



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی متالورژی و مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد

## بررسی تاثیر افزودنی لاستیک مایع به رزین بر رفتار خستگی کامپوزیت پلی استر/ الیاف شیشه مورد استفاده در سازه پره توربین بادی

استادان راهنما:

دکتر احد ضابط

دکتر سمانه صاحبیان سقی

نگارش:

سید محمد امین موسوی خراسانی

فرودین ماه ۱۳۹۷

رسالة محمد



دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی

# \* فرم ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد \*

شماره: ۹۷-۱

تاریخ: ۱۳۹۷/۱/۲۷

پیوست: خلاصه پایان نامه انگلیسی و فارسی

نام و نام خانوادگی دانشجو: سید محمد امین موسوی خراسانی تاریخ شروع تحصیل: لیضال اول سال ۹۴ تعداد واحد جبرانی: ۰ واحد رشته و گرایش تحصیلی: مهندسی مواد - گرایش شناسایی و انتخاب مواد استادان راهنما: دکتر احد ضابط - دکتر سمانه صاحبیان سقی عنوان پایان نامه: "بررسی تأثیر افزودنی لاستیک مایع به رزین بر رفتار خستگی کامپوزیت پلی استر/ الیاف شیشه مورد استفاده در سازه پره توربین بادی"

| ملاحظات       | نمره کسب شده | حداکثر نمره | معیارهای ارزشیابی                                                                                                                                          |
|---------------|--------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نگارش         | ۳            | ۳           | - انسجام در تنظیم و تدوین مطالب، حسن نگارش و رعایت دستورالعمل<br>- کیفیت تصاویر، اشکال و منحنی‌های استفاده شده                                             |
|               |              |             | - بررسی تاریخچه موضوع و بیان سابقه پژوهش در موضوع                                                                                                          |
| علمی          | ۱۲           | ۱۲          | - ابتکار و نوآوری<br>- ارزش علمی و یا کاربردی<br>- استفاده از منابع و مواخذ به لحاظ کمی و کیفی (به روز بودن)<br>- کیفیت نظرات و پیشنهادات برای ادامه تحقیق |
|               |              |             | - تسلط به موضوع و توانایی در پاسخگویی به سوالات در جلسه دفاع                                                                                               |
|               |              |             | - نحوه ارائه (رعایت زمان، تفهیم موضوع، کیفیت ترائس پرستی و...)                                                                                             |
|               |              |             | - مقاله مستخرج از پایان نامه که بر اساس دستورالعمل تهیه و به تأیید استاد راهنما رسیده و به همراه پایان نامه تحویل گردیده است                               |
| انجام به موقع | ۱            | ۱           | - اتمام به موقع دوره و تحویل گزارشات                                                                                                                       |
|               | ۱۹/۲۵        | ۳۰          | نمره پایان نامه                                                                                                                                            |

| اعضای هیئت داوران            | نام و نام خانوادگی     | مرتبه علمی | نام دانشگاه | امضاء |
|------------------------------|------------------------|------------|-------------|-------|
| استادان راهنما               | دکتر احد ضابط          | دانشیار    | فردوسی مشهد |       |
|                              | دکتر سمانه صاحبیان سقی | استادیار   | فردوسی مشهد |       |
| استاد دفاع اول               | دکتر محمد مزینانی      | دانشیار    | فردوسی مشهد |       |
| استاد دفاع دوم               | دکتر زهرا مقصود        | استادیار   | فردوسی مشهد |       |
| نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی | دکتر الهام کمالی حیدری | استادیار   | فردوسی مشهد |       |

جلسه دفاع در تاریخ ۱۳۹۷/۱/۲۷ برگزار گردید و نمره نامبرده با عدد ۱۹/۲۵ با حروف (نوزده و بیست و پنج صدم) می‌باشد که با توجه به ماده ۲۰ آئین نامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مصوب ۱۳۷۳/۱۰/۲۵ به آن (درجه عالی) تعلق می‌گیرد.

