دانشکده مهندسی

رابطه‌سازی پوسته‌های چندلایه‌ی هوشمند

الیاس اعرابی

پایان نامه کارشناسی ارشد ناپیوسته سازه

گروه عمران

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی

سال ۱۳۸۸

دانشکده مهندسی

رابطه‌سازی پوسته‌های چندلایه‌ی هوشمند

الیاس اعرابی

دارای مدرک کارشناسی از دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

پایان نامه‌ی ارائه شده به دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی برای احراز درجه‌ی کارشناسی ارشد سازه

گروه عمران

سال ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشکش به پدر و مادرم

به پاس زحمت‌های بی‌دریغشان

با تشکر از استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد رضای پژند

که بدون راهنمایی های این استاد فرزانه پیدایش این پایان نامه ممکن نمی گشت

به نام خدا

تاییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب به جزء در مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو است.

امضای دانشجو	**تاریخ**
امضای استاد راهنما	**تاریخ**

این پایان‌نامه که توسط آقای الیاس اعرابی تدوین و به هیات داوران زیر ارائه گردیده است، به عنوان بخش پژوهشی دوره‌ی کارشناسی ارشد ناپیوسته‌ی سازه مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

دکتر محمد رضایی‌پژند- استاد راهنما

دکتر جلیل رضایی‌پژند- استاد مشاور

دکتر محمدرضا توکلی‌زاده- استاد مدعو

دکترفریدون پویانژاد- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی

رابطه‌سازی پوسته‌های چندلایه‌ی هوشمند

چکیده: سازه‌هایی که در درون و یا روی سطح آن‌ها محرک و حسگر قرار گیرد و توانایی حس‌کردن و کنترل به هنگام داشته باشند، سازه‌های هوشمند گویند. در آغاز این پایان‌نامه، به ویژگی‌های مواد مرکب و پیزوالکتریک پرداخته می‌شود. همچنین، مروری کوتاه بر رابطه‌سازی‌های سازه‌های هوشمند انجام می‌پذیرد. در ادامه، رابطه‌سازی پیشنهادی جزء محدود سازه‌های پوسته‌ای متقارن محوری مرکب هوشمند ارائه می‌گردد. بر پایه‌ی این رابطه‌ها، برنامه‌ی رایانه‌ای آماده و تحلیل پوسته‌های چندلایه‌ی هوشمند انجام می‌پذیرد. پاسخ‌های رابطه‌های پیشنهادی با نرم‌افزار در دسترس نیز مقایسه و درستی کار تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوسته‌ی چندلایه، پیزوالکتریک، ماده‌ی مرکب، سازه‌ی هوشمند، حسگر، محرک، پوسته‌ی متقارن محوری، رابطه‌سازی، ماده‌ی ناهمسان.

