

آیروالاستیسیته

مؤلفان:

دکتر کرامت ملک زاده فرد

مهندس مصطفی لیوانی

مهندس وحید اسلامی نژاد

www.ketab.ir

سرشناسه	ملک‌زاده فرد، کرامت، ۱۳۴۷ -
عنوان و نام پدیدآور	آیروالاستیسیته / مولفان کرامت ملک‌زاده فرد، مصطفی لیوانی، وحید اسلامی‌نژاد،
مشخصات ظاهری	۲۹۷ص: مصور، جدول، نمودار.
مشخصات نشر	کرج: الماس البرز، ۱۳۹۳.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۹۴۳۸۱-۵-۰۰:
وضیعت فهرست نویسی	فیبا
یادداشت	کتابنامه
موضوع	آیروالاستیسیته
شناسه افزوده	لیوانی، مصطفی، ۱۳۶۴ -
شناسه افزوده	اسلامی‌نژاد، وحید، ۱۳۶۲-
رده بندی کنگره	۱۳۹۳ م ۹/۴۵۷۴ TL
رده بندی دیویی	۶۲۴/۱۷۱۰۲۸۵۵۳:
شماره کتاب شناسی ملی	۳۴۷۹۴۹۵:

آیروالاستیسیته

مولفان دکتر کرامت ملک‌زاده فرد، مهندس مصطفی لیوانی،

مهندس وحید اسلامی‌نژاد

انتشارات الماس البرز

ویراستار: کاظم پری‌پیکر

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

قیمت: ۲۰۰۰۰۰ ریال

چاپ اول: ۱۳۹۳

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۳۸۱-۵-۰۰

تلفن همراه: ۰۹۱۳۶۹۶۳۶۲۱ نمابر: ۰۲۶-۳۲۴۰۰۳۶۳

ایمیل: aa_pub@yahoo.com سایت: aa-pub.ir

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر آبروالاستیسته و تاریخچه آن.....	۱۹
مقدمه	۲۱
۱-۱ مبانی آبروالاستیسته	۲۲
۱-۱-۱ انواع پدیده‌های آبروالاستیک	۲۴
۱-۱-۱-۱ آبروالاستیسته استاتیکی	۲۴
۱-۱-۱-۲ آبروالاستیسته دینامیکی	۲۵
۱-۲ تاریخچه‌ای از آبروالاستیسته	۲۶
بررسی کارهای انجام شده در زمینه آبروالاستیسته	۲۹
مراجع فصل اول	۳۴
فصل دوم: آبروالاستیسته استاتیکی.....	۳۷
مقدمه	۳۹
۲-۱ مدل بال صلب روی تکیه‌گاه الاستیک در تست تونل باد	۳۹
۲-۱-۱ مدل دیواری	۳۹
۲-۱-۲ مدل سوزنی (نیش)	۴۰
۲-۱-۳ مدل پایه‌ای	۴۱
۲-۲ پدیده واگرایی و سرعت واگرایی	۴۱
۲-۲-۱ محاسبه سرعت واگرایی با استفاده از مدل دیواری	۴۱
۲-۲-۲ محاسبه سرعت واگرایی با استفاده از مدل سوزنی	۴۸
۲-۲-۳ محاسبه سرعت واگرایی با استفاده از مدل پایه‌ای	۵۰
۲-۳ بررسی پایداری آبروالاستیک مقطع نمونه همراه با سطح کنترل	۵۲
۲-۳-۱ معادلات تعادل آبروالاستیک برای بال همراه با سطح کنترل	۵۳
۲-۳-۲ وارونه شدن عملکرد سطوح کنترل	۵۴
۲-۴ مدل آبروالاستیک یک بعدی برای بال با نسبت منطری بالا	۵۷
۲-۴-۱ معادله تعادل استاتیکی	۵۸
۲-۴-۱-۱ مدل سازی آیرودینامیکی برای بال یک بعدی با استفاده از تئوری نوار آیرودینامیکی	۵۹
۲-۴-۲ رویکرد مقدار ویژه و تابع ویژه	۶۲
۲-۵ تحلیل آبروالاستیک استاتیک یک بال با خواص متغیر به کمک روش گلرکین	۶۵
۲-۶ تأثیر سوئپ‌دار بودن بال بر مشخصه‌های آیرودینامیکی	۶۸
۲-۶-۱ حل دقیق برای واگرایی خمشی-پیچشی	۷۳
۲-۶-۲ حل تقریبی برای واگرایی خمشی-پیچشی	۷۶
۲-۶-۳ رفتار حل‌های دقیق و تقریبی	۷۸
۲-۸ مثال‌های فصل اول	۸۳
۲-۸ مراجع فصل دوم	۹۸
فصل سوم: آبروالاستیسته دینامیکی - فلاتر.....	۹۹
مقدمه	۱۰۱

