزش‌های کوچک ضریب پسا در 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 رفته‌رفته تغییر کرده، تا آن‌جا که در طول لغزش‌های بیش‌تر از $50 \mu m$ این تغییرات بزرگ‌تر می‌شود. در نهایت 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 عمده نیروی پسا در حالت

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

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

$\frac{C_{d\text{slip}} - C_{d\text{no-slip}}}{C_{d\text{no-slip}}} \times 100 (\%)$	$C_d (\times 10^{-2})$	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}

غیرلغزشی، از جنس پسای اصطکاکی (70%) بوده که با افزایش طول لغزش پسای 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 لزج می‌رسد که پسا به سمت صفر میل خواهد نمود. البته در عمل تاکنون طول لغزش بیش از $50\mu\text{m}$ تجربه نشده است.

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

در "شکل‌های 13 و 14" تأثیر شرط مرزی لغزشی بر ضریب پسا در طول لغزش $50\mu\text{m}$ 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 پسای 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 $50\mu\text{m}$ و در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. هر چه طول لغزش افزایش یابد کاهش ضریب پسای 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

همان‌طور که در 1-3 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 در نتیجه 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 فرار کاهش یافته و گرادیان سرعت مجاور سطح هیدروفویل ملایم‌تر 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 تنش 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

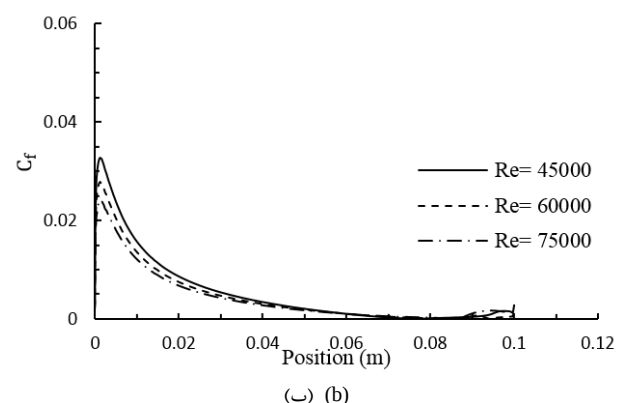
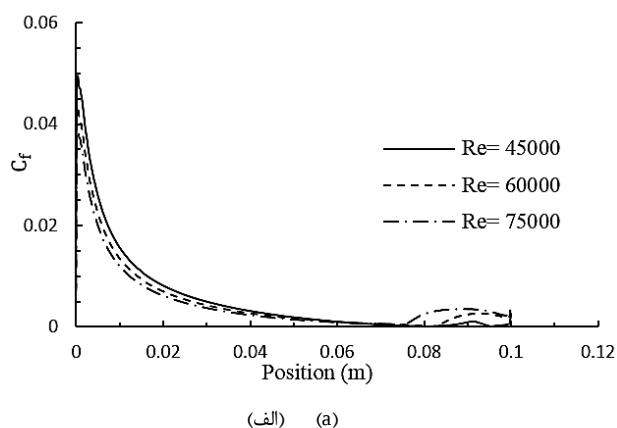


Fig. 13 The effect of Reynolds number on friction drag coefficient at angle of attack of zero for the top portion of a SD7003 foil. (a) No-slip, (b) slip (slip length is $50\mu\text{m}$)

شکل 13 تأثیر رینولدز جریان بر ضریب پسای اصطکاک در زاویه حمله صفر برای سطح فوقانی فویل SD7003. (الف) شرط مرزی غیرلغزشی. (ب) شرط مرزی لغزشی (طول لغزش $50\mu\text{m}$)

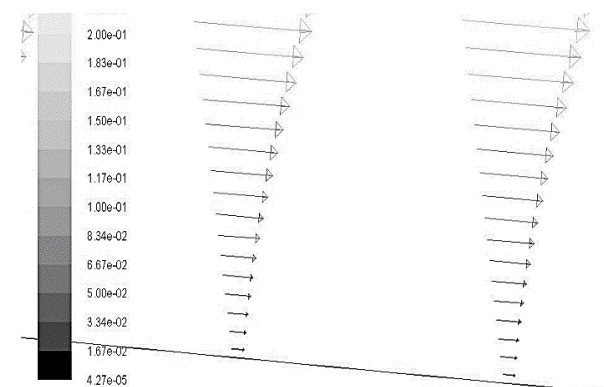


Fig. 11 Velocity vector near the surface at slip lengths of $50\mu\text{m}$ at Reynolds of 6×10^4 and angle of attack of zero

شکل 11 بردار سرعت مجاور سطح در طول لغزش $50\mu\text{m}$ در رینولدز 6×10^4 و زاویه حمله صفر

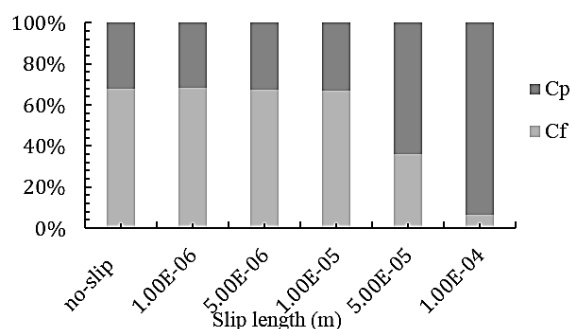


Fig. 12 Drag coefficient components (pressure and friction) are compared at different slip lengths at Reynolds of 6×10^4 and angle of attack of zero

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 7.5×10^4 در یک طول لغزش ثابت ($50 \mu\text{m}$) نشان داده شد که فوق آب گریز کردن در رینولدزهای بالاتر مؤثرتر است و کاهش ضریب پسا از کمتر از 1% به 7% می رسد.

