سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران
تهران، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین
۱۳ تا ۱۵ اسفند ۱۳۹۲

Aero2014P550T107

بررسی عددی عملکرد آیرودینامیکی بالواره نوسانی با حرکت پیچشی در جریان های رینولدز پایین

احمد سمیعی[۱]، مجتبی هنرمند[۲]، محمد حسن جوارشکیان[۳]
۱و۲و۳- دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

در این تحقیق جریان گذرنده از روی بالواره ناکا ۰۰۱۲ حین حرکت پیچشی با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس بر اساس گسسته سازی به روش حجم محدود و تکنیک شبکه های دینامیکی شبیه سازی شده است. جریان لزج، آرام و غیر قابل تراکم در حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر عدد رینولدز و دامنه نوسان بر عملکرد آیرودینامیکی بالواره نوسانی می‌باشد. با افزایش دامنه نوسان ضریب برا افزایش پیدا کرده است و مقادیر بیشینه ضریب برا در زمان کمتری رخ داده است. با افزایش عدد رینولدز ضریب برا بیشینه کاهش پیدا کرده است که ناشی از قدرت گردابه های تشکیل شده بر روی انتهای بالواره می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز ریز گردابه ها به سمت لبه حمله حرکت کرده و باعث تولید یک الگوی نوسانی در ضریب برا می شود. نتایج با حل های عددی منتشر شده به خوبی اعتبار سنجی شده است.

واژه های کلیدی: شبکه دینامیکی - دامنه نوسان - عدد رینولدز پایین - حرکت پیچشی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۰۹۳۷۶۴۲۲۹۰۲ stu.um.ac.ir@Mojtaba.Honarmand
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک

بررسی عددی عملکرد آیرودینامیکی بالواره نوسانی با حرکت پیچشی در جریان‌های رینولدز پایین

احمد سمیعی[1]،مجتبی هنرمند[2]،محمد حسن جوارشکیان[3]

1و2و3- دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده

در این تحقیق جریان گذرنده از روی بالواره ناکا 0012 حین حرکت پیچشی با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس بر اساس گسسته سازی به روش حجم محدود و تکنیک شبکه‌های دینامیکی شبیه سازی شده است. جریان لزج، آرام و غیر قابل تراکم در حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر عدد رینولدز و دامنه‌ی نوسان بر عملکرد آیرودینامیکی بالواره نوسانی می‌باشد. با افزایش دامنه‌ی نوسان ضریب برا افزایش پیدا کرده است و مقادیر بیشینه‌ی ضریب برا در زمان کمتری رخ داده است. با افزایش عدد رینولدز ضریب برا بیشینه کاهش پیدا کرده است که ناشی از قدرت گردابه‌های تشکیل شده بر روی انتهای بالواره می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز ریز گردابه‌ها به سمت لبه‌ی حمله حرکت کرده و باعث تولید یک الگوی نوسانی در ضریب برا می‌شود. نتایج با حل‌های عددی منتشر شده به خوبی اعتبار سنجی شده است.

واژه های کلیدی:*شبکه دینامیکی- دامنه نوسان- عدد رینولدزپایین- حرکت پیچشی*

مقدمه

نیاز بشر به توربین های بادی و آبی و ریز پرنده‌های هوایی عامل اصلی پیشرفت چشمگیر در زمینه‌ی جریان‌های با عدد رینولدز پایین در سالهای اخیر می باشد.طراحی و آزمایش موفقیت آمیز این وسایل به شناخت کامل ساختار جریان و در نتیجه حل دقیق ناحیه محاسباتی بستگی دارد. جریان‌های رینولدز پایین به شدت ناپایا می‌شوند و بسیار لزج هستند و به همین دلیل پیچیده‌اند. بنابراین برای بدست آوردن نتایج محاسباتی دقیق استفاده از روش‌های مناسب برای حل این جریان‌ها ضروری می‌باشد. از آنجائیکه آزمایش درتونل باد برای جریان‌های ناپایا بسیار مشکل و هزینه بردار است، از این رو مطالعه‌ی عددی این مسایل بسیار ارزشمند بوده و اطلاعات مفیدی را در خدمت محققین قرار می‌دهد.

