بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل خمش ورق‌های ضخیم هدفمند پیزوالکتریک

استاد راهنما

دکتر علیرضا سعیدی

استاد مشاور

مهندس میثم محمدی

نگارنده

مریم لری دهسراجی

دی ماه۱۳۹۲

دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد

رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

مریم لری دهسراجی

تحلیل خمش ورق‌های ضخیم هدفمند پیزوالکتریک

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه‌ی عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر علیرضا سعیدی با مرتبه‌ی علمی استاد امضاء

۲- استاد مشاور پایان‌نامه مهندس میثم محمدی با مرتبه‌ی علمی مربی امضاء

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر عماد جمعه زاده با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۴- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دکتر آزاده علیجانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

تشکر و قدردانی:

سپاسگذار خداوندی هستم که توفیق قدم گذاشتن در راه علم را به بنده‌ی خویش عطا فرمود. بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های مدبرانه‌ی استاد ارجمندم جناب آقای دکتر سعیدی ، از مشاور گرامیم جناب آقای مهندس محمدی، همچنین از جناب آقای دکتر جمعه زاده که زحمت داوری این پایانامه روبر عهده گرفتند، صمیمانه تشکر کنم.

در پایان بوسه می زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم، و بعد از خدا ستایش می کنم وجود مقدسشان را و تشکر می کنم از خواهران و برادران عزیزم که با مهربانی مشوق من در این راه بوده‌اند، و در پایان از همه‌ی دوستان خوبم کمال تشکر را دارم.

تمامی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های

حاصل از پژوهش موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه

ولی‌عصر (عج) رفسنجان است.

چکیده

در این پایان نامه تحلیل خمش ورق‌های ضخیم مستطیلی از جنس مواد هدفمند پیزوالکتریک و همچنین مواد هدفمند ایزوتروپ و هدفمند همسانگرد عرضی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر تعادل ورق بر پایه تئوری مرتبه‌ی بالاتر تغییر شکل برشی و عمودی با استفاده از اصل کار مجازی بدست آمده است. پاسخ معادلات حاصل با فرض تکیه گاه ساده روی هر چهار لبه ی ورق به صورت تحلیلی بیان شده است. در پایان، پس از بررسی صحت نتایج ارائه شده، نتایج عددی برای ابعاد گوناگون ارائه شده است. و همچنین اثر پارامتر های مختلف مانند توان ماده ی هدفمند، نسبت ضخامت به طول مشخصه، بر خیز و تنش‌های ورق برای شرایط مرزی الکتریکی مختلف با جزئیات مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: تحلیل خمش، ورق مستطیلی، مواد هدفمند، پیزوالکتریک، ورق ضخیم، تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی و عمودی.

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- مروری بر تحقیقات گذشته..... ۵

