دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

(گرایش سازه های هوایی)

کمانش ورق های کامپوزیتی ساندویچی با هسته میانی انعطاف پذیر و مواد هدفمند

ارائه دهنده:

مسعود ابراهیمی

اساتید راهنما:

دکتر کرامت ملک‌زاده **دکتر سعید ایرانی**

شهریور ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تاییدیه هیأت داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان

" کمانش ورق های کامپوزیتی ساندویچی با هسته میانی انعطاف پذیر و مواد هدفمند "

توسط آقای مسعود ابراهیمی، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته هوافضا گرایش سازه‌های هوایی مورد تایید قرار می‌دهند.

۱– استاد راهنما — آقای دکتر سعید ایرانی

۲– استاد راهنما — آقای دکتر کرامت ملک‌زاده

۳– استاد ممتحن — آقای دکتر علی مظفری

۴– استاد ممتحن — آقای دکتر جعفر اسکندری جم

۵– نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده — آقای دکتر امیرعلی نیک‌خواه

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان‌نامه

کمانش ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته میانی انعطاف‌پذیر و مواد هدفمند

اساتید راهنما: دکتر سعید ایرانی، دکتر کرامت ملک‌زاده

نام دانشجو: مسعود ابراهیمی

شماره دانشجویی: ۸۶۰۱۵۵۴

اینجانب مسعود ابراهیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در مورد استفاده از دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

فرم حق طبع ونشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن، تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

قدردانی و تشکر

پس از حمد و سپاس خداوند متعال، کمال امتنان و تشکر را از تمامی اساتید و دوستانی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق با مساعدت‌های خویش راه‌گشای مشکلات پیش روی اینجانب بوده‌اند دارم. توفیق روز افزون برای تمامی آنها به‌ویژه استاد راهنما آقای دکتر کرامت ملک‌زاده و دوستان عزیزم مهندس علی نظری و مهندس حامد حقیقی آرزومندم.

چکیده

در این پایان‌نامه ناپایداری کمانش پانل‌های ساندویچی مستطیلی با هسته‌ای از جنس مواد هدفمند و رویه‌های چند لایه کامپوزیتی بررسی شده‌است. مواد هدفمند دارای تغییر تدریجی در ساختار میکروسکوپی می‌باشند که این تغییر دارای مزایای گوناگون از جمله استحکام بیشتر بین فازهای مختلف مانند فلز و سرامیک می‌باشد. پانل تحت بارگذاری درصفحه[1]روی لبه‌های رویه‌ها می‌باشد. شرایط مرزی تکیه‌گاهی پانل مفصلی است و روی رویه‌ها اعمال می‌گردد.

از روش انـرژی و اصل همـیلتون جهت استخراج معادلات تعادل و شرایط مرزی مورد نیاز استفاده گردیـده‌است. فرمولاسیون ریاضی در ادامه مراحل تئوری بهبود یافته مرتبه بالای ورق ساندویچی (IHSAPT)[2] می‌باشد. تئوری بکار رفته در رویه‌ها، تئوری برشی مرتبه اول (FSDT)[3] است. جابـجایی‌های هسته در جهات مختلف با چندجـمله‌ای‌هایی با ضرایب نامشخص مدل‌سازی گردیـده‌است. فرض گردیده که هسته قابلیت تحمل تنش‌های برشی و نرمال صفحه‌ای را دارا می‌باشد و اثرات آنها در استخراج سیستم معادلات پانل لحاظ گردیده‌است. تحلیل در منطقه الاستیک می‌باشد و از اثرات درجه حرارت و رطوبت صـرف‌نظر می‌شود. بار بحرانی کمانش در مودهای مختلف و در شرایط هندسی گوناگون، مانند انواع ضریب منظری[4] و نسبت‌های ضخامت بدست می‌آید. سیستم معادلات حاکم بر مساله با استفاده از روش ناویر حل گردیده‌است، بنابراین شرایط مساله نسبت به صفحه میانی، متقارن مدل گردیده‌است. این تقارن شامل تقارن در هندسه، مواد هدفمند، رویه‌ها و شرایط مرزی می‌باشد.

