

بهبود بازده ائرو دینامیکی ایرفویل های نوسانی رینولدز پایین با استفاده از فلپ های گرنی

علیرضا نادری^۱، علیرضا بیکی^۲

۱ استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، prof.naderi@gmail.com

۲ کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۴

چکیده

اصولاً بال و سائل هوایی سرعت پایین، که در اعداد رینولدز پایین پرواز می کنند، برای افزایش برد و کاهش مصرف سوخت باید همانند پرندگان به صورت بال زن طراحی شود. اما بررسی ایرفویل های نوسانی هارمونی ساده نشان می دهد که هر چند در فراحمله نیروی برا بیش تر از ایرفویل ثابت ایجاد می کنند، اما گاهی کاهش این نیرو در فروحمله بسیار زیاد است؛ پس یا باید از مدهای پیچیده حرکتی استفاده نمود یا ایرفویلی با پروفیل پیچیده طراحی کرد. هدف از تحقیق حاضر بهبود بازده ائرو دینامیکی ایرفویل های نوسانی هارمونی ساده سرعت پایین با طراحی فلپ گرنی بر آن می باشد که هم در فراحمله و هم فروحمله بازده ائرو دینامیکی بهتر از ایرفویل نوسانی صاف ارائه دهد. برای این منظور از روش عددی فشار پایه حجم المان محدود روی شبکه متحرک استفاده شده است. در کار حاضر، مکان و ارتفاع فلپ های گرنی به عنوان دو پارامتر مهم طرح مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که هر چه فلپ ها به لبه فرار نزدیک تر باشد، بازده ائرو دینامیکی افزایش می یابد؛ هر چند که ارتفاع آنها باید در یک حد خاص محدود شود. گردابه های تولید شده توسط ایرفویل فلپ گرنی نقشی اساسی را در بهبود بازده ائرو دینامیکی ایفا می کنند. این گردابه ها از طریق تغییر توزیع فشار و همین طور تأثیراتی که بر روی جدایش جریان روی سطح بالایی ایرفویل دارند، سبب افزایش بازده ائرو دینامیکی می شوند.

واژگان کلیدی

ایرفویل نوسانی، گرنی فلپ^۱، بازده ائرو دینامیکی

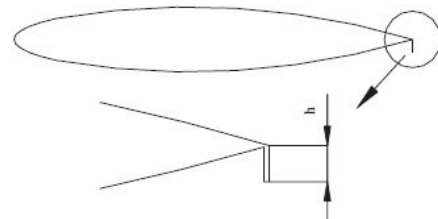
۱. مقدمه

انتخاب می گردد [۱]. این مدهای حرکتی شکل های پیچیده ای دارند و سازوکار اعمال آنها پیچیده و هزینه بر است. به جای این مدهای پیچیده شاید بتوان نوسان هارمونی ساده مد نظر قرار داد و

هر چند استفاده از سطوح بال زن برای دستیابی به بازده ائرو دینامیکی با توان مصرفی کم در اعداد رینولدز پایین پیشنهاد می شود، اما مدهای حرکتی نوسانی کارا سبب محدودیت در این

برای کنترل جریان حول آنها نیز ایده‌های آسانی پیشنهاد و اعمال کرد. تحقیقات انجام شده در زمینه ایرفویل‌های نوسانی نشان می‌دهد که ضرایب ائرو دینامیکی به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر مشخصات تابع نوسان قرار دارند [۲]. هرچند افزایش مقدار برا در فرامه از حالت شبه پایای ایرفویل بیشتر است، اما در فرامه با کاهش زیاد مقدار برا مواجه شده و ممکن است به‌صورت نوسانی باشد [۳]. بنابراین کنترل یا مدیریت جریان به‌منظور حفظ یا افزایش نیروی برا در فرامه و جلوگیری از کاهش آن در فرامه ضروری است. افزایش بازده ائرو دینامیکی و نیروی پسا در این دو مرحله نیز باید مد نظر قرار گیرد. تاکنون برای کنترل جریان روی ایرفویل‌های نوسانی از روش‌های متنوعی استفاده شده است [۴-۵]. از طرفی فلپ‌های گرنی به‌عنوان یک روش کنترل جریان غیرفعال در سالیان اخیر قابلیت‌های خود را نشان داده‌اند [۶-۷] و از آنها برای کنترل جریان روی ایرفویل‌های نوسانی رینولدز بالا استفاده شده است [۸-۹].

فلپ‌های گرنی نخستین بار توسط دانیل گرنی^۲، راننده اتومبیل‌های مسابقه، در مسابقات ایندیاناپولس^۳ مورد استفاده قرار گرفت [۱۰-۱۱]. این فلپ‌ها صفحه‌هایی ساده‌اند که معمولاً ارتفاع بسیار کمی در مقابل طول وتر ایرفویل داشته و به‌صورت عمودی به لبه فرار ایرفویل نصب می‌شوند (شکل ۱). تاکنون از فلپ‌های گرنی در کاربردهای متنوعی چون پره فن‌ها به‌منظور خنک‌کاری [۱۲]، بهبود بازده ائرو دینامیک ایرفویل‌ها [۱۰] و جز این‌ها استفاده شده است.



