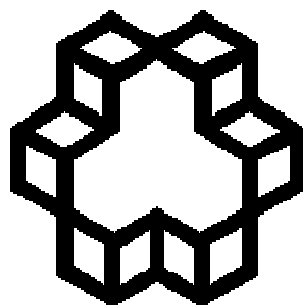


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد

گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی

بررسی تجربی کامپوزیت پلیمری خودترمیم شونده با الیاف توخالی

و تقویت شده با الیاف بازالت

اساتید راهنما:

پروفسور سید محمدرضا خلیلی

دکتر رضا اسلامی فارسانی

نگارش:

هانیه افتخاری

بهمن ۱۳۹۱

بعد از خدای بزرگ که تمامی هستیم متعلق به اوست این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به:

مادر و پدر مهربان و بزرگووارم که نه تنها در تمامی مراحل این پایان نامه بلکه در سراسر زندگی پشتیبان، یار و راهنمای من بودند.

و

مادربزرگ عزیزم که حضورش در تمامی لحظات آرام‌بخش من و خواهر عزیزم که با نظری روشن امیدبخش من بودند.

تشکر و قدردانی:

بعد از سپاس یگانه‌ی هستی بخش که همه خیر و نیکی در زندگی‌م از جانب اوست و در تمامی لحظات دشوار اول امیدبخش و یاری رسان من بود، بر خود لازم می‌دانم از کسانی که مرا در رسیدن این مطلوب یاری رساندند، تشکر و قدردانی نمایم.

در ابتدا از زحمات اساتید محترم راهنما، جناب آقای دکتر رضا اسلامی فارسانی و جناب پروفیسور سید محمد رضا خلیلی که در طول انجام تحقیق مرا از راهنمایی‌های ارزنده‌شان بی‌نصیب ننمودند، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

از اساتید ممتحن جناب آقای دکتر سید محمدحسین سیادت‌ی و جناب آقای دکتر عباس منتظری که راهنمایی‌های ارزنده‌شان در جهت تنظیم هرچه بهتر پایان‌نامه مرا یاری رساندند، قدردانی می‌نمایم و از جناب آقای دکتر رحمت‌ا... قاجار که سخاوتمندانه در استفاده از آزمایشگاه مرا پشتیبانی نموده و جناب آقای مهندس سعیدی جهت مساعدت عملی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

لازم است از کمک‌های فکری و عملی بی‌دریغ آقای مهندس شرفی در مراحل عملی و همکاری و همفکری آقای مهندس شیشه‌گران جهت انجام آزمایشات هم‌چنین از زحمات خالصانه جناب آقای مهندس یزدانی که در تهیه این پایان‌نامه به من یاری رساندند تشکر ویژه نمایم.

ضمن تشکر از همکاری جناب آقای رسولی در دانشکده‌ی علوم جهت تهیه ماده اولیه، برخورد می‌دانم از حسن نظر و مساعدت جناب آقای دکتر حمید خرسند جهت استفاده از آزمایشگاه سطح پیشرفته و همکاری آقای ثنایی و حسین‌پور در این راستا قدردانی نمایم.

در انتها لازم است از جناب آقای مهندس ذوالریاستین و کلیه دوستان و عزیزانی که در انجام این کار از من حمایت کردند و نامی از آن‌ها برده نشد، کمال تشکر و قدردانی را به جا آورم.

چکیده:

استفاده از کامپوزیت‌ها در عصر کنونی، همگام با پیشرفت الیاف مختلف از جمله کربن، بازالت و آرامید در کاربردهای گوناگون از بناهای عمرانی تا انواع وسایل نقلیه و صنایع نظامی گسترش یافته است. البته باید خاطرنشان کرد که نقطه ضعف اصلی کامپوزیت‌ها ترک‌های ریزی است که در کامپوزیت بر اثر اعمال نیرو ایجاد شده و منجر به آسیب‌دیدگی‌های بزرگ می‌شود. این آسیب‌دیدگی‌ها بر خواص مختلف قطعه تاثیر گذاشته، در نهایت منجر به از بین رفتن قطعه آن می‌گردد.

برای جلوگیری از تخریب قطعه لازم است در ابتدا از گسترش ترک‌ها ممانعت نموده و سپس قطعه را ترمیم نمود. فرآیند خودترمیم‌شوندگی به روش‌های متنوعی انجام می‌گیرد که از متداول‌ترین روش‌ها می‌توان به پرکردن الیاف توخالی و یا کپسول‌ها با رزین و قراردادن آن‌ها درون کامپوزیت اشاره نمود. به این ترتیب پس از انتقال نیرو از قطعه به دیواره‌ی الیاف توخالی یا کپسول‌ها، شکست در آن‌ها رخ می‌دهد. سپس با خروج و انجام واکنش مواد ترمیم‌کننده در ناحیه‌ی ترک‌خورده، فاز جامد تشکیل شده و موجب انسداد ترک می‌گردد.

