دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید

بررسی تغییر شکل ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار با آلیاژ حافظه-دار

مهدی انصاری

استاد راهنمای اول

دکتر محمد گلزار

استاد راهنمای دوم

دکتر امیر حسین بهروش

بهمن ۹۱

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای مهدی انصاری پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان **تغییر شکل ورق های کامپوزیتی موج دار با آلیاژ های حافظه دار** در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت وتولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمد گلزار	دانشیار	
استاد راهنمای دوم	دکتر امیر حسین بهروش	دانشیار	غایب
استاد ناظر	دکتر مجتبی قدسی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدحسین صبور	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مجتبی قدسی	استادیار	

آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلا به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمد گلزار و جناب آقای دکتر امیرحسین بهروش از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مهدی انصاری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: مهدی انصاری

تاریخ و امضا

92.01.20

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب مهدی انصاری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۹-۹۰ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم.»

امضا:

تاریخ:

92.01.20

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

سپاس‌گزاری

سپاس خدایی را که در این راه توفیق تلاش در شکست و صبر در نومیدی را به من آموخت. به مصداق «مَن لَم یَشکُرِ المُنعِمَ مِنَ المَخلوقینَ لَم یَشکُرِ اللّه‌عَزَّوَجَلَّ» بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر محمد گلزار و امیر حسین بهروش که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم. لازم است از تمام اساتید گروه ساخت و تولید که در این مدت در خدمتشان بوده‌ام تشکر نمایم.

همچنین از تمامی دانشجویان آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس آقایان مهندس پویان قابضی، سید مجید مولایی، مهرداد توتونچی زاده، حمید جعفری، پیمان شاهی به خاطر کمک‌هایشان سپاسگزاری می‌نمایم. لازم میدانم از دوستان عزیزم آقایان مهندس نبی مهری خوانساری، عباس رضایی و هادی فتاحی نیز که همواره مشوق من در انجام این پایان نامه بوده‌اند سپاسگزاری نمایم. شایسته است از تمامی دوستان واحد ۲۷۰ خوابگاه مدرس که در مدت انجام پایان‌نامه به این‌جانب کمک نموده‌اند سپاسگزاری نمایم.

مهدی انصاری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک

دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این پژوهش تغییر شکل ورق کامپوزیتی موج‌دار بوسیله‌ی آلیاژ حافظه‌دار مورد بررسی شده است. ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار به واسطه درجه ناهمسانگردی بالا، قابلیت استفاده در سازه‌های مورفینگ را دارا می‌باشند. همچنین آلیاژ حافظه‌دار در بین مواد هوشمند، جزو مواد با قابلیت ایجاد تنش و کرنش بالا می‌باشند. بنابراین در این پایان‌نامه از آلیاژ حافظه‌دار به منظور تغییر شکل ورق کامپوزیتی موج‌دار در راستای انعطاف‌پذیر این ورق‌ها استفاده شده است.

پیش از بکارگیری آلیاژ حافظه‌دار، ابتدا آلیاژها در تنش‌های مختلف آموزش داده شدند و سپس کرنش بازیابی آلیاژها در تنش‌های کمتر و بیشتر از تنش آموزش مطالعه شد. نتایج نشان دهنده آن است که با افزایش تنش آموزش توانایی آلیاژ در بازیابی کرنش افزایش می‌یابد. همچنین تنش آموزش در عملکرد آلیاژ در تنش‌های کم بسیار تاثیرگذار می‌باشد؛ در حالی که در تنش‌های بالاتر از MPa ۱۰۰، عملکرد آلیاژ حافظه‌دار مستقل از تنش آموزش می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌های تجربی نشانگر بروز رفتار ناپایدار در تنش‌های آموزش ۱۸۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

در ادامه، سیم آلیاژ حافظه‌دار بر روی سطح تیر موج‌دار کامپوزیتی ساخته شده از جنس شیشه-اپوکسی قرار داده شد. پس از تحریک آلیاژ حافظه‌دار بوسیله منبع تغذیه، تیر دچار تغییر شکل شد و با قطع جریان الکتریکی تیر به به وضعیت اولیه خود بازگشت. در پایان نتایج آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشانگر آن است که با توجه به پیچیدگی رفتار آلیاژ حافظه‌دار و تاثیر پذیری این رفتار از تنش آموزش، به منظور تطابق نتایج تجربی و مدل‌سازی لازم است که اصلاحاتی در مدل برینسون داده شود.