۱۰۳	۳-۱- مشخصات پایداری
۱۰۹	۳-۲- تحلیل فلاتر مدل مقطع نمونه
۱۱۰	۳-۲-۱- استخراج معادلات حرکت به کمک معادلات لاگرانژ
۱۱۳	۳-۲-۲- بدست آوردن سرعت فلاتر با استفاده از تئوری آیرودینامیکی پایا
۱۱۶	۳-۲-۳- بدست آوردن سرعت فلاتر با استفاده از تئوری آیرودینامیکی شبه پایا
۱۱۹	۳-۲-۴- مقایسه نتایج حاصل از دو تئوری بیان شده
۱۲۰	۳-۳- مدل‌های آیرودینامیکی تقریبی
۱۲۰	۳-۳-۱- تئوری پیستون
۱۲۳	۳-۳-۲- تئوری مرتبه دوم وندیک
۱۲۴	۳-۴- تحلیل فلاتر مدل دو درجه آزادی با استفاده از روش کلاسیک
۱۲۶	۳-۴-۱- رونه حل
۱۲۷	۳-۵- روش‌های مهندسی برای تحلیل فلاتر
۱۲۷	۳-۵-۱- روش p
۱۲۸	۳-۵-۲- روش k
۱۳۱	۳-۵-۳- روش $p-k$
۱۳۵	۳-۶- تئوری آیرودینامیک ناپایا، تئوری ایرفویل نازک تنودرسن
۱۳۶	۳-۷- محاسبه فلاتر با استفاده از روش مودهای فرضی
۱۴۱	۳-۸- تحلیل فلاتر با استفاده از نرم افزار MSC NASTRAN/PATRAN
۱۴۱	۳-۸-۱- آنالیز مودال
۱۴۲	۳-۸-۲- تحلیل فلاتر
۱۵۰	۳-۹- مثال‌های فصل سوم
۱۶۲	۳-۱۰- مراجع فصل سوم

فصل چهارم: بررسی پدیده بافتینینگ و پارامترهای مؤثر بر روی آن

۱۶۴	مقدمه
۱۶۷	۴-۱- تاریخچه
۱۶۹	۴-۲- بررسی بارهای بافتینینگ
۱۶۹	۴-۲-۱- بررسی بارهای بافتینینگ برای هواپیما با بال مستقیم
۱۶۹	۴-۲-۲- بررسی بارهای بافتینینگ برای هواپیما با بال دارای زاویه عقبگرد
۱۷۱	۴-۳- پارامترهای مهم در بافتینینگ
۱۷۱	۴-۳-۱- فرکانس‌های بافتینینگ
۱۷۱	۴-۳-۲- فرکانس‌های کاهش یافته
۱۷۱	۴-۳-۳- جدایش جریان
۱۷۳	۴-۳-۴- موقعیت دم در wake
۱۷۳	۴-۳-۵- فشار دینامیکی
۱۷۳	۴-۴- روش‌های ممکن برای تخمین نیروهای بافتینینگ
۱۷۳	۴-۴-۱- روش آماری
۱۷۳	۴-۴-۲- تست‌های پروازی

۱۷۳	۱-۲-۴-۴- گنج‌های کرنش
۱۷۳	۲-۲-۴-۴- اندازه‌گیری فشار
۱۷۴	۳-۴-۴- تست‌های تونل باد
۱۷۵	۴-۴-۴- کرنش سنج‌ها
۱۷۶	۵-۴-۴- اندازه‌گیری فشار
۱۷۸	۶-۴-۴- اندازه‌گیری جابجایی
۱۷۸	۵-۴-۴- کاهش اثر بافتینگ دم
۱۷۸	۱-۵-۴- روش‌های آیرودینامیکی
۱۷۹	۲-۵-۴- روش‌های دینامیک سازهای
۱۷۹	۶-۴-۴- نتیجه‌گیری
۱۸۰	۷-۴-۴- مراجع فصل چهارم
۱۸۳	فصل پنجم: بررسی پدیده فلاتر و پِنل فلاتر بر روی صفحه و
۱۸۵	مقدمه
۱۸۵	۱-۵- تئوری خطی آیروالاستیسیته پوسته
۱۸۵	۱-۱-۵- ماهیت فیزیکی مسئله
۱۸۷	۲-۱-۵- مشخص کردن شروع فلاتر
۱۸۷	۳-۱-۵- مشخصات نوسان بعد از فلاتر
۱۸۷	۴-۱-۵- شکست به علت فلاتر
۱۸۷	۲-۵- تئوری خطی آیروالاستیسیته
۱۸۸	۱-۲-۵- نحوه بدست آوردن معادله دیفرانسیل برای ارتعاش خمشی صفحه مستطیلی
۱۹۲	۳-۵- تحلیل آیروالاستیسیته پوسته به کمک روش اجزای محدود
۱۹۲	۱-۳-۵- مدل اجزای محدود برای پِنل فلاتر مافوق صوت
۱۹۶	۴-۵- بررسی پدیده پِنل فلاتر روی صفحه‌های یک بعدی و دوبعدی
۱۹۶	۱-۴-۵- نحوه محاسبه ماتریسهای سفتی، جرم، آیرودینامیک برای ورق یک بعدی
۲۰۸	۲-۴-۵- تحلیل صفحه مستطیلی دو بعدی
۲۲۲	۵-۵- بررسی پدیده فلاتر روی بال با نسبت منظرئ پایین
۲۲۳	۱-۵-۵- بررسی پدیده فلاتر روی پوسته یک لایه بدون تقویت‌کننده
۲۲۷	۴-۳- بررسی پدیده فلاتر روی پوسته یک لایه همراه با تقویت‌کننده
۲۳۹	۴-۴- بررسی پدیده فلاتر روی بال تقویت‌شده
۲۴۶	۵-۵- مراجع فصل پنجم
۲۵۰	فصل ششم: کماتش و فلاتر همزمان سازه‌ها
۲۵۲	مقدمه
۲۵۳	۱-۶- کماتش حرارتی و رفتار فلاتر غیرخطی روی پِنل‌های FGM
۲۵۳	۱-۱-۶- مقدمه
۲۵۴	۲-۱-۶- فرمولاسازی المان محدود پس کماتش حرارتی پِنل‌های FG
۲۵۴	۱-۲-۶- رابطه جابجایی/جابجایی-گرهای

