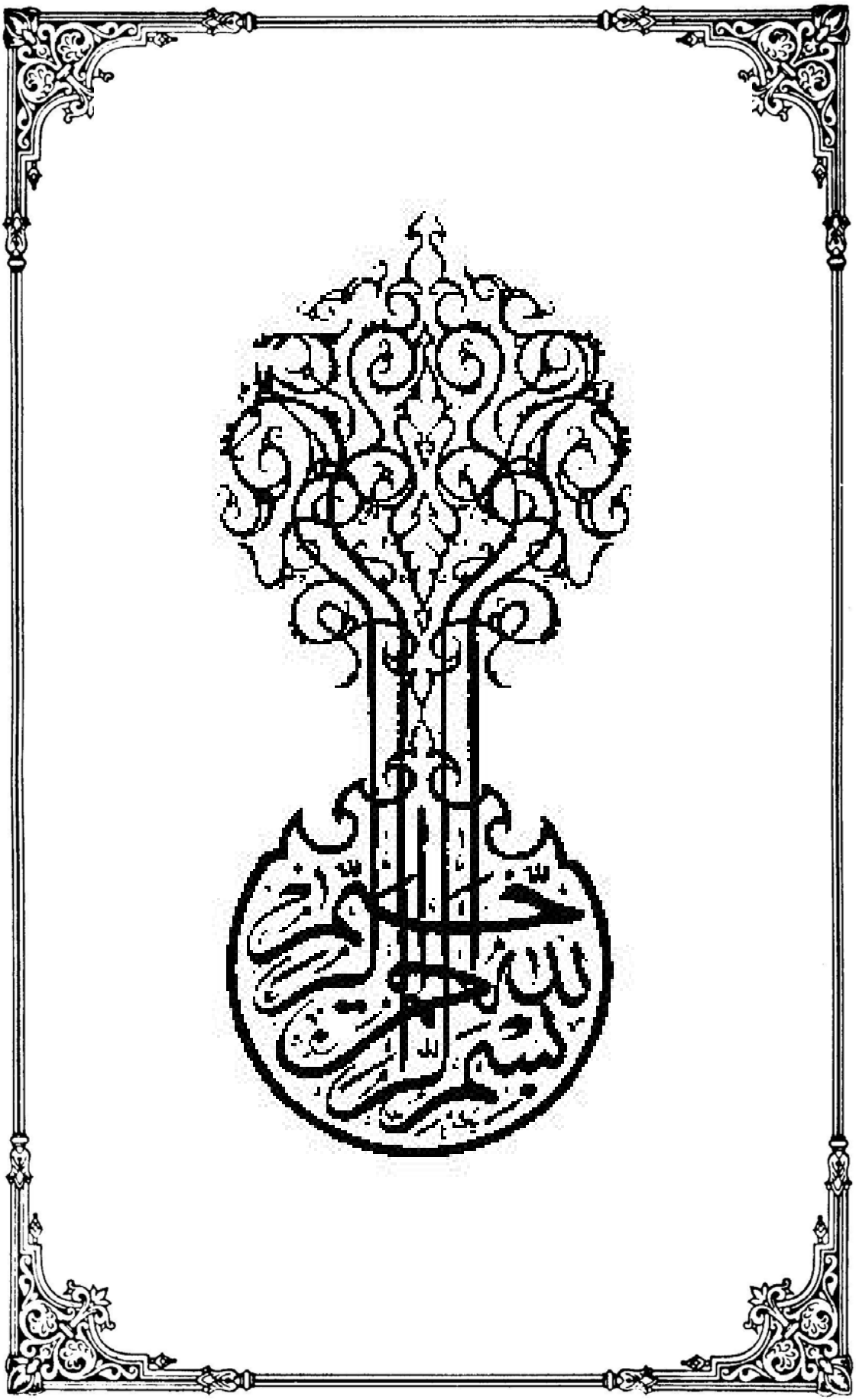


دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در
رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

عنوان:

آنالیز ترموالاستیک مخازن فشاری استوانه‌ای از جنس FGM در یک میدان مغناطیسی یکنواخت تحت بارهای مکانیکی و حرارتی

