



دانشگاه مازندران
دانشکده مهندسی مکانیک

کنترل آیروداستیک غیرخطی بال هواپیما با نسبت منظری بالا در جریان مادون صوت

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک-گرایش طراحی کاربردی

دانشجو:

کیوان اسکندری چراتی

استاد راهنما:

دکتر محمد هادی پاشایی

استاد مشاور:

دکتر مرتضی دردل

تابستان ۱۳۸۹

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش فرید نعمت. هر نفسی که فرومی رود مدحیات است و چون برمی آید مفرح ذات. پس

در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکر واجب. از دست و زبان که برآید که از عمده شکرش به درآید. باران رحمت بی حسابش همه را رسیده و خوان

نعمت بی درغش همه جا کشیده.

Laudation to the GOD of majesty and glory obedience to him is cause of approach and gratitude in increase of benefits. Every inhalation of the breath prolongs life and expiration of it gladdens our nature. Wherefore every breath confers two benefits and for every benefit, gratitude is due. Whose hand and tongue is capable to fulfill the obligation of thanks to him. The shower of his boundless mercy has penetrated to every spot and banquet of his unstinted liberality is spreaded out everywhere.

برخود لازم می دانم از زحمات دکتر محمد هادی پاشایی و دکتر مرتضی دردل که زحمات و مساعدت ایشان راهگشای انجام این پایان نامه بوده است تشکر و قدردانی نمایم.

از دوستان خوبم که در مدت تحصیل در دانشگاه سختی و مشکلات گذراندن واحدهای درسی و انجام پایان نامه را به لحظات خوش و خاطره انگیز تبدیل نمودند تشکر می کنم. مجید کنی، نواب کشیری، امیر مهدی عزیزخانی، امین کلاه دوز، نیما نیک صفت، امیر حسین کیائیان، شهرام صدقی، امین داوری، محمد موسوی ثانی، نیما غفاری، قاسم عباس نژاد، مرتضی قنبرپور، حامد ابراهیم نژاد، فواد نوری، مجید جانی پور از جمله دوستانی بودند که ذکر نام هر کدامشان، تداعی بخش دوران خوش دانشگاه می باشد، و از خدای بزرگ سلامتی و موفقیت روز افزون برای تمامشان خواهانم. همچنین از دوست عزیزم آقای حسن نعمتی که اگر کمک ها و دلگرمی هایشان نبود انجام این پایان نامه میسر نمی شد، تشکر و قدردانی می نمایم.

کیوان اسکندری چراتی

تابستان ۱۳۸۹

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم، خواهر و برادر عزیزم

که همواره به‌مراحم بوده‌اند

و دکتر دول

که چراغدار را هم گشتند...

چکیده

پره‌های هلی‌کوپتر و برخی از مدل‌های هواپیما دارای بال‌های بلندی هستند که در آنها انعطاف‌پذیری و تغییر شکل‌های غیرخطی نقش بسزایی خواهند داشت. در این نوع از سازه‌ها که دارای نسبت طول به عرض (نسبت منظری) بالایی هستند، بدلیل انعطاف‌پذیری زیاد سازه، خیز و تغییر شکل‌های بزرگ ایجاد می‌شوند. خیز بزرگ این ساختارها را می‌توان توسط مدلسازی غیرخطی توصیف نمود. حضور عوامل غیرخطی سازه‌ای موجب ایجاد رفتارهای بسیار پیچیده‌ای شده که در ترکیب با نیروهای آیرودینامیکی منجر به پدیده‌های آیروالاستیک نامناسبی می‌گردند. هدف این پژوهش شناخت این رفتارهای غیرخطی و سپس کنترل رفتار غیرخطی یک مدل بال با نسبت منظری بالا با قابلیت خمش دوطرفه و پیچشی، توسط تحریک‌کننده پیزوالکتریک می‌باشد.

