دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی مقاومت پسماند محوری-کمانشی تیرهای کامپوزیتی پالترود پس از اعمال بار ضربه‌ای محوری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

منیژه آقایی

استاد راهنما
دکتر محمدرضا فروزان

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (گرایش طراحی کاربردی) خانم منیژه آقایی
تحت عنوان

بررسی مقاومت پسماند محوری-کمانشی تیرهای کامپوزیتی پالترود پس از اعمال بار ضربه‌ای محوری

در تاریخ۱۳۹۲/۶/۲۵ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمدرضا فروزان
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر سعید ضیایی راد
۳- استاد داور	دکتر محمود کدخدایی
۴- استاد داور	دکتر مهدی سلمانی تهرانی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

شکر خدا که هرچه طلب کردم از خدا

بر منتهای همّت خود کامران شدم

سپاس و ستایش بی‌انتها خدایی را که به من قدرت آموختن داد تا یاد بگیرم هر آنچه نمی‌دانم و به شایستگی انجام دهم هر آنچه می‌توانم. او که در لحظه لحظه‌ی زندگی در کنارم بوده و بی لطف و عنایت او حتی قدمی به پیش نمی‌توانستم ببرم. حال که به این مرتبه از علم و دانش از جهان پر رمز و راز هستی رسیده‌ام، با افتخار و غرور، مراتب قدردانی خود را نثار کسی می‌کنم که در این راه راهنمایم بوده و با رهنمودهای بی‌دریغ خود مرا یاری رسانده.

استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمدرضا فروزان، ضمن عرض سپاس بی‌پایان به خاطر زحمات بی‌شائبه‌تان، از ایزد منّان برایتان زندگی سرشار از خیر و نیکی و عمر باعزّت آرزومندم.

همچنین با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند.

کلیه حقوق مـادی مترتـب بـر نتـایج مطالعـات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیـق موضـوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشـگاه صـنعتی اصفهان است.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند این مجموعه را به

پدر و مادر عزیزم

تقدیم می کنم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات ۲

۱-۲ مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۳

۱-۳ ارتباط موضوع تحقیق حاضر با پژوهش‌های پیشین ٦

۱-۴ تعریف هدف و اهمیت تحقیق حاضر ٦

۱-۵ محتوای فصل‌های بعدی ۷

فصل دوم: آشنایی با مواد مرکب

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ جایگاه مواد مرکب در مهندسی ۹

۲-۲-۱ فلزات ۹

۲-۲-۲ پلاستیک‌ها ۱۰

۲-۲-۳ سرامیک‌ها ۱۰

۲-۲-٤ مواد مرکب ۱۰

۲-۲-۵ مزایای استفاده از مواد مرکب ۱۱

۲-۲-٦ معایب استفاده از مواد مرکب ۱۱

۲-۳ اجزاء تشکیل‌دهنده ماده مرکب ۱۱

۲-۴ تقسیم‌بندی مواد مرکب بر اساس نوع زمینه ۱۲

۲-٤-۱ کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) ۱۲

۲-٤-۲ کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) ۱۳

۲-٤-۳ کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMC) ۱۳

۲-۵ تقسیم‌بندی مواد مرکب بر اساس نوع تقویت‌کننده ۱٤

۲-۶ روش های ساخت مواد مرکب ۱۷

۲-٦-۱ لایه‌چینی به روش پاشش اسپری گونه ۱۷

۲-٦-۲ لایه‌چینی دستی ۱۸
۲-٦-۳ روش محفظه خلأ ۱۹
۲-٦-٤ روش رشته‌پیچی ۲۰
۲-٦-٥ روش پالتروژن ۲۱
۲-٦-٦ روش انتقال رزین به داخل قالب ۲۲
۲-۷ خواص و ویژگی‌های ماده مورد استفاده در این تحقیق ۲٤
۲-۸ کاربردهای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری [۳۹] ۲٤
۲-۹ کاربرد کامپوزیت‌ها در ایران [۳۹] ۲٥
۲-۱۰ خلاصه‌ی فصل ۲٥
فصل سوم: ضربه و آسیب ضربه‌ای در مواد مرکب
۳-۱ مقدمه ۲٦
۳-۲ موضوع ضربه در مواد مرکب ۲٦
۳-۳ تعریف آسیب ۲۷
۳-۴ تقسیم‌بندی انواع آسیب ۲۷
۳-٥ مکانیزم‌های شکست مواد مرکب ۲۸
۳-٦ روابط ساختاری برای ماده مورد بررسی در این تحقیق ۲۹
۳-۷ فرمول‌بندی آسیب برای مواد مرکب ۳۰
۳-۷-۱ روش مکانیک شکست ۳۰
۳-۷-۲ روش پلاستیسیته ۳۰
۳-۷-۳ روش معیار آسیب ۳۱
۳-۷-٤ روش مکانیک آسیب ۳٥
۳-۸ خلاصه‌ی فصل ٤۰
فصل چهارم: استحکام پسماند محوری-کمانشی در تیر کامپوزیتی
٤-۱ مقدمه ٤۱
٤-۲ کمانش در تیرها ٤۱

٤-٢-١ کمانش در تیرهای ایزوتروپیک ٤٢
٤-٢-٢ کمانش در تیرهای اورتوتروپیک ٤٤
٤-٣ خلاصه‌ی فصل ٤٦