در پایان به منظور نزدیک کردن نتایج این پایان‌نامه به کاربردهای واقعی، یک نمونه ایرفویل با پوسته کامپوزیتی موج‌دار ساخته شد. ایرفویل ساخته شده توانایی این را دارد که در شرایط مختلف انحناءهای مختلفی را داشته باشد.

واژگان کلیدی: ورق کامپوزیتی موج‌دار، آلیاژ حافظه‌دار، سازه‌های مورفینگ، مدل برینسون.

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه
فصل ۱ : مقدمهای بر مواد و سازههای هوشمند..... ۹
فصل ۲ : مروری بر پژوهشهای پیشین ۱۷
۲-۱- مروری بر پژوهشهای پیشین ۱۸
۲-۲- اهداف پایان نامه ۲۳
۲-۳- ساختار پایان نامه ۲۵
فصل ۳ : آلیاژهای حافظهدار و ورقهای کامپوزیتی موجدار..... ۲۷
مقدمه..... ۲۸
۳-۱- ورقهای کامپوزیتی موجدار..... ۲۹
۳-۲- تاریخچه آلیاژ حافظه دار..... ۳۰
۳-۳- اساس پدیده حافظه داری ۳۱
۳-۳-۲- اثر حافظه داری یک طرفه ۳۳
۳-۳-۳- خاصیت حافظهداری دوطرفه ۳۳
۳-۳-۴- خاصیت فوق کشسان ۳۵
۳-۴- انواع آلیاژهای حافظهدار ۳۷
۳-۵- مدلسازی رفتار آلیاژ حافظهدار..... ۴۰
فصل ۴ : مواد و تجهیزات آزمایش ۴۷
مقدمه..... ۴۸
۴-۱- خواص آلیاژ حافظهدار..... ۴۸
۴-۲- نمونههای کامپوزیتی موجدرا..... ۵۲
۴-۲-۱- ساخت نمونههای کامپوزیتی..... ۵۲
۴-۳- وسایل اندازهگیری و تجهیزات الکترونیکی ۵۸
۴-۳-۱- سنسور جابجایی ۵۹
۴-۳-۲- لودسل..... ۵۹
۴-۳-۳- ترموکوپل ۶۱
۴-۳-۴- سنسور جریان الکتریکی..... ۶۲
۴-۳-۵- منبع تغذیه ۶۲
۴-۳-۶- مبدل آنالوگ به دیجیتال ۶۳
۴-۳-۷- نرم افزار پردازش اطلاعات..... ۶۸
فصل ۵ : آموزش آلیاژ حافظهدار ۷۱
مقدمه..... ۷۲

۵-۱- آموزش آلیاژ تحت بار ثابت ۷۲
۵-۲- پاسخ آلیاژهای آموزش داده شده به بارهای کمتر و بیشتر از بار آموزشی ۷۶
۵-۲-۲- تاثیر آموزش در ایجاد خاصیت حافظهداری دوراهه ۷۹
۵-۲-۳- تاثیر آموزش در بروز ناپایداری ۸۲
۵-۲-۴- تاثیر تنش آموزش در عملکرد آلیاژ حافظهدار ۸۵
۵-۲-۵- تاثیر کرنش فازهای آستنیتی و مارتنزیتی در کرنش نهایی آلیاژ حافظهدار ۸۵
۵-۲-۶- تاثیر افزایش بیش از حد دمای آلیاژ حافظهدار ۸۷
فصل ۶ : بررسی تحلیلی و تجربی تغییر شکل تیر هوشمند تحریک شده با *SMAw* ۸۹
مقدمه ۹۰
۶-۱- تحلیل غیر خطی تغییر شکل تیر کامپوزیتی موجدار بوسیلهی آلیاژ حافظهدار ۹۰
۶-۲- شبیه سازی تغییر شکل تیر بوسیلهی مدل برینسون ۹۲
۶-۳- بررسی معادلهی انتقال حرارت سیم حافظهدار ۹۵
۶-۴- آزماشهای تجربی ۱۰۲
فصل ۷ : تغییر ایرفول ساخته شده از پوسته کامپوزیتی موجدار بوسیله *SMAw* ۱۱۲
مقدمه ۱۱۳
۷-۱- اهمیت بالهای مورفینگ ۱۱۳
۷-۲- ساخت بال کامپوزیتی موجدار ۱۱۶
۷-۳- تغییر ضخامت ایرفویل با استفاده از آلیاژ حافظهدار ۱۱۸
فصل ۸ : نتایج و پیشنهادها ۱۲۱
۸-۱- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۲
۸-۲- پیشنهادهایی برای ادامهی کار ۱۲۴