مدل بال مورد بررسی یک بال یکسر گیردار با ارتعاشات خمشی دوطرفه و پیچشی و با قابلیت خیز بزرگ می‌باشد. ارتعاشات خمشی دوطرفه در راستای برون‌صفحه‌ای و ارتعاشات پیچشی در راستای دهانه است. این مدل بال برای تیرهای ایزوتروپیک بلند، مستقیم و نازک اعتبار دارند. در این بررسی سطح مقطع بال را بدون تاب و پیچش اولیه و به صورت ایرفویل در نظر گرفته که در آن محورهای الاستیک و مرکز ثقل بر هم منطبق نمی‌باشند.

مدلسازی آیرودینامیکی بر اساس مدل آیرودینامیک شبه‌پایا می‌باشد که برای جریان‌های آیرودینامیک در سرعت پایین و بدون دخالت دادن اثرات دنباله و تراکم‌ناپذیری اعتبار دارد. این مدل در ترکیب با معادلات غیرخطی سازه‌ای منجر به پدیده‌های فلاتر و نوسانات سیکل حدی می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که با اعمال نیروهای کنترلی توسط تحریک‌کننده‌های پیزوالکتریک، از وقوع

ارتعاشات غیرخطی پیچیده جلوگیری شده و محدوده عملکردی ایمن ساختار گسترش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مدل بال غیرخطی، خمش دوطرفه و پیچش، تحریک‌کننده پیزوالکتریک، آیرودینامیک شبه‌پایا، فلاتر، سیکل حدی.

فهرست مطالب

	فصل اول	مقدمه و مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته	
۱			
۲	۱-۱	مقدمه	
۲	۱-۱-۱	بیان مسئله	
۴	۲-۱	مرور پژوهش‌های انجام گرفته	
۴	۱-۲-۱	پدیده‌های غیرخطی در ایروالاستیسیته	
۵	۲-۲-۱	کنترل ایروالاستیک	
۶	۳-۲-۱	مرور تاریخی کنترل ایروالاستیک	
۱۰	۳-۱	اهداف و مسایل مورد بررسی پایان‌نامه	
۱۰	۱-۳-۱	فرضیات حاکم بر مساله	
۱۱	۲-۳-۱	اهداف پایان‌نامه	
	فصل دوم	معادلات ایروالاستیک	
۱۲			
۱۳	۱-۲	مقدمه	
۱۴	۲-۲	معادلات حرکت مدل بال	
۱۵	۳-۲	مدل آیرودینامیک ایرفویل	
۱۷	۱-۳-۲	مدل جریان آیرودینامیکی شبه‌پایا	
۲۱	۴-۲	گسسته‌سازی معادلات با استفاده از روش مد مفروض	
۳۲	۱-۴-۲	توابع مفروض مورد نیاز برای ارضاء شرایط مرزی هندسی مدل بال	
۳۲	۲-۴-۲	توابع مفروض مورد نیاز برای توصیف جابجایی‌های مدل بال	
۳۴	۵-۲	خلاصه بحث و نتیجه‌گیری فصل دوم	
	فصل سوم	مدل‌سازی سنسورها و محرک‌کننده‌های پیزوالکتریک و معادلات آیروسروالاستیک	
۳۵			
۳۶	۱-۳	مقدمه	
۳۷	۲-۳	مدل کلی الکتروالاستیسیته	
۳۹	۳-۳	مدل‌سازی سنسورها و تحریک‌کننده‌های پیزوالکتریک	
۳۹	۱-۳-۳	انرژی جنبشی سازه‌ای	
۴۰	۲-۳-۳	انرژی الاستیک سازه‌ای	
۴۱	۴-۳	روابط انرژی المان پیزوالکتریک	
۴۷	۵-۳	معادلات ارتعاشی المان پیزوالکتریک	
۵۰	۱-۵-۳	ماتریس‌های جرمی و سفتی و عبارات غیرخطی و کوپلینگ الکترومکانیکال	
۵۵	۶-۳	بی‌بعدسازی معادلات حرکت المان‌های پیزوالکتریک	

۶۳	محاسبه عبارت سنسوری پیزوالکتریک	۷-۳
۶۴	معادلات آیروسروالاستیک	۸-۳
۶۶	ترکیب معادلات ارتعاشی	۱-۸-۳
۷۰	خلاصه بحث و نتیجه گیری فصل سوم	۹-۳