اساتید راهنما:
دکتر علی قربان‌پور **دکتر سعید گلابی**

استاد مشاور:
دکتر کیوان ترابی

بوسیله:
محمدرضا گوهریان

آذرماه ۸۷

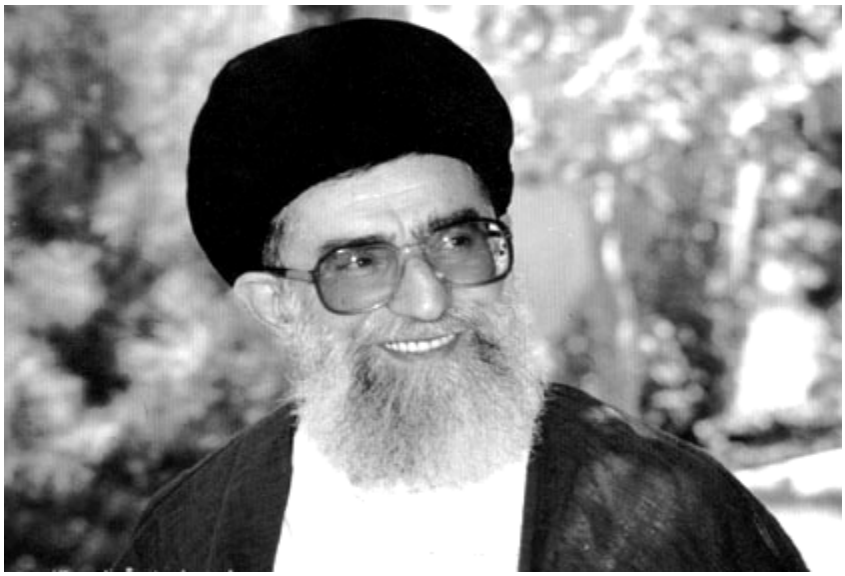
تقدیم به:

مظلومه عالم

حضرت فاطمه زهراء (سلام الله علیها)

و رهبر آزادگان جهان

آیت الله العظمی امام خامنه‌ای (حفظه الله تعالی)



تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای متعال را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود و این افتخار را به ما داد که در راه اعتلای علمی و صنعتی میهن اسلامی عزیزمان گام برداریم و از درگاه او تقاضا داریم که ما را تا آخرین نفس در این راه پربرکت و ارزشمند ثابت قدم نگاه دارد. در اینجا برخود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوارم بویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از اساتید گرامی و بزرگوار جناب آقای **دکتر علی قربان‌پور** و جناب آقای **دکتر سعید گـلابی** که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از جناب آقای **دکتر کیوان ترابی** به‌عنوان مشاور که با راهنمایی‌های خود مرا مورد لطف قرار دادند، کمال تشکر را دارم.

همچنین از تشریک مساعی جناب آقای **دکتر عباس لقمان** به‌عنوان استاد داور داخل دانشگاه و جناب آقای **دکتر علی سلمانی تهرانی** به‌عنوان استاد داور مدعو خارج از دانشگاه که این پایان‌نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند، تشکر می‌نمایم.

در پایان از جناب آقای **دکتر علی اکبر عباسیان** که به‌عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه در جلسه دفاع قبول زحمت نموده‌اند، سپاسگذاری می‌نمایم.

چکیده:

با پیشرفت سریع الکترومکانیک در دهه‌های اخیر، حوزه جدیدی در علم مکانیک ایجاد شده است که به بررسی اثر متقابل بین میدان‌های الکترومغناطیس، دما و کرنش می‌پردازد. این حوزه جدید مگنتوترموالاستیسیته نامیده می‌شود. تئوری مگنتوترموالاستیک که با اثر متقابل بین تنش، کرنش، دما و میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی سروکار دارد، دارای کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون چون شاتل‌های فضایی، هواپیماهای مافوق صوت، رآکتورهای هسته‌ای، اجزای ذخیره مغناطیسی و... می‌باشد و این کاربردها روزبه‌روز افزایش می‌یابد. هم‌چنین مواد هدف‌مند، مواد مرکب غیر همگنی هستند که از دو یا چند ماده مختلف تشکیل یافته‌اند به‌نحوی‌که ساختار آنها بطور پیوسته تغییر می‌کند. این مواد در بارگذاری‌ها و شوک‌های حرارتی و مکانیکی بطور هم‌زمان مقاومت خوبی نشان می‌دهند، لذا از این مواد در بارگذاری‌های مگنتوترموالاستیک بخوبی می‌توان استفاده کرد. در این پایان‌نامه آنالیز تحلیلی مسئله مگنتوترموالاستیک در یک مخزن استوانه‌ای جدار ضخیم از جنس FGM که در یک میدان مغناطیسی یکنواخت وگرادیان دمایی ثابت و تحت فشار داخلی و خارجی قرار دارد، با استفاده از روش تحلیلی و حل مستقیم معادله تعادل انجام پذیرفته است. برای این تحلیل از مدل توانی جهت معرفی ماده هدف‌مند استفاده شده و نمودار تنش‌های شعاعی و محیطی، بردار جابجایی و بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی بدست آمده است و اثر هرکدام از پارامترهای مغناطیس، دما، فشار، ضخامت استوانه و ثابت ناهمگونی ماده هدف‌مند بر نمودارها بررسی می‌گردد. در پایان جهت اثبات صحت محاسبات، نتایج بدست آمده در حالتی خاص با نتایج یکی از مقالات موجود مقایسه گردیده که دقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مگنتوترموالاستیک، مخزن استوانه‌ای جدار ضخیم، مواد هدف‌مند، تنش‌های شعاعی و محیطی، بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر مواد هدف‌مند

