

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت اطلاعات
جمهوری اسلامی ایران



دانشکده مهندسی مکانیک

۱۳۸۰ / ۸ / ۲۰

درصد ترکیب بهینه الیاف در مواد مرکب

حمیدرضا سخنور

013828

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

استاد راهنما

دکتر محمود مهرداد شکریه

زمستان ۱۳۷۹

۳۷۱۴۳

تقدیم به :

پدر و مادر بزرگوارم

چکیده :

ماده مرکب، از دو ماده (الیاف و ماتریس) با خواص مکانیکی متفاوت ساخته می‌شود. خواص مکانیکی این ماده، ترکیبی از خواص مکانیکی مواد متشکله می‌باشد. درصد ترکیب (نسبت حجمی یا وزنی) مواد تشکیل دهنده، نقش عمده‌ای در خواص مکانیکی ماده حاصل دارد. هدف از انجام این تحقیق، تعیین درصد ترکیب بهینه برای رسیدن به بهترین خواص استحکامی مواد مرکب لایه‌ای (Laminated Composite Materials) می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، خواص استحکامی، مطلوب به نظر می‌رسند که دارای نقطه حداکثر مطلق بر حسب درصد ترکیب اجزاء سازنده باشند.

تئوری‌های میکرومکانیک متعددی جهت پیش‌بینی خواص استحکامی مواد مرکب با توجه به درصد ترکیب، در مقالات و کتب مختلف ارائه شده است. آزمایش‌هایی نیز، مطابق با استاندارد ASTM، جهت بررسی نتایج این تئوری‌ها با واقعیت انجام گرفته است.

بر اساس تحقیقات به عمل آمده، استحکام فشار طولی (درجهت الیاف) ماده مرکب عمدتاً جهت اندازه‌گیری درصد ترکیب بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق مطلب فوق توسط تئوری‌های استحکامی مختلف مورد تایید قرار گرفته و با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه می‌شود. از طرفی استحکام برش درون صفحه‌ای بر خلاف آنچه تاکنون ارائه شده است، می‌تواند نقش موثری در تعیین درصد ترکیب بهینه داشته باشد. جهت اثبات این فرضیه، آزمایش‌های برشی بر روی ماده مرکب انجام گرفته که نتایج حاصل از آنها بر صحت فرضیه فوق دلالت دارد. لذا اکثر فعالیت‌های بخش‌های تئوری و آزمایشی این تحقیق، بر دو خاصیت استحکام فشار طولی و برش درون صفحه‌ای ماده مرکب متمرکز شده است. برای تکمیل منحنی‌های خواص مذکور بر حسب درصد ترکیب الیاف، در درصد ترکیب الیاف صفر (فقط ماتریس)، آزمایش‌های فشاری و برشی بر روی نمونه‌هایی از جنس ماتریس انجام شده است.

جهت بررسی ترکیب نتایج آزمایشی فوق، با استفاده از معیارهای تخریب (به ویژه معیار اصلاح شده Hashin)، آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های خارج از محور (Off-Axis) 20° انجام شده است. پس از مقایسه نتایج تئوری و آزمایشی خارج از محور، می‌توان درصد ترکیب بهینه در مواد مرکب را تعیین نمود. از طرف دیگر با اعمال ضریب کاهش استحکام، حد پایین تنش مجاز و میزان مجاز انحراف از درصد ترکیب بهینه بدست می‌آید که این نتیجه به عنوان معیار کنترل کیفی به کار گرفته خواهد شد.

تقدیر و تشکر :

بعد از سپاس خداوند متعال، بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادر عزیزم که با عشق، علاقه و سعه صدر وافر مرا یاری کرده و در این راه مشوق بنده بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

از آقای دکتر محمود مهرداد شکریه که مسئولیت راهنمای این پروژه را بر عهده داشتند و با رهنمودهای ارزشمند خویش همواره مرا یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از صنعت هوایی و مواد ترکیبی فجر و کلیه همکارانی که در آن مجتمع به طریقی در راستای انجام این تحقیق مرا یاری نموده‌اند، به ویژه گروه‌های تست سازه، ساخت و کنترل کیفیت، کمال تشکر را دارم.

