بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه رازی

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

تحلیل ارتعاشاتی تیر ساخته شده از مواد هدفمند ارتوتروپیک بر روی پایه های الاستیک

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین یاس

نگارش:

سعید کمریان

شهریور ۱۳۹۰

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

سعید کمریان

تحت عنوان

تحلیل ارتعاشاتی تیر ساخته شده از مواد هدفمند ارتوتروپیک بر روی پایههای الاستیک

در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۲۲ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما	دکتر محمد حسین یاس	با مرتبه ی علمی	دانشیار	امضاء
۲- استاد داور داخل گروه	دکتر صابر محمدی	با مرتبه ی علمی	استادیار	امضاء
۳- استاد داور خارج از گروه	دکتر مهدی کریمی	با مرتبه ی علمی	استادیار	امضاء

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به تو که راه نرفتهای را در پیچ و خم ندانمها و ناشناختهها برایم آسان و آشنا کردی؛

باحضوری به وسعت تمام بزرگیت در لحظه لحظهی تکاپویم به دنبال دانستن.

تقدیم به تو ای مادر بزرگ بزرگم

تقدیر و سپاس

تقدیر از آنان که شایستهی بهترینها هستند:

از پدرم و مادرم که تمام سختیهای سهمگین روزهای غربت را با امید به دلگرمی و مهربانیهایشان تحمل کردم و به پشتیبانی این قوت قلب بود که نشدنیها شدنی شد. تقدیر از برادرم که به پشتوانهی وجودش پشتم زیر بار این سنگینی خم نشد. سپاس از دوست عزیزم امین که دوستانه دستم را گرفت تا داستان دوستیها را تفسیر عینی و حقیقی کند و تقدیر فراوان از استاد ارجمندم، دکتر یاس، که یادم داد بهترین رسم یادگیری را در کلاسی که تشنهی یادگیری بودم.

چکیده:

در کار حاضر دو هدف دنبال شده است؛ در ابتدا بر اساس تئوری تیر اویلری و با استفاده از روش دیفرانسیل کوادریچر تعمیم یافته، تحلیل پارامتری ارتعاش آزاد تیر هدفمند قرار گرفته بر روی پایههای الاستیک که تغییرات تدریجی خواص تیر در جهت ضخامت آن به دو صورت تغییر کسر حجمی مواد و نیز تغییر زاویه قرار گیری الیاف نسبت به محور طولی تیر در نظرگرفته شده است، بررسی میشود. پارامترهای مورد نظر شامل چهار پارامتر موجود در قانون تعمیم یافتهی توزیع کسر حجمی مواد، زاویهی قرارگیری الیاف، انواع پایههای وینکلر و مدول پایه-های الاستیک میباشد. در ادامه، نتایج عددی برای یک تیر ارتوتروپیک با تغییرات خطی زاویهی الیاف در راستای ضخامت ارائه شده و با تیر چند لایه با چیدمانهای مختلف مشابه مقایسه میشود.

به عنوان هدف دوم، بهینهسازی چند هدفهی رابطهی چهار پارامتری توزیع کسر حجمی مواد برای تیر قرار گرفته بر روی پایههای الاستیک به منظور بهینه کردن پارامتر فرکانسی و وزن با روشهای ضرایب وزندار شده و حل پارتو مورد بررسی قرار میگیرد. برای بهینهسازی مسائل در این رساله از الگوریتم ژنتیک استفاده شدهاست. پارامترهای موجود در قانون توزیع توانی تعمیم یافته باید یک سری قیدها را ارضا کنند؛ بنابر این در این مطالعه با مسائل بهینهسازی مقید مواجه هستیم. از آنجا که الگوریتم ژنتیک برای مسائل نامقید مناسب است، روش جریمه که مسئلهی مقید را به یک مسئلهی نامقید تبدیل میکند به کار گرفته شدهاست. به منظور افزایش دادن به سرعت فرآیند بهینهسازی از شبکههای عصبی مصنوعی استفاده میشود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : مواد هدفمند

