دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

رساله دکتری

تحلیل دینامیکی صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند تحت ضربه با سرعت پایین و خواص وابسته به دما

استاد راهنما : **پروفسور سید محمد رضا خلیلی**

استاد مشاور : **دکتر کرامت ملک زاده**

تهیه و تنظیم :

یونس محمدی

پاییز ۱۳۹۱

چکیده

در این پژوهش، از یک تئوری مرتبه بالای اصلاح شده صفحات ساندویچی برای تحلیل استاتیکی و همچنین تحلیل ارتعاشات آزاد و ضربه صفحات ساندویچی با رویه‌های هدفمند در شرایط دمایی مختلف استفاده شده است. در این تئوری مرتبه بالا، تنش‌های درون صفحه‌ای هسته که معمولاً در تحلیل سازه‌های ساندویچی از آن‌ها صرفنظر می شود در نظر گرفته شده، و برای رویه‌های هدفمند نیز از تئوری برشی مرتبه اول به جای تئوری کلاسیک استفاده شده است. بعلاوه، تاثیرات غیر خطی دما بر روی پاسخ ارتعاشات آزاد و ضربه صفحات ساندویچی با رویه‌های هدفمند در نظر گرفته شده است. در این تئوری، میدان جابه‌جایی هسته نیز از ابتدا با تغییرات مرتبه دوم و مرتبه سوم در راستای ضخامت در نظر گرفته شده است.

فرض شده است که تمامی خواص مواد رویه‌ها و هسته وابسته به دما باشد و تغییرات خواص رویه‌های هدفمند در راستای ضخامت آن‌ها نیز با توابع توانی و نمایی تعریف شده است. ضمناً، فرض شده است که تغییرات دما تنها در راستای ضخامت رویه‌ها و هسته وجود داشته باشد. در این حالت، توابع توزیع دما در هر یک از رویه‌های هدفمند و هسته با حل یک معادله انتقال حرارت حالت پایدار بدست آمده است.

معادلات حاکم با استفاده از اصل همیلتون بدست آمده و از یک رویکرد جدید برای کاهش معادلات از بیست و هفت معادله به پانزده معادله استفاده شده است. ضمناً، این معادلات برای انواع متقارن و نامتقارن صفحات ساندویچی با رویه‌های هدفمند حل شده است. برای پیش گویی تاریخچه نیروی تماس ناشی از برخورد عرضی شبه استاتیکی توسط ضربه زننده الاستیک، ایزوتروپیک و کروی بر صفحه ساندویچی، از یک مدل جرم و فنر دو درجه آزادی استفاده شده است. در مدل جرم و فنر، ابتدا جرم موثر و سفتی موثر صفحه ساندویچی

در محل تماس به روش تحلیلی محاسبه شده، سپس سفتی تماس اصلاح شده با استفاده از یک روش تکراری بدست آمده است.

در بخش نتایج عددی، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل توزیع دما در رویه‌ها و هسته، کرنش‌های غیر خطی، وابستگی خواص مواد به دما، نسبت پهنا به ضخامت، نسبت ضخامت هسته به ضخامت رویه، نسبت جرم ضربه زننده به جرم صفحه و سرعت ضربه زننده بر پاسخ دینامیکی صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند مطالعه شده است. ضمناً، نتایج تحلیلی یک بار هم با فرض میدان جابه‌جایی کلاسیک (CLPT) برای رویه‌ها بدست آمده و مقایسه نتایج CLPT و FSDT نشان می دهد که با افزایش ضخامت رویه‌های هدفمند، دقت نتایج CLPT نسبت به نتایج FSDT کاهش می‌یابد. صفحه ساندویچی تعریف شده، در نرم افزار ABAQUS نیز مدل سازی شده و سپس نتایج تحلیلی هم با نتایج المان محدود بدست آمده از نرم افزار و هم در حالت‌های خاص با نتایج کار محققین دیگر مقایسه شده است. هماهنگی خوبی (۱) بین نتایج تحلیلی و نتایج بدست آمده از المان محدود و همچنین (۲) بین نتایج تحلیلی و نتایج بدست آمده توسط محققین دیگر مشاهده می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان ***صفحه***