در این پروژه جهت ساخت کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، ابتدا مواد ترمیم‌کننده (رزین اپوکسی ۵۰۵۲ و هاردنر) درون الیاف توخالی از جنس شیشه به قطر خارجی متوسط ۴۰۰ میکرومتر و با درصد‌های حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ ذخیره گشته و سپس در داخل نمونه‌های رزین اپوکسی و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت (۱ و ۲ درصد حجمی)، قرار داده شدند. در ابتدا درصد الیاف بهینه و زمان ترمیم مناسب مشخص و سپس به منظور بررسی چگونگی انجام عملیات ترمیم، آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای، کشش و ضربه بر نمونه‌های رزین و کامپوزیت انجام گردید. طبق نتایج آزمایش‌ها از این روش می‌توان جهت افزایش کارایی نمونه‌های تحت بار خمشی و ضربه استفاده نمود؛ ولی در آزمون کشش تاثیر عمده‌ی فرآیند خودترمیمی بر اثر وجود الیاف پرشده در نمونه‌ها محسوس نمی‌باشد. همچنین ازدیاد درصد حجمی الیاف خردشده بازالت سبب افزایش استحکام شده و تاثیری بر اثربخشی ترمیم ندارد.

کلمات کلیدی: الیاف شیشه توخالی، کامپوزیت خودترمیم‌شونده، مواد ترمیم‌کننده، الیاف بازالت

فهرست

صفحه	عنوان
۱.....	فصل ۱ مقدمه
۶.....	فصل ۲ مروری بر تحقیقات پیشین
۷.....	۲-۱- خودترمیمی در شیشه
۸.....	۲-۲- خودترمیمی در فلزات
۸.....	۱-۲-۲- مکانیزم ترمیم توسط فاز مایع
۹.....	۲-۲-۲- ترمیم در حالت فاز جامد
۱۱.....	۲-۳- خودترمیمی در کامپوزیتها
۱۲.....	۱-۳-۲- خودترمیمی در بتن
۱۴.....	۲-۳-۲- خودترمیمی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی
۱۶.....	۳-۳-۲- خودترمیمی در کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی
۱۹.....	۴-۳-۲- فرآیند خودترمیمی در کامپوزیت‌های پلیمری
۲۲.....	۱-۴-۳-۲- انواع مکانیزم‌های خودترمیمی در کامپوزیت‌های پلیمری
۳۳.....	۲-۴-۳-۲- الیاف توخالی
۳۹.....	۳-۴-۳-۲- مراحل ترمیم کامپوزیت‌های پلیمری شامل الیاف
۴۲.....	۴-۴-۳-۲- مدل‌های اصلی کامپوزیت‌های پلیمری خودترمیمی شامل الیاف توخالی
۴۴.....	۵-۳-۲- کامپوزیت‌های خودترمیم شونده‌ی ساندویچی
۴۵.....	۶-۳-۲- کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده با استفاده الیاف کربنی
۵۰.....	فصل ۳ مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش
۵۱.....	۱-۳- معرفی مواد

- ۳-۱-۱- رزین اپوکسی ۵۱
- ۳-۱-۲- الیاف بازالت ۵۴
- ۳-۱-۳- الیاف شیشه‌ی توخالی ۵۶
- ۳-۲- تجهیزات مورد استفاده ۵۷
- ۳-۲-۱- دستگاه کشش ۵۷
- ۳-۲-۲- نگهدارنده آزمون خمش سه نقطه‌ای ۵۷
- ۳-۲-۳- دستگاه آزمون ضربه شاریبی ۵۹
- ۳-۲-۴- میکروسکوپ نوری ۵۹
- ۳-۲-۵- دستگاه پرس ۵۹
- ۳-۲-۶- ترازو ۵۹
- ۳-۳- تولید نمونه‌های آزمایش ۶۰
- ۳-۳-۱- پر کردن الیاف توخالی و قالب‌گیری نمونه‌ها ۶۰
- ۳-۳-۲- نحوه‌ی ایجاد تخریب در نمونه ۷۰
- ۳-۴- آزمایش‌های مکانیکی ۷۰
- ۳-۴-۱- آزمون کشش ۷۰
- ۳-۴-۲- آزمون خمش سه نقطه‌ای ۷۱
- ۳-۴-۳- آزمون ضربه شاریبی ۷۲