فهرست

چکیده.....یک

فهرست.....دو

نمایه‌ی نشانه‌ها.....پنج

فهرست شکل‌ها.....شش

فهرست جدول‌ها.....هشت

فصل یکم-آغازسخن..... ۱

۱- ۱- پیشگفتار.....۱

۱- ۲- پژوهش‌های پیشینیان.....۱

۱- ۳- سازه‌ی هوشمند.....۲

فصل دوم-مشخصه‌های مواد..... ۴

۲- ۱- پیشگفتار.....۴

۲- ۲- ماده‌ی مرکب.....۴

۲- ۳- نگره‌ی کشسانی ناهمسانگرد.....۵

۲- ۳- ۱- رابطه‌های مواد.....۵

۲- ۴- ماده‌ی پیزوالکتریک.....۱۰

۲- ۵- آلیاژهای حافظه‌دار.....۱۲

۲- ۶- ماده‌ی مگنتواستریکتیو.....۱۲

۲- ۷- ماده‌ی الکترواستریکتیو.....۱۲

۲- ۸- سیال‌های الکترومگنتورئولوژیکال.....۱۲

۲- ۹- رابطه‌سازی جزء محدود..... ۱۳
۲- ۹- ۱- معادله‌ی بنیادی پیزوالکتریک..... ۱۳
۲- ۹- ۲- معادله‌های تغییراتی پیزوالکتریک..... ۱۴
۲- ۹- ۳- وابستگی الکترومکانیکی..... ۱۶
۲- ۹- ۴- پتانسیل الکتریکی القایی..... ۱۷
فصل سوم-نگره‌های سازه‌ای..... ۱۹
۳- ۱- پیشگفتار..... ۱۹
۳- ۲- رابطه‌سازی خطی سنتی..... ۲۰
۳- ۳- رابطه‌سازی ناخطی سنتی..... ۲۵
۳- ۴- رابطه‌سازی بر پایه‌ی نگره‌ی میندلین..... ۳۰
۳- ۵- رابطه‌سازی جزء محدود با هندسه‌ی مخروطی..... ۳۶
فصل چهارم-رابطه‌سازی پوسته‌ی دورانی..... ۴۴
۴- ۱- پیشگفتار..... ۴۴
۴- ۲- رابطه‌سازی پوسته‌ی استوانه‌ای..... ۴۴
۴- ۳- رابطه‌سازی با عملکرد ACLD..... ۴۹
فصل پنجم-روش‌های پیشنهادی..... ۵۷
۵- ۱- پیشگفتار..... ۵۷
۵- ۲- رابطه‌سازی با روش لایه‌ی یگانه..... ۵۷
۵- ۳- رابطه‌سازی با روش لایه‌ای..... ۶۳
۵- ۳- ۱- محاسبه‌ی ماتریس $[G]$..... ۶۵

۵- ۳- ۲- معادله‌ی ایستایی ۶۷
۵- ۴- نمونه‌های عددی..... ۶۸
۵- ۴- ۱- نمونه‌های روش لایه‌ی یگانه..... ۶۸
۵- ۴- ۲- نمونه‌های روش لایه‌ای..... ۷۳
فصل ششم-پایان سخن..... ۷۹
۶- ۱- پیشگفتار..... ۷۹
۶- ۲- مروری بر فصل‌های پیشین..... ۷۹
۶- ۳- نتیجه‌گیری..... ۷۹
۶- ۴- پژوهش‌های آیندگان..... ۸۰
پیوست۱: ماتریس سختی کاهش‌یافته‌ی ماده‌ی اورتوتروپیک عام..... ۸۱
پیوست۲:درایه‌های دی‌الکتریک و جفت شدگی..... ۸۲
پیوست۳:ماتریس‌های سختی و بردارهای الکتروکشسان..... ۸۳
پیوست٤:محاسبه‌ی عملگر L ۸۵
منبع‌ها..... ۸۸
واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی..... ۹۱
نام نامه..... ۹۴