دی ۱۳۷۹

علائم اختصاری

		<u>نمادها</u>	
کرنش	ε	قطر	d
زاویه جهت تک لایه	θ	سفتی الاستیک	E
زاویه ناراستایی	ϕ	کرنش تخریب یا حد نهایی	e
جرم حجمی	ρ	سفتی برشی	G
تنش	σ	نسبت حجمی	k
ضریب پواسون	ν	استحکام	S
		فضای بین لایه‌ای یا بین الیافی	s
		ضخامت	t

زیر نویس ها

کشش	T	فشار	C
تک جهته	U	خاصیت الیاف	f
حباب	ν	خاصیت تک لایه	L
محورهای مختصات محلی (Off-Axis)	x,y,z	خاصیت ماتریس	m
محورهای مختصات مادی (On-Axis)	1,2,3	برش	S

۱	فصل اول : مقدمه	۱
۶	فصل دوم : بیان مسأله	۶
۶	۱-۲- صورت مسأله	۶
۶	۲-۲- روش حل مسأله	۶
	۱-۲-۲- مطالعات اولیه در مبحث استحکام مواد مرکب و ارائه مدل های میکرومکانیک	
۷	استحکام تک لایه	۷
۷	۲-۲-۲- تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی اجزاء سازنده	۷
	۳-۲-۲- ارائه منحنی های استحکام- درصد ترکیب الیاف با استفاده از مدل های	
۸	میکرومکانیک	۸
۹	۴-۲-۲- ارائه منحنی های استحکام- درصد ترکیب الیاف توسط آزمایش	۹
۱۱	۵-۲-۲- تعیین آزمایشی درصد ترکیب موجود در مواد مرکب	۱۱
۱۱	۶-۲-۲- تعیین درصد ترکیب بهینه	۱۱
۱۳	فصل سوم : تئوری های میکرومکانیک استحکام	۱۳
۱۳	۱-۳- مقدمه	۱۳
۱۳	۱-۱-۳- تعریف مواد مرکب لایه ای و ساختار فیزیکی آنها	۱۳
۱۵	۲-۳- استحکام های تک محوره و مودهای تخریب تک لایه	۱۵
۱۵	۱-۲-۳- تنش های تخریب یا استحکام های تک لایه	۱۵
۱۶	۲-۲-۳- منغیرهای فیزیکی موثر بر استحکام تک لایه	۱۶
۱۶	۳-۲-۳- مودهای تخریب تک لایه	۱۶
۱۶	۱-۳-۲-۳- مودهای تخریب فشار طولی تک لایه	۱۶
۱۸	۲-۳-۲-۳- مودهای تخریب برش درون صفحه ای تک لایه	۱۸
۱۹	۳-۳- پیش بینی میکرومکانیک استحکام های تک محوره تک لایه	۱۹
۱۹	۱-۳-۳- روش های تحلیل	۱۹
۲۰	۲-۳-۳- استحکام فشار طولی تک لایه	۲۰
۲۰	۱-۲-۳-۳- روش های مقاومت مصالحی	۲۰

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۲۰	۳-۳-۲-۱-۱- قانون اختلاط
۲۰	۳-۳-۲-۱-۲- جزء کمانش بدون ناراستایی و انحناء اولیه الیاف
۲۴	۳-۳-۲-۱-۳- جزء کمانش، ناراستایی و انحناء اولیه الیاف
۲۸	۳-۳-۲-۱-۴- از هم گسیختگی کشش عرضی به سبب کرنش‌های پواسونی
۲۹	۳-۳-۲-۱-۵- تخریب برشی بدون کمانش
۲۹	۳-۳-۲-۲- روش‌های پیشرفته
۳۱	۳-۳-۳- استحکام برش درون صفحه‌ای
۳۱	۳-۳-۱- روش‌های مقاومت مصالحی
۳۱	۳-۳-۱-۱- ضریب تمرکز تنش
۳۲	۳-۳-۱-۲- ضریب بزرگنمایی کرنش
۳۳	۳-۳-۲- روش‌های پیشرفته
۳۵	۳-۴- معادلات ساده شده مایکرو مکانیک مواد مرکب
۳۶	۳-۴- نتیجه‌گیری
۳۷	فصل چهارم : مدل‌سازی
۳۷	۴-۱- مقدمه
۳۷	۴-۲- تئوری‌های تخریب در مواد مرکب
۳۷	۴-۲-۱- معیار Tsai-Wu
۳۸	۴-۲-۲- معیار Hashin
۴۰	۴-۲-۳- معیار اصلاح شده Hashin
۴۱	۴-۳- نحوه تعیین درصد ترکیب بهینه الیاف
۴۱	۴-۳-۱- ارائه مدل
۴۲	۴-۳-۲- مقایسه مدل با تخریب واقعی ماده مرکب
۴۳	۴-۳-۱- آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های خارج از محور
۴۴	۴-۳-۲- آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های خارج از محور
۴۶	۴-۳-۳- تعریف زاویه انتقال و تاثیر آن بر نتایج اولیه برنامه کامپیوتری
۴۸	۴-۴- نحوه تعیین میزان مجاز انحراف از درصد ترکیب بهینه الیاف

