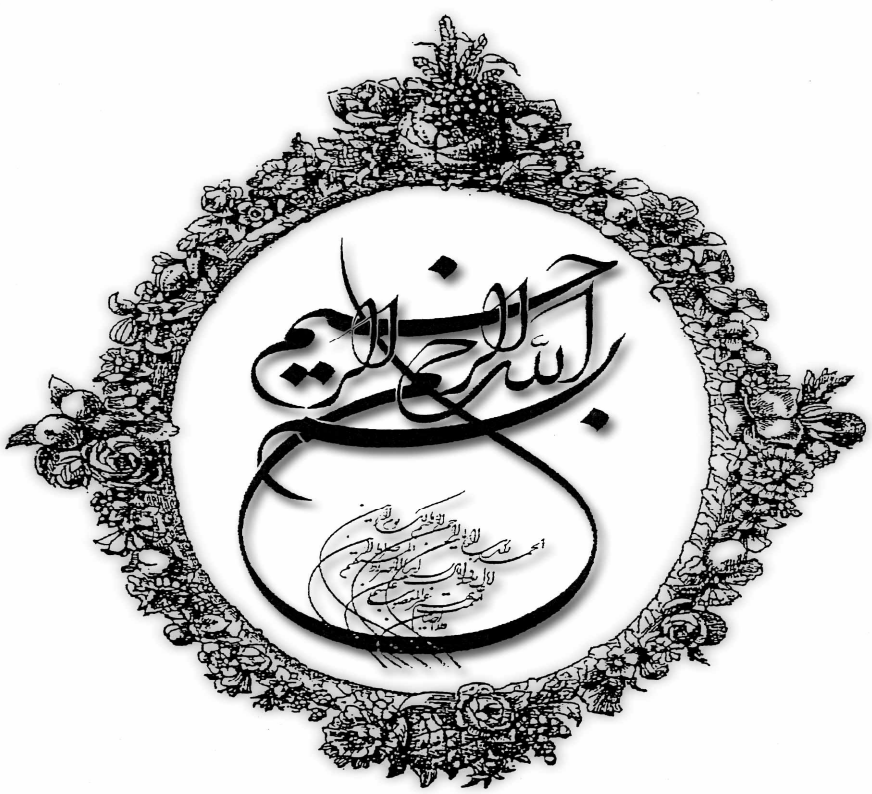
بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

تحلیل تنش‌های مگنتوترموالاستیک، جابجایی و بردار اغتشاش میدان مغناطیسی در دیسک دوار هوشمند توخالی FGM

استاد راهنما:

دکتر علی قربان‌پور آرانی

به وسیله:

مهرداد اعظمی

مهرماه ۱۳۸۹

تقدیم به:

آنان که با خشت جان مرا پروراندند

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود، در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار **جناب آقای دکتر علی قربان پور** که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از **جناب آقای دکتر عباس لقمان** به عنوان مشاور که با راهنمایی خود مرا مورد لطف قرار داده‌اند کمال تشکر را دارم.

همچنین از تشریک مساعی **آقایان دکتر علی‌اکبر عباسیان و دکتر سعید گلابی** به عنوان استاد داور داخل دانشگاه که این پایان نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند تشکر می‌نمایم.

در پایان از **جناب آقای دکتر سید حسین رسا** که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه قبول زحمت نموده‌اند سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

یک دیسک دوار توخالی ساخته شده از ماده مدرج‌شده تابعی که در میدان دما و میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد در نظر گرفته می‌شود. میدان مغناطیسی و میدان دما باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی و حرارتی در دیسک می‌شود.