۲۵۵	۶-۱-۲-۲- رابطه کرنش- جابجایی غیر خطی
۲۵۶	۶-۱-۲-۳- رابطه کرنش- تنش پنل FG
۲۵۷	۶-۱-۲-۴- بارگذاری آبرودینامیکی
۲۵۸	۶-۱-۳- معادلات حاکم
۲۶۰	۶-۱-۴- روند حل
۲۶۰	۶-۱-۴-۱- کمانش آبروحرارتی استاتیکی
۲۶۱	۶-۱-۴-۲- فرکانس آزاد
۲۶۲	۶-۱-۴-۳- فلاتر پنل تحت اثر حرارت
۲۶۳	۶-۱-۴-۴- دامنه سیکل محدود
۲۶۵	۶-۱-۵- نتایج عددی و بحث‌ها
۲۶۶	۶-۱-۵-۱- تحلیل کمانش آبروحرارتی
۲۶۸	۶-۱-۵-۲- ارتعاش آزاد
۲۶۹	۶-۱-۵-۳- پیش‌بینی مرزهای فلاتر پنل
۲۶۹	۶-۱-۵-۴- دامنه سیکل محدود
۲۷۰	۶-۲- بالا بردن ظرفیت فلاتر و کمانش تیر با لایه‌های پیزوالکتریک
۲۷۱	۶-۲-۱- تشریح مسئله
۲۷۳	۶-۲-۲- مدل ریاضی برای تحلیل فلاتر و کمانش تیر
۲۷۴	۶-۲-۳- حل تحلیلی برای فلاتر و کمانش تیر
۲۷۶	۶-۲-۴- شبیه‌سازی عددی و بحث‌ها
۲۸۲	۶-۳- پس‌کمانش حرارتی و خصوصیات فلاتر صفحات کامپوزیتی با الیاف آلیاژهای حافظه‌دار (SMA)
۲۸۲	۶-۳-۱- فرمول‌بندی المان محدود
۲۸۲	۶-۳-۲- روابط جابجایی-کرنش تدریجی
۲۸۳	۶-۳-۳- معادلات حاکم
۲۸۵	۶-۳-۴- معادلات حاکم
۲۸۷	۶-۳-۵- روند حل
۲۸۸	۶-۳-۵-۱- مسئله پس‌کمانش حرارتی
۲۸۹	۶-۳-۵-۲- مسئله ارتعاش
۲۹۰	۶-۳-۵-۳- مسئله فلاتر پنل
۲۹۰	۶-۳-۵-۳-۱- مسئله فلاتر پنل خطی
۲۹۱	۶-۳-۵-۳-۲- مسئله پس‌کمانش حرارتی-آبرودینامیکی
۲۹۲	۶-۳-۶- نتایج عددی و بحث‌ها
۲۹۲	۶-۳-۶-۱- اعتبارسنجی کد
۲۹۳	۶-۳-۶-۲- تحلیل پس‌کمانش حرارتی
۲۹۵	۶-۳-۶-۳- تحلیل ارتعاش
۲۹۷	۶-۳-۶-۴- تحلیل فلاتر پنل
۳۰۰	۶-۴- مراجع فصل ششم

