

بررسی عددی و بهینه سازی ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ با الهام از دندانان پوست کوسه ماکو

رضا میرزایی ارجنکی^۱، محمود پسندیده فرد^۲، فائزه یزدانی مقدم^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، reza.mirzaeiarjenaki@mail.um.ac.ir

^۲ استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، fard_m@um.ac.ir

^۳ استادیار گروه زیست شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، yazdani@um.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر بررسی عددی حول سیزده ایرفویل الهام گرفته شده از دندانان پوست کوسه ماکو با طول وتر ۱۰۰ میلی‌متر انجام شده است. این پژوهش با مدل آشفتگی کا امگا اس اس تی، حل گر فشار مبنا و با اطمینان از تعداد شبکه مناسب صورت گرفته است. شبیه‌سازی جریان با سیال هوا و عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ در زوایای حمله مختلف؛ از چهار تا یازده درجه انجام شده است. اعتبارسنجی در دو مرحله و با دو پژوهش مقایسه و ارائه شده است. نمودارهای Y^+ ، تنش برشی و ضریب فشار، کانتورهای خطوط جریان و سرعت، در زاویه حمله شش درجه گزارش شده است. نتایج حاصل از ضریب برآ، ضریب پسا و نمودار نسبت ضریب برآ به پسا برای تمام زوایا و هندسه‌ها ارائه و بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با ایجاد برآمدگی الگو گرفته شده از سطح پوست کوسه، ضریب پسا کاهش و نسبت ضریب برآ به پسا افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار این نسبت برای ایرفویل با برآمدگی در ۲۳ درصدی طول وتر با ۲۸/۰۵ درصد افزایش نسبت به ایرفویل ساده می‌باشد. برآمدگی‌ها باعث افزایش مقدار تنش برشی سطح بالایی ایرفویل‌ها شده و در زوایای حمله بالا از تداوم جدایش جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی

ایرفویل، زیست تقلید، کوسه، مدل آشفتگی کا امگا اس اس تی

مقدمه

زیست تقلید یا زیست همانندسازی یا بیومیمتیک^۱ تقلید از مدل‌های طبیعت با هدف حل مشکلات انسان است [۱]. در حقیقت اساس این علم مدل‌های طبیعی بیولوژیکی^۲ است که با مطالعه آن‌ها می‌توان سیستم‌های مدرن را طراحی کرده و ساخت. اکثر اختراعات الگو گرفته از مدل‌های زنده است. به‌طور مثال طراحی هواپیما و ریز پرنده‌ها براساس ساختار بدن پرندگان و حشرات، طراحی زیردریایی از روی ساختار دلفین، ساخت رادارها با توجه به سیستم راداری خفاش‌ها و ماهیان نمونه‌هایی از علم زیست الگو می‌باشد [۲، ۳]. آبریان نیز یکی از نمونه‌های مورد مطالعه علم زیست تقلید می‌باشند که در این میان، الهام گرفتن از کوسه‌ها با توجه به ساختار بدنی و

سرعت بالای آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. کوسه ماکو^۳ به‌عنوان سریع‌ترین کوسه جهان شناخته شده و تا سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت قادر به شنا کردن می‌باشد. به همین دلیل سطح پوست این کوسه در ابعاد میکرو می‌تواند آن را از سایر کوسه‌ها متمایز کند. در شکل ۱ تصویر این کوسه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱: کوسه ماکو

با توجه به اهمیت بالای زیست تقلید و به روز بودن آن، استفاده از این علم همواره مورد توجه پژوهشگران بوده که بررسی سطح پوست کوسه هم از این قاعده مستثنا نیست. با بررسی‌های بیشتر مشخص می‌شود، علم زیست تقلید در مهندسی و به‌خصوص در آئرونامیک^۴ از اهمیت زیادی برخوردار است. یوهانس^۵ و همکاران، ادعا می‌کنند دندان‌های پوست کوسه سبب کاهش پسا و افزایش نیروی پیشران در حین حرکت می‌شود و برای بررسی حرکت از یک دستگاه رباتیک استفاده کرده‌اند. نشان می‌دهند دندان‌های پوست کوسه باعث افزایش ۱۲/۳ درصدی سرعت متوسط در مقایسه با پوست بدون دندانان می‌شود [۴]. منگاندان^۶ و همکاران بیان می‌کنند که تقریباً ۲۰ تا ۴۰ درصد از پسای کل، مربوط به پسای اصطکاکی سطح می‌باشد. برای کاهش پسای اصطکاکی بال ناکا ۰۰۱۲، از پوست کوسه الگو گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار پوست کوسه با کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی پسا نسبت به سطح صاف همراه است [۵].