شکل ۱. هندسه ایرفویل به‌همراه گرنی فلپ

اولین بررسی آزمایشگاهی روی گرنی فلپ‌ها توسط لیپک روی یک ایرفویل نیومن ثابت در اعداد رینولدز بالا صورت گرفت [۱۳]. این پژوهشگر نتیجه گرفت که گرنی فلپ با ارتفاع ۱/۲۵ درصد طول وتر، باعث افزایش برا و کاهش پسا می‌شود. همچنین نشان داد برای اینکه بیشینه کارایی ائرو دینامیکی از گرنی فلپ‌ها به‌دست آید، باید ارتفاع آنها بین ۱ تا ۲ درصد طول وتر ایرفویل باشد. با این وجود تحقیقات دیگر، بیانگر افزایش پسا و

استفاده از گرنی فلپ‌ها در ابعاد بسیار وسیع‌تر می‌باشند [۱۰، ۱۲]. از پارامترهای مهم در طراحی این وسایل، ارتفاع، موقعیت نصب، زاویه نصب و شکل آنها می‌باشد [۱۰]. در ایرفویل‌های فروصوت، فلپ‌های گرنی مکش سطح بالایی ایرفویل و فشار سطح پایینی آن را افزایش می‌دهند که منجر به افزایش نیروی برا برای ایرفویل می‌شود. فلپ‌های گرنی با ایجاد گردابه‌هایی پادساعتگرد در پایین دست جریان باعث افزایش انحنای ایرفویل و تغییر موقعیت شرایط کوتا می‌شوند. همچنین ایجاد یک ناحیه چرخشی در بالادست فلپ گرنی سبب افزایش فشار روی سطح بالایی فلپ گرنی و در نتیجه افزایش فشار کل روی ایرفویل می‌شود. ناحیه گردابه‌ای بلندی که در پایین دست گرنی فلپ‌ها قرار دارد، می‌تواند باعث حذف یا کاهش ناحیه جدایش در سطح بالایی ایرفویل و نزدیک لبه فرار شود. از طرفی، گرنی فلپ‌ها باعث افزایش پسا می‌شوند، اما نسبت برا به پسا تحت شرایطی بسیار بیشتر افزایش می‌یابد. هدف این مقاله، بررسی توانایی گرنی فلپ‌ها به‌عنوان یک روش غیرفعال و طراحی آنها برای بهبود کارایی ائرو دینامیکی ایرفویل‌های نوسانی رینولدز پایین می‌باشد که در این نوع جریان‌ها تحقیق‌های مشابه انجام نشده است.

۲. شرح مسئله

در اینجا، برای تأثیر مناسب بر ناحیه نوسانی جریان روی سطح پایینی ایرفویل نوسانی، گرنی فلپ‌های متفاوت در لبه فرار قرار می‌گیرد. برای مقایسه، نتایج ایرفویل با انواع مختلف گرنی فلپ‌ها با هم و با ایرفویل بدون گرنی فلپ ارائه می‌شود. طول وتر ایرفویل واحد است و تمام طول‌ها با آن بی‌بعد می‌شود. گرنی فلپ در لبه فرار و در فاصله‌های ۱/۵ و ۳ درصد طول وتر از لبه فرار قرار می‌گیرد و ارتفاع آن نیز ۱/۵ و ۳ و ۶ و ۸ درصد طول وتر می‌باشد. معادله نوسان این ایرفویل به‌صورت رابطه ۱ است:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(2\pi f^* t) \quad (1)$$

۳. مدل ریاضی و روش عددی

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت است که در فضای لاگرانژی - اویلری به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{\mathcal{G}(t)} \rho d\mathcal{G} + \iint_{S(t)} \rho(\mathbf{V} - \mathbf{V}') \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint_{\mathcal{G}(t)} \rho \mathbf{V} d\mathcal{G} + \iint_{S(t)} \rho \mathbf{V}(\mathbf{V} - \mathbf{V}') \cdot d\mathbf{S} = \iint_{S(t)} \sigma \hat{\mathbf{n}} dS \quad (3)$$

در این شکل زاویه نصب ایرفویل ۱۰ درجه است و گرنی فلپ با ارتفاع ۱/۵ درصد طول وتر ایرفویل در لبه فرار ایرفویل قرار دارد. روی محیط ایرفویل با شبکه چهارضلعی و کمی دورتر شبکه بی‌سازمان سه‌ضلعی تا محل مرزهای آزاد، ورودی و خروجی استفاده می‌شود. فاصله مرکز ایرفویل از مرزهای آزاد و ورودی و خروجی ۳۰ است. سرعت جریان در مرز ورودی و مرزهای آزاد واحد است. مقدار فشار در مرز خروجی نیز واحد است. عدد رینولدز جریان بر مبنای طول وتر ایرفویل و سرعت ورودی برابر ۱۰۰۰ است. به منظور بررسی حساسیت حل به شبکه محاسباتی و گام زمانی از سه شبکه ریز و درشت به ترتیب با حدود ۷۰۶۹، ۱۶۰۹۳ و ۲۵۹۴۹ گره و گام‌های زمانی ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵ روی حالت شکل ۲ استفاده شده است که نتایج نشان‌دهنده اختلاف ناچیز جواب‌ها در شبکه‌های متوسط و ریز و با این گام‌های زمانی است (شکل‌های ۳ و ۴). در این مقاله در همه حالات بیش از ۱۶۰۰۰ گره در کل میدان وجود داشته و گام زمانی نیز ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

