بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعت آب و برق

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مکانیک و انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

تعمیم روش سلول واحد جهت تحلیل خرابی مواد مرکب الیاف کوتاه

تحقیق و تدوین:

محمدکاظم حسن‌زاده اقدم

استاد راهنما:

دکتر محمد جواد محمودی

پاییز ۱۳۹۱

دانشگاه صنعت آب و برق

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مکانیک و انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی آقای محمدکاظم حسن‌زاده اقدم

تحت عنوان

تعمیم روش سلول واحد جهت تحلیل خرابی مواد مرکب الیاف کوتاه

در تاریخ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

۳- استاد داور

۴- استاد داور

معاونت تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات بی‌دریغ استاد گرامی جناب آقای دکتر محمدجواد محمودی که در طول انجام این پایان‌نامه همواره مشوق این جانب بوده و با راهنمایی‌های پربار خود چراغ روشنی‌بخش راهم بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر:

اینجانب محمدکاظم حسن‌زاده اقدم تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب می‌باشد و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان‌نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح، پایین‌تر و بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می‌باشد.

محمدکاظم حسن‌زاده اقدم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه..... ۱

۱-۱- معرفی..... ۲

۱-۲- دسته بندی مواد مرکب..... ۲

۱-۲-۱- مواد مرکب الیافی..... ۲

۱-۲-۲- مواد مرکب لایه‌ایی..... ۳

۱-۲-۳- مواد مرکب ذره‌ایی..... ۳

۱-۲-۴- مواد مرکب با الیاف کوتاه..... ۳

۱-۲-۵- مواد مرکب ترکیبی..... ۳

۱-۳-مایکرومکانیک و ماکرومکانیک..... ۳

۱-۴- مدل‌های تحلیلی مایکرومکانیک..... ۴

۱-۵- مدل‌های عددی مایکرومکانیک..... ۷

۱-۶- مواد مرکب زمینه فلزی..... ۷

۱-۷- المان نماینده..... ۸

۱-۸- رئوس مطالب پایان‌نامه..... ۹

فصل دوم- بررسی رفتار الاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه..... ۱۱

۲-۱- هندسه المان نماینده..... ۱۲

۲-۲- نسبت منظر..... ۱۳

۲-۳- معادلات حاکم..... ۱۴

۲-۳-۱- بررسی رفتار ماده مرکب الیاف کوتاه تحت بارگذاری محوری..... ۱۴

۲-۳-۲- یافتن ضریب پواسون طولی..... ۱۸

۲-۳-۳- محاسبه ضریب انبساط حرارتی..... ۱۸

۲-۳-۴-بررسی رفتار ماده مرکب تحت بارگذاری برشی..... ۱۸

۲-۴- سلول واحد ساده شده گسترش یافته ESUC ۲۱
۲-۵- نتایج بارگذاری عمودی و برشی در حالت الاستیک..... ۲۱
۲-۵-۱- اثر درصد حجمی برخواص ترموالاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه در یک نسبت منظر مشخص..... ۲۴
۲-۵-۲- اثر نسبت منظر برخواص ترموالاستیک در یک درصد حجمی معین..... ۳۴
۲-۶- شروع تسلیم..... ۳۸
۲-۶-۱- تاثیر درصد حجمی الیاف بر رفتار منحنی شروع تسلیم..... ۴۰
۲-۶-۲-تاثیر تنش پسماند حرارتی بر رفتار منحنی شروع تسلیم..... ۴۱
۲-۶-۳-تاثیر درصد حجمی الیاف با در نظر گرفتن تنش پسماند حرارتی بر رفتار منحنی شروع تسلیم..... ۴۳
۲-۶-۴-تاثیر نسبت منظر الیاف بر رفتار منحنی شروع تسلیم..... ۴۵
فصل سوم- بررسی رفتار الاستیک-پلاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه..... ۴۷
۳-۱- معادلات حاکم..... ۴۸
۳-۲- تغییر شکل پلاستیک..... ۴۹
۳-۳- حل عددی تقریب متوالی..... ۵۰
۳-۴- نتایج حل الاستیک-پلاستیک..... ۵۲
۳-۵- اثر نسبت منظر بر پاسخ الاستیک-پلاستیک ماده مرکب..... ۵۷
فصل چهارم- بررسی رفتار الاستیک-ویسکوپلاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه..... ۵۹
۴-۱- معرفی چند مدل ویسکوپلاستیک..... ۶۰
۴-۱-۱- مدل ویسکوپلاستیک پرزینا..... ۶۰
۴-۱-۲- مدل فنر- دمپر- لغزنده..... ۶۱
۴-۱-۳- مدل ویسکوپلاستیک بادنر-پارتم..... ۶۲
۴-۲- معادلات ساختاری..... ۶۴
۴-۳- معادلات حاکم..... ۶۵
۴-۴- حل عددی مسئله الاستیک-ویسکوپلاستیک..... ۶۹

