





دانشگاه صنعتی نوشهرانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی

موضوع:

تحلیل تئوریک و عددی دیسک‌های دوار با ضخامت و خواص مکانیکی

متغیر در معرض تغییر درجه حرارت

استاد راهنما:

دکتر محمدحسن حجتی

استاد مشاور:

دکتر رضا اکبری آلاشتی

دانشجو:

اقلیما مهدوی تلوکلایی

خرداد ماه ۱۳۹۰

تقدیر و تشکر

از اساتید گرانقدر، آقای دکتر حجتی و آقای دکتر اکبری سپاسگزارم، که اگر الطاف بی‌دریغشان در راهنمایی و مشاوره این پایان-نامه نبود، بی‌شک این مجموعه به بار نمی‌نشست.

شایسته است از زحمات همه اساتیدی که در دوره کارشناسی ارشد، در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، از محضرشان استفاده کردم، قدردانی نمایم. شاگردی این اساتید افتخار بس بزرگی بود که نصیب بنده شد و خداوند را هزاران مرتبه بابت آن شاکرم.

همچنین از همه عزیزانی که در انجام این پایان‌نامه به من یاری رساندند، تشکر می‌کنم؛ امیدوارم خداوند به من توفیق جبران بخشی از این محبت‌ها را بدهد.

تقریح بہ

بدر و ماور مہربانم

چکیده

دیسک‌های دوار به طور گسترده در صنایع هوافضا مانند توربین‌های گاز، موتور جت، چرخ لنگر، اتومبیل‌ها، پمپ‌ها، کمپرسورها و غیره بکار می‌روند. این دیسک‌ها به طور معمول تحت بارهای مکانیکی-حرارتی (ترمو مکانیکی) و در سرعت‌های زاویه‌ای بالا بکار می‌روند. مطالعات اخیر نشان داده است که در سرعت زاویه‌ای مشابه، تنش‌ها در دیسک‌های دوار با ضخامت متغیر، بسیار کمتر از دیسک‌هایی با ضخامت یکنواخت هستند [۳۰، ۳۱]. از طرفی با توجه به اهمیتی که امروزه مواد مدرج تابعی (FGM-Functionally Graded Material) در صنایع هوافضا که به موادی با مقاومت حرارتی بالا و مقاوم از لحاظ مکانیکی نیاز است، پیدا کرده‌اند، بررسی دیسک‌های دوار FGM تحت شرایط حرارتی بالا می‌تواند بسیار مطلوب باشد.

از آنجا که سازه‌های مدرج تابعی بیشترین استفاده را در محیط‌های دما بالا دارند که در آن تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده مورد انتظار است، در نظر گرفتن این وابستگی به دما، برای پیش‌بینی دقیق پاسخ مکانیکی ضروری است. بنابراین می‌توان خواص مادی را به صورت تابعی غیرخطی از دما بیان نمود.

از روش‌هایی که برای تحلیل تنش در حوزه الاستیک تطابق خوبی با روش‌های موجود از خود نشان داده است، تئوری خواص مادی متغیر (VMP- Variable Material Properties) است. در این روش، پس از تقسیم دیسک به چندین حلقه، از شکل پاسخ الاستیک برای حل مسائل الاستیک-پلاستیک استفاده می‌شود.

در این پایان‌نامه، هدف، استفاده از تئوری خواص مادی متغیر برای تحلیل رفتار تنش‌ی دیسک‌های دوار مدرج تابعی، با ضخامت متغیر و سرعت زاویه‌ای ثابت، تحت بار ترمومکانیکی، با در نظر گرفتن خواص مادی وابسته به دما است. در ادامه، این تحلیل با روش رانگ-کوتا و تحلیل اجزای محدود (با استفاده از نرم‌افزار انسیس) مقایسه شده است.

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که روش‌های مذکور، بخصوص تئوری خواص مادی متغیر و روش اجزای محدود، در حوزه الاستیک و الاستیک-پلاستیک، تطابق نسبتاً خوبی با هم دارند؛ ضمن اینکه تئوری خواص مادی متغیر، تا حد قابل توجهی، نسبت به روش رانگ-کوتا، به زمان کمتری جهت ارائه پاسخ نیاز دارد.