فصل اول: مقدمه و تعاریف

۱-۱ مقدمه‌ای بر سازه های ساندویچی..... ۱

۱-۲ تغییرات خواص مواد با دما..... ۳

۱-۳ مواد هدفمند..... ٤

۱-۳-۱ تغییرات خواص در صفحات هدفمند..... ۷

۱-۱-۳-۱ تابع توانی..... ۷

۱-۱-۳-۲ تابع نمایی..... ۹

۱-٤ تئوری های مختلف برای تحلیل سازه های ساندویچی..... ۱۰

۱-۵ ضربه بر روی سازه های کامپوزیتی و ساندویچی..... ۱۱

۱-۵-۱ مکانیک برخورد..... ۱۲

۱-۵-۲ مدل های ارائه شده برای آنالیز ضربه با سرعت پایین..... ۱۳

۱-۲-۵-۱ مدل بالانس انرژی..... ۱٤

۱-۲-۵-۲ مدل جرم و فنر..... ۱۵

۱-۲-۵-۳ مدل های کامل..... ۱٦

۱-٦ برخی پژوهش های انجام شده در زمینه ارتعاشات آزاد سازه های ساندویچی..... ۱۷

۱-۷ برخی پژوهش های انجام شده در زمینه ضربه بر روی سازه های ساندویچی..... ۱۹

۱-۸ برخی پژوهش های مرتبط با مواد هدفمند و مرتبط با خواص وابسته به دما..... ۲۷

۱-۹ کاستی های موجود در پژوهش های انجام شده..... ۳۳

۱-۱۰ اهداف نهایی مورد نظر در پژوهش حاضر..... ۳٤

فصل دوم: استخراج معادلات حاکم

۲-۱ مقدمه..... ۳۶

۲-۱-۱ فرضیات..... ۳۸

۲-۲ تعیین مولفه‌های جابه‌جایی..... ۳۹

۲-۲-۱ مولفه های جابه‌جایی رویه‌ها..... ۴۰

۲-۲-۲ مولفه های جابه‌جایی هسته..... ۴۱

۲-۳ تعریف روابط کرنش-جابه‌جایی..... ۴۲

۲-۳-۱ روابط کرنش-جابه‌جایی رویه‌ها..... ۴۳

۲-۳-۲ روابط کرنش-جابه‌جایی هسته..... ۴۳

۲-۴ تعریف منتجه‌های تنش و روابط تنش-کرنش..... ۴۴

۲-۴-۱ منتجه‌های تنش در رویه‌ها..... ۴۴

۲-۴-۲ منتجه‌های تنش در هسته..... ۴۷

۲-۵ شرایط سازگاری..... ۴۹

۲-۶ معادلات حاکم..... ۵۰

۲-۶-۱ اصل همیلتون..... ۵۰

۲-۶-۲ محاسبه تغییرات انرژی کرنشی..... ۵۱

۲-۶-۳ محاسبه تغییرات انرژی جنبشی..... ۵۶

۲-۶-۴ محاسبه تغییرات انرژی پتانسیل ناشی از نیروهای خارجی..... ۵۷

۲-۶-۵ استخراج معادلات حاکم..... ۵۸

۱-۵-٦-۲ پنج معادله حاکم بر رویه بالایی.....۵۸

۲-۵-٦-۲ پنج معادله حاکم بر رویه پایینی.....۵۸

۳-۵-٦-۲ یازده معادله حاکم بر هسته.....۵۹

٤-۵-٦-۲ شش معادله سازگاری.....٦۱

فصل سوم: تحلیل ارتعاشات آزاد

۱-۳ تحلیل ارتعاشات آزاد.....٦۲

۱-۱-۳ صفحه ساندویچی با شرایط تکیه‌گاهی ساده.....٦۲

۲-۱-۳ رویکرد جدید برای حل دستگاه معادلات حرکت.....٦۳

۲-۳ نرمالیزه کردن شکل مودها.....٦٦

فصل چهارم: تحلیل استاتیکی و دینامیکی صفحه ساندویچی تحت بارگذاری عرضی

٤-۱ مقدمه.....٦۷

٤-۲ تحلیل استاتیکی بارگذاری عرضی.....٦۸

٤-۳ تحلیل بارگذاری ضربه عرضی.....۷۱

٤-۳-۱ پاسخ دینامیکی سازه تحت بارگذاری ضربه عرضی.....۷۱

فصل پنجم: پیشگویی تاریخچه نیروی تماس

۵-۱ مقدمه.....۷۹

۵-۱-۱ فرضیات.....۷۹

۵-۲ تحلیل استاتیکی برای محاسبه سفتی معادل صفحه ساندویچی k_{bs}.....۸۰

۵-۳ مدل جرم و فنر.....۸۱

۵-۳-۱ معادلات حرکت مدل جرم و فنر دو درجه آزادی.....۸۱

٤-٥ قانون تماس خطی شده.....٨٤
٥-٥ محاسبه تاریخچه نیروی ضربه.....٨٦
١-٥-٥ الگوریتم تکراری برای محاسبه سفتی تماس اصلاح شده.....٨٦

