بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری

گرایش طراحی کاربردی

عنوان رساله:

تحلیل ارتعاشات اجباری ورق ساندویچی هوشمند با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و خواص وابسته به دما

تدوین:
محسن بت‌شکنان دهکردی

استاد راهنما:
پروفسور سید محمدرضا خلیلی

استاد مشاور:
دکتر محمد شرعیات

شهریور ۱۳۹۲

تقدیم به دو شمع فروزان زندگی

مادر دلسوز و پدر مهربانم

که صادق‌ترین دوستانم بوده‌اند

تائیدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان **تحلیل ارتعاشات اجباری ورق ساندویچی هوشمند با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و خواص وابسته به دما** توسط آقای **محسن بت‌شکنان دهکردی** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی مورد تائید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما	دکتر سید محمد رضا خلیلی	امضاء
۲- ممتحن خارجی	دکتر عباس راستگو	امضاء
۳- ممتحن خارجی	دکتر مجتبی صدیقی	امضاء
۴- ممتحن داخلی	دکتر علی شکوه فر	امضاء
۵- ممتحن داخلی	دکتر علی اصغر جعفری	امضاء
۶-نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر رضا اسلامی فارسانی	امضاء

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه :

تحلیل ارتعاشات اجباری ورق ساندویچی هوشمند با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و خواص وابسته به دما

اساتید راهنما: **دکتر سید محمد رضا خلیلی**

نام دانشجو: **محسن بت‌شکنان دهکردی**

شماره دانشجوئی : **۸۷۰۰۹۲۶**

اینجانب محسن بت‌شکنان دهکردی دانشجوی دوره دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدارک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هر گونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از زحمات فراوان استاد ارجمند جناب آقای پروفسور خلیلی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق همواره با راهنمایی‌ها و یاریهایشان مرا تشویق نمودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. همچنین از سروران بزرگوار دکتر شرعیات، پروفسور کررا، دکتر چینفرا، دکتر محمدی، مهندس افشار رضایی و بقیه دوستانی که در انجام این رساله یار و یاور بنده بودند، کمال تشکر و امتنان را دارم.

چکیده

در این تحقیق تحلیل دینامیکی غیرخطی ورق‌های ساندویچی که رویه‌های آن کامپوزیتی با سیمهای حافظه‌دار می-باشند، با در نظر گرفتن تغییرات لحظه‌ای کسر حجمی مارتنزیتی و خواص مواد در نقاط مختلف سازه به طور پیوسته، بررسی شده است. معادلات سینماتیکی تغییر فاز آلیاژهای حافظه‌دار با معادلات حرکت کوپله بوده که منجر به غیرخطی و پیچیده‌تر شدن معادلات می‌شود. بدین منظور برای حل معادلات، یک روش نموی تکراری بر اساس فرمولاسیون اجزاء محدود گذرای غیرخطی به همراه یک الگوریتم تغییر فاز دینامیکی ارائه شده است. نتایج بیانگر کاهش ارتعاشات سازه می‌باشد که ناشی از استهلاک انرژی به دلیل تغییر فاز سیم‌های حافظه‌دار می‌باشد. برای مدلسازی رفتار شبه‌الاستیک و همچنین اثر حافظه‌داری آلیاژهای حافظه‌دار از مدل برینسون استفاده شده است. در این تحقیق تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های مختلف اعم از تیر کاملا حافظه‌دار، تیر چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار، تیر ساندویچی حافظه‌دار، ورق چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار و نهایتا ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و هسته انعطاف‌پذیر بررسی شده است. برای تحلیل دینامیکی تیر ساندویچی، در ابتدا یک المان مرتبه بالا براساس تئوری مرتبه بالای ساندویچی ارائه شده و سپس با استفاده از این المان فرمولاسیون اجزاء محدود غیرخطی تیر ساندویچی حافظه‌دار انجام شده است. همچنین برای تحلیل ورقهای چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار از فرمولاسیون متحدالشکل ارائه شده توسط کررا استفاده شده است. به عبارتی فرمولاسیون متحدالشکل، یک مدل کلی می‌باشد که قادر به مدلسازی بسیاری از تئوریهای موجود می‌باشد. از آنجایی که در این تحقیق با یک مساله المان محدود گذرای غیرخطی یک ورق چند لایه ساندویچی مواجه هستیم، بنابراین نیاز به یک تئوری می‌باشد که دارای دقت بالا و در عین حال حجم محاسبات پایینی باشد. بدین منظور در این تحقیق در ابتدا یک مدل هیبریدی جدید در چهارچوب کاری متحدالشکل کررا ارائه گردیده است که علیرغم در نظر گرفتن پیوستگی تنشهای عرضی دارای درجات آزادی کمتر (مستقل از تعداد لایه‌ها) و دقت بالایی بوده و سپس با استفاده از این مدل، فرمولاسیون اجزاء محدود غیرخطی ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار انجام شده است. در این راستا اثرات حرارتی و همچنین خواص هسته وابسته به دما نیز در نظر گرفته شده‌اند. به عبارتی با افزایش دما خواص هسته کاهش می‌یابد و باعث کاهش سفتی سازه می‌گردد در صورتیکه آلیاژ حافظه‌دار با افزایش دما به علت تنشهای بازیابی کششی (ناشی از اثر حافظه‌داری) خواصی بر عکس را از خودشان نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از سیم-