۷۱	تئوری های کنترلی مختلف	فصل چهارم
۷۲	مقدمه	۱-۴
۷۲	کنترل بهینه مرتبه دوم	۲-۴
۷۷	اعمال روابط کنترلی	۳-۴
۷۸	خلاصه بحث و نتیجه گیری فصل چهارم	۴-۴

۸۰	نتایج	فصل پنجم
۸۱	مقدمه	۱-۵
۸۱	بررسی صحت معادلات سازه ای با محاسبه فرکانس های طبیعی	۲-۵
۸۲	نتایج بدست آمده از معادلات آیروالاستیک مدل بال با آیرودینامیک شبه پایا	۳-۵
۸۴	نتایج بدست آمده برای مقادیر ویژه از معادلات آیروالاستیک خطی	۱-۳-۵
۸۷	تاثیرات تغییرات تعداد مد شکل ها بر روی سرعت فلاتر و دامنه سیکل حدی	۲-۳-۵
۹۰	تغییرات دامنه نوسانات مدل آیروالاستیک بال در زاویه حمله صفر	۳-۳-۵
۱۰۵	تاثیر زاویه حمله بر روی دامنه نوسانات مدل آیروالاستیک غیرخطی بال	۴-۳-۵
۱۱۵	نتایج بدست آمده از روش کنترل بهینه مرتبه دوم	۴-۵
۱۱۵	ارایه نتایج بدست آمده از روش کنترل بهینه مرتبه دوم	۱-۴-۵
۱۲۵	خلاصه بحث و نتیجه گیری فصل پنجم	۵-۵

۱۲۷	نتیجه گیری و پیشنهادات	فصل ششم
۱۲۸	نتیجه گیری	۱-۶
۱۲۹	پیشنهادات	۲-۶

۱۳۱	منابع و مراجع
-----	----------------------

فهرست شکل‌ها

فصل اول

- شکل ۱-۱ زمينه‌های علمی مختلف ايروالاستيسيته ۲
شکل ۲-۱ يك سيستم كنترل فعال ۶

فصل دوم

- شکل ۱-۲ سازه الاستيك بال ۱۴
شکل ۲-۲ مقطع بال ۱۷
شکل ۳-۲ بال مستطیلی ۱۸
شکل ۴-۲ طرح ساده‌ای از بال مستطیلی يكسر گیردار ۳۳
شکل ۵-۲ شكل مدهای‌های طبیعی ارتعاشات خمشی محوری میله يك سر ثابت يك سر آزاد ۳۴
شکل ۶-۲ شكل مدهای‌های طبیعی ارتعاشات پیچشی محوری میله يك سر ثابت يك سر آزاد ۳۴

فصل سوم

- شکل ۱-۳ سازه الاستيك تحت اثر المان پيزوالكتریک ۳۷
شکل ۲-۳ المان پيزوالكتریک ۳۸

فصل چهارم

- شکل ۱-۴ سيستم تنظيم‌کننده بهينه ۷۳

فصل پنجم

- شکل ۱-۵ تغييرات قسمت حقیقی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۱. ۸۴
شکل ۲-۵ تغييرات قسمت موهومی و حقیقی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۱. ۸۴
شکل ۳-۵ تغييرات قسمت موهومی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۱. ۸۴
شکل ۴-۵ تغييرات قسمت حقیقی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۲. ۸۶
شکل ۵-۵ تغييرات قسمت موهومی و حقیقی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۲. ۸۶
شکل ۶-۵ تغييرات قسمت موهومی مقادير ویژه مدل آيروالاستيك خطی - وضعیت ۲. ۸۶
شکل ۷-۵ تغييرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی بر حسب تغييرات شکل مد در سرعت فلاتر - وضعیت ۱. ۸۹
شکل ۸-۵ تغييرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت پایین‌تر از ۹۱

