٣٨٨٨٥

۱۳۸۰ /۱۰/ ۲۱

دانشگاه تهـران
دانشکده فنی

مدلسازی ریاضی و تحلیل رفتار ترموالاستیک محرک‌ها و تیرهای کامپوزیتی هوشمند، مرکب از لایه‌های آلیاژ حافظه‌دار تعبیه شده در یک مادهٔ ماتریس

نگارش:
محمد منصور محی‌الدین قمشه‌ای

015564

استاد راهنما: دکتر نصراله تابنده
استاد مشاور: دکتر سید اسداله قاضوی

رساله برای دریافت درجهٔ دکترای تخصصی (Ph.D.)
در مهندسی مکانیک

آبانماه ۸۰

۳۸۸۸۵

دانشگاه تهـران

دانشکده فنی- گروه مهندسی مکانیک

عنوان رساله:

مدلسازی ریاضی و تحلیل رفتار ترموالاستیک محرک‌ها و تیرهای کامپوزیتی هوشمند، مرکب از لایه‌های آلیاژ حافظه‌دار تعبیه شده در یک مادهٔ ماتریس

توسط:

محمد منصور محی‌الدین قمشه‌ای

رساله برای دریافت درجهٔ دکترای تخصصی

در رشتهٔ مهندسی مکانیک – گرایش طراحی کاربردی

از این رساله در تاریخ ۲۷ /۹ /۱۳۸۰ در مقابل هیأت داوران دفـاع بـه عمـل آمـد و مورد تصویب قرار گرفت.

محل امضاء:

سرپرست کمیتهٔ تحصیلات تکمیلی دانشکده:

مدیر گروه آموزشی:

نماینده تحصیلات تکمیلی گروه:

استاد راهنما:

استاد مشاور:

عضو هیأت داوران:

عضو هیأت داوران:

عضو هیأت داوران:

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) موادی هستند که قابلیت بازیافت شکل اولیه خود را دارند، و این خاصیت بدلیل ایجاد یک تغییر فاز کریستالی در آنها بر اثر تغییر درجه حرارت، می‌باشد. در این رساله رفتار ترموالاستیک محرک‌ها و تیرهای کامپوزیتی SMA مطالعه گردیده است. این سازه‌ها از تعبیه لایه‌های SMA در یک ماده ماتریس ساخته شده، و با گرمایش این لایه‌ها فعال می‌شوند. رفتار آلیاژهای حافظه‌دار غیر خطی بوده و در مشخصه تنش - کرنش - دمای آنها حالت هیسترزیس وجود دارد. بعلاوه خواص مادی آنها با درجه حرارت متغیر است. همچنین بدلیل ایجاد کرنش‌های نسبتاً بزرگ در این آلیاژها بهنگام بازیافت شکل، رفتار سازه‌های متشکل از آنها به لحاظ هندسی غیر خطی است. این رفتارهای غیر خطی مدلسازی سازه‌های کامپوزیتی SMA را پیچیده می‌سازند. در این پژوهش ابتدا یک مدل ریاضی تقریبی بفرم صریح برای پاسخ ایستای یک نوع محرک کامپوزیتی SMA با ساختار تیر با مقطع مستطیل توخالی و با قابلیت تحرک در سه بعد، ارائه شده است. در ادامه یک فرمولبندی اجزاء محدود دو بعدی برای تحلیل پاسخ گذرای تنش- کرنش - دما و تغییر شکل در محرک‌ها و تیرهای کامپوزیتی SMA با قابلیت تغییر شکل در صفحه (دو بعدی) پیشنهاد شده است. این مدل اجزاء محدود با بهره‌گیری از فرم ضعیف معادلات تعادل، بهمراه معادله بالانس انرژی در لایه‌های SMA و استفاده از یک معادله مشخصه با خواص مادی متغیر و معادلات سینتیک تبدیل فاز در آلیاژ SMA استخراج گردیده است. نتایج شبیه‌سازی این مدل دو بعدی با نتایج تجربی بدست

آمده از آزمایشات بر روی یک نمونه آزمایشگاهی، مقایسه و صحت و دقت آن تحقیق گردیده است. در ادامه، این فرمولبندی اجزاء محدود به حالت محرکها و تیرهای با قابلیت جابجائی سه بعدی تعمیم و توسعه داده شده است. در فصل پایانی این رساله، با وارد کردن اثرات اینرسی، یک مدل اجزاء محدود بمنظور تحلیل پاسخ ترمو-الاستودینامیکی تیرهای کامپوزیت SMA، استخراج گردیده است. این فرمولبندی قادر است رفتار ارتعاشی این سازه‌ها را در حالت فعال و غیرفعال مدلسازی نماید. در این تحقیق، هر یک از مدلهای تئوری توسعه داده شده، بر روی مثالی اعمال گردیده و نتایج عددی حاصله در نمودارهائی ارائه شده‌اند. همچنین تأثیر پارامتر های مختلف بر روی پاسخ سازه مطالعه و بررسی گردیده است.