فهرست اشکال

- شکل ۱.۱ مثلث کولار..... ۲۳
- شکل ۱.۲ پرواز ناموفق ساموئل لانگلی در سال ۱۹۰۳ الف- آغاز پرواز از بلندی، ۲۶
- ب- پرواز کوتاه بر فراز رودخانه، ج- پایان پرواز و د- عملیات نجات! ۲۶
- شکل ۱.۵ تصویر هواپیماهای به ترتیب از بالا به پایین: DH9, Handley Page 0/400 و Fokker D-8 ۲۸
- شکل ۱.۶ منحنی نرخ غلتش بر حسب سرعت برای دو حالت بال صلب و بال الاستیک..... ۳۰
- شکل ۱.۷ توزیع نیرو بر روی بال سوئیپ‌دار..... ۳۱
- شکل ۱.۸ خیز بال در اثر انعطاف‌پذیری باعث می‌شود که زاویه حمله مقطع بال کاهش یابد(مقطع A-A) [۱۸]..... ۳۲
- شکل ۱.۹ پرنده آمریکایی X-۱۵ که برای نخستین بار در سال ۱۹۵۸ با سرعت ماورای صوت پرواز کرد [۲۴]..... ۳۳
- شکل ۲.۱ نمایش شماتیک مدل نصب دیواری در تونل باد [۲]..... ۴۰
- شکل ۲.۲ نمایش شماتیک مدل سوزنی نصب شده در تونل باد [۲]..... ۴۰
- شکل ۲.۳ نمایش جزئیات تیر یکسر گیردار [۲]..... ۴۰
- شکل ۲.۴ نمایش مدل پایه‌ای نصب شده در تست تونل باد..... ۴۱
- شکل ۲.۵- نمودار پیچش الاستیک بر حسب سرعت جریان..... ۴۲
- شکل ۲.۶ ایرفویل مدل تونل باد..... ۴۲
- شکل ۲.۷ منحنی تغییرات نیروی برا ناشی از اثرات آیروالاستیک..... ۴۶
- شکل ۲.۸ منحنی تغییرات $\frac{1}{\alpha_e}$ بر حسب $\frac{1}{q}$ ۴۸
- شکل ۲.۹ نمایش جزئیات ایرفویل مدل سوزنی تونل باد..... ۴۹
- شکل ۲.۱۰ مقطع عرضی بال با تکیه‌گاه پایه‌ای تونل باد..... ۵۱
- شکل ۲.۱۱ مقطع عرضی بال به همراه سطح کنترل..... ۵۲
- شکل ۲.۱۲ نمای بال یکنواخت با نسبت منظری بالا..... ۵۸
- شکل ۲.۱۳ نمای از آلمان دیفرانسیلی بال تحت گشتاورهای پیچشی..... ۵۹
- شکل ۲.۱۴ منحنی تغییرات α_e بر حسب $\bar{q}$ ۶۲
- شکل ۲.۱۵ نمای از بالای بال با خواص متغیر..... ۶۵
- شکل ۲.۱۶ شماتیکی از بال سوئیپ‌دار..... ۶۸
- شکل ۲.۱۷ منحنی فشار دینامیکی واگرایی بر حسب زاویه سوئیپ بال..... ۷۲
- شکل ۲.۱۸ توزیع برا برای زاویه سوئیپ مثبت، صفر و منفی..... ۷۳
- شکل ۲.۱۹ r_D بر حسب β_D برای واگرایی خمش-پیچش کوئل شده، خط‌های پر: حل دقیق و خط چین: حل تقریبی رابطه (۲-۱۱۳)..... ۷۷
- شکل ۲.۲۰ r_D بر حسب r برای واگرایی خمشی- پیچشی جفت شده، خط‌های پر: حل دقیق، خط چین‌ها:

