

کمپوزیت‌های خودترمیم‌شونده

پدیدآورنده:

مهندس محمد علی...

ناشر: انجمن خوردگی ایران

تابستان ۱۳۹۳



آشارت انجمن خوردگی ایران

تمامی حقوق محفوظ و متعلق به مؤلف می‌باشد

سرشناسه	: عابدینی، محمد، ۱۳۶۵
عنوان و نام پدیدآور	: کامپوزیت‌های خود ترمیم شونده/ مولف محمد عابدینی.
مشخصات نشر	: تهران : انجمن خوردگی ایران، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: [۲۲۰] ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: 978-600-5583-29-8 : ۱۴۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
ناشر	: واژه‌نامه.
پاداش	: کتابنامه: ص. [۲۲۱ - ۲۳۰]
موضوع	: مواد خود ترمیم‌شونده
شناسه افزوده	: انجمن خوردگی ایران
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ ۱۷ع۲ / ۱۸۴۱۸/۹
رده بندی دیویی	: ۶۲۰/۱۱۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۵۸۷۲۱۸



انتشارات انجمن خوردگی ایران



نام کتاب:	کامپوزیت‌های خود ترمیم‌شونده
مؤلف:	محمد عابدینی
ناشر:	انجمن خوردگی ایران
سال و نوبت چاپ:	تابستان ۱۳۹۳، چاپ اول
شمارگان:	۵۰۰ جلد
چاپ:	فرسیما
صفحه آرائی و طرح جلد:	رامین روجانی

نشانی ناشر: تهران، خ انقلاب، میدان فردوسی، خیابان شهید عباس موسوی (فرصت)، کوچه بهار، پلاک ۱۱، طبقه ۲. تلفن: ۸۸ ۳۴ ۴۲ ۸۷-۸. دورنگار: ۸۸ ۳۴ ۷۷ ۴۹

(اخذ مجوز و آماده‌سازی کتاب برای چاپ، توسط انتشارات انجمن خوردگی ایران پذیرفته می‌شود)

قیمت: ۱۴۰۰۰ تومان

شتاب فناوری در زمینه‌های مختلف یک پیام دارد و آن این‌که "اگر پا به پای فناوری‌های نو حرکت نکنیم جبران عقب ماندگی‌ها غیرممکن است". غیر قابل رقابت بودن فناوری‌های قدیمی، بیشتر ریشه‌ی اقتصادی دارد. ماشین بافندگی‌ای که روزی به‌طور پیاپی تولید می‌کرد، جایش را داده به ماشین بافندگی جدیدی که ساعتی ۳۰ متر پارچه تولید می‌کند. صنایع قدیمی در برابر رقابت دیگر قدرت مقاومت ندارند. وضعیت تمامی صنایع کم و بیش چنین است. وظیفه‌ی دانشگاهیان در این شتاب فناوری بسیار مهم می‌باشد. از آنجایی‌که این عزیزان به‌طور مستمر با مقالات علمی، سایت‌های اطلاعاتی و کتب و نشریات سروکار دارند، باید جامعه را از تحولات جهانی مطلع کنند. وقوع زلزله و طوفان فناوری را باید پیش‌بینی کنند و راه‌های پیش‌رفت از وقوع چنین سونامی را جهت جلوگیری از بروز فاجعه و نابودی کشورشان، با قاطعیت به مسئولین اطلاع و هشدار دهند. یکی از این راه‌کارها نوشتن کتاب است. اگر کسب علم و دانش مبارزه با جهل است، نوشتن کتاب، همه به‌صورت ترجمه و یا تألیف، مبارزه با کسانی است که نمی‌خواهند تا جوامع مختلف، به‌خصوص نسل جوانان دانشجویان و استادان، به‌طورهای مختلف از علوم جدید بهره‌مند شوند. کتاب به انسان آگاهی می‌دهد، انسان آگاه تصمیم‌های درست‌تر می‌گیرد و تصمیمات درست ما را به سرمنزل مقصود می‌رساند. کتاب حاضر دریچه‌ای را به سوی فناوری جدید کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده باز می‌کند. این کتاب با جمع‌آوری روش‌های ایجاد خودترمیم‌شوندگی در مواد مهندسی، انواع کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده و روش‌های مقابله با آسیب‌های مکانیکی در کامپوزیت‌ها را شرح می‌دهد.