های حافظه‌دار در رویه‌های ورق ساندویچی، برای بهبود پاسخ دینامیکی که از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد، استفاده نمود چرا که سفتی سازه ساندویچی عادی با افزایش دما، به علت کاهش خواص هسته کاهش می‌یابد، ولی در صورت استفاده از سیمهای حافظه‌دار می‌توان از این اثرات جلوگیری کرد و برعکس خواص را در دماهای بالا بهبود بخشید.

فهرست مطالب

فصل اول ۲

مقدمه‌ای بر آلیاژهای حافظه‌دار ۲

و سازه‌های ساندویچی ۲

۱-۱- مقدمه‌ای بر آلیاژهای حافظه‌دار ۲

۱-۱-۱- تاریخچه ۲

۱-۱-۲- خواص آلیاژهای حافظه‌دار ۴

۱-۱-۳- بازیابی آزاد و بازیابی مقید ۱۰

۱-۱-۴- اثر حافظه‌داری یک طرفه و دو طرفه ۱۲

۱-۱-۵- مدلهای بنیادین ترمومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار ۱۴

۱-۲- مقدمه‌ای بر سازه‌های ساندویچی ۱۸

فصل دوم ۲۳

مروری بر ادبیات پیشین ۲۳

۲-۱- پیشینه تحقیق مربوط به کامپوزیتهای حافظه‌دار ۲۳

۲-۲- پژوهشهای انجام شده روی ارتعاشات سازه‌های ساندویچی ۳۳

۲-۳- کاستی‌های موجود در پژوهش‌های انجام شده ۴۲

فصل سوم ۴۳

فرمولاسیون متحدالشکل کررا (Carrera's Unified Formulation (CUF ۴۳

۳-۱- فرمولاسیون متحد الشکل کررا ۴۶

۳-۱-۱- فرضیات میدان جابجایی در تئوریهای تک لایه معادل (ESL) ۴۷

۳-۱-۲- فرضیات میدان جابجایی در تئوریهای لایه‌گون (LW) ۴۹

۳-۱-۳- فرضیات تنشهای عرضی در تئوریهای مختلط (Mixed Formulation) ۵۰

۳-۱-۴- فرمولاسیون با متغیر جابجایی (Displacement Formulation) ۵۲

۳-۱-۵- اسمبل کردن سلولهای بنیادین در فرمولاسیون با متغیر جابجایی ۵۵

۳-۱-۶- فرمولاسیون مختلط (Mixed Formulation) ۵۶

۳-۱-۷- اسمبل کردن سلولهای بنیادین در فرمولاسیون مختلط ۶۰

۳-۱-۸- مخفف مدلهای مختلف در فرمولاسیون متحدالشکل ۶۰

فصل چهارم ۶۳

تحلیل دینامیکی غیرخطی تیر ساندویچی با هسته نرم و رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۶۳

۴-۱- استخراج معادلات حاکم تیر ساندویچی با رویههای کامپوزیتی حافظه‌دار ۶۴
۴-۲- فرمولاسیون اجزاء محدود تیر ساندویچی با رویههای کامپوزیتی حافظه‌دار ۷۱
فصل پنجم ۷۴
تحلیل دینامیکی غیرخطی ورق ساندویچی با هسته نرم و رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۷۴
۵-۱-فرمولاسیون غیرخطی ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۷۵
۵-۲- فرمولاسیون هیبریدی لایه‌گون-تکلایه (LW/ESL) ۸۷
۵-۳- روش حل معادلات اجزاء محدود غیرخطی دینامیکی ۹۲
۵-۳-۱- گسسته‌سازی زمانی ۹۲
۵-۳-۲- فرآیند حل به روش نمووی تکراری ۹۳
فصل ششم ۹۶
نتایج و بحث روی آنها ۹۶
۶-۱- تحلیل دینامیکی ورق چندلایه کامپوزیتی حافظه‌دار ۹۷
۶-۲- تحلیل دینامیکی تیر ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۱۰۹
۶-۳- تحلیل دینامیکی ورق ساندویچی با هسته نرم و رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۱۲۱
۶-۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی ورق ساندویچی با هسته نرم و رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار تحت بارهای مکانیکی-حرارتی ۱۳۴
۶-۴-۱- تحلیل دینامیکی ورق چندلایه کامپوزیتی حافظه‌دار تحت بارهای مکانیکی-حرارتی ۱۳۵
۶-۴-۲- تحلیل دینامیکی ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و هسته نرم وابسته به دما تحت بارهای مکانیکی-حرارتی ۱۴۰
۶-۵- ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار و هسته نرم با خواص وابسته به دما ۱۴۹
فصل هفتم ۱۶۳
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۶۳
۷-۴- خلاصه نتایج ۱۶۴
۷-۲- پیشنهادات برای پژوهشهای آتی ۱۶۷
مراجع ۱۶۸
پیوست الف. کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار ۱۷۵
پیوست ب.۱. تئوریهای تک‌لایه معادل ۱۸۰
تئوری کلاسیک ورق (CLPT) ۱۸۰
تئوری برشی مرتبه اول (FSDT) ۱۸۱
تئوری برشی مرتبه سوم (TSDT) ۱۸۳
تئوری مرتبه بالای کانت (Kant) ۱۸۳
تئوری مرتبه بالای کلی ۱۸۴