پیشگفتار

مواد و سازه های هوشمند مبحث نسبتاً جدیدی در مهندسی است که بویژه در دهه اخیر موضوع پژوهشهای بسیاری را در دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی جهان بخود اختصاص داده است. یکی از مهمترین انواع مواد هوشمند آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) میباشند. بیش از شش دهه است که خاصیت بازیافت شکل در بعضی آلیاژها مشاهده گردیده و توسط مجامع علمی شناخته شده است. اما این تکنولوژی هنوز برای مهندسان طراح ناشناخته باقی مانده و مراحل اولیه خود را طی مینماید. این مطلب عمدتاً بلحاظ آنست که بدلیل وجود ویژگیهای منحصر بفرد در این آلیاژها، بهره گیری از این تکنولوژی در کاربردهای مهندسی، مستلزم ایجاد یک فلسفه جدید در طراحی و نیز ایجاد مدلهای ریاضی مبین رفتار این آلیاژها و سازه های مرکب از آنهاست. کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در محیطهای پیوسته شامل سازه های هوشمندی است که نوعاً از مواد و اجزاء سازه ای کامپوزیتی مسلح شده با المنت های SMA تشکیل میشوند. در این کامپوزیتهای هوشمند فیبرها یا ورقه های نازک SMA در یک ماده ماتریس، مانند رزین اپوکسی تعبیه شده و یا در مواد لایه ای مرکب جا داده میشوند. با اعمال گرمایش و افزایش درجه حرارت SMA تا بالاتر از دمای تبدیل فاز در آن، شکل و مشخصه های آلیاژ تغییر نموده و به تبع آن شکل هندسی و مشخصات مکانیکی کل سازه هوشمند تغییر می نماید. بدین ترتیب بکمک این تکنولوژی کنترل شکل هندسی و نیز کاهش ارتعاشات و آکوستیک سازه ای میسر میگردد. همچنین از این ساختار هوشمند میتوان بمنظور ساخت محرکهای نیرو-جابجائی بهره جست.

پژوهش حاضر با هدف ایجاد مدلهای ریاضی پیشرفته جهت تحلیل رفتار ترمومکانیکی سازه های تیرگونه با ساختار مرکب از المنت های آلیاژ حافظه دار تعبیه شده در یک محیط ماتریس، بانجام رسیده است. این رساله در هشت فصل بشرح زیر تدوین گردیده است:

فصل (۱) نگاهی اجمالی بر دانش و تکنولوژی مواد و سازه های هوشمند دارد. در این بحث، برخی از تعاریف اساسی برای این مواد و سازه ها بررسی شده است. همچنین انواع مواد هوشمند مختصرا تشریح گردیده، و مثالهائی از کاربردآنها آورده شده است. روشهای کنترل فعال در سازه های هوشمند به اختصار توضیح داده شده، و نیز زمینه های کاربرد آنها اشاره گردیده است.

در فصل (۲) ابتدا ویژگی اصلی مواد حافظه دار یعنی خاصیت حافظه‌پذیری یا بازیافت شکل اولیه، که براساس یک دگرگونی کریستالی به نام تبدیل فاز مارتنزیتی در آلیاژ می‌باشد، از دیدگاه ساختمان کریستالی تشریح شده است..سپس، رفتار ترموالاستیکی و مکانیکی آلیاژ از دیدگاه ماکروسکپی مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت آخر از این فصل، دامنه کاربردهای این مواد به همراه ارائه مثال‌هایی، تشریح گردیده است.

فصل (۳) به بررسی بعضی از مهمترین مدل‌های ریاضی ارائه شده برای رفتار ترومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شامل مدل ریاضی ایکوتا، مدل لیانگ و راجزر، مدل لین و راجزر، و نیز مدل برینسون، می‌پردازد. این مدلهای ریاضی شامل معادلات مشخصه و سینتیک تبدیل فاز در این آلیاژهاست.

