

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

٥١٧٠



دانشکده مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد)

بررسی تاثیر و مکانیزم آسیب‌رسانی آب خلیج فارس
بر روی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی

بوسیله‌ی

سید فرداد فقیهی

استاد راهنما

دکتر محمد جعفر هادیانفرد

شهریورماه ۱۳۸۷

۱۰۸۲۳۵

کتابخانه مهندسی مواد
شهریورماه ۱۳۸۷

۱۳۸۷ / ۹ / ۲۳

به نام خدا

بررسی تاثیر و مکانیزم آسیب‌رسانی آب خلیج فارس بر روی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی

بوسیله‌ی

سید فرداد فقیهی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی

مهندسی مواد

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه عالی

.....
دکتر محمد جعفر هادیانفرد، دانشیار بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)

.....
دکتر ابوالقاسم دهقان، استادیار بخش مهندسی مواد

.....
دکتر سید احمد جنابعلی جهرمی، استاد بخش مهندسی مواد

تقدیم به:

مادر مهربانم

که بدون همراهی و پشتیبانی ایشان این تحقیق میسر نمی گشت

سپاس گزاری

اکنون که به یاری خداوند این رساله به پایان رسیده است، شکر حق بجای آورده و وظیفه خود می‌دانم از استاد عالی‌قدر و گرامی، جناب آقای دکتر هادیانفرد نهایت سپاس‌گزاری را به عمل آورده و از مساعدت‌ها و راهنمایی‌های ارزنده ایشان تشکر نمایم. همچنین از سایر اعضای کمیته، جناب آقایان دکتر دهقان، دکتر جنابعلی جهرمی و نماینده تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر نعمت‌الهی به جهت راهنمایی‌های ارزنده‌شان نهایت سپاس را دارم.

از دانشگاه صنعتی مالک اشتر و جناب آقایان دکتر سرانجام و مهندس بهزادی جهت در اختیار گذاشتن مواد اولیه و مساعدت‌های علمیشان نهایت تشکر را دارم.

از دوستان عزیزم جناب آقایان علی دهقانی و احسان زنده‌باد جهت مساعدت بی‌دریغشان در طول پایان‌نامه سپاسگزارم.

با تشکر از کلیه اساتید و کارمندان بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز.

چکیده

بررسی تاثیر و مکانیزم آسیب‌رسانی آب خلیج فارس بر روی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی

بوسیله‌ی

سید فرداد فقیه‌ی

امروزه با توسعه استفاده از مواد مرکب پایه پلیمر در کاربردهای دریایی از جمله تولید شناورها، هاورکرفتها و قایق‌های پرنده، مطالعه در زمینه تاثیرات محیط دریا بر روی خواص مکانیکی این مواد ضروری بنظر می‌رسد. لذا با بررسی مکانیزم آسیب‌رسانی آب دریا، خصوصاً آب خلیج فارس بدلیل نیازهای کشورمان، می‌توان زمینه را جهت پیشگیری این آسیبها و به حداقل رساندن آنها در طراحی‌های آینده هموار نمود. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر آب خلیج فارس بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی و تحقیق در مورد مکانیزم این آسیب‌دیدگی است. پنج نوع ماده مرکب با الیاف شیشه، کربن و کولار و زمینه‌های اپوکسی متفاوت، به روش روی هم چینی دستی و حباب زدایی توسط کیسه خلا تولید شدند. مواد مرکب تولید شده پس از پخت و برش به اشکال مناسب و پیشنهاد استانداردهای معتبر، در محیط طبیعی خلیج فارس و سایر محیطها از جمله آب شهر و نور آفتاب قرار داده شدند. نمونه‌ها به مدت شش ماه در این محیطها قرار گرفته و بطور ماهیانه مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج آزمونهای مکانیکی همانند استحکام کششی، استحکام ضربه‌ای و چقرمگی شکست، افت حد اکثر ۳۳ درصدی در مواد مرکب تهیه شده با الیاف شیشه و ۱۰ درصدی در مواد مرکب تهیه شده با کربن و کولار را نشان دادند. توسط آنالیز عنصری فصل مشترک زمینه-الیاف و مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی، نفوذ آب، یونهای مخرب فلزی و سیلیسیوم و فسفر به فصل مشترک الیاف-زمینه و کاهش استحکام پیوندهای زمینه و الیاف-زمینه و آسیب‌دیدگی الیاف شیشه مهمترین عوامل تخریب شناخته شدند. با استفاده از تطابق نموداری و مدلسازی ریاضی، رابطه‌ای بین استحکام ضربه و چقرمگی شکست در مواد ساخته شده تعریف شد که خطایی کمتر از ۴٪ را برای کلیه مواد نشان می‌دهد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۱	۱-۱- آشنایی با مواد مرکب
۱	۲-۱- تاریخچه صنعت ماده مرکب
۳	۳-۱- ضرورت تحقیق
۳	۴-۱- وجه برتری مواد مرکب پایه پلیمر
۳	۱-۴-۱- استحکام ویژه بالا
۴	۲-۴-۱- توانایی شکل پذیری
۴	۳-۴-۱- دوام مناسب
۴	۴-۴-۱- سرمایه گذاری نسبتاً کم
۵	۵-۱- استفاده دریایی مواد مرکب پایه پلیمر
۶	۲- اصول، تئوری و مروری بر تحقیقات گذشته
۶	۱-۲- تقسیم بندی مواد مرکب از نظر زمینه
۶	۱-۱-۲- مواد مرکب زمینه فلزی
۶	۲-۱-۲- مواد مرکب زمینه سرامیکی
۶	۳-۱-۲- مواد مرکب زمینه پلیمری
۷	۲-۲- انواع زمینه های پلیمری
۷	۱-۲-۲- زمینه های گرما سخت
۹	۱-۱-۲-۲- پلی استر
۱۰	۲-۱-۲-۲- اپوکسی
۱۲	۱-۲-۱-۲-۲- عمل آوری رزینهای اپوکسی با آمینها
۱۴	۲-۲-۲- زمینه های پلیمری گرما نرم
۱۴	۳-۲-۲- زمینه لاستیکی
۱۶	۳-۲- تقسیم بندی تقویت کننده ها از نظر جنس
۱۶	۱-۳-۲- تقویت کننده های طبیعی
۱۷	۲-۳-۲- الیاف مصنوعی
۱۷	۱-۲-۳-۲- الیاف مصنوعی آلی
۱۸	۲-۲-۳-۲- الیاف مصنوعی معدنی

۱۸	۱-۲-۲-۳-۲ الیاف شیشه
۱۹	۲-۲-۲-۳-۲ کربن
۲۰	۴-۲ تقسیم‌بندی مواد تقویت‌کننده از نظر شکل و نحوه توزیع
۲۱	۱-۴-۲ تقویت‌کننده ذره‌ای
۲۱	۲-۴-۲ تقویت‌کننده رشته‌ای
۲۲	۳-۴-۲ تقویت‌کننده‌های پارچه‌ای
۲۲	۵-۲ فصل مشترک الیاف-زمینه
۲۲	۱-۵-۲ پیوندهای فصل مشترک
۲۳	۱-۱-۵-۲ پیوند مکانیکی
۲۳	۲-۱-۵-۲ پیوند الکترواستاتیکی
۲۳	۳-۱-۵-۲ پیوند شیمیایی
۲۵	۴-۱-۵-۲ پیوند نفوذی
۲۵	۶-۲ فرآیندهای تولید مواد مرکب
۲۵	۱-۶-۲ روش لایه‌گذاری دستی
۲۶	۲-۶-۲ روش پاشش توسط پیستوله (Chopping)
۲۷	۳-۶-۲ روش رشته‌پیچ کردن (Filament Winding)
۲۷	۴-۶-۲ قالب‌گیری فشاری
۲۸	۵-۶-۲ روش قالب کششی
۲۹	۶-۶-۲ قالب‌گیری با کیسه‌خلاء
۳۰	۷-۶-۲ فرآیند تزریق در خلاء
۳۱	۸-۶-۲ قالب‌گیری به روش انتقال رزین (RTM)
۳۲	۷-۲ سازوکار چقرمه‌سازی مواد مرکب
۳۲	۱-۷-۲ مکانیزم خمیدگی ترک
۳۳	۲-۷-۲ مکانیزم انحراف ترک
۳۳	۳-۷-۲ مکانیزم جدا شدن الیاف
۳۴	۴-۷-۲ مکانیزم بیرون کشیدگی الیاف
۳۵	۵-۷-۲ چقرمگی در اثر جای خالی
۳۵	۶-۷-۲ چقرمگی در اثر میکروترکها
۳۶	۷-۷-۲ چقرمگی در اثر تبدیل فاز (استحاله فازی)
۳۷	۸-۲ تخریب پلیمرها
۳۷	۱-۸-۲ آسیبهای شایع در زمینه مواد مرکب پایه پلیمر
۳۷	۱-۱-۸-۲ آسیب حرارتی
۳۸	۲-۱-۸-۲ تخریب در اثر تابش
۳۸	۳-۱-۸-۲ تخریب شیمیایی
۳۸	۴-۱-۸-۲ تخریب مکانیکی

۳۹	۲-۸-۲ چگونگی تشخیص آسیب در پلیمرها	۳۹
۳۹	۱-۲-۸-۲ تغییر در وزن ملکولی	۳۹
۳۹	۲-۲-۸-۲ اندازه گیری گازهای تولیدی	۳۹
۳۹	۳-۲-۸-۲ روش تشدید چرخش الکترونی	۳۹
۴۰	۳-۸-۲ مکانیزمهای تخریب پلیمر	۴۰
۴۰	۱-۳-۸-۲ تخریب تک مرحله ای و زنجیروار	۴۰
۴۰	۲-۳-۸-۲ اکسیداسیون خودکار (Auto Oxidation)	۴۰
۴۱	۳-۳-۸-۲ آسیب دیدگی مکانهای ترجیحی بصورت اتفاقی یا مشخص	۴۱
۴۲	۹-۲ تخریب مواد مرکب پایه پلیمر در محیط دریا	۴۲
۴۲	۱-۹-۲ مسیرهای نفوذ آب درون مواد مرکب پایه پلیمر	۴۲
۴۲	۱-۱-۹-۲ نفوذ در زمینه پلیمری	۴۲
۴۳	۲-۱-۹-۲ نفوذ آب از طریق الیاف تقویت کننده	۴۳
۴۳	۳-۱-۹-۲ نفوذ آب از طریق فصل مشترک الیاف-زمینه	۴۳
۴۳	۲-۹-۲ تاثیر محیط دریا بر روی اپوکسی	۴۳
۴۴	۱-۲-۹-۲ تاثیر آب دریا بر روی اپوکسی	۴۴
۴۶	۲-۲-۹-۲ تاثیر نور خورشید بر اپوکسی	۴۶
۴۶	۳-۹-۲ تاثیر آب دریا بر الیاف تقویت کننده	۴۶
۴۶	۱-۳-۹-۲ الیاف شیشه	۴۶
۴۷	۲-۳-۹-۲ الیاف کربن و کولار	۴۷
۴۷	۴-۹-۲ تاثیر محیط دریا بر روی ماده مرکب	۴۷
۴۷	۱-۴-۹-۲ جذب آب در مواد مرکب پایه پلیمر	۴۷
۵۲	۲-۴-۹-۲ عوامل تاثیر گذار بر جذب آب در کامپوزیتهای پایه پلیمر	۵۲
۵۶	۵-۹-۲ تاثیرات جذب آب بر خواص مکانیکی ماده مرکب	۵۶
۵۹	۶-۹-۲ تاثیر تابش خورشید بر کامپوزیتهای پایه پلیمر	۵۹
۶۰	۷-۹-۲ تاثیر آب دریا بر مکانیزم شکست مواد مرکب	۶۰
۶۳	۳-روش انجام کار	۶۳
۶۳	۱-۳ مواد اولیه	۶۳
۶۳	۱-۱-۳ مواد اولیه زمینه	۶۳
۶۴	۲-۱-۳ مواد تقویت کننده	۶۴
۶۵	۲-۳ مواد قالبگیری	۶۵
۶۵	۳-۳ نحوه ساخت صفحه (LAMINATE) کامپوزیتی اولیه	۶۵
۶۶	۴-۳ پخت لمینیت	۶۶
۶۷	۵-۳ آزمونهای انجام شده	۶۷
۶۸	۱-۵-۳ نحوه تولید نمونه های تستهای مکانیکی	۶۸

۶۸	..... ۳-۵-۱-۱ ساخت نمونه های تست کشش
۶۹	..... ۳-۵-۱-۲ ساخت نمونه های ضربه
۷۰	..... ۳-۵-۱-۳ ساخت نمونه های چقرمگی شکست
۷۱	..... ۳-۵-۱-۴ دستگاههای مورد استفاده جهت انجام آزمونهای مکانیکی
۷۱	..... ۳-۵-۱-۴-۱ دستگاه آزمون کشش
۷۲	..... ۳-۵-۱-۴-۲ دستگاه آزمون ضربه
۷۳	..... ۳-۵-۲ بررسی تغییرات ابعاد و وزن
۷۳	..... ۳-۵-۳ بررسی مقطع شکست توسط میکروسکوپ الکترونی
۷۴	..... ۳-۶-۱ نحوه انتخاب محیطهای مورد استفاده
۷۵	..... ۳-۶-۱-۱ محیط غوطه وری کامل در آب دریای طبیعی
۷۵	..... ۳-۶-۱-۲ محیط آب لوله کشی شهر شیراز
۷۶	..... ۳-۶-۱-۳ محیط نور آفتاب
۷۶	..... ۳-۶-۱-۴ محیط جزرومد
۷۶	..... ۳-۶-۱-۵ محیط آب دریای مصنوعی
۷۸	..... ۳-۶-۲ برنامه زمان بندی انجام آزمایشات
۷۹	..... ۴- نتایج، بحث و پیشنهادها
۷۹	..... ۴-۱ ماده مرکب GLASS-LY5052
۷۹	..... ۴-۱-۱ تغییرات خواص مکانیکی
۷۹	..... ۴-۱-۱-۱ تغییرات استحکام کششی
۸۰	..... ۴-۱-۱-۲ تغییرات استحکام ضربه
۸۱	..... ۴-۱-۲ تغییرات خواص فیزیکی
۸۱	..... ۴-۱-۲-۱ تغییرات وزن
۸۲	..... ۴-۱-۲-۲ تغییرات ابعاد
۸۳	..... ۴-۱-۳ بحث
۸۴	..... ۴-۲ ماده مرکب GLASS-AH110
۸۴	..... ۴-۲-۱ تغییرات خواص مکانیکی
۸۴	..... ۴-۲-۱-۱ تغییرات استحکام کششی
۸۴	..... ۴-۲-۱-۲ تغییرات استحکام ضربه
۸۶	..... ۴-۲-۲ تغییرات خواص فیزیکی
۸۶	..... ۴-۲-۲-۱ تغییرات وزن
۸۶	..... ۴-۲-۲-۲ تغییرات حجم
۸۸	..... ۴-۲-۳ بحث
۸۹	..... ۴-۳ ماده مرکب GLASS-ML506
۸۹	..... ۴-۳-۱ تغییرات خواص مکانیکی

۱-۱-۳-۴	تغییرات استحکام کششی	۸۹
۲-۱-۳-۴	تغییرات استحکام ضربه	۹۰
۳-۱-۳-۴	تغییرات چقرمگی شکست	۹۲
۲-۳-۴	تغییرات خواص فیزیکی	۹۳
۱-۲-۳-۴	تغییرات وزن	۹۳
۲-۲-۳-۴	تغییرات ابعاد	۹۵
۳-۳-۴	تغییرات مکانیزم شکست	۹۵
۴-۳-۴	آسیب‌دیدگی الیاف	۹۶
۱-۴-۳-۴	آسیب‌دیدگی الیاف در آب دریای طبیعی	۹۶
۲-۴-۳-۴	آسیب‌دیدگی الیاف در آب دریای مصنوعی	۹۷
۵-۳-۴	آنالیز عنصری فصل مشترک	۹۸
۳-۳-۴	بحث	۹۸
۴-۴	ماده مرکب CARBON-ML506	۱۰۲
۱-۴-۴	تغییرات خواص مکانیکی	۱۰۲
۱-۱-۴-۴	تغییرات استحکام کششی	۱۰۲
۲-۱-۴-۴	تغییرات استحکام ضربه	۱۰۳
۳-۱-۴-۴	تغییرات چقرمگی شکست	۱۰۴
۲-۴-۴	تغییرات خواص فیزیکی	۱۰۵
۱-۲-۴-۴	تغییرات وزن	۱۰۵
۲-۲-۴-۴	تغییرات حجم	۱۰۷
۳-۴-۴	بررسی مکانیزم شکست	۱۰۷
۴-۴-۴	بحث	۱۰۸
۵-۴	ماده مرکب KEVLAR49-ML506	۱۱۰
۱-۵-۴	تغییرات خواص مکانیکی	۱۱۰
۱-۱-۵-۴	تغییرات استحکام کششی	۱۱۰
۲-۱-۵-۴	تغییرات استحکام ضربه	۱۱۱
۳-۱-۵-۴	تغییرات چقرمگی شکست	۱۱۳
۲-۵-۴	تغییرات خواص فیزیکی	۱۱۴
۱-۲-۵-۴	تغییرات وزن	۱۱۴
۲-۲-۵-۴	تغییرات حجم	۱۱۵
۳-۵-۴	بررسی مکانیزم شکست	۱۱۶
۴-۵-۴	بحث	۱۱۷
۶-۴	رابطه تجربی میان استحکام ضربه و چقرمگی شکست	۱۱۸
۱-۶-۴	روش تطابق نموداری	۱۱۸
۲-۶-۴	روش رابطه رابرتز-نیوتون	۱۱۹

۷-۴ نتیجه‌گیری ۱۲۳

۸-۴ پیشنهادات برای تحقیقات آینده ۱۲۵

فهرست منابع ۱۲۶

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ مقایسه خواص مختلف برای گرما سختهها و گرما نرمها	۸
جدول ۲-۲ برخی از خواص گرما سختهها	۱۲
جدول ۳-۲ آمینهای عمل آورنده اپوکسی	۱۳
جدول ۴-۲ آمینهای فعالسازی پخت اپوکسی	۱۳
جدول ۵-۲ خواص برخی گرما نرمها	۱۵
جدول ۶-۲ خواص تقویت کنندههای طبیعی	۱۶
جدول ۷-۲ مواد تشکیل دهنده الیاف شیشه	۱۸
جدول ۸-۲ خواص تقویت کنندههای مصنوعی	۱۹
جدول ۹-۲ مثالهایی از واکنشهای اکسیداسیون خودکار	۴۱
جدول ۱۰-۲ ضخامت ناحیه فصل مشترک در کامپوزیتهای شیشه-پلی استر و شیشه-وینیل استر	۵۲
جدول ۱۱-۲ تغییرات ضریب نفوذ و دما برای ماده مرکب بیسمامید-کربن	۵۵
جدول ۱۲-۲ درصد تغییرات خواص مکانیکی در هر محیط برای ماده مرکب کربن-اپوکسی	۵۷
جدول ۱۳-۲ تغییرات خواص مکانیکی ماده مرکب شیشه-پلی استر و شیشه-وینیل استر	۵۸
جدول ۱-۳ خواص زرینههای اپوکسی مورد استفاده	۶۴
جدول ۲-۳ خصوصیات الیاف استفاده شده	۶۵
جدول ۳-۳ دما و زمان پخت زرینها	۶۷
جدول ۴-۳ ترکیب آب دریای مصنوعی	۷۷
جدول ۵-۳ برنامه زمان بندی انجام آزمایشات برای نمونههای تهیه شده از ماده مرکب Glass-ML506	۷۸
جدول ۶-۳ برنامه زمان بندی انجام آزمایشات برای نمونههای تهیه شده از مواد مرکب	۷۸
جدول ۱-۴ تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-LY5052 در محیطهای مختلف	۷۹
جدول ۲-۴ تغییرات استحکام ضربه ماده مرکب Glass-LY5052 در محیطهای مختلف	۸۰
جدول ۳-۴ تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-AH110 در محیطهای مختلف	۸۴
جدول ۴-۴ تغییرات استحکام ضربه ماده مرکب Glass-AH110 در محیطهای مختلف	۸۵
جدول ۵-۴ تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-ML506 در محیطهای مختلف	۸۹
جدول ۶-۴ تغییرات استحکام ضربه ماده مرکب Glass-ML506 در محیطهای مختلف	۹۱
جدول ۷-۴ چقرمگی شکست ماده مرکب Glass-ML506 در محیط غوطه‌وری	۹۲
جدول ۸-۴ تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Carbon-ML506 در محیطهای مختلف	۱۰۲
جدول ۹-۴ تغییرات استحکام ضربه ماده مرکب Carbon-ML506 در محیطهای مختلف	۱۰۳
جدول ۱۰-۴ چقرمگی شکست ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط غوطه‌وری	۱۰۵
جدول ۱۱-۴ تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیطهای مختلف	۱۱۰
جدول ۱۲-۴ تغییرات استحکام ضربه ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیطهای مختلف	۱۱۲
جدول ۱۳-۴ چقرمگی شکست ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیط غوطه‌وری	۱۱۳
جدول ۱۴-۴ مقادیر ثابت A برای هر ماده مرکب در محیط غوطه‌وری	۱۲۰

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

۸	شکل ۱-۲ ترتیب زنجیره های پلیمری.....
۹	شکل ۲-۲ پلی استر.....
۱۰	شکل ۳-۲ اپوکسی.....
۱۱	شکل ۴-۲ انواع اپوکسی.....
۱۵	شکل ۴-۲ ساختار لاستیکها.....
۱۷	شکل ۵-۲ ساختار زنجیره پلیمری الیاف کولار.....
۲۰	شکل ۶-۲ منحنی تنش-کرنش الیاف مصنوعی.....
۲۰	شکل ۷-۲ دسته بندی مواد مرکب.....
۲۱	شکل ۸-۲ مثالهایی از مواد مرکب.....
۲۴	شکل ۹-۲ انواع پیوندهای فصل مشترک الیاف-زمینه.....
۲۶	شکل ۱۰-۲ روش لایه گذاری دستی.....
۲۶	شکل ۱۱-۲ روش پاشش توسط پیستوله.....
۲۷	شکل ۱۲-۲ روش رشته پیچ کردن.....
۲۸	شکل ۱۳-۲ روش قالب گیری فشاری.....
۲۹	شکل ۱۴-۲ روش قالب کششی.....
۳۰	شکل ۱۵-۲ لایه گذاری توسط کیسه خلاء.....
۳۱	شکل ۱۶-۲ نمودار مقایسه میزان مصرف روشهای مختلف تولید PMC در صنعت خودروسازی.....
۳۲	شکل ۱۷-۲ نمایش شماتیک افزایش چقرمگی شکست در اثر خمیدگی ترک.....
۳۳	شکل ۱۸-۲ نمایش شماتیک مکانیزم انحراف ترک.....
۳۴	شکل ۱۹-۲ نمایش شماتیک مکانیزم جدا شدن الیاف.....
۳۴	شکل ۲۰-۲ نمایش شماتیک مکانیزم بیرون کشیدگی الیاف.....
۳۵	شکل ۲۱-۲ نمودار نیرو-جابجایی و محل قرارگیری مکانیزمهای جداشدگی و بیرون کشیدگی الیاف.....
۳۵	شکل ۲۲-۲ مکانیزم جای خالی.....
۳۶	شکل ۲۳-۲ مکانیزم استحاله فازی.....
۴۰	شکل ۲۴-۲ واکنش اکسیداسیون خودکار در زمینه پلیمری.....
۴۴	شکل ۲۵-۲ تجزیه رزین اپوکسی به عامل اپوکساید و عامل سخت کننده.....
۴۵	شکل ۲۶-۲ جذب آب در رزینهای اپوکسی با فعال سازهای متفاوت.....
۴۶	شکل ۲۷-۲ شکست زنجیره پلیمری در اثر تابش خورشید.....
۴۷	شکل ۲۸-۲ میزان افزایش وزن در کامپوزیت شیشه-فنولیک در اثر غوطه‌وری در آب دریای مصنوعی.....
۴۸	شکل ۲۹-۲ میزان افزایش وزن در کامپوزیت شیشه-پلی استر در اثر غوطه‌وری در آب دریای مصنوعی.....
۴۸	شکل ۳۰-۲ میزان افزایش وزن در کامپوزیت شیشه-وینیل استر در اثر غوطه‌وری در آب دریای مصنوعی.....

شکل ۲-۳۱	میزان تغییرات وزن در کامپوزیت شیشه-پلی استر و کربن-پلی استر در اثر غوطه‌وری در آب دریای مصنوعی	۴۹
شکل ۲-۳۲	تاثیر میزان پخت در جذب آب مواد مرکب کربن-پلی استر و شیشه-پلی استر	۵۰
شکل ۲-۳۳	جذب آب در کامپوزیتهای پایه وینیل استر	۵۰
شکل ۲-۳۴	مقایسه تاثیر میزان پخت در جذب آب رزین وینیل استر	۵۱
شکل ۲-۳۵	منحنی جذب آب در کامپوزیتهای شیشه-فنولیک و شیشه-پلی استر	۵۱
شکل ۲-۳۶	جذب رطوبت در کامپوزیت کربن-اپوکسی و آرامید-اپوکسی	۵۲
شکل ۲-۳۷	منحنی خروج آب کامپوزیت کربن-اپوکسی و آرامید-اپوکسی	۵۳
شکل ۲-۳۸	جذب رطوبت در کامپوزیت کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی	۵۴
شکل ۲-۳۹	نفوذ آب بدرون کامپوزیت بیسمامید-کربن	۵۵
شکل ۲-۴۰	تغییرات ضریب نفوذ با دما برای ماده مرکب بیسمامید-کربن	۵۶
شکل ۲-۴۱	مکانیزمهای انهدام در ماده مرکب کربن-اپوکسی	۵۷
شکل ۲-۴۲	تغییرات انعطاف‌پذیری برای مواد مرکب شیشه-وینیل استر و کربن-وینیل استر	۵۸
شکل ۲-۴۳	تغییرات چقرمگی شکست در مواد مرکب شیشه-پلی استر و شیشه-فنلیک	۵۹
شکل ۲-۴۴	افت چسبندگی الیاف زمینه در اثر قرارگیری نمونه‌های شیشه-اپوکسی در آب دریا	۶۰
شکل ۲-۴۵	ایجاد ترک در فصل زمینه اپوکسی	۶۱
شکل ۲-۴۶	کاهش قدرت پیوند در فصل مشترک	۶۱
شکل ۲-۴۷	کاهش قدرت پیوند در فصل مشترک	۶۲
شکل ۳-۱	نحوه تولید تخته‌های کامپوزیتی اولیه	۶۶
شکل ۳-۲	آون مورد استفاده	۶۷
شکل ۳-۳	نمونه‌های کشش	۶۸
شکل ۳-۴	نمونه‌های ضربه	۶۹
شکل ۳-۵	ابعاد و شکل نمونه استاندارد CT	۷۰
شکل ۳-۶	نمونه‌های چقرمگی شکست	۷۰
شکل ۳-۷	دستگاههای آزمون کشش	۷۱
شکل ۳-۸	دستگاه آزمون ضربه	۷۲
شکل ۳-۱۰	ترازوی دیجیتال	۷۳
شکل ۳-۱۱	دستگاه SEM و دستگاه Spark	۷۴
شکل ۳-۱۲	نمایش شماتیک نمونه‌های غوطه‌ور شده در دریا	۷۵
شکل ۴-۱	مقایسه تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-LY5052 در محیط‌های مختلف	۸۰
شکل ۴-۲	مقایسه تغییرات استحکام ضربه‌ای ماده مرکب Glass-LY5052 در محیط‌های مختلف	۸۱
شکل ۴-۳	درصد تبخیر آب ماده مرکب Glass-LY5052 در اثر حرارت‌دهی در دمای ۵۰ درجه بمدت ۱۰ ساعت	۸۲
شکل ۴-۴	مقایسه درصد تغییر وزن ماده مرکب Glass-LY5052 در محیط‌های مختلف	۸۲
شکل ۴-۵	مقایسه درصد تغییر حجم ماده مرکب Glass-LY5052 در محیط‌های مختلف	۸۳

- شکل ۴-۶ مقایسه تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-AH110 در محیط‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۷ مقایسه تغییرات استحکام ضربه‌ای ماده مرکب Glass-AH110 در محیط‌های مختلف..... ۸۶
- شکل ۴-۸ مقایسه درصد تغییر وزن ماده مرکب Glass-AH110 در محیط‌های مختلف..... ۸۷
- شکل ۴-۹ مقایسه درصد تغییر حجم ماده مرکب Glass-AH110 در محیط‌های مختلف..... ۸۷
- شکل ۴-۱۰ مقایسه تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Glass-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۴-۱۱ مقایسه تغییرات استحکام ضربه‌ای ماده مرکب Glass-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۹۱
- شکل ۴-۱۲ تغییرات چقرمگی شکست ماده مرکب Glass-ML506 در محیط غوطه وری کامل در آب دریا..... ۹۲
- شکل ۴-۱۳ تغییرات وزن ماده مرکب Glass-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۹۴
- شکل ۴-۱۴ درصد تبخیر آب ماده مرکب Glass-ML506 در محیط‌های مختلف در اثر
حرارت دهی در دمای ۵۰ درجه بمدت ۱۰ ساعت..... ۹۴
- شکل ۴-۱۵ تغییرات حجم ماده مرکب Glass-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۹۵
- شکل ۴-۱۶ مقطع شکست ماده مرکب Glass-ML506 قبل از قرار گیری در محیط..... ۹۶
- شکل ۴-۱۷ مقطع شکست ماده مرکب Glass-ML506 پس از قرار گیری در محیط..... ۹۶
- شکل ۴-۱۸ مقطع شکست الیاف قبل از قرار گیری در محیط..... ۹۷
- شکل ۴-۱۹ مقطع شکست الیاف پس از قرار گیری در محیط..... ۹۷
- شکل ۴-۲۰ آسیب دیدگی الیاف قرار داده شده در آب دریای مصنوعی..... ۹۷
- شکل ۴-۲۱ آنالیز EDX در فصل مشترک الیاف زمینه در ماده مرکب Glass-ML506 پس از قرار گیری در
محیط غوطه وری بمدت شش ماه..... ۹۸
- شکل ۴-۲۲ واکنش زنجیره اپوکسی با آب شیمیایی جذب شده بدرون ساختار..... ۹۹
- شکل ۴-۲۳ نمونه‌ای از پیوندهای فصل مشترک مواد مرکب شیشه-اپوکسی..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۴ آسیب دیدگی زنجیره اپوکسی در اثر تابش خورشید..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۶ مقایسه تغییرات استحکام ضربه‌ای ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۷ تغییرات چقرمگی شکست ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط غوطه وری کامل
در آب دریا..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۸ مقایسه درصد تغییر وزن ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۹ درصد تبخیر آب ماده مرکب Carbon-ML506 در اثر حرارت دهی در دمای ۵۰
درجه بمدت ۱۰ ساعت در محیط غوطه وری کامل..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۰ مقایسه درصد تغییر حجم ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۱ مقطع شکست ماده مرکب Carbon-ML506..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۲ نمونه‌ای از پیوند فصل مشترک کربن اپوکسی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۳ مقایسه تغییرات استحکام کششی ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۴ مقایسه تغییرات استحکام ضربه‌ای ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیط‌های مختلف..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۵ تغییرات چقرمگی شکست ماده مرکب Carbon-ML506 در محیط غوطه وری
کامل در آب دریا..... ۱۱۳

- شکل ۴-۳۶ مقایسه درصد تغییر وزن ماده مرکب Kevlar49-ML506 در محیط‌های مختلف ۱۱۴
- شکل ۴-۳۷ درصد تبخیر آب ماده مرکب Kevlar49-ML506 قرار گرفته در محیط غوطه وری در اثر حرارت دهی در دمای ۵۰ درجه بمدت ۱۰ ساعت ۱۱۵
- شکل ۴-۳۸ مقایسه درصد تغییر حجم ماده مرکب Kevlar49- ML506 در محیط‌های مختلف ۱۱۵
- شکل ۴-۳۹ مقطع شکست افقی ماده مرکب Kevlar49-ML506 قبل از قرار گیری در محیط ۱۱۶
- شکل ۴-۴۰ مقطع شکست افقی ماده مرکب Kevlar49-ML506 پس از قرار گیری در محیط ۱۱۶
- شکل ۴-۴۱ برون کشیدگی شدید الیاف کولار ۴۹ ۱۱۷
- شکل ۴-۴۲ تطابق نموداری میان چقرمگی شکست و استحکام ضربه برای ماده مرکب Glass-ML506 ۱۱۸
- شکل ۴-۴۳ تطابق نموداری میان چقرمگی شکست و استحکام ضربه برای ماده مرکب Carbon-ML506 ۱۱۹
- شکل ۴-۴۴ تطابق نموداری میان چقرمگی شکست و استحکام ضربه برای ماده مرکب Kevlar-ML506 ۱۱۹
- شکل ۴-۴۵ روابط بدست‌آمده را با مقادیر تجربی مقایسه می‌کند ۱۲۰
- شکل ۴-۴۶ مقایسه میان روابط بدست‌آمده و مقادیر آزمایشگاهی در ماده مرکب Glass-ML506 ۱۲۱
- شکل ۴-۴۷ مقایسه میان روابط بدست‌آمده و مقادیر آزمایشگاهی در ماده مرکب Carbon-ML506 ۱۲۱
- شکل ۴-۴۸ مقایسه میان روابط بدست‌آمده و مقادیر آزمایشگاهی در ماده مرکب Kevlar-ML506 ۱۲۱

۱- مقدمه

۱-۱ آشنایی با مواد مرکب

تعریف جامع مواد مرکب عبارت است از: مخلوط دو ماده غیر یکسان که ماده حاصل، مجموعه خواص یا خاصیتی را به صورت بهینه ارائه می‌دهد. این مواد هم می‌توانند به صورت طبیعی و هم به صورت مصنوعی (دست ساز) باشند.

چوب مثال خوبی از یک ماده مرکب طبیعی است. چوب ترکیبی از الیاف سلولزی و لیگنین می‌باشد. الیاف سلولزی استحکام را ایجاد می‌کند و لیگنین چسبی است که الیاف را به هم می‌چسباند و پایدار می‌کند. آجرهای خشتی که ترکیبی از گاه و گل می‌باشد ماده مرکبی را تشکیل می‌دهند که هم از گاه و هم از گل به تنهایی قوی‌تر است.

بتن مسلح یک سازه ماده مرکب می‌باشد که ترکیب مواد، قویتر از تک تک مواد اولیه عمل می‌نماید. بتن صلب بوده و استحکام فشاری خوبی دارد در حالی که فولاد استحکام کششی بالایی دارد. ماده مرکب حاصل از این دو هم از نظر کشش و هم از نظر فشار قوی می‌باشد. در مواد مرکب پلیمری ماتریس یک پلیمر نظیر پلی‌استر یا اپوکسی بوده و تقویت کننده آن معمولاً به صورت الیاف شیشه می‌باشد که الیاف شیشه استحکام کششی و رزین استحکام فشاری و صلبیت را ایجاد می‌کند.

۱-۲ تاریخچه صنعت ماده مرکب

استفاده از مواد مرکب طبیعی در زندگی بشر از زمانی آغاز شد که در بناهای باستانی، گاه را برای تقویت کردن آجرهای گلی بکار بردند.

مغولها در قرن دوازدهم، تیر و کمانهای پیشرفته‌ای را نسبت به زمان خودشان می‌ساختند که از تیر و کمانهای مشابه کوچکتر و قوی‌تر بودند. این کمانها سازه‌های مرکب بودند که به وسیله ترکیب زردپی احشام (تاندون)، شاخ، خیزران (بامبو) و ابریشم که با کلوپون

طبیعی (Resin) پیچیده شده بودند، ساخته می‌شد. اخیراً برخی از این قطعات موزه‌ای ۷۰۰ ساله تست شدند، آنها از نظر استحکام حدود ۸۰٪ کمانهای از جنس مواد مرکب مدرن بودند. در اواخر صده ۱۸ میلادی سازندگان کانو (قایقهای باریک وبدون بادبان و سکان) بصورت تجربی با چسباندن لایه های کاغذ محکم کرافت (Kraft) با نوعی لاک به نام شلاک (Shellac)، لایه‌گذاری کاغذی را تشکیل می‌دادند و با این تکنیک قایقهای سبک و مقاومی تولید می‌نمودند.

بعدها اولین رزینهای تولید بشر توسعه یافت بطوری که می‌توانست بوسیله پلیمریزاسیون از حالت مایع به جامد تبدیل شود. این رزینهای پلیمری توسط پیوند متقاطع مولکولی از حالت مایع به جامد تبدیل می‌شوند. رزینهای مصنوعی اولیه شامل سلولوئید، ملامین و باکلیت (Bakelite) بودند.

در اوایل دهه ۱۹۳۰ دو شرکت شیمیایی که روی توسعه رزینهای پلیمری فعالیت می‌کردند، عبارت بودند از: «American Cyanamid» و «Dupont».

در مسیر آزمایشها هر دو شرکت به طور مستقل و در یک زمان به فرمول ساخت رزین پلی‌استر دست یافتند. همزمان شرکت شیشه «Owens-Illinois» شروع به ساخت پارچه‌های شیشه به همان صورت بنیادی بافت پارچه های نساجی نمود. در طی سالهای ۱۹۳۴ تا ۱۹۳۶ محققى به نام «Ray Green» در اوهایو این دو محصول جدید را ترکیب کرد و شروع به قالبگیری قایقهای کوچک نمود. این زمان را شروع ساخت مواد مرکب مدرن می‌شناسند.

در حین جنگ جهانی دوم، توسعه رادار به محفظه های غیر فلزی نیاز پیدا کرد و ارتش آمریکا با تعداد زیادی پروژه های تحقیقاتی، تکنولوژی نوپای مواد مرکب را توسعه بخشید. پس از جنگ جهانی دوم مواد مرکب به عنوان یک ماده مهندسی اصلی، جایگاه خود را در صنعت پیدا نمودند. صنعت مواد مرکب در اواخر دهه ۱۹۴۰ با توجه شدید شروع شد و دهه ۱۹۵۰ به سرعت توسعه یافت. بیشتر روشهای امروزی قالبگیری و فرآیند انجام کار روی این مواد در سال ۱۹۵۵ گسترش یافته‌اند.

قالبگیری باز (لایه گذاری دستی)، قالبگیری فشاری، استفاده از پاشش الیاف سوزنی، قالبگیری به روش انتقال رزین، روش فیلامنت و ایندینگ، استفاده از کیسه خلاء و روش پاشش در خلاء همگی بین سالهای ۱۹۴۶ و ۱۹۵۵ توسعه یافتند و در تولید بکار گرفته شدند. محصولات ساخته شده از مواد مرکب در طی این دوره شامل قایقها، بدنه اتومبیلهای مسابقه، قطعات هواپیماها، مخازن ذخیره زیرزمینی، ساختمانها و بسیاری دیگر از محصولات مشابه بود.

امروزه تمایل به افزایش قدرت، سبکی، دوام و زیبایی در محصولات صنعتی موجب رشد صنعت ماده مرکب شده‌است.

۳-۱ ضرورت تحقیق

با گسترش روزافزون کاربردهای دریایی مواد مرکب پایه پلیمر بویژه در محیط خلیج فارس و قابلیت کشورمان در تهیه شناورهای پیشرفته، لزوم تحقیقات در مورد تاثیر محیط دریا بر روی این مواد امری طبیعی بنظر می‌رسد.

از سوی دیگر بررسی فاکتورهایی مانند تابش آفتاب که در این محیط در کنار آب دریا وجود دارند و می‌توانند در کارایی ماده مرکب تاثیرگذار باشند، نیز می‌تواند تاثیر مهمی در شناخت عوامل آسیب‌رسان و تلاش برای به حداقل رساندن تاثیر آنها داشته‌باشد.

بررسی مکانیزم شکست ماده مرکب عاملی است روشنگر در چگونگی آسیب‌دیدگی این ماده و می‌تواند راهگشای مناسبی جهت پیشگیری آسیبه‌ها و یافتن راه‌حل مناسبی برای کاهش صدمات ناشی از قرارگیری در محیط دریا باشد.

با توجه به عوامل ذکرشده، در این تحقیق سعی شده تاضمن بررسی تاثیر آب دریا و عوامل حاضر در این محیط از قبیل نور خورشید، بر خواص مکانیکی و فیزیکی مواد مرکب تولیدشده، مکانیزم شکست و آسیب‌دیدگی ماده مرکب نیز مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به داده‌های ارائه شده، از قبیل تغییرات استحکام کششی، ضربه‌ای و چقرمگی شکست، امکان پیش‌بینی عمر مواد مرکب شیشه-اپوکسی، کربن-اپوکسی و کولار-اپوکسی فراهم می‌باشد.

داده‌های تغییرات خواص فیزیکی، از جمله تغییرات وزنی و ابعادی می‌توانند راهگشای فرآیند طراحی بشمار آیند.

۴-۱ وجه برتری مواد مرکب پایه پلیمر

۴-۱-۱ استحکام ویژه بالا

نسبت استحکام به وزن مواد مرکب پایه پلیمر نسبت به بسیاری از مواد بالاتر می‌باشد. شاید در مقام مقایسه استحکام کششی یک میله فولادی بیشتر از میله فایبرگلاس هم قطرش باشد ولی در بسیاری موارد وزن بسیار پایینتر آن، تمایل به استفاده میله فایبرگلاس را افزایش می‌دهد.