بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی مقاومت خمشی تیرهای کامپوزیتی چندلایه از جنس شیشه – پلی استر در مقابل بارهای ضربه‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک- ساخت و تولید

مهدی نیکفروز

استاد راهنما

دکتر محمدرضا فروزان

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- ساخت و تولید آقای مهدی نیکفروز

تحت عنوان

بررسی مقاومت خمشی تیرهای کامپوزیتی چند لایه از جنس شیشه – پلی استر در مقابل بارهای ضربه ای

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمد رضا فروزان
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر حمیدرضا میردامادی
۳- استاد داور	دکتر مهران مرادی
۴- استاد داور	دکتر مهدی سلمانی تهرانی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم پور

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از جناب آقایان دکتر محمدرضا فروزان و دکتر حمیدرضا میردامادی به سبب راهنمایی اینجانب در مراحل انجام این پایان نامه تشکر و قدردانی می نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی

اصفهان است.

این پایان‌نامه را به پدر و مادر عزیزم که در تمامی لحظات زندگی حامی و پشتیبانم بوده‌اند تقدیم می‌نمایم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	
۱-۱- اهمیت موضوع ضربه بر مواد مرکب	۲
۱-۲- اهمیت خمش پس از ضربه بر مواد مرکب	۳
۱-۳- تیرهای مرکب تولیدی به روش پولتروژن مورد استفاده در پایان نامه	۳
۱-۴- جنبه های نوین تحقیق	۴
۱-۵- مرور تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی شبیه‌سازی آسیب و ضربه بر مواد مرکب	۴
۱-۶- مرور تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی استحکام خمشی پس از ضربه	۸
۱-۷- مباحث مطرح شده در فصل‌های بعدی	۹
فصل دوم: آشنایی با آسیب ضربه‌ای در مواد مرکب	
۲-۱- مواد مرکب	۱۱
۲-۲- پولتروژن	۱۲
۲-۲-۱- رزین	۱۴
۲-۲-۲- الیاف	۱۴
۲-۳- مقایسه‌ی مواد مرکب پایه پلیمری با دیگر مواد رایج در صنعت	۱۴
۲-۴- چیدمان تیر با مقطع کانال	۱۶
۲-۵- ضربات وارد بر سازه‌های مرکب	۱۶
۲-۵-۱- تعریف صورت مسئله	۱۷
۲-۵-۲- تقسیم‌بندی ضربات وارد بر سازه‌های مرکب	۱۸
۲-۵-۳- تشخیص تحلیل مسئله ضربه با سرعت پایین به‌صورت استاتیک یا دینامیک	۱۹
۲-۵-۴- قانون تماس	۲۰
۲-۵-۵- دینامیک ضربه	۲۱
۲-۵-۶- مکانیزم‌های شکست مواد مرکب	۲۲

۲-۵-۷- شکل‌های آسیب ایجاد شده در اثر ضربه با سرعت پایین ۲۲
۲-۵-۸- آسیب در لایه‌های با جهت الیاف تصادفی ۲۶
۲-۵-۹- اثر پارامترهای جرم و هندسه‌ی ضربه‌زن بر آسیب ناشی از ضربه ۲۷
۲-۵-۱۰- استحکام پسماند پس از ضربه ۲۸

فصل سوم: فرمول‌بندی آسیب در مواد مرکب

۳-۱- روش مکانیک شکست ۳۰
۳-۲- روش پلاستیسیته ۳۱
۳-۳- روش معیار شکست ۳۱
۳-۳-۱- معیار هاشین روتم ۳۵
۳-۳-۲- معیار هاشین ۳۵
۳-۳-۳- معیار هو ۳۶
۳-۳-۴- معیار پاک ۳۶
۳-۳-۵- معیار شکست **Larc04** ۳۷
۳-۴- روش مکانیک آسیب ۳۹
۳-۴-۱- رشد آسیب آنی ۳۹
۳-۴-۲- رشد آسیب تدریجی ۴۰
۳-۵- مدل کردن لایه‌لایه شدن ۴۵
۳-۵-۱- ناحیه‌ی چسبندگی ۴۵