در فصل (٤) یک مدل ریاضی تقریبی بفرم صریح برای پاسخ سازه ای ایستای یک نوع محرک SMA با ساختار تیر مرکب، به تحریک حرارتی، ارائه گردیده است. این محرک قابلیت حرکت و اعمال نیرو در سه بعد را دارد. در این مدلسازی از معادله مشخصه لیانگ و راجرز بهمراه یک معادله سینتیک تبدیل فاز خطی، برای رفتار ترومکانیکی لایه های SMA بهره گرفته شده، و روابط نیرو-تغییر شکل در محرک توسط فرم کلی معادلات کلاسیک تیرها بیان گردیده است. نتایج این قسمت از تحقیق بصورت یک مقاله لاتین با عنوان:

"Mathematical Modeling and Analysis of A Novel Shape Memory Alloy – Elastomer Composite Actuator in Plane Steady Conditions"

در کنفرانس بین‌المللی *ASME-ESDA-2000, Montreux, Switzerland, July 10-13, 2000* ارائه و در مجموعه مقالات آن چاپ گردیده است. همچنین یک نگارش کاملتر از این مقاله با عنوان:

"A Three-Dimensional Shape Memory Alloy/Elastomer Actuator"

جهت مجله علمی *Composites - Part B: Engineering* ارسال و در شماره ژوئن ۲۰۰۱ بچاپ رسیده است.

درفصل (۵) یک فرمولبندی اجزاء محدود برای تحلیل پاسخ گذرای محرکها و تیرهای هوشمند با ساختار کامپوزیتی متشکل از المنت‌های آلیاژ حافظه دار تعبیه شده در یک ماده ماتریس و

دارای درجات آزادی و قابلیت تحرک دو بعدی، ارائه شده است. بدلیل وجود تنش‌های برشی و خیز نسبتا بزرگ در این سازه‌ها، مدلسازی بر اساس یک تئوری پیشرفته برای تیرها و با فرض میدان کرنش غیر خطی ون-کارمن انجام گرفته است. برای رفتار ترمومکانیکی SMA از یک معادله مشخصه با ضرائب متغیر، بهمراه معادلات سینتیک تبدیل فاز سینوسی استفاده بعمل آمده است. در این فصل ابتدا فرم ضعیف معادلات تعادل و انرژی تعیین شده، و سپس بر اساس آن یک فرمولاسیون اجزاء محدود غیرخطی برای این سازه‌های فعال استخراج گردیده است. نتایج این قسمت از پژوهش در قالب یک مقاله لاتین با عنوان:

"Finite Element Analysis of A New Shape Memory Alloy Composite Actuator"

در کنفرانس بین المللی *CFD2K-8th Annual Conference of the CFD Society of Canada, Montreal, Canada, June 11-13, 2000* ارائه و در مجموعه مقالات آن بچاپ رسیده است.

در فصل (٦) ابتدا چگونگی ساخت یک نمونه محرک SMA و نیز مجموعه آزمایشگاهی سازمان داده شده جهت انجام تست خیز محرک بطور خلاصه تشریح گردیده است. سپس آزمایشات انجام یافته تشریح گردیده و نتایج حاصل از آنها با نتایج شبیه سازی عددی بدست آمده از مدل اجزاء محدود ارائه شده در فصل (٥)، مقایسه گردیده است. دستاوردهای این قسمت از تحقیق بصورت یک مقاله لاتین با عنوان:

"Finite Element Modeling of Shape Memory Alloy Composite Actuators:
Theory and Experiment"

در سپتامبر سالجاری میلادی جهت چاپ در مجله تخصصی *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* ارسال گردیده است.

در فصل (٧)، مدل اجزاء محدود ارائه شده در فصل (٥) برای تحلیل تیرها و محرکهای کامپوزیت SMA با قابلیت تحرک در سه بعد توسعه داده شده است. در تیرهای سه بعدی کامپوزیتی SMA امکان کنترل شکل سازه در فضای سه بعدی وجود دارد. همچنین، می‌توان از این سازه‌ها بعنوان محرکهای نیرو- جابجائی با قابلیت تحرک همزمان در دو صفحه متعامد بهره جست. در استخراج این مدل سه بعدی از همان فرضییات و تئوریهای بکار رفته برای مدل دو بعدی، بهره گرفته

شده است. این فرمولاسیون قادر است رفتار فعال و غیر فعال این سازه‌ها را تحلیل نماید. این قسمت از تحقیق در قالب یک مقاله فارسی با عنوان:

"ارائه یک فرمولاسیون جامع اجزاء محدود برای تیرها وکاراندازهای کامپوزیتی هوشمند، مرکب از المانهای آلیاژ حافظه دار تعبیه شده در یک ماده ماده ماتزیس"

در *پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک -دانشگاه گیلان، خردادماه ۸۰* ، که به اهتمام انجمن مهندسان مکانیک ایران و دانشگاه گیلان برگزار گردید، ارائه و در مجموعه مقالات آن بچاپ رسیده است.

در فصل (۸) مدل اجزاء محدود ارائه شده در فصل قبل، به حالت رفتار الاستودینامیکی سازه های تیر کامپوزیتی SMA تعمیم داده شده است، و بدین ترتیب با منظور نمودن اثرات اینرسی سازه، یک فرمولاسیون اجزاء محدود دینامیکی جهت تحلیل رفتار ارتعاشی این تیرهای مرکب سه بعدی استخراج گردیده است. بکمک این مدل .F.E می‌توان پاسخهای پسیو و فعال سازه را در هنگام تحریک المنت‌های SMA تحلیل نموده و تاثیر آنرا در کاهش دامنه ارتعاشات بررسی نمود. در این فصل ابتدا با استفاده از اصل همیلتون فرم ضعیف معادلات حرکت تعیین گردیده و سپس بر اساس آن یک فرمولبندی .F.E جهت تحلیل رفتار الاستودینامیکی این سازه ها استخراج گردیده است. در نظر است که دستاوردهای این قسمت از تحقیق بصورت یک مقاله لاتین با عنوان:

"A Dynamic Finite Element Model for Shape Memory Alloy Composite Thick Beams with Large Deflections"

جهت ارائه در کنفرانس بین المللی *Mechanics & Materials in Design (M2D4) –4th International Conference, Nagoya Univ. , Nagoya, Japan, June 5-8, 2002* ارسال گردد. در حال حاضر چکیده این مقاله از سوی دبیر این کنفرانس پذیرفته شده است.

لازم به ذکر است که مدلهای ریاضی توسعه داده شده در فصول ٤ تا ٨ ، در هر مورد بر روی یک مثال از این نوع سازه های هوشمند اعمال گردیده و بکمک یک برنامه کامپیوتری تحلیل و نتایج عددی حاصله در نمودارهایی ارائه شده است. همچنین اثر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ سازه بررسی گردیده است.

مرور و بررسی اجمالی مراجع مرتبط با این تحقیق در مقدمه هر فصل بطور مجزا آورده شده است. فهرست مراجع مورد استفاده جهت نگارش این رساله در بخش منابع و مآخذ آورده شده‌اند، و در پیوست (۱) لیست کامل برنامه‌های کامپیوتری ضمیمه گردیده است.

منصور محی‌الدین قمشه‌ای

آبانماه ۸۰

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر نصراله تابنده و جناب آقای دکتر سید اسداله قاضوی که با نظرات و راهنمائیهای ارزنده خود مرا در انجام این رساله یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر گردانی‌نژاد استاد دانشگاه نوادا که موضوع این رساله را پیشنهاد نموده، و در مراحل انجام این تحقیق از نظرات ایشان بهره جسته‌ام، تشکر می‌نمایم. همچنین لازمست از جناب آقای دکتر خواجه‌پور استاد دانشگاه واترلو، که اینجانب در طول دورهٔ تحقیقاتی خود در آن دانشگاه، از نظرات ارزنده ایشان بویژه در مرحله انجام آزمایشات بهره گرفته‌ام، تشکر و قدردانی نمایم. در خاتمه، مراتب تقدیر و تشکر خود را از معاونت پژوهشی دانشکده فنی و معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که هزینه انجام دو طرح پژوهشی مرتبط با این رساله را تأمین نموده‌اند، اعلام می‌دارم.

فهـرست مطالب

عنـــــــــوان — صفحـــه

فهرست جدول‌ها ..... (هفده)

فهرست شکل‌ها ..... (هجده)

فهرست علائم و اختصارات ..... (بیست و دو)

فصل (۱): مروری بر مبحث مواد و سازه های هوشمند ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- تعاریف اساسی مواد و سازه های هوشمند ۲

۱-۳- انواع مواد هوشمند ٤

۱-۳-۱- مواد پیزوالکتریک ٤

۱-۳-۲- مواد حافظه دار ٥

۱-۳-۳- سنسورهای نوری ٦

۱-۳-٤- سیالات الکترورئولوژیک ٦

۱-۳-٥- مواد مگنتواستریکتیو ٦

۱-۳-٦- مواد الکترواستریکتیو ۷

۱-٤- مقایسه قابلیت‌های مواد هوشمند ۷

۱-٥- مواد کامپوزیتی هوشمند ۹

۱-٦- طبقه‌بندی سازه‌های هوشمند ۱۰

۱-۷- روشهای کنترل سازه های هوشمند ۱۲

عنـــــــــوان | صفحـــه

۱-۸- زمینه های کاربرد ۱٤

۱-۹- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۵

فصل (۲): آلیاژهای حافظه‌دار: ساختار میکروسکوپی، خواص ماکروسکوپی، و کاربردهای مهندسی ۱۷