۴-۵- نتیجه‌گیری	۴۹
فصل پنجم: ارائه نتایج تئوری و آزمایشی	۵۱
۱-۵- مقدمه	۵۱
۲-۵- ارائه مشخصات فیزیکی و مکانیکی اجزاء سازنده	۵۱
۳-۵- بررسی نتایج تئوری‌های میکرومکانیک استحکام	۵۲
۱-۳-۵- قانون اختلاط	۵۲
۲-۳-۵- جزء کمانش الیاف	۵۳
۳-۳-۵- از هم گسیختگی کشش عرضی به سبب کرنش‌های پواسونی	۵۴
۴-۳-۵- تخریب برشی بدون کمانش	۵۵
۵-۳-۵- روش‌های پیشرفته	۵۵
۶-۳-۵- ضریب تمرکز تنش	۵۶
۷-۳-۵- ضریب بزرگنمایی کرنش	۵۶
۸-۳-۵- معادلات ساده شده میکرومکانیک مواد مرکب	۵۷
۹-۳-۵- نتیجه‌گیری	۵۷
۴-۵- بررسی انواع آزمایشات، نحوه انجام و نتایج بدست آمده از آنها	۵۸
۱-۴-۵- انجام آزمایش‌های استحکامی بر روی ماتریس	۶۰
۱-۱-۴-۵- آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های استاندارد ماتریس	۶۱
۱-۱-۴-۵- مقدمه	۶۱
۲-۱-۴-۵- نحوه انجام آزمایش کشش ماتریس	۶۲
۳-۱-۴-۵- ارائه نتایج آزمایش کشش ماتریس	۶۳
۲-۱-۴-۵- آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های استاندارد ماتریس	۶۵
۱-۲-۴-۵- مقدمه	۶۵
۲-۲-۴-۵- نحوه انجام آزمایش فشار ماتریس	۶۶
۳-۲-۴-۵- ارائه نتایج آزمایش فشاری ماتریس	۶۸
۳-۱-۴-۵- آزمایش‌های برشی بر روی نمونه‌های استاندارد ماتریس	۷۰
۱-۳-۴-۵- مقدمه	۷۰