فصل پنجم: آزمایش‌ها

٥-١ مقدمه ٤٧
٥-٢ جنس نمونه‌های مورد آزمایش ٤٧
٥-٣ تست‌های استاندارد برای تعیین خواص ماده مورد استفاده ٤٨
٥-٣-١ تست کشش تک محوری ٤٨
٥-٣-٢ تست فشار تک‌محوری ٥٢
٥-٣-٣ تست برش ٥٤
٥-٤ تست ضربه محوری ٥٦
٥-٥ تست فشار محوری ٥٨
٥-٦ خلاصه‌ی فصل ٦٠

فصل ششم: شبیه‌سازی

٦-١ مقدمه ٦١
٦-٢ تشریح مدل‌سازی در نرم‌افزار ٦٢
٦-٢-١ مدل‌سازی تیر با مقطع ناودانی ٦٢
٦-٢-٢ نوع المان، فرمول تماس و حلگر استفاده شده ٦٣
٦-٣ زیربرنامه‌ی VUMAT ٦٤
٦-٤ خلاصه‌ی فصل ٦٦

فصل هفتم: نتایج و بحث

٧-١ مقدمه ٦٧
٧-٢ فشار محوری بر تیر سالم ٦٧
٧-٣ ضربه و فشار پس از آن بر تیر ٧٣
٧-٣-١ ضربه با وزن زیاد و رها شده از ارتفاع کم بر روی تیر کوتاه ٧٣
٧-٣-٢ ضربه با وزن کم و رها شده از ارتفاع زیاد بر تیر کوتاه ٨٠

۷-۳-۳ ضربه با وزن زیاد و رها شده از ارتفاع کم بر تیر بلند ۸٤
۷-۴ خلاصه‌ی فصل ۸٦
فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸-۱ مقدمه ۸۷
۸-۱-۱ نتیجه‌گیری ۸۷
۸-۲ پیشنهادات ۸۹
مراجع ۹۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ : چندلایه‌های مرکب ۱۲
شکل ۲-۲ :مقایسه رفتار مکانیکی تقویت‌کننده، زمینه و ماده مرکب از آنها[۳۵] ۱۲
شکل ۲-۳ : تقسیم‌بندی الیاف تقویت‌کننده بر اساس شکل ظاهر[۳۷] ۱۴
شکل ۲-۴: مقایسه رفتار مکانیکی تقویت‌کننده‌های رایج [۳۵] ۱۶
شکل ۲-۵: مقایسه استحکام در برابر ضربه برای برخی تقویت‌کننده‌های رایج [۳۵] ۱۶
شکل ۲-۶: قیمت برخی تقویت‌کنندههای رایج [۳۵] ۱۶
شکل ۲-۷ : لایه‌چینی به روش پاشش اسپری‌گونه[۳۵] ۱۷
شکل ۲-۸ : روش لایه‌چینی دستی[۳۵] ۱۹
شکل ۲-۹ : روش محفظه خلأ[۳۵] ۱۹
شکل ۲-۱۰ : روش رشته‌پیچی[۳۵] ۲۰
شکل ۲-۱۱ : روش پالتروژن[۳۵] ۲۲
شکل ۲-۱۲ : روش انتقال رزین به داخل قالب[۳۵] ۲۳
شکل ۲-۱۳ : مقطع تیر مورد استفاده در این تحقیق ۲۴
شکل ۳-۱ : انواع آسیب در مواد مرکب ۲۸
شکل ۳-۲: آسیب لایه‌لایه شدن و جدایش در بین لایه‌های با جهت الیاف مختلف[۴۰] ۲۸
شکل ۳-۳ : دستگاه مختصات انتخاب شده برای هر لایه مرکب[۴۲] ۲۹
شکل ۳-۴مقایسه رشد آسیب آنی و تدریجی[۱۹] ۳۹
شکل ۴-۱: رفتار تیر در فشار : (۱) کمانش کلی، (۲) کمانش محلی، (۳) شکست، (۴) له شدگی محوری[۵۳] ۴۲
شکل ۴-۲: شکست ناگهانی و یا شکست تدریجی تیر در فشار[۳۰] ۴۳
شکل ۴-۳ : مقادیر مختلف K به کار رفته در رابطه ماکزیمم نیروی کمانش ۴۴
شکل ۴-۴ : پارامترهای به کار رفته در روابط مربوط به محاسبه ماکزیمم نیروی کمانش ۴۵
شکل ۵-۱ : ابعاد مورد نیاز برای تست کشش در دو راستای الیاف و عمود بر الیاف[۵۵] ۴۹
شکل ۵-۲ : تب‌گذاری در تست کشش ۴۹
شکل ۵-۳ : چسباندن تب‌ها به دو سر نمونه ۴۹
شکل ۵-۴ : تست کشش تک‌محوره در راستای الیاف ۵۰
شکل ۵-۵ : نتیجه تست کشش در راستای الیاف ۵۰
شکل ۵-۶ : نتیجه تست کشش در جهت عمود بر الیاف ۵۱
شکل ۵-۷ : منحنی نیرو- جابهجایی تست کشش تک‌محوره در راستای الیاف ۵۱
شکل ۵-۸ : ابعاد نمونه فشار برای دو جهت الیاف و عمود بر الیاف [۵۵] ۵۲
شکل ۵-۹ : نمونه آماده شده برای تست فشار در راستای الیاف ۵۲
شکل ۵-۱۰ :نتیجه تست فشار در راستای الیاف ۵۳
شکل ۵-۱۱ : نتیجه تست فشار در راستای الیاف ۵۳
شکل ۵-۱۲ : منحنی نیرو- جابه‌جایی تست فشار تک‌محوره در راستای الیاف ۵۳
شکل ۵-۱۳ : الف)ابعاد نمونه ب) مکانیزم اعمال بار برشی[۵۵] ۵۴
شکل ۵-۱۴ : اولین مکانیزم پیشنهادی برای اعمال بار برشی به نمونه ۵۵