اکبری 2003 [1] جریان رینولدز پایین را در اطراف یک بالواره پیچشی شبیه سازی کرد. او اثر فرکانس کاهیده، زاویه حمله اولیه و مکان محور پیچش را بررسی کرد و نشان داد که فرکانس کاهیده، بیشترین تاثیر را بر نیروهای آیرودینامیکی می‌گذارد. یانگ 2004[2] اثر فرکانس کاهیده را در یک بالواره بررسی کرد و نشان داد که ضرایب نیروهای آیرودینامیکی، بیشتر از خود فرکانس کاهیده یا زاویه حمله به طور جداگانه، به حاصلضرب فرکانس کاهیده در زاویه حمله بستگی دارد. امیر علایی 2010 [3]، سولکن جی(SolKeun Jee) 2012 [4] و کی لو(K. Lu) 2013 [5] به ترتیب به بررسی دامنه‌های نوسان پایین و دامنه‌های نوسان بالا پرداخته‌اند و نشان دادند که ضریب نیروی برا با افزایش دامنه نوسان افزایش می‌یابد.

عدد رینولدز یکی دیگر از فاکتورهای موثر در جریان‌های نوسانی می‌باشد، هدف از این تحقیق بررسی اثرات عدد رینولدز و دامنه نوسان در جریان آرام، تراکم ناپذیر و لزج می باشد. معادلات ناویراستوکس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و گسسته سازی بر اساس روش حجم محدود توسط نرم افزار اپن فوم (OpenFoam)حل شده اند. دراین مطالعه ابتدا اثر دامنه نوسان بررسی شده، سپس در دو دامنه نوسان مختلف، اثر عدد رینولدز در جریان رینولدز پایین اطراف یک بالواره ناکا 0012 بررسی شده است.

معادلات حاکم و حل گر جریان

به منظور شبیه‌سازی عددی جریان اطراف بالواره نوسانی با جریان لزج، آرام، غیر قابل تراکم و در حالت ناپایا باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریانحل شود که شامل معادلات بقا جرم (1) و مومنتم(2) می باشد. این معادلات به صورت بی‌بعد در زیر آمده است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}}\frac{\partial^2 u}{\partial x_j \partial x_j} \qquad (2)$$

به صورتی که $i = 1,2$به ترتیب جهت مختصاتی x , yرا مشخص می کنندو u_iسرعت در جهت i است.

این معادلات توسط روش حجم محدود در نرم افزار متن باز اپن فوم گسسته سازی شده‌اند. حرکت شبکه لاپلاس اسموسینگ (Laplace smoothing)می باشد. در شبیه سازی حاضر ترم‌های نفوذ و جابه‌جایی بر اساس طرح بالادست مرتبه دو (linearUpwind)و ترم ناپایا توسط طرح ضمنی مرتبه دو پسرو (Backward implicit scheme)گسسته سازی و معادلات سرعت و فشار توسط روش پیزو (PISO)حل شده‌اند.

در مطالعه حاضر، حرکت پیچشی توسط معادله (3) کنترل شده است.

$$\alpha(t) = \alpha_0 + d\sin(\omega t) \qquad (3)$$

در معادله (3)،α(t) تغییر موقعیت بالواره بر اساس گام زمانی به صورت سینوسی می باشد. α_0 متوسط زاویه حمله، d دامنه ی نوسان بر حسب رادیان و ω سرعت زاویه‌ای می‌باشد که از رابطه‌ی (4) محاسبه می‌شود. و مقدار فرکانس از عدد بی‌بعد فرکانس کاهیده از رابطه (5) محاسبه می-شود. در رابطه (5)، k فرکانس کاهیده، f فرکانس حرکت، c طول وتر بالواره و U_∞ سرعت جریان آزاد می‌باشد.

$$\omega = 2\pi f \qquad (4)$$

$$k = \frac{\pi f c}{U_\infty} \qquad (5)$$

1- دانشجوی کارشناسی ارشد
2- دانشجوی کارشناسی ارشد،

شبکه و شرایط مرزی

یک شبکه از نوع C اطراف بالواره ایجاد شده است. نمایی از شبکه در شکل 1 و نمایی از محدوده‌ی محاسباتی و شرایط مرزی در شکل 2 آورده شده است. مرزها به قدر کافی دور در نظر گرفته شده است تا بتوان از اثرات آن‌ها بر جریان اطراف بالواره چشم‌پوشی کرد. برای این منظور از جلوی بالواره به اندازه 20 و از پشت آن به اندازه 30 برابر طول وتردور شده‌ایم.