فصل ۴ نتایج و بحث ۷۴

- ۴-۱- محاسبه‌ی درصد الیاف توخالی بهینه جهت انجام آزمایشات ۷۵
- ۴-۲- محاسبه‌ی بهترین زمان خودترمیمی در نمونه‌های خودترمیمی ۷۷
- ۴-۳- نتایج آزمون خمش ۸۰
- ۴-۳-۱- رزین ساده ۸۰
- ۴-۳-۲- کامپوزیت با ۱٪ حجمی الیاف بازالت ۸۵
- ۴-۳-۳- کامپوزیت با ۲٪ حجمی الیاف بازالت ۸۹
- ۴-۳-۴- مقایسه‌ی نتایج خمش سه نقطه‌ای رزین ساده با کامپوزیت‌های بازالت ۹۳
- ۴-۴- نتایج آزمون کشش ۱۰۰

۱۰۰	..... رزین ساده ۱-۴-۴
۱۰۴	..... کامپوزیت با ۲٪ حجمی الیاف بازالت ۲-۴-۴
۱۰۸	..... مقایسه‌ی نتایج کشش نمونه‌های رزین و کامپوزیت (۲٪ حجمی الیاف بازالت) ۳-۴-۴
۱۱۲	..... نتایج آزمون ضربه ۵-۴
۱۱۲	..... رزین ساده ۱-۵-۴
۱۱۴	..... کامپوزیت با ۱٪ حجمی الیاف بازالت ۲-۵-۴
۱۱۵	..... کامپوزیت با ۲٪ حجمی الیاف بازالت ۳-۵-۴
۱۱۷	..... مقایسه‌ی نمونه‌های رزین با نمونه‌های کامپوزیت در آزمایش ضربه ۴-۵-۴
۱۱۸	..... مقایسه‌ی آزمون خمش، کشش و ضربه ۶-۴
۱۲۵	..... بررسی سطوح شکست نمونه‌ها ۷-۴
۱۲۵	..... نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای ۱-۷-۴
۱۲۶	..... نمونه‌های کششی ۲-۷-۴
۱۳۰	..... شکست نمونه‌های ضربه ۳-۷-۴
۱۳۱	..... مطالعه‌ی تصاویر میکروسکوپی فرآیند خودترمیمی ۸-۴

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۳۳

۱۳۴	..... نتیجه‌گیری ۱-۵
۱۳۶	..... پیشنهادها ۲-۵
۱۳۷	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: پارامترهای کلیدی در مورد کامپوزیت‌های ترمیم‌شونده ۴
- شکل ۱-۲: نفوذ ماده‌ی حل‌شونده به سمت مرزخانه‌ها ۹
- شکل ۲-۲: ترمیم ریزساختار حین بروز فرآیندهایی نظیر خزش یا خستگی حرارتی ۱۰
- شکل ۳-۲: تصویر SEM از رسوب‌گذاری در تخلخل موجود در آلیاژ Mg Al-Zn-Cu ۱۱
- شکل ۴-۲: آزمون خمش نمونه‌های بتنی ترمیم‌شده ۱۳
- شکل ۵-۲: مکانیزم ترمیم کامپوزیت زمینه فلزی با کانال‌های حاوی فلزات با نقطه ذوب پایین ۱۵
- شکل ۶-۲: مکانیزم خودترمیمی توسط آلیاژهای حافظه‌دار ۱۶
- شکل ۷-۲: نمایش فرآیند نمونه‌ی ترک‌خورده و ترمیم‌شده Sn-21%Bi ۱۶
- شکل ۸-۲: نمودار میانگین استحکام خمشی نانوکامپوزیت آلومینا-کاربیدسیلیسیم ۱۸
- شکل ۹-۲: تصویر SEM نمونه‌ی نانوکامپوزیت آنیل‌شده در دمای (الف) 1600°C (ب) 1200°C ۱۸
- شکل ۱۰-۲: ریزساختار نمونه‌ی آلومینا-کاربیدسیلیسیم تحت میکروسختی ۱۹
- شکل ۱۱-۲: (الف) تصویر میکروسکوپ نوری (ب) ۲ (ج) ۲۰ (د) ۴۰ (ه) ۶۰ و (و) ۹۰ ثانیه بعد از خراش ۲۱
- شکل ۱۲-۲: یونومر سوراخ‌شده توسط گلوله و ترمیم شده ۲۳
- شکل ۱۳-۲: محصولات پلیمریزاسیون و استحاله‌ی ترمیم پرکننده‌ی وجوه ترک ۲۶
- شکل ۱۴-۲: (الف) و (ب) آزمون ضربه با انرژی ۱/۵ ژول (ج) و (د) آزمون ضربه با انرژی ۲/۵ ژول ۲۷
- شکل ۱۵-۲: تصاویر میکروسکوپی از میکروکپسول‌ها در کامپوزیت ۲۸
- شکل ۱۶-۲: مکانیزم ترمیم خرابی در سیستم میکروکپسول‌ها ۲۹
- شکل ۱۷-۲: مکانیزم شبکه‌ی آوندی در طبیعت و شبیه‌سازی آن جهت ساخت کامپوزیت ۳۱
- شکل ۱۸-۲: مراحل ترمیم کامپوزیت با الیاف توخالی به صورت شماتیک ۳۲
- شکل ۱۹-۲: ریزساختار الیاف شیشه‌ی توخالی با کسر حجمی ۵۰٪ و قطر خارجی ۶۰ میکرون ۳۳
- شکل ۲۰-۲: سطح داخلی الیاف توخالی غشایی ۳۴
- شکل ۲۱-۲: تصویر انجام عملیات همودیالیز ۳۵
- شکل ۲۲-۲: تصویر الیاف توخالی داخل لمینیت ۳۷
- شکل ۲۳-۲: تصویر میکروسکوپ نوری مراحل ترمیم در کامپوزیت خودترمیم‌شونده حاوی الیاف شیشه ۴۰
- شکل ۲۴-۲: پدیده‌ی ترمیم موضعی برخی مناطق الیاف و وجود مقادیری از عامل ترمیم دست‌نخورده ۴۰