	سرعت فلاتر - وضعیت ۱.	
۹۱	تغییرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت فلاتر - وضعیت ۱.	شکل ۵-۹
۹۱	تغییرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت بالاتر از سرعت فلاتر - وضعیت ۱.	شکل ۵-۱۰
۹۲	تغییرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت پایین تر از سرعت فلاتر - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۱
۹۲	تغییرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت فلاتر - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۲
۹۲	تغییرات جابجایی (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت بالاتر از سرعت فلاتر - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۳
۹۳	جابجایی خمش در راستای عمودی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۱۴
۹۳	جابجایی پیچشی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۱۵
۹۴	جابجایی خمش در راستای عرضی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۱۶
۹۵	جابجایی خمش در راستای عمودی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۷
۹۶	جابجایی پیچشی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۸
۹۶	جابجایی خمش در راستای عرضی در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۱۹
۹۷	تغییرات دامنه نوسانات خمش عمودی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۰
۹۸	تغییرات دامنه نوسانات پیچشی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۱
۹۸	تغییرات دامنه نوسانات خمش عرضی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۲
۹۹	تغییرات دامنه استاتیک نوسانات خمش عرضی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۳
۱۰۰	تغییرات دامنه نوسانات خمش عمودی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۲۴
۱۰۰	تغییرات دامنه نوسانات پیچشی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۲۵
۱۰۰	تغییرات دامنه نوسانات خمش عرضی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۲۶
۱۰۰	تغییرات دامنه استاتیک نوسانات خمش عرضی برای طول بال در سرعت‌های مختلف - وضعیت ۲.	شکل ۵-۲۷
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.58m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.01 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۸
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.54m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.01 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۲۹
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.50m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.01 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۳۰
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.54m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.06 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۳۱
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.54m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.09 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۳۲
۱۰۱	تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.54m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 0^\circ$ و $U_\infty = 1.09 \times U_F$ - وضعیت ۱.	شکل ۵-۳۳

- $U_{\infty} = 1.15 \times U_F$ - وضعیت ۱.
- شکل ۳۴-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال در فاصله $0.54m$ از تکیه‌گاه ثابت بر حسب نسبت سرعت جریان آزاد هوا به سرعت فلاتر و در $\theta_0 = 0^\circ$ - وضعیت ۱. ۱۰۲
- شکل ۳۵-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت پایین‌تر از سرعت فلاتر - وضعیت ۱. ۱۰۳
- شکل ۳۶-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت فلاتر - وضعیت ۱. ۱۰۳
- شکل ۳۷-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت بالاتر از سرعت فلاتر - وضعیت ۱. ۱۰۳
- شکل ۳۸-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت پایین‌تر از سرعت فلاتر - وضعیت ۲. ۱۰۴
- شکل ۳۹-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت فلاتر - وضعیت ۲. ۱۰۴
- شکل ۴۰-۵ دیاگرام فاز حرکت (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی در سرعت بالاتر از سرعت فلاتر - وضعیت ۲. ۱۰۴
- شکل ۴۱-۵ جابجایی خمش عمودی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۱. ۱۰۵
- شکل ۴۲-۵ جابجایی پیچشی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۱. ۱۰۵
- شکل ۴۳-۵ جابجایی خمش عرضی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۱. ۱۰۶
- شکل ۴۴-۵ جابجایی خمش عمودی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۲. ۱۰۷
- شکل ۴۵-۵ جابجایی پیچشی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۲. ۱۰۷
- شکل ۴۶-۵ جابجایی خمش عرضی در سرعت فلاتر بر حسب زاویه حمله - وضعیت ۲. ۱۰۷
- شکل ۴۷-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال برای $\theta_0 = 1^\circ$ و $U_F = 102.271m/s$ - وضعیت ۱. ۱۰۸
- شکل ۴۸-۵ تغییرات جابجایی خمش عمودی بر حسب خمش عرضی برای مدل بال غیرخطی در $\theta_0 = 1^\circ$ و $U_F = 102.271m/s$ - وضعیت ۱. ۱۰۸
- شکل ۴۹-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال برای قبل از نقطه گره جابجایی عرضی و در فاصله $0.5m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 1^\circ$ و $U_{\infty} = 1.05 \times U_F$ - وضعیت ۱. ۱۰۹
- شکل ۵۰-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال بعد از نقطه گره جابجایی عرضی و در فاصله $0.6m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 1^\circ$ و $U_{\infty} = 1.05 \times U_F$ - وضعیت ۱. ۱۰۹
- شکل ۵۱-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال برای انتهای بال در فاصله $0.6299m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 5^\circ$ و $U_F = 102.271m/s$ - وضعیت ۱. ۱۰۹
- شکل ۵۲-۵ تغییرات نوسانی در راستای عرض بال برای انتهای بال، در فاصله $0.6299m$ از تکیه‌گاه ثابت برای $\theta_0 = 10^\circ$ و $U_F = 102.271m/s$ - وضعیت ۱. ۱۰۹
- شکل ۵۳-۵ تغییرات نوسانی مدل بال برای زاویه حمله $\theta_0 = 1^\circ$ و سرعت $U_F = 102.271m/s$ - وضعیت ۱. ۱۱۰
- شکل ۵۴-۵ تغییرات نوسانی مدل بال برای زاویه حمله $\theta_0 = 0.5^\circ$ و سرعت $U_F = 100.924m/s$ - وضعیت ۲. ۱۱۱
- شکل ۵۵-۵ تغییرات نوسانی مدل بال برای زاویه حمله $\theta_0 = 0^\circ$ و سرعت $U_{\infty} = 1.1 \times U_F$ - وضعیت ۱. ۱۱۱