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- معرفی مواد هدفمند ۲

۱-۳- پیشینه مواد هدفمند ۳

۱-۴- مدل های ریاضی موجود برای خواص مکانیکی مواد هدفمند ۴

۱-۴-۱- استفاده از تابع نمایی ۵

۱-۴-۲- استفادهاز توابع یک یا چند جمله ای ۵

۱-۴-۳- استفاده از رابطه غیر خطی ۶

۱-۴-۴- استفاده از رابطه چهار پارامتری ۷

۱-۴-۵- استفاده از رابطه غیر خطی متاثر از دمای مواد ۱۰

۱-۴-۶- استفاده از مدل مثلثاتی ۱۱

فصل دوم : فرمول بندی مسئله

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- تیر هدفمند ارتوتروپیک ۱۴

۲-۲-۱- تشریح مسئله ۱۴

۲-۲-۲- معادلات حاکم بر حرکت ۱۶

فصل سوم : حل مسئله

۳-۱- روش دیفرانسیل کوادریچر ۲۰

۳-۲- اعمال روش دیفرانسیل کوادریچر بر معادلات حرکت تیر هدفمند ارتوتروپیک قرار گرفته بر روی تکیه گاه های الاستیک ۲۳

فصل چهارم : شبکه های عصبی

۴-۱- مقدمه ۲۷

۴-۲- ساختار موازی شبکه های عصبی ۲۷

۴-۳- فواید ، معایب و کاربردهای شبکه های عصبی مصنوعی ۲۸

۴-۴- شبکه عصبی بیولوژیکی ۲۹

۴-۵- اصول شبکه های عصبی مصنوعی ۳۰

۴-۶- شبکه پرسپترون چند لایه ۳۳

۴-۷- الگوریتم یادگیری پس انتشار ۳۴

فصل پنجم : الگوریتم ژنتیک

۵-۱- مقدمه ۳۷

۵-۲- بهینه سازی چند هدفه ۳۷

۵-۳- الگوریتم ژنتیک ۳۸

۵-۳-۱- تفاوت GA با سایر روش های بهینه سازی ۳۹

۵-۳-۲- نقاط قوت و محدودیت های الگوریتم های ژنتیک ۴۰

۵-۳-۳-عملگرهای اصلی GA ۴۱

۵-۳-۳-۱ – جمعیت اولیه ۴۱

۵-۳-۳-۲- تابع برازندگی ۴۲

۵-۳-۳-۳- انتخاب ۴۲

۵-۳-۳-۴- پیوند ۴۲

۵-۳-۳-۵- جهش ۴۲
۵-۳-۳-۶- روش های جایگزینی ۴۳
۵-۳-۳-۷- معیار همگرایی ۴۳
۵-۴- روش جریمه ۴۵

فصل ششم : نتایج عددی

۶-۱- مقدمه ۴۷
۶-۲- تغییرات تدریجی خواص تیر بر اساس تغییر کسر حجمی مواد ۴۷
۶-۲-۱- اعتبار سنجی نتایج ۴۸
۶-۲-۲- بررسی همگرایی و دقت پارامتر فرکانسی در روش دیفرانسیل کوادریچر ۴۹
۶-۲-۳- بررسی تاثیر ضرایب موثر در کسر حجمی مواد بر روی پارامتر فرکانسی ۵۰
۶-۲-۴- بررسی تاثیر ضرایب پایه های الاستیک بر روی پارامتر فرکانسی ۵۶
۶-۳- تغییرات تدریجی خواص بر اساس تغییر زاویه قرار گیری الیاف نسبت به محور طولی تیر ۶۲
۶-۳-۱- اعتبارسنجی نتایج ۶۳
۶-۳-۲- بررسی همگرایی و دقت پارامتر فرکانسی در روش دیفرانسیل کوادریچر ۶۴
۶-۳-۳- بررسی تاثیر زاویه فیبر بر روی پارامتر فرکانسی ۶۵
۶-۳-۴- بررسی تاثیر ضرایب پایه های الاستیک بر روی پارامتر فرکانسی ۶۷
۶-۳-۵- مقایسه تیر هدفمند ارتوتروپیک و تیر ارتوتروپیک با چیدمانهای مختلف ۷۴
۶-۴- مدلسازی توسط شبکه های عصبی ۷۵
۶-۵- بهینه سازی ۷۸

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری ۸۰

۷-۲- پیشنهادات ۸۱

منابع ۸۲

فهرست شکلها

عنوان **فحه**

شکل ۱-۱. هندسه پوسته استوانه ای هدفمند ۵
شکل ۱-۲. تغییرات کسر حجمی مواد هدفمند بر حسب z/h بر اساس روابط (۱-۶) و (۱-۷) ۷
شکل ۱-۳. تغییرات کسر حجمی سرامیک در راستای ضخامت به ازای p های مختلف بر اساس رابطه (۱-۲) ۸
شکل ۱-۴.تغییرات کسر حجمی سرامیک در راستای ضخامت به ازای p های مختلف بر اساس رابطه (۱-۲) ۹
شکل ۱-۵. تغییرات کسر حجمی سرامیک در راستای ضخامت به ازای p های مختلف بر اساس رابطه (۱-۲) ۹
شکل ۱-۶. تغییرات کسر حجمی ماده هدفمند در راستای ضخامت بر اساس رابطه (۱-۱۲) برای حالت $p=1$ ۱۰
شکل ۱-۷. تغییرات کسر حجمی مواد هدفمند بر حسب z/h بر اساس روابط (۱-۱۵) و (۱-۱۶) ۱۱

شکل ۲-۱. هندسه تیر ۱۵
شکل ۲-۲. تیر بر روی تکیه گاه الاستیک ۱۷

شکل ۴-۱. نواحی اصلی یک سلول عصبی بیولوژیک ۳۰
شکل ۴-۲ : نحوه عملکرد شبکه عصبی مصنوعی ۳۱
شکل ۴-۳ : شبکه پیش‌خور با یک لایهی مخفی ۳۴

شکل ۵-۱. فرد a و چهار ژن مربوط به آن ۴۱
شکل ۵-۲. نمودار گردشی CGA و $BEGA$ ۴۴

شکل ۶-۱. همگرایی و پایداری پارامتر فرکانس اساسی تیر هدفمند به ازای شرایط تکیه گاهی مختلف ۵۰
شکل ۶-۲. تاثیر ضریب a در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیهگاهی ساده- ساده ۵۱
شکل ۶-۳. تاثیر ضریب a در رابطه تغییرات کسر حجمی (V_c) سرامیک بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیهگاهی گیردار- ساده ۵۲
شکل ۶-۴. تاثیر ضریب a در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط

تکیه گاهی گیردار-گیردار ۵۲
شکل ۶-۵. تاثیر ضریب b در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی ساده-ساده..... ۵۳
شکل ۶-۶. تاثیر ضریب b در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی گیردار- ساده ۵۳
شکل ۶-۷. تاثیر ضریب b در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی گیر دار-گیر دار ۵۴
شکل ۶-۸. تاثیر ضریب c در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک (V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی ساده-ساده..... ۵۴
شکل ۶-۹. تاثیر ضریب c در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک(V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی گیر دار- ساده..... ۵۵
شکل ۶-۱۰. تاثیر ضریب c در رابطه تغییرات کسر حجمی سرامیک(V_c) بر روی پارامتر فرکانسی تیر با شرایط تکیه گاهی گیر دار- گیر دار ۵۵
شکل ۶-۱۱. تاثیر k بر روی سه فرکانس اول تیر با شرایط تکیه گاهی ساده- ساده ۵۷
شکل ۶-۱۲. تاثیر k بر روی سه فرکانس اول تیر با شرایط تکیه گاهی گیر دار- ساده ۵۷
شکل ۶-۱۳. تاثیر k بر روی سه فرکانس اول تیر با شرایط تکیه گاهی گیردار- گیردار ۵۸
شکل ۶-۱۴. مقایسه فرکانس پایه تیر برای شرایط تکیه گاهی مختلف بر حسب k ۵۸
شکل ۶-۱۵. تاثیر انواع پایهی وینکلر بر روی پارامتر فرکانس اساسی تیر با شرایط تکیه گاهی گیردار – گیردار۵۹
شکل ۶-۱۶. مقایسه تغییرات فرکانس پایه تیر بر حسب k_1 برای شرایط تکیه گاهی مختلف..... ۵۹
شکل ۶-۱۷. تاثیر α بر روی فرکانس پایه تیر برای شرایط تکیه گاهی مختلف..... ۶۰
شکل ۶-۱۸. تاثیر β بر روی فرکانس پایه تیر برای شرایط تکیه گاهی مختلف..... ۶۰
شکل ۶-۱۹. همگرایی و پایداری پارامتر فرکانس اساسی تیر هدفمند ارتوتروپیک با تغییرات خطی فیبر از صفر تا ۹۰ درجه در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی مختلف ۶۵
شکل ۶-۲۰. پارامتر فرکانسی تیر برای حالات مختلف قرارگیری زاویه الیاف برای شرایط تکیه گاهی ساده-ساده ۶۶
شکل ۶-۲۱. پارامتر فرکانسی تیر برای حالات مختلف قرارگیری زاویه الیاف برای شرایط تکیه گاهی گیردار-ساده ۶۶
شکل ۶-۲۲. پارامتر فرکانسی تیر برای حالات مختلف قرارگیری زاویه الیاف برای شرایط تکیه گاهی گیردار-گیردار ۶۷
شکل ۶-۲۳. تاثیر پایه وینکلر بر روی سه پارامتر فرکانسی اول تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف

در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی ساده- ساده ۶۸
شکل ۶-۲۴. تاثیر پایه وینکلر بر روی سه پارامتر فرکانسی اول تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف
در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی گیردار- ساده..... ۶۹
شکل ۶-۲۵. تاثیر پایه وینکلر بر روی سه پارامتر فرکانسی اول تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف
در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی گیر دار-گیردار ۶۹
شکل ۶-۲۶. تاثیر پایه وینکلر بر روی پارامتر فرکانسی اساسی تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف
در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی مختلف ۷۰
شکل ۶-۲۷. تاثیر k_1 بر روی پارامتر فرکانسی اساسی تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف در راستای
ضخامت برای شرایط تکیه گاهی ساده-ساده به ازای مقادیر مختلف پایه وینکلر ۷۰
شکل ۶-۲۸. تاثیر انواع مختلف پایه وینکلر بر روی پارامتر فرکانسی اساسی تیر هدفمند با تغییرات خطی
زاویه الیاف در راستای ضخامت برای شرایط تکیه گاهی گیردار-گیردار ۷۱
شکل ۶-۲۹. تاثیر α بر روی فرکانس پایه تیر برای شرایط تکیه گاهی ۷۱
شکل ۶-۳۰. تاثیر β بر روی فرکانس پایه تیر برای شرایط تکیه گاهی مختلف ۷۲
شکل ۶-۳۱. روند عملکرد شبکه ۷۶
شکل ۶-۳۲. مقایسه بین پارامترهای فرکانسی بدست آمده از روش های GDQ و ANN ۷۷
شکل۶-۳۳. ارتباط بین خروج‌ی‌های بدست آمده از شبکه عصبی و خروجی های واقعی نسبت به
دسته های آموزشی، اعتبار سنجی، امتحانی و کل داده ها (رگرسیون خطی) ۷۷

فهرست جدولها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱. مقایسه مواد هدفمند و مواد مرکب متداول ۳