لی‌ون^۷ و همکاران، برای اولین بار موفق به ساخت غشای مصنوعی انعطاف‌پذیر پوست کوسه به‌صورت سه بعدی شدند و نشان می‌دهند

³ Mako Shark

⁴ Aerodynamics

⁵ Johannes

⁶ Manigandan

⁷ Li Wen

¹ Biomimetic

² Biology

معادلات ۱ و ۲ معادلات حاکم بر جریان یعنی پیوستگی^۱ و ممتم^۱ را بیان می‌کند. با توجه به استفاده از مدل آشفتگی^{۱۲} کا امگا اس اس تی^{۱۳} از معادله انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف این مدل نیز در معادلات ۳ و ۴ استفاده شده است [۱۲].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

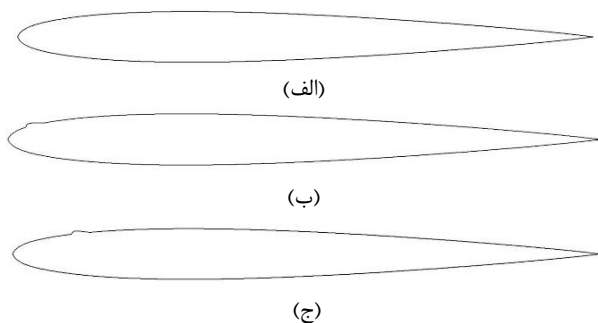
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u_i)) + S_{Mi} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k v) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k \\ & \quad - \beta^* \rho k \omega \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \omega u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \omega v) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \\ & \quad + \frac{\gamma}{\mu_t} P_k - \rho \beta \omega^2 \\ & 2\rho(1 - F_1)\sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \left(\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

هندسه و شرایط مرزی

ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ به‌عنوان هندسه اصلی در نظر گرفته شده است و با الگو از برآمدگی مورد استفاده توسط دومل و همکاران [۱۳]، برآمدگی حاصل در موقعیت مکانی‌های مختلف و در ۳، ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۳، ۲۶، ۲۹ و ۳۲ درصدی طول وتر ۱۰۰ میلی‌متری نصب شده است. در شکل ۲ ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ همراه با برآمدگی در ۳، ۱۰ و ۲۳ درصدی طول وتر و ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ساده قابل مشاهده می‌باشد.



که این غشا در مقایسه با یک مدل صاف و بدون دندان، باعث افزایش سرعت شنا و کاهش مصرف انرژی در ابزار کنترلی و حرکتی می‌شود [۶]. تیان^۱ به بررسی اثرات هیدرودینامیکی^۲ ماده لزج سطح پوست پیرامون یک هیدروفویل^۳ به‌دست‌آمده از ایرفویل^۴ ناکا ۰۰۱۲ با سیال غیر نیوتونی^۵ به‌صورت دو بعدی با الگو گیری از آبزبان پرداخته است. نتایج نشان داده که این ماده باعث کاهش اصطکاک و پسا، افزایش نیروی برآ، کاهش نوسانات، کاهش صدای حین شنا و ذخیره نیرو هیدرودینامیکی می‌شود [۷]. مایکل^۶ و همکاران، مطرح می‌کنند پوست کوسه ماکو به‌عنوان یک وسیله کنترل جدایش جریان آرام عمل کرده و در برابر جریان برگشتی مقاومت می‌کند. سیلندر روکش شده از پوست واقعی کوسه با کاهش ۲۸ درصدی جریان برگشتی و کاهش ۱۸ درصدی پسا نسبت به سیلندر معمولی همراه شده است [۸].

