



دانشکده فنی مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

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

**بهینه‌سازی چند هدفه‌ی ساختار دیسک دوار ساخته شده از مواد هدفمند
تحت اثر بارهای ترمو-مکانیکی بر اساس رفتار خزشی**

استاد راهنما

دکتر فرید وکیلی تهامی

استاد مشاور

دکتر محمد زهساز

پژوهشگر

آرش محمد علیزاده فرد

بهمن ماه ۱۳۹۲

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

به نام خداوند نشسته بنشاینگر

و او را از جایی که مکان ندارد روزی می دهد؛

و هر کس بر خدا توکل کند، کفایت امرش را می کند؛

خداوند فرمان خود را به انجام می رساند؛

و خدا برای هر چیزی اندازه ای قرار داده است!

تقدیم به مادر و پدرم،

که وجودم برایشان همه نخب بود و وجودشان برایم همه مهر.

تقدیر و تشکر

خرسندم که قدردانی خود را نسبت به همه کسانی که مرا در تهیه و تنظیم این پایان نامه یاری نموده‌اند، بیان کنم. از راهنمایی‌های بی‌دریغ استاد علم و اخلاق، جناب آقای دکتر فرید و کیلی تهامی که همواره با پیشنهادات ارزنده‌ی خود بنده را در تمام مراحل تحصیلات دانشگاهی و همچنین تهیه و تدوین این پایان نامه یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از حمایت‌های دلگرم‌کننده‌ی استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمد زهساز به‌عنوان استاد مشاور اینجانب تشکر و قدردانی می‌نمایم. در نهایت، قدردانی خاص خود را از خانواده خویش دارم که همواره مشوق بنده بوده‌اند.

آرش محمدعلیزاده فرد

بهمن ماه ۱۳۹۲

نام خانوادگی دانشجو: محمد علیزاده فرد	نام: آرش
عنوان پایان نامه: بهینه‌سازی چند هدفه‌ی ساختار دیسک دوار ساخته‌شده از مواد هدفمند تحت اثر بارهای ترمو-مکانیکی بر اساس رفتار خزشی	
استاد راهنما: دکتر فرید وکیلی تهامی استاد مشاور: دکتر محمد زهساز	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: دانشگاه تبریز دانشکده: مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: تعداد صفحه: ۹۱	
کلید واژه‌ها: خزش، بهینه‌سازی، دیسک دوار، مواد هدفمند.	
چکیده:	
<p>در این پایان نامه به بهینه‌سازی دیسک دوار هدفمند ساخته‌شده از ترکیب دو ماده‌ی آلومینیوم ۶۰۶۱ و سیلیکون‌کاربید با در نظر گرفتن رفتار خزشی پرداخته شده است. بدین منظور نخست با گسترش معادله‌ی انتقال حرارت رسانش به تعیین توزیع دما در دیسک مذکور پرداخته شده است. سپس با در نظر گرفتن توزیع دمای به دست آمده و با گسترش معادله‌ی جابه‌جایی با وجود وقوع خزش، رفتار ترمو-مکانیکی دیسک مورد بررسی قرار گرفته است. برای گسترش معادلات فوق تمامی خواص تابع دما و درصد حجمی مواد فرض شده و برای تعیین خواص معادل از دو مدل موری-تاناکا و هاشین اشتریکمن استفاده و نتایج به دست آمده از این دو روش همگن‌سازی، در جهت اعتبارسنجی با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه شده است. الگوی توزیع مواد مورد مطالعه در این مطالعات توانی می‌باشد. برای حل معادلات توزیع دما و جابه‌جایی چهار روش گسسته‌سازی، المان محدود، کوادراتور دیفرانسیلی و کوادراتور دیفرانسیلی هارمونیک معرفی شده است. نتایج چهار روش مذکور در جهت مقایسه‌ی دقت و اعتبارسنجی، در حالتی خاص با نتایج تحلیلی به دست آمده مقایسه شده است. مقایسه‌ی این روش‌ها برای انتخاب بهترین روش از نظر زمان و دقت حل صورت گرفته تا بهترین روش برای ورود به بخش بهینه‌سازی تعیین گردد. نتایج حاکی از دقت بالای روش گسسته‌سازی دارد. بهینه‌سازی در سه بخش تک، دو و سه هدفه انجام گرفته است. اهداف مورد مطالعه شامل افزایش ضریب اطمینان کمینه، کاهش وزن و کاهش بازه‌ی تغییرات ضریب اطمینان بیشینه و کمینه بوده و متغیرهای طراحی نیز شامل درصد حجمی مواد در جدار داخلی و خارجی، توان الگوی توزیع مواد و توان پروفیل ضخامت می‌باشند. در بخش نخست چهار روش مختلف الگوریتم ژنتیک پیوسته، ازدحام ذرات، جستجوی گرانشی و روش بهینه‌سازی تغییر شکل‌پذیر سازه‌ای تکاملی از نظر سرعت و دقت دستیابی به پاسخ بهینه در بهینه‌سازی تک‌هدفه‌ی ضریب اطمینان مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. هدف دیگر در بخش بهینه‌سازی تک‌هدفه تعیین ضرایب مناسب برای تابع جریمه است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی دقت بالاتر الگوریتم ژنتیک پیوسته و سرعت همگرایی بالاتر الگوریتم جستجوی گرانشی است. همچنین داده‌های بهینه نیاز به درصد حجمی سیلیکون‌کاربید بیشتر در جدار خارجی و پروفیل ضخامت نزولی را پیش‌بینی می‌کنند. سپس با توجه به دقت بالاتر الگوریتم ژنتیک پیوسته، به انجام بهینه‌سازی دو و سه هدفه با روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی بر اساس داده‌های نامغلوب پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان از تناقض اهداف مطرح دارد.</p>	

