



دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل رفتار الاستیک و خزشی دیسک دوار پیزوالکتریک در میدان حرارتی و الکترومغناطیسی

استاد راهنما

دکتر فرید وکیلی تهامی

استاد مشاور

دکتر سوران حسنی فرد

پژوهشگر

علی جدیدی نیا

بهمن ماه ۱۳۹۳

بسم الله الرحمن الرحيم

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید
و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد
و به همنشینی رهروان علم و دانش منتظرمان نمود
و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه‌ی ایثار و از خودگذشتگی؛

به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است؛

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید؛

به پاس محبت‌های بی‌دیتشان که هرگز فروکش نمی‌کند؛

تقدیم به پدر و مادرم

بوسه بردستانشان

تقدیر و تشکر

بر حسب وظیفه از استاد با کمالات و شایسته، جناب آقای دکتر فرید و کیلی تهامی که در کمال سعه صدر و با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از استاد فرزانه و دلسوز، جناب آقای دکتر سوران حسنی فرد که زحمت مشاوره‌ی این پایان نامه را متقبل شدند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. بدون مساعدت و بزرگواری این دو عزیز این پروژه به نتیجه‌ی مطلوب نمی‌رسید.

از پدر و مادر عزیز و خواهر مهربانم نیز که آرامش روحی و آسایش فکری مرا فراهم نمودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

در نهایت از دوست و برادر عزیزم، جناب آقای مهندس آرش محمدعلیزاده فرد که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: جدیدی نیا	نام: علی
عنوان پایان نامه: تحلیل رفتار الاستیک و خزشی دیسک دوار پیزوالکتریک در میدان حرارتی و الکترومغناطیسی	
استاد راهنما: دکتر فرید و کیلی تهامی استاد مشاور: دکتر سوران حسنی فرد	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: دانشگاه تبریز دانشکده: مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: تعداد صفحه:	
کلید واژه ها: خزش، دیسک دوار، مواد هدفمند، پیزوالکتریک، الکترومغناطیس.	
<p>چکیده:</p> <p>امروزه استفاده از مواد پیزوالکتریک به عنوان مواد هوشمند توجه زیادی را معطوف خود کرده است. این مواد هنگامی که در معرض تغییر شکل قرار بگیرند، میدان الکتریکی تولید می کنند و وقتی در معرض میدان الکتریکی باشند، دچار تغییر شکل می شوند. رفتار دوسویه ای این مواد باعث کاربردهای فراوان آنها در وسایل الکتریکی-مکانیکی، مانند محرک ها و سنسورها شده است.</p> <p>به منظور ثبت یا کنترل رفتار مکانیکی حرارتی بسیاری از قطعات مکانیکی، امروزه از لایه های پیزوالکتریک در ساخت آنها استفاده می شود. از جمله ای این قطعات دیسک های دوار می باشند که در صنعت تولید نیرو نیز کاربرد فراوانی دارند. این دیسک ها غالباً در درجه حرارت و تنش بالا کار می کنند و به همین دلیل مساله ای بررسی رفتار خزشی در آنها اهمیت دارد. به خصوص این که تحقیقات نشان داده است که پیزوسرامیک ها حتی در دمای اتاق نیز متأثر از خزش می شوند.</p> <p>برای بهبود عملکرد و اعتمادپذیر بودن دیسک های گردان، رفتار خزشی این مواد هنگامی که در معرض دمای بالا قرار دارند باید مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مشکلات و سختی های استفاده از دیسک های گردان در دماهای بالا، دشوار بودن شرایط بازبینی آنهاست. بدین منظور می توان تاریخچه ی پتانسیل الکتریکی این مواد هوشمند را برای بازبینی شرایط آنها بکار برد.</p> <p>در این پایان نامه رفتار الکترومغناطیسی و حرارتی وابسته به زمان (خزش) یک دیسک دوار ساخته شده از مواد پیزوالکتریک هدفمند مورد مطالعه قرار گرفته است. این دیسک دوار در میدان ثابت مغناطیسی تحت گرادیان دمایی قرار داشته و یک پتانسیل الکتریکی به آن اعمال می گردد. خصوصیات حرارتی، مکانیکی، مغناطیسی و الکتریکی متغیر ساختار مورد نظر در راستای شعاعی با استفاده از توابع توانی تعیین و تحلیل خزشی با استفاده از معادله ی خزش توانی نورتون انجام شده است. با استفاده از معادله ی تعادل، سازگاری و معادلات اساسی الاستیک و خزشی رفتار دیسک مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از روش شبه تحلیلی که در محیط برنامه ی MATLAB کدنویسی شده، استفاده شده است. نتایج به صورت توزیع تنش، کرنش، پتانسیل الکتریکی و کرنش خزشی با استفاده از روابط پرانتدل-راوس به دست آمده اند. در نهایت اثر میدان مغناطیسی و پتانسیل الکتریکی در توزیع تنش و کرنش در طول دیسک مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین اثر نمای تابع توانی توزیع ماده ی هدفمند در رفتار الکترومغناطیسی و مکانیکی بررسی شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، با توجه به امکان حل تحلیلی معادلات حاکم در حالت الاستیک، با صرف نظر از کرنش های خزشی، پاسخ معادلات در زمان اولیه به دست آمده و با نتایج روش شبه تحلیلی مقایسه شده اند. در نهایت نتایج نشان می دهند که با استفاده از مواد پیزوالکتریک هدفمند به جای مواد پیزوالکتریک معمولی، موجب کم شدن تنش های مکانیکی می گردد.</p>	