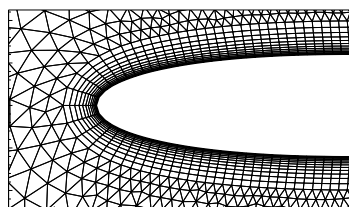
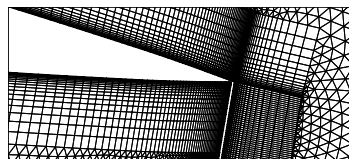
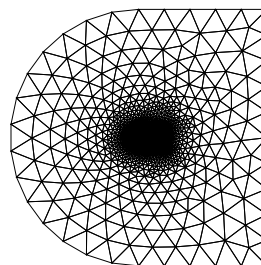
۴. اعتبارسنجی روش عددی

برای بررسی اعتبار روش عددی حاضر جریان آرام حول یک سیلندر با حرکت نوسانی انتقالی عمود بر مسیر جریان مورد بررسی قرار گرفته است. معادله حرکت سیلندر به صورت $y = A \cos(2\pi f_e t)$ می‌باشد. در این معادله A دامنه نوسان سیلندر است که مقدار آن ۰/۲ قطر سیلندر است و f_e فرکانس نوسان سیلندر است که مقدار آن ۰/۸ برابر فرکانس ریزش گردابه (f_o) جریان حول سیلندر ثابت است. در شکل ۵ شبکه کار رفته حول این سیلندر نوسانی نمایش داده شده است. ضریب فشار و ضریب اصطکاک برای این سیلندر نوسانی، وقتی سیلندر در بالاترین محل حرکت خود قرار دارد با نتایج حاصل از کار جیلمن و کوتی [۱۶] و یانگ و بالاراس [۱۷] در شکل ۶ مقایسه شده است. محور افقی این گراف‌ها زاویه را برحسب درجه نشان می‌دهند که از نقطه سکون در جهت ساعت‌گرد افزایش می‌یابد. جواب‌های روش حل حاضر نسبت به جواب‌های یانگ و بالاراس به جواب‌های جیلمن و کوتی نزدیکتر است.

۵. بررسی نتایج

برای بررسی موقعیت مکان نصب فلپ‌های گرنی، آنها دقیقاً در لبه فرار و همچنین در فواصلی که ۰/۹۸۵ و ۰/۹۷ درصد طول وتر از

به طوری که در این روابط $V = u\hat{i} + v\hat{j}$ بردار سرعت سیال، $V' = u'\hat{i} + v'\hat{j}$ بردار سرعت سطوح حجم محدود و $ds = (ds_x)\hat{i} + (ds_y)\hat{j}$ بردار عمود بر سطح سلول با بزرگی $ds = [(ds_x)^2 + (ds_y)^2]^{1/2}$ بردار یک عمود بر سطح سلول و θ حجم مربوط به هر حجم محدود است. همچنین در این معادله σ تانسور تنش کل است. در این مقاله از دیدگاه لاگرانژی - اویلری برای حل میدان جریان و با روش حجم المان محدود استفاده می‌شود [۱۴-۱۵]. از رویکرد مرتبه دوم زمانی در تقریب جملات زمانی استفاده شده است. برای تقریب جملات پخش در معادلات، از توابع شکلی اجزای محدود استفاده می‌شود. جملات فشار نیز با استفاده از آن تقریب زده می‌شوند. در تمامی معادلات حاکم بخشی از جملات جابه‌جایی که به طور صریح متأثر از حرکت شبکه است با استفاده از قوانین بقای هندسی و رویکردهای زمانی ایجاد شده به دست می‌آید. بخش دوم جملات جابه‌جایی هم به طور یکپارچه در تمام معادلات حاکم با روش بالادست و با استفاده از آثار فیزیک جریان تقریب زده می‌شوند. با حل جریان در دامنه‌های پیچیده نشان داده شده است که روش ترکیبی به طور یکسان و دقیقی قادر به محاسبه شارها در المان‌های ثابت یا متحرک سه‌ضلعی و چهارضلعی می‌باشد [۱۴-۱۵]. شبکه به کار رفته حول این ایرفویل به صورت ترکیبی است. بخشی از شبکه اولیه قبل از شروع دوران ایرفویل در شکل ۲ نمایش داده شده است.

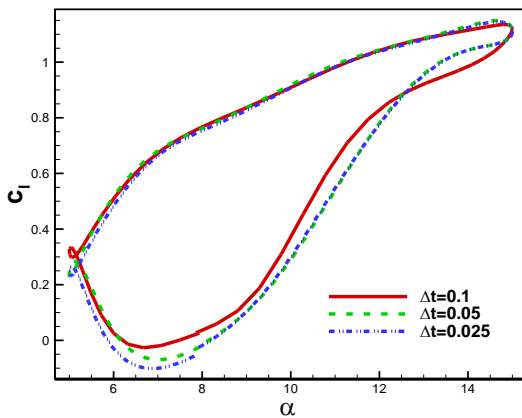


شکل ۲. شبکه ترکیبی ایجاد شده حول ایرفویل نوسانی

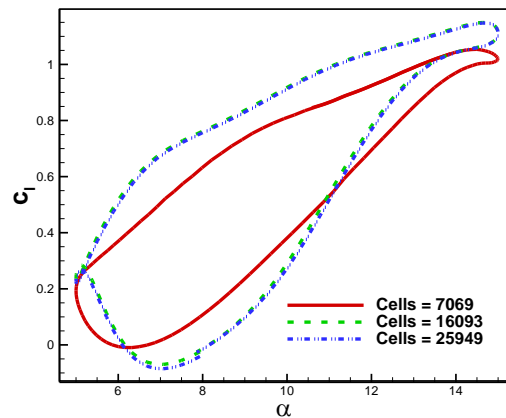
کارایی ائرو دینامیکی نیز افزایش یافته می‌یابد. شکل ۹ آثار ارتفاع را بر ضرایب ائرو دینامیکی ایرفویل نوسانی نشان می‌دهد. برای این منظور گرنی فلپ‌ها با ارتفاع‌های ۱/۵، ۳، ۶ و ۸ درصد طول وتر ایرفویل دقیقاً در لبه فرار قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برا و پسا هر دو افزایش یافته و هرچه ارتفاع گرنی فلپ‌ها بیشتر باشد، این افزایش نیز بیشتر است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با وجود افزایش پسا، بازده ائرو دینامیکی افزایش یافته است. از طرفی، با مشاهده شکل ۱۰ می‌توان دریافت که هرچه گرنی فلپ‌ها ارتفاع بیشتری داشته باشند در زوایای حمله پایین کارایی بیشتری خواهند داشت. شکل ۱۱ خطوط جریان و شکل ۱۲ میدان فشار اطراف ایرفویل صاف و ایرفویل با فلپ به ارتفاع ۶ درصد وتر که در لبه فرار قرار گرفته است، را در حدود سه‌چهارم از پرورد کامل نوسان آن مقایسه می‌کند. پیکان به سمت بالا به معنای فرامحله و پیکان به سمت پایین به معنای فروحملة است.

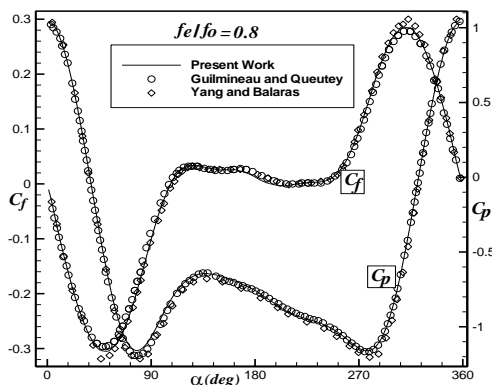
لبه حمله فاصله دارند، نصب شده‌اند. در اینجا ارتفاع فلپ ۱/۵ درصد طول وتر است. قسمت الف از شکل ۷ نشان‌دهنده افزایش نیروی برا روی ایرفویل‌های نوسانی در تمام حلقه نوسان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد ضریب برا هم در فرامحله و هم در فروحملة به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه مکان نصب فلپ‌های گرنی به لبه فرار ایرفویل نزدیک‌تر باشد، برا بیشتر افزایش یافته است و این افزایش برا در بیشینه زاویه حمله مشهودتر است. از طرفی با توجه به قسمت ب از شکل ۷ مشاهده می‌شود که پسا نیز افزایش یافته است و هرچه فلپ‌های گرنی به لبه فرار نزدیک‌تر شود، این افزایش پسا نیز بیش‌تر می‌باشد. با این‌وجود شکل ۸ نشان می‌دهد که بازده ائرو دینامیکی افزایش یافته است. همچنین ایرفویل ثابت و ایرفویل ثابتی که گرنی فلپ در لبه فرار آن قرار گرفته است در اینجا نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک‌شدن به لبه فرار، ضریب برا و



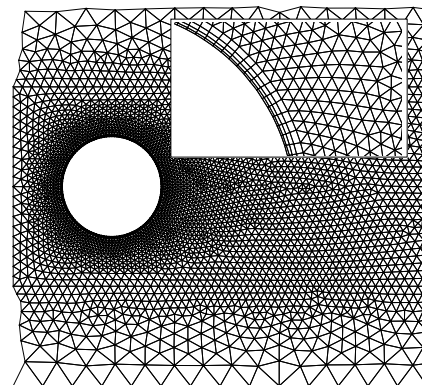
شکل ۴. بررسی استقلال زمانی



شکل ۳. بررسی استقلال شبکه



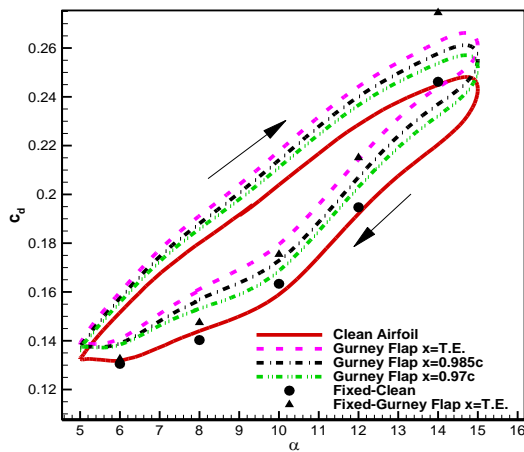
شکل ۶. مقایسه نتایج عددی حاضر برای یک سیلندر نوسانی با نتایج جیلمن و کوتی [۱۶] و یانگ و بالاراس [۱۷]



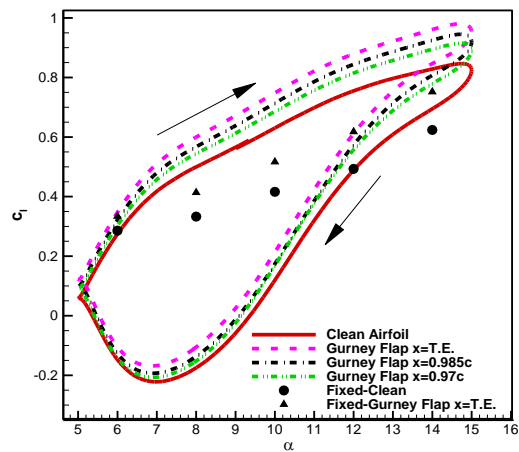
شکل ۵. نمایی از نمونه شبکه به کار رفته در اطراف سیلندر دایروی

بیشتری دارند، پس ایرفویل گرنی نسبت به ایرفویل صاف مکش بیشتری حس می‌کند. از طرفی، به دلیل انسداد جریان که حاصل وجود فلپ گرنی در مسیر جریان است، سطح پایین ایرفویل گرنی فشار بیشتری حس می‌کند. افزایش مکش در سطح بالایی و افزایش فشار روی سطح پایینی سبب افزایش مضاعف برا می‌شود. در زوایای کم فروحمله گردابه‌ای اضافی روی سطح بالایی ایرفویل گرنی فلپ تولید شده که آن هم سبب افزایش برا فروحمله در زوایای پایین نسبت به ایرفویل صاف می‌شود.

میدان جریان با استفاده از خطوط جریان نمایش داده شده است. با توجه به اینکه خطوط جریان خطوطی مماس بر بردار سرعت‌اند و سطح جسم متحرک است، ممکن است این خطوط عمود بر سطح نیز باشند و این حالت در میدان‌های جریان مرجع ۱۷ نیز مشاهده می‌شود. گردابه‌های پادساعتگرد ایجادشده ایرفویل با گرنی فلپ، به سمت پایین دست حرکت می‌کند و سبب ایجاد ناحیه‌ای کم‌فشارتر از ایرفویل صاف در لبه فرار می‌شوند. گردابه‌های سطح بالایی ایرفویل گرنی بزرگ‌تر و سرعت دوران

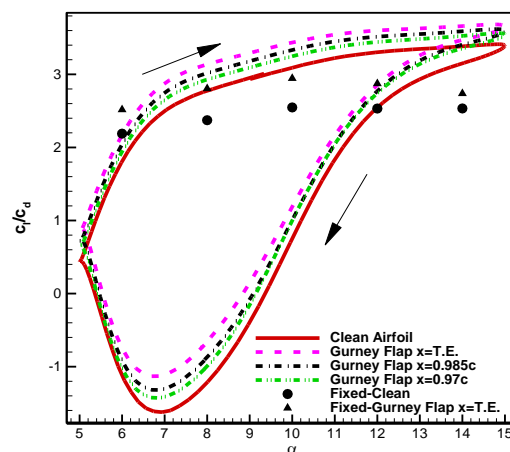


(ب)



(الف)

شکل ۷. تغییرات ضرایب ائرو دینامیکی با مکان قرارگیری فلپ‌های گرنی؛ الف) ضریب برآ، ب) ضریب پسا



شکل ۸. تغییرات بازده ائرو دینامیکی با تغییر مکان قرارگیری فلپ‌های گرنی

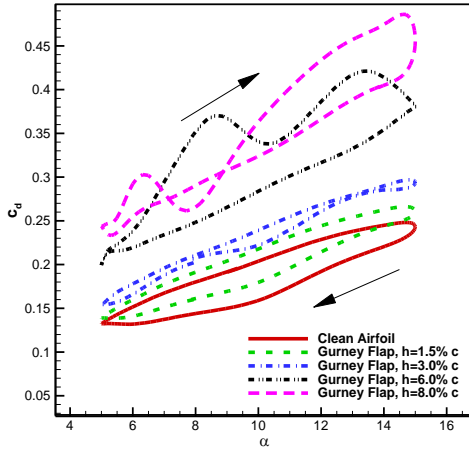
۶. نتیجه‌گیری

است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که فلپ‌های گرنی به طور چشمگیری باعث افزایش برآ و پسا می‌شوند اما میزان افزایش برآ بیشتر می‌باشد که منجر به افزایش بازده ائرو دینامیکی

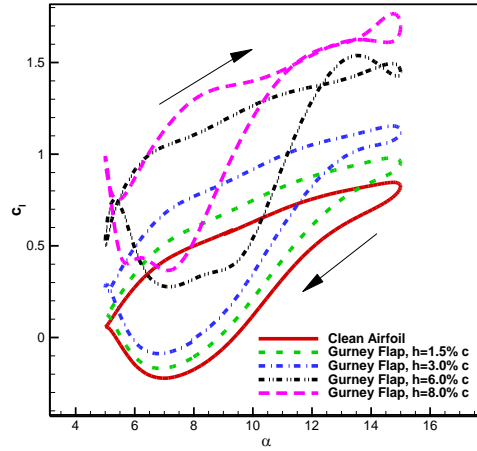
در این مقاله با استفاده از یک روش عددی فشار پایه حجم المان محدود بازده ائرو دینامیکی حاصل از فلپ‌های گرنی در یک ایرفویل نوسانی در عدد رینولدز پایین ۱۰۰۰ به دست آورده شده

ایجاد نیروی مناسب جهت افزایش بازده در سطح بالای ایرفویل حاصل از تغییرات حرکتی گردابه لبه حمله و در سطح زیر ایرفویل ناشی از افزایش فشار است.

ایرفویل‌های نوسانی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هرچه مکان نصب گرنی فلپ‌ها به لبه فرار نزدیک‌تر شود، بازده ائرو دینامیکی بیشتر می‌شود؛ اما ارتفاع آن تا حد محدودی می‌تواند افزایش یابد.

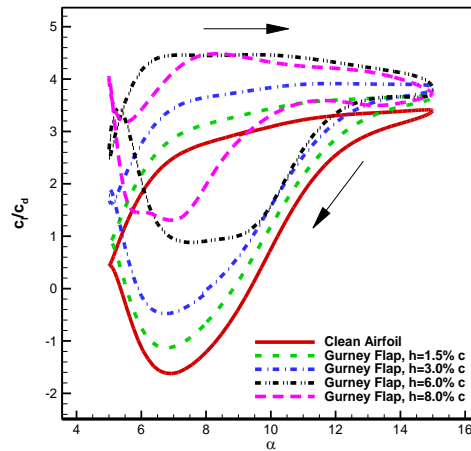


(ب)