در این تحقیق با استفاده از تئوری بی‌نهایت کوچک مگنتوترموالاستیسیتی، قانون هوک در شرایط تنش صفحه‌ای، رابطه کرنش-جابجایی و معادله تعادل، معادله دیفرانسیل حاکم بر جابجایی بدست آمده و سپس با حل معادله دیفرانسیل حاکم به روش عددی یا روش مستقیم جابجایی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از قانون هوک، رابطه کرنش-جابجایی و روابط ماکسول، تنش‌های شعاعی و مماسی و بردار اغتشاش میدان مغناطیسی در دیسک دوار توخالی محاسبه شده و با حالت ماده همگن و حالت بدون وجود میدان مغناطیسی مقایسه می‌شوند و اثر غیرهمگنی ماده و اثر میدان مغناطیسی بر روی تنش‌ها، جابجایی و بردار اغتشاش میدان مغناطیسی تعیین می‌شود. تمام خواص فیزیکی ماده به غیر از ضریب پواسون تابعی از شعاع می‌باشند که به سه صورت تابع توانی، تابع نمائی و تابع توانی کسر حجمی مدل‌سازی می‌شوند.

ابتدا معادله انتقال حرارت با یک روش شبه تحلیلی (روش عددی) حل می‌شود. در تابع توانی و تابع نمائی از یک روش مستقیم و در تابع توانی کسر حجمی از روش شبه تحلیلی جهت حل معادله ناویر (معادله دیفرانسیل حاکم بر جابجایی) استفاده شده است. در روش مستقیم معادلات دیفرانسیل موجود به صورت دقیق حل می‌گردد و در روش شبه تحلیلی دامنه حل دیسک به زیر دامنه‌های کوچکتر تقسیم شده و فرض می‌شود که خواص فیزیکی ماده در هر زیردامنه ثابت و برابر خواص در شعاع متوسط آن زیردامنه است که چنین فرضی معادله دیفرانسیل مرتبه دوم با ضرایب متغیر را به معادله دیفرانسیل مرتبه دوم با ضرایب ثابت تبدیل می‌کند. هر چقدر تعداد زیر دامنه‌ها افزایش یابد دقت حل نیز افزایش میابد.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که وجود میدان مغناطیسی باعث کاهش تنش‌های مماسی می‌شود و در نتیجه عمر دیسک افزایش میابد. همچنین از نتایج این تحقیق می‌توان جهت طراحی بهینه دیسک دوار توخالی ساخته شده از ماده مدرج‌شده تابعی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: تنش‌های مگنتوترموالاستیک، ماده مدرج‌شده تابعی، دیسک دوار هوشمند، میدان مغناطیسی، میدان دما.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- معرفی مواد FGM ۲

۱-۱-۱- تعریف مواد FGM و خواص آن‌ها ۲

۱-۱-۲- مدل‌بندی مواد FGM ۵

۱-۱-۳- کاربردهای مواد FGM ۷

۱-۱-۴- روش‌های ساخت مواد FGM ۹

۱-۲- کاربرد دیسک دوار FGM در صنعت ۱۱

۱-۳- مروری بر کارهای گذشته ۱۱

۱-۴- فعالیت انجام شده در این تحقیق ۱۷

۱-۵- ساختار کلی فصول بعدی ۱۸

فصل دوم: تحلیل تنش مگنتوترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر

۲-۱- مقدمه ۲۰

۲-۲- درجه‌بندی خواص و تعریف تابع ضخامت دیسک ۲۲

۲-۳- معادله انتقال حرارت ۲۴

۲-۴- رابطه تنش-جابجایی و معادله تعادل ۳۱

۲-۵- روابط ماکسول و نیروی لورنس ۳۴

۲-۶- تحلیل تنش مگنتوترموالاستیک ۳۷

۲-۶-۱- دیسک توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۴۱

۲-۶-۲- دیسک توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۴۲

فصل سوم: تحلیل تنش مگنتوترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت ثابت

۳-۱- مقدمه ۴۴

۳-۲- معادلات اساسی ۴۵
۳-۳- تحلیل تنش مگنتوترموالاستیک دیسک دوار FGM با تابع توانی ۴۷
۳-۳-۱- دیسک توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۵۴
۳-۳-۲- دیسک توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۵۵
۳-۴- تحلیل تنش مگنتوترموالاستیک دیسک دوار FGM با تابع نمائی ۵۵