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مواد هدف‌مند و خواص آنها ۴

۱-۳- فیزیک مواد هدف‌مند ۶

۱-۴- تاریخچه مواد هدف‌مند ۷

۱-۵- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه تحلیل استوانه از مواد هدف‌مند ۹

۱-۶- اهداف و ساختار نوشتار حاضر ۱۳

فصل دوم: مدل سازی و روش‌های ساخت مواد هدف‌مند

۲-۱- مدل‌سازی مواد هدف‌مند ۱۶

۲-۱-۱- مدل کسر حجمی غیر خطی ۱۷

۲-۱-۲- مدل توانی ۱۸

۲-۲- روش‌های تولید مواد هدف‌مند ۱۹

۲-۲-۱- روش‌های متالورژی پودر ۲۲

۲-۲-۲- فرآیندهای ذوبی ۲۴

۲-۳- کاربردهای مواد هدف‌مند ۲۶

فصل سوم: معادلات و روابط بنیادی حاکم بر مسئله

۳-۱- معادلات الاستیسیته ۳۰

۳-۱-۱- تانسورهای تنش- کرنش ۳۰

۳-۱-۲- معادلات کرنش بر حسب جابجایی ۳۳

۳-۱-۳- معادلات همسازی یا سازگاری ۳۵

۳-۱-۴- معادلات تعادل ۳۶

۳-۱-۵- روابط تنش- کرنش ۳۸
۳-۱-۶- تغییر فرم نسبی دوبعدی ۳۹
۳-۱-۷- روابط تنش- کرنش ترموالاستیک ۴۰
۳-۲- معادلات انتقال حرارت در مواد هدف‌مند ۴۲
۳-۳- معادلات الکترودینامیک ناشی از میدان مغناطیسی ۴۳

فصل چهارم: تحلیل مگنتوترموالاستیک مخازن استوانه‌ای مواد هدف‌مند

۴-۱- استخراج معادلات حاکم بر مسئله ۴۶

فصل پنجم: آنالیز عددی و رسم نمودارها

۵-۱- مقدمه ۵۵
۵-۲- عکس‌العمل مگنتوترموالاستیک استوانه **FGM** در نقاط مختلف شعاع ۵۷
۵-۳- عکس‌العمل ترموالاستیک استوانه **FGM** در نقاط مختلف شعاع ۶۴
۵-۴- عکس‌العمل مگنتوالاستیک استوانه **FGM** در نقاط مختلف شعاع ۶۸
۵-۵- عکس‌العمل مگنتوترمال استوانه **FGM** در نقاط مختلف شعاع ۷۳
۵-۶- بررسی صحت نتایج عددی ۷۸

فصل ششم: جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات

۶-۱- جمع‌بندی نتایج ۸۳
۶-۲- پیشنهادات ۸۶

منابع و مراجع ۸۷

پیوست: برنامه کامپیوتری محاسبات پایان‌نامه

پ-۱- مقدمه ۹۲
پ-۲- برنامه اصلی ۹۳
پ-۳- محاسبه مقدار جابجایی ۹۶
پ-۴- محاسبه تنش شعاعی ۹۷
پ-۵- محاسبه تنش محیطی ۹۷
پ-۶- نمودار گرادیان دما ۹۸
پ-۷- نمودار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- نمونه‌ای از مخازن استوانه‌ای بکار رفته در پالایشگاه..... ۳

شکل ۱-۲- تفاوت تغییر خواص در مواد مرکب و مواد هدف‌مند..... ۵

شکل ۱-۳- تصاویر میکروسکوپی **a**)پوست انسان **b**)پوسته ساقه گیاه بامبو **c**)استخوان ۷

شکل ۲-۱- انواع روش‌های ساخت مواد هدف‌مند..... ۲۰

شکل ۲-۲- یک نمونه ماده هدف‌مند استوانه‌ای شکل تولید شده از **Mullite/Mo**..... ۲۴