شکل ۵-۱۵ : دومین مکانیزم پیشنهادی برای اعمال بار برشی به نمونه ۵۵
شکل ۵-۱۶ : اولین مکانیزم برای اعمال ضربه در سر تیر ۵۶
شکل ۵-۱۷ : دومین مکانیزم برای اعمال ضربه در سر تیر ۵۷
شکل ۵-۱۸ : آخرین تکیه‌گاه پیشنهادی برای تست ضربه ۵۷
شکل ۵-۱۹ : ضربه‌زن ساخته شده برای تست ضربه محوری ۵۸
شکل ۵-۲۰ : تکیه‌گاه تیر در تست فشار محوری ۵۹
شکل ۵-۲۱ : الف) اطمینان از عمود بودن تیر به کمک تراز ب) استفاده از صفحه فولادی واسطه برای ایجاد فشار یکنواخت بر مقطع تیر ۵۹
شکل ۶-۱ : الگوریتم حل مسئله ضربه و فشار پس از ضربه در نرم‌افزار ABAQUS ۶۱
شکل ۶-۲ : الف) مقطع تیر ب)تکیه‌گاه (ابعاد به میلیمتر) ۶۲
شکل ۶-۳ : ابعاد ضربه‌زن و فک فشار به میلیمتر ۶۲
شکل ۶-۴ : قطعات سوار شده ۶۳
شکل ۶-۵ : مش‌بندی اجزای مختلف ۶۴
شکل ۶-۶ : الگوریتم تعریف رفتار ماده در زیربرنامه VUMAT ۶۵
شکل ۷-۱ : مشخصات مقطع تیر مورد بررسی (L=50, h=25, t=5) ۶۷
شکل ۷-۲ : مود کمانش در تست فشار محوری بر تیر سالم ۶۹
شکل ۷-۳ : آسیب‌های ایجاد شده در تیر سالمی که تحت فشار محوری قرار گرفته است ۶۹
شکل ۷-۴ : مود کمانش و توزیع تنش برای معیارهای الف) ماکزیمم تنش ب) هاشین پ) ماکزیمم کرنش ت) هو ث) ماکزیمم کرنش/هو ۷۰
شکل ۷-۵: مودهای مختلف آسیب برای معیار ماکزیمم کرنش الف) آسیب فایبر در کشش ب) آسیب فایبر در فشار پ) آسیب زمینه در کشش (۱- روبه‌رو ۲- پشت تیر) ت) آسیب زمینه در فشار ۷۰
شکل ۷-۶ : مودهای مختلف آسیب برای معیار ماکزیمم تنش الف) آسیب فایبر در کشش ب) آسیب فایبر در فشار پ) آسیب زمینه در کشش (۱- روبه‌رو ۲- پشت تیر) ت) آسیب زمینه در فشار ۷۱
شکل ۷-۷ : مودهای مختلف آسیب برای معیار ماکزیمم هاشین الف) آسیب فایبر در کشش ب) آسیب فایبر در فشار پ) آسیب زمینه در کشش (۱- روبه‌رو ۲- پشت تیر) ت) آسیب زمینه در فشار ۷۱
شکل ۷-۸ : تست فشار بر تیر سالم و مقایسه با نتیجه‌ی‌حاصل از معیارهای مختلف ۷۲
شکل ۷-۹ :مود کمانش و توزیع تنش برای تیر سالم در فشار محوری (بدون مدل آسیب) ۷۳
شکل ۷-۱۰ : تست ضربه با وزن ۲۶ کیلوگرم رها شده از ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر بر روی تیر به طول ۳۰ سانتیمتر ۷۴
شکل ۷-۱۱ : منحنی نیرو- جابه‌جایی تیر در فشار پس از ضربه ۲۶ کیلوگرم از ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر ۷۴
شکل ۷-۱۲ : مود کمانش و توزیع تنش میزز پیش‌بینی شده توسط معیارهای الف) ماکزیمم تنش، ب) هاشین ، پ) ماکزیمم کرنش، ت) ماکزیمم کرنش/هو ۷۵
شکل ۷-۱۳ : آسیب ایجاد شده در تیر پس از تست فشار محوری و ایجاد کمانش ۷۶
شکل ۷-۱۴ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار ماکزیمم کرنش الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ-۱) آسیب ماتریس در کشش (پشت تیر)، پ-۲) آسیب ماتریس در کشش (روبه‌روی تیر)، ت) آسیب ماتریس در فشار ۷۶
شکل ۷-۱۵ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار هو/ ماکزیمم کرنش الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ) آسیب ماتریس در کشش، ت) آسیب ماتریس در فشار ۷۷
شکل ۷-۱۶ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار ماکزیمم تنش الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ-۱) آسیب ماتریس در کشش (پشت تیر)، پ-۲) آسیب ماتریس در کشش (روبه‌روی تیر)، ت-۱) آسیب ماتریس در

