



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه جامدات

حل تحلیلی و عددی دیسک چرخان *FGM* با ضخامت متغیر تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی

دانشجو: سید مهدی جباری

استاد راهنما:

دکتر مهدی قنّاد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار: بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تشکر و قدردانی:

بر خود واجب می دانم از زحمات پدر و مادر مهربانم که همواره در تحصیل علم، دانش و اخلاق مشوق اینجانب بوده اند قدردانی نمایم.

لازم است که از زحمات اساتید محترم دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که از محضر درس آن بزرگواران استفاده نموده‌ام، قدردانی نمایم. همچنین از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر مهدی قناد که زحمت هدایت پایان‌نامه‌ی اینجانب بر دوش ایشان بوده است، بسیار سپاسگزارم. از خداوند متعال توفیق روزافزون این عزیزان را خواستارم.

سید مهدی جباری

تعهد نامه

اینجانب سید مهدی جباری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه حل تحلیلی و عددی دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی تحت راهنمایی دکتر مهدی قنّاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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: ۱۳۹۰/۱۲/۱۵

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

دیسک دوار به علت کاربردهای فراوانی که در صنعت دارد، از دیرباز موضوع تحقیقات و مطالعات متعددی بوده است. از میان کاربردهای دیسک دوار می توان به دیسک های توربین گاز، فلایویل ها، چرخ دنده ها و دیسک های ترمز و ... اشاره کرد. از این رو ارائه ی فرمول های تحلیلی در کنار نرم افزارهای کاربردی می تواند کمک شایانی در طراحی های بهینه دیسک ها در صنایع مختلف داشته باشد.

در این پژوهش با استفاده از تئوری الاستیسیته ی مستوی و بر مبنای شرایط تنش صفحه ای، معادله ی ترموالاستیک حاکم بر حسب جابجایی برای دیسک با ضخامت متغیر ناهمگن چرخان، با خواص وابسته به دما و شعاع دیسک، ارائه شده است. در مدل سازی مواد FG و پروفیل تغییرات ضخامت دو تابع نمایی و توانی بکار گرفته شده و معادله ی حاکم حل شده است. در مواردی که توابع نمایی برای تابع توزیع خواص یا پروفیل انتخاب می شود، معادله ی انتقال حرارت حاکم بر دیسک دارای حل دقیق نمی باشد برای این منظور در این موارد از روشهای تحلیلی و نیمه تحلیلی استفاده شده است و نتایج برای اعتبار سنجی با حل عددی مقایسه شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده تاثیر هریک از بارگذاریهای مکانیکی و حرارتی در دیسک ها با توجه به خواص آن بررسی می شود.

نتایج بدست آمده نشان دهنده ی این مطلب است که افزایش ضخامت در شعاع داخلی دیسک و استفاده از مواد FG بطوریکه مقدار خواص در راستای شعاع افزایش یابد، سبب کاهش تنش بیشینه ناشی از بارگذاری حرارتی و دورانی می شود، ولی افزایش تنش بیشینه ناشی از فشار داخلی را بهمراه دارد. همچنین مقدار تنش بیشینه محاسبه شده در توابع توانی به کار گرفته شده در توزیع خواص و پروفیل در بارگذاری حرارتی و دورانی کمتر از توانی نمایی بوده ولی در مورد فشار داخلی بیشتر از توانی نمایی می باشد.

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۲
۱- ۱ کلیات	۲
۱- ۲ معرفی مواد <i>FG</i>	۳
۱- ۳ تاریخچه ی پژوهش در زمینه ی دیسک های چرخان	۱۱
۱- ۴ اهداف و تعریف مسئله	۱۳
۲- تحلیل ترموالاستیک دیسک چرخان با ضخامت ثابت	۱۹
۱- ۲ مقدمه	۱۹
۲- ۲ معادله ی عمومی حاکم بر دیسک چرخان	۱۹
۲- ۳ حل ترموالاستیک دیسک همگن با ضخامت ثابت	۲۷
۲- ۴ بررسی نتایج حل دیسک همگن با ضخامت ثابت	۳۲
۲- ۵ حل ترموالاستیک دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت	۳۷
۲- ۶ بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت	۴۵
۲- ۷ جمع بندی	۵۳
۳- تحلیل ترموالاستیک دیسک همگن چرخان با ضخامت متغیر	۵۹
۱- ۳ مقدمه	۵۹
۲- ۳ حل تحلیلی دیسک همگن با پروفیل توانی	۶۵
۳- ۳ بررسی نتایج حل دیسک همگن با تابع ضخامت توانی	۷۳
۳- ۴ حل تحلیلی دیسک همگن با تابع ضخامت نمایی	۸۰