- شکل ۲-۲۵: تصاویر میکروکپسول شکسته شده در نمونه
- شکل ۲-۲۶: الیاف توخالی و تراوش عامل خودترمیم از داخل آن
- شکل ۲-۲۷: ترمیم هوشمند در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری
- شکل ۲-۲۸: کامپوزیت پایه اپوکسی Epikote828 با الیاف شیشه‌ی تک جهته نوع E
- شکل ۲-۲۹: طراحی شبکه برای نمونه‌ی ساندویچی ترمیم‌شونده
- شکل ۲-۳۰: (الف) نحوه‌ی قرارگیری الیاف توخالی، (ب) پل زنی فصل مشترک ترک‌ها در یک کامپوزیت
- شکل ۲-۳۱: تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت پلیمری تقویتی الیاف کربن ترمیمی با الیاف توخالی شیشه
- شکل ۲-۳۲: (الف) جاسازی نامناسب الیاف HGF و (ب) تجمع الیاف به دلیل فاصله‌ی کم
- شکل ۲-۳۳: نمایش ترک برشی بدون بروز جدالایی در CFRP
- شکل ۲-۳۴: (الف) نمونه‌ی کامپوزیتی تحت آزمون چقرمگی شکست و (ب) نتایج نمونه‌های خودترمیم و اولیه
- شکل ۲-۳۵: تغییرات ضریب شدت تنش ترک خستگی برحسب زمان فرآیند ترمیم
- شکل ۲-۳۶: انحراف رشد ترک از مسیر گسیختگی اولیه پس از رخداد استحاله‌ی ترمیم
- شکل ۳-۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی الیاف شیشه (الف) مقطع طولی، (ب) سطح مقطع
- شکل ۳-۲: دستگاه کشش هانسفیلد H25KS
- شکل ۳-۳: نگهدارنده‌ی دستگاه خمش سه نقطه‌ای در حین آزمایش خمش
- شکل ۳-۴: تصویر دستگاه ضربه
- شکل ۳-۵: الیاف توخالی پر شده توسط رزین و هاردنر
- شکل ۳-۶: قاب‌های چوبی اولیه
- شکل ۳-۷: تصویر قالب فلزی جهت تولید نمونه‌های خمش، کشش و ضربه
- شکل ۳-۸: (الف) رووینگ بازالت (ب) الیاف بازالت خردشده
- شکل ۳-۹: فلوجارت انجام آزمایشات
- شکل ۳-۱۰: فلوجارت انجام آزمایشات جهت انتخاب درصد الیاف و زمان ترمیم بهینه
- شکل ۳-۱۱: تصویر شماتیک ایجاد تخریب در نمونه‌ها
- شکل ۳-۱۲: نمونه‌ی کششی تخریب شده
- شکل ۳-۱۳: نمونه‌ی کامپوزیت در آزمون ضربه شارپی
- شکل ۴-۱: مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های خودترمیم‌شونده با درصد الیاف و زمان های ترمیم متفاوت
- شکل ۴-۲: مقایسه‌ی استحکام کششی نمونه‌ها با درصد الیاف متفاوت
- شکل ۴-۳: مقایسه‌ی انرژی ضربه‌ی نمونه‌های رزین با درصد الیاف متفاوت