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۷۱	..... نحوه انجام آزمایش برشی ماتریس ۲-۳-۱-۴-۵
۷۳	..... ارائه نتایج آزمایش برشی ماتریس ۳-۳-۱-۴-۵
۷۵	..... نحوه تعیین درصد ترکیب الیاف ۲-۴-۵
۷۵	..... مقدمه ۱-۲-۴-۵
۷۵	..... روش‌های تعیین درصد حجمی الیاف ۲-۲-۴-۵
۷۵	..... تعیین درصد حجمی الیاف مطابق با استاندارد ASTM D5300 ۱-۲-۲-۴-۵
۷۶	..... تعیین درصد حجمی واقعی الیاف با در نظر گرفتن حباب ۲-۲-۲-۴-۵
۷۶	..... روش‌های تعیین درصد وزنی اجزاء سازنده ماده مرکب ۳-۲-۴-۵
۷۶	..... تعیین درصد وزنی رزین و الیاف مطابق با استاندارد ASTM D2584 ۱-۳-۲-۴-۵
۷۷	..... تعیین درصد وزنی رزین و الیاف مطابق با استاندارد ASTM D3171 ۲-۳-۲-۴-۵
۷۷	..... تعیین درصد حجمی حباب مطابق با استاندارد ASTM D2734 ۴-۲-۴-۵
۷۷	..... ارائه نتایج آزمایش تعیین درصد ترکیب ۵-۲-۴-۵
۸۲	..... آزمایش فشار طولی بر روی نمونه‌های استاندارد ماده مرکب ۳-۴-۵
۸۲	..... مقدمه ۱-۳-۴-۵
۸۳	..... نحوه انجام آزمایش فشار طولی ماده مرکب ۲-۳-۴-۵
۸۳	..... ارائه نتایج آزمایش فشار طولی ماده مرکب ۳-۳-۴-۵
۸۷	..... آزمایش برش درون صفحه‌ای بر روی نمونه‌های استاندارد ماده مرکب ۴-۴-۵
۸۷	..... مقدمه ۱-۴-۴-۵
۸۸	..... نحوه انجام آزمایش برش درون صفحه‌ای ماده مرکب ۲-۴-۴-۵
۹۰	..... ارائه نتایج آزمایش برش درون صفحه‌ای ماده مرکب ۳-۴-۴-۵
۹۶	..... آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های خارج از محور ماده مرکب ۵-۴-۵
۹۶	..... مقدمه ۱-۵-۴-۵
۹۷	..... نحوه انجام آزمایش فشاری خارج از محور ماده مرکب ۲-۵-۴-۵
۹۸	..... ارائه نتایج آزمایش فشاری خارج از محور ماده مرکب ۳-۵-۴-۵
۱۰۴	..... فصل ششم : تحلیل نتایج و ارزیابی مدل
۱۰۴	..... مقدمه ۱-۶

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱۰۴	حجمی الیاف	۲-۶- ارائه منحنی آزمایشی استحکام فشار طولی و برش درون صفحه‌ای بر حسب درصد
۱۰۷	۳-۶- تعیین زاویه انتقال و ارائه آن بر حسب درصد حجمی الیاف	
۱۰۸	۴-۶- تعیین درصد حجمی بهینه الیاف با استفاده از مدل	
۱۱۰	۵-۶- مقایسه نتایج آزمایش فشاری خارج از محور 20° با نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل .	
۱۱۲	۶-۶- تعیین میزان مجاز انحراف از درصد حجمی بهینه الیاف	
۱۱۵	۷-۶- نتیجه‌گیری کلی و ارائه پیشنهادات	
۱۱۸	ضمائم	
۱۱۸	ضمیمه A	
۱۱۹	ضمیمه B	
۱۲۰	ضمیمه C	
۱۲۱	ضمیمه D	
۱۲۳	مراجع	

فصل دوم

- ۱-۲ نمای شماتیک از مدل مایکرومکانیک استحکام‌های تک‌محوره تک‌لایه، بر حسب درصد ترکیب الیاف. الف) کشش طولی، ب) فشار طولی، ج) کشش و فشار عرضی و د) برش درون صفحه‌ای ۸
- ۲-۲ نمای شماتیک از منحنی استحکام برش درون صفحه‌ای پیش‌بینی شده، بر حسب درصد ترکیب الیاف ۱۰
- ۳-۲ نمای شماتیک از منحنی آزمایشی استحکام بر حسب درصد ترکیب الیاف و تعریف نقاط روی آن ۱۰
- ۴-۲ نمای شماتیک از منحنی آزمایشی استحکام فشار طولی و برش درون صفحه‌ای بر حسب درصد ترکیب الیاف ۱۲
- ۵-۲ نمای شماتیک از منطقه امن با تغییرات درصد ترکیب الیاف ۱۲

فصل سوم

- ۱-۳ الف) مواد مرکب لایه‌ای، ب) تک‌لایه منفرد ۱۳
- ۲-۳ مایکرومکانیک و مکرومکانیک مواد مرکب ۱۴
- ۳-۳ سه مود تخریب ممکن برای بارگذاری فشار طولی ماده مرکب تک‌جهته. الف) جزء کمانش الیاف، ب) از هم گسیختگی کشش عرضی به سبب کرنش‌های پواسونی و ج) تخریب برشی بدون کمانش ۱۷
- ۴-۳ مودهای تخریب فشار طولی به علت جزء کمانش الیاف. الف) نمای شماتیک از جزء کمانش الیاف، ب) اجزاء سازنده قبل از اعمال بار، ج) جدایش اجزاء سازنده یا سیلان ماتریس، د) رشته الیاف کمانش یافته و ه) جزء کمانش صفحه‌ای ۱۸
- ۵-۳ نمای شماتیک از تخریب برش درون صفحه‌ای تک‌لایه. الف) نمونه قبل از اعمال بار، ب) نمونه تخریب شده ۱۸
- ۶-۳ مقایسه تئوری جزء کمانشی با نتایج آزمایشی برای استحکام فشار طولی ماده مرکب الیاف شیشه E - اپوکسی. منحنی‌های پیوسته نمایانگر نتایج حاصل از تئوری، A: مود انبساطی و B: مود برشی و دایره‌های بسته، نشانگر نتایج حاصل از آزمایش .. ۲۱