۳- ۵	بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن با تابع ضخامت نمایی	۸۶
۳- ۶	جمع بندی	۹۶
۴ -	تحلیل ترموالاستیک دیسک ناهمگن چرخان با ضخامت متغیر	۱۰۱
۴- ۱	مقدمه	۱۰۱
۴- ۲	حل دیسک با ضخامت متغیر توانی FG با توزیع توانی	۱۰۲
۴- ۳	بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن توانی با تابع ضخامت توانی	۱۱۰
۴- ۴	حل دیسک FG با ضخامت متغیر با تابع نمایی و توزیع خواص نمایی	۱۱۶
۴- ۵	بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن با توزیع خواص نمایی با تابع ضخامت نمایی	۱۲۱
۴- ۶	حل دیسک ناهمگن با توزیع خواص نمایی و تابع ضخامت توانی	۱۲۵
۴- ۷	بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن با توزیع خواص نمایی با تابع ضخامت توانی	۱۲۸
۴- ۸	حل دیسک ناهمگن با توزیع خواص توانی با تابع ضخامت نمایی	۱۳۲
۴- ۹	بررسی نتایج حل دیسک ناهمگن با توزیع خواص توانی با تابع ضخامت نمایی	۱۳۴
۴- ۱۰	جمع بندی	۱۳۸
۵ -	نتیجه گیری	۱۴۳
۵- ۱	خلاصه مطالب ارائه شده در این پژوهش	۱۴۳
۵- ۲	نتیجه گیری	۱۴۴
۵- ۳	زمینه های ادامه پژوهش	۱۴۷
۶ -	پیوست	۱۵۰
۶- ۱	پیوست A: حل دقیق دیسک ناهمگن با ضخامت متغیر با استفاده از معادلات بلترامی - میشل	۱۵۰

- ۶-۲ پیوست *B*: حل دیسک با ضخامت متغیر با استفاده توابع فوق هندسی ۱۵۷
- ۶-۳ پیوست *C*: معادله ی حاکم بر دیسک با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی ۱۵۹
- ۷- مراجع ۱۶۵

فهرست اشکال و نمودار ها

- شکل ۱-۱: ساختار FG در صدف ۴
- شکل ۲-۱: نواحی قابل تعریف در مواد FG ۷
- شکل ۳-۱: نحوه ی تغییرات خواص در تابع توزیع توانی ۹
- شکل ۴-۱: نحوه ی تغییرات خواص در تابع توزیع نمایی ۱۰
- شکل ۵-۱: مختصات وگره های تعریف شده برای المان حرارتی $Plane 77$ ۱۵
- شکل ۶-۱: نحوه ی شبکه بندی دیسک همگن فولادی ۱۷
- شکل ۱-۲: بارگذاری در دیسک با ضخامت ثابت ۳۰
- شکل ۲-۲: مقایسه ی توزیع جابجایی شعاعی حل تحلیلی با حل عددی (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۳
- شکل ۳-۲: مقایسه ی توزیع تنش شعاعی حل تحلیلی با حل عددی (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۳
- شکل ۴-۲: مقایسه ی توزیع تنش محیطی حل تحلیلی با حل عددی (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۴
- شکل ۵-۲: نحوه ی توزیع جابجایی شعاعی در بارگذاریهای مختلف (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۴
- شکل ۶-۲: نحوه ی توزیع تنش شعاعی در بارگذاریهای مختلف (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۵
- شکل ۷-۲: نحوه ی توزیع تنش محیطی در بارگذاریهای مختلف (دیسک همگن با ضخامت ثابت) ۳۶
- شکل ۸-۲: مقایسه ی نتایج جابجایی شعاعی حل تحلیلی با حل عددی ($n=0.75$) ۴۵
- شکل ۹-۲: مقایسه ی توزیع تنش شعاعی در حل تحلیلی با حل عددی ($n=0.75$) ۴۶
- شکل ۱۰-۲: مقایسه ی توزیع تنش محیطی در حل تحلیلی با حل عددی ($n=0.75$) ۴۶
- شکل ۱۱-۲: نحوه ی توزیع جابجایی شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($n=0.5$) ۴۷
- شکل ۱۲-۲: نحوه ی توزیع تنش شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($n=0.5$) ۴۸
- شکل ۱۳-۲: نحوه ی توزیع تنش محیطی در بارگذاریهای مختلف ($n=0.5$) ۴۹