1. Inplane
2 . Improved Higher-Order Sandwich Plate Theory
3 . First Shear Deformation Theory
4 . Aspect ratio

با توجه به اینکه هدف اصلی کاربرد پانل ساندویچی در این پایان‌نامه، استفاده‌های سازه‌ای می‌باشد، اعمال این تقارن برخی ابهامات استفاده از مواد هدفمند بعنوان هسته پانل‌های ساندویچی را رفع می‌نماید. اما نظر به‌اینکه این سازه‌ها کاربردهای سازه‌ای-حرارتی نیز دارند، جهت تکمیل‌تر شدن این تحقیق پانل در نرم‌افزار ANSYS بصورت نامتقارن مدل‌سازی گردیده‌است. کد بکار رفته در این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی نامتقارن مواد هدفمند، تغییر در ابعاد هندسی و خصوصیات مواد بکار رفته را دارا می‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول ۱

ساختار کلی پانل‌های ساندویچی ۱

مقدمه ۲

۱-۱ سازه‌های ساندویچی ۳

۱-۲ ساختار کلی سازههای ساندویچی ۵

۱-۳ نقش رویه‌ها و هسته ۶

۱-۴ انواع متفاوت سازه‌های ساندویچی ۷

۱-۵ آشنایی با کامپوزیت‌ها ۱۰

۱-۶ انواع الیاف کامپوزیت‌ها ۱۳

۱-۷ مواد زمینه کامپوزیتها ۱۴

۱-۸ بررسی تئوری‌های مختلف ورق‌ها و پانل‌های ساندویچی ۱۵

۱-۸-۱ تئوری کلاسیک ورق (CLPT) ۱۵

۱-۸-۲ تئوری برشی مرتبه اول (FSDT) ۱۶

۱-۸-۳ تئوری برشی مرتبه سوم ورق (تئوری رِدی) ۱۷

۱-۸-۴ تئوری کانت ۱۸

۱-۸-۵ تئوری مرتبه بالای فراستیگ ۱۸

۱-۸-۶ تئوری بهبودیافته مرتبه بالا ۱۹

۱-۹ مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۹

فصل دوم ۲۵

آشنایی با مواد هدفمند و خواص آن ۲۵

مقدمه ۲۶

۲-۱ تاریخچه FGM ۲۷

۲-۲ معرفی مواد هدفمند ۲۸

۲-۳ فرآیند تولید FGM ۳۰

۲-۳-۱ فرآیند تثبیت پودر حالت جامد ۳۱
۲-۳-۲ فرآیندهای روکش دهی ۳۲
۲-۴ کاربردهای مواد هدفمند ۳۳
۲-۵ مدل کردن خواص مکانیکی مواد هدفمند ۳۴
۲-۵-۱ توزیع خواص به صورت چند جمله‌ای ۳۵
۲-۵-۲ توزیع خواص به صورت S-FGM ۳۶
۲-۵-۳ توزیع خواص به صورت نمایی ۳۷
۲-۶ مروری بر تحقیقات انجام شده ۳۸
فصل سوم ۴۰
فرمول‌بندی و حل مساله کمانش پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته هدفمند ۴۰
مقدمه ۴۱
۳-۱ تعریف مسأله ۴۲
۳-۲ ایده FGM متقارن ۴۳
۳-۳ روش کلی استخراج معادلات ۴۶
۳-۴ تئوری‌های مورد استفاده در رویه‌ها و هسته ۴۷
۳-۵ روش انرژی و اصل همیلتون ۴۹
۳-۶ معادله تغییرات مرتبه اول انرژی پتانسیل پانل ۵۰
۳-۷ منتجه‌های تنش در رویه‌ها و هسته ۵۱
۳-۸ معادله تغییرات مرتبه اول انرژی حاصل از نیروهای خارجی ۵۳
۳- ۹ معادله تغییرات مرتبه اول انرژی جنبشی پانل ۵۴
۳-۱۰ شرایط سازگاری در محل اتصال هسته به رویه‌ها ۵۵
۳-۱۱ معادله تغییرات مرتبه اول انرژی پتانسیل پانل پس از روابط سازگاری ۵۷
۳-۱۲ سیستم معادلات دیفرانسیل پانل ۵۹
۳-۱۳ روابط بنیانی نیروها و گشتاورها با کرنش‌ها و ماتریس‌های سفتی ۶۳
۳-۱۳-۱ روابط بنیانی نیروها در تک لایه ارتوتروپیک ۶۳
۳-۱۳-۲ روابط بنیانی نیروها در رویه‌ها ۶۴