فصل ششم: محاسبه توابع توزیع دما

٦-١ مقدمه.....٨٨
٦-٢ توزیع دما در هسته.....٨٩
٦-٣ توزیع دما در رویه‌ها.....٩٠
٦-٣-١ توزیع خواص در رویه‌های هدفمند.....٩١

فصل هفتم: نتایج و بحث

٧-١ مقدمه.....٩٣
٧-٢ تحلیل ارتعاشات آزاد.....٩٣
٧-٢-١ صحت سنجی مدل موجود.....٩٣
٧-٢-٢ تحلیل ارتعاشات آزاد صفحات ساندویچی با خواص وابسته به دما در دماهای یکنواخت.....٩٩
٧-٢-٢-١ مطالعه اهمیت وابستگی خواص به دما.....١٠١
٧-٢-٢-٢ مطالعه اهمیت جملات غیر خطی کرنش.....١٠٣
٧-٢-٢-٣ مطالعه تاثیر نسبت پهنا به ضخامت.....١٠٦
٧-٢-٢-٤ مطالعه اثر نسبت ضخامت هسته به ضخامت رویه.....١٠٩
٧-٢-٣ تحلیل ارتعاشات آزاد صفحه ساندویچی با خواص وابسته به دما در توزیع دمای واقعی.....١١٠
٧-٢-٣-١ صحت سنجی تحلیل ارتعاشات آزاد.....١١٠

۱-۱-۳-۲-۷ صحت سنجی با نتایج FEM..... ۱۱۱

۲-۱-۳-۲-۷ صحت سنجی با نتایج محققین دیگر..... ۱۱۳

۲-۳-۲-۷ مطالعه تاثیر شرایط دمایی متفاوت..... ۱۱٤

۳-۳-۲-۷ مطالعه تاثیر نسبت پهنا به ضخامت..... ۱۱٦

٤-۳-۲-۷ مطالعه تاثیر نسبت ضخامت‌های هسته به رویه..... ۱۱۸

۵-۳-۲-۷ مقایسه نتایج میدان جابه‌جایی FSDT و CLPT برای رویه ها..... ۱۱۹

٦-۳-۲-۷ تاثیر کرنش‌های غیرخطی رویه‌ها و هسته در تحلیل ارتعاشات آزاد حرارتی..... ۱۲۰

۳-۷ تحلیل ضربه بر روی صفحات ساندویچی با رویه‌های هدفمند..... ۱۲۵

۱-۳-۷ صحت سنجی تحلیل ضربه..... ۱۲۵

۱-۱-۳-۷ مقایسه با نتایج FEM..... ۱۲۵

۲-۱-۳-۷ مقایسه با نتایج محققین دیگر..... ۱۲۹

۲-۳-۷ مطالعه تاثیر شرایط دمایی متفاوت..... ۱۳۰

۳-۳-۷ مطالعه تاثیر نسبت جرم ضربه زننده به جرم صفحه (نسبت جرمی)..... ۱۳٤

٤-۳-۷ مطالعه تاثیر سرعت ضربه زننده..... ۱۳۷

۵-۳-۷ تاثیر کرنش‌های غیرخطی رویه‌ها و هسته در تحلیل حرارتی ضربه..... ۱٤۰

٦-۳-۷ تاثیر مواد تشکیل دهنده رویه‌های هدفمند و هسته..... ۱٤٤

۷-۳-۷ مطالعه تاثیر وابستگی خواص به دما در تحلیل حرارتی ضربه..... ۱٤۷

فصل هشتم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات

۸-۱ نوآوری‌های پژوهش حاضر..... ۱۵٤
۸-۲ خلاصه نتایج و دستاوردهای مهم..... ۱۵۵
۸-۳ پیشنهادات برای ادامه پژوهش حاضر..... ۱۵٦

مراجع..... ۱۵۸

لیست مقالات منتشر شده

فهرست اشکال

شکل **صفحه**

شکل ۱-۱ : تغییرات پیوسته‌ی مواد در بین سطوح مواد هدفمند [٤]..... ٦

شکل ۲-۱ : هندسه یک صفحه هدفمند [٦]..... ۷

شکل ۳-۱: تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت صفحه بر مبنای تابع توانی و بدون وابستگی خواص به دما [٦]..... ۹

شکل ٤-۱ : تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت صفحه بر مبنای تابع s شکل و بدون وابستگی خواص به دما [٦]..... ۱۰

شکل ۵-۱: برخورد دو جسم با شعاع‌های انحناء متفاوت [۲۳]..... ۱۳

شکل ٦-۱: مدل جرم – فنر با دو درجه آزادی..... ۱٦

شکل ۱-۲: هندسه صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند..... ۳۹

شکل ۲-۲: مختصات تعریف شده برای صفحه ساندویچی: (a) نمای صفحه x-z و (b) نمای صفحه y-z..... ٤۰