فشار(پشت تیر)، ت-۲) آسیب ماتریس در فشار (روبه‌روی تیر) ۷۷
شکل ۷-۱۷ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار هاشین الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ) آسیب ماتریس در کشش، ت) آسیب ماتریس در فشار ۷۸
شکل ۷-۱۸ : میکروسکوپ نوری ۷۸
شکل ۷-۱۹ : نمونه‌های آماده‌سازی شده برای مشاهده با میکروسکوپ نوری.....۷۹
شکل ۷-۲۰ : مشاهده بخشی از تیر در راستای فایبرها، توسط میکروسکوپ نوری الف) تیر سالم، ب) تیر آسیب دیده (خورد شدن فایبر در راستای طول).....۷۹
شکل ۷-۲۱ : مقایسه رفتار تیر در تست فشار برای دو تست با و بدون خارج از مرکزیت تیر ۸۰
شکل ۷-۲۲ : آسیب ایجاد شده در تیر پس از فشار محوری و ایجاد کمانش ۸۰
شکل ۷-۲۳ : فشار بعد از دو ضربه با انرژی‌های یکسان بر روی تیر با طول ۳۰۰ میلیمتر ۸۱
شکل ۷-۲۴ : منحنی نیرو- جابه‌جایی تیر در فشار پس از ضربه ۲۰ کیلوگرم از ارتفاع ۱۵۱ سانتیمتر.....۸۲
شکل ۷-۲۵ : مود کمانش و توزیع تنش میزز پیش‌بینی شده توسط معیارهای الف) ماکزیمم تنش، ب) هاشین ۸۲
شکل ۷-۲۶ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط ماکزیمم تنش الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ) آسیب ماتریس در کشش، ت) آسیب ماتریس در فشار ۸۳
شکل ۷-۲۷ : مودهای آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار هاشین الف) آسیب فایبر در کشش، ب) آسیب فایبر درفشار، پ) آسیب ماتریس در کشش، ت) آسیب ماتریس در فشار ۸۳
شکل ۷-۲۸ : کمانش تیر به طول ۴۵ سانتی‌متر در فشار پس از ضربه.....۸۴
شکل ۷-۲۹ : آزمایش فشار پس از ضربه بر روی تیرهای با طول ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر ۸۵
شکل ۷-۳۰ : فشار پس از ضربه با وزن ۲۶ کیلوگرم و رها شده از ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر بر روی تیر با طول ۴۵ سانتی‌متر ۸۵
شکل ۷-۳۱ : مود کمانش و توزیع تنش پیش‌بینی شده پس از کمانش، به کمک معیار ماکزیمم تنش.....۸۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱–۱ : جایگاه تحقیق حاضر در بین پژوهش‌های پیشین ۶
جدول ۲–۱ : تقویت‌کننده‌های رایج مورد استفاده برای زمینه‌های مختلف [۳۸] ۱۵
جدول ۳–۱ : ثوابت به کار رفته در معیارهای مستقل از مود آسیب ۳۲
جدول ۳–۲ : معیارهای ماکزیمم تنش و ماکزیمم کرنش ۳۴
جدول ۳–۳ : معیار آسیب هو [۴۵] ۳۴
جدول ۳–۴ : معیار آسیب هاشین [۴۷] ۳۵
جدول ۳–۵ : مدل رشد آسیب ارائه شده توسط ردی و ردی [۴۹] ۳۶
جدول ۳–۶ : مدل رشد آسیب ارائه شده توسط لی [۱۹] ۳۷
جدول ۳–۷ : مدل رشد آسیب کامانهو و متیو بر پایه مدل Tan [۵۰] ۳۷
جدول ۵–۱ : پارامترهای استخراجی از تست‌های کشش تک‌محوره ۴۸
جدول ۵–۲ : خواص حاصل از تست‌های کشش تک‌محوره ۵۱
جدول ۵–۳ : نتیجه‌ی تست‌های فشار ۵۴
جدول ۶–۱ : خواص کامپوزیت شیشه/پلی‌استر ۶۳
جدول ۷–۱ : مقایسه‌ی ماکزیمم نیرو و جابه‌جایی برای تست و معیارهای مختلف ۷۲
جدول ۷–۲ : مقایسه‌ی ماکزیمم نیرو و جابه‌جایی برای تست و معیارهای مختلف ۷۵
جدول ۷–۳ : مقایسه‌ی ماکزیمم نیرو و جابه‌جایی برای تست و معیارهای آسیب ۸۴