نام و نام خانوادگی مدیر گروه: دکتر محمد مزینانی

- سهم اعضای هیئت داوران در ارزشیابی یکسان است.
- محاسبه میانگین و اعمال یک نمره مربوط به بخش اتمام به موقع با توجه به تاریخ شروع و پایان تحصیل توسط نماینده تحصیلات تکمیلی گروه انجام می‌گیرد.

\*(لطفاً به توضیحات مندرج در پشت برگه توجه فرمائید)\*

# اظهارنامه

اینجانب سید محمد امین موسوی خراسانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر افزودنی لاستیک مایع به رزین بر رفتار خستگی کامپوزیت پلی استر/الیاف شیشه مورد استفاده در سازه پره ی توربین بادی تحت راهنمایی دکتر احد ضابط و دکتر سمانه صاحبیان سقی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا «Ferdowsi University of Mashhad» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

رفتار ترد رزین‌های پلی‌استر غیر اشباع پخت شده سبب محدودیت در بکارگیری از آن در مواد مرکب زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مورد استفاده در پرهی توربین بادی شده است. در این پژوهش، از کوپلیمر مایع بوتادین-اکریلونیتریل (CTBN) جهت بهبود چقرمگی رزین پلی‌استر غیر اشباع استفاده شد. لاستیک مایع CTBN با گروه کربوکسیل سبب حلالیت ضعیف لاستیک در رزین پلی‌استر غیر اشباع و ناسازگاری با آن می‌شود. به این منظور از اصلاح کننده ۴،۱-بوتان‌دی‌ال‌دی‌گلیسیدیل اتر (۱،۴-BDGE) استفاده شد تا با گروه کربوکسیل لاستیک مایع CTBN واکنش داده و به گروه عاملی استر تبدیل شود. واکنش‌های بین گروه‌های عاملی اپوکسی در ۱،۴-BDGE و گروه‌های کربوکسیل CTBN به کمک آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کشش نیز جهت بررسی تاثیر افزودنی لاستیک CTBN اصلاح شده به رزین پلی‌استر انجام شد. نتایج نشان داد که با افزودن ۲ درصد وزنی لاستیک CTBN اصلاح شده به پلی‌استر، استحکام کششی و افزایش طول تا شکست به ترتیب ۷/۲۲ و ۳۹/۴٪ نسبت به پلی‌استر خالص افزایش یافته است. بیشترین میزان چقرمگی در پلی‌استر حاوی ۲wt% لاستیک CTBN اصلاح شده، بدست آمد. بر این اساس، دو نمونه ماده‌ی مرکب پلی‌استر/الیاف شیشه و پلی‌استر حاوی ۲wt% لاستیک/الیاف شیشه با روش تزریق رزین به کمک خلأ (VIP) تهیه و رفتار خستگی آنها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از آزمون کشش، استحکام کششی مشابهی برای هر دو مرکب بدست آمد. آزمون خستگی کشش-کشش ( $R = 0.1$ )، با کاهش سطح حداکثری تنش، بهبود در طول عمر خستگی در صورت استفاده از عامل چقرمگی در زمینه ماده‌ی مرکب را نشان داد. تصاویر SEM از سطوح شکست خستگی نمونه‌های ماده‌ی مرکب نیز نشان داد که با افزودن ۲wt% لاستیک به زمینه‌ی پلی‌استر، گسیختگی ترجیحاً در فصل مشترک زمینه و الیاف رخ می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** افزودنی لاستیک مایع، خستگی، کامپوزیت پلی‌استر/الیاف.

---

تقدیم به

پدر، مادر و همسر م که پیوسته مشوق من در راه علم و پژوهش

بودند...

---

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست...

بر خود واجب می دانم که از زحمات بی دریغ اساتید محترم راهنما تشکر نموده و مراتب سپاس گذاری خود را از ایشان ابراز نمایم.

از تمامی کارمندان پژوهشکده هوا-خورشید دانشگاه فردوسی مشهد، آقایان علی نظیف و رامین قانع نیز بسیار سپاس گزارم؛ چرا که بدون راهنمایی های ایشان تأمین این پایان نامه سخت می نمود.

