



تحلیل فرکانسی و بررسی آرایش جریان بر روی دو بال نامحدود با لبه حمله ساده و سینوسی

حسین جباری^۱، محمدحسن جوارشکیان^{۲*}، علی اسماعیلی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد هوافضا-آیرودینامیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، hossein.jabbari@mail.um.ac.ir

۲- استاد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، javareskian@um.ac.ir

۳- استادیار مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، aliesmaeilii@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

گردش باوجود جثه عظیم و بدنه سفت‌وسخت، در هنگام شکار طعمه بوده که ناشی از وجود باله های شناوری ویژه آن‌ها است. ساختار این باله‌ها به‌صورت برآمدگی‌هایی سینوسی در لبه حمله است. این منحنی‌های سینوسی به گونه ایی است که فاصله از قله تا دره به‌عنوان دامنه‌ی این دسته از بال‌ها، در محدوده ۵ تا ۲۴ درصد و میزان دهانه بال حدود ۱۰ تا ۵۰ درصد طول وتر می‌باشند [۱-۷]. بنا بر دلایلی که پیش‌تر بیان شد، شاهد توزیع متفاوتی از سرعت و الگوهای جریان بر روی بالواره‌های اصلاح‌شده خواهیم بود و تاکنون مطالعاتی که ساختار متقارن و تناوبی جریان را بیان می‌کردند، موردبررسی قرار داده شد؛ اما تحقیقاتی دیگر، دلالت بر رفتار زیر-هامونیک دارند و درک مکانیسم‌های داخلی جریان را به‌عنوان یک هدف دنبال می‌کنند. سرسین و همکاران [۸] که در این مسیر گام برداشتند، عدم تقارن و غیر تناوبی بودن جریان را گزارش می‌کنند.

شناخت و تحلیل فیزیک و رفتار جریان‌های گذرنده بر روی دو بالواره با لبه حمله ساده و سینوسی توسط تحلیل‌های فرکانسی، زاویه دید جدیدی در حوزه آیرودینامیک اجسام پرنده ارائه می‌کند که این مهم از جمله اهداف این پژوهش است. به عبارتی با توجه به مطالب بیان‌شده، نحوی توزیع جریان بر روی بالواره‌ها با لبه حمله ساده و برآمده، تأثیر بسزای در طراحی ریزپرنده‌ها دارد که می‌تواند پژوهشگران را در این رابطه ترغیب کند؛ اما تاکنون به این موضوع کمتر توجه شده است که در تحقیق پیش‌رو، با دیدگاهی عددی و شیوه‌های متفاوت، تلاش برای به نمایش گذاشتن الگوها و رفتار مختلف جریان متأثر از وجود برآمدگی‌ها در مقابل عدم وجود آن‌ها، در دستور کار قرار گرفته است.

در این تحقیق، دیدگاه متفاوتی از بررسی الگو و رفتار جریان آشفته بر روی دو بال لبه ساده و لبه سینوسی با شرطمرزی تناوبی توسط یک روش عددی معرفی شده است. در این شبیه‌سازی معادلات ناویر-استوکس توسط روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از مدل آشفته‌گی بهبودیافته (*IDDES*) حل شده است. به عبارتی در تحقیق حاضر به‌منظور افزایش مانور پذیری یک ریزپرنده با بال ثابت از یک روش کنترل غیر-فعال جریان که از باله شناوری یک گونه خاص نهنگ به نام هامپک الهام گرفته شده، استفاده شده است. در راستای بررسی نحوی عملکرد این نوع بال نامحدود، عدد رینولدز معادل با $10^5 \times 1/4$ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصله نشان از تغییرات گسترده میان این دو نوع بالواره دارد. به‌نوعی برخلاف بالواره لبه ساده که الگوی جریان متقارنی دارد، افت‌وخیزهای شدیدی در توزیع فشار و الگوی جریان بر روی بالواره لبه سینوسی در شرایط ماقبل از واماندگی وجود دارد که متأثر از غلبه جریان‌های جانبی بر جریان‌های طولی بر روی این دست از بالواره‌هاست؛ بنابراین بررسی الگوها و تحلیل گردابه‌های شکل‌گرفته و فرکانس‌های مربوطه بر روی این نوع بالواره همواره می‌تواند کمک شایانی به شناخت فیزیک جریان در آن نواحی کند و زاویه دید جدیدی برای طراحان اجسام پرنده محسوب شود.

واژه های کلیدی: بال لبه سینوسی-کنترل غیر فعال جریان-تقارن و عدم تقارن جریان-عملکرد آیرودینامیکی-رینولدز بحرانی

۱- مقدمه

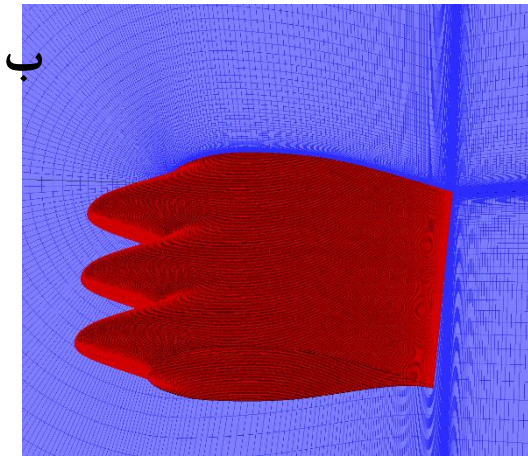
از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر پیشرفت روزافزون علم در شاخه‌های مختلف از جمله علوم فیزیکی، الهام گرفتن بیش‌ازپیش از طبیعت بوده که در این میان علم هوافضا از این قاعده مستثنی نیست؛ بنابراین اندیشه و تفکر عمیق در این رویکرد، همواره حاوی ایده‌های جدید و کاربردی برای پژوهشگران می‌باشد. به‌عنوان مثال پرندهگان و ماهی‌ها از گذشته تا به امروز بسیار موردتوجه پژوهشگران در زمینه طراحی و بهبود عملکرد هواپیماها، UAV و حتی MAV ها بوده و خواهد بود.