- شکل ۲-۱۴ : توزیع دما در دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت ۵۰
- شکل ۲-۱۵ : توزیع جابجایی شعاعی در دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت ۵۱
- شکل ۲-۱۶ : توزیع تنش شعاعی در دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت ۵۱
- شکل ۲-۱۷ : توزیع تنش محیطی در دیسک ناهمگن با ضخامت ثابت ۵۲
- شکل ۳-۱ : دیسک توربین گاز واحدهای نیروگاه گازی V94 ساخت شرکت آنسالدور ۵۹
- شکل ۳-۲ : چرخ کورتیس در توربین بخار ۶۰
- شکل ۳-۳ : نمایش پروفیل ضخامت توانی به ازای نسبت ضخامت های مختلف ۶۱
- شکل ۳-۴ : نمایش پروفیل ضخامت نمایی به ازای نسبت ضخامت های مختلف ۶۳
- شکل ۳-۵ : تاثیر پارامتر q در پروفیل ضخامت سهموی ($m=2$) ۶۴
- شکل ۳-۶ : تاثیر پارامتر q در پروفیل ضخامت سهموی ($m=2$) ۶۴
- شکل ۳-۷ : تاثیر پارامتر m در پروفیل ضخامت سهموی ($q=0.5$) ۶۵
- شکل ۳-۸ : بارگذاری در دیسک با ضخامت متغیر ۷۱
- شکل ۳-۹ : توزیع جابجایی شعاعی در دیسک همگن با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$) ۷۴
- شکل ۳-۱۰ : توزیع تنش شعاعی در دیسک همگن با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$) ۷۵
- شکل ۳-۱۱ : توزیع تنش محیطی در دیسک همگن با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$) ۷۵
- شکل ۳-۱۲ : نحوه ی توزیع جابجایی شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۷۶
- شکل ۳-۱۳ : نحوه ی توزیع تنش شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۷۷
- شکل ۳-۱۴ : نحوه ی توزیع تنش محیطی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۷۸
- شکل ۳-۱۵ : تاثیر نسبت ضخامت بر توزیع جابجایی شعاعی دیسک همگن ۷۹
- شکل ۳-۱۶ : تاثیر نسبت ضخامت بر توزیع تنش شعاعی دیسک همگن ۷۹
- شکل ۳-۱۷ : تاثیر نسبت ضخامت بر توزیع تنش محیطی دیسک همگن ۸۰

- شکل ۳-۱۸ : نمودار توابع انتگرال نمایی (مرجع [۳۰]) ۸۲
- شکل ۳-۱۹: نحوه ی تبدیل دیسک به حلقه های با ضخامت ثابت ۸۳
- شکل ۳-۲۰: بررسی استقلال از حلقه ها برای دیسک همگن با تابع ضخامت نمایی ($h_i/h_o=2$) ۸۷
- شکل ۳-۲۱: توزیع جابجایی شعاعی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ($h_i/h_o=2$) ۸۷
- شکل ۳-۲۲: توزیع تنش شعاعی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ($h_i/h_o=2$) ۸۸
- شکل ۳-۲۳: توزیع تنش محیطی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ($h_i/h_o=2$) ۸۸
- شکل ۳-۲۴: نحوه ی توزیع جابجایی شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۸۹
- شکل ۳-۲۵: نحوه ی توزیع تنش شعاعی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۹۰
- شکل ۳-۲۶: نحوه ی توزیع تنش محیطی در بارگذاریهای مختلف ($h_i/h_o=2$) ۹۰
- شکل ۳-۲۷: نحوه ی توزیع جابجایی شعاعی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ۹۱
- شکل ۳-۲۸: نحوه ی توزیع تنش شعاعی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ۹۲
- شکل ۳-۲۹: نحوه ی توزیع تنش محیطی در دیسک همگن با پروفیل نمایی ۹۲
- شکل ۳-۳۰: مقایسه ی پروفیل های ضخامت نمایی و توانی ۹۳
- شکل ۳-۳۱: مقایسه توزیع جابجایی شعاعی در پروفیل ضخامت نمایی و توانی ۹۴
- شکل ۳-۳۲: مقایسه مقادیر تنش شعاعی در پروفیل ضخامت نمایی و توانی ۹۴
- شکل ۳-۳۳: مقایسه مقادیر تنش محیطی در پروفیل ضخامت نمایی و توانی ۹۵
- شکل ۴-۱: توزیع جابجایی شعاعی در روش تحلیلی و روش عددی دیسک FG توانی با پروفیل توانی ۱۱۱
- شکل ۴-۲: توزیع تنش شعاعی در روش تحلیلی و روش عددی دیسک FG توانی با پروفیل توانی ۱۱۱
- شکل ۴-۳: توزیع تنش محیطی در روش تحلیلی و روش عددی دیسک FG توانی با پروفیل توانی ۱۱۲
- شکل ۴-۴: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در جابجایی شعاعی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$) ۱۱۳
- شکل ۴-۵: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در تنش شعاعی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$) ۱۱۳

