



بررسی حرکت نوسانی یک بالواره در نزدیکی سطح زمین

وحیده آذرگون^۱، محمد حسن جوارشکیان^۲، اسماعیل اسماعیلی فر^۳

۱ و ۲، دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد

در این تحقیق، جریان ناپایا، تراکم ناپذیر، لزج و آرام بر روی یک بالواره نوسانی دو بعدی NACA0012 در نزدیکی سطح زمین توسط یک روش عددی شبیه سازی شده است. در روش مذکور معادلات ناویر استوکس (Naver stockes) دو بعدی توسط روش حجم محدود گسسته و توسط الگوریتم پیمپل (Pimple) حل شده است. در این پژوهش، از شبکه دینامیکی بمنظور اعمال حرکت نوسانی (حرکت فراز و فرود) بالواره استفاده شده است. در ابتدا به منظور اعتبار-سنجی، جریان سیال بر روی بالواره با حرکت فراز و فرود و دور از سطح و همچنین جریان سیال بر روی بالواره‌ی پایا و نزدیک سطح زمین شبیه سازی شده و نتایج تغییرات ضریب برآ با داده‌های عددی منتشر شده، مقایسه که تطابق مطلوب نتایج، صحت شبیه‌سازی را تایید می‌نماید. در ادامه به بررسی اثر فرکانس نوسان بالواره بر ضریب برآ و پسا برای مقادیر مختلف عدد اشتروهل $2/0, 3/0$ و $0/4$ ، اثر فاصله‌ی بالواره از سطح $1, 1/5$ و 2 و همچنین اثر دامنه‌ی نوسان $0/2, 0/25, 0/3$ پرداخته شده است. ارزیابی نتایج حاصل نشان می‌دهد که در بالواره‌های نوسانی نزدیک سطح، فرکانس نوسان، دامنه‌ی نوسان و فاصله‌ی بالواره از سطح، پارامترهایی بسیار موثر بر ضرایب آیرودینامیکی می‌باشند. بعبارت دیگر، افزایش فرکانس نوسان، افزایش دامنه‌ی نوسان و کاهش ارتفاع پروازی باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شود همچنین نشان می‌دهد که در فرکانس‌های کم، اثر سطح پارامتر موثر حاکم بر نیروهای آیرودینامیکی می‌باشد در حالی که در فرکانس‌های متوسط پارامتر حاکم، اثر متقابل گردابه و بالواره است که با ایجاد یک زاویه حمله موثر باعث تولید نیروی برآ و نیروی جلوبرنده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بالواره نوسانی نزدیکی سطح حرکت فراز و فرود اثر سطح حرکت نوسانی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مکانیک و هوافضا، javareshkian@um.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا



بررسی حرکت نوسانی یک بالواره در نزدیکی سطح زمین

وحیده آذرگون^۱، محمد حسن جوارشکیان^۲، اسماعیل اسماعیلی فر^۳

۱، ۲ و ۳- دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد

چکیده

در این تحقیق، جریان ناپایا، تراکم ناپذیر، لزج و آرام بر روی یک بالواره نوسانی دو بعدی NACA0012 در نزدیکی سطح زمین توسط یک روش عددی شبیه سازی شده است. در روش مذکور معادلات ناویر استوکس (Naver-stokes) دو بعدی توسط روش حجم محدود گسسته و توسط الگوریتم پیمپل (Pimple) حل شده است. در این پژوهش، از شبکه دینامیکی بمنظور اعمال حرکت نوسانی (حرکت فراز و فرود) بالواره استفاده شده است. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی، جریان سیال بر روی بالواره با حرکت فراز و فرود و دور از سطح و همچنین جریان سیال بر روی بالواره‌ی پایا و نزدیک سطح زمین شبیه سازی شده و نتایج تغییرات ضریب برآ با داده‌های عددی منتشر شده، مقایسه که تطابق مطلوب نتایج، صحت شبیه‌سازی را تایید می‌نماید. در ادامه به بررسی اثر فرکانس نوسان بالواره بر ضریب برآ و پسا برای مقادیر مختلف عدد اشتروال (Strouhal) 0.2 ، 0.3 و 0.4 ، اثر فاصله‌ی بالواره از سطح $1/5$ ، 2 و همچنین اثر دامنه‌ی نوسان 0.2 ، 0.25 و 0.3 پرداخته شده است. ارزیابی نتایج حاصل نشان می‌دهد که در بالواره‌های نوسانی نزدیک سطح، فرکانس نوسان، دامنه‌ی نوسان و فاصله‌ی بالواره از سطح، پارامترهایی بسیار موثر بر ضرایب آیرودینامیکی می‌باشند. عبارت دیگر، افزایش فرکانس نوسان، افزایش دامنه‌ی نوسان و کاهش ارتفاع پروازی باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شود همچنین نشان می‌دهد که در فرکانس‌های کم، اثر سطح پارامتر موثر حاکم بر نیروهای آیرودینامیکی می‌باشد در حالی که در فرکانس‌های متوسط پارامتر حاکم، اثر متقابل گردابه و بالواره است که با ایجاد یک زاویه حمله موثر باعث تولید نیروی برآ و نیروی جلوبرنده‌گی می‌شود.

