بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه

مدلسازی و آنالیز الکترومکانیکی ورقها با لایه های پیزوالکتریک و بررسی تاثیر المانهای پیزوالکتریک بر عملکرد ورقها

استاد راهنما :

دکتر محمد جواد فدایی

مؤلف :

جواد نصر اصفهانی

خردادماه ۱۳۸۹

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

گروه عمران

دانشکده فني و مهندسي

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : جواد نصر اصفهانی

استاد راهنما : دکتر محمدجواد فدایی

داور ۱ : دکتر حسین ابراهیمی

داور۲ : دکتر حامد صفاری

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع : دکتر سعیدرضا صیدنژاد

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر غلامرضا پورابراهیم

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

روان پاک مادرم

پدرم بزرگترین تکیه گاه و یاورم

به همراهي هميشگي و خالصانه ی همسرم

و به نگاه مهربان دخترم مهلا

تشکر و قدردانی :

خداوند منان را به پاس الطاف و عنایات بی نهایتش که منت بر من نهاده و راه بر من گشود سپاسگزارم.

ضمن تقدیر و تشکر از تمامی اساتید در دوران تحصیل، از تلاشهای بی دریغ استاد گرانقدر جناب اقای دکتر فدایی که مسئولیت راهنمایی اینجانب را در تدوین و تنظیم هر چه بهتر این رساله بر عهده داشتند، کمال تقدیر و تشکر را داشته. همچنین از همسرم که در طول تحصیل همیشه همراه و یاورم بود و از هیچ تلاشی فروگذار نبود نهایت سپاس و قدردانی را دارم. و از خداوند منان توفیق روز افزون همگی آنها را خواستارم.

Shahid Bahonar University of Kerman

Faculty of Technical and Engineering

Department of Civil engineering

Modeling and electromechanical analysis of plates with piezoelectric layers and consideration of influence of piezoelectric elements on operation of plates

Supervisor :

DR. Mohammad javad fadaee

Prepared by :

Javad nasr esfahani

A Thesis Submitted as a Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil engineering (M. Sc.)

june 2010

فهرست مطالب

صفحه

فصل اول- کلیات

۱-۱- مقدمه ۱۷

۱-۲- پیشینه تحقیق و بررسی منابع ۱۹

۱-۳- مطالعه و بررسی مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان در مهندسی عمران ۲۹

۱-۳-۱- انواع مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ۲۹

۱-۳-۲- اثرات بکاراندازنده ۳۳

۱-۳-۳- اثرات سنسور ۳۶

۱-۳-٤- بررسی خلل و فرج در سازه‌های بتنی و اثر خصوصیات مواد مرکب پیزوالکتریک سرامیکی بر روی آنها ۳۷

۱-۳-٤- ۱- رابطه بین حجم سرامیک و تخلخل ۳۸

۱-۳-٤- ۲- رابطه بین حجم سرامیک و مقاومت فشاری ۳۹

۱-۳-٤- ۳- رابطه بین حجم سرامیک و دی الکتریسیته ٤۰

۱-۳-۵- پارامترهای وابسته به قطبش در پیزوالکتریک‌های مرکب بر پایه سیمان ٤۱

۱-۳-۵- ۱- دما ٤۱

۱-۳-۵- ۲- شدت میدان الکتریکی ٤۲

۱-۳-۵- ۳- تأثیر شدت میدان الکتریکی (E) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d_{33}) در فرآیند قطبش ٤۲

۱-۳-۵- ٤- تأثیر زمان قطبش (t) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d۳۳) ٤۳

۱-۳-۵- ۵- تأثیر دمای قطبش (T) بر روی کرنش پیزوالکتریک (d۳۳) ٤٤

۱-۳-٦- اثر اندازه ذرات پیزوالکتریک بر روی خصوصیات دی‌الکتریسیته و ضریب کرنش پیزوالکتریسیته ٤٤