نمایه‌ی نشانه‌ها

درایه‌های کشسانی..... C_{ij}

نسبت پواسون برای کرنش در جهت jام و تنش در جهت iام..... υ_{ij}

ضریب کشسانی در iامین جهت ماده..... E_i

سختی تنش مستوی کاهش یافته..... Q_{ij}

میدان الکتریکی..... $\{E\}$

تغییرمکان الکتریکی..... $\{D\}$

ضریب دی الکتریک..... $\{\epsilon\}$

ضریب جفت‌شدگی پیزوالکتریک..... $\{e\}$

جفت‌شدگی الکترواستریکتیو..... d^*

تانسور تنش کوشی متقارن..... σ_{ij}

مؤلفه‌ی بردار عمودی یکه..... n_i

مؤلفه‌ی تانسور کرنش نخستین (تحریک القایی)..... Λ_{kl}

کرنش خطی..... $\bar{\varepsilon}^L$

کرنش ناخطی..... $\bar{\varepsilon}^{NL}$

میرایی ریلی..... $[C_{uu}]$

بردار تغییرمکان انتقالی..... $\{d_t\}$

بردار تغییرمکان دورانی..... $\{d_r\}$

فهرست شکل‌ها

شکل(۱- ۳- ۱): مجموعه‌ی سازه‌ی هوشمند..... ۳

شکل(۳- ۴- ۱): جزء پوسته‌ی چندلایه‌ی پیزوالکتریک ۹ گرهی دو انحنایی..... ۳۱

شکل(۳- ۵- ۱): جزء مخروطی ۸گرهی..... ۳۹

شکل(۴- ۳- ۱): پوسته‌ی چندلایه با وصله‌های ACLD..... ۵۱

شکل(۴- ۳- ۲): تغییرشکل بر پایه‌ی نگره‌ی تغییرشکل برشی مرتبه یکم..... ۵۱

شکل(۵- ۲- ۱): شکل هندسی..... ۵۸

شکل(۵- ۲- ۲): جزء هم عامل یک بعدی سه گرهی..... ۵۹

شکل(۵- ۳- ۱)- تابع درون‌یاب یک بعدی..... ۶۴

شکل(۵- ۴- ۱)- صفحه‌ی دایره‌ای شکل..... ۶۹

شکل(۵- ۴- ۲)- نمودار تغییرمکان صفحه‌ی دایره‌ای شکل همسانگرد..... ۶۹

شکل(۵- ۴- ۳)- صفحه‌ی دایره‌ای سه لایه..... ۷۰

شکل(۵- ۴- ۴)- نمودار بار-تغییرمکان صفحه‌ی سه لایه..... ۷۰

شکل(۵- ۴- ۵)- عرقچین کروی..... ۷۱

شکل(۵- ۴- ۶)- نمودار تغییرمکان کلاهک کروی..... ۷۱

شکل(۵- ۴- ۷)- پوسته‌ی مخروطی..... ۷۲

شکل(۵- ۴- ۸)- نمودار تغییرمکان پوسته‌ی مخروطی..... ۷۳

شکل(۵- ۴- ۹)- پوسته‌ی مخروطی ناقص..... ۷۴

شکل(۵-۴-۱۰)- نمودار بار-تغییرمکان..... ۷۴

شکل(۵- ۴- ۱۱)- صفحه‌ی دایره‌ای سه لایه..... ۷۵

شکل(۵- ۴- ۱۲)- نمودار بار-تغییرمکان صفحه..... ۷۵

شکل(۵- ۴- ۱۳)- کلاهک کروی..... ۷۶

شکل(۵- ۴- ۱۴)- نمودار تغییرمکان عرقچین کروی.....۷۶
شکل(۵- ۴- ۱۵)- عرقچین کروی.....۷۷
شکل(۵- ۴- ۱۶)- نمودار تغییرمکان عرقچین.....۷۸

فهرست جدول‌ها

جدول(۵- ۴- ۱)- مشخصه‌های ماده و بار.....۶۹

جدول(۵- ۴- ۲)- مشخصه‌های لایه‌های پوسته‌ی مخروطی.....۷۲

جدول(۵- ۴- ۳)- مشخصه‌های لایه‌های عرقچین.....۷۷

فصل یکم :آغاز سخن

۱-۱- پیشگفتار

تا آغاز دهه‌ی ۷۰ میلادی، الگوسازی‌های بسیاری برای مبدل‌های پیزوالکتریک با استفاده از روش جزء محدود ارائه شده است. کاربرد ماده‌ی پیزوالکتریک در سازه‌های هوشمند در دهه‌ی ۸۰ مطرح گردید. در پایان دهه‌ی ۹۰ ، شماری جزء محدود در آیین‌نامه‌های تجاری وارد شدند. تاکنون جزءها و رابطه‌سازی‌های بسیاری برای الگوسازی رفتار خطی انتقالی و هارمونیک، مودال و ایستایی ارائه شده است. پژوهش‌های سال‌های اخیر درباره‌ی اثرهای حرارت، وارسی فعال کمانش، ناخطی ماده و هندسه، کاهش لرزش، ناهمسانگردی و ناهمگنی مواد و مانند این‌ها می‌باشد.