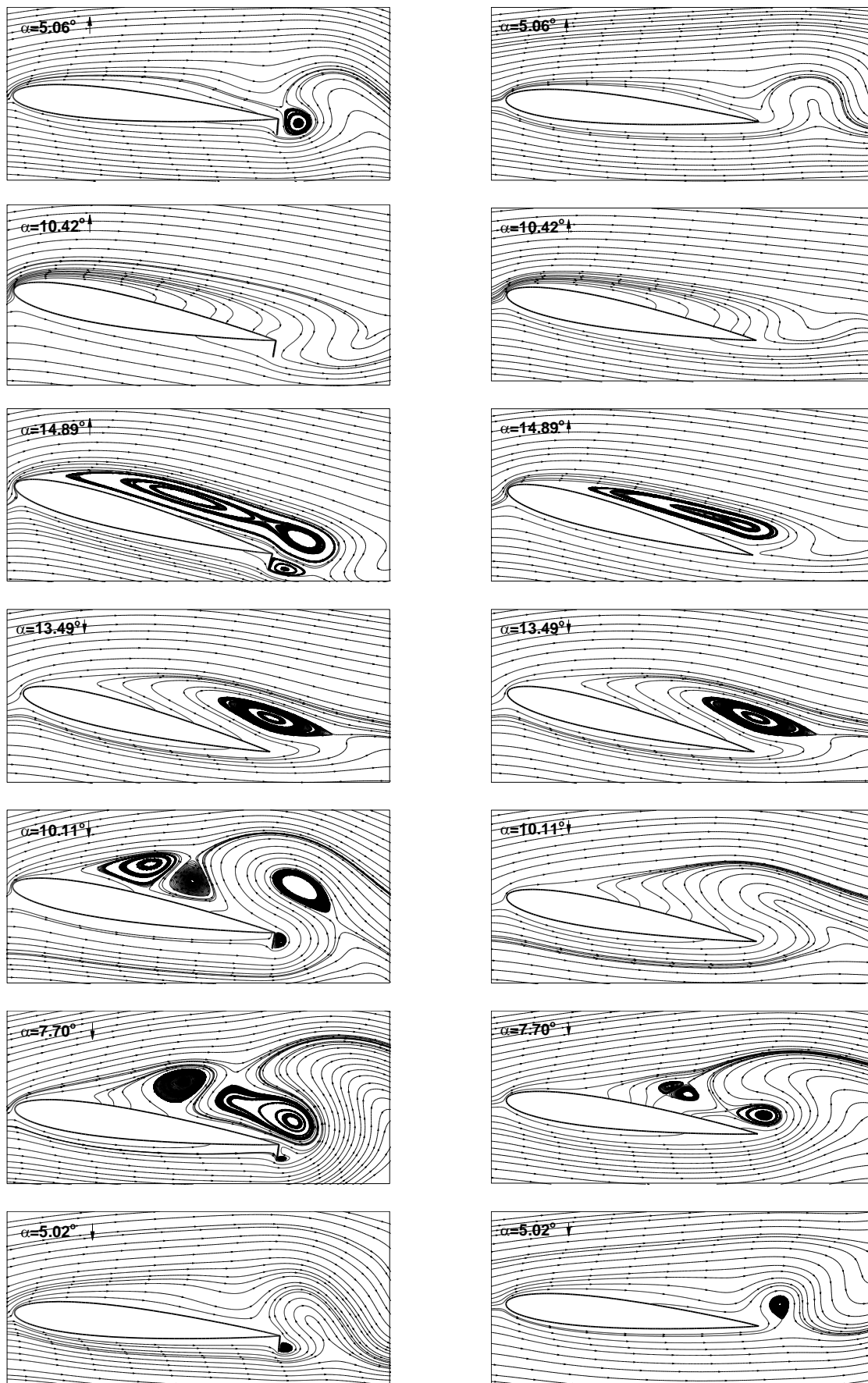


(الف)

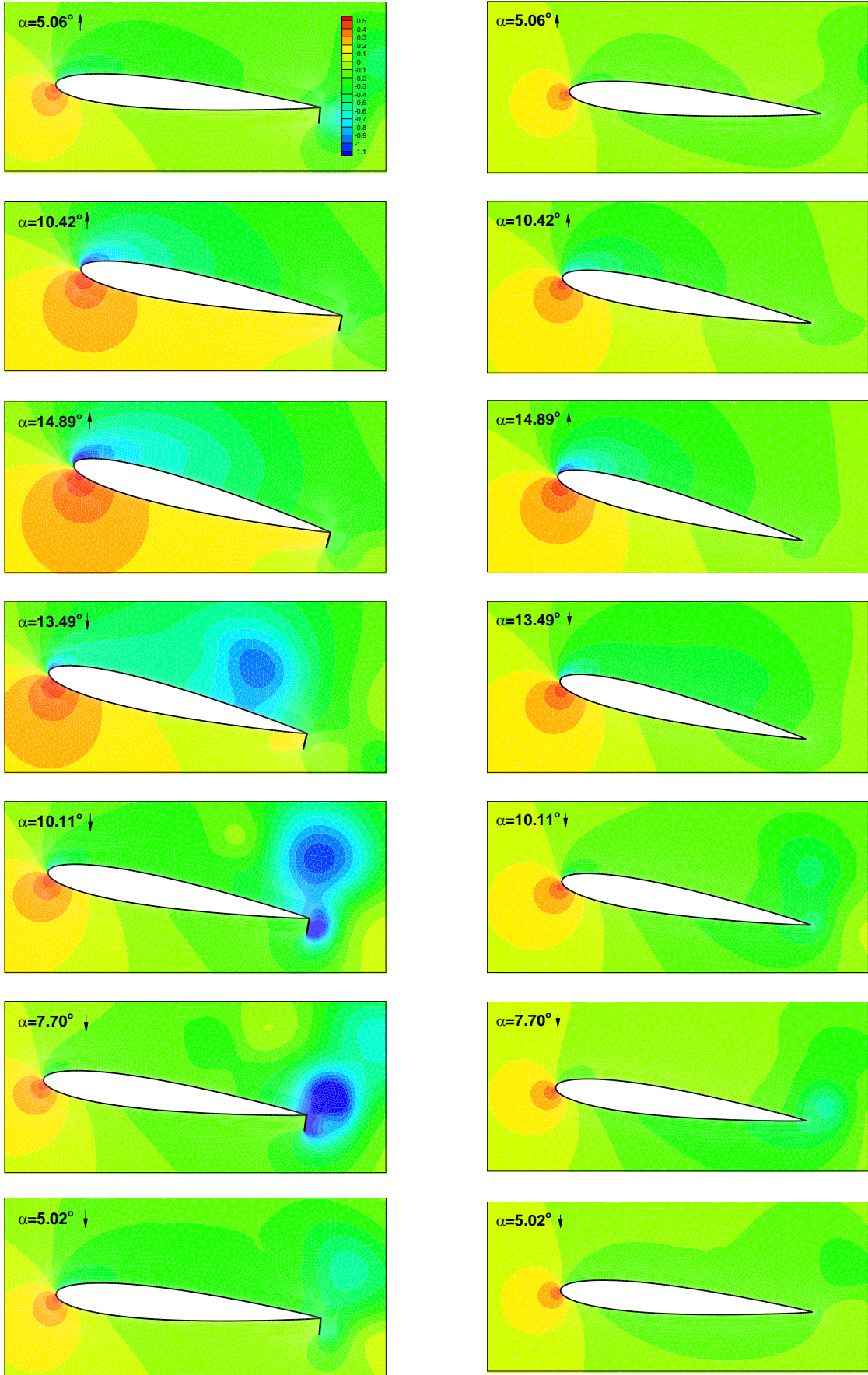
شکل ۹. تغییرات ضرایب ائرو دینامیکی با ارتفاع فلپ‌های گرنی؛ (الف) ضریب برآ، (ب) ضریب پسا