- حل تقریبی (رابطه ۲-۱۱۶) و همچنین منحنی $\tau_D = -27r^2/4$ در ربع چهارم. ۷۹.....
- شکل ۲.۲۱ τ_D بر حسب r برای واگرایی خمشی-پیچشی جفت شده، خط‌های پر: حل دقیق، خط چین‌ها: حل تقریبی (رابطه ۲-۱۱۶) و همچنین منحنی $\tau_D = -27r^2/4$ در ربع چهارم. ۷۹.....
- شکل ۲.۲۲ فشار دینامیکی واگرایی نرمال شده برای یک بال دارای سوئپ بدون کوپل‌شدگی الاستیک. ۸۲.....
- شکل ۲.۲۳ فشار دینامیکی واگرایی نرمال برای بال سوئپ دار بدون کوپل‌شدگی الاستیک با $\frac{GJ}{EI} = 0.2$ و $\frac{e}{l} = 0.02$. [۲] ۸۳.....
- شکل ۲.۲۴ فشار دینامیکی واگرایی نرمال برای یک بال سوئپ‌دار بدون کوپل‌شدگی الاستیک با $\frac{GJ}{EI} = 0.2$ و $\frac{e}{l} = 0.05$: حل دقیق: خط پر و حل فرم بسته تقریبی: خط چین [۲]. ۸۳.....
- شکل ۳.۱ نمایی از فلاتر در یک مود (پیچینگ) ۱۰۲.....
- شکل ۳.۲ شکست پل تاکوما در سال ۱۹۴۰ ۱۰۲.....
- شکل ۳.۳ نمایی از فلاتر در دو مود (خمشی و پیچشی) ۱۰۳.....
- شکل ۳.۴ نمای بال یکنواخت با نسبت منظری پایین ۱۰۳.....
- شکل ۳.۵ رفتار دامنه مود نوعی ۱۰۸.....
- شکل ۳.۶ شماتیک مقطع بال مدل مقطع نمونه با دو درجه آزادی برای تحلیل فلاتر. ۱۰۹.....
- شکل ۳.۷ نمودار فلاتر با استفاده از مدل آیرودینامیک پایا ۱۱۶.....
- شکل ۳.۸ نمودار فلاتر با استفاده از مدل آیرودینامیک شبه‌پایا ۱۱۸.....
- شکل ۳.۹ مقایسه‌ی نمودار فلاتر برای دو مدل آیرودینامیک پایا و شبه‌پایا. ۱۱۹.....
- شکل ۳.۱۰ مدل برای بارگذاری روی یک پیستون معادل [۹] ۱۲۱.....
- شکل ۳.۱۱ مقایسه‌ی بین روش‌های P و k برای تحلیل فلاتر هواپیمای ترابری دو موتوره. ۱۳۳.....
- شکل ۳.۱۲ مقایسه‌ی بین روش‌های P و $P-k$ برای تحلیل فلاتر هواپیمای ترابری دو موتوره. ۱۳۴.....
- شکل ۳.۱۳ رسم قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع نئودورسن برای k های مختلف از مقدار صفر جایی که $C(k) = 0$ تا مقدار یک. ۱۳۵.....
- شکل ۳.۱۴ نمای بال یکنواخت با نسبت منظری بالا. ۱۳۶.....
- شکل ۳.۱۵ سطح مقطع بال یکنواخت. ۱۳۷.....
- شکل ۳.۱۶ منوی Analysis ۱۴۲.....
- شکل ۳.۱۷ منوی Result ۱۴۳.....
- شکل ۳.۱۸ منوی Preferences در محیط Flds ۱۴۴.....
- شکل ۳.۱۹ ترتیب شماره گذاری برای ایجاد صفحه مورد نظر در قسمت Flat Plate Modeling ۱۴۵.....
- شکل ۳.۲۰ منوی Global data ۱۴۵.....
- شکل ۳.۲۱ منوی Aeroelasticity-structural coupling ۱۴۶.....
- شکل ۳.۲۲ منوی Aeroelastic Analysis ۱۴۷.....
- شکل ۳.۲۳ منوی Analysis-Flutter parameters ۱۴۸.....
- شکل ۳.۲۴ منوی Analysis-Flutter parameters-Velocity sets ۱۴۹.....

- شکل ۴.۱ مرئی ساختن جریان برای تجسم ایجاد گردابه ها در محل اتصال لبه‌ی حمله بال با بدنه (LEX) در زاویه حمله ۳۰ درجه [۴] ۱۶۷
- شکل ۴.۲ اثر مولد گردابه بر روی ناحیه جدایش جریان و بافتینگ [۸] ۱۷۰
- شکل ۴.۳ قراردعی فینس بر روی LEX بال هواپیمای F/A-18 ۱۷۲
- شکل ۴.۴ نمایی از یک مدل کوچک شده سوزنی هواپیمای نصب شده در تونل باد ۱۷۴
- شکل ۴.۵ مدل تونل باد یک هواپیمای آموزشی پیشرفته در زاویه حمله ۲۵ درجه ۱۷۵
- شکل ۴.۶ تجهیزات بافتینگ [۸] ۱۷۶
- شکل ۴.۷ محل قرارگیری مبدلها برای اندازه‌گیری فشار روی دم عمودی هواپیمای F/A-18 ۱۷۷
- شکل ۴.۸ بخشبندی سطح دم عمودی برای مناطق مجاور مبدل‌های فشار ۱۷۸
- شکل ۵.۱ انواع پوسته و صفحه ۱۸۵
- شکل ۵.۲ شکل شماتیک از حساسیت پنل ۱۸۶
- شکل ۵.۳ هندسه پنل دو بعدی ۱۹۲
- شکل ۵.۴ هندسه پنل یک بعدی ۱۹۷
- شکل ۵.۵ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۳
- شکل ۵.۶ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۳
- شکل ۵.۷ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۴
- شکل ۵.۸ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۴
- شکل ۵.۹ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۵
- شکل ۵.۱۰ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۵
- شکل ۵.۱۱ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۶
- شکل ۵.۱۲ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۰۶
- شکل ۵.۱۳ شکل مقدار ویژه بر حسب مقدار فشار دینامیکی در زاویه وزش باد ۴۰ ۲۰۸
- شکل ۵.۱۴ نمایش المان مستطیلی خمشی ۲۱۴
- شکل ۵.۱۵ نمایش یک صفحه مش‌بندی ۲۱۵
- شکل ۵.۱۶ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی کاملاً گیردار ۲۱۷
- شکل ۵.۱۷ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی کاملاً گیردار ۲۱۷
- شکل ۵.۱۸ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی با تکیه‌گاه ساده ۲۱۸
- شکل ۵.۱۹ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی با تکیه‌گاه ساده ۲۱۸
- شکل ۵.۲۰ شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی گیردار و سه طرف آزاد ۲۱۹
- شکل ۵.۲۱ شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی گیردار و سه طرف آزاد ۲۱۹
- شکل ۵.۲۲ نمایش یک صفحه تحت جریان مافوق صوت که با محور x زاویه θ [۳۴] ۲۲۰
- شکل ۵.۲۳ محاسبه فلاتر با استفاده از روش زاویه بین دو بردار ویژه برای حالت‌های صفر و ۱۰ درجه ۲۲۰
- شکل ۵.۲۴ نمایش دو شکل مود صفحه ۴ طرف گیردار الف $\lambda = 0$ ب $\lambda = 850$ ۲۲۱
- شکل ۵.۲۵ نمایش تابع فشار دینامیکی بحرانی بر حسب زاویه وزش هوا برای صفحه ۴ طرف تکیه‌گاه ساده ۲۲۲
- شکل ۵.۲۶ نمایش تابع فشار دینامیکی بحرانی بر حسب زاویه وزش هوا برای صفحه ۴ طرف گیردار ۲۲۲
- شکل ۵.۲۷ مدل پوسته یک لایه ۲۲۳