۴-۵- نتایج حل الاستیک-ویسکوپلاستیک.....۷۰
۴-۵-۱- نتایج حل الاستیک-ویسکوپلاستیک برای زمینه.....۷۰
۴-۵-۲- نتایج حل الاستیک-ویسکوپلاستیک برای ماده مرکب.....۷۲
۴-۵-۳- تاثیر تنش پسماند حرارتی بر پاسخ تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک.....۷۶
۴-۵-۴-تاثیر درصد حجمی الیاف بر منحنی تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک.....۸۳

فصل پنجم- تحلیل خرابی لایه میانی ماده مرکب الیاف کوتاه.....۸۵
۵-۱- معرفی چند مدل خرابی لایه میانی.....۸۶
۵-۱-۱- مدل جدایی لایه میانی انعطاف‌پذیر (FI).....۸۶
۵-۱-۲- مدل جدایی لایه میانی با نرمی ثابت (CCI).....۸۶
۵-۱-۳- مدل جدایی لایه میانی با نرمی گشایشی (ECI).....۸۷
۵-۱-۴- مدل خرابی فاز میانی نیدلمن (NI).....۸۸
۵-۲- معادلات حاکم.....۸۹
۵-۳- نتایج حل الاستیک-ویسکوپلاستیک با درنظر گرفتن خرابی لایه میانی.....۹۲
۵-۳-۱- منحنی شروع خرابی ماده مرکب الیاف کوتاه.....۹۶
۵-۳-۲- منحنی تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک تحت بارگذاری دو محوری.....۹۹

فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهاد.....۱۰۲
۶-۱- نتیجه‌گیری و بحث.....۱۰۳
۶-۲- پیشنهاد برای تحقیقات آینده.....۱۰۴

مراجع.....۱۰۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ پرسش پایه مایکرومکانیک [۱]..... ۴

شکل ۱-۲-الف مدل‌سازی ماده مرکب الیاف کوتاه در روش سلولی [۴]..... ۵

شکل ۱-۲-ب سلول تکرار شونده در ماده مرکب الیاف کوتاه در روش سلولی [۴]..... ۶

شکل ۱-۳ المان نماینده در آرایش شش ضلعی و آرایش مربعی [۱]..... ۸

شکل ۱-۴ آرایش واقعی الیاف درون زمینه [۱]..... ۹

شکل ۱-۵ الیاف با یکدیگر تماس ندارند [۲۹]..... ۹

شکل ۱-۶ تمام الیاف با هم تماس دارند [۲۹]..... ۹

شکل ۲-۱ چیدمان الیاف درون زمینه ۱۲

شکل ۲-۲ هندسه سلول‌ها در المان نماینده..... ۱۳

شکل ۲-۳ سلول انتخابی *ijk* شامل الیاف کوتاه..... ۱۳

شکل ۲-۴ المان نماینده ماده مرکب الیاف کوتاه تحت بارگذاری عرضی و محوری (بارگذاری نرمال)..... ۱۴