۱-۲- پژوهش‌های پیشینیان

به دنبال کارهای نخستین نیس و تریستن در سال ۱۹۶۷ که اصل‌های تغییراتی را برای پدیده‌ی پیزوالکتریک بنا نهادند، آلیک و هیوز در سال ۱۹۷۰، یک جزء سه بعدی برای پیزوالکتریسیته ارائه کردند[۱]. در این رابطه‌سازی که نخستین الگوسازی جزء محدود بود، از اصل هامیلتون، معادله‌های تشکیل دهنده‌ی پیزوالکتریک و یک جزء چهاروجهی استفاده شده است. در سال ۱۹۹۰، لرچ رابطه‌سازی‌هایی کلی برای الگوسازی جزء محدود ۲ و ۳ بعدی پیشنهاد داد[۲]. با افزایش کاربرد سازه‌های پوسته‌ای، نیاز به استفاده از ابزارهای الگوسازی جزء محدود برای صفحه‌ها و پوسته‌های هوشمند به وجود آمد.

تزو و تسنگ در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ یک جزء آجری نازک برای وارسی نوسان صفحه‌ی مستطیلی ارائه کردند[۳]. یک جزء مشابه برای سازه‌های چندلایه را، ها و چانگ در سال ۱۹۹۲ به کار بردند[۴]. در ادامه، تحلیل‌گران بسیاری در این زمینه به پژوهش پرداختند. از میان آن‌ها می‌توان به بنجدو[۵]، ردی[۶]، ساراوانوس [۷] و هایلیگر[۸] اشاره کرد. در سال‌های اخیر، الگوسازی جزء محدود سازه‌های هوشمند، رشد چشم‌گیری داشته است. برگزاری همایش‌های مختلف و چاپ نشریه‌های علمی که تنها به این موضوع می‌پردازند، بهترین گواهی بر پیشرفت و اهمیت این گونه از سازه‌ها می‌باشد.