## فهرست مطالب

| عنوان                                                            | صفحه |
|------------------------------------------------------------------|------|
| فصل ۱: مقدمه.....                                                | ۱    |
| فصل ۲: مروری بر منابع.....                                       | ۶    |
| ۱-۲- مقدمه.....                                                  | ۷    |
| ۲-۲- طبقه بندی مواد مرکب.....                                    | ۸    |
| ۳-۲- مواد مرکب تقویت شده با الیاف.....                           | ۸    |
| ۱-۳-۲- الیاف.....                                                | ۹    |
| ۱-۱-۳-۲- الیاف شیشه.....                                         | ۹    |
| ۲-۳-۲- زمینه.....                                                | ۱۱   |
| ۱-۲-۳-۲- مقایسه خواص زمینه‌ی گرمانرم و گرماسخت در مواد مرکب..... | ۱۲   |
| ۴-۲- رزین پلی استر.....                                          | ۱۳   |
| ۱-۴-۲- شرایط پخت رزین های پلی استر.....                          | ۱۶   |
| ۲-۴-۲- روشهای افزایش چقرمگی رزین پلی استر غیر اشباع.....         | ۱۸   |
| ۳-۴-۲- بررسی خواص پلی استر اصلاح شده با انواع الاستومر.....      | ۲۱   |
| ۵-۲- خستگی در مواد مرکب زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف.....     | ۲۳   |
| ۱-۵-۲- عوامل موثر بر خستگی مواد مرکب تقویت شده با الیاف.....     | ۲۶   |
| ۱-۱-۵-۲- نوع الیاف.....                                          | ۲۶   |
| ۲-۱-۵-۲- نوع زمینه.....                                          | ۲۸   |
| ۳-۱-۵-۲- شرایط بارگذاری.....                                     | ۲۹   |
| ۴-۱-۵-۲- شرایط محیطی.....                                        | ۲۹   |
| ۲-۵-۲- مکانیزم های تخریبی خستگی در مواد مرکب.....                | ۳۰   |

|         |                                                                                      |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ۳۰..... | ۲-۵-۱- گسیختگی الیاف                                                                 |
| ۳۱..... | ۲-۵-۲- گسیختگی زمینه                                                                 |
| ۳۲..... | ۲-۶- انواع گسیختگی ها در مواد مرکب پلیمری چند لایه ای                                |
| ۳۳..... | ۲-۷- شکست نگاری زمینه پلیمری و تاثیر نوع زمینه                                       |
| ۳۳..... | ۲-۷-۱- ترک های ریز                                                                   |
| ۳۳..... | ۲-۷-۲- تورق زمینه و میکروسیلان بافت مانند                                            |
| ۳۴..... | ۲-۷-۳- اسکارپ                                                                        |
| ۳۵..... | ۲-۷-۴- خطوط رودخانه ای                                                               |
| ۳۶..... | ۲-۷-۵- نواحی آینه ای، مه مانند و شانه ای                                             |
| ۳۷..... | ۲-۸- انعطاف پذیری و تاثیر چقرمگی زمینه بر مورفولوژی شکست                             |
| ۳۸..... | ۲-۹- مورفولوژی سطوح شکست تحت بارگذاری سیکلی                                          |
| ۳۸..... | ۲-۹-۱- گسیختگی های بین لایه ای                                                       |
| ۳۸..... | ۲-۹-۱-۱- مورفولوژی های شکست مربوط به حالت I بارگذاری سیکلی                           |
| ۳۹..... | ۲-۹-۱-۲- مورفولوژی های شکست مربوط به حالت II بارگذاری سیکلی                          |
| ۴۱..... | ۲-۹-۱-۳- مورفولوژی شکست مربوط به مخلوط حالت های I و II در بارگذاری سیکلی             |
| ۴۲..... | ۲-۹-۲- گسیختگی های درون لایه ای                                                      |
| ۴۲..... | ۲-۱۰- بررسی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با رفتار خستگی در ماده‌ی مرکب زمینه پلی استر |
| ۴۸..... | فصل ۳: مواد اولیه و روش انجام تحقیق                                                  |
| ۴۹..... | ۳-۱- مواد مصرفی                                                                      |
| ۵۰..... | ۳-۲- روش نمونه سازی                                                                  |
| ۵۰..... | ۳-۲-۱- ساخت نمونه‌های پلیمری                                                         |
| ۵۱..... | ۳-۲-۲- نحوه‌ی نمونه سازی مواد مرکب                                                   |