فهرست عناوین

فهرست شکل‌ها و نمودارها

فهرست جداول

فهرست اختصارات

فهرست علائم

فصل اول - مقدمه و بررسی منابع

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ پدیده‌ی خزش ۴
- ۱-۲-۱ مکانیزم‌های فیزیکی تغییرشکل خزشی ۶
- ۲-۲-۱ عوامل تأثیرگذار در رفتار خزشی و معادلات اساسی خزش ۷
- ۳-۲-۱ معادلات خزشی برای مواد کامپوزیتی با پایه‌ی آلومینیوم ۹
- ۳-۱ مواد کامپوزیتی لایه‌لایه ۱۰
- ۴-۱ مواد هدفمند ۱۰
- ۵-۱ طراحی بهینه و بهینه‌سازی ۱۱
- ۱-۵-۱ مسائل بهینه‌سازی سخت و الگوریتم‌های فرا اکتشافی ۱۲
- ۲-۵-۱ مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه ۱۳
- ۳-۵-۱ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی شکل تکاملی ۱۶
- ۶-۱ مطالعات انجام‌یافته ۱۷
- ۱-۶-۱ تحلیل خزشی دیسک دوار ساخته‌شده از مواد هدفمند ۱۷
- ۲-۶-۱ بهینه‌سازی دیسک دوار ۲۰
- ۷-۱ اهداف تحقیق و نوآوری‌های آن ۲۱

فصل دوم - مواد و روش‌ها

- ۱-۲ الگوی توزیع مواد ۲۴
- ۲-۲ همگن‌سازی خواص و خواص معادل ۲۴
- ۳-۲ روش‌های تحلیل ترمو-مکانیکی ۲۹
- ۴-۲ معادله‌ی حاکم بر توزیع دما ۳۰