شکل ۲-۵ مدل سلول واحد ساده شده..... ۲۱

شکل ۳-۱ رفتار تنش-کرنش دو خطی برای تنش تک محوری..... ۵۰

شکل ۳-۲ رفتار الاستیک-پلاستیک ماده..... ۵۰

شکل ۳-۳ نمودار جریانی حل پلاستیک..... ۵۳

شکل ۴-۱ شبیه‌سازی مکانیکی در مدل ویسکوپلاستیک فنر-دمپر-لغزنده [۳۳]..... ۶۲

شکل ۴-۲ نمودار جریانی حل الاستیک-ویسکوپلاستیک..... ۷۱

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار ۲-۱ تغییرات مدول یانگ محوری و عرضی به مدول یانگ زمینه در برابر درصد حجمی الیاف، تمام سلول‌ها دارای یک خاصیت می‌باشند..... ۲۲
نمودار ۲-۲ تغییرات نسبت پوآسون طولی و عرضی در برابر درصد حجمی الیاف، تمام سلول‌ها دارای یک خاصیت می‌باشند..... ۲۳
نمودار ۲-۳ تغییرات مدول برشی طولی و عرضی به مدول برشی زمینه در برابر درصد حجمی الیاف، تمام سلول‌ها دارای یک خاصیت می‌باشند..... ۲۳
نمودار ۲-۴ تغییرات ضریب انبساط حرارتی طولی و عرضی در برابر درصد حجمی الیاف، تمام سلول‌ها دارای یک خاصیت می‌باشند..... ۲۴
نمودار ۲-۵-الف تغییرات مدول یانگ محوری در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب مس/اپوکسی با نسبت منظر ۶۰..... ۲۶
نمودار ۲-۵-ب تغییرات مدول یانگ محوری در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب مس/اپوکسی با نسبت منظر ۱۰۰..... ۲۷
نمودار ۲-۶-الف تغییرات مدول یانگ محوری در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه فولاد/اپوکسی با نسبت منظر ۵۰..... ۲۸
نمودار ۲-۶-ب تغییرات مدول یانگ عرضی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه فولاد/اپوکسی با نسبت منظر ۵۰..... ۲۸
نمودار ۲-۶-ج تغییرات مدول برشی طولی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه فولاد/اپوکسی با نسبت منظر ۵۰..... ۲۹
نمودار ۲-۷-الف تغییرات مدول یانگ محوری در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۰
نمودار ۲-۷-ب تغییرات مدول یانگ عرضی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۱

نمودار ۲-۷-ج تغییرات نسبت پوآسون طولی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۱
نمودار ۲-۷-د تغییرات نسبت پوآسون عرضی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۲
نمودار ۲-۷-ر تغییرات مدول برشی محوری در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۳
نمودار ۲-۷-م تغییرات ضریب انبساط حرارتی طولی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۳
نمودار ۲-۷-ن تغییرات ضریب انبساط حرارتی عرضی در مقابل درصد حجمی الیاف ماده مرکب الیاف کوتاه شیشه/اپوکسی با نسبت منظر ۳۰..... ۳۴
نمودار ۲-۸-الف تغییرات مدول یانگ محوری نسبت به مدول یانگ زمینه در مقابل نسبت منظر الیاف با درصد حجمی ۲۰٪..... ۳۵
نمودار ۲-۸-ب تغییرات مدول یانگ عرضی نسبت به مدول یانگ زمینه در مقابل نسبت منظر الیاف با درصد حجمی ۲۰٪..... ۳۶
نمودار ۲-۸-ج تغییرات نسبت پوآسون طولی در مقابل نسبت منظر الیاف با درصد حجمی ۲۰٪..... ۳۷
نمودار ۲-۹ تغییرات ضریب انبساط حرارتی طولی در مقابل نسبت منظر..... ۳۷
نمودار ۲-۱۰ منحنی تسلیم تیتانیوم..... ۳۸
نمودار ۲-۱۱-الف منحنی تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-y با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰..... ۳۹
نمودار ۲-۱۱-ب منحنی تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-z با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰..... ۴۰
نمودار ۲-۱۲-الف تاثیر درصد حجمی الیاف بر منحنی شروع تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-y با نسبت منظر ۲۰..... ۴۱
نمودار ۲-۱۲-ب تاثیر درصد حجمی الیاف بر منحنی شروع تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-z با نسبت منظر ۲۰..... ۴۱