این کتاب توسط جناب آقای دکتر گیوه چی و اینجانب به طور کامل روخوانی و ویرایش شد. از جناب آقای مهندس محمد عابدینی که همت کردند و با خواندن مقالات مختلف مرتبط، چنین مجموعه‌ای را گردآوری نمودند، باید تشکر کرد و آرزو نمود تا جوانان دیگر نیز، در حد بضاعت خود، وارد چنین میادین کارزاری شوند. ابزار مورد نیاز در این میدان، علم و تجربه است. امید است که اساتید دانشگاهی، از متقدمین و متأخرین، با تجربه‌ها و جوانان، با انتشار کتب علمی مفید، زندگی علمی را بر نسل آینده هموارتر کنند.

ناصر گیوه چی - سید محمود کثیریها

اعضای هیأت مؤسس انجمن خوردگی ایران

پیش‌گفتار مؤلف

کتاب حاضر با محوریت کاربردهای ترمیمی، به معرفی اهمیت و ماهیت بحث مواد خودترمیم‌شونده می‌پردازد و می‌کوشد بستر علمی مناسبی را برای محققان داخلی فراهم آورد تا با اطلاع از مبانی و اصول ایجاد خودترمیم‌شوندگی، ضمن بسط و گسترش دانش فنی و این دسترس علمی، بتوانند در راستای پیاده‌سازی و کاربردی نمودن آن اقدام نمایند. با توجه به گستره‌ی استفاده و تنوع پلیمرها و کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، امکان پرداختن به تمامی جنبه‌های این کامپوزیت‌های هوشمند وجود ندارد. لذا پس از معرفی اجمالی هر یک از راه‌کارهای خودترمیم‌شوندگی، اصول کلی کار و مبانی و مفاهیم مربوطه مرور می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از اطاله‌ی کلام، مطالعه‌ی بیشتر هر حوزه با ارجاع دادن به منابع مطالعاتی امکان‌پذیر شده است.

مجموعه‌ی حاضر رسالت خود را تشریح بحث نوپای مواد خودترمیم‌شونده و معرفی زمینه‌های کاری و پتانسیل‌های موجود می‌داند. ضمن آن‌که در نگارش متن کتاب همواره سعی بر آن بوده تا حد امکان با معادل‌سازی اصطلاحات انگلیسی و استفاده از واژگان مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی، سواد نگارش فنی و علمی رعایت گردد. همچنین تلاش شده در موارد لازم معادل انگلیسی اصطلاحات پی‌نوشت‌شده تا در صورت نیاز خوانندگان به اطلاعات تکمیلی و یا اطلاع از مباحث پیرامونی، امکان دسترسی به واژگان انگلیسی اصطلاحات اصلی وجود داشته باشند.

در اولین فصل کتاب، مقدمه‌ای کلی درباره‌ی کلیت خودترمیم‌شوندگی و مقدمات لازم برای نيل به آن ارائه می‌شود و در ادامه انواع روش‌های ایجاد این قابلیت معرفی می‌شوند که علاوه بر کامپوزیت‌های پلیمری خودترمیم، پلیمرهای غیر کامپوزیتی با خودترمیم‌شوندگی ذاتی را نیز در برمی‌گیرد.

در فصل دوم ایجاد کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده بر پایه‌ی میکروکپسول‌های حاوی عوامل ترمیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد که اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط تیم تحقیقاتی وایت پیشنهاد شد. از بدو معرفی این طرح پیشنهادی در دانشگاه ایلینویز، خیل فزاینده‌ای از مطالعات در این زمینه طرح‌ریزی و اجرا شده‌اند به‌گونه‌ای که همچنان به‌عنوان شاخص‌ترین کامپوزیت هوشمند خودترمیم‌شونده در دست مطالعه است.