همچنین مقایسه پاسخ‌های بدست آمده، با در نظر گرفتن وابستگی دمایی خواص و بدون در نظر گرفتن آن، نشان‌دهنده خطای بسیار زیاد حاصل از در نظر نگرفتن آن است.

در ادامه، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله شکل هندسی دیسک، شاخص درجه‌بندی، توزیع دمایی و ... بر رفتار تنش‌ی دیسک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این پارامترها تاثیر قابل توجهی بر تنش‌ها و تغییر شکل دیسک دارند.

واژه‌های کلیدی: دیسک دوار- مواد مدرج تابعی- تئوری خواص مادی متغیر- خواص وابسته به دما- روش رانگ-کوتا- تحلیل

ترموالاستیک- تحلیل ترموپلاستیک- تحلیل اجزای محدود

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	فصل اول: مقدمه
۳	۱-۱ مواد مدرج تابعی
۷	۲-۱ هدف پژوهش
۸	۳-۱ ساختار پایان نامه
۱۰	فصل دوم: مرور مطالعات پیشین در زمینه دیسک‌های دوار
۱۲	۱-۲ روش‌های تحلیلی
۱۲	۱-۱-۲ تحلیل دیسک‌های دوار با استفاده از تئوری خواص مادی متغیر
۱۵	۲-۱-۲ تحلیل دیسک‌های دوار با استفاده از انتگرال‌گیری مستقیم
۱۷	۲-۲ روش‌های نیمه‌تحلیلی
۲۰	۳-۲ روش‌های عددی
۲۰	۱-۳-۲ تحلیل اجزای محدود
۲۱	۲-۳-۲ روش ریاضیاتی عددی
۲۲	فصل سوم: تحلیل دیسک دوار مدرج تابعی با ضخامت متغیر
۲۴	۱-۳ مدل‌سازی دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر
۲۴	۱-۱-۳ فرضیات کلی حاکم بر دیسک دوار مورد بررسی
۲۴	۲-۱-۳ معادلات حاکم بر تحلیل دیسک دوار با ضخامت متغیر
۲۵	۱-۲-۱-۳ معادلات ترموالاستیک دیسک دوار با ضخامت متغیر
۲۸	۲-۲-۱-۳ معادلات ترموپلاستیک دیسک دوار با ضخامت متغیر
۲۹	۳-۱-۳ مدل‌های هندسی دیسک دوار
۳۰	۴-۱-۳ شرایط مرزی
۳۱	۱-۴-۱-۳ دیسک دوار حلقوی

۳۱	۳-۱-۴-۲ دیسک دوار توپر
۳۱	۳-۱-۵ منحنی‌های تنش-کرنش
۳۳	۳-۱-۶ معیار تسلیم
۳۳	۳-۱-۷ مدل‌های ریاضی به منظور بیان خواص مکانیکی ماده FGM
۳۶	۳-۱-۸ مدل‌های مورد بررسی
۳۶	۳-۲-۲ روش‌های تحلیل دیسک دوار
۳۶	۳-۲-۱ روش تحلیلی: تئوری خواص مادی متغیر
۳۹	۳-۲-۱-۱ تحلیل ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر، با استفاده از تئوری خواص مادی متغیر
۴۳	۳-۲-۱-۲ تحلیل الاستیک-پلاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر با استفاده از تئوری خواص مادی متغیر
۴۴	۳-۲-۱-۲-۱ طرح ارزیابی مدول موثر و نسبت پواسون موثر در تئوری خواص مادی موثر
۴۷	۳-۲-۲ تحلیل عددی: روش رانگ-کوتا
۴۷	۳-۲-۱-۲-۲ شرح روش رانگ-کوتا
۴۹	۳-۲-۲-۲ تحلیل الاستیک-پلاستیک دیسک دوار با ضخامت متغیر، با استفاده از روش رانگ-کوتا
۵۴	فصل چهارم: تحلیل اجزای محدود دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر
۵۵	۴-۱ معرفی روش اجزای محدود
۵۸	۴-۲ تحلیل اجزای محدود دیسک دوار FGM در نرم‌افزار انسیس
۵۹	۴-۲-۱ مدل‌سازی خواص دیسک دوار FGM
۶۱	۴-۲-۱-۲ مدل‌سازی هندسی دیسک دوار FGM
۶۲	۴-۲-۲ بارگذاری و اعمال شرایط مرزی بر دیسک دوار با سرعت زاویه‌ای ثابت
۶۳	۴-۲-۳ حل مسئله
۶۴	فصل پنجم: ارائه و بررسی نتایج
۶۶	۵-۱ بررسی پاسخ ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر
۶۶	۵-۱-۱ بررسی پاسخ ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و خواص مستقل از دما

