

دانشگاه ضلعی خواجہ نصیر الدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دکتری

مهندسی عمران – گرایش سازه

**تحلیل استاتیکی و دینامیکی تیرهای چند لایه و ساندویچی شامل
لایه‌های پیزوالکتریک با استفاده از یک تئوری مرتبه بالای اصلاح شده**

دانشجو:

مجتبی لڑگی نظرگاه

۸۷۰۰۳۳۶

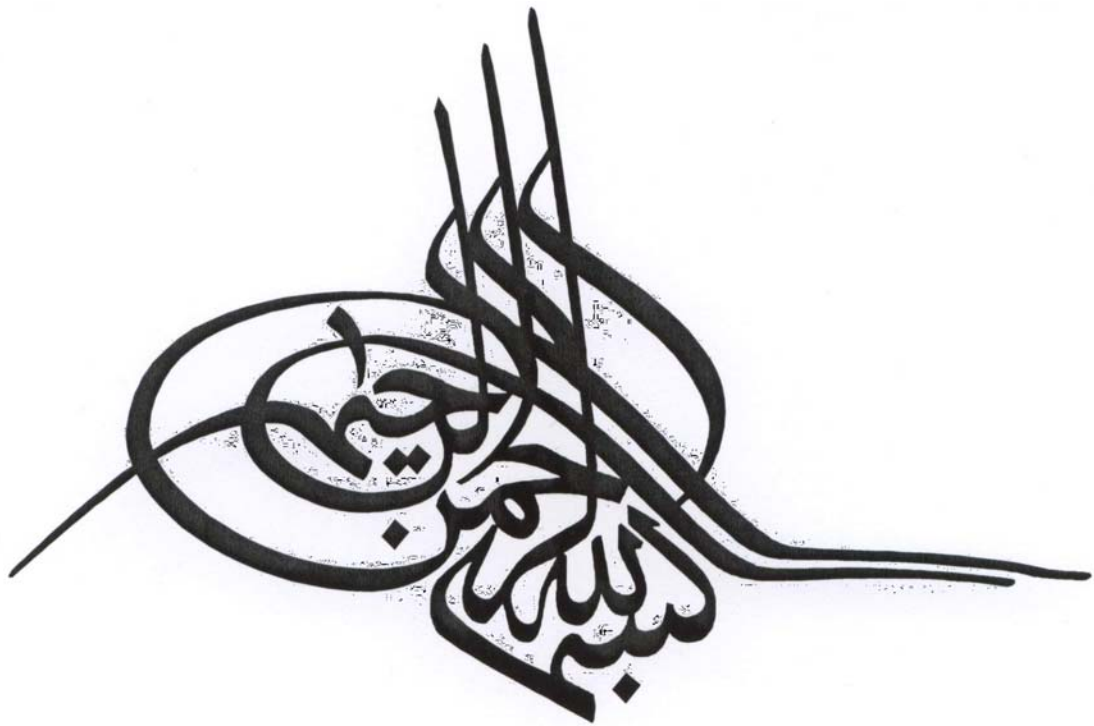
استاد راهنما:

دکتر سید بهرام بهشتی اول

استاد مشاور:

دکتر محمد شرعیات

شهریور ۱۳۹۰



تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر سید بهرام بهشتی اول صمیمانه و مجدانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از زحمات فراوان و تلاش همه جانبه استاد مشاور، جناب آقای دکتر محمد شریعت که در نهایت لطف، اینجانب را در انجام این تحقیق راهنمایی و یاری نمودند نیز تشکر و قدردانی نموده و سلامتی و موفقیت روز افزون ایشان را از ایزد یکتا خواهانم.