فصل دوم- سازه ی هوشمند و مواد پیزوالکتریک

۲-۱- سازه هوشمند ٤۸

۲-۱-۱- انواع سازه های هوشمند ۵۱

۲-۲- مواد هوشمند ۵۱

۲-۲-۱- انواع مواد هوشمند ۵۱

۲-۳- آشنایی با پیزوالکتریک ها (کهربا فشارها) ۵۲

۲-۳-۱- تاریخچه مواد پیزوالکتریک ۵٤

۲-۳-۲پیزوالکتریک‌درنقش محرک ۵٦

۲-۳-۲- ۱-پیزوالکتریک های تک لایه با کاربری محرک ٥٦
۲-۳-۲- ۱-پیزوالکتریک های دو لایه با کاربری محرک ٥٧
۲-۳-۳ پیزوالکتریک‌درنقش حسگر ٥٩
۲-٤- روابط‌جاکم بر پیزوالکتریک ها ٦١
۲-٤-۱- پلاریزاسیون ٦٢
۲-٤-۱- ۱- پلاریزاسیون الکترونی ٦٣
۲-٤-۱- ۲- پلاریزاسیون جهتی (دو قطبی) ٦٣
۲-٤-۱- ۳- پلاریزاسیون بار فضایی ٦٤
۲-٤-۱- ٤- پلاریزاسیون اتمی (یونی) ٦٤
۲-٤-۲- مولفه های تنش وکرنش ٦٩
۲-٤-۳- مولفه های میدان االکتریکی وجابجایی الکتریکی ٧٠
۲-٤-٤- مولفه های مشخصه الاستیک مواد ٧٠
۲-٤-٥- مولفه های ماتریس ثوابت پیزوالکتریکی ٧١
فصل سوم- معادلات الاستیک خطی مواد ناهمسانگرد
۳-۱- تعاریف ٧٧
۳-۲- انواع مواد پیزوالکتریک ٧٩
۳-۳- قطبش ٨٠
۳-٤- بررسی ماتریس ضرایب الاستیسیته در مواد مختلف ٨٢
۳-٤-۱- بررسی ماتریس ضرایب الاستیسیته در مواد مختلف ٨٢
۳-٤-۲- ماده منوکلینیک ٨٢
۳-٤-۳- ماده دوسانگرد(ارتوتروپیک) ٨٣
۳-٤-٤- ماده همسانگرد عرضی ٨٤
۳-٥- معادلات ساختاری حاکم بر مواد پیزوالکتریک ٨٥
۳-٥-۱- رابطه تنش و کرنش ٨٥
۳-٥-۲- رابطه میدان الکتریکی و کرنش ٨٦
۳-٥-۳- رابطه میدان الکتریکی و چگالی شار الکتریکی ٨٧
۳-٥-٤- رابطه چگالی شار الکتریکی و تنش ٨٨
۳-٦- محاسبه روابط ساختاری مواد پیزوالکتریک با استفاده از انرژی آزاد کل ٨٩
۳-۷- صفحات نازک پیزوالکتریک ٩٣
۳-۷-۱- اصل هامیلتون ٩٣
۳-۸- روابط حاکم در مختصات منحنی‌الخط ٩٥
۳-۸-۱- سیستم مختصات استوانه‌ای ٩٥
۳-۹- بررسی تحلیلی و عددی پیزوالکتریک‌های بیمورف کششی و برشی ٩٦

۳-۹-۱- پیزوالکتریک‌های بیمورف کششی ۹۶
۳-۹-۲- پیزوالکتریک های بیمورف برشی ۹۸
۳-۹-۳- پیزوالکتریک بیمورف کششی و برشی ۱۰۰
۳-۱۰- نتایج تحلیلی و عددی پیزوالکتریک‌های بیمورف تحت بارالکتریکی ۱۰۱
۳-۱۰-۱- تیر بیمورف کششی ۱۰۱
۳-۱۰-۲- تیر بیمورف برشی ۱۰۳
۳-۱۰-۳- تیر بیمورف کششی وبرشی ۱۰۳
۳-۱۱- بررسی دو حالت خاص ۱۰۵
۳-۱۱-۱- مدار اتصال کوتاه ۱۰۵
۳-۱۱-۲- مدار باز ۱۰۶
۳-۱۲- توده پیزوالکتریک ۱۰۷
۳-۱۳- معادلات حاکم بر سیستم (جرم – فنر – میراگر- پیزوالکتریک) ۱۰۹
۳-۱۳-۱- سیستم (جرم - فنر- میراگر) ۱۰۹
۳-۱۳-۲- سیستم (جرم- فنر- میراگر- بکاراندازنده پیزوالکتریک) ۱۱۰
۳-۱۳-۳- سیستم (جرم- فنر- بکاراندازنده پیزوالکتریک) ۱۱۱
۳-۱۳-۳- ۱- اتصال کوتاه ۱۱۱
۳-۱۳-۳- ۲- مدار باز ۱۱۲
۳-۱۴- روابط حاکم بر صفحات مرکب هوشمند پیزوالکتریک ۱۱۳

