



بررسی تاثیر خمیدگی بیشینه، بسامد نوسان و دامنه نوسان بر خصوصیات پسماندی یک هواپر نوسانگر

محمد حاجی جعفری^{۱*} و جواد چاوشی کمار^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، صنایع و هوافضا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین‌زهره، قزوین، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

چکیده

در این پژوهش خصوصیات پسماندی یک هواپر نوسانگر حول مرکز آیرودینامیکی آن برای تعیین تاثیرپذیری از پارامترهای هندسی و چرخه‌ای نظیر خمیدگی بیشینه، دامنه و بسامد نوسان، مطالعه شده‌است. بدین منظور، هواپرهای ناکا ۰۰۱۲، ۱۴۱۲، ۲۴۱۲، ۳۴۱۲ و ۴۴۱۲ در دامنه نوسان ۱۰ درجه و بسامد ۲/۵ هرتز تحلیل گردیده‌اند. این کار برای بررسی تاثیر دامنه نوسان در زوایای مختلف از یک سو و تاثیر بسامد نوسان با فرض دامنه ۱۰ درجه روی هواپر ناکا ۴۴۱۲ تکرار شده‌است. آن چه در نمودارها (ضرایب برآ، پسا و گشتاور چرخشی برحسب سرعت زاویه‌ای و زاویه حمله) حائز اهمیت است، افزون‌بر ویژگی‌های مرتبط با ریخت کلی از جمله جهت دوران، تاب‌خوردگی و بدشکلی، مساحت محصور در حلقه‌های پسماندی است که امکان مقایسه توان انتقالی یا انرژی هدرشده را فراهم می‌سازد. در حالی که بدشکلی عموماً ناشی از جدایش جریان از روی سطح بالایی هواپر است، تاب‌خوردگی نمودارها می‌تواند ناشی از جدایش جریان یا جا ماندن آن به دلیل ناهم‌فازی حرکت هواپر و نوسان جریان باشد. مشاهده می‌شود که افزایش خمیدگی هواپر به بهبود ضریب برآ در حلقه منجر شده و شدیداً روی ضرایب پسا و گشتاور چرخشی تاثیرگذار است.

کلمات کلیدی: هواپر نوسانگر، جدایش جریان، پسماند، ضرایب آیرودینامیکی

Investigating the Influence of Maximum Camber, Amplitude and Frequency of Oscillation on the Hysteresis Characteristics of an Oscillating Airfoil

M. Haji Jafari^{1,*}, J. Chavoshi Komar Olia²

¹Assist. Prof, Dept of Ind. Mech. and Aerospace Eng., Buein Zahra Technical Univ., Qazvin, Iran

²MSc. Student, Mech. Eng., Elm o Sanat University, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the hysteresis characteristics of an oscillating airfoil is investigated (around a.c.) to showcase the influence of geometrical and cyclic parameters (i.e. the maximum camber, amplitude and frequency of oscillation). Hence, airfoils NACA0012, 1412, 2412, 3412 and 4412 are analyzed for the oscillation amplitude of 10° and frequency of 2.5 Hz. Assuming an amplitude of 10° for NACA4412, this is repeated to evaluate the effect of the oscillation amplitude, and for frequencies of 1, 2.5 and 4 Hz to study the effect of oscillation frequency. More than the characteristics related to the overall shape of graphs (depicting lift, drag, and pitching moment coefficients vs angular velocity and angle of attack), such as the direction of rotation, twist and deformity, the area enclosed in the hysteresis loops matters which allows analyzing the transmitted power or wasted energy. While the deformity is generally caused by the flow separation on the upper surface of the airfoil, the twist of the loops can be caused by the out-of-the-phase movement of the airfoil regarding the flow. It can be seen that more the airfoil is cambered, the better the lift coefficient while strongly changing the drag and pitching moment coefficients.

Keywords: Oscillating Airfoil, Flow Separation, Hysteresis, Aerodynamic Coefficients

۱- مقدمه

این تاخیر با عوارضی همراه است که از جمله می‌توان به افزایش ضریب نیروی برا بیشینه نسبت به حالت پایا و افزایش احتمال وقوع پدیده فلاتر اشاره نمود [۹].

موریس پدیده پسماند را خاصیتی می‌داند که تنها در سامانه‌های دینامیکی رخ داده و نشان‌دهنده تفاوت ویژگی‌های آیرودینامیکی هواپر در حرکت بالاسو و پایین‌سو است [۱۰]. می‌توان این‌گونه عنوان کرد که پسماند نتیجه اختلاف فاز بین حرکت بال و میدان جریان است [۱۱]. خصوصیات پسماند را می‌توان از نمودار ضرایب آیرودینامیکی برحسب زاویه حمله/ سرش جانبی (یا مشتق زمانی آنها) دریافت. این نمودارها اصولاً شامل یک حلقه بسته (یا شبه‌بسته) بوده که دارای جهت دوران و مساحت محصور مشخصند. برای نمونه سلطانی و رائی جهت دوران حلقه‌های پسماند برا و پسا هواپرهای نوسانگر را تحت تأثیر متغیرهای چرخه‌ای مطالعه کردند [۱۲]. تاب‌خوردگی حلقه پسماند از ویژگی‌های جذاب آن به‌شمار می‌آید که معمولاً با نمود فیزیکی همراه است. برای نمونه، تاب‌خوردگی در نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله، اغلب حول زاویه واماندگی استاتیکی رخ می‌دهد [۱۳]. اصولاً هواپرهای دارای لبه حمله مسطح و در اعداد رینولدز پایین در حال نوسان، خصوصیات پسماندی از خود نشان می‌دهند [۱۳]. لارسن و همکاران وجود دو منحنی برا برحسب زاویه حمله را ناشی از ایجاد دو حباب (یکی در لبه حمله و دیگری در لبه فرار) روی سطح هواپر نوسانگر می‌دانند. رفتار لایه مرزی حباب لبه حمله، بسته به پایین‌سو یا بالاسو بودن حرکت تفاوت می‌کند؛ به‌گونه‌ای که یک بار (حرکت بالاسو) گرادیان فشار تقویت و از جدایش جلوگیری شده و بار دیگر (حرکت پایین‌سو) وارون این حالت رخ داده و جدایش تسریع می‌گردد. این پدیده که با گزارش دو ضریب برا به‌ازای یک زاویه حمله همراه است؛ واماندگی دوگانه (Dual Stall) نام دارد [۱۴].

تغییر هندسه جسم، تأثیر چشم‌گیری روی رفتار دینامیکی جریان دارد. برای نمونه مولر در پژوهشی به بررسی تأثیر جدایش جریان بر خصوصیات پسماند هواپرهای رینولدز پایین پرداخته است. این مقاله نتایج یک مطالعه تجربی روی هواپرهای (Lissaman 7769) و (Miley M06-13-128) را برای وترهای متناسب با رینولدز پایین ارائه می‌کند. با وجود این‌که هر دوی هواپرها عملکرد مناسبی در عدد رینولدز متناظر با نقطه طراحی خود (۶۰۰،۰۰۰) نشان می‌دهند، برای

مطالعه آیرودینامیک هواپر، معمولاً ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از مطالعه جریان سه‌بعدی روی بال بوده و اصولاً یکی از نخستین گام‌ها در تحلیل سیالاتی اجسام پرنده به‌شمار می‌آید. در حالی که منطقاً رژیم جریان روی بال سه‌بعدی با هواپر تفاوت دارد، خصوصیات آیرودینامیکی بال مستقیماً تابعی از هواپر به‌کاررفته در آن است [۱۱]. هواپرهای در رینولدزهای پایین (کمتر از ۵۰۰،۰۰۰) رفتار ویژه‌ای در گذار از جریان آرام به آشفته، جدایش جریان و واماندگی (Stall) از خود نشان می‌دهند [۱۲]. این رفتار، بهبود عملکرد آیرودینامیکی را به‌ویژه در زوایای حمله بالا در پی دارد. بررسی خصوصیات آیرودینامیکی هواپرهای در اعداد رینولدز پایین موضوعی جذاب تلقی می‌شود؛ چراکه «واماندگی یکی از بحرانی‌ترین عوامل محدودکننده برای آیرودینامیک هواپر است» [۱۳]. هرچند که هواپرهای ثابت، در مواجهه با جریان‌های دارای رینولدز پایین به‌گونه‌ای چشم‌گیر به جدایش و واماندگی حساسند، رفتار آنها در حالت دینامیکی (نوسانی) با تفاوت‌های بسیاری همراه است. این وضعیت برای نمونه در مورد تیغه‌های روتور بالگرد، توربین باد و نیز پرنده‌های بال‌زن مشاهده می‌شود [۱۴]. از جمله، برخلاف شرایط استاتیکی، حباب‌های ناشی از جدایش جریان روی هواپر، محدود شده و جریان آشفته غلبه خواهد داشت [۱۵]. در این حالت، واماندگی به تاخیر افتاده و همین‌طور پدیده‌ای به نام پسماند (Hysteresis) رخ می‌دهد [۱۶].

بروز تاخیر در واماندگی هواپر نوسانگر به رخدادهای لایه مرزی و گردابه‌های تشکیل‌شده نسبت داده می‌شود. در این وضعیت، جریان از رژیم آرام به آشفته تغییر کرده و گرادیان‌های فشار نادلخواه تضعیف می‌گردند [۱۶]. زو و همکاران در پژوهش خود مطالعه دقیقی روی این پدیده انجام داده و توزیع مجدد میدان فشار و به‌دنبال آن شار گردابه‌های لایه مرزی ناشی از شتاب هنجار به هواپر را عامل تاخیر در واماندگی معرفی نمودند. برپایه مشاهدات آنها، در حالی که جریان در نزدیکی لبه حمله هواپر نوسانگر باقی می‌ماند، از لبه فرار آغاز به جدایش می‌نماید [۱۷]. مایر، زنگ و آدریپوند نیز در مجموعه آزمایش‌های خود روی هواپر نوسانگر (NACA 0012)، با بررسی توزیع فشار روی سطوح بالا و پایین هواپر دریافتند که حرکت دینامیکی باعث تاخیر در واماندگی می‌شود [۱۸]. البته

به دلیل وابستگی شدید رفتار جدایش و تغییر رژیم جریان به عدد رینولدز، گرادیان فشار و اغتشاشات محیطی، خصوصیات لایه مرزی و نوع پسماند نیز از این دیدگاه قابل بررسی است [۱۸]. افزون بر تاثیرات اغتشاشی جریان، امکان بررسی کنترل هدفمند رفتار دینامیکی هوابر از راه تزریق جریان نیز وجود دارد. برای نمونه، فان و شین به بررسی تاثیر عملگر پلاسمایی بر بهبود عملکرد آیرودینامیکی هوابر نوسانگر، از راه کنترل لایه مرزی پرداختند. در این پژوهش استفاده از آشکارساز برای مشاهده جزئیات لایه مرزی به منظور توضیح چرایی تاثیر واماندگی استفاده شده است [۳].