|         |                                                                 |
|---------|-----------------------------------------------------------------|
| ۵۴..... | ۳-۳-۳ آزمون ها                                                  |
| ۵۵..... | ۳-۳-۱ آزمون زمان ژل شدن                                         |
| ۵۵..... | ۳-۳-۲ انجام آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR)       |
| ۵۶..... | ۳-۳-۳ آزمون کشش نمونه‌های پلیمری                                |
| ۵۶..... | ۳-۳-۴ آزمون تعیین چگالی                                         |
| ۵۷..... | ۳-۳-۵ آزمون تعیین دمای انحراف گرمایی (HDT)                      |
| ۵۸..... | ۳-۳-۶ آزمون تعیین درصد حفره و درصد حجمی الیاف                   |
| ۵۸..... | ۳-۳-۷ آزمون کشش نمونه‌های ماده‌ی مرکب                           |
| ۵۹..... | ۳-۳-۸ آزمون خستگی کشش - کشش                                     |
| ۶۰..... | ۳-۳-۹ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)                            |
| ۶۲..... | فصل ۴: نتایج و بحث                                              |
| ۶۳..... | ۴-۱ نتایج آزمون های انجام شده برای نمونه‌های پلیمری             |
| ۶۳..... | ۴-۱-۱ نتایج آزمون زمان ژل شدن                                   |
| ۶۴..... | ۴-۱-۲ نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR)                   |
| ۶۹..... | ۴-۱-۳ نتایج آزمون کشش نمونه‌های پلیمری                          |
| ۷۳..... | ۴-۱-۴ نتایج تصویربرداری SEM سطوح شکست استاتیکی نمونه‌های پلیمری |
| ۷۶..... | ۴-۱-۵ نتایج آزمون چگالی نمونه‌های پلیمری                        |
| ۷۷..... | ۴-۱-۶ نتایج آزمون تعیین دمای انحراف گرمایی (HDT)                |
| ۷۸..... | ۴-۲ نتایج آزمون های انجام شده برای مواد مرکب                    |
| ۷۸..... | ۴-۲-۱ نتایج آزمون تعیین درصد حفره و تعیین درصد الیاف            |
| ۷۹..... | ۴-۲-۲ نتایج آزمون کشش نمونه‌های ماده‌ی مرکب                     |
| ۸۱..... | ۴-۲-۳ نتایج آزمون خستگی                                         |

- ۴-۲-۴- نتایج آزمون T با نمونه های مستقل برای داده های خستگی ..... ۸۳
- ۴-۲-۵- نتایج تصویر برداری SEM سطوح شکست خستگی نمونه های ماده‌ی مرکب ..... ۸۵
- ۴-۲-۵-۱- نتایج تصویر برداری SEM از سطوح شکست خستگی ماده‌ی مرکب پلی استر/الیاف شیشه ..... ۸۵
- ۴-۲-۵-۲- نتایج تصویر برداری SEM از سطوح شکست خستگی ماده‌ی مرکب پلی استر حاوی ۲wt% لاستیک/ الیاف شیشه ..... ۸۷
- فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۹۱
- ۵-۱- نتیجه‌گیری ..... ۹۲
- ۵-۲- پیشنهادات ..... ۹۳
- ۶- منابع ..... ۹۴