فصل چهارم: شبیه‌سازی اجزای محدود

۴-۱- مدل‌سازی تیر مرکب با مقطع کانال ۵۳
۴-۲- نوع المان و فرمول تماس استفاده شده ۵۵
۴-۳- معیارهای آسیب به‌کار رفته در پایان‌نامه ۵۶
۴-۳-۱- ویژگی معیارهای انتخاب شده برای شروع آسیب ۵۷
۴-۴- برنامه نویسی رفتار ماده ۵۸
۴-۵- شبیه‌سازی با استفاده از المان چسب ۶۱
۴-۵-۱- رفتار بار سطحی- جابه‌جایی الاستیک خطی در abaqus ۶۱

۴-۵-۲- تعریف شروع و رشد آسیب برای المان چسب ۶۲

فصل پنجم: آزمایش‌ها

۵-۱- جنس نمونه‌ی آزمایش ۶۴

۵-۲- آزمایش کشش تک‌محوری در راستای طول الیاف ۶۴

۵-۳- آزمایش ضربه با سرعت پایین ۶۶

۵-۴- آزمایش ضربه سقوطی ۶۹

۵-۵- آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای ۷۰

فصل ششم: نتایج و بحث

۶-۱- مقایسه‌ی شکل آسیب در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها با استفاده از ترکیب معیار ماکزیمم کرنش و معیار هو ۷۲

۶-۱-۱- شکست زمینه در محل اتصال جان تیر به بال تیر ۷۲

۶-۱-۲- شکست فشاری الیاف ۷۳

۶-۱-۳- شکست کششی الیاف در لبه تیر ۷۳

۶-۱-۴- شکست زمینه در فشار ۷۴

۶-۲- اعتبارسنجی شبیه سازی ها با نمودار خمش پس از ضربه‌ی حاصل از آزمایش ۷۴

۶-۳- مقایسه دقت معیارهای دیگر برای پیش‌بینی آسیب ضربه‌ای و استحکام پس از ضربه ۷۶

۶-۳-۱- دقت معیار هاشین در تعیین محل شکست الیاف ۷۶

۶-۳-۲- دقت معیار هاشین در تعیین نیروی خمشی تا شکست کامل نمونه ۷۷

۶-۳-۳- دقت معیار پاک در تعیین محل شکست الیاف ۷۸

۶-۳-۴- دقت معیار پاک در تعیین نیروی خمشی تا شکست کامل نمونه ۷۸

۶-۴- تاثیر استفاده از المان چسب بر نتایج شبیه‌سازی‌ها ۸۰

۶-۵- روند مشاهده شده در استحکام خمشی پسماند پس از ضربه حاصل از آزمایش با تغییر ارتفاع ضربه‌زن ۸۲

۶-۶- بررسی تاثیر جرم ضربه زن بر نیروی خمشی پس از ضربه در شبیه‌سازی‌ها برای تیر با طول ۲۵ سانتیمتر ۸۳

۶-۷- بررسی تاثیر جرم ضربه زن بر نیروی خمشی پس از ضربه در شبیه‌سازی‌ها برای تیر با طول ۵۰ سانتیمتر ۸۴