این روند به گونه‌ای فراگیر شده است که در سال‌های اخیر، توجه به ساختار فیزیولوژیکی و مورفولوژی گونه‌ی از نهنگ‌ها به نام هامپک، توسط زیست‌شناسان دریایی، روشنگر راه بسیاری از محققان هوافضایی بوده است، به‌نحوی که ایده استفاده از برآمدگی در لبه حمله بالواره‌ها و حتی بال‌ها را به وجود آورد؛ اما از جمله عواملی که این دسته از نهنگ‌ها را از سایر آبزیان متمایز کرده چابکی بسیار و قابلیت‌های مانور پذیری همچون چرخش و

۲- مدل‌سازی عددی

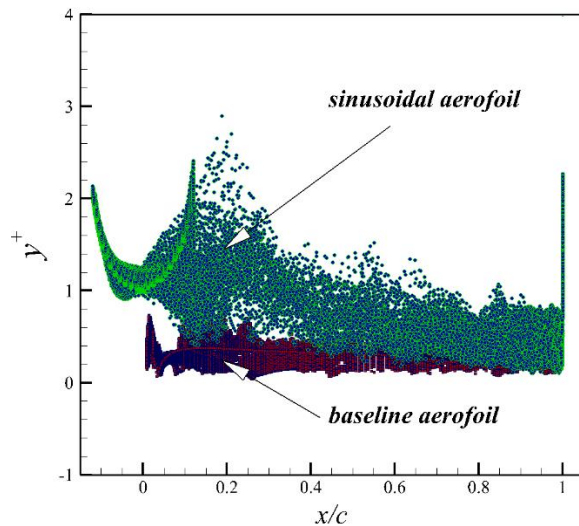
۲-۱ طرح مسئله و تولید شبکه

به‌منظور مدل‌سازی بال نامحدود با لبه حمله برآمده، لازم است که ابتدا یک سطح مقطع منبایی که همپوشانی بالایی با نمونه طبیعی خود یعنی سطح مقطع باله شناوری نهنگ هامپک داشته باشد، مدل بالواره انتخابی در پژوهش پیش‌رو همچون مطالعات پیشین مطابق شکل (۱) (۰۴۱۷) NASA-LS، می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره‌ایی از الف) شبکه‌بندی و ب) ابعاد و شرایط مرزی

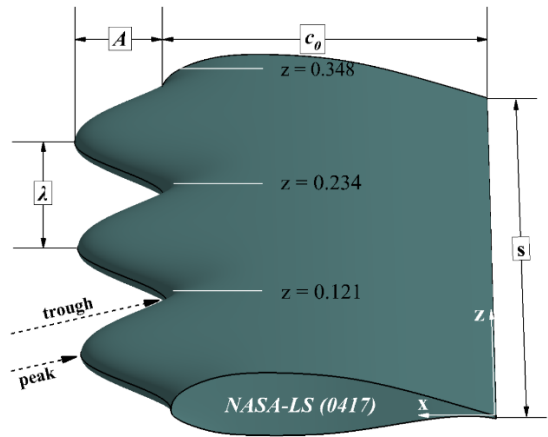
در همین راستا می‌توان اشاره کرد که این شیوهی اندازه‌گذاری محدوده دامنه عددی بر اساس یک موازنه شکل‌گرفته میان تلاش‌های محاسباتی و کیفیت حل می‌باشد که سازگاری بالایی با مرجع [۹] داشته و به نوعی استقلال از دامنه محاسباتی را بیان می‌کند، همچنین قابل ذکر است که تعداد کل سلول‌های شبکه محاسباتی مذکور برای بال نامحدود مذکور برابر با ۱۳/۵ میلیون اندازه‌گیری شده است. نتیجتاً، مطابق با جزئیاتی که پیش‌تر در ارتباط با شرایط و ویژگی‌های میدان محاسباتی بیان شد، قادر به ارائه رفتار و فیزیک پیچیده جریان خواهد بود. واحد گام زمانی استفاده شده در روند این شبیه‌سازی (۰/۰۰۲۵) بوده که علاوه بر تطابق با پژوهش‌های پیشین [۹]، مطابق با پیشنهاد منتر [۱۲، ۱۳]، به‌منظور تسخیر صحیح لایه‌مرزی آرام و گذار می‌بایست از تنظیم شدن مقدار y^+ تقریباً حدود یک اطمینان داشت. در همین راستا در کار حاضر، مقدار y^+ در بازه مناسبی متغیر است به‌طوری‌که با الزامات مدل آشفتگی جریان مطابقت دارد. شکل ۳ گویای چنین ادعای است.