شکل ۲-۳- گرادیان تولیدی از چگالی ذرات در طول یک ماده هدف‌مند تولید شده با روش ریخته‌گری رسوبی..... ۲۵

شکل ۲-۴- برخی کاربردهای مواد هدف‌مند در صنایع مختلف ۲۷

شکل ۳-۱- مؤلفه‌های تنش و جابجایی روی یک المان سه‌بعدی استوانه‌ای ۳۷

شکل ۳-۲- یک مخزن جدار ضخیم استوانه‌ای در معرض یک میدان مغناطیسی اولیه..... ۴۴

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار ۵-۱- نمودار گرادیان دما برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۵۹

نمودار ۵-۲- نمودار گرادیان دما برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۵۹

نمودار ۵-۳- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۰

نمودار ۵-۴- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۰

نمودار ۵-۵- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۱

نمودار ۵-۶- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۱

نمودار ۵-۷- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۲

نمودار ۵-۸- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۲

نمودار ۵-۹- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۳

نمودار ۵-۱۰- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۳

نمودار ۵-۱۱- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۵

نمودار ۵-۱۲- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۵

نمودار ۵-۱۳- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۶

نمودار ۵-۱۴- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۶

نمودار ۵-۱۵- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۷

نمودار ۵-۱۶- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۷

نمودار ۵-۱۷- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۶۹

نمودار ۵-۱۸- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۶۹

نمودار ۵-۱۹- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۰

نمودار ۵-۲۰- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۰

نمودار ۵-۲۱- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۱

نمودار ۵-۲۲- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۱

نمودار ۵-۲۳- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۲

نمودار ۵-۲۴- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۲

نمودار ۵-۲۵- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۴

نمودار ۵-۲۶- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۴

نمودار ۵-۲۷- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۵

نمودار ۵-۲۸- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۵

نمودار ۵-۲۹- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۶

نمودار ۵-۳۰- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۶

نمودار ۵-۳۱- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.5** ۷۷

نمودار ۵-۳۲- نمودار بردار آشفتگی میدان مغناطیسی القایی برحسب شعاع استوانه برای **a/b=0.8** ۷۷

نمودار ۵-۳۳- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای **b/a=1.2** ۷۹

نمودار ۵-۳۴- نمودار جابجایی برحسب شعاع استوانه برای مرجع [۱۵] ۷۹

نمودار ۵-۳۵- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای **b/a=1.2** ۸۰

نمودار ۵-۳۶- نمودار تنش شعاعی برحسب شعاع استوانه برای مرجع [۱۵] ۸۰

نمودار ۵-۳۷- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای **b/a=1.2** ۸۱

نمودار ۵-۳۸- نمودار تنش محیطی برحسب شعاع استوانه برای مرجع [۱۵]..... ۸۱

فصل اول:

مقدمه‌ای بر مواد هدف‌مند

۱-۱- مقدمه

اجزای مکانیکی یا سازه‌ای که هم‌زمان تحت اثر بارهای مکانیکی و حرارتی قرار گیرند، در صنایع امروز روزبه‌روز افزایش می‌یابند. یکی از این سازه‌ها که بخصوص در دهه‌های اخیر بسیار پرمصرف بوده و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف پیدا کرده است، مخازن است. در صنایع شیمیایی، صنایع نفت و گاز، صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی، صنعت آب و فاضلاب و ... جهت حفظ، نگهداری و انتقال مواد از مخازن استفاده می‌شود.

در شرایط تنوع آب و حرارتی کشورمان و هم‌چنین تنوع دمایی موادی که داخل مخازن قرار می‌گیرند، تنش‌های حرارتی از تنش‌های معمول وارد بر مخازن می‌باشند. این تنش‌ها در صنایع هسته‌ای و فضایی سهم بزرگی از بارهای وارد به مخازن را تشکیل می‌دهند.

بطور کلی یک تقسیم بندی جامع و یکسان برای مخازن ذخیره وجود ندارد. طبقه‌بندی مخازن می‌تواند از دیدگاه‌های متفاوتی مانند شکل هندسی، نوع سیال و یا برحسب فشار بخار ماده ذخیره شده در آن باشد. اما می‌توان همه مخازن را به دو دسته کلی مخازن ذخیره یا تانک[1] و مخازن تحت فشار[2] تقسیم کرد.