فصل چهارم- تحلیل عددی مسائل پیزوالکتریک

۴-۱- آنالیز استاتیکی ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی ۱۱۷
۴-۱-۱- حل دقیق مسئله ۱۱۷
۴-۱-۱-۱- اتصال کوتاه ۱۱۸
۴-۱-۱-۲- مدار باز ۱۱۹
۴-۱-۲- تحلیل مسأله به روش اجزای محدود ۱۲۳
۴-۲- تحلیل استاتیکی استوانه سرامیکی تحت تنش برشی مماسی ۱۳۲
۴-۳- آنالیز دینامیکی ورق پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی ۱۳۶
۴-۳-۱- حل دقیق مسئله ۱۳۶
۴-۳-۲- مقایسه نتایج تحلیلی وعددی ورق هوشمند پیزوالکتریک ۱۳۹
۴-۴- مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی تیر مرکب همراه با بکاراندازنده‌های پیزوالکتریک با مکانیزم-های کششی و برشی ۱۴۳
۴-۴-۱- آنالیز استاتیکی ۱۴۳
۴-۴-۱-۱- مکانیزم کششی ۱۴۴
۴-۴-۱-۲- مکانیزم برشی ۱۴۷

٤-٤-٢- آنالیز دینامیکی ١٥٢
٤-٤-٢-١- مکانیزم کششی ١٥٢
٤-٤-٢-٢- مکانیزم برشی ١٥٤
٤-٥- مدل‌سازی ورق هوشمند سه لایه با مکانیزم برشی ١٥٥
٤-٥-١- مقایسه نتایج ریلی - ریتز و اجزای‌محدود ١٥٨
٤-٥-٢- بررسی اثر تغییر زاویه راستای قطبش در صفحه (x-y) بر عملکرد ورق سه لایه هوشمند ١٦١
٤-٥-٣- بررسی اثر تغییر زاویه راستای قطبش در صفحه (x-z) بر عملکرد ورق سه لایه هوشمند ١٦٣
٤-٥-٤- تغییر نوع پیزوالکتریک به‌کاررفته در ورق سه لایه هوشمند و بررسی تأثیر آن بر جابجایی عرضی ورق ١٦٥
٤-٦- حل دقیق ورق لایه‌لایه با بکاراندازنده برشی پیزوالکتریک ١٦٧
٤-٦-١- فرمول بندی مسئله ١٦٧
٤-٦-٢- حل دقیق ١٦٩
٤-٦-٣- ارائه نتایج ١٧٥
٤-٦-٣-١- ارائه نتایج در حالت بارگذاری مکانیکی ١٧٥
٤-٦-٣-٢- ارائه نتایج در حالت بارگذاری الکتریکی ١٨٠
٤-٧- بهینه سازی ١٨٤

فصل پنجم- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

٥-١- نتیجه‌گیری ١٨٩
٥-٢- پیشنهاد برای ادامه کار ١٩٠

مراجع ١٩٢

پیوست الف ١٩٥

فهرست شکل‌ها

عنوان | صفحه

شکل۱-۱. اثر گذر زمان بر زندگی انسان ۲۰

شکل۱-۲. یک نمونه سرامیک پیزوالکتریک مرکب (۳-۰) بر پایه سیمان ۳۰

شکل۱-۳. مقایسه ضریب کرنش پیزوالکتریک (d_{33}) و زمان عمل‌آوری برای سرامیک/ سیمان مرکب وسرامیک/ پلیمر مرکب تحت اختلاف پتانسیل 4.3KV/mm و زمان ۳۰ دقیقه ۳۰

شکل۱-۴. مقایسه ضریب کرنش پیزوالکتریک (d_{33}) و زمان عمل‌آوری با توجه به میزان درصد پودر سرامیک پیزوالکتریک برای پیزوالکتریک های مرکب بر پایه سیمان (۳-۰) تحت اختلاف پتانسیل 4.3KV/mm در فرآیند قطبش و زمان قطبش ۱۰ دقیقه ۳۱

شکل۱-۵. یک نمونه ازمواد مرکب سرامیک پیزوالکتریک ۲-۲ بر پایه سیمان الف) نحوه عملکرد ب) نمونه ساخته شده ۳۲

شکل۱-۶. پاسخ مکانیکی مواد مرکب سرامیک پیزوالکتریک ۲-۲ بر پایه سیمان تحت بارگذاری مکانیکی، الکتریکی و جریان متناوب ۳٤

شکل ۱-۷. رابطه الکترومکانیکی مواد مرکب سرامیک پیزوالکتریک ۲-۲ بر پایه سیمان تحت شرایط بارگذاری مختلف مکانیکی با جریان متناوب ۳۵

شکل ۱-۸. پاسخ الکتریکی مواد مرکب سرامیک پیزوالکتریک ۲-۲ تحت سیکل‌های بارگذاری مختلف ۳٦

شکل ۱-۹. پاسخ الکتریکی مواد مرکب سرامیک پیزوالکتریک ۲-۲ تحت سیکل‌های بارگذاری مختلف ۳۷