چکیده

در این تحقیق یک مدل اصلاح شده مرتبه بالا برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی تیرهای مرکب چند لایه و ساندویچی شامل لایه‌های پیزوالکتریک ارائه شده است. مدل معرفی شده انعطاف پذیری عرضی و نیز اثرات تنش‌ها و کرنش‌های عرضی قائم تیر را نیز در نظر می‌گیرد. اثرات کرنش‌های عرضی قائم القا شده در لایه‌های پیزوالکتریک نیز در فرمولاسیون لحاظ شده‌اند. با وجود در نظر گرفتن مولفه‌ی درون صفحه‌ای میدان الکتریکی، شرایط پیوستگی تمامی مولفه‌های جابجایی و تنش در سطوح تماس لایه‌ها برآورده می‌گردند. برخلاف بسیاری از تئوری‌های ارائه شده‌ی موجود، مدل معرفی شده در این تحقیق شرایط مرزی غیر صفر تنش‌های عرضی برشی و قائم بر روی سطوح بالا و پایین تیر را نیز برآورده می‌نماید. مولفه‌ی درون صفحه‌ای میدان جابجایی تیر از ترکیب یک چند جمله‌ای، یک عبارت نمایی و یک عبارت که شامل مشتق اول مجهولات الکتریکی لایه‌های پیزوالکتریک می‌شود، تشکیل شده است. مولفه‌ی عرضی تیر نیز از ترکیب یک چند جمله‌ای پیوسته‌ی مرتبه چهار به همراه یک عبارت که شامل مجهولات الکتریکی لایه‌های پیزوالکتریک می‌شود، تشکیل شده است. در راستای ضخامت هر لایه‌ی پیزوالکتریک نیز یک پتانسیل الکتریکی مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. از جمله دیگر مزیت‌های مدل پیشنهادی این است که تعداد مجهولات مکانیکی آن مستقل از تعداد لایه‌هاست. علاوه بر این، مدل اجزا محدود بکار گرفته شده نیز عاری از پدیده‌ی قفل شدگی برشی است.

بمنظور صحت سنجی، نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از تحلیل پیزوالاستیسیته و نیز نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود (ABAQUS) مقایسه شده‌اند. بدین منظور نمونه‌های مختلفی از تیرهای مرکب چند لایه و ساندویچی پیزوالکتریک که پارامترهای هندسی، چیدمان لایه‌ها، شرایط مرزی مکانیکی و الکتریکی آن‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند انتخاب و تحلیل خمشی، ارتعاش آزاد و اجباری آن‌ها با استفاده از مدل پیشنهادی انجام شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی علاوه بر کم هزینه بودن به لحاظ محاسباتی قادر است فرکانس‌های طبیعی، شکل-های مودی، پاسخ الکترواستاتیکی و ارتعاش اجباری تیرهای مرکب و ساندویچی پیزوالکتریک را با دقت بسیار بالایی تحت شرایط مرزی مختلف الکتریکی و مکانیکی پیش بینی نماید.

کلمات کلیدی: اجزا محدود، پیزوالکتریک، تیرهای مرکب چند لایه و ساندویچی، تنش‌های عرضی

برشی و قائم، شرایط مرزی غیر همگن تنش‌های عرضی برشی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱.....

فصل دوم: مدل‌های ارائه شده جهت تحلیل تیرها و صفحات مرکب پیزوالکتریک

۱-۲- مقدمه ۷.....

۲-۲- روش‌های سه بعدی ۷.....

۳-۲- روش‌های دو بعدی ۱۰.....

۱-۳-۲- مدل‌های مبتنی بر تنش‌های منته ۱۵.....

۲-۳-۲- روش‌های مجانبی ۱۵.....

۳-۳-۲- روش‌های قانونمند ۱۶.....

۱-۳-۳-۲- تئوری‌های کلاسیک ۱۹.....

۲-۳-۳-۲- تئوری‌های لایه‌ای (LW) ۲۱.....

۳-۳-۳-۲- تئوری‌های زیگزاگ ۲۲.....

۱-۳-۳-۳-۲- مدل‌های مبتنی بر LMT ۲۳.....

۲-۳-۳-۳-۲- مدل‌های مبتنی بر AMT ۲۵.....

۳-۳-۳-۳-۲- مدل‌های مبتنی بر فرمولاسیون ترکیبی Reissner ۳۴.....

۴-۳-۳-۳-۲- تئوری‌های مبتنی بر اصل برهم نهی مضاعف ۳۸.....

۴-۳-۲- مدل‌های هیبریدی، کلی-محلی، hierarchic و سایر مدل‌های ارائه شده ۴۲.....

فصل سوم: مدل اصلاح شده مرتبه بالای پیشنهادی جهت تحلیل استاتیکی و دینامیکی

تیرهای مرکب چند لایه

- ۴۸-۱-۳-۱-۳ مقدمه
- ۴۸-۲-۳-۲-۳ مدل اصلاح شدهی مرتبه بالا بدون لحاظ اثرات تنش‌ها و کرنش‌های عرضی قائم
- ۴۸-۱-۲-۳-۱-۲-۳ هندسه و دستگاه مختصات
- ۵۰-۲-۲-۳-۲-۳ معادلات ساختاری
- ۵۱-۳-۲-۳-۳-۲-۳ میدان جابجایی
- ۵۴-۴-۲-۳-۴-۲-۳ مولفه‌های عرضی و صفحه‌ای کرنش
- ۵۴-۵-۲-۳-۵-۲-۳ مدل اجزا محدود تیر مرکب چند لایه
- ۵۸-۶-۲-۳-۶-۲-۳ بحث و بررسی نتایج عددی
- ۵۸-۱-۶-۲-۳-۱-۶-۲-۳ مثال عددی ۱
- ۶۴-۲-۶-۲-۳-۲-۶-۲-۳ مثال عددی ۲
- ۷۰-۳-۶-۲-۳-۳-۶-۲-۳ مثال عددی ۳
- ۷۵-۴-۶-۲-۳-۴-۶-۲-۳ مثال عددی ۴
- ۷۷-۳-۳-۳-۳-۳-۳ مدل اصلاح شدهی مرتبه بالا با لحاظ اثرات تنش‌ها و کرنش‌های عرضی قائم
- ۷۷-۱-۳-۳-۱-۳-۳ هندسه، دستگاه مختصات و معادلات ساختاری
- ۷۸-۲-۳-۳-۲-۳-۳ تقریب میدان‌های جابجایی و کرنش
- ۸۵-۳-۳-۳-۳-۳-۳ مدل اجزا محدود
- ۸۸-۴-۳-۳-۴-۳-۳ بحث و بررسی نتایج
- ۸۸-۱-۴-۳-۳-۱-۴-۳-۳ مثال عددی ۱
- ۹۳-۲-۴-۳-۳-۲-۴-۳-۳ مثال عددی ۲

۹۸.....	۳-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۳
۱۰۴.....	۴-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۴
۱۱۰.....	۵-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۵
۱۱۹.....	۶-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۶
۱۲۱.....	۷-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۷
۱۲۴.....	۸-۴-۳-۳-۳ مثال عددی ۸

فصل چهارم: تعمیم مدل اصلاح شده مرتبه بالای پیشنهادی جهت تحلیل استاتیکی تیرهای

چند لایه‌ی پیزوالکتریک

۱۲۶.....	۱-۴-۱-۴ مقدمه
۱۲۶.....	۲-۴-۲-۴ تعمیم مدل اصلاح شده‌ی مرتبه بالا جهت تحلیل تیرهای پیزوالکتریک
۱۲۶.....	۱-۲-۴-۱-۲ هندسه و دستگاه مختصات
۱۲۸.....	۲-۲-۴-۲-۲ معادلات ساختاری
۱۲۹.....	۳-۲-۴-۳-۲ تقریب پتانسیل الکتریکی در لایه‌های پیزوالکتریک
۱۳۰.....	۴-۲-۴-۴-۲ تقریب میدان‌های جابجایی و کرنش
۱۴۰.....	۵-۲-۴-۵-۲ مدل اجزا محدود
۱۴۵.....	۳-۴-۳-۴ بحث و بررسی نتایج
۱۴۶.....	۱-۳-۴-۱-۳-۴ مثال عددی ۱
۱۴۶.....	۱-۱-۳-۴-۱-۱ بارگذاری مکانیکی
۱۵۵.....	۲-۱-۳-۴-۲-۱ بارگذاری الکتریکی
۱۶۳.....	۳-۱-۳-۴-۳-۱ بارگذاری الکتریکی-مکانیکی

۱۶۵.....	۲-۳-۴- مثال عددی ۲
۱۷۰.....	۳-۳-۴- مثال عددی ۳
۱۷۱.....	۱-۳-۳-۴- بارگذاری مکانیکی
۱۷۷.....	۲-۳-۳-۴- بارگذاری الکتریکی
۱۸۴.....	۴-۳-۴- مثال عددی ۴
۱۸۵.....	۱-۴-۳-۴- بارگذاری مکانیکی
۱۸۹.....	۲-۴-۳-۴- بارگذاری الکتریکی

فصل پنجم: ارزیابی مدل اصلاح شده مرتبه بالا در تحلیل دینامیکی تیرهای پیزوالکتریک

۱۹۲.....	۱-۵- مقدمه
۱۹۲.....	۲-۵- ارتعاش آزاد
۱۹۴.....	۱-۲-۵- مثال عددی ۱
۲۰۸.....	۲-۲-۵- مثال عددی ۲
۲۱۲.....	۳-۲-۵- مثال عددی ۳
۲۱۸.....	۴-۲-۵- مثال عددی ۴
۲۱۹.....	۳-۵- ارتعاش اجباری
۲۲۰.....	۱-۳-۵- مثال عددی ۱
۲۲۶.....	۲-۳-۵- مثال عددی ۲
۲۳۲.....	۳-۳-۵- مثال عددی ۳

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی تحقیقات

۶-۱- نتیجه گیری ۲۳۴

۶-۲- پیشنهادهایی برای ادامه‌ی تحقیقات ۲۳۶

لیست مقالات منتشر شده ۲۳۷

فهرست مراجع ۲۳۸

پیوست (الف) ۲۵۰

پیوست (ب) ۲۶۱

پیوست (ج) ۲۷۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. المان‌های پیزوالکتریک موجود در نرم افزار ABAQUS ۵
- شکل ۱-۲. پارامترهای هندسی در یک سازه‌ی دو بعدی با $h/L \ll 1$ ۱۰
- شکل ۲-۲. هندسه و علایم استفاده شده در تعریف 2D تیرها و صفحات چند لایه ۱۱
- شکل ۳-۲. مقایسه‌ی تنش‌های برشی عرضی در یک سازه‌ی تک لایه با یک سازه‌ی مرکب سه لایه
[۲۷] ۱۴
- شکل ۴-۲. مقایسه میان فرضیات تئوری‌های LWT و ESLT [۴۵] ۱۸
- شکل ۱-۳. پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده برای تیر مرکب چند لایه ۴۹
- شکل ۲-۳. دستگاه مختصات کلی و محلی در نظر گرفته شده برای تیر مرکب چند لایه ۴۹
- شکل ۳-۳. المان تیر در نظر گرفته شده برای تیر مرکب چند لایه ۵۵
- شکل ۴-۳. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری تیر مورد بررسی در بخش ۳-۲-۶-۱ ۵۹
- شکل ۵-۳. $\bar{w}(L/2,0)$ در مقابل نسبت طول به ضخامت- تیر سه لایه $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ ۶۱
- شکل ۶-۳. تغییرات راستای ضخامت \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در مقاطع مختلف تیر سه لایه $-[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$
..... $S=4$ ۶۲
- شکل ۷-۳. تغییرات راستای ضخامت \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در مقاطع مختلف تیر سه لایه $-[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$
..... $S=10$ ۶۳
- شکل ۸-۳. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری تیر $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$ ۶۴
- شکل ۹-۳. تغییرات راستای ضخامت $\tau_{xz} (N/m^2)$ در دو مقطع متفاوت تیر یکسر گیردار
..... $S=4 - [90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$ ۶۶

- شکل ۳-۱۰. تغییرات راستای ضخامت $u(m)$ ، $\sigma_x(N/m^2)$ و $\tau_{xz}(N/m^2)$ برای تیر یکسر گیردار
 $S=10 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۶۸
- شکل ۳-۱۱. تغییرات راستای ضخامت $u(m)$ ، $\sigma_x(N/m^2)$ و $\tau_{xz}(N/m^2)$ برای تیر یکسر گیردار
 $S=50 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۶۹
- شکل ۳-۱۲. تغییرات راستای ضخامت $\tau_{xz}(N/m^2)$ در دو مقطع متفاوت تیر یکسر گیردار
 $S=4 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۷۱
- شکل ۳-۱۳. تغییرات راستای ضخامت $u(m)$ ، $\sigma_x(N/m^2)$ و $\tau_{xz}(N/m^2)$ برای تیر یکسر گیردار
 $S=10 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۷۳
- شکل ۳-۱۴. تغییرات راستای ضخامت $u(m)$ ، $\sigma_x(N/m^2)$ و $\tau_{xz}(N/m^2)$ برای تیر یکسر گیردار
 $S=50 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۷۵
- شکل ۳-۱۵. المان تیر در نظر گرفته شده برای تیر مرکب چند لایه با لحاظ اثرات تنش‌ها و کرنش‌های
 قائم عرضی ۸۵
- شکل ۳-۱۶. $\bar{w}(L/2,0)$ در مقابل نسبت طول به ضخامت- تیر سه لایه $[0^\circ / 90^\circ / 0^\circ]$ ۹۱
- شکل ۳-۱۷. تغییرات راستای ضخامت \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\sigma}_{zz}$ در مقاطع مختلف تیر سه لایه
 $S=4 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ]$ ۹۳
- شکل ۳-۱۸. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری تیر مورد بررسی در بخش ۳-۳-۴-۲ ۹۴
- شکل ۳-۱۹. $\bar{w}(L/2,0)$ در مقابل نسبت طول به ضخامت- تیر سه لایه $[0^\circ / 90^\circ]$ ۹۵
- شکل ۳-۲۰. تغییرات راستای ضخامت \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\sigma}_{zz}$ در مقاطع مختلف تیر دو لایه $[0^\circ / 90^\circ]$ -
 $S=4$ ۹۷
- شکل ۳-۲۱. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx}(N/m^2)$ و $\sigma_{zz}(N/m^2)$ در تیر یکسر گیردار
 $S=4 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ ۹۹

- شکل ۳-۲۲. تغییرات راستای ضخامت $\tau_{xz} (N/m^2)$ در دو مقطع مختلف تیر یکسر گیردار
 ۱۰۰..... $S=4 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
- شکل ۳-۲۳. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx} (N/m^2)$ ، $\tau_{xz} (N/m^2)$ ، $\sigma_{zz} (N/m^2)$ و $u(m)$ برای
 تیر یکسر گیردار $S=10 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
 ۱۰۲.....
- شکل ۳-۲۴. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx} (N/m^2)$ ، $\tau_{xz} (N/m^2)$ ، $\sigma_{zz} (N/m^2)$ و $u(m)$ برای
 تیر یکسر گیردار $S=50 - [90^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
 ۱۰۴.....
- شکل ۳-۲۵. تغییرات راستای ضخامت $\tau_{xz} (N/m^2)$ و $\sigma_{zz} (N/m^2)$ در تیر یکسر گیردار
 ۱۰۶..... $S=4 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
- شکل ۳-۲۶. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx} (N/m^2)$ ، $\tau_{xz} (N/m^2)$ ، $\sigma_{zz} (N/m^2)$ و $u(m)$ برای
 تیر یکسر گیردار $S=10 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
 ۱۰۸.....
- شکل ۳-۲۷. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx} (N/m^2)$ ، $\tau_{xz} (N/m^2)$ ، $\sigma_{zz} (N/m^2)$ و $u(m)$ برای
 تیر یکسر گیردار $S=50 - [0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$
 ۱۱۰.....
- شکل ۳-۲۸. تیر ساندویچی مورد بررسی در بخش ۳-۳-۴-۵
 ۱۱۱.....
- شکل ۳-۲۹. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{xx} (N/m^2)$ و $\tau_{xz} (N/m^2)$ در تیر ساندویچی ($S=4$)
 ۱۱۲.....
- شکل ۳-۳۰. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_{zz} (N/m^2)$ و $w(m)$ در تیر ساندویچی ($S=4$)
 ۱۱۳.....
- شکل ۳-۳۱. بررسی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات E_{1f} / E_{1e}
 ۱۱۵.....
- شکل ۳-۳۲. بررسی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات E_{3f} / E_{3e}
 ۱۱۷.....
- شکل ۳-۳۳. بررسی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات G_f / G_e
 ۱۱۹.....
- شکل ۳-۳۴. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری تیر مورد بررسی در بخش ۳-۳-۴-۶
 ۱۱۹.....

- شکل ۳-۳۵. تغییرات راستای ضخامت $\sigma_x (N/m^2)$ ، $\sigma_z (N/m^2)$ و $\tau_{xz} (N/m^2)$ در تیر دو سر گیردار
 $[-75^\circ / -15^\circ / 15^\circ / 75^\circ]$ ۱۲۱
- شکل ۳-۳۶. شکل‌های مودی برای تیر چهار لایه‌ی $[0^\circ / 90^\circ / 90^\circ / 0^\circ]$ با $S=10$ ۱۲۴
- شکل ۴-۱. هندسه و دستگاه مختصات در نظر گرفته شده برای تیر پیزوالکتریک ۱۲۷
- شکل ۴-۲. دستگاه مختصات کلی و محلی در نظر گرفته شده برای تیر پیزوالکتریک ۱۲۷
- شکل ۴-۳. نمایش مدل اجزا محدود تیر پیزوالکتریک (الف) درجات آزادی مکانیکی (ب) درجات آزادی الکتریکی ۱۴۱
- شکل ۴-۴. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری مکانیکی تیر مورد بررسی در قسمت ۵-۳-۱-۱ ۱۴۷
- شکل ۴-۵. تغییرات در راستای ضخامت \bar{w} ، \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\sigma}_{zz}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\phi}$ برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$
تحت بارگذاری مکانیکی - $S=4$ ۱۵۱
- شکل ۴-۶. تغییرات در راستای ضخامت \bar{w} ، \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\sigma}_{zz}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\phi}$ برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$
تحت بارگذاری مکانیکی - $S=10$ ۱۵۳
- شکل ۴-۷. تغییرات $\bar{w}(0.5L, 0)$ در مقابل نسبت طول به ضخامت برای حالت بارگذاری مکانیکی
..... ۱۵۵
- شکل ۴-۸. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری الکتریکی تیر مورد بررسی در قسمت ۵-۳-۱-۲ ۱۵۶
- شکل ۴-۹. تغییرات در راستای ضخامت \tilde{w} ، \tilde{u} ، $\tilde{\sigma}_{xx}$ ، $\tilde{\sigma}_{zz}$ ، $\tilde{\tau}_{xz}$ و \tilde{D}_z برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$
تحت بارگذاری الکتریکی - $S=5$ ۱۶۰
- شکل ۴-۱۰. تغییرات در راستای ضخامت \tilde{w} ، \tilde{u} ، $\tilde{\sigma}_{xx}$ ، $\tilde{\sigma}_{zz}$ ، $\tilde{\tau}_{xz}$ و \tilde{D}_z برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$
تحت بارگذاری الکتریکی - $S=10$ ۱۶۲

شکل ۴-۱۱. تغییرات $\tilde{w}(0.5L, 0)$ در مقابل نسبت طول به ضخامت برای حالت بارگذاری الکتریکی

۱۶۳.....

شکل ۴-۱۲. تغییرات در راستای ضخامت $\hat{\sigma}_{xx}$ ، $\hat{\sigma}_{zz}$ ، $\hat{\tau}_{xz}$ و \hat{D}_z برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت

بارگذاری الکتریکی - مکانیکی (S=5) ۱۶۵.....

شکل ۴-۱۳. بررسی تاثیر ضخامت لایه پیزوالکتریک بر رفتار حسگری ۱۶۸.....

شکل ۴-۱۴. بررسی تاثیر ضخامت لایه پیزوالکتریک بر رفتار عملگری ۱۷۰.....

شکل ۴-۱۵. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری مکانیکی تیر مورد بررسی در قسمت ۴-۳-۳-۱

۱۷۱.....

شکل ۴-۱۶. تغییرات در راستای ضخامت \bar{w} ، \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\sigma}_{zz}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\phi}$ برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$

تحت بارگذاری مکانیکی - S=4 ۱۷۴.....

شکل ۴-۱۷. تغییرات در راستای ضخامت \bar{w} ، \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\sigma}_{zz}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\phi}$ برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$

تحت بارگذاری مکانیکی - S=10 ۱۷۶.....

شکل ۴-۱۸. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری الکتریکی تیر مورد بررسی در قسمت ۴-۳-۳-۲

۱۷۸.....

شکل ۴-۱۹. تغییرات در راستای ضخامت \tilde{w} ، \tilde{u} ، $\tilde{\sigma}_{xx}$ ، $\tilde{\sigma}_{zz}$ ، $\tilde{\tau}_{xz}$ و \tilde{D}_z برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$

تحت بارگذاری الکتریکی - S=4 ۱۸۱.....

شکل ۴-۲۰. تغییرات در راستای ضخامت \tilde{w} ، \tilde{u} ، $\tilde{\sigma}_{xx}$ ، $\tilde{\sigma}_{zz}$ ، $\tilde{\tau}_{xz}$ و \tilde{D}_z برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$

تحت بارگذاری الکتریکی - S=10 ۱۸۳.....

شکل ۴-۲۱. هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری تیر ساندویچی پیزوالکتریک تحت بارگذاری مکانیکی

۱۸۵.....

شکل ۴-۲۲. تغییرات $w(m)$ ، $u(m)$ ، $\sigma_{xx} (N/m^2)$ و $\phi(V)$ در راستای ضخامت تیر ساندویچی برای حالت بارگذاری مکانیکی ۱۸۷

شکل ۴-۲۳. تغییرات راستای ضخامت $\tau_{xz} (N/m^2)$ و $\sigma_{zz} (N/m^2)$ در مقاطع مختلف تیر ساندویچی برای حالت بارگذاری مکانیکی ۱۸۸

شکل ۴-۲۴. تغییرات $w(m)$ ، $u(m)$ ، $\sigma_{xx} (N/m^2)$ ، $\tau_{xz} (N/m^2)$ و $D_z (C/m^2)$ در راستای ضخامت تیر ساندویچی برای حالت بارگذاری الکتریکی ۱۹۱

شکل ۵-۱. مقایسه اشکال مودی بدست آمده از مدل اصلاح شده‌ی مرتبه بالا با ABAQUS برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با تکیه‌گاه‌های ساده و شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۰۰

شکل ۵-۲. نمودار تغییرات \bar{u} ، \bar{w} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ ، $\bar{\tau}_{xz}$ و $\bar{\phi}$ در راستای ضخامت تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ در اولین مود خمشی- نسبت طول به ضخامت تیر $S=5$ ، تکیه‌گاه‌ها ساده و شرایط مرزی الکتریکی OC می‌باشد ۲۰۲

شکل ۵-۳. نمودار تغییرات $\bar{\phi}$ در راستای ضخامت تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ در اولین مود خمشی- تکیه‌گاه‌های تیر ساده و شرایط مرزی الکتریکی CC می‌باشد ۲۰۴

شکل ۵-۴. اشکال مودی بدست آمده از مدل اصلاح شده‌ی مرتبه بالا برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی مکانیکی گیردار-آزاد و شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۰۷

شکل ۵-۵. اشکال مودی بدست آمده از مدل اصلاح شده‌ی مرتبه بالا برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی مکانیکی گیردار-گیردار و شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۰۸

شکل ۵-۶. نمودار تغییرات \bar{u} ، \bar{w} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در راستای ضخامت تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ در اولین مود خمشی- نسبت طول به ضخامت تیر $S=10$ ، تکیه‌گاه‌ها ساده و شرایط مرزی الکتریکی نیز OC می‌باشد ۲۱۱

شکل ۵-۷. چیدمان لایه‌های کامپوزیتی در تیر ساندویچی مورد بررسی در قسمت ۵-۲-۳ ۲۱۲

شکل ۵-۸. اشکال مودی بدست آمده از مدل اصلاح شده‌ی مرتبه بالا برای تیر ساندویچی پیزوالکتریک، نسبت طول به ضخامت تیر $S=10$ ، تکیه‌گاه‌ها ساده و شرایط مرزی الکتریکی نیز OC می‌باشد
۲۱۴.....

شکل ۵-۹. نمودار تغییرات \bar{u} ، \bar{w} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در راستای ضخامت تیر ساندویچی در اولین مود خمشی - نسبت طول به ضخامت تیر $S=10$ ، تکیه‌گاه‌ها ساده و شرایط مرزی الکتریکی نیز OC می‌باشد
۲۱۶.....

شکل ۵-۱۰. هندسه و شرایط مرزی تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت حالت بارگذاری (الف)
۲۲۱.....

شکل ۵-۱۱. هندسه و شرایط مرزی تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت حالت بارگذاری (ب)
۲۲۲.....

شکل ۵-۱۲. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ نسبت به زمان برای حالت بارگذاری (الف)
۲۲۳.....

شکل ۵-۱۳. نمودار تغییرات \bar{u} ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در راستای ضخامت تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ برای حالت بارگذاری (الف) - $t = 0.048s$
۲۲۴.....

شکل ۵-۱۴. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ نسبت به زمان برای حالت بارگذاری (ب)
۲۲۵.....

شکل ۵-۱۵. نمودار تغییرات \tilde{u} ، \tilde{w} و \tilde{D}_z در راستای ضخامت تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ برای حالت بارگذاری (ب) - $t = 0.048s$
۲۲۶.....

شکل ۵-۱۶. هندسه و شرایط مرزی تیر ساندویچی تحت حالت بارگذاری (الف)
۲۲۷.....

شکل ۵-۱۷. هندسه و شرایط مرزی تیر ساندویچی تحت حالت بارگذاری (ب)
۲۲۷.....

- شکل ۵-۱۸. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار ساندویچی نسبت به زمان برای حالت بارگذاری (الف) ۲۲۸
- شکل ۵-۱۹. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار ساندویچی نسبت به زمان برای حالت بارگذاری (ب) ۲۲۹
- شکل ۵-۲۰. نمودار تغییرات \bar{u} ، $\bar{\phi}$ ، $\bar{\sigma}_{xx}$ و $\bar{\tau}_{xz}$ در راستای ضخامت تیر یکسر گیردار ساندویچی برای حالت بارگذاری (الف) - $t = 0.036s$ ۲۳۰
- شکل ۵-۲۱. نمودار تغییرات \tilde{w} ، $\tilde{\sigma}_{xx}$ و \tilde{D}_z در راستای ضخامت تیر یکسر گیردار ساندویچی برای حالت بارگذاری (ب) - $t = 0.036s$ ۲۳۲
- شکل ۵-۲۲. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار $[p_z/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ نسبت به زمان برای حالت بارگذاری هارمونیک ۲۳۳
- شکل ۵-۲۳. جابجایی عرضی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار ساندویچی نسبت به زمان برای حالت بارگذاری هارمونیک ۲۳۳
- شکل الف-۱. هندسه و سیستم مختصات تیر چند لایه‌ی پیزوالکتریک ۲۵۰
- شکل ج-۱. چرخش دستگاه مختصات محلی در صفحه‌ی ۲-۳ ۲۷۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳. $\bar{w}(L/2,0)$ برای مقادیر مختلف طول به ضخامت- تیر مرکب سه لایه $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$	۶۰.....
جدول ۲-۳. $w(L,0)$ برای مقادیر مختلف S - تیر یکسر گیردار $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$	۶۵.....
جدول ۳-۳. $w(L,0)$ برای مقادیر مختلف S - تیر یکسر گیردار $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$	۷۰.....
جدول ۴-۳. فرکانس‌های طبیعی تیر مرکب ضخیم ($S \cong 2.2$)	۷۶.....
جدول ۵-۳. فرکانس‌های طبیعی تیر مرکب نازک ($S = 22.7$)	۷۵.....
جدول ۶-۳. نتایج آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر سه لایه‌ی $S=4 - [0^\circ/90^\circ/0^\circ]$	۸۹.....
جدول ۷-۳. $\bar{w}(L/2,0)$ برای مقادیر مختلف طول به ضخامت- تیر مرکب سه لایه $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$	۹۰.....
جدول ۸-۳. نتایج آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر دو لایه‌ی $S=4 - [0^\circ/90^\circ]$	۹۵.....
جدول ۹-۳. $w(L,0)$ برای مقادیر مختلف S - تیر یکسر گیردار $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$	۹۸.....
جدول ۱۰-۳. $w(L,0)$ برای مقادیر مختلف S - تیر یکسر گیردار $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$	۱۰۵.....
جدول ۱۱-۳. آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر $S=10 - [0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$	۱۲۲.....
جدول ۱۲-۳. فرکانس‌های طبیعی تیر چهار لایه $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$	۱۲۳.....
جدول ۱۳-۳. فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی	۱۲۵.....
جدول ۱-۴. آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت بارگذاری مکانیکی - $S=10$	۱۴۸.....
جدول ۲-۴. نتایج عددی بدست آمده برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت بارگذاری مکانیکی	۱۴۹.....

- جدول ۳-۴. آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت بارگذاری الکتریکی - $S=10$ ۱۵۶
- جدول ۴-۴. نتایج عددی بدست آمده برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ تحت بارگذاری الکتریکی ۱۵۸
- جدول ۴-۵. نتایج عددی بدست آمده برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ تحت بارگذاری مکانیکی ۱۷۷
- جدول ۴-۶. نتایج عددی بدست آمده برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ تحت بارگذاری الکتریکی ۱۷۹
- جدول ۵-۱. آزمایش همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی الکتریکی $S = 5 - OC$ ۱۹۵
- جدول ۵-۲. فرکانس‌های طبیعی تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی الکتریکی OC و تکیه‌گاه-های ساده ۱۹۶
- جدول ۵-۳. فرکانس‌های طبیعی تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی الکتریکی CC و تکیه‌گاه-های ساده ۲۰۳
- جدول ۵-۴. فرکانس‌های طبیعی تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی مکانیکی گیردار-آزاد و شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۰۵
- جدول ۵-۵. فرکانس‌های طبیعی تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ با شرایط مرزی مکانیکی گیردار-گیردار و شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۰۶
- جدول ۵-۶. فرکانس‌های طبیعی تیر $[pz/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ با شرایط مرزی الکتریکی OC و تکیه‌گاه-های ساده ۲۰۹
- جدول ۵-۷. فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی پیزوالکتریک با شرایط مرزی الکتریکی OC و تکیه‌گاه-های ساده ۲۱۳
- جدول ۵-۸. فرکانس‌های طبیعی تیر یکسر گیردار ساندویچی با شرایط مرزی الکتریکی OC ۲۱۷