فصل چهارم: نتایج حاصله بحث و نتیجه‌گیری
۴-۱- مقدمه ۶۳
۴-۲- دیسک دوار FGM با تابع توانی کسر حجمی ۶۴
۴-۲-۱- تابع ضخامت مقعر ۶۵
۴-۲-۱-۱- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۶۶
۴-۲-۱-۲- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۷۲
۴-۲-۲- بررسی اثرات ضخامت ۷۸
۴-۲-۲-۱- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۷۹
۴-۲-۲-۲- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۸۵
۴-۳- دیسک دوار FGM با تابع توانی و نمائی ۹۱
۴-۳-۱- دیسک دوار FGM با تابع توانی ۹۱
۴-۳-۱-۱- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۹۲
۴-۳-۱-۲- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۹۹
۴-۳-۲- دیسک دوار FGM با تابع نمائی ۱۰۵
۴-۳-۲-۱- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی آزاد-آزاد ۱۰۵
۴-۳-۲-۲- دیسک دوار توخالی با شرایط مرزی ثابت-آزاد ۱۱۲
۴-۴- نتیجه‌گیری ۱۱۸
۴-۵- پیشنهادات ۱۱۸
منابع و مراجع ۱۲۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- یک ماده FGM با ساختار پیوسته ۱۰
شکل ۱-۲- یک ماده FGM دو فاز ۱۰
شکل ۱-۳- یک ماده FGM با ساختار گسسته ۱۰
شکل ۲-۱- پیکربندی دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و ضخامت کم ۲۱
شکل ۲-۲- حجم کنترل دیفرانسیلی، $rzdrd\theta$ برای تجزیه و تحلیل مسئله انتقال حرارت در دیسک با ضخامت متغیر ۲۵
شکل ۲-۳- تقسیمات شعاعی دامنه حل به زیردامنه‌های کوچکتر ۲۸
شکل ۳-۱- پیکر بندی دیسک دوار FGM با ضخامت ثابت و ضخامت کم ۴۵

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار ۲-۱- تغییرات تابع ضخامت بر حسب شعاع ۲۳
نمودار ۴-۱- تغییرات تابع اختلاف دما بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر و مقادیر مختلف n..... ۶۵
نمودار ۴-۲- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر در شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۶۶
نمودار ۴-۳- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۶۷
نمودار ۴-۴- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۶۷
نمودار ۴-۵- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۶۸
نمودار ۴-۶- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۶۸
نمودار ۴-۷- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۶۹
نمودار ۴-۸- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۶۹
نمودار ۴-۹- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۰

نمودار ۴-۱۰- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۰
نمودار ۴-۱۱- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۱
نمودار ۴-۱۲- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۱
نمودار ۴-۱۳- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر در شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۷۲
نمودار ۴-۱۴- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۷۳
نمودار ۴-۱۵- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n..... ۷۳
نمودار ۴-۱۶- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۴
نمودار ۴-۱۷- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۴
نمودار ۴-۱۸- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۵
نمودار ۴-۱۹- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۵

نمودار ۴-۲۰- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۶
نمودار ۴-۲۱- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۶
نمودار ۴-۲۲- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۷
نمودار ۴-۲۳- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی، تابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف n ۷۷
نمودار ۴-۲۴- تغییرات تابع اختلاف دما بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف..... ۷۸
نمودار ۴-۲۵- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف در شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۷۹
نمودار ۴-۲۶- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۰
نمودار ۴-۲۷- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد ۸۰
نمودار ۴-۲۸- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد ۸۱
نمودار ۴-۲۹- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مقعر برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۱
نمودار ۴-۳۰- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۲

نمودار ۴-۳۱- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۲
نمودار ۴-۳۲- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۳
نمودار ۴-۳۳- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۳
نمودار ۴-۳۴- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۴
نمودار ۴-۳۵- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد..... ۸۴
نمودار ۴-۳۶- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف در شرایط مرزی ثابت-آزاد..... ۸۵
نمودار ۴-۳۷- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد..... ۸۶
نمودار ۴-۳۸- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد..... ۸۶
نمودار ۴-۳۹- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد..... ۸۷
نمودار ۴-۴۰- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد..... ۸۷