۲-۱- مقدمه ۱۷

۲-۲- مکانیزم عمل آلیاژهای حافظه‌دار بر اساس ساختمان کریستالی آنها ۱۹

۲-۳- رفتار ترمو-مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار ۲۳

۲-۳-۱- تغییر شکل ماکروسکوپی ۲۳

۲-۳-۲- درجه حرارتهای تبدیل فاز ۲۵

۲-۳-۳- خاصیت ابر کشسانی و میرایی ۲۷

۲-۳-٤- مقاومت اهمی ۳۰

۲-٤- طبقه‌بندی و تشریح موارد کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار ۳۰

۲-٤-۱- موارد کاربرد از بازیافت آزاد آلیاژ ۳۱

۲-٤-۲- موارد کاربرد از بازیافت مقید آلیاژ ۳۳

۲-٤- ۳- موارد کاربرد براساس خاصیت ابرکشسانی آلیاژ ۳٤

۲-٤-٤- موارد کاربرد بمنظور تولید نیرو و جابجایی (ساخت محرکها) ۳۵

۲-۵- خلاصه ۳۹

فصل (۳): مروری بر مدلهای مشخصه ارائه شده برای رفتار ترمومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار ٤۰

۳-۱- مقدمه ٤۰

۳-۲- مدل ایکوتا یا مدل زیر لایه متغیر ٤۱

۳-۳- مدل لیانگ و راجرز ٤۵

عنـــــــــوان | صفحـــه

۳-٤- مدل لین و راجرز ٤٩

۳-٥- مدل براینسون ٥١

۳-٥-۱- معادلات سینتیک تبدیل فاز براینسون ٥٢

۳-٦- خلاصه ٥٥

فصل (٤): یک فرمولبندی بفرم صریح برای تحلیل تقریبی پاسخ ایستای تیرها و محرکهای کامپوزیتی SMA ٥٧

٤-۱- مقدمه ٥٧

٤-۲- مدلسازی ریاضی ٥٩

٤-۲-۱- توزیع دما در مقطع محرک ٥٩

٤-۲-۲- معادلات کلی نیرو-تغییر شکل ٦١

٤-۲-۳- تعیین نیروی محوری و لنگر خمشی مؤثر ٦٢

٤-۲-٤- محاسبه منتجه‌های تنش حرارتی ٦٤

٤-۲-٥- محاسبه منتجه‌های تنش ناشی از تبدیل فاز ٦٥

٤-۲-٦- حل معادلات نیرو-تغییر شکل ٦٧

٤-۳- نتایج عددی ٦٨

٤-٤- بحث و نتیجه‌گیری ٧١

فصل (٥): فرمولبندی اجزاء محدود تیرها و محرکهای کامپوزیتی SMA، در حالت دو بعدی ٧٦

٥-۱- مقدمه ٧٦

٥-۲- مدلسازی ریاضی ٧٩

٥-۲-۱- روابط سینماتیکی و مشخصه ٨١

عنـــــــــوان | صفحـــه

۵-۲-۲- استخراج معادلات تیر بروش انرژی ۸۲

۵-۲-۳- مدل اجزاء محدود تیر ۸۵

۵-۲-٤- مدل اجزاء محدود پخش دما در S MA ۸٦

۵-۳- روش انجام محاسبات عددی ۸۸

۵-٤- نتایج عددی و بحث ۹۰

ضمیمه ۹۳

فصل (٦): مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی پاسخ یک محرک SMA با نتایج تجربی ۹۵

٦-۱- مقدمه ۹۵

٦-۲- مجموعه آزمایشگاهی ۹۷

٦-۲-۱- ساخت یک نمونه محرک SMA و مشخصات آن ۹۷

٦-۲-۲- سیستم دریافت و ثبت اطلاعات ۱۰۰

٦-۳- آزمایشات:روش انجام تست ها و نتایج ۱۰۲

٦-٤- مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با نتایج تجربی ۱۰۹

٦-۵- نتیجه‌گیری ۱۱۰

فصل (۷): فرمولبندی اجزاء محدود تیرها و محرکهای کامپوزیتی SMA، در حالت سه بعدی ۱۱۲

۷-۱- مقدمه ۱۱۲

۷-۲- مدلسازی ریاضی ۱۱۳

۷-۲-۱- روابط سینماتیکی و مشخصه ۱۱۵

۷-۲-۲- استخراج معادلات تیر بروش انرژی ۱۱۷

۷-۲-۳- مدل اجزاء محدود تیر ۱۲۱