با توجه به آن که بیشینه‌ی مطالعات روی خودترمیم‌شوندگی به روش میکروکپسوله‌کردن صورت گرفته است، در فصل سوم اساس و مبانی میکروکپسوله‌کردن و مباحث مربوط به آن مرور می‌شوند. انتظار می‌رود عناوین مورد بحث در این فصل، ضمن آشنا کردن خوانندگان با تحقیقات انجام شده برای کپسوله‌کردن عوامل ترمیمی، سایر حوزه‌های مطالعاتی مرتبط با میکروکپسوله‌کردن و واحدهای صنعتی وابسته را نیز پوشش دهد. هرچند بیان توضیحات همواره تحت عنوان میکروکپسوله‌کردن صورت می‌گیرد، اما مفاهیم و روش‌های معرفی شده پیرامون کپسوله‌کردن، محدود به ابعاد میکرون نمی‌شود و در مقیاس نانو و یا ماکرو نیز قابل بحث است.

روش بر ذاتی دیگر برای ایجاد کامپوزیت خودترمیم‌شونده، ذخیره‌ی اجزای ترمیمی در الیاف توخالی است که وظیفه‌ی رساندن و رهایش عوامل ترمیمی را به عهده دارند. این روش اولین بار در دانشگاه بریستول و برای هواپیما پیشنهاد شد که به عنوان مدل برای سایر کاربردها در بر داشته است. لذا در فصل چهارم این نسل از کامپوزیت‌های ترمیمی معرفی می‌شود.

جدیدترین طراحی برای کامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده به‌صورت ریزآوندی بوده که با تأثیر گرفتن از سازوکار ترمیم آسیب در بافت‌های زنده پیشنهاد شده است. انتقال عوامل ترمیمی در این سیستم‌های ترمیمی، به‌واسطه‌ی شبکه‌ای از ریزکانال‌های متصل به هم انجام می‌گیرد که به‌طور مداوم، رسانش عوامل پلیمرساز از محل ذخیره به محل آسیب را میسر ساخته و ترمیم مجدد یک موقعیت از کامپوزیت را امکان‌پذیر نموده‌اند. این کامپوزیت‌ها و جزئیات طراحی و اجرای آن‌ها در پنجمین فصل کتاب ارائه شده‌اند.

موضوع مشترک بین تمامی روش‌های خودترمیم‌شوندگی غیرالکترونی، اصول اجزای ترمیمی (نظیر کاتالیست و عامل ترمیمی) در کامپوزیت است تا در موقعیت زمانی و مکانی مورد نیاز پلیمریزاسیون در محل آسیب، آن را ترمیم نمایند. در تمامی این کامپوزیت‌ها، عوامل ترمیمی به شکل‌های مختلف ذخیره‌ایزوله می‌شوند تا در موعد مقرر در تماس با یکدیگر، ضمن ایجاد واکنش مؤثر و بازسازی محل تخریب، رفتار یک نمونه را هم تا حد امکان بازیابی نمایند. پس لازم است عوامل و اجزای ترمیمی مورد استفاده در سیستم‌های خودترمیم‌شونده شناخته شوند و امکان استفاده از آن‌ها تحت شرایط مختلف محیطی ارزیابی شود. در فصل ششم ضمن بیان معمول‌ترین اجزای ترمیمی، به‌طور ویژه کاتالیست Grubbs و عامل ترمیمی DCPD معرفی و محدودیت‌های کاری آن‌ها تبیین می‌گردد.

پارامترهای فیزیکی و رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های معرفی‌شده، قبل و پس از ترمیم، از جمله‌ی اصلی‌ترین کمیت‌ها برای تعیین میزان کارایی ترمیمی و اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده محسوب می‌شوند. در همین راستا در فصل هفتم پس از طبقه‌بندی انواع آسیب محتمل در کامپوزیت‌ها، راهکارهای مقابله‌ای برای حذف یا کاهش اثرات آن‌ها بررسی و بازده ترمیمی روش‌های خودترمیم‌شوندگی مختلف با هم مقایسه می‌شوند.