شکل ۱۰. تغییرات کارایی ائرو دینامیکی با تغییر ارتفاع فلپ‌های گرنی



شکل ۱۱. مقایسه خطوط جریان اطراف ایرفویل صاف و ایرفویل با گرنی فلپ



شکل ۱۲. مقایسه میدان فشار اطراف ایرفویل صاف و ایرفویل با گرنی فلپ

- [1] Wang, Z.J. "Aerodynamic efficiency of flapping flight: analysis of a two-stroke model." *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211, pp. 234-238.
- [2] Amiralaei, M.R., A. ghanbari, S.M. Hashemi. "An investigation into the effects of unsteady parameters on the aerodynamics of a low Reynolds number pitching airfoil." *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(6), pp. 979-993.
- [۳] نادری، علیرضا، مسعود دربندی، محمد طیبی رهنی. "بررسی تأثیر نوسان بر ضرایب اثرودینامیکی ایرفویل با یک الگوریتم دقیق عددی"، هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.
- [4] Post, M.L., T. C. Corke. "Separation control using plasma actuators: Dynamic stall vortex control on oscillating airfoil." *AIAA Journal*, 2006, 44(12), pp. 3125-3135.
- [5] Rehman, A., K. Kontis. "Synthetic jet control effectiveness on stationary and pitching airfoils." *Journal of Aircraft*, 2006, 43(6), pp. 1782-1789.
- [6] Brown, L., A. Filippone. "Aerfoil at low speed with Gurney flaps." *The Aeronautical Journal*, 2003, pp. 539-564.
- [7] Li, Y., J. Wang, P. Zhang. "Influences of mounting angles and locations on the effects of gurney flaps." *Journal of Aircraft*, 2003. 40(3), pp. 494-498.
- [8] Joo, W., Lee, Bo-Sung, Yee, Kwanjung, Lee, Dong-Ho. "Combining passive control method for dynamic stall control." *Journal of Aircraft*, 2006. 43(4), pp.1120-1128.
- [9] Yee, K., W. Joo, D.H. Lee. "Aerodynamic performance analysis of a Gurney flap for rotorcraft application." *Journal of Aircraft*, 2007. 44(3), pp. 1014-1003.
- [10] Wang, J.J., Y. C. Li, K. S. Choi. "Gurney flap-Lift enhancement, mechanisms and applications." *Progress in Aerospace Sciences*, 2008. 44(1), pp. 22-47.
- [11] Julia, C., et al. "An Experimental Investigation into the Effect of Gurney Flaps on Various Airfoils", in 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2011, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [12] Greenblatt, D. "Application of Large Gurney Flaps on Low Reynolds Number Fan Blades." *Journal of Fluids Engineering*, 2011. 133(2): pp. 021102-021102.
- [13] Liebeck, R.H. "Design of Subsonic Airfoils for High Lift." *Journal of Aircraft*, 1978. 15(9): pp. 547-561.
- [14] Darbandi, M., A. Naderi. "Multiblock hybrid grid finite volume method to solve flow in irregular geometries." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 196(1-3): pp. 321-336.
- [15] Naderi, A., M. Darbandi, M. Taeibi-Rahni. "Developing a unified FVE-ALE approach to solve unsteady fluid flow with moving boundaries." *International journal for numerical methods in fluids*, 2010. 63(1), pp. 40-68.
- [16] Guilmineau, E., P. Queutey. "A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder." *Journal of Fluids and Structures*, 2002. 16(6): pp. 773-794.
- [17] Yang, J., E. Balaras. "An embedded-boundary formulation for large-eddy simulation of turbulent flows interacting with moving boundaries." *Journal of Computational Physics*, 2006, 215(1).

پی نوشت

-
1. Gurney Flap or wickerbill
 2. Daniel Sexton Gurney (1931 -)
 3. Indianapolis