۱-۳ بیان مسئله و هدف از انجام پایان نامه..... ۵

فصل دوم: پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه..... ۱۱

۲-۲- مواد هدفمند..... ۱۲

۲-۲-۱- مواد هدفمند همسانگرد..... ۱۵

۲-۲-۲- مواد هدفمند همسانگرد عرضی..... ۱۶

۲-۳- مواد پیزوالکتریک..... ۱۶

۲-۴- ماده هدفمند پیزوالکتریک..... ۱۷

۲-۴-۱- روابط متشکله مواد هدفمند پیزوالکتریک..... ۱۷

۲-۴-۲-تابع پتانسیل الکتریکی..... ۲۲

۲-۴-۲-۱- بارگذاری مکانیکی..... ۲۳

۲-۴-۲-۲-بارگذاری الکتریکی..... ۲۴

۲-۴-۳-معادله ماکسول..... ۲۵

عنوان | صفحه

فصل سوم: روش پژوهش

۳-۱- مقدمه..... ۲۷

۳-۲- فرضیات سینماتیکی..... ۲۸

۳-۳- معادلات حاکم بر ورق..... ۳۱

۳-۴- معادلات حاکم بر تحلیل استاتیکی ورق‌های مستطیلی هدفمند پیزوالکتریک..... ۳۵

۳-۴-۱- بارگذاری مکانیکی..... ۳۵

۳-۴-۲- حل ناویر..... ۳۹

۳-۴-۳- بارگذاری الکتریکی..... ۴۶

۳-۵- معادلات حاکم بر تحلیل استاتیکی ورق‌های مستطیلی هدفمند همسانگرد عرضی..... ۵۵

۳-۶- معادلات حاکم بر تحلیل استاتیکی ورق‌های مستطیلی هدفمند همسانگرد..... ۶۲

فصل چهارم: بحث و نتایج عددی

۴-۱- مقدمه..... ۷۰

۴-۲- نتایج عددی تحلیل خمش ورق‌های هدفمند..... ۷۱

۴-۲-۱- نتایج عددی تحلیل خمش ورق‌های هدفمند همسانگرد..... ۷۱

۴-۲-۱-۱- بررسی صحت نتایج ارا ئه شده..... ۷۱

۴-۲-۱-۲- نتایج عددی..... ۷۷

۴-۲-۲- نتایج عددی تحلیل خمش ورق‌های هدفمند همسانگرد عرضی..... ۹۲

۴-۲-۲-۱- -نتایج عددی..... ۹۳

۴-۳- نتایج عددی تحلیل خمش ورق‌های هدفمند پیزوالکتریک..... ۱۰۱

۴-۳-۱- بارگذاری مکانیکی..... ۱۰۳

عنوان **صفحه**

۴-۳-۱-۱- -مدار بسته..... ۱۰۳

۴-۳-۱-۱-۱- نتایج عددی..... ۱۰۳

۴-۳-۱-۲-مدار باز بسته..... ۱۲۹

۴-۳-۲- بارگذاری الکتریکی..... ۱۴۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱-جمع‌بندی نتایج..... ۱۶۲

۵-۲-پیشنهادها..... ۱۶۵

منابع..... ۱۷۱

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱) نمای شماتیک جسم –ماده هدفمند.....۱۳

شکل ۲-۲) تغییرات نسبی چگالی بر حسب ضخامت برای توان‌های مختلف ماده هدفمند...۱۴

شکل ۳-۱) مدل هندسی ورق.....۲۸

نمودار ۴-۱الف- تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق بر حسب نسبت طول به ضخامت(h / l_1) برای توان‌های متفاوت ماده‌ی هدفمند برای ورق مربعی.....۸۳

نمودار ۴-۱ب) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق بر حسب نسبت طول به ضخامت(l_1 / h) برای توان‌های متفاوت ماده‌ی هدفمند برای ورق مربعی.....۸۴

نمودار ۴-۲) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق بر حسب نسبت ابعاد (l_1 / l_2) برای توان‌های متفاوت ماده‌ی هدفمند($h / l_1 = 0.1$)

.....۸۴

نمودار ۴-۳) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\sigma_x}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت ورق برای توان های متفاوت ماده ی هدفمند $(h/l_1 = 0.2)$.....۸۶

نمودار ۴-۴) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\sigma_x}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت ورق برای نسبت ابعادی متفاوت $(N = 2)$ و ($h / l_1 = 0.1$))).....۸۶

نمودار ۴-۵) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد$(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت ورق مربعی برای نسبت طول به ضخامت متفاوت$(N = 2)$.....۸۷

نمودار ۴-۶) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای $\overline{\sigma_y}(l_1/2, l_2/2, z)$ بی‌بعد در امتداد ضخامت ورق برای نسبت ابعادی متفاوت $(N = 2)$ و ($h / l_1 = 0.1$).....۸۷

نمودار ۴-۷) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد$(0,0, z)$ در امتداد ضخامت ورق برای نسبت ابعادی متفاوت $(N = 2)$ و ($h / l_1 = 0.1$).....۸۸

نمودار ۴-۸) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\tau_{xy}}(0,0, z)$در امتداد ضخامت ورق برای