۶۶	۱-۱-۱-۵ بررسی پاسخ ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر، با استفاده از روش اجزای محدود
۶۶	۱-۱-۱-۵ بررسی حساسیت نسبت به تعداد تقسیمات
۶۸	۲-۱-۱-۵ بررسی پاسخ اجزای محدود دیسک دوار FGM
۷۰	۲-۱-۱-۵ بررسی همگرایی تئوری خواص مادی متغیر و روش رانگ-کوتا
۷۱	۳-۱-۱-۵ بررسی پاسخ ترموالاستیک دیسک دوار با استفاده از تئوری خواص مادی متغیر، روش رانگ-کوتا و تحلیل اجزای محدود
۷۴	۴-۱-۱-۵ بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر
۸۲	۲-۱-۵ بررسی ترموالاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و خواص وابسته به دما
۸۴	۲-۵ بررسی ترموپلاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر
۸۴	۱-۲-۵ بررسی ترموپلاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و خواص مستقل از دما
۸۵	۱-۱-۲-۵ محاسبه مدول موثر و ضریب پواسون موثر در تئوری خواص مادی متغیر
	۲-۱-۲-۵ بررسی پاسخ ترموپلاستیک دیسک دوار با استفاده از تئوری خواص مادی متغیر، روش رانگ-کوتا و تحلیل اجزای محدود
۸۷	
۹۰	۲-۲-۵ بررسی ترموپلاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و خواص وابسته به دما
۹۰	۱-۲-۲-۵ محاسبه مدول موثر و ضریب پواسون موثر در تئوری خواص مادی متغیر
۹۳	۲-۲-۲-۵ بررسی معادلات ترموپلاستیک دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر و خواص وابسته به دما

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۹۶	
۹۷	۱-۶ نتیجه‌گیری
۹۹	۲-۶ پیشنهادات

۱۰۰ مراجع

۱۰۵	پیوست‌ها
۱۰۶	پیوست الف- نمودار جریانی تئوری خواص مادی متغیر
۱۰۹	پیوست ب- نمودار جریانی روش رانگ-کوتا