شکل ۱-۱۰. رابطه تخلخل کلی و سطح تخلخل با نسبت حجم سرامیک به سیمان برای مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ۳۸

شکل۱-۱۱. رابطه چگالی محاسبه شده و چگالی اندازه‌گیری شده در مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان با نسبت‌های مختلف سرامیک به سیمان ۳۹

شکل۱ -۱۲. رابطه بین مقاومت فشاری مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان و نسبت حجم سیمان به سرامیک ۳۹

شکل ۱-۱۳. رابطه مقاومت فشاری و حجم تخلخل کلی در مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ٤۰

شکل ۱-۱۴. رابطه بین حجم تخلخل و ثابت دی‌الکتریک نسبی در مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ٤۰

شکل۱-۱۵. رابطه بین زمان و k_t در فرآیند قطبش برحسب دماهای مختلف و شدت میدان الکتریکی ثابت ($5.5 KV/mm$) برای مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ٤۱

شکل۱-۱۶. رابطه بین زمان و k_t در فرآیند قطبش بر حسب اختلاف پتانسیل‌های مختلف و دمای ثابت (130^{oc}) برای مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان ٤۲

شکل ۱-۱۷. رابطه کرنش پیزوالکتریک (d_{33}) و شدت میدان الکتریکی (E) برای مواد مرکب ٤۲

پیزوالکتریک بر پایه سیمان با درصدهای مختلف مواد پیزوالکتریک
شکل ۱-۱۸. رابطه کرنش پیزوالکتریک (d_{33}) و زمان قطبش (t) بر حسب دقیقه در فرآیند قطبش برای مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان با درصدهای مختلف مواد پیزوالکتریک. ٤٣
شکل ۱-۱۹. رابطه کرنش و دمای قطبش بر حسب درجه‌سانتی‌گراد در فرآیند قطبش برای مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان با درصدهای مختلف مواد پیزوالکتریک ٤٤
شکل ۱-۲۰. تصویر الکترونی از مواد مرکب پیزوالکتریک بر پایه سیمان پرتلند با اندازه مختلف ذرات پیزوالکتریک (الف) ۶۲۰ میکرومتر و (ب) ۳/۸ میکرومتر ٤٥
شکل ۱-۲۱. نتایج ثابت دی‌الکتریسیته بر روی مواد مرکب پیزوالکتریک همراه با سیمان پرتلند ٤٦
شکل۱-۲۲. اثر اندازه ذرات پیزوالکتریک بر روی کرنش پیزوالکتریک در مواد مرکب پیزوالکتریک همراه با سیمان پرتلند ٤٦
شکل۲-۱. جایگاه سازه هوشمند ٤٩
شکل۲-۲. بدن انسان نمونه ای از یک سازه هوشمند ٥٠
شکل۲-۳. مقایسه بدن انسان با یک سازه هوشمند ٥٠
شکل۲-٤. تغییر ابعاد بلور کوارتز در اثر اعمال ولتاژ ٥٣
شکل۲-٥. رابطه میدان‌های مکانیکی و الکتریکی ٥٥
شکل۲-٦. اثر کمیت‌های الکتریکی (اختلاف پتانسیل الکتریکی) بر کمیت‌های مکانیکی (کرنش) در مواد هوشمند پیزوالکتریک ٥٥
شکل۲-۷. پیزوالکتریک در نقش محرک ٥٦
شکل۲-۸. افزایش ضخامت تک لایه پیزوالکتریک ٥٦
شکل۲-۹. تغییر طول عرضی لایه پیزوالکتریک ٥٦
شکل۲-۱۰. تغییر طول ورق دو لایه ای پیزوالکتریک ٥٧
شکل۲-۱۱. خمش ورق دو لایه ای پیزوالکتریک قرار گرفته به صورت یک سر گیردار ٥٨
شکل۲-۱۲. خمش ورق دو لایه ای پیزوالکتریک قرار گرفته به صورت نصف شده ی دو سر گیردار ٥٨
شکل۲-۱۳. خمش ورق دو لایه ای پیزوالکتریک قرار گرفته به صورت یک تیر ساده ٥٨
شکل۲-۱٤. نمودار نقطه ای کارکرد پیزوالکتریک محرک ٥٩
شکل۲-۱٥. پیزوالکتریک در نقش سنسور ٦٠
شکل۲-۱٦. انرژی الکتریکی در اثر تغییر طولی المان ٦٠
شکل۲-۱۷. انرژی الکتریکی در اثر تغییر طول عرضی ٦٠
شکل۲-۱۸. نمودار نقطه ی کارکرد پیزوالکتریک حسگر ٦١
شکل۲-۱۹. پلاریزاسیون الکترونی ٦٣
شکل۲-۲۰. پلاریزاسیون جهتی ٦٣
شکل۲-۲۱. پلاریزاسیون بار فضایی ٦٤
شکل۲-۲۲. پلاریزاسیون یونی ٦٤

