

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه طراحی کاربردی

**حل نیمه تحلیلی ترمومگنتوالاستیک خزش دیسک های چرخان با
ضخامت متغیر از جنس کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تقویت شده با
ذرات سیلیکون کارباید**

دانشجو : مرضیه سادات حسنی

اساتید راهنما :

جناب دکتر محمود شریعتی

جناب دکتر عباس لقمان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک
گروه طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مرضیه سادات حسنی

تحت عنوان : تحلیل عددی ترمومگنتو الاستیک خزش در دیسکهای چرخان با ضخامت متغیر از جنس کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید راهنما
	دکتر محمود شریعتی
	دکتر عباس لقمان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر قطعی		دکتر حمید رضا ایپک چی
			دکتر مهدی قناد

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود، در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار بویژه 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 محترم جناب آقای دکتر محمود شریعتی که با صبر و توجه خود اینجانب را همراهی فرمودند سپاسگزارم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر عباس لقمان که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت قدردانی و تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب مرضیه سادات حسنی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک- طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تحلیل عددی ترمومگنتو الاستیک خزش دیسکهای چرخان با ضخامت متغیر از جنس کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید" تحت راهنمایی جناب دکتر شریعتی 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

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

یک دیسک چرخان ضخامت متغیر که تحت گرادیان دمایی و میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گرفته است را در نظر می‌گیریم. نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش و گرادیان دما باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی و حرارتی در دیسک می‌شوند.

در این پژوهش ابتدا مناسب‌ترین ساختار ضخامت و توزیع حجمی دیسک تعیین می‌شود، سپس بر اساس قانون نورتون، خزش ترمومگنتوالاستیک ایجاد شده در دیسک در طی پنجاه سال آینده پیش‌بینی خواهد شد. برای تحلیل مسئله، معادلات تعادل، روابط تنش- کرنش و کرنش- تغییرمکان را حل کرده و توزیع تنش‌ها به دست می‌آید. بر اساس روابط حاصله مقادیر تنش‌های خزشی، تابعی از کرنش‌های خزشی می‌باشند و کرنش‌های خزشی به نوبه خود به زمان، دما و تنش بستگی دارند، بدین جهت با تقسیم‌بندی شعاع به المان‌های کوچک با استفاده از یک روش عددی، گرادیان دمایی و تنش‌ها محاسبه شده، کرنش‌های خزشی بر اساس معادلات پرانتل-روس و تنش مؤثر قابل محاسبه خواهند بود.

در این روش عددی، یک جزء زمانی انتخاب شده، سپس جزءهای کرنش خزشی در تمامی نقاط تقسیم در شعاع دیسک حدس زده می‌شوند. با داشتن مقادیر جزءهای کرنش فرض شده و با حل معادلات تعادل، روابط تنش- کرنش و کرنش- تغییرمکان، مقادیر تنش‌ها محاسبه می‌گردد. با داشتن مقادیر تنش‌ها، بر اساس معیار ون میسز تنش مؤثر محاسبه شده، سپس نرخ کرنش‌های خزشی بر اساس معادلات پرانتل روس قابل محاسبه خواهند بود. با داشتن نرخ کرنش‌های خزشی بدست آمده و مقدار جزء زمانی در نظر گرفته شده، جزءهای کرنش خزشی محاسبه می‌شوند و این مقادیر، به عنوان مقادیر جدید جهت ادامه تکرار تا رسیدن به همگرایی در نظر گرفته خواهند شد.

کرنش‌های خزشی کل، حاصل جمع جزءهای کرنش خزشی همگرا شده خواهد بود که در محاسبه تنش‌ها و جابجایی خزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که دیسک با هندسه مقعر مناسب‌ترین ساختار را دارد، همچنین حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به شدت بر رفتار الاستیک و خزشی دیسک تأثیر می‌گذارد و جابجایی شعاعی و تنش‌ها را تا حد زیادی تقلیل می‌بخشد.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ تاریخچه مواد *FG* ۳
- ۳-۱ معرفی مواد درجه بندی شده ی تابعی ۴
- ۴-۱ روش های ساخت مواد *FG* ۷

فصل دوم : خزش از دیدگاه متالوژیکی

- ۱-۲ مقدمه ۱۲
- ۲-۲ مشکل مواد در دمای زیاد ۱۳
- ۳-۲ منحنی خزش ۱۵
- ۴-۲ تغییرات ساختاری حین خزش ۲۰
- ۱-۴-۲ تغییر شکل توسط لغزش ۲۲
- ۲-۴-۲ تشکیل دانه فرعی ۲۲
- ۳-۴-۲ لغزش مرز دانه ۲۳

۲۴ ۵-۲ خزش در دماهای کم

۲۶ ۶-۲ خزش در دمای زیاد

۲۷ ۷-۲ آلیاژهای مناسب برای دمای زیاد

فصل سوم : مروری بر پژوهش های پیشین

۳۲ ۱-۳ مقدمه

۳۲ ۲-۳ تاریخچه خزش

۴۱ ۳-۳ جدیدترین موارد مرتبط

۵۰ ۴-۳ اهداف

فصل چهارم : تحلیل تئوری و فرمول بندی مسئله

۵۴ ۱-۴ مقدمه

۵۵ ۲-۴ هندسه دیسک و رفتار تابعی ماده

۵۷ ۳-۴ معادلات حاکم بر دیسک چرخان *FGM* با ضخامت متغیر

۶۲ ۴-۴ روابط الاستیک دیسک چرخان تحت تأثیر بارهای مکانیکی و حرارتی

۶۵ ۵-۴ قانون جریان خزشی

فصل پنجم : حل نیمه تحلیلی ترمومگنتوالاستیک

- ۱-۵ مقدمه ۷۰
- ۲-۵ حل نیمه تحلیلی معادله انتقال حرارت ۷۰
- ۳-۵ حل نیمه تحلیلی الاستیک دیسک چرخان ۷۴
- ۱-۳-۵ انتخاب ساختار ضخامت مناسب در حالت الاستیک ۷۶
- ۲-۳-۵ انتخاب توزیع حجمی مناسب ۷۹
- ۴-۵ اثرات حضور میدان مغناطیسی یکنواخت ۹۰

فصل ششم : تحلیل رفتار خزشی

- ۱-۶ مقدمه ۹۸
- ۲-۶ روش حل بر اساس همگرایی جزء های کرنش خزشی ۹۸
- ۳-۶ انتخاب ساختار ضخامت مناسب با در نظر گرفتن خزش ۱۰۲
- ۴-۶ رفتار خزشی دیسک با ساختار ضخامت مقعر ۱۱۶
- ۵-۶ اثرات حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بر رفتار خزشی ۱۲۱
- ۶-۶ مقایسه رفتار خزشی دیسک در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت ۱۲۶
- مراجع ۱۴۱

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: تصویر شماتیک ریزساختاری یک ماده درجه بندی شده تابعی متشکل از سرامیک-فلز.....۶

شکل ۲-۱: ماده درجه بندی شده تابعی با تغییر خواص تدریجی پیوسته ۷

شکل ۱-۲: منحنی خزش نشان دهنده سه مرحله خزش ۱۷

شکل ۲-۲: تحلیل آندرد از فرآیندهای رقابت کننده‌ای که منحنی خزش را تعیین می‌کنند ۱۷

شکل ۳-۲: نمودار شمایی اثر تنش بر منحنی های خزش در دمای ثابت ۲۰

شکل ۴-۲: آهنگ کرنش به صورت تابعی از کرنش کل ۲۱

شکل ۵-۲: تشکیل تا (به طور شمایی) در یک نقطه سه گانه ۲۴

شکل ۶-۲: اثر تنش بر مکانیزم خزش فعال شده در اثر گرما ۲۷

شکل ۱-۳: نتایج آزمایش خزش بر روی فلز Mo-V در فشار 3000 Psi (45 MPa) ۳۴

شکل ۲-۳: توزیع تنش‌های مؤثر در ضخامت لوله از حالت الاستیک تا خزش حالت پایدار ۳۷

شکل ۳-۳: تخمین عمر باقی مانده در شرایط کاری دما بالا ۳۹

شکل ۴-۳: تصویر کلی دیسک FGM چرخان با ساختار ضخامت متغیر ۵۰

شکل ۱-۴: نمای شماتیکی از چهار نوع ساختار ضخامت دیسک ۵۶

شکل ۵-۱: تقسیم بندی فرضی دیسک در راستای شعاع ۷۱

شکل ۵-۲: تصویر کلی دیسک ۷۳

شکل ۵-۳: چهار نوع توزیع حجمی در راستای شعاع دیسک ۷۹

فهرست نمودارها

- نمودار ۵-۱: گرادیان دمایی در راستای شعاع..... ۷۳
- نمودار ۵-۲: جابجایی شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۷
- نمودار ۵-۳: توزیع تنش شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۷
- نمودار ۵-۴: توزیع تنش محیطی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۷
- نمودار ۵-۵: توزیع تنش مؤثر چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۷
- نمودار ۵-۶: جابجایی شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۸
- نمودار ۵-۷: توزیع تنش شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۸
- نمودار ۵-۸: توزیع تنش محیطی چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۸
- نمودار ۵-۹: توزیع تنش مؤثر چهار دیسک با هندسه متفاوت ۷۸
- نمودار ۵-۱۰: جابجایی شعاعی دیسک ضخامت ثابت برای چهار توزیع حجمی ۸۱
- نمودار ۵-۱۱: توزیع تنش شعاعی دیسک ضخامت ثابت برای چهار توزیع حجمی ۸۱
- نمودار ۵-۱۲: توزیع تنش محیطی دیسک ضخامت ثابت برای چهار توزیع حجمی ۸۱
- نمودار ۵-۱۳: توزیع تنش مؤثر دیسک ضخامت ثابت برای چهار توزیع حجمی ۸۱
- نمودار ۵-۱۴: جابجایی شعاعی دیسک خطی برای چهار توزیع حجمی ۸۲
- نمودار ۵-۱۵: توزیع تنش شعاعی دیسک خطی برای چهار توزیع حجمی ۸۲
- نمودار ۵-۱۶: توزیع تنش محیطی دیسک خطی برای چهار توزیع حجمی ۸۲

نمودار ۵-۱۷: توزیع تنش مؤثر دیسک خطی ۸۲

نمودار ۵-۱۸: جابجایی شعاعی دیسک محدب ۸۳

نمودار ۵-۱۹: توزیع تنش شعاعی دیسک محدب ۸۳

نمودار ۵-۲۰: توزیع تنش محیطی دیسک محدب ۸۳

۸۳

نمودار ۵-۲۱: توزیع تنش مؤثر دیسک محدب ۸۳

نمودار ۵-۲۲: جابجایی شعاعی دیسک مقعر ۸۴

نمودار ۵-۲۳: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر ۸۴

نمودار ۵-۲۴: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر ۸۴

نمودار ۵-۲۵: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر ۸۴

نمودار ۵-۲۶: جابجایی شعاعی دیسک ضخامت ثابت ۸۶

نمودار ۵-۲۷: توزیع تنش شعاعی دیسک ضخامت ثابت ۸۶

نمودار ۵-۲۸: توزیع تنش محیطی دیسک ۸۶

نمودار ۵-۲۹: توزیع تنش مؤثر دیسک ضخامت ثابت ۸۶

نمودار ۵-۳۰: جابجایی شعاعی دیسک خطی ۸۷

نمودار ۵-۳۱: توزیع تنش شعاعی دیسک خطی ۸۷

نمودار ۵-۳۲: توزیع تنش محیطی دیسک خطی ۸۷

نمودار ۵-۳۳: توزیع تنش مؤثر دیسک خطی ۸۷

- نمودار ۵-۳۴: جابجایی شعاعی دیسک محدب ۸۸
- نمودار ۵-۳۵: توزیع تنش شعاعی دیسک محدب ۸۸
- نمودار ۵-۳۶: توزیع تنش محیطی دیسک محدب ۸۸
- نمودار ۵-۳۷: توزیع تنش مؤثر دیسک محدب ۸۸
- نمودار ۵-۳۸: جابجایی شعاعی دیسک مقعر ۸۹
- نمودار ۵-۳۹: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر ۸۹
- نمودار ۵-۴۰: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر ۸۹
- نمودار ۵-۴۱: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر ۸۹
- نمودار ۵-۴۲: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۹۲
- نمودار ۵-۴۳: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۹۲
- نمودار ۵-۴۴: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۹۲
- نمودار ۵-۴۵: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *c* ۹۲
- نمودار ۵-۴۶: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۹۳
- نمودار ۵-۴۷: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۹۳
- نمودار ۵-۴۸: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *d* ۹۳
- نمودار ۵-۴۹: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *d* ۹۳
- نمودار ۵-۵۰: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۹۴
- نمودار ۵-۵۱: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۹۴

- نمودار ۵-۵۲: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۹۴
- نمودار ۵-۵۳: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *c* ۹۴
- نمودار ۵-۵۴: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۹۵
- نمودار ۵-۵۵: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۹۵
- نمودار ۵-۵۶: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *d* ۹۵
- نمودار ۵-۵۷: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *d* ۹۵
- نمودار ۶-۱: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۲: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۳: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۴: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۱۰ سال ۱۰۳
- نمودار ۶-۷: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴
- نمودار ۶-۸: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴
- نمودار ۶-۹: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴
- نمودار ۶-۱۰: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴
- نمودار ۶-۱۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴
- نمودار ۶-۱۲: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع *c* پس از ۳۰ سال ۱۰۴

- نمودار ۶-۱۳: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۴: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۵: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۸: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۰۵
- نمودار ۶-۱۹: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۰: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۱: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۲: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۴: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۰۶
- نمودار ۶-۲۵: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷
- نمودار ۶-۲۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷
- نمودار ۶-۲۷: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷
- نمودار ۶-۲۸: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷
- نمودار ۶-۲۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷
- نمودار ۶-۳۰: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۰۷

- نمودار ۳۱-۶: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۲-۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۳-۶: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۴-۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۵-۶: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۶-۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۰۸
- نمودار ۳۷-۶: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۳۸-۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۳۹-۶: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۴۰-۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۴۱-۶: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۴۲-۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۱۰ سال ۱۰۹
- نمودار ۴۳-۶: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰
- نمودار ۴۴-۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰
- نمودار ۴۵-۶: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰
- نمودار ۴۶-۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰
- نمودار ۴۷-۶: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰
- نمودار ۴۸-۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۳۰ سال ۱۱۰

- نمودار ۶-۴۹: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۰: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۱: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۲: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۴: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع c پس از ۵۰ سال ۱۱۱
- نمودار ۶-۵۵: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۵۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۵۷: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۵۸: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۵۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۶۰: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۱۰ سال ۱۱۲
- نمودار ۶-۶۱: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳
- نمودار ۶-۶۲: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳
- نمودار ۶-۶۳: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳
- نمودار ۶-۶۴: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳
- نمودار ۶-۶۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳
- نمودار ۶-۶۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۳۰ سال ۱۱۳

- نمودار ۶-۶۷: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۶۸: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۶۹: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۷۰: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۷۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۷۲: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک نوع d پس از ۵۰ سال ۱۱۴
- نمودار ۶-۷۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع c ۱۰۶
- نمودار ۶-۷۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع c ۱۱۷
- نمودار ۶-۷۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع c ۱۱۷
- نمودار ۶-۷۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع c ۱۱۷
- نمودار ۶-۷۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع c ۱۱۷
- نمودار ۶-۷۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع c ۱۱۷
- نمودار ۶-۷۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع d ۱۱۸
- نمودار ۶-۸۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۱۸
- نمودار ۶-۸۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۱۸
- نمودار ۶-۸۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۱۸
- نمودار ۶-۸۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۱۸
- نمودار ۶-۸۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۱۸

- نمودار ۶-۸۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۸۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۸۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۸۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۸۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۹۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۱۱۹
- نمودار ۶-۹۱: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع *d* ۱۲۰
- نمودار ۶-۹۷: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲
- نمودار ۶-۹۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲
- نمودار ۶-۹۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲
- نمودار ۶-۱۰۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲
- نمودار ۶-۱۰۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲
- نمودار ۶-۱۰۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع *c* ۱۲۲

- نمودار ۶-۱۰۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۲۳
- نمودار ۶-۱۰۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع c ۱۲۴
- نمودار ۶-۱۱۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نوع d ۱۲۵
- نمودار ۶-۱۱۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۲۵
- نمودار ۶-۱۱۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۲۵
- نمودار ۶-۱۱۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۲۵
- نمودار ۶-۱۱۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۲۵
- نمودار ۶-۱۲۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۲۵

- نمودار ۶-۱۲۱: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۷
- نمودار ۶-۱۲۷: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۲۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۲۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۳۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۳۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۳۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۸
- نمودار ۶-۱۳۳: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۹
- نمودار ۶-۱۳۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۹
- نمودار ۶-۱۳۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۹
- نمودار ۶-۱۳۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۲۹
- نمودار ۶-۱۳۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۲۹
- نمودار ۶-۱۳۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۲۹

- نمودار ۶-۱۳۹: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۰
- نمودار ۶-۱۴۵: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۴۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۴۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۴۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۴۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۵۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۱
- نمودار ۶-۱۵۱: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۲
- نمودار ۶-۱۵۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۲
- نمودار ۶-۱۵۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d آزاد ۱۳۲
- نمودار ۶-۱۵۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۲
- نمودار ۶-۱۵۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۲
- نمودار ۶-۱۵۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۲

- نمودار ۶-۱۵۷: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۵۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۵۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۶۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۶۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۶۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۳
- نمودار ۶-۱۶۳: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۴
- نمودار ۶-۱۶۹: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۵
- نمودار ۶-۱۷۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۵
- نمودار ۶-۱۷۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۵
- نمودار ۶-۱۷۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع C ۱۳۵
- نمودار ۶-۱۷۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع C ۱۳۵
- نمودار ۶-۱۷۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع C ۱۳۵

- نمودار ۶-۱۷۵: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۷۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۷۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۷۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۷۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۸۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۶
- نمودار ۶-۱۸۱: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۷
- نمودار ۶-۱۸۷: جابجایی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۸
- نمودار ۶-۱۸۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۸
- نمودار ۶-۱۸۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۸
- نمودار ۶-۱۹۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر نوع d ۱۳۸
- نمودار ۶-۱۹۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر نوع d ۱۳۸
- نمودار ۶-۱۹۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر نوع d ۱۳۸

فهرست علائم و اختصارات

تنش شعاعی جاری	σ_r
تنش محیطی جاری	σ_θ
تنش محوری جاری	σ_z
شعاع	r
کرنش شعاعی کل	ε_r
کرنش مماسی کل	ε_θ
کرنش محوری کل	ε_z
تنش مؤثر	σ_e
ضریب انبساط حرارتی	α
ضریب پواسون	ν
شاخص توزیع مواد FG	n
مدول الاستیک	E
گرادیان دما	ΔT
درجه حرارت	T
درجه حرارت سطح داخلی	T_i
درجه حرارت سطح خارجی	T_o
شعاع داخلی	r_i
شعاع خارجی	r_o
زمان	t
جزء کرنش خزشی مؤثر	$\Delta \varepsilon_e^c$

جزء کرنش خزشی شعاعی	$\Delta \varepsilon_r^c$
جزء کرنش خزشی مماسی	$\Delta \varepsilon_\theta^c$
نرخ کرنش خزشی مؤثر	ε_e^c
نرخ کرنش خزشی شعاعی	ε_r^c
نرخ کرنش خزشی مماسی	ε_θ^c
نرخ کرنش خزشی محوری	ε_z^c
نیروی لورنس	f_z
شدت میدان مغناطیسی	H_z
ضخامت دیسک	h
ضریب هدایت حرارتی	K
جابجایی شعاعی	u
جرم حجمی	ρ
سرعت زاویه ای	ω
ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی	μ
ضریب هندسی ساختار ضخامت	m
ضریب هندسی ساختار ضخامت	q
ثابت نورتون	b_0
ثابت نورتون	b_1
ثابت نورتون	n_0

فصل اول:



۱-۱ مقدمه

در دو دهه اخیر ساخت مواد درجه بندی شده تابعی یا اصطلاحاً *FGM* ها که خواص آن‌ها به صورت پیوسته در جهات مختلف تغییر می‌کند به منظور بهبود رفتار مکانیکی سازه‌ها گسترش یافته است، به موازات آن تحلیل‌های الاستیک-پلاستیک و خزش در این سازه‌ها یک موضوع فعال پژوهشی بوده است. در این میان تحلیل‌های مربوط به خزش، در سازه‌های *FGM* کمتر توسعه یافته که شاید دلیل آن، عدم دسترسی به مدل‌های ریاضی برای رفتار خزشی این مواد و وابستگی آن به زمان است.

جریان خمیری، قسمت وسیعی از مکانیک جامدات را تشکیل می‌دهد که شامل رفتار مواد تحت اثر بارهای مکانیکی و حرارتی در خارج از حد ارتجاعی می‌باشد. تغییرشکل خمیری، تغییرشکل غیرقابل برگشت مواد است که بعد از باربرداری همچنان در جسم باقی می‌ماند، اما خزش جریان خمیری وابسته به زمان در فلزات است، هنگامی که تحت اثر بار ثابت یا تنش ثابت می‌باشند. خزش در هر درجه حرارتی می‌تواند رخ دهد، اما خزش در درجه حرارت‌های بالا به علت دیفیوژن، حائز اهمیت فراوان است. نظریات مربوط به تئوری‌های خمیری و خزشی فلزات به دو دسته تقسیم می‌شود:

▪ نظریه‌های فیزیکی

▪ نظریه‌های ریاضی

نظریه‌های فیزیکی در پی آن است که علت جریان خمیری یا خزشی فلزات را دریابد در این دیدگاه مواد از نقطه نظر میکروسکوپی بررسی می‌شوند و کوشش بر آن است که معلوم گردد بر سر اتم‌ها و کریستال‌ها چه پیش می‌آید، اما نظریه‌های ریاضی از طرف دیگر در طبیعت به صورت حادثه

منطقی به موضوع توجه کرده و سعی می کند آن را فرمول بندی نموده و در حالت بزرگ و مرئی به شکل قابل استفاده درآورد، بدون اینکه به طور عمیق به مبناهای فیزیکی توجه داشته باشد. امید آن است که بالاخره این دو نظریه یکی شده و رفتار مواد را در جریانات خمیری و خزشی تعیین نمایند و مبنایی برای استفاده‌های عملی به مهندسين بدهد.

مکانیزم‌های خزش منجر به آسیب‌های بزرگ ساختاری همچون حرکت نابجایی، ایجاد گلوئی و... می‌شوند. تاریخچه تنش‌ها و داشتن میزان آسیب‌های خزشی در دیسک‌ها جهت تخمین عمر در تجهیزاتی که تحت شرایط کاری دما- فشار بالا هستند بسیار اهمیت دارد.

آشنایی با تحلیل الاستیک در روش‌های ساده طراحی برای درجه حرارت‌های بالا مناسب نیست زیرا تحت این دماها، خزش مهم‌ترین مکانیزم مخرب حاکم است. قطعات تحت اثر مکانیزم خزش گاهی در تنش‌های پایین تر سیلان هم تغییر شکل می دهند و با پیشرفت زمان و افزایش درجه حرارت، تاثیر این پدیده شدت می‌یابد.

فولاد در حرارت بالا کاهش جدی استحکام نشان می‌دهد، از طرفی مواد سرامیکی اغلب ترد و شکننده هستند. لذا سال‌هاست تحقیقات در زمینه تولید مواد مرکبی که تحت دماهای بالا خواص مکانیکی قابل قبولی داشته باشند آغاز شده و نتایج مطلوبی در برداشته است.

۱-۲ تاریخچه مواد FG

در سال‌های اخیر، با توسعه موتورهای پر قدرت صنایع هوا فضا، توربین‌ها و راکتورها و دیگر ماشین‌ها نیاز به موادی با مقاومت حرارتی بالا احساس شده است. در گذشته از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش و روکش قطعات تحت دمای کارکرد بالا استفاده می‌شد. این مواد عایق‌های بسیار خوبی بودند ولی مقاومت زیادی در برابر تنش‌های پس ماند نداشتند و این موضوع باعث بروز مشکلات

زیادی از جمله ایجاد حفره و ترک در آن‌ها می‌شد. بعدها برای رفع این مشکل از مواد کامپوزیت لایه ای استفاده شد اما تنش‌های حرارتی در این مواد نیز موجب پدیده لایه‌لایه شدن می‌گردید. با توجه به این مشکلات، تولید ماده‌ای مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا داشته باشد و هم مشکل لایه‌لایه شدن نداشته باشد ضرورت پیدا کرد. هر چند اولین پیشنهاد در مورد ساخت و تولید مواد دارای تغییرات تابعی خواص را در سال ۱۹۷۲ بور^۱ و دووز^۲ ارائه کردند و قبل از آن هم یک سری تحقیقات در مورد آن به صورت گسسته صورت گرفته بود ولی برای اولین بار نام *FGM* توسط محققان ژاپنی در سال ۱۹۸۴ به این مواد داده شد و پس از آن به تدریج این مواد در سطح بین المللی ساخته شدند. نینو^۳ و کویزومی^۴ از جمله افرادی بودند که در آن زمان در ژاپن مامور تحقیق در مورد مواد جدید شدند و به علت نیاز این کشور به این مواد برای توسعه صنایع هوایی این تحقیقات به صورت جدی دنبال شد [۲۱].

۳-۱ معرفی مواد درجه بندی شده‌ی تابعی

مواد درجه بندی شده‌ی تابعی یا *FGM* که مخفف عبارت *Functionally Graded Materials* می‌باشد، مواد کامپوزیتی هستند که از نظر میکروسکوپی غیرهمگند و خواص مکانیکی آن‌ها به صورت ملایم و پیوسته از یک سطح تا سطح دیگر تغییر می‌کند. این تغییرات به صورت تدریجی و با تغییر نسبت حجمی دو ماده ساختاری ایجاد می‌شود. نوع رایج این مواد، ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز است. این مواد از اختلاط پودر فلز و سرامیک به دست می‌آیند و تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملاً پیوسته می‌باشد، به گونه‌ای که یک سطح جسم از فلز خالص و

1.K. Bour

2.H.R.Dowezz

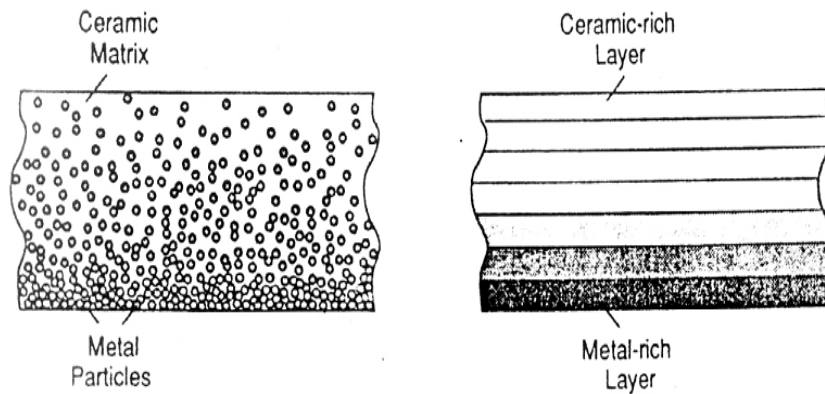
3.Niino

4.M. Koizumi

سطح دیگر از سرامیک خالص است و بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو می‌باشد، همچنین خواص مکانیکی این مواد نیز با توجه به نوع ترکیب، تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد. نسبت این ترکیب در راستای ضخامت جسم متغیر بوده و چگالی ذرات فلز معلق در بستر سرامیک از سطح فلزی تا سطح سرامیکی توسط یک تابع معین که می‌تواند خطی، غیرخطی یا نمایی باشد کاهش یا افزایش می‌یابد. این مواد با توجه به پیوستگی مواد تشکیل دهنده خود دارای خواص ترمومگنتومکانیکال مؤثری نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای هستند و به دلیل مقاومت بالایی که در مقابل کمناش حرارتی دارند در ساخت صفحات و پوسته‌های مخازن راکتورها، توربین‌ها و دیگر اجزای ماشین‌ها به کار می‌روند. از جمله کاربردهای اصلی این مواد، استفاده در صنایع شیمیایی (غشاها و کاتالیست‌ها)، استفاده در مهندسی پزشکی (کاشت دندان مصنوعی، استخوان‌ها یا اندام‌های مصنوعی) و سایر فناوری‌های نوین مانند موتورهای سرامیکی و پوشش در برابر خوردگی و حرارت را نام برد. از دیگر کاربردهای مواد درجه بندی شده‌ی تابعی می‌توان به استفاده از آن‌ها در ساخت پوشش عایق‌های حرارتی^۱ نیز اشاره نمود. یکی از مهم‌ترین مزایای مواد *FG* نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای، عدم گسستگی در محل اتصال لایه‌هاست.

جزء فلزی مواد *FG* می‌تواند آلومینیوم، مس، کروم، نیکل یا سرب باشد. قسمت سرامیک نیز می‌تواند از جنس سرامیک بدون اکسید- فلز مانند *Si3N4* و *SiC*، سرامیک بدون اکسید- فلز *ZrC* و *TiC* سرامیک‌های با اکسید بدون فلز *SiO2* و یا سرامیک‌های با اکسید با فلز *ZrO2* و *Al2O3* انتخاب شود.

تصویر شماتیک یک ماده *FG* متشکل از سرامیک- فلز در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: تصویر شماتیک ریز ساختاری یک ماده درجه بندی شده تابعی متشکل از سرامیک-فلز [۲۱].

همان گونه که اشاره شد امتیاز اصلی مواد درجه بندی شده تابعی مقاومت بسیار بالای آن ها در برابر محیط‌هایی با درجه حرارت بالا (تغییرات دمایی بالا) می باشد، به گونه ای که مؤلفه سرامیکی ماده به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین باعث مقاومت در برابر دماهای بسیار بالا می گردد، از سوی دیگر مؤلفه فلزی باعث جلوگیری از رشد ترک و شکست ماده در اثر تنش‌های حرارتی ایجاد شده می گردد. همچنین پیوستگی تغییرات ریز ساختاری باعث امتیاز ماده درجه بندی شده تابعی نسبت به انواع مواد مرکب لایه ای خواهد بود.

همانند دیگر مواد ساخته شده به دست بشر که نمونه ای در طبیعت دارند، *FGM* ها نیز نمونه هایی در طبیعت دارند، دندان‌ها، صدف‌ها، استخوان‌ها و درختان بامبو، مثال‌هایی هستند تا دانسته شود چگونه طبیعت به ساختمان میکروسکوپی مواد با قرار دادن عناصر قوی تر درجایی که تنش و کرنش در بالاترین حد خود می باشد، نظم می دهد. ساختارهای بیولوژیکی برای این که قدرت یکسان در تمام حالات را فراهم نمایند، خلق شده اند تا از تنش زیاد جلوگیری نمایند و بدینسان امکان باقی ماندن را به وسیله کاهش امکان شکست ساختاری و یا ضربه گسترش دهند.

در ساده ترین *FGM* ها دو جزء ماده مختلف به طور پیوسته از یکی به دیگری، همانطوری که

در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، تغییر می کند.



شکل ۱-۲: ماده درجه بندی شده‌ی تابعی با تغییر خواص تدریجی پیوسته [۲۱].

۱-۴ روش‌های ساخت مواد FG

برای تهیه مواد *FG*، چند روش وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- *CVD/PVD* (نشت بخار مواد، توسط روش‌های شیمیایی یا فیزیکی)

۲- اسپری پلاسما^۱

۳- متالورژی پودر

۴- سنتز احتراقی خود انتشار

قبل از ساخت ماده *FG* باید مشخص شود که فلز و سرامیک به چه صورتی توزیع شده‌اند. در بعضی مقاله‌ها هدف یافتن یک ساختار با توجه به کمینه کردن یک کمیت است. در مواقع دیگر پروفیل توزیع فلز و سرامیک انتخاب می‌شود و یک پارامتر برای اهداف بهینه یا کمینه کردن یک کمیت در آن در نظر گرفته می‌شود.

متدهای مختلفی جهت مدل کردن تغییرات خواص در مواد FG وجود دارد. در این روش‌ها تغییرات خواص ترمومگنتومکانیکال ماده به صورت تابع توانی، نمایی و یا کسر حجمی و معمولاً در جهت شعاعی مدل می‌شود.

یکی از روش‌های معمول برای تولید این مواد به این ترتیب است که ابتدا یک بستر (لایه) سرامیکی ایجاد کرده (لایه اولیه یا لایه تحتانی)، سپس لایه‌های دیگر به صورت طبقه - طبقه به طوری که نسبت حجمی مواد به طور ملایم و پیوسته در آن تغییر نماید ایجاد نموده و در نهایت قرار دادن یک لایه فوقانی از جنس فلز روی لایه میانی می‌باشد.

روش دیگر برای تولید این مواد استفاده از نیروی گریز از مرکز می‌باشد. در این روش با حرارت دادن به فلز آن را ذوب نموده و ذرات سرامیک به وسیله نیروی گریز از مرکز در داخل مذاب انتشار می‌یابند. به عنوان مثال برای ساخت سرامیک ZrO_2+Cu پودر اکسید زیرکونیم با پودر فلز مس مخلوط و به هم فشرده می‌شود تا تشکیل یک نمونه استوانه‌ای شکل را بدهند. سپس نمونه در داخل دستگاه گریز از مرکزی با قابلیت ایجاد شتاب g ۱۰۰ یا بیشتر قرار می‌گیرد. به محض اعمال نیروی گریز از مرکز، نمونه از یک انتها مشتعل می‌گردد و یک موج احتراق ایجاد می‌شود. در این حالت فلز مس ذوب می‌شود و با توجه به متفاوت بودن جرم مخصوص مواد ترکیب شده، ذرات اکسید زیرکونیم ZrO_2 با نسبت حجمی خالص در داخل مذاب پراکنده می‌شود.

در پاشش توسط تفنگ، پلاسما ذرات پودر با قطر تقریبی ۱۰۰ میکرومتر به سرعت، گرم شده و شتاب می‌گیرند. فازهای مقاوم که معمولاً سرامیک‌ها هستند و فلزات به طور مشابه گداخته و با کنترل سرعت و تغذیه مناسب ترکیب می‌شوند.

در متالورژی پودر، پودر فلز و سرامیک با نسبت های معین و کنترل شده توسط کامپیوتر از مخازن خود با سرعت بالا به مخلوط کن هدایت می شوند و با نیروی گریز از مرکز متراکم شده و سپس روی آن ها عملیات زینترینگ^۱ انجام می شود.

در روش رسوب گذاری با اسپری حرارتی فواره مذاب فلز تبدیل به پودر شده و به صورت یک زیرلایه سفت جامد سرامیکی، فشرده می شود و یک لایه جامد به سرعت تشکیل می شود. این روش بر اساس نفوذ جرم بوده و لذا بیشتر برای مواد نازک کاربرد دارد.

در ساخت با لیزر، مقداری از ماده ۱ بر روی سطح ماده ۲ به کمک لیزر جوش می خورد. با تکرار این عمل، یک سلسله از لایه ها با گرادیان خواص معینی روی سطح ۲ ساخته می شود. این گرادیان به ضخامت اولیه ماده ۱ و قدرت لیزر بستگی دارد و با همین اهرم ها کنترل می گردد.

خواص مکانیکی و حرارتی مواد FG ، با توجه به نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده و مدل تعریف شده برای آن ها به دست می آید. به عنوان مثال بر اساس قانون فویگت^۲ فرض می گردد خواص مادی ورق غیرهمگن مانند مدول الاستیسیته (E)، ضریب انبساط حرارتی (α) و چگالی (ρ) آن طبق روابط زیر در جهت ضخامت ورق تغییر نمایند، در حالی که ضریب پواسون (ν) برای آن، ثابت در نظر گرفته می شود و کمیت های مذکور برای ورق مورد نظر از روابط زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned} E(z) &= E_c V_c + E_m (1 - V_c) \\ \alpha(z) &= \alpha_c V_c + \alpha_m (1 - V_c) \\ \rho(z) &= \rho_c V_c + \rho_m (1 - V_c) \\ \nu(z) &= \nu \end{aligned} \quad (1-1)$$

اندیس m مربوط به فلز و c مربوط به سرامیک است.

1.Zintring

2-Fougits

فصل دوم:

خزش از دیدگاه
ماتریکی

۱-۲ مقدمه

در بسیاری از کاربردها نیاز است قطعات در شرایط بارگذاری در دمای بالا کار کنند. در چنین قطعاتی که در دمای بالا در معرض تنش قرار دارند پدیده‌ی خزش اتفاق می‌افتد، مثلاً در کلیه قطعاتی که در نیروگاه‌های برق کار می‌کنند، موتورهای جت، توربین‌های بخار، راکت‌ها، موشک‌ها و ... در اثر خزش در قطعه تغییرات مکانیکی به وجود می‌آید. این تغییرات مکانیکی می‌تواند باعث ایجاد سه پدیده شود:

(۱) می‌تواند منجر به پارگی و شکست در جسم شود.

(۲) ممکن است جسم از خود کرنش نشان دهد.

(۳) می‌تواند باعث اکسایش شود.

دو عامل اول خاص خزش است. البته کرنش خزشی با کرنش معمولی متفاوت است. پدیده اکسایش هم با اینکه خاص خزش نیست به همان اندازه مهم است.

تفاوت عمده‌ای بین کرنش خزشی با کرنش الاستیک و پلاستیک وجود دارد. تفاوت مذکور این است که در کرنش‌های الاستیک و پلاستیک با اعمال بار، جسم بلافاصله از خود تغییر شکل نشان می‌دهد و با گذشت زمان، تحت بار ثابت، این کرنش ثابت باقی می‌ماند و به زمان بستگی ندارد. اما کرنش‌های خزشی وابسته به زمان هستند.

در ناحیه الاستیک براساس قانون هوک بین تنش و کرنش رابطه خطی وجود دارد. اما در ناحیه پلاستیک و در ناحیه خزشی رابطه تنش و کرنش عموماً غیرخطی است.

یک تفاوت بسیار مهم در رابطه تنش- کرنش در ناحیه الاستیک و پلاستیک وجود دارد. در ناحیه الاستیک بین تنش و کرنش تنها یک رابطه مشخص وجود دارد که همان قانون هوک می‌باشد. اما در ناحیه‌های پلاستیک و خزشی بین تنش و کرنش رابطه واحدی وجود ندارد و کاملاً به مسیر بارگذاری یا باربرداری وابسته است.

به دلیل وابستگی کرنش خزشی به تاریخچه و مسیر بارگذاری، باید جزءهای کرنش خزشی در طول مسیر تخمین زده شود و در نهایت با جمع کردن جزءها، کرنش خزشی کل حاصل گردد.

جهت تخمین مقادیر واقعی جزءهای کرنش خزشی در حالت چند محوری از روابط غیرخطی بین جزءهای تنش- کرنش استفاده می‌گردد. در این روابط جزءهای کرنش خزشی به مسیر بارگذاری و تنش‌های محوری وابسته می‌باشد. جزءهای کرنش خزشی مؤثر و تنش مؤثر براساس خواص ماده در تحلیل چند بعدی تعریف می‌شوند.

در این فصل مکانیزم خزش، چگونگی عملکرد آن و پارامترهایی که بر رفتار خزشی تأثیرگذار می‌باشند، به تفصیل بحث و بررسی خواهد شد.

۲-۲ مشکل مواد در دمای زیاد

استحکام مواد با افزایش دما کم می‌شود، چون تحرک اتم‌ها با افزایش دما به سرعت زیاد می‌شود، می‌توان دریافت فرآیندهایی که توسط نفوذ کنترل می‌شوند می‌توانند اثر عمده‌ای بر خواص مکانیکی در دمای زیاد داشته باشند، از سوی دیگر دمای زیاد به تحرک بیشتر نابجایی‌ها توسط مکانیزم صعود منجر می‌شود. به همین ترتیب غلظت تعادل جاهای خالی نیز با دما زیاد می‌شود، ممکن است در دمای بالا مکانیزم‌های تغییر شکل جدیدی نیز مطرح شوند. در بعضی فلزات با افزایش دما سیستم لغزش تغییر می‌کند یا سیستم‌های لغزش اضافی ایجاد می‌شود. عامل مهم دیگری که

باید در نظر گرفت اثر نگهداری بلند مدت در دمای زیاد بر پایداری متالوژیکی فلزات و آلیاژهاست. مثلاً در فلزات کارسرد شده تبلور مجدد به وجود آمده و دانه آن‌ها درشت می‌شود، در صورتی که آلیاژهای پیر سخت شده ممکن است فرتوت شوند و با درشت شدن ذرات فاز ثانوی استحکام خود را از دست بدهند. مطلب مهم دیگری که باید در نظر گرفته شود برهم کنش فلز با محیط خود در دمای زیاد است. اکسایش و خیم و نفوذ مرزدانه‌ای اکسید از عواملی هستند که باید جلوگیری شوند.

بنابراین معلوم است که استفاده موفقیت‌آمیز از فلزات در دمای بالا همراه با مشکلاتی است. در برنامه‌هایی که جهت بهبود آلیاژ اجرا می‌شود، موادی با خواص خوب در دمای بالا تولید شده‌اند، ولی نیاز صنعت جدید به موادی با استحکام بهتر در دمای زیاد و مقاوم در برابر اکسایش روزافزون می‌باشد. مدت‌های مدید کاربرد اصلی مواد در دمای بالا در نیروگاه‌های بخار، پالایشگاه‌های نفت و واحدهای شیمیایی بود. دمای کار در وسایلی مانند دیگ بخار، توربین‌های بخار و واحدهای کراکینگ به ندرت از 538°C (1000°F) تجاوز می‌کرد. با ورود موتور توربین گازی، نیاز به موادی پیدا شد که بتواند به شکل قطعاتی تحت تنش بحرانی و در دماهای حدود 815°C (1500°F)، مثل محفظه‌های توربین کار کنند. طراحی موتورهای پرقدرت‌تر، این حد را به 982°C (1800°F) رسانیده است. موتورهای موشک و مخروط‌های دماغه موشک پرتابی با مشکلات بیشتری مواجه‌اند، که فقط با استفاده استادانه از مواد مورد مصرف در دمای زیاد، و نیز بهبود هر چه بیشتر این مواد، قابل رفع است. تردیدی نیست که موادی که اکنون در ساخت به کار می‌روند، پیشرفت سریع صنعت دمای زیاد را محدود می‌کنند.

یک مشخصه مهم استحکام در دمای زیاد این است که باید همیشه با توجه به مقیاس زمان در نظر گرفته شود. در کارهای تجربی، خواص کششی اغلب مواد مهندسی در دمای اتاق به زمان بستگی ندارد. اگر سرعت بارگذاری در آزمایش کشش طوری تنظیم شود که آزمایش در ۲ ساعت یا ۲ دقیقه به اتمام برسد، نتایج فقط قدری متفاوت خواهد شد. همچنین رفتار ناکشسان ماده‌ای که در

دمای اتاق آزمایش می‌شود، از پی‌آمد عمل کمی برخوردار خواهد بود. اما استحکام در دمای زیاد به آهنگ کرنش و زمان عمل بستگی زیادی دارد. تعدادی از فلزات در این شرایط رفتاری مانند مواد گرانشسان دارند. فلز که تحت بار کششی ثابتی در دمای زیاد قرار دارد، خزش کرده و افزایش طولی که در آن ایجاد می‌شود با زمان مرتبط است.

ارتباط شدید استحکام با دما، برای مواد مختلف و در دماهای مختلف مهم است. ممکن است دمایی که برای ماده‌ای زیاد است، برای دیگری خیلی زیاد نباشد. برای جبران این مطلب، دما اغلب به صورت دمای همسانی، یعنی نسبت دمای آزمایش به دمای ذوب و با مقیاس دمای مطلق شرح داده می‌شود. به طور کلی در دمای همسانی بیش از ۰/۵، خزش از نظر مهندسی اهمیت پیدا می‌کند.

آزمایش‌هایی که برای اندازه‌گیری استحکام در دمای زیاد انجام می‌گیرد، باید بر مبنای مدت زمان کاری که ماده باید پایدار بماند، انتخاب شود. بنابراین یک آزمایش کشش در دمای زیاد اطلاعات مفیدی در مورد کار قطعه‌ای در دمای زیاد با عمر کم مثل یک موتور موشک یا دماغه مخروطی موشک پرتابی ارائه می‌کند، در صورتی که همین اطلاعات برای خط لوله بخاری که باید در مدت ۱۰۰۰۰۰ ساعت کار در دمای زیاد مقاومت کند، ناچیز است. بنابراین برای ارزیابی کارایی مواد در دماهای متفاوت، آزمایش‌های ویژه‌ای مورد نیاز است. در آزمایش خزش تغییرات ابعادی که در اثر قرار گرفتن در دمای زیاد به وجود می‌آید، اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که آزمایش گسیختگی ناشی از تنش، اثر دما بر مشخصات تحمل بار در طولانی مدت را اندازه می‌گیرد.

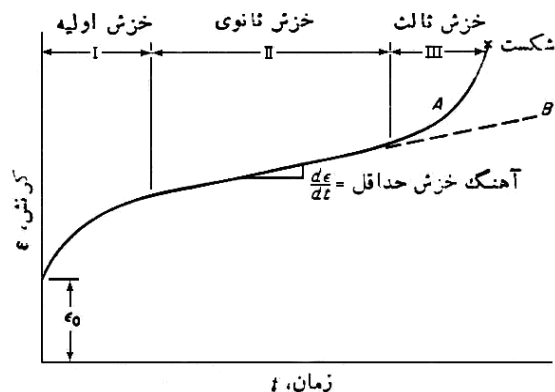
۲-۳ منحنی خزش

تغییر شکل فزاینده ماده‌ای تحت تنش ثابت خزش نام دارد. برای تعیین منحنی خزش مهندسی یک فلز، بار ثابتی به یک نمونه کشش در دمای ثابت وارد شده و کرنش (کشیدگی) نمونه بر

حسب تابعی از زمان تعیین می‌شود. با اینکه اندازه گیری مقاومت به خزش ساده می‌نماید، ولی این کار به وسایل آزمایشگاهی زیادی نیاز دارد و انجام آن ممکن است ماه‌ها طول بکشد.

منحنی A در شکل (۱-۲) شکل آرمانی یک منحنی خزش را نشان می‌دهد. شیب این منحنی $(d\varepsilon/dt)$ آهنگ خزش نامیده می‌شود. پس از ازدیاد طول سریع اولیه نمونه، ε_0 ، آهنگ خزش با زمان کم می‌شود و سپس به یک حالت پایدار می‌رسد که در آن آهنگ خزش با زمان تغییر کمی می‌کند و بالاخره پس از آن تا وقوع شکست سریعاً با زمان زیاد می‌شود. میزان سهولت تشخیص این سه مرحله از یکدیگر به شدت تنش وارده و دما بستگی دارد.

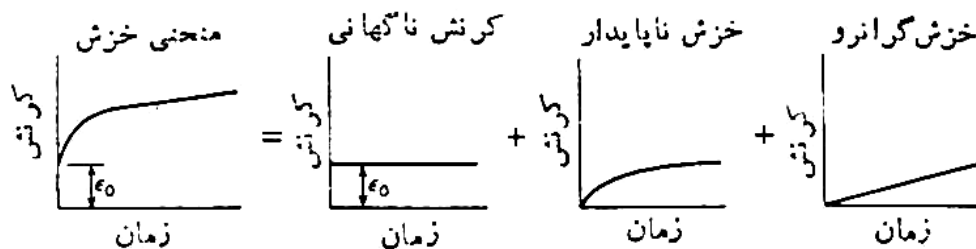
در یک آزمایش خزش مهندسی، باید بار، حین آزمایش ثابت باشد. بنابراین با ازدیاد طول نمونه و کاهش سطح مقطع، تنش محوری زیاد می‌شود. معمولاً مقدار تنشی که در گزارش‌های آزمایش ذکر می‌شود، تنش وارده اولیه است. برای اینکه آزمایش خزش در شرایط تنش ثابت انجام شود، روش‌هایی برای جبران تغییر ابعادی نمونه به کار برده می‌شود. وقتی آزمایش در تنش ثابت انجام می‌شود، غالباً ناحیه تسریع آهنگ خزش (ناحیه III در شکل (۱-۲)) وجود ندارد و منحنی خزش شبیه منحنی B در شکل (۱-۲) به دست می‌آید. با این حال، هنگامی که تحت آزمایش‌های با تنش ثابت، در فلز تغییرات متالورژیکی ایجاد شود، خزش تسریع شده به دست می‌آید. منحنی B نشان دهنده خزش اصلی فلز است.



شکل ۱-۲: منحنی خزش نشان دهنده سه مرحله خزش، منحنی A آزمایش در بار ثابت و B در تنش ثابت [۴۹].

کارهای پیشرفته‌ای که آندرد^۱ در زمینه خزش انجام داده تأثیر زیادی در درک این موضوع داشته است [۷]. او فرض کرد که منحنی خزش در تنش ثابت، از انطباق دو فرآیند خزش جداگانه که پس از کرنش ناگهانی حاصل از اعمال بار ناشی می‌شوند، به وجود می‌آید. اولین مؤلفه منحنی خزش، خزش ناپایداری است که در آن آهنگ خزش با زمان کم می‌شود. یک مؤلفه خزش گرانبه یا آهنگ ثابت به اولین مؤلفه اضافه می‌شود. انطباق این فرآیندهای خزش در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. آندرد دریافت که منحنی خزش با معادله تجربی زیر نشان داده می‌شود.

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \beta t^{1/3})e^{(kt)} \quad (1-2)$$



شکل ۲-۲: تحلیل آندرد از فرآیندهای رقابت‌کننده‌ای که منحنی خزش را تعیین می‌کنند [۵۱].

