

## فهرست اشکال

| عنوان                                                                                                                                                                            | صفحه |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| شکل ۱-۱- دیاگرام شماتیک تنش سیکلی بر حسب تعداد سیکل شکست در سازه های مختلف.....                                                                                                  | ۳    |
| شکل ۱-۲- اشکال مختلف مواد تقویت کننده.....                                                                                                                                       | ۷    |
| شکل ۲-۲- انواع الیاف مورد استفاده در مواد مرکب چند لایه.....                                                                                                                     | ۹    |
| شکل ۳-۲- نمایش شماتیکی از ساختار (الف) پلیمرهای گرمانرم و (ب) پلیمرهای گرماسخت.....                                                                                              | ۱۱   |
| شکل ۴-۲- نمودار تنش - کرنش کششی نمونه ای از پلیمرهای گرماسخت (اپوکسی) و پلیمر گرمانرم (پلی سولفون).....                                                                          | ۱۳   |
| شکل ۵-۲- مواد تشکیل دهنده در تهیه ی زمینه پلی استر، (الف) مولکول پلی استر غیر اشباع. ستاره نشان دهنده ی مکان های غیر اشباع در مولکول پلی استر غیر اشباع، (ب) مولکول استایرن..... | ۱۵   |
| شکل ۶-۲- تصویر شماتیک رزین پلی استر با اتصالات عرضی.....                                                                                                                         | ۱۵   |
| شکل ۷-۲- تغییرات دمایی رزین پلی استر در حین پخت با گذشت زمان (۱۰۰ گرم رزین بدون استفاده از پرکننده).....                                                                         | ۱۷   |
| شکل ۸-۲- تغییرات زمان ژل شدن با دما برای پلی استر با کاتالیزور و شتاب دهنده.....                                                                                                 | ۱۸   |
| شکل ۹-۲- مسیرهای مختلف حرکت ترک در (الف) ایجاد حفره، (ب) جدایش، (ج) انحراف ترک.....                                                                                              | ۲۰   |
| شکل ۱۰-۲- استحکام کششی رزین پلی استر اصلاح شده بر حسب درصدهای وزنی لاستیک.....                                                                                                   | ۲۲   |
| شکل ۱۱-۲- ازدیاد طول تا شکست رزین پلی استر اصلاح شده بر حسب درصدهای وزنی لاستیک.....                                                                                             | ۲۲   |
| شکل ۱۲-۲- چقرمگی رزین پلی استر اصلاح شده بر حسب درصدهای وزنی لاستیک.....                                                                                                         | ۲۳   |
| شکل ۱۳-۲- استحکام ضربه رزین پلی استر اصلاح شده بر حسب درصدهای وزنی لاستیک.....                                                                                                   | ۲۳   |

- شکل ۲-۱۴- کاهش استحکام و سفتی باقی مانده ماده‌ی مرکب هنگام بارگذاری خستگی با دامنه‌ی ثابت ۲۴
- شکل ۲-۱۵- شماتیکی از نمایش منحنی S-N..... ۲۵
- شکل ۲-۱۶- تاثیر فرکانس بر افزایش دما در ماده‌ی مرکب پروپیلن / الیاف شیشه در بارگذاری خستگی ۲۶
- شکل ۲-۱۷- داده‌های خستگی برای مواد مرکب تک راستا ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۸- مقایسه منحنی های S-N ماده‌ی مرکب هیبریدی با نسبت درصدهای مختلف الیاف کربن / شیشه ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۹- منحنی S-N ماده‌ی مرکب هیبریدی پلی استر / الیاف شیشه و کربن ..... ۲۸
- شکل ۲-۲۰- نحوه‌ی ایجاد تخریب در مواد مرکب لایه‌ای با الیاف دو جهته در آزمون خستگی کشش- کشش ..... ۳۱
- شکل ۲-۲۱- سه نوع گسیختگی در ماده‌ی مرکب زمینه پلیمری چند لایه ای، (الف) گسیختگی درون لایه- ای، (ب) گسیختگی بین لایه‌ای، (ج) گسیختگی در عرض لایه‌ای ..... ۳۳
- شکل ۲-۲۲- مثالی از تشکیل بافت میکروسیلان در بزرگنمایی  $(\times 10k)$  ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۳- مثالی از اسکارپ در زمینه‌ی پلیمر چقرمه شده  $(\times 10k)$  ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۴- مثالی از خطوط رودخانه‌ای در زمینه‌ی پلیمری  $(\times 100)$  ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۵- توضیح ایجاد مورفولوژی خطوط رودخانه‌ای ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۶- مناطق آینه‌ای، مه مانند و شانه‌ای که مربوط به میکروسیلان بافت مانند و خطوط رودخانه‌ای است ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۷- کاسپ‌های برشی در زمینه‌ی پلیمری ماده‌ی مرکب  $(\times 7000)$  ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۸- مثالی از سطح شکست که نشان دهنده‌ی خطوط رودخانه‌ای است  $(\times 400)$  ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۹- انعطاف پذیری در زمینه‌ی چقرمه  $(\times 5k)$  ..... ۳۸