نمودار ۲-۱۳-الف تاثیر تنش پسماند حرارتی بر منحنی تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-y با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰..... ۴۲
نمودار ۲-۱۳-ب تاثیر تنش پسماند حرارتی بر منحنی تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-z با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰..... ۴۳
نمودار ۲-۱۴-الف تاثیر درصد حجمی الیاف با وجود تنش پسماند حرارتی بر منحنی شروع تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-y..... ۴۳
نمودار ۲-۱۴-ب تاثیر درصد حجمی الیاف با وجود تنش پسماند حرارتی بر منحنی شروع تسلیم ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-z ۴۴
نمودار ۲-۱۵-الف تاثیر نسبت منظر الیاف بر منحنی تسلیم ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-y..... ۴۵
نمودار ۲-۱۵-ب تاثیر نسبت منظر الیاف بر منحنی تسلیم ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم در صفحه x-z..... ۴۵
نمودار ۳-۱ منحنی تنش-کرنش واقعی تیتانیوم [۴۰]..... ۵۲
نمودار ۳-۲ منحنی تنش-کرنش الاستیک-پلاستیک آلیاژ تیتانیوم..... ۵۴
نمودار ۳-۳-الف منحنی تنش-کرنش طولی الاستیک-پلاستیک ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کارباید/تیتانیوم با درصد حجمی ۳۳٪..... ۵۵
نمودار ۳-۳-ب منحنی تنش-کرنش عرضی الاستیک-پلاستیک ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کارباید/تیتانیوم با درصد حجمی ۳۳٪..... ۵۶
نمودار ۳-۴-الف منحنی تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم با نسبت منظر ۱۰ و درصد حجمی ۳۳٪..... ۵۶
نمودار ۳-۴-ب منحنی تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کارباید/تیتانیوم با نسبت منظر ۱۰ و درصد حجمی ۳۳٪..... ۵۷
نمودار ۳-۵ اثر نسبت منظر بر پاسخ تنش-کرنش طولی الاستیک-پلاستیک..... ۵۸
نمودار ۴-۱ پاسخ تنش-کرنش آلیاژ تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش $(1/s)$ 10^{-4} [۳۱]..... ۶۴

نمودار ۴-۲-الف پاسخ تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک آلیاژ تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) ۸۳۳×۱۰^{-۶} ۷۲
نمودار ۴-۲-ب پاسخ تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک آلیاژ تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) ۸۳۳×۱۰^{-۶} ۷۲
نمودار ۴-۳-الف پاسخ تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف بلند برن/آلومینیوم با درصد حجمی ۴۶٪ و نرخ کرنش (۱/s) ۰/۰۱ ..... ۷۳
نمودار ۴-۳-ب پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف بلند برن/آلومینیوم با درصد حجمی ۴۶٪ و نرخ کرنش (۱/s) ۰/۰۱ ..... ۷۴
نمودار ۴-۴-الف پاسخ تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه برن/آلومینیوم با نسبت منظر ۲۰، درصد حجمی ۴۶٪ و نرخ کرنش (۱/s) ۰/۰۱ ..... ۷۵
نمودار ۴-۴-ب پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه برن/آلومینیوم با نسبت منظر ۲۰، درصد حجمی ۴۶٪ و نرخ کرنش (۱/s) ۰/۰۱ ..... ۷۵
نمودار ۴-۵ پاسخ تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربايد/آلومینیوم با درصد حجمی ۱۳/۲٪ و نسبت منظر ۵ ..... ۷۶
نمودار ۴-۶-الف پاسخ کشش طولی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربايد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱۰^{-۴}$ ۷۷
نمودار ۴-۶-ب پاسخ کشش طولی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربايد/تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱۰^{-۴}$ ۷۸
نمودار ۴-۷-الف پاسخ کشش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربايد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰ و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱۰^{-۴}$ ۷۹
نمودار ۴-۷-ب پاسخ کشش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربايد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰، در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱۰^{-۴}$ ۷۹
نمودار ۴-۸-الف پاسخ کشش عرضی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربايد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱/۶۶۷\times۱۰^{-۴}$ ۸۰
نمودار ۴-۸-ب پاسخ کشش عرضی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربايد/تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (۱/s) $۱/۶۶۷\times۱۰^{-۴}$ ۸۱