که ε کرنش در زمان t و β و k اعداد ثابت هستند. خزش ناپایدار با β نشان داده می‌شود و معادله (۱-۲) هنگامی که $k = 0$ باشد به این شکل بر می‌گردد. ثابت k نشان‌دهنده مقدار کشیدگی بر واحد طولی است که در یک آهنگ ثابت ایجاد می‌شود. معادله دیگری که از معادله آندرد مناسب‌تر است، توسط گارو فالو^۱ ارائه شد [۱۱].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t(1 - e^{-rt}) + \varepsilon_s t \quad (۲-۲)$$

ε_0 = کرنش لحظه‌ای در بارگذاری

ε_t = حدتنش ناپایدار

r = نسبت آهنگ خزش ناپایدار به کرنش خزش ناپایدار

ε_s = آهنگ خزش حالت پایدار

به طور کلی منحنی خزش متشکل از سه مرحله در نظر گرفته می‌شود. در واژگان فنی کرنش لحظه‌ای که در شکل (۱-۲) با ε_0 علامتگذاری شده، اغلب اولین مرحله خزش نامیده می‌شود و بنابراین به نظر می‌رسد منحنی خزش چهار مرحله داشته باشد. عملاً کرنشی که با ε_0 نشان داده می‌شود در اثر وارد شدن بار به صورت لحظه‌ای رخ می‌دهد. حتی اگر تنش وارده کمتر از تنش تسلیم باشد، تمام کرنش لحظه‌ای کشسان نیست. بیشتر این کرنش در اثر رها شدن بار به سرعت قابل بازیابی است (کشسان)، در صورتی که بخشی با زمان بازیابی می‌شود (ناکشسان) و بقیه غیرقابل بازیابی است (مومسان). با اینکه کرنش لحظه‌ای در واقع خزش نیست ولی مهم است، زیرا ممکن است بخش زیادی از کرنش کل مجاز در قطعات دستگاہ را تشکیل دهد. گاهی کرنش لحظه‌ای در نمونه

1.GaroFalo

خزش از کرنش کل کم می‌شود تا کرنش منحصراً ناشی از خزش به دست آید. شروع این نوع منحنی‌های خزش از مبدأ محورهای مختصات است.

اولین مرحله خزش، که خزش اولیه نام دارد، ناحیه ای است که کم شدن آهنگ خزش را نشان می‌دهد. خزش اولیه یک دوره خزش ناپایدار غالبی است که در آن مقاومت خزش مواد با کمک تغییرشکل خود آن زیاد می‌شود. در دماها و تنش‌های کم، مثل خزش قلع در دمای اتاق، خزش اولیه فرآیندی غالب است. مرحله دوم خزش، موسوم به خزش ثانوی، دوره ای با آهنگ خزش تقریباً ثابت است که از ایجاد تعادل بین فرآیندهای رقابت کننده کارسختی و بازیابی نتیجه می‌شود، معمولاً با توجه به این دلیل خزش مرحله دوم خزش حالت پایدار گفته می‌شود. مقدار میانگین آهنگ خزش در مرحله ثانوی، آهنگ حداقل خزش نامیده می‌شود. مرحله سوم با خزش ثالث عمدتاً در آزمایش‌های خزش با بار ثابت و تنش‌های زیاد در دماهای زیاد رخ می‌دهد. خزش ثالث هنگامی رخ می‌دهد که کاهش مؤثری در سطح مقطع به علت گلویی با تشکیل حفره داخلی به وجود آید. خزش مرحله ثالث اغلب با تغییرات متالورژیکی مانند درشت شدن ذرات رسوب، باز بلوری، یا تغییرات نفوذی در فازهای موجود همراه است.

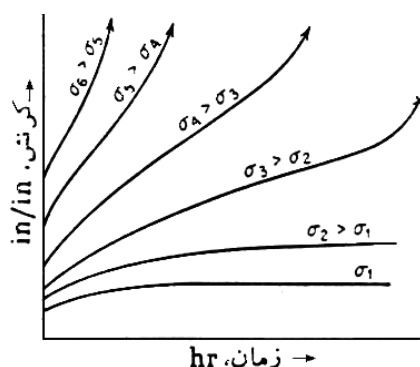
شکل (۲-۳) اثر تنش وارده بر منحنی خزش در دمای ثابت را نشان می‌دهد. پیداست که منحنی خزش با سه مرحله کاملاً مشخص فقط برای ترکیبات ویژه‌ای از تنش و دما به دست می‌آید. برای خزش در تنش ثابت و دماهای مختلف خانواده مشابهی از منحنی‌های خزش به دست می‌آید. هرچه دما بیشتر باشد، آهنگ خزش بیشتر است.

حداقل آهنگ خزش مهم‌ترین پارامتر طراحی است که از منحنی خزش به دست می‌آید. معمولاً دو معیار از این پارامتر به کار می‌رود:

۱- تنش لازم برای تولید آهنک خزشی به مقدار $0/0001$ درصد در ساعت یا ۱ درصد در 10000 ساعت.

۲- تنش لازم برای تولید آهنک خزشی به مقدار $0/00001$ درصد در ساعت یا ۱ درصد در 100000 ساعت (حدود ۱۱/۵ سال).

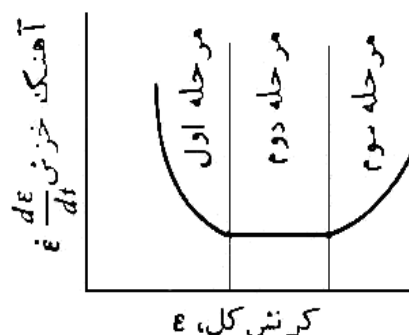
اولین معیار عمدتاً برای شرایط مربوط به آلیاژهای موتور جت است. در صورتی که معیار دوم برای توربین‌های بخار و دستگاه‌های مشابه آن به کار می‌رود. غالباً ترسیم $log-log$ تنش برحسب حداقل آهنک خزش، به یک خط راست منجر می‌شود.



شکل ۲-۳: نمودار شمایی اثر تنش بر منحنی‌های خزش در دمای ثابت [۴۹].

۲-۴ تغییرات ساختاری حین خزش

اگر شیب منحنی خزش در شکل (۲-۱) برحسب کرنش رسم شود، یک منحنی آهنک خزش برحسب کرنش کل به دست می‌آید که شکل (۲-۴) نمایشگر آن است. این منحنی به طور کامل تغییرات زیاد آهنک خزش را هنگام آزمایش خزش نشان می‌دهد. چون تنش و دما ثابت هستند، این تغییر آهنک خزش، ناشی از تغییر ساختار داخلی ماده با کرنش خزشی و زمان است.



شکل ۲-۴: آهنگ کرنش به صورت تابعی از کرنش کل [۵۱].

فرآیندهای اصلی تغییر شکل در دمای زیاد عبارت اند از لغزش، تشکیل دانه فرعی و لغزش مرزدانه، مشخصه تغییر شکل در دمای بالا ناهمگنی بیش از حد است. مقادیر ازدیاد طول موضعی خزش در مکان های مختلفی از یک نمونه خزش نشان داده اند که کرنش موضعی تحت تأثیر بسیاری تغییرات دوره ای با زمان قرار می گیرد که در تغییرات کرنش طول سنجه کل نمونه ضبط نمی شود. در نمونه های درشت دانه، ممکن است نواحی موضعی تحت چرخش های شبکه ای که نواحی با اختلاف آرایش به وجود می آورند، ایجاد شوند.

تعدادی از فرآیندهای ثانوی تغییر شکل در دمای زیاد در فلزات مشاهده شده اند. این فرآیندها عبارت اند از لغزش مضاعف، تشکیل نوارهای لغزش بی نهایت درشت، نوارهای خم، تشکیل تاخوردگی در مرزهای دانه، و جابجا شدن مرزهای دانه. بسیاری از مطالعات در دمای زیاد روی نمونه های ساخته شده از ورق آلومینیم درشت دانه انجام شده است. (آلومینیم از این رو برای این نوع مطالعات مناسب است چون پوسته اکسیدی ظریف روی آن مسائل ناشی از اکسایش را حذف می کند). همچنین مطالعاتی نیز بر تغییر شکل خزش در آهن، منیزیم، و سرب انجام شده است. یادآوری این نکته مهم خواهد بود که کلیه مطالعات پیرامون تغییر شکل در دمای زیاد در شرایطی انجام می شود که آهنگ خزش در ۱۰۰ یا ۱۰۰۰ ساعت به مقدار چند درصد باشد، در صورتی که در بسیاری

کاربردهای مهندسی، آهنگ خزشی به مقدار کمتر از ۱ درصد در ۱۰۰۰۰۰ ساعت لازم است. چون فرآیندهای تغییر شکل که در دمای بالا رخ می‌دهند علاوه بر دما به آهنگ کرنش نیز بستگی دارند، همیشه نمی‌توان نتایج به دست آمده در شرایط آهنگ کرنش زیاد را برای شرایطی با اهمیت عملی بیشتر ملاک قرار داد.

۲-۴-۱ تغییر شکل توسط لغزش

وقتی فلزات در دمای بالا تغییر شکل می‌دهند این امکان وجود دارد که سیستم‌های لغزش جدیدی فعال شود. در دمایی بالای 260°C (500°F) لغزش در آلومینیم بر صفحات $\{111\}$ ، $\{100\}$ ، $\{211\}$ رخ می‌دهد. روی و منیزیم در دمای بالا روی صفحاتی غیر از قاعده لغزش می‌کنند.

۲-۴-۲ تشکیل دانه فرعی

تغییر شکل خزش کاملاً غیرهمگن بوده و احتمال زیادی برای خمش شبکه، خصوصاً نزدیک مرزهای دانه، به وجود می‌آید. خمش به تشکیل تعداد بسیار زیادی نابجایی هم‌علامت منجر شده و چون نابجایی در دمای زیاد به راحتی صعود می‌کند، این نابجایی‌ها به صورت یک مرزدانه تنگ قرار می‌گیرند. تشکیل ساختار دانه فرعی یا ساختار سلولی حین خزش اولیه به وسیله اشعه X، فلزنگاری و میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته است. چگالی نابجایی شبکه دانه فرعی حین خزش اولیه تا آن حد زیاد می‌شود که اساساً حین خزش حالت پایدار ثابت بماند. اندازه دانه فرعی به تنش دما بستگی دارد. دانه‌های فرعی بزرگ در دمای زیاد و تنش یا آهنگ خزش کم تشکیل می‌شوند.

تشکیل یک ساختار دانه فرعی در فلزاتی که انرژی خطای انباشتگی زیادی دارند به سادگی رخ می‌دهد. در مورد فلزاتی با انرژی خطای انباشتگی کم به جای تشکیل یک ساختار سلولی حین خزش

اولیه تمایل به باز بلوری وجود دارد، بنابراین آن‌ها مانند سدهای کم اثری در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند.

۲-۴-۳ لغزش مرزدانه

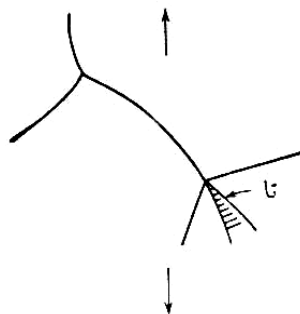
دانه‌های فلزات چند بلوری در دمای زیاد قادرند نسبت به یکدیگر حرکت کنند. لغزش مرزدانه یک فرآیند برش است که در جهت مرزدانه رخ می‌دهد. این فرآیند با ازدیاد دما و یا کاهش آهنگ کرنش پیشرفت می‌کند. با اینکه بیشتر تحقیقات حاکی از این هستند که لغزش در امتداد مرزدانه، مانند حرکت ظاهری دو دانه، رخ می‌دهد، ولی مشاهدات دیگری نشان می‌دهند که جریان در ناحیه‌ای هموار و به فاصله‌ای معین از مرزدانه در داخل دانه رخ می‌دهد. لغزش مرزدانه به طور منقطع با زمان رخ می‌دهد و مقدار جابجایی برشی در امتداد مرزدانه یکنواخت نیست.

مطالعات حاکی است که کرنش ناشی از لغزش مرزدانه از فقط چند درصد تا ۵۰ درصد کرنش کل را نشان می‌دهد، که این مقدار به شرایط آزمایش و جنس فلز بستگی دارد. با این حال، یک رابطه خطی بین فاصله کل لغزش مرزدانه و ازدیاد طول کل برای بیشتر سیستم‌های مطالعه شده به دست آمده است. چون کرنش کل مجموع کرنش حاصل از لغزش درون دانه‌ها و لغزش مرزدانه است، رابطه نزدیک بین فاصله لغزش و کرنش کلی به این معنی است که بین لغزش بلورشناسی و لغزش مرزدانه رابطه نزدیک یکسانی وجود دارد.

تنها راهی که لغزش درون دانه‌ها می‌تواند بر لغزش مرزدانه تأثیر بگذارد در حالتی است که توسط لبه‌ها یا برآمدگی‌های موجود در مرزدانه‌ای که باید بریده می‌شود، از لغزش جلوگیری شود. به این ترتیب آهنگ لغزش توسط آهنگ تغییر شکل دانه کنترل می‌شود. مکانیزمی که بر اساس آن لغزش درون دانه‌ها، لغزیدن مرزدانه را کنترل می‌کند هر چه باشد، از دیدگاه عملی لغزیدن مرزدانه برای تغییر شکل خزش عامل بحرانی نیست چون عناصر آلیاژی که برای جلوگیری از لغزش اضافه

می‌شوند از لغزیدن مرزدانه نیز جلوگیری می‌کنند. با اینکه اغلب به آلیاژهای مرکب مورد مصرف در دمای زیاد، عناصر آلیاژی اضافه می‌شود تا خواص مرزدانه تقویت شود، اما عموماً این عناصر ایجاد ترک و نرمی کمی را سبب می‌شوند.

اهمیت عمده لغزش مرزدانه ایجاد شکست در مرزدانه است. برای اینکه مرزدانه بدون ایجاد ترک در آن تغییر شکل دهد، باید مکانیزم تغییر شکل طوری باشد که کرنش در امتداد مرزدانه پیوسته بماند. روش فراهم آوردن امکان برای کرنش مرزدانه در دمای زیاد، به مدد ایجاد تاهایی در انتهای مرزدانه است (شکل ۲-۵)). یک روش دیگر بازیابی، مهاجرت مرزدانه است که مرزدانه عمود بر خود تحت اثر تنش برشی حرکت کرده و تمرکز کرنش را برطرف می‌کند. مرزدانه‌های موجی شکل که غالباً حین خزش در دمای بالا مشاهده می‌شوند محصول تغییر شکل ناهمگن مرزدانه و مهاجرت مرزدانه‌اند.



شکل ۲-۵: تشکیل تا (به طور شمایی) در یک نقطه سه گانه [۴۹].

۲-۵ خزش در دماهای کم

خزش فقط به این دلیل انجام می‌شود که موانع موجود بر سر راه تغییر شکل در اثر کرنش مرکب تنش با نوسانات حرارتی از بین می‌روند. فرآیندهایی که با نفوذ کنترل می‌شوند، عمدتاً در دماهای حدود بیش از نصف نقطه ذوب اهمیت پیدا می‌کنند. در دماهای کمتر فرآیندهای بازیابی که

مستقل از نفوذند مانند لغزش متقاطع، نقش مهمی در فرآیند خزش دارند. خزش در دمای زیاد عمدتاً خزش گرانرو یا حالت پایدار است، در صورتی که در کمتر از نصف نقطه ذوب، خزش اولیه یا ناپایدار تسلط دارد.

معادله آندرد برای توضیح خزش پایدار و ناپایدار، در قسمت قبل بررسی شد. معادله کلی دیگری برای قوانین زمانی خزش توسط کاترل پیشنهاد شده است.

$$\dot{\varepsilon} = A t^{-n'} \quad (3-2)$$

که A و n' اعداد ثابت تجربی و t زمان است. بسته به مقدار n' ، انواع مختلف رفتار خزشی توسط معادله (3-2) شرح داده شده است. اگر $n' = 0$ باشد، آهنگ خزش ثابت است و معادله (3-2) خزش حالت پایدار را نشان می‌دهد. وقتی $n' = 1$ است، معادله (3-2) به شکل زیر در می‌آید.

$$\varepsilon = \alpha \ln t \quad (4-2)$$

در رابطه فوق α عدد ثابت است. معادله (4-2) قانون لگاریتمی خزش است که برای دماهای کم به دست آمده است.

وقتی $n' = 2.3$ باشد، معادله (3-2) به همان معادله آندرد برای خزش ناپایدار تبدیل می‌شود.

$$\varepsilon = \beta t^{1.3} \quad (5-2)$$

خزش لگاریتمی در دماها و تنش‌های کم، که امکان وقوع بازیابی نیست، انجام می‌شود. به نظر می‌رسد فرآیند جامعی وجود داشته باشد که مرحله تعیین آهنگ در آن، انرژی فعال‌سازی برای حرکت دادن یک نابجایی باشد. در شروع اعمال تنش، نابجایی‌هایی که کمترین انرژی فعال‌سازی را دارند اول حرکت می‌کنند تا کرنش اولیه خزش را تولید کنند. با خروج نابجایی‌هایی که آسان حرکت

می‌کنند، خزش فقط با حرکت نابجایی‌های دارای انرژی فعال‌سازی بیشتر ادامه می‌یابد. بنابراین انرژی فعال‌سازی فرآیند به طور مداوم زیاد شده و آهنگ خزش کمتر می‌شود. خزش لگاریتمی یا خزش از بین برنده استحکام، در دمای کم از یک معادله مکانیکی حالت پیروی می‌کند، مثلاً آهنگ کرنش در یک زمان معین فقط به مقادیر لحظه‌ای تنش و کرنش بستگی دارد، نه به تاریخچه کرنش قبلی، اما خزش در دماهای بیشتر به تاریخچه حرارتی و کرنش قبلی بستگی زیادی دارد و بنابراین از معادله مکانیکی حالت پیروی نمی‌کند.

۲-۶ خزش در دمای زیاد

شرایط برای خزش حالت پایدار هنگامی برقرار می‌شود که آهنگ بازیابی به حدی زیاد و آهنگ کارسختی به حدی کم باشد که بین این عوامل رقیب تعادل برقرار شود. این شرط گاهی خزش بازیابی نام می‌گیرد. اگر آهنگ کارسختی $h = \partial\sigma/\partial\varepsilon$ و آهنگ بازیابی $r = -\partial\sigma/\partial t$ باشد، برای یک آهنگ خزش حالت پایدار، باید تنش جریان ثابت باقی بماند [۴۶].

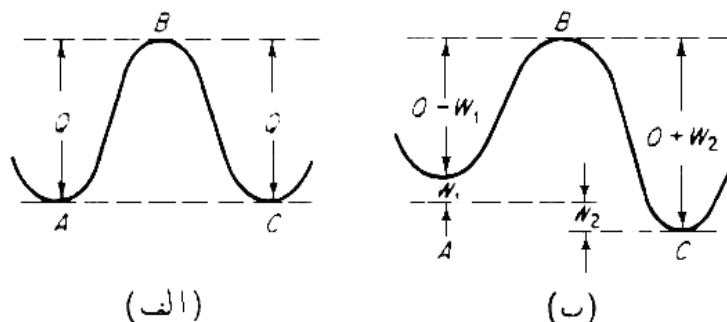
$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} d\varepsilon = 0$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\partial\sigma/\partial t}{\partial\sigma/\partial\varepsilon} = \frac{r}{h} \quad (۲-۱۰)$$

یکی از مشکلات مهم خزش در دمای زیاد تعیین رابطه تنش با آهنگ خزش حالت پایدار است. البته روابط تجربی آزمایش شده‌ای به دست آمده‌اند، ولی هنوز در ارائه معادلات معتبری از $\dot{\varepsilon}$ برحسب σ از اصول اولیه با استفاده از الگوهای نابجایی مشکل وجود دارد. این امر چندان تعجبی ندارد، زیرا برخلاف تغییر سریع دما، انتظار می‌رود برای ایجاد تغییر عمده‌ای در ساختار نابجایی، تنش

به سرعت تغییر کند. چون آهنگ خزش توسط دما، تنش و ساختار نابجایی تعیین می‌شود، و تغییر تنش منجر به تغییرات ساختاری می‌شود، تعیین اثر صرف تنش بر آهنگ خزش کار آسانی نیست.

شکل کلی معادلات تجربی خزش می‌تواند بر اساس الگوی اثر تنش بر فرآیند خزش فعال شده قرار گیرد. برای اینکه مکانیزم خزش عمل کند، باید یک سد انرژی از نوع نشان داده شده در شکل مسلط باشد. برای اینکه ماده به مقدار واحد کرنش کند، یک اتم باید از وضعیت حداقل انرژی آزاد در A حرکت کند، از روی سد انرژی B بگذرد و به انرژی آزاد حداقل دیگری در C برود. ارتفاع سد انرژی، Q است. حال اگر تنشی از C به A وارد شود، کار مثبت انجام می‌شود و ارتفاع سد برای تغییر شکل از A به C کمتر شده و برای تغییر شکل از C به A زیاد می‌شود. این سد انرژی با شکل (۲-۶-ب) نشان داده شده است:



شکل ۲-۶: اثر تنش بر مکانیزم خزش فعال شده در اثر دما [۴۹].

۲-۷ آلیاژهای مناسب برای دمای زیاد

آلیاژهای دما بالا گروهی از مواد مرکب هستند که برای کاربرد خاصی تهیه شده‌اند. درک اصول متالورژیکی که در تهیه این آلیاژها به کار می‌رود از جنبه شناخت نحوه تأثیر متغیرهای متالورژیکی بر

رفتار خزش مهم است. اساساً تهیه آلیاژهای دما بالا ماحصل تحقیقات تجربی پرزحمتی بوده و اصول این پبشرفت ها با نگاهی به دست آوردهای گذشته به دست آمده است.

به طور کلی هرچه نقطه ذوب فلز بیشتر باشد مقاومت به خزش بیشتر است زیرا آهنگ خودنفوذی در فلزات با زیاد شدن T_m ، کمتر می شود. چون لغزش متقاطع نابجایی مرحله مهمی در صعود نابجایی برای اجتناب از برخورد با مانع است، فلزات دارای انرژی خطای انباشتگی کم، مقاومت بیشتری به خزش دارند، چون به هر حال لغزش متقاطع نابجایی های جزئی، ممتد شکل است. اضافات آلیاژی محلول جامد با ظرفیت زیاد مؤثرترین عناصر هستند، چون انرژی خطای انباشتگی را خیلی کاهش می دهند.

ابراآلیاژهایی با مبنای نیکل محتوی مقادیر کمی Al یا Ti هستند که با زمینه ترکیب شده و رسوب های ریزی از ترکیبات بین فلزی Ni_3Ti و Ni_3Al یا $Ni_3(Ti$ و $Al)$ را که می توانند قبل از عمل خزش توسط عملیات حرارتی رسوب داده شوند یا مقدمتاً^۱ حین تغییر شکل خزش در نابجایی ها ته نشین شوند، تشکیل می دهند. پایداری گرمایی رسوب یا فازهای استحکام دهنده هم بسیار مهم است. چون بیشترین استحکام دهی با ریزترین ذرات که ناپایدارترین ذرات هستند به وجود می آید، معمولاً^۲ یک فرآیند بحرانی عملیات حرارتی و ترمودینامیکی برای ایجاد بهترین استحکام در دمای زیاد انجام می شود. درشت شدن رسوب با استفاده از فاز پراکنده ای که تقریباً^۳ در زمینه نامحلول است به حداقل می رسد، طوری که انحلال مجدد ذرات ریز و رشد ذرات درشت تر آهسته است. این شرایط در آلیاژهای استحکام یافته از پراکندگی که در آن ها ذرات اکسیدی بی اثری مانند (SiO_2) و (ThO_2) و (Al_2O_3) با پودر از جنس فلز زمینه مخلوط شده و مخلوط حاصل توسط فنون متالورژی پودر یکپارچه می شود، به بهترین وضع خود می رسد. نیکل TD و پودر آلومینیم کلوخه شده (SAP) مثال هایی از این نوع آلیاژ هستند.

گرچه در آلیاژهای دما بالا تأکید بر فرآیندهای استحکام‌دهی قرار دارد، ملاحظات دیگر نیز دارای اهمیت هستند. ساختن آلیاژ مستحکمی در دمای زیاد توسط گرم کاری، شکل دادن سرد یا جوشکاری ممکن است مشکل باشد. بعضی از مستحکم‌ترین آلیاژها به قدری زیاد آلیاژی شده‌اند که فقط با ریخته‌گری دقیق قابل تولیدند. موادی که در دمای زیاد کار می‌کنند، علاوه بر استحکام باید در برابر محیط گرمایی که در آن قرار دارند نیز مقاوم باشند. برخی آلیاژهای با استحکام زیاد مانند مولیبدن، مقاومت زیادی در برابر اکسایش ندارند و در صورتی که در دمای زیاد مورد استفاده قرار گیرند باید با یک ماده مقاوم در برابر اکسایش پوشش داده شوند. متأسفانه این کار در قابلیت اطمینان، کنترل کیفیت و ساخت، مشکلاتی به وجود می‌آورد. در موارد دیگر ترکیب شیمیایی آلیاژ را باید تعدیل کرد تا بین استحکام زیاد و مقاومت در برابر اکسایش، موازنه برقرار شود.

فصل سوم:



مروری بر

پژوهش‌های پیشین

۱-۳ مقدمه

در فصل گذشته در مورد اهمیت پدیده خزش در مکانیک شکست بحث شد. در این فصل ابتدا به مطالعات صورت گرفته در زمینه خزش اشاره می‌شود، سپس اهداف انجام این تحقیق، نقاط قوت، و آنچه که این تحقیق را از مورد مشابه متمایز می‌سازد، بیان خواهد شد.

۲-۳ تاریخچه خزش

اولین قدم در تحلیل تنش و بررسی تغییرشکل مواد در دمای بالا، در سال ۱۹۲۹ توسط بایلی^۱ صورت گرفت. او یک رابطه غیرخطی بین نرخ کرنش خزشی و تنش بدین ترتیب ارائه نمود [۱]:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (۱-۳)$$

$\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش خزشی، σ تنش، A و n ثابت‌های وابسته به دما می‌باشند. بایلی از این رابطه به جای قانون هوک در تحلیل تنش-کرنش در ناحیه خزشی استفاده نمود. این رابطه برای حالت تنش تک محوری می‌باشد در حالی که در مسایل واقعی و عملی شرایط تنشی چند محوری حکم فرماست.

معادله تک محوری فوق در سال ۱۹۳۵ توسط بایلی برای حالت چند محوری عمومیت پیدا کرد. مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسئله و هدف در سیستم‌های چند محوری معادل سازی و تبدیل تنش‌ها در این سیستم‌ها به حالت تنش تک محوری می‌باشد. روابط کلی که توسط بایلی برای خزش پیشنهاد شد بر اساس جهات و تنش‌های اصلی می‌باشد. برای مثال نرخ کرنش خزشی در جهت اصلی x بدین ترتیب بیان شده است:

^۱. Bailey

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{A}{2} \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z)^2 \right]^m \times [(\sigma_x - \sigma_y)^{n-2m} - (\sigma_z - \sigma_x)^{n-2m}] \quad (2-3)$$

ثابت‌های ماده هستند که به میزان درجه حرارت بستگی دارد و $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ تنش‌های اصلی می‌باشند. برای کشش ساده با قرار دادن ($\sigma_z = 0, \sigma_y = 0$) معادله فوق به معادله $\dot{\epsilon}_x = A \sigma_x^n$ کاهش می‌یابد. که مشابه معادله (۱-۳) می‌باشد. داده‌های آزمایشگاهی در تغییر شکل خزشی لوله‌های تحت فشار داخلی و پیچش محوری ساده با مقادیر حاصل از معادله فوق تطابق دارد [۲].

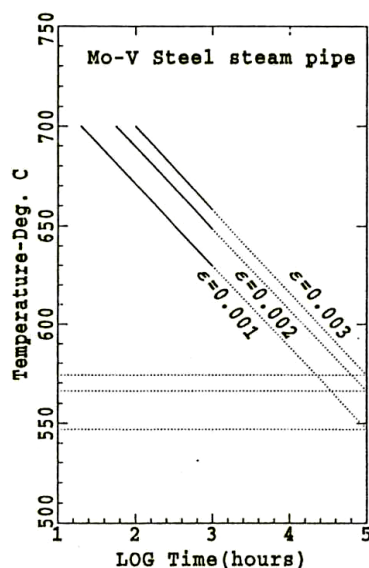
نتایج حاصله از اقدامات بایلی در ۱۹۳۵ منجر به تئوری‌ای شد که بیان می‌کند فلزات در حالتی که تحت تنش‌های ترکیبی قرار دارند، تغییر شکل خزشی کمتری نسبت به حالت کشش محض پیدا می‌کنند. به هر حال برای بدست آوردن رابطه بین تنش‌های چند محوری و معادلسازی با حالت تک محوری، نیاز به روابط و آزمایشات دقیق‌تری احساس می‌شد.

در تلاشی دیگر، برای بدست آوردن رابطه بین تغییر شکل خزشی چند محوری و خزش تک محوری، سودربرگ^۱ در ۱۹۴۱ تئوری تسلیمی براساس حداکثر تنش و حداکثر کرنش ارائه کرد. او این تئوری را برای یک لوله جدار نازک تحت فشار داخلی به کار برد و فرض کرد که نرخ کرنش ثابت است و خطوط کرنش با حداقل شیب به تنش‌ها مرتبط هستند. سودربرگ بیان داشت که نرخ کرنش خزشی مماسی $\sqrt{3}/2$ برابر نرخ کرنش خزشی محوری می‌باشد. وی در نهایت بیان کرد که بررسی خزش در لوله‌های جدار ضخیم موضوعی پیچیده و مشکل می‌باشد. در حقیقت سودربرگ تئوری پلاستیسیته (تئوری تغییر شکل هنکی^۲) را اصلاح نموده است [۳].

^۱. Soderberg

^۲. Hencky

بایلی در ۱۹۵۱ چند موضوع مهم و اصلی را در تحلیل خزش در نظر گرفت که در طراحی خطوط لوله برای شرایط کاری دما- فشار بالا باید مورد توجه قرار گیرد. او به طور کلی درباره درجه حرارت و توزیع تنش‌ها برای طرح‌های مورد نظر بحث کرده است. وی همچنین آزمایشات خزش را بر روی فلز *Mo-V* برای شرایط کاری با سطح تنش بالا و درجه حرارت‌های زیاد از 630°C تا 700°C انجام داده و گزارش‌هایی ارائه نموده است. برای تعیین کرنش‌هایی به میزان 0.001 و 0.002 و 0.003 منحنی‌هایی ترسیم نموده است که دما را به عنوان محور عمودی و لگاریتم زمان را محور افقی در نظر گرفته است. او نشان داد که بین دما و لگاریتم زمان یک رابطه خطی وجود دارد که در شکل (۳-۱) قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل ۳-۱: نتایج آزمایش خزش بر روی فلز *Mo-V* در فشار 3000 Psi (45 MPa) [۴].

او این خطوط را تا $100,000$ ساعت امتداد داده است تا دمای طراحی را بتواند بدست آورد. دمای طراحی برای لوله‌ها، توزیع تنش، خزش در لوله‌های تحت فشار داخلی در مقاله‌ای جداگانه توسط بایلی در ۱۹۵۱ مورد بررسی قرار گرفته است. او فرمول‌هایی را برای تنش‌های اصلی در استوانه

جدار ضخیم بدست آورده است او مدعی شده است که برای بدست آوردن کرنش‌های خزشی می‌توان از کرنش‌های الاستیک صرف نظر نمود.

او برای بدست آوردن نرخ کرنش‌های خزشی در مختصات سه بعدی از فرمول (۳-۱) که قبلاً^۱ تعریف شده است استفاده نموده است همچنین رابطه‌ای را برای درجه حرارت لوله بدست آورده است که وابسته به فشار داخلی می‌باشد [۴].

انجام آزمایشات خزشی برای یک دوره زمانی طولانی مدت تحت شرایط کاری دما - فشار بالا در لوله‌های بخار بسیار مشکل و دشوار می‌باشد. اولین بار توسط بایلی آزمایش‌هایی در دماهای بسیار بالا صورت گرفت. او آزمایش خزش را به صورت شتاب دار انجام داد و برای مقادیر مشخصی از کرنش، تنش را استنتاج کرد و دمای طراحی و عمر باقی‌مانده را از طریق برون‌یابی تخمین زد.

رابطه خطی که بین دما و لگاریتم زمان به ازای کرنش‌های خزشی معین در سال ۱۹۵۱ توسط بایلی ارائه گردید و در ۱۹۵۲ توسط لارسون^۱ و میلر توسعه داده شد. آن‌ها یک رابطه زمان - دما برای تنش و زمان شکست ارائه نمودند و نشان دادند خطوط به ازای مقادیر مختلف تنش در نقطه‌ای روی محور عمودی همگرا می‌شوند. آن‌ها پارامتر لارسون - میلر (P_{LM}) را تعریف کردند. پارامتر لارسون - میلر بر اساس درجه حرارت لگاریتم زمان شکست تعریف می‌شود:

$$P_{LM}(\sigma) = T(C + \log_{10} t_R) \quad (۳-۳)$$

در رابطه فوق P_{LM} پارامتر لارسون-میلر، $\log_{10} t_R$ لگاریتم زمان، C ضریب لارسون-میلر، σ تنش و T : دما است.

^۱Larson

لارسون و میلر برای اکثر مواد مقدار $C = 20$ را انتخاب نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که این پارامتر فقط به تنش بستگی دارد و منحنی‌های پارامتر (لارسون - میلر) را معرفی کردند. پارامتر لارسون - میلر در تحلیل شکست خزشی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از محققان استفاده از مقدار $C = 20$ را برای کلیه موارد بسیار مورد سؤال قرار دادند و بدین ترتیب ایراداتی به لارسون - میلر گرفتند و در نهایت پارامترهای دیگری پیشنهاد شد [۵].

مانسون^۱ و هافرد^۲ در سال ۱۹۵۳ لگاریتم زمان شکست را به صورت تابعی از درجه حرارت ترسیم نمودند و نشان دادند که برای مقادیر مختلف تنش این خطوط به نقطه‌ای همگرا می‌شوند. این نقطه به خصوصیات ماده کاملاً وابسته می‌باشد. آن‌ها پارامتری را معرفی کردند که تا اندازه‌ای کلی‌تر از پارامتر لارسون - میلر برای مواد مختلف بود [۶].

اسکالت^۳ در سال ۱۹۶۰ مشاهده کرد که در حل خزش تیرها نقاطی در مقطع تیر وجود دارند که در آن‌ها تنش تغییر نمی‌کند. این تنش ثابت، تنش مرجع نامیده شده بود. با انجام آزمایش خزش در این تنش ثابت، او توانست تغییر شکل تیر را پیش‌بینی کند. در این روش رفتار سازه‌ها تنها برای شرایطی که آزمایش خزش تحت این فشار مرجع صورت گیرد قابل ارزیابی بود [۸].

در نهایت مانسون در ۱۹۶۳ پارامتر عمومی‌تر یافته‌ای را معرفی کرد که از پارامترهای لارسون - میلر و مانسون - هافرد کلی‌تر می‌باشد [۹].

ماریوت^۴ و لیکلی^۱ در ۱۹۶۴ مشاهده کردند که در طی فرآیند خزش نقاطی وجود دارند که در آن تنش با زمان تغییر نمی‌کند. در استوانه‌های جدار ضخیم تحت فشار این نقطه، نقطه اساسی^۲

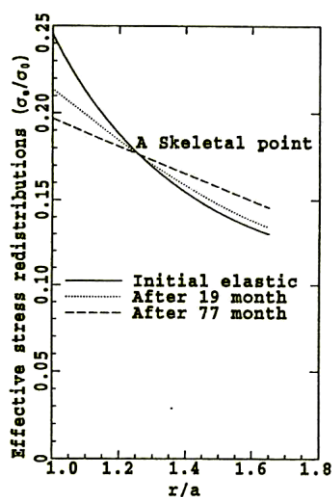
^۱ . Manson

^۲ . Haferd

^۳ . Schulte

^۴ . Marriot

نامیده شده است که در شکل (۲-۳) نقطه A نشان داده شده است. به هر حال از این نقطه در هیچ بررسی استفاده نکرده‌اند [۱۰].



شکل ۲-۳: توزیع تنش‌های مؤثر در ضخامت لوله از حالت الاستیک تا خزش حالت پایدار [۱۰].

مکنزی^۳ در سال ۱۹۶۸ روشی را برای بدست آوردن تنش مرجع پیشنهاد نمود. این روش، مطابق رابطه زیر، مشروط به پیروی رفتار ماده از قانون جریان خزشی می‌باشد:

$$\dot{\epsilon} = B \sigma_{ref}^n \quad (۴-۳)$$

تحلیل تنش‌ها در حالت پایدار با استفاده از قانون فوق برای سازه‌هایی مثل تیرها و استوانه‌های جدار ضخیم صورت گرفته است. تنش‌های مرجع از مقایسه حل الاستیک و حل حالت پایدار بدست آمده‌اند. مکنزی رابطه فوق را بر حسب تنش مرجع σ_{ref} و نرخ کرنش مرجع $\dot{\epsilon}_{ref}$ بازنویسی کرد.

^۱. Leckie

^۲. Skeletal point

^۳. Mackenzie

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_{ref}} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{ref}} \right)^n \quad (5-3)$$

وی معادله فوق و رابطه بین تنش و نرخ کرنش را برای تعدادی از موارد از جمله استوانه جدار ضخیم بکار برده و نحوه تغییر شکل و رفتار ماده را بر حسب پارامترهای مرجع تخمین زده است. او برای این کار نرخ کرنش خزشی مماسی در سطح خارجی $\dot{\epsilon}_{\sigma_o}$ و در سطح داخلی $\dot{\epsilon}_{\sigma_i}$ برای استوانه بر حسب $\dot{\epsilon}_{ref}$ بدین ترتیب ارائه نموده است:

$$\dot{\epsilon}_{\sigma_i} = 1.5 \frac{\lambda \dot{\epsilon}_{ref} \beta^2}{(\beta^2 - 1)} \quad (6-3)$$

$$\dot{\epsilon}_{\sigma_o} = 1.5 \frac{\lambda \dot{\epsilon}_{ref}}{(\beta^2 - 1)}$$

β نسبت شعاعی برابر (R_o/R_i) و λ پارامتری وابسته به β می‌باشد. به این ترتیب می‌توان مقدار کرنش‌های خزشی مماسی را در هر استوانه‌ای بدست آورد [۱۲].

در سال ۱۹۸۰ کراس^۱ خزش در استوانه‌های جدار ضخیم را بررسی کرد. او بیان نمود که نرخ کرنش‌های خزشی مماسی و شعاعی برابر بوده و از نظر علامت متفاوتند، همچنین نرخ کرنش خزشی در راستای طولی برابر با صفر است. ارتباط بین نرخ کرنش خزشی مؤثر در حالت پایدار و تنش مؤثر، همانند رابطه بایلی-نورتن در حالت تک محوری برای خزش ثابت می‌باشد. یعنی $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ ، او نشان داد که مقدار n ، از برابر قرار دادن حل حالت پایدار خزش و حل الاستیک بدست می‌آید [۱۴].

یک روش محاسباتی برای پیش‌بینی عمر لوله‌هایی که در سیستم‌های گرمایشی مراکز پتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند توسط سیمونن^۲ در سال ۱۹۸۵ ارائه شده است. در این روش از روش‌های المان محدود برای حل خزش دوبعدی بهره گرفته شده است [۱۵].

^۱. Kros

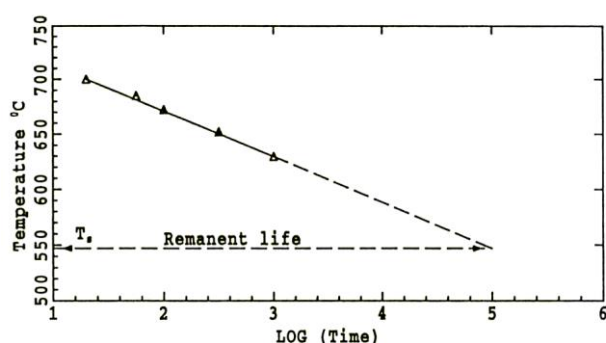
^۲. Simonen

پارامتر لارسون - میلر برای تحلیل داده‌های شکست خزشی استفاده می‌شود. لارسون و میلر رفتار واقعی شکست مواد فلزات آلیاژی مورد استفاده و رفتار شکست حاصل از تحلیل عددی را مقایسه نموده‌اند. تحقیقات سیمونن نشان داد که بیشترین آسیب‌دیدگی در دیواره میانی لوله رخ می‌دهد در حالی که هیچگونه آسیب‌دیدگی در سطح خارجی لوله دیده نمی‌شود.

در سال ۱۹۷۲ هایرست^۱ [۱۳] و در سال ۱۹۸۲ هادلستون^۲ [۱۶] چند معیار برای تنش‌های معادل ارائه نمودند. این تنش‌های معادل در تحلیل وابسته به زمان برای آلیاژ Cr-Mo جهت محاسبه زمان شکست و پیش‌بینی رفتار ماده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در سال ۱۹۹۵ تولکدورف^۳ عمر باقی مانده در لوله‌های تحت خزش قرار گرفته را بر اساس نتایج حاصل از زمان شکست از روی آزمایش خزش مورد بحث قرار داده است.

او آزمایشات خزشی شتابداری در تنش‌های ثابت و در درجه حرارت‌های بالا انجام داد و با استفاده از درونیابی در درجه حرارت‌های مختلف مقدار عمر باقی مانده را پیش‌بینی کرد. این مطلب با توجه به شکل (۳-۳) قابل درک می‌باشد.



شکل ۳-۳: تخمین عمر باقی مانده در شرایط کاری دما بالا [۱۹].

^۱ . Hayharst

^۲ . Huddleston

^۳ . Tolksdorf

در سال ۱۹۹۵ تولکدورف آزمایشات خزشی را در تنش‌های بالا و دمای ثابت انجام داده است. همچنین او آزمایشات خزشی را تحت دماها و تنش‌های بالا به طور همزمان انجام داده است تا عمر باقی‌مانده در لوله‌های جدار ضخیم را پیش‌بینی کند. در این آزمایشات قطعاتی از نمونه اصلی جهت ساخت نمونه‌های آزمایش جدا می‌شود و در واقع این آزمایشات، آزمایشات مخربی هستند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که این نمونه‌ها بیانگر رفتار واقعی نمی‌باشند [۱۹].

اخیراً ارزیابی آسیب‌های خزشی، بر اساس بازرسی‌های دوره‌ای، مشاهدات چشمی، آزمایشات غیرمخرب، سختی سطح، متالوگرافی سطوح، نمونه‌برداری جهت بررسی تغییرات ساختاری می‌باشند که این روش‌ها در سال ۱۹۹۵ توسط نوگاتا^۱ و تاکاهاشی^۲ ارائه شده است [۲۰].

اطلاعات بدست آمده از بازرسی‌های دوره‌ای نمی‌تواند به عنوان معیارهای مطمئن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نمی‌توان از روش‌های ارزیابی سطح یک مقدار کمی جهت آسیب‌دیدگی و اختلاف و تفاوت آسیب‌ها بدست آورد. در حالی که تست‌های دوره‌ای و تست‌های غیرمخرب در لوله‌های جدار ضخیم اطلاعات مفیدی را در مورد شرایط ماده ارائه می‌کنند. داشتن تخمینی از آسیب‌ها و تنش‌ها قبل از انجام مراحل بازرسی برای پیش‌بینی رفتار ماده بسیار مفید خواهد بود.

در واقع اولین قدم، داشتن میزان تنش‌ها و آسیب در اجزاء می‌باشد. نکته بسیار مهم در تنش‌های حالت غیرپایدار و بررسی آسیب‌ها، مدلسازی رفتار ماده و خواص شکست می‌باشد. استفاده از روش‌های پارامتری مثل روش لارسون - میلر این امکان را فراهم می‌سازد تا با استفاده از درون‌یابی رفتار شکست تخمین زده شود. استانداردهایی مثل *ASTM* بر اساس همین معیار، رفتار ماده را ارزیابی می‌کنند.

^۱. Nogata

^۲. Tokahashi

نکته قابل توجه در روش لارسون - میلر وجود محدودیت در برونیابی و عدم پیش‌بینی رفتار ماده برای زمان‌های طولانی می‌باشد.

۳-۳ جدیدترین موارد مرتبط

گوون^۱ در سال ۱۹۹۲ تنش‌های الاستیک-پلاستیک دیسک FG چرخان با ضخامت متغیر را تحلیل نمود [۱۷].

اوباتا^۲ و نودا^۳ در سال ۱۹۹۴ تنش‌های دمایی در استوانه و کره توخالی FG را با فرض موقعیت پایدار یک بعدی بدست آوردند [۱۸].

لوتز^۴ و زیمرمن^۵ در سال ۱۹۹۶ برای تنش‌های کره FGM ، حل تحلیلی ارائه کردند. آن‌ها رفتار کره را تحت بار دمایی شعاعی بررسی نمودند [۲۲].

یانگ^۶ در سال ۲۰۰۰ رفتار خزشی استوانه را در طی زمان بررسی کرد. او با بکارگیری معادله نورتون برای رفتار خزشی مواد و همچنین معادله تعادل، روابط تنش- کرنش و در نظر گرفتن معادله پرانتل روس، معادله دیفرانسیلی برای نرخ جابجایی بدست آورده است. سپس با انجام برخی ساده سازی‌ها و حل معادله دیفرانسیل، نرخ جابجایی و نرخ تنش‌ها را بدست آورد [۲۳].

لاو^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۲ به مدلسازی رفتار خزشی مخازن تحت فشار پرداختند. آن‌ها با این روش رفتار خزشی آلیاژ $Cr, 1 Mo Steels$ را بررسی نمودند. توزیع تنش‌های الاستیک

-
1. U. Guven
 2. Obata
 3. Noda
 4. M. P. Lutz
 5. R. W. Zimmerman
 6. Y.Y. Yang
 7. M. Law

حرارتی در جداره، توزیع تنش‌های مؤثر ون میسر برای سطوح داخلی، خارجی، میانی در طول زمان، همچنین توزیع تنش‌های مؤثر نورتون، در طول زمان را ترسیم نمودند. عدم دقت کافی در همگرایی تنش‌های سطوح داخلی، میانی و خارجی در نقطه مرجع از جمله ایرادهای تحقیق آن‌ها می‌باشد [۲۴].

اراسلن^۱ و گروهش در سال ۲۰۰۳ رفتار الاستیک-پلاستیک دیسک ضخامت متغیر چرخان را مورد بررسی قرار دادند [۲۵].

سینگ^۲ و ری^۳ در سال ۲۰۰۳ به تحلیل رفتار خزشی در دیسک چرخان *FGM* پرداختند. دیسک مورد مطالعه از جنس آلومینیم تقویت شده با ذرات سیلیکون کارباید بوده است. آن‌ها رفتار خزشی ماده را بر اساس قانون نورتون تعریف کردند و علت تغییر پارامترهای خزشی در فواصل شعاعی دیسک را ناشی از تغییر ترکیب ماده در راستای شعاع دانستند و دریافتند که برای توزیع خطی ذرات در دیسک چرخان، نرخ خزش شعاعی و محیطی در مقایسه با دیسکی که ذرات سیلیکون کارباید در آن به طور غیر یکنواخت توزیع شده باشد کوچکتر است [۲۶].

تاکاشی^۴ و ماساکی^۵ در سال ۲۰۰۵ رفتار خزشی در *9 Cr-1Mo-V-Nb Steel* را در اتصالات جوشی بررسی کرده‌اند. آن‌ها زمان شکست را در فلز پایه، منطقه *HAZ* بر حسب تنش رسم کرده‌اند و نشان داده‌اند که شکست در قسمت *HAZ* زودتر از بقیه نواحی صورت می‌گیرد [۲۷].

دای^۱ و همکارانش، در سال ۲۰۰۶ رفتار ترمومگنتوالاستیک مخازن استوانه‌ای و کروی *FGM* را تحت فشار داخلی و میدان مغناطیسی یکنواخت بررسی نمودند. آن‌ها جابجایی شعاعی، تنش‌ها و

-
1. Erraslan
 2. Singh
 3. Ray
 4. Takashi
 5. Masaki

اغتشاشات میدان مغناطیسی را در مخازن کروی و استوانه ای *FGM* به کمک تئوری ذره ای مگنتوالاستیک به دست آوردند. تغییر سختی ماده و نفوذپذیری مغناطیسی در طول ضخامت به صورت آرام در نظر گرفته شده و ضریب پواسون ثابت فرض گردیده است. تنش ها و اغتشاشات میدان مغناطیسی بر اساس ثابت همگن و غیرهمگن در یک نمودار با هم مقایسه شده اند. ثابت غیرهمگن که به تغییر کسر حجمی ماده وابسته است به صورت تجربی به دست آمده و مقادیر به کار رفته در این تحقیق اختیاری بوده که اثر ناهمگنی را بر تنش ها و اغتشاشات میدان مغناطیسی نشان می دهد [۲۸].

فوجی بایاشی^۲ در سال ۲۰۰۷ رفتار خزشی در *1.25 Cr – 0.5 M Steel* مورد مطالعه قرار داده است. وی پدیده خزش در جوشکاری، نحوه تغییرات ساختار کریستالی در فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت (*HAZ*) را بررسی کرده است و به محاسبه نرخ کرنش خزشی $\dot{\epsilon}$ و زمان شکست t_r نیز پرداخته است [۲۹].

یو^۳ و گروهش در سال ۲۰۰۷ خزش حالت پایدار را در مخازن استوانه ای جدار ضخیم *FGM* تحت فشار داخلی بررسی کردند. ایشان با استفاده از قانون نورتون، روابط تنش-کرنش، سازگاری و معادله تعادل، توزیع تنش ها را با مشتق گیری از معادله تعادل بر حسب کرنش و حل عددی معادله دیفرانسیل حاصل بدست آورده و تأثیر ضرایب قانون نورتون را روی تنش ها بررسی کردند [۳۰].