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵	شکل (۱-۱): تغییر پیوسته مواد در FGM [۵].
۶	شکل (۲-۱): تغییرات مرحله‌ای مواد در FGM [۵].
۲۵	شکل (۱-۳): نمای سه بعدی یک دیسک نازک با ضخامت متغیر [۳۲].
۲۶	شکل (۲-۳): پروفیل دیسک دوار و نیروهای وارد بر یک جز از دیسک دوار با ضخامت متغیر [۱۸].
۳۰	شکل (۳-۳): پروفیل ضخامت دیسک: (الف) مقعر؛ (ب) خطی؛ و (ج) محدب [۳۲].
۳۲	شکل (۴-۳): منحنی تنش-کرنش الاستیک-سخت‌شونده خطی.
۳۹	شکل (۵-۳): تقسیم دیسک به تعداد محدود زیرلایه.
۴۰	شکل (۶-۳): (الف) دیسک دوار، (ب) حلقه‌ای دلخواه در دیسک [۱۷].
۴۵	شکل (۷-۳): (الف) روش تصویرکردن؛ (ب) روش طول کمان؛ و (ج) قاعده نیوبر [۴۱].
۵۹	شکل (۱-۴): هندسه المان PLANE4۲ [۵۰].
۶۰	شکل (۲-۴): انتخاب ویژگی المان.
۶۱	شکل (۳-۴): انتخاب مدل مادی جدید.
۶۲	شکل (۴-۴): مدل هندسی دیسک دوار FGM با تعداد تقسیمات ۲۵ در نرم‌افزار انسیس.
۶۳	شکل (۵-۴): شبکه‌بندی دیسک دوار FGM با تعداد تقسیمات ۲۵ در نرم‌افزار انسیس.
۶۸	شکل (۱-۵): بررسی حساسیت تنش شعاعی نسبت به تعداد تقسیمات دیسک، در تحلیل اجزای محدود.
۶۸	شکل (۲-۵): کانتور جابجایی برای دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر.
۶۹	شکل (۳-۵): کانتور تنش شعاعی برای دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر.
۶۹	شکل (۴-۵): کانتور تنش محیطی برای دیسک دوار FGM با ضخامت متغیر.
۷۱	شکل (۵-۵): همگرایی پاسخ‌ها بر حسب تعداد تقسیمات دیسک دوار D۱، برای تئوری خواص مادی متغیر و روش رانگ-کوتا: (الف) تنش شعاعی؛ و (ب) جابجایی شعاعی.
۷۲	شکل (۶-۵): تنش‌های شعاعی و محیطی بدست آمده برای دیسک D۱، با استفاده از سه روش VMP، RK و FE.
۷۳	شکل (۷-۵): کرنش‌های شعاعی و محیطی بدست آمده برای دیسک D۱، با استفاده از روش‌های VMP، RK و FE.
۷۲	شکل (۸-۵): مقایسه جابجایی شعاعی بدست آمده برای دیسک دوار D۱، با استفاده از سه روش VMP، RK و FE.
۷۵	شکل (۹-۵): تاثیر تغییر پروفیل ضخامت بر پروفیل تغییر دما در دیسک D۱، با استفاده از روش VMP.

- شکل (۵-۱۰): تاثیر تغییر شاخص درجه‌بندی بر کسر حجمی فلز دیسک D₁، با استفاده از روش VMP. ۷۶
- شکل (۵-۱۱): تاثیر شاخص درجه‌بندی بر توزیع مدول الاستیسیته دیسک D₁، با استفاده از روش VMP. ۷۶
- شکل (۵-۱۲): تاثیر شاخص درجه‌بندی روی تنش‌های دیسک دوار D₁، با استفاده از روش VMP: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی. ۷۷