فهرست عناوین

فهرست شکل‌ها و نمودارها

فهرست جدول‌ها

فهرست علائم

فصل اول - مقدمه و بررسی منابع

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ پدیده‌ی خزش ۳
- ۱-۲-۱ مکانیزم‌های فیزیکی تغییرشکل خزشی ۴
- ۲-۲-۱ عوامل تأثیرگذار در رفتار خزشی و معادلات اساسی خزش ۶
- ۳-۱ پیزوالکتریک‌ها ۷
- ۱-۳-۱ اثرات پیزوالکتریک ۸
- ۲-۳-۱ کاربردهای مواد پیزوالکتریک ۹
- ۳-۳-۱ کریستال‌های طبیعی و مصنوعی ۱۱
- ۴-۳-۱ ثابت‌های پیزوالکتریک ۱۳
- ۵-۳-۱ مواد پیزوالکتریک هدفمند ۱۵
- ۴-۱ پیشینه‌ی پژوهش ۱۶
- ۱-۴-۱ بررسی رفتار الاستیک دیسک‌های دوار ۱۶
- ۲-۴-۱ بررسی رفتار خزشی دیسک‌های دوار ۱۸
- ۳-۴-۱ بررسی رفتار الاستیک مواد پیزوالکتریک ۲۰
- ۴-۴-۱ بررسی رفتار خزشی مواد پیزوالکتریک ۲۲
- ۵-۱ اهداف تحقیق ۲۶

فصل دوم - مواد و روش‌ها

- ۱-۲ مقدمه ۲۸
- ۲-۲ معادلات ساختاری پیزوالکتریک ۲۸
- ۳-۲ معادله‌ی حاکم بر توزیع دما ۲۹
- ۴-۲ فرمول بندی مساله ۲۹

۳۵	..... حل با الگوریتم شبه تحلیلی گسسته‌سازی
۴۰	..... ۶-۲ رهیافت عددی
۴۰	..... ۷-۲ اعتبارسنجی
۴۰	..... ۱-۷-۲ حل تحلیلی معادله‌ی توزیع دما
۴۲	..... ۲-۷-۲ حل تحلیلی معادله‌ی جابه‌جایی

فصل سوم - نتایج، بحث و نتیجه‌گیری

۵۰	..... ۱-۳ مقدمه
۵۱	..... ۳-۳ تعیین توزیع دما
۵۳	..... ۴-۳ پاسخ‌های حالت الاستیک
۶۲	..... ۵-۳ تاثیر توان‌های ناهمگونی بر نتایج الاستیک
۶۴	..... ۶-۳ پاسخ‌های حالت خزشی
۶۹	..... ۷-۳ تاثیر توان‌های ناهمگونی بر نتایج خزشی
۷۱	..... ۸-۳ نتیجه‌گیری
۷۲	..... ۹-۳ پیشنهاد برای ادامه‌ی کار

منابع

فهرست شکل‌ها و نمودارها

فصل دوم - مواد و روش‌ها	۶
منابع	۷
شکل ۱-۱- استفاده از دیسک دوار در توربین	۲
شکل ۲-۱- نمودار کرنش خزشی در برابر زمان [۳]	۴
شکل ۳-۱- منحنی‌های کرنش-زمان (الف) تنش ثابت و (ب) دما ثابت [۳]	۴
شکل ۴-۱- نقشه‌ی مکانیزم تغییر شکل خزشی [۳]	۵
شکل ۵-۱- تصویر شماتیک عمل مستقیم پیزوالکتریک [۹]	۹
شکل ۶-۱- شکل شماتیک عمل معکوس پیزوالکتریک [۹]	۹
شکل ۷-۱- نمونه‌ای از موتور فراصوتی خطی پیزوالکتریک	۱۰
شکل ۸-۱- کریستال‌های پیزوالکتریک	۱۳
شکل ۹-۱- یک مدل ساده‌ی سلول واحد شبکه‌ای کریستال پیزوالکتریک	۱۶
شکل ۱۰-۱- مقایسه‌ی تاثیر اندازه‌ی هندسی مساله در جواب‌ها [۲۷]	۲۲
شکل ۱-۲- هندسه‌ی دیسک مورد نظر	۳۰
شکل ۲-۲- تقسیم‌بندی شعاعی دیسک	۳۶
شکل ۳-۲- فلوچارت روش تحلیل مندلسون برای به دست آوردن تاریخچه‌ی تنش‌ها و کرنش‌ها	۴۱
شکل ۱-۳- نتایج آزمون حساسیت به تعداد تقسیمات (nd) برای تعیین توزیع دما با روش گسسته‌سازی	۵۲
شکل ۲-۳- مقایسه‌ی نتایج روش تحلیلی و شبه‌تحلیلی گسسته‌سازی در تعیین توزیع دما	۵۳
شکل ۳-۳- مقایسه‌ی تعیین توزیع دما به‌ازای مقادیر مختلف توان ناهمگونی ϕ	۵۳
شکل ۴-۳- نتایج آزمون حساسیت تنش شعاعی به تعداد تقسیمات (nd)	۵۵
شکل ۵-۳- نتایج آزمون حساسیت تنش محیطی به تعداد تقسیمات (nd)	۵۵
شکل ۶-۳- مقایسه‌ی تنش شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت	۵۶
شکل ۷-۳- مقایسه‌ی تنش محیطی حل شبه تحلیلی گسسته‌سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت	۵۶
شکل ۸-۳- مقایسه‌ی جابه‌جایی شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت	۵۷
شکل ۹-۳- مقایسه‌ی تنش شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت و بارگذاری حرارتی	۵۷
شکل ۱۰-۳- مقایسه‌ی تنش محیطی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت و بارگذاری حرارتی	۵۸
شکل ۱۱-۳- مقایسه‌ی جابه‌جایی شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت و بارگذاری حرارتی	۵۸
شکل ۱۲-۳- مقایسه‌ی تنش شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت، بارگذاری حرارتی و نیروهای الکترومغناطیسی	۵۹
شکل ۱۳-۳- مقایسه‌ی تنش محیطی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت، بارگذاری حرارتی و نیروهای الکترومغناطیسی	۵۹
شکل ۱۴-۳- مقایسه‌ی جابه‌جایی شعاعی حل شبه تحلیلی گسسته سازی و تحلیلی برای دوران با سرعت ثابت، بارگذاری حرارتی و نیروهای الکترومغناطیسی	۶۰