نمودار ۴-۹-الف پاسخ کشش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰، در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (1/s) $۱/۶۶۷\times۱۰^{-۴}$.....۸۲
نمودار ۴-۹-ب پاسخ کشش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰، در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش (1/s) $۱/۶۶۷\times۱۰^{-۴}$.....۸۲
نمودار ۴-۱۰-الف تاثیر درصد حجمی الیاف با در نظر گرفتن تنش پسماند بر منحنی تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۸۳
نمودار ۴-۱۰-ب تاثیر درصد حجمی الیاف با در نظر گرفتن تنش پسماند بر منحنی تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۸۴
نمودار ۵-۱ مقایسه رفتار ساختاری لایه میانی با مدل‌های لایه میانی انعطاف‌پذیر، نرمی ثابت، نرمی گشایشی و نیدلمن.....۸۹
نمودار ۵-۲-الف پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۹۳
نمودار ۵-۲-ب پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد.....۹۴
نمودار ۵-۳ تاثیر تنش پسماند حرارتی و خرابی در لایه میانی بر ماده مرکب الیاف بلند سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۹۴
نمودار ۵-۴-الف پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰ و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۹۵
نمودار ۵-۴-ب پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰ و دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد.....۹۶
نمودار ۵-۵ تاثیر تنش پسماند حرارتی و خرابی در لایه میانی بر ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم با نسبت منظر ۲۰ و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد.....۹۷
نمودار ۵-۶-الف منحنی شروع خرابی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-y با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰.....۹۸
نمودار ۵-۶-ب منحنی شروع خرابی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابد/تیتانیوم در صفحه x-z با درصد حجمی ۳۳٪ و نسبت منظر ۲۰.....۹۸

نمودار ۵-۷ پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابید/تیتانیوم تحت بارگذاری دو محوری برابر عرضی/عرضی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نسبت منظر ۲۰.....۹۹
نمودار ۵-۸-الف پاسخ تنش-کرنش عرضی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابید/تیتانیوم تحت بارگذاری دو محوری برابر طولی/عرضی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نسبت منظر ۲۰.....۱۰۰
نمودار ۵-۸-ب پاسخ تنش-کرنش طولی ماده مرکب الیاف کوتاه سیلیکون کاربابید/تیتانیوم تحت بارگذاری دو محوری برابر طولی/عرضی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و نسبت منظر ۲۰.....۱۰۱

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ خواص ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد [۳۵]..... ۲۲

جدول ۲-۲ مشخصات مواد مرکب شیشه/نایلون و شیشه/پلی‌پروپیلن [۴]..... ۲۴

جدول ۲-۳–الف مقایسه نسبت مدول یانگ محوری به مدول یانگ زمینه (E_{11}/E_m)..... ۲۵

جدول ۲-۳–ب مقایسه نسبت مدول یانگ محوری به مدول یانگ زمینه (E_{11}/E_m)..... ۲۵

جدول ۲-۴ مشخصات ماده مرکب مس/اپوکسی [۴]..... ۲۶

جدول ۲-۵ مشخصات ماده مرکب فولاد /اپوکسی [۴]..... ۲۷

جدول ۲-۶ خواص ماده مرکب شیشه/اپوکسی [۲۴]..... ۲۹

جدول ۲-۷ خواص ماده مرکب [۳۰]..... ۳۵

جدول ۳-۱ خواص آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) [۴۰]..... ۵۴

جدول ۳-۲ خواص سیلیکون کارباید [۴۰]..... ۵۵

جدول ۴-۱ خواص آلیاژ تیتانیوم (Ti-15V-3Cr) [۳۵]..... ۷۰

جدول ۴-۲ ثوابت الاستیک و غیرالاستیک برن/آلومینیوم [۳۴]..... ۷۳

جدول ۴-۳ ثوابت الاستیک و غیرالاستیک سیلیکون کارباید/آلومینیوم [۳۷]..... ۷۴

جدول ۴-۴ خواص سیلیکون کارباید (SCS-6) [۳۵]..... ۷۷

جدول ۵-۱ خواص فاز میانی در ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم [۳۹]..... ۹۲