عنوان **صفحه**

نسبت طول به ضخامت متفاوت $(N=2)$.....۸۸
نمودار ۴-۹- تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\tau_{xz}}(0,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق برای نسبت ابعادی متفاوت $(N=2)$ و ($h/l_1=0.1$).....۹۰
نمودار ۴-۱۰- تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\tau_{yz}}(l_1/2,0,z)$ در امتداد ضخامت ورق برای نسبت ابعادی متفاوت $(N=2)$ و ($h/l_1=0.1$).....۹۰
نمودار ۴-۱۱- تغییرات تنش عمودی برون صفحه‌ای بی‌بعد$\overline{\sigma_z}(l_1/2,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق مربعی برای نسبت ضخامت به طول متفاوت $(N=2)$.....۹۱
نمودار ۴-۱۲- تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{v_1}(0,l_2/2,z)$ ورق مربعی در امتداد ضخامت ورق برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت$(N=2)$ ۹۱
نمودار ۵-۱۳- تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{v_1}(0,l_2/2,z)$ ورق مربعی در امتداد ضخامت ورق برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت$(N=2)$.....۹۲
نمودار ۴-۱۴) ۱۴ تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی $\overline{v_1}(0,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند ،($h/l_1=0.1$).....۹۲
نمودار ۴-۱۵) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق بر حسب نسبت طول به ضخامت(h/l_1) برای توان های متفاوت ماده‌ی هدفمند برای ورق مربعی..... ۹۷
نمودار ۴-۱۶- : تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق بر حسب نسبت ابعاد(l_1/l_2) برای توان های متفاوت ماده ی هدفمند($h/l_1=0.1$).....۹۸
نمودار ۴-۱۷) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد$\overline{\sigma_x}(l_1/2,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق برای توان‌های متفاوت ماده‌ی هدفمند ($h/l_1=0.1$).....۹۸
نمودار ۴-۱۸) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\sigma_x}(l_1/2,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق مربعی برای نسبت طول به ضخامت متفاوت$(N=2)$.....۹۹
نمودار ۴-۱۹)تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\tau_{xy}}(0,0,z)$ در امتداد ضخامت ورق مربعی برای نسبت طول به ضخامت متفاوت $(N=2)$.....۹۹
نمودار ۴-۲۰) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد $\overline{\tau_{xz}}(0,l_2/2,z)$ در امتداد ضخامت ورق برای نسبت طول به ضخامت متفاوت $(N=2)$.....۱۰۰
نمودار ۴-۲۱) تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی $\overline{v_1}(0,l_2/2,z)$ در

عنوان **صفحه**

امتداد ضخامت ورق برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند ،.....۱۰۱
نمودار۴-۲۴) تغییرات خیز عرضی ورق در امتداد ضخامت برای ورق مربعی باتوان‌های مختلف، تحت بار سینوسی$(h/l_1 = 0.1)$-مدار بسته.....۱۰۵
نمودار ۴-۲۵) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق (الف): مربعی با نسبت طول به ضخامت، (ب): با نسبت ابعادی، $(h/l_1 = 0.1)$ ، برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند، (ج): در امتداد ضخامت برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت.....۱۲۰

نمودار ۴-۲۶) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد مرکز ورق $\overline{\sigma_x}$ ، (الف): ورق مربعی با نسبت طول به ضخامت، (ب): با نسبت ابعادی، $(h/l_1 = 0.1)$ ، برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند.....۱۲۱

نمودار ۴-۲۷) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد مرکز ورق $\overline{\tau_{xy}}$، (الف): ورق مربعی با نسبت طول به ضخامت، (ب): با نسبت ابعادی، $(h/l_1 = 0.1)$ ، برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند.....۱۲۲

نمودار ۴-۲۸) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی $\overline{\sigma_x}$ در امتداد ضخامت برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۲

نمودار ۴-۲۹) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_x}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۳

نمودار ۴-۳۰) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{xy}}(0,0,z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۴

نمودار ۴-۳۱)تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_y}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۴

نمودار ۴-۳۲) تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{xz}}(0, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب):