- شکل ۳-۱۵- کرنش شعاعی برای حالت الاستیک. ۶۰
- شکل ۳-۱۶- کرنش محیطی برای حالت الاستیک. ۶۱
- شکل ۳-۱۷- پتانسیل الکتریکی برای حالت الاستیک. ۶۲
- شکل ۳-۱۸- تاثیر پارامتر γ بر تنش محیطی. ۶۲
- شکل ۳-۱۹- تاثیر پارامتر η بر تنش محیطی. ۶۳
- شکل ۳-۲۰- تاثیر پارامتر β بر تنش محیطی. ۶۳
- شکل ۳-۲۱- تاثیر پارامتر ϕ بر تنش محیطی. ۶۴
- شکل ۳-۲۲- تاریخچه‌ی تنش شعاعی دیسک دوار. ۶۵
- شکل ۳-۲۳- تاریخچه‌ی تنش محیطی دیسک دوار. ۶۶
- شکل ۳-۲۴- تاریخچه‌ی تنش موثر دیسک دوار. ۶۷
- شکل ۳-۲۵- تاریخچه‌ی جابه‌جایی شعاعی دیسک دوار. ۶۷
- شکل ۳-۲۶- تاریخچه‌ی کرنش شعاعی دیسک دوار. ۶۷
- شکل ۳-۲۷- تاریخچه‌ی کرنش محیطی دیسک دوار. ۶۸
- شکل ۳-۲۸- تاریخچه‌ی کرنش در راستای ضخامت دیسک دوار. ۶۹
- شکل ۳-۲۹- تاثیر پارامتر γ بر تنش محیطی پس از گذشت ۳۰ سال. ۷۰
- شکل ۳-۳۰- تاثیر پارامتر β بر تنش محیطی پس از گذشت ۳۰ سال. ۷۰
- شکل ۳-۳۱- تاثیر پارامتر ϕ بر تنش محیطی پس از گذشت ۳۰ سال. ۷۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر تنش بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه ۶
- جدول ۱-۲- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر زمان بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه ۶
- جدول ۱-۳- انواع کریستال‌های طبیعی و مصنوعی ۱۱
-
- جدول ۳-۱- خواص فیزیکی ماده‌ی پیزوالکتریک PZT8 ۵۰
- جدول ۳-۲- مقادیر توان‌های ناهمگونی خواص مواد و مشخصات هندسی مفروض ۵۰
- جدول ۳-۳- شرایط کاری در دیسک دوار مورد بررسی ۵۱
- جدول ۳-۴- مقادیر ضرایب معادله‌ی نورتون ۶۵

فهرست علائم

نماد	توضیح
R_i, R_o	شعاع درونی و خارجی دیسک دوار
r	متغیر شعاع
$u_i (i=r, z)$	جابه‌جایی‌های شعاعی و محوری
γ, η, χ, ϕ	پارامترهای ناهمگونی ماده
$\sigma_{ii} (i=r, \theta, z)$	مولفه‌های شعاعی، محیطی و محوری تنش
$\varepsilon_{ii} (i=r, \theta, z)$	مولفه‌های شعاعی، محیطی و محوری کرنش
$\varepsilon^c_{ii} (i=r, \theta, z)$	مولفه‌های شعاعی، محیطی و محوری کرنش خزشی
D_{rr}	جابه‌جایی الکتریکی شعاعی
E_r	میدان الکتریکی شعاعی
c_{ij}	ضرایب الاستیک
e_{ij}	ضرایب پیزوالکتریک
p_1	ثابت پایروالکتریک
ε_{33}	ثابت دی‌الکتریک
$B(r), n(r)$	پارامترهای خزشی وابسته به شعاع
f_r	نیروی لورنتز
H_z	میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای محوری
J	چگالی میدان الکتریکی
$k(r)$	ضریب انتقال حرارتی
$T(r)$	تابع تغییرات دما
$\alpha_i (i=r, \theta, z)$	ضرایب انبساط حرارتی
ϕ	پتانسیل الکتریکی
ρ	چگالی جرمی
μ	نفوذپذیری مغناطیسی
ω	سرعت زاویه‌ای
σ_i, σ_o	مقدار تنش شعاعی در جداره‌ی داخلی و خارجی
Φ_i, Φ_o	مقدار پتانسیل الکتریکی در جداره‌ی داخلی و خارجی