فهرست علایم

نسبت منظر	s
طول المان حجمی نماینده در جهت محور x	L_c
طول المان حجمی نماینده در جهت محور y	L_r
طول المان حجمی نماینده در جهت محور z	L_h
شماره سلول	ijk
طول سلول در جهت محور x	a_i
طول سلول در جهت محور y	b_j
طول سلول در جهت محور z	d_k
تنش ماکرو	S
کرنش ماکرو	$\bar{\varepsilon}$
تنش داخلی در سلول ijk	σ^{ijk}
کرنش داخلی در سلول ijk	ε^{ijk}
مدول یانگ	E
نسبت پوآسون	v
ضریب انبساط حرارتی	α
تغییر درجه حرارت	ΔT
کرنش پلاستیک	ε_p
نمو کرنش پلاستیک	$d\varepsilon_p$
نیرو	f
ماتریس ضرایب	A, B
کرنش حرارتی	$\bar{\varepsilon}_T$
تنش برشی	τ
مدول برشی	G
تنش تسلیم	σ_Y

تنش تسلیم عرضی	S_Y , S_x
تنش تسلیم طولی	S_z
کرنش تسلیم	ε_Y
شیب بخش پلاستیک	H
تعداد مراحل حل	Q
شماره‌ی هر مرحله	q
نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}$
زمان	t
افزاینده کرنش پلاستیک	$\dot{\lambda}$
تنش موثر	$\overline{\sigma}^t$
ثابت سخت‌شوندگی ماده	h
کرنش ویسکوپلاستیک موثر انباشته شده	k^t
کرنش انحراف ویسکوپلاستیک	$\dot{e}_{ij}^{vp,t}$
ضریب ویسکوزیته	η_p
تنش انحراف	Σ_{ij}
تابع جریان در مدل بادنر-پارتم	Λ
پارامترهای غیر الاستیک در مدل بادنر-پارتم	D_0, n, m, Z_1, Z_0
نامتغیر دوم تنش انحراف	J_2
کار پلاستیک	W_p
پارامترهای تجربی جدایی	R_n, R_t
جابجایی نرمال و مماسی	u_n, u_t
تنش جدایی	σ_{DB}
ثوابت تجربی مدل لایه میانی نرمی گشایشی	Λ_0, B_0

چکیده

در این پایان‌نامه، مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده گسترش یافته به منظور مطالعه رفتار کلی ماده مرکب الیاف کوتاه هم‌راستا ارائه می‌شود. المان حجمی نماینده مدل، شامل $c\times r\times h$ سلول در ۳ بعد است که در آن الیاف کوتاه داخل سلول‌های زمینه توزیع می‌شوند. با استفاده از این مدل میکرومکانیکی خواص ترموالاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه استخراج می‌شود. با روش تقریبات متوالی و معیار تسلیم فن-مایزز منحنی تنش-کرنش الاستیک-پلاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه که رفتار الیاف و زمینه به ترتیب الاستیک والاستیک-پلاستیک می‌باشد، تحت بارگذاری تک محوری و با اعمال تنش پسماند حرارتی بدست می‌آید. رفتار الاستیک-ویسکوپلاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه با استفاده از مدل ویسکوپلاستیک بادنر-پارتم با اعمال اثر تنش پسماند حرارتی استخراج می‌شود. جهت حصول منحنی تنش-کرنش الاستیک-ویسکوپلاستیک رفتار الیاف و زمینه به ترتیب الاستیک و الاستیک-ویسکوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود. اثرات شروع و گسترش خرابی لایه میانی با در نظر گرفتن تنش پسماند حرارتی بر رفتار الاستیک-ویسکوپلاستیک ماده مرکب الیاف کوتاه هم راستا تحت بارگذاری تک محوری و دو محوری با استفاده از مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده گسترش یافته مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت تحلیل خرابی لایه میانی مدل جدایی لایه میانی با نرمی ثابت و مدل جدایی لایه میانی با نرمی گشایشی و همچنین مدل خرابی فاز میانی نیدلمن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین منحنی‌های خرابی در صفحات مختلف با در نظر گرفتن خرابی در لایه میانی و اثر تنش پسماند حرارتی ناشی از فرآیند ساخت برای ماده مرکب الیاف کوتاه استخراج می‌شود. نتایج مشخص کرده است که جهت حصول پیش‌بینی‌های دقیق‌تر بایستی هر دو عامل خرابی لایه میانی و اثر تنش پسماند حرارتی در مدل اعمال شود.

کلمات کلیدی: میکرومکانیک، ماده مرکب الیاف کوتاه، الاستیک-ویسکوپلاستیک، خرابی لایه میانی، تنش پسماند حرارتی