- شکل (۵-۱۳): تاثیر سرعت زاویه‌ای روی تنش‌های دیسک دوار D₁، با استفاده از روش VMP: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی. ۷۸
- شکل (۵-۱۴): تاثیر a/b بر روی توزیع تنش در دیسک دوار D₁، با استفاده از روش VMP: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی. ۸۰
- شکل (۵-۱۵): تاثیر تغییر دمای سطح خارجی (T_b) بر توزیع تنش در دیسک دوار D₁، با استفاده از روش VMP: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی. ۸۱
- شکل (۵-۱۶): مقایسه تنش‌های دیسک D₁ در حوزه الاستیک، در دو حالت در نظر گرفتن خواص وابسته به دما و خواص مستقل از دما: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی؛ و (ج) تنش ون‌مایسز. ۸۳
- شکل (۵-۱۷): مقایسه کرنش‌ها و جابجایی دیسک D₁ در حوزه الاستیک، در دو حالت در نظر گرفتن خواص وابسته به دما و خواص مستقل از دما: (الف) کرنش شعاعی؛ (ب) کرنش محیطی؛ و (ج) جابجایی شعاعی. ۸۴
- شکل (۵-۱۸): مدول موثر (برحسب Pa) برای دیسک دوار D₂ با ضخامت متغیر، در چهار دمای سطح خارجی: (الف) $T_b = 100^\circ C$ ؛ (ب) $T_b = 350^\circ C$ ؛ (ج) $T_b = 700^\circ C$ ؛ و (د) $T_b = 1000^\circ C$. ۸۶
- شکل (۵-۱۹): نسب پوآسون موثر برای دیسک دوار D₂ با ضخامت متغیر، در چهار دمای سطح خارجی: (الف) $T_b = 100^\circ C$ ؛ (ب) $T_b = 350^\circ C$ ؛ (ج) $T_b = 700^\circ C$ ؛ و (د) $T_b = 1000^\circ C$. ۸۷
- شکل (۵-۲۰): مقایسه تنش‌های شعاعی و محیطی بدست آمده برای دیسک D₃، با استفاده از روش‌های VMP، RK و FE. ۸۸
- شکل (۵-۲۱): مقایسه تنش ون‌مایسز بدست آمده برای دیسک D₃، با استفاده از روش‌های VMP، RK و FE. ۸۸
- شکل (۵-۲۲): مقایسه کرنش‌های شعاعی و محیطی بدست آمده برای دیسک D₃، با استفاده از روش‌های VMP، RK و FE. ۸۹
- شکل (۵-۲۳): مقایسه جابجایی‌های شعاعی بدست آمده برای دیسک D₃، با استفاده از روش‌های VMP، RK و FE. ۹۰
- شکل (۵-۲۴): مدول موثر (برحسب Pa) برای دیسک D₄ با ضخامت متغیر، با خواص مکانیکی وابسته به دما، در چهار دمای سطح خارجی: (الف) $T_b = 100^\circ C$ ؛ (ب) $T_b = 290^\circ C$ ؛ (ج) $T_b = 320^\circ C$ ؛ و (د) $T_b = 500^\circ C$. ۹۱
- شکل (۵-۲۵): نسبت پوآسون موثر برای دیسک D₄ با ضخامت متغیر، با خواص مکانیکی وابسته به دما، در چهار دمای سطح خارجی: (الف) $T_b = 100^\circ C$ ؛ (ب) $T_b = 290^\circ C$ ؛ (ج) $T_b = 320^\circ C$ ؛ و (د) $T_b = 500^\circ C$. ۹۲
- شکل (۵-۲۶): مقایسه تنش‌ها در حوزه الاستیک-پلاستیک در دو حالت در نظر گرفتن خواص وابسته به دما و خواص ۹۴