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه
شکل ۱-۱ : حالتهای مختلف پرواز هواپیما [۳]..... ۱۰
شکل ۱-۲ : رابطه تغییر بال پرندگان و سرعت پرواز آنها[۳]..... ۱۱
شکل ۱-۳ : تغییر شکل بال هواپیمای بدون سرنشین[۴]..... ۱۱
شکل ۱-۴ : روند توسعه مواد در صنعت هواپیما [۵]..... ۱۲
شکل ۱-۵ : حالتهای مختلف ورق کامپوزیتی دوپایا. (A) حالت اولیه؛ پس از خارج کردن از فریزر در دمای ۷۰- درجهی سانتیگراد. (B) حالت نهایی؛ در دمای اتاق..... ۱۳
شکل ۱-۶ : ورقهای کامپوزیتی دوپایا. (A) تغییر شکل ورقهای دوپایا با لایه چینی متفاوت [۸]. (B) تحریک ورقهای دوپایا به وسیلهی پیزوفیلم [۹]. (C) تحریک ورقهای دوپایا از طریق آلیاژ حافظهدار [۷]..... ۱۴
شکل ۱-۷ : کاربرد ورقهای موجدار در بال هواپیما [۱۰, ۱۱] ۱۵
شکل ۱-۸ : استفاده از پیزوالکتریک و آلیاژ حافظهدار در سطوح کنترلی بال هواپیما [۱۲]..... ۱۵
شکل ۲-۱ : حالتهای مختلف تحریک سازهها بوسیله آلیاژ حافظهدار [۱۵]..... ۱۹
شکل ۳-۱ : اثر حافظهداری یک طرفه در یک سیم آلیاژ حافظهدار ۲۸
شکل ۳-۲ : ابعاد ورق کامپوزیتی موجدار ذوزنقهای به همراه یک جزء آن ۲۹
شکل ۳-۳ : تاریخچه کشف آلیاژ حافظهدار [۵۷]..... ۳۱
شکل ۳-۴ : تغییرات درصد مارتنزیت برحسب دما در فرایند سرمایش و گرمایش..... ۳۲
شکل ۳-۵ : خاصیت حافظهداری یک طرفه در آلیاژهای حافظهدار [۱۲]..... ۳۳
شکل ۳-۶ : شماتیک اثر حافظهداری یکجهته و دوجهته [۶۴]..... ۳۴
شکل ۳-۷ : ایجاد خاصیت حافظهداری دوطرفه در یک آلیاژ یک طرفه [۵]..... ۳۵
شکل ۳-۸ : خاصیت فوق کشسان در آلیاژ حافظهدار [۱۲]..... ۳۶
شکل ۳-۹ : مقایسه سه خاصیت فوق کشسان، فوق پلاستیک و حافظهداری [۷۱]. ۳۷
شکل ۳-۱۰ : دیاگرام چگالی انرژی تحریک بر حسب تنش و کرنش تحریک مواد هوشمند دو طرفه [۷۶, ۷۷] ۳۹