عنوان **صفحه**

برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۵

نمودار ۴-۳۳) تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{yz}}(l_1/2, 0, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۵

نمودار ۴-۳۴) تغییرات تنش عمودی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_z}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت.....۱۲۶

نمودار ۴-۳۵) تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{v_1}(0, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۲۷

نمودار ۴-۳۶) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق مربعی هدفمند پیزوالکتریک با نسبت ضخامت به طول ورق برای پروفیل نمایی و توانی.....۱۲۷

نمودار ۴-۳۷) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق هدفمند پیزوالکتریک (الف):با نسبت ضخامت به طول ورق، (ب): با نسبت ابعادی ورق برای دو ماده PZT4 و PZT5.....۱۲۸

نمودار ۴-۳۸) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق (الف): مربعی با نسبت طول به ضخامت، (ب): با نسبت ابعادی، $(h/l_1 = 0.1)$ ، برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند-مدار باز بسته.....۱۳۴

نمودار ۴-۳۹) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_x}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۵

نمودار ۴-۴۰) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_y}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۵

نمودار ۴-۴۱) تغییرات تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{xy}}(0,0, z)$ در امتداد ضخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۶

نمودار ۴-۴۲) تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{xz}}(0, l_2/2, z)$ در امتداد

عنوان **صفحه**

صخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۶

نمودار ۴-۴۳) تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\tau_{yz}}(l_1/2, 0, z)$ در امتداد صخامت $(N = 2)$ برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۷

نمودار ۴-۴۴) تغییرات تنش عمودی برون صفحه‌ای بی‌بعد ورق هدفمند $\overline{\sigma_z}(l_1/2, l_2/2, z)$ در امتداد صخامت $(N = 2)$ (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۷

نمودار ۴-۴۵) تغییرات جابجایی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی $\overline{v_1}(0, l_2/2, z)$ در امتداد ضخامت ورق هدفمند $(N = 2)$ و $(h/l_1 = 0.1)$، برای نسبت‌های ابعادی متفاوت.....۱۳۸

نمودار ۴-۴۶) تغییرات خیز بی‌بعد مرکز ورق (الف): مربعی با نسبت طول به ضخامت، (ب): با نسبت ابعادی، $(h/l_1 = 0.1)$ ، برای دو حالت مدار باز بسته و مدار بسته،$(N = 2)$.....۱۳۹

نمودار ۴-۴۷) مقایسه $\overline{\tau_{xy}}(0,0,z)$ ، $\overline{\sigma_x}(l_1/2, l_2/2, z)$ برای ورق مربعی در دو حالت مدار باز بسته و مدار بسته،$(N = 2)$، $(h/l_1 = 0.1)$.....۱۳۹

نمودار ۴-۴۸) مقایسه $\overline{v_1}(0, l_2/2, z)$ برای ورق مربعی در دو حالت مدار باز بسته و مدار بسته،$(N = 2)$، $(h/l_1 = 0.1)$.....۱۴۰

نمودارهای ۴-۴۹ تا ۴-۵۲) بررسی اثر الکتریکی مواد پیزوالکتریک روی خیز بی‌بعد مرکز ورق برای هر دو حالت مدار بسته و مدار باز بسته $(N = 2)$.....۱۴۱

نمودار ۴-۵۳) بررسی اثر الکتریکی مواد پیزوالکتریک روی خیز بی‌بعد مرکز ورق برای هر دو حالت مدار بسته و مدار باز بسته $(N = 2)$.....۱۴۱

نمودارهای ۴-۵۴ تا ۴-۵۸) تغییرات تنش‌ها و جابجایی‌های ورق مربعی در امتداد ضخامت ورق برای توان‌های متفاوت ماده هدفمند$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۴۴

نمودار ۴-۵۹) تغییرات خیز ورق در امتداد ضخامت مربعی (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): ورق مستطیلی برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(h/l_1 = 0.1)$، $(N = 1)$ ۱۴۵

عنوان **صفحه**

نمودار ۴-۶۰) تغییرات تنش عمودی درون صفحه‌ای ورق در امتداد ضخامت مربعی (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): ورق مستطیلی برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(N = 1)$ ،$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۴۶

نمودار ۴-۶۱) تغییرات تنش برشی برون صفحه‌ای ورق در امتداد ضخامت مربعی (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): ورق مستطیلی برای نسبت‌های ابعادی متفاوت $(N = 1)$ ،$(h/l_1 = 0.1)$.....۱۴۷

نمودار ۴-۶۲) تغییرات تنش عمودی برون صفحه‌ای ورق در امتداد ضخامت مربعی (الف): ورق مربعی برای نسبت‌های طول به ضخامت متفاوت، (ب): ورق مستطیلی برای نسبت‌های ابعادی متفاوت$(N = 1)$ ،$(h/l_1 = 0.1)$ ۱۴۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱- خصوصیات مواد همسانگرد (سعیدی و همکاران، ۲۰۰۹و۲۰۱۲).....۷۱

جدول۴-۲: مقایسه پارامترهای بی‌بعد جابجایی‌ها و تنش‌های بی‌بعد برای ورق همگن مربعی با نسبت ضخامت به طول متفاوت با مرجع (سعیدی و همکاران ۲۰۱۲) با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه‌ی پنجم..... ۷۳

جدول ۴-۳: مقایسه پارامترهای بی‌بعد جابجایی عرضی و تنش‌ها با تئوری الاستیسیته سه بعدی برای ورق مربعی هدفمند تحت بار عرضی یکنواخت با توان‌های مختلف ماده هدفمند با مرجع (یانگ و همکاران، ۲۰۱۱) با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه ی پنجم ۷۴

جدول ۴-۴- مقایسه پارامترهای بی‌بعد جابجایی عرضی و تنش‌ها با تئوری برشی مرتبه بالا برای ورق هدفمند مربعی تحت بار عرضی سینوسی برای توان‌های مختلف ماده هدفمند با مرجع (ردی، ۲۰۰۰)، با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه ی پنجم($h/l_1=0.1$) ۷۶

جدول ۴-۵: جابجایی بی‌بعد برون صفحه‌ای برای ورق هدفمند مربعی با نسبت های مختلف ضخامت به طول و توان‌های مختلف ماده هدفمند بر اساس تئوری های مرتبه اول تا پنجم.....۷۸

جدول ۴-۶ : : تنش عمودی بی‌بعد درون صفحه‌ای$\bar{\sigma}_x$ برای ورق هدفمند مربعی با نسبت های مختلف ضخامت به طول و توان‌های مختلف بر اساس تئوری های مرتبه اول تا پنجم ۷۹

جدول ۴-۷: تنش برشی بی‌بعد درون صفحه‌ای برای ورق هدفمند مربعی با نسبت های مختلف ضخامت به طول و توان‌های مختلف بر اساس تئوری های مرتبه اول تا پنجم ۸۰

جدول ۴-۸: پارامترهای بی‌بعد جابجایی و تنش‌ها برای ورق هدفمند مستطیلی با نسبت های مختلف ضخامت به طول و نسبت‌های مختلف ابعادی بر اساس تئوری های مرتبه سوم و پنجم برشی و عمودی..... ۸۱

جدول ۴-۹: پارامترهای بی‌بعد جابجایی و تنش‌هابرای ورق هدفمند مربعی با نسبت های مختلف ضخامت به طول و توان‌های مختلف ماده هدفمند بر اساس تئوری های مرتبه سوم و پنجم برشی و عمودی ۹۵

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱۰: خصوصیات مواد پیزوالکتریک (بداغی و شاکری، ۲۰۱۲).....۱۰۲
جدول ۴-۱۱: مقایسه جابجایی و تنش‌ها برای ورق مربعی با مرجع (ژانگ و شانگ،۲۰۰۳) ، مدار بسته ۱۰۴
جدول ۴-۱۲- تنش‌ها و جابجایی‌های بی‌بعد ورق مربعی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه سوم و پنجم-مدار بسته.....۱۰۷
جدول ۴-۱۳: ت خیز بی‌بعدرمرکز ورق مربعی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه اول تا پنجم-مدار بسته.....۱۰۹
جدول ۴-۱۴: تنش عمودی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه اول تا پنجم-مدار بسته.....۱۱۰
جدول ۴-۱۵: تنش برشی درون صفحه‌ای بی‌بعد ورق مربعی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه اول تا پنجم-مدار بسته.....۱۱۱
جدول ۴-۱۶: تنش‌ها و جابجایی‌های بی‌بعد ورق مستطیلی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه پنجم-مدار بسته$(l_1/l_2 = 2)$.....۱۱۳
جدول ۴-۱۷: تنش‌ها و جابجایی‌های بی‌بعد ورق مستطیلی برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و نسبت‌های ابعادی متفاوت با استفاده از تئوری برشی و عمودی مرتبه اول، سوم و پنجم - مدار بسته $\left(N = 2\right)$.....۱۱۴
جدول ۴-۱۸- نتایج بی‌بعد ورق مستطیلی را برای نسبت‌های متفاوت ضخامت به طول برای ورق هدفمند $(N = 2)$ بر اساس تئوری برشی و عمودی مرتبه سوم و پنجم- مدار باز بسته.....۱۱۶
جدول ۴-۱۹ نتایج ورق هدفمند پیزوالکتریک $(N = 2)$، برای نسبت‌های ضخامت به طول متفاوت و نسبت‌های ابعادی متفاوت بر اساس تئوری مرتبه سوم و پنجم.....۱۱۷

فهرست علائم

A	سطح ورق
$\{E\}$	بردار میدان الکتریکی
$[C]$	ماتریس سختی
$[D]$	ماتریس ضرایب مشتق چند جمله‌ای‌های لژاندر
$\{D\}$	بردار جابه‌جایی الکتریکی
$[S]$	ماتریس نرمی
$[\zeta]$	ماتریس ثوابت دی الکتریک ماده پیزوالکتریک
$[d]$	ماتریس ثوابت کرنش ماده پیزوالکتریک
λ	ماتریس نفوذ پذیری دی الکتریک مطلق
$[e]$	ماتریس ثوابت شارژ
Φ	تابع پتانسیل الکتریکی در مختصات سه بعدی (تابع مکان)
φ	تابع پتانسیل الکتریکی در مختصات دو بعدی تابع مکان

$\tilde{\varphi}$	ثابت مؤلفه پتانسیل الکتریکی
Q	بار الکتریکی کل
I	شدت جریان الکتریکی
N	توان ماده هدفمند
E	مدول الاستیسیته
K	مرتبه‌ی تئوری تغییر شکل برشی و عمودی
L	چند جمله‌ای‌های لژاندر
M	ممان نیروهای درون صفحه‌ای
q	بار اعمالی بر سطح تابع مختصات درون صفحه‌ای
P_0	بار یکنواخت اعمالی
T	ممان نیروهای جانبی
v_1, v_2, w	مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی در مختصات سه‌بعدی (تابع مکان)
$v_1^a, v^a{}_2, w^a$	مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی تابع مختصات درون صفحه‌ای

ثابت مولفه‌های میدان جابه‌جایی	$\tilde{V}_1^a, \tilde{V}_2^a, \tilde{W}^a$
بردار نیروهای حجمی	b
ضخامت ورق	h
طول و عرض ورق	l_1 , l_2
مختصات مکان	x , y , z
تابع دلتای کرونکر	δ
تانسور کرنش	ε
اپراتور لاپلاس در مختصات مستطیلی	∇^2
میدان برداری جابه‌جایی مجازی	$\delta\eta$
ضرایب لامه	λ, μ
پارامترهای بی‌بعد تنش	$\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$
ضریب پوآسون	ν
پارامترهای بی‌بعد جابه‌جایی	$\bar{w}$, $\bar{v}$
چگالی	ρ
تانسور تنش	σ
پارامترهای بی‌بعد تنش	$\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$