در فصل انتهایی کتاب ضمن بیان کاربردهای مواد خودترمیم‌شونده در حوزه‌های مختلف، پتانسیل‌های کاری آن‌ها در آینده بررسی می‌گردد. از آنجایی که استفاده از تکنولوژی‌های نوین (مخصوصاً در مراحل اولیه‌ی معرفی) نیازمند شناختن حق مالکیت‌های متعلق به مخترعین و نحوه‌ی ثبت یا بهره‌برداری از آن‌ها است، در فصل هشتم با اشاره به مراحل و شرایط ثبت اختراع و پتنت‌های ارائه شده در زمینه‌ی مواد خودترمیم‌شونده، مراحل کاربردی‌سازی و استفاده از آن‌ها را بررسی می‌نماییم.

این کتاب نیز همانند هر اثر دیگری خالی از ایراد و اشتباه نیست، لذا نگارنده‌ی این اثر صمیمانه پذیرای انتقادات، پیشنهادات و نظرات خوانندگان گرامی از طریق پست الکترونیکی m.abedini@ma.iut.ac.ir خواهد بود.

در پایان از ریاست محترم انجمن خوردگی ایران، جناب آقای دکتر دهکردی به‌خاطر در اختیار گذاشتن امکان چاپ و نشر کتاب و حمایت‌های انجمن و نیز از زحمات بی‌دریغ سرکار خانم سخنور و همفکری‌های سازنده‌ی آقای عباسیان، مسئول اجرایی محترم اسرار انجمن کمال تشکر را دارم. ضمن آن که خود را وامدار مساعدت و عنایت جناب آقای دکتر گیوهچی و جناب آقای مهندس کثیریها می‌دانم که ضمن قبول زحمت داوری کتاب، با پیشنهاد واژگان جای‌گزین فرهنگستان و تصحیح اصلاحات فنی و علمی، غنای این اثر را باعث شدند. هم‌چنین بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر اقبالی و جناب آقای دکتر گل‌عذار که اولین بار من را با مقوله‌ی مواد خودترمیم‌شونده آشنا ساختند، تشکر نمایم.

محمد عابدینی

تابستان ۹۳

فهرست مطالب

۳	.....	بیش گفتار مؤلف
۷	.....	فهرست مطالب
۱۳	.....	فصل اول: مقدمه‌ای بر خرد پلیمری
۱۳	.....	۱-۱ مقدمه
۱۵	.....	۲-۱ تعریف خاصیت خودترمیم‌شوندگی
۱۵	.....	۳-۱ موادی که ترمیم در آن‌ها مورد نیاز است
۱۵	.....	۱-۳-۱ پلاستیک و پلیمرها
۱۶	.....	۲-۳-۱ رنگ‌ها
۱۶	.....	۳-۳-۱ فلزات
۱۶	.....	۴-۳-۱ سرامیک‌ها و بتن‌ها
۱۷	.....	۴-۱ مقدمات لازم برای ایجاد خودترمیم‌شوندگی
۱۹	.....	۵-۱ راه‌کارهای خودترمیم‌شونده ساختن مواد پلیمری و آلی
۲۱	.....	۶-۱ پلیمرهای خودترمیم‌شونده‌ی ذاتی
۲۱	.....	۱-۶-۱ سیستم‌های برگشت‌پذیر با پیوندهای کووالانسی
۲۱	.....	۱-۶-۱ الف- واکنش‌های Diels-Aide
۲۳	.....	الف-۱: پلیمرهای بر پایه‌ی Furan- maleimide
۲۳	.....	الف-۲: پلیمرهای بر پایه‌ی دی‌سایکلوپنتادین
۲۴	.....	الف-۳: پلیمرهای بر پایه‌ی Authrancene
۲۵	.....	۱-۶-۱ ب- پلیمرهای بر پایه‌ی Thiol
۲۵	.....	۱-۶-۱ ج- پلیمرهای بر پایه‌ی اتصالات N-O
۲۶	.....	۱-۶-۱ د- پلیمرهای بر پایه‌ی دوپارش متأثر از نور
۲۶	.....	۲-۶-۱ سیستم‌های برگشت‌پذیر با پیوندهای غیرکووالانسی