شکل ۱-۳: مراحل انجام رویکرد جدید جهت کاهش معادلات از ۲۷ معادله به ۱۵ معادله..... ٦٤

شکل ۱-٤: بارگذاری ضربه عرضی اعمال شده بر رویه بالایی صفحه ساندویچی..... ۷۱

شکل ۱-۵: مدل ضربه سرعت پایین..... ۸۰

شکل ۲-۵: مدل جرم و فنر دو درجه آزادی خطی استفاده شده در این پژوهش..... ۸۲

شکل ۱-٦ : شرایط دمایی صفحه ساندویچی..... ۸۸

شکل ۱-۷: نمای دو بعدی از صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند و (a) هسته نرم، (b) هسته سخت..... ۹۵

شکل ۲-۷: نمای دو بعدی از صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند..... ۱۰۰

شکل ۳-۷: تغییرات پارامتر فرکانس بی بعد، $\overline{\omega}$، با دما برای صفحات ساندویچی مربعی ۱-۸-۱؛ (a) خواص وابسته به دما؛ (b) خواص مستقل از دما..... ۱۰۱

شکل ٤-۷: تغییرات پارامتر فرکانس بی بعد، $\overline{\omega}$، با دما برای صفحات ساندویچی مربعی ۱-۱-۱؛ (a) خواص وابسته به دما؛ (b) خواص مستقل از دما..... ۱۰۲

شکل ٥-۷: تغییرات پارامتر فرکانس بی بعد، $\overline{\omega}$، با دما برای صفحات ساندویچی مربعی ۲-۱-۲؛ (a) خواص وابسته به دما؛ (b) خواص مستقل از دما..... ۱۰۲

شکل ٦-۷: تغییرات پارامتر فرکانسی بی بعد با توان تابع توانی در دماهای مختلف برای صفحات ساندویچی مربعی ۱-۸-۱، (a) با و (b) بدون کرنش‌های غیر خطی رویه ها..... ۱۰٤

شکل ۷-۷: تغییرات پارامتر فرکانسی بی بعد با توان تابع توانی در دماهای مختلف برای صفحات ساندویچی مربعی ۱-۱-۱، (a) با و (b) بدون کرنش‌های غیر خطی رویه ها..... ۱۰٥

شکل ۸-۷: تغییرات پارامتر فرکانسی بی بعد با توان تابع توانی در دماهای مختلف برای صفحات ساندویچی مربعی ۲-۱-۲، (a) با و (b) بدون کرنش‌های غیر خطی رویه ها..... ۱۰٥

شکل ۹-۷: پارامتر فرکانسی در برابر نسبت پهنا به ضخامت صفحه ساندویچی مربعی ۱-۸-۱، در توان‌های مختلف تابع توانی..... ۱۰۷

شکل ۱۰-۷: پارامتر فرکانسی در برابر نسبت پهنا به ضخامت صفحه ساندویچی مربعی ۱-۱-۱، در توان‌های مختلف تابع توانی..... ۱۰۷

شکل ۱۱-۷: پارامتر فرکانسی در برابر نسبت پهنا به ضخامت صفحه ساندویچی مربعی ۲-۱-۲، در توان‌های مختلف تابع توانی..... ۱۰۸

شکل ۱۲-۷: پارامتر فرکانسی در برابر نسبت ضخامت هسته به ضخامت رویه، برای صفحات ساندویچی مربعی متقارن در توان‌های تابع توانی مختلف، و $T = 300\mathrm{K}$..... ۱۰۸

شکل ۱۳-۷: مدل سازی و المان بندی صفحه ساندویچی در نرم افزار ABAQUS..... ۱۱۱

شکل ۱٤-۷: شکل مود پایه صفحه ساندویچی در دمای $\mathrm{T_U}$ =۳۰۰K، محاسبه شده توسط نرم افزار ABAQUS..... ۱۱۳

شکل ۱۵–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی در برابر شرایط دمایی مختلف، برای صفحات ساندویچی مربعی (a) ۱–۳–۱، (b) ۲–۱–۲. ($b/h = 10$)..... ۱۱۵

شکل ۱۶–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی در برابر شرایط دمایی مختلف، برای صفحات ساندویچی نا متقارن مربعی. ($b/h = 10$)..... ۱۱۵

شکل ۱۷–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی با نسبت پهنا به ضخامت، برای صفحات ساندویچی مربعی متقارن ۱–۸–۱ و ۲–۱–۲، در دماهای مختلف T_U. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}$)..... ۱۱۷