پیوست ب.۲. تئوریهای لایه مجزا ۱۸۵
تئوری لایه‌گون (Layerwise) ۱۸۵
تئوری مرتبه بالای سازه‌های ساندویچی HSAPT ۱۸۷
پیوست ج ۱۸۸
پیوست د. ۱۹۲

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: انتقال فاز در آلیاژهای حافظه‌دار متاثر از دما بدون نیروی مکانیکی ۴
شکل ۱-۲: شماتیکی از تغییر شکل فازها ۵
شکل ۱-۳: شماتیکی از ایجاد ماتنزیت غیردوقلویی در اثر اعمال بار در پدیده حافظه‌داری ۶
شکل ۱-۴: شماتیکی از باربرداری و گرمایش به فاز آستنیت بدون اعمال نیرو ۶
شکل ۱-۵: نمایی از اثر حافظه‌داری ۶
شکل ۱-۶: عملکرد اثر حافظه‌داری در مجموعه جرم و فنر ۷
شکل ۱-۸: مسیر بارگذاری-باربرداری شبه الاستیک ۸
شکل ۱-۹: دیاگرام تنش-کرنش شبه الاستیک ۸
شکل ۱-۱۰: عملکرد اثر شبه الاستیک در قاب عینک ۹
شکل ۱-۱۱: رفتار ترمومکانیکی آلیاژ حافظه‌دار، از نقطه ۰ تا ۴ اثر حافظه‌داری، از نقطه۵ تا ۱۰ اثر شبه الاستیک ۹
۱-۱۲: نمودار تنش-کرنش در حالت بازیابی آزاد ۱۱
۱-۱۳: نمودار تنش-کرنش در حالت بازیابی مقید ۱۱
۱-۱۴: تغییرات کرنش با دما در حالت بازیابی مقید ۱۱
شکل۱-۱۵: اثر حافظه‌داری یک طرفه ۱۲
شکل ۱-۱۶ : کاربرد اثر حافظه‌داری یک طرفه در پیستون ۱۲
شکل۱-۱۷: اثر حافظه‌داری دو طرفه ۱۳
شکل۱-۱۸: کاربرد اثر حافظه‌داری دو طرفه در یک عملگر شیر ۱۳
شکل ۱-۱۹: نمودار تنشهای بحرانی تبدیل فاز بر حسب دما در مدل تاناکا ۱۵
شکل ۱-۲۰: نمودار تنشهای بحرانی تبدیل فاز بر حسب دما در مدل برینسون ۱۸
شکل ۱-۲۱: شماتیکی از اجزای یک سازه ساندویچی ۱۹
شکل ۲-۱: نمودار تجربی تنشهای بازیابی و مدول یانگ برای آلیاژ (Nitinol) بر حسب دما و پیش کرنشهای اولیه ۲۶
شکل ۳-۱: نمونهای از تغییرات زیگزاگی میدان جابجایی در یک سازه ساندویچی ۴۴
شکل ۳-۲: پیوستگی و ناپیوستگی تنشهای بین لایهای در یک ورق چند لایه ۴۵
شکل ۳-۳: شرایط C_z^0 برای جابجاییها و تنشها در یک ورق سه لایه کامپوزیتی ۴۶
شکل ۳-۴: مختصات و هندسه یک ورق چند لایه ۴۷
شکل ۳-۵: توزیع میدان جابجایی و تنشهای عرضی در راستای ضخامت برای مدل ED2 ..... ۴۸
شکل ۳-۶: توزیع میدان جابجایی و تنشهای عرضی در راستای ضخامت برای مدل LD3 ..... ۵۰
شکل ۳-۷: توزیع میدان جابجایی و تنشهای عرضی در راستای ضخامت برای مدل EM2 ..... ۵۱
شکل ۳-۸: توزیع میدان جابجایی و تنشهای عرضی در راستای ضخامت برای مدل LM2 ..... ۵۲
شکل ۳-۹: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین برای تئوری لایه گون (راست) و تک لایه معادل(چپ) ۵۶
شکل ۳-۱۰: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین $\boldsymbol{K}_{\sigma u}^{ks}$ (راست) و $\boldsymbol{K}_{u\sigma}^{ks}$ (چپ) برای تئوری تک لایه معادل ۶۱
شکل ۴-۱: مشخصات هندسی و دستگاه مختصات برای تیرهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۶۵
شکل ۴-۲: درجات آزادی المان مرتبه بالا برای تیر ساندویچی ۷۲
شکل ۵-۱: مشخصات هندسی و دستگاه مختصات برای ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی حافظه‌دار ۷۶
شکل ۵-۲: نمایی از المان لاگرانژی درجه دو ۷۹