- ۱-۶-۲-الف- مونومرهای یونی..... ۲۶
- ۱-۶-۲-ب پیوندهای هیدروژنی..... ۲۷
- ۱-۶-۲-ج برهم کنش های $\pi-\pi$ دهنده / پذیرنده..... ۲۸
- ۱-۶-۳ کنشسانی تأخیری..... ۲۸
- ۱-۶-۴ گروه های غیرواکنشی..... ۲۹
- ۱-۶-۵ پلیمرهای زنده..... ۲۹
- ۱-۶-۵-الف پلیمرهای زنده و ایجاد خودترمیم شوندگی با تشعشع ناشی از عیوب..... ۳۰
- ۱-۷-۱ روش غیر ذاتی (استفاده از افزودنی ها)..... ۳۱
- ۱-۷-۲ انواع و چالش های ایجاد خودترمیم شوندگی غیر ذاتی..... ۳۲
- ۱-۷-۳ روش ها، مختلف خودترمیم شوندگی غیر ذاتی..... ۳۳
- ۱-۷-۴ کپسوله کردن عامل ترمیمی..... ۳۴
- ۱-۷-۴-الف ایجاد خودترمیم شوندگی با استفاده از الیاف توخالی..... ۳۵
- ۱-۷-۴-۲-الف تقابل بین روش میکروکپسوله کردن و روش استفاده از الیاف توخالی..... ۳۶
- ۱-۷-۵ خودترمیم شونده با شش های ریز آوندی..... ۳۶
- ۱-۷-۶ سایر روش های ایجاد خودترمیم شوندگی غیر ذاتی..... ۳۷
- فصل دوم: خودترمیم شوندگی به روش میکروکپسوله کردن..... ۴۱
- ۱-۲ طراحی سیستم خودترمیم شونده به روش میکروکپسوله کردن..... ۴۱
- ۲-۲ انواع روش های ایجاد خودترمیم شوندگی به روش میکروکپسوله کردن..... ۴۳
- ۲-۲-۱ کپسوله کردن کانالیزت برای جلوگیری از غیرفعال شدن آن..... ۴۵
- ۲-۲-۲ ایجاد خودترمیم شوندگی به روش فاز حلال..... ۴۶
- ۲-۲-۳ ایجاد خودترمیم شوندگی با بلوک های کوپلیمری با ساختار بالا..... ۴۷
- ۲-۲-۳ سازوکارهای ترمیم به روش میکروکپسوله کردن..... ۴۸
- ۲-۳-۱ جنبه های ترمودینامیکی خودترمیم شوندگی..... ۴۹
- ۲-۳-۲ محدودیت های خودترمیم شوندگی به روش میکروکپسوله کردن..... ۵۲
- ۲-۳-۳ قراردهی میکروکپسول های ترمیمی درون فاز زمینه..... ۵۳
- ۲-۳-۴ روش های مختلف قراردهی میکروکپسول در فاز زمینه..... ۵۳
- ۲-۴ فاز زمینه مورد استفاده در رنگ ها و پوشش های پلیمری..... ۵۵
- ۲-۴-۱ رزین اپوکسی..... ۵۶
- ۲-۴-۲ اجزای اپوکسی..... ۵۸
- ۲-۴-۳ ارتباط بین سختی فاز زمینه ی کامپوزیت و سختی پوسته..... ۵۹
- ۲-۵ انواع محرک های رهایش عامل ترمیمی از میکروکپسول..... ۶۱
- ۲-۵-۱ سنتز میکروکپسول های با نرخ رهایش قابل کنترل..... ۶۱
- ۲-۵-۲ اقدامات صورت گرفته برای تعیین سازوکار تحریک..... ۶۴