مستقل از دما: (الف) تنش شعاعی؛ (ب) تنش محیطی؛ و (ج) تنش ون مایسز.
شکل (۵-۲۷): مقایسه کرنش‌ها در حوزه الاستیک-پلاستیک، در دو حالت در نظر گرفتن خواص وابسته به دما
و خواص مستقل از دما: (الف) کرنش شعاعی؛ (ب) کرنش محیطی؛ و (ج) جابجایی شعاعی.

۹۵

فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۷	جدول (۱-۳): مشخصات مدل‌های بررسی شده در تحلیل ترموالاستیک
۳۸	جدول (۲-۳): مشخصات مدل‌های بررسی شده در تحلیل ترموپلاستیک
۶۷	جدول (۱-۵): اثر تعداد تقسیمات بر بیشینه تنش شعاعی در مدلسازی اجزای محدود
	جدول (۲-۵): بیشینه تنش‌ها و جابجایی در تحلیل ترموالاستیک با روش‌های خواص مادی متغیر، رانگ-کوتا و
۷۲	اجزای محدود
	جدول (۳-۵): مقادیر بیشینه تنش‌ها در تحلیل ترموپلاستیک با روش‌های خواص مادی متغیر، رانگ-کوتا و اجزای
۸۹	محدود

فهرست علائم

شعاع داخلی دیسک	a
شعاع خارجی دیسک	b
مدول الاستیسیته	E
مدول موثر	E_{eff}
مدول الاستیسیته موثر	E_f
مدول مماسی	E_t
نیروی داخلی هر لایه	F_1
نیروی خارجی هر لایه	F_2
نیروی شعاعی	F_r
ضخامت دیسک	h
ضخامت محور دیسک	h_a
ضخامت شعاع خارجی دیسک	h_o
ضخامت استوانه	H
شمارنده لایه دیسک	k
پارامتر هندسی ضخامت پارابولیک	m_1
پارامتر هندسی ضخامت هیپربولیک	m_2
شاخص درجه بندی	n
تعداد تقسیمات دیسک	N
خواص مکانیکی	p
خواص مادی سطح داخلی	p_i
خواص مادی سطح خارجی	p_o
فشار اعمال شده بر شعاع داخلی	P_{in}
پارامتر هندسی ضخامت پارابولیک	q
مختصه شعاعی	r
شعاع داخلی هر لایه	r_1
شعاع خارجی هر لایه	r_2
شعاع داخلی دیسک	r_i
شعاع خارجی دیسک	r_o
شعاع میانی لایه k ام	$r^{(k)}$
دما	T
تابع دما	$T(r)$
دمای داخلی هر لایه	T_1
دمای خارجی هر لایه	T_2
دمای سطح داخلی دیسک	T_i
دمای سطح خارجی دیسک	T_o
ضخامت لایه k ام	$t^{(k)}$

جابجایی شعاعی	u
ضریب انبساط حرارتی	α
ضریب انبساط حرارتی موثر	α_f
دلتای کرونگر	δ_{ij}
کرنش شعاعی	\mathcal{E}_r
کرنش محیطی	\mathcal{E}_θ
تانسور کرنش کل	\mathcal{E}_{ij}
تانسور کرنش الاستیک	\mathcal{E}_{ij}^e
تانسور کرنش پلاستیک	\mathcal{E}_{ij}^p
تانسور کرنش دمایی	\mathcal{E}_{ij}^T
کرنش پلاستیک معادل	\mathcal{E}_{eq}^p
کرنش پلاستیک شعاعی	\mathcal{E}_r^p
کرنش پلاستیک محیطی	\mathcal{E}_θ^p
تانسور انحرافی تنش	ϕ
ضریب هدایت حرارتی موثر	κ_f
نسبت پواسون	ν
نسبت پواسون موثر	ν_{eff}
مختصه محیطی	θ
چگالی	ρ
تنش تسلیم ماده	σ_0
تنش شعاعی	σ_r
تنش محیطی	σ_θ
تانسور تنش	σ_{ij}
تنش معادل	σ_{eq}
مولفه تنش نرمال در راستای X محور مختصات	σ_x
مولفه تنش نرمال در راستای Y محور مختصات	σ_y
مولفه تنش نرمال در راستای Z محور مختصات	σ_z
مولفه تنش برشی عمود بر محور X	τ_{yz}
مولفه تنش برشی عمود بر محور Y	τ_{zx}
مولفه تنش برشی عمود بر محور Z	τ_{xy}
سرعت زاویه‌ای	ω
تابع تنش	ψ
گرادیان دمایی	ΔT
مواد مدرج تابعی	FGM
المان بکار رفته در نرم‌افزار انسیس	PLANE42

فصل اول

مقدمه

فصل اول: مقدمه

دیسک‌های دوار کاربردهای مهندسی عملی بسیاری دارند که در آن تحت بارهای مکانیکی-حرارتی در سرعت‌های زاویه‌ای و دماهای بالا بکار می‌روند. کاربردهای این نوع سازه‌ها را می‌توان در روتور توربین‌های بخار و گاز، توربو ژنراتورها، موتورهای احتراق داخلی، موتورهای توربوجت‌ها، کمپرسورهای توربینی، چرخ لنگرها، اتومبیل‌ها و پمپ‌ها یافت. دیسک ترمز هم می‌تواند به عنوان نمونه‌ای از دیسک‌های دوار توپر باشد. در روتور توربین، همیشه امکان این هست که گرما از سطح خارجی به شفت و از آن به یاطاقان‌ها انتقال یابد و منجر به تاثیر معکوس روی کارایی و عملکرد آن شود. برای مقابله با این وضعیت و ممانعت از گرمای انتقال یافته میان شفت و یاطاقان‌ها، می‌توان دیسک را از مواد مدرج تابعی، با سطح خارجی کاملاً سرامیکی

و سطح داخلی کاملاً فلزی ساخت. از آنجا که خواص مقاوم گرمایی سرامیک در سطح خارجی از انتقال گرما جلوگیری می‌کند، فلز در سطح داخلی به تحمل تنش برای انتقال گشتاور به شفت کمک می‌کند [۲،۱].