دای و فو^۴ در سال ۲۰۰۷ مسئله ترمومگنتوالاستیک سازه های توخالی *FGM* را تحت بارهای مکانیکی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها تغییرات ویژگی های ماده را در میان ضخامت جداره دیسک، ساده و آرام در نظر گرفتند [۳۱].

^۱ . H. L. Dai

1. Shimpei Fujibayashi

^۳ . You

^۴ . Y. M. Fu

حسینی کردخیلی و نقدآبادی در سال ۲۰۰۷ به روش نیمه تحلیلی تأثیر فاکتورهای اساسی مثل شاخص توزیع خواص و شرایط بارگذاری را بر تنش‌ها و تغییرشکل‌های دیسک چرخان *FGM* مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رفتار ترموالاستیک دو دیسک متقارن سوراخ دار و بی‌سوراخ از جنس *FGM* را بررسی کردند. در ابتدا دیسک را در راستای شعاع به قسمت‌هایی تقسیم کرده، با استفاده از شرایط مرزی و پیوستگی شرایط در مرز بین دو قسمت مجاور به یک دستگاه معادلات جبری خطی دست یافتند و با حل دستگاه معادلات، پاسخ‌های ترموالاستیک را برای هر قسمت که به صورت تابعی از شعاع دیسک است به دست آوردند. قسمتی از تنش، کرنش و جابجایی به دست آمده ناشی از نیروی گریز از مرکز و بارگذاری دمایی است. آن‌ها نتایج حاصل از این تحقیق را با نتایج روش اجزای محدود مقایسه کردند و نشان دادند که تغییر خواص ماده و پاسخ‌های ترموالاستیک دیسک *FG* با هم مرتبطند [۳۲].

قربانپور و همکارانش در سال ۲۰۰۸ یک حل تحلیلی برای پاسخ گذرای تنش‌های ترمومگنتوالاستیک و آشفستگی بردار میدان مغناطیسی برای مخازن کروی جدار ضخیم از جنس *FG* ارائه کردند. آن‌ها اثرات میدان مغناطیسی و ناهمگنی مواد را بر تنش‌های کره توخالی *FG* مطالعه نمودند و نتیجه گرفتند که نتایج تحلیلی و عددی، دقیق و معتبرند و به عنوان مرجع برای حل سایر مسائل دینامیکی کره توخالی تحت میدان مغناطیسی یکنواخت، بار مکانیکی و دمایی قابل استفاده‌اند [۳۳].

بیات و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به تجزیه تحلیل رفتار الاستیک دیسک چرخان *FG* با ضخامت متغیر پرداختند. آن‌ها رابطه مربوط به خصوصیات مواد و ضخامت دیسک را به صورت زیر در نظر گرفتند: در این پژوهش برای هر دو نوع توزیع خواص که در رابطه (۳-۷) آمده یک حل الاستیک به دست آمد.

$$P(r) = (P_o + P_i) \left(\frac{r - r_i}{r_o + r_i} \right)^n + P_i, \quad P(r) = P_o \left(\frac{r}{r_o} \right)^\gamma \quad (7-3)$$

$$h(r) = h_a \left(1 - q \left(\frac{r}{r_o} \right)^m \right) \quad (8-3)$$

P ویژگی ماده در هر شعاع دلخواه از دیسک، n شاخص توزیع مواد، h ضخامت دیسک و m و q ثوابت هندسی مربوط به ساختار ضخامت آن، γ شاخص توزیع مواد در رابطه نمایی ویژگی های ماده و h_a ضخامت دیسک در جدار داخلی است.

برای دیسک سوراخ دار دو حل تحلیلی و نیمه تحلیلی در دو شرط مرزی دو سر آزاد و یک سر آزاد- یک سر گیردار و برای دیسک توپر فقط حل نیمه تحلیلی در شرط مرزی دو سر آزاد ارائه دادند، اثرات تغییر هندسه دیسک بر جابجایی و تنش ها بررسی گردید. بیات به این نتیجه دست یافت که دیسک چرخان از جنس FG با ساختار ضخامت نمایی، جابجایی و تنش های کمتری نسبت به دیسک با ضخامت یکنواخت دارد. اینطور به نظر می رسد که تنش شعاعی برای دیسک توپر با ساختار ضخامت نمایی در مرکز شبیه دیسک با ضخامت یکنواخت نیست. در واقع دیسک FGM با ساختار ضخامت نمایی مقعر یا هیپربولیک همگرا رفتار مناسب تری نسبت به دیسک با ضخامت یکنواخت دارد [34].

تحلیل خزشی مخازن استوانه ای از جنس مواد FG تحت فشار داخلی و خارجی توسط سوآن^۱ و گروهش در سال ۲۰۰۹ انجام شده است. ایشان با استفاده از تابع توانی ساده و بکارگیری بسط تیلور، حل تقریبی از درجات مختلف تیلور بدست آوردند و با حل بدست آمده از روش المان محدود مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که تقریب مرتبه پنجم بسط تیلور، جواب دقیق تری برای محاسبه تنش ها ارائه می دهد [35].

^۱. Xuan Fu-Zhen

بیات و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به تحلیل تنش‌های مکانیکی و دمایی دیسک *FG* چرخان با ضخامت متغیر تحت بار متقارن شعاعی پرداختند. آن‌ها دیسک را در میدان دمایی پایدار در نظر گرفتند. پاسخ‌های ترموالاستیک و وزن دیسک که در عملکرد آن بسیار مهم است به شاخص توزیع مواد، (n) ، و هندسه دیسک بستگی دارند. آن‌ها دریافتند که دیسک با ساختار ضخامت هیپربولیک و پارابولیک کمترین تنش‌ها و جابجایی را در مقایسه با دیسک ضخامت ثابت دارند. دیسک *FG* با ضخامت متغیر، تنش‌های ناشی از بار دمایی کمتری نیز نسبت به دیسک ضخامت ثابت دارد. همچنین برای یک شاخص توزیع مواد مشخص، دیسک *FG* با هندسه مقعر سبک‌تر از همان دیسک با ضخامت ثابت است و برای هر کدام از هندسه‌ها وزن دیسک *FG* بین دیسک از جنس فلز خالص و سرامیک خالص با همان هندسه است [۳۶].

اصغری و غفوری در سال ۲۰۱۰ یک حل نیمه تحلیلی در الاستیسیته سه بعدی برای دیسک *FGM* چرخان و هر دو نوع سوراخ دار و بی سوراخ ارائه کردند. هدف آن‌ها تعیین دادن حل تنش سطحی دوبعدی به سه بعدی بوده است. برای دیسک‌های نازک حل دوبعدی کفایت و پاسخ‌های معقولی خواهد داد اما دیسک‌های ضخیم باید در سه بعد بررسی شود تا نتایج ضعیف و دور از واقعیت نباشد. آن‌ها نشان دادند اگرچه حل تنش صفحه‌ای همه معادلات سه بعدی حرکت و شرایط مرزی را ارضا می‌کند اما نمی‌تواند میدان کرنش سه بعدی مناسبی ارائه دهد. به همین دلیل ایشان با اصلاح پاسخ تنش صفحه‌ای به پاسخ‌های سه بعدی معتبری دست یافتند [۳۷].

شاه زمانیان در سال ۲۰۱۰ تحلیلی از رفتار ترموالاستیک دیسک چرخان *FG* با منبع گرمایی ارائه کرد. او در این پژوهش از روش حل عددی اجزای محدود استفاده نمود [۳۸].

پنگ^۱ و لی^۲ در سال ۲۰۱۰ به حل مسئله ترموالاستیک دیسک FG سوراخدار چرخان با فرض تغییر خواص مواد در راستای شعاعی پرداختند. آن‌ها یک روش تحلیلی برای بررسی تنش‌های دمایی پایدار در دیسک چرخان حول محور مرکزی با سرعت زاویه‌ای ثابت ارائه کردند. ایشان تنش حرارتی و جابجایی شعاعی با حل عددی معادلات به دست آوردند و نتایج تغییر دما، سرعت زاویه‌ای و ضخامت دیسک را بر توزیع تنش‌های حرارتی و جابجایی شعاعی در نمودارهایی نمایش دادند [۳۹].

افسر و همکاران در سال ۲۰۱۰ به تحلیل عددی اجزای محدود دیسک FG چرخان پرداخت [۴۰].

قربانپور و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به کمک تئوری ذره‌ای ترمومگنتوالاستیک یک روش حل برای مسائل ترمومگنتوالاستیک کره توخالی FG با فشار داخلی، تحت میدان مغناطیسی یکنواخت و میدان دمایی بدست آوردند که نتایج آن برای طراحی بهینه کره توخالی به کار خواهد رفت [۴۱].

قربانپور و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تنش‌های ترمومگنتوالاستیک را برای دیسک چرخان با ضخامت متغیر از جنس FGM به کمک روش حل نیمه تحلیلی به دست آوردند. در این روش یک پارامتر مثل دما، جابجایی و تنش‌ها برای نقطه‌ای در وسط لایه فرضی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این امر بدیهی که پارامتر مورد نظر در مقایسه با لایه قبل و بعد برای نقطه مورد نظر باید یکسان باشد به یک سری معادلات رسیدند که با حل آن معادله مربوط بر حسب مکان (x یا r) به دست آمد. در این پژوهش ابتدا توزیع دما، جابجایی، تنش‌های شعاعی و محیطی برای چهار نوع دیسک با ساختار ضخامت ثابت، مقعر، محدب و خطی در غیاب میدان مغناطیسی با هم مقایسه شد که در نتیجه این مقایسه دیسک مقعر مناسب‌ترین نوع ساختار دیسک تشخیص داده شد. سپس جابجایی و تنش‌های دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی در یک نمودار واحد نمایش داده شد

^۱ . Xu-Long Peng

^۲ . Xian-Fang Li

و بیانگر این حقیقت بود که حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به شدت بر جابجایی شعاعی و تنش های شعاعی و محیطی اثر می گذارد و کاهش می دهد. او همچنین جابجایی و تنش ها را در دیسک مقعر برای n های مختلف باهم مقایسه کرد و اعلام کرد که اولاً مقادیر مربوط به جابجایی و تنش ها برای دیسک FG بین مقادیر مربوط به دیسک از جنس فلز خالص و سرامیک خالص قرار دارد، ثانیاً تنش شعاعی در دیسک با افزایش n کاهش می یابد [۴۲].

لقمان و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به بررسی خزش ترمومگنتوالاستیک در مواد FG پرداختند. آن ها یک استوانه جدار ضخیم از جنس FG را تحت فشار داخلی، میدان دمایی و میدان مغناطیسی یکنواخت در نظر گرفتند و توزیع تنش ها را در آن بررسی کردند. توزیع خواص مکانیکی و مغناطیسی را در راستای شعاع آهسته و پیوسته در نظر گرفتند. کرنش کل، حاصل جمع کرنش الاستیک، دمایی و خزشی است. کرنش های خزشی خود به زمان، دما و تنش ها وابسته اند. با استفاده از معادلات تعادل، تنش - کرنش و کرنش - جابجایی به شکل معادله دیفرانسیل رسیدند که شامل کرنش های خزشی است. با صرف نظر از کرنش های خزشی از این معادله دیفرانسیل، جابجایی شعاعی و تنش های ترمومگنتوالاستیک اولیه را در زمان صفر به دست آوردند و تنش ها را برای خواص مادی مختلف رسم کردند. سپس با استفاده از روابط پرانتل روس در رابطه با معادله بدست آمده و قانون نورتون برای خزش تک محوری مدل موجود، جابجایی شعاعی و نرخ تنش ها شعاعی و محیطی را به دست آوردند و نرخ تنش ها بر حسب شعاع بی بعد را برای خواص مادی مختلف رسم کردند. آن ها با استفاده از نرخ تنش، توزیع تنش ها را محاسبه کردند به طوری که تنش های ترمومگنتوالاستیک را مقادیر اولیه برای حل شروع حل عددی در نظر گرفتند. آن ها مشاهده کردند که توزیع تنش شعاعی برای خواص مادی مختلف مهم نیست و توزیع اصلی برای تنش های مؤثر و محیطی رخ می دهد و در جایی که تنش مؤثر در طول فرآیند خزش با زمان تغییر نکند می توان یک تنش مؤثر مرجع برای همه مواد تعیین کرد [۴۳].

گوتا^۱ و همکاران، خزش حالت پایدار و پارامترهای مواد را در دیسک چرخان *Al-Sic* بررسی نمود. او در تلاشی دیگر به تجزیه تحلیل رفتار خزشی دیسک چرخان تحت اثر میدان دمایی پرداخت [۴۴].

گوتا و سینگ^۲ در سال ۲۰۱۱ اثرات عدم تقارن محوری را بر خزش حالت پایدار در استوانه *FG* بررسی نمودند [۴۵].

لقمان و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به تجزیه تحلیل خزش ترموالاستیک وابسته به زمان در دیسک چرخان *FG* پرداختند. آن‌ها تنش‌های شعاعی، محیطی و مؤثر را برای چهار توزیع حجمی مختلف مورد مطالعه قرار دادند که به صورت (۱) دیسک از جنس آلومینیم خالص، (۲) دیسکی با ۲۰٪ سیلیکون کارباید در سراسر دیسک یکنواخت توزیع شده است، (۳) دیسک با سطح داخلی آلومینیم و سطح خارجی ۴۰٪ سیلیکون کارباید، (۴) دیسک با سطح داخلی ۴۰٪ سیلیکون کارباید و سطح خارجی آلومینیم است. در این بررسی، دیسک نوع سوم مناسب‌ترین تشخیص داده شد. زیرا تنش‌های آن نسبت سه نوع دیگر، مقدار کمتری را دارا بوده است. آن‌ها سپس به محاسبه عددی خزش پرداختند و تنش‌ها شعاعی، محیطی و مؤثر، جابجایی شعاعی خزشی، کرنش‌های خزشی شعاعی و محیطی را برای دیسک نوع سوم در طول پنجاه سال آینده، به کمک روش مندلسون^۳ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تنش‌ها شعاعی، محیطی و مؤثر با زمان روند کاهشی دارند و جابجایی شعاعی و کرنش‌های خزشی با زمان افزایش می‌یابند [۴۶].

خزش یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های آسیب و تخریب در سیستم‌های کاری دما و فشار بالا می‌باشد و باید به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تخمین عمر لحاظ گردد. برای بررسی دقیق آسیب

^۱ . V.K.Gupta

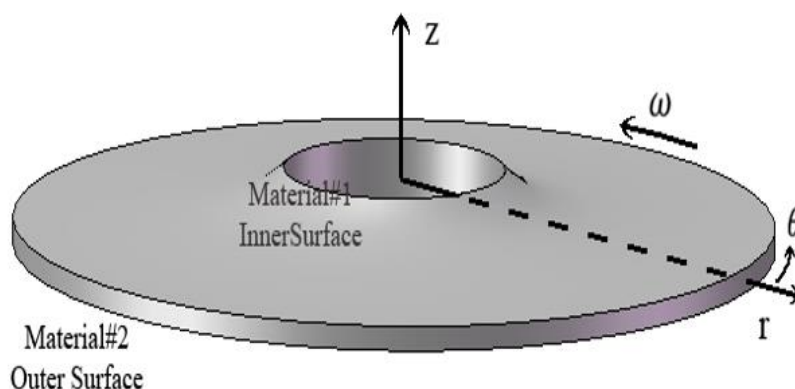
^۲ . S.B.Singh

^۳ . Mendelson

و عمر قطعات، دانستن تاریخچه تنش ها ضروری می باشد و همچنین بررسی تنش ها، امری اجتناب ناپذیر است.

۳-۴ اهداف

مطالعات در زمینه رفتارهای الاستیک و ترموالاستیک *FGM* ها تا کنون قابل ملاحظه بوده، اما رفتار ترمومگنتوالاستیک آن ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، رفتار ترمومگنتوالاستیک دیسک *FGM* چرخان با ضخامت متغیر، با روش های نیمه تحلیلی مورد بررسی قرار می گیرد. فرض می شود ویژگی های دمایی، مکانیکی و مغناطیسی ماده به صورت تابعی از درصد حجمی در راستای شعاع دیسک توزیع شده است.



شکل ۳-۴: تصویر کلی دیسک *FGM* چرخان با ساختار ضخامت متغیر [۳۶].

با توجه به مطالبی که تا به این جا ذکر شد، مهمترین اهداف در تحلیل تنش های خزشی به شرح زیر طبقه بندی می شود:

- بررسی توزیع دما در طول شعاع دیسک؛
- بررسی تنش ها و جابجایی دیسک در حالت الاستیک؛

- بررسی تنش‌ها، جابجایی و تغییر شکل‌های خزشی وابسته به زمان دیسک با استفاده از مدل ساختاری خزشی ماده برای زمان‌های طولانی؛

- بررسی تنش‌ها، جابجایی و تغییر شکل‌های الاستیک و خزشی در حضور میدان مغناطیسی؛
کلیه موارد فوق از طریق حل نیمه تحلیلی و همگرایی انجام می‌پذیرد.

✓ نکات قوت این تحقیق:

- علاوه بر آن که رفتار ترموالاستیک دیسک با ضخامت متغیر بررسی می‌گردد، مناسب‌ترین نوع دیسک از لحاظ ساختار هندسی و نیز توزیع حجمی مشخص خواهد شد.

- به تحلیل رفتار خزشی دیسک با ضخامت متغیر طی پنجاه سال آینده در حضور و غیاب میدان مغناطیسی یکنواخت و مقایسه این دو پرداخته خواهد شد.

فصل چہارم:

تحلیل تئوری و

فرمول بندی مسئلہ

۱-۴ مقدمه

خزش از موضوعات تغییر شکل پلاستیک می‌باشد و عبارت است از تغییر شکل آهسته و پیوسته وابسته به زمان در جسمی که طی زمان نسبتاً طولانی تحت تاثیر بار قرار داشته باشد. تنش ناشی از خزش تنش است که از تنش حرارتی و مکانیکی توأمآً ایجاد می‌شود و با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد. خزش در دماهای بالا بسیار چشمگیر است و معمولاً در مورد تنش‌های کششی مطرح می‌شود، ولی به طور کلی در مورد تنش‌های فشاری و پیچشی نیز این پدیده وجود دارد. به عنوان تعریفی کلی، خزش نوعی خاصیت غیرخطی ماده است که در آن ماده به تغییر شکل تحت بار ثابت ادامه می‌دهد و برعکس، اگر یک جابجایی اعمال شود، نیروهای عکس‌العمل و (تنش‌ها) با زمان کاهش می‌یابند. میزان تغییرات در فرآیند خزش به باز توزیع تنش‌ها، دما و زمان وابسته است.

در ناحیه الاستیک براساس قانون هوک بین تنش و کرنش رابطه خطی وجود دارد. اما در ناحیه پلاستیک و در ناحیه خزشی رابطه تنش و کرنش عموماً غیرخطی است.

یک تفاوت بسیار مهم در رابطه تنش - کرنش در ناحیه الاستیک و پلاستیک وجود دارد. در ناحیه الاستیک بین تنش و کرنش تنها یک رابطه مشخص وجود دارد که همان قانون هوک می‌باشد. اما در ناحیه‌های پلاستیک و خزشی بین تنش و کرنش رابطه واحدی وجود ندارد و کاملاً به مسیر بارگذاری یا باربرداری وابسته می‌باشد. به دلیل وابستگی کرنش خزشی به تاریخچه و مسیر بارگذاری می‌باید جزءهای کرنش خزشی طول مسیر تخمین زده شود در نهایت با ترکیب و جمع کردن جزءها، کرنش خزشی کل حاصل می‌شود.

در این فصل رفتارهای خزشی غیرخطی دیسک با ضخامت متغیر فرمول بندی می‌گردد. حل نیمه تحلیلی و نتایج حاصله در فصل‌های بعد بررسی خواهد شد.

۲-۴ هندسه دیسک و رفتار تابعی ماده

دیسک ها از اجزاء کوچک اما مهم در بسیاری از دستگاهها و ساختارهای مکانیکی هستند که تحت انواع بارگذاری های مکانیکی و حرارتی قرار می گیرند. بنابراین در این بحث معادلات خزشی وابسته به زمان در دیسک چرخان با ضخامت متغیر بررسی می گردد.

یک دیسک چرخان با ضخامت متغیر، که در معرض گرادیان دما قرار دارد، در نظر گرفته شده که این شرایط مشابه شرایط واقعی کاری دیسک در اغلب دستگاه ها می باشد.

ساختار ضخامت دیسک، به طور کلی چنین خواهد بود [۳۱]:

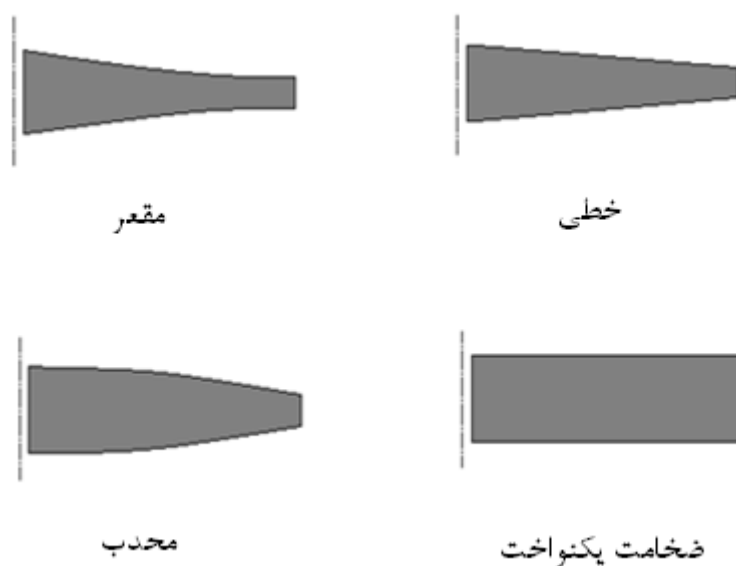
$$h(r) = h_a \left(1 - q \left(\frac{r}{r_o} \right)^m \right) \quad (۱-۴)$$

h_a ضخامت دیسک در جدار داخلی، r شعاع دلخواه، r_o شعاع خارجی و m و q ثوابت هندسی

هستند که انحنای ساختار دیسک را مشخص می کنند.

دیسک با ضخامت یکنواخت	$q = 0$
دیسک مقعر	$m < 1$
دیسک خطی	$m = 1$
دیسک محدب	$m > 1$

$q \neq 0$



شکل ۴-۱: نمای شماتیکی از چهار نوع ضخامت دیسک

در حالت کلی رابطه مربوط به توصیف خصوصیات مواد FG به دو شکل نمایی و کسر حجمی تعریف می‌شود که صورت کسر حجمی آن به دلیل آن که خواص ماده طبق آن متناسب با شعاع تغییر می‌کند و در هر نقطه دلخواه از شعاع، ویژگی‌های مربوط به همان نقطه با توجه به توزیع حجمی محل مورد نظر در دست خواهد بود، با اقبال بیشتری روبروست و در اکثر پژوهش‌های پیش از این برای تحلیل مواد FG از همین صورت استفاده شده است. در این پژوهش نیز خصوصیات ماده‌ای که دیسک مورد مطالعه از آن ساخته شده است، به صورت کسر حجمی بیان می‌شود و فرض خواهد شد همه خصوصیات مکانیکی، دمایی و مغناطیسی به جز ضریب پواسون از رابطه زیر پیروی می‌کنند:

$$p(r) = p_{AL} + (p_{sic} - p_{AL}) \frac{v(r)}{100} \quad ; r_o \leq r \leq r \quad (۲-۴)$$

در اینجا v توزیع حجمی دیسک در شعاع دلخواه است که به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$v(r) = v_i + \frac{r + r_i}{r_o - r_i} (v_o - v_i) \quad (3-4)$$

در رابطه فوق، اگر $r = r_i$ باشد $v(r) = v_i$ می‌شود، همچنین در صورتی که $r = r_o$ باشد $v(r) = v_o$ خواهد شد. بنابراین v_i توزیع حجمی دیسک در شعاع داخلی و v_o در شعاع خارجی است. عددی که برای v به دست می‌آید مقداری کسری است که با ضرب آن در ۱۰۰، درصد حجمی حاصل می‌شود.

۳-۴ معادلات حاکم بر دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر

در این قسمت ابتدا کلیه معادلات تعادل، تنش-کرنش و کرنش-تغییر مکان در سیستم مختصات استوانه‌ای بیان خواهد شد، این دسته روابط متشکل از پانزده معادله است که شامل همه تنش‌ها و کرنش‌های نرمال و برشی خواهد بود. در مرحله بعد، با در نظر گرفتن دیسک، که استوانه‌ای با ارتفاع بسیار کوچک نسبت به شعاع است، می‌توان از برخی موارد چشم‌پوشی نمود و با ساده‌سازی، پانزده معادله را به پنج معادله تقلیل بخشید.

تعادل:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta = 0 \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + F_z = 0$$

تنش - کرنش:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \varepsilon_r^c + \alpha_r T$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] + \varepsilon_\theta^c + \alpha_\theta T$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \varepsilon_z^c + \alpha_z T$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2G} \tau_{r\theta} + \varepsilon_{r\theta}^c$$

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2G} \tau_{rz} + \varepsilon_{rz}^c$$

$$\varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2G} \tau_{\theta z} + \varepsilon_{\theta z}^c \quad (5-4)$$

ε_r^c و ε_θ^c و ε_z^c کرنش‌های خزشی می‌باشند که به زمان، دما، تنش و در واقع به مسیر و نحوه بارگذاری بستگی دارند و از مجموع جزءهای کرنش در طول زمان حاصل می‌شوند. همچنین $\varepsilon_{r\theta}^c$ و ε_{rz}^c و $\varepsilon_{\theta z}^c$ کرنش‌های برشی خزشی هستند.

کرنش - تغییر مکان:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)$$

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (6-4)$$

$$\varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)$$

با در نظر گرفتن تقارن محوری، تغییر مکان های مماسی و کرنش های برشی، کلیه مشتقات

نسبت به θ $\left(\frac{\partial}{\partial \theta}\right)$ برابر با صفر می باشد. به دلیل کوچک بودن ارتفاع نسبت به شعاع دیسک، از تغییر

مکان در راستای z نیز چشم پوشی می کنیم. با فرض کرنش و تنش صفحه ای برای دیسک در حالت

کلی^۱، معادلات تعادل، تنش-کرنش و کرنش-تغییر مکان برای دیسک FG ضخامت متغیر چرخان به

صورت زیر درمی آید. البته برای دیسک تنش طولی صفر است اما کرنش طولی دقیقاً صفر نیست و

به دلیل کوچک بودن از آن چشم پوشی خواهد شد.

تعادل:

دسته معادلات تعادل (۴-۴) با برخی ساده سازی ها برای دیسک به یک معادله تبدیل شده

است که برای دیسک با ضخامت متغیر با استناد به مقاله بیات [۳۱] چنین خواهد بود:

$$\frac{\partial(h(r))\sigma_r}{\partial r} + h(r)\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho(r)h(r)r\omega^2 = 0 \quad (۷-۴)$$

تنش - کرنش:

با در نظر گرفتن تنش صفحه ای ($\sigma_z = 0$)، می توان تنش ها را بر حسب کرنش ها از دسته

روابط (۵-۴) بدست آورد. با حذف σ_z از دو معادله اول، یک دستگاه دو معادله-دو مجهول به دست می

آید:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu\sigma_\theta] + \varepsilon_r^c + \alpha_r T$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \nu\sigma_r] + \varepsilon_\theta^c + \alpha_\theta T$$

^۱ - Generalized Plane Strain

حال با ضرب ν در معادله دوم و جمع کردن دو رابطه با هم، σ_θ حذف می‌شود و σ_r به دست می‌آید.

$$\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu^2\sigma_r] + (\varepsilon_r^c + \nu\varepsilon_\theta^c) + (\alpha_r T + \nu\alpha_\theta T)$$

با فاکتورگیری از σ_r و بردن آن به سمت چپ تساوی، رابطه σ_r به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2}[\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta - (\alpha_r + \nu\alpha_\theta)T - (\varepsilon_r^c + \nu\varepsilon_\theta^c)]$$

اینک با قرار دادن σ_r حاصله در یکی از دو رابطه اصلی σ_θ به دست می‌آید. مجموعه روابط تنش- کرنش برای دیسک FGM به صورت زیر است:

$$\sigma_r = \frac{E(r)}{1-\nu^2}[\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta - (\alpha_r(r) + \nu\alpha_\theta(r))T(r) - (\varepsilon_r^c + \nu\varepsilon_\theta^c)] \quad (۸-۴)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(r)}{1-\nu^2}[\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r - (\alpha_\theta(r) + \nu\alpha_r(r))T(r) - (\varepsilon_\theta^c + \nu\varepsilon_r^c)]$$

کرنش - تغییر مکان:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (۹-۴)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

معادله سازگاری با حذف u از روابط کرنش - تغییر مکان به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta - \varepsilon_r}{r} = 0 \quad (۱۰-۴)$$

با فرض غیرقابل تراکم بودن ماده، یعنی $v = \frac{1}{2}$ در ناحیه پلاستیک، رابطه زیر را برای

کرنش‌های خزشی می‌توان نتیجه گرفت:

$$\varepsilon_r^c + \varepsilon_\theta^c + \varepsilon_z^c = 0 \quad (11-4)$$

ε_z^c هم که با فرض کرنش مسطح، صفر در نظر گرفته شده است، بنابر این کرنش‌های خزشی

شعاعی و محیطی قرینه هم می‌باشند، یعنی مقادیر یکسان و علامت مخالف هم دارند.

اگر دیسک چرخان، در معرض میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد معادله تعادل به شکل زیر

درمی‌آید:

$$\frac{\partial(h(r))\sigma_r}{\partial r} + h(r)\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + h(r)f_r + \rho(r)h(r)r\omega^2 = 0 \quad (12-4)$$

f_r نیروی لورنس^۱، ناشی از میدان مغناطیسی و u جابجایی شعاعی دیسک است.

برای به دست آوردن نیروی لورنس ابتدا باید برخی پارامترها را تعریف کرد:

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \nabla \times \vec{h}, \\ \vec{h} &= \nabla \times (\vec{U} \times \vec{H}), \\ \nabla \times \vec{e} &= -\mu(r)\frac{\partial \vec{h}}{\partial t}, \quad \text{div } \vec{h} = 0, \\ \vec{e} &= -\mu(r)\left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \times \vec{H}\right). \end{aligned} \quad (13-4)$$

بردار میدان مغناطیسی در مختصات استوانه‌ای به صورت $\vec{H}(0,0,H_z)$ تعریف می‌شود و \vec{U}

بردار جابجایی شعاعی است.

^۱. Lorentz's force

$$\begin{aligned}
\vec{U} &= (u, 0, 0), \\
\vec{e} &= -\mu(r) \left(0, H_z \frac{\partial u}{\partial t}, 0 \right), \\
\vec{h} &= (0, 0, h_z), \\
\vec{J} &= \left(0, -\frac{\partial h_z}{\partial t}, 0 \right), \\
h_z &= -H_z \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right).
\end{aligned}
\tag{۱۴-۴}$$

نیروی لورنس از رابطه زیر و به کمک تعاریف ذکر شده به دست می‌آید.

$$f_r = \mu(r) \times (\vec{J} \times \vec{H}). \tag{۱۵-۴}$$

بنابر این:

$$f_r = \mu(r) H_z^2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right). \tag{۱۶-۴}$$

۴-۴ روابط الاستیک دیسک چرخان تحت تأثیر بارهای مکانیکی و حرارتی

با فرض انتقال حرارت پایدار از خارج به داخل در اثر گرادیان دمایی معادل با $(T_o - T_i)$ ، معادله دیفرانسیل توزیع دما به صورت زیر خواهد بود که تفاوت آن با دیسک ضخامت ثابت، ظهور پارامتر (h) در معادله است.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rh(r) K(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right] = 0 \tag{۱۷-۴}$$

K ضریب هدایت حرارتی در راستای شعاع دیسک است که با الگو برداری از رابطه (۲-۴) به

صورت زیر تعریف می‌شود که در آن ν توزیع حجمی دیسک در شعاع دلخواه است:

$$K(r) = K_{AL} + (K_{sic} - K_{AL}) \frac{v(r)}{100} \quad (18-4)$$

در حالت الاستیک، مؤلفه‌های مربوط به خزش از معادله (۸-۴) حذف می‌شود و معادلات تنش

– کرنش به این شکل در خواهد آمد:

$$\sigma_r = \frac{E(r)}{1-\nu^2} [\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta - (\alpha_r + \nu\alpha_\theta)T(r)] \quad (19-4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(r)}{1-\nu^2} [\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r - (\alpha_\theta + \nu\alpha_r)T(r)]$$

برای به دست آوردن معادله دیفرانسیل موقعیت دیسک در حالت الاستیک ابتدا باید ε_θ و ε_r

از معادله (۹-۴) در σ_θ و σ_r از رابطه (۱۹-۴) جایگذاری شود، با این کار، تنش‌ها بر حسب جابجایی

شعاعی به دست می‌آیند. ضمناً در این پژوهش $\alpha_r = \alpha_\theta$ در نظر گرفته شده است و تنها یک

پارامتر α به جای این دو، در روابط ظاهر می‌گردد.

$$\sigma_r = \frac{E(r)}{1-\nu^2} \left[\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(r)}{1-\nu^2} \left[\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right]$$

حال باید این تنش‌ها در معادله (۷-۴) یا معادله (۱۲-۴) قرار گیرند و عبارت حاصل

مرتب شده و همه جملات آن در $(1-\nu^2)$ ضرب گردند.

$$\frac{\partial(h(r))}{\partial r} \left[\frac{E(r)}{1-\nu^2} \left[\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right] \right] + \frac{\partial \left[\frac{E(r)}{1-\nu^2} \left[\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right] \right]}{\partial r} h(r) +$$

$$\frac{h(r)E(r)}{r(1-\nu^2)} \left[\left[\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right] - \left[\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} - (1+\nu)\alpha(r)T(r) \right] \right] + \rho(r) h(r) r\omega^2 = 0$$

رابطه نهایی یک معادله مرتبه دو بر حسب جایجایی شعاعی خواهد بود:

$$rh(r) E(r) \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{d}{dr} [rh(r) E(r)] \frac{du}{dr} + \nu \frac{d}{dr} [h(r) E(r)] - \frac{h(r) E(r)}{r} u +$$

$$- r(1 + \nu) \frac{d}{dr} [E(r) h(r) \alpha(r) T(r)] + \rho(r) h(r) r^2 \omega^2 (1 - \nu^2) = 0$$

معادله دیفرانسیل فوق را مختصراً می توان چنین نوشت:

$$C_1 \frac{d^2 u}{dr^2} + C_2 \frac{du}{dr} + C_3 u + C_4 = 0 \quad (20-4)$$

ضرایب معادله در حالت ترموالاستیک و بدون حضور میدان مغناطیسی به صورت زیر است:

$$C_1 = rh(r) E(r)$$

$$C_2 = \frac{d}{dr} [rh(r) E(r)]$$

$$C_3 = \nu \frac{d}{dr} [h(r) E(r)] - \frac{h(r) E(r)}{r} \quad (21-4)$$

$$C_4 = -r(1 + \nu) \frac{d}{dr} [E(r) h(r) \alpha(r) T(r)] + \rho(r) h(r) r^2 \omega^2 (1 - \nu^2)$$

در صورتی که دیسک در معرض میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد باید معادله تعادل

(۱۲-۴) را در نظر گرفت و نیروی لورنس را از رابطه (۴-۱۶) در آن قرار داد. معادله دیفرانسیل

موقعیت دیسک در این حالت به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned}
& rh(r)[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)]\frac{d^2u}{dr^2} + \\
& \frac{d}{dr}[rh(r)E(r)] + h(r)\mu(r)H_z^2(1-\nu^2)\frac{du}{dr} + \\
& \nu\frac{d}{dr}[h(r)E(r)] - \frac{h(r)}{r}[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)]\mu + \\
& -r(1+\nu)\frac{d}{dr}[E(r)h(r)\alpha(r)\Gamma(r)] + \rho(r)h(r)r^2\omega^2(1-\nu^2) = 0
\end{aligned}$$

ضرایب معادله دیفرانسیل فوق چنین است:

$$C_1 = rh(r)[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)] \quad (۲۲-۴)$$

$$C_2 = \frac{d}{dr}[rh(r)E(r)] + h(r)\mu(r)H_z^2(1-\nu^2)$$

$$C_3 = \nu\frac{d}{dr}[h(r)E(r)] - \frac{h(r)}{r}[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)]$$

حضور میدان مغناطیسی فقط روی ضرایب C_1 ، C_2 و C_3 اثر می‌گذارد و بر ضریب C_4

تأثیری ندارد.

۴-۵ قانون جریان خزشی^۱

با در نظر گرفتن خزش وابسته به زمان، ضریب C_4 از دسته معادلات (۴-۲۱) به شکل زیر در

می‌آید که شامل کرنش‌های خزشی است:

^۱. Creep Flow Rule

$$\begin{aligned}
C_4 = & -r(1+\nu)\frac{d}{dr}[E(r)h(r)\alpha(r)\Gamma(r)] \\
& - \varepsilon_r^c \left[r \frac{d}{dr}(E(r)h(r)) + E(r)h(r)(1-\nu) \right] \\
& - \varepsilon_\theta^c \left[r\nu \frac{d}{dr}(E(r)h(r)) - E(r)h(r)(1-\nu) \right] \\
& - E(r)h(r) \left[\frac{d\varepsilon_r^c}{dr} + \nu \frac{d\varepsilon_\theta^c}{dr} \right] + \rho(r)h(r)r^2\omega^2(1-\nu^2)
\end{aligned} \tag{۲۳-۴}$$

خزش روی سایر ضرایب تأثیر ندارد و سه ضریب دیگر با توجه به حضور یا عدم حضور میدان مغناطیسی مطابق دسته روابط (۲۱-۴) و (۲۲-۴) در نظر گرفته می‌شوند.

تنش‌ها تابع کرنش‌های خزشی کل می‌باشند و کرنش‌های خزشی خود به زمان، دما و تنش‌ها وابسته هستند. اگر Δt جزئی از زمان باشد $\Delta\varepsilon_r^c$ و $\Delta\varepsilon_\theta^c$ جزءهای کرنش خزشی مربوط به زمان Δt خواهند بود و بر اساس قانون پیرانتل روس به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴۳]:

$$\begin{aligned}
\Delta\varepsilon_r^c &= \frac{\Delta\varepsilon_e^c}{\sigma_e} \left[\sigma_r - \frac{1}{2}\sigma_\theta \right] \\
\Delta\varepsilon_\theta^c &= \frac{\Delta\varepsilon_e^c}{\sigma_e} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_r \right]
\end{aligned} \tag{۲۴-۴}$$

σ_e تنش مؤثر، $\Delta\varepsilon_e^c$ جزء کرنش خزشی مؤثر می‌باشد، با تقسیم دو طرف رابطه بر Δt نرخ کرنش‌های خزشی حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_r^c &= \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \left[\sigma_r - \frac{1}{2}\sigma_\theta \right] \\
\dot{\varepsilon}_\theta^c &= \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_r \right]
\end{aligned} \tag{۲۵-۴}$$

$\dot{\varepsilon}_r^c$ و $\dot{\varepsilon}_\theta^c$ نرخ کرنش خزشی شعاعی و مماسی و عبارت $\dot{\varepsilon}_e^c/\sigma_e$ قسمت وابسته به مسیر بارگذاری و تاریخچه در روابط فوق است. σ_r و σ_θ تنش‌های شعاعی و محیطی جاری هستند. σ_e تنش مؤثر و $\dot{\varepsilon}_e^c$ نرخ کرنش خزشی مؤثر در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta} \quad (26-4)$$

$$\Delta \varepsilon_e^c = \dot{\varepsilon}_e^c \Delta t \quad (27-4)$$

$\dot{\varepsilon}_e^c$ از رابطه زیر که قانون نورتون^۱ نام دارد به دست می‌آید [۴۳]:

$$\dot{\varepsilon}_e^c = B(r) \sigma_e^{n_0} \quad (28-4)$$

$$B(r) = b_0 r^{b_1}$$

b_0 ، n_0 و b_1 ثوابت نورتون هستند که برای مواد مختلف مقادیر متفاوتی دارند. به این ترتیب رفتار خزشی ماده به مقادیر σ_e^c و $\dot{\varepsilon}_e^c$ بستگی دارد. تنش‌ها تابعی از کرنش‌های خزشی کل می‌باشند و نرخ کرنش‌های خزشی به تنش‌ها، تاریخچه بارگذاری جزءهای تنش-کرنش و خصوصیات خزشی ماده وابسته است.

بر پایه معادلات فوق یک حل نیمه تحلیلی جهت بدست آوردن گرادیان دمایی، جابجایی و تنش‌ها در حالت الاستیک، و نیز جابجایی، تنش‌ها و کرنش‌های خزشی انجام خواهد گرفت که به موجب آن مناسب‌ترین دیسک از نظر ساختار ضخامت و توزیع حجمی مشخص خواهد شد.

^۱. Norton's law

فصل پنجم:

حل نیمه تحلیلی

تر مومگنتوالاستیک

۵-۱ مقدمه

دیسک از اجرام سه بعدی است که به دلیل تقارن محوری و نسبت ارتفاع به شعاع بسیار کوچک مشمول برخی ساده سازی ها در تحلیل الاستیک خواهد شد. همانطور که در فصل گذشته بیان شد تنش دیسک، صفحه ای فرض می شود و دسته معادلات پانزده گانه در سیستم مختصات استوانه ای به پنج معادله برای دیسک تبدیل می گردد.

در این پژوهش، دیسکی در نظر گرفته شده که در یک میدان دمایی واقع است و با سرعت زاویه ای ثابت ω می چرخد. این چرخش، نیروی گریز از مرکز ایجاد می کند که به صورت نیروی حجمی^۱ در معادله تعادل دیسک ظاهر می شود.

این فصل ابتدا به تحلیل دمایی دیسک چرخان پرداخته، سپس با حل عددی معادله دیفرانسیل موقعیت دیسک در حالت الاستیک، مناسب ترین ساختار ضخامت و توزیع حجمی دیسک تعیین شده است. در بخش نهایی با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی یکنواخت، اثرات حضور میدان بر رفتار دیسک مورد بررسی قرار گرفته است.

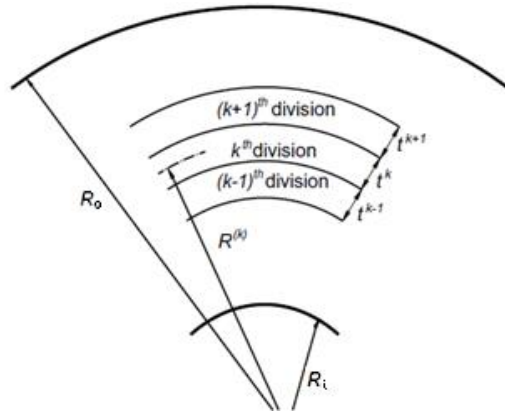
۵-۲ حل نیمه تحلیلی معادله انتقال حرارت

در فصل گذشته معادله انتقال حرارت برای دیسک با ضخامت متغیر به صورت رابطه (۴-۱۷) بیان شد. معادله از نوع درجه دوم با ضرایب متغیر است که به اختصار می توان آن را چنین نوشت:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + c \frac{dT}{dr} = 0 \quad (۱-۵)$$

$$c^{(k)} = \frac{1}{r^{(k)}} + \frac{1}{h(r^{(k)})} \frac{dh(r)}{dr} \Big|_{r=r^{(k)}} + \frac{1}{K(r^{(k)})} \frac{dK(r)}{dr} \Big|_{r=r^{(k)}} ; \quad k = 1, 2, \dots$$

^۱ . body force



شکل ۱-۵: تقسیم بندی فرضی دیسک در راستای شعاع [۳۶].

شرایط مرزی دمایی در شعاع داخلی و خارجی دیسک مقداری معین و ثابت است.

$$B.C: \quad r = r_i \quad \rightarrow \quad T = T_i$$

$$r = r_o \quad \rightarrow \quad T = T_o$$

حل دقیق معادله (۱-۵) با در نظر گرفتن شرایط مرزی داده شده، به شکل زیر است [۴۶]:

(۲-۵)

$$T(r^{(k)}) = \bar{X}_1^{(k)} + \bar{X}_2^{(k)} \exp(-r^{(k)} c^{(k)})$$

\bar{X}_1 و \bar{X}_2 ثوابت نامعین در لایه k ام طبق رابطه فوق هستند. این پاسخ در صورتی می تواند

توزیع دما را مشخص کند که ضریب c مقداری ثابت و معین باشد. در حالی که طبق رابطه (۱-۵)، c

با شعاع دیسک تغییر می کند. البته می توان معادله ۱-۵ را به شکل اشتورم-لیووویل درآورد و حلی

دقیق ارائه نمود؛ اما به دلیل هزینه بر بودن روش ریاضی مذکور، استفاده از روش زیر پیشنهاد می شود

که مقرون به صرفه است و پاسخی معقول دارد.

برای حل معادله انتقال حرارت ابتدا می توان دیسک را در راستای شعاع، به n قسمت تقسیم

کرد. به طوری که گویی دیسک از کنار هم چیدن لایه های متوالی تشکیل شده است. تعداد

تقسیمات باید آنقدر باشد که ضخامت هر یک از قسمت‌ها تا اندازه‌های کوچک شود که بتوان تغییر خصوصیات ماده را در هر قسمت ثابت فرض کرد. حال در هر قسمت، c مقداری ثابت دارد و معادله انتقال حرارت برای آن از نوع مرتبه دو با ضریب ثابت است و معادله (۵-۲) برای لایه k ام قابل حل می‌باشد.

هر قسمت، دو شرط مرزی دمایی ابتدایی و انتهایی دارد، که باید بین آن‌ها پیوستگی برقرار باشد. شرط پیوستگی آن است که دما و گرادیانش در ابتدا و انتهای هر قسمت یکسان باشد.

$$T \Big|_{r = r^{(k)} + \frac{t^{(k)}}{2}} = T \Big|_{r = r^{(k+1)} - \frac{t^{(k+1)}}{2}}$$

$$\frac{dT}{dr} \Big|_{r = r^{(k)} + \frac{t^{(k)}}{2}} = \frac{dT}{dr} \Big|_{r = r^{(k+1)} - \frac{t^{(k+1)}}{2}}$$

برای n قسمت، n معادله می‌توان نوشت که با حل دستگاه معادلات n معادله- n مجهول به کمک نرم افزار *Matlab* و قرار دادن شرایط مرزی، توزیع دما در سراسر دیسک تعیین خواهد شد.

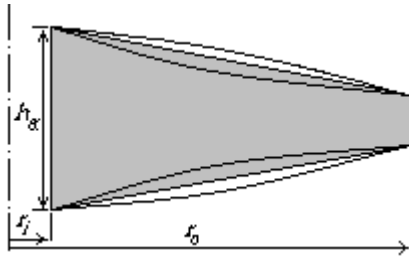
برای حل نیمه تحلیلی این بخش فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

$$K_{Al} = 237 \quad \frac{W}{m^{\circ}C} \quad K_{sic} = 120 \quad \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$r_i = 0.2 \quad m \quad r_o = 1 \quad m \quad h_a = 0.05 \quad m$$

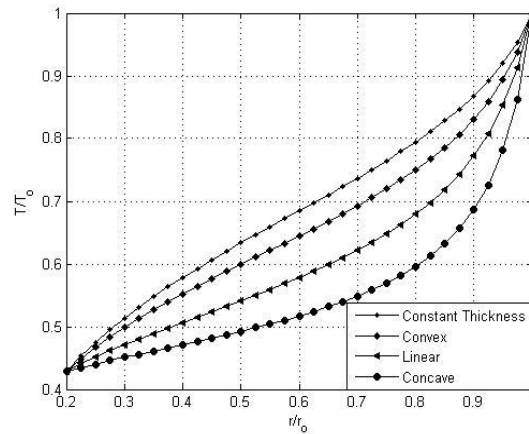
$$T_i = 30^{\circ}c \quad T_o = 70^{\circ}c$$

$$E_{Al} = 70 \quad GPa \quad E_{sic} = 410 \quad GPa$$



شکل ۵-۲: تصویر کلی دیسک

نمودار توزیع دمای بی بعد برای هر چهار ساختار ضخامت به صورت زیر به دست آمده است:



نمودار ۵-۱: گرادیان دمایی در راستای شعاع، برای چهار نوع ساختار ضخامت دیسک

در تحلیل معادله انتقال حرارت و رسم گرادیان دمایی در طول شعاع دیسک در نمودار (۵-۱)،

دیسک با هندسه مقعر از گرادیان دمایی کمتر و توزیع یکنواخت‌تری نسبت به سایر هندسه‌ها

برخوردار است.

۵-۳ حل نیمه تحلیلی الاستیک دیسک چرخان

معادله دیفرانسیل موقعیت دیسک چرخان تنها در حضور میدان دمایی، مطابق روابط (۴-۲۰) و (۴-۲۱) خواهد بود. معادله از نوع مرتبه دو با ضرایب متغیر است. بنابراین همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد حل دقیقی برای آن وجود ندارد و رابطه زیر تنها برای لایه k ام صادق است زیرا ضخامت لایه آنقدر کم است که خواص ماده در آن ثابت در نظر گرفته شده است [۴۶].

$$u^{(k)} = X_1^{(k)} \exp(\eta_1^{(k)} r^{(k)}) + X_2^{(k)} \exp(\eta_2^{(k)} r^{(k)}) - \frac{C_4^{(k)}}{C_3^{(k)}} \quad (۳-۵)$$

$$\eta_1^{(k)}, \eta_2^{(k)} = \frac{C_2^{(k)} \pm \sqrt{(C_2^{(k)})^2 - 4C_3^{(k)} C_1^{(k)}}}{2C_1^{(k)}}$$

X_1 و X_2 ثوابت نامعین و C_1, C_2, C_3 و C_4 ضرایب معادله حاکم بر دیسک در لایه k ام هستند. در لایه k ام، ضرایب معادله حاکم و ثوابت فوق، مقداری مشخص و در نتیجه جابجایی شعاعی، معین خواهد بود. شرط پیوستگی نیز در هر لایه باید برقرار باشد، یعنی:

$$u \Big|_{r=r^{(k)} + \frac{t^{(k)}}{2}} = u \Big|_{r=r^{(k+1)} - \frac{t^{(k+1)}}{2}}$$

$$\sigma_r \Big|_{r=r^{(k)} + \frac{t^{(k)}}{2}} = \sigma_r \Big|_{r=r^{(k+1)} - \frac{t^{(k+1)}}{2}}$$

از آنجا که با در نظر گرفتن شرایط مرزی کلی دیسک در جدار داخلی و خارجی، تنها جابجایی و تنش شعاعی معین است، برای کلیه لایه‌ها نیز پیوستگی این دو مورد در نظر گرفته می‌شود. شرط پیوستگی در مرز لایه‌ها را برای سایر مؤلفه‌های رفتاری دیسک از جمله تنش محیطی نمی‌توان نوشت

زیرا در سطح داخلی و خارجی دیسک، تنش محیطی معینی در دست نیست، در نتیجه حل دستگاه معادلات n مجهولی برای تنش محیطی میسر نخواهد شد.