شکل ۳-۱۱ :دیاگرام دانسیته انرژی تحریک مخصوص برحسب فرکانس تحریک دستهای از مواد هوشمند دوطرفه [۷۶, ۷۷]. ۳۹
شکل ۳-۱۲ : نمودار فازی آلیاژ حافظهدار و بخشهای مختلف آن ۴۲
شکل ۳-۱۳ : رابطه بین سه فاز و شش استحاله در آلیاژهای حافظهدار. زیر نویس I,K مربوط به فاز مارتنزیت با واریانتهای مختلف میباشد [۹۲]. ۴۳
شکل ۳-۱۴ : تغییر ساختار کریستالی آلیاژ حافظهدار در استحالههای مختلف [۹۲]. ۴۴
شکل ۴-۱ : آزمایش گرماسنج روبشی تفاضلی در چرخه گرمایش ۵۰
شکل ۴-۲ : آزمایش گرماسنج روبشی تفاضلی در چرخه سرمایش ۵۱
شکل ۴-۳ : تصویری از جزئیات روش دستی در ساخت قطعات کامپوزیتی [۹۵]. ۵۳
شکل ۴-۴ : الیاف شیشه مورد استفاده در ساخت قطعات کامپوزیتی ۵۴
شکل ۴-۵ : مشخصات هندسی قالب ۵۴
شکل ۴-۶ : شابلون با هندسه ذوزنقهای و دستگاه برش لیزر ۵۵
شکل ۴-۷ : تصویری از آماده سازی قالب اسفنجی ۵۶
شکل ۴-۸ : نمونههای کامپوزیتی موجدار ساخته شده ۵۷
شکل ۴-۹ : سنسور جابجایی ۵۹
شکل ۴-۱۰ : تصویر نیرو سنج ۶۰
شکل ۴-۱۱ : گیره نگهدارنده نیروسنج ۶۱
شکل ۴-۱۲ : تصویر ترموکوپل مورد استفاده ۶۱
شکل ۴-۱۳ : سنسور جریان ۶۲
شکل ۴-۱۴ : منبع تغذیه ۶۳
شکل ۴-۱۵ : مبدل آنالوگ به دیجیتال ۶۳
شکل ۴-۱۶ : بلوک دیاگرام مبدل آنالوگ به دیجیتال ۶۵
شکل ۴-۱۷ : پنلهای راست و چپ مبدل ۶۶
شکل ۴-۱۸ : محیط نرم افزار لبویو- قسمت کالیبره کرده دادهها و اجرای برنامه ۶۹
شکل ۴-۱۹ : قسمتهای مربوط به کالیبره کرده خروجی سنسورها ۶۹
شکل ۴-۲۰ : محیط نرم افزار لبویو- نمایش رابطه دما-زمان، جریان-زمان ، جابجایی-زمان و نیرو-زمان ۷۰

شکل ۴-۲۱ : محیط نرمافزار لبویو- نمایش رابطه دوگانه فاکتورهای جابجایی، نیرو، جریان و دما..... ۷۰
شکل ۵-۱ : گیره نگهدارنده سیم هوشمند..... ۷۳
شکل ۵-۲ : آموزَش آلیاژ حافظهدار: (A) آلیاژ در فاز مارتنزیت. (B)آلیاژ در فاز آستنیت..... ۷۳
شکل ۵-۳ : رابطه کرنش بازیابی در چرخههای مختلف..... ۷۴
شکل ۵-۴ : رابطه تنش آموزش و کرنش بازیابی در چرخه ۶۰ام..... ۷۵
شکل ۵-۵ : کرنش بازگردانی آلیاژهای آموزش دیده شده در تنشهای کمتر از تنش آموزش (ادامه در صفحه بعد)..... ۷۷
شکل ۵-۵: کرنش بازگردانی آلیاژهای آموزش دیده شده در تنشهای کمتر از تنش آموزش (ادامه در صفحه قبل)..... ۷۸
شکل ۵-۶ : رابطه بین کرنش بازیابی و تنش برای تمام نمونههای آموزش دیده شده..... ۸۰
شکل ۵-۷ : رابطه آلیاژ حافظهدار در دیاگرام فازی..... ۸۱
شکل ۵-۸ : رابطه تنش آموزش بر حسب کرنش بازیابی و تنش آستانه بروز کرنش در سیم..... ۸۱
شکل ۵-۹ : مقایسه کرنش بازیابی آلیاژ آموزش دیده تحت تنش MPa ۱۸۰ در چرخههای مختلف با تعدادی دیگری از آزمایشها..... ۸۳
شکل ۵-۱۰ : رابطه کرنش بازیابی و تنش. آموزش در تنش MPa ۱۸۰ به تعداد ۶۰ چرخه..... ۸۴
شکل ۵-۱۱ : رابطه کرنش بازیابی و تنش. آموزش در تنش MPa ۱۸۰ به تعداد ۳۰ چرخه..... ۸۴
شکل ۵-۱۲ : تغییر طول آلیاژ حافظهدار در تنشهای مختلف برای آلیاژ آموزش دیده در تنش MPa ۳۰..... ۸۶
شکل ۵-۱۳ : تغییر طول آلیاژ حافظهدار در تنشهای مختلف برای آلیاژ آموزش دیده در تنش MPa ۱۰۰..... ۸۶
شکل ۵-۱۴ : نمودار تغییرات طول آلیاژ حافظهدار بر حسب تنش برای نمونهی آموزش دیده تحت تنش MPa ۱۸۰..... ۸۷
شکل ۵-۱۵ : رابطهی کرنش بازیابی بر حسب تنش برای آلیاژ آموزش دیده تحت تنش MPa ۱۸۰..... ۸۸
شکل ۶-۱ : A تیر موجدار. B تیر تخت معادل سازی شده با تیر موجدار..... ۹۰
شکل ۶-۲ : تیر یکسر گیردار تحریک شده به وسیلهی آلیاژ حافظهدار..... ۹۲
شکل ۶-۳ : شبیهسازی رابطه تنش – دمای عملگر آلیاژ حافظهدار بکار رفته در تیر کامپوزیتی موجدار..... ۹۳
شکل ۶-۴ : شبیهسازی رابطه تنش – دمای آلیاژ حافظهدار در تیر کامپوزیتی موجدار دولایه..... ۹۴
شکل ۶-۵ : شبیهسازی جابجایی انتهای تیر بر حسب تابعی از دمای آلیاژ حافظهدار..... ۹۵