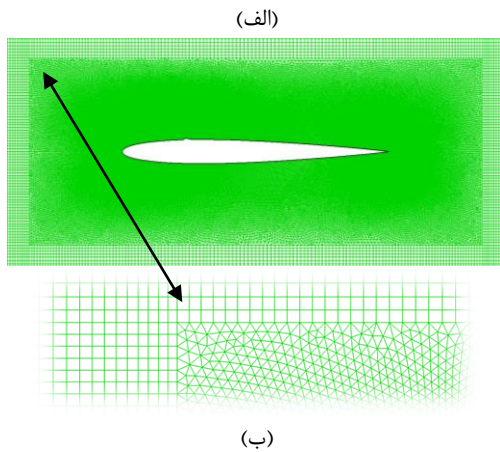
دیوی^۷ و همکاران به بررسی دندان‌های پوست کوسه ماکو در تونل باد به‌صورت تجربی با نصب آن روی بال پرداخته و مطرح می‌کنند دندان‌ها در کنترل جدایش جریان اثر زیادی دارند. با بررسی نتایج در سیال آب و هوا، تفاوت در فشار دینامیکی^۸ را مطرح می‌کنند و علت این اختلاف را تعامل پوست با سیال می‌دانند و تغییر حالت دندان‌ها در سیال هوا به فشار دینامیکی بیشتری و تقریباً ۸ برابر آب نیاز دارد [۹]. یورچنکو^۹ مطرح می‌کند، سرعت بالای آبزبان و جهت‌گیری خوب آن‌ها تا حدودی با تعامل جریان با سطح پوست آن‌ها وابسته است. بال نهنگ و الگوگیری از آن در ساخت پره توربین بادی را بررسی کرده و افزایش ضریب برآ، کاهش پسا و عملکرد بهتر و افزایش نسبت ضریب برآ به پسا در حالت الهام گرفته شده از بال نهنگ نسبت به سطح صاف را مطرح کرده و همچنین اثر مثبت دندان‌های پوست کوسه در شنا و سرعت آن را بیان می‌کند [۱۰]. لانگ و همکاران با بررسی تمام نقاط پوست کوسه ماکو مطرح می‌کنند که نقاطی از بدن این کوسه مانند طرفین و پایین دست آب‌شش‌ها دارای دندان‌های کوچک که نقش زیادی در کاهش پسا و جدایش، حین حرکت و مانورها دارد [۱۱].

لذا در پژوهش حاضر، هدف بررسی عددی سیزده ایرفویل همراه با برآمدگی‌های الهام گرفته شده از دندان‌های سطح پوست کوسه می‌باشد. قابل‌ذکر است بررسی عددی هندسه‌های مدل شده تاکنون گزارش نشده است.

معادلات حاکم

¹ Continuity 0
¹ Momentum 1
¹ Turbulence 2
¹ K- ω -SST 3

¹ Tian
² Hydrodynamic
³ Hydrofoil
⁴ Airfoil
⁵ Non-Newtonian
⁶ Michael
⁷ Devey
⁸ Dynamic Pressure
⁹ Yurchenko



شکل ۴: (الف) میدان حل و شرایط مرزی، (ب) شبکه‌بندی هندسه، ناحیه اطراف هندسه و شبکه‌بندی آن و محل تلاقی شبکه با سازمان و مثلی

شرایط جریان

در پژوهش حاضر مدل آشفتگی کا امگا اس اس تی [۱۲]، سرعت ورودی ۵/۷۴ متر بر ثانیه، شدت آشفتگی ۰/۵ درصد و رینولدز^۷ ۴۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است و شبیه‌سازی در زوایای حمله چهار تا یازده درجه در نرم‌افزار فلونت^۸ انجام شده است.