واژه های کلیدی: بالواره نوسانی نزدیکی سطح- حرکت فرازوفرود- اثر سطح- حرکت نوسانی

مقدمه

بالواره ساکن در نزدیک سطح و بالواره نوسانی هر دو موضوعات مهم و قابل توجه‌ای هستند که برای هر کدام تحقیقاتی صورت گرفته است و در سالهای اخیر این دو موضوع با هم نیز بررسی شده است. هنگامی که یک بال در نزدیکی سطح قرار می‌گیرد دو پدیده رخ می‌دهد یکی افزایش برآ و دیگری کاهش پسا که در نهایت موجب افزایش نسبت برآ به پسا می‌گردد. و همچنین هنگامی که بالواره دارای حرکت نوسانی فراز و فرود باشد از این حرکت نوسانی یک زاویه حمله‌ی موثر ایجاد می‌گردد، که باعث افزایش نیروی برآ و نیروی جلوبرنده‌گی می‌شود. به علت کاربرد -

همکارانش در سال ۲۰۰۷ شبیه سازی دو بعدی بالواره را در نزدیکی زمین انجام دادند آنها بالواره‌ی NACA/Munk M15 را در نزدیک سطح زمین و در جریان آزاد مورد بررسی قرار داده و یک رابطه برای ضریب برآ در نزدیکی سطح برحسب ضریب برای جریان آزاد ارائه نمودند [۱] مطالعه بر روی حرکت نوسانی (فراز و فرود) بالواره به ازای دامنه‌های کوچک و فرکانس‌های بالا توسط یونگ و لای (Young and Lai) انجام شد [۲] کیونگ هو (Kyoungwoo) و همکاران به صورت عددی و دو بعدی شکل بهینه بالواره بر پایه مقطع NACA0015 را به دست آوردند [۳] گوئررو (Guerrero) اثر انحنا را روی عمکرد آیرودینامیکی یک بالواره نوسانی را بررسی کرد [۴] مطالعه بر روی اثر خمیدگی بالواره بر ضریب برآ توسط جوارشکیان و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام شد [۵].

جوارشکیان و همکارانش اثر بالچه هوشمند با بالچه معمولی را در نزدیکی سطح زمین و زاویه حمله و زاویه بالچه متناظر با ماکزیمم نسبت برآ به پسا را بررسی کردند [۶] مولینا (Molina) و ژانگ (Zhang) با شبیه سازی بالواره نوسانی نزدیک سطح زمین مفهوم تاخیر فاز بین حرکت و نیرو تاثیرات هر کدام را بر تولید برآ به صورت جداگانه مطالعه کردند [۷] و به بررسی نیروهای واقعی روی بالواره پرداختند و اثر سطح زمین را بر روی گردابه‌های رها شده از بالواره بررسی نمودند [۸] لیانگ (Liang) و همکارش نیز در سال ۲۰۱۱ به مطالعه‌ی رفتار آیرودینامیکی یک بالواره مجاور سطح زمین در جریان مادون صوت و تراکم پذیر در تاثیر فاصله‌ی بالواره و سطح و تاثیر عدد ماخ (Mach) پرداختند [۹] از جمله کارهای دیگر انجام شده بر روی پدیده اثر سطح (بالواره نزدیک سطح) تحقیقات اتین (Etienne) و همکارانش می‌باشد، آنها حرکت بالواره تحت تاثیر نیروهای آیرودینامیکی (که به علت نوسانات بالواره القا شده اند) را در بررسی جریان روی بالواره نوسانی لحاظ نمودند [۱۰] بررسی تاثیرات فاصله‌ی بالواره نوسانی از سطح بر ضرایب برآ و پسا توسط ژاو (zhao) و همکارش انجام شده است [۱۱] در سال ۲۰۱۴ نیز نایکل (Nikhil) و همکارانش تاثیر زاویه‌ی حمله بر ضرایب آیرودینامیکی بالواره نزدیک سطح را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲] شارما (Sharma) و کلیمنت (Clement) به مطالعه‌ی تاثیرات سطح برخواص آیرودینامیکی یک بالواره دو بعدی NACA0012 در زاویه حمله‌های مختلف و ارتفاع‌های مختلف پروازی پرداختند [۱۳] از کارهای دیگر می‌توان به بررسی‌های انجام شده بر روی تاثیر زاویه حمله بالواره ناپایا و ارتفاع پرواز بر خواص آیرودینامیکی زمین صاف و موج‌دار توسط کیولین‌کو (QiulinQu) و همکارانش اشاره نمود [۱۴].

با وجود مطالعات انجام شده در حوزه بالهای نوسانی نزدیک سطح تحقیقی جامع با استفاده از بالواره‌های استاندارد و همچنین بررسی پارامتریک تمامی پارامترها در محدوده وسیع وجود ندارد. برای مثال تحقیقات مولینا و همکارانش علیرغم اینکه در توصیف فیزیک جریان بسیار دقیق و موفق بوده است ولی محدود به یک بالواره غیراستاندارد معکوس می‌شود که فقط در خودروهای فرمول ۱ کاربرد دارند. در تحقیقات انجام شده در حوزه بالواره نزدیک سطح، به موثرترین پارامتر در فرکانسهای پایین، متوسط و بالا پرداخته نشده است.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

۲- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مکانیک و هوافضا، صندوق پستی ۱۱۱۱-

javarehshian@um.ac.ir ۹۱۷۷۵

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

فراوان بالواره در نزدیکی سطح کارهای مختلفی در مراکز تحقیقاتی دنیا بر روی این پدیده در حال انجام است. یونگ مون (Youn Moon) و

هدف از این تحقیق شبیه سازی، جریان ناپایا، تراکم ناپذیر، لزج و آرام بر روی یک بالواره نوسانی دو بعدی NACA0012 در نزدیکی سطح زمین توسط یک روش عددی می باشد که در شبیه سازی صورت گرفته پس از بررسی پارامترهای موثر، در فرکانسهای پایین و متوسط ارائه شده است.