نمودار ۴-۴۱- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۸۸
نمودار ۴-۴۲- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۸۸
نمودار ۴-۴۳- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۸۹
نمودار ۴-۴۴- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۸۹
نمودار ۴-۴۵- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۹۰
نمودار ۴-۴۶- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی کسر حجمی و توابع ضخامت مختلف برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد.....۹۰
نمودار ۴-۴۷- تغییرات تابع اختلاف دما بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی و مقادیر مختلف β.....۹۲
نمودار ۴-۴۸- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی در شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β..... ۹۳
نمودار ۴-۴۹- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β.....۹۴
نمودار ۴-۵۰- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۴
نمودار ۴-۵۱- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۵
نمودار ۴-۵۲- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۵
نمودار ۴-۵۳- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۶

نمودار ۴-۵۴- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۶
نمودار ۴-۵۵- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۷
نمودار ۴-۵۶- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۷
نمودار ۴-۵۷- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ...۹۸
نمودار ۴-۵۸- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلف β ۹۸
نمودار ۴-۵۹- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی در شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β..... ۹۹
نمودار ۴-۶۰- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β.....۱۰۰
نمودار ۴-۶۱- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-ثابت و مقادیر مختلف β ۱۰۰
نمودار ۴-۶۲- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۱
نمودار ۴-۶۳- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۱
نمودار ۴-۶۴- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۲
نمودار ۴-۶۵- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۲
نمودار ۴-۶۶- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۳
نمودار ۴-۶۷- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۳
نمودار ۴-۶۸- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۴
نمودار ۴-۶۹- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع توانی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلف β ۱۰۴

نمودار ۴-۷۰- تغییرات تابع اختلاف دما بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی و مقادیر مختلفk.....۱۰۵
نمودار ۴-۷۱- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی در شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk..... ۱۰۶
نمودار ۴-۷۲- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk.....۱۰۷
نمودار ۴-۷۳- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۰۷
نمودار ۴-۷۴- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۰۸
نمودار ۴-۷۵- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۰۸
نمودار ۴-۷۶- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۰۹
نمودار ۴-۷۷- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۰۹
نمودار ۴-۷۸- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۰
نمودار ۴-۷۹- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۰
نمودار ۴-۸۰- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk..۱۱۱
نمودار ۴-۸۱- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۱
نمودار ۴-۸۲- تغییرات تابع بردار اغتشاش میدان مغناطیسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی در شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk..... ۱۱۲
نمودار ۴-۸۳- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk.....۱۱۳
نمودار ۴-۸۴- تغییرات تابع جابجایی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی آزاد-ثابت و مقادیر مختلفk ۱۱۳
نمودار ۴-۸۵- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۴

نمودار ۴-۸۶- تغییرات تابع تنش شعاعی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۴
نمودار ۴-۸۷- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۵
نمودار ۴-۸۸- تغییرات تابع تنش مماسی بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۵
نمودار ۴-۸۹- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۶
نمودار ۴-۹۰- تغییرات تابع تنش موثر بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۶
نمودار ۴-۹۱- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت مگنتوترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk.۱۱۷
نمودار ۴-۹۲- تغییرات تابع تنش وان‌میسز بر حسب شعاع برای دیسک FGM با تابع نمائی برای حالت ترموالاستیک، شرایط مرزی ثابت-آزاد و مقادیر مختلفk ۱۱۷

فصل اول:

مقدمه

۱–۱– معرفی مواد FGM[۱]

۱–۱–۱– تعریف مواد FGM و خواص آن‌ها

از ما قبل تاریخ تاکنون مواد نقش قاطع و موثری در توسعه جامعه و فرهنگ ما داشته‌اند. در قرن بیستم با استخراج عناصر پایه از جداول تناوبی، راه را برای پلیمرهای پیشرفته، آلیاژهای مهندسی و سرامیک‌ها هموار ساخت.