شکل ۱۸–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی با نسبت پهنا به ضخامت، برای صفحات ساندویچی مربعی نامتقارن ۱–۵–۳، در شرایط دمایی مختلف..... ۱۱۷

شکل ۱۹–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی با نسبت ضخامت هسته–به–ضخامت رویه، در صفحات ساندویچی مربعی متقارن. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 15$)..... ۱۱۹

شکل ۲۰–۷: مقایسه منحنی‌های پارامتر فرکانسی در برابر دمای T_{U}، بین صفحات ساندویچی مربعی ۱–۸–۱ و ۲–۱–۲. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 10$)..... ۱۲۲

شکل ۲۱–۷: تغییرات پارامتر فرکانسی با دمای T_{U}، در صفحات ساندویچی مربعی ۱–۲–۱. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 10$)..... ۱۲۴

شکل ۲۲–۷: مقایسه منحنی‌های پارامتر فرکانسی در برابر دمای T_{U}، بین صفحات ساندویچی مربعی ۱–۵–۳ و ۳–۵–۱. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 10$)..... ۱۲۴

شکل ۲۳–۷: مدل سازی و المان بندی صفحه ساندویچی و ضربه زننده کروی در نرم افزار ABAQUS؛ (a) نمای سه بعدی ضربه زننده و صفحه ساندویچی (b) المان بندی صفحه ساندویچی در ناحیه تماس..... ۱۲۶

شکل ۲۴–۷: مقایسه تاریخچه نیروی ضربه ناشی از برخورد ضربه زننده صلب با سرعت ۱m/s به صفحه ساندویچی..... ۱۲۷

شکل ۲۵–۷: مقایسه نتایج بین روش های مختلف برای ضربه بین یک صفحه ایزوتروپیک و یک ضربه زننده صلب..... ۱۳۰

شکل ۲۶–۷: تاریخچه نیروی ضربه در شرایط دمایی مختلف. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}$)..... ۱۳۱

شکل ۲۷–۷: منحنی سه بعدی تغییرات تاریخچه خیز برحسب دمای سطح برخورد ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}$)..... ۱۳۳

شکل ۲۸–۷: تاریخچه نیروی ضربه در نسبت‌های جرمی مختلف..... ۱۳۵

شکل ۲۹-۷: تغییرات تاریخچه نیروی تماس بر حسب نسبت جرمی..... ۱۳۵

شکل ۳۰-۷: تغییرات (a) حداکثر نیروی تماس و (b) زمان تماس، با نسبت جرم ضربه زننده به جرم صفحه..... ۱۳۶

شکل ۳۱-۷: تاریخچه خیز در نسبت‌های جرمی مختلف..... ۱۳۷

شکل ۳۲-۷: تاریخچه نیروی تماس در سرعت‌های مختلف ضربه زننده..... ۱۳۸

شکل ۳۳-۷: تغییرات ماکزیمم نیروی تماس بر حسب سرعت ضربه زننده..... ۱۳۹

شکل ۳٤-۷: تغییرات تاریخچه خیز برحسب تغییرات سرعت ضربه زننده..... ۱٤۰

شکل ۳۵-۷: تاثیر کرنش‌های غیر خطی بر تاریخچه نیروی تماس و تاریخچه خیز برای صفحه ساندویچی مربعی ۱-۳-۱ در دماهای مختلف. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 40, a = 1m$)..... ۱٤۲

شکل ۳٦-۷: تعریف چهار نوع صفحه ساندویچی با اجزاء تشکیل دهنده متفاوت..... ۱٤۵

شکل ۳۷-۷: تغییرات زمان تماس با دمای سطح برخورد، برای چهار نوع صفحه ساندویچی با رویه‌های هدفمند..... ۱٤۵

شکل ۳۸-۷: تاریخچه نیروی تماس در دماهای مختلف یک بار با خواص مستقل از دما (TI) و بار دیگر با خواص وابسته به دما (TD). ($T_L = 300K$)..... ۱٤۹

شکل ۳۹-۷: تغییرات تاریخچه نیروی تماس بر حسب دمای سطح برخورد، هم با خواص وابسته به دما و هم با خواص مستقل از دما..... ۱٤۹

شکل ٤۰-۷: تغییرات نیروی تماس با خیز در دماهای مختلف سطح برخورد هم با خواص وابسته و هم با خواص مستقل از دما..... ۱۵۱

فهرست جداول

جدول **صفحه**

جدول ۱-۱ : مدول الاستیسیته، Pa ، $E = C_0\left(C_{-1}T^{-1} + 1 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3\right)$ [٤] ۳