اعتبارسنجی

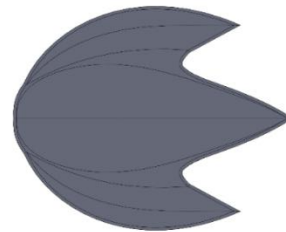
هندسه‌های پژوهش حاضر برای اولین بار طراحی و مورد بررسی قرار گرفته و برای اعتبارسنجی داده‌های مربوط به این هندسه‌ها در دسترس نمی‌باشد. به همین دلیل اعتبارسنجی در دو مرحله و از پژوهش تجربی انجام شده بر روی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ به طول وتر ۶۸ میلی‌متر و رینولدز ۴۰۰۰۰ توسط دومل و همکاران [۱۳]، استفاده و اعتبارسنجی به صورت عددی انجام پذیرفته است. با توجه به اینکه عدد رینولدز پژوهش فوق که در محدوده پایین می‌باشد، بررسی با مدل‌های آشفتگی متفاوتی انجام شده است. در نهایت مدل آشفتگی کا امگا اس اس تی کمترین خطا را داشته و بهترین مدل برای این پژوهش طبق شکل ۵ می‌باشد. در ادامه اعتبارسنجی؛ با توجه به اینکه برآمدگی‌ها بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ نصب شده، لازم است که ایرفویل ساده و بدون برآمدگی ناکا ۰۰۰۹ با نتایج معتبری مقایسه شده و صحت انجام کار را تضمین نماید. برای همین منظور نسبت ضریب برآ به پسا پژوهش اریک [۱۴] و پژوهش حاضر در چهار زاویه حمله ۵، ۷، ۹ و ۱۱ درجه در رینولدز ۴۰۰۰۰، مطابق شکل ۶ بررسی و مقایسه شده است.



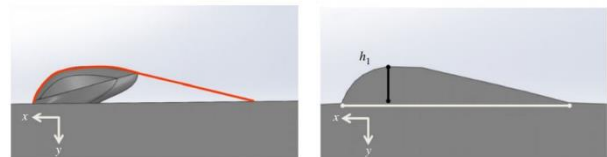
(د)

شکل ۲: (الف) ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ساده، (ب) ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ به همراه برآمدگی در ۳ درصدی طول وتر (ج) در ۱۰ درصدی (د) در ۲۳ درصدی

برآمدگی فوق، الگو گرفته شده از نمای جانبی دندان کوسه ماکو می‌باشد. دندان کوسه ماکو با توجه به تصاویر موجود با نرم‌افزار سالدورکس^۱ مطابق شکل ۳ (الف) طراحی شده، سپس متناسب با ضخامت ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ابعاد برآمدگی جدید به صورت قسمت (ب) شکل ۳ به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳: (الف) دندان پوست کوسه ماکو طراحی شده با نرم‌افزار سالدورکس، (ب) نحوه ایجاد برآمدگی، دومل و همکاران [۱۳]

شبکه‌بندی ایرفویل‌ها توسط نرم‌افزار گمبیت^۲ و با توجه به وجود برآمدگی‌ها به منظور بررسی دقیق کنار دیواره از تعداد ۳۰۰ هزار سلول تشکیل شده است. شبکه‌بندی فوق شامل شبکه لایه‌مرزی با سازمان و شبکه با سازمان و مثلی با میدانی^۳ به طول ۴۰ برابر طول وتر که ۱۵ برابر آن سمت چپ و ۲۵ برابر آن در راستای جریان و بالا و پایین هندسه نیز ۱۰ برابر طول وتر می‌باشد. شرایط مرزی پژوهش نیز، ورودی سرعت^۴ خروجی فشار^۵ و دیواره^۶ در نظر گرفته شده است.