---

1. Tank
2. Pressure vessel

تانک‌ها مخازنی هستند که جهت ذخیره‌سازی سیالات آن هم تحت فشار و وزن خود سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند و اصطلاحاً به آنها مخازن روباز نیز گفته می‌شود. اما مخازن تحت فشار مخازنی هستند که در آنها گازها و سیالات در فشارهای مختلف و تحت دماهای گوناگون نگهداری می‌شوند و براساس همین میزان فشار، دما و هم‌چنین نوع ماده‌ای که داخل آنها قرار می‌گیرد، طراحی و ساخته می‌شوند. از آنجا که مواد مختلف دارای خواص شیمیایی و فیزیکی مختلفی هستند، شرایط و نحوه مناسب ذخیره‌سازی آنها از یکدیگر متفاوت است. این مخازن که اصطلاحاً به آنها مخازن دربسته گفته می‌شود، امروزه در بسیاری از صنایع کاربرد دارند. گازها، سیالات قابل اشتعال، مواد شیمیایی خطرناک مانند اسیدها یا بازها و سیالاتی که از خود گازهای سمی منتشر می‌کنند، باید در مخازن دربسته نگهداری و ذخیره شوند.

شکل ۱-۱- نمونه‌ای از مخازن استوانه‌ای بکار رفته در پالایشگاه

از مخازن دربسته می‌توان به مخازن با سقف ثابت، مخازن با سقف شناور، مخازن استوانه‌ای، مخازن کروی، مخازن افقی، مخازن عمودی و مخازن سرد اشاره نمود. از کاربردهای این مخازن در صنایع امروز می‌توان به انواع بویلرها، برج‌های تقطیر، مخازن ذخیره گاز، انواع لوله‌های تحت فشار، زیردریایی‌ها، مخازن **CNG**، کپسول‌های گاز، کپسول‌های آتش‌نشانی، تانکرهای حمل مواد نفتی، رآکتورهای هسته‌ای، موشک‌های فضایی، انواع شاتل‌ها و ... اشاره کرد.[۱]

۱-۲- مواد هدف‌مند[1] و خواص آنها

درجه حرارت‌های بالا در بسیاری از سازه‌ها و قطعات هم‌چون سازه‌های هوایی- فضایی، موتورهای احتراق داخلی، مخازن تحت فشار در نیروگاه‌های اتمی، تجهیزات مورد استفاده در نیروگاه‌ها و بسیاری از سازه‌های دیگر مورد استفاده در صنعت، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی زیاد در تجهیزات می‌گردد. این تنش‌ها به همراه تنش‌های مکانیکی ناشی از بارهای خارجی، باعث ایجاد ترک و شکست در قطعه می‌شوند. تنش‌های حرارتی می‌توانند اثرات مخرب دیگری چون خستگی حرارتی و کمانش حرارتی را نیز در ماده ایجاد کنند.[۲]

در قرن بیستم استخراج عناصر پایه از جدول تناوبی در شکل ترکیبات آلی و معدنی، راه را برای ایجاد پلیمرهای پیشرفته، انواع آلیاژهای مهندسی، الاستومرها و سرامیک‌های پیشرفته هموار کرد. زیرا دیگر مواد رایج و اساسی مثل فلزات، دیگر جوابگوی خواسته‌های متنوع و گوناگون صنعت از مواد نبودند. در این بین و در دهه‌های اخیر با معرفی مواد مرکب[2] به صنعت، تحولات عظیمی در این راستا ایجاد گردید و بسیاری از مشکلات و خواسته‌ها مرتفع گردید.

خواص کم‌نظیر مواد مرکب مثل استحکام، سفتی بالا، سبک بودن وزن و ... باعث گردیده استفاده گسترده‌ای از این مواد در زمینه‌های گوناگون گردد. در سازه‌های متداول مواد مرکب لایه‌ای، لایه‌های همگن و الاستیک بهم پیوسته شده‌اند تا شرایط ایده‌آل مکانیکی و حرارتی را مطابق با خواسته‌های طراحان مکانیک در دسترس قرار دهند. با این وجود تغییر ناگهانی در خواص مواد در صفحات مشترک لایه‌ها، می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های بزرگ در مرز بین لایه‌های داخلی شده که این مواد را برای تحمل شوک‌های حرارتی و مکانیکی سنگین نامطمئن می‌کند.