- شکل ۲-۳۰- سطح شکست ماده‌ی مرکب اپوکسی تحت حالت I خالص بارگذاری (الف) استاتیکی، (ب) خستگی ..... ۳۹
- شکل ۲-۳۱- مرز حالت I استاتیکی/ خستگی در ماده‌ی مرکب اپوکسی (۲۵۰۰×) ..... ۳۹
- شکل ۲-۳۲- سطوح شکست ایجاد شده در حالت II خالص (الف) استاتیکی، (ب) خستگی (۱۵۰۰×) ..... ۴۰
- شکل ۲-۳۳- رولرهای زمینه در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی تحت حالت II خالص بارگذاری خستگی (۴۵۰۰×) ..... ۴۰
- شکل ۲-۳۴- استریشن‌های ایجاد شده در بقایای الیاف تحت حالت II بارگذاری خستگی در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن (۴۵۵۰×) ..... ۴۱
- شکل ۲-۳۵- سطح شکست خستگی در ۲۵٪ حالت II در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی (۲۰۰۰×) ..... ۴۱
- شکل ۲-۳۶- سطح شکست خستگی در ۷۵٪ حالت II در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی (۲۰۰۰×) ..... ۴۲
- شکل ۲-۳۷- تنش بر حسب لگاریتم تعداد سیکل شکست برای ماده‌ی مرکب لایه‌ای چند راستا (۴۵±)  $R = 0/1$  ..... [۲۷] ۴۳
- شکل ۲-۳۸- کرنش شکست بر حسب لگاریتم تعداد سیکل شکست برای ماده‌ی مرکب لایه‌ای چند راستا (۴۵±)  $R = 0/1$  ..... ۴۳
- شکل ۲-۳۹- مقایسه‌ی مقدار کرنش کششی یک میلیون سیکل خستگی ماده مرکب لایه‌ای (الف) پلی استر، (ب) وینیل استر و (ج) اپوکسی در درصد حجمی الیاف کم و زیاد ..... ۴۴
- شکل ۲-۴۰- تأثیر پلیمر در بارگذاری خستگی معکوس برای زمینه‌ی اپوکسی (EP) و پلی استر (UP) با  $R = -1$  و بیشترین نیروی ۵۵,۶ KN ..... ۴۵