در سال‌های اخیر با توسعه موتورهای پرقدرت صنایع هوافضا، توربین‌ها، راکتورها و دیگر ماشین‌ها تحت تنش‌های مکانیکی و حرارتی، نیاز به موادی با مقاومت حرارتی بالا و مقاومتر از لحاظ مکانیکی احساس شده است.

اگر از فلز خالص در محیط‌های با درجه حرارت بالا (تنش‌های حرارتی زیاد) استفاده شود، ممکن است پدیده خزش[۲] و تغییر شکل‌های بزرگ در قطعات مختلف دستگاه به وجود آید که این امر می‌تواند موجب آسیب به دستگاه و اختلال در عملکرد دستگاه گردد.

در سال‌های گذشته در صنایع هوافضا از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش و روکش دادن قطعات برای کارکرد در درجه حرارت‌های بالا استفاده می‌شد. زیرا ضریب هدایت حرارتی مواد سرامیکی پایین است و با کاهش ضریب هدایت حرارتی مقاومت حرارتی ماده افزایش میابد.

این مواد با مقامت حرارتی بالا، عایق‌های حرارتی بسیار خوبی بودند ولی مقاومت زیادی

---

[۱]-Functionally Graded Material
[۲]-Creep

در برابر تنش‌های پس‌ماند نداشتند. تنش‌های پس‌ماند در این مواد موجب مشکلات زیادی از جمله ایجاد حفره و ترک می‌شد.

خواص مواد مرکب پیشرفته، همچون استحکام و سفتی بالا باعث شده که از آن‌ها در زمینه‌های گوناگون استفاده شود.

در سازه‌های متداول مواد مرکب لایه‌ای، لایه‌های همگن و الاستیک به هم پیوسته شده‌اند تا شرایط ایده‌آل مقاومتری در محیط‌های با درجه حرارت بالا و تنش‌های مکانیکی را ایجاد نمایند. با این وجود تغییر ناگهانی خواص مواد مرکب لایه‌ای، در صفحه‌های مشترک لایه‌ها می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های بزرگ در لایه‌های داخلی شده و در نتیجه موجب ایجاد عیب و نقص در ماده مرکب گردد.

برای مثال اگر یک ماده به عنوان پوشش، روی یک ماده با پایه متفاوت استفاده شود تنش‌های فوق ایجاد می‌شوند که می‌توانند باعث تغییر شکل پلاستیکی، ایجاد ترک و یا حتی جدایش لایه‌ها شوند. در نتیجه عمر قطعه کاهش میابد.

به طور مشابه اگر دو ماده متفاوت که بطور معمولی به هم چسبیده‌اند در معرض ضربه ناگهانی قرار گیرند یک موج تنش در طول ماده گسترش خواهد یافت. هنگامی‌که این موج تنش از فصل مشترک دو ماده عبور کند، یک نیروی کششی به وجود خواهد آمد که می‌تواند باعث جدایش دو ماده در فصل مشترک این گونه مواد شود. بنابراین تنش‌های حرارتی در این مواد موجب پدیده لایه لایه شدن در فصل مشترک این گونه مواد می‌گردد.

با توجه به این مشکلات طرح ماده‌ای مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا و قابلیت کارکرد در محیط‌های با درجه حرارت بالا را داشته و هم مشکل لایه لایه شدن نداشته باشد ضرورت پیدا کرد.

یک روش برای رفع نقص مذکور، استفاده از تغییر تدریجی ساختار ماده و به تبع آن تغییر پیوسته خواص ماده می‌باشد. بنابر مشکلاتی که در صنایع مختلف برای مواد تحت تنش-های حرارتی بالا وجود داشت، دانشمندان علم مواد در سال ۱۹۸۴ در منطقه سندایی[1] ژاپن

[1]-Sendai