شکل ۵-۳: بسط ماتریس نه سلولی $\boldsymbol{K}_{uu_{mech}}^{k\text{ts}ij}$ ۸۲
شکل ۵-۴: ورق ساندویچی با رویه‌های دو لایه ۸۸
شکل ۵-۵: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین $\boldsymbol{K}_{uu}^{k\text{ts}}$ در فرمولاسیون هیبریدی ۸۹
شکل ۵-۶: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین $\boldsymbol{K}_{u\sigma}^{k\text{ts}}$ در فرمولاسیون هیبریدی ۸۹
شکل ۵-۷: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین $\boldsymbol{K}_{\sigma u}^{k\text{ts}}$ در فرمولاسیون هیبریدی ۹۰
شکل ۵-۸: نحوه اسمبل کردن سلولهای بنیادین $\boldsymbol{K}_{\sigma\sigma}^{k\text{ts}}$ در فرمولاسیون هیبریدی ۹۰
شکل ۵-۹: الگوریتم حل تغییر فاز دینامیکی ۹۴
شکل ۶-۱: تقسیم سطح مقطع تیر حافظه‌دار به چندین زیرلایه ۹۸
شکل ۶-۲: تاریخچه زمانی خیز در وسط تیر حافظه‌دار ۹۹
شکل ۶-۳: حلقه‌های هیسترزیس در وسط لایه بالایی ۱۰۱
شکل ۶-۴: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق با شرایط مرزی ساده a/b=1 و a/h=20 ..... ۱۰۱
شکل ۶-۵: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی با زمان در وسط لایه بالایی ۱۰۲
شکل ۶-۶: کسر حجمی مارتنزیت در نقاط مختلف لایه بالایی ورق در زمان t=0.0035 sec. ۱۰۳
شکل ۶-۷: تغییرات مدول یانگ سیمهای حافظه‌دار با زمان در وسط لایه بالایی ورق ۱۰۴
شکل ۶-۸: مدول یانگ سیمهای حافظه‌دار در نقاط مختلف لایه بالایی ورق در زمان t=0.0035 sec. ۱۰۴
شکل ۶-۹: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق بر حسب مدلهای مختلف با a/b=1 و a/h=20 ..... ۱۰۵
شکل ۶-۱۰: تغییرات ضریب استهلاک با نسبت ضخامت a/h برای a/b=1 ..... ۱۰۶
شکل ۶-۱۱: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق با شرایط مرزی CSCS، a/b=1 و a/h=20 ..... ۱۰۷
شکل ۶-۱۲: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق با شرایط مرزی CCCC، a/b=1 و a/h=20 ..... ۱۰۸
شکل ۶-۱۳: کسر حجمی مارتنزیت در نقاط مختلف لایه بالایی ورق CCCC در زمان t=0.0018 sec. ۱۰۸
شکل ۶-۱۴: تغییرات ضریب استهلاک با نسبت منظر a/b برای a/h=20 ..... ۱۰۹
شکل ۶-۱۵: خیز رویه‌های بالا و پایین در راستای طول تیر ساندویچی ۱۱۱
شکل ۶-۱۶: تاریخچه زمانی خیز مرکز رویه بالایی تیر ساندویچی ۱۱۱
شکل ۶-۱۷: حلقه‌های هیسترزیس در وسط لایه هشتم رویه بالایی تیر ساندویچی ۱۱۲
شکل ۶-۱۸: تاریخچه زمانی خیز مرکز رویه بالایی تیر ساندویچی ۱۱۳
شکل ۶-۱۹: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی با زمان در وسط لایه هشتم رویه بالایی تیر ساندویچی ۱۱۳
شکل ۶-۲۰: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی لایه هشتم رویه بالایی تیر ساندویچی با زمان ۱۱۴
شکل ۶-۲۱: تاریخچه زمانی خیز مرکز رویه بالایی تیر ساندویچی برای موقعیتهای مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۱۴
شکل ۶-۲۲: تاریخچه زمانی خیز در وسط رویه بالایی تحت بار سینوسی (بدون در نظر گرفتن خاصیت سوپرالاستیک) ۱۱۶
شکل ۶-۲۳: تاریخچه زمانی خیز در وسط رویه بالایی تحت بار سینوسی (با در نظر گرفتن خاصیت سوپرالاستیک) ۱۱۶
شکل ۶-۲۴: حلقه‌های هیسترزیس در وسط لایه بالایی تیر چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار ۱۱۷
شکل ۶-۲۵: تاریخچه زمانی خیز در مرکز تیر چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار ۱۱۷
شکل ۶-۲۶: دیاگرام فازی مطابق با نیروی لحظه‌ای در مرکز تیر چند لایه کامپوزیتی حافظه‌دار ۱۱۷
شکل ۶-۲۷: تاریخچه زمانی خیز در مرکز تیر حافظه‌دار ۱۱۸
شکل ۶-۲۸: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی در راستای ضخامت و طول تیر حافظه‌دار در زمان t=0.0043 sec. ۱۱۹
شکل ۶-۲۹: تغییرات تنش در راستای ضخامت در وسط تیر در زمانهای مختلف ۱۱۹