معادله حرکت بالواره نوسانی

$$h(t) = a_m \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

در این معادله h فاصله ی بالواره از سطح زمین، a_m دامنه ی نوسان و f فرکانس نوسان می باشد
اگر سرعت جریان آزاد u_∞ باشد عدد اشتروهل را می توان به صورت زیر تعریف کرد

$$s(t) = \frac{2fa_m}{u_\infty} \quad (2)$$

معادلات حاکم بر جریان

به منظور شبیه سازی جریان ناپایا، لزج و غیرقابل تراکم اطراف بالواره در نزدیکی سطح باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان حل شود که شامل بقای جرم، جابجایی و انرژی می باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

p, ρ, ν, u بترتیب مولفه های سرعت در جهت x, y , چگالی و فشار می باشند. حل این معادلات از ۲ لحاظ با دشواری هایی روبرو است. اول اینکه ترم های جابجایی، غیرخطی هستند و دوم اینکه این معادلات به هم وابسته هستند و مولفه های سرعت علاوه بر معادلات جابجایی در معادله پیوستگی نیز ظاهر می شوند. هر دو این مشکلات با استفاده از یک روش حل تکراری مانند الگوریتم های سیمپل (SIMPLE) و یا پیرو (PISO) قابل حل است. الگوریتم پیمپل (PIMPLE) که در این پژوهش استفاده شده است، در واقع ترکیبی از سیمپل و پیرو می باشد. این الگوریتم یک برتری نسبت به الگوریتم پیرو داراست که با استفاده از اعداد کورانت بزرگتر نیز حل واگرا نشده و سریعتر به جواب خواهد رسید.

الگوریتم های حل شبکه متحرک

تحلیل دینامیک سیالات شبکه های متحرک نیازمند یک الگوریتم دقیق برای محاسبه جابجایی ها و تغییرشکل های سلول های حوزه حل است. این الگوریتم باید قادر به حفظ کیفیت شبکه باشد. اگر این الگوریتم به درستی عمل نکند می تواند منجر به پاسخهای اشتباه در اثر عدم ارضای قوانین بقا و یا کیفیت نامناسب شبکه شود و یا حتی در اثر ایجاد حجم های منفی منجر به واماندگی حل شود. مهم ترین مولفه های کیفیت یک شبکه متحرک حفظ تعامد و تورب سلولها است. مولفه های دیگر مانند عدم تولید حجم منفی و یا بسته بودن مرز سلولها فرض می شود در شبکه اولیه ارضا شده باشد و الگوریتم مربوط به شبکه متحرک این مولفه ها را حفظ نماید. در این تحقیق حرکت شبکه از پیش در مرزها تعیین شده و ما

نیازمند یک الگوریتم برای یافتن موقعیت جدید نقاط روی مرزها و حوزه حل داخلی هستیم. برای حل این معادله روشهای مختلفی ارائه شده است از جمله روش فنر خطی که دقت کافی ندارد این عدم دقت با استفاده از فنرهای پیچشی و غیرخطی قابل حل است ولی باعث افزایش پیچیدگی معادلات شده، هزینه محاسباتی را بالا می برد. جاساک و همکارش (Jasak) [۱۵] از معادله لاپلاس با ضریب پخش ثابت و متغیر به عنوان معادله شبکه متحرک استفاده کردند. این معادله به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla u) = 0 \quad (6)$$

که در اینجا γ ضریب پخش بوده که می تواند ثابت و یا متغیر باشد. u سرعت حرکت نقاط است برای بروز رسانی موقعیت جدید نقاط رابطه ی زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

$$x_{new} = x_{old} + u \Delta t \quad (7)$$

x_{old} و x_{new} به ترتیب موقعیت مکانی نقطه در گام زمانی جدید و قبلی است و Δt ، گام زمانی می باشد. آنها این الگوریتم را در نرم افزار این فوم توسعه دادند. در نرم افزار این فوم معادله لاپلاس با استفاده از یک روش حجم محدود مرتبه دوم گسسته شده و یک ماتریس قطری ایجاد می کند که این ماتریس با استفاده از حلگر آ.سی.سی.جی (ICCG) حل می شود. شبکه های متحرک از این نظر که توپولوژی شبکه طی حرکت ثابت و یا متغیر باشد به ۲ گروه کلی تقسیم می شوند و حلگرهای مختلفی برای هر کدام از حالتها در نرم افزار مذکور توسعه داده شده اند. در شبکه های متحرک توپولوژی ثابت، تعداد سلولها و ارتباطات آنها با هم تغییر نخواهد کرد و سلولها فقط دچار تغییر شکل می شوند یعنی کشیده شده یا فشرده می شوند و یا در حرکت های زاویه ای زاویه لبه های سلول نسبت به هم تغییر می کند. این حالت برای جابجایی های بزرگ مناسب نیست و بسته به نوع حرکت ممکن است تعامد سلول و با تورب آن حفظ نشود و یا حتی حجم منفی تولید شود.

در کاربردهایی که جابجایی های بزرگ و یا سطوح لغزشی داریم استفاده از توپولوژی متغیر می تواند مفید باشد. برای مثال در حرکت فراز و فرود یک بالواره در جریان آزاد استفاده از روش توپولوژی ثابت و شبکه بی سازمان نتایج مورد قبولی خواهد داشت ولی در بررسی حرکت فراز و فرود نزدیک سطح زمین با دامنه نوسان های بزرگ بهتر است با استفاده از حذف و اضافه لایه ای از سلولها از ایجاد شبکه ای با کیفیت نامناسب جلوگیری کنیم. بدین صورت که وقتی ضخامت لایه ای از سلولها از مقدار مشخصی کمتر شد لایه سلول حذف شود و وقتی ضخامت لایه ای از سلولها از مقدار مشخصی بیشتر شد لایه ای به سلولها اضافه شود.

شبکه بندی و شرایط مرزی

به منظور دقت بالاتر و تسخیر بهتر حوزه حل از شبکه سازمان یافته نوع H استفاده شده است. شبکه نوع H قادر به تسخیر کامل اطراف بالواره نیست برای احاطه ی بهتر از شبکه سازمان یافته ی نوع C برای اطراف بالواره استفاده شده است، شکل ۱ شبکه حوزه حل، شکل ۲ شبکه در اطراف بالواره و شکل ۳ شرایط مرزی را نمایش می دهد.