۱.

- شکل ۵-۵۶ پاسخ دینامیکی مدل بال: دامنه نوسانات (۱) خمش عمودی (۲) پیچشی (۳) خمش عرضی و (۴) فرکانس سیکل حدی سیستم بر حسب زوایای حمله و نسبت به سرعت- وضعیت ۱. ۱۱۲
- شکل ۵-۵۷ تاثیر متقابل تغییرات پارامترهای x_α و a_{ih} بر روی سرعت فلاتر محدوده سیکل حدی - وضعیت ۱. ۱۱۳
- شکل ۵-۵۸ تاثیر متقابل تغییرات پارامترهای a_{ih} و μ بر روی سرعت فلاتر در محدوده سیکل حدی - وضعیت ۱. ۱۱۴
- شکل ۵-۵۹ تاثیر متقابل تغییرات پارامترهای x_α و μ بر روی سرعت در محدوده سیکل حدی - وضعیت ۱. ۱۱۴
- شکل ۵-۶۰ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیرولاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۱. ۱۱۶
- شکل ۵-۶۱ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۱. ۱۱۶
- شکل ۵-۶۲ تغییرات قسمت موهومی و حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب یکدیگر - وضعیت ۱. ۱۱۷
- شکل ۵-۶۳ تغییرات قسمت موهومی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۱. ۱۱۷
- شکل ۵-۶۴ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه بسته بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۱. ۱۱۸
- شکل ۵-۶۵ تغییرات قسمت موهومی و حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه بسته بر حسب یکدیگر - وضعیت ۱. ۱۱۸
- شکل ۵-۶۶ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیرولاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۲. ۱۱۹
- شکل ۵-۶۷ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۲. ۱۱۹
- شکل ۵-۶۸ تغییرات قسمت موهومی و حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب یکدیگر - وضعیت ۲. ۱۱۹
- شکل ۵-۶۹ تغییرات قسمت موهومی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه باز بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۲. ۱۱۹
- شکل ۵-۷۰ تغییرات قسمت حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه بسته بر حسب تغییرات سرعت - وضعیت ۲. ۱۲۰
- شکل ۵-۷۱ تغییرات قسمت موهومی و حقیقی مقادیر ویژه مدل آیروسروالاستیک خطی حلقه بسته بر حسب یکدیگر - وضعیت ۲. ۱۲۰
- شکل ۵-۷۲ تغییرات جابجایی خمش عمودی برای مدل آیرولاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته (-) در سرعت $U_\infty = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱. ۱۲۱
- شکل ۵-۷۳ دیاگرام فاز حرکت خمش عمودی برای مدل آیرولاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته (-) در سرعت $U_\infty = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱. ۱۲۱
- شکل ۵-۷۴ تغییرات جابجایی پیچشی برای مدل آیرولاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته (-) ۱۲۱