جواب‌های حالت پایا به عنوان شرایط اولیه برای حالت نوسانی ناپایا در نظر گرفته شده است. بر روی سطح بالواره از شرط مرزی عدم لغزش (Wall)و برای مرزهای دور از شرط مرزی لغزشی (Slip)استفاده شده است. در مرز ورودی سرعت از عدد رینولدز بدست می‌آید (Velocity inlet)و برای فشار از شرط گرادیان صفر (Zero-gradient)استفاده شده است. در مرز خروجی فشار با مقدار فشار جریان آزاد برابر است در حالی که برای سرعت شرط گرادیان صفر برقرار است.

برای بدست آوردن شبکه مناسب از 5 شبکه با تعداد 9×10^3، 13×10^3، 23×10^3، 25×10^3 و 40×10^3 سلول در شرایط کاری رینولدز 555، دامنه نوسان 2 درجه و فرکانس کاهیده 0/1 استفاده شده است. در شکل 3 ضریب برا بیشینه نسبت به زمان بدون بعد برای هر کدام از شبکه‌ها رسم شده است. برای تشخیص بهتر عدم وابستگی به شبکه، شکل 4 با دقت بیشتری نسبت به شکل 3 نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف بین ضریب برا در شبکه‌های 25×10^3 و 40×10^3 قابل صرف نظر کردن است. بنابراین شبکه 25×10^3 برای انجام تحلیل‌های بعدی به عنوان شبکه مبنا در نظر گرفته شده است.

برای استقلال از گام زمانی نیز شبکه مبنا برای تعداد گام زمانی 1000، 2000 و 4000 حل شده است. به منظور مقایسه تاثیر گام زمانی، ضریب برا بیشینه در شبکه 25×10^3 و گام زمانی 2000 در هر دوره نوسانی مبنای مقایسه قرار گرفته و شرایط آزمایش شده دیگر با این حالت سنجیده شده است. همانطور که در جدول 1 مشخص است، اختلاف بین ضریب برا بیشینه محاسبه شده در شبکه مستقل بدست آمده با تعداد گام زمانی 2000 و 4000 بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن است. بنابراین از نتایج گرفته شده برای شبکه و گام زمانی، شبکه‌ای با تعداد 25×10^3 سلول و با تعداد گام زمانی 2000 برای تحلیل‌های آینده انتخاب شده است.

جدول 1- تاثیر اندازه شبکه‌های مختلف و گام زمانی، اختلاف بر اساس نمونه مبنا (25×10^3 سلول و تعداد گام زمانی 2000) محاسبه شده است.

$T/\Delta t$	اندازه شبکه $\times10^3$	اختلاف (%)
1000	25	0/28
4000	25	0/14
2000	25	0/17
2000	13	2/45
2000	9	3/4

اعتبار سنجی

برای اطمینان از صحت مطالعه عددی حاضر، نتایج با اطلاعات منتشر شده مقایسه و به خوبی اعتبار سنجی شده است. در شبیه‌سازی حاضر عدد رینولدز 555، دامنه نوسان 2 درجه و فرکانس کاهیده 0/1 انتخاب شده است و محور پیچش بر روی وتر و در فاصله 0/25 از نوک بالواره قرار گرفته است. در شکل 5 نتایج ضریب برا در برابر زمان بی‌بعد با شبیه‌سازی امیرعلایی[3] مقایسه شده است که انطباق خوبی را نشان می‌دهد.

اثر دامنه‌ی نوسان

در این شبیه‌سازی اثر دامنه‌ی نوسان بر روی ضریب برا بررسی شده است. در شکل 6 ضریب برا آنی نسبت به زمان بی‌بعد برای شرایط کاری رینولدز 555، فرکانس کاهیده 0/1 و دامنه‌های نوسان 2، 4، 6 و 8 درجه رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضرایب برا محاسبه شده به صورت دوره‌ای و نوسانی می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب برا بیشینه با افزایش دامنه‌ی نوسان افزایش می‌یابد. این امر به خاطر افزایش زاویه حمله بر طبق معادله (3) می‌باشد. افزایش دامنه نوسان همچنین باعث تسریع در ضریب برا بیشینه می‌شود. علت این امر تاثیر قوی ویک جاری و ساختار گردابه در دامنه نوسان بالاتر است.