چکیده

مواد مرکب از سالیان پیش به دلیل دارا بودن ویژگی‌های برجسته‌ای از جمله نسبت استحکام به چگالی بالا و مقاومت بالا در برابر خوردگی، به عنوان جایگزینی برای برخی از فلزات مانند فولاد و آلومینیوم در بسیاری از صنایع انتخاب شده‌اند. تیرهای ساخته شده از جنس مواد مرکب از جمله محصولاتی از کامپوزیت‌ها هستند که در ساخت سازه‌های ساختمانی، راه‌سازی، پل‌ها و ... کاربرد دارند. موضوع ضربه در مواد مرکب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا در اثر ضربه در ماده مرکب آسیب ایجاد شده و در نتیجه مقاومت آن کاهش می‌یابد. یکی از انواع ضربه‌هایی که به تیرهای کامپوزیتی ممکن است اعمال شود، ضربه‌ی محوری می‌باشد که کمتر توسط محققان دیگر به آن پرداخته شده است. بررسی استحکام پسماند محوری- کمانشی تیر پس از ضربه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا در اثر کمانش و ناپایداری ناگهانی تیر، ممکن است کل سازه دچار ناپایداری و فرو ریزش شود. در این تحقیق، تیرهای با مقطع ناودانی از جنس شیشه- پلی‌استر و ساخته شده به روش پالتروژن ابتدا تحت ضربه محوری قرار داده شده و سپس مقاومت پسماند محوری- کمانشی آنها پس از اعمال بار ضربه‌ای اندازه‌گیری شده است. به جهت بررسی تأثیر ضربه و آسیب ناشی از آن بر مقاومت محوری- کمانشی این تیرها، مقاومت تیرهای سالم مشابه نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و توسط حل‌گر صریح انجام و برای بررسی شروع آسیب به مقایسه‌ی چهار معیار ماکزیمم تنش، ماکزیمم کرنش، هاشین و هو پرداخته شده است. در کنار این معیارها که از جمله معیارهای ساده و مشهور برای بررسی شروع آسیب در مواد مرکب هستند، از روش رشد آسیب آنی استفاده شده است. برای اعمال مدل آسیب و تعریف رفتار ماده به صورت اورتوتروپیک، از زیربرنامه VUMAT بهره گرفته شده است. به جهت اعتبارسنجی داده‌های حاصل از مدل‌سازی به انجام تست‌های آزمایشگاهی پرداخته شده، ضمن آنکه مدل‌سازی و تست‌های مربوطه برای شرایط مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به این ترتیب که تأثیر وزن و ارتفاع ضربه‌زن و نیز طول تیر در این بررسی‌ها مورد توجه بوده است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایش، این نتیجه بدست آمده است که معیارهای ماکزیمم تنش، ماکزیمم کرنش و هاشین برای فشار بر تیر سالم، بهترین پیش‌بینی را از نظر منحنی نیرو- جابه‌جایی و مود کمانش کرده‌اند. در حالی که معیار هو با احتیاط بیش از حد، رفتار خوبی برای تیر در فشار پیش‌بینی نکرده و آسیب را بسیار زیاد در تیر نشان داده است. در مورد فشار پس از ضربه در تیر، معیارهای ماکزیمم تنش و هاشین، رفتارهای نسبتاً مشابه و مطابق با آزمایش را پیش‌بینی نموده‌اند. هچنین به کمک تحقیق انجام گرفته در این پایان‌نامه این دست‌آورد حاصل شده است که بسته به نوع بارگذاری و ماده‌ی مورد استفاده باید از معیار مناسب برای مدل کردن آسیب استفاده کرد و سپس به کمک مدل‌سازی با این معیار مناسب قادر به دستیابی به نتایجی بود که رسیدن به آن‌ها از طریق آزمایش آسان نباشد. برای نمونه می‌توان به دستیابی به مود کمانش و شکل مودهای آسیب اشاره نمود.

کلمات کلیدی: تیر پالترود، ضربه‌ی محوری، مقاومت پسماند محوری- کمانشی، تحلیل اجزا محدود ، زیربرنامه VUMAT، آزمایش

فصل اول
مقدمه

۱-۱ کلیات

تقاضای روزافزون برای بهبود عملکرد مواد به صورت خواسته‌های مختلف از قبیل چگالی کمتر، استحکام بیشتر و هزینه‌های کمتر مطرح می‌شوند[۱]. استحکام زیاد در کنار چگالی کم، گرایش‌ها را به سمت تولید موادی مرکب از چندین جز سوق داده است. مواد مرکب ساخته دست بشر با نام کامپوزیت‌های مصنوعی شناخته می‌شوند.مواد مرکب مصنوعی با الگوگیری از مواد مرکب طبیعی شکل گرفتند. از جمله مواد مرکب موجود در طبیعت می‌توان سنگ، چوب و استخوان را نام برد. از ابتدایی‌ترین مواد مرکب ساخته دست بشر می‌توان به کاه‌گل اشاره کرد که در آن از ذرات کاه برای استحکام بخشیدن به گل استفاده می‌شد و در ساختمان‌سازی کاربرد داشت. نمونه‌ی دیگر مواد مرکب مصنوعی می‌توان بتن را نام برد که در آن سنگریزه‌های شنی به کمک سیمان به یکدیگر متصل شده و ماده مستحکم بتن را تشکیل می‌دهند. رفته رفته با پیشرفت صنعت کامپوزیت در سراسر جهان، محققان با ترکیب زمینه‌های مختلف با تقویت‌کننده‌های مناسب، مواد مرکب با خواص و کاربردهای متفاوت را ایجاد کردند. مواد مرکب در قالب اشکال مختلف از قبیل صفحه و تیر ساخته می‌شوند که هر یک از این اشکال با قرار دادن لایه‌های با جهت الیاف مختلف بر روی هم ایجاد می‌گردند. از زمان ساخت اولین مواد مرکب تا کنون، این مواد کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله ساختمان‌سازی، هوافضا، نظامی، ورزشی، پزشکی و ... داشته‌اند.

اصلی‌ترین نقطه‌ی تمایز مواد مرکب با سایر مواد رایج مانند فلزات را می‌توان در نسبت استحکام و سختی به چگالی بالای این مواد دانست. ضمن اینکه در بسیاری از روش‌های ساخت این مواد، تنها با هزینه‌های اندکی می‌توان مواد با خواص بسیار مطلوب و تحت کنترل طراح و سازنده را تولید کرد.