شکل ۶-۶ : تابع جریان اعمالی به آلیاژ حافظهدار ۹۷
شکل ۶-۷ : رابطه دمای سیم حافظهدار با زمان بر اساس تابع جریان شکل ۶-۶ ..... ۹۸
شکل ۶-۸ : تابع جریان الکتریکی اعمالی به سیم حافظهدار ۹۹
شکل ۶-۹ : رابطهی دمای سیم حافظهدار بر حسب زمان برای تابع جریان شکل ۶-۸ ..... ۹۹
شکل ۶-۱۰ : رابطهی دمای سیم حافظهدار بر حسب زمان برای تابع جریان شکل ۶-۸. قطر سیم ۱۰۰۰/۲ mm
شکل ۶-۱۱ : رابطهی دمای سیم حافظهدار بر حسب زمان برای تابع جریان شکل ۶-۸. قطر سیم ۰/۱۹۵۶ mm
..... ۱۰۰
شکل ۶-۱۲ : تابع جریان- زمان و دما-زمان آلیاژ حافظهدار مربوط به مرجع [۳۰] ۱۰۱
شکل ۶-۱۳ : نتیجهی حل عددی تغییرات دمای سیم حافظهدار بر حسب زمان برای تابع جریان رمپ در شکل
۶-۱۲ ..... ۱۰۱
شکل ۶-۱۴ : شماتیک چیدمان تجهیزات آزمایش ۱۰۲
شکل ۶-۱۵ : چیدمان تجهیزات آزمایش ۱۰۳
شکل ۶-۱۶ : نحوه اتصال سیم به سطح تیر ۱۰۴
شکل ۶-۱۷ : تغییر شکل تیر در نتیجهی تحریک آلیاژ حافظهدار ۱۰۴
شکل ۶-۱۸ : نمودار جریان اعمالی به سیم حافظهدار بر حسب زمان ۱۰۵
شکل ۶-۱۹ : تغییرات دما بر حسب زمان برای تابع جریان اعمالی در شکل ۶-۱۷ ..... ۱۰۶
شکل ۶-۲۰ : نتایج تجربی تغییرات نیروی آلیاژ بر حسب جریان اعمالی ۱۰۶
شکل ۶-۲۱ : نتایج تجربی تغییرات تنش با جریان الکتریکی ۱۰۷
شکل ۶-۲۲ : رابطه جابجایی انتهای ورق بر حسب جریان الکتریکی آلیاژ حافظهدار ۱۰۸
شکل ۶-۲۳ : نتایج تجربی جابجایی انتهای تیر بر حسب دمای آلیاژ حافظهدار ۱۰۹
شکل ۶-۲۴ : مقایسه جابجایی انتهای تیر بر حسب دمای آلیاژ حافظهدار بر اساس مدل برینسون و نتایج
تجربی ۱۰۹
شکل ۶-۲۵ : مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی در دیاگرام فازی برینسون ۱۱۰
شکل ۷-۱ : نرم افزار NACA و شماتیک بال انتخابی ۱۱۶
شکل ۷-۲ : قالب بال کامپوزیتی موجدار ۱۱۷
شکل ۷-۳ : قرار گرفتن لایه چینی کامپوزیت بین قالب بالایی و پایینی ۱۱۷