- شکل ۵.۲۸. شکل مود اول 1/9165 Hz ۲۲۴
- شکل ۵.۲۹. شکل مود دوم 2/8859 Hz ۲۲۴
- شکل ۵.۳۰. شکل مود سوم 5/2342 Hz ۲۲۵
- شکل ۵.۳۱. هندسه شکل سازه ۲۲۵
- شکل ۵.۳۲. شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۲۶
- شکل ۵.۳۳. شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی ۲۲۶
- شکل ۵.۳۴. ساختار سازه همراه با تقویت‌کننده‌ها ۲۲۷
- شکل ۵.۳۵. المان تیر همراه خمش در دو صفحه ۲۳۰
- شکل ۵.۳۶. نمایش مختصات محلی و عمومی ۲۳۱
- شکل ۵.۳۷. شکل مود اول 61.081 Hz ۲۳۴
- شکل ۵.۳۸. شکل مد دوم 76.107 Hz ۲۳۵
- شکل ۵.۳۹. شکل مد سوم 109.29 Hz ۲۳۵
- شکل ۵.۴۰. مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی لایه تقویت‌کننده ۲۳۸
- شکل ۵.۴۱. مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی لایه تقویت‌کننده ۲۳۸
- شکل ۵.۴۲. سازه واقعی ۲۳۹
- شکل ۵.۴۳. شکل مود اول 109/29 Hz ۲۴۲
- شکل ۵.۴۴. شکل مود دوم 115/59 Hz ۲۴۲
- شکل ۵.۴۵. شکل مود سوم 134/24 Hz ۲۴۳
- شکل ۵.۴۶. شکل مقدار ویژه حقیقی بر حسب مقدار فشار دینامیکی برای سازه واقعی بدون تقویت‌کننده ۲۴۴
- شکل ۵.۴۷. شکل مقدار ویژه موهومی بر حسب مقدار فشار دینامیکی برای سازه واقعی بدون تقویت‌کننده ۲۴۴
- شکل ۶.۱. پدیده فلاتر پل ۲۵۲
- شکل ۶.۲. تغییرات تابع نسبت حجمی بر حسب ضخامت یی بعد شده [۲] ۲۵۴
- شکل ۶.۳. اثر توان نسبت حجمی روی تغییر شکل پس‌کمانش یک پل FG گیردار [۳] ۲۶۷
- شکل ۶.۴. اثر توان نسبت حجمی روی تغییر شکل پس‌کمانش یک پل FG با شرایط مرزی ساده [۳] ۲۶۷
- شکل ۶.۵. اثر مقادیر مختلف فشار دینامیکی روی خصوصیات کمانش یک پل FG با $n = 1$ [۳] ۲۶۸
- شکل ۶.۶. فرکانس‌های طبیعی در نواحی پیش از کمانش و پس‌کمانش برای ال‌های مختلف [۳] ۲۶۸
- شکل ۶.۷. اثر توان نسبت حجمی روی مرز پایداری یک پل FG گیردار [۳] ۲۶۹
- شکل ۶.۸. تغییرات دامنه سیکل محدود با فشار دینامیکی در یک افزایش دمای ۶ درجه سلسیوس برای یک پل FG گیردار [۳] ۲۷۰
- شکل ۶.۹. طرح کلی تغییرات دامنه سیکل محدود و تغییر شکل پس‌کمانش با فشار دینامیکی برای $n = 1$ [۳] ۲۷۰
- شکل ۶.۱۰. تیر با دو لایه پیزوالکتریک تحت بار دینال رو ۲۷۲
- شکل ۶.۱۱. اولین جفت فرکانس رزونانس بر حسب نیروی دیناله‌رو، b. اولین فرکانس رزونانس بر حسب نیروی دیناله‌رو [۴] ۲۷۸
- شکل ۶.۱۲. ظرفیت فلاتر و کمانش تیر بر حسب سفتی فتر [۴] ۲۷۹
- شکل ۶.۱۳. ظرفیت فلاتر و کمانش تیر در ولتاژهای مختلف زمانی که $L1 = 0.1$ و $L2 = 0.9$ b. درصد افزایش در ظرفیت فلاتر و کمانش تیر [۴] ۲۸۰
- شکل ۶.۱۴. ظرفیت فلاتر و کمانش تیر در اندازه‌های مختلف لایه پیزوالکتریک در $V = 30$ [۴] ۲۸۱