شکل ۳- توزیع عدد y^+ روی دیواره دو بالواره با لبه حمله ساده و سینوسی

۲-۲ معادلات حاکم و اعتبارسنجی

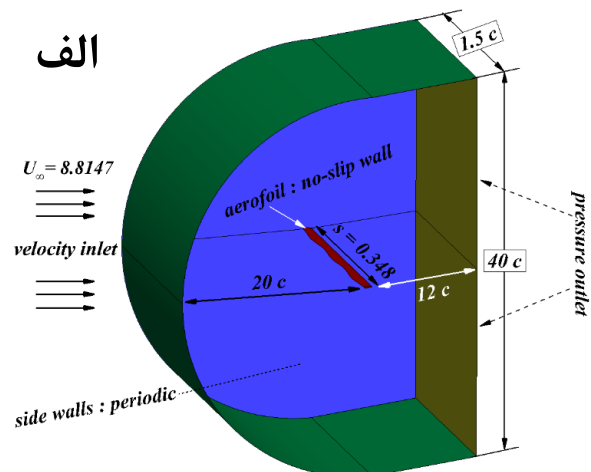
شبیه‌سازی عددی صورت گرفته بر مبنای حل معادلات دیفرانسیلی نویر-استوکس (Navier-Stokes) می‌باشد. مدل‌های ترکیبی با سطح مشترک نیز دارای چندین روش مختلف می‌باشند که پرکاربردترین آن‌ها روش DES



شکل ۱- تعریف مختصات مدل بال با لبه حمله برآمده در نمای بالا و نمای روبرو (خط توپر نشان‌دهنده سطح مقطع بال معمولی است)

اطلاعات تکمیلی در رابطه با مدل‌سازی بالواره در مرجع [۹] به تفصیل بیان شده است.

در شکل ۲ نمایی کلی از حوزه جریان، ابعاد، شرایط مرزی و همچنین شبکه‌بندی ارائه شده است. قابل ذکر است که سلول‌های ۶ ضلعی شبکه مذکور در نزدیکی دیواره برای تسخیر پدیده‌های آیرودینامیکی به اندازه کافی ریز شده و از تراکم مناسبی برخوردار می‌باشد [۱۰]. اگرچه فرایندی زمان‌بر برای شبکه‌بندی حجم‌های چندگانه می‌باشد، اما به‌منظور حفظ تراکم و کیفیت شبکه، این شیوه در دستور کار قرار گرفت. در این میان می‌توان به عوامل مؤثر بر کیفیت شبکه اشاره کرد که از جمله آن‌ها عبارتند از اسکینوس و نسبت منطقی بر همین مبنا تلاش شده است تا مقادیر حدی پارامترهای مذکور در کل ناحیه محاسباتی در بازه مناسبی قرار گیرد. از طرفی تولید یک شبکه با سازمان پیچیدگی رویه شبیه‌سازی برای عناصر شش‌وجهی نزدیک به سطح بال نامحدود را افزایش داد و از این‌رو برای گریز از بالا رفتن اسکینوس (به‌عنوان عاملی نامطلوب)، تلاش شد تا کمترین فاصله ممکن برای نزدیک‌ترین سلول به سطح اعمال شود و از طرفی به‌منظور حفظ یکی از نیازهای اساسی در مدل دی‌ای‌اس، حداکثر میزان فاصله عمودی بر واحد سطح [۱۱] رعایت شده است. برای اطمینان حاصل شدن از مستقل بودن نتایج از اندازه شبکه، شبکه را از یک حالت شبکه‌بندی درشت شروع کرده و رفته‌رفته بر تعداد تراکم شبکه افزوده تا زمانی که نهایتاً با افزایش تعداد سلول‌ها اختلاف ناچیزی در مسیر همگرایی نتایج ظاهر شود.



جدول ۱- مقایسه تغییرات نرخ ضریب برآ به پسا نتایج عدد و تجربی [۱۶]

زاویه حمله (درجه)	نتایج c_l/c_d		درصد خطا (%)
	تجربی [۱۶]	عددی (حاضر)	
۱۶	۵/۳۵۸	۵/۳۸۲	۰/۴۴

۳- نتایج

بررسی طبیعت شرایط نامتقارن جریان گذرنده بر روی یک بالواره با لبه حمله سینوسی، قادر به ایجاد زاویه دید جدیدی از سازکارهای کنترل جریان نامتناوب القا شده می‌باشد. به عبارتی، نحوی توزیع جریان بر روی بالواره‌ها با لبه حمله برآمده، تأثیر بسزای در نیروهای ایرودینامیکی دارد؛ بنابراین استفاده از شیوه‌های کنترلی جریان همچون المان‌های زبری با اندازه بهینه و در موقعیت مناسبی از سطح موردنظر باهدف ارتقا سطح عملکرد بال و یا بالواره‌ها می‌تواند بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد بررسی الگوها و ساختار جریان در نواحی نزدیک دیواره بالواره لبه ساده و مقایسه آن با بالواره لبه سینوسی همواره می‌تواند حائز اهمیت می‌باشد. مطابق شکل ۴ الگوی کلی جریان نزدیک دیواره بر هر دو بالواره‌ها به نمایش گذاشته شده است. در این بین، شکل ۴، نشان از دویعدی بودن الگوی جریان از لبه حمله تا $x/c_{ref} = 0.4$ بر روی بالواره لبه ساده در زاویه حمله ۱۶ درجه دارند. اما به تدریج اثر گردایان معکوس فشار غالب شده و جریان‌های برگشتی پدیدار می‌شوند و جریان اتصال خود را بر روی سطح را از دست می‌دهد. این خطوط جریان از نواحی مرکزی دهانه بالواره استخراج شده‌اند. همچنین در حوالی $x/c_{ref} = 0.26$ یک حباب جدایش شروع به شکل‌گیری می‌کند و در انتها نیز که با باز چسب مجدد جریان همراه است، افزایش شدت آشفتگی و افزایش مجدد سرعت قابل‌رؤیت است. در آخر نیز می‌توان بر وجود یک ناحیه جدایش نسبتاً ملایم، در نواحی نزدیک به لبه فرار، اذعان کرد. به‌طور کلی، شباهت زیادی میان این رژیم جریان بر روی بالواره لبه ساده با پدیده‌ها رایج در اطراف یک بالواره در رینولدزهای پایین، وجود دارد [۱۷-۲۰]. بنابراین می‌توان بر الگوی شبه-مقارن روی بالواره مدل پایه اذعان داشت. در مقابل، در بخش $z/c_{ref} = 0.52$ با حرکت جریان به سمت پایین‌دست بالواره لبه سینوسی، شاخه‌های جریان بر روی هر دو طرف قله کماکان متصل بوده و بر نواحی لبه فرار بخش دره تمرکز داشته که تولید جریان‌های برگشتی را به همراه دارند که نتیجتاً می‌توان شاهد ناحیه جدایش بزرگی در این ناحیه بود.