با نوشتن جداگانه معادله دیفرانسیل (۴-۲۰) برای تمامی لایه‌ها و حل این دستگاه معادلات n معادله- n مجهول به کمک نرم افزار *Matlab*، جابجایی شعاعی کلیه نقاط دیسک به دست خواهد آمد. در تحلیل‌های مربوط به جابجایی شعاعی و تنش‌ها دو شرط مرزی متفاوت، به طور مجزا بررسی خواهد شد:

$$B.C: \quad \begin{array}{l} r = r_i \quad \rightarrow \quad \sigma_r = 0 \\ r = r_o \quad \rightarrow \quad \sigma_r = 0 \end{array} \quad 1. \text{ دو سر آزاد!}$$

$$B.C: \quad \begin{array}{l} r = r_i \quad \rightarrow \quad u = 0 \\ r = r_o \quad \rightarrow \quad \sigma_r = 0 \end{array} \quad 2. \text{ یک سر گیردار-یک سر آزاد!}^2$$

برای حل نیمه تحلیلی این بخش، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۴۶]:

$$E_{AL} = 70 \text{ GPa} \quad E_{sic} = 410 \text{ GPa}$$

$$\rho_{AL} = 2700 \text{ Kgm}^{-3} \quad \rho_{sic} = 3200 \text{ Kgm}^{-3}$$

$$\alpha_{AL} = 23.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \quad \alpha_{sic} = 4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\nu = 0.3 \quad \omega = 1200 \text{ rpm}$$

$$r_i = 0.2 \text{ m} \quad r_o = 1 \text{ m}$$

^۱ - Free-Free

^۲ - Fixed-Free

$$\frac{r_o}{r_i} = 5$$

$$h_a = 0.05 \text{ m}$$

۵-۳-۱ انتخاب ساختار ضخامت مناسب در حالت الاستیک

در این قسمت، جابجایی و تنش‌های ترموالاستیک چهار نوع دیسک که از لحاظ ساختار هندسی با هم متفاوتند، بررسی خواهد شد تا مناسب‌ترین هندسه مشخص شود.

چهار نوع ساختار ضخامتی که از آن یاد شد عبارت است از ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر با شیب خطی، محدب و مقعر که برای حل، مقادیر زیر در نظر گرفته شده است [۳۶]:

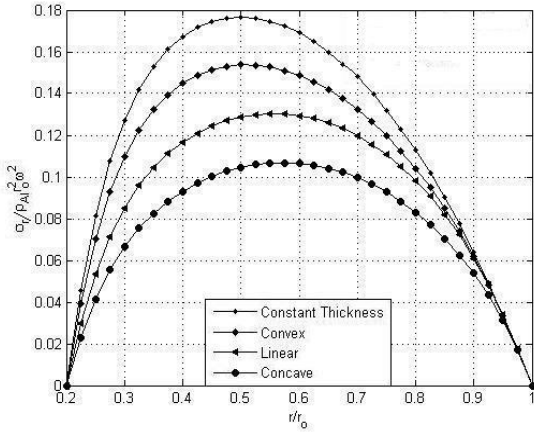
دیسک با ضخامت یکنواخت	$q = 0$
دیسک خطی	$m = 1 \quad q = 0.8$
دیسک محدب	$m = 3 \quad q = 0.4151965$
دیسک مقعر	$m = 0.5 \quad q = 0.96$

چهار دیسک مورد نظر، شعاع داخلی و خارجی و h_a برابر دارند، یعنی مبنای هندسی آن‌ها یکسان است. با بکارگیری مقادیر فوق در حل نیمه تحلیلی، دیسک‌ها با هم قابل مقایسه خواهند بود و نمودارهای جابجایی شعاعی و تنش‌های شعاعی، محیطی و مؤثر برای چهار دیسک یاد شده رسم خواهد شد تا با مقایسه آن‌ها در کنار هم بهترین هندسه تعیین گردد.

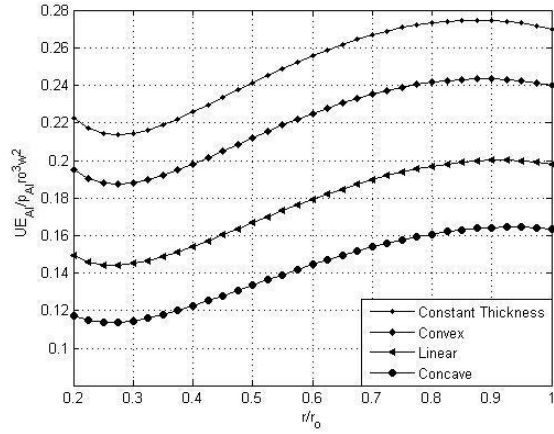
کلیه نمودارها به صورت بی‌بعد رسم شده که پارامترهای بی‌بعدسازی در زیر آورده شده است. برای رسم، جابجایی شعاعی بر U و تنش‌ها بر σ تقسیم می‌شوند:

$$U = \frac{\rho_{Al} r_o^3 \omega^2}{E_{Al}}, \quad \sigma = \rho_{Al} r_o^2 \omega^2$$

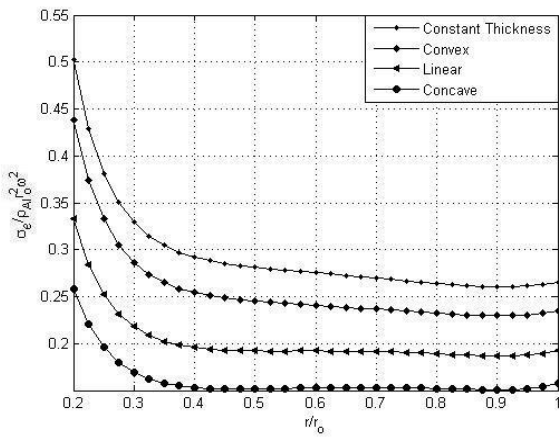
دوسر آزاد:



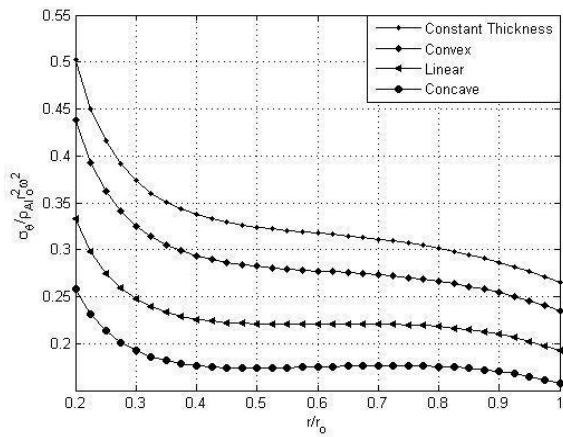
نمودار ۳-۵: مقایسه توزیع تنش شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت



نمودار ۲-۵: مقایسه جابجایی شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت

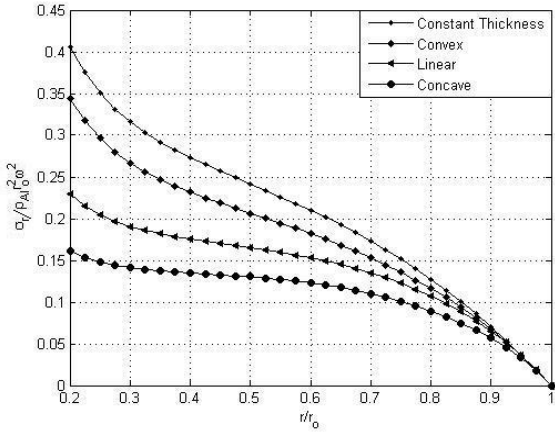


نمودار ۵-۵: مقایسه توزیع تنش مؤثر چهار دیسک با هندسه متفاوت

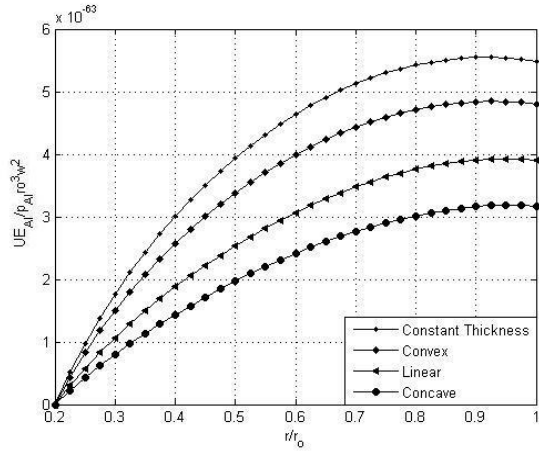


نمودار ۴-۵: مقایسه توزیع تنش محیطی چهار دیسک با هندسه متفاوت

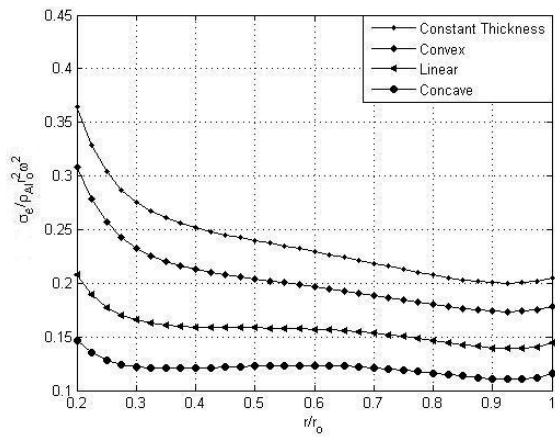
یک سر گیردار-یک سر آزاد:



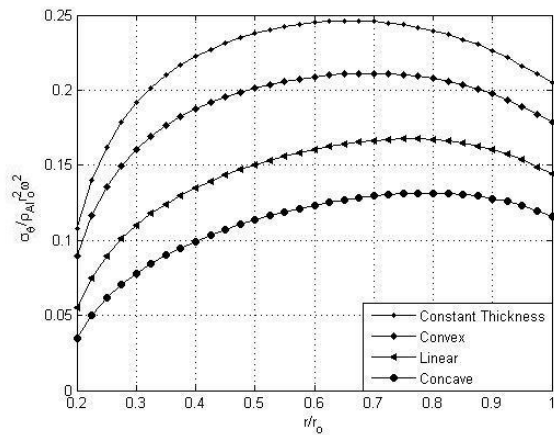
نمودار ۷-۵: مقایسه توزیع تنش شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت



نمودار ۶-۵: مقایسه جابجایی شعاعی چهار دیسک با هندسه متفاوت



نمودار ۹-۵: مقایسه توزیع تنش مؤثر چهار دیسک با هندسه متفاوت



نمودار ۸-۵: مقایسه توزیع تنش محیطی چهار دیسک با هندسه متفاوت

در کلیه نمودارهای مربوط به گرادیان دما، جابجایی شعاعی و تنش‌های شعاعی، محیطی و مؤثر، ترتیب ظهور دیسک‌ها از بیشترین تا کمترین مقدار، به صورت ضخامت یکنواخت، محدب، خطی و مقعر بوده و این امر در هر دو شرط مرزی صادق است. بنابر این دیسک با ساختار ضخامت مقعر به دلیل داشتن جابجایی شعاعی و تنش‌های کمتر و یکنواخت‌تر نسبت به سایر هندسه‌ها، به عنوان مناسب‌ترین هندسه معرفی می‌گردد.

۵-۳-۲ انتخاب توزیع حجمی مناسب

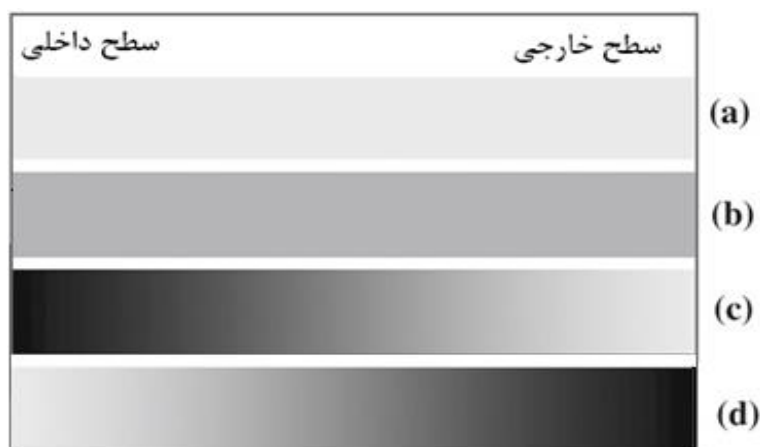
در این مرحله، جابجایی شعاعی و تنش‌های ترموالاستیک چهار دیسک که از لحاظ توزیع حجمی با هم متفاوتند مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا مناسب‌ترین توزیع حجمی مشخص شود.

a. دیسک از جنس آلومینیم خالص

b. دیسک با تقویت یکنواخت ۲۰ درصد

c. دیسک با تقویت کاهشی از سطح داخل (۴۰٪) به خارج (آلومینیم خالص)

d. دیسک با تقویت افزایشی از سطح داخل (آلومینیم خالص) به خارج (۴۰٪)



شکل ۵-۳: چهار نوع توزیع حجمی در راستای شعاع دیسک [۴۶].

شکل فوق، حالات a تا d را به صورت شماتیک در مقطع دیسک نشان می‌دهد. توزیع حجمی ذرات SiC از سطح داخل دیسک به خارج، به صورت تابعی خطی، بنابر معادله (۳-۴) فرض می‌شود:

$$v(r) = v_i + \frac{r - r_i}{r_o - r_i} (v_o - v_i)$$

در معادله فوق v_o و v_i به ترتیب درصد حجمی ذرات سیلیکون کارباید در سطح داخل و خارج دیسک و r_o و r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی دیسک می‌باشند.

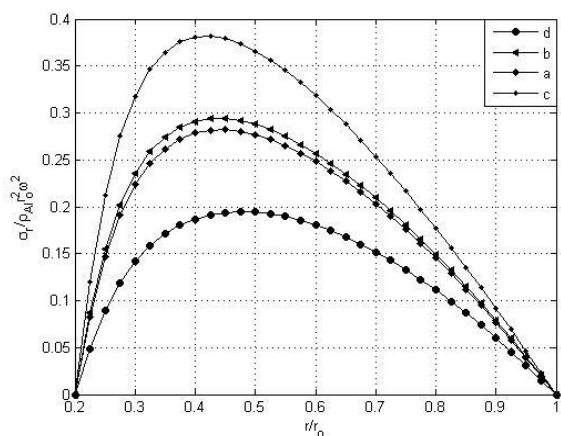
بر اساس رابطه (۲-۴)، تمامی خصوصیات مکانیکی، حرارتی و مغناطیسی دیسک به صورت یک تابع وابسته به شعاع، بر حسب درصد حجمی ذرات SiC مدل می‌شود که در آن P ، ویژگی وابسته به شعاع، P_{AL} ، ویژگی آلومینیم خالص، P_{SiC} ، ویژگی سیلیکون کارباید خالص و v ، حجم ذرات SiC در شعاع r می‌باشد.

بر اساس معادله (۱-۴)، کلیه خصوصیات ماده شامل مکانیکی، مغناطیسی و حرارتی به جز نسبت پواسون، عبارتند از:

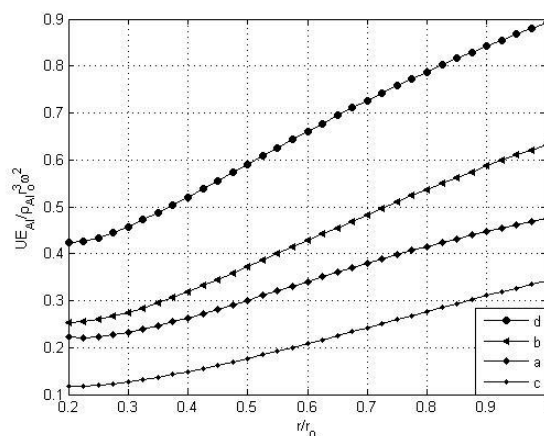
$$\begin{aligned} \rho(r) &= \rho_{AL} + (\rho_{sic} - \rho_{AL}) \frac{v(r)}{100} \\ E(r) &= E_{AL} + (E_{sic} - E_{AL}) \frac{v(r)}{100} \\ \alpha(r) &= \alpha_{AL} + (\alpha_{sic} - \alpha_{AL}) \frac{v(r)}{100} \end{aligned} \quad (۴-۵)$$

حال به کمک روابطی که ذکر شد، از طریق کد نویسی در فضای نرم‌افزار *Matlab*، این چهار نوع دیسک، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در واقع چهار توزیع حجمی a تا d ، برای هر چهار نوع ساختار ضخامت دیسک، در هر دو شرط مرزی یاد شده، تحلیل خواهند شد.

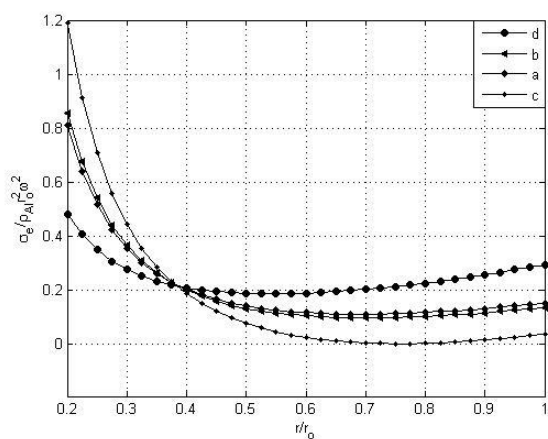
دو سر آزاد، ضخامت یکنواخت:



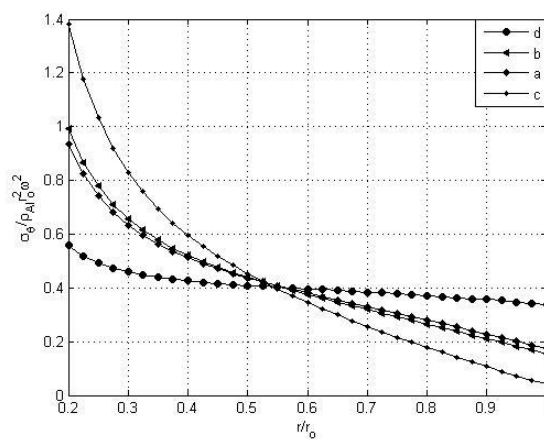
نمودار ۵-۱۱: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک
ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۱۰: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک
ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

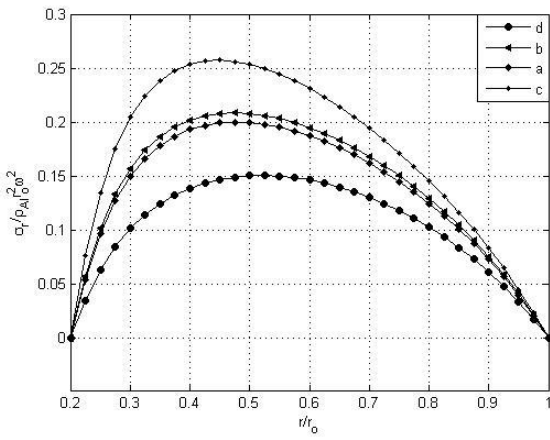


نمودار ۵-۱۳: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک
ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

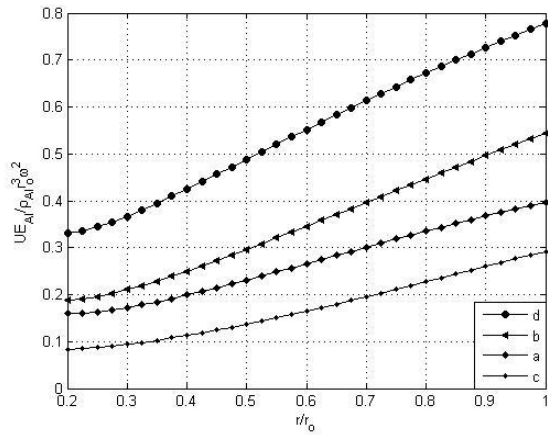


نمودار ۵-۱۲: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک
ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

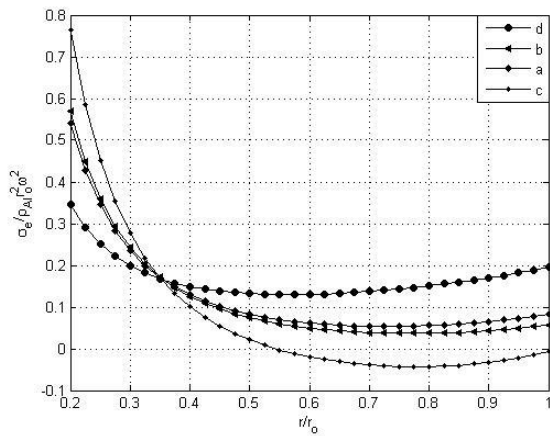
دوسر آزاد، خطی:



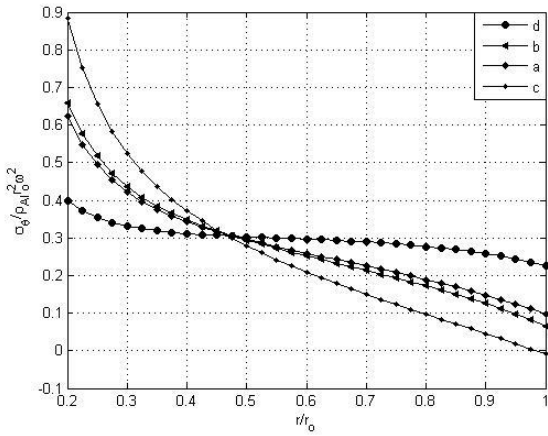
نمودار ۵-۱۵: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۱۴: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

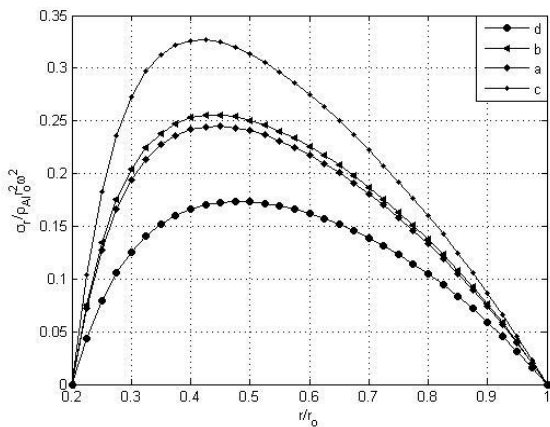


نمودار ۵-۱۷: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

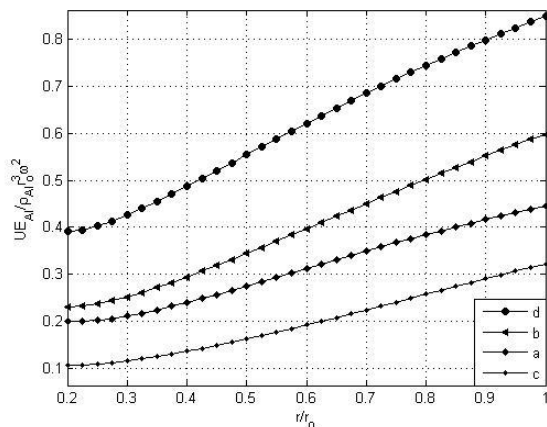


نمودار ۵-۱۶: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

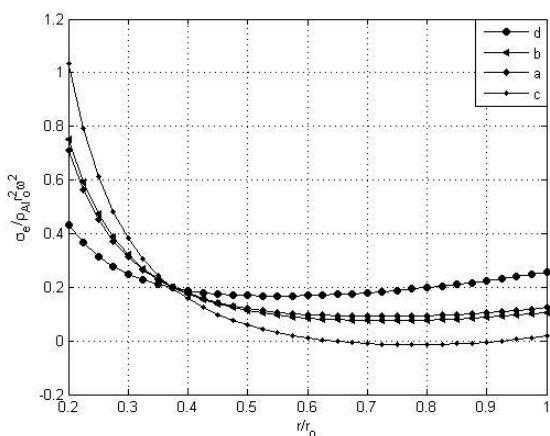
دو سر آزاد، محدب:



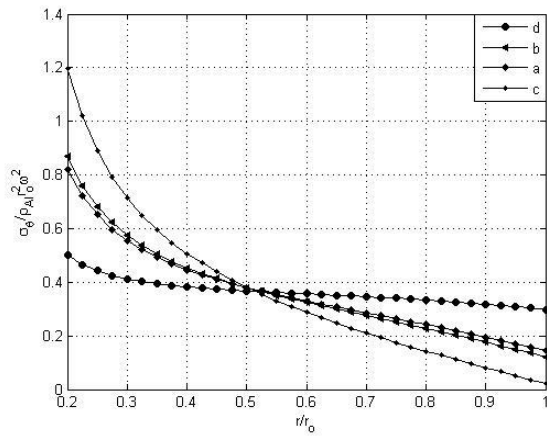
نمودار ۵-۱۹: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۱۸: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

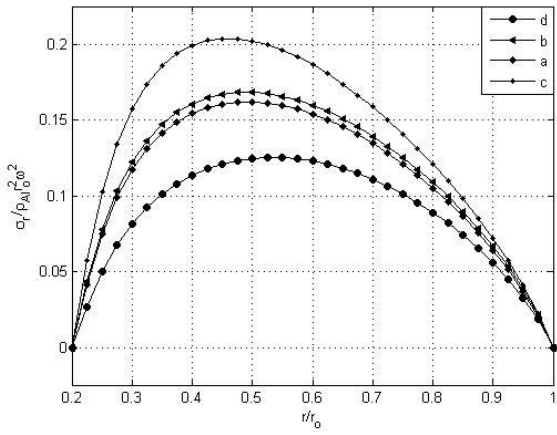


نمودار ۵-۲۱: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

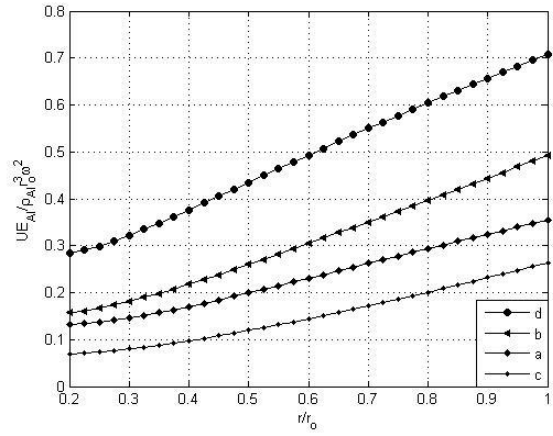


نمودار ۵-۲۰: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

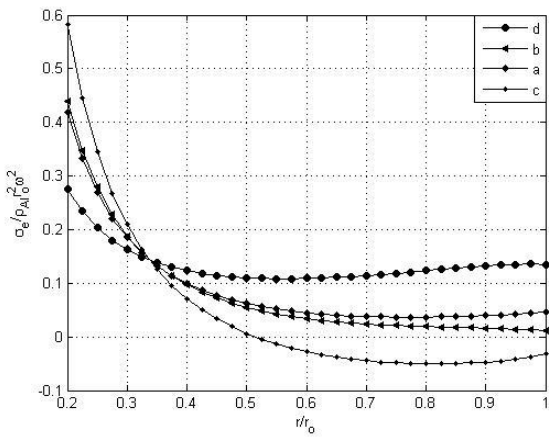
دو سر آزاد، مقعر:



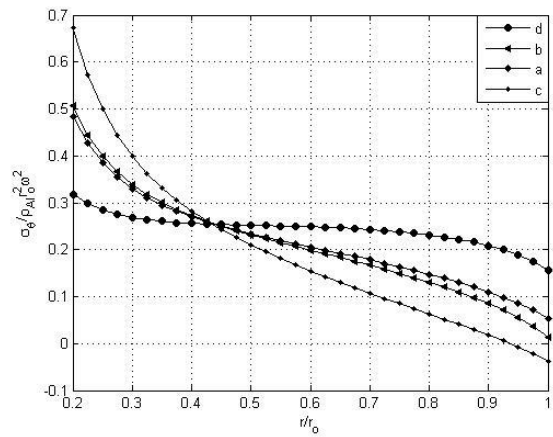
نمودار ۲۳-۵: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۲۲-۵: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



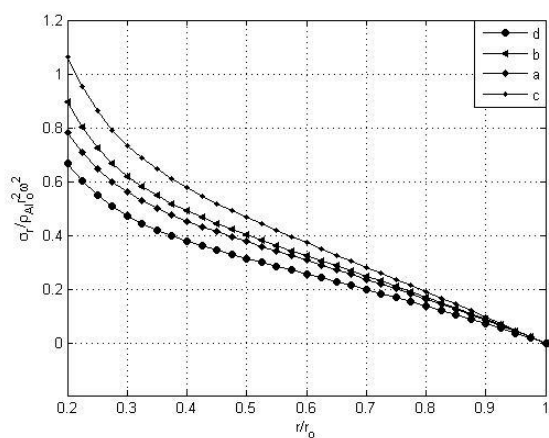
نمودار ۲۵-۵: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



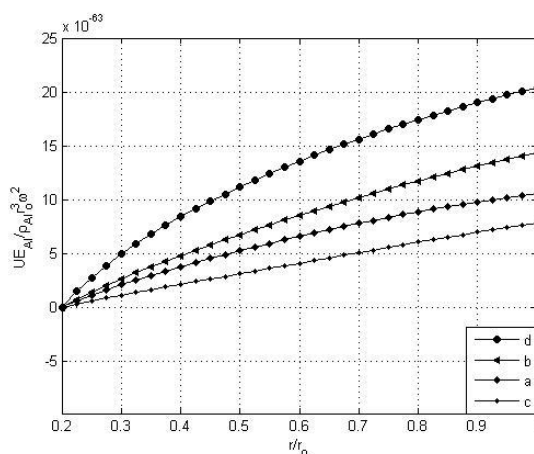
نمودار ۲۴-۵: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی

در تحلیل ترموالاستیک دیسک چرخان، در شرایط مرزی دو سر آزاد، برای تمام هندسه‌ها و انواع توزیع حجمی، جابجایی شعاعی شعاع خارجی بیشتر از داخلی است. تنش شعاعی در شعاع داخل و خارج صفر است که شرایط مرزی را ارضا نموده و در شعاع نسبی بین $0/4$ تا $0/5$ بیشینه است. تنش محیطی و مؤثر در شعاع داخل بیشتر از خارج است. تنش مؤثر که در واقع برآیند تنش‌های شعاعی و محیطی است نشان می‌دهد که شعاع داخلی دیسک آسیب‌پذیرتر است.

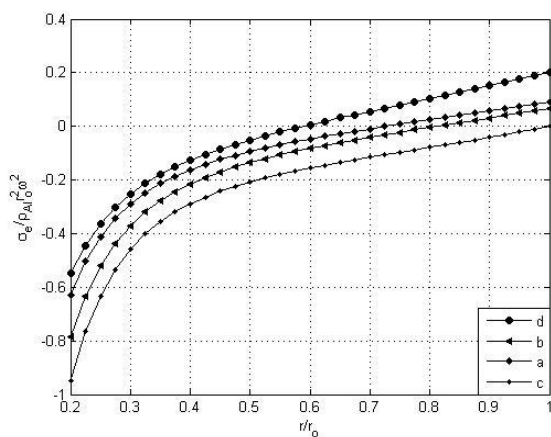
یک سرگردار-یک سر آزاد، ضخامت یکنواخت:



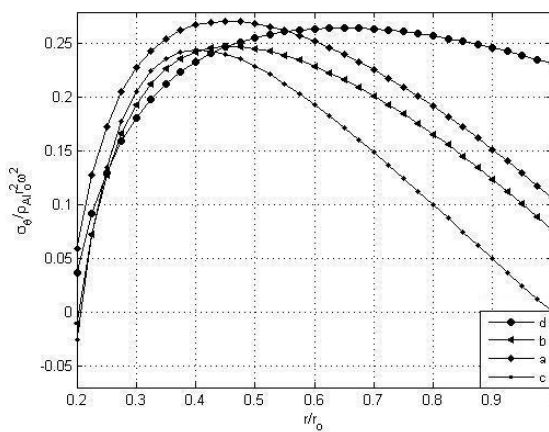
نمودار ۵-۲۷: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۲۶: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

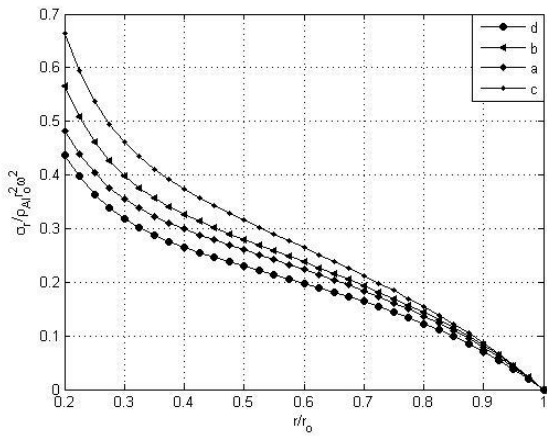


نمودار ۵-۲۹: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

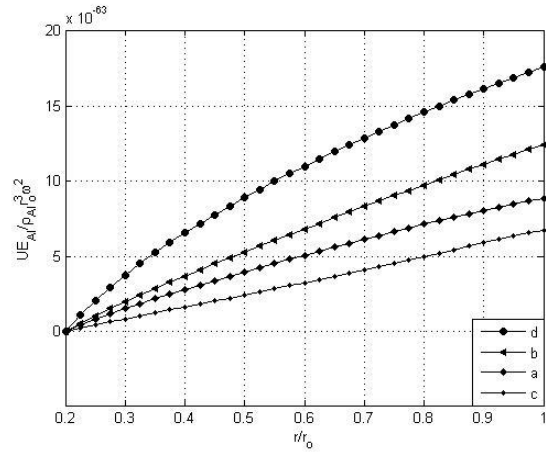


نمودار ۵-۲۸: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک ضخامت ثابت برای چهار نوع توزیع حجمی

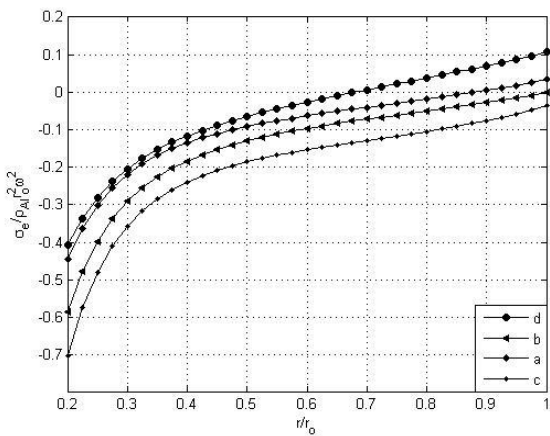
یک سرگردار-یک سر آزاد، خطی:



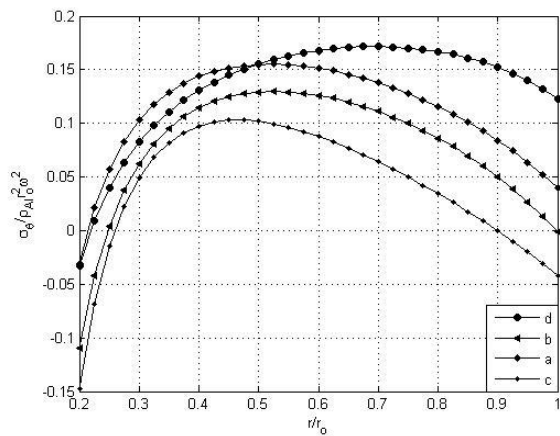
نمودار ۵-۳۱: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۳۰: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

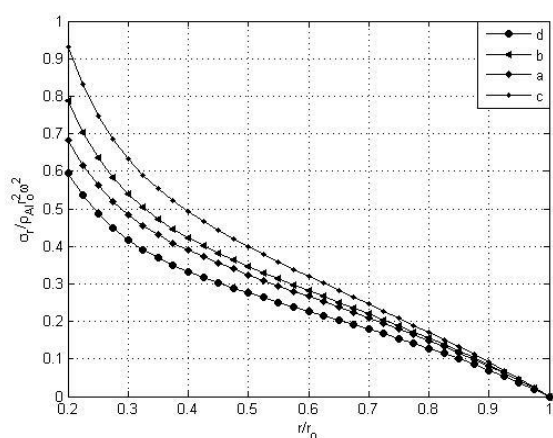


نمودار ۵-۳۳: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

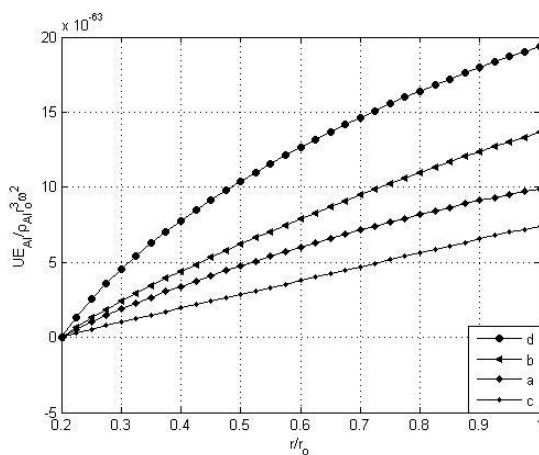


نمودار ۵-۳۲: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک خطی برای چهار نوع توزیع حجمی

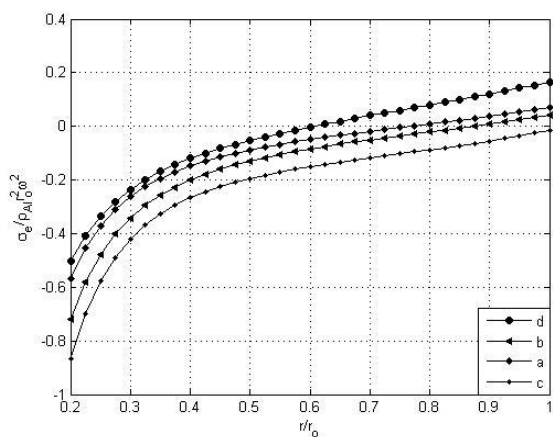
یک سرگردار-یک سر آزاد، محدب:



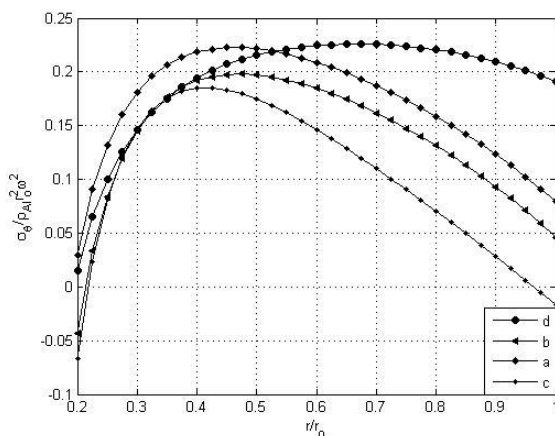
نمودار ۵-۳۵: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۳۴: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

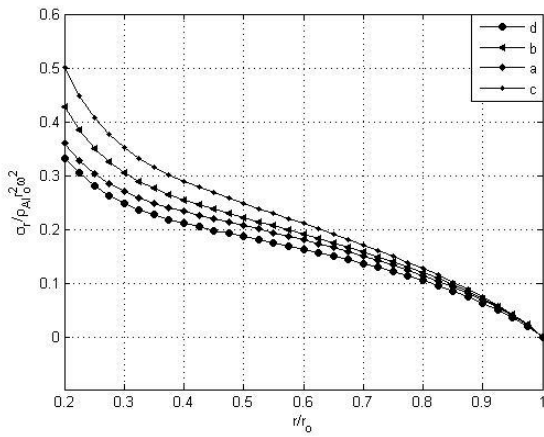


نمودار ۵-۳۷: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

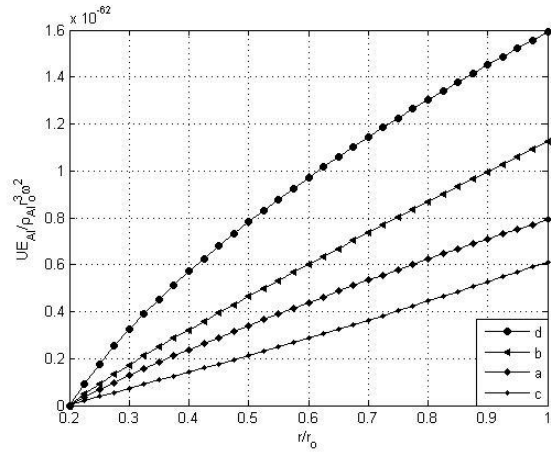


نمودار ۵-۳۶: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک محدب برای چهار نوع توزیع حجمی

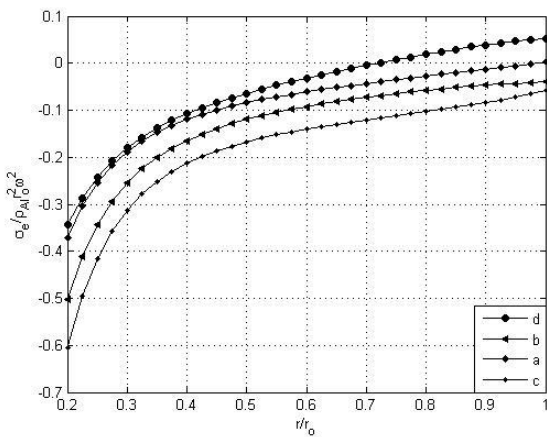
یک سرگردار-یک سر آزاد، مقعر:



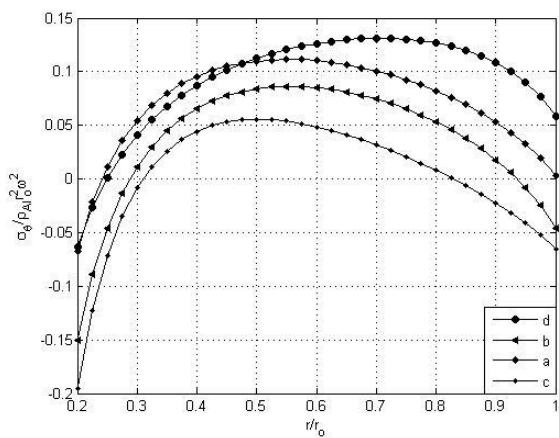
نمودار ۵-۳۹: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۳۸: جابجایی شعاعی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۴۱: توزیع تنش مؤثر در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی



نمودار ۵-۴۰: توزیع تنش محیطی در راستای شعاع دیسک مقعر برای چهار نوع توزیع حجمی

در تحلیل رفتار ترموالاستیک دیسک چرخان، در شرایط مرزی یک سر گیردار-یک سر آزاد، برای تمام هندسه‌ها و انواع توزیع حجمی، جابجایی شعاعی در شعاع داخل صفر است که شرط مرزی را ارضا می‌کند و تا شعاع خارجی روند افزایشی دارد. تنش شعاعی در شعاع داخلی دارای مقدار بیشینه است و با روند کاهشی در شعاع خارجی به صفر می‌رسد. در این حالت نیز تنش مؤثر در شعاع داخلی بیش از خارجی است و شعاع داخلی بیشتر در معرض آسیب است.

با بررسی نمودارهای این قسمت، به نظر می‌رسد دیسک با توزیع حجمی d ، به دلیل روند یکنواخت تر توزیع جابجایی و تنش‌ها در طول شعاع و دیسک c به دلیل کمتر بودن مقدار آن در اکثر نمودارها، نسبت به انواع دیگر مناسب‌تر باشند. اما آنچه که واضح است دو نوع c و d در کلیه اشکال فوق، در منتهی الیه بالا و پایین واقع شده‌اند. به طوری که تقریباً در همه موارد، مقادیر مربوط به سایر توزیع‌های حجمی بین این دو واقع شده‌اند. از آنجایی که نمی‌توان حدس زد تأثیر حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و نیز گذر زمان و بروز پدیده خزش بر دیسک‌ها چگونه است، در اینجا هر دو نوع c و d مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا نتیجه گیری جامعی به دست آید که انواع توزیع حجمی را پوشش دهد.

۵-۴ اثرات حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

در قسمت قبل با مقایسه دیسک‌ها در حضور میدان دمایی، دیسک با هندسه مقعر به عنوان مناسب‌ترین ساختار انتخاب شد. در این قسمت دیسک مقعر در میدان مغناطیسی یکنواختی به شدت $H_z = 2.23 \times 10^9 \text{ A/m}$ قرار داده می‌شود تا اثر آن بر جابجایی و تنش‌ها مشاهده گردد.

در فصل گذشته روابط مربوط به حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بیان گردید. همانطور که ذکر شد، میدان مغناطیسی بر توزیع انتقال حرارت در دیسک تأثیری ندارد اما در معادله تعادل

دیسک ظاهر می‌شود و برضرایب معادله دیفرانسیل جابجایی دیسک اثر می‌گذارد، این تأثیرات در روابط (۴-۱۲)، (۴-۱۷)، (۴-۱۸) و (۴-۱۹) ظاهر شده است.

μ ، قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی است که برای دیسک FG مورد نظر، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(r) = \mu_{AL} + (\mu_{sic} - \mu_{AL}) \frac{v(r)}{100} \quad (5-5)$$

برای حل نیمه تحلیلی، مقادیر زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$\mu_{AL} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad \mu_{sic} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$H_z = 2.23 \times 10^9 \text{ A/m}$$

قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی برای مواد مختلف، طبق رابطه زیر نسبت به خلأ تعریف می‌شود:

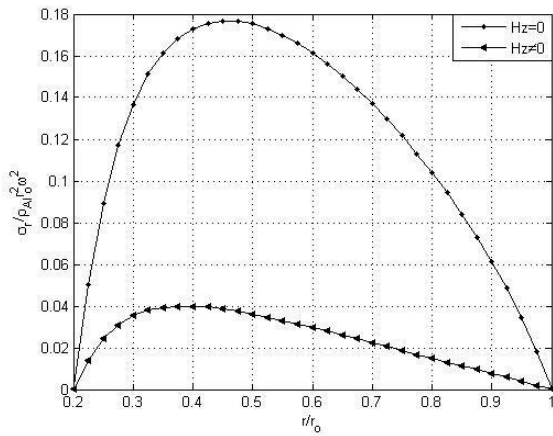
$$\mu(r) = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$\mu(r)$ ، قابلیت نفوذ مغناطیسی نسبی و μ_0 ، نفوذ خلأ است. به برخی مواد از جمله آلومینیم و سیلیکون کاربرد اصطلاحاً مواد به ندرت مغناطیسی^۱ اطلاق می‌گردد. برای این مواد $\mu(r) = 1$ در نظر گرفته می‌شود و $\mu = \mu_0$ خواهد بود، به همین دلیل قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی آلومینیم و سیلیکون کاربرد مقداری برابر با هم انتخاب شده است [۴۸ و ۴۹].

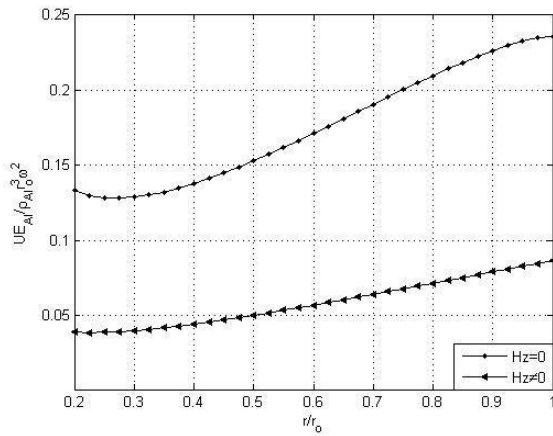
برای تحلیل این قسمت، دیسک با هندسه مقعر، در شرایط بارگذاری مکانیکی، حرارتی و مغناطیسی در نظر گرفته شده است و رفتار آن در هر دو شرط مرزی یاد شده و برای هر دو توزیع حجمی c و d مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

^۱. rarely magnetic

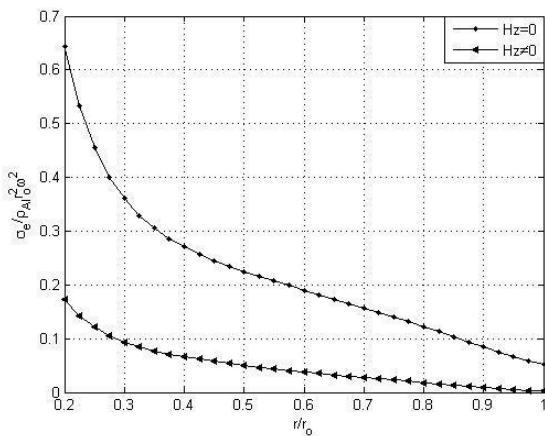
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c:



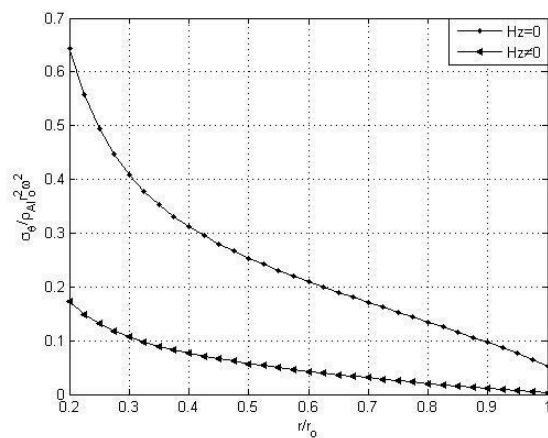
نمودار ۴۳-۵: مقایسه توزیع تنش شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۴۲-۵: مقایسه جابجایی شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

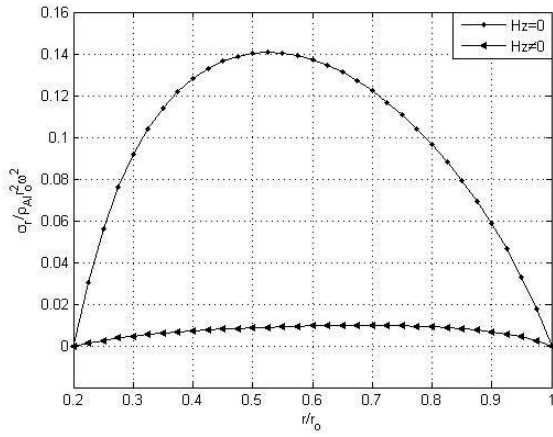


نمودار ۴۵-۵: مقایسه توزیع تنش مؤثر دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

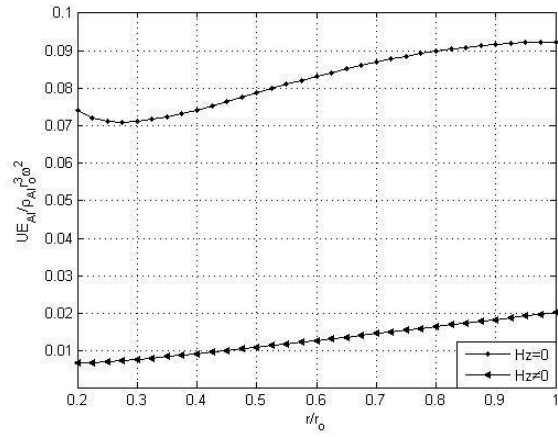


نمودار ۴۴-۵: مقایسه توزیع تنش محیطی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

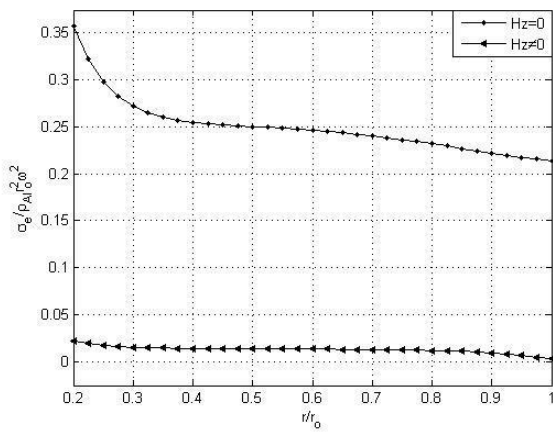
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع d:



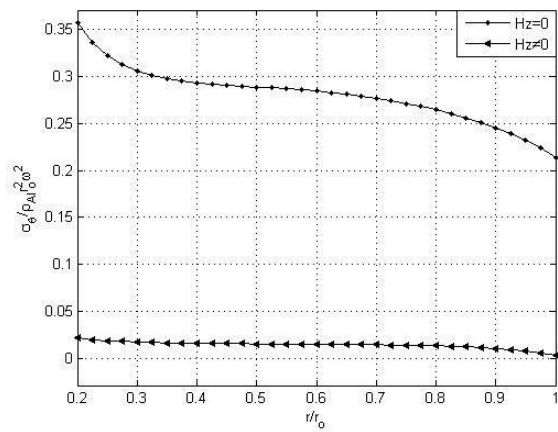
نمودار ۵-۴۷: مقایسه توزیع تنش شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۵-۴۶: مقایسه جابجایی شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

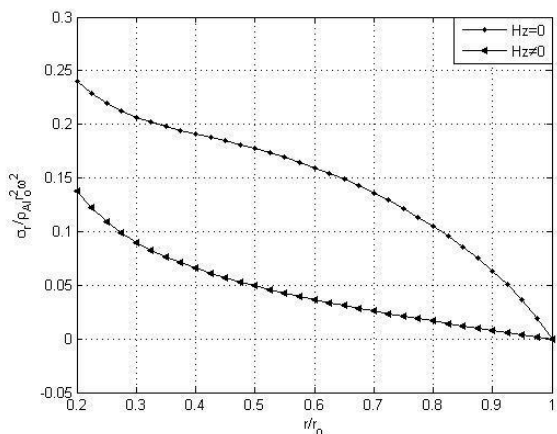


نمودار ۵-۴۹: مقایسه توزیع تنش مؤثر دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

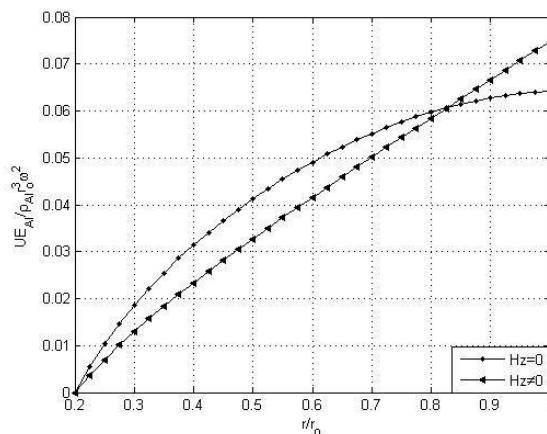


نمودار ۵-۴۸: مقایسه توزیع تنش محیطی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

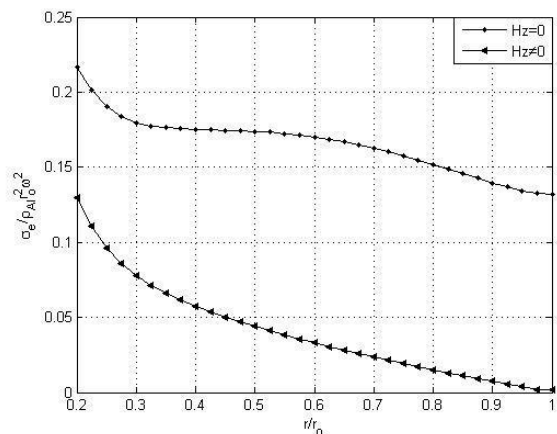
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c:



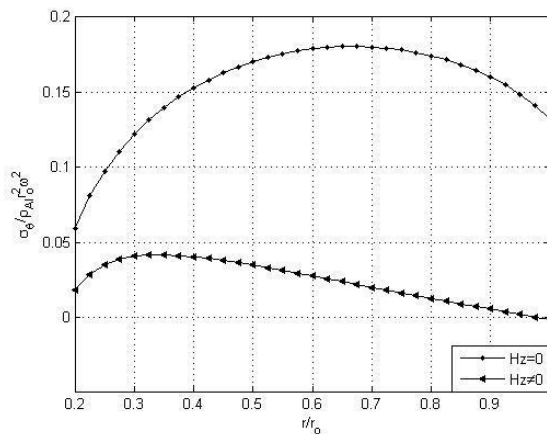
نمودار ۵-۵۱: مقایسه توزیع تنش شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۵-۵۰: مقایسه جابجایی شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

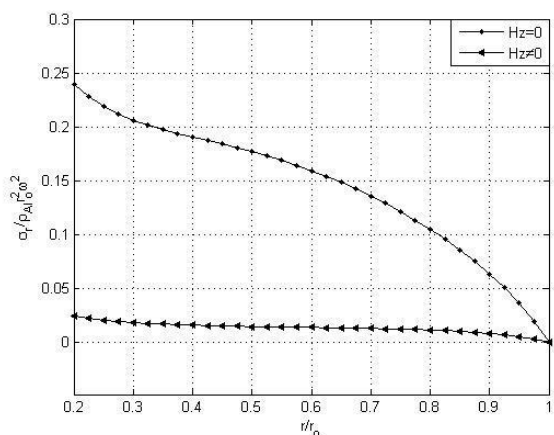


نمودار ۵-۵۳: مقایسه توزیع تنش مؤثر دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

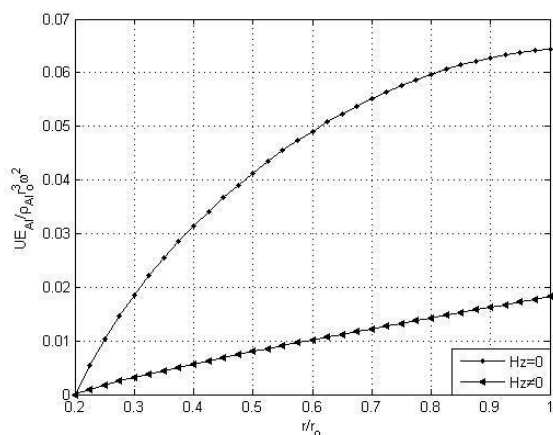


نمودار ۵-۵۲: مقایسه توزیع تنش محیطی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

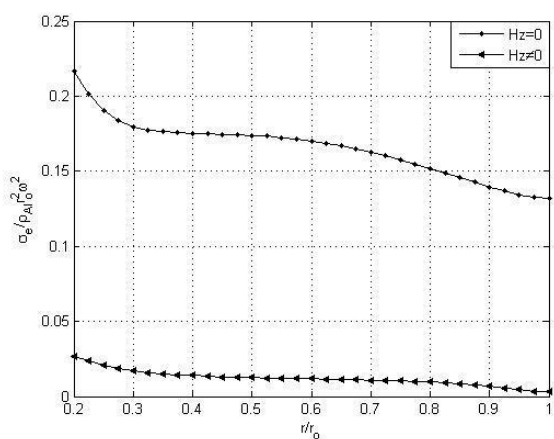
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع d:



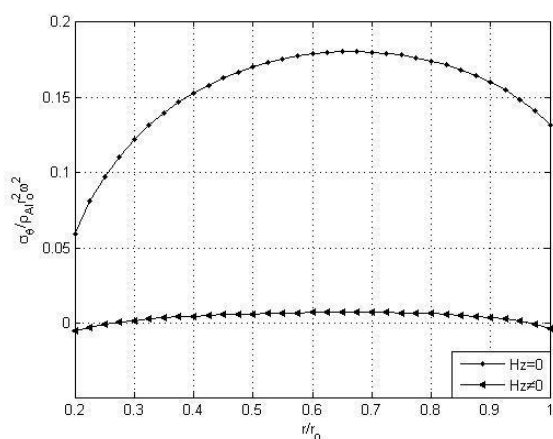
نمودار ۵-۵۵: مقایسه توزیع تنش شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۵-۵۴: مقایسه جابجایی شعاعی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۵-۵۷: مقایسه توزیع تنش مؤثر دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت



نمودار ۵-۵۶: مقایسه توزیع تنش محیطی دیسک با هندسه مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت

نمودارهای به دست آمده، به وضوح بیانگر این امر است که حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، به شدت بر رفتارهای الاستیک دیسک اثر می‌گذارد و جابجایی شعاعی و تنش‌ها را به میزان قابل توجهی تقلیل می‌بخشد.

در فصل آینده، رفتار خزشی دیسک مورد تجزیه تحلیل قرار خواهد گرفت و تأثیر حضور میدان مغناطیسی بر رفتار دیسک، در طی سال‌های آینده بررسی خواهد شد.

فصل ششم:

تحلیل

رفتار خزشی

۶-۱ مقدمه

در فصل‌های گذشته، پدیده خزش و کارهای صورت گرفته تا به امروز مورد بحث قرار گرفت. با نوشتن معادلات تعادل، سازگاری و روابط بین تنش‌ها و کرنش‌ها در حالت کلی، رفتار خزشی دیسک حاصل شد. به دست آوردن کرنش‌های خزشی، بر اساس تنش و کرنش خزشی مؤثر، بر اساس معادلات پیرانتل روس^۱ بیان گردید و نیز شرایط مرزی و چگونگی توزیع دما در راستای شعاع دیسک، به تفصیل بحث شد.

با مروری بر فصل چهارم، معادلات و روابط لازم در جهت تحلیل خزش دیسک چرخان با ضخامت متغیر در دست است.

۶-۲ روش حل بر اساس همگرایی جزء‌های کرنش خزشی

این روش مبتنی بر حدس جزء‌های کرنش خزشی می باشد در هر مرحله زمانی برای تمامی نقاط تقسیم جزء‌های کرنشی خزشی محاسبه می شود. پس از همگرایی جزء‌های کرنش، مقادیر کرنش کل ϵ_r^c و ϵ_θ^c محاسبه می شود. سپس الگوریتم مجدداً با داشتن یک جزء زمانی جدید ادامه می‌یابد مراحل تکرار تا رسیدن به تعداد تکرار تعریف شده (۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال) ادامه می‌یابد. در انتها مقادیر جابجایی شعاعی خزشی U_c و تنش‌های σ_r ، σ_θ و σ_e برای تمامی زمان‌ها در تمامی نقاط تقسیم بدست آید.

دیسک را می‌توان به صورت تعداد زیادی حلقه دایروی نازک فرض نمود که هر حلقه به نوبه خود تنش متغیری نسبت به زمان دارد. از طرفی با توجه به تفاوت دما و سطح تنش در هر لایه،

^۱. Prandtl-Reuss

خزش این حلقه‌ها متفاوت خواهد بود. در هر حلقه، تنش‌های متغیر دو محوری وجود دارد در حالی که معادله ساختاری ماده تنها براساس یک تنش بیان می‌شود. بنابراین لازم است تا براساس تنش‌های دو محوری، یک تنش مؤثر محاسبه گردیده و از آن در معادله ساختاری ماده استفاده شود تا بتوان رفتار خزشی را در تمام دیسک بدست آورد.

در زیر، به ترتیب مراحل این روش عددی شرح داده شده است:

۱- در اولین مرحله جزء زمانی (Δt) مناسبی انتخاب می‌گردد. زمان کل، مجموع جزءهای زمانی در طی فرآیند خزش می‌باشد:

$$t_i = \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k + \Delta t_i \quad (1-6)$$

در هر مرحله، نرخ کرنش خزشی مقدار کمی دارد و در نتیجه همگرایی روش عددی با مقادیر بزرگی برای جزءهای زمانی در حدود ۸۶۴۰۰۰ ثانیه، زمانی معادل ۱۰ روز امکان‌پذیر می‌باشد.

۲- مقادیر $0/000001$ و $-0/000001$ به عنوان مقادیر اولیه کرنش‌های خزشی مماسی و شعاعی $\Delta \mathcal{E}_{r,ij}^c$ و $\Delta \mathcal{E}_{\theta,ij}^c$ در نظر گرفته شده است. مقادیر جزءهای کرنش خزشی به دست آمده به مقادیر مرحله زمانی ماقبل در تمامی نقاط تقسیم افزوده می‌شود و به این ترتیب کرنش‌های خزشی کل در تمام نقاط به دست می‌آیند. شایان ذکر است در اولین مرحله زمانی کرنش‌های خزشی کل صفر می‌باشند کرنش‌های خزشی مماسی و شعاعی در i امین مرحله زمانی برابرند با:

$$\mathcal{E}_{r,ij}^c = \sum_{k=1}^{i-1} \Delta \mathcal{E}_{r,kj}^c + \Delta \mathcal{E}_{r,ij}^c \quad (2-6)$$

$$\mathcal{E}_{\theta,ij}^c = \sum_{k=1}^{i-1} \Delta \mathcal{E}_{\theta,kj}^c + \Delta \mathcal{E}_{\theta,ij}^c$$

اندیس‌های a و j به ترتیب مراحل زمانی و نقاط تقسیم دیسک را نشان می‌دهند.

۳- با به دست آوردن مقادیر کرنش‌های خزشی کل، تنش‌های خزشی به دست می‌آید.

تنش‌های الاستیک در تمام نقاط از شعاع داخل تا خارج، به عنوان تنش‌های اولیه ($t=0$) در شروع خزش انتخاب می‌گردد. در واقع قبل از شروع حلقه اصلی محاسباتی، تنش‌های الاستیک شامل تنش‌های حرارتی و مکانیکی محاسبه می‌شود و به عنوان اولین مقادیر تنش‌های کل فرض می‌شود.

۴- جابجایی شعاعی دیسک با بکارگیری روابط (۲۰-۴)، (۲۱-۴) و (۲۲-۴)، (۲۳-۴)، به دست

می‌آید، معادله دیفرانسیل موقعیت دیسک طبق رابطه (۲۰-۴) به صورت زیر است:

$$C_1 \frac{d^2 u}{dr^2} + C_2 \frac{du}{dr} + C_3 u + C_4 = 0$$

ضرایب معادله دیفرانسیل جابجایی فوق تنها با در نظر گرفتن گرادیان دمایی به صورت دسته

روابط (۵-۶) تعریف می‌شوند:

$$C_1 = rh(r) E(r)$$

$$C_2 = \frac{d}{dr} [rh(r)E(r)]$$

$$C_3 = \nu \frac{d}{dr} [h(r)E(r)] - \frac{h(r)E(r)}{r}$$

$$C_4 = -r(1+\nu) \frac{d}{dr} [E(r)h(r)\alpha(r)T(r)]$$

(۳-۶)

$$- \varepsilon_r^c \left[r \frac{d}{dr} (E(r)h(r)) + E(r)h(r)(1-\nu) \right]$$

$$- \varepsilon_\theta^c \left[r\nu \frac{d}{dr} (E(r)h(r)) - E(r)h(r)(1-\nu) \right]$$

$$- E(r)h(r) \left[\frac{d\varepsilon_r^c}{dr} + \nu \frac{d\varepsilon_\theta^c}{dr} \right] + \rho(r)h(r)r^2\omega^2(1-\nu^2)$$

۵- تنش مؤثر در کلیه نقاط تقسیم دیسک بر اساس معیار فن میززا^۱ چنین

است:

$$\sigma_{e,ij} = \sqrt{\sigma_{r,ij}^2 + \sigma_{\theta,ij}^2 - \sigma_{r,ij} \sigma_{\theta,ij}} \quad (۴-۶)$$

۶- نرخ کرنش مؤثر با استفاده از معادله نورتون بدین قرار می‌باشد:

$$\dot{\epsilon}_e^c = B_1(r) \sigma_e^{n_0} \quad (۵-۶)$$

B_1 ضریب نورتون است که با ثوابت نورتون تعریف می‌شود:

$$B_1(r) = b_0 r^{b_1} \quad (۶-۶)$$

$$n_0 = 2.2 \quad b_0 = 0.11 \times 10^{-36} \quad b_1 = -5$$

ثوابت نورتون برای مواد FG ، بنا بر مقاله سینگ و ری^۲ [۲۶]، به درصد حجمی، اندازه ذرات و

دما بستگی دارد که برای ماده مورد نظر ما در این پژوهش به صورت فوق به دست آمده است.

۷- جزء کرنش خزشی مؤثر به صورت زیر است:

$$\Delta \epsilon_{e,ij}^c = \dot{\epsilon}_{e,ij}^c \Delta t_i \quad (۷-۶)$$

۸- با استفاده از جزء کرنش خزشی مؤثر و تنش مؤثر، جزء کرنش‌های خزشی شعاعی و

محیطی جدید از طریق قانون پرائنتل-روس به دست می‌آید:

^۱. Von-Mises factor

^۲. S.B.Singh, S.Ray

$$\Delta \varepsilon_{r,ij}^{c(new)} = \frac{\Delta \varepsilon_{e,ij}}{\sigma_{e,ij}^c} \left[\sigma_{r,ij} - \frac{1}{2} \sigma_{\theta,ij} \right] \quad (۸-۶)$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta,ij}^{c(new)} = \frac{\Delta \varepsilon_{e,ij}}{\sigma_{e,ij}^c} \left[\sigma_{\theta,ij} - \frac{1}{2} \sigma_{r,ij} \right]$$

۹- مقادیر جزءهای کرنش خزشی بدست آمده در مرحله قبل به عنوان مقادیر اولیه جدید در نظر گرفته می‌شوند و از گام دوم با فرض این مقادیر جدید تکرار صورت می‌گیرد و تا زمانی که همگرایی حاصل شود ادامه می‌یابد. مقدار خطایی که برای همگرایی در نظر گرفته شده ۰/۰۰۰۱ است.

۱۰- جزء زمانی جدید که از قبل مشخص شده به جزءهای زمانی قبل افزوده می‌شود و تمامی مراحل از ابتدا تکرار می‌گردد و مقادیر جابجایی، تنش‌ها و کرنش‌های خزشی کل برای زمان مورد نظری که آن هم از قبل تعیین شده و تعداد تکرار حلقه برنامه بر اساس آن تعریف گردیده است به دست می‌آیند.

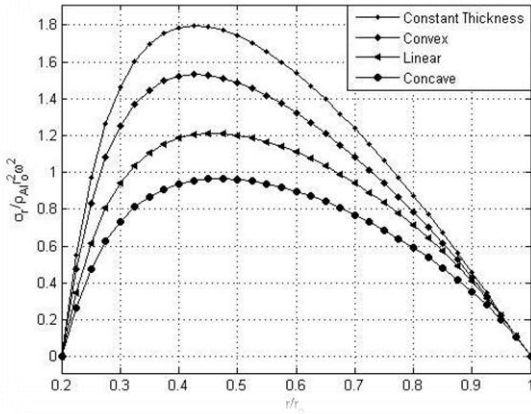
۶-۳ انتخاب ساختار ضخامت مناسب با در نظر گرفتن خزش

در مرحله نخست، دیسک چرخان ضخامت متغیر، در میدان دمایی یاد شده در فصل قبل فرض می‌شود و رفتار هر چهار هندسه ضخامت ثابت، خطی، محدب و مقعر همزمان در طی پنجاه سال آینده برای هر دو نوع توزیع حجمی c و d و نیز هر دو شرط مرزی دو سر آزاد و یک سر گیردار-یک سر آزاد با هم مقایسه می‌گردد.

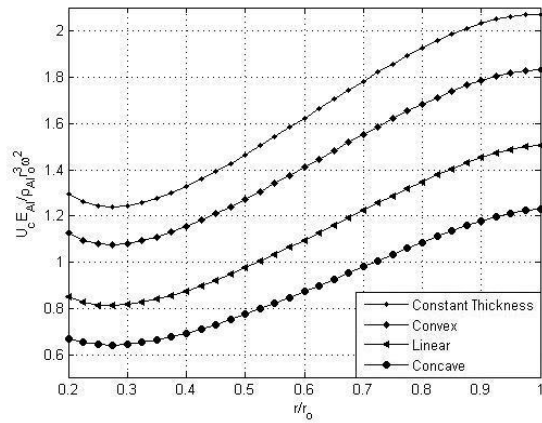
این که پارامتر زمان وارد تحلیل‌ها شده بدین معناست که پدیده خزش وابسته به زمان در روابط پدیدار خواهد شد که نقش تعیین کننده‌ای در مقدار و جهت تنش‌ها خواهد داشت.

با مقایسه نمودارها در این بخش مناسب‌ترین هندسه دیسک با در نظر گرفتن خزش وابسته به زمان مشخص خواهد شد.

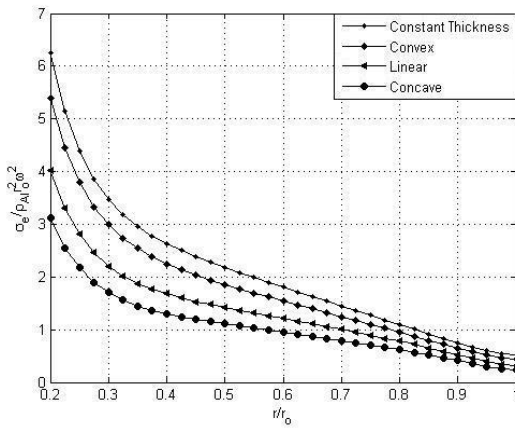
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۱۰ سال:



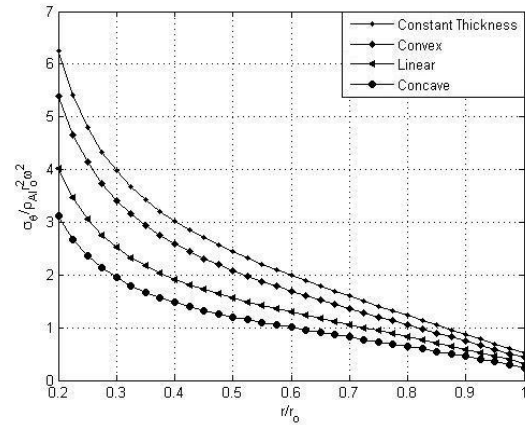
نمودار ۶-۲: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



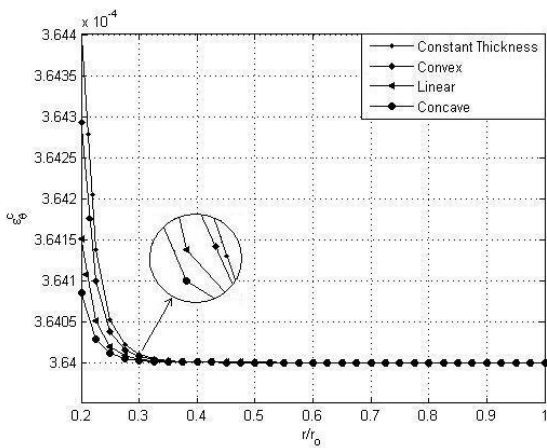
نمودار ۶-۱: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



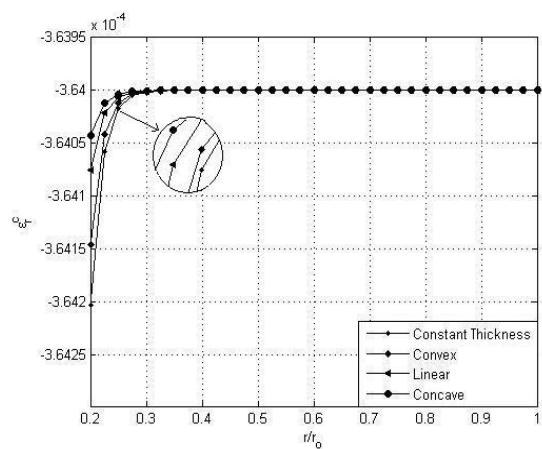
نمودار ۶-۴: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۳: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

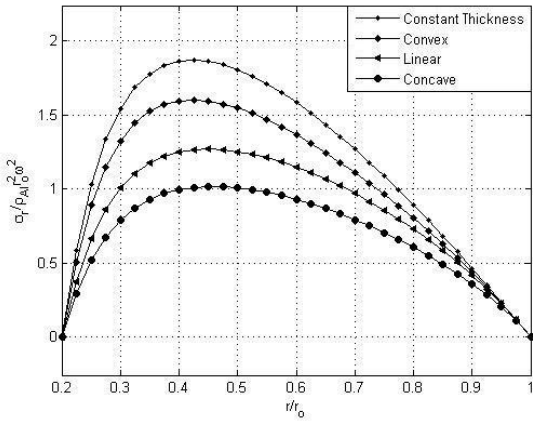


نمودار ۶-۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

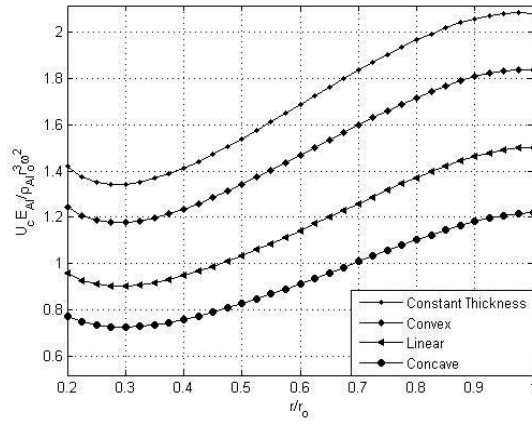


نمودار ۶-۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

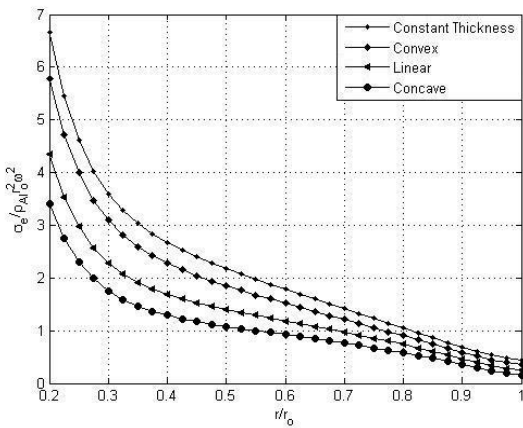
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c، پس از ۳۰ سال:



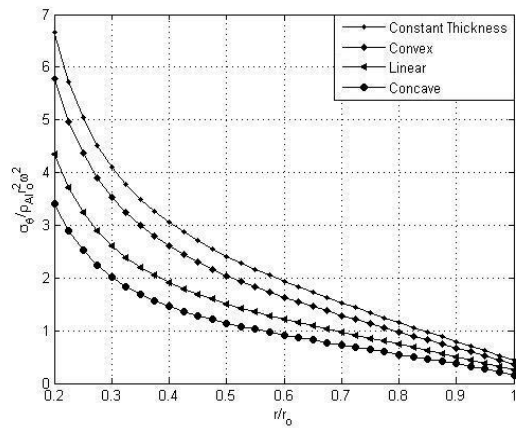
نمودار ۶-۸: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



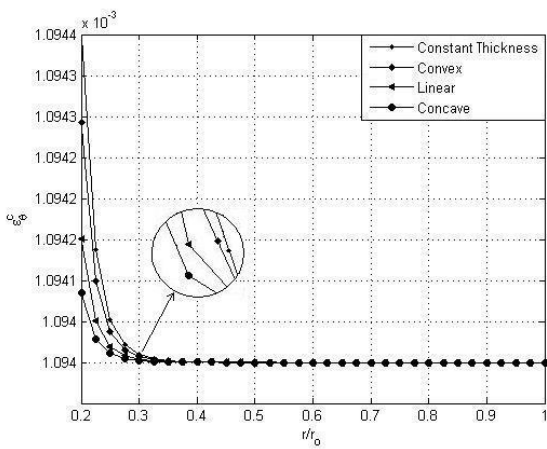
نمودار ۶-۷: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



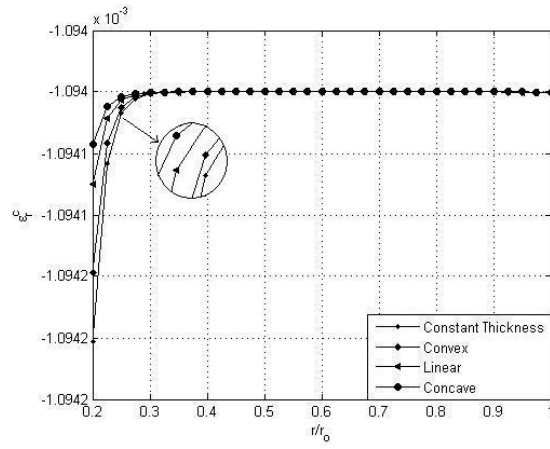
نمودار ۶-۱۰: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۹: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

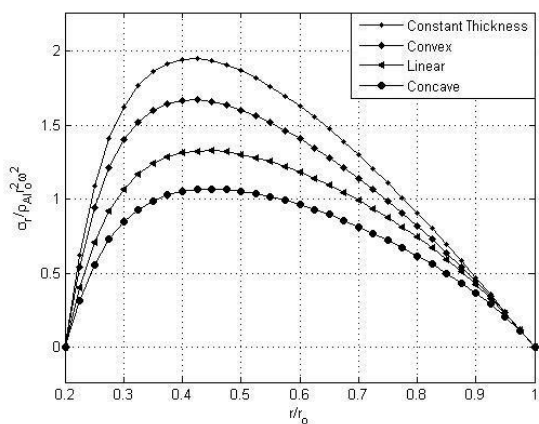


نمودار ۶-۱۲: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

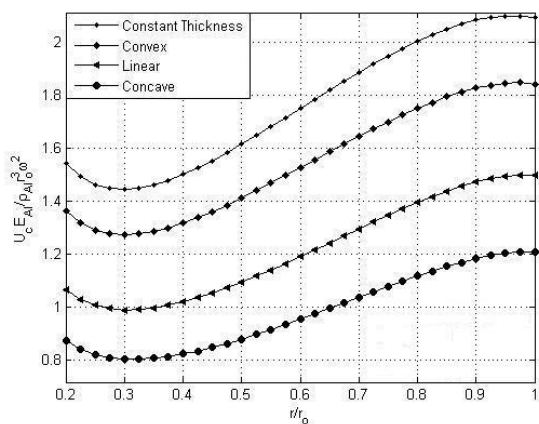


نمودار ۶-۱۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

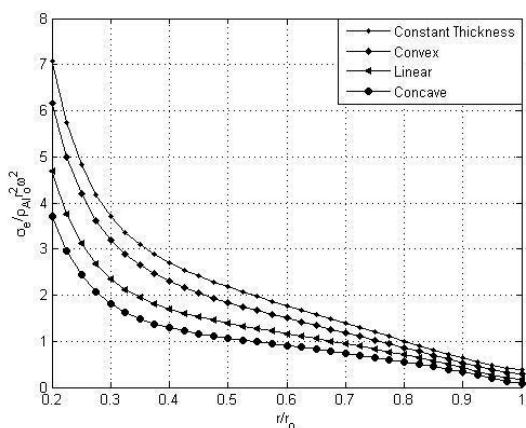
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c ، پس از ۵۰ سال:



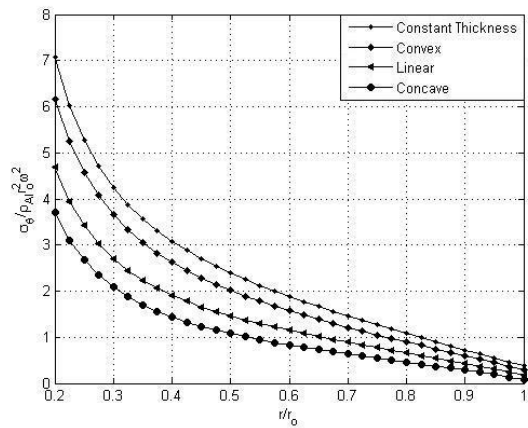
نمودار ۶-۱۴: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



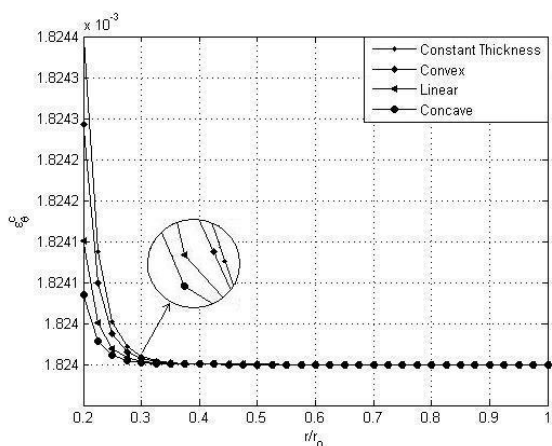
نمودار ۶-۱۳: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



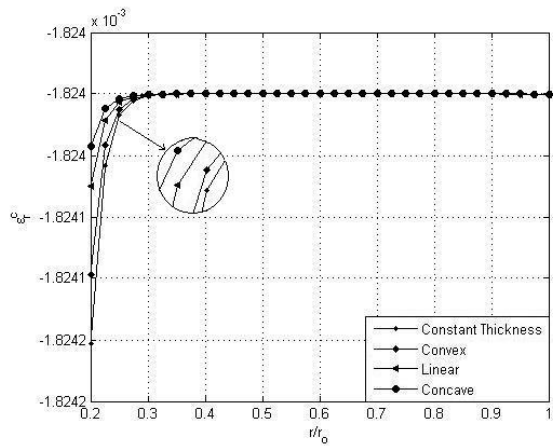
نمودار ۶-۱۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۱۵: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

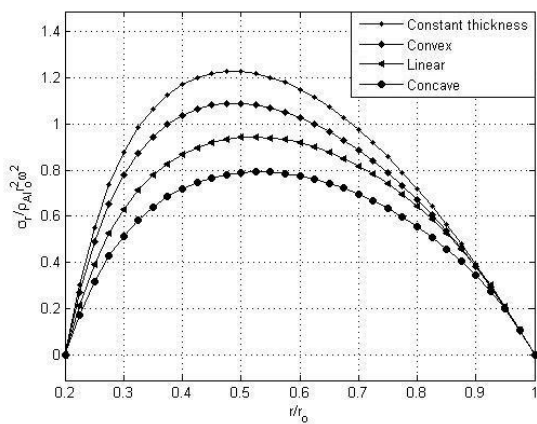


نمودار ۶-۱۸: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

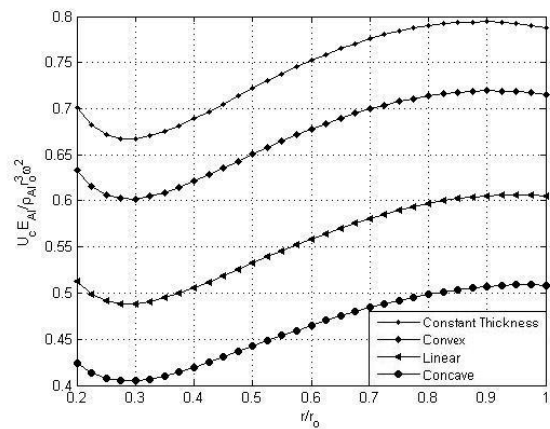


نمودار ۶-۱۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

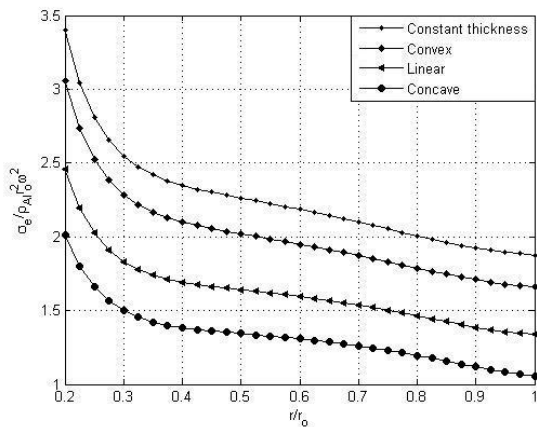
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع dl پس از ۱۰ سال:



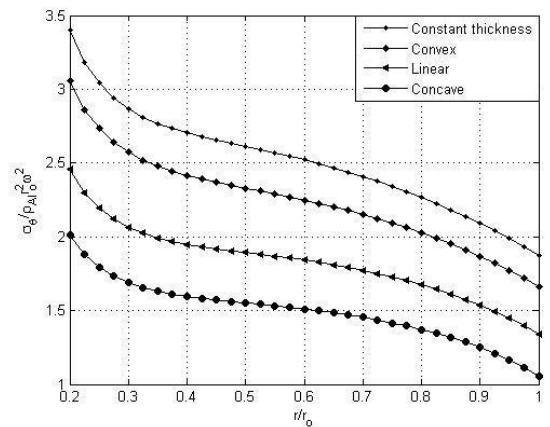
نمودار ۶-۲۰: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



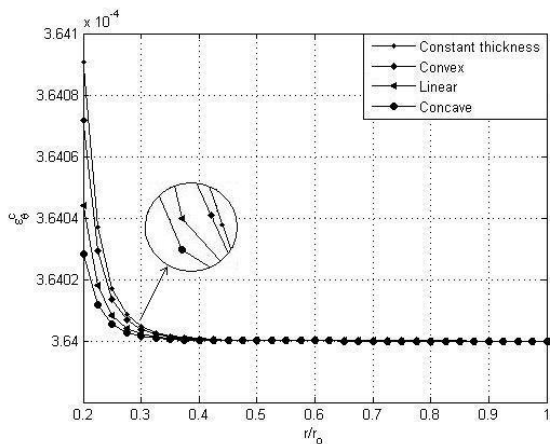
نمودار ۶-۱۹: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



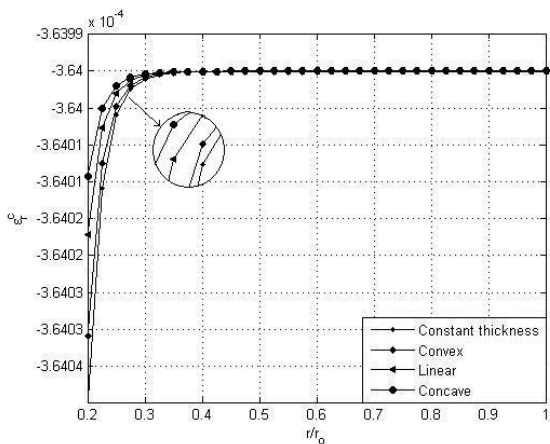
نمودار ۶-۲۲: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۲۱: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

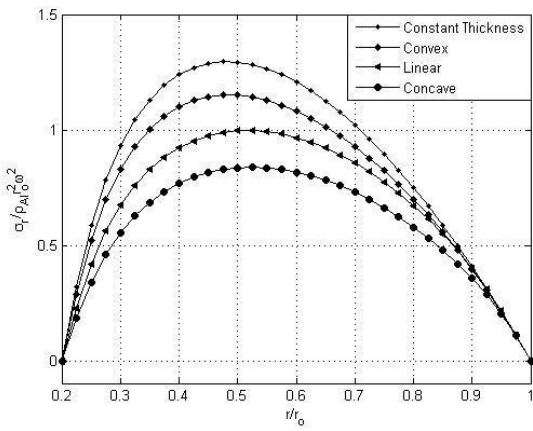


نمودار ۶-۲۴: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

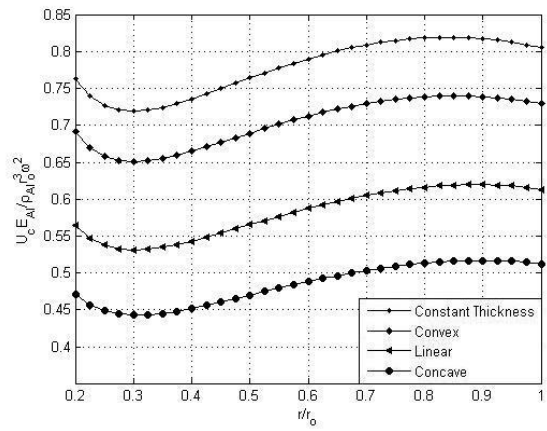


نمودار ۶-۲۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

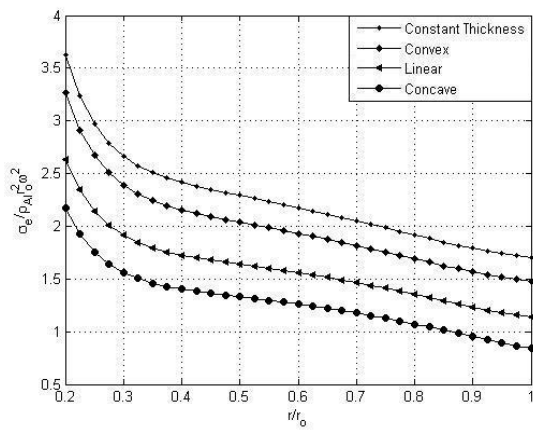
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع d ، پس از ۳۰ سال:



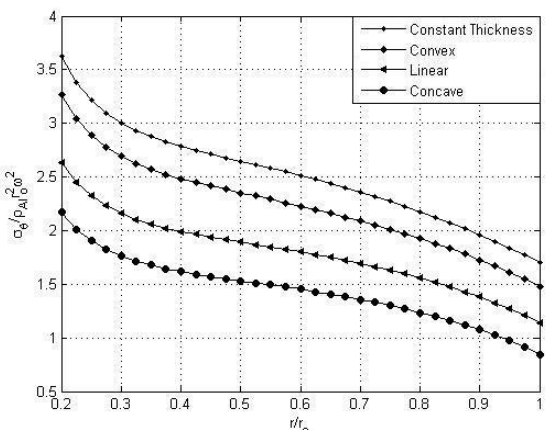
نمودار ۶-۲۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



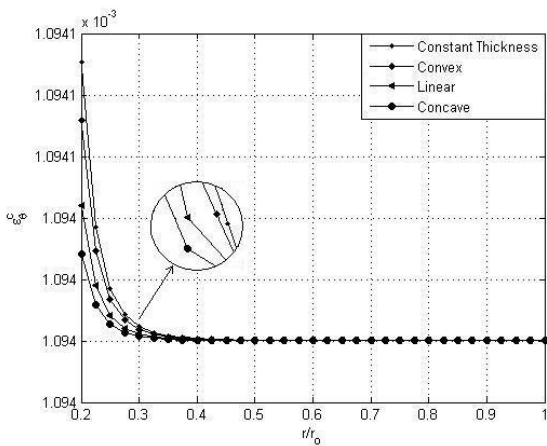
نمودار ۶-۲۵: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



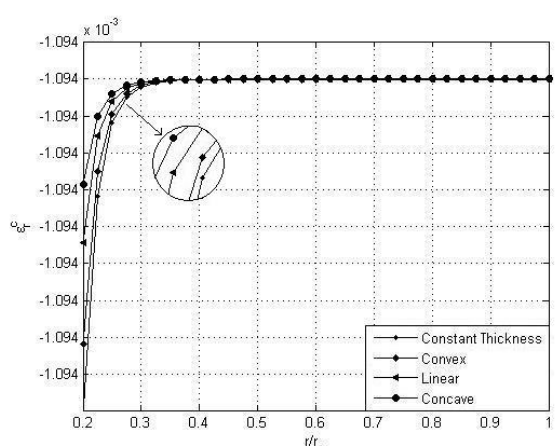
نمودار ۶-۲۸: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۲۷: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

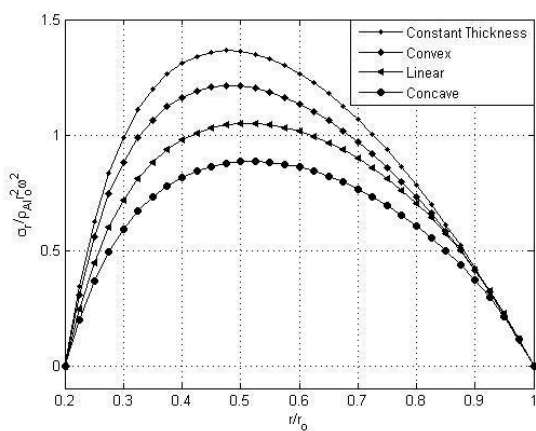


نمودار ۶-۳۰: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

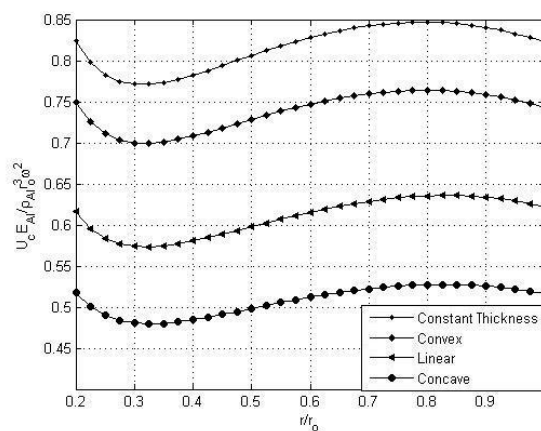


نمودار ۶-۲۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

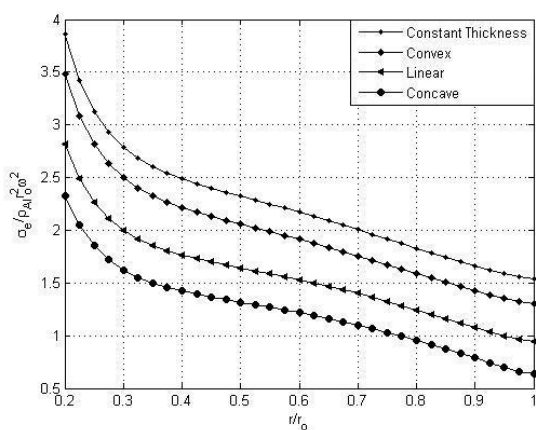
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع d ، پس از ۵۰ سال:



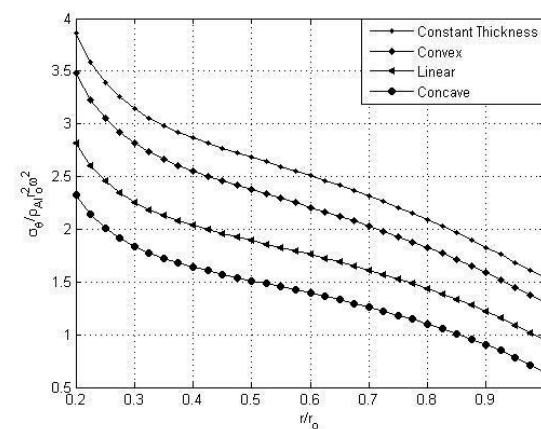
نمودار ۶-۳۲: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



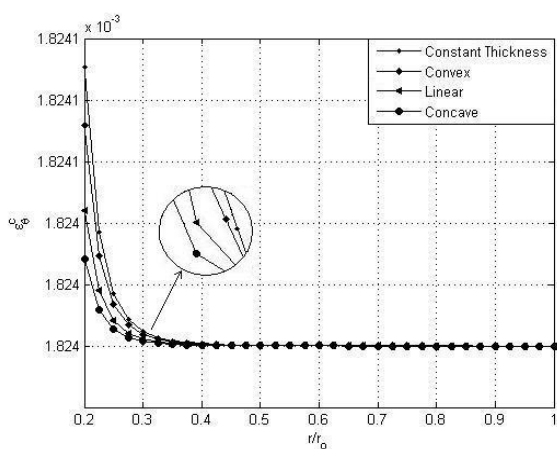
نمودار ۶-۳۱: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