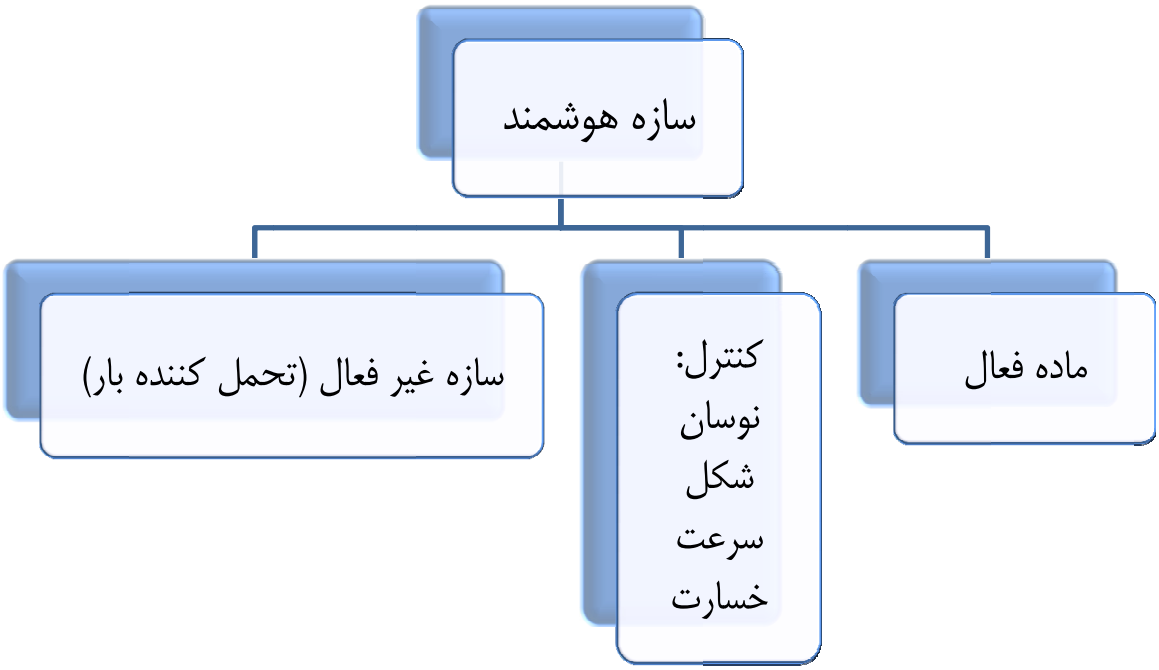
۱-۳- سازه‌ی هوشمند

به مجموعه‌ای از جزءهای سازه‌ای مانند: تیر، صفحه، پوسته و یا یک سازه‌ی چندلایه با لایه‌هایی از ماده‌ی فعال، سازه‌ی هوشمند می‌گویند. تعریف‌های مختلفی برای سازه‌های هوشمند کرده‌اند. بر پایه‌ی تعریف نیوهام، سازه‌هایی که در درون یا روی سطح آن‌ها محرک و حسگر قرارگرفته است و دارای توانایی حس‌کنندگی و کارکرد صحیح هستند، سازه‌های باهوش نام دارند.

همانند شکل(۱- ۳- ۱)، یک مجموعه‌ی سازه‌ی هوشمند از چند بخش تشکیل شده است. یک بخش وظیفه‌ی تحمل بارها (الکتریکی، مکانیکی،حرارتی یا مغناطیسی) را به عهده دارد که بخش نافعال نام دارد. بخش دیگر ماده‌ی فعال است که نقش آن حس‌کنندگی و تحریک می‌باشد. هنگامی که سازه‌ی هوشمند با لایه‌ی فعال مانند پیزوالکتریک زیر اثر بارهای خارجی تغییرشکل می‌دهد، لایه‌ی فعال (حسگر) نیز تغییرشکل می‌دهد و با توجه به رفتار مواد آن یک شارژ سطحی متناسب با بار وارده تولید می‌شود. این شارژ به یک بخش مقایسه فرستاده می‌شود و به وسیله این بخش یک ولتاژ مناسب برای لایه‌ی پیزوالکتریک (محرک) تولید می‌گردد و تغییرشکل وابسته را به سازه وارد می‌کند. در نتیجه، با این روش دامنه‌ی نوسان کاهش می‌یابد.

در آغاز قرن ۲۱، پژوهش‌گران در آستانه‌ی تولید نسل جدیدی از مواد و سازه‌های هوشمند هستند. این نسل از ماده‌های هوشمند در مورد جفت‌شدگی الکتروترمومکانیکی و هوشمندی در مقیاس نانو می‌باشد. با پیدایش این مواد جدید، بحث دوام و عملکرد آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. این مجموعه زیر اثر موقعیت‌های مختلفی به کار می‌رود.

شرایطی مانند کمینه و بیشینه دما، فشار، بار، کرنش، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، مشکل‌های جدیدی برای طراحی و نگهداری سازه‌های هوشمند به وجود می‌آورد. هزینه‌های بالای پژوهش‌های آزمایشگاهی باعث شده است که تحلیل‌های نظری بیشتر به کار روند.



شکل (۱- ۳- ۱)- مجموعه‌ی سازه‌ی هوشمند

آنچه در این پایان‌نامه ارائه می‌شود مروری بر گام‌های تحلیل نظری سازه‌های هوشمند است. به این صورت که در آغاز، ویژگی‌های ماده‌های تشکیل دهنده و رابطه‌های آن‌ها می‌آید. در ادامه، با استفاده از نگره‌های مختلف سازه‌ای، چندین رابطه‌سازی ارائه می‌شود. سپس، به رابطه‌سازی پیشنهادی برای الگوسازی جزء محدود سازه‌های پوسته‌های متقارن محوری مرکب هوشمند پرداخته می‌شود. پاسخ‌های رابطه‌های پیشنهادی با نرم‌افزار *ANSYS* نیز مقایسه می‌شوند و در پایان به پیشنهادهای لازم برای پژوهش‌های بیشتر اشاره می‌شود.