¹ Solid works

² Gambit

³ Domain

⁴ Velocity Inlet

⁵ Pressure Outlet

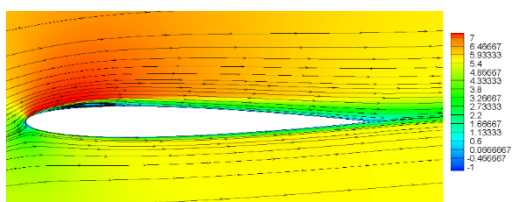
⁶ Wall

⁷ Reynolds

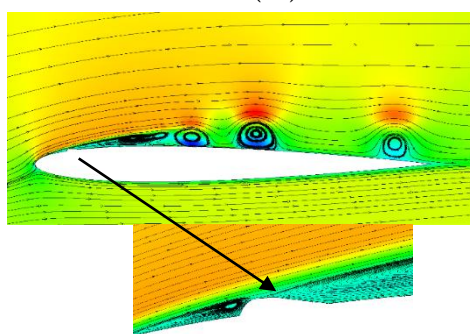
⁸ Fluent

خطوط جریان

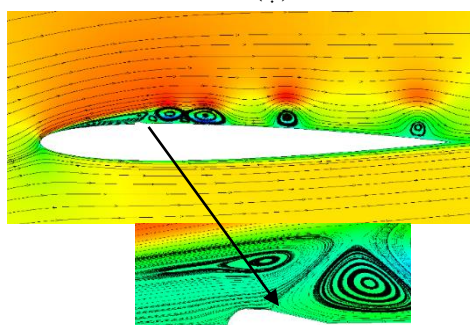
تمام ایرفویل‌های طراحی شده در نرم‌افزار فلونت مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته و برای بررسی اثر برآمدگی‌های اعمال شده بر جریان عبوری، کانتور سرعت در راستای جریان، همراه با خطوط جریان برای سه ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ساده و همراه با برآمدگی در ۸ و ۲۳ درصدی طول وتر در زاویه حمله ۶ درجه در شکل ۸ قابل مشاهده است. جریان با برخورد با برآمدگی‌ها از سطح جدا شده و مجدداً به سطح بازمی‌گردد. با ایجاد برآمدگی‌ها جریان آشفته شده و پسای کل کاهش پیدا می‌کند. با اعمال برآمدگی‌ها اثر پسای فشاری نسبت به حالت ساده بیشتر شده و با افزایش فاصله برآمدگی از لبه حمله اثر پسای اصطکاکی افزایش و اثر پسای فشاری کاهش پیدا می‌کند.



(الف)



(ب)

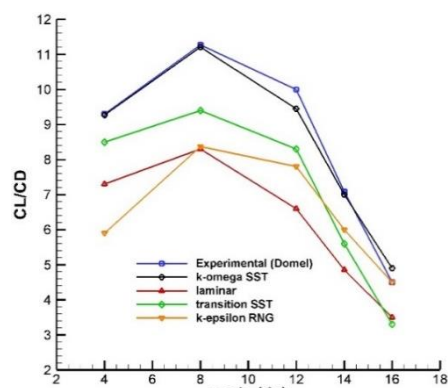


(ج)

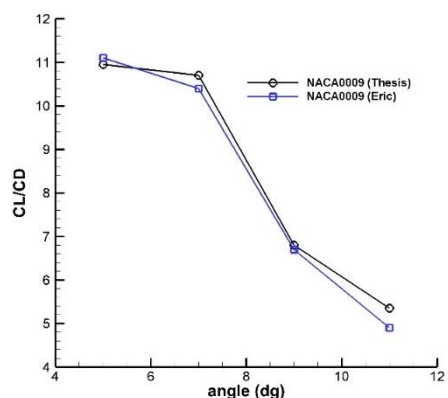
شکل ۸: کانتور سرعت در جهت X به‌همراه خطوط جریان در زاویه حمله ۶ درجه، (الف) ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ساده، (ب) ایرفویل با برآمدگی در ۸ درصدی وتر، (ج) ایرفویل با برآمدگی در ۲۳ درصدی وتر

نمودارهای Y+، تنش برشی و ضریب فشار

نمودارهای Y+، تنش برشی و ضریب فشار در زاویه حمله ۶ درجه به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ برای سه ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ ساده و همراه با برآمدگی در ۱۰ و ۲۰ درصد قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به اینکه حداکثر مقدار در نمودارهای Y+، کمتر از یک می‌باشد، نشان



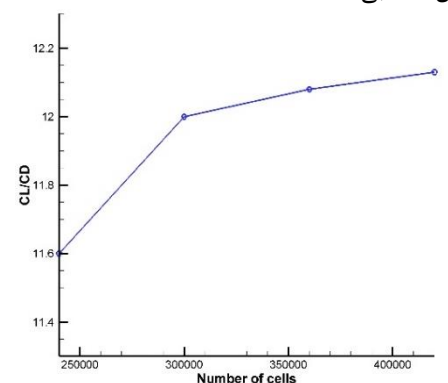
شکل ۵: نمودار ضریب برآ به پسا برحسب زاویه حمله و بررسی در مدل‌های مختلف آشفته‌گی برای هیدروفرویل ناکا ۰۰۱۲ و اعتبارسنجی با پژوهش دومل



شکل ۶: نمودار ضریب برآ به پسا برحسب زاویه حمله در زوایای حمله ۵، ۷، ۹ و ۱۱ درجه برای ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ و اعتبارسنجی با پژوهش اریک

استقلال از شبکه

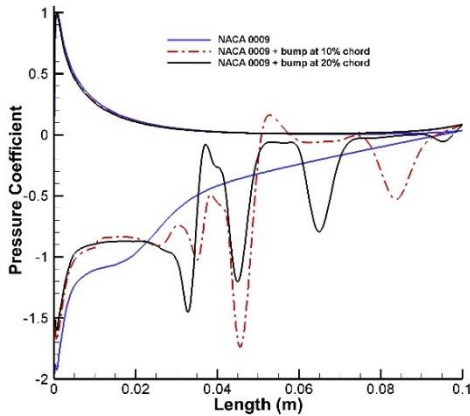
ایرفویل‌های طراحی شده با شبکه‌ای به تعداد ۳۰۰ هزار سلول بررسی شده است. از این رو استقلال از شبکه با ۲۰ درصد کاهش، ۲۰ و ۴۰ درصد افزایش تعداد سلول‌ها نسبت به شبکه اصلی یعنی به ترتیب با ۲۴۰، ۳۶۰ و ۴۲۰ هزار سلول بررسی و تحلیل شده است. اثر تعداد سلول‌ها برای ایرفویل همراه با برآمدگی در ۱۰ درصدی طول وتر با نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برای زاویه حمله ۶ درجه مطابق شکل ۷ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که برای پژوهش فوق از تعداد سلول مناسبی استفاده شده است.



شکل ۷: نمودار تعداد سلول‌ها به نسبت ضریب برآ به پسا برای ایرفویل با برآمدگی در ۱۰ درصدی طول وتر

نتایج

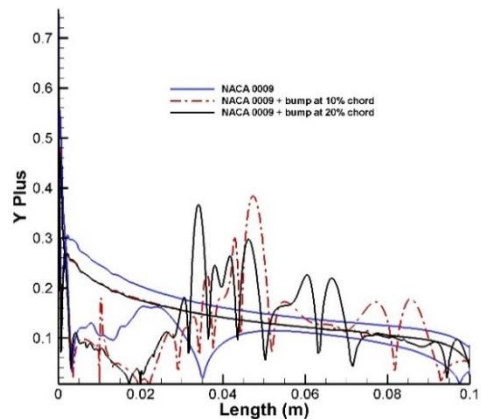
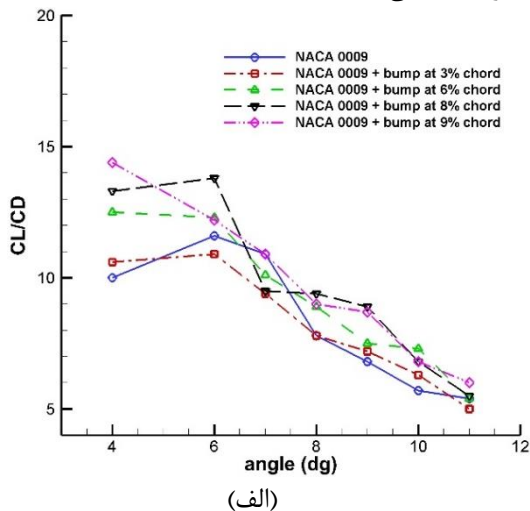
دهنده این است که شبکه لایه مرزی مناسبی اعمال و نزدیک دیواره به خوبی بررسی شده است.



شکل ۱۱: نمودار ضریب فشار بر حسب طول در زاویه حمله ۶ درجه برای ایرفویل‌های ناکا ۰۰۰۹ ساده و همراه با برآمدگی در ۱۰ و ۲۰ درصدی وتر

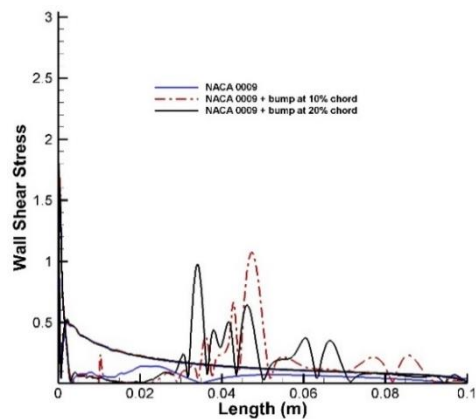
ضریب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به پسا

نتایج حاکی از آن است که مساحت زیر نمودار ضریب پسا برای ایرفویل‌های همراه با برآمدگی کمتر از حالت ساده است و کاهش پسا باعث افزایش مقدار نسبت ضریب برآ به پسا برای این ایرفویل‌ها می‌شود. در ایرفویل‌های ناکا ۰۰۰۹ و با برآمدگی در ۳، ۶، ۸ و ۱۲ درصدی طول وتر، واماندگی در یک زاویه رخ داده و دیگر ایرفویل‌ها زودتر به واماندگی می‌رسند. مساحت زیر نمودار ضریب برآ به پسا بر حسب زاویه حمله برای تمامی ایرفویل‌ها به جز ایرفویل با برآمدگی در ۳ درصدی طول وتر بیشتر از ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ است و بیشترین مساحت زیر سطح این نمودار برای ایرفویل همراه با برآمدگی در ۲۳ درصدی طول وتر با افزایش ۲۸/۰۵ درصدی نسبت به ایرفویل ساده می‌باشد. نمودارهای نسبت ضریب برآ به پسا بر حسب زاویه حمله برای ۱۳ ایرفویل با برآمدگی و ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ در شکل ۱۲ قابل مشاهده و مقایسه می‌باشد.



شکل ۹: نمودار Y^+ بر حسب طول در زاویه حمله ۶ درجه برای ایرفویل‌های ناکا ۰۰۰۹ ساده و همراه با برآمدگی در ۱۰ و ۲۰ درصدی طول وتر

نمودار تنش برشی نشان می‌دهد در هر موقعیت از نمودار که مقدار تنش برشی به صفر رسیده جدایش رخ داده است. نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که برآمدگی‌ها باعث افزایش تنش برشی بر روی سطح ایرفویل شده و جدایش را به تعویق انداخته است. همچنین با بررسی نمودار ضریب فشار و مقایسه ایرفویل‌ها، طبق تحقیقات وایت^۱ [۱۵] که معتقد است بعد از نقطه جدایش، فشار و یا ضریب فشار بر روی سطح ثابت می‌ماند، با توجه به شکل ۱۱ این نتیجه حاصل می‌گردد که برآمدگی‌ها با آشفته کردن جریان مانع تداوم جدایش در زاویه حمله‌های بالا بر روی سطح ایرفویل می‌شوند.



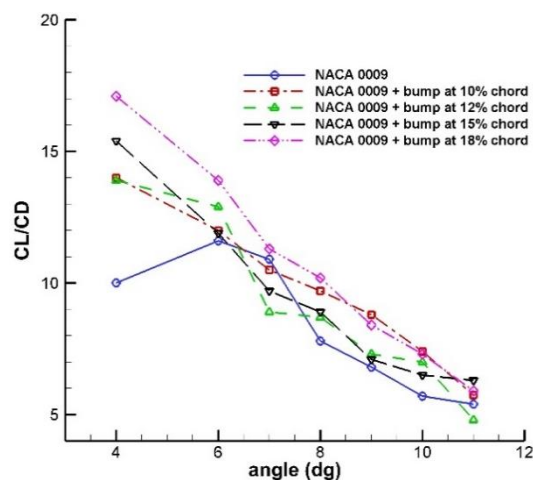
شکل ۱۰: نمودار تنش برشی بر حسب طول در زاویه حمله ۶ درجه برای ایرفویل‌های ناکا ۰۰۰۹ ساده و همراه با برآمدگی در ۱۰ و ۲۰ درصدی وتر

¹ White

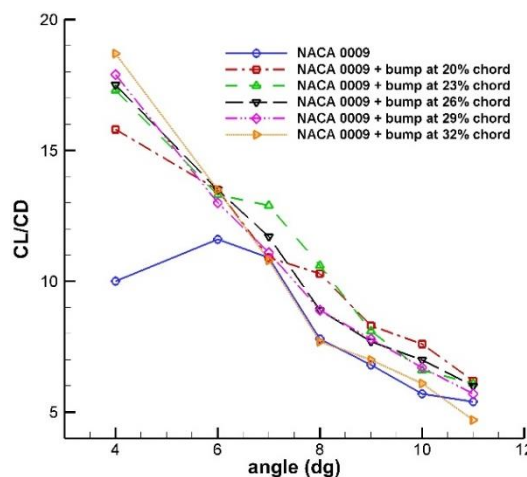
γ ضریب اتمیسیت (۱/۴)
 μ لزجت دینامیکی ($N.s/m^2$)
 ω اتلاف مخصوص آشفتگی
 τ تانسور

مراجع و منابع

- [1] J. F. Vincent, O. A. Bogatyreva, N. R. Bogatyrev, A. Bowyer and A.-K. Pahl, Biomimetics, 2006. "its practice and theory", Journal of the Royal Society Interface, Vol. 3, No. 9, pp. 471-482.
- [2] M. McCarty, 2009. "Life of bionics founder a fine adventure", Dayton Daily News, Vol. 29, 2009.
- [3] F. Romei and L. DaVinci, 2008. "The Oliver Press, Inc".
- [4] J. Oeffner and G. V. Lauder, 2012. "The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications", Journal of Experimental Biology, Vol. 215, No. 5, pp. 785-795.
- [5] S. Manigandan, K. G. Kumar, P. Gunasekar and S. Nithya, 2017. "Experiment evaluation of skin friction drag by surface tailoring", in Proceeding of, IOP Publishing, pp. 012062.
- [6] L. Wen, J. C. Weaver and G. V. Lauder, 2014. "Biomimetic shark skin": design, fabrication and hydrodynamic function, Journal of Experimental Biology, Vol. 217, No. 10, pp. 1656-1666.
- [7] F.-B. Tian, 2020. "Hydrodynamic effects of mucus on swimming performance of an undulatory foil by using the DSD/SST method", Computational Mechanics, Vol. 65, No. 3, pp. 751-761.
- [8] M. T. Bradshaw, 2014. "Laminar separation control effects of shortfin mako shark skin", Thesis, Dept, University of Alabama Libraries.
- [9] S. P. Devey, A. W. Lang, J. P. Hubner, J. A. Morris and M. L. Habegger, 2020. "Experimental analysis of passive bristling in air to enable mako-shark-inspired separation control", in Proceeding of, 2768, 2020.
- [10] N. Yurchenko, 2011. "From marine animals to plasma aerodynamics", in Proceeding of, 1341.
- [11] A. Lang, P. Motta, M. L. Habegger, R. Hueter and F. Afroz, 2011. "Shark skin separation control mechanisms", Marine Technology Society Journal, Vol. 45, No. 4, pp. 208-215
- [12] F. R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry, 2003. "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, Turbulence, heat and mass transfer", Vol. 4, No. 1, pp. 625-632.
- [13] A. G. Domel, M. Saadat, J. C. Weaver, H. Haj-Hariri, K. Bertoldi and G. V. Lauder, 2018. "Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance", Journal of the Royal Society Interface, Vol. 15, No. 139, pp. 20170828.
- [14] E. Sauvageat and V. F.-C. Rolin, 2016. "Prediction and Comparison of low-Reynolds Airfoil Performance", Thesis.
- [15] F. M. White, 1986. "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, New York, pp. 560-56.



(ب)



(ج)

شکل ۱۲: نمودار ضریب برآ به پسا برحسب زاویه حمله برای ۱۳ ایرفویل طراحی شده و ایرفویل ناکا ۰۰۰۹

نتیجه گیری

بررسی عددی بر روی ۱۳ ایرفویل الهام گرفته شده از دندان پوست کوسه ماکو با ایجاد برآمدگی روی ایرفویل ناکا ۰۰۰۹، با طول وتر ۱۰۰ میلی متر و عدد رینولدز ۴۰۰۰۰ با مدل آشفتگی کامگا اس اس تی در زوایای حمله چهار تا یازده درجه انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که با اعمال برآمدگی بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۰۹ و ایجاد آشفتگی و اغتشاشات جریان، ضریب پسا با کاهش قابل توجهی روبه رو شده است. همچنین ضریب برآ با کمی کاهش نسبت به ایرفویل ساده همراه شده و در نتیجه نسبت ضریب برآ به پسا افزایش پیدا کرده است. بیشترین نرخ افزایش نسبت ضریب برآ به پسا برای ایرفویل با برآمدگی در ۲۳ درصدی طول وتر با مقدار ۲۸/۰۵ درصد نسبت به حالت ساده می باشد. برآمدگی ها باعث افزایش مقدار تنش برشی سطح بالایی ایرفویل ها شده و در زوایای حمله بالا از تداوم جدایش جلوگیری می کنند.

فهرست علائم

ρ چگالی، kg/m^3