۶-۸- مدول خمشی پس از ضربه ۸۵

فصل هفتم: نتیجه‌گیری

۷-۱- نتایج به دست آمده از پایان نامه ۸۷

۷-۲- پیشنهادات ۸۹
مراجع ۹۰

چکیده

مواد مرکب موادی با استحکام و سختی بالا و چگالی کم هستند که با این ویژگی‌ها جایگزین موادی مانند فولاد و آلومینیوم در صنعت شده‌اند اما این مواد به آسیب ایجاد شده در اثر ضربه حساسند. ضربه‌های با سرعت کم آسیب داخلی در سازه ایجاد می‌کنند که با رشد این آسیب در بارگذاری‌های بعدی استحکام سازه به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. در این پایان‌نامه به بررسی مقاومت ضربه‌ای و استحکام خمشی پس از ضربه تیرهای مرکب چندلایه با مقطع ناودانی و از جنس شیشه پلی‌استر پرداخته شده است. برای این منظور معیارهای آسیب مناسب موجود برای شکست دینامیک مواد مرکب جستجو شدند و از این میان معیارهای هو، هاشین، ماکزیمم کرنش و معیار پاک به زبان فرترن برنامه نویسی و در بسته نرم افزاری آباکوس وارد شدند. شبیه سازی‌های ضربه و خمش پس از ضربه نشان داد که معیار ماکزیمم کرنش برای شکست الیاف و معیار هو برای شکست زمینه بهترین دقت را در پیش بینی محل و زمان رخداد آسیب و استحکام خمشی پس از ضربه دارند. در ادامه آزمایش ضربه با انرژی‌های مختلف با تغییر ارتفاع ضربه‌زن بر تیر کوتاه ۲۵ سانتیمتری و تیر بلند ۵۰ سانتیمتری انجام شد و بر روی هر نمونه ضربه‌خورده آزمایش خمش صورت گرفت. در آزمایش‌های ضربه نوعی شکست زمینه در محل اتصال جان تیر به بال تیر اتفاق می‌افتاد که ناشی از لایه‌لایه شدن و تمرکز کرنش در گوشه تیر بود و استحکام خمشی پس از ضربه تیر را بسیار تحت تاثیر قرار می داد و نیز سبب اختلاف زیاد بین نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌شد برای رفع این مشکل این ناحیه با المان چسب مدل شد. استفاده از المان چسب برای مدل‌سازی این نوع آسیب روش نوینی بود که در ادبیات تحقیق بررسی نشده بود. به عنوان چند نمونه از نتایج به دست آمده در پایان‌نامه می‌توان به این موارد اشاره کرد: معیار پاک در تعیین محل شکست الیاف در کشش و فشار دقت کمی داشت. در شبیه‌سازی‌ها با ثابت نگه‌داشتن ارتفاع سقوط ضربه‌زن سه روند خطی برای تغییر استحکام خمشی و مدول خمشی پس از ضربه بر حسب انرژی ضربه برای تیر ۵۰ سانتیمتری و روند خطی برای تغییر استحکام خمشی پس از ضربه برای تیر ۲۵ سانتیمتری مشاهده شد. علاوه بر این با تغییر ارتفاع سقوط ضربه زن و ثابت نگه داشتن جرم ضربه زن نیز سه روند برای تغییر استحکام خمشی پسماند تیر بر حسب انرژی ضربه مشاهده شد که در ناحیه اول آسیب زمینه و در نتیجه کاهش استحکام اندک بود. در ناحیه دو استحکام خمشی به نصف مقدارآن بدون آسیب ضربه‌ای قبلی می‌رسید و در ناحیه سه روند نمودار تخت بود.

کلمات کلیدی: ماده مرکب، تیر با مقطع ناودانی، ضربه با سرعت پایین، مقاومت خمشی پسماند

فصل اول

مقدمه

۱-۱- اهمیت موضوع ضربه بر مواد مرکب

رشد روز افزون تقاضا برای سازه های سبک تر منجر به تعویض قطعات فلزی با اجزای مرکب شده است با این وجود به دلیل عدم اطمینان از طراحی ایمن، نبود تکنولوژی برای ساخت و قیمت به نسبت زیاد این مواد هنوز استفاده فراگیر از آن‌ها محدود به کاربردهای نظامی است چون برای این کاربردها امکانات لازم برای آزمایش با این مواد موجود می باشد. کاهش قیمت‌ها در دهه گذشته همراه با فهم بیشتر از رفتار ماده سبب کاربرد این مواد در سازه‌ها شده است اما استفاده بیشتر از مواد مرکب در کاربردهای سازه‌ای نیازمند ابزارهای طراحی کارآمدتر و کم هزینه‌تر است و مدل های متشکله واقع گرایانه‌تر برای ابزارهای تحلیل عددی مانند اجزای محدود می‌تواند اطمینان بیشتر برای طراحی سازه‌های بزرگ و پیچیده همراه با کاهش هزینه‌ها و زمان برای اعتبارسنجی با کارهای آزمایشگاهی را به ارمغان آورد.