جدول ۲-۱: ضریب انبساط حرارتی، $\frac{1}{^0K}$ ، $\alpha = C_0\left(C_{-1}T^{-1} + 1 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3\right)$ [٤] ٤

جدول ۳-۱: ضریب پواسون، $\upsilon = C_0\left(C_{-1}T^{-1} + 1 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3\right)$ [٤] ٤

جدول ٤-۱: مواد هدفمند ساخته شده از دو ماده‌ی فلز و سرامیک [٤] ٥

جدول ۱-۷: صحت سنجی مقادیر پارامترهای فرکانسی بدون بعد برای صفحات ساندویچی مربعی ۲-۱-۲ با هسته سخت..... ۹۷

جدول ۲-۷: صحت سنجی مقادیر پارامترهای فرکانسی بدون بعد برای صفحات ساندویچی مربعی با هسته سخت، $h/b = 0/1$ ۹۷

جدول ۳-۷: صحت سنجی مقادیر پارامترهای فرکانسی بدون بعد برای صفحات ساندویچی با هسته سخت، $h/b = 0/01$ ۹۷

جدول ٤-۷: صحت سنجی مقادیر پارامترهای فرکانسی بدون بعد برای صفحات ساندویچی با هسته نرم، $h/b = 0/01$ ۹۷

جدول ٥-۷: ضرایب مادی سیلیکون نیتراید و فولاد برای وابستگی خواص به دما [٤] ۱۰۰

جدول ٦-۷: تاثیر دما بر روی مقدار مدول الاستیسیته فولاد و سیلیکون نیتراید ۱۰٦

جدول ۷-۷: مقایسه نتایج تحلیلی و عددی برای صفحه ساندویچی هدفمند متقارن و مربعی در شرایط دمایی مختلف. ($T_L = 300K$ ،$a = 25cm$ ،$h_t = 5mm$ و $h_c = 15mm$) ۱۱۲

جدول ۸-۷: مقایسه فرکانس های بی بعد در شرایط دمایی مختلف (m=1)..... ۱۱٤

جدول ۹-۷: مقادیر پارامتر فرکانسی در صفحات ساندویچی مربعی متقارن. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 15$)..... ۱۱۸

جدول ۱۰-۷: مقایسه نتایج میدان جابه‌جایی تئوری برشی مرتبه اول و تئوری کلاسیک برای رویه‌های هدفمند، در تحلیل ارتعاشات آزاد..... ۱۲۰

جدول ۱۱-۷: تاثیر کرنش‌های غیر خطی بر مقدار پارامتر فرکانسی برای انواع صفحات ساندویچی مربعی متقارن ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 10$)..... ۱۲۲

جدول ۱۲-۷: مقادیر حداکثر نیروی تماس و زمان تماس ناشی از برخورد ضربه زننده صلب با سرعت ۱m/s به صفحه ساندویچی..... ۱۲۸

جدول ۱۳-۷: مشخصات ضربه زننده و صفحه..... ۱۲۹

جدول ۱٤-۷: مقادیر حداکثر نیروی تماس و زمان تماس در دماهای مختلف. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}$)..... ۱۳۲

جدول ۱۵-۷: مقدار ایمپالس در دماهای مختلف سطح بالایی. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}$)..... ۱۳۲

جدول ۱٦-۷: مقدار ایمپالس در نسبت‌های جرمی مختلف..... ۱۳٦

جدول ۱۷-۷: مقدار ایمپالس به ازای سرعت‌های مختلف ضربه زننده..... ۱٤۰

جدول ۱۸-۷: تاثیر کرنش‌های غیر خطی بر مقدار پارامترهای مختلف..... ۱٤۲

جدول ۱۹-۷: تاثیر کرنش‌های غیر خطی بر حداکثر نیروی تماس، $F_{\max}$، برای دو نوع صفحه ساندویچی مربعی متقارن. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 40, a = 1m$)..... ۱٤۳

جدول ۲۰-۷: تاثیر کرنش‌های غیر خطی بر زمان تماس، T_{C}، برای دو نوع صفحه ساندویچی مربعی متقارن. ($T_{\mathrm{L}} = 300\mathrm{K}, b/h = 40, a = 1m$)..... ۱٤٤

جدول ۲۱-۷: مقادیر حداکثر نیروی تماس و زمان تماس برای چهار نوع صفحه ساندویچی در دمای $T_U = 400K$..... ۱٤٦

جدول ۲۲-۷: زمان تماس و حداکثر نیروی تماس در دماهای مختلف یک بار با خواص مستقل از دما و بار دیگر با خواص وابسته به دما. ($T_L = 300K$)..... ۱٤۷