فهرست تصاویر

صفحه	عنوان	شکل
۷-۳	استحکام حد نهایی فشار طولی بر حسب نسبت حجمی الیاف برای ماده مرکب الیاف کربن - اپوکسی.....	۲۲
۸-۳	مدل جزء کمانشی الیاف.....	۲۳
۹-۳	مقایسه پیش‌بینی‌ها با مفروضات آزمایشی. الف) HT-S / Epoxy ، ب) E-glass / Epoxy	۲۴
۱۰-۳	تأثیرات الف) انحناء اولیه، ب) ناراستایی الیاف بر استحکام فشار طولی ماده مرکب....	۲۵
۱۱-۳	الف) انحراف واقعی الیاف در مواد مرکب، ب) نیروهای اعمالی بر روی المان تکراری ماده مرکب تحت بار فشار محوری	۲۶
۱۲-۳	فرضیات مختلف برای ناراستایی اولیه الیاف.....	۲۷
۱۳-۳	تغییرات استحکام فشار طولی پیش‌بینی شده و آزمایشی بر حسب نسبت حجمی الیاف در مود از هم گسیختگی کشش عرضی برای ماده مرکب الیاف شیشه E-اپوکسی ...	۲۸
۱۴-۳	تغییرات استحکام فشاری ماده مرکب الیاف کربن AS4 - ماتریس اپوکسی 3501-6 با دما	۲۹
۱۵-۳	برآورد تنش طولی الیاف بر حسب تنش مؤثر ماتریس در فصل مشترک الیاف و ماتریس به عنوان تابعی از زاویه ناراستایی و نسبت حجمی الیاف	۳۰
۱۶-۳	الف) نمای شماتیک از آرایش مربعی الیاف به همراه المان فرضی برای استحکام برش درون صفحه‌ای، ب) ضریب تمرکز تنش برشی بر حسب نسبت حجمی الیاف.....	۳۱
۱۷-۳	ضریب بزرگنمایی کرنش برشی بر حسب نسبت حجمی الیاف	۳۲
۱۸-۳	نمای شماتیک از آرایش مربعی و مثلثی الیاف	۳۳
۱۹-۳	ضریب تمرکز تنش برش درون صفحه‌ای برای مواد مرکب مختلف	۳۴
۲۰-۳	الف) شبکه اجزاء محدود برای نسبت حجمی الیاف ۰/۶ ، ب) مقایسه اثرات پیش‌بینی شده میکرومکانیک و آزمایشی درصد حجمی الیاف بر استحکام برشی مواد مرکب الیاف AS4 یا HM - ماتریس EPON 828	۳۵

فصل چهارم

۱-۴	نمایی از مدل خارج از محور با زاویه خارج از محوری θ	۴۳
۲-۴	وضعیت تنش مادی در نمونه خارج از محور تحت بارگذاری الف) کششی، ب) فشاری	۴۴

فهرست تصاویر

شکل	عنوان	صفحه
۳-۴	الف) مقایسه مقادیر آزمایشی و پیش‌بینی شده برای استحکام خارج از محوری در مود تخریب فشاری الیاف بر حسب درصد ترکیب الیاف با زاویه خارج از محوری 20° ، ب) نمایی از منحنی استحکام خارج از محوری در مود تخریب فشاری الیاف بر حسب درصد ترکیب الیاف با تغییرات زاویه خارج از محوری.....	۴۵
۴-۴	نمایی از منحنی‌های استحکام خارج از محوری در دو مود تخریب فشاری الیاف و ماتریس بر حسب زاویه خارج از محوری.....	۴۷
۵-۴	نمای شماتیک از نتایج تحلیلی استحکام فشاری خارج از محور جهت تعیین حد پایین تنش فشاری مجاز و میزان مجاز انحراف از درصد ترکیب بهینه الیاف.....	۴۸
۶-۴	الگوریتم مراحل اجرایی در این تحقیق.....	۴۹