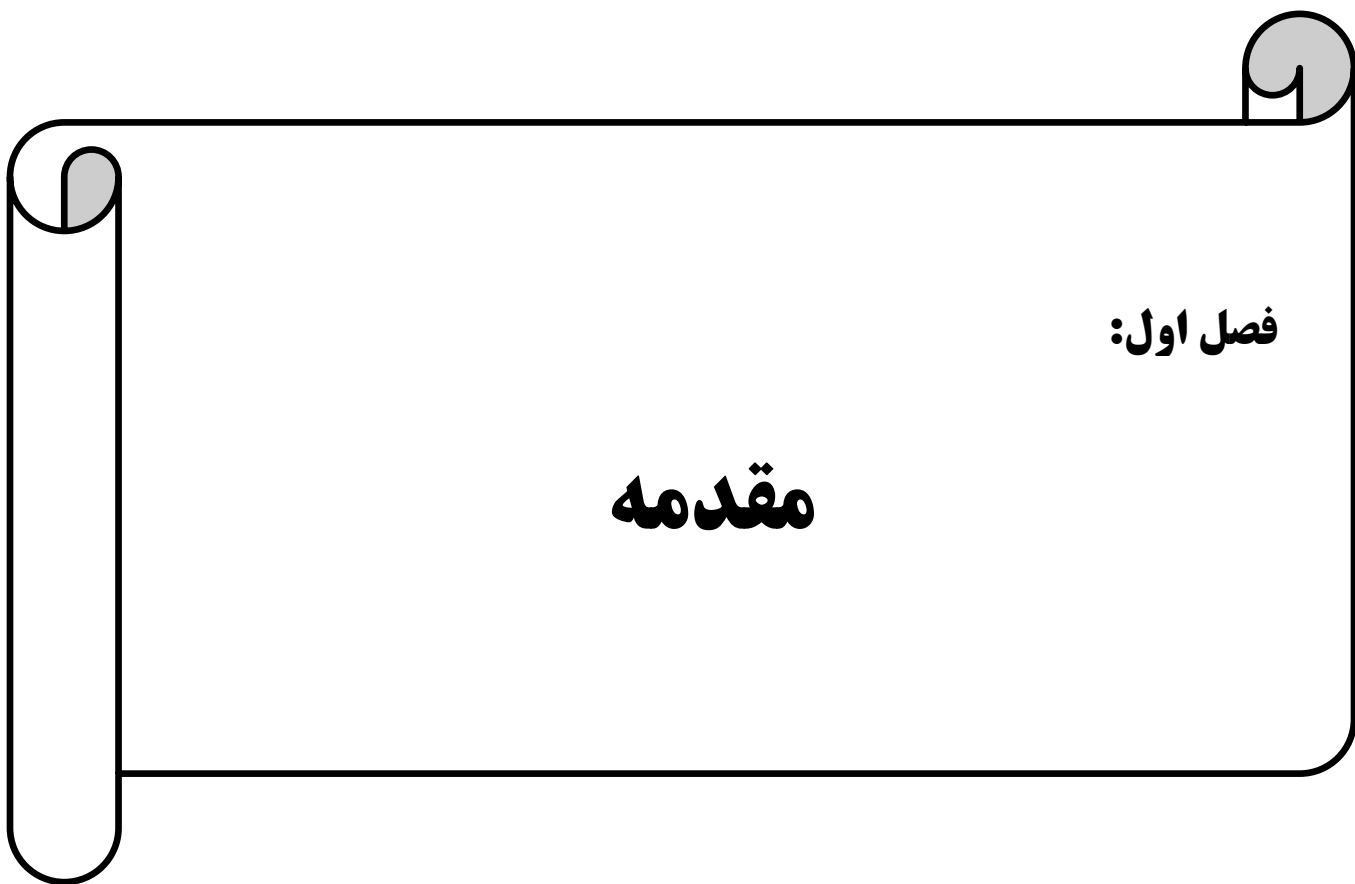
- شکل ۴-۶: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در تنش محیطی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۱۴
- شکل ۴-۷: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در جابجایی شعاعی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=0.2$)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۸: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در تنش شعاعی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=0.2$)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۹: نمایش تاثیر ثابت ناهمگنی در تنش محیطی دیسک با پروفیل توانی ($h_i/h_o=0.2$)..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۰: مقایسه ی نتایج جابجایی شعاعی با حل عددی ($n=0.3, h_i/h_o=2$)..... ۱۲۲
- شکل ۴-۱۱: مقایسه ی نتایج تنش شعاعی با حل عددی ($n=0.3, h_i/h_o=2$)..... ۱۲۲
- شکل ۴-۱۲: مقایسه ی نتایج تنش محیطی با حل عددی ($n=0.3, h_i/h_o=2$)..... ۱۲۳
- شکل ۴-۱۳: توزیع جابجایی شعاعی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۲۳
- شکل ۴-۱۴: توزیع تنش شعاعی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۲۴
- شکل ۴-۱۵: توزیع تنش محیطی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۲۴
- شکل ۴-۱۶: بررسی استقلال از تعداد حلقهها در دیسک ناهمگن..... ۱۲۹
- شکل ۴-۱۷: مقایسه ی توزیع جابجایی شعاعی در دیسک FG توانی با پروفیل نمایی با روش عددی..... ۱۲۹
- شکل ۴-۱۸: مقایسه ی توزیع تنش شعاعی در دیسک FG توانی با پروفیل نمایی با روش عددی..... ۱۳۰
- شکل ۴-۱۹: مقایسه ی توزیع تنش محیطی در دیسک FG توانی با پروفیل نمایی با روش عددی..... ۱۳۰
- شکل ۴-۲۰: توزیع جابجایی شعاعی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص توانی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۳۱
- شکل ۴-۲۱: توزیع تنش شعاعی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص توانی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۳۱
- شکل ۴-۲۲: توزیع تنش محیطی در دیسک با پروفیل نمایی و تابع توزیع خواص توانی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۳۲
- شکل ۴-۲۳: مقایسه ی توزیع جابجایی شعاعی در دیسک FG نمایی با پروفیل توانی با روش عددی..... ۱۳۵
- شکل ۴-۲۴: مقایسه ی توزیع تنش شعاعی در دیسک FG نمایی با پروفیل توانی با روش عددی..... ۱۳۵
- شکل ۴-۲۵: مقایسه ی توزیع تنش محیطی در دیسک FG نمایی با پروفیل توانی با روش عددی..... ۱۳۶
- شکل ۴-۲۶: توزیع جابجایی شعاعی در دیسک با پروفیل توانی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$)..... ۱۳۶