- شکل ۴-۴: نمودار خطی مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های رزین با زمان‌های ترمیم مختلف ۷۸
- شکل ۵-۴: مقایسه‌ی نمونه‌ها با درصد متفاوت الیاف و زمان ترمیم نسبت به نمونه‌ی با ۱۴ روز زمان ترمیم ۷۹
- شکل ۶-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های رزین تحت بار خمشی ۸۱
- شکل ۷-۴: مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های رزین ۸۱
- شکل ۸-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار خمشی ۸۲
- شکل ۹-۴: منحنی مقاومت ترک در اثر پل بستن الیاف ۸۵
- شکل ۱۰-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های رزین در بار خمشی ۸۵
- شکل ۱۱-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیت ۱٪ در بار خمشی ۸۷
- شکل ۱۲-۴: نمودار مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت با ۱٪ حجمی الیاف بازالت ۸۷
- شکل ۱۳-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۱٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار خمشی ۸۸
- شکل ۱۴-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۱٪ در بار خمشی ۸۹
- شکل ۱۵-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ در خمش ۹۰
- شکل ۱۶-۴: نمودار مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ الیاف بازالت ۹۱
- شکل ۱۷-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار خمشی ۹۱
- شکل ۱۸-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ تحت بار خمشی ۹۳
- شکل ۱۹-۴: مقایسه‌ی استحکام خمشی نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و کامپوزیت ۲٪ ۹۴
- شکل ۲۰-۴: تصویر تنش-کرنش شماتیک برای الیاف و ماتریس ۹۵
- شکل ۲۱-۴: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و ۲٪ در بار خمشی ۹۵
- شکل ۲۲-۴: مقایسه‌ی درصد آسیب نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و ۲٪ در بار خمشی ۹۶
- شکل ۲۳-۴: منطقه‌ی آسیب در یک ماده‌ی مرکب با الیاف کوتاه ۹۷
- شکل ۲۴-۴: انحراف ترک الف: کج شدن جبهه‌ی ترک، ب: تابیدن جبهه‌ی ترک ۹۸
- شکل ۲۵-۴: مکانیزم‌های مقاومت الیاف، الف: جدا شدن، ب: بیرون کشیدن ۹۸
- شکل ۲۶-۴: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و ۲٪ در بار خمشی ۹۹
- شکل ۲۷-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های رزین در بار کششی ۱۰۱
- شکل ۲۸-۴: مقایسه‌ی استحکام کششی نمونه‌های رزین ۱۰۲
- شکل ۲۹-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم و آسیب نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار کششی ۱۰۳
- شکل ۳۰-۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین در بار کششی ۱۰۴
- شکل ۳۱-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ در بار کششی ۱۰۵

- شکل ۴-۳۲: مقایسه‌ی استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ در بار کششی ۱۰۶
- شکل ۴-۳۳: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار کششی ۱۰۷
- شکل ۴-۳۴: نمودار درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در بار کششی ۱۰۷
- شکل ۴-۳۵: مقایسه‌ی استحکام کششی نمونه‌های رزین و کامپوزیت با ۲٪ حجمی الیاف بازالت ۱۰۹
- شکل ۴-۳۶: اثر تغییر شکل در اطراف الیاف کوتاه ۱۱۰
- شکل ۴-۳۷: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین و کامپوزیت، نسبت به نمونه‌های شاهد در بار کششی ۱۱۰
- شکل ۴-۳۸: مقایسه‌ی درصد آسیب نمونه‌های رزین و کامپوزیت ۲٪، نسبت به نمونه‌های شاهد در بار کششی ۱۱۱
- شکل ۴-۳۹: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های رزین و کامپوزیت ۲٪ در بار کششی ۱۱۲
- شکل ۴-۴۰: نمودار درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در آزمون ضربه ۱۱۴
- شکل ۴-۴۱: نمودار درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های کامپوزیت ۱٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در آزمون ضربه ۱۱۵
- شکل ۴-۴۲: نمودار درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد در آزمون ضربه ۱۱۷
- شکل ۴-۴۳: مقایسه‌ی انرژی ضربه نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و ۲٪ ۱۱۸
- شکل ۴-۴۴: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم در نمونه‌های رزین، کامپوزیت ۱٪ و ۲٪ در آزمون ضربه ۱۱۸
- شکل ۴-۴۵: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در بارگذاری‌های متفاوت ۱۱۹
- شکل ۴-۴۶: مقایسه‌ی درصد آسیب نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در بارگذاری‌های متفاوت ۱۲۰
- شکل ۴-۴۷: توزیع تنش الف) خمش سه نقطه‌ای، ب) کشش بر نمونه با سطح مقطع مستطیل ۱۲۱
- شکل ۴-۴۸: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین در بارگذاری‌های متفاوت ۱۲۲
- شکل ۴-۴۹: مقایسه‌ی درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین نسبت به نمونه‌ی شاهد در بارگذاری‌های متفاوت ۱۲۳
- شکل ۴-۵۰: مقایسه تفاوت درصد اثربخشی ترمیم نمونه‌های رزین و کامپوزیت ۲٪، در بارگذاری‌های متفاوت ۱۲۴
- شکل ۴-۵۱: مقایسه تفاوت درصد آسیب نمونه‌های رزین و کامپوزیت ۲٪، در بارگذاری‌های متفاوت ۱۲۵
- شکل ۴-۵۲: حالت‌های مختلف از کارافتادگی در آزمون خمش ۱۲۶
- شکل ۴-۵۳: شکست نمونه‌ی الف) 3Ff-1B-WD-00، ب) 0Fu-1B-WD-00 ۱۲۷
- شکل ۴-۵۴: نمونه‌ی 3Ff-0B-WD-07 پس از آزمون خمش ۱۲۸
- شکل ۴-۵۵: تصویر الیاف بازالت بیرون‌زده در نمونه‌ی 3Ff-2B-WD-07 ۱۲۸
- شکل ۴-۵۶: حالت‌های مختلف از کارافتادگی در آزمون کشش ۱۲۹
- شکل ۴-۵۷: نمونه‌ی 0Fu-0B-WD-00 در آزمایش کشش ۱۲۹
- شکل ۴-۵۸: الف) بیرون‌زدگی الیاف در نمونه‌ی 3Ff-0B-WD-07، ب) شکست در نمونه‌ی 3Ff-0B-WD-07 ۱۳۰
- شکل ۴-۵۹: الف) شکست نمونه‌ی 3Ff-0B-WD-07 از وسط نمونه، ب) شکست نمونه‌ی 3Fu-0B-WD-00 ۱۳۰