۱-۱ مواد مدرج تابعی

با گسترش تحقیقات و تکنولوژی‌های نوین، شناخت و به کارگیری مواد نو در صنایع، 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. بکارگیری مواد کامپوزیتی، آلیاژهای حافظه‌دار، مواد پیزوالکتریک و غیره و گسترش دامنه استفاده از این مواد، از جمله تلاش‌های محققان جهت نیل به اهداف فوق می‌باشد. بطور کلی هر یک از مواد مورد اشاره دارای ویژگی و خواصی هستند که حوزه کاری هر دسته را محدود می‌نماید. مواد نو که در سال‌های اخیر تولید و مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

(الف) مواد کامپوزیت

(ب) آلیاژهای حافظه‌دار

(ج) مواد پیزوالکتریک

(د) نانو مواد

(ه) مواد مدرج تابعی

در سال‌های اخیر با توسعه موتورهای پر قدرت صنایع هوافضا، توربین‌ها و راکتورها و دیگر ماشین‌ها، نیاز به موادی با مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا احساس شده است. در سال‌های قبل، در صنایع هوافضا از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش و روکش قطعات با درجه کارکرد بالا استفاده می‌شد. این مواد عایق‌های بسیار خوبی بودند ولی مقاومت زیادی در برابر تنش‌های پس‌ماند نداشتند. تنش‌های پس‌ماند در این مواد مشکلات زیادی از جمله ایجاد حفره و ترک می‌نمود. بعدها برای رفع این مشکل از مواد کامپوزیت لایه‌ای استفاده شد. تنش‌های حرارتی در این مواد نیز موجب پدیده لایه‌لایه شدن می‌گردید. با توجه به این

مشکلات، طرح ماده‌ای مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا داشته و هم مشکل لایه‌لایه شدن نداشته باشد، ضرورت پیدا کرد [۳].

مفهوم مواد مدرج تابعی ابتدا در سال ۱۹۸۴ توسط ناینو (از دانشمندان علم مواد در منطقه سندایی ژاپن) در لابراتوار هوافضای ملی ژاپن و همکارانش به عنوان یک ماده برای روکش‌های حرارتی، قابل استفاده در کاربردهای فضایی و راکتورهای گداخت، معرفی شد [۴].

مواد مدرج تابعی، این فکر را در ذهن بشر راه داد که عملاً به جای اینکه تمام قطعه از مواد با ارزش و احیاناً گران‌قیمتی که مقاومت خوبی در برابر شرایط مرزی نامطلوب دارند، ساخته شود، می‌توان فقط در نواحی نزدیک مرزهایی با شرایط نامطلوب، از مواد مقاوم و گران‌تر استفاده نمود و باقی قطعه را با کمک مواد ارزان‌تر و یا خواص فیزیکی مطلوب دیگر پوشش داد. مرز نامطلوب مذکور می‌تواند حرارت بیش از حد یا بارگذاری مکانیکی زیاد و ... باشد [۵].

FGMها مواد کامپوزیتی با ریزساختار ناهمگن هستند که خواص مکانیکی آن‌ها شامل مدول الاستیسیته، چگالی، ضریب انتقال حرارت هدایتی و دیگر خواص آن، بطور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر جسم تغییر می‌کند. نوع رایج آن ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز است. این مواد از اختلاط پودر فلز و سرامیک بدست می‌آیند. ماده سرامیکی، به دلیل رسانش گرمایی کم، مقاومت حرارتی بالایی دارد و از طرفی ماده فلزی چکش‌خوار بوده، از شکستگی یا ترک به خاطر تنش حرارتی ممانعت به عمل می‌آورد. تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر، کاملاً پیوسته است؛ به طوری که یک سطح از جنس سرامیک خالص و سطح دیگر، فلز خالص است. بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو ماده وجود دارد. خواص مکانیکی نیز با توجه به نوع ترکیب، تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد [۴].