شکل۲-۲۳. اثرات متقابل میدانهای الکتریکی و مکانیکی ٦٨
شکل۲-۲٤. الف- مولفه های تنش و کرنش در نماد گذاری تانسوری ٦٩
شکل۲-۲٤. ب- مولفه های تنش و کرنش در نماد گذاری مهندسی ٦٩
شکل۲-۲٤. ج- مولفه های میدان الکتریکی در نماد گذاری تانسوری و مهندسی ۷۰
شکل۲-۲۵. تغییر شکل برشی مکعب پیزوالکتریک ۷٤
شکل۳-۱. فرآیند قطبش در مواد هوشمند پیزوالکتریک ۸۱
شکل۳-۲. صفحه تقارن ماده مونوکلینی ۸۳
شکل۳-۳. سه صفحه تقارن ماده دوسانگرد ۸٤
شکل۳-۴. رابطه تنش و کرنش در مواد هوشمند پیزوالکتریک ۸۵
شکل۳-۵. رابطه خطی بین میدان الکتریکی و کرنش در مواد هوشمند پیزوالکتریک ۸٦
شکل۳-۶. تیر بیمورف هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم کششی ۹۷
شکل۳-۷. تغییر شکل تیر مرکب هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی استاتیکی وتکیه‌گاه گیردار[ABAQUS]. ۹۸
شکل ۳-۸. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی ۹۹
شکل ۳-۹. تغییر شکل تیر هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی و تکیه-گاه گیردار[ABAQUS]. ۱۰۰
شکل ۳-۱۰. تیر هوشمند بیمورف پیزوالکتریک با مکانیزم ترکیبی (کششی – برشی) ۱۰۱
شکل ۳-۱۱. تغییر شکل تیر بیمورف پیزوالکتریک برای حالت ترکیبی کششی – برشی بر حسب زاویه قطبش(L/H=10) ۱۰٤
شکل ۳-۱۲. تغییر شکل تیر بیمورف پیزوالکتریک برای حالت ترکیبی کششی – برشی بر حسب زاویه قطبش(L/H=5) ۱۰۵
شکل۳-۱۳. مدار اتصال کوتاه ۱۰٦
شکل ۳-۱۴. مدار باز ۱۰٦
شکل۳-۱۵. توده هوشمند پیزوالکتریک ۱۰۷
شکل ۳-۱۶. لایه i ام توده هوشمند پیزوالکتریک ۱۰۸
شکل ۳-۱۷. سیستم (جرم – فنر – میراگر) ۱۰۹
شکل ۳-۱۸. سیستم (جرم – فنر – میراگر- بکاراندازنده پیزوالکتریک) ۱۱۰
شکل۳-۱۹. سیستم (جرم- فنر- بکاراندازنده پیزوالکتریک) ۱۱۱
شکل۳-۲۰. سیستم (جرم- فنر- بکاراندازنده پیزوالکتریک) در حالت اتصال کوتاه ۱۱۱
شکل۳-۲۱. سیستم(جرم- فنر- بکاراندازنده پیزوالکتریک)در حالت مدار باز ۱۱۲
شکل۳-۲۲. صفحه مرکب سه لایه شامل لایه‌های هوشمند پیزوالکتریک و لایه الاستیک میانی ۱۱۳
شکل۳-۲۳. توزیع تنش و کرنش صفحه مرکب سه لایه شامل لایه های هوشمند پیزوالکتریک ولایه الاستیک میانی ۱۱٤