شکل ۴-۲۷: توزیع تنش شعاعی در دیسک با پروفیل توانی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$) ۱۳۷

شکل ۴-۲۸: توزیع تنش محیطی در دیسک با پروفیل توانی و تابع توزیع خواص نمایی ($h_i/h_o=2$) ۱۳۷

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: خواص فیزیکی و مکانیکی دیسک همگن فولادی ۱۳
- جدول ۲-۱: خواص هندسی دیسک های مدل سازی شده ۱۳
- جدول ۳-۱: بارگذاری اعمالی در تمامی دیسک ها ۱۴
- جدول ۴-۱: بررسی تغییرات تعداد المانها با نتایج حاصل از حل عددی ۱۶
- جدول ۱-۲: حل پارامتریک دیسک ها با ضخامت ثابت ۵۴
- جدول ۲-۲: نتایج حاصل از تحلیل در دیسک با ضخامت ثابت ۵۵
- جدول ۱-۳: حل پارامتریک دیسک همگن با پروفیل توانی ۹۶
- جدول ۲-۳: نتایج حل دیسک همگن با پروفیل توانی به تفکیک بارگذاری ۹۷
- جدول ۳-۳: نتایج حل دیسک همگن با پروفیل نمایی به تفکیک بارگذاری ۹۸
- جدول ۱-۴: حل پارامتریک دیسک ناهمگن توانی با پروفیل توانی ۱۳۸
- جدول ۲-۴: تنش معادل در دیسکهای FG به تفکیک ماده، پروفیل و بارگذاری ۱۴۰
- جدول ۱-۵: روشهای به کار گرفته شده برای هر نوع از دیسک ها در این پژوهش ۱۴۳
- جدول ۲-۵: تنش معادل در لایه داخلی به تفکیک بارگذاری ۱۴۶
- جدول ۱-۶: ضرایب معادله ی دیفرانسیل حاکم به ازای پروفیل و توزیع خواص متفاوت ۱۵۷