موضوع ضربه در مواد مرکب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در اثر اعمال ضربه، در این مواد آسیب ایجاد می‌شود. این آسیب که بسته به انرژی اعمالی از سوی بار ضربه‌ای، گاه کم و گاه زیاد است، با شروع و رشد می‌تواند استحکام ماده مرکب را تحت تأثیر قرار داده و کارایی اولیه آن را کاهش دهد. از این رو محققین بسیاری از ابتدای ساخت این مواد تاکنون به بحث و بررسی در مورد پدیده ضربه، آسیب ایجاد شده و به تبع آن بررسی کاهش استحکام ماده مرکب پرداخته‌اند. به دلیل پر هزینه بودن تست‌های عملی برای بررسی این پدیده، گرایش پژوهشگران به مدل‌سازی مسئله واقعی به کمک روش‌های تحلیلی و نرم‌افزارهای موجود بوده است تا با یافتن بهترین روش برای تحلیل مسئله ضربه و آسیب ایجاد شده در اثر آن و تأثیر آن بر استحکام ماده مرکب، از هزینه‌های هنگفت تست‌های آزمایشگاهی کاسته شود. در ادامه به مرور پژوهش‌های انجام شده بر روی این موضوعات پرداخته شده است.

۱-۲ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

ماروین و همکاران در سال ۱۹۷۷[۲]، به انجام آزمایش برای بررسی مقاومت پسماند فشاری در صفحه تقویت شده به کمک کلاهک، پس از اعمال بار ضربه‌ای متقاطع بر روی آن پرداختند. جیمز لی در سال‌های ۱۹۸۰ [۳] و ۱۹۸۲ [۴] ، به ارائه یک مدل سه‌بعدی اجزاء محدود برای بررسی تنش‌ها در اطراف سوراخ موجود در یک صفحه کامپوزیتی تحت بارگذاری دو محوری پرداخت. وی برای معیارهای شروع و رشد آسیب، مدل‌های لی را ارائه داد. هوانگ و سان در سال ۱۹۸۹[۵]، با استفاده از معیار هاشین به‌همراه معیار لی به بررسی آسیب درون صفحه ای و معیار چانگ و اسپرینگر برای بررسی لایه لایه شدن در یک صفحه سورخ‌دار از جنس شیشه/اپوکسی تحت کشش تک محوره پرداختند. آنها با ارائه یک مدل برای رشد آسیب آنی، رشد آسیب را نیز مورد بررسی قرار دادند. ایشای و شراگای در سال ۱۹۹۰[۶]، با انجام تست‌های آزمایشگاهی به بررسی مقاومت پسماند فشاری تیرهای کامپوزیتی پس از اعمال بار ضربه‌ای خمشی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که آسیب لایه‌لایه شدن باعث کاهش قابل توجه در استحکام پسماند فشاری تیر می‌شود.گیلد و همکاران در سال ۱۹۹۳[۷]، با انتخاب سه صفحه کامپوزیتی با سه جنس مختلف به بررسی استحکام پسماند فشاری- محوری این صفحات پس از اعمال بار ضربه‌ای خمشی پرداختند. آنها فرض ایزوتروپ خطی و الاستیک بودن مواد را در کار خود در نظر گرفتند و با تغییر ارتفاع ضربه‌زن، سایز ناحیه آسیب و تأثیر آن بر مقاومت پسماند صفحات را مورد بررسی قرار دادند. ردی و همکارش در سال ۱۹۹۳ [۸]، به بررسی شروع و رشد آسیب در صفحه کامپوزیتی از جنس گرافیت/اپوکسی تحت بارگذاری محوری پرداختند. آنها برای رشد آسیب آنی یک مدل با نام خودشان ارائه دادند.

چن و همکارانش[۹]، در سال ۱۹۹۳ به مطالعه‌ی پارامتری استحکام پسماند ماده مرکب گرافیت/اپوکسی آسیب دیده تحت ضربه با سرعت پایین پرداختند. چوتارد و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۱۰]، با انجام تست‌های آزمایشگاهی به بررسی مقاومت پسماند خمشی (به کمک تست خمش چهارنقطه ای) پس از اعمال بار ضربه‌ای در تیرهای با مقطع قوطی و U از جنس شیشه/پلی‌استر پرداختند. آنهاتأثیر پارامترهای آزمایش مثل سرعت ضربه، جرم و سایز ضربه‌زن را در کار خود مورد بررسی قرار دادند. هو و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۱۱]، معیاری برای بررسی شروع آسیب در صفحات کامپوزیتی ارائه دادند. آنها معیار خود را بر اساس معیار معروف چانگ-چانگ که در نرم‌افزار LS-DYNA مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه دادند و اصلاحاتی روی معیار چانگ-چانگ انجام داده و یک مدل نیز برای رشد آسیب آنی معرفی کردند. آنها مدل خود را با انجام تست‌های آزمایشگاهی برای صفحه از جنس CFRP اعتبارسنجی کردند.

کوین و همکارش در سال۲۰۰۱ [۱۲]، به بررسی پاسخ صفحات کامپوزیتی با تقویت‌کننده کربن و زمینه پلیمر، در