است. قابل‌ذکر است که در سال‌های اخیر به‌منظور رفع برخی از ایرادات موجود در مدل مذکور، اصلاحاتی صورت گرفت که به ارائه مدل‌های *DDES* و *IDDES* ختم شد، به همین منظور در روند این شبیه‌سازی عددی همچون مراجع [۹، ۱۴]، از این مدل آشفتگی استفاده شده است.

با در نظر گرفتن طول وتر بال نامحدود، عدد رینولدز و همچنین توجه به $Re = f(\rho, U, L, \mu)$ ، شبیه‌سازی عددی با سرعت جریان آزاد معادل $8/815 \text{ m/s}$ صورت پذیرفته است. برای حل معادلات ممنتیم، روش نیمه-ضمنی معادلات فشار مینا سیمپل (*SIMPLE*) بکار گرفته شده که همراه با دقت مرتبه دوم برای فشار گسسته‌سازی شده است. علاوه بر این، قاعده درون‌یابی درجه دوم از اسکیم کوئیک (*QUICK*) [۱۵]، به‌منظور گسسته‌سازی حجم محدود معادلات ممنتیم، مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان، به‌منظور یکپارچگی زمانی از یک روش ضمنی دقیق مرتبه دوم برای کاهش محدودیت‌های پایداری عددی استفاده شده است. همچنین

مقدار هدف باقی‌مانده‌ها به میزان 10^{-6} ثابت شده تا به‌عنوان یک معیار همگرایی برای تمام مقیاس‌های انتقالی تعیین شود. از طرفی، گام زمانی بکار گرفته شده برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها، در اینجا 0.0025 بوده و اگرچه این مقدار در مرحله مقدماتی باهدف تأیید استقلال گام زمانی نصف شده است. برای نشان دادن عدم تفاوت چشمگیر در هزینه محاسباتی *DES* و *RANS* شبکه‌های عددی متفاوتی به‌منظور تحلیل بال‌های نامحدود با مقادیر متفاوتی از نسبت منطری با کار گرفته شدند، اما آن شبکه‌ها صرف‌نظر از مدل آشفتگی استفاده شده، بدون تغییر باقی ماندند. غالباً شبیه‌سازی‌های عددی برای رسیدن به یک حالت همگرایی ناپایداری از نقطه نظر آماری به گونه‌ای که تحت تأثیر حالت گذار اولیه قرار نگیرد، باید بیشتر از 40 s انجام شود.

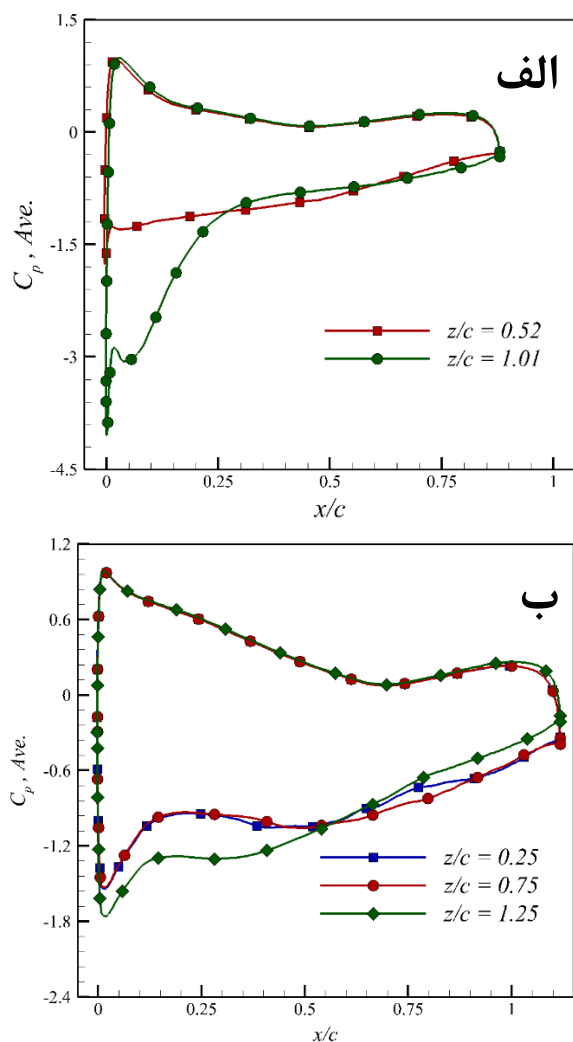
جهت اطمینان از صحت نتایج و عدم وابستگی آن به تعداد سلول‌های شبکه مقدار ضریب برآ در زاویه حمله ۱۶ درجه برای ۴ شبکه با تعداد سلول‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۱ تغییرات ضریب برآ بر حسب تعداد سلول‌های شبکه نشان داده شده است. با توجه به روند منحنی مشخص است که شبکه $13/5$ میلیون مناسب‌ترین شبکه از نظر دقت و حجم محاسبات می‌باشد.