فصل دوم : مشخصه‌های مواد

۲-۱- پیشگفتار

استفاده از ماده‌ی مرکب در سازه‌ها به علت ویژگی‌های مهندسی بهتر نسبت به مصالح معمول رو به افزایش است. ویژگی‌هایی مانند: نسبت بالای مقاومت به وزن، بهبود مقاومت در برابر خوردگی و فرسایش، عایق‌بندی حرارتی و صوتی و مانند این‌ها سبب کاربرد گسترده‌ی این ماده در سازه‌های هوایی، فضایی، زیردریایی، وسیله‌های پزشکی و ورزشی شده است. با پیدایش مواد پیزوالکتریک، کاربرد همزمان این دو گونه از مواد در سازه‌های صنعتی بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرد. دلیل اصلی آن، توانایی بالای این دسته از سازه‌ها در سازگاری با تغییر حالت محیط پیرامونشان می‌باشد. در ادامه به معرفی مشخصه‌های هر یک از این دو ماده پرداخته می‌شود.

۲-۲- ماده‌ی مرکب

ماده‌ی مرکب را به طور کلی در ۴ گروه طبقه‌بندی می‌کنند. ماده‌ی مرکب رشته‌ای که شامل رشته‌هایی در یک ماده‌ی چسبنده(ماتریس) می‌باشد. ماده‌ی مرکب لایه‌لایه که از چندین لایه با جنس‌های مختلف به هم چسبیده تشکیل شده است. ماده‌ی مرکب ذره‌ای که از قرار گرفتن ذره‌های فلز یا نافلز در یک چسباننده به وجود می‌آید. از ترکیب دو یا تمامی سه نوع پیشین گونه‌ی ترکیبی در دسترس قرار می‌گیرد. با افزایش روزافزون استفاده از ماده‌ی مرکب تقویت شده‌ی رشته‌ای در سازه‌ها، مطالعه‌ی رفتار آن‌ها ارزشمند است. هم اکنون، تلاش‌های فراوانی برای تعیین

ویژگی‌های ایستایی و پویایی این گونه سازه‌ها صورت می‌گیرد. رفتار بیشتر سازه‌های مرکب واقعی راه‌حل دقیق ندارند. به همین دلیل از تحلیل تقریبی برای آن‌ها بهره‌جویی می‌شود. روش جزء محدود یک فن تقریبی مؤثر عددی برای مساله‌های مقدارهای مرزی، مقدارهای اولیه و ویژه و همچنین پیش‌بینی پاسخ سازه‌های مرکب می‌باشد. در ادامه این فصل، به معرفی رفتار مکانیکی ماده‌ی مرکب پرداخته می‌شود.

۲-۳- نگره‌ی کشسانی ناهمسان‌گرد

برای درک مناسبی از رفتار مکانیکی ماده‌ی مرکب باید رفتار این ماده را شناخت. پیش از پرداختن به رابطه‌های ریاضی، نخست، از تفاوت میان ماده‌های همگن و ناهمگن، همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد سخن به میان می‌آید. یک ماده را همگن گویند اگر ویژگی‌های ماده در داخل آن بدون تغییر باشد. در برابر این، در یک ماده‌ی ناهمگن ویژگی‌های ماده تابعی از موقعیت است. اگر ویژگی‌های ماده در یک نقطه مستقل از جهت باشد آن را همسان‌گرد می‌نامند. در صورتی که ویژگی‌های ماده در جهت‌های مختلف مقدارهای متفاوتی داشته باشد به آن ناهمسان‌گرد می‌گویند [۹]. در حالت کلی یک ماده را می‌توان در یکی از چهار گروه زیر قرار داد:

- همسان‌گرد و همگن
- همسان‌گرد و ناهمگن
- ناهمسان‌گرد و همگن
- ناهمسان‌گرد و ناهمگن

۲-۳-۱- رابطه‌های مواد

نخست به رابطه‌ی ماده کشسان خطی پرداخته می‌شود. در دستگاه مختصه‌ی دکارتی سه بعدی، یک رابطه‌ی خطی بین ۶ مؤلفه‌ی تنش و کرنش وجود دارد. این برابری قانون هوک نام دارد و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_k = C_{kj}\,\varepsilon_j \qquad (k = 1,2,\dots,6) \qquad (۲-۱)$$