شکل ۷-۴ : ایرفویل پس از پخت کامپوزیت و برداشتن قالبهای بالایی و پایینی ۱۱۸
شکل ۷-۵ : ایرفویل پس از خارج کردن فوم داخل بال و برداشتن لایههای داکرون ۱۱۸
شکل ۷-۶ : مکان قرار گیری عملگر آلیاژ حافظهدار بر روی بال..... ۱۱۸
شکل ۷-۷ : حالتهای مختلف ایرفویل. (A) حالت ابتدایی، جریان الکتریکی برابر صفر. (D) حالت پایانی، جریان الکتریکی برابر ۰/۵۵ آمپر. ۱۲۰

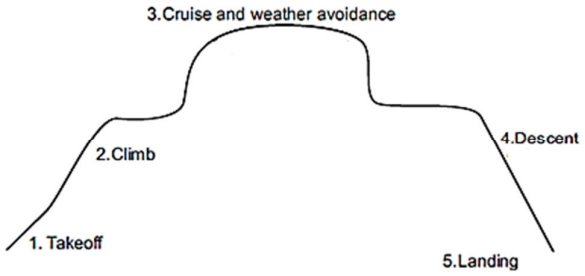
فهرست جدول‌ها

عنوان ..... صفحه
جدول ۳-۲ : ثابتهای مورد نیاز برای مدل سازی رفتار آلیاژ حافظهدار ۴۶
جدول ۴-۱ : رابطه کرنش دائمی و تنش اعمالی به آلیاژ ۴۸
جدول ۴-۲ : خواص فیزیکی آلیاژ حافظهدار [۹۴] ۴۹
جدول ۴-۳ : دماهای استحاله آلیاژ حافظهدار ۵۱
جدول ۴-۴ : مقایسه نتایج آزمایش گرماسنج روبشی تفاضلی با مرجع [۳۰] ۵۱
جدول ۴-۵ : خواص مورد نیاز برای شبیه سازی آلیاژ حافظهدار [۳۰] ۵۲
جدول ۴-۶ : خواص فیزیکی رزین ۵۳
جدول ۴-۷ : خواص مکانیکی و حرارتی رزین در دمای ۲۵ ℃ ۵۳
جدول ۴-۸ : : خواص الیاف شیشه ۵۴
جدول ۴-۹ : مشخصات هندسی و مکانیکی ورق کامپوزیتی موجدار ۵۸
جدول ۴-۱۰ : مشخصات سنسور جابجایی [۹۷] ۵۹
جدول ۴-۱۱ : مشخصات نیروسنج [۹۸] ۶۰
جدول ۴-۱۲ : مشخصات ترموکوپل ۶۲
جدول ۴-۱۳ : مشخصات منبع تغذیه ۶۲
جدول ۴-۱۴ : عیوب احتمالی مبدل آنالوگ به دیجیتال ۶۷
جدول ۶-۱ : خواص حرارتی آلیاژ حافظهدار [۳۰] ۹۶

فصل ۱: مقدمه‌ای بر مواد و سازه‌های هوشمند

امروزه با پیشرفت علوم و تکنولوژی و نیز نیاز سازه‌های مهندسی به خواص متفاوت (مکانیکی، حرارتی، الکتریکی، خود شکل پذیری و ...)، کاربرد مواد جدید در سازه‌های پیشرفته توسعه یافته است. این سازه‌ها که به آن‌ها سازه‌های هوشمند[1]، مورفینگ[2] یا انطباقی[3] اطلاق می‌شود، شکل و هندسه خود را با توجه به شرایط مختلف تغییر می‌دهند و از این رو سبب افزایش عملکرد سازه‌ها خواهند شد [۱]. البته ساختارهای مورفینگ علاوه بر آن‌که شکل و هندسه خود را تغییر می‌دهند باید در برابر نیروهای مختلفی که به آن‌ها وارد می شود بهترین عملکرد را داشته باشند.