جدول ۱- استقلال از شبکه بر مبنای تغییرات ضریب برآ

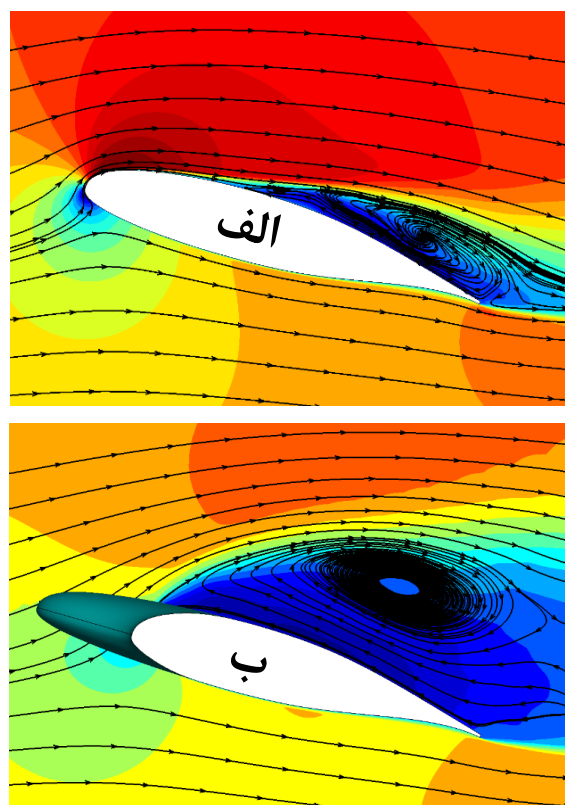
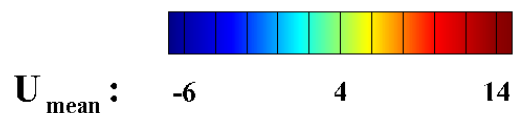
ضریب برآ	تعداد سلول‌ها (10^6)
۱/۲۸۵	۱۱/۷
۱/۲۹۴	۱۲/۹
۱/۲۹۷	۱۳/۵
۱/۲۹۸	۱۵/۱

جهت بررسی دقت نتایج مدل‌سازی عددی، لازم است که بخشی از نتایج حل عددی حاضر با نتایج تجربی منتشر شده توسط کای [۱۶] مقایسه گردد. در جدول ۱ مقایسه‌ای میان تغییرات نرخ ضریب برآ به پسا تحت عنوان صحت‌سنجی دستاوردهای بخش بالواره لبه سینوسی در زاویه ۱۶ درجه و رینولدز $10^5 \times 1/4$ ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی جریان در زوایای حمله بالاتر، زاویه ۱۶ درجه به‌عنوان معیار اعتبارسنجی قرار داده شده است. مطابق با داده‌های موجود در جدول ۱، خطای موجود بسیار ناچیز و حدود 0.44% درصد می‌باشد.

نتیجتاً، تغییرات ضریب فشار متوسط از نقطه سکون فشار تا لبه فرار، نشان از انحراف جریان از قله‌ها به سمت دره‌ها دارد که می‌تواند تغییر فشار قابل توجهی در راستای جریان اعمال کند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که قله‌ها علاوه بر ایجاد افت فشار ناگهانی در پشت دره‌ها، نقش مهمی در کاهش تدریجی فشار متوسط در پشت قله‌ها نیز ایفا می‌کند. همچنین از دیگر نکات قابل توجه در این شکل، وجود تفاوتی میان میزان فشار سکون برای 0.75 و 0.25 با $Z/C_{ref} = 1/25$ است که متأثر از غلبه جریان‌های عرضی بر جریان‌های طولی موجود بر روی برخی از قله‌ها می‌باشد. چراکه، قله $Z/C_{ref} = 1/25$ ، محصور شده میان دو دره با حباب می‌باشد. حاکمیت این شرایط به افت بیشتر فشار سکون در دو قله $Z/C_{ref} = 0.75$ و 0.25 ختم شده است. مطابق شکل ۵، جریان‌های القایی، توزیع الگوهای جریان بر روی این دست از بالواره‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این جریان‌ها که از دامنه برآمدگی‌ها نشأت می‌گیرند، سرعت‌های جانبی را به بخش دره‌ها القا می‌کنند. نتیجتاً جریان‌های برگشتی شروع به شکل‌گیری می‌کنند و به نوعی حضور این دسته از جریان‌ها در برخی نواحی به میزان اندکی بوده و حباب جدا شده را به وجود می‌آورند.