- ۳۱..... ۵-۲ معادلات حاکم بر تحلیل تنش- کرنش
- ۳۲..... ۶-۲ بی‌بعدسازی
- ۳۳..... ۷-۲ حل با الگوریتم شبه‌تحلیلی گسسته‌سازی
- ۳۵..... ۸-۲ روش DQM
- ۳۵..... ۱-۸-۲ نحوه‌ی انتخاب نقاط نمونه
- ۳۶..... ۲-۸-۲ توابع تست
- ۳۷..... ۳-۸-۲ نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی در روش DQM
- ۳۸..... ۹-۲ روش HDQM
- ۳۹..... ۱۰-۲ روش المان محدود
- ۳۹..... ۱۱-۲ روش‌های بهینه‌سازی
- ۳۹..... ۱-۱۱-۲ الگوریتم ژنتیکی پیوسته
- ۴۳..... ۲-۱۱-۲ الگوریتم ازدحام ذرات
- ۴۶..... ۳-۱۱-۲ روش جستجوی گرانشی
- ۴۸..... ۴-۱۱-۲ روش بهینه‌سازی تغییرشکل‌پذیر سازه‌ای با رویکرد حذف مواد
- ۴۹..... ۱۲-۲ فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی
- ۵۰..... ۱۳-۲ اعتبارسنجی
- ۵۰..... ۱-۱۳-۲ بررسی اعتبار روش‌های همگن‌سازی مورد استفاده
- ۵۲..... ۲-۱۳-۲ بررسی اعتبار روش‌های حل معادلات دیفرانسیل
- ۵۲..... ۱-۲-۱۳-۲ حل تحلیلی معادله‌ی توزیع دما
- ۵۳..... ۲-۲-۱۳-۲ حل تحلیلی معادله‌ی جابه‌جایی

فصل سوم - نتایج بحث و نتیجه‌گیری

- ۵۹..... ۱-۳ مقدمه
- ۵۹..... ۲-۳ مقایسه‌ی روش‌های تحلیل ترمو-مکانیکی
- ۵۹..... ۱-۲-۳ مقایسه‌ی روش‌های تعیین توزیع دما
- ۶۲..... ۲-۲-۳ مقایسه‌ی روش‌های تحلیل ترمو-مکانیکی
- ۶۵..... ۳-۳ نمونه‌ی حل با استفاده از روش گسسته‌سازی

۶۸.....	۴-۳ نتایج بهینه‌سازی
۶۸.....	۱-۴-۳ بهینه‌سازی تک‌هدفه
۷۷.....	۲-۴-۳ بهینه‌سازی دوهدفه
۷۹.....	۳-۴-۳ بهینه‌سازی سه‌هدفه
۸۰.....	۵-۳ نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۱.....	۶-۳ پیشنهاد برای ادامه‌ی کار

منابع

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل ۱-۱- روتور یک توربین ۲
- شکل ۱-۲- مدل شماتیک یک ماده هدفمند ۳
- شکل ۱-۳- نمودار کرنش خزشی در برابر زمان ۵
- شکل ۱-۴- منحنی‌های کرنش-زمان ۶
- شکل ۱-۵- نقشه‌ی مکانیزم تغییر شکل خزشی ۷
- شکل ۱-۶- مدل شماتیک سازه‌های کامپوزیتی لایه‌لایه با استفاده از تئوری‌های LW و ESL ۱۰
- شکل ۲-۱- توابع برازش شده برای خواص آلومینیوم به همراه داده‌های تجربی ۲۷
- شکل ۲-۲- توابع برازش شده برای خواص سیلیکون کاربرد ۲۸
- شکل ۲-۳- توابع برازش شده برای تنش مجاز آلومینیوم و سیلیکون کاربرد به همراه داده‌های تجربی ۲۸
- شکل ۲-۴- تقسیم‌بندی شعاعی دیسک ۳۴
- شکل ۲-۵- فلوجارت مراحل الگوریتم ژنتیکی دوهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب ۴۲
- شکل ۲-۶- فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ۴۵
- شکل ۳-۱- نتایج آزمون حساسیت به تعداد تقسیمات برای تعیین توزیع دما با استفاده از روش گسسته‌سازی ۶۰
- شکل ۳-۲- مقایسه‌ی نتایج روش‌های مختلف در تعیین توزیع دما ۶۱
- شکل ۳-۳- مقایسه‌ی توزیع تنش شعاعی بی‌بعد به دست آمده از دو روش DQM و HDQM ۶۳
- شکل ۳-۴- مقایسه‌ی نتایج روش‌های مختلف در تعیین توزیع تنش شعاعی ۶۳
- شکل ۳-۵- مقایسه‌ی نتایج روش‌های مختلف در تعیین توزیع تنش مماسی ۶۴
- شکل ۳-۶- توزیع دمای به دست آمده با خواص وابسته به دما با روش گسسته‌سازی ۶۶
- شکل ۳-۷- توزیع تنش شعاعی و مماسی الاستیک به دست آمده با خواص وابسته به دما با روش گسسته‌سازی ۶۶
- شکل ۳-۸- توزیع ضریب اطمینان الاستیک به دست آمده با خواص وابسته به دما با روش گسسته‌سازی برای حالات مختلف ۶۷
- شکل ۳-۹- کمینه ضریب اطمینان به دست آمده به ازای تعداد تکرارهای مختلف در حل خزشی پس از پنج سال ۶۷
- شکل ۳-۱۰- بازآرایی تنش معادل پس از بازه‌های زمانی مختلف ۶۸
- شکل ۳-۱۱- نمودارهای همگرایی الگوریتم ژنتیکی پیوسته برای مقادیر مختلف جریمه ۷۰
- شکل ۳-۱۲- نمودارهای همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات برای مقادیر مختلف جریمه ۷۲
- شکل ۳-۱۳- نمودارهای همگرایی الگوریتم جستجوی گرانشی برای مقادیر مختلف جریمه ۷۴

- شکل ۳-۱۴- تغییرات تابع هدف با پیشرفت الگوریتم در روش MESO ۷۵
- شکل ۳-۱۵- شکل بهینه‌ی به‌دست‌آمده از روش MESO ۷۵
- شکل ۳-۱۶- نمودار همگرایی روش MESO ۷۶
- شکل ۳-۱۷- مقادیر حساسیت در روش MESO برای گام نخست و نهایی ۷۶
- شکل ۳-۱۸- ۷۵ درصد جواب‌های بهتر الگوریتم NSGA دوهدفه پس از ۱۰ نسل طی پنج سال ۷۷
- شکل ۳-۱۹- ۷۵ درصد جواب‌های بهتر الگوریتم NSGA دوهدفه پس از ۵۰ نسل طی پنج سال ۷۸
- شکل ۳-۲۰- جواب‌های برتر نهایی الگوریتم NSGA دوهدفه طی پنج سال ۷۸
- شکل ۳-۲۲- جواب‌های برتر نهایی الگوریتم NSGA سه‌هدفه طی پنج سال [۷۹](#)

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر تنش بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه ۷
- جدول ۲-۱- برخی از روابط معمول برای توصیف اثر زمان بر کرنش خزشی به همراه نام رابطه ۸
- جدول ۳-۱- روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیکی ۱۴
- جدول ۱-۲- ضرایب و ثوابت چندجمله‌ای‌های برازش شده برای آلومینیوم ۶۰۶۱ ۲۷
- جدول ۲-۲- ضرایب و ثوابت چندجمله‌ای‌های برازش شده برای سیلیکون کاربید ۲۷
- جدول ۳-۲- ضرایب و ثوابت چندجمله‌ای‌های برازش شده برای مقاومت مواد ۲۹
- جدول ۴-۲- نتایج تجربی مورد استفاده برای رگرسیون ۲۹
- جدول ۵-۲- مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج مدل موری-تاناکا ۵۱
- جدول ۶-۲- مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج مدل هاشین-شتریکمن ۵۱
- جدول ۷-۲- نمادهای مورد استفاده در حل تحلیلی ۵۲
- جدول ۱-۳- مقایسه‌ی روش‌های مختلف در تعیین توزیع دما ۶۲
- جدول ۲-۳- مقایسه‌ی نتایج روش‌های مختلف در تحلیل ترمو-مکانیکی ۶۴
- جدول ۳-۳- مشخصات و شرایط کاری ۶۵
- جدول ۴-۳- مقایسه‌ی سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیکی پیوسته به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه ۷۰
- جدول ۵-۳- مقایسه‌ی سرعت همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه ۷۲
- جدول ۶-۳- مقایسه‌ی سرعت همگرایی الگوریتم جستجوی گرانشی به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه ۷۳
- جدول ۹-۳- مقایسه‌ی چند حالت بهینه (بهینه‌سازی طی پنج سال و پویاست) ۸۰

فهرست اختصارات

Asymptotic Expansion Homogenization	AEH
Differential Quadrature Method.....	DQM
Finite Element Method	FEM
Functionally Graded.....	FG
Functionally Graded Material	FGM
Genetic Algorithm.....	GA
Gravitational Search Algorithm	GSA
Harmonic Differential Quadrature Method	HDQM
Layerwise	LW
Morphing Evolutionary Structural Optimization	MESO
Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	NSGA
Particle Swarm Optimization	PSO

فهرست علائم

نماد	توضیح
A	سطح مقطع
A ₀	سطح مقطع اولیه
B	ضریب خزشی
C	ضریب خزشی
D	ضریب خزشی
D _L	ضریب انتشار شبکه
E	مدول الاستیسیته
\bar{E}	مدول الاستیسیته بی بعد
F	نیرو
\bar{H}	شعاع بی بعد
I	ماتریس همانی
J	بردار توابع هدف
J _i	هدف i ام
K	مدول حجمی
L	چند جمله‌ای‌های لاگرانژ
M	ضریب خزشی
N	تعداد نقاط نمونه در دو روش DQM و HDQM
N _{pop}	تعداد اعضای جمعیت
N _{var}	تعداد متغیرهای بهینه‌سازی
P	بردار ثوابت طراحی
Q	انرژی فعال‌سازی
R	ثابت جهانی گازها
\bar{R}	شعاع بی بعد
S _y	تنش تسلیم
S _{all}	تنش مجاز
T	دمای مطلق
T _m	دمای ذوب
T _{ref}	دمای مرجع
\bar{T}	دمای بی بعد

نماد	توضیح
\hat{T}	ضریب بی‌بعدسازی دما
\bar{U}	جابه‌جایی بی‌بعد
V	درصد حجمی ذرات اضافه شده
X	بردار متغیرهای طراحی
$[a]$	ماتریس ضرایب وزنی در دو روش HDQM و DQM
\vec{b}_r	بردار برگرز
f	قسمت ناهمگن معادله دیفرانسیل در دو روش HDQM و DQM
g	قید نامساوی
h	ضخامت
k	ضریب رسانش
\bar{k}	ضریب رسانش بی‌بعد
m	ثابت خزشی
n	ثابت خزشی
p	خاصیت ترمو-مکانیکی
q	تعداد پیک‌ها
r	شعاع
t	زمان
u	جابه‌جایی
\hat{u}	ضریب بی‌بعدسازی جابه‌جایی
α	ضریب انبساط حرارتی
β	ضریب خزشی
ε	کرنش
λ	اندازه زیردانه‌ها
μ	مدول برشی
ν	ضریب پواسون
ζ	توان پروفیل توزیع مواد
ρ	چگالی
σ	تنش
σ_{sh}	شعاع جایگاه
σ_0	تنش آستانه‌ای

نماد	توضیح
ω	سرعت دورانی
$(.)_{eff}$	مقدار مؤثر
$(.)_i$	مقدار در جدار داخلی
$(.)_o$	مقدار در جدار خارجی
$(.)_{rr}$	مقدار در راستای شعاعی
$(.)_{\theta\theta}$	مقدار در راستای مماسی
$(.)^{el}$	مقدار الاستیک
$(.)^c$	مقدار خزشی

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

دیسک دوار به علت کاربردهای فراوانی که در صنعت دارد، از دیرباز موضوع تحقیقات و مطالعات متعددی بوده است. از میان کاربردهای دیسک دوار می‌توان به مواردی همچون موتورهای صنایع هوایی، اتومبیل‌ها، توربین‌ها، پمپ‌ها و کمپرسورها اشاره نمود. بسیاری از این کاربردها نیازمند کاهش وزن سازه به‌خاطر وجود دلایلی همچون کاهش مصرف سوخت و نیز دستیابی به سازه‌ای با توزیع ضریب اطمینان بالاتر می‌باشند. در عین حال برای بهره‌گیری از تمام ظرفیت دیسک، مطلوب است بازه‌ی میان ضریب اطمینان کمینه و بیشینه محدود باشد. شکل ۱-۱ دیسک دوار مورد استفاده در روتور یک توربین را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱- روتور یک 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، دلواپسی اصلی در طراحی اجزای سیستم‌ها به سمت ارزیابی کارایی ویسکوپلاستیک^۲ این قطعات برای جلوگیری از واماندگی در اثر وقوع خزش سوق یافته است [۱ و ۲]. دیسک‌های دوار نیز به‌عنوان جزئی از این سیستم‌ها، اغلب در گرادیان‌های دمایی و سرعت‌های زاویه‌ای بالا کار می‌کند. سرعت زاویه‌ای و دمای زیاد باعث ایجاد تنش‌های ترمو-مکانیکی بالا در دیسک شده و همزمان با آن، وجود دمای بالا و