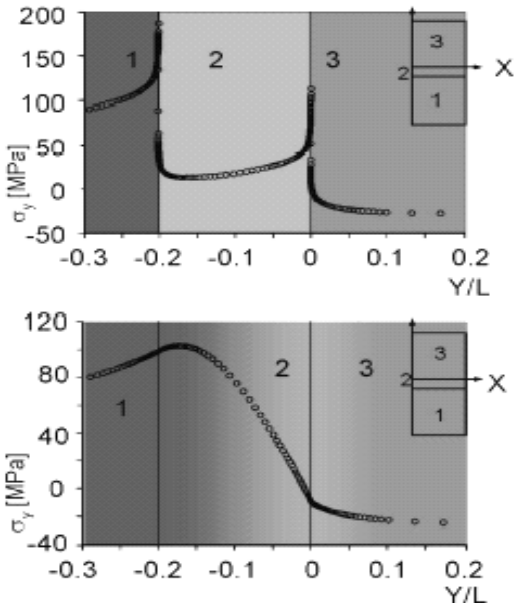
برای مثال اگر یک ماده فلزی در یک پوشش سرامیکی قرار گیرد و ماده مرکب مذکور در معرض شوک‌های حرارتی و مکانیکی واقع شود، در مرز بین دو لایه فازی ترک ایجاد و سریعاً رشد می‌کند و همین امر باعث تغییرشکل‌های پلاستیک و حتی جدایش دو سطح لایه می‌گردد. یک روش برای رفع نقص مذکور این است که برای تغییر از فازی به فاز دیگر،

---

1. FGM
2. Composite Material

ساختار ماده بطور تدریجی تغییر فاز دهد و به تبعیت از آن خواص ماده نیز بطور پیوسته و آرام تغییر کند.

موادی که دارای تغییر تدریجی و پیوسته خواص مانند مدول یانگ، انبساط حرارتی، ضریب هدایت حرارتی، سختی و ... به منظور خاصی می‌باشند، مواد هدف‌مند یا **FGM**[1] نامیده می‌شوند. این مواد در واقع ترکیبی از دو یا چند ماده مختلف می‌باشند و بگونه‌ای طراحی شده‌اند که نسبت حجمی[2] آنها در یک یا چند جهت تغییر نماید. این امر ماده را از دیدگاه میکروسکوپی ناهمگن می‌سازد و از دیدگاه ماکروسکوپی خواص مکانیکی را به نرمی و بطور پیوسته تغییر می‌دهد و چنین تغییرات پیوسته‌ای، مشکلات مربوط به تغییرات ناگهانی در سطح تماس دو ماده متفاوت را در مواد مرکب مرتفع می‌سازد.



شکل ۱-۲- تفاوت تغییر خواص در مواد مرکب و مواد هدف‌مند

پس یکی از راه‌حل‌های مقابله با بارهای شدید حرارتی و مکانیکی استفاده از مواد هدف‌مند است که موادی غیرهمگن ولی ایزوتروپ بوده و خواص آنها از نقطه‌ای به نقطه دیگر بطور پیوسته تغییر می‌کند.[۳]

1. Functionally Graded Materials (FGMs)
2. Volume Fraction

تغییر پیوسته خواص در مواد هدف‌مند می‌تواند جهت رسیدن به حداقل تنش‌های حرارتی و کنترل نقاطی که این تنش‌ها به مقدار بیشینه می‌رسند، به تأخیر انداختن شروع تسلیم پلاستیک و گسیختگی برای یک بارگذاری ترمومکانیکی، افزایش قدرت بهم پیوستگی ماده و متوقف کردن رشد ترک‌ها مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین در یک ماده هدف‌مند ایده‌آل دیگر هیچ فصل مشترک تیز و ناگهانی نخواهیم داشت و در نتیجه هیچ محلی که ذاتاً ضعیف‌تر از نقاط دیگر ماده باشد، وجود نخواهد داشت. پس حذف فصل مشترک مواد که بزرگترین ضعف ساختاری در مواد کامپوزیتی محسوب می‌گردد، یکی از مهمترین دلایل طراحی مواد هدف‌مند است. لذا در سالهای اخیر استفاده از این مواد در محیط‌های با دمای بسیار بالا مانند رآکتورهای هسته‌ای، کارخانجات شیمیایی و نیز در ساخت سفینه‌های فضایی با سرعت بالا، اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است.[۴]

۱-۳- فیزیک مواد هدف‌مند

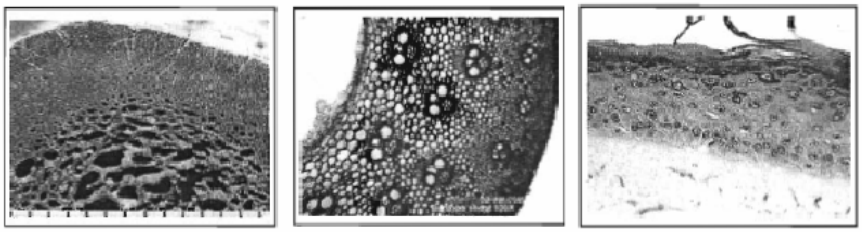
مهمترین مشخصه مواد هدف‌مند بهبود مشخصه‌های مکانیکی و ترمومکانیکی مواد است که به طریق زیر صورت می‌پذیرد:[۵]