شکل ۶-۳۰: تغییرات خیز بی بعد بر حسب ضخامت با استفاده از LEM4 برای a/h=4 ..... ۱۲۳
شکل ۶-۳۱: تغییرات تنش برشی عرضی بی بعد $\overline{\sigma}_{xz}$ بر حسب ضخامت با استفاده از LEM4 برای a/h=4 ..... ۱۲۳
شکل ۶-۳۲: تغییرات تنش عمودی عرضی بی بعد $\overline{\sigma}_{zz}$ بر حسب ضخامت با استفاده از مدل LEM4 برای a/h=4 ..... ۱۲۳
شکل ۶-۳۳: حلقه‌های هیسترزیس در وسط لایه هشتم رویه بالایی ورق ساندویچی ۱۲۴
شکل ۶-۳۴: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی ۱۲۵
شکل ۶-۳۵: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی با زمان در وسط لایه هشتم رویه بالایی ورق ساندویچی ۱۲۵
شکل ۶-۳۶: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای شدت بارهای لحظه‌ای مختلف ۱۲۶
شکل ۶-۳۷: تغییرات ضریب استهلاک به ازای شدت بارهای لحظه‌ای مختلف ۱۲۶
شکل ۶-۳۸: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای محلهای مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۲۷
شکل ۶-۳۹: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی ۱۲۸
شکل ۶-۴۰: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای کسر حجمی‌های مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۲۸
شکل ۶-۴۱: تغییرات ضریب استهلاک با نسبت کسر حجمی سیمهای حافظه‌دار ۱۲۹
شکل ۶-۴۲: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای کسر حجمی‌های مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۲۹
شکل ۶-۴۳: تغییرات ضریب استهلاک با نسبت منظر a/b ۱۳۰
شکل ۶-۴۴: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای کسر حجمی‌های مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۳۰
شکل ۶-۴۵: تغییرات ضریب استهلاک با نسبت ضخامت رویه‌ها h_f / h ۱۳۱
شکل ۶-۴۶: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای شرایط مرزی مختلف ۱۳۲
شکل ۶-۴۷: کسر حجمی مارتنزیت در نقاط مختلف لایه بالایی ورق CCCC در زمان t=0.0028 sec. ۱۳۲
شکل ۶-۴۸: کسر حجمی مارتنزیت در نقاط مختلف لایه بالایی ورق SSSS در زمان t=0.0042 sec. ۱۳۳
شکل ۶-۴۹: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای E_c / E_1 مختلف ۱۳۳
شکل (۶-۵۰): توزیع دما در راستای ضخامت ورق ساندویچی ۱۳۴
شکل ۶-۵۱: خواص فوم تابعی از دما ۱۳۴
شکل ۶-۵۲: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق به ازای دماهای مختلف در حالت همدما ۱۳۶
شکل ۶-۵۳: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق تحت بار مکانیکی-حرارتی ۱۳۷
شکل ۶-۵۴: حلقه‌های هیسترزیس در وسط لایه بالایی ورق به ازای بارهای مکانیکی-حرارتی با پیش-کرنش ۰/۵ درصد ۱۳۷
شکل ۶-۵۵: تغییرات کسر حجمی مارتنزیتی با زمان در وسط لایه بالایی ورق با پیش-کرنش ۰/۵ درصد ۱۳۷
شکل ۶-۵۶: دیاگرام تبدیل فاز تنش-دما و تنشهای بازیابی به ازای پیش-کرنشهای مختلف ۱۳۸
شکل ۶-۵۷: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق به ازای تغییرات دمایی مختلف و پیش-کرنش ۰/۵ درصد ۱۳۹
شکل ۶-۵۸: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق به ازای پیش-کرنشهای مختلف و تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتیگراد ۱۳۹
شکل ۶-۵۹: تاریخچه زمانی خیز مرکز ورق به ازای کسرحجمی‌های مختلف سیمهای حافظه‌دار، پیش-کرنش ۰/۵ درصد و تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتیگراد ۱۴۰
شکل ۶-۶۰: تاریخچه زمانی خیز سطح بالایی ورق ساندویچی در حالتهای مختلف ۱۴۲
شکل ۶-۶۱: تاریخچه زمانی خیز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای تغییرات دمایی مختلف و پیش-کرنش ۰/۵ درصد ۱۴۳
شکل ۶-۶۲: تغییرات خیز در اولین قله ارتعاشی با تغییرات دما ۱۴۳
شکل ۶-۶۳: تاریخچه زمانی خیز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای پیش-کرنشهای مختلف و تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتیگراد ۱۴۳
شکل ۶-۶۴: تغییرات خیز در اولین قله ارتعاشی با پیش-کرنش با تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتیگراد ۱۴۴
شکل ۶-۶۵: تغییرات تنشهای بازیابی با پیش-کرنش با تغییرات دمایی تا ۵۰ درجه سانتیگراد ۱۴۴