- شکل ۶.۱۵ ظرفیت فلاتر و کماتش تیر در موقعیت‌های مختلف لایه پیزوالکتریک در $V = 30$ b. فرکانس‌های اول و دوم تیر برای موقعیت‌های مختلف لایه پیزوالکتریک در $V = 30$ [۴] ۲۸۱
- شکل ۶.۱۶ مدل الاستیسیته SMA بر حسب دما، b. تنش بازگشتی بر حسب دم [۵] ۲۸۲
- شکل ۶.۱۷ رفتار پس‌کمانش حرارتی صفحه کامپوزیتی [۵] ۲۹۳
- شکل ۶.۱۸ اثر نسبت حجمی الیاف SMA روی رفتار پس‌کمانش حرارتی [۵] ۲۹۴
- شکل ۶.۱۹ اثر کرنش اولیه الیاف SMA روی رفتار پس‌کمانش حرارتی [۵] ۲۹۴
- شکل ۶.۲۰ فرکانس‌های طبیعی در مناطق قبل کمانش و پس‌کمانش [۵] ۲۹۶
- شکل ۶.۲۱ فرکانس‌های طبیعی در مناطق قبل کمانش و پس‌کمانش [۵] ۲۹۶
- شکل ۶.۲۲ فرکانس‌های طبیعی در مناطق قبل کمانش و پس‌کمانش [۵] ۲۹۷
- شکل ۶.۲۳ فرکانس‌های طبیعی در مناطق قبل کمانش و پس‌کمانش [۵] ۲۹۷
- شکل ۶.۲۴ مرزهای پایداری صفحه‌ی همسانگرد [۵] ۲۹۸
- شکل ۶.۲۵ اثر نسبت حجمی الیاف SMA روی مرزهای پایداری [۵] ۲۹۹
- شکل ۶.۲۶ اثر کرنش اولیه الیاف SMA روی مرزهای پایداری [۵] ۲۹۹

فهرست جداول

جدول ۳.۱	تئوری‌های آیرودینامیکی مختلف با طیف عدد ماخ	۱۲۳
جدول ۳.۲	مقادیر α_i و β_i برای تیر یکسر گیردار	۱۳۸
جدول ۵.۱	مقادیر ویژه (in-vacuo) مقادیر ویژه بحرانی و فشار دینامیکی بحرانی در پنل	۲۰۱
جدول ۵.۲	بررسی اثر تکیه‌گاه روی مقدار ویژه و فشار دینامیکی بحرانی	۲۰۲
جدول ۵.۳	بررسی اثر نیروی محوری بر فشار دینامیکی بحرانی	۲۰۲
جدول ۵.۴	مقادیر ویژه (in-vacuo) و مقادیر ویژه بحرانی و فشار دینامیکی بحرانی در پنل	۲۱۵
جدول ۵.۵	مقایسه فرکانس‌های سازه توسط MATLAB و NASTRAN برای پوسته ساده	۲۲۳
جدول ۵.۶	مقادیر ویژه (in-vacuo) و مقادیر ویژه و فشار دینامیکی بحرانی در پنل	۲۲۶
جدول ۵.۷	مقایسه فرکانس‌های سازه توسط MATLAB و NASTRAN برای پوسته تقویت‌کننده یک لایه	۲۳۴
جدول ۵.۸	مشخصات پوسته بال با نسبت منطری پایین	۲۳۹
جدول ۵.۹	مشخصات تقویت‌کننده‌های پوسته	۲۳۹
جدول ۵.۱۰	مشخصات تیرهای متصل‌کننده دو پوسته	۲۴۰
جدول ۵.۱۱	مقایسه فرکانس‌های سازه اصلی توسط MATLAB و NASTRAN	۲۴۱
جدول ۵.۱۲	مشخصات تقویت‌کننده‌های پوسته	۲۴۵
جدول ۵.۱۳	مشخصات تیرهای متصل‌کننده دو پوسته	۲۴۵
جدول ۵.۱۴	مشخصات مرز فلاتر بر اساس زاویه جهت وزش هوا ما فوق صوت	۲۴۶
جدول ۶.۱	ضرایب وابسته به دما برای سیلیکان نیتريد و نیکل	۲۶۶
جدول ۶.۲	هندسه و خواص مواد تیر و لایه پیزوالکتریک	۲۷۷
جدول ۶.۳	خواص مواد ماتریس کامپوزیت و الیاف SMA (واحد dT درجه سلسیوس است)	۲۹۴
جدول ۶.۴	دمای بحرانی	۲۹۵