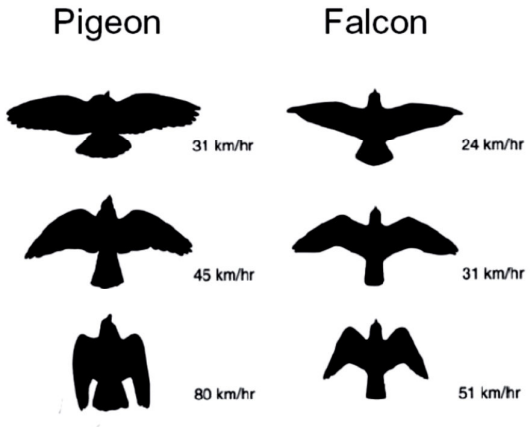
این سازه ها در کاربردهای مختلفی از جمله بال هواپیما و سفینه‌های فضایی مورد علاقه طراحان قرار گرفته است. افزایش قدت مانور هواپیماها و نیز روند روبه توسعه سفینه‌ها و ماهواره های فضایی از جمله دلایل افزایش تمایل به استفاده از این سازه‌های هوشمند می باشد. پرندگان هندسه‌ی بال-هایشان در شرایط مختلف پرواز تغییر می‌دهند؛ این قابلیت سبب افزایش عملکرد آن‌ها می شود و کمک می‌کند که به آسانی بتوانند مراحلی مانند اوج گرفتن، تغییر جهت پرواز و تغییر سرعت را به بهترین صورت کنترل کنند. اگر بال هواپیما مشابه بال پرندگان توانایی تغییر شکل در شرایط مختلف پرواز را دارا باشد[۲] این امر سبب افزایش عملکرد پروازی هواپیماها در شرایط مختلفی مانند اوج گرفتن و تغییر جهت پرواز خواهد شد. شکل ۱-۱ حالت های مختلف پرواز هواپیما را نشان می-دهد[۳].



شکل ۱-۱: حالت‌های مختلف پرواز هواپیما [۳]

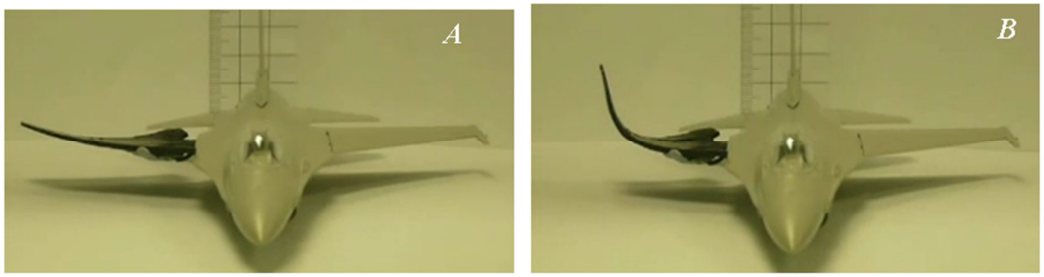
1 Smart structure
2 Morphing structure
3 Adaptive structure

بال‌های با ابعاد ثابت برای شرایط مختلف پروازی عملکرد بهینه‌ای را ندارند؛ از این رو است که پرندگان در حین پرواز می‌توانند با عقب راندن بال‌های خود، نیروی مقاوم در برابر پرواز را کاهش داده و در نتیجه سرعت خود را افزایش بدهند. شکل ۱-۲ نشان دهنده چگونگی تغییر سرعت پرواز پرندگان در نتیجه‌ی تغییر هندسه بال‌ها می‌باشد [۳].



شکل ۱-۲: رابطه تغییر بال پرندگان و سرعت پرواز آن‌ها [۳]

ایده استفاده از سازه‌های هوشمند در بال هواپیماها امروزه در هواپیماهای بدون سرنشین در حال سپری کردن مراحل تحقیقاتی می‌باشد. در شکل ۱-۳ یک نمونه بال هواپیمای بدون سرنشین با قابلیت تغییر شکل نشان داده شده است [۴].



شکل ۱-۳ : تغییر شکل بال هواپیمای بدون سرنشین[۴]

تقاضا برای سازه‌های سبک و مقاوم با قابلیت‌های مضاعف مهندسی (مانند حس کنندگی، تحریک پذیری، و ...) سبب بروز شاخه جدیدی از مواد تحت عنوان مواد چند کاره[1] شده است؛ شاخه‌ای از مواد

1 multifunctional materials