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

امروزه استفاده از دیسک‌های دوار در صنعت گسترش بسیاری یافته است. از جمله کاربردهای عمده‌ی این دیسک‌ها می‌توان به استفاده در روتورها، توربین‌ها، موتورهای جت، فلاپیل‌ها، اتومبیل‌ها، پمپ‌ها، کمپرسورها و موارد متعدد دیگر اشاره کرد. شکل ۱-۱ نمونه‌ای از کاربرد دیسک‌های دوار در توربین‌هاست.



شکل ۱-۱- استفاده از دیسک دوار در توربین.

با افزایش تقاضا برای افزایش بازده تبدیل انرژی^۱ و نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌ها، سیستم‌های تولید انرژی و مواردی از این دست، دما و تنش کاری این سیستم‌ها افزایش یافته است. از این‌رو، مساله‌ی اصلی در طراحی اجزای این سیستم‌ها به سمت ارزیابی کارایی ویسکوپلاستیک^۲ قطعات برای جلوگیری از واماندگی در اثر وقوع خزش سوق یافته است [۱]. از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های تولید انرژی دیسک‌های دوار می‌باشند که اکثراً در معرض فشار محیطی بالا قرار داشته و با گرادیان دمایی بالا کار می‌کنند. همچنین، دیسک‌های دوار غالباً با سرعت دورانی زیادی دوران می‌کنند که این خود نیز باعث به‌وجود آمدن تنش‌های بزرگی در این دیسک‌ها می‌شود. با توجه به وجود دما و تنش‌های بالا و زمان استفاده‌ی طولانی، این قطعات در معرض واماندگی خزشی قرار دارند. کاربردهای فراوان دیسک‌های دوار که شامل بارگذاری‌های ترمو-مکانیکی می‌باشد، موجب گردیده تا مواد متداول به تنهایی از عهده‌ی آن بر

¹ Energy Conversion

² Viscoplastic

نمایند. بنابراین مواد هدفمند^۱ در دیسک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است. استفاده از مواد هدفمند یکی از زمینه‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر مورد توجه و مطالعات فراوانی بوده است. مواد هدفمند، مواد ناهمگونی هستند که خواص مواد آنها در یک (یا چندین جهت) تغییر می‌کنند. این مواد در دیدگاه میکروسکوپی ناهمگون هستند، اما در دید ماکرو، خواص فیزیکی آنها به‌طور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کنند. این مشخصه با تغییرات تدریجی ترکیبات مواد سازنده، عمدتاً در راستای ضخامت یا شعاع، از یک سو به سوی دیگر ایجاد می‌شوند. با توجه به تغییرات ملایم خواص فیزیکی مواد در این ساختارها، مشکلات مواد کامپوزیتی سنتی از قبیل لایه‌لایه شدن^۲، ترک‌خوردگی^۳ و جدایش در مرز^۴ به علت تغییرات ناگهانی در خواص مواد بین لایه‌های گسسته از بین رفته است. مواد هدفمند امروزه برای استفاده‌ی عمومی به عنوان اجزای سازه‌ها در محیط‌های دمایی بالا توسعه می‌یابند. مواد هدفمند معمولاً از ترکیب سرامیک و فلز، و یا ترکیب چندین فلز یا چندین نوع سرامیک برای دستیابی به هدف مطلوب، به دست می‌آیند. برای مثال، مواد هدفمند با گرادیانی از خواص پیزوالکتریک در مبدل‌های فراصوتی، یا در عملگرهای خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱ پدیده‌ی خزش

برای مواد مهندسی در دمای بالا با گذشت زمان امکان تغییر شکل تحت بار ثابت نیز وجود دارد، این نوع کرنش وابسته به زمان، کرنش خزشی نامیده می‌شود [۲]. شکل ۲-۱ نمودار الگووار کرنش خزشی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۲-۱ مشخص است، یک قسمت کرنش الاستیک مستقل از زمان وجود دارد. با توجه به این شکل پدیده‌ی خزش را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

در **مرحله‌ی اول**^۵ در یک زمان نسبتاً کوتاه نرخ کرنش خزشی از یک مقدار زیاد شروع و در نهایت به کمینه‌ی نرخ کرنش خزشی کاهش می‌یابد. در این بازه تأثیر کرنش سختی^۶ بیشتر از بازیافت حرارتی^۷ است.

در **مرحله‌ی دوم**^۸ نرخ کرنش خزشی تقریباً ثابت است. این مرحله طولانی‌ترین زمان را نسبت به مراحل دیگر دارد. در این بازه، اثرات کرنش سختی و بازیافت حرارتی تقریباً یکسان می‌باشد.

¹ Functionally Graded Material (FGM)

² Delamination

³ Cracking

⁴ Debonding

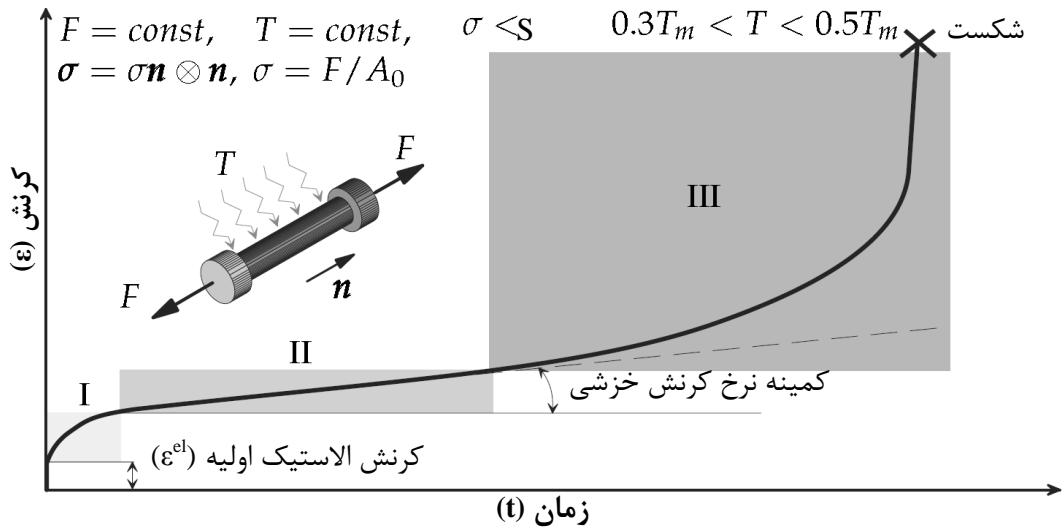
⁵ Primary creep

⁶ Strain hardening

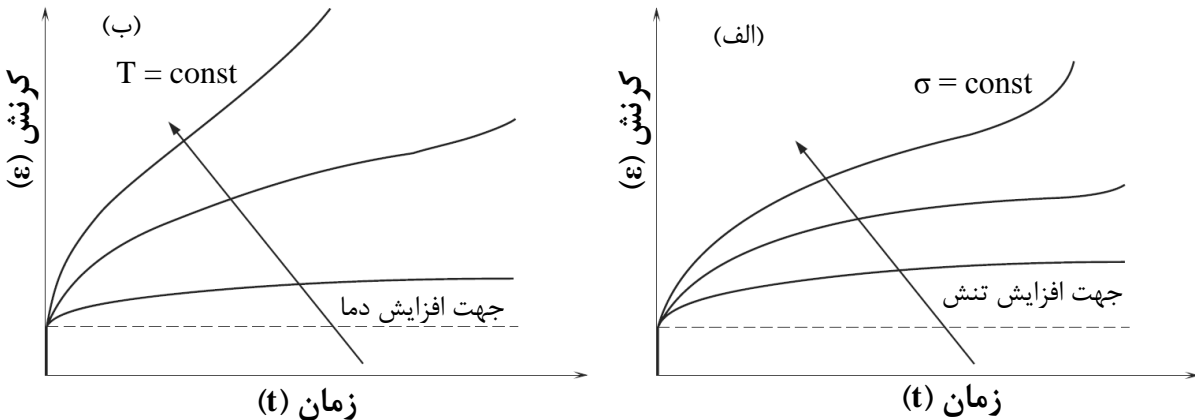
⁷ Thermal recovery

⁸ Secondary creep

در مرحله سوم^۱ نرخ کرنش خزشی شروع به افزایش می‌کند. این امر به‌طور عمده در نتیجه‌ی تغییر ابعاد سطح مقطع قطعه و ایجاد حفره‌های داخلی می‌باشد. پایان این مرحله با گسیختگی قطعه همراه است. شکل منحنی‌های کرنش خزشی و طول مدت هر یک از مراحل ذکر شده به مقدار تنش و درجه حرارت بستگی دارد. شکل ۱-۳ این منحنی‌ها را برای حالت‌های تنش و دما ثابت مختلف نشان می‌دهد. لازم به‌ذکر است، تغییر شکل خزشی نوعی تغییر شکل پلاستیک است.



شکل ۱-۲- نمودار کرنش خزشی در برابر زمان [۲].



شکل ۱-۳- منحنی‌های کرنش-زمان (الف) تنش ثابت و (ب) دما ثابت [۳].

۱-۲-۱ مکانیزم‌های فیزیکی تغییر شکل خزشی

دو مکانیزم عمده در وقوع خزش، خزش نفوذی^۲ و خزش ناشی از حرکت نابجایی‌ها^۳ می‌باشند [۲].

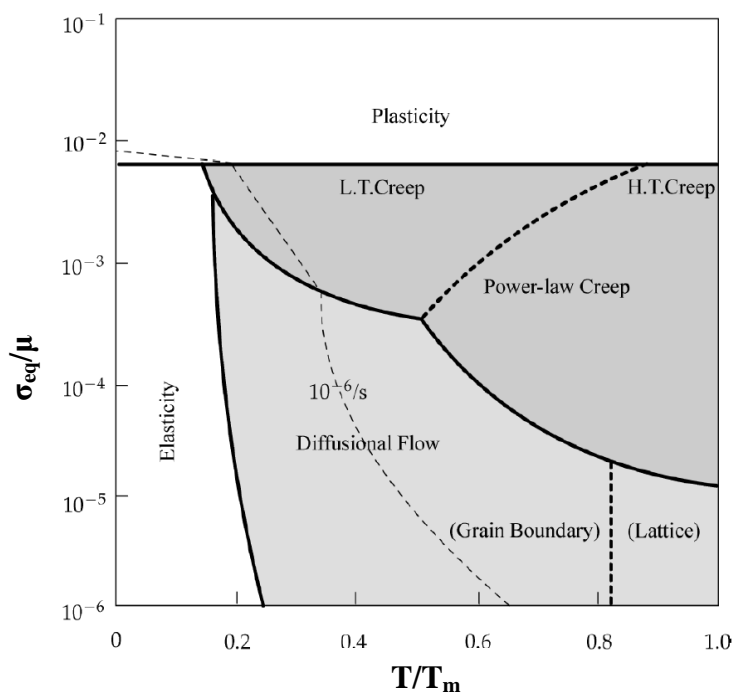
¹ Tertiary creep

² Diffusional creep

³ Dislocational creep

در خزش نفوذی، حفره‌ها تک تک جابه‌جا می‌شوند و در مرزخانه‌ها ایجاد ترک می‌کنند. به دلیل حرکت فضای خالی اتم‌ها (جریان نفوذی) از منطقه‌ی تحت فشار به منطقه‌ی تحت کشش، این نوع خزش به وجود خواهد آمد. خزش نفوذی، در تنش‌های پایین رابطه‌ی خطی با تنش دارد. این نوع تغییر شکل در دما و تنش‌های پایین نیز می‌تواند رخ دهد.

در خزش ناشی از حرکت ناب‌جایی‌ها، ناب‌جایی‌ها جابه‌جا می‌شوند، یعنی ناب‌جایی‌های موجود در ساختار شبکه‌ی کریستال مواد ممکن است با غلبه بر مقاومت طبیعی کریستال و سایر موانع موجود که مانع حرکت آن‌ها و پدیده خزش می‌شوند در داخل شبکه به حرکت درآیند. در تنش‌های پایین این حرکت ناب‌جایی‌ها متوقف شده و یا کند می‌گردد؛ از این رو مکانیزم مذکور بیشتر در تنش‌ها و درجه حرارت بالا رخ می‌دهد. خزش ناشی از ناب‌جایی‌ها نسبت به تنش اعمالی بر قطعه شدیداً غیرخطی است. این نوع تغییر شکل از مهمترین و حائز اهمیت‌ترین انواع تغییر شکل خزشی در صنعت می‌باشد. محدوده‌های تنش و دما برای مکانیزم‌های مختلف خزش در شکل ۴-۱ به صورت نقشه‌ی مکانیزم تغییر شکل^۱ برای یک ماده ارائه شده است. در این شکل T/T_m و σ_{eq}/μ به ترتیب نسبت تنش مؤثر به مدول برشی و دما به دمای ذوب^۲ است. چنان که از این نمودار مشخص است پدیده‌ی خزش در دماهای بالاتر از $0.7T_m$ قابل توجه‌تر است. در ادامه به عوامل مؤثر در رفتار خزشی پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۱ - نقشه‌ی مکانیزم تغییر شکل خزشی [۳].

¹ Deformation-mechanism map

² Homologous temperature

۲-۲-۱ عوامل تأثیرگذار در رفتار خزشی و معادلات اساسی خزش

از جمله عوامل مؤثر در رفتار خزشی می‌توان به تنش، درجه حرارت، زمان و جنس قطعه اشاره کرد. در حالت کلی کرنش خزشی را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۱-۱) بیان نمود [۲]:

$$\varepsilon^c = f(\sigma, t, T) \quad (1-1)$$

فرض می‌شود اثرات این عوامل قابل جداسازی باشد. بنابراین، می‌توان نوشت [۲]:

$$\varepsilon^c = f_1(\sigma)f_2(t)f_3(T) \quad (2-1)$$

روابط اساسی متعددی برای بیان رفتار خزشی تحت بارگذاری محوری پیشنهاد شده‌اند. با توجه به آزمایشات و نتایج تجربی به دست آمده تنش با کرنش خزشی رابطه‌ی غیرخطی دارد. به علت اهمیت و طولانی‌تربودن مرحله‌ی دوم خزش، در اغلب این روابط مرحله‌ی دوم خزش بیشتر مدنظر قرار گرفته است [۲]. تعدادی از روابط موجود برای توصیف تأثیر تنش و زمان بر روی کرنش خزشی به ترتیب در جدول ۱-۱ و جدول ۲-۱ ارائه شده‌اند. در این روابط B , C , n , m و β و σ_0 ثوابت مربوط به جنس می‌باشند.

جدول ۱-۱- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر تنش بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه [۲]

نام رابطه	$f_1(\sigma)$
نورتون ^۱	$B\sigma^n$
پرانتل ^۲	$B \sinh(\beta\sigma)$
دورن ^۳	$B \exp(\beta\sigma)$
گروفالو ^۴	$B[\sinh(\beta\sigma)]^n$
تنش اصطکاکی ^۵	$B(\sigma - \sigma_0)^n$

جدول ۲-۱- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر زمان بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه [۲]

نام رابطه	$f_1(\sigma)$
خزش ثانویه	t
بیلی ^۶	Ct^m
آندره ^۷	$(1 + Ct^{1/3})e^{mt}$
گراهام و ولز ^۸	$\sum_j C_j t^{m_j}$

¹ Norton

² Prandtl

³ Dorn

⁴ Garofalo

⁵ Friction stress

⁶ Bailey

⁷ Andrade

⁸ Graham and Walles

با توجه به نتایج تجربی، قانون آرنیوس تخمین خوبی را نسبت به تأثیر درجه حرارت در پدیده‌ی خزش ارائه می‌دهد. این قانون به شکل رابطه‌ی (۳-۱) قابل بیان است [۲]:

$$f_3(T) = D \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3-1)$$

که در آن D ، Q ، R و T به ترتیب ثابت مربوط به جنس، انرژی فعال‌سازی، ثابت جهانی گازها و دمای مطلق می‌باشند. یکی از ترکیبات پرکاربرد روابط بالا به شکل رابطه‌ی (۴-۱) قابل بیان است [۴]:

$$\varepsilon^c = BCD \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t^m \sigma^n \quad (4-1)$$

رابطه‌ی فوق برای حالت هم‌دما^۱ به صورت زیر خواهد بود [۴]:

$$\varepsilon^c = M t^m \sigma^n \quad (5-1)$$

رابطه‌ی (۵-۱) برای حالت تنش ثابت به کار می‌رود. برای حالت تنش متغیر، باید نرخ تغییرات کرنش مورد بررسی قرار گیرد. در مورد رابطه‌ی (۵-۱) می‌توان نرخ تغییرات کرنش را به شکل رابطه‌ی (۶-۱) نوشت [۴]:

$$\dot{\varepsilon}^c = \frac{d\varepsilon^c}{dt} = mM t^{m-1} \sigma^n \quad (6-1)$$

با حذف زمان بین رابطه‌ی (۵-۱) و (۶-۱)، رابطه‌ی مستقل از زمان برای نرخ کرنش به دست می‌آید [۴]:

$$\dot{\varepsilon}^c = \frac{mM \frac{1}{m} \sigma^{\frac{n}{m}}}{(\varepsilon^c)^{\frac{1-m}{m}}} \quad (7-1)$$

رابطه‌ی (۶-۱) و (۷-۱) به ترتیب روابط زمان سختی^۲ و کرنش سختی^۳ نامیده می‌شوند. این دو رابطه برای حالت بارگذاری تنش ثابت نتایج کاملاً مشابهی دارند ولی اگر تنش ثابت نباشد، دقت رابطه‌ی کرنش سختی بیشتر و استفاده از رابطه‌ی زمان سختی آسان‌تر می‌باشد.

۳-۱ پیزوالکتریک‌ها

برای بهبود عملکرد و اعتمادپذیری دیسک‌های دوار هدفمند، رفتار خزشی این اجزاء، هنگامی که در دماهای محیطی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند باید مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از مشکلات عمده در تخمین عمر اجزایی که در معرض گرادیان دمایی بالا قرار دارند، بازبینی شرایط این اجزاء با تست‌های متالورژیکی مخرب و غیرمخرب است. در مطالعات نوین، استفاده از مواد پیزوالکتریک به عنوان مواد هوشمند، توجه زیادی را معطوف به خود کرده است. سازه‌های پیزوالکتریک با بهره‌گیری از اثرات مستقیم و معکوس این مواد، توسعه‌ی فراوانی در صنایعی نظیر هوافضا، صنایع دریایی، هواپیماسازی و غیره

¹ Isothermal

² Time hardening

³ Strain hardening

یافته‌اند. مواد پیزوالکتریک هنگامی که در معرض تغییر شکل قرار گیرند، میدان الکتریکی تولید می‌کنند و وقتی در معرض میدان الکتریکی باشند، دچار تغییر شکل می‌شوند. به‌کارگیری اثر مستقیم خاصیت پیزوالکتریک در حسگرها همزمان با اثر معکوس آنها در عملگرها، این مواد را به یکی از پرکاربردترین مواد در زمینه‌ی سازه‌های هوشمند مبدل ساخته است. تاریخچه‌ی پتانسیل الکتریکی برای بازبینی شرایط این اجزای هوشمند، بدون دشواری‌های متالورژیکی می‌تواند برای بازبینی شرایط دیسک‌های دوار مورد استفاده قرار گیرد. اثری که امروزه از آن به عنوان اثر پیزوالکتریک یاد می‌شود، توسط برادران پیر و ژاکوب کوری^۱، در سال ۱۸۸۰ میلادی، هنگامی که ۲۱ و ۲۴ ساله بودند، کشف شد. آنها کریستال‌هایی مانند تورمالین^۲، توپاز^۳، کوارتز^۴، نمک راشل^۵ و کانی شکر^۶ پیدا کردند که وارد کردن فشار باعث تولید بار الکتریکی در آنها می‌شد که متناسب با تنش بود. نام پیزوالکتریک از ریشه‌ی پیزن^۷ به معنی فشردن و منقبض کردن، که یک واژه‌ی یونانی است، گرفته شده است. کریستال‌هایی پیزوالکتریک خوانده می‌شوند که بین کرنش مکانیکی و ولتاژ آنها رابطه‌ای وجود داشته باشد. برادران کوری خاصیت معکوس پیزوالکتریک را پیش‌بینی نکرده بودند. یک سال بعد، لپیمان^۸ این تناسب را به‌صورت تئوری و بر پایه‌ی ترمودینامیک پیش‌بینی کرد. وی همچنین پیشنهاد کرد که برای این مواد اثر معکوس نیز باید وجود داشته باشد. متعاقباً اثر معکوس پیزوالکتریک توسط برادران کوری از راه آزمایش اثبات شد. از این تحقیقات به عنوان نقطه‌ی شروع تاریخچه‌ی پیزوالکتریک‌ها یاد می‌شود. بر پایه‌ی این نتایج والدمار و ویت^۹ اولین فرمول‌بندی کامل برای مواد پیزوالکتریک را در سال ۱۸۹۰ منتشر کرد [۵-۸].

۱-۳-۱ اثرات پیزوالکتریک

پیزوالکتریک دو کاربرد و اثر دارد: اثر مستقیم و اثر معکوس.

کریستال پیزوالکتریک وقتی که فشرده یا کشیده می‌شود، بار ذخیره تولید می‌کند و به عنوان یک خازن با ولتاژ اعمالی کار می‌کند و جریانی که پیزوالکتریسیته نامیده می‌شود، بین دو سطح آن به‌وجود می‌آید. به عبارتی ساده‌تر، در حالت مستقیم، این کریستال‌ها با تحمل تنش (تغییر شکل)، میدان الکتریکی تولید

¹ Pierre Curie, Jacques Curie

² Tourmaline

³ Topaz

⁴ Quartz

⁵ Rachele salt

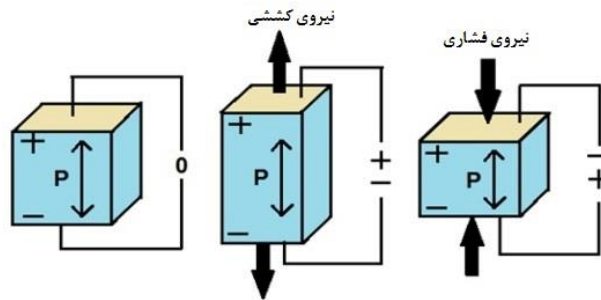
⁶ Cane sugar

⁷ Piezen

⁸ Lippmann

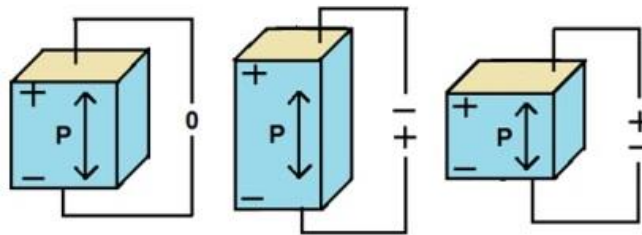
⁹ Woldemar Voigt

می‌کنند. شکل ۱-۵ تصویر شماتیکی از این اثر را نشان می‌دهد. برای ساخت سنسورها از اثر مستقیم استفاده می‌شود که به آن خاصیت سنسوری یا ژنراتوری نیز گفته می‌شود.



شکل ۱-۵- تصویر شماتیک عمل مستقیم پیزوالکتریک [۹].

از سوی دیگر، این مواد با قرار گرفتن در معرض یک میدان الکتریکی دچار تغییر طول یا کرنش می‌شوند که به این اثر، اثر معکوس پیزوالکتریک گفته می‌شود. نحوه‌ی انجام این عمل نیز در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. برای ساخت عملگرها از اثر معکوس پیزوالکتریک استفاده می‌شود.



شکل ۱-۶- شکل شماتیک عمل معکوس پیزوالکتریک [۹].

مواد پیزوالکتریک عموماً مواد آهنی نیستند، ولی چون خاصیت فروالکتریکی دارند، به آنها فروالکتریک نیز می‌گویند. مواد فروالکتریک در اصل به موادی گفته می‌شود که در اثر قرار گرفتن در میدان الکتریکی، قلمروهای الکتریکی آنها چرخیده و در راستای میدان قرار می‌گیرند و پس از قطع میدان، این حالت را حفظ می‌کنند [۵].

۱-۳-۲ کاربردهای مواد پیزوالکتریک

مهمترین مورد استفاده‌ی پیزوالکتریک‌ها، استفاده در ساخت سنسورهاست. سنسورهای پیزوالکتریک کاربردهای متعددی دارند که می‌توان به اندازه‌گیری شتاب، فشار، کرنش یا نیرو و تبدیل آنها به سیگنال الکتریکی اشاره کرد.

کوارتز از جمله موادی است که خواص پیزوالکتریکی ذکر شده را دارا می‌باشد و بسیار مقاوم و پایدار است. کریستال‌های کوارتز در ساختار ساعت‌ها و همچنین در فرستنده‌های رادیویی استفاده می‌شوند. نمک راشل در برابر فشار، ولتاژ بزرگی تولید می‌کند که در میکروفون‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گرفت.