- (در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱.)
- شکل ۷۵-۵ ۱۲۱ دیاگرام فاز حرکت پیچشی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱.
- شکل ۷۶-۵ ۱۲۲ تغییرات جابجایی خمش عرضی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱.
- شکل ۷۷-۵ ۱۲۲ دیاگرام فاز حرکت خمش عرضی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱.
- شکل ۷۸-۵ ۱۲۲ تغییرات جابجایی خمش عمودی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۷۹-۵ ۱۲۲ دیاگرام فاز حرکت خمش عمودی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۰-۵ ۱۲۳ تغییرات جابجایی پیچشی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
(در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۱-۵ ۱۲۳ دیاگرام فاز حرکت پیچشی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۲-۵ ۱۲۳ تغییرات جابجایی خمش عرضی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۳-۵ ۱۲۳ دیاگرام فاز حرکت خمش عرضی برای مدل آیروالاستیک غیرخطی حلقه باز (□) و حلقه بسته ()
- در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۴-۵ ۱۲۴ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی خمش عمودی در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ -
وضعیت ۱.
- شکل ۸۵-۵ ۱۲۴ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی پیچشی در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ - وضعیت ۱.
- شکل ۸۶-۵ ۱۲۴ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی خمش عرضی در سرعت $U_{\infty} = 112.498 m/s$ -
وضعیت ۱.
- شکل ۸۷-۵ ۱۲۴ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی خمش عمودی در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ -
وضعیت ۲.
- شکل ۸۸-۵ ۱۲۵ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی پیچشی در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ - وضعیت ۲.
- شکل ۸۹-۵ ۱۲۵ ورودی کنترلی مربوط به جابجایی خمش عرضی در سرعت $U_{\infty} = 105.97 m/s$ -
وضعیت ۲.

فهرست جداول

فصل پنجم

۸۲	پارامتر فرکانس طبیعی عرضی بی‌بعد برای مدل بال یکسرگیردار مستطیلی	جدول ۱-۵
۸۳	مشخصات مدل بال مورد استفاده برای مباحث آیروداستیک	جدول ۲-۵
۸۸	بررسی همگرایی پاسخ برای سرعت فلاتر و واگرایی در مد شکل‌های مختلف	جدول ۳-۵

فهرست علائم

فاصله بی بعد بین محور مرکزی بال و محور الاستیک نسبت به عرض	a_h
طول نیم قوس بال	b
دمپینگ خمشی عرضی و عمودی سازه‌ای بال	C_v, C_w
دمپینگ پیچشی سازه‌ای بال	C_θ
طول قوس و قوس بی بعد بال	c, \bar{c}
نیروهای درگ و لیفت	dD, dL
نیروهای عرضی و عمودی مدل بال	dF_v, dF_w
گشتاور پیچشی حول محور الاستیک	dM_x
گشتاور پیچشی حول ربع بال	dM_{xf}
مدول الاستیسیته سازه	E
فاصله مرکز جرم محور الاستیک	e
مدول برشی	G
ممان سطحی خمشی عمودی و عرضی	I_1, I_2
اینرسی جرم حول محور الاستیک	I_α
ممان اینرسی جرم در واحد طول حول مرکز جرم	I_θ
ثابت سفتی پیچشی	J
شعاع چرخش جرمی بال (شعاع ژیراسیون)	K_m
طول بال	L
جرم واحد طول بال	m
مجموع تعداد مدها	N
شعاع ژیراسیون حول محور الاستیک	r_α
زمان	t
سرعت و سرعت بی بعد جریان سیال آزاد	U, U^*
سرعت فلاتر	U_F
مختصات تعمیم داده شده برای خمشی عرضی و عمودی	V_i, W_i
جابجایی خمشی عرضی	v
جابجایی خمشی عمودی	w
موقعیت محوری در راستای طول بال	x
موقعیت محور پیچشی بال	x_f