مقدمه

فصل اول:

۱-۱ کلیات

دیسک دوار به علت کاربردهای فراوانی که در صنعت دارد، از دیرباز موضوع تحقیقات و مطالعات متعددی بوده است. از میان کاربردهای دیسک دوار می توان به دیسک های توربین گاز اشاره کرد. دیسک توربین گاز اغلب در گرادیان های دمایی بالا و سرعت های زاویه ای زیادی کار می کند. سرعت زاویه ای بالا باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز بزرگی در دیسک شده و همزمان با آن، دمای بسیار زیاد، منجر به کاهش مقاومت ماده سازنده دیسک می شود که این به نوبه خود، تغییر شکل زیادی را در دیسک دوار ایجاد می کند. که وجود قید در تجهیزات فوق موجب تولید تنش در آن ها شده که این تنش در نهایت موجب ایجاد ترک و شکست در آن ها می شود. از این رو مطالعه در زمینه ی دیسک های دوار به منظور کاهش تنش ها ضروری خواهد بود.

یکی از راه های کاهش تنش های حرارتی انتخاب مواد مناسب در دیسک ها می باشد. با توجه به کاهش مقاومت مکانیکی مواد فلزی در دماهای بالا، مواد انتخاب شده در دیسک ها می بایست علاوه بر حفظ خواص مکانیکی قابلیت تحمل تنش های مکانیک را داشته باشد که چنین خاصیتی در یک ماده ی همگن وجود ندارد لذا برای حل این مشکل می بایست سراغ مواد ناهمگن و کامپوزیتی رفت. با توجه به ظهور نسل جدیدی از مواد کامپوزیتی موسوم به مواد *FG* که برای کاهش تنش های حرارتی طراحی و ساخته شده، در این پژوهش از این مواد برای کاهش تنش ها استفاده می شود.

در قسمت اول این فصل به معرفی و بیان تاریخچه ای از این مواد پرداخته شده و نحوه ی مدل سازی آن با استفاده از روابط ریاضی بیان می شود.

در قسمت دوم تاریخچه ی مختصری از کارهای تحقیقاتی انجام شده بر روی دیسک ها بیان می شود و خط مشی این پژوهش مشخص می شود. همچنین برای یکنواختی در تحلیل های انجام شده، خواص ثابتی برای دیسک ها

تعیین می شود. در پایان نیز از نرم افزار اجزای محدودی که برای کنترل حل های انجام شده و اعتبارسنجی به نتایج از آن استفاده می شود معرفی و نحوه ی مدل سازی در آن بیان می شود.

۱ - ۲ معرفی مواد *FG*

پیشرفت تجهیزات مکانیکی نیازمند تولید موادی با قابلیت تحمل تنش های حرارتی و مکانیکی در شرایط خاص است. اخیراً استفاده از مواد با ساختار ناهمگن در شاخه های مختلف مهندسی گسترش یافته است. این مواد یا به طور مستقیم از طبیعت (مانند یاقوت) بدست می آیند یا به صورت مصنوعی (مانند کامپوزیت های تقویت شده با فیبر) ساخته می شوند. یکی از مشکلات موجود در مواد ناهمگن مرکب تحت بارهای حرارتی و مکانیکی، ایجاد تنش پسماند در مرز مشترک مواد سازنده است که بدلیل رفتار متفاوت لایه های سازنده تحت شرایط فوق اتفاق می افتد. این تنش های پسماند در موارد متعدد سبب ایجاد ترک و در پاره ای از اوقات سبب لایه لایه شدن مواد می شود. از این رو نسل جدید مواد مرکب موسوم به *FGM* معرفی شدند.