شکل ۶-۶۶: دیاگرام تبدیل فاز تنش-دما و تنشهای بازیابی به ازای پیش-کرنشهای کمتر از ۱ درصد ۱۴۵
شکل ۶-۶۷: دیاگرام تبدیل فاز تنش-دما و تنشهای بازیابی به ازای پیش-کرنشهای بیش از ۱ درصد..... ۱۴۵
شکل ۶-۶۸: تاریخچه زمانی خیز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای توزیع خطی دما در راستای ضخامت هسته..... ۱۴۶
شکل ۶-۶۹: تاریخچه زمانی خیز سطح بالایی ورق ساندویچی بر حسب کسر حجمیهای مختلف سیمهای حافظه‌دار ۱۴۶
شکل ۶-۷۰: تغییرات خیز در اولین قله ارتعاشی با کسرحجمی سیمهای حافظه‌دار ۱۴۶
شکل ۶-۷۱: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای شرایط مرزی SSSS..... ۱۴۸
شکل ۶-۷۲: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای شرایط مرزی CSCS..... ۱۴۸
شکل ۶-۷۳: تاریخچه زمانی خیز مرکز سطح بالایی ورق ساندویچی به ازای شرایط مرزی CCCC ۱۴۸
شکل ۶-۷۴: تغییرات نسبت فرکانس طبیعی اول با نسبت منظر..... ۱۵۱
شکل ۶-۷۵: تغییرات فرکانس طبیعی اول با دما ۱۵۵
شکل ۶-۷۶: توزیع تنشهای بازیابی در نقاط مختلف لایه فوقانی رویه بالایی ۱۵۶
شکل ۶-۷۷: تغییرات نسبت فرکانس طبیعی اول با کسر حجمی سیمهای حافظه‌دار ۱۵۸
شکل ۶-۷۸: تغییرات نسبت فرکانس طبیعی اول با مقدار پیش-کرنش سیمهای حافظه‌دار..... ۱۵۸
شکل (۶-۷۹): تغییرات نسبت فرکانس طبیعی اول و نسبت ضریب استهلاک با دما ۱۶۳
شکل پ-الف۱: استنت های با اندازه های متفاوت ۱۷۵
شکل پ-الف۲: سیم ارتودنسی شبه الاستیک..... ۱۷۶
شکل پ-الف۳: نمونهای از سیمهای حافظه‌دار پیچیده شده با الیاف کولار برای تقویت خسارت سازه..... ۱۷۶
شکل پ-الف۴: استفاده از سیمهای حافظه‌دار برای کنترل شکل بال هواپیما..... ۱۷۷
شکل پ-الف۵: Chevron هواپیمای بوئینگ با هندسه متغیر توسط تسمههای حافظهدار ۱۷۷
شکل پ-ب۱: تغییر شکل های خطوط عمود بر صفحه میانی ورق در تئوری کلاسیک..... ۱۸۰
شکل پ-ب۲: توزیع میدان جابجایی در راستای ضخامت برای تئوری کلاسیک و برشی مرتبه اول..... ۱۸۱
شکل پ-ب۳: توزیع میدان جابجایی و تنش برشی عرضی در راستای ضخامت برای تئوری کلاسیک..... ۱۸۱
شکل پ-ب۴: تغییر شکل های خطوط عمود بر صفحه میانی ورق در تئوری برشی مرتبه اول ۱۸۲
شکل پ-ب۵: توزیع میدان جابجایی و تنش برشی عرضی در راستای ضخامت برای تئوری برشی مرتبه اول ۱۸۲
شکل پ-ب۶: توزیع میدان جابجایی و تنش برشی عرضی در راستای ضخامت برای تئوری برشی مرتبه سوم ۱۸۳
شکل پ-ب۷: نمایش جابجایی و توابع تقریب خطی در تئوری لایهای..... ۱۸۶

فهرست جداول

جدول ۶-۱: خیز بی‌بعد در وسط ورق کامپوزیتی مربعی ۹۸
جدول ۶-۲: مشخصات هندسی و مادی تیر حافظه‌دار ۹۹
جدول ۶-۳: خواص مادی آلیاژ حافظه‌دار ۱۰۰
جدول ۶-۴: ماکزیمم خیز در مرکز ورق به ازای (a/h)های مختلف بر حسب مدلهای گوناگون ۱۰۵
جدول ۶-۵: شدت بار و مدل مناسب برای نسبت منظرهای مختلف با a/h=20 ..... ۱۰۸
جدول ۶-۶: مقایسه پنج فرکانس ضدمتقارن اول تیر ساندویچی با هسته نرم با نتایج آزمایشگاهی ۱۱۰
جدول ۶-۷: خواص کامپوزیت پایه رویه‌های تیر ساندویچی ۱۱۲
جدول ۶-۸: خواص هندسی و فیزیکی رویه‌های ورق ساندویچی ۱۲۱
جدول ۶-۹: خواص هندسی و فیزیکی هسته ورق ساندویچی ۱۲۱
جدول ۶-۱۰: خیز بی بعد در مرکز ورق به ازای a/hهای مختلف ۱۲۲
جدول ۶-۱۱: شدت بار برای نسبت منظرهای مختلف با $h_f / h = 0.1875$ ۱۲۹
جدول ۶-۱۲: شدت بار برای نسبت ضخامت رویه‌های مختلف با a/b=0.6 ..... ۱۳۰
جدول ۶-۱۳: خواص ورق ساندویچی ۱۴۹
جدول ۶-۱۴: فرکانسهای بی بعد ($\hat{\omega}_n = 100\omega_n a\sqrt{E_1^f / \rho^c}$) برای ورق ساندویچی مربعی با $h_f / h = 0.1$ ۱۵۰
جدول ۶-۱۵: خواص مواد کامپوزیت و سیمهای حافظه‌دار ۱۵۱
جدول ۶-۱۶: شش فرکانس طبیعی اول برای ورق مربعی ساندویچی حافظهدار بر حسب دما با $h_f / h = 0.1, e_0 = 0.5\%$ ۱۵۳
جدول ۶-۱۷: فرکانس طبیعی برای ورق مربعی ساندویچی حافظه‌دار با تغییرات خطی دما $a/h = 20, h_f / h = 0.1, e_0 = 0.5\%$ ۱۵۵
جدول ۶-۱۸: فرکانس طبیعی برای ورق مربعی ساندویچی حافظه‌دار بر اساس نوع تنشهای بازیابی $a/h = 20, h_f / h = 0.1, e_0 = 0.5\%$ ۱۵۶
جدول ۶-۱۹: فرکانس طبیعی ورق مربعی ساندویچی حافظه‌دار بر حسب کسر حجمی سیمهای حافظه‌دار $h_f / h = 0.1, e_0 = 0.5\%$ ۱۵۷
جدول ۶-۲۰: فرکانس طبیعی ورق مربعی ساندویچی حافظهدار بر حسب پیش-کرنش سیمهای حافظهدار $h_f / h = 0.1, V_s = 40\%$ ۱۵۹
جدول ۶-۲۱: اثر شرایط مرزی روی فرکانس طبیعی ورق ساندویچی حافظه‌دار $h_f / h = 0.1, V_s = 40\%$ ۱۵۹
جدول ۶-۲۲: خواص ورق ساندویچی ۱۶۱
جدول ۶-۲۳: فرکانسهای طبیعی و ضرایب استهلاک ورق ساندویچی ۱۶۱
جدول ۶-۲۴: فرکانس طبیعی و ضریب استهلاک ورق مربعی ساندویچی حافظهدار با هسته ویسکوالاستیک وابسته به دما $h_f / h = 0.1, V_s = 40\%, e0 = 0.5\%$ ۱۶۲