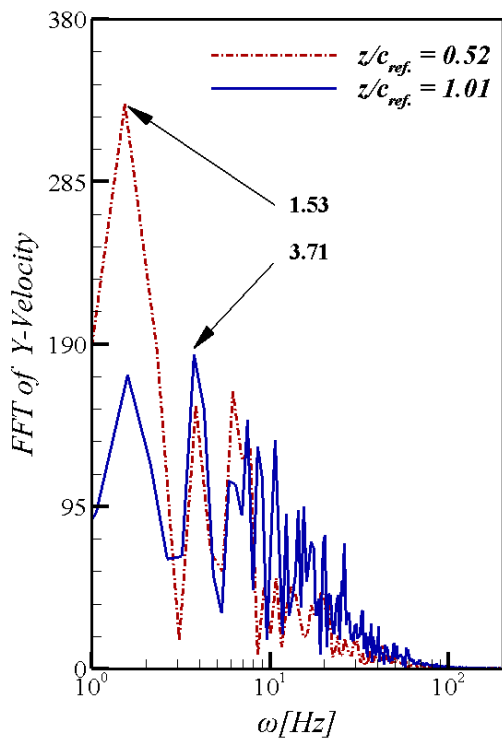


شکل ۵- مقایسه تغییرات منحنی ضریب فشار متوسط بال نامحدود مدل لبه سینوسی برای الف) دو دره با $1/25$ و 0.75 و 0.25 Z/C_{ref} و ب) سه قله با مشخصه $1/25$ و 0.75 و 0.25 Z/C_{ref}



شکل ۴- میدان سرعت متوسط برای هر دو بالواره با لبه الف) ساده و ب) سینوسی، برش خورده در $Z/C = 0.52$ در زاویه 16° درجه

به منظور تحلیل آرایش جریان در ابتدا مقایسه‌ای کلی میان تغییرات رفتار منحنی ضریب فشار متوسط برای هر دو بالواره با لبه حمله ساده و سینوسی، صورت گرفته است. این قیاس برای پنج بخش قابل تأمل و حیاتی بالواره، به تفکیک ارائه شده است. این بخش‌ها برای بالواره لبه سینوسی، سه قله و دو دره مجزا را شامل می‌شوند. در هر یک از این منحنی‌ها وجود یک ناحیه‌ی یکنواخت در توزیع فشار متوسط مشهود است. وجود این ناحیه می‌تواند متأثر از جدایش لایه مرزی در سمت مکش بالواره باشد که همراه با یک لایه برشی جدا شده، رخ داده است. توزیع ضریب فشار متوسط به ازای Z/C_{ref} های مختلف، الگوهای گوناگونی را به خود می‌گیرد چراکه شرایط متفاوتی از جریان در آن نواحی حکم فرماست. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، جدایش جریان در $Z/C_{ref} = 0.52$ ، از همان حوالی لبه حمله شروع شده و تقریباً تمامی طول وتر را احاطه می‌کند. این در حالی است که در $Z/C_{ref} = 1/0.1$ ، جدایش جریان کمی با تأخیر نسبت به حالت قبل رخ می‌دهد و یک ناحیه با سطح فشار تقریباً ثابت در محدوده $0.09 < X/C_{ref} < 0.3$ ایجاد می‌کند. جریان جدا شده بعد از طی مسافتی کوتاه (به اندازه طول حباب)، به سطح بالواره بازمی‌گردد. در این ناحیه که با بازیابی فشار و برگشت جریان به سطح بالواره همراه است روند کاهشی فشار ادامه یافته و سپس گذار آرام-به-آشفته در پایین دست جریان اتفاق می‌افتد. ورود کردن ممنتم از لایه‌های بالایی جریان به ناحیه جدا شده، موجبات بازجذب مجدد جریان به سطح را فراهم می‌کند. هر چه طول حباب افزایش یابد، فشار سکون نیز افزایشی می‌شود. این رویداد دلیلی بر افزایش ضخامت حباب و تأثیر آن بر ضخیم‌تر دیده شدن لبه حمله بالواره است.

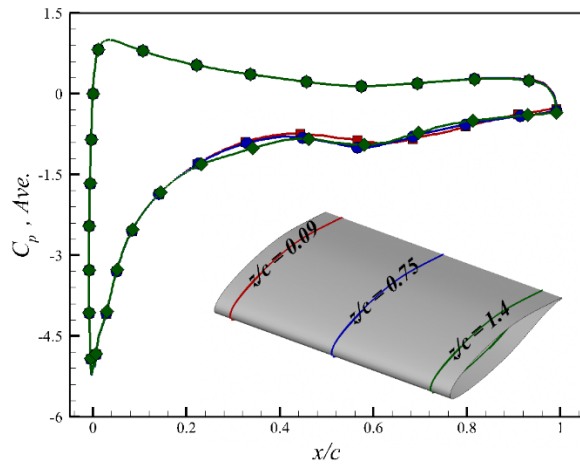


شکل ۷- تحلیل بسامد سرعت لحظه‌ای در جریان حول نقطه $x/c_{ref} = 1/0.3$ در دو بخش با مشخصه $z/c_{ref} = 0.52$ و $1/0.1$ برای بال نامحدود لبه سینوسی

به‌علاوه به‌غایت ارزیابی ماهیت نوسانات نیروی در شبیه‌سازی‌ها، تحلیل توان طیفی چگالی (PSD) یک سیگنال زمانی به‌عنوان بخشی از یک انتقال فوریه ارائه شده است. شکل ۸، نوسانات این تحلیل را برای ضریب نیروی برآ مربوط به بالواره لبه ساده و لبه سینوسی، نشان می‌دهد. در هر یک از این شکل‌ها یک قله‌ی اولیه وجود دارد که مربوط به ریزش گردابه‌ها است. پیش‌بینی می‌شود که قله دوم مربوط به افت فشار تکراری در هر یک از ریزش گردابه‌ها است. این در حالی است که قله اصلی و اساسی مربوط به گردش توسط سرعت القایی میان دو گردابه متوالی با چرخش غیر هم‌راستا، می‌باشد.