## 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 ۳۰-۲- سطح شکست ماده‌ی مرکب اپوکسی تحت حالت I خالص بارگذاری (الف) استاتیکی، (ب) خستگی ..... ۳۹
- شکل ۳۱-۲- مرز حالت I استاتیکی/ خستگی در ماده‌ی مرکب اپوکسی (۲۵۰۰×) ..... ۳۹
- شکل ۳۲-۲- سطوح شکست ایجاد شده در حالت II خالص (الف) استاتیکی، (ب) خستگی (۱۵۰۰×) ..... ۴۰
- شکل ۳۳-۲- رولرهای زمینه در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی تحت حالت II خالص بارگذاری خستگی (۴۵۰۰×) ..... ۴۰
- شکل ۳۴-۲- استریشن‌های ایجاد شده در بقایای الیاف تحت حالت II بارگذاری خستگی در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن (۴۵۵۰×) ..... ۴۱
- شکل ۳۵-۲- سطح شکست خستگی در ۲۵٪ حالت II در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی (۲۰۰۰×) ..... ۴۱
- شکل ۳۶-۲- سطح شکست خستگی در ۷۵٪ حالت II در ماده‌ی مرکب زمینه اپوکسی (۲۰۰۰×) ..... ۴۲
- شکل ۳۷-۲- تنش بر حسب لگاریتم تعداد سیکل شکست برای ماده‌ی مرکب لایه‌ای چند راستا (۴۵±)  $R = 0/1$  ..... [۲۷] ۴۳
- شکل ۳۸-۲- کرنش شکست بر حسب لگاریتم تعداد سیکل شکست برای ماده‌ی مرکب لایه‌ای چند راستا (۴۵±)  $R = 0/1$  ..... ۴۳
- شکل ۳۹-۲- 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 ۴۰-۲- 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

## فهرست جداول

| عنوان                                                                        | صفحه |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| جدول ۱-۲- ترکیب شیمیایی الیاف شیشه از نوع E-glass و S-glass.....             | ۱۰   |
| جدول ۲-۲- خواص عمومی الیاف شیشه از نوع E-glass و S-glass.....                | ۱۰   |
| جدول ۳-۲- خواص عمومی رزین پلی استر غیر اشباع.....                            | ۱۶   |
| جدول ۱-۳- نام گذاری مخلوط‌های پلی استر غیر اشباع/ لاستیک CTBN اصلاح شده..... | ۵۱   |
| جدول ۲-۳- نحوه‌ی نام گذاری و ترکیب مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه.....    | ۵۴   |
| جدول ۱-۴- نتایج آزمون زمان ژل شدن رزین پلی‌استر.....                         | ۶۴   |
| جدول ۲-۴- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی PR0.....                              | ۷۰   |
| جدول ۳-۴- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی PR1.....                              | ۷۱   |
| جدول ۴-۴- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی PR2.....                              | ۷۱   |
| جدول ۵-۴- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی PR3.....                              | ۷۱   |
| جدول ۶-۴- نتایج آزمون چگالی نمونه‌های پلیمری.....                            | ۷۷   |
| جدول ۷-۴- نتایج آزمون تعیین دمای انحراف گرمایی (HDT).....                    | ۷۸   |
| جدول ۸-۴- نتایج آزمون تعیین درصد حفره و درصد الیاف ماده‌ی مرکب CPR0.....     | ۷۸   |
| جدول ۹-۴- نتایج آزمون تعیین درصد حفره و درصد الیاف ماده‌ی مرکب CPR2.....     | ۷۹   |
| جدول ۱۰-۴- میانگین نتایج آزمون تعیین درصد حفره و درصد الیاف.....             | ۷۹   |
| جدول ۱۱-۴- نتایج آزمون کشش برای ماده‌ی مرکب CPR0.....                        | ۸۰   |
| جدول ۱۲-۴- نتایج آزمون کشش برای ماده‌ی مرکب CPR2.....                        | ۸۱   |
| جدول ۱۳-۴- نتایج آماری آزمون خستگی کشش- کشش ماده‌ی مرکب CPR0.....            | ۸۲   |
| جدول ۱۴-۴- نتایج آماری آزمون خستگی کشش- کشش ماده‌ی مرکب CPR2.....            | ۸۲   |

جدول ۴-۱۵- نتایج آزمون T برای مقایسه‌ی میانگین‌های تعداد سیکل شکست دو ماده‌ی مرکب CPR0 و CPR2 در ۴ سطح حداکثر تنش. ۸۴.....

فصل ۱

# مقدمه