بحث و نتایج

بمنظور اعتبارسنجی شبیه سازی انجام شده، ابتدا جریان آرام، غیرقابل تراکم و ناپایا با حول یک بالواره نوسانی با حرکت خالص فراز و فرود در فاصله ی دور از سطح با زاویه حمله ی ۵ درجه و اندازه ی طول وتر ۰/۱ فرکانس ۲/۰۱ و دامنه ی نوسان ۰/۳۷۵ شبیه سازی شده و تغییرات

ضریب برای این شبیه سازی با مرجع [۱۶] مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود دو منحنی تطابق قابل قبولی دارند که نشان دهنده صحت حل می باشد. همچنین به شبیه سازی بالواره پایا در زاویه حمله ۲ درجه و فاصله ی پروازی ۱ متری از سطح زمین پرداخته شده و ضریب برای این شبیه سازی با مرجع [۱۳] مقایسه شده همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود دو مقدار ضریب برآ خطای کمی دارند.

جدول ۱- مقایسه ی نتایج شبیه سازی با نتایج مرجع [۱۶]

نتایج مرجع [۱۶]	مقدار ضریب برآ = ۰/۲۱۲۱۵
نتایج شبیه سازی	مقدار ضریب برآ = ۰/۲۱۷۸۳
درصد خطا	٪ ۲/۶

جهت نشان دادن استقلال شبکه از تعداد سلول ها، جریان حول بالواره NACA0012 برای سه شبکه ی مختلف حل شده است، شکل ۵ تغییرات ضریب پسا بر حسب زمان را نشان می دهد به طوری که نتایج استقلال از شبکه به ازای تعداد سلول ۳۸۰۰۰ قابل مشاهده می باشد.

شکل ۶ تغییرات لحظه ای ضریب پسا برای یک دوره ی نوسان به ازای عدد اشتروال های مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۶-a مشاهده می شود برای عدد اشتروال ۰/۲ در دو قله وجود دارد در سه حالت h/c نقطه ی نتایج در قله اول تقریباً یکسان است ولی در قله دوم کمی متفاوت است. همچنین نشان می دهد که نتایج در نقطه ی اوج اول در $h/c = ۱$ بزرگتر از نقطه ی اوج دوم است. شکل ۶-b تغییرات را برای اشاره شده ۰/۳ را نشان می دهد. در این حالت نیز نتایج در نقطه ی اوج اول برای سه حالت h/c تقریباً یکسان است، با افزایش ارتفاع، نتایج نقطه ی اوج دوم کوچکتر شده و نقطه ی اوج دوم در h/c برابر یک از نقطه ی اوج اول بزرگتر است. شکل ۶-c نتایج برای عدد اشتروال برابر ۰/۴ را نشان می دهد. در این حالت نقطه ی اوج دوم با افزایش ارتفاع کمتر شده اما تاثیر ارتفاع بر نقطه ی اوج دوم نسبت به حالت قبل کمتر شده است و نقطه ی اوج دوم مانند نقطه ی اوج اول برای سه حالت h/c تقریباً یکسان است. در هر سه حالت، منحنی دارای یک نقطه ی کمینه است که در آن کمترین ضریب پسا مربوط به کمترین فاصله از سطح ($h/c = ۱$) است. با افزایش عدد اشتروال نقطه ی کمینه برای هر سه حالت تقریباً یکنواخت شده و وابستگی آن به فاصله ی بالواره از سطح کمتر شده است.

شکل ۷ تغییرات لحظه ای ضریب برآ در یک دوره ی نوسانی برای اعداد اشتروال های مختلف را نشان می دهد. در شکل ۷-a نتایج برای عدد مذکور برابر با ۰/۲ قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می شود یک نقطه ی اوج وجود دارد. شکل ۷-b تغییرات را برای عدد بی بعد اشاره شده برابر با ۰/۳ را نشان می دهد مانند حالت قبل یک نقطه ی اوج وجود دارد که با افزایش عدد اشتروال نسبت به حالت قبل نقطه ی اوج بزرگتر است. شکل ۷-c نتایج برای عدد بی بعد اشاره شده برابر با ۰/۴ را نشان می دهد. در این حالت تاثیر ارتفاع بر نقطه ی اوج نسبت به حالت قبل کمتر شده و بیشترین تاثیر سطح در همه ی حالت ها برای h/c برابر یک که بزرگترین نقطه ی اوج را دارد، می باشد.

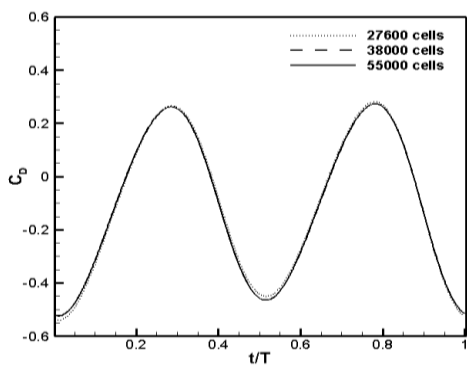
بطور کلی با توجه به شکل ۶ برای C_D در یک دوره ی نوسانی دو نقطه ی اوج وجود دارد که در فرکانس های کم اثر سطح و در فرکانس های متوسط اثر متقابل گردابه و بالواره تفاوت محسوسی بین این دو نقطه وجود دارد که باعث تولید نیروی جلوبرنده گی می شود با افزایش ارتفاع در فرکانس های بالاتر اختلاف دو نقطه اوج کم می شود و نیروی جلوبرنده گی تولید نمی شود. برای C_L در شکل ۷ یک نقطه ی اوج اتفاق می افتد و با افزایش h/c تولید نیروی برآ کم می شود.

شکل ۸ تغییرات ضریب پسا متوسط را تابعی از عدد اشتروال در فاصله سطح مختلف نشان می دهد مشاهده می شود تغییرات فاصله از سطح تغییر قابل ملاحظه ای در ضریب پسا متوسط را نشان نمی دهد. شکل ۹ ضریب برای متوسط را بر حسب عدد اشتروال نشان می دهد، مشاهده می گردد ضریب برای متوسط به آرامی برای سه فاصله کاهش پیدا می کند اما شیب کاهش برای اعداد اشتروال بزرگتر در کمترین فاصله سطح بیشتر است. شکل ۱۰ تغییرات لحظه ای ضریب پسا برای یک دوره ی نوسان به ازای دامنه نوسان های مختلف را نشان می دهد. شکل a- ۱۰ نتایج برای عددی اشتروال برابر ۰/۲ و در سه حالت Am/c قابل مشاهده است. دو نقطه ی اوج وجود دارد، که در هر دو بیشترین مقدار برای Am/c برابر ۰/۲ است و با افزایش دامنه ی نوسان نقطه ی اوج کاهش می یابد. شکل b- ۱۰ تغییرات را برای عدد اشتروال برابر ۰/۳ نشان می دهد. در این حالت با افزایش دامنه ی نوسان مقدار ضریب پسا و دو نقطه ی اوج افزایش پیدا کرده است. شکل c- ۱۰ نتایج برای عدد بدون بعد اشاره شده برابر با ۰/۴ را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دامنه نوسان دو نقطه ی اوج افزایش یافته و کمترین نقطه ی کمینه مربوط به کمترین دامنه ی نوسان است. شکل ۱۱ تغییرات لحظه ای ضریب برآ در یک دوره ی نوسانی برای دامنه نوسان های مختلف را نشان می دهد، همانطور که از این شکل ها مشاهده می شود با افزایش فرکانس دامنه ی تغییرات ضریب برآ افزایش می یابد و بیشترین نقطه اوج و کمترین نقطه ی کمینه در هر سه حالت برای Am/c برابر با ۰/۲ است. شکل ۱۲ تغییرات ضریب پسا متوسط را تابعی از عدد اشتروال در دامنه نوسان- های مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش عدد اشتروال اختلاف نتایج دامنه های مختلف قابل مشاهده تر می باشد که بیشترین کاهش شیب مربوط به کمترین دامنه می باشد. شکل ۱۳ ضریب برآ متوسط را بر حسب عدد اشتروال نشان می دهد، مشاهده می شود با افزایش عدد اشتروال تا ۰/۳۵ تاثیر دامنه کاهش و منحنی ها به هم نزدیک و بعد از آن مجدد منحنی ها فاصله می گیرند. شکل ۱۴ کانتور سرعت را برای ۴ دوره ی نوسانی در عدد اشتروال ۰/۳ و h/c برابر یک را نشان می دهد. شکل های a- ۱۴ تا d- ۱۴ نتایج در دوره های نوسانی $T/۴$ و $T/۲$ و $T/۴$ را نشان می دهد.

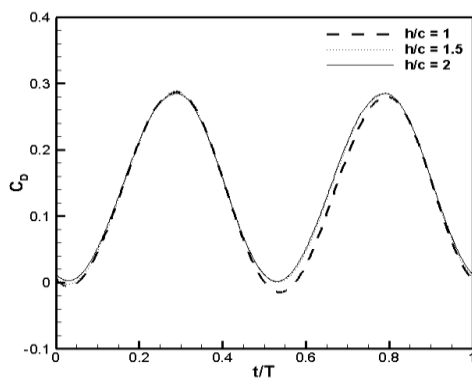
نتیجه گیری

در این تحقیق با شبیه سازی جریان حول بالواره با حرکت فراز و فرود و نزدیک زمین در اعداد اشتروال مختلف، ارتفاع های پروازی مختلف و دامنه نوسان های مختلف پارامترهای حاکم بر ضرایب آیرودینامیکی در فرکانس های پایین و متوسط بررسی شد و مشاهده شد که در بالواره نزدیک سطح زمین با نزدیک شدن به سطح، افزایش عدد اشتروال (افزایش فرکانس) و افزایش دامنه ی نوسان ضریب برآ افزایش و ضریب پسا کاهش می یابد در نتیجه نسبت برآ به پسا افزایش می یابد. فرکانس نوسان پارامتر موثرتری نسبت به دامنه ی نوسان بر ضرایب آیرودینامیکی است. همچنین مشاهده شد که در فرکانس کم، اثر سطح (فاصله از سطح) پارامتر حاکم بر ضرایب آیرودینامیکی می باشد و در فرکانس های متوسط، پارامتر حاکم اثر متقابل گردابه و بالواره است که با ایجاد یک زاویه حمله موثر باعث تولید نیروی برآ و نیروی جلوبرنده گی می شود.

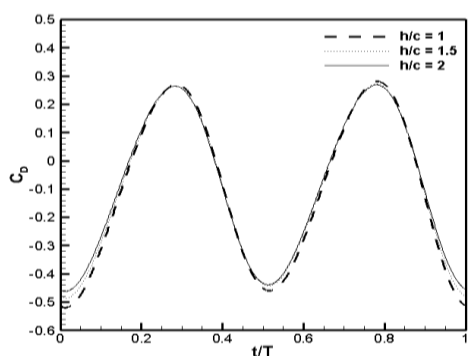
شکل ها و نمودارها



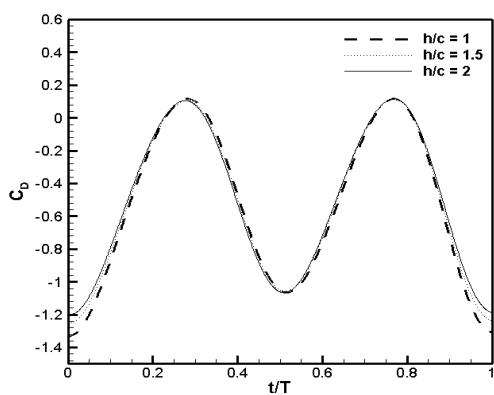
شکل ۵- تغییرات ضریب پسا برای سه شبکه‌ی مختلف



شکل ۶-a- تغییرات ضریب پسا در $St = 0.2$ در h/c های مختلف

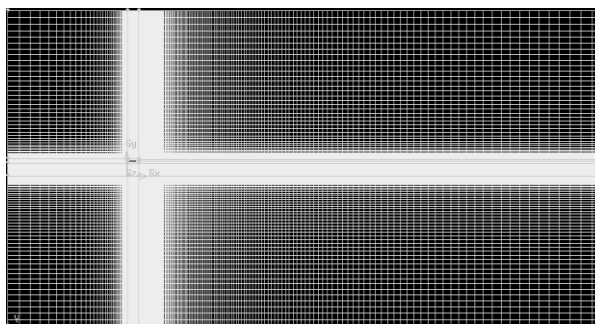


شکل ۶-b- تغییرات ضریب پسا در $St = 0.3$ در h/c های مختلف

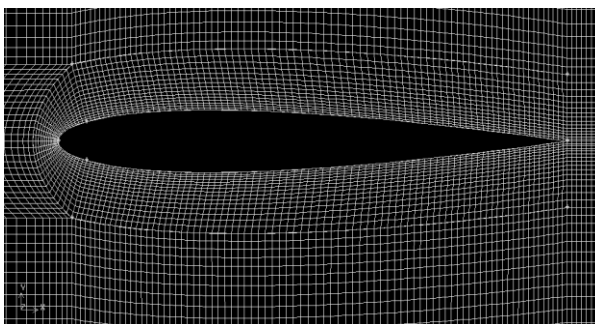


شکل ۶-c- تغییرات ضریب پسا در $St = 0.4$ در h/c های مختلف

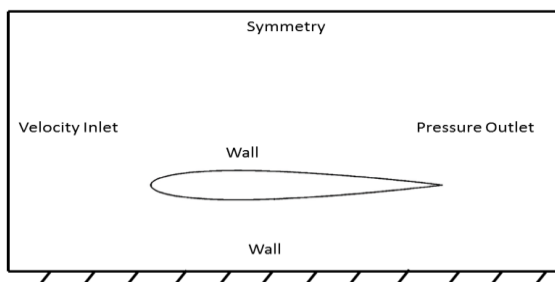
شکل ۶ تغییرات ضریب پسا به ازای عدد اشتروال مختلف



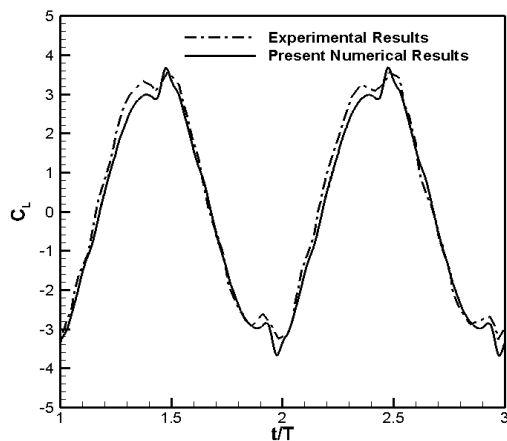
شکل ۱- شبکه حوزه حل جریان



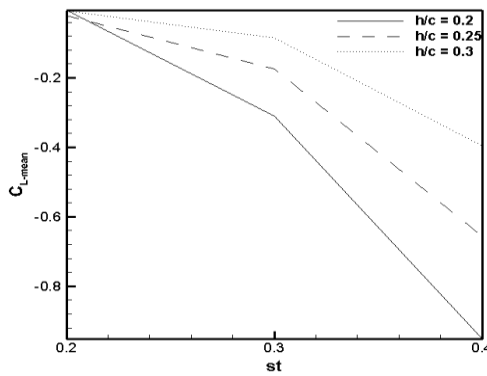
شکل ۲- شبکه سازمان یافته در اطراف بالواره



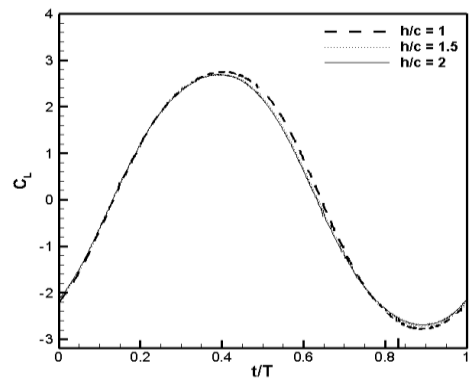
شکل ۳- شرایط مرزی حل مسأله



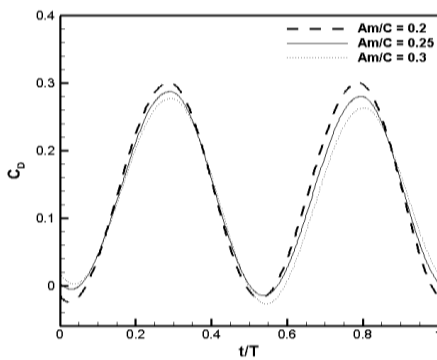
شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی NACA0012 نوسانی با مرجع



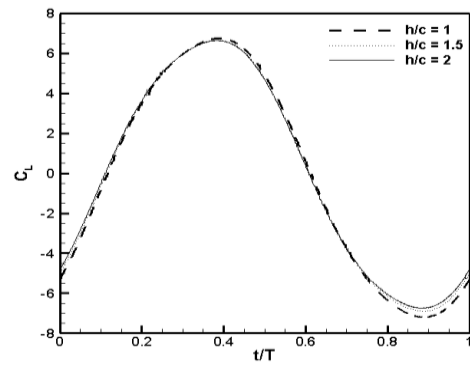
شکل ۹ تغییرات ضریب برآی متوسط بر حسب St در h/c های مختلف



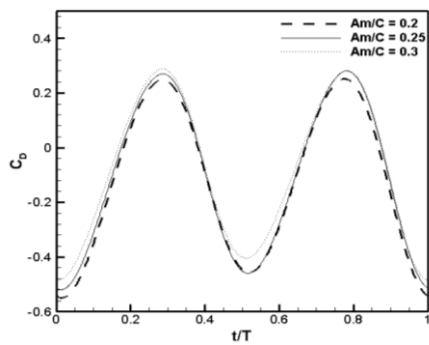
شکل ۷-ا تغییرات ضریب برآ در $St = 0.2$ در h/c های مختلف