FGM ها نسل جدیدی از مواد مرکب هستند که در آن ها خواص میکروسکوپییک ماده با توزیع غیریکنواخت، هموار و پیوسته ای از ترکیب مواد سازنده اصلی آن تغییر می کند. این تغییرات ممکن است در یک بعد و یا در چند بعد باشد. به عنوان مثال در ورق های حائل حرارتی که ترکیبی از سرامیک و فلز هستند، دو سطح سرامیکی و فلزی خالص وجود دارد که بین این دو سطح ترکیبی دلخواه از این دو ماده ساختار مورد نظر را تولید می نماید. در این صورت خصوصیات حرارتی و مکانیکی ماده به صورت پیوسته تغییر می کند. فاز سرامیکی مقاومت ماده در برابر حرارت را افزایش می دهد و فاز فلزی وظیفه ی انتقال حرارت را دارد [۱].

مهم ترین حسن استفاده از این مواد آن است که همه ی خواص مورد نیاز (مانند انعطاف پذیری و مقاومت در برابر حرارت) بدون اینکه یکی از آن ها سبب تضعیف دیگری شود در آن ها وجود دارد. فلزات شکل پذیری، استحکام

زیاد و قابلیت ماشین کاری دارند و از طرف دیگر سرامیک ها دارای خواصی مانند مقاومت زیاد در برابر حرارت و خوردگی هستند. بنابراین کاربرد مرسوم این مواد ترکیب فلز و سرامیک است.

کاربرد گسترده‌ی این مواد مرهون تغییرات تدریجی خصوصیات آن است، چرا که در مقایسه با مواد کامپوزیتی لایه‌لایه، مشکل عدم تطابق خصوصیات مکانیکی در محل اتصال لایه ها وجود ندارد. این عدم تطابق در مواد لایه-ای، باعث افزایش تمایل به جدا شدن لایه ها در اثر بارگذاری های شدید حرارتی خواهد شد. ضمناً احتمال ایجاد ترک ها در محل اتصال لایه ها و گسترش آنها در مقاطع ضعیف تر ماده وجود دارد. علاوه بر این، به علت متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی لایه‌ها، وجود تنش های پسماند اجتناب ناپذیر خواهد بود. تغییرات تدریجی خواص باعث کاهش تنش های حرارتی، تنش های پسماند و ضرایب تمرکز تنش می شود. از این رو این مواد می توانند در شرایط سخت مقاومت بیشتری نسبت به کامپوزیت های هم رده‌ی خود داشته باشد. کاربردهای *FGM* در علوم پیشرفته، صنایع نظامی، تجهیزات فضایی، مهندسی پزشکی، تجهیزات هسته ای، الکترونیک و غیره به صورت قابل توجهی در حال پیشرفت است، به گونه ای که به یکی از ده تکنولوژی برتر کشور ژاپن تبدیل شده است.



شکل ۱-۱: ساختار *FG* در صدف

مفهوم *FGM* در محیط زیست، گیاهان و موجودات از سالیان بسیار دور وجود داشته است که مورد توجه محققین و دانشمندان قرار نگرفته است. صدف، خیزران و نارگیل مثال های خوبی از مواد *FG* هستند. خیزران و صدف هر دو، در نزدیکی سطح خارجی سفت و در داخل نرم هستند. (شکل ۱-۱) بعلاوه خیزران دارای صفات

ممتاز دیگر مانند وزن کم، الاستیسیته و سفتی مناسب است، که ناشی از تغییر مرحله‌ای منحنی حفره‌های موجود در ساختمان آن است.

محل اتصال نارگیل به شاخه ی درخت نیز دارای ساختار مدرج است، وقتی نارگیل توسط باد تکان می خورد، یک سوم محل اتصال آن به شاخه به نرمی تکان می خورد و بقیه‌ی آن در مقابل باد مقاومت می کند، که این مقاومت جز با ساختار *FG* میسر نیست. این موضوع ساده نقش مهمی در محیط زیست اطراف درخت نارگیل دارد و مانع آسیب رسانی به موجودات می شود.