فهرست علائم یونانی

زاویه پیچش مقطع بال	θ
مختصات تعمیم داده شده برای پیچش	θ_i
زاویه حمله حالت پایا	θ_0
نسبت جرم بال به هوا	μ
جابجایی بی بعد خمش عمودی	ξ
چگالی هوا	ρ
زمان بی بعد	τ
فرکانس نوسانات سیکل حدی	ω
فرکانس طبیعی نوسانات برای پیچش و خمش	ω_h, ω_α
نسبت فرکانس	$\bar{\omega}$
$d()/dx$	$()'$
$d()/dt$	$(\dot{ })$

فصل اول



مقدمه و مرور پژوهش‌های انجام

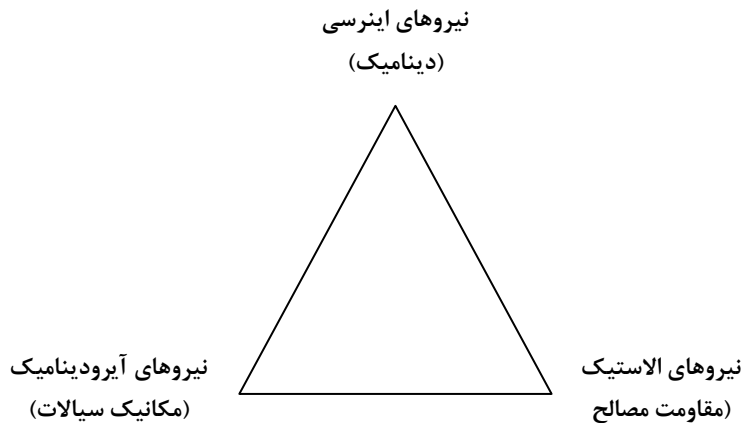
گرفته

۱-۱ مقدمه

در این فصل مرور اولیه از کارهای انجام گرفته در زمینه‌های مختلف آیروداستیک و توضیح کارهای انجام گرفته در این زمینه ارائه می‌گردد تا آشنایی اولیه و مختصر از مباحث آیروداستیک و آیروسرواستیک حاصل شود. سپس در ادامه به ارائه فهرست کارهای پیشنهادی و صورت گرفته در این پایان‌نامه، پرداخته می‌شود.

۱-۱-۱ بیان مسئله

سالها پیش کلار پیشنهاد داده بود که آیروداستیسیتی با تشکیل مثلثی از علوم متفاوت بصورت شکل ۱-۱ قابل درک می‌باشد [۱].



شکل ۱-۱- زمینه‌های علمی مختلف آیروداستیسیتیه

آیروداستیسیتی به بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌پردازد که شامل تعامل متقابل نیروهای اینرسی، الاستیک و آیرودینامیک می‌باشد. در سالهای پیش، زمینه آیروداستیسیتی بر کاربرد هوایی متمرکز بوده است، ولی در حال حاضر این زمینه کاربردهای فراوانی در مهندسی عمران: نظیر جریان هوا حول پل‌ها و

سازه‌های بلند، در مهندسی مکانیک: برای بررسی جریان هوا حول پره‌های توربوماشین‌ها و جریان هوا داخل لوله‌های انعطاف‌پذیر و در مهندسی هسته‌ای: برای بررسی جریان سیال حول المان‌های سوخت و پره‌های مبدل حرارتی یافته است [۱ و ۲].

پدیده‌های ایروالاستیک به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: پدیده‌های ایروالاستیک استاتیک و پدیده‌های ایروالاستیک دینامیک.

پدیده‌های ایروالاستیک استاتیک، پدیده‌هایی هستند که در آنها تنها نیروهای آیرودینامیکی و الاستیک شرکت دارند و نیروهای دینامیکی نقشی ندارند. این پدیده‌ها به صورت: "واگرایی"، "معکوس شدن سطح کنترلی"، "چرخش یک بال مستقیم"، "واگرایی خمشی و پیچشی یک بال مورب"، "واگرایی خمشی بدون تغییر شکل پیچشی بال‌های مورب با زاویه رو به جلو" ظاهر می‌شوند. اکثر پدیده‌های ایروالاستیک استاتیک وقتی اتفاق می‌افتند که مرکز آیرودینامیک جلوتر از محور الاستیک باشد [۱].