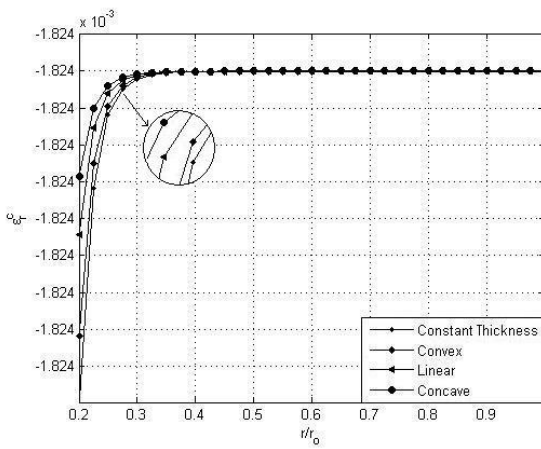
نمودار ۶-۳۴: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۳۳: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

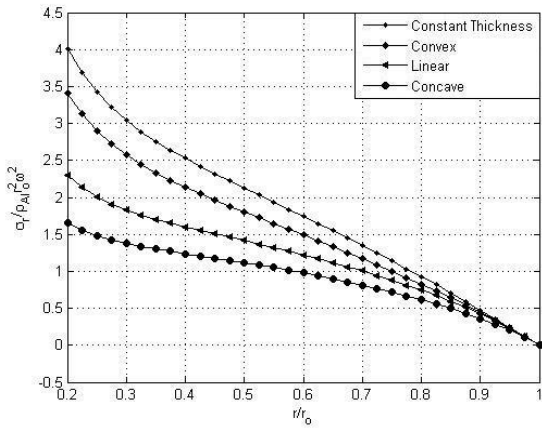


نمودار ۶-۳۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

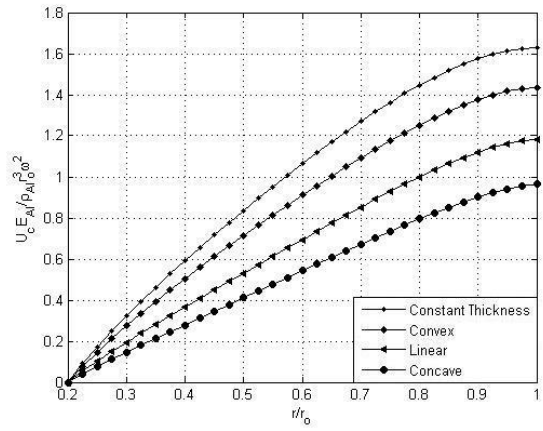


نمودار ۶-۳۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

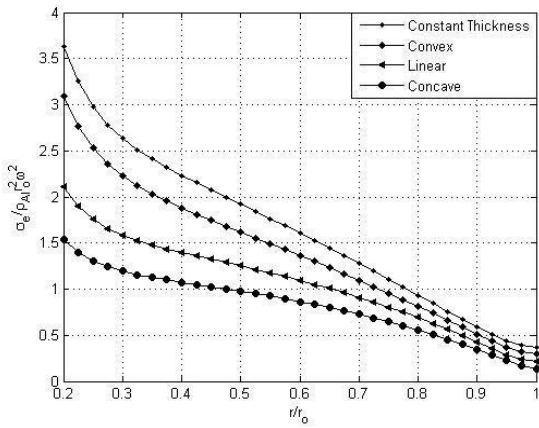
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع C، پس از ۱۰ سال:



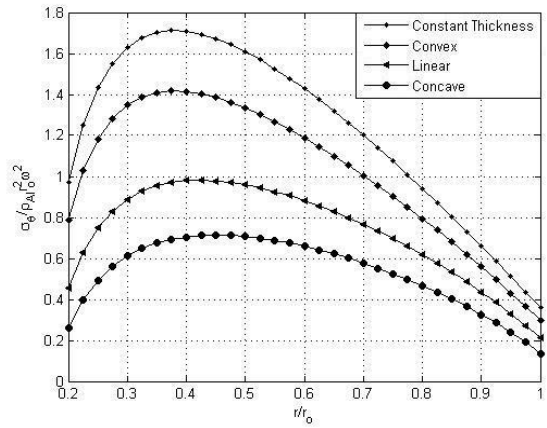
نمودار ۶-۳۸: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



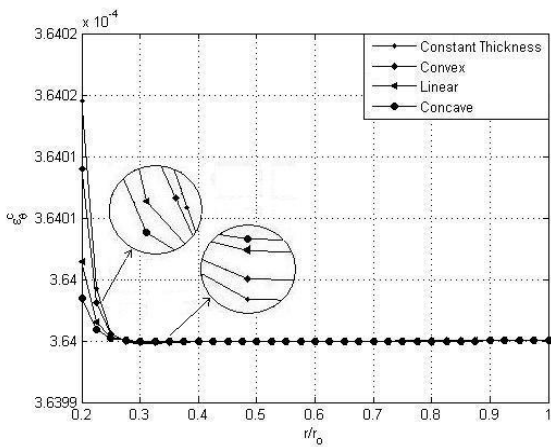
نمودار ۶-۳۷: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



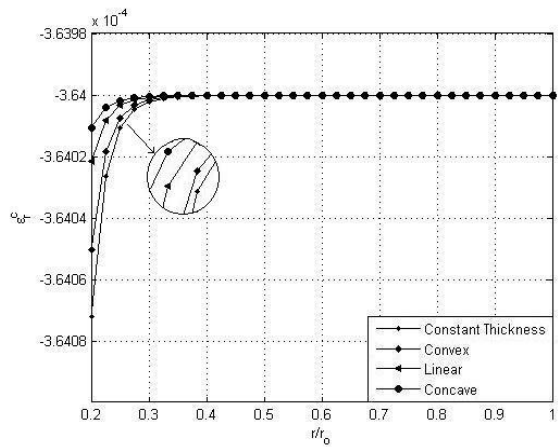
نمودار ۶-۴۰: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۳۹: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

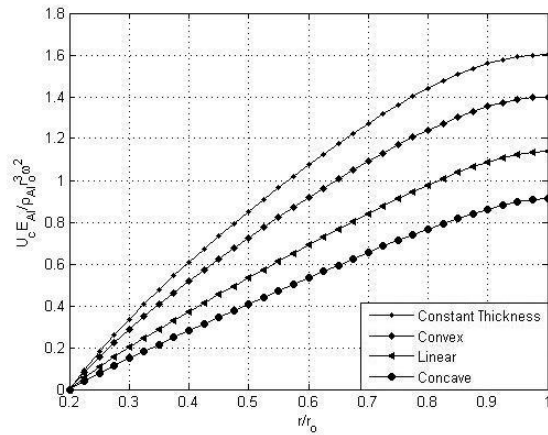
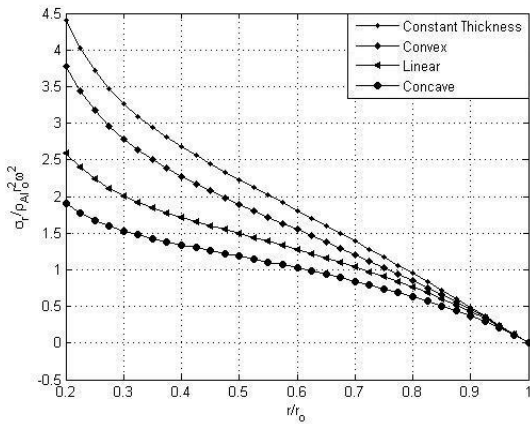


نمودار ۶-۴۲: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک



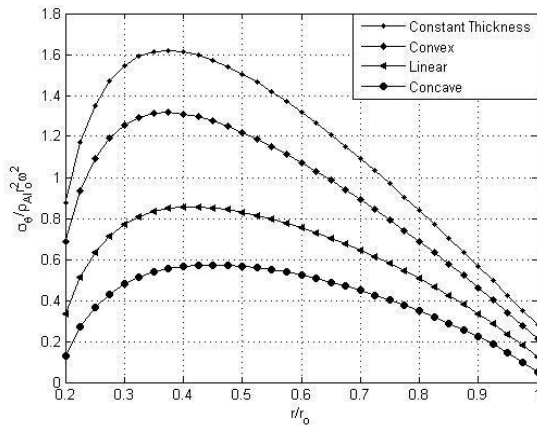
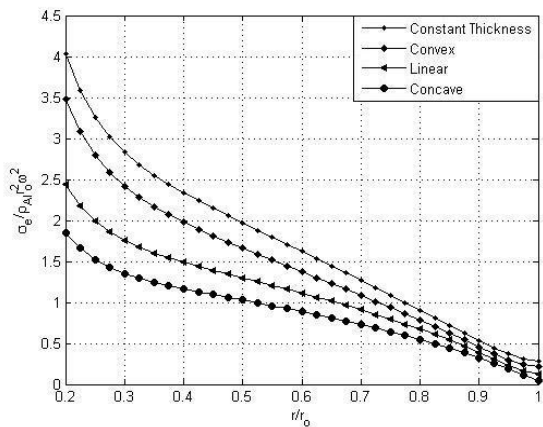
نمودار ۶-۴۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c، پس از ۳۰ سال:



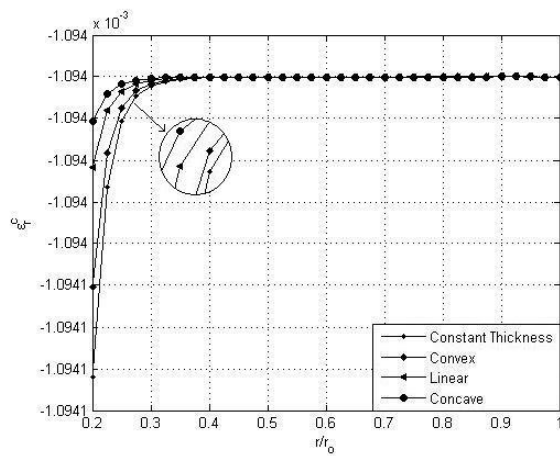
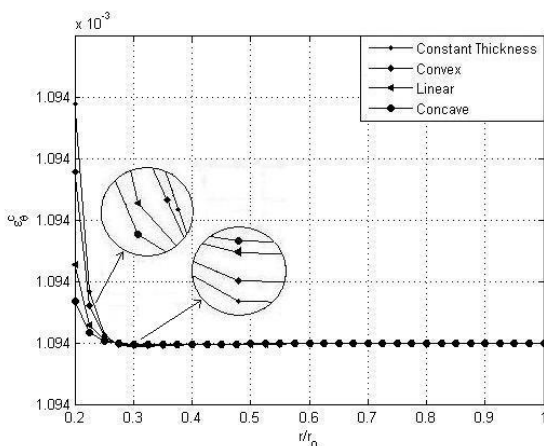
نمودار ۶-۴۴: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک

نمودار ۶-۴۳: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۴۶: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک

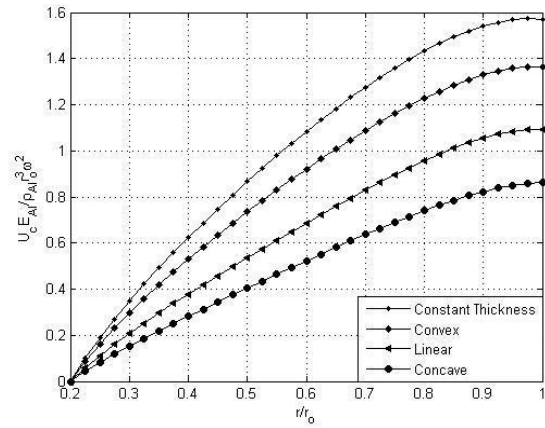
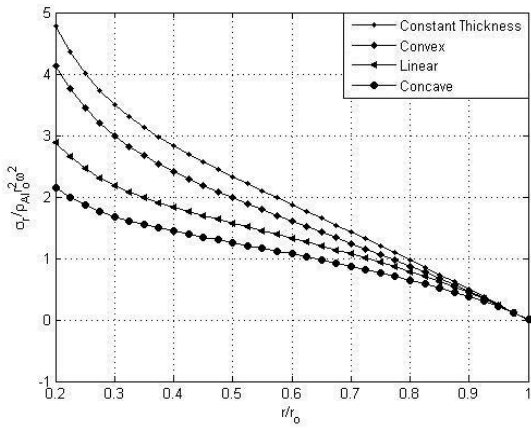
نمودار ۶-۴۵: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۴۸: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

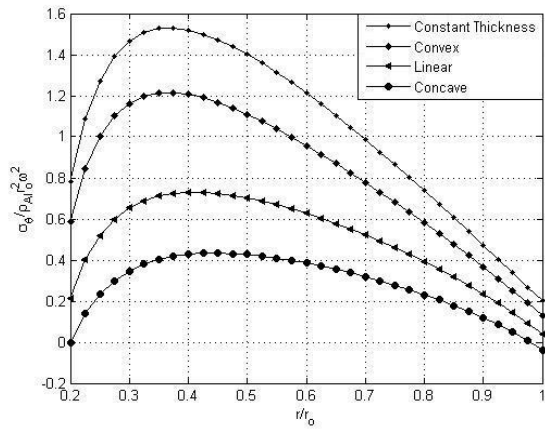
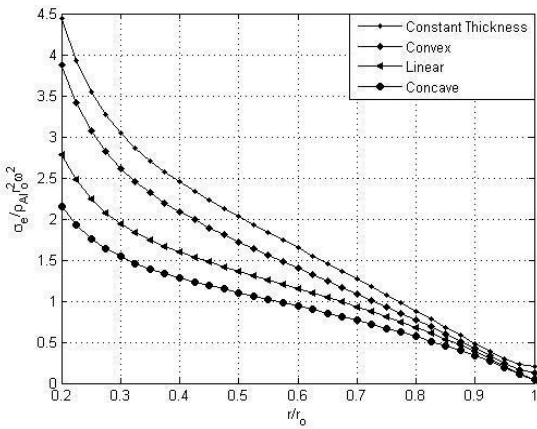
نمودار ۶-۴۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c، پس از ۵۰ سال:



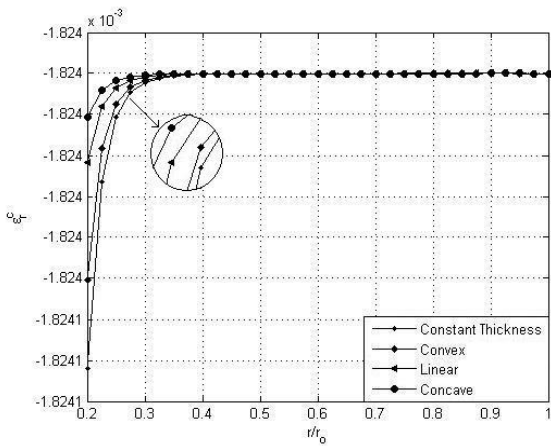
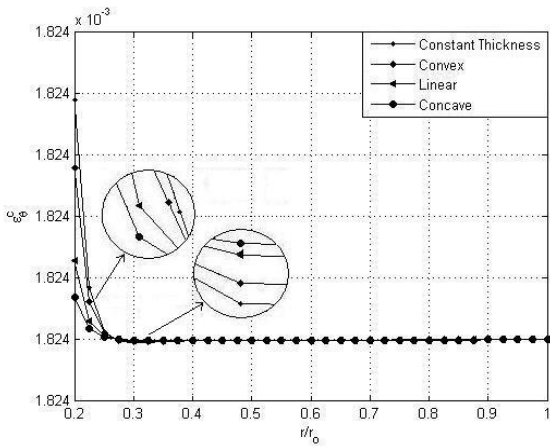
نمودار ۶-۵۰: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک

نمودار ۶-۴۹: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۵۲: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک

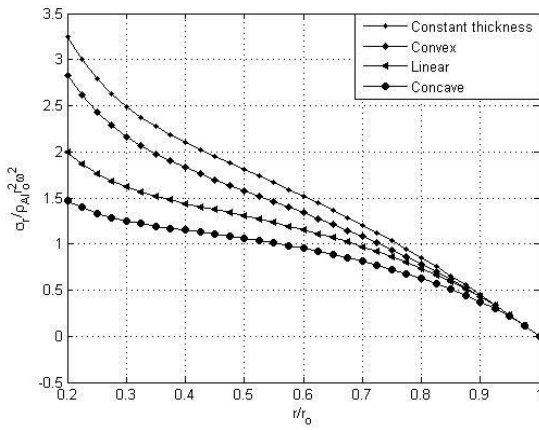
نمودار ۶-۵۱: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک



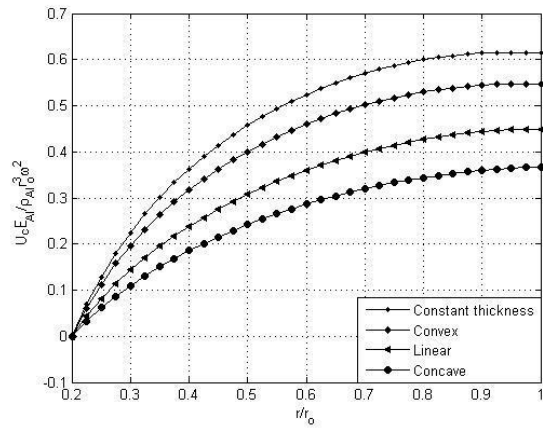
نمودار ۶-۵۴: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

نمودار ۶-۵۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

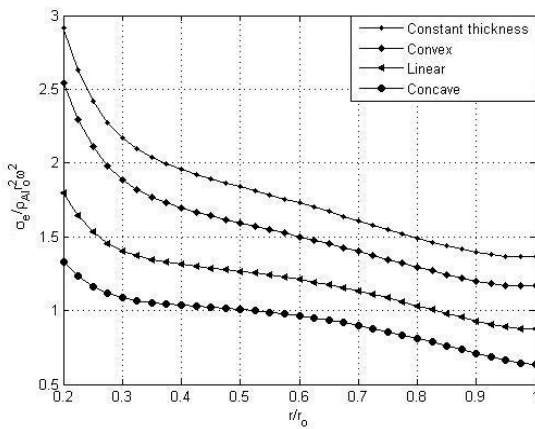
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع، پس از ۱۰ سال:



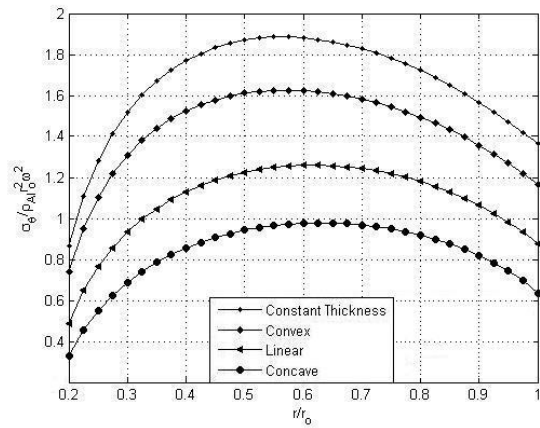
نمودار ۶-۵۶: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



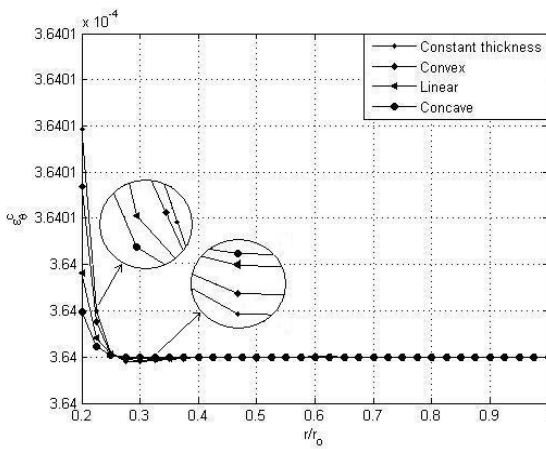
نمودار ۶-۵۵: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



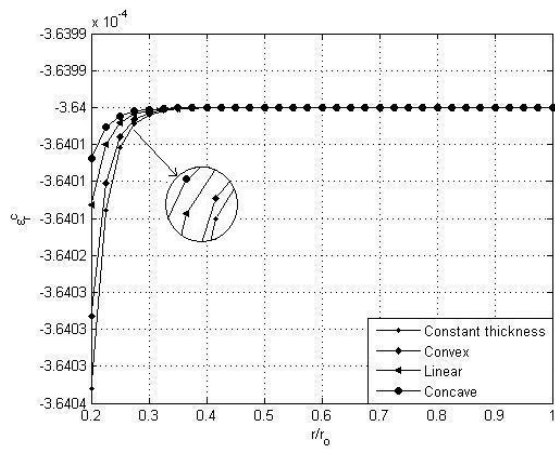
نمودار ۶-۵۸: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۵۷: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

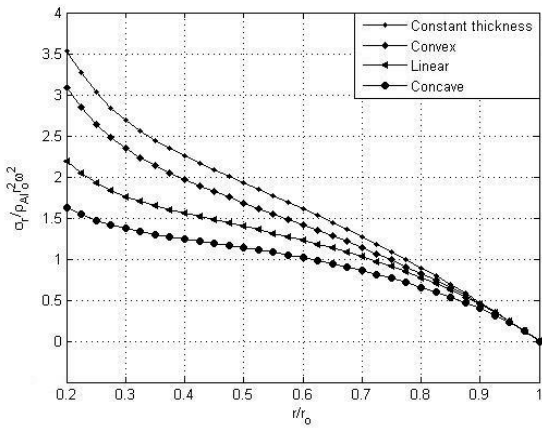


نمودار ۶-۶۰: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

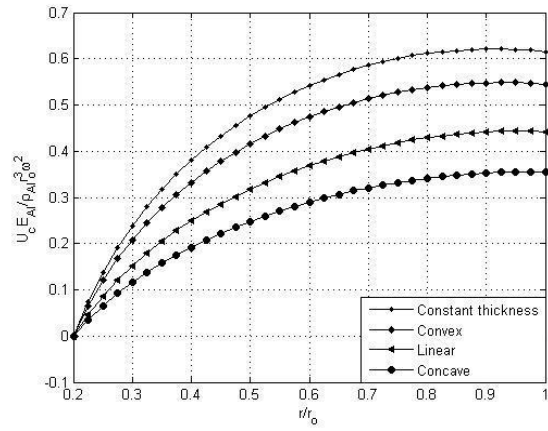


نمودار ۶-۵۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

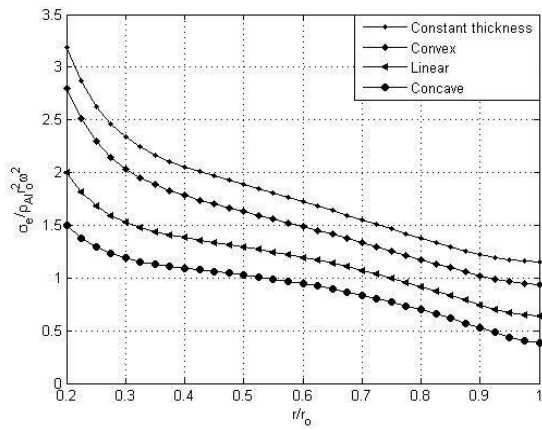
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع l، پس از ۳۰ سال:



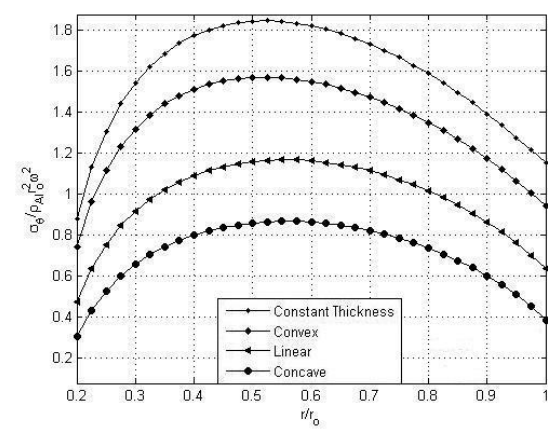
نمودار ۶-۶۲: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



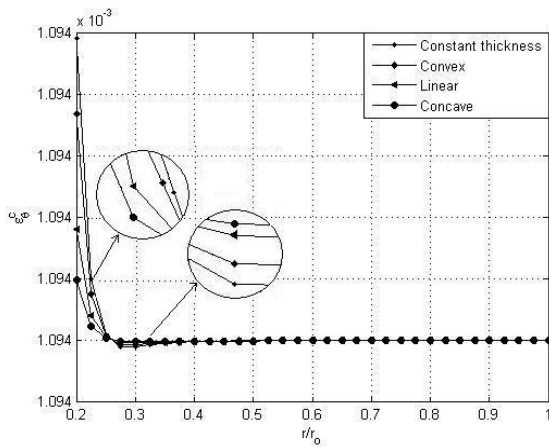
نمودار ۶-۶۱: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



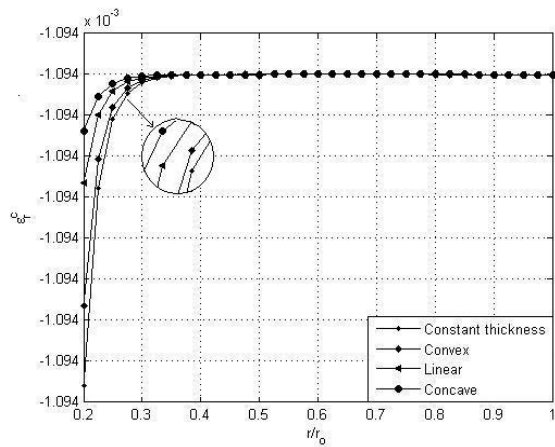
نمودار ۶-۶۴: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۶۳: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک

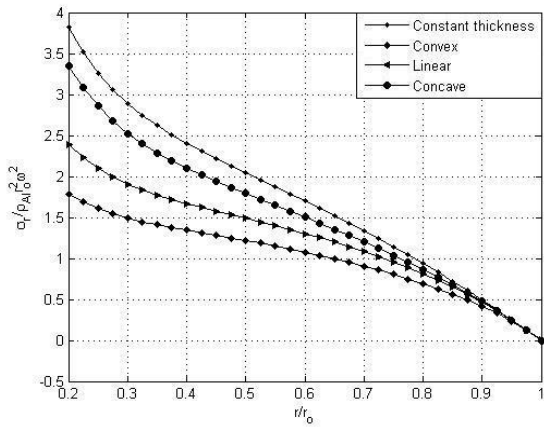


نمودار ۶-۶۶: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک

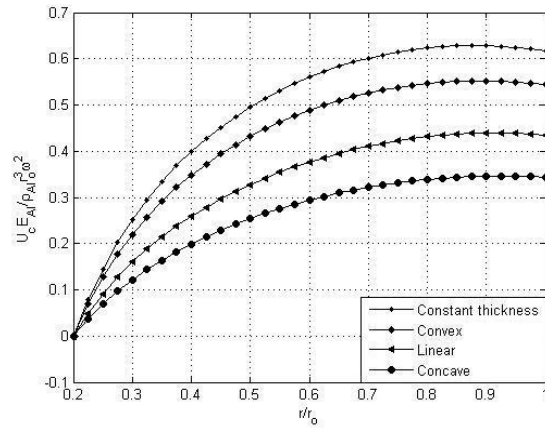


نمودار ۶-۶۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

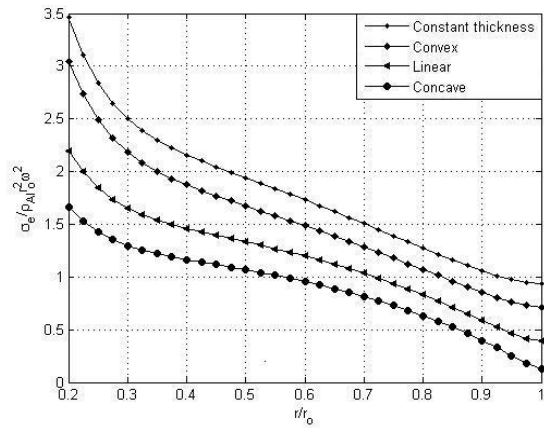
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع /، پس از ۵۰ سال:



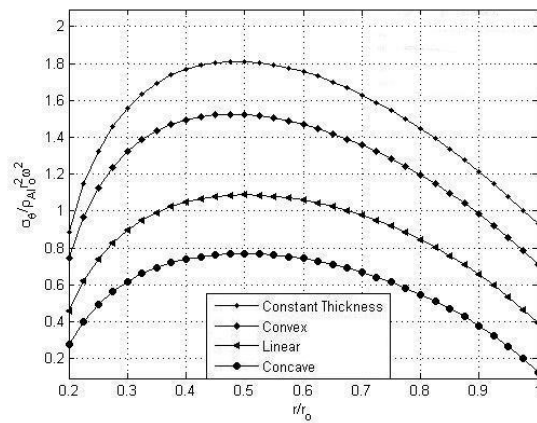
نمودار ۶-۶۸: توزیع تنش شعاعی چهار هندسه دیسک



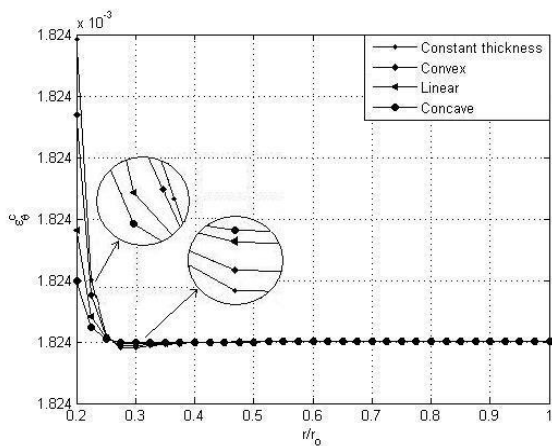
نمودار ۶-۶۷: جابجایی شعاعی خزشی چهار هندسه دیسک



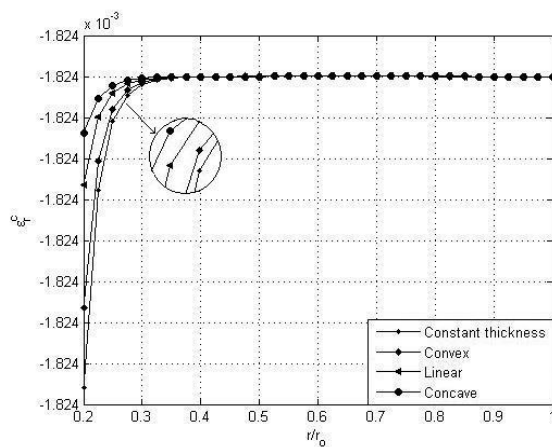
نمودار ۶-۷۰: توزیع تنش مؤثر چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۶۹: توزیع تنش محیطی چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۷۲: توزیع کرنش خزشی محیطی چهار هندسه دیسک



نمودار ۶-۷۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی چهار هندسه دیسک

در هر دو شرایط مرزی، برای تمام هندسه‌ها و هر دو توزیع حجمی نوع C (سطح داخلی شامل ۴۰٪ سیلیکون کارباید و سطح خارجی آلومینیم خالص) و نوع d (سطح داخلی آلومینیم خالص و سطح خارجی شامل ۴۰٪ سیلیکون کارباید) در پنجاه سال آینده، جابجایی شعاعی با زمان افزایش می‌یابد، تقعر نمودار جابجایی به سمت پایین است یعنی توزیع آن در نقاط بیرونی دیسک یکنواخت‌تر است. در نوع d این توزیع از شعاع داخل به خارج یکنواخت‌تر از نوع C است. توزیع جابجایی در طول شعاع با گذشت زمان یکنواخت‌تر و شیب آن کمتر می‌شود. اما تنش مؤثر از مقدار بیشینه در شعاع داخل تا مقداری نزدیک به صفر در شعاع خارج کاهش می‌یابد. بنابر این سطح داخلی دیسک بیشتر در معرض آسیب است. همچنین با گذشت زمان تنش مؤثر زیاد می‌شود و شیب آن نیز افزایش می‌یابد. کرنش‌های خزشی شعاعی و محیطی نیز تا شعاع نسبی حدود ۰/۳، مقداری متغیر دارند و قدر مطلق آن‌ها در حال افزایش است، اما از آن پس تا شعاع خارجی دارای مقدار یکنواختی است.

در کلیه نمودارها، دیسک با ساختار ضخامت مقعر کمترین میزان جابجایی شعاعی، تنش‌های شعاعی، محیطی، مؤثر و کرنش‌های خزشی شعاعی و محیطی را نسبت به سایر هندسه‌ها داراست و این رفتار آن در هر دو شرط مرزی و برای هر دو توزیع حجمی مورد نظر صادق است. بنابراین همانند بخش ۵-۳-۱ از فصل گذشته، دیسک مقعر مناسب‌ترین هندسه ضخامت را دارد، از این رو در بخش‌های بعدی به بررسی رفتار این دیسک تحت گرادیان دمایی طی سال‌های آینده پرداخته خواهد شد، همچنین برای تحلیل رفتار ناشی از حضور میدان مغناطیسی یکنواخت از این دیسک استفاده می‌گردد.

۶-۴ رفتار خزشی دیسک با ساختار ضخامت مقعر

حال که مناسب ترین دیسک از لحاظ هندسه ضخامت معین شده است باید دید رفتار خزشی این دیسک در طی پنجاه سال آینده چگونه است.

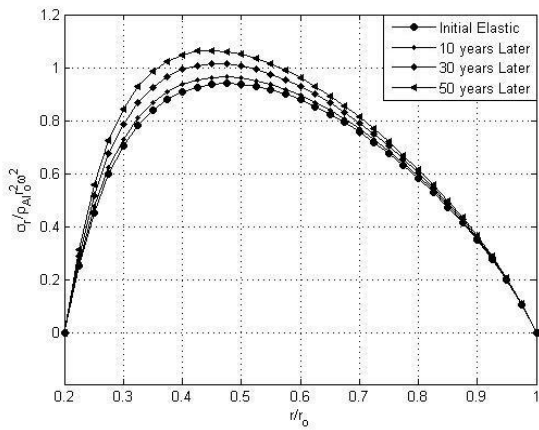
برای تحلیل این قسمت، دیسک چرخانی با ضخامت متغیر از نوع هندسه مقعر تحت گرادیان دمایی یاد شده در نظر گرفته شده است که نمودارهای جابجایی، تنش و کرنش خزشی آن را در طی سال های آینده در مقایسه با زمان حاضر و رفتار الاستیک آن رسم خواهد شد.

با گذر زمان پدیده خزش روی می دهد و هر چه زمان بیشتری سپری شود جزء کرنش های خزشی که روی هم انباشته می شوند و کرنش های خزشی کل را پدید می آورند بیشتر می گردد. از این رو در زمان های دورتر، کرنش های خزشی بزرگتر خواهند بود.

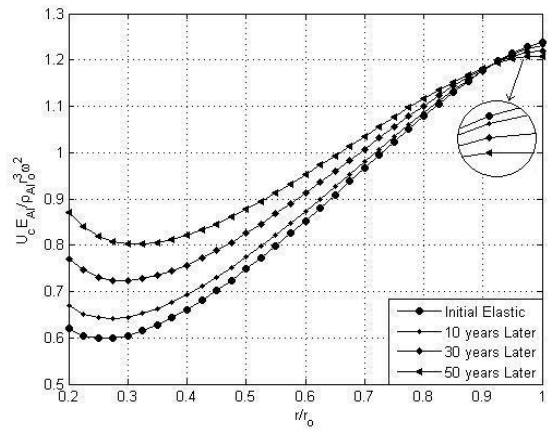
همانطور که رابطه (۶-۳) بیان می دارد تنش های شعاعی و محیطی و در نتیجه تنش مؤثر، ارتباط مستقیم با کرنش های خزشی دارند. در نتیجه رشد کرنش های خزشی در طول زمان بر مقدار و جهت تنش ها نیز اثرات قابل توجهی خواهد داشت.

جابجایی شعاعی هم به دلیل حضور پارامترهای کرنش خزشی شعاعی و محیطی و نیز مشتق آن ها در ضریب C_4 از دسته روابط (۶-۴) مستقیماً از خزش وابسته به زمان متأثر است.

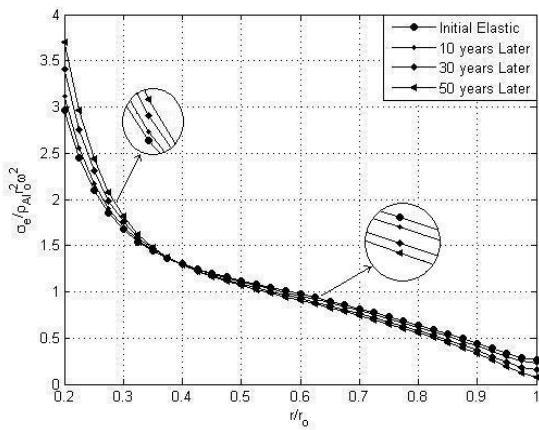
اینک با در نظر گرفتن هر دو شرط مرزی دو سر آزاد و یک سر گیردار-یک سر آزاد و برای هر دو نوع توزیع حجمی c و d نمودارهای مربوط به رفتار خزشی رسم و در ادامه آورده شده است.



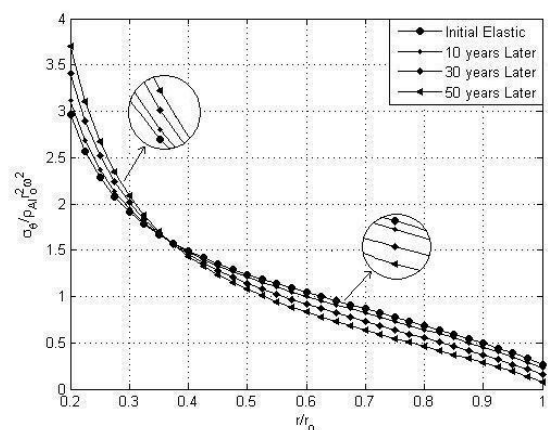
نمودار ۶-۷۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



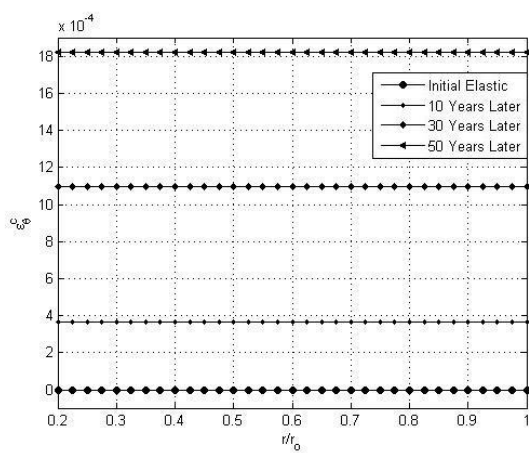
نمودار ۶-۷۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر نمودار



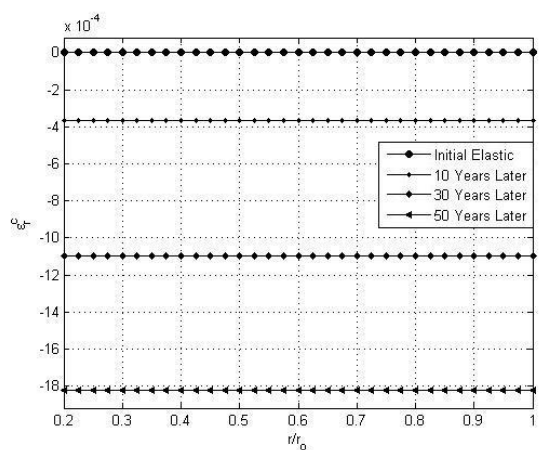
نمودار ۶-۷۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۷۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

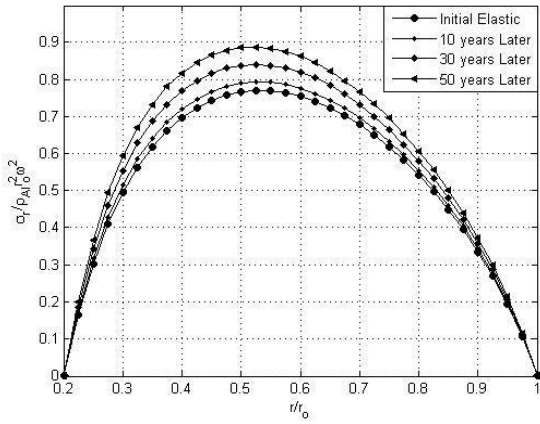


نمودار ۶-۷۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

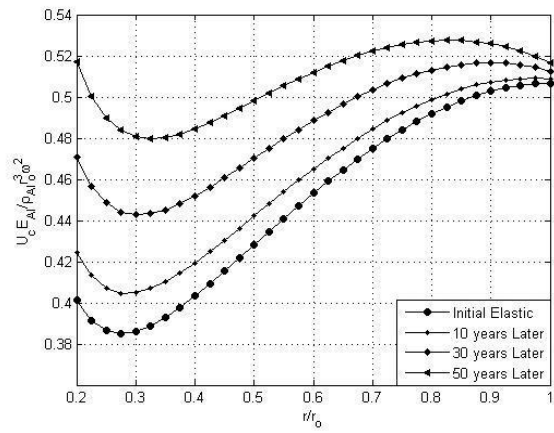


نمودار ۶-۷۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

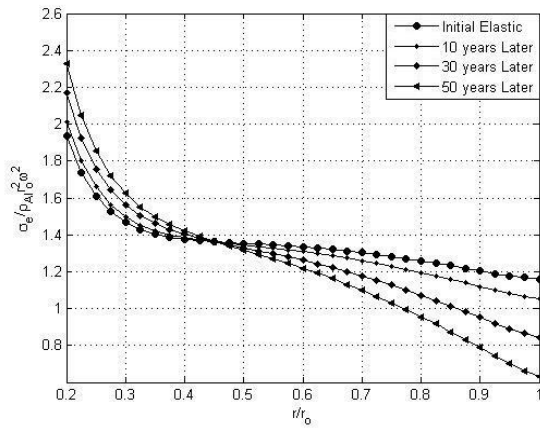
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع d در پنجاه سال آینده:



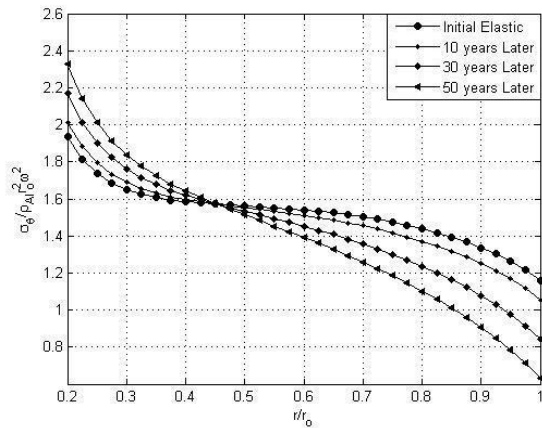
نمودار ۶-۸۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



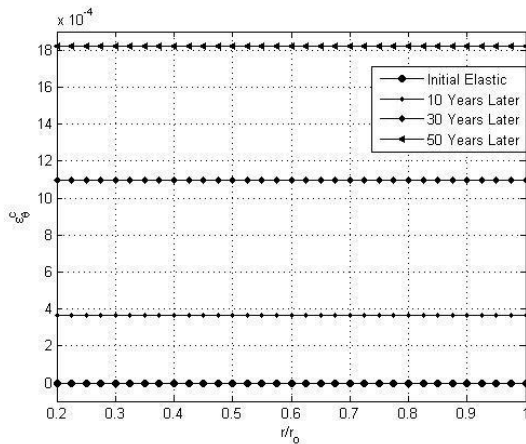
نمودار ۶-۷۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



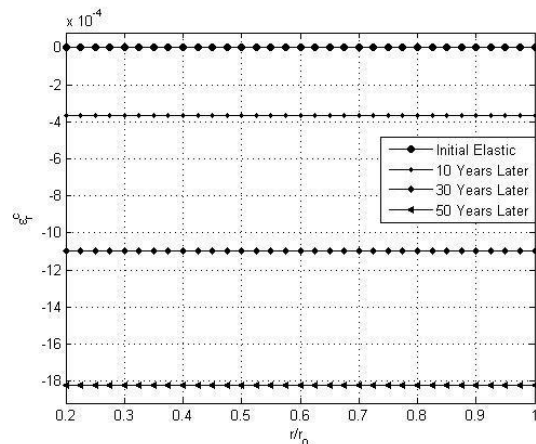
نمودار ۶-۸۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۸۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

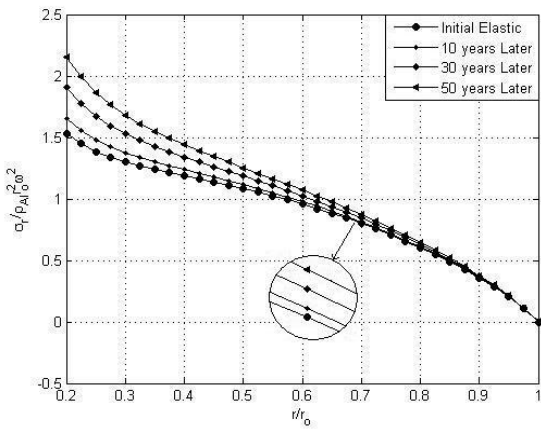


نمودار ۶-۸۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

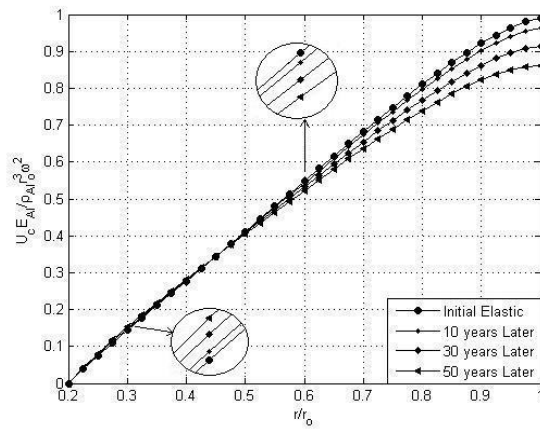


نمودار ۶-۸۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

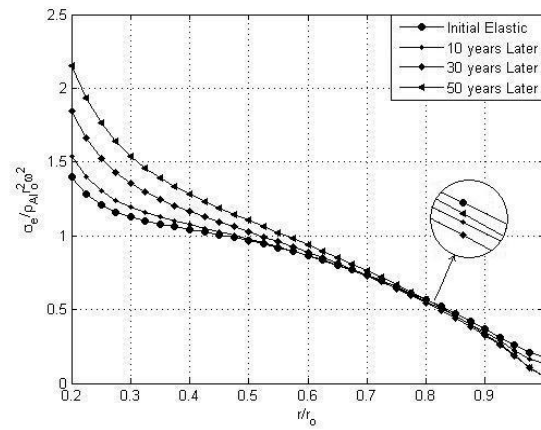
یک سرگردار - یک سر آزاد توزیع حجمی نوع c در پنجاه سال آینده:



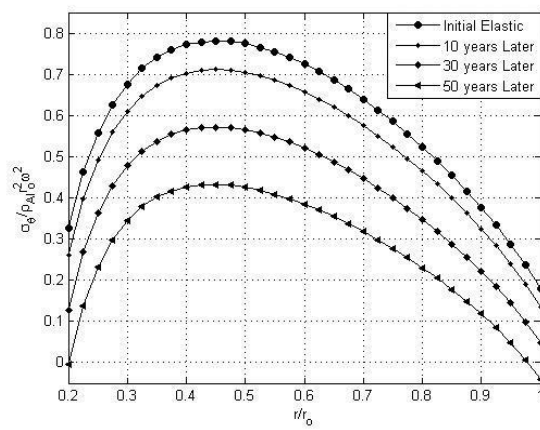
نمودار ۶-۸۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



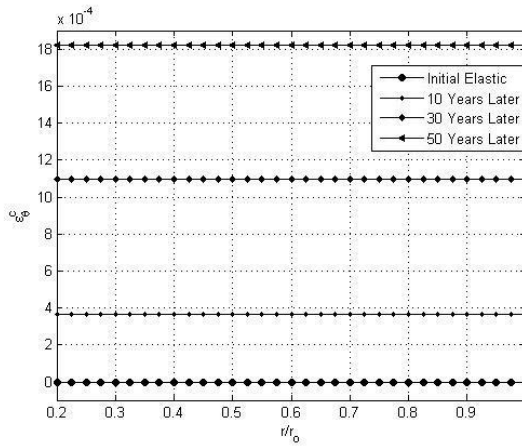
نمودار ۶-۸۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



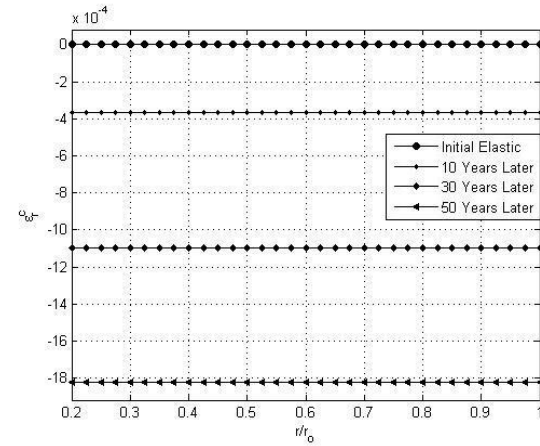
نمودار ۶-۸۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۸۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

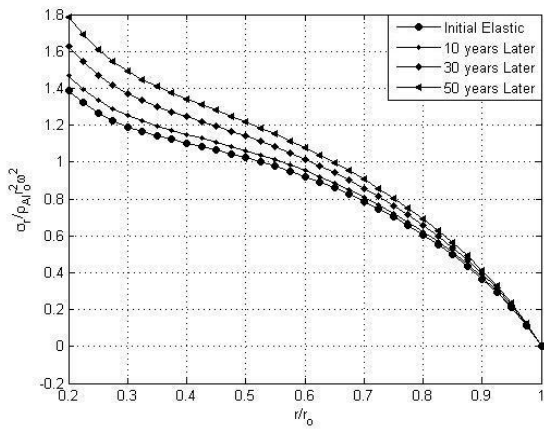


نمودار ۶-۹۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

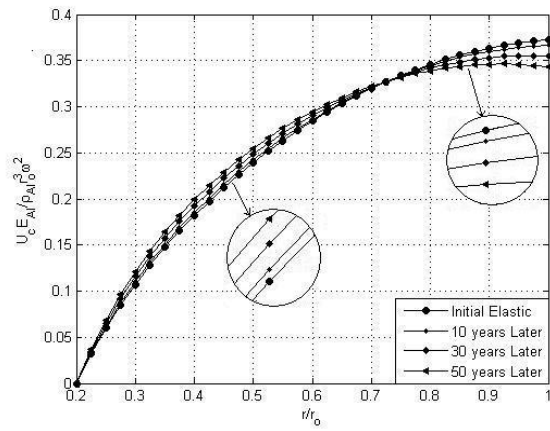


نمودار ۶-۸۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

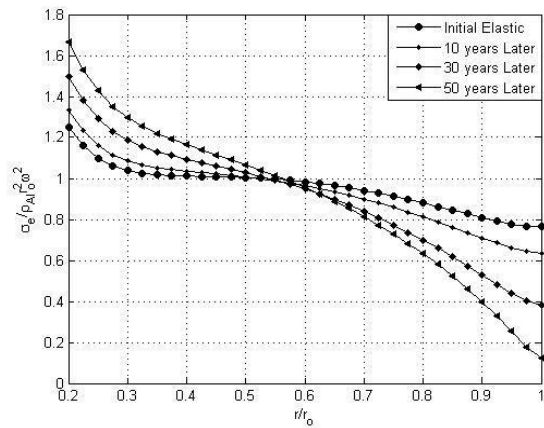
یک سرگردار - یک سر آزاد توزیع حجمی نوع d در پنجاه سال آینده:



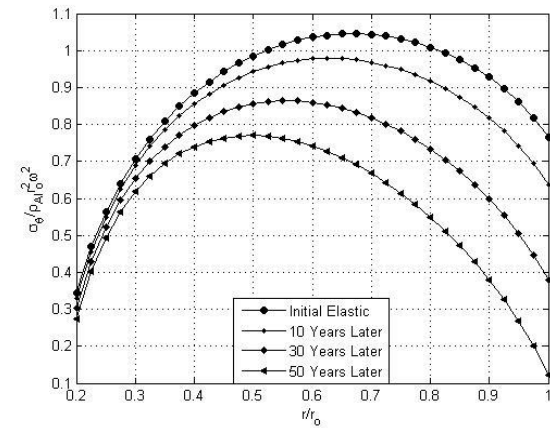
نمودار ۶-۹۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



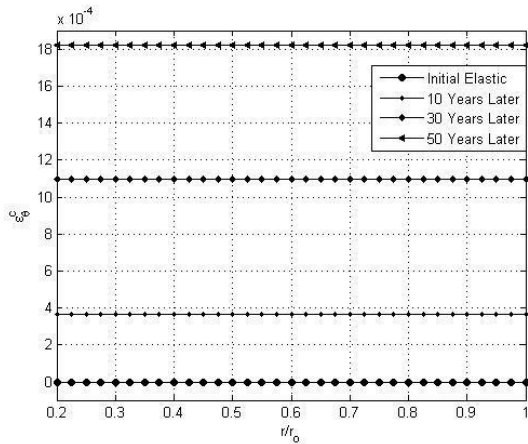
نمودار ۶-۹۱: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



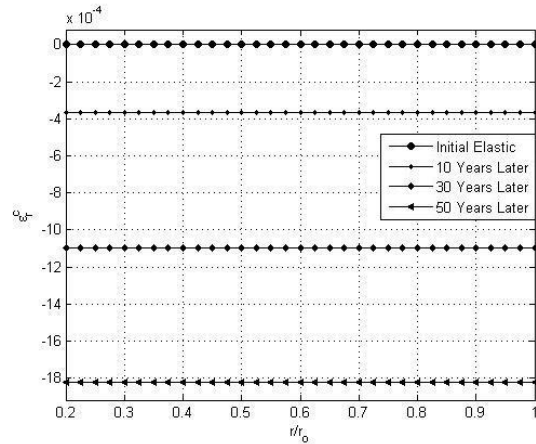
نمودار ۶-۹۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۹۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر



نمودار ۶-۹۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر



نمودار ۶-۹۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

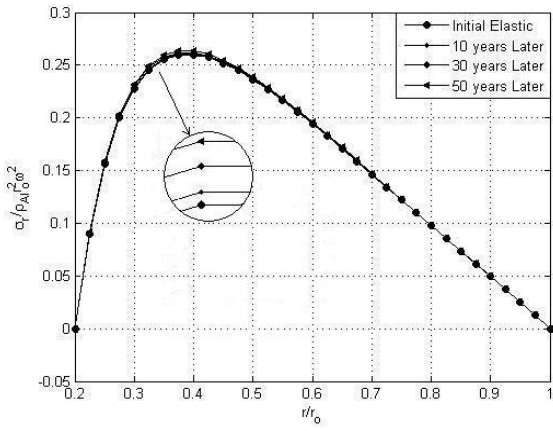
۶-۵ اثرات حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بر رفتار خزشی

در این قسمت اثرات حضور میدان مغناطیسی یکنواخت را بر رفتار دیسک چرخان FG با ضخامت متغیر از نوع هندسه مقعر بررسی خواهد شد. بدین منظور دیسک مورد نظر را در معرض میدان مغناطیسی یکنواختی به شدت $H_z = 2.23 \times 10^9 \text{ A/m}$ قرار داده و اثرات گذر زمان و بروز پدیده خزش بر رفتار دیسک در طی پنجاه سال آینده بررسی و با رفتار آن در حالت الاستیک مقایسه شده است. برای تحلیل عددی ابتدا باید در ساختار کدنویسی قسمت قبل، تغییراتی لحاظ گردد. از این رو در گام چهارم از بخش ۶-۲ باید معادلات زیر با دسته معادلات (۶-۴) جایگزین شود.