- ۱۳۰ شکل ۴-۶۰: شکست نمونه‌ی ضربه 3Ff-2B-WD-07 از وسط نمونه
- ۱۳۱ شکل ۴-۶۱: الف) نمونه‌ی خودترمیم‌شونده قبل از تخریب، ب) بلافاصله، ج) ۴ روز و د) ۷ روز بعد از تخریب
- ۱۳۲ شکل ۴-۶۲: الف، ب و ج) برخورد ترک با الیاف پر شده د) نمونه‌ی ترمیم‌شده بعد از گذشت ۴ روز

فهرست جدول‌ها

۳۶	جدول ۱-۲: اثربکارگیری الیاف توخالی در کاهش وزن کامپوزیت
۵۲	جدول ۱-۳: مشخصات رزین اپوکسی مورد استفاده
۵۳	جدول ۲-۳: مشخصات شیمیایی و فیزیکی استون
۵۵	جدول ۳-۳: مقایسه‌ی خواص الیاف بازالت با سایر الیاف
۵۶	جدول ۴-۳: مشخصات رووینگ بازالت
۶۴	جدول ۵-۳: ابعاد نمونه‌های کشش، خمش و ضربه بر اساس الزامات ASTM
۶۵	جدول ۶-۳: جدول مشخصات کلی نمونه‌های شاهد و خودترمیم‌شونده
۶۹	جدول ۷-۳: مشخصات نمونه‌های کدگذاری شده در آزمایش‌های مختلف
۷۱	جدول ۸-۳: فهرست نمونه‌های کشش رزین و کامپوزیت
۷۲	جدول ۹-۳: فهرست نمونه‌های خمش رزین و کامپوزیت
۷۳	جدول ۱۰-۳: فهرست نمونه‌های ضربه‌ی رزین و کامپوزیت
۷۸	جدول ۱-۴: استحکام خمشی نمونه‌های خودترمیم‌شونده
۸۰	جدول ۲-۴: نتایج آزمون خمش نمونه‌های رزین
۸۶	جدول ۳-۴: نتایج آزمون خمش نمونه‌های کامپوزیت با ۱٪ بازالت
۸۹	جدول ۴-۴: نتایج آزمون خمش نمونه‌های کامپوزیت با ۲٪ بازالت
۱۰۰	جدول ۵-۴: نتایج آزمون کشش نمونه‌های رزین
۱۰۵	جدول ۶-۴: نتایج آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیت با ۲٪ حجمی الیاف بازالت
۱۱۳	جدول ۷-۴: انرژی ضربه، درصد اثربخشی ترمیم و آسیب نمونه‌های رزین در آزمون ضربه
۱۱۴	جدول ۸-۴: انرژی ضربه، درصد اثربخشی ترمیم و آسیب نمونه‌های کامپوزیت ۱٪ در آزمون ضربه
۱۱۶	جدول ۹-۴: انرژی ضربه، درصد اثربخشی ترمیم و آسیب نمونه‌های کامپوزیت ۲٪ در آزمون ضربه

فصل ۱

مقدمه

۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها در واقع مواد مهندسی هستند که از دو یا چند جزء سازنده با خواص شیمیایی و فیزیکی کاملاً متفاوت تشکیل شده‌اند. این مواد در مقیاس ماکروسکوپی، دارای ساختار نهایی مجزا و قابل تشخیص می‌باشند. خواص کامپوزیت‌ها از ترکیب اجزای مختلف به دست می‌آید؛ به طوری که این خواص از هیچ‌کدام از اجزا به تنهایی تبعیت نمی‌نمایند.

کامپوزیت‌ها هزاران سال است که توسط بشر تهیه و مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین کامپوزیت مورد استفاده‌ی بشر که در تاریخ گزارش شده، کاه‌گل می‌باشد که طی سال‌های طولانی، برای ساخت‌وساز استفاده شده است. چوب‌های چند لایه نیز یکی از اولین کامپوزیت‌هایی بودند که توسط مصری‌های قدیمی مورد استفاده قرار گرفتند.

اما کامپوزیت‌های پیشرفته در اواخر دهه‌ی ۱۹۳۰ با ابداع الیاف شیشه، تولید و به کار گرفته شدند و به تدریج سرعت پیشرفت آن‌ها در زمان جنگ جهانی دوم و دهه‌های بعدی افزایش یافت.

از آن جایی که توسعه‌ی کیفیت مواد و عملکرد آن‌ها، پارامتر مهمی در طراحی ساختارهای مهندسی است و یکی از مهم‌ترین موادی که توسط مهندسين در سازه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود کامپوزیت است، توسعه‌های ایجادشده در زمینه‌ی کامپوزیت‌ها، نقش مهمی در زندگی روزمره در قرن ۲۱ دارد [۱]. یکی از معمول‌ترین دلایل انهدام کلیه‌ی مواد مهندسی از جمله کامپوزیت‌ها، ترک‌های ریز در ساختار آن‌ها می‌باشد. این ترک‌های ریز در مواد کامپوزیتی منجر به تورق قطعه و کاهش قابلیت ساختار آن می‌شود و چنانچه تخریب، تشخیص داده نشده و ترمیم نگردد، تخریب زودهنگام در آن رخ می‌دهد. همچنین ترک‌ها و تورق ایجادشده در ساختارهای کامپوزیتی باعث تولید منافذی برای داخل شدن آلودگی مانند رطوبت و میکروارگاسم نیز می‌گردد.

این موضوع برای سازه‌هایی نظیر سازه‌های ایستگاه‌های فضایی، سازه‌های زیرزمینی، زیر آبی، سازه‌های نگه‌دارنده‌ی مایعات و یا سازه‌های حساس مربوط به تأسیسات اتمی به دلیل دسترسی بسیار محدود نیروهای نظارتی، اهمیت دوچندان می‌یابد. از منظر دیگر، طولانی‌نمودن هر چه بیشتر عمر مفید فقط با تکیه بر تکنیک-

های نظارت و نگهداری دقیق ممکن می‌شود. این در شرایطی است که حتی اگر بررسی‌ها و تشخیص‌ها به درستی انجام شود، همواره عملی‌بودن امر ترمیم ممکن نیست [۲]. از این‌رو مهندسين سعی بر الگوبرداری زیستی در راستای ایجاد مصالح خودترمیم نمودند. در این راستا سعی کردند با بهره‌گیری از تکنولوژی نانو و میکرو، مکانیزم ترمیم در بدن موجودات زنده را شبیه‌سازی کنند تا از این طریق به استراتژی ترمیم دست یابند [۳]. به عنوان مثال با الهام‌گرفتن از نقش گلبول‌های قرمز در لخته‌شدن خون و ترمیم، اقدام به ساخت کپسول-های بسیار ریز^۱ حاوی عامل ترمیم‌کننده^۲ نمودند [۴]. به کارگیری الیاف توخالی، روش دیگری از مکانیزم خودترمیمی را در اختیار دانشمندان قرار داد [۵] که در این روش توانستند با استفاده از رنگ‌های فلورسنت در عامل ترمیم‌کننده‌ی جاری در الیاف، پدیده‌ی کبودشدگی^۳ را در موجودات زنده بازسازی نمایند که نقش مهمی در تشخیص محل آسیب‌دیدگی دارد [۶]. در این مسیر دست‌یابی به الگوی چند عملکردی آن‌چنان که در بهترین شکل خود در بافت‌های زنده وجود دارند، دانشمندان را به توسعه‌ی شیوه‌های کارآمدتر ترمیم واداشت. در حالت کلی برای طراحی یک سیستم خودترمیم بهینه، توجه به نکات زیر ضروری به نظر می‌رسد [۷]:

- انتخاب بهترین سیستم از مکانیزم‌های موجود [۷]
- انتخاب بهترین ماده‌ی ترمیم‌کننده با حفظ خصوصیات کامپوزیت پایه [۷]
- در برگرفتن حجمی کافی از عامل ترمیم‌کننده برای ترمیمی کارآمد [۷]
- نشان‌دادن پاسخ مناسب در مقابل محرک از جانب عامل ترمیم [۷]
- سیالیت و موئینگی بالای عامل ترمیم برای نفوذ کافی در میان میکروتُرک‌ها [۷]
- انجام فرآیند ترمیم به مقدار کافی، به سرعت و قبل از گسترش خرابی [۷]