۶۵	۲-۵-۲-الف ذخیره‌ی عامل هالوژینی در نانوحامل‌های با قابلیت رهایش تحریکی.....
۶۷	فصل سوم: میکروکپسوله کردن.....
۶۷	۱-۳ مقدمه.....
۶۸	۲-۳ کاربردهای میکروکپسول‌ها.....
۶۸	۳-۳ پوسته‌ی میکروکپسول و نرخ رهایش مغزی.....
۶۹	۴-۳ روش‌های کپسوله کردن.....
۷۲	۴-۳-۱ پلی‌چگالش فصل مشترکی.....
۷۲	۴-۳-۲ هم‌انباشت.....
۷۳	۴-۳-۳ پلیمریزاسیون درجا.....
۷۳	۴-۳-۴ سرد کردن مینی امولسیون.....
۷۶	۴-۳-۵ کپسوله کردن به روش درجا.....
۷۶	۴-۳-۶ کپسوله کردن به روش دیسپرس قابل ذوب.....
۷۷	۴-۳-۷ کپسوله کردن به روش هم‌انباشت.....
۷۷	۴-۳-۸ کپسوله کردن به روش پلیمریزاسیون فصل مشترکی.....
۷۷	۴-۳-۹ کپسوله کردن به صورت مالتی.....
۷۸	۴-۳-۱۰ سنتز میکروکپسول به روش تبخیر.....
۸۰	۴-۳-۱۰-الف- اثر ویسکوزیته‌ی گاز.....
۸۰	۴-۳-۱۰-ب- اثر نرخ اختلاط.....
۸۱	۴-۳-۱۹-ج- اثر فشار و دما.....
۸۱	۴-۳-۱۱ سنتز میکروکپسول آبی به روش امولسیون مغزی.....
۸۲	۴-۳-۱۲ میکروکپسوله کردن محلول آبی به روش جدایش فاز.....
۸۳	۳-۵ ایجاد امولسیون و پارامترهای مؤثر.....
۸۴	۳-۵-۱ انواع امولسیون.....
۸۵	۳-۵-۲ ویژگی‌های امولسیون و عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون.....
۸۶	۳-۵-۳ عوامل فعال سطحی.....
۸۷	۳-۶ روش‌های آزموده شده برای سنتز میکروکپسول‌های ترمیمی.....
۸۷	۳-۶-۱ سنتز میکروکپسول‌های ترمیمی به روش لایه-لایه.....
۸۸	۳-۶-۲ سنتز میکروکپسول‌های ترمیمی به روش پلیمریزاسیون درجا.....
۸۹	۳-۶-۲-الف- میکروکپسوله کردن عامل ترمیمی دی‌سایکلوپنتادین.....
۹۰	۳-۶-۲-ب- تأثیر نرخ هم زدن و اندازه‌ی میکروکپسول‌ها.....
۹۱	۳-۶-۳ سنتز میکروکپسول‌های ترمیمی به روش دیسپرس پلیمریزاسیونی.....
۹۳	۳-۷ رزین‌های آوره-فرمالدئید.....
۹۳	۳-۷-۱ ترکیب شیمیایی رزین‌های آوره-فرمالدئیدی.....