فصل پنجم

۱-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس قانون اختلاط.....	۵۳
۲-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس مدل جزء کمانش الیاف، الف) معادله (۳-۳)، ب) معادلات (۳-۳) و (۴-۳).....	۵۳
۳-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس معادلات (۳-۳) و (۴-۳)، الف) محور عمودی خطی، ب) محور عمودی لگاریتم بر پایه ۱۰.....	۵۴
۴-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس مود از هم گسیختگی کششی عرضی.....	۵۴
۵-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس مدل تخریب برشی بدون کمانش.....	۵۵
۶-۵	نمودار استحکام فشار طولی بر حسب درصد حجمی الیاف بر اساس روش‌های پیشرفته.....	۵۵
۷-۵	نمودار استحکام بر حسب درصد حجمی الیاف، بر اساس روش ضریب تمرکز تنش، الف) استحکام برش درون صفحه‌ای، ب) استحکام فشار عرضی.....	۵۶
۸-۵	نمودار استحکام بر حسب درصد حجمی الیاف، الف) فشار طولی، ب) برش درون صفحه‌ای.....	۵۷

فهرست تصاویر

صفحه

عنوان شکل

- ۹-۵ تصاویری از دستگاه‌های، الف) کشش و فشار Instron 8502 و ب) پیچش پیشرفته SM21 به همراه لوازم جانبی آن ۶۰
- ۱۰-۵ تصاویری از قیود، الف) آزمایش برشی و ب) آزمایش فشاری ماده مرکب ۶۰
- ۱۱-۵ تصاویری از قالب استفاده شده در ساخت نمونه کشش ماتریس، الف) کل قالب، ب) تک‌وجه قالب ۶۱
- ۱۲-۵ الف) تصویری از نمونه آزمایشی کشش ماتریس، ب) نقشه و ابعاد نمونه مورد نظر ۶۲
- ۱۳-۵ ارائه منحنی تنش- کرنش آزمایشی برای یک نمونه کششی ماتریس ۶۴
- ۱۴-۵ ارائه نمودار ستونی برای نمونه‌های آزمایشی کشش ماتریس، الف) استحکام، ب) کرنش حدنهایی ۶۴
- ۱۵-۵ نمایش تخریب در دو نمونه آزمایشی کشش ماتریس، الف) نمونه تخریب شده در مود مناسب، ب) نمونه تخریب شده به دلیل وجود حباب در مقطع شکست ۶۴
- ۱۶-۵ تصاویری از الف) نمونه خام برای آزمایش فشار ماتریس به همراه لوله آزمایش، ب) نمونه‌های مختلف پودر حاصل از عملیات ماشینکاری ۶۶
- ۱۷-۵ الف) تصویری از نمونه آزمایش فشاری ماتریس، ب) نقشه و ابعاد نمونه مورد نظر ۶۶
- ۱۸-۵ ارائه منحنی تنش-کرنش آزمایشی برای سه نمونه فشاری ماتریس - سری B ۶۹
- ۱۹-۵ ارائه نمودار ستونی استحکام فشاری ماتریس برای نمونه‌های الف) سری A، ب) سری B ۶۹
- ۲۰-۵ چند نمونه فشاری تخریب شده ماتریس، الف) نمونه سری B تخریب شده در مود بشکهای شدن، ب) نمونه سری B تخریب شده در مود کمانش، ج) نمونه سری A تخریب شده در مود کمانش ۷۰
- ۲۱-۵ الف) تصویری از نمونه آزمایش برشی ماتریس، ب) نقشه و ابعاد نمونه مورد نظر ۷۰
- ۲۲-۵ الف) نحوه قرار دادن نمونه در فک دستگاه، ب) نصب پیچش سنج SM21a ۷۲
- ۲۳-۵ نمودار نمایشگر عقربه‌ای بر حسب نمایشگر دیجیتالی زاویه پاندول برای دستگاه SM21 ۷۳
- ۲۴-۵ ارائه نتایج آزمایشی برای یک نمونه برشی ماتریس، الف) منحنی تنش - کرنش، ب) منحنی گشتاور - زاویه پیچش ۷۴