پژوهش‌های یادشده در دو محور قابل جمع بندی است؛ ۱- بررسی پارامترهای هندسی ۲- پارامترهای چرخه‌ای. در بررسی تاثیر متغیرهای هندسی و به ویژه خمیدگی هوابرهای نوسانگر روی خصوصیات آیرودینامیکی آن‌ها، در حالی که تاکنون تمرکز بعضی از پژوهش‌ها روی هوابرهای متقارن [۵، ۷ و ۸] و برخی دیگر روی هوابرهای نامتقارن بوده [۱ و ۱۵]، تاثیر مقدار خمیدگی هوابر به شکل هدفمند کنکاش نگردیده است. (البته تاثیر ضخامت هوابر به شکل محدودی مطالعه شده است [۲۰]). در مقابل، گرچه در بسیاری از پژوهش‌ها تاثیر متغیرهای محیطی مانند بسامد (یا بسامد کاهیده) نوسان، دامنه نوسان و زاویه حمله میانی به صورت کیفی بررسی گردیده، [۲، ۱۷ و ۲۱] مطالعه کمی نتایج از منظر شدت پسماند، بیشینه و کمینه ضرایب رفتار آیرودینامیکی به ندرت دیده می‌شود. در این میان، بررسی کمی شیب نمودارها به منظور پیش‌بینی رفتار پایداری در کنار بررسی رفتار آیرودینامیکی هوابر موردی نایاب است (موردی چون [۵] استثنا هستند). مطالعه تاثیر سرعت جریان و متناظر با آن عدد رینولدز [۱۵] و تغییر جایگاه محور دوران [۱۶] نیز حائز اهمیت هستند که البته در چارچوب این پژوهش نمی‌گنجد. در مجموع و به منظور ارائه تصویری جامع از تاثیر پارامترهای هندسی و حرکتی روی رفتار آیرودینامیکی هوابرهای نوسانگر، بررسی تغییر خمیدگی هوابر در کنار دامنه و بسامد نوسان برای دستیابی به بالاترین عملکرد کانون توجه این پژوهش است. در این راستا مقایسه کیفیت و مساحت حلقه‌های پسماند، دامنه‌ها و نقاط فرینه (اکسترموم) را می‌توان از برجستگی‌های کار تلقی نمود.

رینولدزهای پایین (۳۰۰،۰۰۰) تفاوت آشکاری در رفتار پسماندی نمودارهای برا و پسا پدیدار می‌شود؛ هم‌چنین در این مقاله، دیگر عوامل موثر مانند اغتشاشات محیطی بر رفتار حلقه‌های پسماند نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۵].

افزون بر هندسه جسم، متغیرهای چرخه‌ای نیز بر رفتار جریان تاثیرگذارند. در حالی که نوسان می‌تواند از نوع لک‌لک زدن (Lagging)، بال‌بال‌زدن (Flapping)، پرپرزدن (feathering) یا ترکیبی از آن‌ها (مانند آنچه در پرواز یک پرنده رخ می‌دهد) باشد، بسیاری از پژوهش‌ها تنها پرپرزدن را بررسی کرده‌اند که شامل دوران هوابر حول یک محور ثابت و بدون حرکت انتقالی است. در این بین بسامد نوسان مهم‌ترین این متغیرهاست که توسط فان و شین در قالب یک پژوهش عددی روی یک هوابر نوسانگر بررسی شده است. بر این اساس، شکل حلقه پسماند و مساحت آن هر دو وابستگی شدیدی به بسامد نوسان داشته و رشد بسامد باعث افزایش مساحت حلقه در نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله و رفع تاب‌خوردگی آن می‌شود [۳]. لی و گرونتاکوس با به‌کارگیری حسگرهای فیلم داغ در مطالعه رفتار جریان و اتفاقات لایه مرزی برای واماندگی هوابر (NACA0012) در رینولدز $10^5 \times 1/35$ دریافتند که کاهش بسامد تاثیر چشم‌گیری روی هوابرهای نوسان‌کننده دارد. برپایه یافته‌های آنها، کاهش بسامد (حتی جزئی) به تاخیر در پدیداری پدیده‌های گوناگون در لایه مرزی و در نتیجه ضرایب آیرودینامیکی متفاوت می‌انجامد [۵]. کاهش شیب نمودار پسماندی برا و در نتیجه کاهش برا و پسا در اثر افزایش بسامد کاهیده ($k = \omega c/2v$) در پژوهش‌های دیگری هم دیده می‌شود که معمولاً با بررسی زاویه حمله میانی نیز همراه است [۷ و ۱۶].

جایگاه محور نوسان از دیگر متغیرهای چرخه‌ای تاثیرگذار بر عملکرد هوابر نوسانگر است. حیدری و همکاران تاثیر متغیرهای چرخه‌ای از جمله جایگاه محور نوسان را بررسی کرده و دریافتند که با قرار دادن این جایگاه پشت لبه فرار، میزان بیشینه و میانگین ضریب برا درازای ثابت باقی ماندن کمینه آن، بهبود می‌یابد. هم‌چنین در این حالت، میانگین نسبت برا به پسا به‌ویژه در زوایای حمله بالا با کاهش همراه است؛ در صورتی که برای جایگاه محور نوسان جلوتر از لبه حمله، نسبت برا به پسا افزایش می‌یابد [۱۷].

۲- روش کار

همانگونه که گفته شد، در این مقاله تنها حرکت پرپر زدن هواپر در جریان دوبعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در آغاز، به تشریح ریاضیات مسئله با بیان معادلات حاکم پرداخته شده و سپس فرضیات و تنظیمات شبیه‌سازی عددی در محیط نرم‌افزاری ذکر گردیده‌است. پس از بیان فرضیات و تنظیمات، الگوهای تحلیل با فرض تغییر خمیدگی، تغییر دامنه و تغییر بسامد نوسان تشریح شده‌است.

۲-۱- معادلات حاکم

در این مقاله حرکت نوسانی ساده حول یک محور و در حضور جریان آزاد با سرعت ثابت، جایگاه محوری دارد که متفاوت از دیگر انواع حرکت نوسانی بوده و آنرا می‌توان با دانستن دامنه و بسامد نوسان برحسب زمان توصیف نمود. بدین ترتیب، اگرچه سرعت جریان آزاد ثابت نگاه داشته می‌شود، سرعت زاویه‌ای هواپر تابعی از زمان خواهد بود. سرعت زاویه‌ای یک نوسانگر با بسامد زاویه‌ای ω_{ang} و پیشینه زاویه (دامنه) نوسان θ_{max} برحسب زمان t از معادله ۱ پیروی می‌کند. در مقابل، بسامد زاویه‌ای از معادله ۲ به‌دست می‌آید.

$$\dot{\theta} = \theta_{max} \omega_{ang} \cos(\omega_{ang} t) \quad (1)$$

$$\omega_{ang} = 2\pi \omega \quad (2)$$

در این‌جا زاویه حمله (α) همان زاویه فاز (θ) تعریف شده و در نتیجه، نرخ تغییرات زمانی آن ($\dot{\alpha}$) با سرعت زاویه‌ای ($\dot{\theta} = \omega$) یکسان خواهد بود.

نیروهای آیرودینامیکی اعمالی بر سطح، دارای جهت و اندازه بوده و مولفه‌های آنها در راستای حرکت و عمود بر جریان به‌صورت پسا و برا تعبیر می‌گردند. گشتاور (چرخشی) برآیند حول ربع وتر در صورتی که با بالا آمدن دماغه هواپر همراه باشد، مثبت ارزیابی می‌گردد. ضرایب این سه، در قالب معادلات ۳ تا ۵ آورده شده‌است:

$$c_l = \frac{L'}{\frac{1}{2} \rho V^2 c} \quad (3)$$

$$c_d = \frac{D'}{\frac{1}{2} \rho V^2 c} \quad (4)$$

$$c_m = \frac{M'}{\frac{1}{2} \rho V^2 c^2} \quad (5)$$

که در آن c وتر هواپر، ρ چگالی هوا و V سرعت جریان آزاد است. همین‌گونه M' ، D' و L' نیز به‌ترتیب گشتاور (چرخشی)، پسا و برا در دهانه واحد هستند.

تاثیر رویدادهای لایه مرزی بر ضرایب آیرودینامیکی، در نمودار تغییرات این ضرایب برحسب زاویه حمله به‌روشنی دیده می‌شود. ریخت و مساحت حلقه‌های پسماند، بارزترین ویژگی‌هایی است که برای بررسی تاثیر این عوامل می‌توان تصور نمود. برای نمونه، شدت پسماند (ϵ_{cl}) در نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله به‌صورت مساحت درون حلقه پسماند تعریف شده که از معادله ۶ پیروی می‌کند [۱]:

$$\epsilon_{cl} = \frac{\oint c_l d\alpha}{\theta_{max}} \quad (6)$$

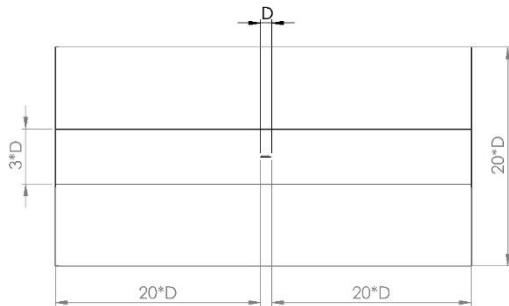
برای محاسبه مساحت درون نمودارها از روش‌های عددی استفاده می‌شود. روش ذوزنقه‌ای (معادله ۷) برای محاسبه مساحت درون نمودارها و روش کمینه مربعات (معادله ۸) برای یافتن شیب خط برازش‌شده بسیار معمول هستند.

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{2} [f_0 + 2f_1 + 2f_2 + \dots + 2f_{n-1} + f_n] \quad (7)$$

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1} \quad (8)$$

جهت دوران حلقه‌های پسماندی در نمودارها تحت تاثیر حرکت بالاسو و پایین‌سوی هواپر، یک ویژگی مهم به‌شمار می‌آید. در حالی که حرکت ساعت‌گرد مساحت مثبت را نتیجه می‌دهد، حرکت پادساعت‌گرد نشانگر یک مقدار منفی متناظر با مساحت خالص محصور در نمودار است.

جنس مساحت محصور در حلقه بسته به برچسب محورهای عمودی و افقی نمودار تعبیرپذیر است. در حالی که در این مقاله محور افقی از جنس زاویه حمله یا سرعت زاویه‌ای است، مساحت درون حلقه‌ها به‌دلیل بی‌بعدی ضرایب نیرو و گشتاور در محور عمودی، بی‌بعد (رادیان/درجه) بوده یا بعد یک بر واحد زمان (رادیان بر ثانیه/درجه بر ثانیه) خواهند داشت.

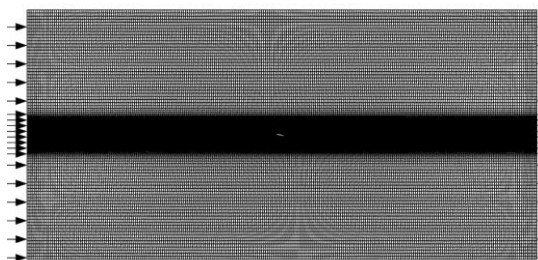


شکل ۱- هندسه دامنه محاسباتی

تمامی شبیه‌سازی‌ها در شرایط استاندارد سطح دریا انجام پذیرفته که در نتیجه آن، چگالی هوا $1/225 \text{ kg/m}^3$ و لرزت دینامیکی $1/7894 \times 10^{-5} \text{ Kg/m s}$ منظور گردیده است.

۲-۲-۲- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی شامل ۶۵,۰۰۰ المان ترکیبی می‌شود که از المان‌های مثلثی در نزدیکی دامنه دینامیکی و شبکه‌ای سازمان‌یافته در اطراف (شکل ۲)، با $250 \approx \gamma$ اطراف هوا بر می‌شود. زمان تحلیل بسته به بسامد متفاوت بوده و برای ۴ نوسان کامل با گام زمانی $0/0005$ ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌علت چولگی (Skewness) بیش از اندازه المان‌ها در اثر حرکت هوا بر دامنه، نیاز به بازتولید مش وجود دارد که در نرم‌افزار آنسیس فلونت تنها برای مش‌های مثلثی یا شش‌گوشه امکان‌پذیر است.



الف) نمای شبکه تولیدشده در محدوده تحلیل

اما مسئله مهم‌تر تعبیرپذیری از منظر تطابق با کمیت‌های فیزیکی است. برای نمونه مساحت محصور در نمودار ضریب گشتاور برحسب سرعت زاویه‌ای از جنس توان ویژه خالص است که در یک چرخه به جریان انتقال می‌یابد؛ چرا که گشتاور چرخشی و سرعت زاویه‌ای در تمامی مراحل نوسان هم‌راستا است. همین‌طور به‌دلیل هنجار بودن دائمی نیروی برا بر وتر هوا بر نوسانگر (و در نتیجه زاویه حمله) جنس مساحت محصور در حلقه‌های نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله نیز متناسب با توان ویژه انتقالی به جریان است.

۲-۲- فرضیات و تنظیمات شبیه‌سازی

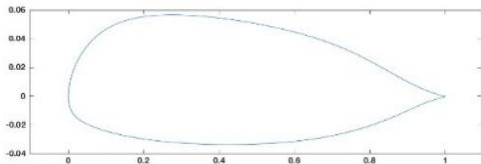
۲-۲-۱- شرایط هندسی

شبیه‌سازی‌ها برای پنج هوا بر ۴ رقمی از خانواده ناکا، با ضخامت 12% و وتر 300 میلی‌متر انجام شده که مشخصات هندسی و شرایط تحلیل آنها در جدول ۱ و دامنه محاسباتی در شکل ۱ آمده است. آن‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، برای تحلیل از هر دو روش پایا و گذرا استفاده شده، که روش پایا با زوایای حمله متغیر برای مقایسه با نتایج عددی تونل باد و روش گذرا با گام زمانی ثابت، و سرعت زاویه‌ای با بسامد ثابت در تحلیل‌های دینامیکی به‌کار رفته است.

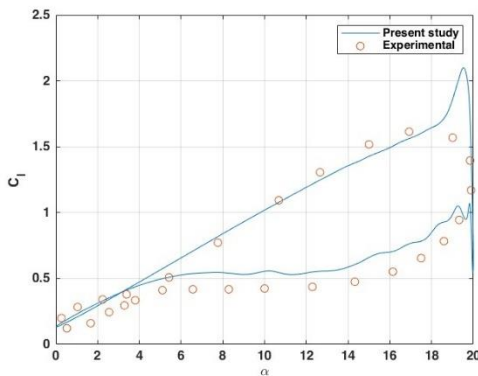
جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌ها و شرایط تحلیل

| هوا بر | سرعت جریان (m/s) | عدد رینولدز | روش حل |
|-----------|------------------|-------------|--------|
| ناکا ۰۰۱۲ | ۱۰ | ۱۶۷۰۰۰ | گذرا |
| ناکا ۰۰۱۲ | ۲۰ | ۳۳۵۰۰۰ | پایا |
| ناکا ۲۴۱۲ | ۱۰ | ۱۶۷۰۰۰ | گذرا |
| ناکا ۴۴۱۲ | ۱۰ | ۱۶۷۰۰۰ | گذرا |
| ناکا ۴۴۱۲ | ۱۰ | ۱۶۷۰۰۰ | پایا |

همچنین در شکل ۵ داده‌های تجربی از این هواپر با نتایج عددی اعتبارسنجی مقایسه شده‌اند که نشان از همخوانی مناسب بین آن دو دارد.



شکل ۴- طرحواره هواپر (OA309)

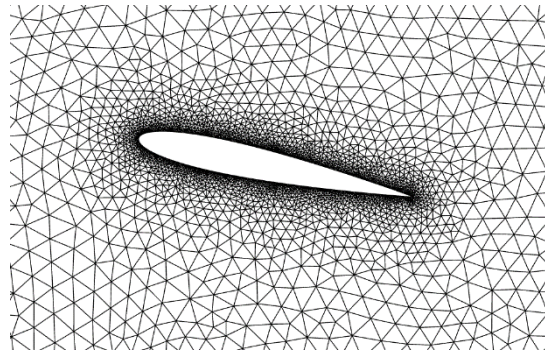


شکل ۵- مقایسه نتایج ضریب برا برحسب زاویه حمله، شبیه‌سازی حاضر با پژوهش مارتینات و همکاران [۱۹]

مطالعه‌ی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که وجود برخی از تفاوت‌ها در زوایای حمله بالا معمول بوده و در پژوهش‌های دیگری نظیر [۲۸] و [۲۹] نیز دیده می‌شود. لی و همکاران در پژوهش خود تأثیر روش‌های عددی و مدل‌های اغتشاشی مورد استفاده را بر این تفاوت‌ها مطالعه کرده‌اند [۲۴].

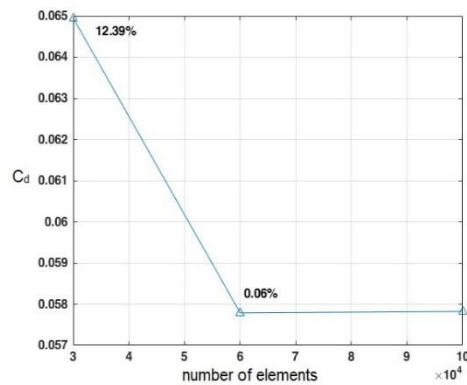
۲-۲-۳- روش حل

حلگر استفاده‌شده در این پژوهش، فلونت از نرم‌افزار انسیس بوده و با تنظیمات فشارمینا ($M < 0.3$) به کار گرفته شده است. مدل به کاررفته K- ϵ Realizable enhanced wall treatment



شکل ۲- نمایشی از شبکه تولیدشده با مش مثلثی در مجاورت هواپر (ب)

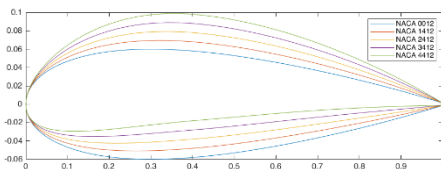
برای مطالعه استقلال شبکه، شبکه‌هایی با تعداد ۱۰۰,۰۰۰، ۶۵,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ بررسی گردیده و نتایج آنها در شکل ۳ به نمایش درآمده است. دیده می‌شود که برای کیفیت ۶۵,۰۰۰ درصد خطا حدوداً ۰/۰۵٪ است که به پایداری نتایج در روند تغییر چگالی شبکه حکم می‌دهد؛ در نتیجه، شبکه‌هایی با ۶۵,۰۰۰ المان برای تحلیل انتخاب گردیده است.



شکل ۳- بررسی استقلال شبکه از راه مطالعه تغییرات ضریب پسا برحسب تعداد المان شبکه

با توجه به این‌که نمونه‌های تجربی قابل اتکا برای بسیاری از هواپرهای مورد مطالعه در این پژوهش وجود ندارد، به منظور اعتبارسنجی نتایج از داده‌های تجربی هواپر (OA309) در جریان با عدد رینولدز 9×10^5 و بسامد ۲ هرتز استفاده شده است [۱۹]. شمای این هواپر در شکل ۴ به نمایش درآمده است؛

تحلیل‌ها به تنها یک خانواده از هواپرها محدود شده‌است؛ در نتیجه، پنج هواپر ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ (شکل ۶) تحت بسامد ۲/۵ هرتز و دامنه نوسان ۱۰ درجه بررسی شده و برای هر کدام از تحلیل‌ها ۴ دوره کامل با گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه منظور گردیده است.



شکل ۶- مقایسه خمیدگی پنج هواپر ناکا ۰۰۱۲، ۲۴۱۲، ۳۴۱۲، ۴۴۱۲

۲-۳-۲- دامنه نوسان

تغییر در دامنه نوسان به‌عنوان یکی از متغیرهای چرخه‌ای، توسط افرادی همچون یانگ و همکاران [۱۳] بررسی شده‌است. آنها نشان دادند که در نزدیکی زاویه واماندگی استاتیکی، رفتار آیرودینامیکی هواپر تغییر یافته و نمودارهای پسماند دچار تاب‌خوردگی می‌شوند. در مطالعات دیگر [۱۴] با تغییر زاویه میانی و حفظ دامنه نوسان، ضرایب آیرودینامیکی حول زوایای حمله مختلف بررسی شده‌است؛ هم‌چنین این متغیر در بسامد کاهیده (به‌عنوان تنها یک عامل فرعی) نیز تاثیرگذار است که تاثیر آن در کنار اثر بسامد مطالعه گردیده‌است [۳]. در این پژوهش، با ثابت نگه داشتن زاویه میانی نوسان، تغییر دامنه از جریان آرام تا نزدیکی زاویه واماندگی بررسی گردیده و با افزایش دامنه نوسان به‌جای زاویه میانی گستره‌ای وسیع‌تر از اطلاعات از رفتار آیرودینامیکی هواپر در اختیار قرار گرفته است. این نتایج را می‌توان نشانگر تایید ضمنی درستی شبیه‌سازی عددی، دست‌کم برای حالت استاتیکی تلقی نمود؛ در نتیجه، بخش دوم شبیه‌سازی دینامیکی شامل مقایسه سه دامنه نوسان ۵- تا ۵+، ۱۰- تا ۱۰+ و ۱۵- تا ۱۵+ درجه برای هواپر ناکا ۴۴۱۲ در بسامد ۲/۵ هرتز خواهد بود. در این مورد نیز همانند بخش پیش، برای هر کدام از تحلیل‌ها ۴ دوره کامل با گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه صرف شده‌است.

است که از معادلات URANS^۱ برای تحلیل خصوصیات لزجت جریان استفاده می‌کند. مدل Realizable، مقادیر اصلاح‌شده روش Standard را به‌کار گرفته و عملکرد بهتری در لایه مرزی خمیده دارد که استفاده از Enhanced wall treatment برای کاربردهای مهندسی مناسب‌تر است [۲۱].

در شبیه‌سازی مقدار y^+ باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که در محدوده مناسب برای مدل اغتشاشی قرار گیرد. برای نمونه، مقادیر y^+ برای مدل $K-\epsilon$ برای استفاده از توابع دیواره استاندارد بایست در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ تنظیم گردد؛ چراکه با این کار نخستین سلول در لایه لگاریتمی قرار می‌گیرد [۲۳]. با بهره‌گیری از اصلاح دیواره بهبودیافته (Enhanced Wall Treatment) رفتار جریان در نزدیکی دیواره مدل خواهد شد که به‌کارگیری $250 \lesssim y^+$ در این پژوهش را توجیه می‌کند (تنها در نقاط معدودی در محدوده ۶ تا ۳۰).

از دیگر سو، معادلات URANS با بار محاسباتی نسبتاً پایینی همراه هستند؛ به‌طوری‌که زمان حل با مدل‌های RANS در مقایسه با حل معادلات کامل ناویر-استوکس، تا ۵۰ برابر کمتر است [۱۷]. در این پژوهش از هر دو روش، پایا با زوایای حمله مختلف به‌منظور مقایسه با نتایج عددی تونل باد و گذرا با گام زمانی ثابت و سرعت زاویه‌ای با بسامد ثابت در تحلیل‌های دینامیکی استفاده شده‌است.

۲-۳-۳- الگوهای تحلیل

الگوهای تحلیل با هدف بررسی تاثیر سه متغیر روی رفتار دینامیکی هواپر نوسانگر تعریف شده‌اند: ۱- خمیدگی هواپر، ۲- دامنه نوسان، ۳- بسامد نوسان.

۲-۳-۱- خمیدگی هواپر

پژوهش‌هایی مانند، مولر [۱۵] در بررسی تاثیر متغیرهای هندسی، دو هواپر را در رینولدزهای متناظر نقطه طراحی و رینولدزهای پایین بررسی نمودند؛ هم‌چنین ژئوپینگ و همکاران روی تاثیر ضخامت هواپر مطالعه داشتند که البته با بررسی هدفمند تاثیر خمیدگی هواپر همراه نبود [۲۰]؛ در نتیجه، در این پژوهش به بررسی اثر خمیدگی هواپر پرداخته شده که به‌منظور مقایسه بهتر و با هدف کنترل دیگر متغیرها (بیشینه ضخامت، شکل خط خمیدگی و هم‌چنین وتر)

^۱ Unsteady Reynolds-averaged Navier-stokes

۲-۳-۳- بسامد نوسان

تأثیر تغییر بسامد بر رفتار آیرودینامیکی نیز از متغیرهای مهم در مطالعات است که برای نمونه در مقاله فان و شی [۳] بررسی گردیده است. آنها به خوبی نشان دادند با تغییر بسامد، رفتار آیرودینامیکی از جمله ریخت حلقه‌های پسماند، ضرایب نیرو و گشتاور تغییر می‌کند. به منظور مطالعه جامع‌تر هواپرنوسانی، بسامدهای ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز برای هواپرنوسان ۴۴۱۲ و دامنه نوسان ۱۰ درجه تحلیل شده‌اند. گام زمانی همانند موارد پیش ۰/۰۰۵ ثانیه بوده و تعداد دور ۴ دوره کامل است.

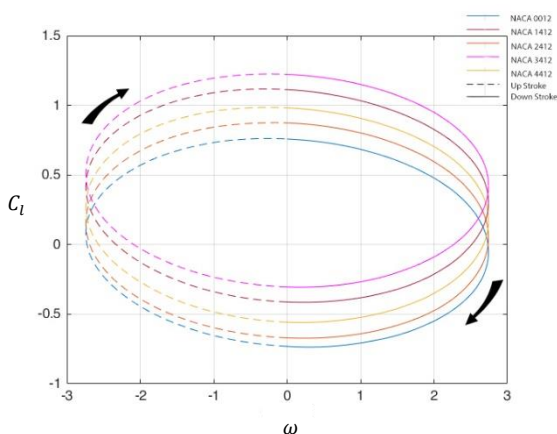
۳- نتایج

نتایج تحلیل‌ها به ترتیب شامل اثر خمیدگی هواپرنوسان (ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۱۴۱۲، ناکا ۲۴۱۲، ناکا ۳۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲)، اثر دامنه نوسان (۱۰ و ۱۵ درجه؛ برای هواپرنوسان ۴۴۱۲) و در پایان، اثر بسامد

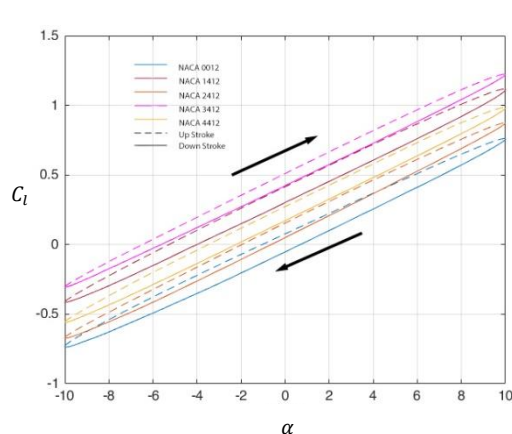
نوسان (بسامد ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز؛ برای هواپرنوسان ۴۴۱۲) در حضور جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه می‌شود.

۳-۱- اثر خمیدگی

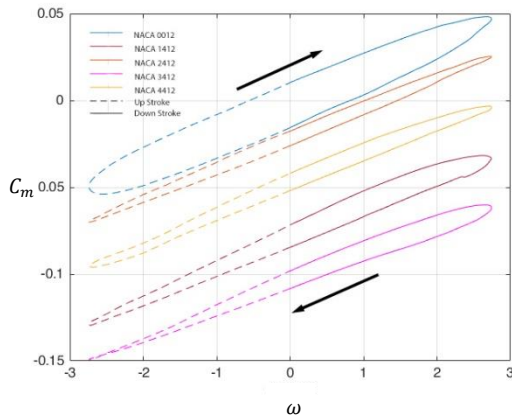
نتایج تحلیل شامل نمودارهای برا برحسب زاویه حمله (الف)، و برا (ب)، پسا (ج) و گشتاور (د) برحسب سرعت زاویه‌ای (نرخ تغییرات زاویه حمله)، برای پنج هواپرنوسان ۰۰۱۲، ۱۴۱۲، ۲۴۱۲، ۳۴۱۲ و ۴۴۱۲ با دامنه نوسان ± 10 درجه و بسامد ۲/۵ هرتز در شکل ۷ آمده‌است:



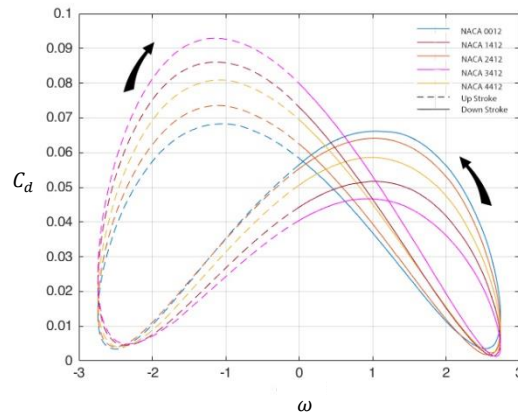
ب) ضریب برابر برحسب سرعت زاویه‌ای



الف) ضریب برابر برحسب زاویه حمله



د) ضریب گشتاور چرخشی بر حسب سرعت زاویه‌ای



ج) ضریب پسا بر حسب سرعت زاویه‌ای

شکل ۷- نمودارهای ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی بر حسب زاویه حمله و سرعت زاویه‌ای برای پنج هواپرنه ناکا ۰۰۱۲،

ناکا ۱۴۱۲، ناکا ۲۴۱۲، ناکا ۳۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲، سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با بسامد ۲/۵ هرتز

در حرکت پایین‌سو همراه است (شکل ۷ج). با مطالعه رفتار ضریب گشتاور چرخشی بر حسب سرعت زاویه‌ای، تاثیر خمیدگی بیشتر بر افزایش (بزرگی) ضریب گشتاور به‌ازای سرعت زاویه‌ای ثابت، کاملاً آشکار است (شکل ۷د). بیشتر بودن ضریب برا در حرکت بالاسو را می‌توان به تفاوت فشار روی دو سطح هواپرنه مرتبط دانست (سطح زیرین نسبت به سطح زبرین) که از آن تحت عنوان «خمیدگی القایی» نیز یاد می‌شود [۳]؛ بدین معنا که در حرکت بالاسو هواپرنه مشابه یک هواپرنه با خمیدگی بیشتر رفتار می‌کند [۷]. در توجیه این رفتار می‌توان به کاهش ضخامت لایه مرزی [۲۸] و چسبندگی بیشتر جریان به سطح زبرین هواپرنه در حرکت بالاسو اشاره نمود؛ در حالی که برای حرکت بالاسو جریان تمایل کمتری برای مجاورت با سطح زبرین دارد. در نتیجه، ضریب نیروی برا در حرکت بالاسو برای هواپرنه بیشتر و در حرکت پایین‌سو کمتر است [۱۳]. در همین حال، پسا نیز به دلیل جدایش جریان در حرکت پایین‌سو شدیداً رشد کرده و در مقابل، در حرکت بالاسو کاهش می‌یابد (شکل ۷ج).

تقارن هواپرنه اصولاً به تقارن مرکزی (تقریبی) نمودارهای چهارگانه حول مرکز مختصات می‌انجامد. در حالی که مساحت محصور در نمودارهای ضریب برا و گشتاور چرخشی اصولاً مقداری مثبت است، در نمودار ضریب پسا این مساحت با

توجه به جهت دوران در تحلیل نمودارهای دارای حلقه‌های پسماندی دارای اهمیت است. شایان ذکر است که جهت دوران با تاب خوردگی تغییر می‌کند و باعث کاهش مساحت می‌شود (شکل ۷ج). در نمودارهایی که سرعت زاویه‌ای روی محور افقی قرار دارد، نیمه راست متناظر با حرکت بالاسو بوده و نیمه چپ به حرکت پایین‌سوی هواپرنه اختصاص دارد (شکل ۷ب، ج، د). در مقابل، برای نمودارهایی که زاویه حمله در محور افقی جای گرفته، حرکت بالاسو و پایین‌سو بسته به جهت دوران، بین دورترین نقاط دو سوی نمودار حرکت می‌کنند. در این بین، جهت دوران جایگاه کمان‌های متناظر با حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو را تعیین می‌کند. برای نمونه، دوران ساعت‌گرد باعث می‌شود در نمودار ضریب برا بر حسب زاویه حمله، کمان حرکت بالاسو بالاتر از کمان حرکت پایین‌سو قرار گرفته و در نتیجه مساحت چرخه عددی مثبت را نتیجه دهد (شکل ۷الف). باید خاطرنشان ساخت که به دلیل یکسان بودن ضخامت هواپرنه با یکدیگر، مساحت درون حلقه‌ها به شکل مستقیم با یکدیگر قابل مقایسه خواهد بود.

همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش خمیدگی هواپرنه ضریب برا آن افزایش یافته و در نتیجه، حلقه‌ها به سوی بالا جابه‌جا می‌شوند (شکل ۷الف و ب)؛ اما این تغییر با رشد ضریب پسا بیشینه در حرکت بالاسو در کنار حفظ کمینه ضریب پسا

خواهد بود. در این مورد خاص مساحت درون حلقه‌ها معادل توان اتلافی در یک چرخه نوسانی است. همین‌طور افزایش خمیدگی بر تغییرات ضریب پسا برحسب سرعت زاویه‌ای تأثیر چشم‌گیری گذاشته و به عدم تقارن در دو بال نمودار دامن می‌زند (شکل ۷ج). براینده این نمودار کاهش ضریب پسا برای هوابرهای خمیده‌تر در حرکت بالاسو و افزایش آن در حرکت پایین‌سو در سرعت زاویه‌ای ثابت است که گاه باعث می‌گردد که ضریب پسا هوابر در جریان حتی به صفر میل کند. این وضعیت در نزدیکی وضع تعادل در حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو مشاهده می‌گردد. با مقایسه ضرایب برا و پسا برحسب سرعت زاویه‌ای می‌توان دریافت که در ازای دست‌یابی به بیشینه ضریب برا بیشتر در صورت استفاده از هوابرهای خمیده‌تر، مساحت چرخه در نمودار ضریب پسا برحسب سرعت زاویه‌ای افزایش چشم‌گیری می‌یابد؛ این در حالی است که مساحت خالص در نمودار ضریب برا برحسب سرعت زاویه‌ای اصولاً تغییری نمی‌کند (جدول ۲).

عنایت به جهت دوران، برای هوابر ناکا ۰۰۱۲ (تقریباً) صفر است. تغییرات مساحت محصور در نمودارهای ضریب برا برحسب زاویه حمله و سرعت زاویه‌ای تغییرات ناچیزی نسبت به افزایش خمیدگی هوابر از خود نشان می‌دهد که نشانگر ناچیز بودن تأثیر خمیدگی هوابر روی پسماند است (جدول ۲). پسماند را در این جا می‌توان به‌صورت انرژی اتلاف‌شده در چرخه تعبیر نمود که اصولاً ناشی از ایجاد حباب جدایش روی سطوح زیرین و زیرین هوابر شکل می‌گیرد؛ چنان‌چه ژئوپینگ و همکاران نشان دادند که با افزایش ضخامت هوابر به حد بحرانی، حلقه پسماند حذف می‌شود [۲۰].

تأثیر خمیدگی هوابر روی مساحت محصور در نمودار ضریب گشتاور چرخشی برحسب سرعت زاویه‌ای چشم‌گیر است. با افزایش خمیدگی مقدار پسماند کاهش چشم‌گیری پیدا کرده و سپس با افت و خیز ضعیفی همراه است. نکته جالب دیگری که از تأثیر افزایش خمیدگی روی تغییرات ضریب گشتاور چرخشی می‌توان دریافت، میل به تاب خوردن نمودار متناظر با ناکا ۴۴۱۲ در حرکت پایین‌سوست که به‌معنای کمتر شدن توان منتقل‌شده به جریان در این مرحله از حرکت تفسیر می‌شود که عملکرد هوابر را کاهش می‌دهد. این پدیده اصولاً برخاسته از تغییر جهت حرکت جریان در موقعیت وضع تعادل در حرکت پایین‌سو و از جاماندن جریان در لبه فرار هوابر ناشی می‌شود. همین‌طور کمینه ضریب گشتاور چرخشی با این کار کاهش می‌یابد (شکل ۷د - جدول ۲). باید خاطر نشان ساخت که به‌دلیل یکسان بودن ضخامت هوابرها با یکدیگر، مساحت درون حلقه‌ها به‌شکل مستقیم با یکدیگر قابل مقایسه

جدول ۲- مقادیر مساحت نمودارها برای پنج هوابر نوسانگر با بسامد ثابت؛ بررسی

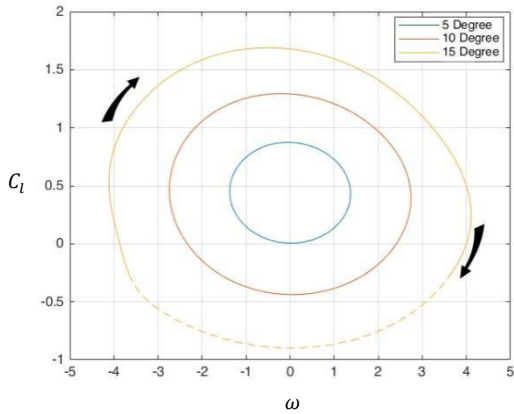
تأثیر خمیدگی بیشینه

| نام هوابر | $A(C_{L\alpha})$ | $A(C_{L\omega})$ | $A(C_{D\omega})$ | $A(C_{m\omega})$ |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ناکا ۰۰۱۲ | ۲/۰۹۳ | ۶/۴۳۲ | ۰/۰۰۷۶ | ۰/۱۱۷۲ |
| ناکا ۱۴۱۲ | ۱/۶۹۹ | ۶/۶۸۰ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۳۴۲ |
| ناکا ۲۴۱۲ | ۱/۷۱۱ | ۶/۶۴۴ | ۰/۰۸۴۷ | ۰/۰۴۲۲ |
| ناکا ۳۴۱۲ | ۱/۹۰۱ | ۶/۵۷۹ | ۰/۱۲۶۶ | ۰/۰۵۶۹ |
| ناکا ۴۴۱۲ | ۱/۴۵۰ | ۶/۵۷۹ | ۰/۱۷۴۹ | ۰/۰۴۳۶ |

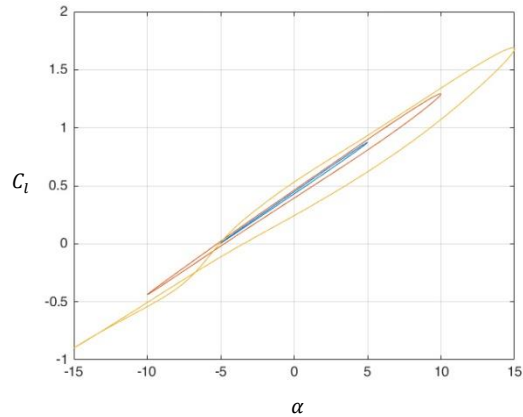
۲-۳- نتایج تغییر دامنه نوسان

تغییرات زاویه حمله، برای سه دامنه نوسان ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در بسامد ۲/۵ هرتز با حضور هوا بر ناکا ۴۴۱۲ است که در شکل ۸ به نمایش درآمده است:

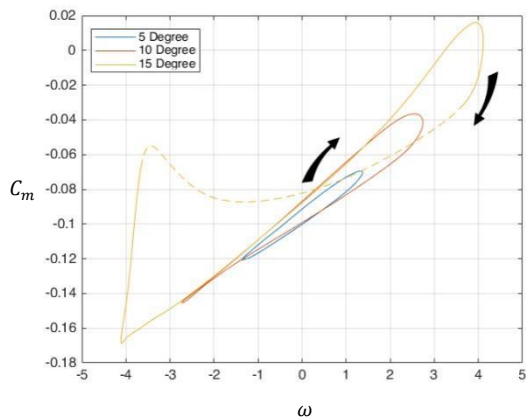
نتایج تحلیل شامل نمودارهای برا برحسب زاویه حمله (الف)، و برا (ب)، پسا (ج) و گشتاور (د) برحسب سرعت زاویه‌ای (نرخ)



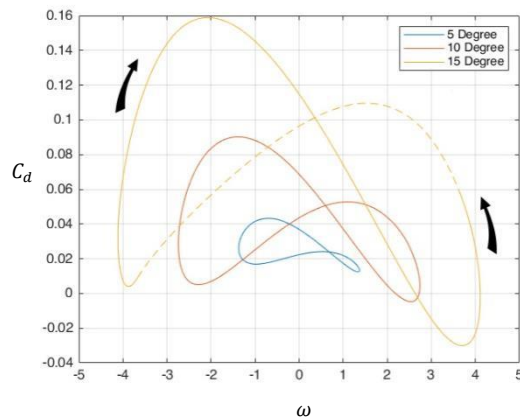
ب) ضریب برابر برحسب سرعت زاویه‌ای



الف) ضریب برابر برحسب زاویه حمله



د) ضریب گشتاور چرخشی برحسب سرعت زاویه‌ای



ج) ضریب پسا برحسب سرعت زاویه‌ای

شکل ۸- نمودارهای ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی برحسب زاویه حمله و سرعت زاویه‌ای در سه دامنه نوسان ۵، ۱۰ و ۱۵

درجه ۱۵ برای هوا بر ناکا ۴۴۱۲ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با بسامد ۲/۵ هرتز

مساحت حلقه پسماند ۴ برابر شود. برای اجتناب از این سوءبرداشت بهتر است، از پارامتر شدت استفاده گردد که امکان مقایسه بهتر بین نتایج را فراهم می‌آورد. برای نمونه در جدول ۳ مقایسه‌ای روی پارامتر شدت پسماند بین سه حلقه متناظر با دامنه ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه ارائه شده است. از این داده‌ها

مسئله نخست در مطالعه نمودارهای این بخش (برخلاف هوا برهای مختلف با خمیدگی‌های ناهمسان)، تفاوت در دامنه نوسان است که باعث تفاوت در ابعاد و مساحت محصور در هر حلقه می‌گردد. براین پایه، هرچه دامنه نوسان بیشتر باشد، ابعاد حلقه و احتمالاً مساحت محصور در آن نیز بیشتر خواهد بود. برای نمونه انتظار می‌رود، اگر دامنه نوسان دو برابر گردد،

به روشنی برمی آید که افزایش دامنه نوسان باعث افزایش شدت پسماند می گردد.

جدول ۳- شدت پسماند برا برای سه دامنه نوسان متفاوت

| شدت پسماند \mathcal{E}_{cl} | دامنه نوسان (درجه) |
|-------------------------------|--------------------|
| ۰/۰۳۰۶ | ۵ |
| ۰/۱۴۴۹ | ۱۰ |
| ۰/۳۳۵۶ | ۱۵ |

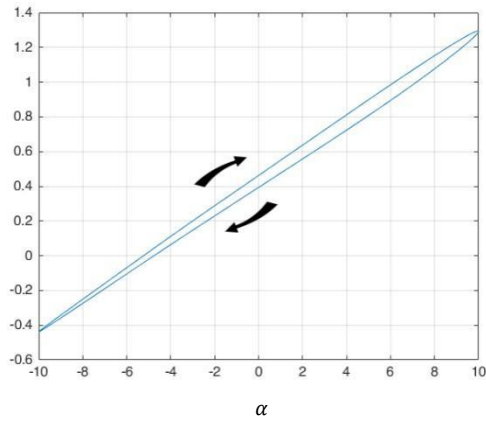
نکته برجسته در نمودار ضریب برا برحسب سرعت زاویه‌ای، افزایش مساحت نمودار با افزایش دامنه نوسان است. افزایش مساحت را می توان نشان دهنده مقدار انرژی اتلاف شده در هر چرخه دانست. با افزایش دامنه نوسان به ۱۵ درجه، نشانه‌های واماندگی در حواشی حلقه در بخش حرکت پایین سو به صورت ناهمواری دیده می شود. این ناهمواری باعث افزایش مساحت شده که میزان انرژی اتلاف شده را در هر چرخه افزایش می دهد (شکل ۸). با تطبیق نمودارهای هنجار شده ضریب نیروی پسا می توان دریافت که در حرکت پایین سو برجستگی‌هایی دیده می شود که آن را می توان به جدایش جریان نسبت داد (شکل ۸). تاب خوردن حلقه‌ها از دامنه ۱۰ درجه و تاب خوردگی شدید آن در دامنه ۱۵ درجه در شکل ۸ به روشنی دیده می شود که مویید مشاهدات قبلی است. اگر بتوان با دقت خوبی دامنه ۱۰ درجه را متناظر با آغاز واماندگی هوابر نوسانگر در نظر گرفت، این زاویه به شکل قابل توجهی بیشتر از زاویه واماندگی استاتیکی برای ناکا ۴۴۱۲ است. این پدیده که تحت عنوان تاخیر در واماندگی دینامیکی از آن یاد می شود ناشی از چسبندگی بیشتر جریان به سطح زیرین هوابر در حرکت بالاسوست و از دیگر سو باعث افزایش ضریب برا پیشینه می شود [۱]. شکرگزار و یزدانی این پدیده را ناشی از فروریزش گردابه‌ها بر سطح زیرین هوابر نوسانگر در زاویای حمله زیاد می دانند [۲۳].

شکل ۹ جزئیات شکل ۸ الف را با جزئیات نمایش داده است (به مقیاس محورها توجه نمایید). همان گونه که دیده می شود، برخلاف دامنه‌های ۵ و ۱۰ درجه که حلقه جهت دوران یکسانی دارد، در دامنه ۱۵ درجه یک تاب خوردگی شدید در حرکت پایین سو دیده می شود که به روشنی می توان آن را به جدایش جریان در این وضع نسبت داد. این کار از

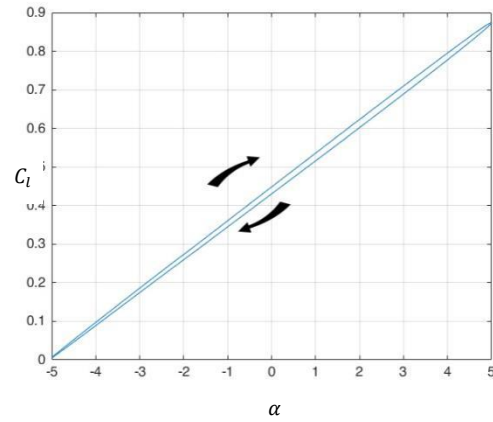
مساحت محصور موردانتظار در حلقه یاد شده می کاهد. این پدیده را می توان به وجود یک حباب در لبه حمله هوابر و ترکیدن آن نسبت داد؛ حبابی که در حرکت پایین سو رشد کرده، در یک زاویه حمله بحرانی ترکیده و باز با بازگشت به آن زاویه شکل می گیرد (شکل ۹ ج) [۲۴]. البته اثراتی چون نقص یا زبری سطح مدل در کنار عدد رینولدز نیز بر رفتار پسماند تاثیر گذارند [۱۵]. برای نمونه کورتولوش نشان داد که با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰ به ۴۰۰۰، زاویه حمله بحرانی (متناظر با ترکیدن حباب) کاهش می یابد [۲۵]. به منظور مقایسه بهتر، نقاط متناظر با بخش جدایش جریان در شکل ۹ ج، در نمودارهای ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی برحسب زاویه حمله به صورت خط چین آورده شده است. این محدوده در شکل‌های ۹ ب، ۹ ج و ۹ د نیز جهت مقایسه با خط چین نمایش داده شده است.

با دنبال کردن تاثیر ناحیه متناظر با واماندگی هوابر (خط چین) در نمودارهای شکل ۹ می توان در مورد میزان و نحوه تاثیر پذیری ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی در سرعت‌های زاویه‌ای متفاوت از این پدیده قضاوت نمود. در حالی که حلقه‌های ضرایب برا و پسا احتمالا مساحت کمتری را نسبت به حالت مورد انتظار محصور می نمایند، شکل عمومی حلقه پسماندی در این نمودارها تقریبا بدون تغییر باقی می ماند. در مقابل، ضریب گشتاور چرخشی برحسب زاویه حمله در زاویه ۱۵ درجه تغییر شکل شدیدی پیدا می کند. این تغییر شکل متفاوت با تاب خوردگی در زاویه ۱۰ درجه است که آن گونه که پیش تر گفته آمد، برخاسته از ناهم فازی حرکت جریان و هوابر در لبه فرار رخ می دهد. نتیجه این کار منفی شدن چشم گیر مساحت محصور در حلقه پسماندی است که نشانگر ناتوانی نوسانگر در انتقال توان به جریان است (شکل ۸ د - جدول ۴).

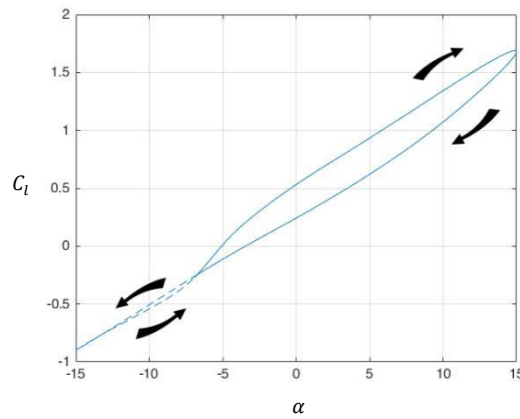
نکته مهم دیگری که از نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله برمی آید، افت چشم گیر ضریب نیروی برا در دامنه نوسانی ۱۵ درجه است که نشانگر افت عملکرد هوابر نوسانگر در این وضعیت است. این در حالی است که در دامنه‌های نوسان ۵ و ۱۰ درجه عملکرد هوابر تقریبا بدون تغییر باقی می ماند؛ در نتیجه، می توان دریافت که صرفا با افزایش دامنه نوسان نمی توان عملکرد آیرودینامیکی هوابر را بهبود داد.



ب) ضریب برا برحسب زاویه حمله: دامنه ۱۰ درجه



الف) ضریب برا برحسب زاویه حمله: دامنه ۵ درجه



ج) ضریب برا برحسب زاویه حمله: دامنه ۱۵ درجه

شکل ۹- ضریب برا برحسب زاویه حمله در سه دامنه نوسان ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه برای هواپر ناکا ۴۴۱۲۳ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

با بسامد ۲/۵ هرتز

مقادیر مساحت نمودارها برای سه دامنه نوسان ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه برای هواپر ناکا ۴۴۱۲۳ در ۴- جدول

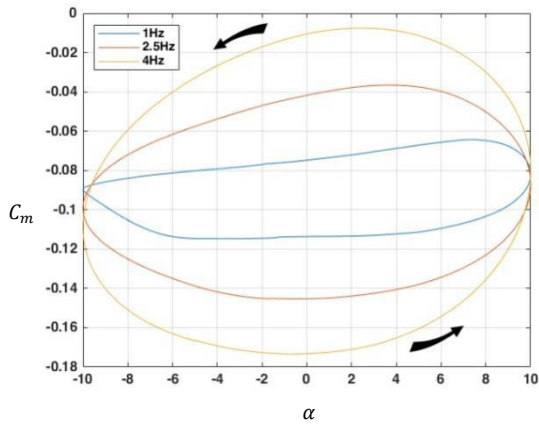
سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با بسامد ۲/۵ هرتز

| $A(C_{m_{\alpha}})$ | $A(C_{D_{\alpha}})$ | $A(C_{l_{\alpha}})$ | $A(C_{l_{\alpha}})$ | دامنه نوسان |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| -۰/۱۵۳۱ | -۰/۰۱۹۴ | -۰/۰۳۱۵ | ۱/۸۶۷ | ۵ درجه |
| ۱/۴۵۰ | -۰/۰۴۳۶ | -۰/۰۱۷۵ | ۶/۵۸۸ | ۱۰ درجه |
| ۵/۰۳۴ | -۰/۱۰۳۸ | -۰/۰۸۹۴ | ۱۶/۶۶ | ۱۵ درجه |

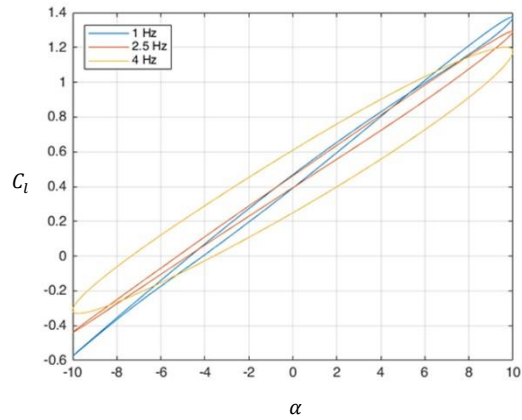
۳-۳- نتایج تغییر بسامد

نتایج تحلیل شامل نمودارهای ضرایب برا (الف) و گشتاور چرخشی (ب) برحسب زاویه حمله و ضرایب برا (ج)، (د) چرخشی و گشتاور چرخشی (ه) برحسب سرعت زاویه‌ای (نرخ تغییرات

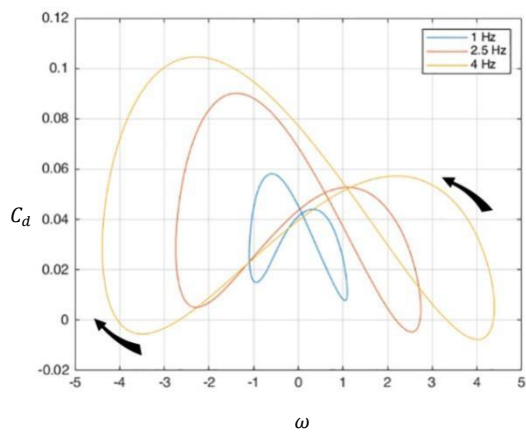
زاویه حمله)، برای حرکت نوسانی با دامنه ۱۰ درجه در بسامدهای گوناگون با حضور هواپرنوسانگر ۴۴۱۲ است که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به نمایش درآمده است:



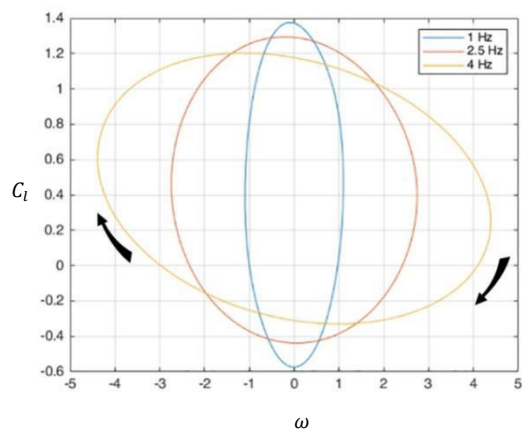
(ب) ضریب گشتاور چرخشی برحسب زاویه حمله



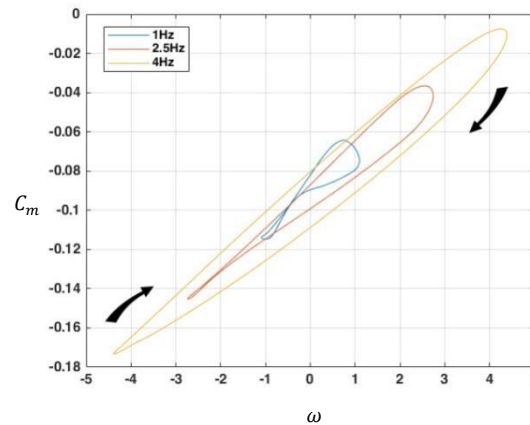
(الف) ضریب برا برحسب زاویه حمله



(د) ضریب پسا برحسب سرعت زاویه‌ای



(ج) ضریب برا برحسب سرعت زاویه‌ای



ه) ضریب گشتاور چرخشی بر حسب سرعت زاویه‌ای

شکل ۱۰- نمودارهای ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی بر حسب زاویه حمله و سرعت زاویه‌ای در دامنه نوسان ۱۰ درجه

برای هوابر ناکا ۴۴۱۲ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با سه بسامد ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز

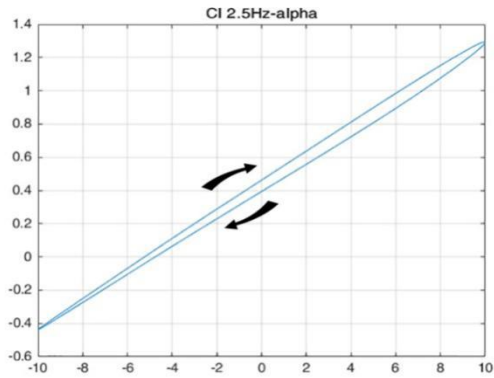
زبرین و زیرین هوابر در بسامدهای بالا دانست که به ضریب برا پایین‌تر درازای مقادیر بیشینه و کمینه می‌انجامد. اسلامی این‌گونه استدلال می‌کند که «افزایش بسامد کاهیده در این هوابر، موجب کاهش نیروی برا شده است، به عبارت دیگر، با افزایش بسامد کاهیده، مقادیر بیشینه نیروی برا در زوایای حمله بالاتری اتفاق افتاد» [۱۱]. مصلی‌نژاد و همکاران نیز این‌گونه استدلال می‌کنند که: «درواقع با افزایش بسامد نوسان، جریان فرصت جدا شدن از سطح و چسبیدن مجدد به آن را از دست می‌دهد» [۲۶]؛ در نتیجه، تغییر بسامد باعث تغییر در رفتار پسماند هوابر می‌شود که عوامل موثر بر آن تغییر در توزیع جریان و واماندگی است. رفتار جریان همان‌گونه که گفته شد تابعی از عدد رینولدز است. حیدری، پسندیده‌فر و مالک جعفریان استفاده بسامد کاهید پایین با دامنه نوسان بالا را برای دستیابی به بهترین عملکرد آیرودینامیکی در اعداد رینولدز بالا پیشنهاد می‌دهند [۱۶] که در پژوهش شکرگزار و یزدانی نیز بدان اشاره گردیده است [۲۳].

آخرین نکته مربوط به نمودارها به شکل ۱۰ دیده می‌شود. مساحت محصور در هر حلقه به شکل مستقیم وابسته به بسامد نوسان است. این مساحت را می‌توان معادل کار انجام شده در هر چرخه دانست که به روشنی با داشتن دامنه نوسان مشخص، به‌ازای بسامدهای بیشتر افزایش می‌یابد. جدول ۵

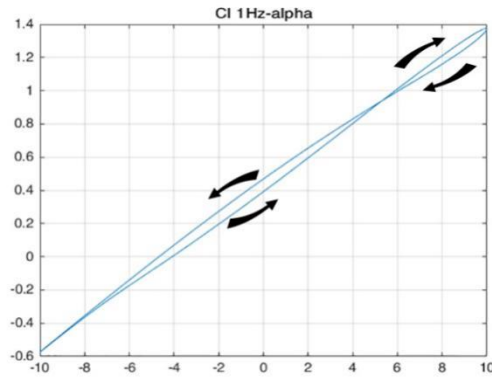
در شکل ۱۰ الف، تاثیر بسامد نوسان روی ضریب نیروی برا بر حسب زاویه حمله آورده شده است (جزئیات روشن‌تر در شکل ۱۱ آورده شده است). در بسامد ۱ هرتز نمودار به‌وضوح تاب‌خورده است که به کاهش مساحت محصور در آن می‌انجامد. این درحالی است که بسامد ۲/۵ هرتز با باز شدن تاب‌خوردگی همراه بوده و در بسامد ۴ هرتز حلقه کاملاً گشوده شده است. این رفتار هماهنگی مناسبی با پژوهش فلاح پور و همکاران [۲۷] و مصدری و همکاران [۲۸] دارد. در این گذار، مساحت محصور در حلقه‌ها از منفی به مثبت تغییر علامت می‌دهد که نشانگر مثبت شدن کار انجام‌شده توسط نیروی برا در حلقه است. این رفتار هماهنگی کامل با پژوهش فان و شی دارد که از بیشتر بودن ضریب برا در حرکت بالاسو نسبت به پایین‌سو حکایت می‌کند [۳]. الگوی مشابهی را می‌توان در نمودار ضریب گشتاور چرخشی بر حسب سرعت زاویه‌ای در شکل ۱۰ مشاهده کرد که با رفع تاب‌خوردگی از بسامد نزدیک به ۲/۵ هرتز همراه است.

نکته دیگر درباره تغییرات ضریب برا بر حسب سرعت زاویه‌ای است که در شکل ۱۰ ج به نمایش درآمده است. به‌رغم افزایش مساحت محصور در حلقه، با بالا رفتن بسامد نوسان بیشینه و کمینه این ضریب با کاهش همراه است که آن را می‌توان ناشی از جا ماندن جریان برای چسبیدن به سطوح

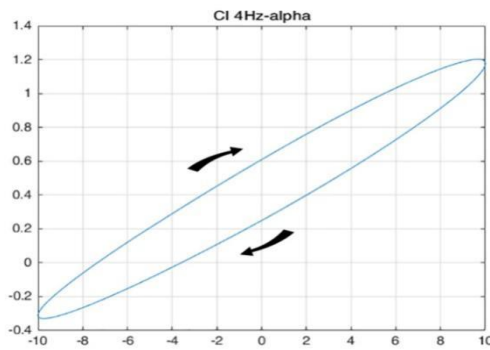
داده‌های متناظر با بسامدهای ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز را برای ضرایب بر حسب زاویه حمله، و برای پسا و گشتاور چرخشی بر حسب سرعت زاویه‌ای گردآوری کرده که شامل شیب نمودارها و نیز مساحت محصور در هر حلقه است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۱- ضریب بر حسب زاویه حمله در سه دامنه نوسان ۱۰ درجه برای هواپرنوسانگر ۴۴۱۲۳ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و ۳

بسامد ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز

جدول ۵- مقادیر مساحت نمودارها برای بسامدهای متفاوت

| $A(C_{m\alpha})$ | $A(C_{D\alpha})$ | $A(C_{l\alpha})$ | $A(C_{l\alpha})$ | بسامد نوسان |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|
| -۰/۵۱۹۳ | -۰/۰۱۹۰ | -۰/۰۱۳۶ | ۳/۳۴۰ | ۱ هرتز |
| ۱/۴۵۰ | -۰/۰۴۳۶ | -۰/۰۱۷۵ | ۶/۵۸۸ | ۲/۵ هرتز |
| ۵/۶۷۱ | -۰/۰۱۹۴۱ | -۰/۰۲۶۲۵ | ۱۰/۲۶ | ۴ هرتز |

۴- نتیجه گیری:

برحسب سرعت زاویه‌ای است که به‌ازای دامنه‌های نوسان بیشتر رخ می‌دهد.

تاثیرات افزایش بسامد نوسان روی حرکت هوا بر ناکا ۴۴۱۲ با دامنه ۱۰ درجه در درجه اول روی بیشینه ضریب برا خود را نشان می‌دهد. در حالی که به‌دلیل چسبندگی بهتر جریان به سطح زیرین هوا بر در حرکت بالاسو ضریب برا بالاتر از حرکت پایین‌سوست، افزایش بسامد با جا ماندن جریان همراه بوده و بیشینه ضریب برا در پی آن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر در بسامد ۴ هرتز کار خالص بیشتری روی جریان انجام می‌شود که با باز شدن گره حلقه در نمودار ضریب گشتاور چرخشی برحسب سرعت زاویه‌ای همراه است. دست‌یابی به ترکیبی مناسب از بسامد و دامنه نوسان برای داشتن بهترین عملکرد آیرودینامیکی یک مسئله رایج پژوهشی است که به رینولدز جریان آزاد و خصوصیات سطح جسم نوسانگر بستگی دارد. در این بین، لازم است که خمیدگی مناسبی برای هوا بر انتخاب گردد.

هدف از انجام این پژوهش دست‌یابی به یک چارچوب ذهنی از تاثیر تغییرات در سه دسته از پارامترهای هندسی و چرخه‌ای در عملکرد دینامیکی هوا بر نوسانگر است و به‌شکل ویژه به ریخت و پسماند حلقه‌ها در آن اشاره شده‌است. در حالی که برای انجام یک طراحی اولیه یا تحلیل یک سامانه موجود، نیاز به آزمون‌های تونل باد و یا پرواز به‌شکل واقعی است، استفاده از هرگونه تحلیل عددی تنها می‌تواند باعث دستیابی به یک تخمین اولیه مناسب از واقعیت باشد که با افزایش سطح جزئیات قابلیت اتکای بیشتری خواهد داشت.