- ۳-۷-۱-الف- واکنش متیل افزایی ۹۴
- ۳-۷-۱-ب- واکنش چگالش ۹۵
- ۳-۷-۲- سنتز میکروکپسول های اوره-فرمالدئیدی ۹۶
- ۳-۸- برآورد اندازه و توزیع اندازه ی میکروکپسول ها ۹۷
- ۳-۹- تعیین ترکیب و ساختار شیمیایی اجزای میکروکپسول ها ۹۸
- فصل چهارم: خود ترمیم شوندگی با استفاده از الیاف ترمیمی ۹۹
- ۴-۱-ا-ایا و معایب خود ترمیم شوندگی به روش ذخیره ی عامل ترمیمی در الیاف توخالی ۹۹
- ۴-۱-ب- مطالعات انجام شده برای ایجاد خود ترمیم شوندگی با استفاده از الیاف ۱۰۰
- ۴-۱-۲- خود ترمیم شوندگی با استفاده از لوله های توخالی شیشه ای و الیاف شیشه ای ۱۰۰
- ۴-۲-۱- ایجاد ترمیم شوندگی در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف ۱۰۴
- ۴-۳-۱- ارزیابی رفتار ترمیمی کامپوزیت های حاوی الیاف ترمیمی ۱۰۷
- ۴-۳-۲- آزمون فشار متناوب ۱۱۲
- ۴-۳-۳- آنالیز آزمون فشار متناوب ۱۱۴
- فصل پنجم: خود ترمیم شوندگی با استفاده از شبکه های ریز آوندی ۱۱۵
- ۵-۱- مبانی و مفاهیم خود ترمیم شوندگی و شبکه های ریز آوندی ۱۱۵
- ۵-۲- مدل سازی و طراحی شبکه های ریز آوندی ۱۱۶
- ۵-۲-۱- مزایا و محدودیت های خود ترمیم شوندگی ریز آوندی ۱۱۷
- ۵-۲-۲- قراردادی ترکیبات خود ترمیم شوندگی دو جزئی درون شبکه های ریز آوندی ۱۱۹
- ۵-۳- روش های ایجاد شبکه های ریز آوندی ۱۲۱
- ۵-۴- انواع آسیب، تأثیرات و آنالیز شرایط بحرانی (FibreCA) ریز آوندی ۱۲۴
- ۵-۵- ارزیابی خود ترمیم شوندگی در کامپوزیت های ریز آوندی ۱۲۴
- فصل ششم: انواع عوامل ترمیمی و کاتالیست ۱۳۵
- ۶-۱- اصول و نکات لازم در انتخاب و استفاده از عوامل ترمیمی و کاتالیست ۱۳۶
- ۶-۲- دی سایکلوپنتادین شناخته شده ترین عامل ترمیمی ۱۳۷
- ۶-۳- کاتالیست های GRUBBS، معمول ترین عامل کاتالیستی ۱۳۹
- ۶-۴- اجزای ترمیمی برخی سیستم های خود ترمیم شونده ی موفق ۱۴۰
- ۶-۴-۱- سیستم پلی دی متیل سیلوکسان - کاتالیست قلع ۱۴۰
- ۶-۴-۲- سیستم ترمیمی رزین و عامل سخت کننده ۱۴۱
- ۶-۵- بررسی امکان کاربردی سازی سیستم خود ترمیمی DCPD-GRUBBS در صنعت ۱۴۱
- ۶-۵-۱- زمینه ی اپوکسی مورد استفاده ۱۴۲
- ۶-۶-۲- نمونه سازی برای ارزیابی رفتار خود ترمیم شوندگی ۱۴۳
- ۶-۵-۳- بررسی رفتار پخت زمینه ی اپوکسی به روش DSC ۱۴۴
- ۶-۵-۴- نتایج بررسی های دینامیکی - مکانیکی کاتالیست ۱۴۶

۱۴۷	۵-۵-۶ کنترل مورفولوژی کانالیست
۱۴۸	۶-۵-۶ کنترل پایداری کانالیست
۱۴۹	۷-۵-۶ آنالیز کاهش وزن حرارتی و اثر کانالیست بر آن
۱۵۰	۸-۵-۶ ارزیابی اثر کانالیست با توجه به نتایج دینامیکی - مکانیکی
۱۵۱	۹-۵-۶ خودترمیم‌شوندگی با کوپلیمرهای پلیمری در سیستم ترمیمی DCPD-GRUBBS
۱۵۵	۶-۶ ایجاد خودترمیم‌شوندگی با استفاده از میکروکپسول‌های حاوی GRUBBS و DCPD
۱۵۸	۱-۶-۶ ارزیابی رفتار ترمیمی به روش شکست خود فعال
۱۶۳	فصل هشتم: ارزیابی عملکرد ترمیمی
۱۶۳	۱-۷ انواع آسیب و سازوکارهای مقابله با آن‌ها
۱۶۵	۱-۷ جنبه‌ها: کنترل تلفات ترمیم در پوشش‌های پلیمری
۱۶۶	۱-۷-۱ انواع آسیب و بازسازی محل تخریب (پر شدن فضای تخریبی)
۱۶۶	۲-۷-۲ شکست فصلی و زدگی
۱۶۶	۲-۷-۲-۲-۲-۷ آلودگی و خوردگی خوردگی درون کامپوزیت
۱۶۷	۲-۷-۲-۲-۲-۷ باریک‌سازی سطح زیرلایه‌ی فلزی
۱۶۸	۳-۷ انواع آزمون‌های شکست برای ارزیابی رفتار ترمیمی
۱۷۰	۱-۳-۷ شکست نیمه‌استاتیک
۱۷۰	۱-۳-۷ الف- شکست نوع اول
۱۷۱	۱-۳-۷ ب- شکست نوع اول در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف
۱۷۲	۱-۳-۷ ج- آزمون شکست مختلط
۱۷۲	۱-۳-۷ د- شکست نوع سوم
۱۷۲	۲-۳-۷ خستگی
۱۷۳	۳-۳-۷ آزمون ضربه
۱۷۴	۴-۳-۷ ایجاد شکست دندان‌های
۱۷۵	۴-۷ بازده ترمیمی
۱۷۷	۵-۷ اثر اندازه‌ی آسیب بر رفتار ترمیمی کامپوزیت
۱۸۰	۶-۷ تأثیر حضور میکروکپسول بر چقرمگی شکست زمینه
۱۸۰	۶-۷-۱ سازوکارهای افزایش چقرمگی شکست با اضافه کردن مواد پرکننده
۱۸۰	۷-۷ ارزیابی رفتار خودترمیم‌شوندگی فصل مشترکی در کامپوزیت تقویت شده با الیاف
۱۸۳	۷-۷-۱ تغییرات استحکام کششی الیاف پس از پوشش‌دهی
۱۸۵	فصل هشتم: کاربرد مواد خودترمیم‌شونده
۱۸۵	۱-۸ کاربردهای بدون رویکرد کاهش هزینه
۱۸۵	۱-۸-۱ دندان‌سازی و کاربردهای پزشکی در بدن
۱۸۶	۲-۱-۸ هوا-فضا

- ۱۸۷ ۸-۱-۳ صنایع نظامی
- ۱۸۷ ۸-۲ کاربردهایی با رویکرد کاهش هزینه ها
- ۱۸۷ ۸-۲-۱ رنگ آمیزی اتومبیل
- ۱۸۹ ۸-۲-۲ سازه های ساختمانی
- ۱۸۹ ۸-۳ ایجاد خودترمیم شوندگی به منظور ایجاد پوشش مقاوم به خوردگی
- ۱۸۹ ۸-۳-۱ سازوکارهای خوردگی و حفاظت در پوشش های خودترمیم شونده
- ۱۹۱ ۸-۳-۲ آزمون های خوردگی
- ۱۹۲ ۸-۴ کاربرد مواد خودترمیم شونده در صنایع هوایی
- ۱۹۳ ۸-۴-۱ رایندهای خودترمیم شوندگی و جنبه های هوا-فضایی مربوطه
- ۱۹۳ ۸-۵ بررسی حق مالکیت های فکری در حوزه ی سیستم های خودترمیم شونده
- ۱۹۳ ۸-۵-۱ حق مالکیت های ثبت شده
- ۱۹۵ ۸-۵-۲ مقایسه حق مالکیت های ثبت شده
- ۱۹۷ ۸-۵-۳ استراتژی های ثبت شده
- ۱۹۸ ۸-۵-۴ استراتژی های ثبت شده
- ۱۹۸ ۸-۵-۴-الف امتیاز بهره برداری
- ۱۹۹ ۸-۵-۴-ب تولید محصول
- ۲۰۰ ۸-۵-۴-ج استراتژی انتخاب
- ۲۰۰ ۸-۶ تعیین روندنمای زمانی ایجاد و عرضه ی محصولات خودترمیم شونده
- ۲۰۱ ۸-۷ انتخاب نوع رزین
- ۲۰۶ ۸-۷-۱ مقایسه ی انواع رزین های زمینه برای ایجاد کامپوزیت های خودترمیم شونده
- ۲۰۶ ۸-۷-۱-الف سیانات استرها
- ۲۰۷ ۸-۷-۱-ب اپوکسی ها
- ۲۰۸ ۸-۷-۱-ج چسب های بی هوازی
- ۲۰۸ ۸-۷-۱-د سیلیکون ها
- ۲۰۹ واژه نامه
- ۲۱۹ منابع مطالعاتی