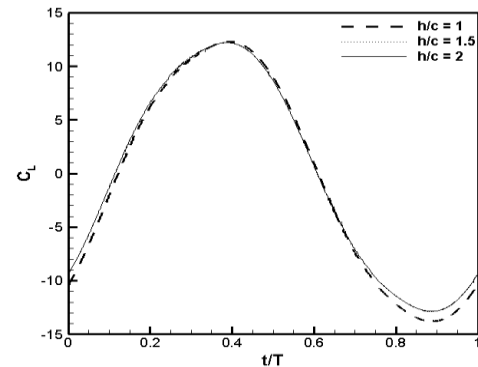
شکل ۱۰-ا تغییرات ضریب پسا در دامنه نوسان های مختلف



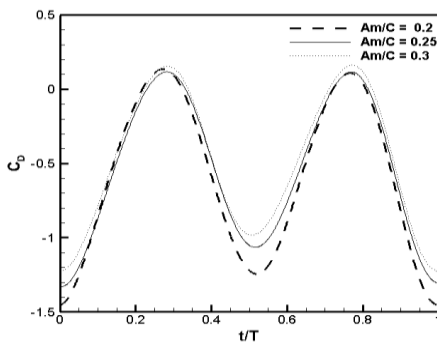
شکل ۷-ب تغییرات ضریب برآ در $St = 0.3$ در h/c های مختلف



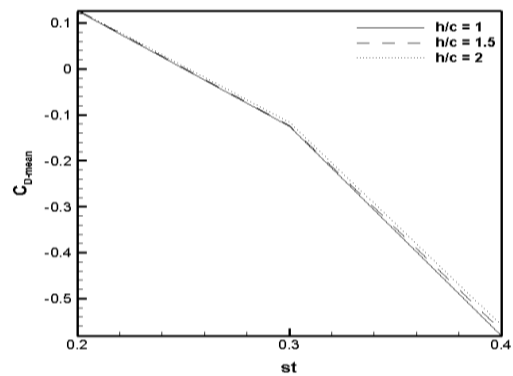
شکل ۱۰-ب تغییرات ضریب پسا در دامنه نوسان های مختلف



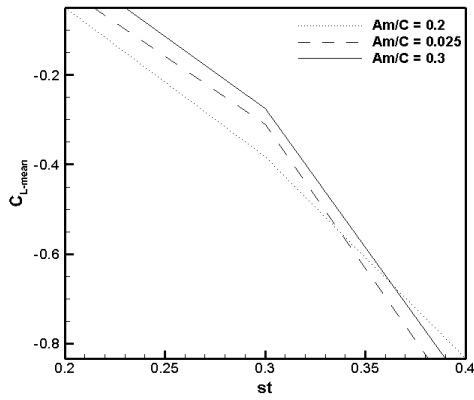
شکل ۷-ج تغییرات ضریب برآ در $St = 0.4$ در h/c های مختلف
شکل ۷ تغییرات ضریب برآ به ازای عدد اشتروال مختلف



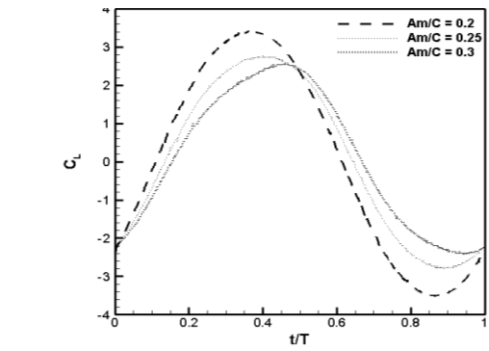
شکل ۱۰-ج تغییرات ضریب پسا در دامنه نوسان های مختلف



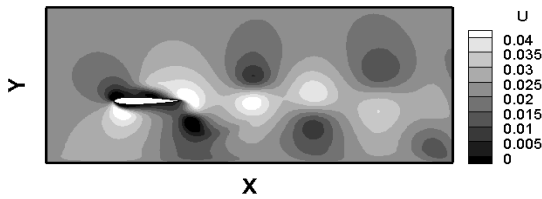
شکل ۸ تغییرات ضریب پسا متوسط بر حسب St در h/c های مختلف



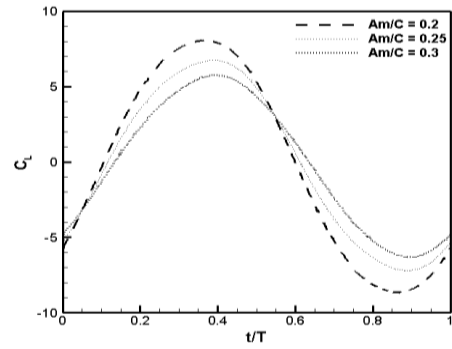
شکل ۱۳- تغییرات ضریب برای متوسط نسبت به St در سه دامنه نوسان



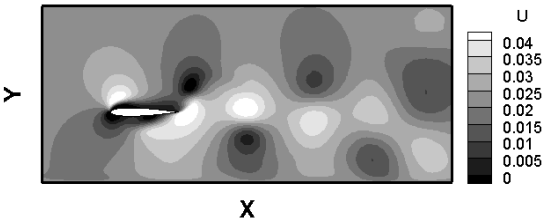
شکل ۱۱-a- تغییرات ضریب برآ در $St = 0.2$ در دامنه نوسان های مختلف



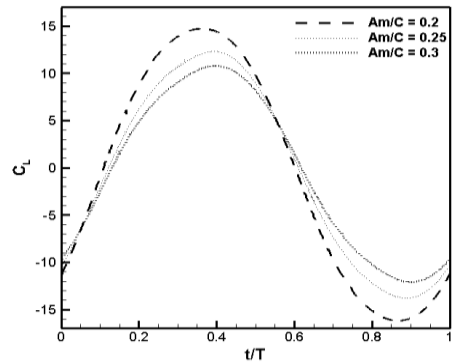
شکل ۱۴-a- کانتور سرعت در زمان $T/4$



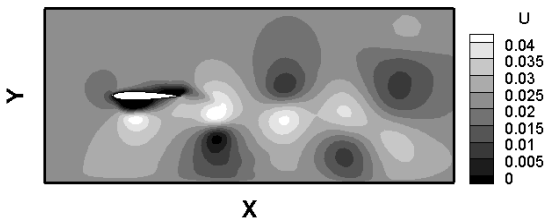
شکل ۱۱-b- تغییرات ضریب برآ در $St = 0.3$ در دامنه نوسان های مختلف