تضعیف نوسانات بسامد ریزش در ضریب برآ مشهود است. در بالواره لبه سینوسی، به‌جای یک ریزش محلی بسامد؛ نوسانات ضعیف‌تری در یک طیف گسترده‌تر از بسامدها رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های لبه سینوسی، بسامد ریزش گردابه‌ها کمی بالاتر باشد. با این حال، ریزش گردابه‌ها تقریباً تأثیر ناچیزی بر نوسانات نیروی‌ها آیرودینامیکی در نمونه‌های لبه سینوسی دارند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

برخلاف بالواره لبه سینوسی، توزیع فشار متوسط بر روی بالواره لبه ساده افت خیزهای بسیار ناچیزی دارد. ناحیه کم‌فشار نوع اول همچون استنباط گذشته به حباب جدایش ختم می‌شود. این رویداد در $x/c_{ref} = 0.4$ شروع و در $x/c_{ref} = 0.5$ خاتمه می‌یابد. در مقابل، نواحی کم‌فشار دیگری در سمت‌مکش بالواره لبه ساده شکل می‌گیرد که عدم جدایش جریان در آن نواحی مشهود است.



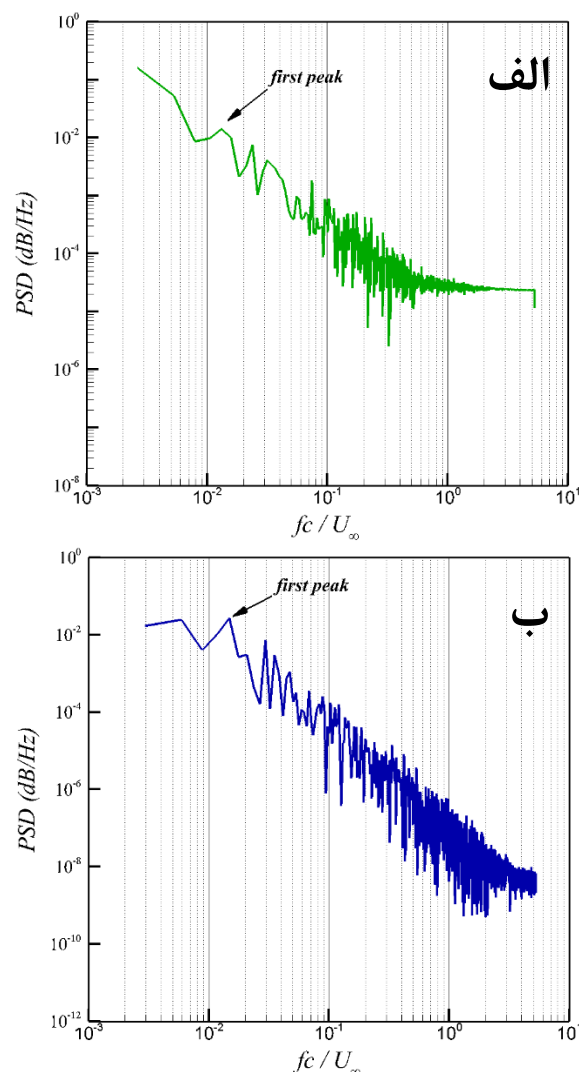
شکل ۶- مقایسه تغییرات منحنی ضریب فشار متوسط بر روی بال نامحدود مدل لبه ساده

به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار و ساختار گردابه‌ها بر روی بال نامحدود لبه سینوسی، از تبدیل فوریه مؤلفه عمودی سرعت لحظه‌ای، در دو بخش $z/c_{ref} = 0.52$ و $1/0.1$ در نقطه $x/c_{ref} = 1/0.3$ استفاده شده است. این نقاط مشخصاً حائز اهمیت و کاربردی هستند چراکه هر دو نمایانگر جریان عبوری از روی دره‌ها می‌باشند. جریان در نقطه $x/c_{ref} = 1/0.3$ نماینده‌ای مناسب برای برهمکنش و توسعه گردابه‌های شکل‌گرفته است. شایان‌ذکر است میزان بسامد تشدید مربوط به بالواره لبه سینوسی در $x/c_{ref} = (1/0.3)$ در $z/c_{ref} = (0.52$ و $1/0.1)$ در هر دو حالت به ترتیب برابر $1/53$ و $3/71$ هرتز می‌باشد. این اختلاف منتج شده از یک برهمکنش محلی میان گردابه‌ها در نواحی دره‌ها است. به عبارتی توسعه و برهمکنش گردابه‌های غیر هم‌راستا با یکدیگر منجر به قوی‌تر شدن هسته آن دسته از گردابه‌ها در $z/c_{ref} = 1/0.1$ شده است. به نوعی نشان از کوچک‌تر بودن گردابه‌ها و درعین حال بیشتر بودن بسامد آن‌ها در راستای جریان منتشر شده، دارد. به‌علاوه، این اختلاف در تحلیل بسامد تشدید مربوطه در $z/c_{ref} = 0.52$ نسبت به $z/c_{ref} = 1/0.1$ نشأت گرفته از عواملی همچون عدم پایداری جریان، عدم توسعه گردابه‌ها با هسته‌های به نسبت قوی و همچنین شروع جدایش می‌باشد.

در مسیر کاستن و محدود کردن چرخش جریان بر روی این دست از بالواره‌ها منتهی شود.