فهرست علائم

دمای شروع آستنیتی	A_s
دمای پایان آستنیتی	A_f
سفتی کششی	A^j
دامنه ضخامت	A_k
طول ورق	a
سفتی کوپلینگ	B^j
عرض ورق	b
اندیس بیانگر پایین (bottom)	$_b$
ضخامت هسته	C
ضریب نفوذ فاز آستنیت	C_A
ضریب نفوذ فاز مارتنزیت	C_M
ماتریسهای سفتی لایه kام	$\boldsymbol{C}_{ij}^k$
سفتی خمشی	D^j
اپراتور دیفرانسیلی	$\boldsymbol{D}_p$
مدول یانگ	E
مدول یانگ فاز آستنیت	E_A
مدول یانگ فاز مارتنزیت	E_M
مدول یانگ هسته	E_c
انتگرال‌گیری توابع ضخامت	E_{ts}
تابع ضخامت	F_τ
بردار نیروی المانی	$\{F^e\}$
مدول برشی	G_c
ضخامت رویه بالا	h_t
ضخامت رویه پایین	h_b
ماتریس سفتی المانی	$[K^e]$
ماتریس سفتی ناشی از اثرات غیرخطی حرارتی	$\boldsymbol{K}_{uu_{nl\theta}}^{kts ij}$
ماتریس سفتی ناشی از تنشهای مکانیکی	$\boldsymbol{K}_{uu_{mech}}^{kts ij}$
ماتریس سفتی ناشی از اثرات غیرخطی تغییر فاز	$\boldsymbol{K}_{uu_{nlSMA}}^{kts ij}$
ماتریس سفتی لایه kام	$\boldsymbol{K}_{u\sigma}^{kts}$
ماتریس سفتی لایه kام	$\boldsymbol{K}_{uu}^{kts}$
اندیس بیانگر لایه kام	k
کسر حجمی سیمهای حافظه‌دار	k_s
کسر حجمی کامپوزیت پایه	k_c

طول تیر	L
کار ناشی از تنشهای مکانیکی	$L_{\text{int}\,M}$
کار ناشی از تنشهای حرارتی	$L_{\text{int}\,T}$
کار ناشی از تغییر فاز در سیمهای حافظه‌دار	$L_{\text{int}\,SMA}$
کار نیروهای خارجی لایه kام	L_e^k
کار نیروهای خارجی	L_{ext}
کار نیروهای اینرسی لایه kام	L_{in}^k
طول المان	l_e
ماتریس جرمی المانی	$\left[M^e\right]$
ماتریس جرمی لایه kام	$\boldsymbol{M}_{uu}^{k\,ts}$
منتجه‌های ممان	M_{xx}^{j}
دمای شروع مارتنزیتی	M_s
دمای پایان مارتنزیتی	M_f
جرم بر طول واحد هسته	m_c
منتجه‌های تنش	N_{xx}^{j}
تعداد لایه‌ها	N_l
توابع شکل لاگرانژی درجه دو	N_i
بردار نیروهای ناشی از اثرات حرارتی	$\boldsymbol{P}_{u\theta}^k$
بردار نیروهای ناشی از اثرات تغییر فاز	$\boldsymbol{P}_{sma}^k$
بردار نیروهای خارجی	$\boldsymbol{p}_{us}^k$
چند جمله‌ای لژاندر	P_n
بردار جابجائیهای گرهی	$\mathbf{q}_{\bar{\tau}i}^k$
دما	T
اندیس بیانگر بالا (top)	t
انرژی پتانسیل داخلی	U
بردار درجات آزادی جابجایی	$\boldsymbol{u}_{\tau}^k$
جابجایی در راستای x	u
انرژی پتانسیل خارجی	V
جابجایی در راستای y	v
جابجایی در راستای z	w
بردار جابجائیهای گرهی	Δ^e
اختلاف دما	$\boldsymbol{\theta}$
ضرایب انبساط حرارتی لایه kام	α_i^k
سفتی ناشی از ضرایب انبساط حرارتی لایه kام	$\boldsymbol{\lambda}_i^k$
مختصاتهای محلی	η, ζ

کرنشهای درون صفحه‌ای غیرخطی	$\boldsymbol{\varepsilon}_{pG_{nl}}^{k}$
پارامتر مربوط به اثرات تغییر فاز	$\boldsymbol{\kappa}^{k}$
پیش‌کرنش اولیه	ε_0
ضرایب انتگرال‌گیری در حوزه زمانی در روش نیومارک	α, γ
تنش	σ
کرنش	ε
ثابت ترموالاستیک	ϑ
ثابت تبدیل فاز	Ω
کسر حجمی مارتنزیتی	ξ
ماکزیمم کرنش برگشت پذیر آلیاژ حافظه‌دار	ε_L
کسر حجمی مارتنزیت ناشی از دما	ξ_T
کسر حجمی مارتنزیت ناشی از تنش	ξ_s
تنش بحرانی برای شروع مارتنزیت غیردوقلویی	σ_s^{cr}
تنش بحرانی پایان مارتنزیت غیردوقلویی	σ_f^{cr}
تنشهای درون صفحه‌ای	$\boldsymbol{\sigma}_p$
تنشهای عرضی عمود بر صفحه	$\boldsymbol{\sigma}_n$
اپراتور تغییراتی	δ
مختصات بی‌بعد محلی	ζ_k
چگالی لایه kام	ρ^k
تنش عمودی عرضی هسته	σ_{zz}^c
کرنش عمودی عرضی هسته	ε_{zz}^c
تنش برشی عرضی هسته	τ_{xz}^c
کرنش برشی عرضی هسته	γ_{xz}^c
پارامتر مربوط به تغییر فاز سیمهای حافظه‌دار	χ_s
توابع شکل لاگرانژی مرتبه دو	ψ_i
توابع شکل هرمیتی مکعبی	ϕ_i