۳-۱۳-۳ روابط بنیانی نیروها در هسته ۶۶
۳-۱۴ سیستم معادلات دیفرانسیل پانل جهت بارگذاری کمانشی پس از اعمال روابط بنیانی ۶۷
۳-۱۵ پاسخ ناویر برای تحلیل کمانش پانل ساندویچی با تکیه‌گاه ساده ۷۵
۳-۱۵-۱ مفهوم فیزیکی اعدادصحیح m و n ۷۶
۳-۱۶ تشکیل دستگاه معادلات جبری از دستگاه معادلات دیفرانسیل ۷۶
فصل چهارم ۷۸
تحلیل نتایج و پیشنهادها ۷۸
مقدمه ۷۹
۴-۱ بار بحرانی کمانش ورق مربعی ایزوتروپ همگن ۸۰
۴-۲ بار بحرانی کمانش ورق مربعی هدفمند ۸۰
۴-۳ بار بحرانی کمانش پانل ساندویچی با هسته و رویه‌های همگن ۸۱
۴-۴ بررسی اثر ضریب منظری پانل ساندویچی بر مود کمانش بار بحرانی ۸۲
۴-۵ بررسی اثر نسبت ضخامت پانل ساندویچی بر بار بحرانی کمانش ۹۱
۴-۶ بررسی اثر نسبت مدول الاستیسیته هسته هدفمند بر بار بحرانی کمانش پانل ساندویچی ۱۰۰
۴-۷ بررسی شکل مودهای کمانشی یک پانل ساندویچی با هسته هدفمند ۱۰۷
۴-۸ حل عددی کمانش پانل ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته FGM نامتقارن ۱۰۹
نتیجه‌گیری کلی ۱۱۵
پیشنهادها ۱۱۷
پیوست‌ها ۱۱۸
فهرست مراجع ۱۳۷