* کمینه‌سازی تنش‌های حرارتی و کنترل بیشینه تنش‌های حرارتی در نواحی بحرانی
* به تأخیر انداختن شروع تسلیم پلاستیک و شکست در یک بارگذاری ترمومکانیکی
* کاهش نرخ رشد ترک با انتخاب مناسب درجه بندی خواص مکانیکی
* توقف رشد ترک‌ها با افزایش قدرت بهم پیوستگی ماده
* جلوگیری از تمرکز تنش‌های شدید در محل تقاطع لبه‌ها و نقاط تکین
* افزایش مقاومت باندهای واسط بین جامدات غیرهمگن، با جهت‌دار کردن تغییر خواص مکانیکی و تغییرات پیوسته این خواص
* بهبود مشخصه‌های تغییرشکل پلاستیک در اطراف بریدگی و فرورفتگی‌های نوک تیز و از بین بردن میدانهای تکین ناشی از آنها با درجه‌بندی ترکیب در لایه‌های سطحی
* سهولت قرارگیری پوشش سخت روی یک ماده با جنس نرم بوسیله درجه‌بندی پیوسته خواص مکانیکی و جهت‌دار کردن تغییر خواص مواد

۱-۴- تاریخچه مواد هدف‌مند

اگر چه مواد هدف‌مند به نظر می‌رسد از ابتکارات دهه‌های اخیر باشند، اما مفهوم آن و استفاده از آنها از دیرباز وجود داشته است. برای مثال آهنگری فولاد یکی از روش‌های قدیمی شکل‌دهی فولاد است که در بالا بردن استحکام فولاد نقش اساسی دارد و هم‌اکنون نیز از تئوری آن در ساخت فولادهای مدرن استفاده می‌شود. این فرآیند یک درجه‌بندی سختی شیمیایی و به موجب آن سختی مکانیکی از سطح یک قطعه به طرف داخل آن ایجاد می‌کند.

مواد هدف‌مند در طبیعت نیز از دیرباز وجود داشته‌اند. از جمله در استخوان و دندان جانداران، ساقه گیاه بامبو، پوست انسان و .... ساختار مواد هدف‌مند بطور طبیعی یافت می‌شوند.[۶]



c b a

شکل ۱-۳- تصاویر میکروسکوپی a)پوست انسان b)پوسته ساقه گیاه بامبو c)استخوان

نیاز به ساخت موادی که بتوانند گرادیان‌های شدید دما را تحمل کنند، انگیزه اولیه ساخت مواد هدف‌مند را در ذهن محققان ایجاد کرد. این نیاز اساسی ابتدا در صنایع هوافضا بسیار بیشتر از بخش‌های دیگر صنعت احساس می‌شد. به عنوان مثال، روی سطح شاتل‌های فضایی، معمولاً دما هنگام ورود به جو به ۲۱۰۰ کلوین می‌رسد و این سطح باید اختلاف دمایی در حدود ۱۶۰۰ کلوین را بین محیط بیرون و دمای درون کابین تحمل کند.

دانشمندان علم مواد در مرکز تحقیقات هوا- فضای ملی ژاپن[1] در شهر سندای[2] اولین پیشگامان طراحی و ساخت چنین موادی بودند. البته ایده اولیه ترکیب دو فاز مختلف به مدتی پیشتر و به سال ۱۹۷۲ باز می‌گردد. درآن زمان دو دانشمند به نامهای بیور و داوز[3] ایده اولیه

1. NAL
2. Sendai
3. Bever, Duwez

ترکیب دو فاز مختلف را با تغییر نحوه آرایش و ترتیب هرکدام از فازها در هر لایه جهت بهبود خواص مکانیکی مطرح کردند.[۷]