شکل۳-۲٤. اعمال ولتاژ به سازه مرکب سه لایه هوشمند شامل لایه‌های پیزوالکتریک ولایه الاستیک میانی ۱۱۵
شکل۴-۱. ورق سرامیکی الکترودار با طول وعرض بی‌نهایت و ضخامت ثابت $(2h)$ تحت بارهای مکانیکی و راستای قطبش در جهت ضخامت ۱۱۷
شکل۴-۲. مقایسه کارانجام شده در ورق هوشمند پیزوالکتریک در حالت‌های اتصال کوتاه و مدار باز ۱۲۱
شکل۴-۳. مدل اجزای‌محدود ورق هوشمند پیزوالکتریک $(PZT\ 5H)$ تحت بار مکانیکی کششی و تکیه‌گاه گیردار بر روی چهار لبه در نرم‌افزار ABAQUS ۱۲۳
شکل٤-٤. تنش (T_{11}=T_{22}) در حالت اتصال کوتاه برای ماده $PZT\ 5H$ الف) درنرم‌افزار ABAQUS ب) در نرم‌افزارANSYS ۱۲٤
شکل٤-٥. شدت میدان الکتریکی (E_3) در حالت مدار باز برای ماده $PZT\ 5H$ الف) درنرم‌افزار ABAQUS ب)در نرم‌افزار ANSYS ۱۲٥
شکل٤-٦. مقایسه کرنش برای مواد مختلف پیزوالکتریک در سه حالت مدار باز ، اتصال کوتاه و غیر فعال ۱۳۱
شکل٤-۷. مقایسه تنش برای مواد مختلف پیزوالکتریک در سه حالت مدار باز ، اتصال کوتاه و غیر فعال ۱۳۱
شکل٤-۸. درصد کاهش تنش وکرنش در مواد مختلف پیزوالکتریک (در حالت غیر فعال نسبت به فعال) ۱۳۲
شکل٤-۹. استوانه سرامیکی هوشمند پیزوالکتریک با طول بی‌نهایت و راستای قطبش مماسی تحت بار مکانیکی برشی بر روی سطح خارجی و تکیه‌گاه گیردار بر روی سطح داخلی استوانه ۱۳۳
شکل٤-۱۰. الف مدل نرم‌افزاری استوانه سرامیکی هوشمند پیزوالکتریک $(PZT\ 5H)$با طول بی‌نهایت و راستای قطبش مماسی تحت بار مکانیکی برشی بر روی سطح خارجی و تکیه‌گاه گیردار بر روی سطح داخلی ۱۳۵
شکل٤-۱۰. . ب تنش برشی (T_{12}) استوانه هوشمند پیزوالکتریک $(PZT\ 5H)$ تحت تنش برشی روی سطح خارجی و راستای قطبش مماسی ۱۳۵
شکل۴-۱۱. ورق سرامیکی الکترودار هوشمند پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی دینامیکی با ضخامت ثابت $(2h)$ و طول وعرض بی‌نهایت ۱۳٦
شکل ۴-۹. نمودار $0.2647\tan\xi h = \xi h$ برای تعیین نخستین فرکانس طبیعی متقارن ورق پیزوالکتریک (PZT 5H) ۱٤۰
شکل ۴-۱۰. الف مدل اجزای‌محدود ورق هوشمند پیزوالکتریک $(PZT\ 5H)$ تحت بار الکتریکی دینامیکی و شرایط مرزی مکانیکی تکیه‌گاه گیردار بر روی چهار لبه ۱٤۱
شکل ۴-۱۰. ب کشیدگی ورق هوشمند پیزوالکتریک $(PZT\ 5H)$ در راستای ضخامت تحت بار ۱٤۱

الکتریکی دینامیکی و شرایط مرزی مکانیکی تکیه‌گاه گیردار بر روی چهار لبه
شکل٤-١١. نمودار پاسخ فرکانسی ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی دینامیکی و تکیه‌گاه گیردار بر روی چهار لبه ١٤٢
شکل٤-١٢. مقایسه نخستین فرکانس طبیعی مواد مختلف پیزوالکتریک ١٤٣
شکل٤-١٣. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با ماده ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٤٤
شکل٤-١٤. تغییر شکل قائم تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$)با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٤٥
شکل٤-١٥. مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک [١٤] با نتایج نرم افزار ABAQUS ١٤٥
شکل٤-١٦. مقایسه جابجایی عرضی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS ١٤٦
شکل٤-١٧. مقایسه درصد کاهش جابجایی عرضی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS نسبت به حالت غیر فعال ١٤٧
شکل۴-١٨. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٤٨
شکل۴-١٩. تغییر شکل قائم تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٤٨
شکل۴-٢٠. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$)با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٤٩
شکل ۴-٢١الف. مقایسه جابجایی عرضی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS ١٥٠
شکل ۴-٢١ب.مقایسه درصد کاهش جابجایی عرضی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS نسبت به حالت غیر فعال ١٥٠
شکل۴-٢٢الف. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک ١٥١
شکل ۴-٢٢ب. مقایسه جابجایی عرضی تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با

مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS ۱۵۱
شکل٤-۲۳. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی ۱۵۲
شکل٤-۲٤. مود شکل‌های تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم کششی ۱۵۳
شکل٤-۲۵. تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی ۱۵٤
شکل٤-۲٦. . مود شکل‌های تیر مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT\ 5H$) با مکانیزم برشی ۱۵۵
شکل٤-۲۷. مدل اجزای‌محدود ورق سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی استاتیکی در نرم افزار (ABAQUS) الف) تکیه گاه گیردار- "گیردار- آزاد- آزاد" ب) تکیه گاه "مفصلی- مفصلی- آزاد- آزاد" ۱۵۷
شکل۴-۲۸. جابجایی عرضی ورق مربعی هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه‌گاه "گیردار- گیردار- آزاد- آزاد" وبار الکتریکی استاتیکی در نرم‌افزارANSYS ۱۵۹
شکل۴-۲۹. جابجایی عرضی ورق مربعی هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه‌گاه "گیردار- گیردار- آزاد- آزاد" و بار الکتریکی استاتیکی در نرم‌افزار ABAQUS ۱۵۹
شکل ۴-۳۰. مقایسه جابجایی عرضی ورق مرکب سه لایه هوشمند پیزوالکتریک ($PZT4$) با مکانیزم برشی تحت بار الکتریکی و استاتیکی بر روی سطوح پیزوالکتریک در نرم افزار ABAQUS ۱٦۰
شکل۴-۳۱. ابجایی عرضی گوشه آزاد ورق سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه-گاه"گیردار- گیردار- آزاد- آزاد" و بار الکتریکی استاتیکی بر حسب زاویه بردار قطبش در صفحه (x-y) در نرم‌افزارABAQUS ۱٦۲
شکل۴-۳۲. جابجایی عرضی گوشه آزاد ورق سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه‌گاه "مفصل-مفصل- آزاد- آزاد" و بار الکتریکی استاتیکی بر حسب زاویه بردار قطبش در صفحه (x-y) در نرم‌افزارABAQUS ۱٦۲
شکل۴-۳۳. جابجایی عرضی گوشه آزاد ورق سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه‌گاه "گیردار- گیردار- آزاد- آزاد" و بار الکتریکی استاتیکی بر حسب زاویه بردار قطبش در صفحه (x-z) در نرم‌افزارABAQUS ۱٦۳
شکل۴-۳۴. جابجایی عرضی گوشه آزاد ورق سه لایه هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی تحت تکیه‌گاه"مفصل-مفصل- آزاد- آزاد" و بار الکتریکی استاتیکی بر حسب زاویه بردار قطبش در صفحه (X-Z) در نرم‌افزارABAQUS ۱٦٤
شکل۴-۳۵. جابجایی عرضی خط تقارن ورق گیردار- گیردار- آزاد- آزاد برای انواع مختلف پیزوسرامیک ۱٦٦

شکل۴-۳۶. جابجایی عرضی خط تقارن ورق مفصل- مفصل- آزاد- آزاد برای انواع مختلف پیزوسرامیک ۱۶۶
شکل۴-۳۷. لایه‌های هوشمند مستطیلی همگن پیزوالکتریک ۱۶۷
شکل٤-۳۸. مقایسه جابجایی مکانیکی (U_1) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی استاتیکی بر روی سطح بالایی ۱۷۶
شکل٤-۳۹. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ANSYS برای جابجایی مکانیکی (U_1) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۷
شکل ٤-٤۰. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای جابجایی مکانیکی (U_1) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۷
شکل٤-٤۱. مقایسه جابجایی مکانیکی (U_3) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی استاتیکی بر روی سطح بالایی ۱۷۷
شکل ٤-۴۲. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ANSYS برای جابجایی مکانیکی (U_3) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۸
شکل ٤-٤۳. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای جابجایی مکانیکی (U_3) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۸
شکل٤-٤٤. مقایسه تنش مکانیکی (σ_{11}) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی استاتیکی بر روی سطح بالایی ۱۷۸
شکل ٤-٤٥ درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ANSYS برای تنش مکانیکی (σ_{11}) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۹
شکل ٤-٤٦ درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای تنش مکانیکی (σ_{11}) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۷۹
شکل٤-٤۷. مقایسه تنش مکانیکی (σ_{13}) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی استاتیکی بر روی سطح بالایی ۱۷۹
شکل ٤-٤۸. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای تنش مکانیکی (σ_{13}) تحت بار مکانیکی استاتیکی ۱۸۰
شکل٤-٤۹. مقایسه جابجایی مکانیکی (U_1) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی استاتیکی بر روی سطح بالایی ۱۸۱
شکل ٤-۵۰. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ANSYS برای جابجایی مکانیکی (U_1) تحت بار الکتریکی استاتیکی ۱۸۱
شکل ٤-۵۱. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای جابجایی مکانیکی (U_1) تحت بار الکتریکی استاتیکی ۱۸۱