5- علائم اختصاری

B	نیروی حجمی (N)
$\hat{i}$	بردار یکه در راستای محور X
$\hat{j}$	بردار یکه در راستای محور Y
k	انرژی جنبشی (Nm)
L_s	طول لغزش (m)
N	بردار عمود بر سطح
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
T	دما (K)
u_j	سرعت (ms^{-1})
U_s	سرعت مماسی (ms^{-1})
U_{slip}	سرعت لغزشی (ms^{-1})
X	مختصات طول (m)
Y	مختصات عرض (m)
y^+	فاصله بی بعد شده از دیواره

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
θ	زاویه ($^\circ$)
ω	نرخ اتلاف ویژه (Nm)

زیر نویس

wall دیواره

6- منابع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] S. Devasahayam, P. Yarlagadda, Measurement studies on Superhydrophobic materials, *Advanced Materials Research*, Vol. 988, No 17, pp. 134-142, 2014.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. Koishi, K. Yasuoka, S. Fujikawa, T. Ebisuzaki, X. C. Zeng, Coexistence and transition between Cassie and Wenzel state on pillared hydrophobic

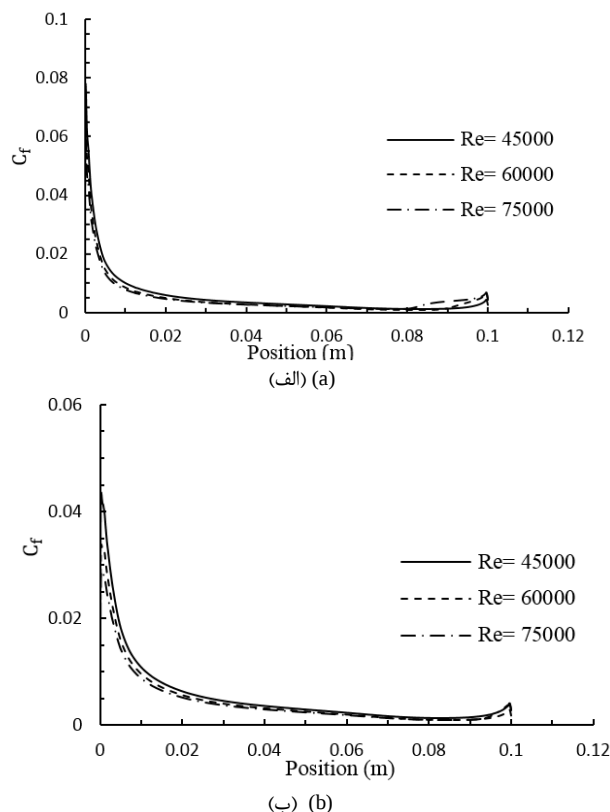


Fig. 14 The effect of Reynolds number on friction drag coefficient at angle of attack of zero for the bottom portion of a SD7003 foil (a) No-slip, (b) Slip (slip length is $50 \mu\text{m}$)

شکل 14 تأثیر رینولدز جریان بر ضریب پسای اصطکاک در زاویه حمله صفر برای سطح فوقانی فویل SD7003. (الف) شرط مرزی غیر لغزشی. (ب) شرط مرزی لغزشی (طول لغزش $50 \mu\text{m}$)

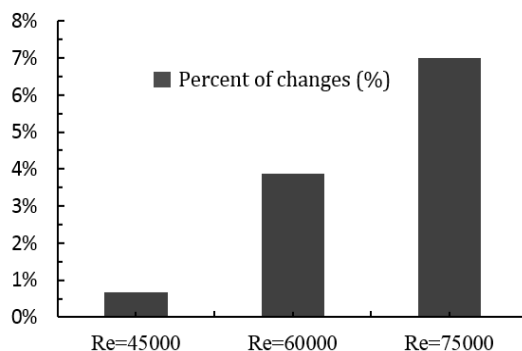


Fig. 15 Reynolds number effect on Drag coefficient in slip length amount is $50 \mu\text{m}$

شکل 15 تأثیر رینولدز جریان بر کاهش ضریب پسای سطح معمولی به پسا با شرط لغزشی در طول لغزش $50 \mu\text{m}$

تحلیل مسئله پیچیده تر می شود. در این مطالعه، تأثیر فوق آبگریزی سطح فویل SD7003 بر ضریب پسای اصطکاک و فشاری بررسی شده است. با شبیه سازی عددی نشان داده شد که افزایش طول لغزش (آب گریز کردن) باعث کاهش ضریب پسای اصطکاک در ابتدا و انتهای فویل می شود و چون بخش قابل توجهی از ضریب پسا توسط اصطکاک ابتدا و انتهای فویل اعمال می شود، لذا فوق آب گریز کردن سطح باعث کم شدن ضریب پسا می شود. با افزایش طول لغزش تأثیر فوق آبگریزی بر ضریب پسا محسوس تر شده و مقاومت سیال در مقابل حرکت هیدروفویل کاهش می یابد. 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. Bakhsh, S. Sekhvat, 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. Sekhvat, 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- ω 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] A. 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