فهرست جداول و شکل‌ها

شکل ۱- ۱ نسبت‌های افزایش سفتی، سختی خمشی و وزن در اثر افزایش قطر هسته [۳] ۶
شکل ۱-۲ تصویری از مقطع تیغ جوجه تیغی ۱۰
شکل ۱-۳ تصویری از مقطع ساقه چمن ۱۰
شکل ۲-۱ نمونه‌ای از تغییرات تدریجی مواد در یک ورق FGM ۲۸
شکل۲-۲ توزیع تنش در سمت راست: ساختاری تشکیل شده از سه ماده همگن. سمت چپ: ساختاری از همان مواد با توزیع هدفمند ۳۰
شکل۲-۳ نمودار تغییرات کسر حجمی در راستای ضخامت برای مدول الاستیسیته یک P-FGM [۵۶] ۳۶
شکل۲-۴ تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت یک S-FGM [۵۶] ۳۷
شکل ۲-۵ تغییرات مدول یانگ در جهت ضخامت یک E-FGM [۵۶] ۳۷
شکل ۳-۱ ورق ساندویچی مستطیلی با دو رویه چندلایه کامپوزیتی و هسته میانی انعطاف‌پذیر از جنس مواد هدفمند ۴۲
شکل۳-۲ تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت یک SYMMETRY S-FGM ۴۴
شکل۳-۳ نمودار تغییرات کسر حجمی در راستای ضخامت برای مدول الاستیسیته یک SYMMETRY P-FGM ۴۴
شکل ۳-۴ تغییرات مدول یانگ در جهت ضخامت یک SYMMETRY E-FGM ۴۴
شکل۳-۵ (A): هندسه پانل ساندویچی (B): الگوهای تغییر شکل، قراردادهای علامت ومؤلفه‌های تنش‌های داخلی برای هسته و صفحات و بارگذاری درون صفحه‌ای خارجی [۷] ۴۷
جدول ۴-۱ بار بحرانی بی‌بعد کمانش ورق مربعی ایزوتروپ همگن ۸۰
جدول ۴-۲ بار بحرانی بی‌بعد کمانش ورق مربعی هدفمند ۸۰
جدول ۴-۳: بار بحرانی کمانش پانل با هسته و رویه‌های همگن تحت بارگذاری تک محوره ۸۱
شکل ۴-۱ (الف) پانل پس از تغییر شکل کمانشی (ب) شکل هندسی و شرایط مرزی و نیرویی پانل ۸۱
شکل ۴-۲ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری در مود اول یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM ۸۳
شکل ۴-۳ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری در مود اول پانل با هسته S-FGM و توان‌های تابع توزیع خواص P=1, 5, 10 ..... ۸۳
شکل ۴-۴ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری در مود اول پانل ساندویچ با هسته P-FGM و توان‌های تابع توزیع خواص P=0.1, 0.7, 2, 7 ..... ۸۴
شکل ۴-۵ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری در مود اول یک پانل ساندویچی با هسته NON-FGM ۸۴
شکل ۴-۶ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل با هسته P-FGM و توان تابع توزیع خواص P=5 در پنج مود اول ۸۵
شکل ۴-۷ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM در پنج مود اول.۸۶
شکل ۴-۸ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5 در پنج مود اول ۸۷
شکل ۴-۹ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری پانل با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=0.1, 1, 10 در پنج مود اول ۸۷
شکل ۴-۱۰ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته NON-FGM ۸۷
شکل ۴-۱۱ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM در پنج مود اول برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته ۸۹

شکل ۴-۱۲ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=1 در پنج مود اول برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته ۸۹
شکل ۴-۱۳ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=5 در پنج مود اول برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته ۹۰
شکل ۴-۱۴ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات ضریب منظری یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=10 در پنج مود اول برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته..... ۹۰
شکل ۴-۱۵ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM..... ۹۲
شکل ۴-۱۶ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت پانل با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=1, 5, 10 ..... ۹۲
شکل ۴-۱۷ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=0.1, 0.7, 1, 5, 10..... ۹۳
شکل ۴-۱۸ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته NON-FGM..... ۹۳
شکل ۴-۱۹ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM برای نسبت‌های مختلف طول به عرض پانل ۹۴
شکل ۴-۲۰ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5 برای نسبت‌های مختلف طول به عرض پانل..... ۹۵
شکل ۴-۲۱ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=1 برای نسبت‌های مختلف طول به عرض پانل..... ۹۵
شکل ۴-۲۲ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P= 5 برای نسبت‌های مختلف طول به عرض پانل..... ۹۶
شکل۴-۲۳ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=10 برای نسبت‌های مختلف طول به عرض پانل..... ۹۶
شکل ۴-۲۴ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=5 برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته پانل ۹۷
شکل ۴-۲۵ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P= 10 برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته پانل..... ۹۸
شکل ۴-۲۶ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته E-FGM و برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته پانل ۹۸
شکل ۴-۲۷ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت ضخامت یک پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5 برای نسبت‌های مختلف سفتی هسته پانل..... ۹۹
شکل ۴-۲۸ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل‌های ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5, 10 و هسته E-FGM..... ۱۰۰
شکل ۴-۲۹ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل‌های ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=0.1, 0.7, 1, 5, 10..... ۱۰۱
شکل ۴-۳۰ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته E-FGM و نسبت‌های مختلف طول به عرض ۱۰۲
شکل ۴-۳۱ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5 و نسبت‌های مختلف طول به عرض ۱۰۲