پیشگفتار

نیاز به طراحی و ساخت هواپیماها و وسایل پرنده ایمن با استحکام و طول عمر مفید بالا از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه در بین طراحان وسایل پرنده می‌باشد. احتمال قرارگیری این سازه‌ها در برابر پدیده‌های ناپایدارکننده‌ای که منجر به پدیده خستگی و شکست ناگهانی قطعات می‌شوند، کارشناسان طراحی سازه هواپیما را مجبور به تحلیل و آنالیزهای دینامیکی سازه‌های هواپیما و بررسی تأثیر آنها بر طراحی سازه‌های هواپیما می‌کند.

پدیده‌های آیروالاستیک یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایدارکننده هواپیماها است که به موازات افزایش سرعت وسایل پرنده و لزوم انجام طراحی‌های بهینه سازه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است. در این کتاب ضمن معرفی این پدیده‌های مخرب، به روش‌های محاسبه این پدیده و روش‌های جلوگیری از وقوع آن پرداخته می‌شود. این کتاب برای دانشجویان، مهندسان و محققانی که در مورد پدیده‌های آیروالاستیک تحقیق می‌کنند، می‌تواند مفید باشد. در این کتاب، از تجربیات تحقیقات و سالیان متمادی تدریس و کارهای علمی مولفان استفاده شده است. سعی شده است تا از بهترین مثال‌های آموزشی و نیز تحقیقاتی استفاده شود. این کتاب جهت تدریس در مقطع کارشناسی ارشد هوافضا به عنوان یک مرجع تکمیلی می‌تواند بسیار مفید باشد. از طرفی کتاب حاضر به عنوان یک مرجع مفید برای استفاده محققان و طراحان سازه‌های هوافضایی توصیه می‌شود.

در این کتاب سعی شده با ارائه مثال‌های متعدد در هر فصل، به دانشجویان در فهم کامل مطالب ارائه شده در آن فصل کمک شود. در فصل اول این کتاب، مقدمه‌ای بر آیروالاستیسیته و انواع آن در حوزه‌های استاتیک و دینامیک، تاریخچه‌ای از آیروالاستیسیته و مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی آیروالاستیسیته ارائه خواهد شد. در فصل دوم به بیان مبانی آیروالاستیسیته استاتیکی، مدل‌های مختلف شبیه‌سازی آیروالاستیسیته استاتیکی، همچنین به معرفی و نحوه محاسبه پدیده‌های آیروالاستیسیته در حوزه استاتیک پرداخته می‌شود. در فصل سوم، به بررسی پدیده فلاتر و محاسبه سرعت فلاتر با استفاده از تئوری‌های آیرودینامیکی پایا، شبه‌پایا و ناپایا و روش‌های مهندسی

بدست آوردن سرعت فلاتر پرداخته می‌شود. همچنین در این فصل نمونه‌ای از محاسبه سرعت و فرکانس فلاتر توسط مازول آیروالاستیسیت نرم‌افزار NASTRAN ارائه می‌گردد. در فصل چهارم به بررسی پدیده بافتینگ و پارامترهای مؤثر بر روی آن و همچنین روش‌های ممکن برای تخمین نیروهای بافتینگ پرداخته می‌شود. در فصل پنجم به بررسی پدیده فلاتر و پنل فلاتر بر روی صفحه و بال دارای تقویت‌کننده به کمک روش اجزای محدود پرداخته شده و پدیده فلاتر در بال با نسبت منظری پایین بررسی شده است. در فصل ششم، اثر کمانش و فلاتر هم‌زمان سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل با ارائه چند مقاله و پایان‌نامه، به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه فلاتر و کمانش پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه تمام تلاش نویسندگان کتاب حاضر، معطوف به تالیف کتابی بی‌نقص و عاری از اشتباه بوده ولی با این وجود، مجموعه در دسترس خالی از اشتباه نمی‌باشد. لذا نظرات و پیشنهادات اساتید، دانشجویان، پژوهشگران و صنعتگران عزیز، ما را در جهت بهبود آن یاری خواهد داد. شما می‌توانید هر گونه پیشنهاد و انتقاد خود را از طریق پست الکترونیکی به آدرس K.malekzadeh@gmail.com ارسال فرمائید. امید است اجر معنوی این کار شامل همه عزیزانی باشد که ما را با راهنمایی‌ها و کمک‌های خویش مرهون عنایت خود نمودند.

من الله توفیق - دکتر کرامت ملک زاده و همکاران

شهریور ۱۳۹۲