۵- مراجع

- [1] F. E. Fish and J. M. Battle, "Hydrodynamic design of the humpback whale flipper," *Journal of Morphology*, vol. 225, no. 1, pp. 51-60, 1995.
- [2] F. E. Fish, "Performance constraints on the maneuverability of flexible and rigid biological systems," in *International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 1999, pp. 394-406: University of New Hampshire-Marine Systems.
- [3] F. E. Fish, P. W. Weber, M. M. Murray, and L. E. Howle, "The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology," ed: Oxford University Press, 2011.
- [4] F. Fish and G. V. Lauder, "Passive and active flow control by swimming fishes and mammals," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, pp. 193-224, 2006.
- [5] F. E. Fish, L. E. Howle, and M. M. Murray, "Hydrodynamic flow control in marine mammals," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 48, no. 6, pp. 788-800, 2008.
- [6] S. Aftab, N. Razak, A. M. Rafie, and K. Ahmad, "Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 84, pp. 48-69, 2016.
- [7] M. D. Bolzon, R. M. Kelso, and M. Arjomandi, "Tubercles and their applications," *Journal of aerospace engineering*, vol. 29, no. 1, p. 04015013, 2016.
- [8] D. Serson, J. R. Meneghini, and S. J. Sherwin, "Direct numerical simulations of the flow around wings with spanwise waviness," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 826, pp. 714-731, 2017.
- [9] A. Esmaili, H. Delgado, and J. Sousa, "Numerical simulations of low-Reynolds-number flow past finite wings with leading-edge protuberances," *Journal of Aircraft*, vol. 55, no. 1, pp. 226-238, 2018.
- [10] J. Sousa and L. Silva, "Transition prediction in infinite swept wings using Navier-Stokes computations and linear stability theory," *Computers & structures*, vol. 82, no. 17-19, pp. 1551-1560, 2004.
- [11] P. R. Spalart and C. Streett, "Young-person's guide to detached-eddy simulation grids," 2001.
- [12] F. R. Menter, R. B. Langtry, S. Likki, Y. Suzen, P. Huang, and S. Völker, "A correlation-based transition model using local variables—part I: model formulation," 2006.
- [13] R. B. Langtry, F. Menter, S. Likki, Y. Suzen, P. Huang, and S. Völker, "A correlation-based transition model using local variables—Part II: Test cases and industrial applications," 2006.
- [14] M. Zhao, M. Zhang, and J. Xu, "Flow physics behind the effects of leading-edge protuberances on the airfoil aerodynamic performance [J]," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1037, no. 2, pp. 22-35.
- [15] J. Pereira and J. Sousa, "Finite volume calculations of self-sustained oscillations in a grooved channel," *Journal of Computational Physics*, vol. 106, no. 1, pp. 19-29, 1993.
- [16] C. Cai, Z. Zuo, S. Liu, and Y. Wu, "Numerical investigations of hydrodynamic performance of



شکل ۸- تحلیل توان طیفی چگالی برای نیروی برآ لحظه‌ای برای هر دو بالواره الف) بال نامحدود با لبه حمله ساده و ب) لبه حمله سینوسی

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد برخلاف بال نامحدود لبه ساده که رفتاری به نسبت متعادل دارد، الگو و رفتار جریان بر روی بال‌های نامحدود لبه سینوسی بشدت متأثر از غالب و مغلوب شدن جریان‌های عرضی بر جریان‌های طولی شکل می‌گیرد. ذاتاً به علت وجود برآمدگی‌ها ساختار جریان بر روی بالواره‌های (بال‌های) لبه سینوسی نامتقارن هستند این در حالی است که الگوی جریان بر روی بال و یا بالواره معمولی متقارن و یا شبه-متقارن است. همچنین جریان عبوری بر روی بالواره لبه سینوسی ناشی از انحراف جریان‌های است که از قله‌ها (به سمت دره‌ها) سرچشمه می‌گیرد و می‌تواند افت فشار محسوس در نواحی پایین‌دست دره‌ها به وجود بیاورد که عامل پدیدار شدن حباب‌های جدایش و جریان‌های برگشتی است. نتیجتاً، چنین رویدادی می‌تواند ریزش گردابه‌ها و فرکانس‌های مربوطه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این رویداد به گونه‌ای است که اندازه گردابه‌ها در زوایای ماقبل از واماندگی بر روی بالواره لبه سینوسی نسبت به بالواره لبه ساده بزرگ‌تر بوده و به علت برهمکنش‌های صورت گرفته میان گردابه‌های غیر هم‌راستا با گردابه‌های لبه حمله، هسته‌های مربوط به آن‌ها را قوی‌تر می‌کند که تحت عنوان تحلیل‌های فرکانسی و توان چگالی ارائه شد. به نوعی شناخت فیزیک محلی جریان می‌تواند به برداشتن گامی مؤثر

- hydrofoils with leading-edge protuberances," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 7, p. 1687814015592088, 2015.
- [17] M. Zhang, G. Wang, and J. Xu, "Experimental study of flow separation control on a low-Re airfoil using leading-edge protuberance method," *Experiments in fluids*, vol. 55, no. 4, p. 1710, 2014.
- [18] Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, and Y. Nishida, "Visualization of the flow field and aerodynamic force on a Horizontal Axis Wind Turbine in turbulent inflows," *Energy*, vol. 111, pp. 57-67, 2016.
- [19] A. Dovgal, V. Kozlov, and A. Michalke, "Laminar boundary layer separation: instability and associated phenomena," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 30, no. 1, pp. 61-94, 1994.
- [20] J. M. Lin and L. L. Pauley, "Low-Reynolds-number separation on an airfoil," *AIAA journal*, vol. 34, no. 8, pp. 1570-1577, 1996.