خصوصیات ساختاری این گونه مواد شامل نوع توزیع و اندازه فازها به طور تدریجی از سطحی به سطح دیگر تغییر می‌کند و همین تغییر تدریجی منجر به تغییر تدریجی خواص در FGM می‌شود. این تغییرات مواد، به صورت تدریجی، با تغییر نسبت حجمی دو ماده ساختاری ایجاد می‌شود.

این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده دارای خواص مکانیکی موثرتری نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای می‌باشد. در کامپوزیت‌های لایه‌ای، انتقال ناگهانی خصوصیات مواد از یک لایه به لایه دیگر باعث ایجاد تنش‌های نامطلوب بین لایه‌ای در فصل مشترک لایه‌ها می‌شود که این تنش‌ها می‌تواند باعث تغییر شکل پلاستیکی، ایجاد ترک و یا حتی جدایش لایه‌ها شود. اما در مواد FGM به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی، مشکلات عدم پیوستگی که در سازه‌های کامپوزیتی وجود دارد به وجود نمی‌آید و این اثرات نامطلوب می‌توانند با استفاده از این مواد برطرف شوند.

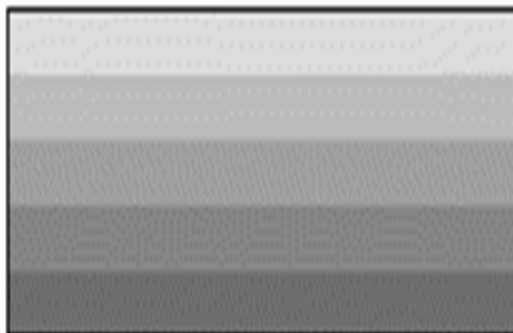
از نظر نوع تغییرات، FGMها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) تغییرات پیوسته: در ساده‌ترین FGMها دو جزء ماده مختلف به طور پیوسته از یکی به دیگری، همانطوری که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، تغییر می‌کند.

ب) تغییرات مرحله‌ای: اجزای مواد می‌توانند به صورت غیر پیوسته و مرحله به مرحله، بصورت شکل (۲-۱)، تغییر کنند.



شکل (۱-۱): تغییر پیوسته مواد در FGM [۶].



شکل (۱-۲): تغییرات مرحله‌ای مواد در FGM [۶].

البته هر دوی این حالات از نظر ساختاری FGM در نظر گرفته می‌شوند [۶]. بطور کلی در ارتباط با سازه‌های دارای ساختار FGM می‌توان چنین بیان نمود که این گونه سازه‌ها و یا مواد برخلاف سایر مواد مرکب که بصورت تک‌لایه و چندلایه هستند و در هر لایه خواص ماده منحصر به آن لایه می‌باشد، این مواد بصورت یک‌لایه بوده، ولی ترکیب مواد در همین یک لایه متغیر است. جزء فلزی مواد FGM می‌تواند آلومینیوم، مس، کرم، نیکل و یا سرب باشد. قسمت سرامیکی نیز می‌تواند از جنس سرامیک بدون اکسید- فلز مانند SiN_3 یا SiC ، سرامیک‌های بدون اکسید- با فلز مانند ZrC یا TiC ، سرامیک‌های با اکسید- بدون فلز مانند SiO_2 و یا سرامیک‌های با اکسید- با فلز مانند Al_2O_3 و ZrO_2 انتخاب شود [۴].

همانطور که در شکل (۱-۱) مشخص است در هیچ نقطه‌ای از این مواد گسستگی یا انفصال در ریز ساختار مشاهده نمی‌شود و تغییرات به صورت کاملاً یکنواخت و با نرخی مشخص به صورت پیوسته تغییر می‌کند. چون شکاف درونی یا مرزی در آن وجود ندارد، پیک‌های تنش در ساختارهای FGM، زمانی که نیروی خارجی به آنها اعمال می‌شود، میرا شده و در نتیجه از شکست بدلیل عدم پیوستگی درونی و تمرکز تنش جلوگیری می‌شود [۴].

از نکات بسیار برجسته این مواد، بهینه نمودن تغییرات تنش در آنها، با تغییر مناسب پروفیل تغییرات مواد ساختاری است.