در اواسط دهه ۱۹۸۰ برای اولین بار در کشور ژاپن، نام علمی **FGM** به این دسته از مواد نهادند و از آن پس عصر جدیدی در تحقیقات گسترده بر روی این مواد گشوده شد. درآن زمان چند تن از دانشمندان ژاپن تحقیقات خود را روی پروژه هواپیمای فضایی آغاز کردند. تحقیقات آنها نشان داد که اجزای سازه‌های بکار رفته در بدنه هواپیمای فضایی، تحت بارهای بسیار شدید قرار می‌گیرند و بنابراین در ترکیب و درجه بندی ریزساختارهای سازه‌های بدنه بایستی به نحوی از تنش‌های ایجاد شده در اثر ناپیوستگی‌های مواد، که عموماً در مواد مرکب چند لایه‌ای ایجاد می‌شود، جلوگیری شود. نتایج این تحقیقات موجب شد تا در سال ۱۹۸۷ سازمانی متشکل از دانشمندان علوم مختلف، تحت عنوان یک پروژه ملی به اسم «تحقیق برروی تکنولوژی پایه برای تولید مواد هدف‌مند برای کاهش تنش‌های حرارتی» زیر نظر آژانس علوم و تکنولوژی ژاپن[1] تشکیل شود و بودجه تحقیقاتی بسیار زیادی را به خود اختصاص دهد. هدف این سازمان انجام تحقیقات گسترده در ارتباط با مواد هدف‌مند و نهایتاً ساخت آنها بود.[۸]

کمیته علمی این سازمان مأمور طراحی و ارزیابی سیستم‌های مرکب معدنی شد که نهایتاً پس از انجام تحقیقات فراوان به سمت انتخاب فلز و سرامیک به عنوان عناصر تشکیل دهنده مواد هدف‌مند، هدایت شد. آزمایش‌های متعدد، سرامیک را ماده مناسبی برای عملکرد درسطح داغ نشان داد. بین دو سطح داغ و سرد را به کمک روش متالورژی پودر با مخلوطی از سرامیک و فلز با درجه‌های مشخص پر نموده و آزمایشاتی برای انتخاب درصد مناسب مخلوط انجام شد. این تحقیقات تا سال ۱۹۹۱ ادامه یافت و حاصل آن ساخته شدن چند قطعه آزمایشگاهی از جمله یک صفحه مربعی به ابعاد ۳۰۰ میلیمتر مربع و یک پوسته نیمکروی با شعاع ۵۰ میلیمتر بود.

در سال ۱۹۹۳ دانشمندان ژاپنی توجه خود را روی سیستم‌های انرژی معطوف کردند. هدف از انجام این پروژه که دومین برنامه تحقیقاتی در زمینه مواد هدف‌مند بوده است، استفاده

1. STA

از این مواد برای بهینه کردن تبدیل انرژی حرارتی به الکتریسیته بود که در مواد ترموالکتریک و ترمویونیک بکار می‌روند. در این کار تحقیقاتی، مواد هدف‌مند در اصل برای کمینه کردن تنش‌های حرارتی سیستم بکار می‌رود. دستیابی به بازده بالا در محدوده وسیعی از تغییرات درجه حرارت، دستاورد بزرگ فاز دوم تحقیقات می‌باشد.

در فاصله سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ در خارج از کشور ژاپن هم در چند کشور از جمله آلمان، ایالات متحده، چین و روسیه، مواد هدف‌مند به یکی از مهمترین محورهای تحقیقاتی تبدیل شده بود که ادامه این تحقیقات هم‌چنان ادامه دارد. به عنوان نمونه در آلمان یک برنامه تحقیقاتی شش ساله از سال ۱۹۹۵ و با مشارکت تعداد زیادی از آزمایشگاه‌های این کشور طرح‌ریزی شد. برنامه شامل چهار شاخص اصلی بود که عبارت بودند از:

– فرآیندهای تولید مواد هدف‌مند براساس روش ذوب کردن (ریخته‌گری، صاف کردن، رشد کریستالی)

– فرآیندهای تولید مواد هدف‌مند براساس روش پودر کردن.

– مدل سازی ترمودینامیکی

– ساخت مواد برای کاربردهای علم پزشکی

در سال‌های اخیر مواد هدف‌مند کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. اتصالات فلز به سرامیک، اعضا مصنوعی قابل پیوند به بدن انسان، اجزای موتورهای احتراق داخلی، نازل موتورهای جت، وسایل مغناطیسی، ابزارآلات برش، وسایل اطفاء حریق درساختمان‌ها، مواد مرکب پلیمری با مقاومت بالا، سپرهای حرارتی شاتل‌ها و مواد پیزوالکتریک قابل کاربرد در سنسورها بخش کوچکی از این کاربردهاست.

۱–۵– مروری برپژوهش‌های انجام شده در زمینه تحلیل استوانه از مواد هدف‌مند

با توجه به مطالب ذکر شده درمورد اهمیت مبحث ترموالاستیسیته و نیز آشنایی با فواید مواد هدف‌مند، بدین منظور بخشی از مقاله‌های منتشر شده در زمینه تحلیل استوانه‌های ساخته شده از مواد هدف‌مند را جهت ارائه یک پیشینه از مبحث ارائه شده، به اختصار بررسی می‌نماییم: