

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی  
گروه مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک  
رشته‌ی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

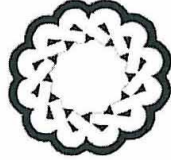
عنوان پایان‌نامه  
تحلیل کمانش ورق‌های ضخیم هدفمند پیزوالکتریک

استاد راهنما  
دکتر علیرضا سعیدی

استاد مشاور  
مهندس میثم محمدی

نگارنده  
مهديه عبداله‌ی بادیزی

بهمن ۹۲



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک

رشته‌ی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

مهدیه عبدالهی بادیزی

### تحلیل کماتش ورق‌های ضخیم هدفمند پیزوالکتریک

در تاریخ ۹۲/۱۱/۱۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

امضاء  
امضاء  
امضاء  
امضاء

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

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

۳- استاد داور خارجی گروه دکتر عماد جمعه‌زاده با مرتبه‌ی علمی استادیار

۴- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دکتر علی علیزاده با مرتبه‌ی علمی استادیار

تمامی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های  
حاصل از پژوهش موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه  
ولی عصر (عج) رفسنجان است.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و

خواهر و برادران عزیزم

به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند

## مشکر و قدرانی

سپاسگزار خداوندی، بسم که توفیق قدم گذاشتن در راه علم را به بنده‌ی خویش عطا فرمود.

لازم می‌دانم از راهبانی‌های عالمانه و مدبرانه استاد ارجمندم جناب آقای دکتر سعیدی کمال مشکر و سپاسگزاری را داشته باشم که همواره با نظارت و راهبانی‌های خود، مرایاری و راهبانی نموده‌اند. همچنین از مشاور خود جناب آقای مهندس محمدی که در این دوره از محضرشان استفاده نموده‌ام، مشکر و قدرانی کنم.

در پایان جای دارد از تمام اساتید گروه مکانیک و دوستان خود که به هر نوعی مرایاری کرده‌اند، مشکر کنم.

## فهرست علائم

|  |  |
|--|--|
| سطح ورق                                  | $A$  |
| تانسور الاستیسیته                        | $C$  |
| ماتریس ضرایب مشتق چند جمله‌ای‌های لژاندر | $D$  |
| مدول الاستیسیته                          | $E$  |
| مرتبه‌ی تئوری تغییر شکل برشی و عمودی     | $k$  |
| چند جمله‌ای‌های لژاندر                   | $L$  |
| توان ماده‌ی هدفمند و هدفمند پیزوالکتریک  | $N$  |
| مختصات مکان                              | $x, y, z$  |
| طول و عرض ورق                            | $l_1, l_2$   |
| ضخامت ورق                                | $h$  |
| مؤلفه‌های میدان جابجایی                  | $u_1, u_2, u_3$  |
| مؤلفه‌های میدان جابجایی در تعادل         | $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$                      |
| مؤلفه‌های میدان جابجایی در همسایگی تعادل | $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$                |
| مؤلفه‌های ثابت میدان جابجایی             | $\tilde{u}_1^{mn}, \tilde{u}_2^{mn}, \tilde{u}_3^{mn}$ |
| خصوصیت مکانیکی یا الکتریکی ماده          | $\theta$   |
| تانسور کرنش                              | $\varepsilon$  |

|  |                        |
|--|------------------------|
| ضریب پواسون                              | $\nu$                  |
| بارهای درون صفحه‌ای                      | $P_1, P_2$             |
| بردار میدان الکتریکی                     | $\{E\}$                |
| ماتریس ثوابت کرنش ماده پیزوالکتریک       | $[d]$                  |
| ماتریس نفوذپذیری دی‌الکتریک مطلق         | $[E]$                  |
| ماتریس ثوابت شارژ ماده پیزوالکتریک       | $[e]$                  |
| تابع پتانسیل الکتریکی                    | $\phi$                 |
| شدت جریان الکتریکی                       | $I$                    |
| بار الکتریکی کل                          | $Q$                    |
| منتجه‌های تنش                            | $M_{ij}$               |
| منتجه‌های تنش در حالت تعادل              | $\bar{M}_{ij}$         |
| منتجه‌های تنش در همسایگی تعادل           | $\tilde{M}_{ij}$       |
| مرز انتگرال‌گیری                         | $\Gamma$               |
| بردارهای مماس و عمود بر مرز انتگرال‌گیری | $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ |



## زیرنویس ها و بالانویس ها

سرامیک

$c$

فلز

$m$

مرتبه‌ی چندجمله‌ای‌های لژاندر

$a, b, c, d, \dots$

راستای محورهای مختصات

$i, j$

راستای محورهای مختصات

1,2,3

## چکیده

در این پایان‌نامه، کمانش ورق‌های مستطیلی ساخته شده از مواد هدفمند و مواد هدفمند پیزوالکتریک (در حالت‌های مدار بسته و مدار باز- بسته) بر اساس تئوری مرتبه بالای تغییر شکل برشی و عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. طبق این تئوری، مؤلفه‌های میدان جابجایی به صورت ترکیبی از توابعی شامل متغیرهای  $x$ ،  $y$  و همچنین متغیر  $Z$  می‌باشند که توابع شامل متغیر  $Z$  با توابع لژاندر تقریب زده می‌شوند. با استفاده از اصل حداقل انرژی پتانسیل، معادلات حاکمه تعادل که شامل عبارت‌های غیرخطی از مؤلفه‌های میدان جابجایی هستند، تعیین می‌شوند و با کمک معیار تعادل همسایگی، معادلات پایداری را که از جملات خطی بر حسب مؤلفه‌های میدان جابجایی تشکیل شده‌اند، بدست می‌آیند. تابع پتانسیل حاکم بر ماده پیزوالکتریک به صورت تابع درجه دو در جهت ضخامت در نظر گرفته شده است تا علاوه بر شرایط مرزی مدار بسته و مدار باز- بسته معادله ماکسول باید ارضا گردد. دستگاه معادلات بدست آمده با فرض تکیه‌گاه ساده روی هر چهار لبه ورق با روش ناویر حل شده و بار بحرانی کمانش بدست می‌آید. پس از بررسی صحت نتایج ارائه شده، مقادیر بار بحرانی کمانش برای پارامترهای مختلفی مانند اندیس‌های ماده هدفمند، نسبت منظری و نسبت ضخامت به عرض ورق برای انواع شرایط بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** کمانش، ورق‌های مستطیلی ضخیم، مواد هدفمند پیزوالکتریک، تئوری مرتبه بالای تغییر شکل برشی و عمودی، حل ناویر.

فهرست مطالب

| صفحه    | عنوان  |
|---------|--|
| ۱.....  | فصل اول مقدمه.....   |
| ۱.....  | ۱-۱ مقدمه.....   |
| ۴.....  | ۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده.....                        |
| ۷.....  | ۳-۱ بیان مسئله و هدف از انجام پایاننامه.....                 |
| ۹.....  | فصل دوم مواد هوشمند، مواد پیزوالکتریک و مواد هدفمند.....     |
| ۹.....  | ۱-۲ مقدمه.....   |
| ۹.....  | ۲-۲ مواد هوشمند.....   |
| ۱۰..... | ۱-۲-۲ مواد هوشمند نوع اول.....                               |
| ۱۰..... | ۲-۲-۲ مواد هوشمند نوع دوم.....                               |
| ۱۲..... | ۳-۲ مواد پیزوالکتریک.....                                    |
| ۱۲..... | ۱-۳-۲ تاریخچه اکتشاف و پژوهش‌های اولیه مواد پیزوالکتریک..... |
| ۱۳..... | ۲-۳-۲ انواع مواد پیزوالکتریک.....                            |
| ۱۴..... | ۳-۳-۲ ساختمان مواد پیزوالکتریک.....                          |
| ۱۷..... | ۴-۳-۲ کاربردهای مواد پیزوالکتریک:.....                       |
| ۱۷..... | ۵-۳-۲ روابط متشکله مواد پیزوالکتریک.....                     |
| ۲۳..... | ۴-۲ مواد هدفمند.....   |
| ۲۴..... | ۱-۴-۲ ساختمان مواد هدفمند.....                               |
| ۲۵..... | ۲-۴-۲ کاربرد مواد هدفمند.....                                |
| ۲۵..... | ۳-۴-۲ روابط متشکله مواد هدفمند.....                          |

| عنوان  | صفحه       |
|--|------------|
| <b>فصل سوم معادلات پایداری</b> .....   | <b>۲۷</b>  |
| ۱-۳ مقدمه .....  | ۲۷         |
| ۲-۳ تعیین معادلات تعادل ورق .....  | ۲۹         |
| ۳-۳ تعیین معادلات پایداری ورق هدفمند با استفاده از معیار تعادل همسایگی ..... | ۳۵         |
| ۴-۳ تعیین معادلات پایداری ورق هدفمند پیزوالکتریک .....                       | ۴۳         |
| ۱-۴-۳ تعیین معادلات پایداری ورق هدفمند پیزوالکتریک مدار بسته .....           | ۴۵         |
| ۲-۴-۳ تعیین معادلات پایداری ورق هدفمند پیزوالکتریک مدار باز - بسته .....     | ۴۷         |
| <b>فصل چهارم ۵۳ نتایج عددی</b> .....   | <b>۵۳</b>  |
| ۱-۴ مقدمه .....  | ۵۳         |
| ۲-۴ مقایسه بار بحرانی کمانش ماده هدفمند .....                                | ۵۳         |
| ۳-۴ نتایج عددی برای ورق‌های ضخیم هدفمند همسانگرد .....                       | ۵۸         |
| ۴-۴ نتایج عددی برای ورق‌های ضخیم هدفمند همسانگرد عرضی .....                  | ۷۶         |
| <b>فصل پنجم ۱۴۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b> .....                             | <b>۱۴۷</b> |
| ۱-۵ جمع بندی نتایج .....   | ۱۴۷        |
| ۲-۵ پیشنهادات .....  | ۱۴۹        |
| پیوست .....  | ۱۵۱        |
| منابع .....  | ۱۸۳        |

## فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان  |
|------|--|
| ۱۱   | شکل (۱-۲). به وجود آمدن جریان الکتریکی در اثر اعمال فشار.....  |
| ۱۵   | شکل (۳-۲). نمای شماتیک دو قطبی الکتریکی، (A) قبل از پلاریزه، (B) در حین پلاریزه، (C) بعد از پلاریزه.....                                       |
| ۱۶   | شکل (۴-۲). عکس العمل المان سرامیک پیزوالکتریک در مقابل تحریک بکار برده شده.....  |
| ۲۴   | شکل (۵-۲). ساختمان ماده هدفمند.....  |
| ۲۷   | شکل (۱-۳). ورق مستطیلی تحت بارهای درون صفحه‌ای.....  |
| ۶۹   | شکل (۱-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای توان‌های مختلف ماده هدفمند همسانگرد $R = 0, l1/l2 = 1$ .....             |
| ۷۰   | شکل (۲-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای ماده هدفمند همسانگرد تحت انواع شرایط بارگذاری $N = 1, l1/l2 = 1.5$ ..... |
| ۷۱   | شکل (۳-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب توان‌های مختلف ماده هدفمند همسانگرد برای انواع شرایط بارگذاری $l1/l2 = 1, h/l2 = 0.2$ .....         |
| ۷۲   | شکل (۴-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند همسانگرد $R = 0, h/l2 = 0.1$ .....                              |
| ۷۳   | شکل (۵-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند همسانگرد $R = 0, h/l2 = 0.3$ .....                              |
| ۷۴   | شکل (۶-۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند همسانگرد $R = 1, h/l2 = 0.1$ .....                              |

- شکل (۴-۷). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند همسانگرد برای انواع شرایط بارگذاری  $N = 0, h/l2 = 0.1$  ..... ۷۵
- شکل (۴-۱۳). بررسی اثر پیزوالکتریک ( مدار بسته) بر روی بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق  $l1/l2 = 1, R = 0, N = 1$  ..... ۱۲۲
- شکل (۴-۱۴). بررسی اثر پیزوالکتریک ( مدار بسته) بر روی بار بحرانی کمانش بر حسب توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک  $l1/l2 = 1, R = 0, h/l2 = 0.2$  ..... ۱۲۳
- شکل (۴-۱۵). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک ( مدار بسته)  $R = 1, l1/l2 = 1$  ..... ۱۲۴
- شکل (۴-۱۶). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری  $N = 1, l1/l2 = 1$  ..... ۱۲۵
- شکل (۴-۱۷). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری  $l1/l2 = 1, h/l2 = 0.1$  ..... ۱۲۶
- شکل (۴-۱۸). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک مدار بسته  $R = 0, h/l2 = 0.1$  ..... ۱۲۷
- شکل (۴-۱۹). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته)  $R = 0, h/l2 = 0.3$  ..... ۱۲۸
- شکل (۴-۲۰). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری  $N = 1, h/l2 = 0.2$  ..... ۱۲۹

- شکل (۴-۲۱). بررسی اثر پیزوالکتریک ( مدار باز- بسته) بر روی بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق  $l1/l2 = 1, R = 0, N = 1$  ..... ۱۳۰
- شکل (۴-۲۲). بررسی اثر پیزوالکتریک ( مدار باز- بسته) بر روی بار بحرانی کمانش بر حسب توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک  $l1/l2 = 1, R = 0, h/l2 = 0.2$  ..... ۱۳۱
- شکل (۴-۲۳). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته)  $R = 1, l1/l2 = 1$  ..... ۱۳۲
- شکل (۴-۲۴). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری  $N = 1, l1/l2 = 1$  ..... ۱۳۳
- شکل (۴-۲۵). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته) برای انواع شرایط بارگذاری  $l1/l2 = 1, h/l2 = 0.1$  ..... ۱۳۴
- شکل (۴-۲۶). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته)  $R = 0, h/l2 = 0.1$  ..... ۱۳۵
- شکل (۴-۲۷). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته)  $R = 0, h/l2 = 0.3$  ..... ۱۳۶
- شکل (۴-۲۸). تغییرات بار بحرانی کمانش بر حسب تغییرات نسبت منظری برای ماده هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز- بسته) برای انواع شرایط بارگذاری  $N = 1, h/l2 = 0.2$  ..... ۱۳۷
- شکل (۴-۲۹). مقایسه بار بحرانی کمانش بدون در نظر گرفتن اثر پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق  $l1/l2 = 1, R = 0, N = 1$  ..... ۱۳۸

- شکل (۴-۳۰). مقایسه بار بحرانی کمانش بدون در نظر گرفتن اثر پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته برای توان‌های مختلف ماده هدفمند پیزوالکتریک
- ۱۳۹.....  $l1/l2=1, R=0, h/l2=0.2$
- شکل (۴-۳۱). مقایسه بار بحرانی برای ورق هدفمند پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته  $R = 1, l1/l2 = 1, h/l2 = 0.1$
- ۱۴۰.....
- شکل (۴-۳۲). مقایسه بار بحرانی برای ورق هدفمند پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته  $R = 1, l1/l2 = 1, h/l2 = 0.3$
- ۱۴۱.....
- شکل (۴-۳۳). مقایسه بار بحرانی برای ورق هدفمند پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و باز- بسته  $R = 1, l1/l2 = 1, N = 0$
- ۱۴۲.....
- شکل (۴-۳۴). مقایسه بار بحرانی برای ورق هدفمند پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و باز- بسته  $R = 1, l1/l2 = 1, N = 10$
- ۱۴۳.....
- شکل (۴-۳۵). مقایسه مودهای کمانش برای ورق هدفمند پیزوالکتریک در دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته  $R = 0, h/l2 = 0.1, N = 0$
- ۱۴۴.....
- شکل (۴-۳۶). مقایسه مودهای کمانش برای ورق ضخیم هدفمند پیزوالکتریک برای دو حالت مدار بسته و مدار باز- بسته  $R = 0, h/l2 = 0.3, N = 0$
- ۱۴۵.....



## فهرست جدول‌ها

| عنوان   | صفحه |
|---|------|
| جدول (۱-۲). انواع مواد هوشمند نوع اول .....   | ۱۰   |
| جدول (۱-۴). مقایسه بار بحرانی کمانش ( $MN/m$ ) برای ورق هدفمند تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) .....                  | ۵۵   |
| جدول (۲-۴). مقایسه بار بحرانی کمانش ( $MN/m$ ) برای ورق هدفمند تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) .....                | ۵۶   |
| جدول (۳-۴). مقایسه بار بحرانی کمانش ( $MN/m$ ) برای ورق هدفمند تحت بارگذاری یک طرف فشاری و طرف دیگر کششی ( $R = -1$ ) ..... | ۵۷   |
| جدول (۴-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) .....                | ۵۹   |
| ادامه جدول (۴-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) .....          | ۶۰   |
| ادامه جدول (۴-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) .....          | ۶۱   |
| جدول (۵-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) .....              | ۶۲   |
| ادامه جدول (۵-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) .....        | ۶۳   |
| ادامه جدول (۵-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) .....        | ۶۴   |

|  |    |
|--|----|
| جدول (۶-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد تحت بارگذاری یک طرف فشاری و طرف دیگر کششی ( $R = -1$ ).....                   | ۶۵ |
| جدول (۷-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی.....       | ۶۶ |
| ادامه جدول (۷-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی..... | ۶۸ |
| ادامه جدول (۷-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی..... | ۶۸ |
| جدول (۸-۴). ثابت‌های الاستیسیته ورق هدفمند همسانگرد عرضی.....  | ۷۶ |
| جدول (۹-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ).....                               | ۷۷ |
| ادامه جدول (۹-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ).....                         | ۷۸ |
| ادامه جدول (۹-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ).....                         | ۷۹ |
| جدول (۱۰-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری یک طرف فشاری ( $R = 0$ ).....                              | ۸۰ |
| ادامه جدول (۱۰-۴). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری یک طرف فشاری ( $R = 0$ ).....                        | ۸۲ |

- ادامه جدول (۴-۱۰). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری یک طرف فشاری ( $R = 0$ )..... ۸۲
- جدول (۴-۱۱). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت بارگذاری یک طرف فشاری و طرف دیگر کششی ( $R = -1$ )..... ۸۳
- جدول (۴-۱۲). مقادیر بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۸۴
- ادامه جدول (۴-۱۲). مقادیر بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۸۵
- ادامه جدول (۴-۱۲). مقادیر بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند همسانگرد عرضی تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۸۶
- جدول (۴-۱۳). ثابت‌های الاستیسیته مواد پیزوالکتریک ..... ۹۳
- جدول (۴-۱۴). ثوابت شارژ الکتریکی و نفوذپذیری دیالکتریک مطلق..... ۹۳
- جدول (۴-۱۵). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ )..... ۹۴
- ادامه جدول (۴-۱۵). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ )..... ۹۶
- ادامه جدول (۴-۱۵). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ )..... ۹۶
- جدول (۴-۱۶). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ )..... ۹۷

ادامه جدول (۴-۱۶). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) ..... ۹۸

ادامه جدول (۴-۱۶). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) ..... ۹۹

جدول (۴-۱۷). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت بارگذاری یک طرف فشاری و طرف دیگر کششی ( $R = -1$ ) ..... ۱۰۰

جدول (۴-۱۸). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۱۰۱

ادامه جدول (۴-۱۸). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۱۰۲

ادامه جدول (۴-۱۸). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار بسته) تحت انواع شرایط بارگذاری بر اساس تئوری مرتبه پنج تغییر شکل برشی و عمودی ..... ۱۰۳

جدول (۴-۱۹). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز - بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) ..... ۱۰۴

ادامه جدول (۴-۱۹). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز - بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) ..... ۱۰۵

ادامه جدول (۴-۱۹). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز - بسته) تحت بارگذاری دو طرف فشاری ( $R = 1$ ) ..... ۱۰۶

جدول (۴-۲۰). بار بحرانی کمانش ( $GN/m$ ) برای ورق هدفمند پیزوالکتریک (مدار باز - بسته) تحت بارگذاری فشاری تک محوره ( $R = 0$ ) ..... ۱۰۷