به‌رغم آن چه در این پژوهش بدان پرداخته شد، کاستی‌هایی دیده می‌شود که برخی از آنها را می‌توان در کارهای آینده مورد توجه قرار داد. نخستین مورد به تفسیر دقیق معنای مساحت محصور در حلقه‌های شکل گرفته در هر نمودار باز می‌گردد. در این پژوهش به‌شکل کلی مساحت حلقه‌ها متناظر با کار انجام‌شده توسط نیرو یا گشتاور متناظر فرض گردیده است، در حالی که لازم است تفسیر دقیق‌تری در این باره انجام پذیرد. بدین ترتیب امکان بررسی صحیح مقدار مساحت محصور و همین‌طور تفسیر واقع‌گرایانه از تاب‌خوردگی حلقه‌ها فراهم خواهد بود.

بررسی حباب‌های جدایش و طرح خطوط جریان در شبیه‌سازی‌ها دیگر سرنخ پژوهشی است که امکان درک بهتر

در این مقاله نوسان هوا بر در جریان آزاد بررسی و در آن حرکت پرپر زدن حول نقطه یک‌چهارم وتر بررسی گردید. هرچند که رفتار دینامیکی هوا بر تحت تاثیر عوامل گسترده‌ای از جمله عدد رینولدز و بسامد کاهیده است، در این پژوهش هدف بررسی تغییرات ضرایب برا، پسا و گشتاور چرخشی به‌ازای تغییرات خمیدگی، دامنه نوسان و بسامد نوسان هوا بر تعیین گردیده است.

هوا برهای مورد استفاده همگی از خانواده ناکا چهاررقمی انتخاب شده‌اند: ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۱۴۱۲، ناکا ۲۴۱۲، ناکا ۳۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲. تمامی این هوا برها ضخامت بیشینه ۱۲ درصد داشته که در ۴۰٪ وتر رخ می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان تاثیر تغییرات ضخامت را مستقل از دیگر پارامترهای تاثیرگذار روی هندسه هوا بر بررسی نمود. برای مشاهده تاثیر تغییرات دامنه و بسامد نوسان از هوا بر ناکا ۴۴۱۲ استفاده شده است. این هوا بر با فرض بسامد ۲/۵ هرتز در دامنه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نوسان کرده است. از سوی دیگر شبیه‌سازی‌ها برای نوسان‌هایی با بسامدهای ۱، ۲/۵ و ۴ هرتز در دامنه ۱۰ درجه انجام شده است.

افزایش خمیدگی متوسط از صفر تا ۴ درصد وتر تا زمانی که هوا بر دچار واماندگی نگردد، به افزایش ضریب برا برحسب زاویه حمله می‌انجامد. در حالی که کار انجام شده در چرخه برای نیروی برا اصولاً تغییری نمی‌کند، این کار برای نیروی پسا با افزایش پیوسته مساحت محصور در حلقه از صفر تا مقداری مثبت همراه است. در مقابل، مساحت محصور در حلقه‌های ضریب گشتاور چرخشی برحسب سرعت زاویه‌ای ابتدا کاهش یافته و سپس افت‌وخیز ناچیزی دارد.

تاثیرات افزایش دامنه نوسان هوا بر ناکا ۴۴۱۲ با ثابت باقی ماندن بسامد به‌روشنی تاثیرات جدایش جریان را در زوایای حمله بالا نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه‌پذیری مساحت‌های محصور از پارامتر شدت پسماند استفاده شده است. در این مثال زاویه نوسان حدوداً ۱۰ درجه نقطه شروع جدایش است که باعث تغییرات چشم‌گیر در کیفیت حلقه‌های نوسان و همین‌طور شدت پسماند در آن می‌شود. نتیجه روشن افزایش شدت پسماند در نمودارهای ضریب برا و گشتاور چرخشی

- Oscillations: A Comparative Study. Energy 222:1200-04
- [2] Carmichael B, NASA (1982) Low Reynolds Number Airfoil Survey.
- [3] Phan M, Shin J (2016) Numerical Investigation of Aerodynamic Flow Actuation Produced by Surface Plasma Actuator on 2D Oscillating Airfoil. Chinese J Aeronaut 29:882–892
- [4] Aiken E, Ormiston R, Young L (2000) Future Directions in Rotorcraft Technology at Ames Research Center. NASA Moffett Field CA Aimes Research Center.
- [5] Lee T, Gerontakos P (2004) Investigation of Flow over an Oscillating Airfoil. J Fluid Mech 512:313–341
- [6] Corke T, Thomas F (2015) Dynamic Stall in Pitching Airfoils: Aerodynamic Damping and Compressibility Effects. Annu Rev Fluid Mech 47:479–505
- [7] Zou S, Gao A, Shi Y, Wu J (2017) Causal Mechanism Behind the Stall Delay by Airfoil's Pitching-up Motion. Theor Appl Mech Lett 7:311–315
- [8] Mayer YD, Zang B, Azarpeyvand M (2020) Aeroacoustic Investigation of an Oscillating Airfoil in the Pre- and Post-Stall Regime. Aerosp Sci Technol 103:105880
- [9] Rasekh S, Karimian A, Hosseini Doust M (2018) Comparison of Dynamic Stall Models Using Numerical and Semi-Empirical Approaches for a Wind-Turbine Airfoil, In Persian, Modares Mech Eng 18 (3) :282-290
- [10] Morris KA (2011) What is hysteresis? Appl Mech Rev 64:161-73
- [11] Eslami Haghighat Z (2022) Experimental Investigation of Suddenly Stop of Supercritical Airfoil SC-0410 between Pitching Motion In Persian, J Aeronaut Eng. 3 (2) :29-42
- [12] Soltani MR, Rasi Marzabadi F (2010) Experimental Investigation of Transition on a Plunging Airfoil. Sci Iran 17 (6): 468-489
- [13] Yang Z, Haan F, Hu H, Ma H (2007) An Experimental Investigation on the Flow Separation on a Low-Reynolds-Number Airfoil. In: 45th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. p 275
- [14] Larsen J, Nielsen S, Krenk S (2007) Dynamic Stall Model for Wind Turbine Airfoils. J Fluids Struct 23:959–982
- [15] Mueller T (1985) The Influence of Laminar Separation and Transition on Low Reynolds Number Airfoil Hysteresis. J Aircr 22:763–770
- [16] Heydari A, Pasandidehfard M, Malekjafarian M (2014) Investigation of Unsteady Parameters Effects on Aerodynamic Coefficients of Pitching Airfoil Using Coarse Grid CFD. Sci Iran 2: 370-386

فیزیک مسئله را فراهم می‌سازد. این کار به‌ویژه برای مطالعه اثر تغییرات بسامد روی رفتار دینامیکی هواپر نوسانگر پیشنهاد می‌شود. در نهایت، انجام آزمایش به‌صورت تجربی و مقایسه نتایج با محاسبات عددی بهترین کاری است که برای اعتبارسنجی یافته‌ها می‌توان انجام داد.

در پایان، تعریف شاخص‌های مناسب برای سنجش عملکرد آیرودینامیکی به‌منظور بررسی شرایط شبیه‌سازی ضروری است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

| | |
|-----------------|----------------|
| وتر متوسط | c |
| ضریب پسا | c_d |
| ضریب برا | c_l |
| ضریب گشتاور | c_m |
| پسا | D |
| بسامد کاهیده | K |
| برا | L |
| گشتاور | M |
| مساحت مرجع | s |
| زمان | T |
| سرعت جریان آزاد | v |
| بسامد | ω |
| بسامد زاویه‌ای | ω_{ang} |
| چگالی | ρ |

اختصارات:

| | |
|--|---------------|
| Computational Fluid Dynamics | CFD |
| $K\omega$ Shear Stress Transport | $K\omega$ SST |
| Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes | URANS |

مراجع

- [1] Zhu C, Qiu Y, Wang T (2021) Dynamic Stall of the Wind Turbine Airfoil and Blade Undergoing Pitch

- [23] Shokrgozar Abbasi A, Yazdani S (2021) A Numerical Investigation of Synthetic Jet Effect on Dynamic Stall Control of Oscillating Airfoil. *Sci Iran* 28:343–354.
- [24] Li Z, Zhang P, Pan T, et al (2018) Catastrophe-Theory-Based Modeling of Airfoil-Stall Boundary at Low Reynolds Numbers. *AIAA J* 56:36–45
- [25] Kurtuluş D (2022) Critical Angle and Fundamental Frequency of Symmetric Airfoils at Low Reynolds Numbers. *J Appl Fluid Mech* 15(3): 723-735
- [26] Mosallanejad M, Kazemi M, Nouri S, et al (1402) Experimental Study of Aerodynamic Effects of Plasma Actuators on NACA0012 Airfoil in Pitch Oscillation, In Persian in: 21st Intl Conf of Iran Aerospace Soc, Tehran, Iran
- [27] FallahPour N, Haghiri AA, Mani M, et al (2015) Experimental Investigation of Boundary Layer on an Oscillating (Pitching) Supercritical Airfoil in Compressible Flow Using Multiple Hot Film Sensors, In Persian, *J Struct Fluid Mech.* 5 (3) :173-184
- [28] Masdari M, Jahanmiri M, Soltani M et al (2016) Experimental Investigation of Boundary Layer on an Oscillating Supercritical Airfoil, *Sharif Mech J*, 8: 41-52
- [29] Medina A, Alves D, de Paula Sales T, et al (2014) Study of Flow over and Oscillating NACA0012 Airfoil. In: 8th Ntl. Cong. of Mech. Eng.
- [17] Heydari A, Pasandideh Fard M, Malek Jafarian M (2012) Investigation of Unsteady Parameters Effects on Aerodynamic Coefficients of Pitching Airfoil Using Coarse Grid CFD, In Persian, *J Aeronaut Eng.* 14 (2) :49-66
- [18] Mueller T, Pohlen L, Conigliaro P, Jansen B (1983) The Influence of Free-Stream Disturbances on Low Reynolds Number Airfoil Experiments. *Exp Fluids* 1:3–14
- [19] Martinat G, Braza M, Hoarau Y, et al (2008) Turbulence Modelling of the Flow Past a Pitching NACA0012 Airfoil at 10^5 and 10^6 Reynolds Numbers. *J Fluids Struct*, 1294:303–24
- [20] Zhiping L, Zhang P, Tianyu P, et al (2020) Study on Effects of Thickness on Airfoil-Atall at Low Reynolds Numbers by Cusp-Catastrophic Model Based on GA (W)-1 airfoil. *Chinese J Aeronaut* 33:1444–1453
- [21] Guo B, Liu P, Qu Q, Cui YL (2012) Turbulence Models Performance Assessment for Pressure Prediction During Cylinder Water Entry. *Appl Mech Mater* 224:225–229
- [22] Sheldahl R, Klimas P (1981) Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA)