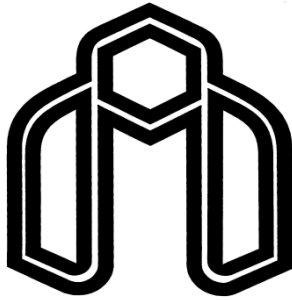


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

تعیین ضرایب شدت تنش مواد پیزوالکتریک تابعی صفحه‌ای
حاوی ترک با روش المان محدود توسعه یافته

دانشجو:

احسان اوبری دخت

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

استاد مشاور:

دکتر محمد باقر نظری

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای احسان اوبری دخت

تحت عنوان: تعیین ضرایب شدت تنش مواد پیزوالکتریک تابعی صفحه ای حاوی ترک با
روش المان محدود توسعه یافته

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : محمد باقر نظری		نام و نام خانوادگی : محمود شریعتی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایشار و از خودگذشتگی

به پاس قلب های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدنش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به خانواده عزیزم تقدیم می کنم

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس بیکران خداوند، لازم می‌دانم از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به‌ویژه اساتید محترم آقای دکتر محمود شریعتی و آقای دکتر محمد باقر نظری که با راهنمایی‌های مدبرانه، نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از تمامی دوستان که لحظاتی سرشار از صفا و صمیمیت را در کنار خود برایم به یادگار گذاشتند و همیشه اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده و به من درس صداقت و مهرورزی آموختند بسیار سپاسگزارم.

درد فراوان خدمت خانواده بسیار عزیز، دلسوز و فداکارم که پیوسته جرعه نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده‌ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است، از ایشان تقدیر و تشکر فراوان دارم.

تعهد نامه

اینجانب احسان اوبری دخت دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " تعیین ضرایب شدت تنش مواد پیزوالکتریک تابعی صفحه ای حاوی ترک با روش المان محدود توسعه یافته " تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر محمد باقر نظری متعهد می-

شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پژوهش به تعیین ضرایب شدت تنش مکانیکی و شدت جابجایی الکتریکی در مواد پیزوالکتریک ترک‌دار و همچنین مواد پیزوالکتریک تابعی پرداخته شده است.

روش عددی مورد استفاده در این پژوهش، روش المان محدود توسعه یافته می‌باشد. برنامه نوشته شده به وسیله نرم افزار Matlab می‌باشد که شامل یک برنامه اصلی و چندین زیربرنامه می‌باشد. در برنامه پس از بدست آوردن جابجایی‌های مکانیکی و پتانسیل الکتریکی و همچنین تنش‌ها و جابجایی‌های الکتریکی، ضرایب شدت تنش مکانیکی و ضریب شدت جابجایی الکتریکی در صفحات پیزوالکتریک همگن و غیرهمگن با ترک مرکزی، لبه‌ای و مایل مورد بررسی قرار گرفته است. روش مورد استفاده برای محاسبه ضرایب شدت در این پژوهش روش انتگرال برهم‌کنش و انطباق نقطه‌ای می‌باشد که در قسمت نتایج ضرایب شدت با استفاده از این دو روش محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. با توجه به نتایج، اثر بار مکانیکی بر ضریب شدت جابجایی الکتریکی و اثر بار الکتریکی بر ضریب شدت تنش مکانیکی ناچیز است. همچنین در بررسی تأثیر زاویه، با افزایش زاویه‌ی ترک نسبت به افق، ضرایب شدت تنش مکانیکی مود I و ضریب شدت الکتریکی کاهش می‌یابند و ضریب شدت تنش مکانیکی مود II ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

کلید واژه: ترک، مواد پیزوالکتریک تابعی، روش المان محدود توسعه یافته، ضرایب شدت تنش مکانیکی و

ضریب شدت جابجایی الکتریکی.

۵	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
۱	فصل ۱. مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- مواد تابعی.....
۳	۳-۱- ویژگی های مواد تابعی.....
۴	۴-۱- مواد پیزوالکتریک تابعی.....
۵	۵-۱- کاربردهای مواد پیزوالکتریک.....
۶	۶-۱- معادلات اساسی برای مواد پیزوالکتریک.....
۷	۷-۱- روش اجزای محدود توسعه یافته.....
۷	۸-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده.....
۱۰	۹-۱- ساختار پایان نامه.....
۱۲	فصل ۲. مکانیک شکست مواد پیزوالکتریک
۱۳	۱-۲- مقدمه‌ای بر مکانیک شکست.....
۱۳	۲-۲- مکانیک شکست در مواد پیزوالکتریک.....
۱۴	۳-۲- معیار شکست برای بارگذاری الکترومکانیکی استاتیکی.....
۱۴	۱-۳-۲- معیار شکست برای یک ترک گریفیث.....
۱۶	۲-۳-۲- منحنی‌های مقاومت رشد ترک.....
۱۸	فصل ۳. روش اجزای محدود توسعه یافته
۱۹	۱-۳- مقدمه.....
۲۰	۲-۳- روش اجزای محدود توسعه یافته.....
۲۰	۱-۲-۳- روابط پایه.....
۲۱	۲-۲-۳- روابط مربوط به مدل سازی ترک.....
۲۳	۳-۲-۳- محاسبه ضرایب شدت تنش.....
۲۴	۳-۳- روش‌های اجزای محدود توسعه یافته برای مواد پیزوالکتریک.....
۲۵	۱-۳-۳- توصیف هندسه ترک.....
۲۶	۲-۳-۳- غنی‌سازی تقریب.....
۲۸	۳-۳-۳- محاسبه ضریب شدت تنش تحلیلی.....
۲۹	۴-۳-۳- کاربردهای عددی.....
۳۰	فصل ۴. محاسبه ضرایب شدت تنش در صفحه پیزوالکتریک
۳۱	۱-۴- مقدمه.....
۳۱	۲-۴- روش همبستگی تغییر مکانها (انطباق نقطه‌ای).....
۳۴	۳-۴- میدانهای نوک ترک در مواد پیزوالکتریک و مواد پیزوالکتریک تابعی.....
۳۷	۴-۴- انتگرال J (حالت دوبعدی).....
۳۷	۱-۴-۴- مواد پیزوالکتریک همگن.....
۴۲	۲-۴-۴- مواد پیزوالکتریک غیرهمگن.....

۴۳	..... ۵-۴-۵- روش انجام پروژه
۴۴	..... ۴-۵-۱- پیش پردازش
۴۵	..... ۴-۵-۲- حل مسئله
۴۶	..... ۴-۵-۳- پس پردازش
۴۸	..... فصل ۵. نتایج
۴۹	..... ۵-۱- بررسی و محاسبه ضرایب شدت تنش در صفحه پیزوالکتریک
۴۹	..... ۵-۱-۱- صفحه بدون ترک پیزوالکتریک همگن
۵۱	..... ۵-۱-۲- بررسی همگرایی المان محدود توسعه یافته
۵۳	..... ۵-۱-۳- ترک داخلی در صفحه پیزوالکتریک همگن
۵۴	..... ۵-۱-۴- ترک داخلی زاویه دار در صفحه پیزوالکتریک
۵۵	..... ۵-۱-۵- ترک داخلی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
۵۶	..... ۵-۱-۶- صفحه پیزوالکتریک همگن حاوی ترک لبه‌ای
۵۸	..... ۵-۲- نتایج
۵۸	..... ۵-۲-۱- ترک لبه‌ای در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مکانیکی
۵۹	..... ۵-۲-۲- ترک لبه‌ای در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری الکتریکی
۶۰	..... ۵-۲-۳- ترک لبه‌ای در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مرکب
۶۴	..... ۵-۲-۴- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مکانیکی
۶۵	..... ۵-۲-۵- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری الکتریکی
۶۶	..... ۵-۲-۶- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مرکب
۶۸	..... ۵-۲-۷- تأثیر طول ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مرکب
	..... ۵-۲-۸- بررسی خطای ناشی از محدوده شعاع انتگرال ناحیه J در ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک همگن
۷۰	..... تحت بارگذاری مرکب
۷۱	..... ۵-۲-۹- بررسی اثر شبکه بندی صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
۷۳	..... ۵-۲-۱۰- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن (پیزوالکتریک تابعی) تحت بارگذاری مکانیکی
۷۵	..... ۵-۲-۱۱- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن تحت بارگذاری الکتریکی
۷۷	..... ۵-۲-۱۲- ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن تحت بارگذاری مرکب
۸۰	..... ۵-۲-۱۳- تأثیر طول ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن تحت بارگذاری مرکب
	..... ۵-۲-۱۴- تأثیر محدوده شعاع انتگرال ناحیه J در ترک مرکزی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
۸۱	..... تحت بارگذاری مرکب
۸۳	..... ۵-۲-۱۵- بررسی اثر شبکه بندی صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
۸۴	..... ۵-۲-۱۶- تأثیر زاویه ترک نسبت به افق در صفحه پیزوالکتریک همگن تحت بارگذاری مرکب
۸۶	..... ۵-۲-۱۷- تأثیر زاویه ترک نسبت به افق در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن تحت بارگذاری مرکب
۸۹	..... فصل ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۰	..... ۶-۱- نتیجه‌گیری
۹۳	..... ۶-۲- پیشنهادها
۹۴	..... منابع
۹۸	..... واژه نامه فارسی به انگلیسی
۹۹	..... واژه نامه انگلیسی به فارسی

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ضریب شدت تنش مکانیکی مود I	K_I
ضریب شدت تنش مکانیکی مود II	K_{II}
ضریب شدت جابجایی الکتریکی	K_{IV}
طول ترک	A
تنش دوردست	σ^∞
جابجایی الکتریکی	D^∞
رهیافت انرژی	G
میدان الکتریکی	E
جابجایی گره‌ای	u_i
پتانسیل الکتریکی	Φ_I
تابع غنی سازی	$\psi(x)$
مجموعه‌ای از گره‌ها	N^g
دامنه اثر تابع شکل	ω_1
پارامتر اضافی در غنی‌سازی تقریب	b_j
پارامتر اضافی در غنی‌سازی تقریب	c_l
چگالی انرژی کرنشی	W
ماتریس سفتی	K
پارامتر اضافی	d_l
پارامتر اضافی	a_i
نصف عرض صفحه	w
زاویه ترک نسبت به افق	δ

r	شعاع انتگرال
C	ثابت الاستیک
e	ثابت دی الکتریک
κ	ثابت پیزوالکتریک
$f_{ij}^N(\theta)$	تابع زاویه‌ای استاندارد ترک
$g_i^N(\theta)$	تابع زاویه‌ای استاندارد ترک
$d_i^N(\theta)$	تابع زاویه‌ای استاندارد ترک
$v^N(\theta)$	تابع زاویه‌ای استاندارد ترک
P_α	مقادیر ویژه
$A_{M\alpha}$	بردار ویژه
Y	ماتریس اروین

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

فصل دوم

- شکل (۱-۲) ترک گریفیث با قطب عمودی و میدان الکتریک ۱۴
شکل (۲-۲) نرخ رهاسازی انرژی در مقابل میدان الکتریک برای روابط مختلف نفوذ پذیری K_F با ترک گریفیث
در PZT-5H در تنش دوردست ثابت σ_{zz} ۱۶

فصل سوم

- شکل (۱-۳) ترک بین لایه‌ای بین دو ماده دوسانگرد ۲۰
شکل (۲-۳) بردارهای یکه عمودی و مماسی در تابع هویساید تعمیم یافته برای نقطه‌ای مانند X^*
که نزدیکترین نقطه بر روی ترک به نقطه X است ۲۲
شکل (۳-۳) انتخاب نقاط برای غنی سازی، نقاطی که با دایره مشخص شده‌اند با تابع تعمیم یافته هویساید
و نقاطی که با مثلث مشخص شده‌اند با توابع نزدیک نوک ترک غنی سازی می‌شوند ۲۳
شکل (۴-۳) مجموعه گره‌های انتخابی برای غنی سازی ۲۷

فصل چهارم

- شکل (۱-۴) برونیایی ضریب شدت تنش در روش همبستگی تغییر مکانها ۳۲
شکل (۲-۴) کاربرد روش همبستگی تغییر مکان ۳۳
شکل (۳-۴) پیوستار پیزوالکتریک تابعی با ترک تحت بارهای خارجی مکانیکی و الکتریکی ۳۴
شکل (۴-۴) مختصات محلی نوک ترک و کانتور برای محاسبه انتگرال J ۳۷
شکل (۵-۴) نواحی انتگرالگیری برای محاسبه فرم سطحی انتگرال J ۳۸
شکل (۶-۴) شبکه بندی صفحه و انتخاب المان ها و گره های اطراف ترک و تعیین نوع آنها ۴۴
شکل (۷-۴) تغییر شکل صفحه پیزوالکتریک، الف) همگن، ب) غیر همگن ۴۶
شکل (۸-۴) فلوجارت برنامه ۴۷

فصل پنجم

- شکل (۱-۵) صفحه پیزوالکتریک بدون ترک ۴۹
شکل (۲-۵) جابجایی در جهت X بر روی قطر اصلی صفحه ساده پیزوالکتریک همگن
با روش بدون المان گالرکین و روش اجزای محدود توسعه یافته ۵۰
شکل (۳-۵) جابجایی در جهت Y بر روی قطر اصلی صفحه ساده پیزوالکتریک همگن
با روش بدون المان گالرکین و روش اجزای محدود توسعه یافته ۵۰

- شکل (۴-۵) پتانسیل الکتریکی بر روی قطر اصلی صفحه ساده پیزوالکتریک همگن
 با روش بدون المان گالرکین و روش اجزای محدود توسعه یافته..... ۵۱
- شکل (۵-۵) صفحه پیزوالکتریک با ترک داخلی تحت بار مکانیکی و الکتریکی ۵۱
- شکل (۶-۵) ضریب شدت تنش مکانیکی در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی با مش بندی متفاوت..... ۵۳
- شکل (۷-۵) ضریب شدت جابجایی الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی با مش بندی متفاوت..... ۵۳
- شکل (۸-۵) صفحه پیزوالکتریک با ترک مایل تحت بارگذاری مرکب ۵۵
- شکل (۹-۵) صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای تحت بار مکانیکی و الکتریکی ۵۷
- شکل (۱۰-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای تحت بارگذاری مکانیکی ۵۹
- شکل (۱۱-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای تحت بارگذاری الکتریکی ۶۰
- شکل (۱۲-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای
 تحت بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت ۶۱
- شکل (۱۳-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای
 تحت بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت ۶۲
- شکل (۱۴-۵) ضرایب شدت بی بعد شده K_I و K_{IV} بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای تحت
 بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت ۶۲
- شکل (۱۵-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک لبه ای تحت بارگذاری مرکب با بار الکتریکی ثابت ۶۳
- شکل (۱۶-۵) ضرایب شدت بی بعد شده K_I و K_{IV} بر حسب تنش دوردست در صفحه پیزوالکتریک
 با ترک لبه ای تحت بارگذاری مرکب با بار الکتریکی ثابت ۶۴
- شکل (۱۷-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مکانیکی ۶۵
- شکل (۱۸-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری الکتریکی ۶۶
- شکل (۱۹-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت ۶۷
- شکل (۲۰-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب با بار الکتریکی ثابت ۶۸
- شکل (۲۱-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب طول ترک، ب) ضریب شدت K_{IV} بر حسب طول ترک،
 در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب ۶۹
- شکل (۲۲-۵) الف) ضریب شدت تنش K_I بر حسب نسبت اندازه شبکه بندی، ب) ضریب شدت K_{IV}
 بر حسب نسبت اندازه شبکه بندی، در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب ۷۲
- شکل (۲۳-۵) خطای حاصل از ضرایب شدت K_I و K_{IV} بر حسب نسبت اندازه شبکه بندی در صفحه پیزوالکتریک
 با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب ۷۳
- شکل (۲۴-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 تحت بارگذاری مکانیکی ۷۴

- شکل (۲۵-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۵ تحت بارگذاری مکانیکی
- شکل (۲۶-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۶ تحت بارگذاری الکتریکی
- شکل (۲۷-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۶ تحت بارگذاری الکتریکی
- شکل (۲۸-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب تنش دوردست در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۷ تحت بارگذاری مرکب با بار الکتریکی ثابت
- شکل (۲۹-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب تنش دوردست در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۸ تحت بارگذاری مرکب با بار الکتریکی ثابت
- شکل (۳۰-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۹ تحت بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت
- شکل (۳۱-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب بار الکتریکی در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۷۹ تحت بارگذاری مرکب با بار مکانیکی ثابت
- شکل (۳۲-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب طول ترک در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۸۰ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۳-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب طول ترک در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۸۱ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۴-۵) ضریب شدت تنش بی بعد شده K_I بر حسب شعاع انتگرال در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
 ۸۲ با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۵-۵) ضریب شدت بی بعد شده K_{IV} بر حسب شعاع انتگرال در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
 ۸۲ با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۶-۵) ضریب شدت تنش K_I بر حسب نسبت اندازه المان در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۸۳ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۷-۵) ضریب شدت K_{IV} بر حسب نسبت اندازه المان در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک مرکزی
 ۸۳ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۸-۵) ضریب شدت تنش بی بعد شده K_I بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک مرکزی
 ۸۵ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۳۹-۵) ضریب شدت تنش بی بعد شده K_{II} بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک مرکزی
 ۸۵ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۴۰-۵) ضریب شدت بی بعد شده K_{IV} بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک مرکزی
 ۸۶ تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۴۱-۵) ضریب شدت تنش بی بعد شده K_I بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
 ۸۷ با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۴۲-۵) ضریب شدت تنش بی بعد شده K_{II} بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
 ۸۸ با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب
- شکل (۴۳-۵) ضریب شدت بی بعد شده K_{IV} بر حسب زاویه ترک در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
 ۸۸ با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب

فهرست جداول

- جدول (۱-۴) مقایسه ماتریس اروین در مرجع [۲۹] با کد نوشته شده ۴۱
- جدول (۱-۵) نتایج حاصل از ضرایب شدت صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک داخلی تحت بارگذاری مرکب ۵۴
- جدول (۲-۵) خطای حاصل از مقایسه ضرایب شدت روش انتگرال J و انطباق نقطه ای با نتایج تحلیلی
در صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک داخلی تحت بارگذاری مرکب ۵۴
- جدول (۳-۵) مقایسه نتایج حاصل از ضرایب شدت K_I ، K_{II} و K_{IV} در صفحه پیزوالکتریک همگن
با دو روش EDI و DCT با مرجع [۳۱] ۵۵
- جدول (۴-۵) نتایج حاصل از ضرایب شدت صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن با ترک داخلی تحت بارگذاری مرکب ۵۶
- جدول (۵-۴) خطای حاصل از مقایسه ضرایب شدت برای کد نوشته شده با نتایج تحلیلی
در صفحه پیزوالکتریک همگن با ترک لبه‌ای تحت بارگذاری مرکب ۵۴
- جدول (۶-۵) خطای حاصل از مقایسه ضرایب شدت بی بعد برای کد نوشته شده با نتایج تحلیلی
در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب با طول های ترک مختلف ۷۰
- جدول (۷-۵) خطای حاصل از مقایسه ضرایب شدت بی بعد برای کد نوشته شده با نتایج تحلیلی
در صفحه پیزوالکتریک با ترک مرکزی تحت بارگذاری مرکب با شعاع های انتگرال گیری مختلف ۷۰
- جدول (۸-۵) نتایج حاصل از ضرایب شدت K_I ، K_{II} و K_{IV} در صفحه پیزوالکتریک همگن
با روش EDI در زوایای مختلف ترک ۸۱
- جدول (۹-۵) نتایج حاصل از ضرایب شدت K_I ، K_{II} و K_{IV} در صفحه پیزوالکتریک غیرهمگن
با روش EDI در زوایای مختلف ترک ۸۳

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا به معرفی مواد تابعی و ویژگی‌های آن‌ها پرداخته شده است که می‌تواند استحکام مواد را افزایش دهد و از شکست تا حدود زیادی جلوگیری کند. در ادامه در مورد مواد پیزوالکتریک به عنوان یکی از انواع مواد هوشمند توضیح داده شده است که قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و یا برعکس را دارد. همچنین کاربردهای گسترده‌ی مواد پیزوالکتریک توضیح داده شده و پس از آن، معادلات اساسی برای مواد پیزوالکتریک گفته شده است. پس از آن به اختصار در مورد کار گذشتگان اشاره و در انتهای فصل به ساختار پایان نامه اشاره شده است.

۱-۲- مواد تابعی

مواد تابعی از ترکیب دو ماده مختلف که معمولاً یکی فلز و دیگری سرامیک است، ساخته می‌شوند؛ به طوری که خواص ترکیب حاصل بصورت یکنواخت تغییر کند. در نتیجه در این مواد جزء حجمی مواد تشکیل‌دهنده بصورت تابعی یکنواخت تغییر کرده و باعث ایجاد یک ساختار میکروسکوپی غیر یکنواخت و یک ساختار ماکروسکوپی با تغییرات پیوسته می‌گردد [۱].

با وجود آنکه تحقیق‌های علمی در مورد مواد تابعی سابقه زیادی ندارد؛ ولی تصور کلی و مفهوم مواد تابعی از زمان‌های دور در ساختار سازه‌های فولادی اولیه و حتی در ساختار ارگانسیم‌های زنده طبیعت مانند استخوان و خیزران وجود داشته است. این‌گونه مواد در ساختارشان دارای تغییرات تدریجی هستند تا اجزای قوی‌تر ساختار آن‌ها در مکان‌هایی متمرکز شوند که تنش وارد بر سازه در آن نقاط بیشتر است.

به عنوان مثال در ساختار استخوان بدن که لازم است در سطوح خارجی آن مقاومت مناسبی در مقابل عوامل بیرونی از جمله ضربات شدید و در قسمت‌های داخلی شرایط مناسبی برای جذب مواد غذایی داشته باشد، ساختاری که کاملاً مشابه ساختار مواد تابعی می‌باشد، وجود دارد. به گونه‌ای که استخوان در سطوح خارجی کاملاً سخت و مقاوم می‌باشد؛ ولی در مرکز، ساختاری کاملاً نرم و

اسفنجی را داراست و تغییرات بین این دو ناحیه نیز به صورت کاملاً پیوسته و هموار می‌باشد. البته یک تفاوت اساسی در ساختار تدریجی مواد زنده و مواد مصنوعی وجود دارد. به این دلیل که ارگانسیم‌های زنده قابلیت وفق دادن سازه‌ی خود، با توجه به ظرفیت عناصر مورد نیاز خود را دارند. در ساختار مواد تابعی می‌بایست خواص از یک ترکیب یا ماده به سمت خواص یک ترکیب یا ماده دیگر تغییر کند، یعنی مواد تابعی به طور معمول از دو فاز جداگانه ساخته شده‌اند به گونه‌ای که خواص آن‌ها به صورت پیوسته و مستمر در حالت تغییر از یک فاز به فاز دیگر می‌باشد. معمولاً نوع ترکیب به گونه‌ای است که خواص مواد ترکیبی مکمل یکدیگر می‌باشند و کمبودها و نواقص یکدیگر را جبران می‌کنند.

۱-۳- ویژگی‌های مواد تابعی

با توجه به نکاتی که گفته شد و با تحقیق‌های که بر روی مواد تابعی انجام گرفته است، می‌توان ویژگی‌های زیر را برای مواد تابعی نام برد [۲].

۱- مواد تابعی در برابر گرادیان دمایی بالا مقاومت خوبی دارند و با کاهش دادن تنش‌های

حرارتی، اثرات منفی آن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. به کمک این خواص

می‌توان تنش‌ها را در اطراف نقاطی که تنش‌های حرارتی دارای مقدار بیشینه است و در

حقیقت نوعی حالت بحرانی به وجود آمده است، کنترل کرد.

۲- به کمک مواد تابعی می‌توان استحکام مواد را افزایش داد و از ورود اجسام به منطقه‌ی

پلاستیک و حتی شکست تا حدود زیادی جلوگیری کرد.

۳- یکی از مهمترین ویژگی‌هایی که مواد تابعی دارند، قابلیت از بین بردن تمرکز تنش می‌باشد.

در بسیاری از اجسام، تمرکز تنش به علت وجود شکل‌های هندسی خاص، در برخی از نقاط

جسم ایجاد می‌گردد. نقاطی مانند لبه‌های جسم یا در نزدیکی سوراخ‌های درون جسم که به

وسیله مواد تابعی می‌توان اثرهای آن‌ها را کاهش داد.

۴- تغییرات تدریجی خواص در ساختار مواد موجب استحکام بین فازهای مختلف می‌گردد. در مواد مرکب تداخل موجود بین ساختارهای زمینه و الیاف تقویت کننده، یک نوع ناهماهنگی در خواص مکانیکی را ایجاد می‌کند. به عنوان مثال هنگامی که در معرض بارهای حرارتی بالا قرار می‌گیرند، ترک ابتدا در پهنه‌ی مرزی زمینه و الیاف ایجاد می‌گردد و سپس در لایه‌ها و مقاطع ضعیف داخل زمینه و الیاف منتشر می‌گردد.

۵- با استفاده از مواد تابعی و یافتن بهترین ترکیب برای تغییر خواص، نیروهایی که باعث ایجاد و رشد ترک می‌گردند، قابل کنترل می‌باشند.

۶- بسیار ساده‌تر خواهد بود اگر هنگام قرارداد یک روکش سخت و ترد بر روی مواد نرم، از تغییرات پیوسته و تدریجی مواد استفاده شود. در این حالت احتمال جدا شدن لایه‌ها کاهش می‌یابد.

۷- به کمک تغییرات تدریجی خواص مکانیکی در لایه‌های سطحی می‌توان از بریدگی‌های سطحی که باعث ایجاد میدان‌های تکین می‌شوند، جلوگیری کرد و خواص تغییر شکل پلاستیک ماده را در اطراف این بریدگی‌ها تغییر داد.

۱-۴- مواد پیزوالکتریک تابعی^۱

با توجه به اینکه مواد تابعی، پتانسیل کاهش تمرکز تنش و افزایش چقرمگی شکست را دارا می‌باشند، در نتیجه نوع جدیدی از مواد (پیزوالکتریک تابعی) به منظور بهبود قابلیت اطمینان از مواد پیزوالکتریک و سازه‌ها با گسترش مفهوم مواد شناخته شده تابعی، توسعه داده شد.

پیزوالکتریک‌ها یکی از انواع مواد هوشمند هستند که دارای قابلیت تبدیل انرژی از سطحی به سطح دیگر می‌باشند. رفتار پیزوالکتریک عبارت است از تولید الکتریسیته ایجاد شده توسط پلاریزاسیون توسط یک کریستال در اثر اعمال تنش. اثر پیزوالکتریک، قابلیت برخی از مواد است برای

^۱Functionally graded piezoelectric materials

تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و برعکس. تولید اختلاف پتانسیل الکتریکی در برخی بلورهای نارسانا مثل کوارتز در اثر کشش یا فشار متداول است. علامت پتانسیل‌های دو وجه بلور در دو حالت فشردگی یا کشیدگی معکوس هم‌ارزند و هرچه میزان فشار و کشش بیشتر باشد، اختلاف پتانسیل تولید شده بیشتر است. زمانی که یک میدان الکتریکی به یک کریستال پیزوالکتریک اعمال شود، تحت کرنش قرار می‌گیرد که اصطلاحاً آنرا رفتار پیزوالکتریک معکوس می‌نامند. شرط ضروری برای پیزوالکتریک بودن یک کریستال، عدم وجود تقارن مرکزی در ساختار کریستال است. حال اگر دو وجه روبرویی در هر یک از این بلورها را به اختلاف پتانسیل متناوب الکتریکی وصل کنیم، تغییر شکل متناوبی در آن رخ داده و به ارتعاش درمی‌آید. ترکیبات سرب، زیرکات و تیتانات مثال‌هایی از مواد پیزوالکتریک هستند.

۱-۵- کاربردهای مواد پیزوالکتریک

۱. به عنوان مبدل انرژی نوسانی به انرژی الکتریکی (شتاب سنج و ...)
۲. به عنوان مبدل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی (در دیسک‌های صوتی، میکروفن، بلندگو و ...)
۳. در دریافت و انتقال امواج آلتراسونیک (کنترل امواج التراسونیک، سنسورهای AE و ...)
۴. در تولید ولتاژ و جرقه با ولتاژ بالا (جرقه‌زن)
۵. در تولید بیوسنسورهای پزشکی
۶. در تولید میکروروباتهای ریز و موتورهای در مقیاس کوچک
۷. استفاده از نانوذرات پیزوالکتریک (نانوذرات سرامیک‌های خاص) در ایجاد خواص الکتریکی

یک سطح