برابر بار ضربه‌ای خمشی پرداختند. آنها از آسیب پیوسته در کار خود استفاده کردند. حبیب در سال ۲۰۰۱ [۱۳]، به انجام آزمایش برای بررسی استحکام پسماند فشاری پس از ضربه[1]درصفحات کامپوزیتی برای سه ضخامت مختلف پرداخت. ساگار و همکارانش در سال۲۰۰۲[۱۴]، به بررسی پیش‌بینی پاسخ صفحات کامپوزیتی در برابر ضربه و رشد آسیب در اثر ضربه خمشی پرداختند. طاهری و ژانگ در سال ۲۰۰۲ [۱۵]، پاسخ دینامیکی کمانش پالسی تیرهای کامپوزیتی با جنس شیشه/اپوکسی (دارای عیوب اولیه) پس از اعمال بار ضربه‌ای محوری را به روش اختلاف محدود با تغییر پارامترهای مختلف به دست آوردند و نتایج خود را با روش اجزاء محدود در نرم‌افزارLS-DYNAمورد مقایسه قرار دادند. آنها همچنین در سال ۲۰۰۴ [۱۶]، به بررسی شروع آسیب در تیرهای از جنس کربن/اپوکسی پس از اعمال بار ضربه ای محوری پرداختند. دونادون و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۱۷]، به ایجاد مدل سه‌بعدی برای پیش‌بینی آسیب پس از ضربه با سرعت پایین و استفاده از مکانیک آسیب پیوسته در صفحات کامپوزیتی پرداختند.پوئنت و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۱۸]، با انجام مدلسازی و تست عملی به بررسی سطح آسیب و سرعت پسماند ضربه زن در ضربه با سرعت بالا بر روی صفحات بافته شده از جنس کربن/اپوکسی پرداختند. آنها در مدل خود از معیار چانگ-چانگ اصلاح شده برای بررسی شروع آسیب و رشد آسیب تدریجی برای بررسی رشد آسیب استفاده کردند.

گارنیچ و آکولا در سال ۲۰۰۸ [۱۹]، به جمع‌آوری مدل‌های شروع آسیب دو و سه بعدی مستقل از مود آسیب و وابسته به مود آسیب پرداختند. همچنین مدل‌های رشد آسیب دو و سه بعدی آنی و تدریجی را نیز جمع‌آوری نمودند و به تحلیل و بررسی هریک از مدل‌ها پرداختند.

سکات و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۲۰]، آسیب در تیرهای تحت ضربه با تفنگ گاز سرعت بالا را مورد مطالعه قرار دادند. جنس تیرهایی که آنها انتخاب کردند شیشه اپوکسی و با مقطع مستطیلی بود. آنها کد غیرخطی رفتار ماده را در نرم‌افزار LS-DYNA نوشتند. آنها پس از هر تست، تیر را از وسط برش داده تا آسیب ایجاد شده را به طور دقیق مورد بررسی قرار دهند. کویی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۲۱]، استحکام کششی پسماند صفحات از جنس گرافیت/اپوکسی پس از اعمال بار ضربه‌ای متقاطع را مورد بررسی قرار دادند. آنها از رشد آسیب آنی در مدلخود استفاده کردند و راستی‌سنجی مدل‌سازی خود را با انجام تست‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. سانتیوست و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲۲]، به کمک آزمایش به بررسی مقاومت خمشی پسماند در دو تیر کامپوزیتی از جنس شیشه/پلی‌استر و با ابعاد مختلف و با دو نوع ضربه‌زن پرداختند. در این آزمایشات تیر ابتدا با یک ضربه‌زن تحت ضربه متقاطع قرار گرفته وسپس آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی آن انجام شد. آنها همچنین تأثیر انرژی ضربه، عرض نمونه و هندسه ضربه زن بر مقاومت پسماند خمشی تیررا مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین در همین سال [۲۳]، به مقایسه معیارهای هو و هاشین برای پیش بینی شروع آسیب در تیرتحت ضربه خمشی (خمش سه نقطه ای) با سرعت پایین پرداختند و برای جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ[2] در المان‌هایی که دچار آسیب شده و سختی آنها کاهش یافته است، از معیار ماکزیمم کرنش استفاده کرده تا در صورت ارضای این معیار، آن المان حذف گردد.

فاگیانی و فالزون در سال ۲۰۱۰ [۲۴]، با استفاده از مدل آسیب بین صفحه‌ای بر پایه مکانیک آسیب پیوسته به پیش‌بینی آسیب در مواد مرکب با تقویت‌کننده کربن پرداختند. آنها مدل‌سازی خود را در نرم‌افزار ABAQUS انجام دادند و فرض غیر خطی بودن مدل آسیب برشی را نیز در مدل خود وارد کردند. صفحاتی که آنها انتخاب

---

[1]. compression after impact
[2]. Large deformation

کردند به کمک تیرهای کامپوزیتی با مقطع I تقویت شده بود. گاما و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۲۵]، صفحات کامپوزیتی ضخیم تحت ضربه متقاطع را مورد بررسی قرار دادند. آنها در مدل‌سازی و آزمایشات خود ضربات از سرعت ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه را مورد بررسی قرار دادند. در هر مدل سعی در به دست آوردن سرعت پسماند ضربه‌زن پس از ضربه و نیز میزان آسیبی که بر روی صفحه بر جای می‌گذارد داشتند. آنها مدل اجزاء محدود غیرضمنی خود را در نرم‌افزار LS-DYNA انجام دادند. پالانیولو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۲۶]، به بررسی رفتار تیوپ‌هایی با ۹ سطح مقطع مختلف از جنس کامپوزیت ساخته شده به روش لایه‌چینی دستی، در فشار محوری استاتیکی پرداختند و تأثیر طول و عرض و ضخامت در حداکثر نیرو و انرژی قابل تحمل تیوپ را اندازه‌گیری نمودند. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲۷]، به بررسی شروع و رشد آسیب در صفحات کامپوزیتی از جنس گرافیت اپوکسی به دو روش عددی و تست عملی پس از اعمال ضربه با سرعت پایین پرداختند. مدل‌سازی خود را در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit انجام دادندو شروع و رشد آسیب را در زیربرنامه VUMAT تعریف نمودند. آنها به دلیل تقارنی که در صفحات خود مشاهده کردند، یک چهارم صفحه را در مدل خود استفاده کردند. رایموندو و همکاران در سال ۲۰۱۲[۲۸]، چندلایه‌های کامپوزیتی تحت ضربه با سرعت پایین را مورد بررسی قرار دادند. در روشی که آنها برای شروع و رشد آسیب ارائه دادند پاسخ نهایی مستقل از سایز المان‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر با یک مش درشت نیز می‌توان به جواب صحیح رسید. آنها از مکانیک آسیب بر پایه انرژی استفاده کردند تا برای هر المان مستقل از سایز آن، یک انرژی به دست آید. اسکیون و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲۹] ،به بررسی نیروی بحرانی کمانش در تیرهای کامپوزیتی پالترود در دو بارگذاری خمشی و محوری و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در نیروی کمانش برای طول تیر یک متر و ابعاد مقطع داده شده در مقاله، پرداختند. سایجود و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۳۰] ، به جمع‌آوری تاریخچه‌ای از تحقیقات انجام شده برای محاسبه میزان جذب انرژی در ستون‌ها و تیرهای مختلف از جنس کامپوزیت در بارگذاری فشاری پرداختند و فاکتورهای تأثیرگذار در ماکزیمم نیروی فشاری قابل اعمال به ستون یا تیر کامپوزیتی را معرفی نمودند. نیکفروزدر پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود در سال ۲۰۱۲ [۳۱] ، به بررسی مقاومت پسماند خمشی تیرهای کامپوزیتی پالترود پس از اعمال بار ضربه‌ای خمشی در وسط تیر، پرداخت. وی ابتدا تیر با مقطع ناودانی را تحت ضربه با سرعت پایین قرار داد و پس از آن با انجام تست خمش سه‌نقطه‌ای به بررسی مقاومت پسماند خمشی تیر آسیب‌دیده پرداخت. وی مدل‌سازی خود را در نرم‌افزار آباکوس انجام داد و رفتار ماده از نظر شروع و رشد آسیب را در زیربرنامه VUMAT تعریف نمود. در انتها برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی به انجام تست‌های آزمایشگاهی پرداخت. وی در کارهای خود تأثیر پارامترهای مختلف از جمله سرعت ضربه و طول تیر را نیز مورد بررسی قرار داد.

۱-۳ ارتباط موضوع تحقیق حاضر با پژوهش‌های پیشین

جایگاه قرارگیری این تحقیق در بین برخی موضوعات مشابه انجام گرفته در پژوهش‌های پیشین، در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱ : جایگاه تحقیق حاضر در بین پژوهش‌های پیشین

محقق	نوع بررسی		مقاومت پسماند			ضربه		ماده اولیه	
	مدلسازی	آزمایش	خمشی	کششی	فشاری	متقاطع	محوری	صفحه	تیر
ماروین ۱۹۷۷		×			×	×		×	
لی ۱۹۸۲	×			×				×	
اشای ۱۹۹۰		×			×	×			×
گیلد ۱۹۹۳	×	×			×	×		×	
چوتارد ۲۰۰۰		×	×			×			×
کوین ۲۰۰۱	×					×		×	
طاهری۲۰۰۴-۲۰۰۲	×	×					×		×
کویی۲۰۰۹	×	×		×		×		×	
سانتیوست ۲۰۱۰		×	×			×			×
کیم ۲۰۱۲	×					×		×	
نیکفروز ۲۰۱۲	×	×	×			×			×
تحقیق حاضر	×	×			×		×		×

با مروری بر تحقیقات با موضوعات مرتبط با موضوع تحقیق حاضر، این نتیجه حاصل شد که تعداد کارهای انجام شده بر روی تیرهای کامپوزیتی، بسیار کمتر از کارهای انجام شده بر روی صفحات کامپوزیتی است. از بین پژوهش‌های انجام شده بر روی تیر کامپوزیتی، کمتر تحقیقی به بررسی استحکام پسماند تیر پس از اعمال بار ضربه‌ای پرداخته است. همچنین از بین تحقیقات انجام گرفته روی تیرهای کامپوزیتی، تنها دو تحقیق مربوط به کار طاهری و ژانگ در سال ۲۰۰۲ [۱۵] و ۲۰۰۴ [۱۶] ضربه محوری را برای کار خود انتخاب کرده‌اند، درحالی‌که آنها به بررسی شروع و رشد آسیب در تیر اکتفا کرده و به محاسبه مقاومت پسماند تیر پس از اعمال ضربه نپرداخته‌اند.

۱-۴ تعریف هدف و اهمیت تحقیق حاضر

هدف از این پژوهش تعیین مقاومت پسماند محوری- کمانشی تیری است که یک ضربه‌ی محوری را تحمل کرده است. بدین منظور تیرهای با مقطع ناودانی[1] و با طول‌های متفاوت، تهیه شده به روش پالتروژن و از جنس شیشه/پلی‌استر را ابتدا تحت ضربه محوری با وزن‌های مختلف قرار داده و سپس مقاومت پسماند محوری-کمانشی این تیرها، پس از اعمال ضربه محاسبه گردد. پس از آن، این مقاومت با مقاومت فشاری تیر سالم مقایسه شده تا تأثیر انرژی ضربه بر کاهش استحکام تیر مشخص شود. مدل‌سازی این مسئله در نرم‌افزار آباکوس و حل‌گر صریح[2] انجام

[1]. U section
[2]. ABAQUS/Explicit