جدول ۲۳-۷: کار انجام شده توسط ضربه زننده در دماهای مختلف و با خواص مستقل و وابسته به دما..... ۱۵۱

فهرست علائم

علامت	تعریف
C_0 ، C_{-1} ،C_1 ،C_2 و C_3	ثوابت مادی برای تعریف وابستگی هریک از خواص به دما
h_{t}	ضخامت رویه بالایی
h_{b}	ضخامت رویه پایینی
h_{c}	ضخامت هسته
a و b	طول و عرض صفحه ساندویچی
u_j و v_j $(j = t, b)$	جابه‌جایی‌های درون صفحه‌ای هر نقطه دلخواه از رویه‌ها در جهات x و y
φ_x^j و φ_y^j $(j = t, b)$	چرخش صفحه میانی رویه‌ها حول محورهای y و x (مجهولات دورانی رویه‌ها)
u_c و v_c	جابه‌جایی‌های درون صفحه‌ای هر نقطه دلخواه از هسته به ترتیب در جهات x و y
w_c	جابه‌جایی خارج از صفحه هسته
u_k و v_k $(k = 0,1,2,3)$	هشت ثابت مجهول جابه‌جایی‌های درون صفحه‌ای هسته
w_l $(l = 0,1,2)$	سه ثابت مجهول جابه‌جایی عمودی هسته
ε_{ij}	کرنش‌های خطی
d_{ij}	کرنش‌های غیر خطی
s_{ij}	مولفه‌های کرنش
A_{mn}^j ، D_{mn}^j و B_{mn}^j، $m, n = 1,2,6$ و $j = t, b$	مولفه‌های ماتریس‌های سفتی رویه‌ها
N_{xx}^j ، N_{yy}^j ، M_{xx}^j و M_{yy}^j ، $j = (t, b)$	منتجه‌های تنش و ممان در رویه‌ها
N_{xx}^{Tj} ، N_{yy}^{Tj} ، M_{xx}^{Tj} و M_{yy}^{Tj} ، $j = (t, b)$	منتجه‌های حرارتی تنش و ممان در رویه‌ها
E_t, E_b	مدول الاستیسیته رویه‌ها
ϑ_t, ϑ_b	ضریب پواسون رویه‌ها
α_t, α_b	ضریب انبساط حرارتی رویه‌ها
$R_{xx}^{Tj}, R_{yy}^{Tj}, j = (t, b)$	منتجه‌های مرتبه بالای تنش حرارتی در رویه‌ها
$\sigma_{xx}^{Tj}, \sigma_{yy}^{Tj}, j = (t, b)$	تنش‌های حرارتی رویه‌ها
T_t, T_b	توزیع دما در رویه‌ها
T_c	توزیع دما در هسته
Q_{xc} , M_{Q1xc} , M_{Q2xc} , Q_{yc} , M_{Q1yc} , M_{Q2yc} , R_{zc} , M_{zc}	منتجه‌های تنش مرتبه بالای هسته، ناشی از تنش‌های خارج

	از صفحه‌ی هسته
Q_{xy}^{c} , M_{Q1xy}^{c} , M_{Q2xy}^{c} , M_{Q3xy}^{c} , R_{x}^{c} , M_{x1}^{c} , M_{x2}^{c} , M_{x3}^{c} , R_{y}^{c} , M_{y1}^{c} , M_{y2}^{c} , M_{y3}^{c}	منتجه‌های تنش مرتبه بالای هسته، ناشی از تنش‌های درون صفحه‌ای هسته
E_c	مدول الاستیسیته هسته
G_c	مدول برشی هسته
$, G_{ck}, E_{ck} \quad k = (0,1,2,3,4,5,6)$	پارامترهای تعریف شذه برای محاسبه منتجه‌های تنش مرتبه بالای هسته
M_{cl}^{T} , R_{c}^{T} $(l = 1,2,3)$	
U ، T و V	انرژی کرنشی، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل صفحه ساندویچی
δ	اپراتور تغییرات
t	مختصه‌ی زمان
U_p	انرژی کرنشی مکانیکی
U_T	انرژی کرنشی حرارتی
λ_{xi} ، λ_{yi} و λ_{zi} $(i = t, b)$	ضرایب لاگرانژ
V_t ، V_b و V_{core}	حجم رویه‌های بالایی، پایینی و حجم هسته
σ_{xx}^{jT} , σ_{yy}^{jT} $(j = t, b)$	تنش‌های حرارتی رویه‌ها
σ_{xx}^{cT} , σ_{yy}^{cT} , σ_{zz}^{cT}	تنش‌های حرارتی هسته
ρ_t و ρ_b	چگالی رویه‌های بالایی و پایینی
I_{0t} , I_{1t} , I_{2t} , I_{0b} , I_{1b} , I_{2b}	ممان‌های اینرسی رویه‌ها
I_{0c} , I_{1c} , I_{2c} , I_{3c} , I_{4c} , I_{5c} , I_{6c}	ممان‌های اینرسی هسته
q_t	بار گسترده اعمال شده بر رویه بالایی
C_{uj} ، C_{vj} ، C_{wj} ، $C_{\varphi xj}$ ، $C_{\varphi yj}$ ، C_{uk} ، C_{vk} ، C_{wl} ، $C_{\lambda xj}$ ، $C_{\lambda yj}$ و $C_{\lambda zj}$ $(j = t, b)$	بیست و هفت ثابت مجهول حل سری‌های مثلثاتی
$\mathbf{K_{mn}}$	ماتریس سفتی
$\mathbf{M_{mn}}$	ماتریس جرمی
$\boldsymbol{C_{mn}}$	ثوابت شکل مودها
$\{X\}$	بردار شکل مودهای طبیعی
$\{F_s\}$	بردار نیروهای عرضی استاتیکی
m_I	جرم ضربه زننده
v_0	سرعت ضربه زننده