شکل ۴-۳۲ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=1 و نسبت‌های مختلف طول به عرض ۱۰۳
شکل ۴-۳۳ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P= 5 و نسبت‌های مختلف طول به عرض ۱۰۳
شکل ۴-۳۴ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=10 و نسبت‌های مختلف طول به عرض ۱۰۴
شکل ۴-۳۵ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل با هسته E-FGM و نسبت‌های مختلف ضخامت ۱۰۴
شکل ۴-۳۶ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته S-FGM و توان توزیع خواص P=5 و نسبت‌های مختلف ضخامت ۱۰۵
شکل ۴-۳۷ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=1 و نسبت‌های مختلف ضخامت ۱۰۵
شکل ۴-۳۸ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P=5 و نسبت‌های مختلف ضخامت ۱۰۶
شکل ۴-۳۹ نمودار بار بی‌بعد کمانش نسبت به تغییرات نسبت مدول الاستیسیته هسته در پانل ساندویچی با هسته P-FGM و توان توزیع خواص P= 10 و نسبت‌های مختلف ضخامت ۱۰۶
شکل ۴-۴۰ شکل مودهای کمانشی دو پانل ساندویچی مربع و مستطیلی منتخب با هسته P-FGM ۱۰۹
شکل ۴-۴۱ پانل‌های ساندویچی (الف) مربعی (ب) مستطیلی با هسته هدفمند نامتقارن پس از مش زدن و اعمال شرایط مرزی و نیرویی ۱۱۱
شکل ۵-۴۲ شکل مود اول پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۲
شکل ۴-۴۳ شکل مود دوم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۲
شکل ۴-۴۴ شکل مود سوم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۲
شکل ۴-۴۵ شکل مود چهارم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۳
شکل ۴-۴۶ شکل مود پنجم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۳
شکل ۴-۴۷ شکل مود ششم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۳
شکل ۴-۴۸ شکل مود هفتم پانل‌های ساندویچی با هسته هدفمند نامتقارن ۱۱۴

فصل اول

ساختار کلی پانل‌های ساندویچی

مقدمه

امروزه صفحات ساندویچی یکی از اجزای اصلی در سازه‌های مورد استفاده در صنایع هوافضا، صنایع دریایی، صنعت حمل و نقل، صنایع بسته‌بندی، مهندسی عمران، عایق‌کاری و غیره می‌باشد. صفحات سبک ساندویچی دارای نسبت استحکام به وزن بالایی هستند. این صفحات معمولاً از دو رویه فلزی و یا کامپوزیتی و یک هسته با چگالی پائین انتخاب می‌شوند. لایه میانی می‌تواند از جنس مواد پلاستیکی متخلخل مثل فوم، مواد لانه زنبوری[1] (۴ ضلعی، ۶ ضلعی یا حتی دایروی) با فویل‌های فلزی با ضخامت پائین، پروفیل‌های جدار نازک جدا از هم که دو لایه بیرونی را به هم متصل می‌کنند و یا ورق‌های موجی شکل با ضخامت پائین باشند.

یکی از اصول اولیه طراحی، مطالعه بارگذاری روی سازه است. یکی از انواع بارگذاری‌های روی این صفحات، بارگذاری عرضی است که می‌تواند منجر به کمانش صفحه ساندویچی گردد. کمانش می‌تواند به صورت سیستم امواجی که به صورت متوالی محدب و مقعرند خود را نشان دهد. جهت، تعداد و مشخصه توزیع این امواج بستگی به ابعاد و شکل ورق و هسته، جنس هسته و ورق، نوع حالت تنش بوجود آمده و همینطور روش اتصال لبه‌های پانل دارد. اگر پانل ساندویچی مورد استفاده مثلا به عنوان سطوح کنترل و یا بال یک جسم پرنده به کار رود، این تحدب و تقعر باعث پائین آمدن کیفیت آیرودینامیکی می‌شود، یا اگر پانل به عنوان دیواره‌ای که باری را تحمل می‌کند به کار رود، کمانش باعث می‌شود بخش زیادی از دیواره در برابر بارگذاری مؤثر نباشد و این بارگذاری اعضای دیگر سازه را بیشتر تحت تأثیر قرار دهد. همچنین در دیواره‌ای که دچار کمانش شده، تنش‌هایی ایجاد می‌شود که اگر به صورت متناوب تکرار شود، باعث ایجاد ترک و شکست می‌گردد. بارگذاری روی پانل را به صورت بارگذاری در واحد طول و عمود بر مقطع عرضی پانل در نظر می‌گیریم. تا زمانی که مقدار بارگذاری کم است پانل در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند و به صورت