شکل٤-٥٢. مقایسه جابجایی مکانیکی (U_3) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی بر روی سطح بالایی ۱۸۲
شکل ٤-٥٣. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ANSYS برای جابجایی مکانیکی (U_3) تحت بار الکتریکی استاتیکی ۱۸۲
شکل ٤-٥٤. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای جابجایی مکانیکی (U_3) تحت بار الکتریکی استاتیکی ۱۸۲
شکل ٤-٥٥. مقایسه تنش مکانیکی (σ_{13}) بر حسب S برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی بر روی سطح بالایی ۱۸۲
شکل ٤-٥٦. درصد خطای نسبی بین حل دقیق و ABAQUS برای تنش مکانیکی (σ_{13}) تحت بار الکتریکی استاتیکی ۱۸۳
شکل۴-۵۷. تیر مرکب سه لایه همراه با بکاراندازنده های پیزوالکتریک ۱۸٤
شکل۴-۵۸. نمای بالای تیر مرکب سه لایه با بکاراندازنده های پیزوالکتریک ۱۸۵
شکل۴-۵۹. تغییر شکل تیر مرکب همراه با لایه های پیزوالکتریک ۱۸٦
شکل۴-۶۰. صفحه مرکب سه لایه همراه با بکاراندازنده های پیزوالکتریک ۱۸۷
شکل٤-٦١. نمای روبروی صفحه مرکب سه لایه با بکاراندازنده‌های پیزوالکتریک ۱۸۷
شکل٤-٦٢. صفحه مرکب سه لایه همراه با بکاراندازنده های پیزوالکتریک ۱۸۸
شکل٤-٦٣. نمای روبروی صفحه مرکب سه لایه با بکاراندازنده‌های پیزوالکتریک ۱۸۸

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول۱-۱. سه گروه خلل و فرج	۳۷
جدول۱-۲. خواص برخی مواد پیزوالکتریک همسانگرد عرضی متداول	۷۵
جدول۲-۲. نتایج اعمال ولتاژ در شرایط یکسان به برخی مواد پیزوالکتریک همسانگرد عرضی متداول	۷٦
جدول۳-۱. محیطهای فیزیکی مختلف	۷۷
جدول۳-۲. مقایسه اجزای سازه هوشمند و بدن انسان	۷۹
جدول۳-۳. مزایا و معایب مواد هوشمند پیزوالکتریک	۸۰
جدول۳-٤. نوشتار ماتریسی	۸۹
جدول۳-۵. مقایسه نتایج تغییرشکل تحلیلی و عددی برای تیرهای بیمورف هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم کششی	۱۰۲
جدول۳-٦. مقایسه نتایج تغییرشکل تحلیلی و عددی برای تیرهای بیمورف هوشمند پیزوالکتریک با مکانیزم برشی	۱۰۳
جدول۴-۱. مقایسه k_{33}^2 برای مواد مختلف پیزوالکتریک	۱۲۰
جدول ۴-۲. خصوصیات مواد مختلف هوشمند پیزوالکتریک	۱۲۱
جدول٤-۳. نتایج تحلیلی اتصال کوتاه ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی	۱۲۲
جدول۴-۴. نتایج تحلیلی مدار باز ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی	۱۲۲

جدول ۴-۵. مقایسه نتایج کرنش $S_{33}\,(m/m)$ برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۶

جدول ۴-۶. مقایسه درصد خطای نسبی بین حل تحلیلی وعددی برای کرنش $S_{33}\,(m/m)$ ورق هوشمند پیزوالکتریک با مواد مختلف تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۶

جدول ۴-۷. مقایسه نتایج تنش $(T_{11}=T_{22})\,(N/m^2)$ برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۶

جدول ۴-۸. مقایسه درصد خطای نسبی بین حل تحلیلی و عددی برای تنش $(T_{11}=T_{22})\,(N/m^2)$ ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۷

جدول ۴-۹. مقایسه نتایج چگالی شار الکتریکی $(D_3)\,(C/m^2)$ برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۷

جدول٤-۱۰. مقایسه درصد خطای نسبی بین حل تحلیلی و عددی برای چگالی شار الکتریکی $(D_3)\,(C/m^2)$ ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت اتصال کوتاه ۱۲۷

جدول۴-۱۱. مقایسه نتایج تنش $(T_{11}=T_{22})\,(N/m^2)$ برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت مدار باز ۱۲۸

جدول۴-۱۲. مقایسه درصد خطای نسبی بین حل تحلیلی و عددی برای تنش $(T_{11}=T_{22})\,(N/m^2)$ ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت مدار باز ۱۲۸

جدول ۴-۱۳. مقایسه نتایج کرنش $(S_{33})\,(m/m)$ برای ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت مدار باز ۱۲۸

جدول٤-۱٤. مقایسه درصد خطای نسبی بین حل تحلیلی و عددی برای کرنش $(S_{33})\,(m/m)$ ورق هوشمند پیزوالکتریک تحت بار مکانیکی کششی در حالت مدار باز ۱۲۹