$\{F_d\}$	بردار توابع تحریک عرضی دینامیکی
ω_{mn}	فرکانس طبیعی پایه صفحه ساندویچی
k_{bs}	سفتی معادل صفحه ساندویچی
w_{bI}	خیز رویه پایینی صفحه ساندویچی در محل برخورد ضربه زننده به صفحه
M_s^*	جرم موثر صفحه ساندویچی
ω_1 و ω_2	فرکانس‌های طبیعی سیستم جرم و فنر
α	فرورفتگی موضعی سازه در نقطه برخورد
E_s و ν_s	مدول الاستیسیته و ضریب پواسون سطحی از سازه که در معرض برخورد قرار دارد
F_m	حداکثر نیروی تماس
k_c^*	سفتی تماس اصلاح شده
T_U	دما در بالاترین سطح صفحه ساندویچی
T_L	دما در پایین‌ترین سطح صفحه ساندویچی
T_{UI}	دما در سطح مشترک رویه بالایی و هسته
T_{LI}	دما در سطح مشترک رویه پایینی و هسته
k_c	ضریب هدایت حرارتی هسته
k_t , k_b	ضریب هدایت حرارتی رویه‌ها

۱-۱ مقدمه‌ای بر سازه‌های ساندویچی

دلیل اصلی استفاده از سازه‌های ساندویچی و کامپوزیت‌های ارتوتروپیک[1] لایه‌ای در صنایع مختلف مانند صنایع هوا-فضا، حمل و نقل دریایی و جاده‌ای، سازه‌های عمرانی و سازه‌های مکانیکی در دهه‌های اخیر وجود نسبت استحکام به وزن نسبتاً بالا و سفتی خمشی بسیار بالای این مواد پیشرفته می‌باشد. به ویژه در زمانی که کاهش وزن اهمیت خاصی داشته باشد، استفاده از این نوع مواد پیشنهاد می شود [۱].

یک نوع از سازه‌های لایه‌ای که بیشترین استفاده را هم در سازه‌های هوافضا، سازه‌های دریایی و هم در سازه‌های عمرانی دارد، سازه ساندویچی می باشد. سازه‌های ساندویچی استاندارد از سه لایه تشکیل شده اند. دو لایه بیرونی آنها صفحات رویی یا رویه‌ها[2] نامیده می شوند که از صفحات نازکی تشکیل شده و با یک لایه میانی که هسته نامیده می شود از هم جدا می‌شوند. در حالیکه رویه‌ها از موادی با استحکام بالا مانند فولاد، آلومینیوم و یا پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف تشکیل شده‌اند اما هسته از موادی با وزن ویژه کم مانند بالسا[3]، لاستیک‌های متخلخل، فوم‌ها، صفحات فلزی کرکره ای و مواد نرم فلزی یا غیر فلزی تشکیل شده است. با توجه به اینکه هسته دارای وزن، سفتی و استحکام کمتری نسبت به رویه‌ها می‌باشد، در پی بدست آوردن موادی با سفتی خمشی بالا همراه با کمترین وزن اضافی و بدست آوردن سطوح آیرودینامیک صاف در محدوده سرعت‌های بالا، سازه‌های ساندویچی اهمیت ویژه ای پیدا کرده اند، چرا که بسیاری از این خصوصیات که در سازه‌های هوافضایی، دریایی، عمرانی و غیره مورد نیاز است را دارا می‌باشند [۲].

[1] Orthotropic
[2] Face sheets
[3] Balsa