پدیده‌های ایروالاستیک دینامیک، پدیده‌هایی هستند که در آنها هر سه نیروی آیرودینامیکی، الاستیکی و دینامیکی نقش دارند و اثرات حاصله شامل تعامل این سه نیرو می‌باشند. در ایروالاستیسیته دینامیک به مباحثی نظیر (۱) ناپایداری دینامیک یا "فلاتر" (۲) مسایل پاسخ پرداخته می‌شود که در مبحث دوم به پاسخ یک سیستم ایروالاستیک به یک بار خارجی اعمالی پرداخته می‌شود.

مخرب‌ترین پدیده فیزیکی در زمینه ایروالاستیسیتی، فلتر یا ناپایداری دینامیک است که در اکثر موارد منجر به شکست سازه‌ای می‌گردد. بدین صورت که در سرعت‌های پائین نیروهای آیرودینامیکی باعث کاهش دامنه ارتعاشات سازه‌ای می‌شوند. اما در سرعت‌های بالاتر از یک سرعت مشخص، نیروهای آیرودینامیکی موجب تقویت ارتعاش می‌شوند. در این حالت بجای کاسته شدن از دامنه ارتعاش، دامنه را افزایش داده و در صورتی که در سیستم به اندازه کافی میرایی وجود نداشته باشد، سیستم تا مرز تخریب پیش می‌رود.

۲-۱ مرور پژوهش‌های انجام گرفته

در این قسمت مرور مختصر از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه آبرو الاستیک و آبروسروالاستیک پرداخته می‌شود تا زمینه بررسی اولیه کارهای انجام گرفته و موارد پیشنهادی در این پایان‌نامه مهیا گردد.

۱-۲-۱ پدیده‌های غیرخطی در آبرو الاستیسیته

پژوهشگران از مطالعات دقیق تحلیلی و آزمایشی انجام گرفته بر روی سیستم‌های آبرو الاستیک، سیستم‌های آبرو الاستیک را سیستم‌های ذاتاً غیرخطی توصیف می‌کنند. این غیرخطی‌ها منجر به پدیده‌هایی می‌شوند که به طور مناسب با نمایش خطی توصیف نمی‌شوند. برای مثال، پاسخ‌های چندین مقدره که منجر به پدیده‌های پرش، سیکل‌های حدی، تعامل مودال و تشدیدهای متفاوت (داخلی و هارمونیک‌های بالا و پائین) می‌شوند، از عوامل غیرخطی ناشی می‌شوند. منشاء غیرخطی شامل عوامل داخلی (بواسطه موقعیت جرم‌های متمرکز و مجزا)، آبرودینامیکی (بواسطه سکتة دینامیکی، نوسانات بزرگی که منجر به جدایی جریان می‌شوند، شوک‌های نوسانی یا دیگر منابع ناپائی جریان) و سازه‌ای (بواسطه مکانیزم میرایی، مواد، تغییر شکل‌های بزرگ یا از دست دادن جزیی یکپارچه‌گی سازه‌ای یا کنترلی) می‌باشند. در برخی از موارد حضور رفتارهای آشوبناک در ساختارهای آبرو الاستیک نیز گزارش شده است [۳ و ۴].

از میان تمام مسایل آبرو الاستیک با غیرخطی‌های سازه‌ای، فلاتر پانل بیشترین توجه را به خود اختصاص داده است. فلاتر پانل یک ناپایداری دینامیک می‌باشد که در آن یک صفحه نازک یا پوسته با غیرخطی هندسی با خمش و کشش صفحه همراه است. یک مرور جامع از تحلیل غیرخطی‌های سازه‌ای برای یک مقطع بال، در کار لی و همکارانش [۵] ارایه شده است.