- شکل ۲-۴۱- نتایج آزمون خستگی نمونه‌های پلی استر چقرمه شده با مقادیر متفاوت لاستیک مایع VTBN ..... ۴۶
- شکل ۲-۴۲- نتایج خستگی برای ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی چقرمه شده با کوپلیمر آمفیفیلک و چقرمه نشده تقویت شده با الیاف شیشه ..... ۴۶
- شکل ۳-۱- فلوچارت مربوط به مراحل ساخت نمونه‌های پلی استر خالص ..... ۵۰
- شکل ۳-۲- فلوچارت مربوط به مراحل ساخت نمونه‌های پلی استر حاوی لاستیک مایع ..... ۵۱
- شکل ۳-۳- (الف) قراردادن پارچه‌های الیاف با چیدمان موردنظر روی میزکار، (ب) کشیدن پارچه‌ی داکرون روی سطح الیاف، (ج) قراردادن پارچه سه بعدی آبی‌رنگ و لوله‌های اسپیرال ورودی و خروجی، (د) فرایند گاززدایی رزین قبل از تزریق به کمک خلأ، (ه) تزریق رزین به کمک خلأ ..... ۵۳
- شکل ۳-۴- فلوچارت مربوط به مراحل ساخت مواد مرکب به روش تزریق رزین به کمک خلأ ..... ۵۴
- شکل ۳-۵- آزمون‌های انجام شده برای نمونه‌های پلیمری ..... ۵۴
- شکل ۳-۶- آزمون‌های انجام شده برای مواد مرکب ..... ۵۵
- شکل ۳-۷- نمونه استاندارد آزمون کشش. ابعاد برحسب میلی‌متر است ..... ۵۶
- شکل ۳-۸- شماتیکی از دستگاه آزمون HDT ..... ۵۷
- شکل ۳-۹- ابعاد نمونه‌ی مورد استفاده در آزمون خستگی کشش - کشش ..... ۵۹
- شکل ۴-۱- تصویری از جدایش فازی لاستیک CTBN در رزین پلی استر ..... ۶۵
- شکل ۴-۲- ساختارهای (الف) لاستیک مایع CTBN، (ب) BDGE-۱,۴ ..... ۶۵
- شکل ۴-۳- نمودار شماتیک واکنش بین گروه‌های اپوکسی BDGE-۱,۴ و گروه‌های کربوکسیل ..... ۶۶
- CTBN ..... ۶۶

- شکل ۴-۴- نمودار FT-IR از (الف) CTBN، (ب) ۱,۴-BDGE و (ج) CTBN واکنش داده با -  
 ۱,۴BDGE ..... ۶۸
- شکل ۴-۵- منحنی های تنش - کرنش برای نمونه های پلیمری PR0، PR1، PR2، PR3 ..... ۷۰
- شکل ۴-۶- تأثیر مقادیر CTBN اصلاح شده بر خواص کششی پلس استر شامل (الف) استحکام کششی،  
 (ب) ازدیاد طول تا شکست، (ج) مدول یانگ و (د) سطح زیر نمودار تنش - کرنش ..... ۷۳
- شکل ۴-۷- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش مربوط به (الف) PR0 (x۸۰)، (ب) PR2  
 (x۸۰) ..... ۷۴
- شکل ۴-۸- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش مربوط به (الف) PR0 (x۵۰۰)، (ب) PR0  
 (x۲۵۰۰) ..... ۷۵
- شکل ۴-۹- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش مربوط به (الف) PR2 (x۵۰۰)، (ب) PR3  
 (x۵۰۰) ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش مربوط به نمونه ی PR2 ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۱- منحنی های تنش - کرنش ماده ی مرکب CPR0 و CPR2 ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۲- نمودار S-N حاصل از نتایج آزمون خستگی (حداکثر تنش بر حسب تعداد سیکل شکست).  
 نقاط مربوط به ماده ی مرکب پلی استر دارای ۲wt% لاستیک/ الیاف شیشه، به میزان ۵ MPa بالاتر ترسیم  
 شده تا بتوان به آسانی به مقایسه ی داده ها پرداخت. .... ۸۳
- شکل ۴-۱۳- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده ی مرکب CPR0 در بزرگنمایی (الف) x۱۰۰،  
 (ب) x۲۵۰ ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۴- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده ی مرکب CPR0 در بزرگنمایی (الف) x۵۰۰،  
 (ب) x۲۵۰۰ ..... ۸۶

شکل ۴-۱۵- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR0 در بزرگنمایی ۵۰۰۰x..... ۸۷

شکل ۴-۱۶- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR0 در بزرگنمایی (الف) ۲۵۰۰x،

(ب) ۷۰۰۰x..... ۸۷

شکل ۴-۱۷- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR2 در بزرگنمایی (الف) ۱۰۰x،

(ب) ۵۰۰x..... ۸۸

شکل ۴-۱۸- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR2 در بزرگنمایی (الف) ۱۵۰۰x،

(ب) ۳۵۰۰x..... ۸۹

شکل ۴-۱۹- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR2 در بزرگنمایی ۱۵۰۰x..... ۹۰

شکل ۴-۲۰- تصاویر SEM از سطح شکست خستگی ماده‌ی مرکب CPR2 در بزرگنمایی ۱۵۰۰x..... ۹۰