اثر عدد رینولدز

در این مطالعه برای فرکانس کاهیده 0/1 و دامنه‌های نوسان 2و 8 درجه که کمترین و بیشترین دامنه نوسان بیان شده در این تحقیق می‌باشد اثر عدد رینولدز بر روی ضرایب برا با در نظر گرفتن رینولدزهای 555، 1000، 2000 و 5000 بررسی شده است.

همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود برای دامنه نوسان 8 درجه با افزایش عدد رینولدز حلقه‌های ضریب برا به صورت ساعتگرد چرخیده‌اند و ضریب برا بیشینه با افزایش عدد رینولدز کاهش و همچنین در زاویه‌های حمله‌ی کمتری اتفاق می‌افتد. برای بیان علت این امر نمودارهای خطوط جریان در زمانی که ضریب برا به بیشترین مقدار خود می‌رسد برای هر حالت در شکل‌های 8 تا 11 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود برای رینولدز 555 در این زمان که ضریب برا بیشینه است برگشت جریان بر روی سطح بالایی بالواره شروع می‌شود و ضریب برا از این زمان به بعد کاهش می‌یابد. برای رینولدز 1000 در شکل 9 در زمان بیشینه برا، برگشت جریان بر روی سطح بالایی بیشتر است و منجر به کاهش 3/5 درصدی ضریب برا نسبت به حالت رینولدز 555 شده است. با افزایش رینولدز از 1000 تا 2000 همانطور که در شکل 10 دیده می‌شود جریان برگشتی با تولید گردابه در انتهای بالواره بیشتر شده و در ناحیه‌ی وسیع‌تری بر روی سطح بالایی سرعت کاهش یافته که باعث افزایش فشار در سطح بالایی و افزایش برا منفی شده که باعث کاهش 6 درصدی ضریب برا نسبت به حالت رینولدز 1000 شده است. درشکل 11 در رینولدز 5000 گردابه بزرگ انتهای بالواره جریان برگشتی وسیعی را روی سطح بالایی بالواره تولید کرده است که باعث می‌شود که تقریبا تا نزدیکی‌های لبه حمله جریان برگشتی سرعت را بر روی سطح بالایی به کمترین مقدار خود برساند که نتیجه آن افزایش فشار و تولید برا منفی است که باعث می‌شود ضریب برا تا 14 درصد نسبت به حالت رینولدز 2000 کاهش یابد.

نتایج ضرایب برا بیشینه و زاویه حمله‌های آن در رینولدزهای مختلف در جدول 2 گزارش داده شده است.

جدول 2: ضریب برا بیشینه در زاویه حمله بدست آمده در دامنه نوسان 8درجه و رینولدزهای مختلف

Re	α	$C_{l\,max}$
555	7/77	0/5383
1000	7/66	0/5192
2000	7/46	0/4866

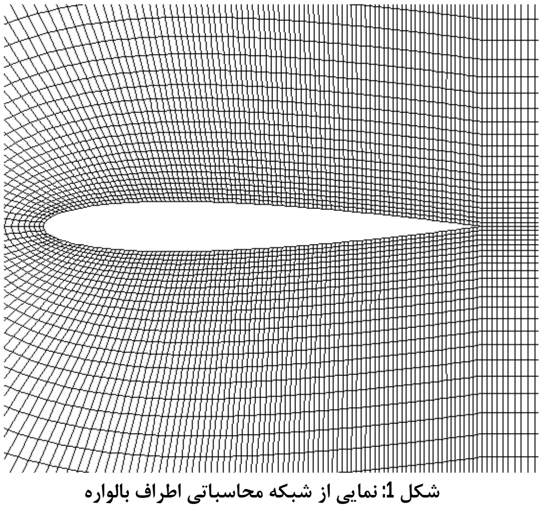
5000	7/089	0/417

همانطور که در شکل 7 دیده می‌شود هنگام کاهش زاویه‌ی حمله در رینولدز 5000 نوسانات شدیدی تولید شده است که آن به این خاطر است که به هنگام برگشت بالواره به زاویه حمله‌های پایین‌تر گردابه‌های ریز فراوانی بر روی سطح بالواره تشکیل می‌شود که به سمت لبه حمله حرکت می‌کنند که باعث تولید نواحی کم فشار و پر فشار متناوب بر روی سطح بالواره و در نتیجه نوسان ضریب برا می‌شود. این نوسانات در رینولدز 2000 نیز به صورت کمتری مشاهده می‌شود. شکل‌های 12 تا 14 به خوبی این گردابه‌ها را نشان می‌دهد.

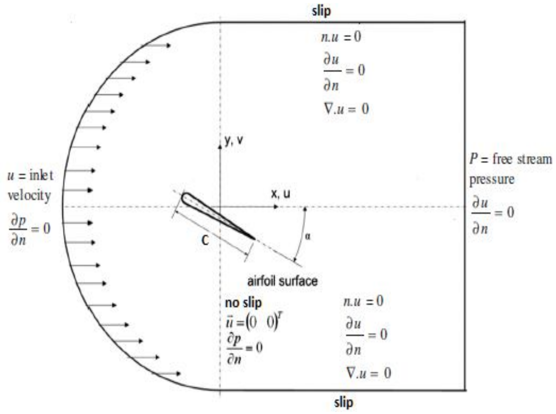
اثر عدد رینولدز در دامنه نوسان 2 درجه نیز بررسی شده است که همانطور که در شکل 15 مشاهده می‌شود رفتاری مشابه با دامنه نوسان 8 درجه دارد به جز این‌که در رینولدز 5000 دیگر نوسانی مشاهده نمی‌شود. چون در دامنه نوسان 2 درجه گردابه کوچکی در لبه‌ی فرار تشکیل شده و از بین می‌رود و بر روی سطح بالواره گردابه‌ای به وجود نمی‌آید.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

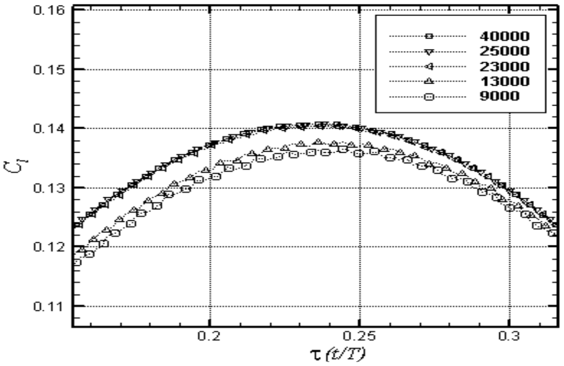
مطالعه‌ی عددی آیرودینامیکی دو بعدی اطراف بالواره ناکا0012 در حرکت دینامیکی پیچشی در جریان رینولدز پایین به صورت ناپایا انجام و تاثیر دامنه‌ی نوسان و عدد رینولدز بر روی ضریب برا لحظه‌ای و الگوی جریان بررسی شده است. حل معادلات ناویراستوکس بر اساس گسسته‌سازی به روش حجم محدود صورت گرفته است. نتایج تاثیر قابل توجه پارامترهای ناپایای فوق الذکر را بر روی ضریب برا بیشینه نشان می‌دهد. پارامترهای بررسی شده، مقدار بیشینه‌ی نیرو را بسته به ساختار الگوی جریان اطراف بالواره، افزایش یا کاهش می‌دهد. با افزایش دامنه‌ی نوسان ضریب برا افزایش پیدا کرده است و مقادیر بیشینه‌ی ضریب برا در زمان کمتری رخ داده است. با افزایش عدد رینولدز ضریب برا بیشینه، کاهش پیدا کرده است که ناشی از قدرت گردابه‌های تشکیل شده بر روی سطح بالواره می-باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ریز گردابه‌ها به سمت لبه‌ی حمله حرکت کرده و باعث تولید یک الگوی نوسانی در ضریب برا می‌شود.



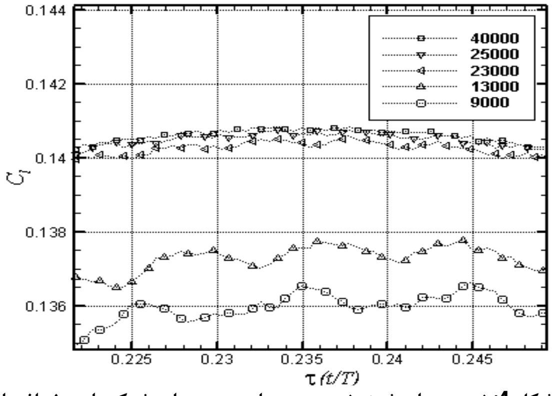
شکل 1: نمایی از شبکه محاسباتی اطراف بالواره