¹- Micro-Encapsulated

²- Healing agent

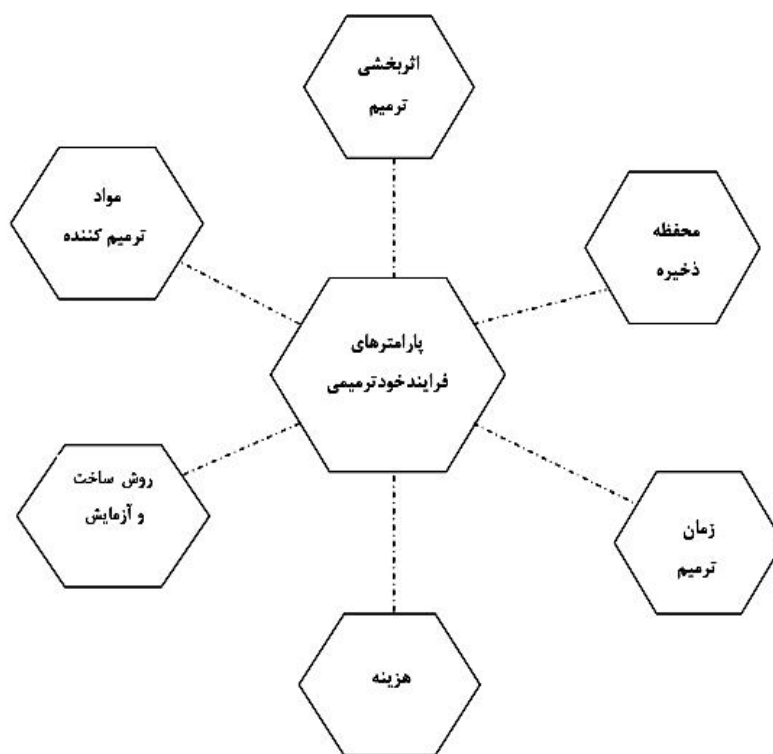
³- Bruise

- در مراحل اولیه، جلوگیری از خرابی فاجعه‌آمیز و در حالات پیشرفته‌تر، برگشت به شرایط اولیه [۷]

- امکان ذخیره‌سازی عامل ترمیم مازاد پس از عملیات ترمیم [۷]

- قابلیت تکرارپذیری خودترمیمی سیستم [۷]

با توجه به مطالب فوق، جنبه‌های مختلفی برای کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده برای دستیابی به قابلیت ترمیم مانند سیستم‌های زیستی باید در نظر گرفته شود. در شکل ۱-۱ پارامترهای بحرانی در نظر گرفته شده برای توسعه‌ی کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، نشان داده شده است [۷].



شکل ۱-۱: پارامترهای کلیدی در مورد کامپوزیت‌های ترمیم‌شونده [۷].

این کار تحقیقاتی در راستای دستیابی به نمونه‌هایی با کارایی بالاتر و قابلیت ترمیم خودبخود که بتواند ترک‌های داخلی ایجادشده را تا حدی ترمیم کرده و عمر قطعه را افزایش دهد، تحت عنوان بررسی تجربی کامپوزیت پلیمری خودترمیم‌شونده با الیاف توخالی و تقویت‌شده با الیاف بازالت انجام شده است.

در فصل دوم، مواد خودترمیم‌شونده، کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده و کارهای تحقیقاتی و پژوهش‌هایی که در این راستا انجام شده، مرور شده است. در فصل سوم نمونه‌های خودترمیم‌شونده بر اساس یکی از روش‌های ذکر شده در فصل دوم و با استفاده از ذخیره‌ی رزین و هاردنر در داخل الیاف شیشه‌ی توخالی با قطر ۴۰۰ میکرومتر و استفاده از رزین اپوکسی به عنوان زمینه و الیاف بازالت به عنوان تقویت‌کننده تولید شده‌اند. لازم به ذکر است الیاف شیشه‌ی توخالی مورد استفاده با روش آزمایشگاهی جهت استفاده در این پژوهش ساخته شدند.

پس از ایجاد یک تخریب، الیاف پر شده در نمونه‌ها شکسته شده و مدتی در دمای اتاق قرار می‌گیرند. بعد از زمان مورد نظر، نمونه‌های خودترمیم‌شونده با درصد‌های ۱٪، ۳٪ و ۵٪ الیاف پر شده، تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای، کشش تک‌محوری و ضربه‌ی شارپی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای، کشش و ضربه در فصل چهارم مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و نتایج کلی و پیشنهادات در فصل پنجم بیان شده‌اند.

فصل ۲

مروری بر تحقیقات پیشین