همچنین مثال های متعدد دیگر (مانند بعضی از مفاصل بدن انسان، گیاهان موجود بر روی سطوح لغزنده و غیره) که نشانگر مفهوم *FGM* در محیط زیست هستند، وجود دارد که قابل بحث و بررسی هستند. اما مفهوم *FGM* در دهه‌ی ۷۰ قرن نوزدهم در بعضی از مقالات به صورت تئوری دیده می شود ولی به عنوان نسل جدیدی از مواد معرفی نشده است. فعالیت متمرکز و تخصصی بر روی *FGM* از سال ۱۹۸۴ شروع شد. حوالی سال ۱۹۸۴-۱۹۸۵ دو محقق (هوا فضا و مواد پیشرفته) در مورد رویایشان برای ساخت بدنه‌ی سفینه‌ی فضایی در یک ساختمان قدیمی دانشگاهی صحبت می کردند. سطح خارجی بدنه این سفینه که در شرایط دمایی بسیار بالا (حدود ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار دارد نیازمند موادی با مقاومت حرارتی بالا است. از طرفی بین سطوح داخلی و خارجی بدنه اختلاف دمایی زیاد (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) وجود دارد که نیازمند ماده ای با تحمل مکانیکی و هدایت حرارتی زیاد است، از آنجایی که ماده‌ای که توانایی تحمل این شرایط را داشته باشد، وجود نداشت آنها به فکر راه حلی برای این مشکل افتادند و توانستند مفهوم *FGM* را برای ساخت بدنه‌ی این سفینه معرفی کنند. در طرح آن‌ها برای سطح خارجی از سرامیک های مقاوم با قابلیت تحمل دمای بالا و برای سطح داخلی از موادی با قابلیت هدایت حرارتی بالا استفاده شده بود، که درصد ترکیبات بین دو سطح سرامیکی و فلزی به صورت تدریجی تغییر می کرد.

با این تحقیق، پژوهش در زمینه‌ی *FGM* شروع شد. در سال ۱۹۸۷ تحقیق *FGM* برای پروژه‌ی عظیم وزارت علوم شروع شد. در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۱ پروژه‌ای با نام "تحقیق و پژوهش برای توسعه و تعمیم مفهوم *FGM* در آزادسازی تنش‌های حرارتی" توسط تعداد زیادی از محققین دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌ها و شرکت‌ها انجام شد. آنها به طور دقیق بر روی روش‌های توسعه و فرآیندهای مختلف (مانند طراحی مواد، روش‌های تولید و تحلیل) بحث کردند. سرانجام این همکاری‌ها ساخت یک نمونه *FGM* با قابلیت آزادسازی تنش حرارتی ساخته شد.

در سال ۱۹۹۰ اولین کنفرانس بین‌المللی در شهر سندای برگزار شد. در سال ۱۹۹۲ *FGM* در تکنولوژی‌های مختلف کشور ژاپن استفاده شد. در سال ۱۹۹۳ دومین پروژه‌ی *FGM* در زمینه‌ی تبدیل انرژی شروع شد که تا سال ۱۹۹۸ به طول انجامید. بدین ترتیب تا سال ۲۰۰۱ شش سمینار بین‌المللی در زمینه‌ی *FGM* برگزار شد که نشانگر اهمیت این موضوع بود. این چنین بود که *FGM* به یکی از ده تکنولوژی برتر کشور ژاپن تبدیل شد و توانست نظر جهانیان را به خود جلب کند [۲].

۱ - ۲ - ۱ معرفی معادلات حاکم بر مواد *FG*

با توجه به پیشرفت علم و اتوماسیون شدن فرآیند طراحی مهندسی، مهم‌ترین بخش در طراحی، شبیه‌سازی طرح مورد نظر است. این فرآیند شامل مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی است. در مسائل، با توجه به شرایط مسئله و هندسه‌ی موجود مدل‌سازی انجام شده و پس از تحلیل مدل، بهینه‌سازی می‌شود. از این رو برای رسیدن به طرح بهینه نیاز به یک مدل مناسب الزامی است. *FGM*‌ها نیز به عنوان مواد قابل کاربرد در صنعت، نیازمند یک مدل مناسب می‌باشد. مشکل اساسی در طراحی *FGM* جدا از انتخاب مواد، طراحی تابع ترکیبات است. این تابع می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود که خواص حرارتی، فیزیکی و مکانیکی در *FGM* حاوی دو ماده‌ی ثابت بهینه شود، که این امر نیازمند تعریف و بهینه‌سازی‌های تابع توزیع ترکیبات است. مشکل بعدی در این مواد پیش‌بینی رفتار *FGM* پس از ساخت و در شرایط بارگذاری است، که این مشکل با استفاده از