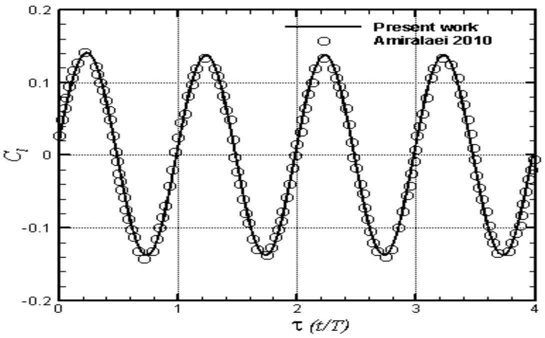
شکل 2: نمایی از ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی



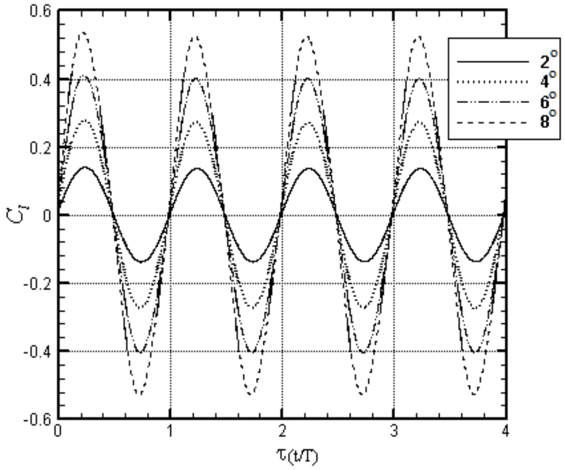
شکل 3: ضریب برا بیشینه نسبت به زمان بی‌بعد برای شبکه‌های مختلف



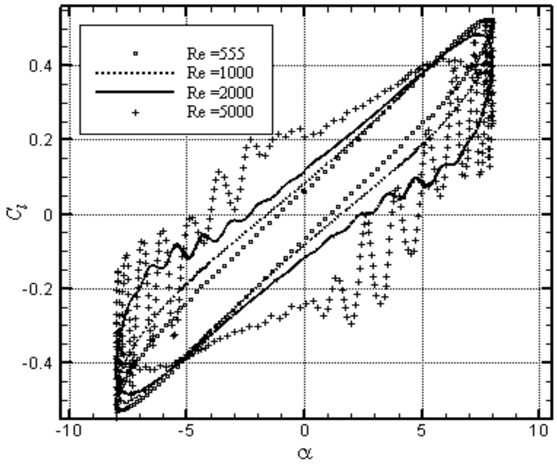
شکل 4: ضریب برا بیشینه نسبت به زمان بی‌بعد برای شبکه‌های مختلف با دقت بالاتری نسبت به شکل 3



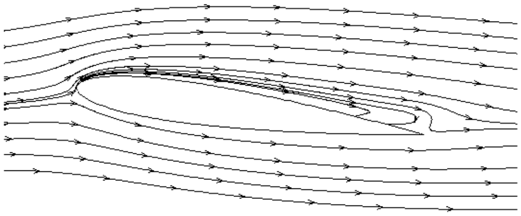
شکل 5: ضریب برا نسبت به زمان بی‌بعد(رینولدز 555، دامنه نوسان 2درجه و فرکانس کاهیده 0/1)



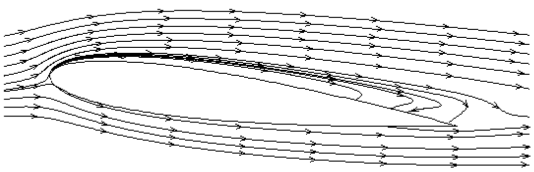
شکل **6**: ضریب برا نسبت به زمان بی‌بعد برای دامنه‌های نوسان مختلف



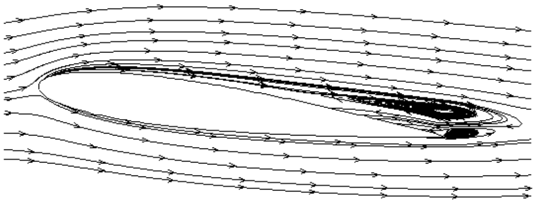
شکل **7**: ضریب برا نسبت به زاویه حمله برای رینولدزهای مختلف و در دامنه نوسان **8** درجه



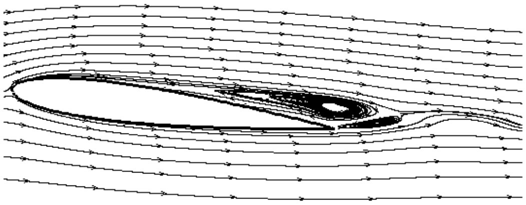
شکل **8**: رینولدز **555**، حرکت به طرف بالا و زاویه **7/77** درجه



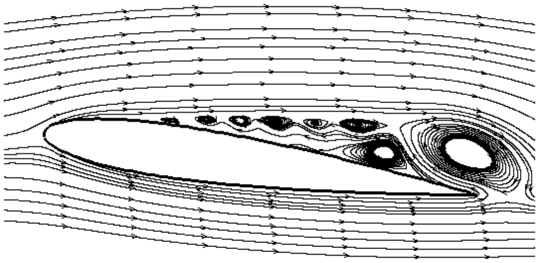
شکل **9**: رینولدز **1000**، حرکت به طرف بالا و زاویه **7/66** درجه



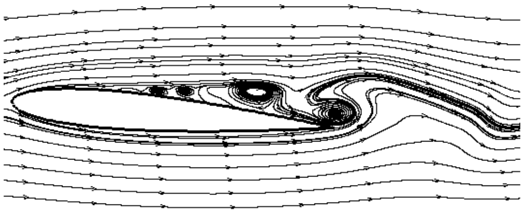
شکل **10**: رینولدز **2000**، حرکت به طرف بالا و زاویه **7/46** درجه



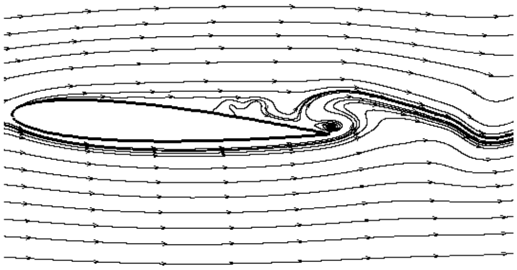
شکل **11**: رینولدز **5000**، حرکت به طرف بالا و زاویه **7/089** درجه



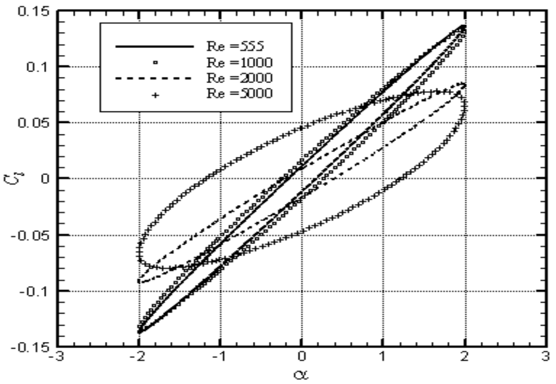
شکل **12**: رینولدز **5000**، حرکت به طرف پایین و زاویه **7/99** درجه



شکل **13**: رینولدز **5000**، حرکت به طرف پایین و زاویه **4/75** درجه



شکل **14**: رینولدز **5000**، حرکت به طرف پایین و زاویه **2/19** درجه



شکل **15**: ضریب برا نسبت به زاویه حمله برای رینولدزهای مختلف و در دامنه نوسان **2** درجه

مراجع

1. Akbari, M.H., Price, S.J., Simulation of dynamic stall for a NACA 0012 airfoil using a vortex method. *Journal of Fluids and Structures* 17, 2003, pp. 855–874.

2. Young, J., Lai, J.C.S., Oscillation frequency and amplitude effects on the wake of a plunging airfoil. *AIAA Journal*42, 2004, pp.2042–2052.

3.Amiralaei, M.R., Alighanbari, H., Hashemi, S.M.,An investigation into the effects of unsteady parameters on the aerodynamics of a low Reynolds number pitching airfoil. *Journal of Fluids and Structures* 26 (6), 2010,pp 979–993.

4. SolKeun Jee.,Robert D. Moser. , Conservative integral form of the incompressible Navier–Stokes equations for a rapidly pitching airfoil. *Journal of Computational Physics*, Vol. 231, 2012, pp. 6268-6289.

5. K. Lu, Y.H. Xie, D. Zhang. , Numerical study of large amplitude, nonsinusoidal motion and camber effects on pitching airfoil propulsion. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 36, 2013, pp. 184-194.

6. OpenFOAM, 2008. The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 1.5. OpenCFD Limited.