¹ Energy conversion

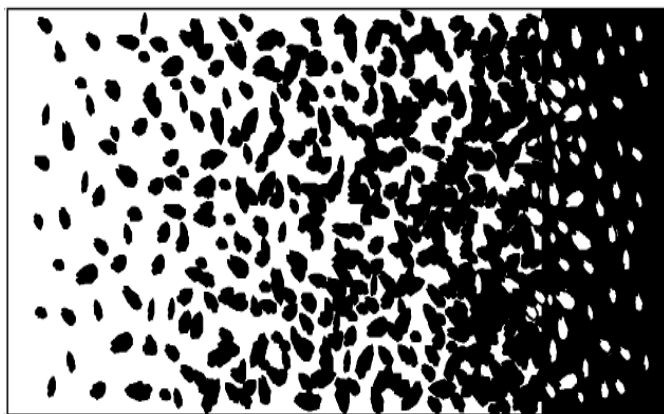
² Viscoplastic

زمان کاری طولانی شرایط را برای وقوع پدیده‌ی خزش فراهم می‌کند. از این جهت بررسی پدیده‌ی خزش در دیسک‌های دوار اهمیت می‌یابد.

با پیشرفت سریع تکنولوژی نیاز به استفاده از مواد جدید به‌عنوان اولویت مهندسی در سیستم‌های پیچیده‌ی پربازده مطرح شده است. در برخی از این موارد، نیاز به تأمین مقاومت توأمان ماده در برابر بارهای حرارتی-مکانیکی متفاوت، منجر به معرفی و تولید مواد هدفمند^۱ با قابلیت تحمل بارهای متفاوت و تغییرات خواص پیوسته در جهات مختلف گردیده است.

عبارت مواد هدفمند بیانگر دسته‌ای از مواد است که ریزساختارهای آن‌ها به صورت فضایی و به‌منظور دستیابی به خواص مکانیکی یا حرارتی مشخص، تغییر می‌کنند تا کارکرد مناسب و مشخصه‌های مطلوب سازه را محقق سازند. از جمله کاربردهای مواد هدفمند می‌توان به سپرهای حرارتی سازه‌های فضایی، مبدل‌های حرارتی، دیواره‌های راکتورها، قطعات موتورها و تمامی قطعات در معرض تنش‌های ترمو-مکانیکی همچون دیسک‌های دوار اشاره نمود. چنانچه مشخص است با توجه به کاربردهای دما بالای مواد هدفمند، بررسی پدیده‌ی خزش در این مواد اهمیت می‌یابد.

مواد هدفمند علاوه بر حل مشکلات اتصالات بین مواد معمولی، فاقد عیوب کامپوزیت‌های موجود که به‌علت تغییرات ناهمگن خواص به‌وجود می‌آیند، نیز می‌باشند. برای مثال در سپرهای حرارتی معمولی، یک لایه ماده‌ی سرامیکی به‌صورت مجزا به یک سازه‌ی فلزی متصل می‌گردد. در نتیجه به‌دلیل اختلاف شدید خواص مواد در سطح مشترک این دو لایه‌ی متفاوت، تنش‌های بین لایه‌ی زیادی ایجاد می‌شوند که می‌توانند منجر به تغییر شکل پلاستیک و یا ایجاد ترک گردند. با استفاده از مفهوم مواد هدفمند می‌توان آثار زیانبار این‌چنینی را کاهش داد. شکل ۱-۲ ساختار یک ماده‌ی هدفمند را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- مدل شماتیک یک ماده هدفمند.

¹ Functionally Graded Material (FGM)

مواد هدفمند برای نخستین بار در سال ۱۹۹۷ میلادی و به منظور دستیابی به مواد با مقاومت حرارتی بالا توسط کویزومی [۳] مطرح گردید. معرفی کامل مواد هدفمند شامل نحوه تولید، مشخصات و طراحی این مواد توسط سورش و مرتسن [۴] در سال ۱۹۹۸ میلادی ارائه شده است. مطالعات دیگر بسیاری نیز در ارتباط با این نوع مواد صورت گرفته است. طراحی مواد هدفمند و به بیان دیگر، تعیین نحوه تغییرات ترکیب مواد از طریق کسر حجمی^۱ و شکل ریزساختارها^۲ باید به گونه‌ای انجام شود که سازه وظیفه‌ی خود را در بهترین حالت انجام دهد و بدین علت طراحی صحیح این مواد مستلزم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد تا توزیع بهینه‌ی مواد به دست آید.

بهینه‌سازی باید با در نظر گرفتن اهداف موجود انجام پذیرد. با توجه به توضیحات ارائه شده، اهداف پژوهش حاضر شامل کمینه کردن وزن سازه، افزایش ضریب اطمینان و دستیابی به سازه‌ای با توزیع ضریب اطمینان یکنواخت می‌باشند. چنان که مطرح شد، بررسی این اهداف باید با در نظر گرفتن پدیده‌ی خزش انجام گیرد. همواره انتخاب روش تحلیل و بهینه‌سازی باید با توجه به مسئله‌ی موجود انجام گیرد. در این پژوهش پنج روش تحلیل و چهار روش بهینه‌سازی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه به منظور آشنایی توضیحی مختصر در مورد پدیده‌ی خزش آمده است.

۱-۲ 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 [۵]. شکل ۱-۳ نمودار الگووار کرنش خزشی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱-۳ 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.

شکست S_y

کرنش
(۳)

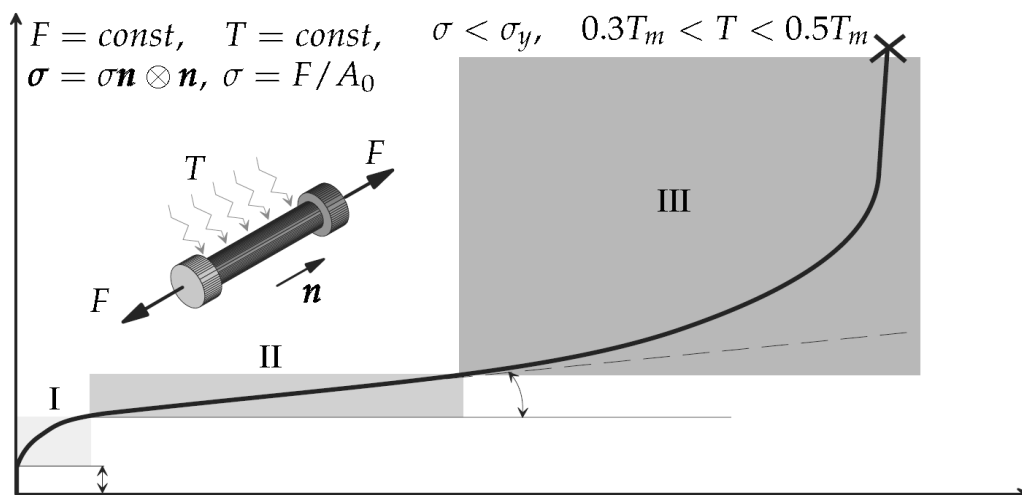
کمینه نرخ کرنش خزشی

کرنش الاستیک اولیه (ϵ^e)

¹ Volume fraction

² Microstructure morphology

زمان (t)



شکل ۱-۳- نمودار کرنش خزشی در برابر زمان [۶].

در **مرحله اول**^۱ 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^۲ بیشتر از بازیافت حرارتی^۳ است. در **مرحله دوم**^۴ 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. در **مرحله سوم**^۵ 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 ۱-۴ این منحنی‌ها را برای حالت‌های تنش و دما ثابت مختلف نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، تغییر شکل خزشی نوعی تغییر شکل پلاستیک است.

(ب)

(الف)

¹ Primary creep
² Strain hardening
³ Thermal recovery
⁴ Secondary creep
⁵ Tertiary creep