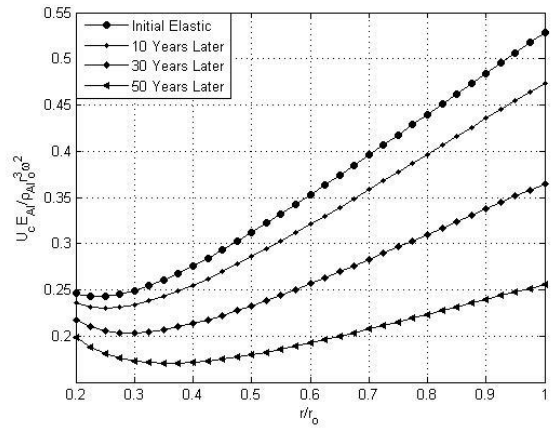
$$\begin{aligned}
 C_1 &= rh(r)[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)] \\
 C_2 &= \frac{d}{dr}[rh(r)E(r)] + h(r)\mu(r)H_z^2(1-\nu^2) \\
 C_3 &= \nu \frac{d}{dr}[h(r)E(r)] - \frac{h(r)}{r}[E(r) + \mu(r)H_z^2(1-\nu^2)] \\
 C_4 &= -r(1+\nu)\frac{d}{dr}[E(r)h(r)\alpha(r)T(r)] \\
 &\quad - \varepsilon_r^c \left[r \frac{d}{dr}(E(r)h(r)) + E(r)h(r)(1-\nu) \right] \\
 &\quad - \varepsilon_\theta^c \left[r\nu \frac{d}{dr}(E(r)h(r)) - E(r)h(r)(1-\nu) \right] \\
 &\quad - E(r)h(r) \left[\frac{d\varepsilon_r^c}{dr} + \nu \frac{d\varepsilon_\theta^c}{dr} \right] + \rho(r)h(r)r^2\omega^2(1-\nu^2)
 \end{aligned} \tag{۹-۶}$$

در دسته روابط فوق اثرات میدان یکنواخت مغناطیسی بروز یافته است که با بکارگیری آن مجموعه نمودارهای جدیدی از جابجایی شعاعی و تنش‌ها حاصل می‌شود و رفتار دیسک را با وجود گرادیان دمایی و حضور توأم میدان مغناطیسی یکنواخت نشان می‌دهد. نتایج این مقایسه در نمودارهای (۶-۹۷) تا (۶-۱۲۰) نمایش داده شده است.

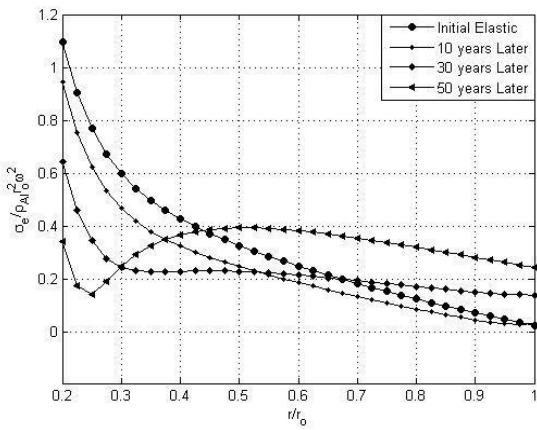
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c در پنجاه سال آینده:



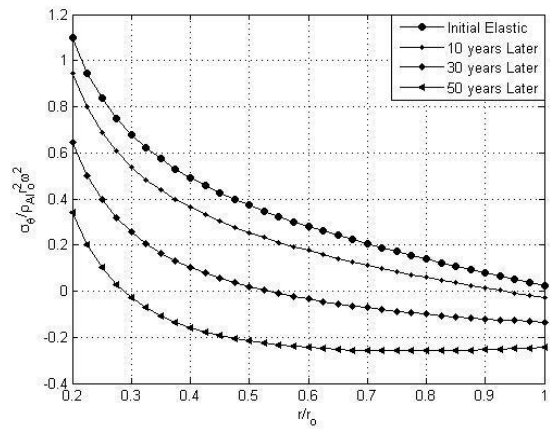
نمودار ۶-۹۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



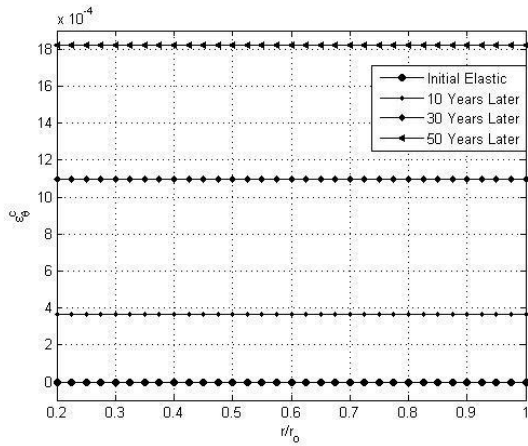
نمودار ۶-۹۷: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



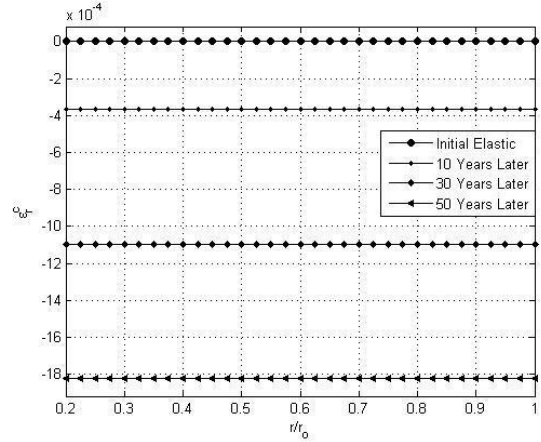
نمودار ۶-۱۰۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۹۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

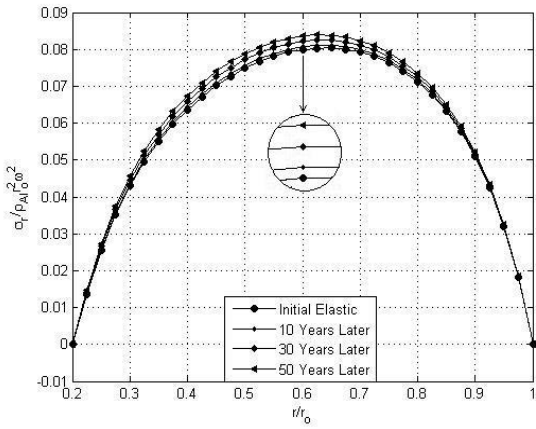


نمودار ۶-۱۰۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

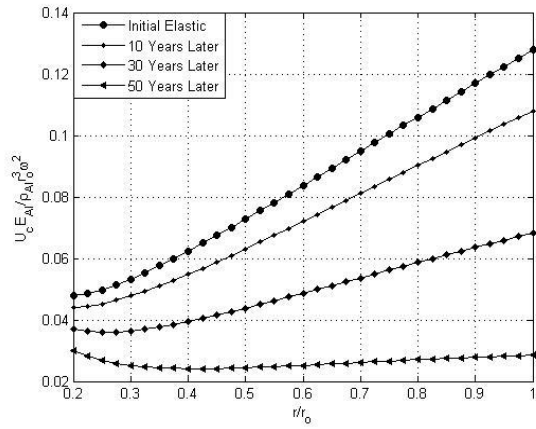


نمودار ۶-۱۰۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

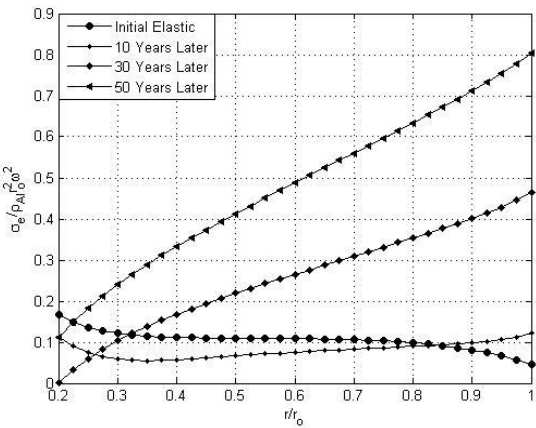
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع d در پنجاه سال آینده:



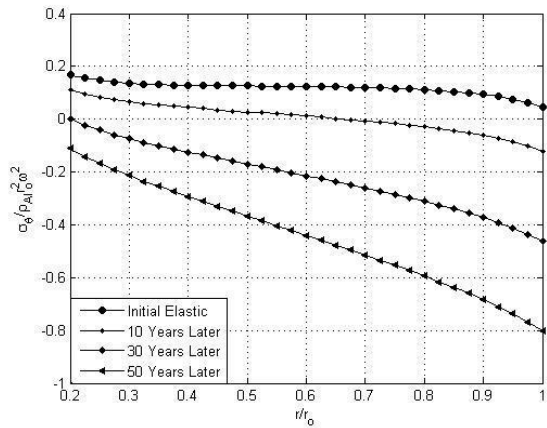
نمودار ۶-۱۰۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



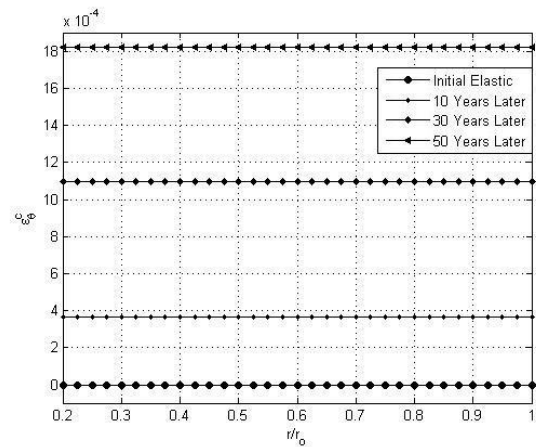
نمودار ۶-۱۰۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



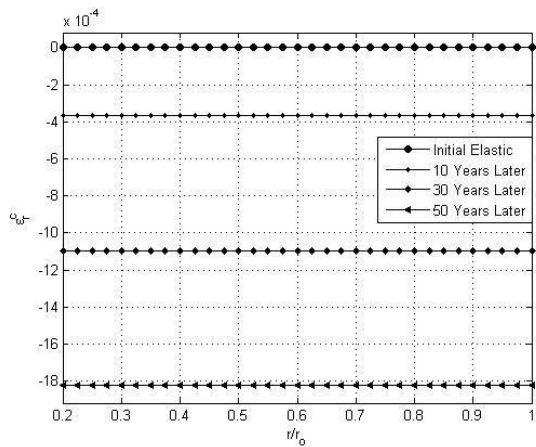
نمودار ۶-۱۰۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۱۰۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

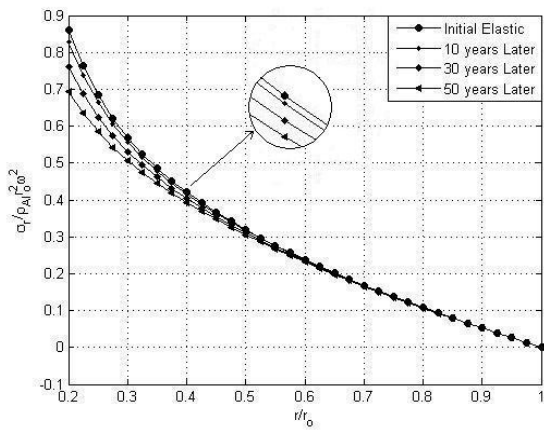


نمودار ۶-۱۰۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

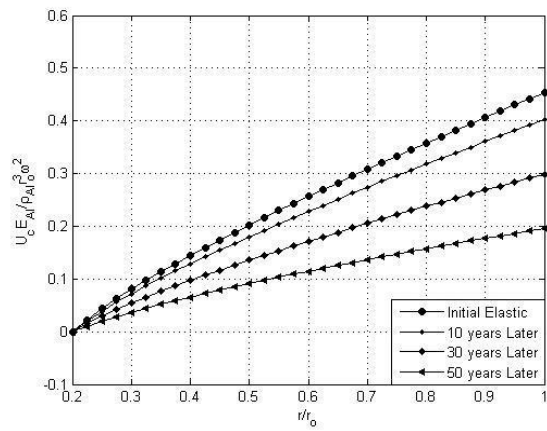


نمودار ۶-۱۰۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

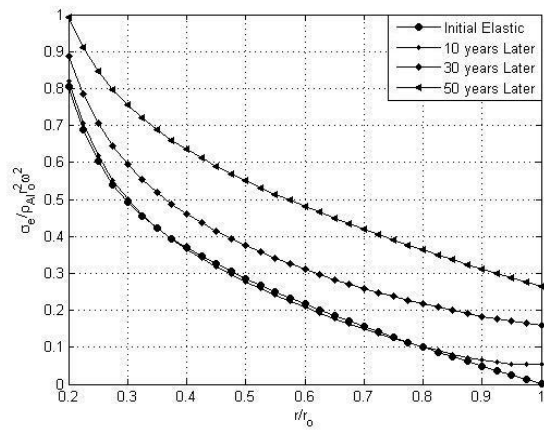
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c در پنجاه سال آینده:



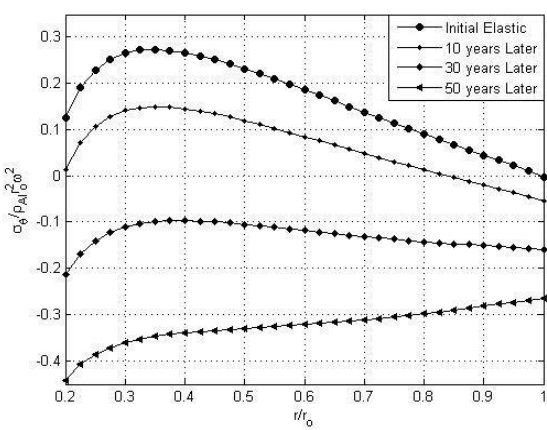
نمودار ۶-۱۱۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



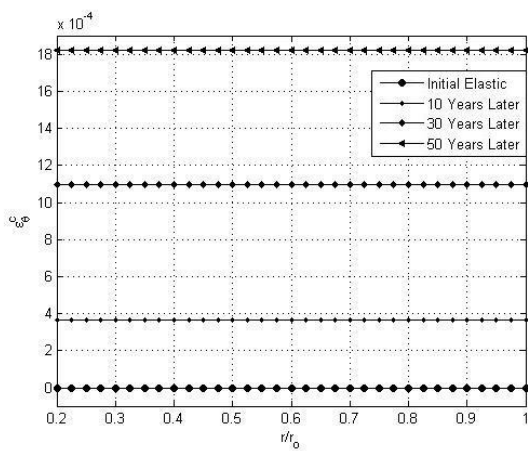
نمودار ۶-۱۰۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



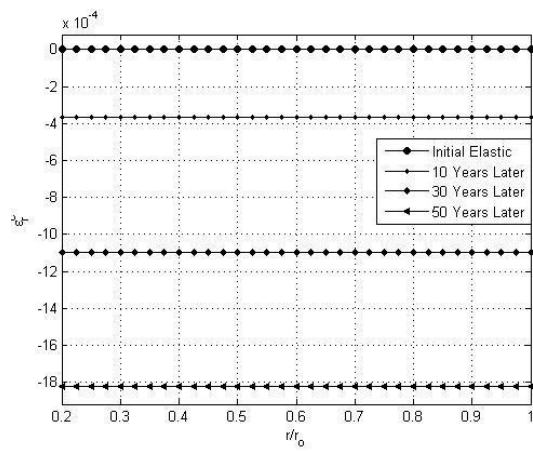
نمودار ۶-۱۱۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۱۱۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر

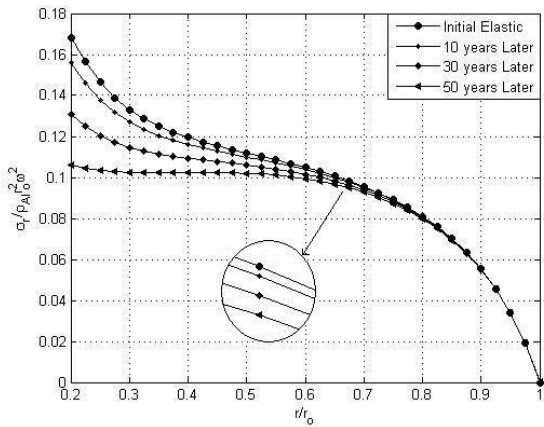


نمودار ۶-۱۱۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر

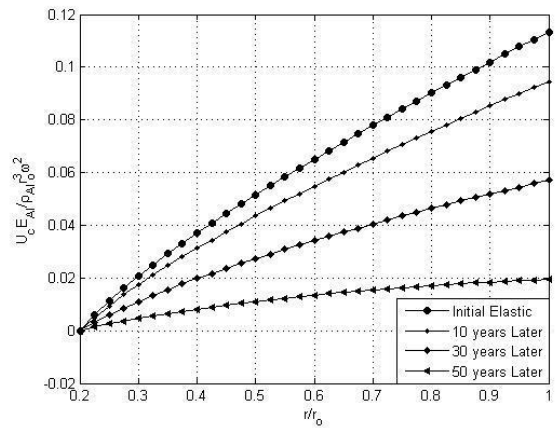


نمودار ۶-۱۱۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

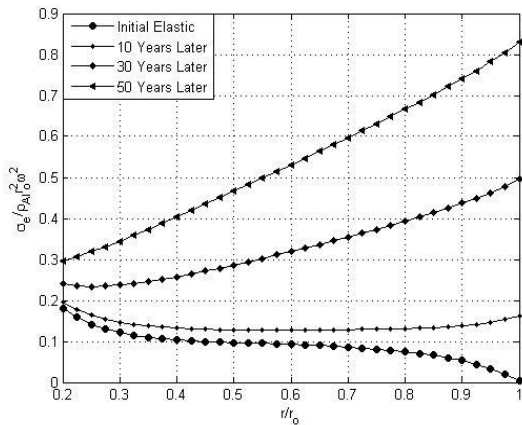
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع d در پنجاه سال آینده



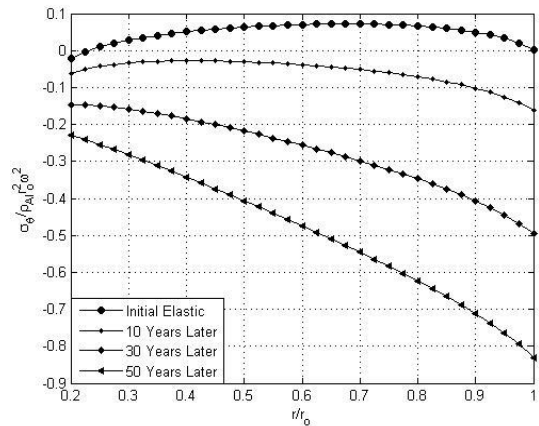
نمودار ۶-۱۱۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر



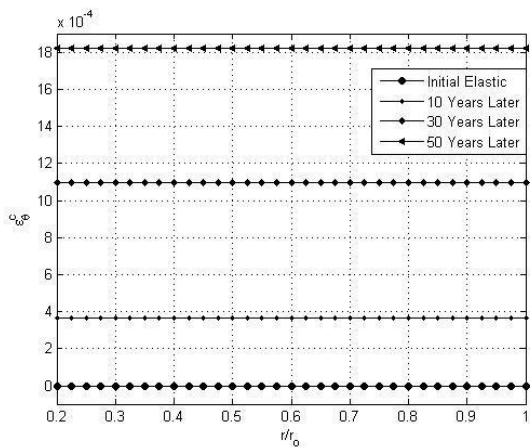
نمودار ۶-۱۱۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر



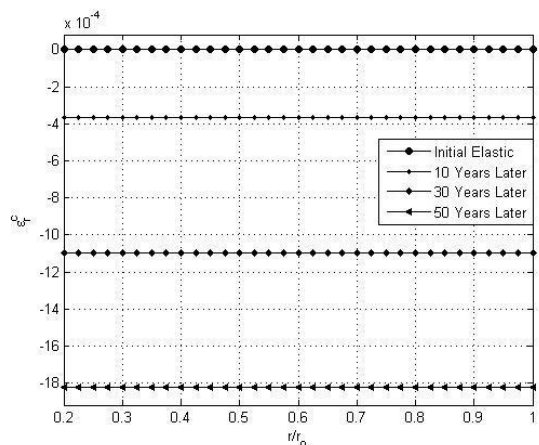
نمودار ۶-۱۱۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر



نمودار ۶-۱۱۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر



نمودار ۶-۱۲۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر



نمودار ۶-۱۱۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر

جابجایی شعاعی دیسک مقعر در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با گذشت زمان کاهش می‌یابد. تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت در شرایط مرزی دو سر آزاد با گذشت زمان افزایش و در شرایط مرزی یک سر گیردار-یک سر آزاد کاهش می‌یابد، البته این تغییرات نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی وجود ندارد بسیار کوچک است. تنش محیطی خزشی دیسک در هر دو شرط مرزی، در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با گذشت زمان روند کاهشی دارد. در طول پنجاه سال همواره دیسک با هندسه مقعر توزیع کرنش خزشی یکنواخت‌تری دارد و مقدار کرنش‌های خزشی آن در شعاع داخلی کمتر از سایر هندسه‌هاست. یعنی کمتر در معرض آسیب است.

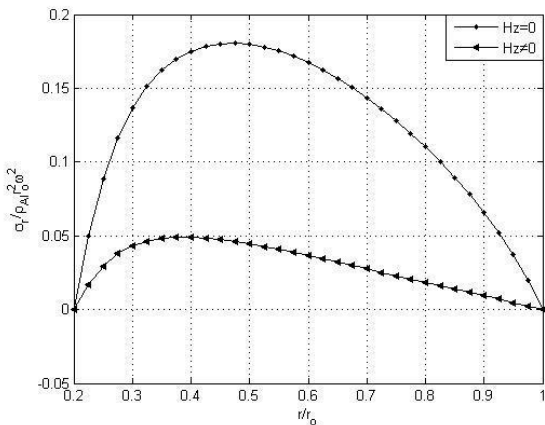
حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به قدری بر رفتار دیسک اثر گذاشته است که تنش محیطی آن را نه تنها کاهش داده بلکه پس از ۳۰ سال آن را منفی کرده است. یعنی با گذشت زمان تنش محیطی فشاری شده است. از آنجایی که تنش مؤثر برآیند تنش‌های شعاعی و محیطی است، منفی بودن مقدار تنش محیطی پس از ۳۰ سال بر روند تنش مؤثر اثر می‌گذارد و سبب می‌شود رفتار متفاوتی نسبت به قبل از خود نشان دهد. البته از آنجایی که همواره قدر مطلق تنش محیطی از شعاعی بیشتر است، تأثیر آن هم بر تنش مؤثر بیشتر خواهد بود.

۶-۶ مقایسه رفتار خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان

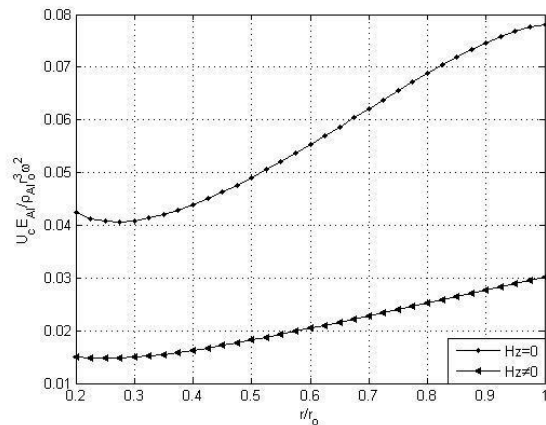
یکنواخت مغناطیسی

در قسمت‌های گذشته رفتار خزشی دیسک در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی مفصلاً و به طور جداگانه بررسی گردید. در این قسمت این دو وضعیت را با هم مقایسه می‌شود تا مشخص گردد حضور میدان مغناطیسی چه تأثیراتی بر رفتار دیسک با هندسه مقعر دارد.

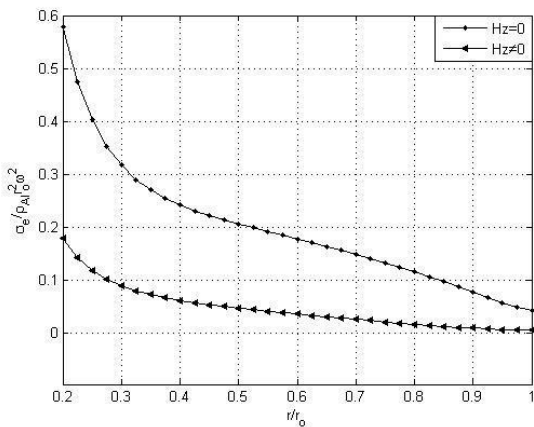
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۱۰ سال:



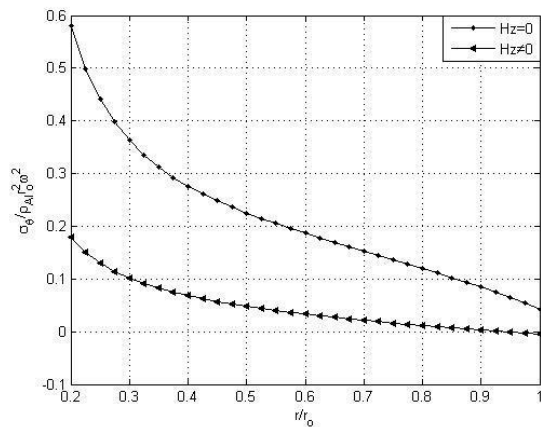
نمودار ۶-۱۲۲: توزیع تنش شعاعی چهار دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



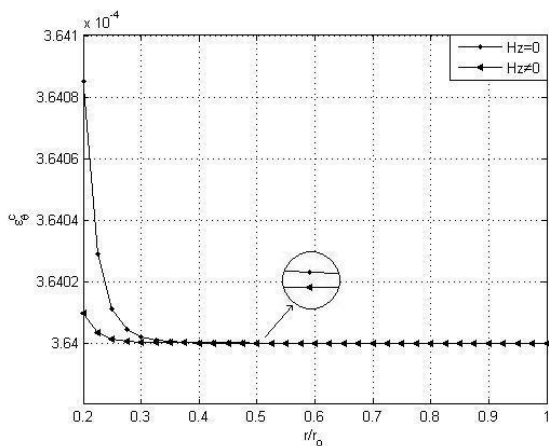
نمودار ۶-۱۲۱: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



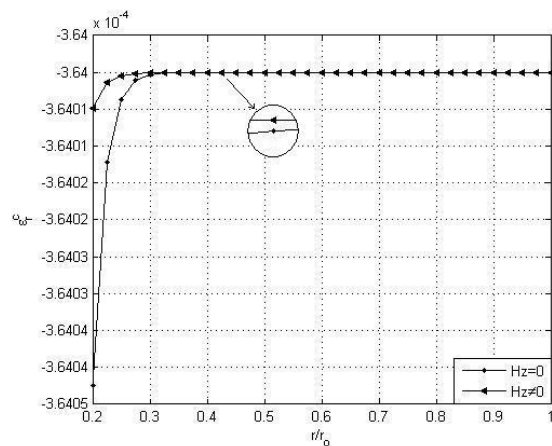
نمودار ۶-۱۲۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۲۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

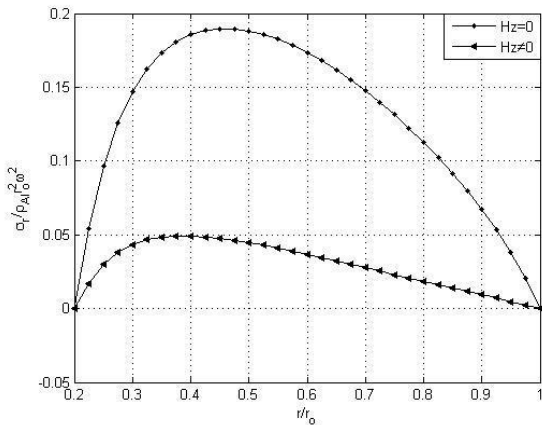


نمودار ۶-۱۲۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

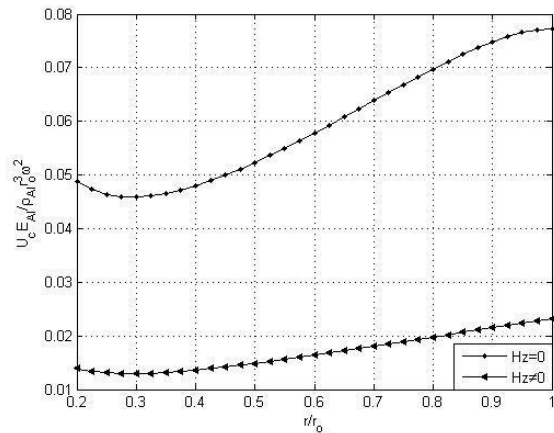


نمودار ۶-۱۲۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

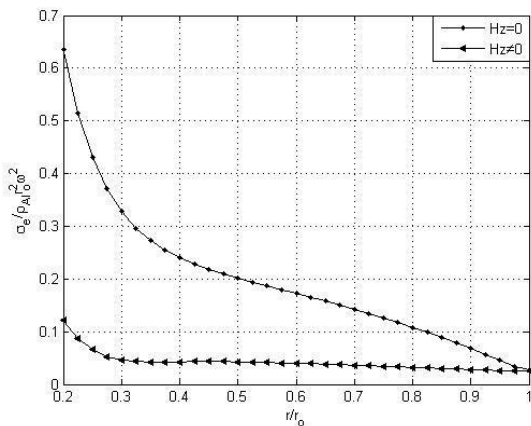
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۳۰ سال:



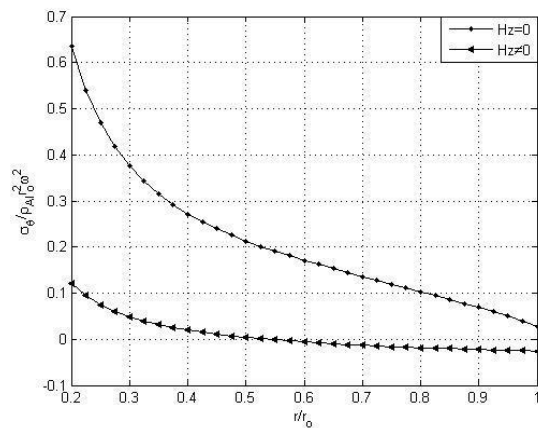
نمودار ۶-۱۲۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



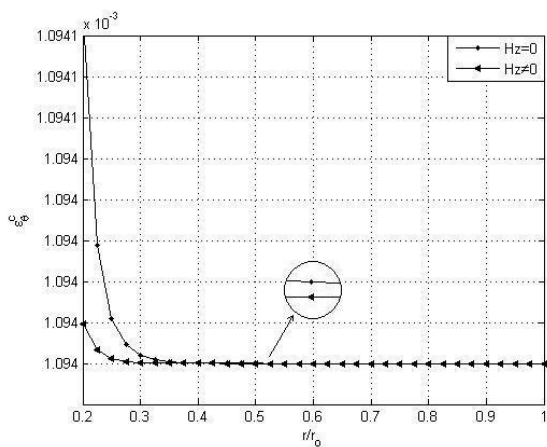
نمودار ۶-۱۲۷: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



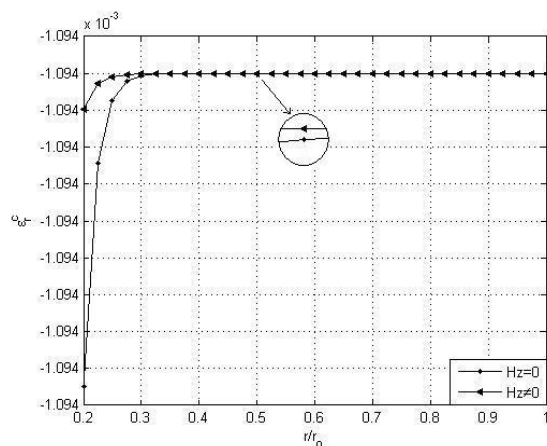
نمودار ۶-۱۳۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۲۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

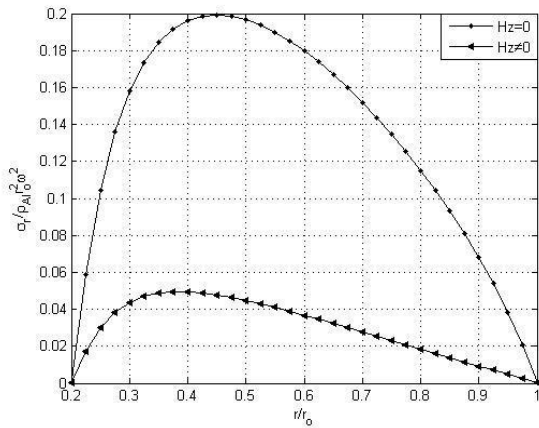


نمودار ۶-۱۳۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

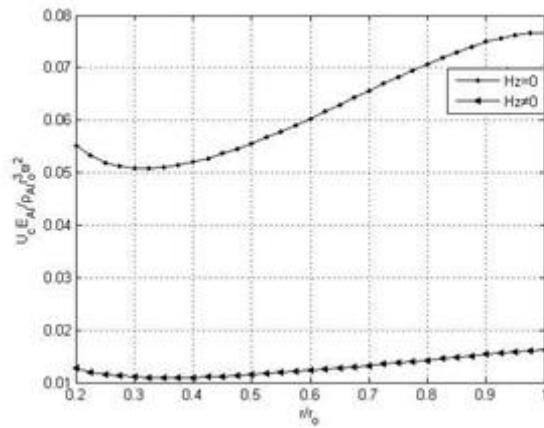


نمودار ۶-۱۳۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

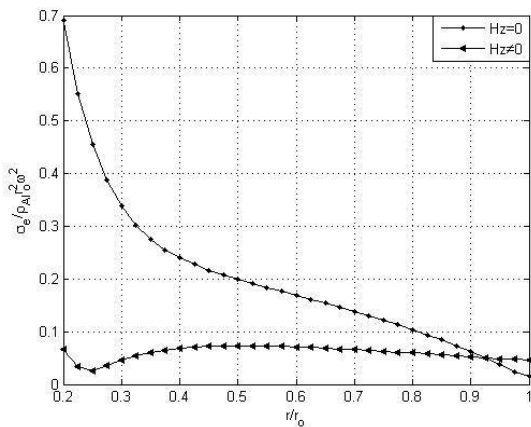
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۵۰ سال:



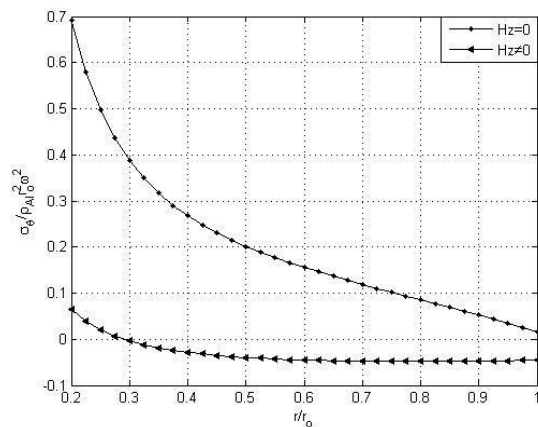
نمودار ۶-۱۳۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



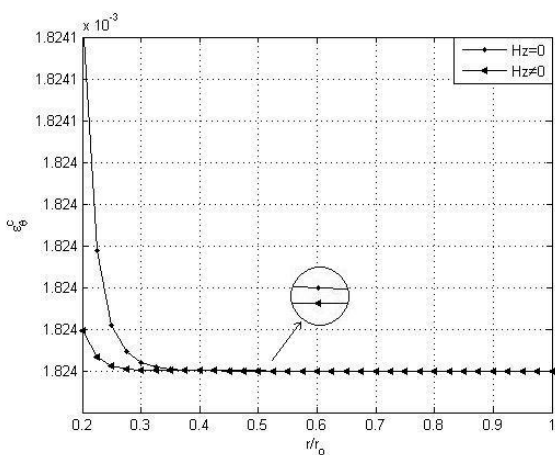
نمودار ۶-۱۳۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



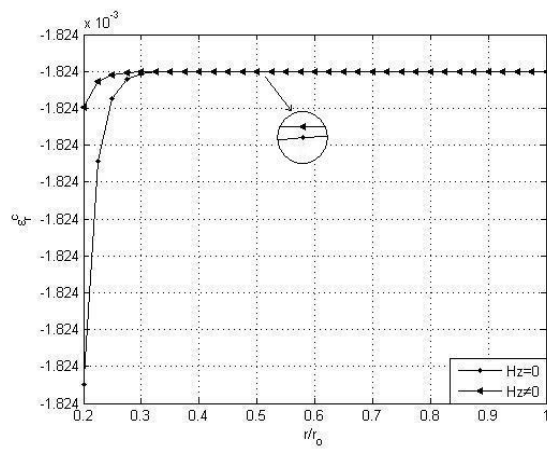
نمودار ۶-۱۳۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۳۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

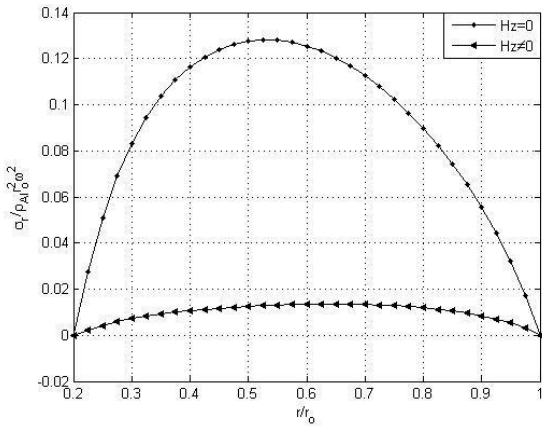


نمودار ۶-۱۳۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

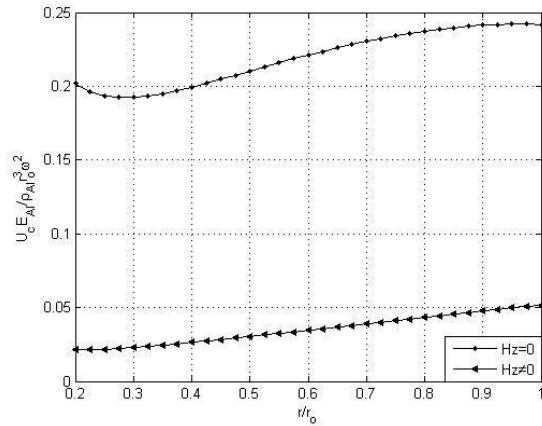


نمودار ۶-۱۳۷: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

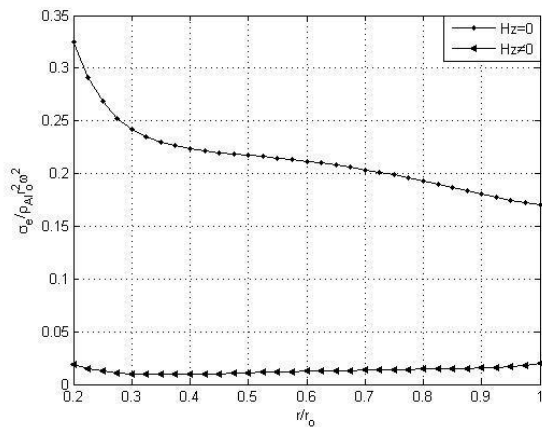
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع ad پس از ۱۰ سال:



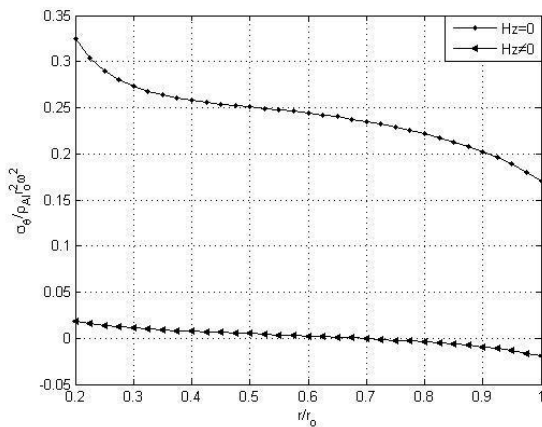
نمودار ۶-۱۴۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



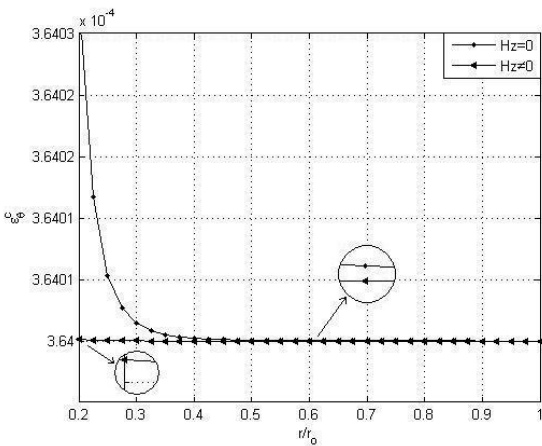
نمودار ۶-۱۳۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



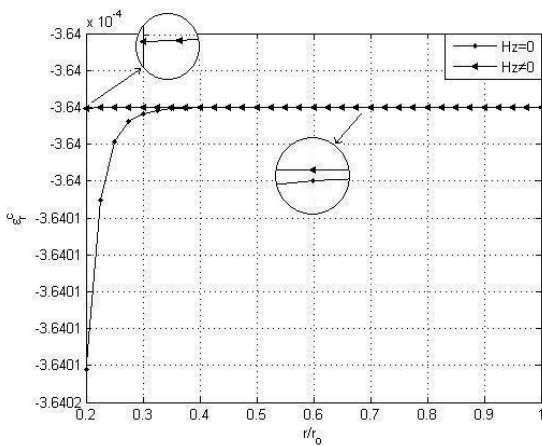
نمودار ۶-۱۴۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۴۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

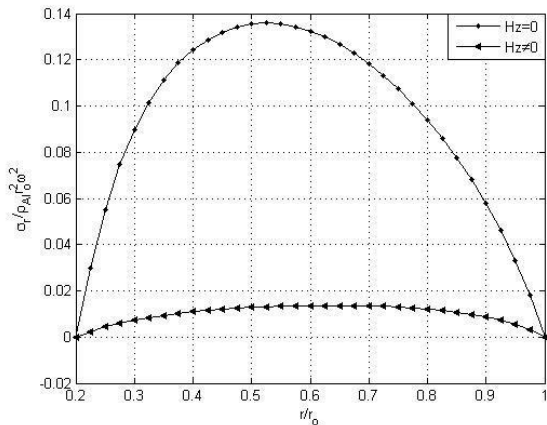


نمودار ۶-۱۴۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

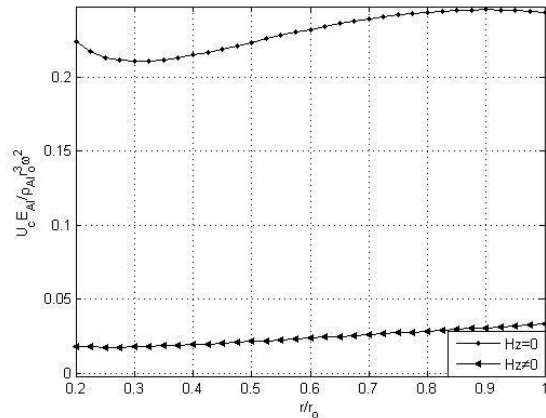


نمودار ۶-۱۴۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

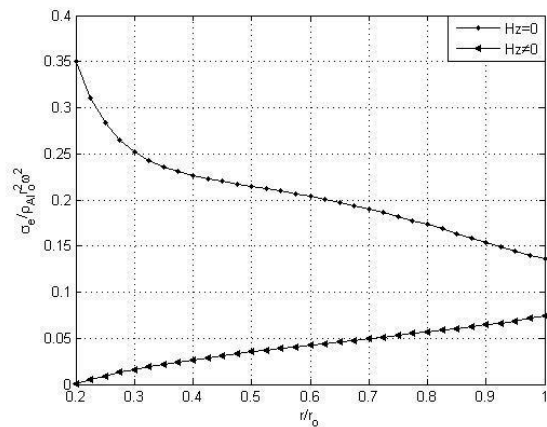
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع ad پس از ۳۰ سال:



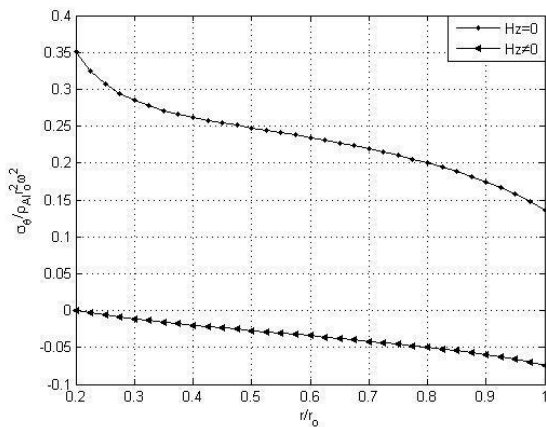
نمودار ۶-۱۴۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



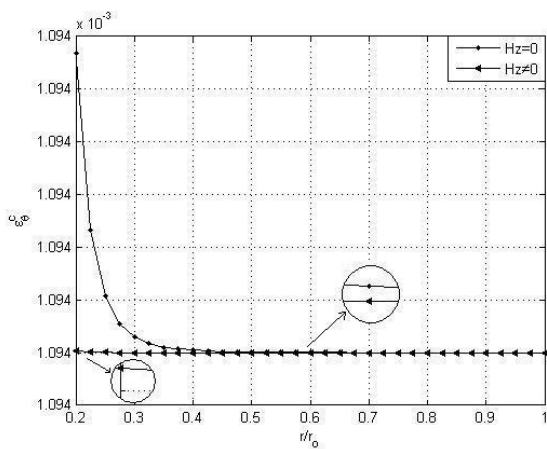
نمودار ۶-۱۴۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



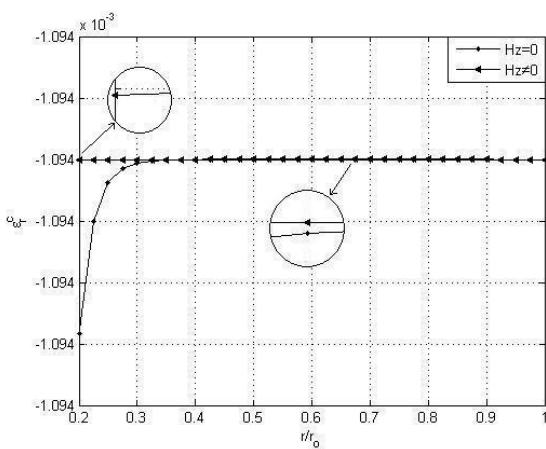
نمودار ۶-۱۴۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۴۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

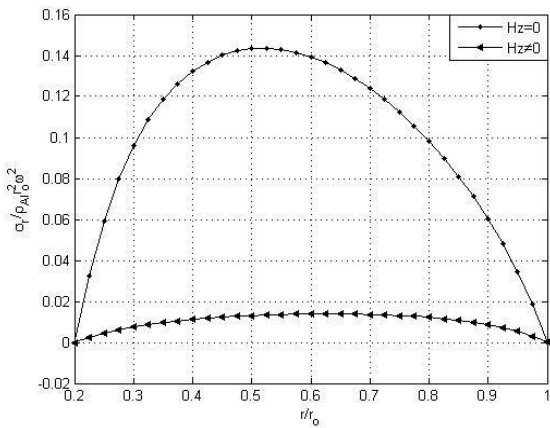


نمودار ۶-۱۵۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

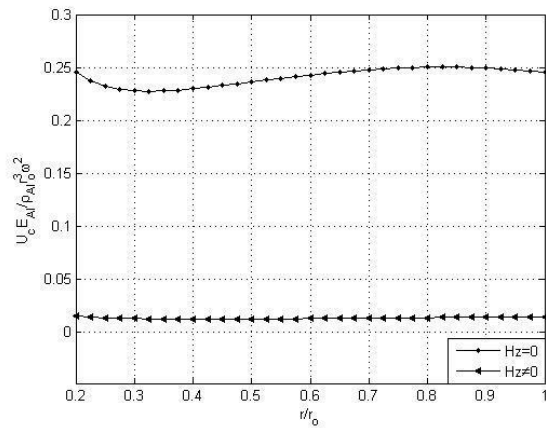


نمودار ۶-۱۴۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

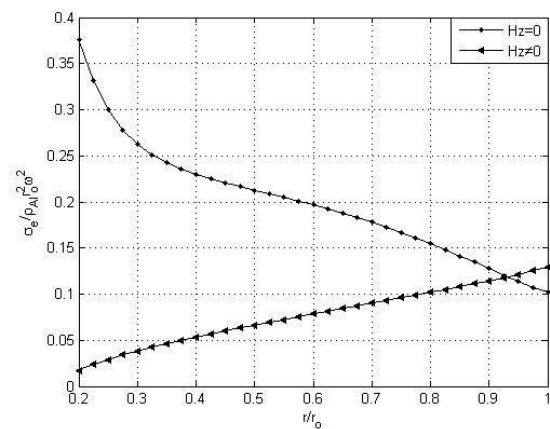
دو سر آزاد، توزیع حجمی نوع ad پس از ۵۰ سال:



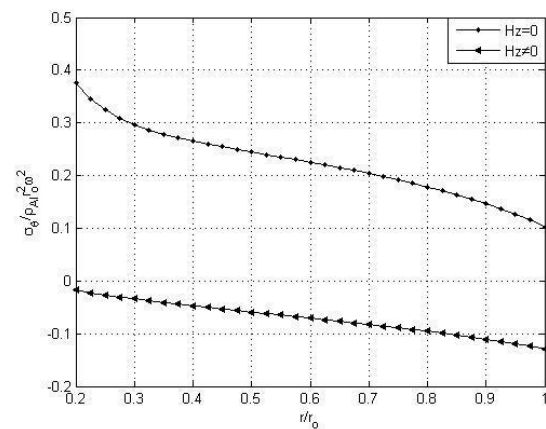
نمودار ۶-۱۵۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



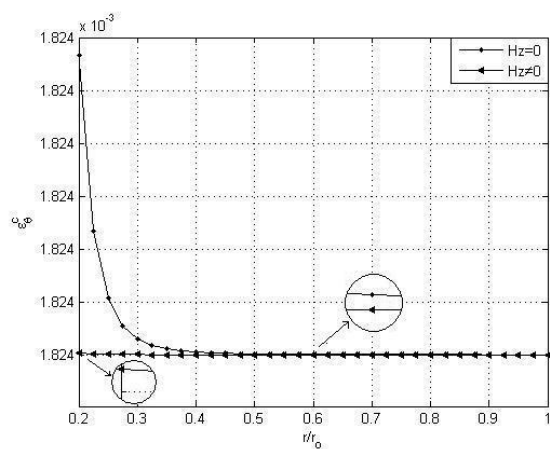
نمودار ۶-۱۵۱: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



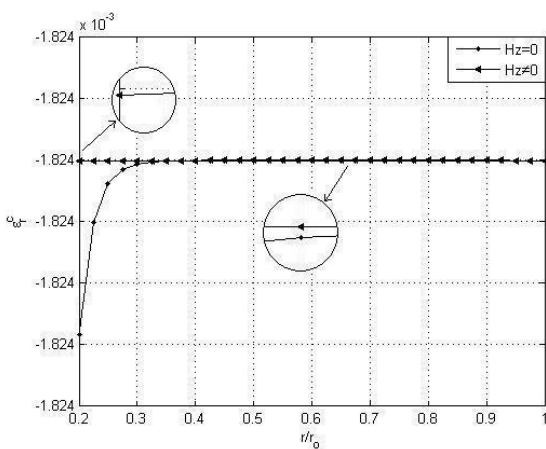
نمودار ۶-۱۵۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۵۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

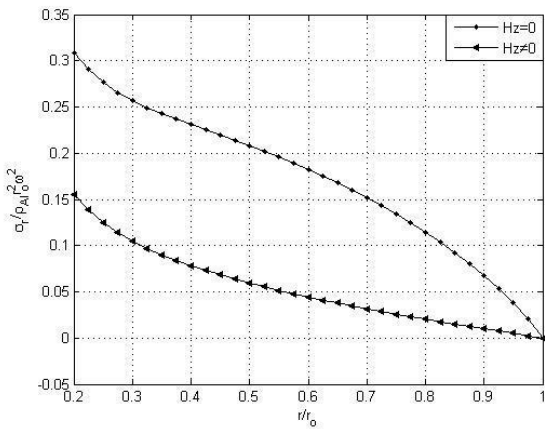


نمودار ۶-۱۵۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

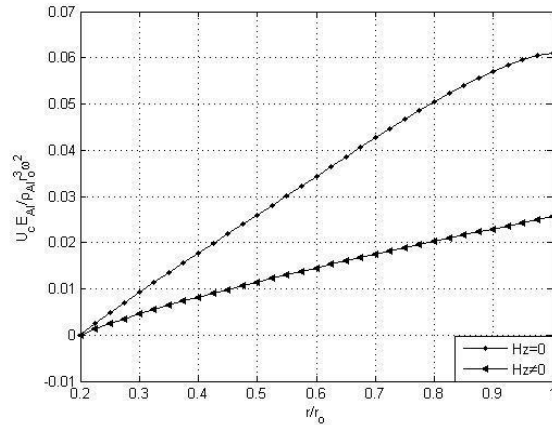


نمودار ۶-۱۵۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

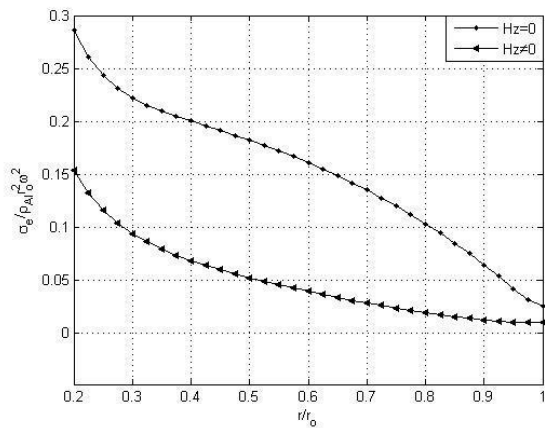
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۱۰ سال:



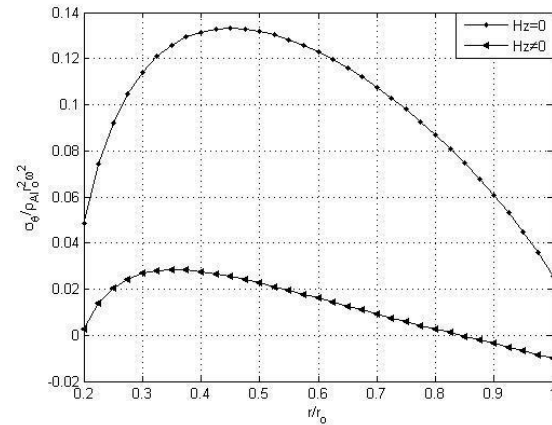
نمودار ۶-۱۵۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



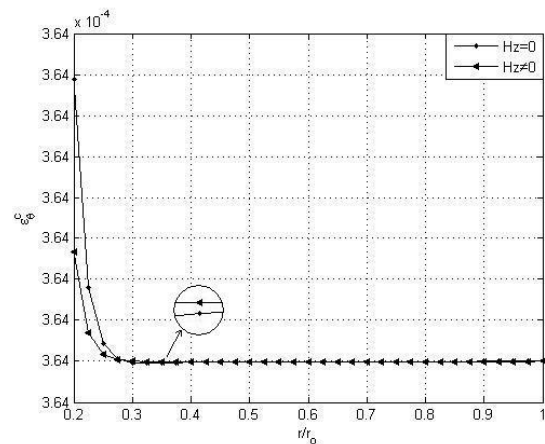
نمودار ۶-۱۵۷: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



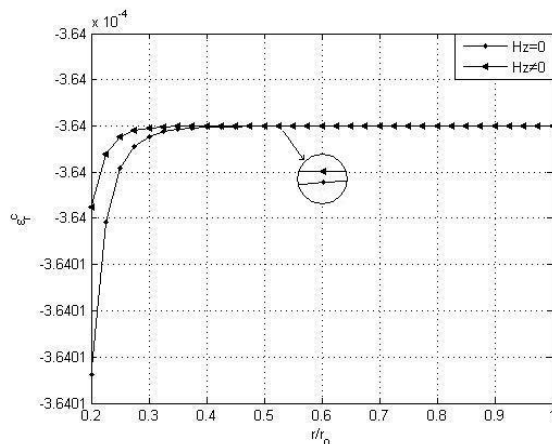
نمودار ۶-۱۶۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۵۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

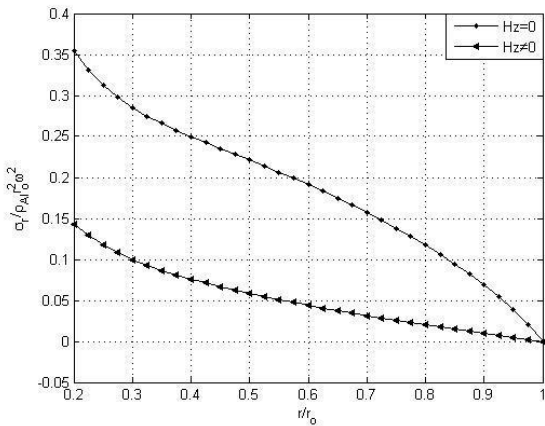


نمودار ۶-۱۶۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

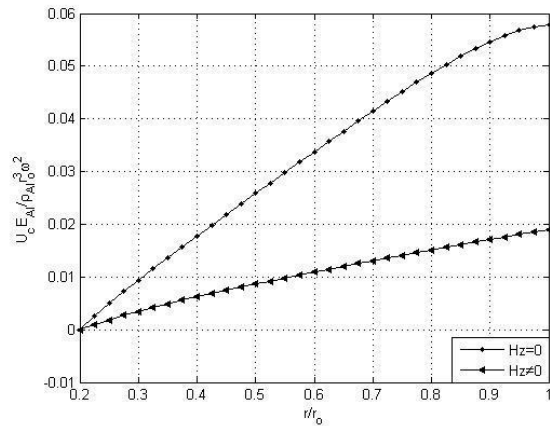


نمودار ۶-۱۶۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

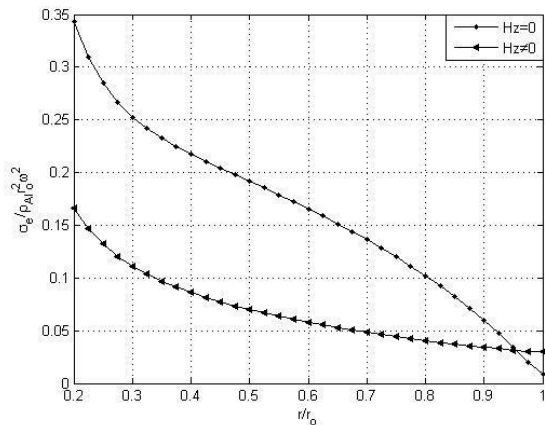
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۳۰ سال:



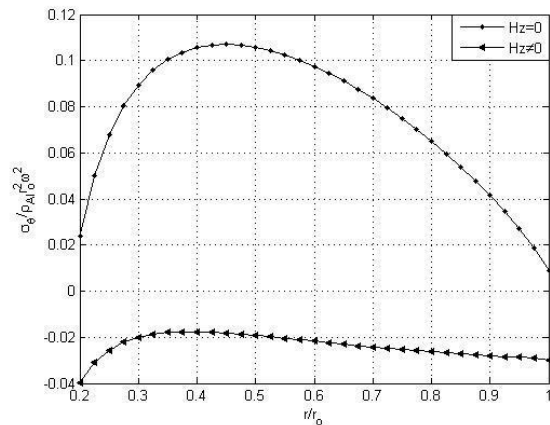
نمودار ۶-۱۶۴: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



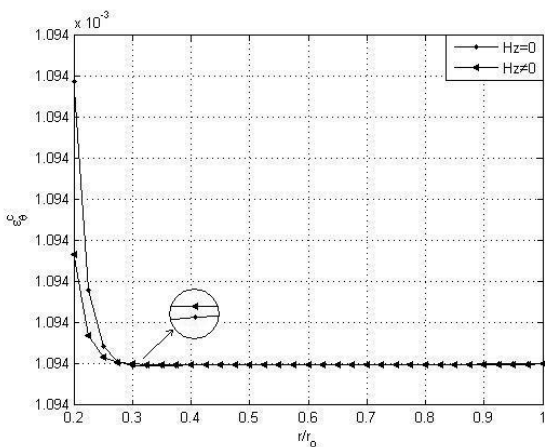
نمودار ۶-۱۶۳: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



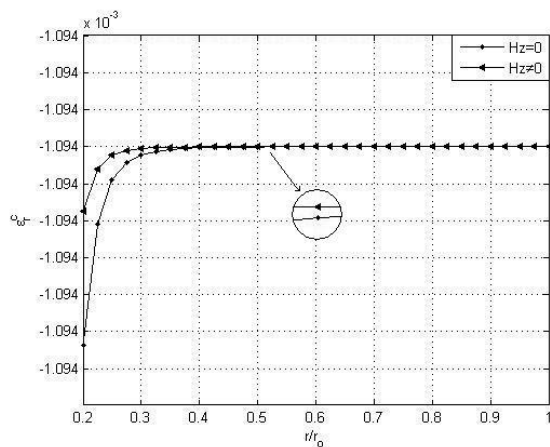
نمودار ۶-۱۶۶: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۶۵: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

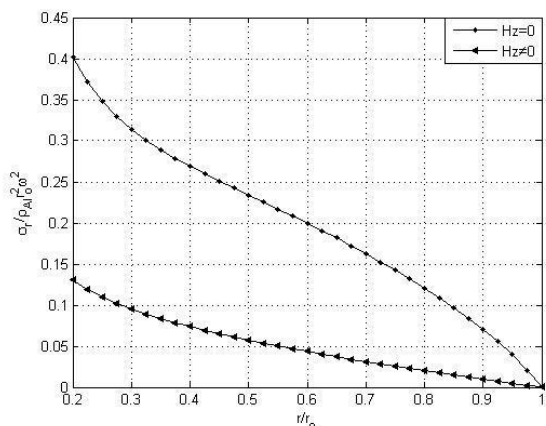


نمودار ۶-۱۶۸: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

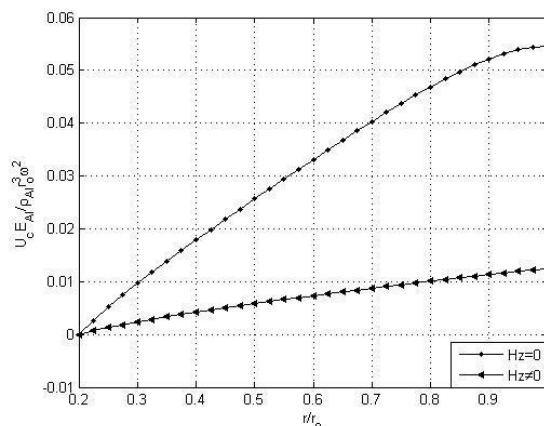


نمودار ۶-۱۶۷: توزیع کرنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

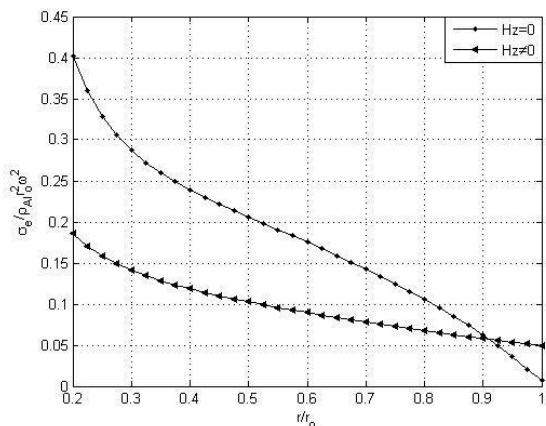
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع c پس از ۵۰ سال:



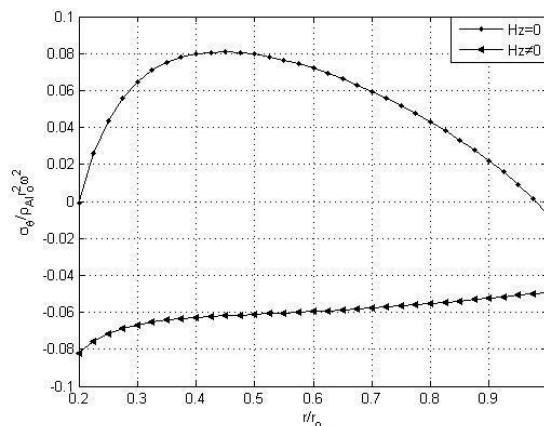
نمودار ۶-۱۷۰: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



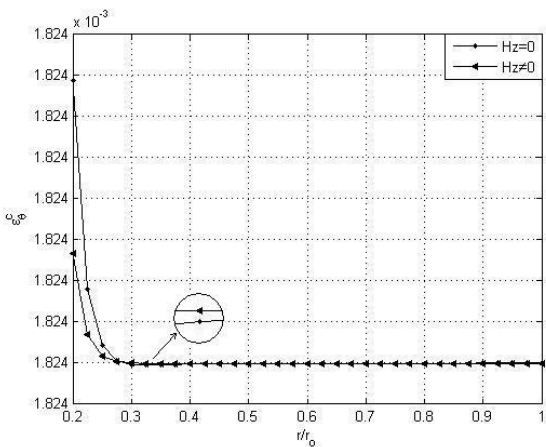
نمودار ۶-۱۶۹: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



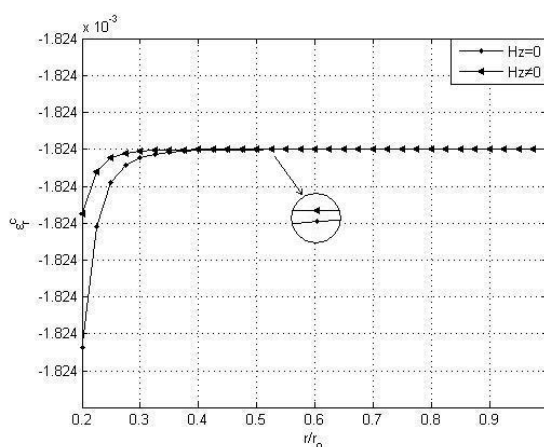
نمودار ۶-۱۷۲: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۷۱: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

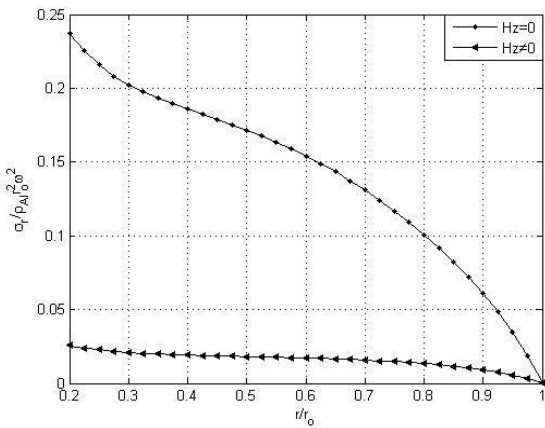


نمودار ۶-۱۷۴: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

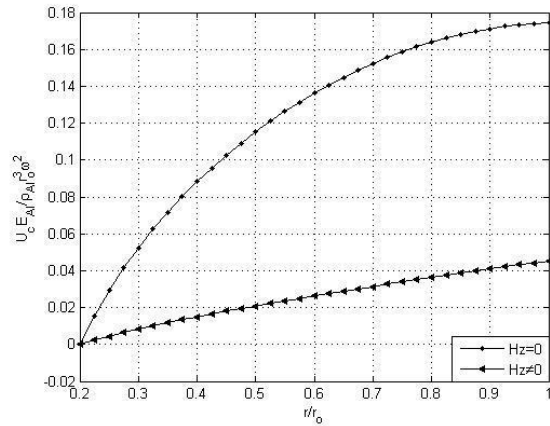


نمودار ۶-۱۷۳: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

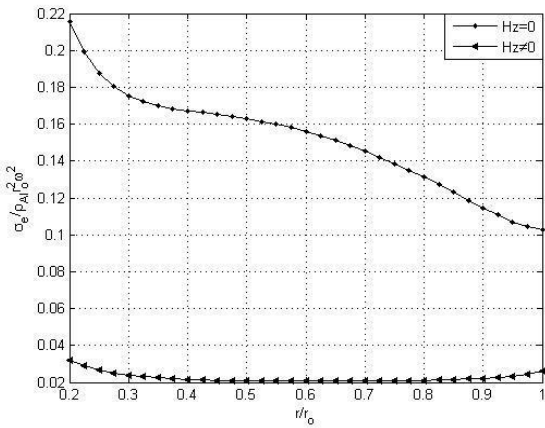
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع dl پس از ۱۰ سال:



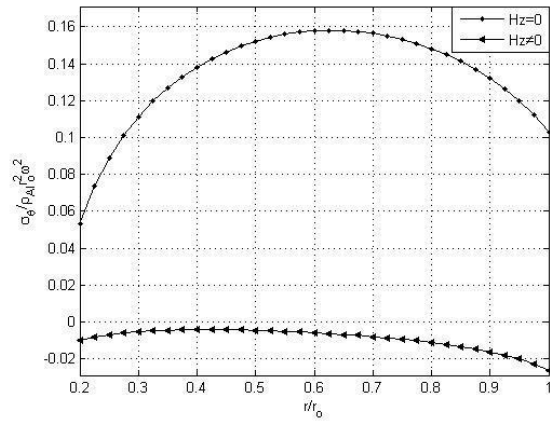
نمودار ۶-۱۷۶: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



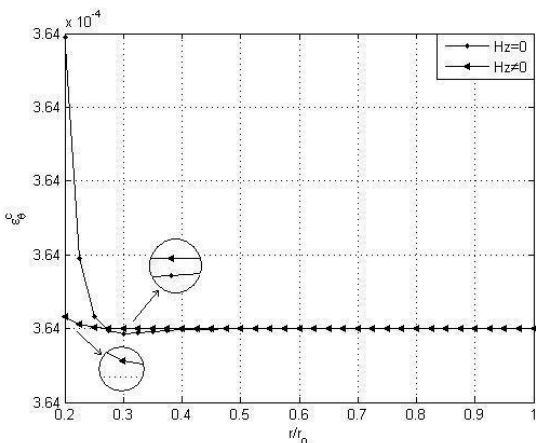
نمودار ۶-۱۷۵: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



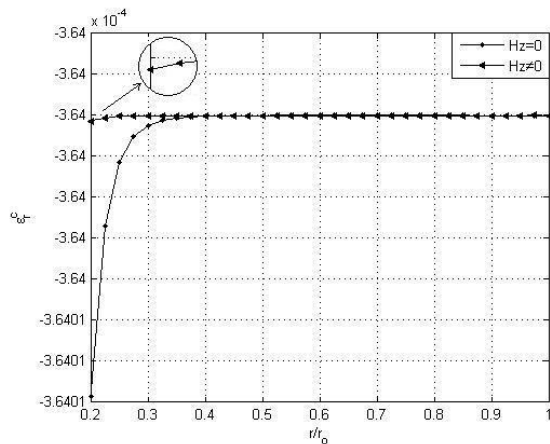
نمودار ۶-۱۷۸: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۷۷: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

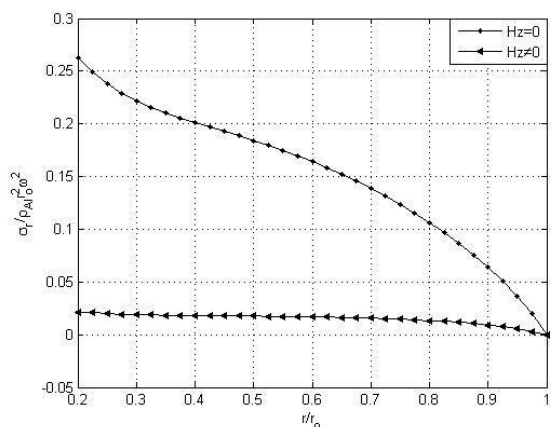


نمودار ۶-۱۸۰: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

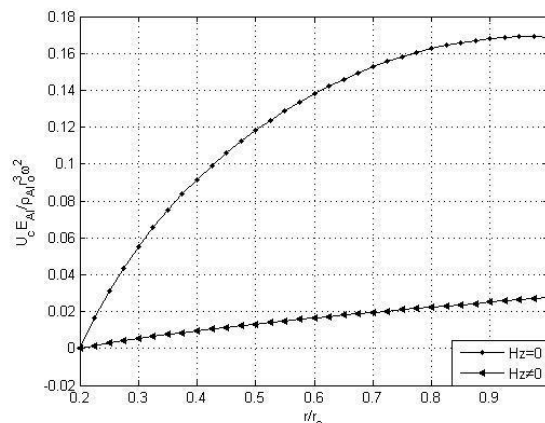


نمودار ۶-۱۷۹: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

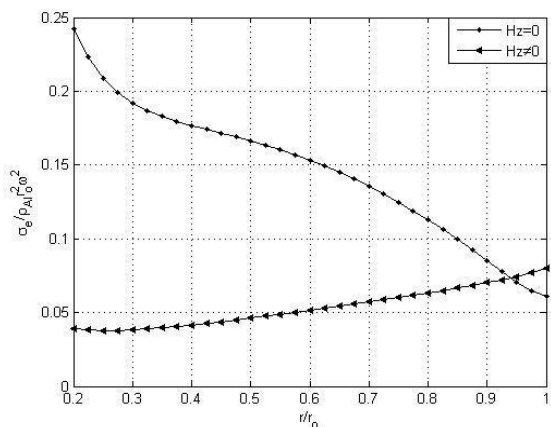
یک سرگردار-یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع d پس از ۳۰ سال:



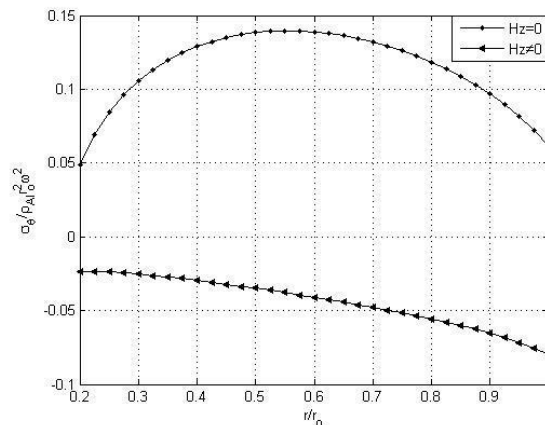
نمودار ۶-۱۸۲: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



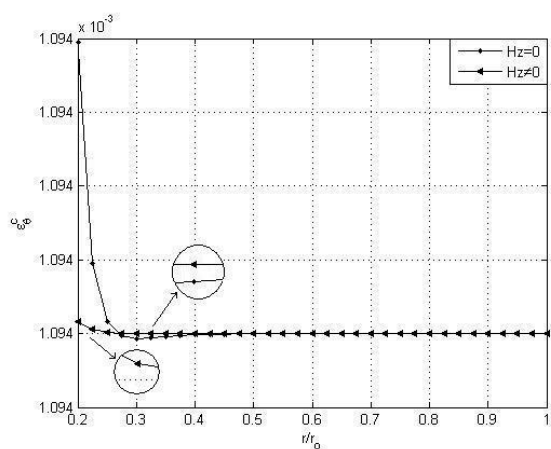
نمودار ۶-۱۸۱: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



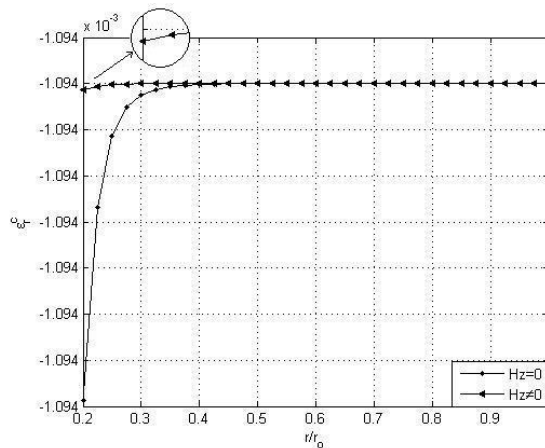
نمودار ۶-۱۸۴: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۸۳: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

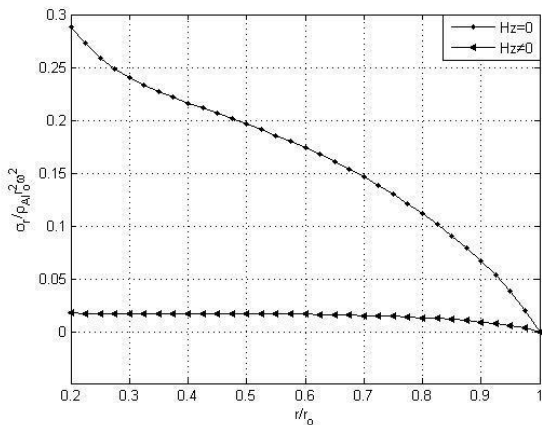


نمودار ۶-۱۸۶: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

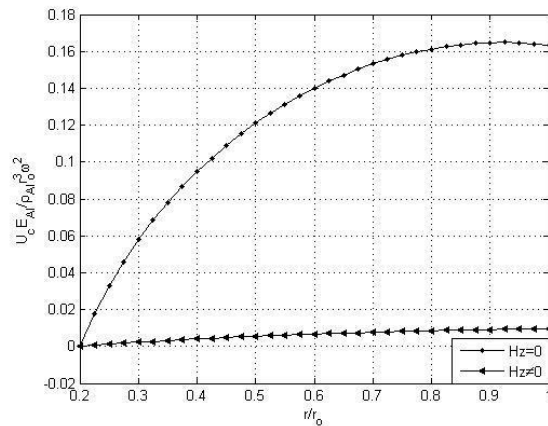


نمودار ۶-۱۸۵: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

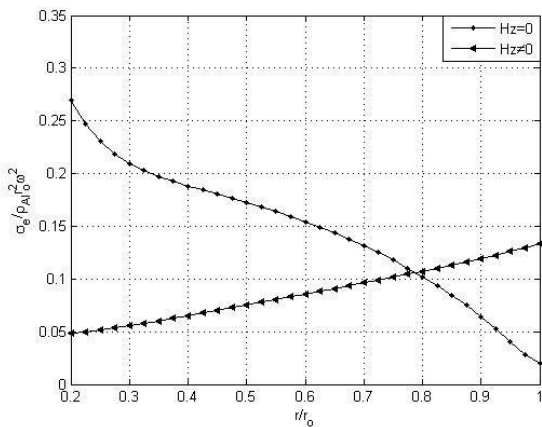
یک سرگردار - یک سر آزاد، توزیع حجمی نوع dl پس از ۵۰ سال:



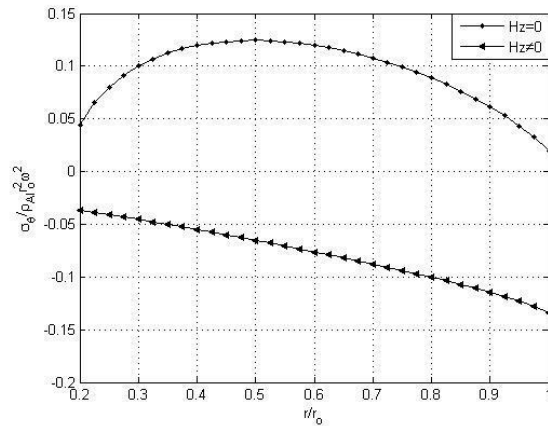
نمودار ۶-۱۸۸: توزیع تنش شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



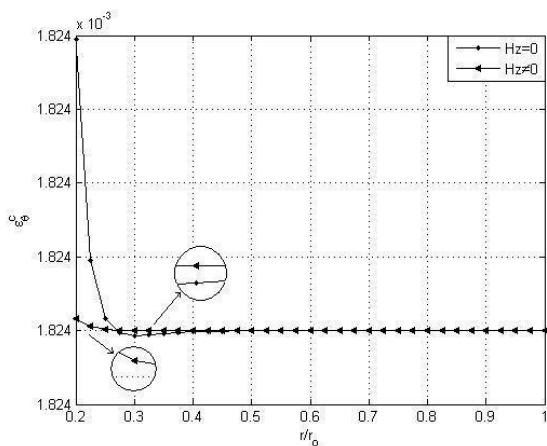
نمودار ۶-۱۸۷: جابجایی شعاعی خزشی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



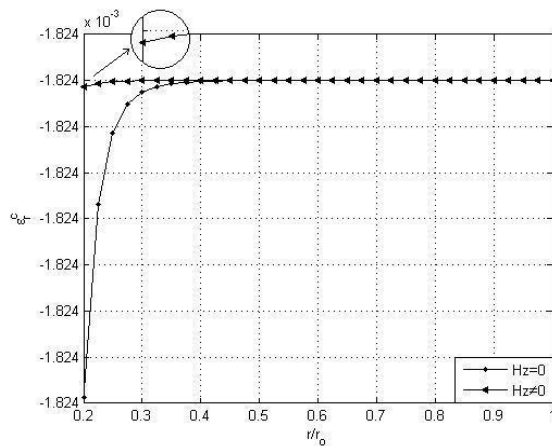
نمودار ۶-۱۹۰: توزیع تنش مؤثر دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۸۹: توزیع تنش محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۹۲: توزیع کرنش خزشی محیطی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی



نمودار ۶-۱۹۱: توزیع کرنش خزشی شعاعی دیسک مقعر در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به شدت بر رفتار دیسک تأثیر می‌گذارد و جابجایی و تنش
ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کرنش‌های خزشی شعاعی و محیطی نیز در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، توزیع
یکنواخت‌تری دارند و فاصله بیشینه و کمینه آن‌ها کمتر خواهد بود.

مراجع

- 1- R.W. Bailey, (1929), "*Creep Stresses at High Temperature*" Transaction of the World Power Conference, Tokeyo, pp. 1089-1097.
- 2- R.W. Bailey, (1935), "*The Utilization of Creep Test Data in Engineering Design*", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 131, pp. 131-349.
- 3- C.R. Soderberg, (1941), "*Interpretion of Creep Tests on Tubes*", Transactions of the ASME, vol. 63, pp. 737-748.
- 4- R.W. Bailey, (1951), "*Steam Piping for High Pressures and High Temperatures*", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 164, pp.324-335.
- 5- F.R. Larson and J. Miller, (1952), "*A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses*", Trans, ASME, vol. 174, pp. 765-781.
- 6- S.S. Manson and A.M. Haferd, (1953), "*A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data*", NACA, TN 2890.
- 7- E.N. Andrade, (1957), "*Creep and Recovery*", American Society for Metals, Ohio
- 8- C.A. Schulte, (1960), "*Predicting Creep Deflections of Plastic Beams*", Proc. ASTM, vol. 60, pp. 895-904.
- 9- S.S. Manson, (1963), "*Design Considerations for Long Life at Elevated Temperatures*", ASME/ASTM/IME joint International Conference Creep, New York and London.
- 10- D.L. Marriot and F.A. Leckie, (1964), "*Some Observations on the Deflection of Structures During Creep*", Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, vol. 178, pp. 115-125.
- 11- F. Garofalo, (1965), "*Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*", Macmillan, New York.

- 12- A.C. Mackenzi, (1968), "*On the Use of a Single Uniaxial Test to Estimate Deformation Rates in Some Structures Undergoing Creep*", International Journal of Mechanical science, Pergamon Press, vol. 10, pp.441-453.
- 13- D.R. Hayhurst, (1972), "*Creep under Multiaxial State of Stress*", Journal of Mechanics and Physics of Solids, vol. 20, pp. 381-390.
- 14- H. Kraus, (1980), "*Creep Analysis*", John Wiley and Sons, New York
- 15- F.A. Simonen, and C.E. Jaske, (1985), "*A Computational Model for Predicting the Life of Tubes Used in Petrochemical Heater Service*", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 107, pp. 239-46.
- 16- R.L. Huddleston, (1985), "*An Improved Multiaxial Creep-Rupture Strength Criterion*", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 107, pp. 421-429.
- 17- U. Guven, (1992), "*Elastic-Plastic Stresses in a Rotating Annular Disk of Variable Thickness and Variable Density*", International Journal of Mechanical Sciences, 34(2), pp. 133-138.
- 18- Y. Obata and N. Noda, (1994), "*Steady Thermal Stresses in a Hollow Circular Cylinder and a Hollow Sphere of a Functionally Gradient Material*", International Journal of Mechanical science, Thermal Stresses, vol. 17, pp. 471-488.
- 19- E. Tolksdorf, (1995) ,"*Residual Service File of Creep Exposed Components and Means of Repair*", International Conference on Failures Repairs & Life Assessment of pressure Vessels and Pipe work, Institute of Metals and Materials Australasia Ltd, Melbourne 29-30 March, vol. 3, pp. 31-40.
- 20- F. Nogata and H. Takahashi, (1995), "*A Creep Damage Estimation Method for In-Service Fossil Fuel Boiler Super Heater Tubes*", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 117, pp. 14-18.
- 21- M. Koizumi and M. Niino, (1995), "*Overview of FGM Research in Japan*", MRS Bull, vol. 20, pp. 19-21.

- 22- M.P. Lutz and R.W. Zimmerman, (1996), "*Thermal Stresses and Effective Thermal Expansion Coefficient of a Functionally Graded Sphere*", International Journal of Thermal Stresses, vol. 19, pp. 39-54.
- 23- Y.Y. Yang, (2000), "*Time-dependent stress Analysis in Functionally Graded Material*", International Journal of Solids Struct, vol. 37, pp. 7593-7608
- 24- M. Law, W. payten and K. Snowden, (2002), "*Modeling Creep of Pressure Vessels with Thermal Gradients Using Theta Projection Data*", International Journal of Pressure Vessel and piping, vol. 79, pp. 847-851.
- 25- A.N. Eraslan, (2003), "*Elastic-Plastic Deformation of Rotating Variable Thickness Annular Disks with Free, Pressurized and Radially Constrained Boundary Conditions*", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 45, pp. 643-667.
- 26- S.B. Singh and S. Ray, (2003), "*Creep Analysis in an Isotropic FGM Rotating Disk of Al-SiC Composite*", Journal of Materials Processing Technology, vol. 144, pp. 616-622.
- 27- W. Takashi, T. Masaaki and Y. Masayoshi, (2005), "*Creep Damage Evaluation of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel Welded Joints Showing Type IV Fracture*", International Journal of pressure vessel and piping, vol. 83, pp. 63-71.
- 28- H.L. Dai, Y.M. Fu and Z.M. Dong, (2006), "*Exact Solution for Functionally Graded Pressure Vessels in a Uniform Magnetic Field*", International Journal of Solids Struct, vol. 43, pp. 5570-5580.
- 29- Sh. Fujibayashi, (2007), "*Creep Behavior and Rupture Life of the Simulated Intercritical HAZ for 1.25 Cr- 0.5 MO Steel under a Multiaxial Stress State*", ISIJ International, vol. 147, pp. 333-339.
- 30- L.H. You, H. Ou and Z.Y. Zheng , (2007), "*Creep Deformation and Stresses in Thick-Walled Cylindrical Vessels of FGM*" , Internal pressure Elsevier Composite Structure , vol. 78, pp. 285-291.

- 31- H.L. Dai and Y.M. Fu, (2007), "*Magneto-Thermo-Elastic Interaction in Hollow Structures of Functionally Graded Material Subjected to Mechanical Loads*", International Journal Of pressure vessel and piping, vol. 84, pp. 132-138.
- 32- S.A.H. Kordkheili and R. Naghdabadi, (2007), "*Thermo-Elastic Analysis of a Functionally Graded Rotating Disk*", Composite Structures, vol. 79, pp. 508-516.
- 33- A. Ghorbanpour, M. Salari, H. Khademizadeh and A. Arefmanesh, (2008), "*Magneto-Thermo-Elastic Transient Response of a Functionally Graded Thick Hollow Sphere Subjected to Magnetic and Thermo-Elastic Fields*", Archive of Applied Mechanics, vol. 79, pp. 481-497.
- 34- M. Bayat, M. Saleem, B.B. Sahari , A.M.S. Hamouda and E. Mahdi , (2008), "*Analysis of Functionally Graded Rotating Disks with Variable Thickness*", Mechanics Research Communications, vol. 35, pp. 283-309.
- 35- X.F. Zhen, Ch. J. Jun, W. Zhengdong and T.Sh. Tung, (2009), "*Time-Dependent Deformation and Fracture of Multi-material Systems at High Temperature*", International Journal of pressure vessel and piping, vol. 86, pp. 604-615
- 36- M. Bayat , M. Saleem , B.B. Sahari , A.M.S. Hamouda , E. Mahdi , (2009), "*Mechanical and Thermal Stresses in a Functionally Graded Rotating Disk with Variable Thickness Due to Radially Symmetry Loads*", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 86, pp. 357–372.
- 37- M. Asghari and E. Ghafoori, (2010), "*A Three-Dimensional Elasticity Solution for Functionally Graded Rotating Disks*", Composite Structures, vol. 92, pp. 1092–1099.
- 38- M.M. Shahzamani, B.B. Sahari, M. Bayat, F. Mustapha and Z.N. Ismarrubie, (2010), "*Finite Element Analysis of Therm-Eelastic Contact Problem in Functionally Graded Axisymmetric Brake Disks*", Composite Structures, vol. 92, pp. 1591–1602.
- 39- X.L. Peng and X.F. Li, (2010), "*Thermal Stress in Rotating Functionally Graded Hollow Circular Disks*", Composite Structures, vol. 92, pp. 1896–1904.
- 40- A.M. Afsar and J. Go, (2010), "*Finite Element Analysis of Thermo-Elastic Field in a Rotating FGM Circular Disk*", Applied Mathematical Modeling, vol. 34, pp. 3309–3320.

- 41- A. Ghorbanpour, M. Salari, H. Khademizadeh and A. Arefmanesh, (2010), "*Magneto-Thermo-Elastic Stress and Perturbation of Magnetic Field Vector in a Functionally Graded Hollow Sphere*", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 80, pp. 189-200.
- 42- A. Ghorbanpour, A. Loghman, A.R. Shajari and S. Amir, (2010), "*Semi-Analytical Solution of Magneto-Thermo-Elastic Stresses for Functionally Graded Variable Thickness Rotating Disks*", *Journal of Mechanical Sciences and Technology*, vol. 24, pp. 2107-2117.
- 43- A. Loghman, A. Ghorbanpour, S. Amir and A. vajedi, (2010), "*Magneto-Thermo-Elastic Creep Analysis of Functionally Graded Cylinders*", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 87, pp. 389-395.
- 44- V.K. Gupta, S.B. Singh, H.N. Chandrawat and S. Ray, (2004), "*Steady State Creep and Material Parameters in a Rotating Disk of Al-SiCp Composite*", *European Journal of Mechanics A/solids*, vol. 23, pp. 335-344.
- 45- V.K. Gupta, S.B. Singh, H.N. Chandrawat and S. Ray, (2005), "*Modeling of Creep Behavior of a Rotation Disc in the Presence of both Composition and Thermal Gradients*", *Engineering Materials and Technology*, vol. 127, pp. 97-105.
- 46- A. Loghman, A. Ghorbanpour, A.R. Shajari and S. Amir, (2011), "*Time-dependent Thermoelastic Creep Analysis of Rotating Disk Made of Al-SiC Composite*", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 51, pp. 402-414.
- 47- R. Clarke, (2011), "*Magnetic Properties of Materials*", Surrey. ac. uk.
- 48- H. Zheng, J. Zheng and H. Zheng, (2007), "*Electromagnetic Properties of Silicon Carbide forms and their Composites whit Silicon Dioxid as matrix in X-band*", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, pp. 602-608
- 49- H. Kros, (1980), "*Creep Analysis*", John Wiley, New York.
- 50- R.K. Penny and H. Marriot, (1994), "*Design for Creep*", John Wiley, New York.

۵۱- لقمان ع، (۱۳۶۶)، پایان نامه ارشد: "حل مسئله ارتجاعی خمیری و خزش در استوانه‌های جدار ضخیم تحت تأثیر بارهای حرارتی و مکانیکی"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Abstract:

We consider a variable thickness rotating disks under the temperature gradient and the magnetic field. Centrifugal force of rotation and temperature gradient are causes thermal and mechanical stresses in the disk.

In this study initially is determined most appropriate structure and thickness of the disk volume distribution, Then, according to *Norton law*, Magneto-thermo-elastic creep in the disc will be projected during the next fifty years. For this analysis, we get the equilibrium equations, relationship stress-strain and stress distribution is the solution. On The results relationships; values of creep strain are a function of creep strain and Creep strain in turn depend on temperature, stress and time. Therefore the classification of the radius into small unit using a numerical method, the calculated Temperature gradient and elastic stresses, the creep strain based on the equations *Prandtl-Reuss* and effective stress can be calculated.

In this numerical method, the time component is selected, and then the strain of creeping into all parts of the disk radius can be guessed, with the small amounts of strain and solve equations balance, relationship stress - strain, stress values are calculated. With tension values, based on the criteria *von-Mises* effective stress is calculated, then the creep strain rate equations based on *Prandtl-Reuss* will be calculated.

With the creep strain rate and the amount of time considered, are measured in micro units of strain creep And these values as new values for the iterations to achieve convergence will be taken.

The total creep strains, sum of small units of creep strain have been converging that are used in calculating the stresses and dislocation creep.