[1]. Honeycomb

پایدار فرم سطحی خود را حفظ می‌کند. با افزایش مقدار بارگذاری از مقدار اولیه صفر مقاومت ورق بتدریج کم می‌گردد. بالاخره لحظه‌ای می‌رسد که با کوچک‌ترین تحریکی شکل ورق از حالت مسطح خارج شده و کمانش یا همان ناپایداری ورق در آن اتفاق می‌افتد. تعیین این مقدار بحرانی برای درک زمان کمانش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بنابراین با توجه به اهمیت پدیده کمانش و تأثیر آن روی رفتار سازه، بررسی این پدیده ضروری می‌باشد.

۱-۱ سازه‌های ساندویچی

ایده پانل ساندویچی در طول تاریخ مورد توجه بسیاری از دانشمندان و مخترعان قرار گرفته است. بعضی از نقشه‌های پانل‌های ساندویچی اولیه در بعضی از کارهای لئوناردو داوینچی دیده می‌شود. هرچند اولین فردی که به طور رسمی این ایده را مطرح و ثبت نمود، شخصی فرانسوی به نام دولیو[۱] در سال ۱۸۲۰ و بعد از آن فردی به نام ویلیام فربیرن[۲] در سال ۱۸۴۹ شناخته می‌شود. در سال ۱۹۱۹ اولین پانل ساندویچی با استفاده از پوسته‌هایی از جنس چوب ماهون[۳](به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز) با هسته‌ای از چوب بالسا ساخته شد. در دهه ۱۹۳۰ پانل‌های ساندویچی به تولید انبوه رسیدند. در جنگ‌های جهانی دوم از پانل‌هایی با رویه‌های چند لایه[۴] و هسته بالسا در انواع قسمت‌های سازه هواپیما استفاده شد. در سال ۱۹۴۵ اولین پانل ساندویچی تمام آلومینیومی ساخته شد که از رویه‌های آلومینیومی با هسته‌ای از لانه زنبوری آلومینیومی تشکیل شده بود. نوع کاغذی لانه زنبوری برای ساخت مبلمان در اوایل دهه ۱۹۳۰ توسط صنایع لینکلن به کار رفت. اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ زمان ورود و استفاده از پلی وینیل کلراید (PVC) و پلی

[1]. Duleau

[2]. William Fairbairn

[3]. Mahogany

[4]. Ply wood veneer

اورتان (P.UR) به عنوان هسته پانل ساندویچی می‌باشد. هر چند فوم‌های PVC در دهه ۱۹۶۰ در آلمان تولید شد، ولی به علت نرمی تا زمان مذکور به صورت عموم استفاده نگردیدند.

استفاده از سازه ساندویچی امروزه به شکل گسترده‌ای در صنایع گوناگون مانند انواع هواپیماهای تجاری، هلیکوپترها، موشک‌ها در صنعت هوافضا، انواع قطعات کشتی باری، اتومبیل‌ها، قطارها در صنعت حمل و نقل، در انواع وسایل ورزشی مانند قایق‌ها، چوب‌های اسکی و غیره، به عنوان دکوراسیون پارتیشن‌بنـدی، درب‌ها و کابینت‌ها و غیره رواج بسیار یافته است.