شکل ۱۴-b- کانتور سرعت در زمان $T/2$

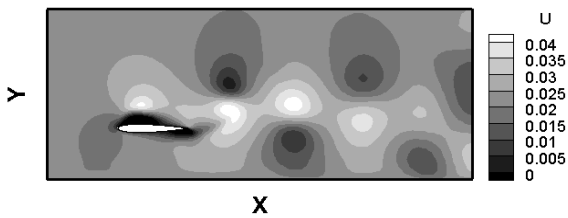


شکل ۱۱-c- تغییرات ضریب برآ در $St = 0.4$ در دامنه نوسان های مختلف

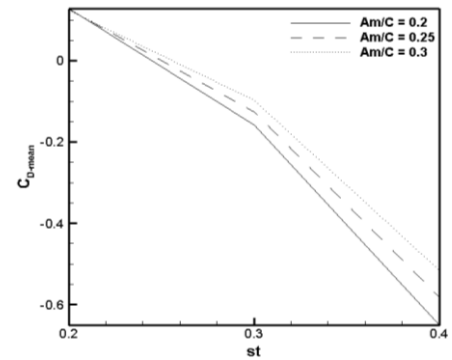


شکل ۱۴-c- کانتور سرعت در زمان $3T/4$

شکل ۱۱ تغییرات ضریب برآ به ازای عدد اشتروال مختلف



شکل ۱۴-d- کانتور سرعت در زمان T
شکل ۱۴ کانتورهای سرعت در یک دوره نوسان



شکل ۱۲- تغییرات ضریب پسای متوسط نسبت به St در سه دامنه نوسان

مراجع

-
- Ground Effect, Proceedings of the 40th JAXA Workshop on Investigation and Control of Boundary-Layer Transition, pp.53-56, 2007
2. Kyoungwoo Park, Byeong Sam Kim, Juhee Lee, and KwangSoo Kim, Aerodynamics and Optimization of Airfoil Under Ground Effect, Testing Conference
, Seattle, Washington, v.3, n.4, pp.385-391, 2009.
 3. J. Young and J. C. S. Lai, Vortex Lock-In Phenomenon in the Wake of a Plunging Airfoil, university of new south wales, australian defence force academy, canberra, australian capital territory 2600, v. 45, n. 2, pp.485-490, 2007.
 4. J. E. Guerrero, Effect of Cambering on the Aerodynamic Performance of Heaving Airfoils, Journal of Bionic Engineering, v. 6, no. 4, pp. 398-407, 2009.
 5. M. H. Djavareshkian, A. Esmaeli, and A. Parsani, Aerodynamics of Smart Flap Under Ground Effect, Aerospace Science and Technology, v. 2, pp. 1-6, 2010.
 6. M. H. Djavareshkian, A. Esmaeli, and A. Parsani, Aerodynamics of Smart Flap Under Ground Effect, Aerospace Science and Technology, v.15, n.8, pp. 642-652, 2011.
 6. J. Molina and X. Zhang, Aerodynamics of a Heaving Airfoil in Ground Effect, university of southampton, southampton, england s017 1bj, united kingdom, v. 49, n. 6, pp.1168-1179, 2011.
 8. J. Molina, X. Zhang, and D. Angland, On The Unsteady Motion and Stability of a Heaving Airfoil in Ground Effect, acta mechanica sinica, v. 27, n.2, pp. 164-178, 2011.
 9. H. Liang, Z. Zong, A Subsonic Lifting Surface Theory For Wing-in-Ground Effect, acta mechanica, v. 219, n.3, pp.203-217, 2011.
 10. S. Etienne and F. Plante, Plunging and Heaving Airfoils: Imposed Forward Motion or Self-propulsion?, arc.aiaa.org, pp. 1-10, 2013.
 11. J. Wu^{a,*}, N. Zhao, Ground effect on Flapping Wig, 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 7th APCATS 2013, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Yudao Street 29, Nanjing 210016, p.r.china, v.67, pp.295-302, 2013.
 12. Nikhil S. Pillai, Anil T, Aravind R, Rahul Vinod, Sudheesh Kumer E, Zahir Ummer Zaid, Antony J.K, Manojkumar M, Investigation on Airfoil Operating in Ground Effect Region, J International Journal of Engineering & Technology, v.3, n.4, pp.540-544, 2014.
 13. Saurabh Sharma, Shibu Clement, Cfd Simulation of the Flow Characteristics of NACA0012, NACA6409, and DHMTU Airfoils in Ground Effect, n.FEDSM2014-2113, pp.V01AT03A002; 8, 2014.
 14. Qiulin Qu, Zhe Lu, and Peiqing Liu, Ramwsh K. Agarwal Numerical Study of Aerodynamics of a Wing-in-Ground-Effect Craft, Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Washington University in St. Louis, St. Louis, Missouri 63130, V. 51, n.3, pp. 913-924, 2014.
 15. H. Jasak, Automatic Mesh Motion for The Unstructured Finite Volume Method, Transactions of FAMENA, v. 30, n. February, 2006.

۱۶. امیرباقری، علی اسماعیلی، محمد حسن جوارشکیان، عبدالمجید زمانی فرد، بررسی آیرودینامیکی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و نوسانی بالواره‌ها در حرکت فراز و فرود با روش پاسخ سطح. مجله مهندسی مکانیک مدرس، دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱۶، شماره صفحه ۱۰۱-۱۱۱، سال ۲۰۱۳-۱۵.