جدول ۴-۱ : توابع محرک با علائم قراردادی ۳۲

جدول ۶-۱. خواص مکانیکی مواد ۴۸
جدول۶-۲. مقایسه پارامتر فرکانسی تیر یکنواخت روی تکیه گاه الاستیک وینکلر ۴۸
جدول۶-۳. مقایسه پارامتر فرکانسی تیر یکنواخت روی تکیه گاه الاستیک وینکلر ۴۹
جدول ۶-۴. تاثیر α و k_0 بر فرکانس طبیعی برای شرایط مختلف تکیه گاهی ۶۱
جدول ۶-۵. تاثیر β و k_0 بر فرکانس طبیعی برای شرایط مختلف تکیه گاهی ۶۲
جدول ۶-۶. مقایسه پارامتر فرکانسی اساسی تیر برای زاویه های ثابت صفر و ۹۰ درجه بدون تکیه گاه الاستیک ۶۳
جدول ۶-۷. مقایسه پارامتر فرکانسی اساسی تیر چند لایه با زاویه های ثابت و تیر هدفمند با تغییرات خطی زاویه الیاف ۶۴
جدول ۶-۸. تاثیر α و k_0 بر فرکانس طبیعی برای شرایط مختلف تکیه گاهی ۷۳
جدول ۶-۹. تاثیر α و k_0 بر فرکانس طبیعی برای شرایط مختلف تکیه گاهی ۷۳
جدول ۶-۱۰. ده پارامتر فرکانسی اول تیر هدفمند ارتوتروپیک و تیر ارتوتروپیک چند لایه با چیدمان های مختلف ۷۴
جدول ۶-۱۱. نتایج بهینه سازی دو هدفه برای چند حالت مختلف، با استفاده از روش ضرایب جمع شده ۷۸

فصل اول

مواد هدفمند

۱-۱- مقدمه

با گسترش روزافزون علوم و فنون در صنایع پیشرفته امروزی (هوافضا، نظامی، هسته ای و ...) شناخت و به کارگیری مواد نو روز به روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. در این راستا تحقیقات صنعتی و دانشگاهی توجه خاصی به شناخت، تولید و گسترش مواد نو دارند. به کارگیری مواد مرکب، آلیاژهای حافظه دار، مواد پیزوالکتریک، نانو مواد و مواد هدفمند وگسترش دامنه استفاده از این مواد از جمله تلاش های محققین جهت نیل به اهداف فوق می‌باشد. گسترش به کارگیری این نوع مواد در صنایع باعث گردید فعالیت های علمی و صنعتی بی‌شماری در زمینه‌های تولید و بررسی خواص متالورژیکی و همچنین تحلیل و به کارگیری این نوع مواد در سازه‌ها و اجزاء مکانیکی صورت گیرد.

یک دسته از این مواد نو، تحت عنوان مواد هدفمند شناخته می شوند که امروزه توجه چشمگیری را به عنوان مواد سازه ای پیشرفته به خود معطوف داشته است. در ادامه به بررسی پیشینه، خواص و کاربرد این مواد پرداخته خواهد شد.

۱-۲- معرفی مواد هدفمند

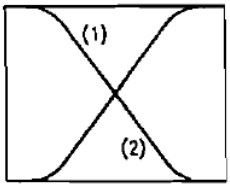
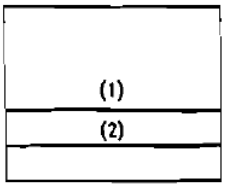
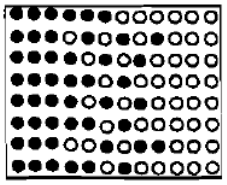
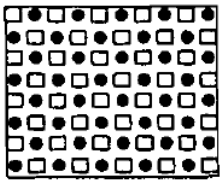
مواد مرکب لایه ای علیرغم ویژگی های حرارتی و مکانیکی مطلوبی که دارند، دارای مشکلاتی هستند همچون اثرات تغییر شکل برشی عرضی ناشی از کوچک بودن نسبت مدول برشی عرضی به مدول محوری، گسیختگی ناشی از لایه لایه شدن، ایجاد تمرکز تنش به علت تغییرات سریع خواص مواد در فصل مشترک بین آنها به خصوص در دماهای بالا [۱]. به عنوان مثال در یک محفظه موتور هواپیما متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی سبب ایجاد تنش های پسماند بزرگی می شود که این امر باعث ایجاد ترک در لایه های میانی و رشد آن در قسمت های ضعیف تر می شود. مواد هدفمند که خواص مکانیکی و حرارتی در آنها به طور پیوسته و تدریجی تغییر می کند برای حل این مشکل گزینه مناسبی می باشند.

در سالهای اخیر، مواد هدفمند اهمیت و کاربرد قابل ملاحظه در محیط های با درجه حرارت بسیار بالا مانند رآکتورهای هسته ای و وسایل شیمیایی پیدا کرده است. مواد هدفمند، مواد مرکب پیشرفتهای

هستند که از لحاظ میکروسکوپی غیر همگن می باشند و خواص مکانیکی در آنها به طور پیوسته و تدریجی از یک سطح به سطح دیگر تغییر می کند.

وجود تغییرات یکنواخت و تدریجی در ساختار این مواد باعث کاهش تمرکز تنش، تنش های حرارتی و تنش های پسماند می شود [۲]. تفاوت های اساسی بین مواد هدفمند و مواد مرکب متداول در جدول ۱ نشان داده شده است[۳].

جدول ۱-۱. مقایسه مواد هدفمند و مواد مرکب متداول[۳]

Materials Example	FGM	Non-FGM
Function/Property 1. Mechanical strength 2. Thermal conductivity		
Structure/Texture Constituent elements: —Ceramics • —Metal ○ —Fiber □		

آشناترین مواد هدفمند را می توان نمونه ای از سرامیک و فلز را نام برد که در یک سمت سرامیک و در سمت دیگر فلز قرار دارد و خواص ماده در بین این دو حد به طور پیوسته تغییر می کند باید توجه شود این دو جنس وظایف ناسازگار با یکدیگر مثل مقاومت در مقابل حرارت ،خوردگی و زنگ زدن در معرض محیط های با درجه حرارت بالا و همچنین خواص مکانیکی بالا مانند چغرمگی و قابلیت ماشین کاری را به صورت یکجا دارد.

۱-۳- پیشینه مواد هدفمند

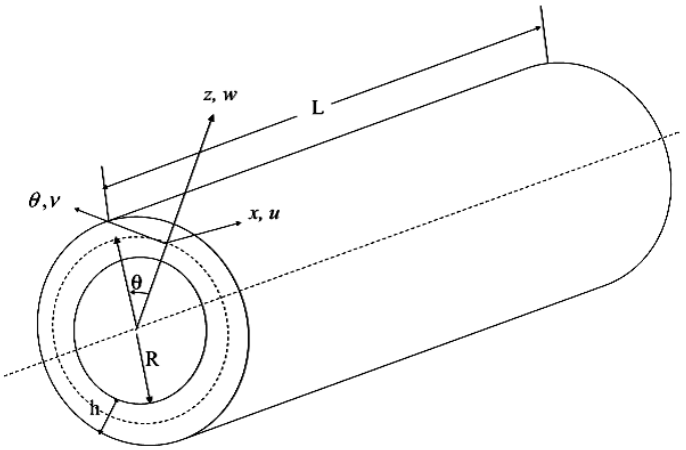
مواد هدفمند در بعضی از سازه های موجود در طبیعت وجود دارد، مثل استخوان و نی خیزران که در ساختارشان دارای تغییرات تدریجی می باشند. بدین صورت که در جایی که تنش بیشتر است ساختارشان قویتر است. به طور کلی تفاوت های عمده ای بین ساختار های با تغییرات تدریجی زنده و آنچه به صورت مصنوعی ساخته می شود وجود دارد از جمله این که مواد هدفمند زنده هوشمند می باشد و می تواند محیط در بردارنده تنش موضعی خود را حس کند در حالی که مواد هدفمند ساخت بشر حداقل در حال حاضر فاقد چنین قابلیتی می باشد. پس این مواد جدید نیستند و از طرف دیگر با پیدایش مواد مرکب متداول و قابلیت ترکیب فازهای مختلف مواد، امکان ایجاد ساختاری با اجزا تشکیل دهنده قابل کنترل و همراه با تغییرات تدریجی ایجاد شده است.

استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد به عنوان یک ایده در سال ۱۹۷۲ میلادی در امریکا توسط بو و دیوز بیان شد [۴] و بر پایه این تئوری، یک تحقیق ملی در زمینه مواد با تغییر عملکرد تدریجی برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ میلادی بوسیله نینو و همکارانش در آزمایشگاه ملی هوافضای ژاپن به دنبال راهی برای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت انجام شد[۳]. اولین نمونه های آزمایش مواد هدفمند در سالهای ۱۹۸۷-۱۹۸۹ انجام شد که نمونه آزمایش الیافی با قطر حدود ۳۰ میلیمتر و ضخامت ۱ تا ۱۰ میلیمتر بود که می توانست دمای ۲۰۰۰ درجه کلوین و همچنین اختلاف دمای حدود ۱۰۰ درجه را تحمل کند. سپس در سال های ۱۹۹۰-۱۹۹۱ قطعات بزرگتری از مواد هدفمند ساخته شدند همچون یک پوسته مربعی و کاسه های نیمکره ای که در سفینه های فضایی مورد استفاده قرار می گیرند که با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفتند. در اواخر دهه ۸۰ میلادی و اوایل دهه ۹۰ خارج از ژاپن در کشور های آلمان، روسه و چین نیز بررسی بر روی مواد هدفمند به یک موضوع جالب برای تحقیق تبدیل شد.

امروزه مواد هدفمند کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارد که از جمله می توان به قسمت های انفجاری موتور، رآکتور های هسته ای، لوله های مبد های حرارتی، اندام های مصنوعی انسان، مواد مرکب با زمینه پلیمری مقاوم، آستر محفظه پرتاب راکت، محافظ های حرارتی سفینه های فضایی و . . . اشاره کرد.

۱-٤- مدلهای ریاضی موجود برای خواص مکانیکی مواد هدفمند

به منظور انجام تحلیل های مختلف بر روی سازه های ساخته شده از مواد هدفمند، لازم است تا خواص مکانیکی مواد هدفمند (که با P بیان میشود) در معادلات حاکم دخالت داده شوند. در ادامه برخی مدل های مورد استفاده در مقالات مختلف مورد بررسی قرار میگیرد. برای بیان بهتر روابط، استوانه‌ای توخالی با شعاع داخلی R_1 ، شعاع خارجی R_2 و ضخامت h ساخته شده از مواد هدفمند (مطابق شکل ۱-۱) در نظر گرفته می شود.



شکل ۱-۱. هندسه پوسته استوانه ای هدفمند

۱-٤-۱- استفاده از تابع نمایی

در این مدل خواص ماده به صورت یک تابع نمایی از r، راستایی که خواص تغییر می‌کنند، بیان می‌شود.[۵]

$$p(r) = p_2 \exp\left[-\delta(1+\frac{R_1+R_2}{h}-\frac{2r}{h})\right] \qquad (۱-۱)$$

که

$$\delta = \frac{1}{2}\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

در رابطه فوق P_1 و P_2 به ترتیب خواص مکانیکی ماده را روی سطح پایینی وبالایی پوسته مشخص میکنند و r مختصات شعاعی تیر می باشد $r_i \le r \le r_o$.

۱-٤-۲- استفاده از توابع یک یا چند جمله ای

در این حالت خواص ماده به صورت یک یا چند جمله ای مرتبه m بیان می‌شود. از این مدل بیشتر جهت ارائه راه حل های تحلیلی استفاده می‌کنند [۶] و [۷] :

$$P = P_0 r^m \qquad R_1 < r < R_2 \qquad (۲-۱)$$

که در رابطه بالا P_o , m اعداد ثابت می‌باشند.

۱-٤-۳- استفاده از رابطه غیر خطی

یکی از بهترین روابط بیان خواص مکانیکی که در اکثر تحقیقات از آن استفاده می‌شود، بیان خواص به صورت یک رابطه غیرخطی و ترکیبی از خواص سرامیک و فلز می‌باشد. [۲]

$$P(r) = (P_2 - P_1)\left(\frac{r-R_1}{R_2-R_1}\right)^p + P_1 \qquad (۳-۱)$$

که توان p پروفیل کسر حجمی را در راستای ضخامت پوسته کنترل می کند $(0 \le p \le \infty)$. همان طور که مشخص است در این رابطه می‌توان حالات مختلفی را جهت بیان تغییرات خواص ماده، توسط توان p ارائه