کاربرد ساندویچ‌های کامپوزیتی در هواپیما در قسمت‌های مختلفی می‌تواند باشد. از جمله صفحات کف، سطوح بال، دم و سکان عمودی، درهای محفظه چرخ‌ها، ترمزهای هوایی، قطعات فلپ، دکوراسیون داخلی.

در صنعت هوافضا می‌توان از فرود فضاپیمای آپولو بر روی ماه در سال ۱۹۶۹ به عنوان اولین استفاده از تکنولوژی سازه ساندویچی نام برد. از پانل‌های ساندویچی در پوسته این فضاپیـما استفاده شد. گسترش استفاده از این تکنولوژی از آن زمان تا به حال به گونه‌ای می‌باشد که امروز کمتر وسیله پرنده‌ای از انواع هواپیماهای مسافربری و نظامی تا انواع موشک‌ها، سفینه‌ها را می‌توان یافت که در ساختمان آنها از سازه ساندویچی استفاده نشده باشد.

شاید بتوان علت استفاده روزافزون از این مواد را در استحکام بالا وزن پائین آنها یافت تنوع بالایی که در انواع ساختارهای ساندویچی وجود دارد، خصوصیاتی مانند مقاومت در برابر شکست، مقاومت حرارتی بالا، مقاومت شیمیایی خوب، استحکام خمشی و کششی مناسب، سطوح یکپارچه و صیقلی، عدم نیاز به پرچ‌ها در اتصالات، کاهش نیروی پسا، مقاومت مکانیکی خوب، روش ساخت نسبتا آسان و ارزان و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و گرانقیمت جهت ساخت را قابل دسترس می‌سازد. به عنوان مثال استفاده از سازه‌های ساندویچی در پوسته اجسام پرنده با سرعت‌های بالا را می‌توان ذکر کرد. در اجسام پرنده بر اثرسرعت زیاد، نوعی از بارگذاری روی پوسته ایجاد می‌گردد که همزمان نیاز می‌گردد که برای تحمل بارگذاری، صلبیت پوسته افزایش یابد. چون پروفیل بال در حین پرواز نباید تغییر کند و همچنین در سرعت‌های بالا گرمایش آیرودینامیکی شدید روی سطوح به وجود می‌آید، مجبور می‌شویم از پوسته آلومینیومی استفاده نکنیم و مثلاً

از آلیاژهای تیتان و فولاد استفاده کنیم که با استفاده از این آلیاژها، به علت جلوگیری از افزایش وزن، مجبور به استفاده از ضخامت‌های نازک خواهیم بود که مشکل مقاومت در برابر کمانش ظاهر می‌گردد. برای افزایش پایداری، افزایش صلبیت مورد نیاز است که راه‌حل افزایش ضخامت بدلیل گفته شده مطرود است. راه‌حل تراکم بیشتر تقویت‌کننده‌های طولی[1] نیز، باز مشکل ازدیاد وزن را بوجود می‌آورد. بنابراین راه‌حل‌های سازه‌های ساندویچی می‌تواند راه‌حلی مؤثر باشد.

۱-۲ ساختار کلی سازه‌های ساندویچی

مزایای بسیاری را می‌توان برای انواع کاربردهای یک سازه ساندویچی درنظر گرفت. اما به طور عموم می‌توان گفت اصول کلی حاکم بر سازه‌های ساندویچی با وجود تنوع بالای آنها یکی می‌باشد. این سازه از دو رویه قوی و نازک که یک هسته ضخیم و معمولاً با چگالی پائین را دربرگرفته‌اند به همراه عامل اتصال رویه به هسته تشکیل شده‌اند. [۱] هرچه قطر هسته اضافه گردد، سختی و سفتی کل پانل افزایش می‌یابد. ولی این ازدیاد به هیچ وجه با افزایش وزن پانل که بسیار ناچیز است، قابل قیاس نیست. درواقع وجود هسته باعث بالا رفتن سفتی و سختی سازه به نسبت افزایش وزن می‌گردد. [۲] در تصویر ذیل این مطلب نشان داده شده است.

[1]. Stringer