اما شناخت دقیق رفتار اجزای مرکب تحت ضربه همواره دغدغه بزرگی برای طراحان این اجزا بوده است. این ضربات که به طور منطقی در عمر یک سازه انتظار می روند منجر به آسیب های داخلی در سازه می شوند که کشف آن‌ها اغلب دشوار است. مواد مرکب به ویژه به ضربات با سرعت پایین بسیار حساس هستند زیرا این ضربات می توانند کاهش قابل توجهی در استحکام پس از ضربه این مواد ایجاد کنند. برای اطمینان از این که سازه آسیب دیده در طی عمر کاری به صورت فاجعه باری پس از ضربه فرو نمی‌ریزد لازم است که تحقیقاتی در مورد استحکام پس از ضربه این اجزا انجام شود.

در طول عمر یک سازه ضربات اشیای خارجی در طی ساخت، حین کار و نگهداری می‌تواند اتفاق بیفتد. مثالی از ضربات حین کار آسیب وارده به بدنه هواپیما در حین بلند شدن و نشستن در باند پرواز است چون در این زمان سنگ ها و دیگر اشیای روی زمین با سرعت بالا از چرخ ها دفع شده و به بدنه هواپیما برخورد می‌کنند. در این مورد

سرعت ضربه کم ولی جرم پرتابه زیاد است. سازه‌های چندلایه مرکب نسبت به سازه فلزی مشابه نسبت به آسیب ضربه‌ای حساس‌تر هستند زیرا در سازه‌های مرکب، ضربات آسیب داخلی ایجاد می‌کنند که با چشم قابل دیدن نیست. آسیب داخلی در بارگذاری های بعدی وارد بر سازه رشد می‌کند و کاهش زیادی در استحکام ماده ایجاد می کند. به همین جهت اثر ضربات اشیای خارجی در فرایند طراحی این مواد باید به حساب آورده شود.

مسئله پیچیده تعیین اثرات ناشی از ضربه به دو دسته تقسیم می شود الف - بررسی مقاومت ضربه ای که در ارتباط با پاسخ سازه در برابر ضربه و آسیب ایجاد شده در اثر ضربه است و ب – بررسی استحکام و پایداری سازه در برابر بارهای وارده بر سازه پس از ضربه. استحکام پس از ضربه به استحکام کششی پس از ضربه، استحکام فشاری پس از ضربه و استحکام خمشی پس از ضربه طبقه بندی می شود. در این پایان نامه به بخش خمش پس از ضربه پرداخته می شود که می تواند بحرانی تر از دو حالت دیگر باشد.

۱-۲- اهمیت خمش پس از ضربه بر مواد مرکب

بررسی ویژگی های مکانیکی پس از ضربه توجه بسیاری را به خود جلب کرده است اما بیشتر این توجهات به استحکام فشاری پسماند پس از ضربه معطوف شده است چون ضربه اغلب سبب لایه لایه شدن چند لایه های مرکب می‌شود که در بارگذاری پس از ضربه این فاز شکست سبب کمانش سازه می‌شود. تحقیقات بر ویژگی‌های خمشی پسماند پس از ضربه مانند استحکام و مدول پسماند به خصوص اثر پارامترهای مختلف بر آن‌ها هنوز اندک‌اند. در حالی که مواد مرکب اغلب در کاربردهایی استفاده می شوند که در معرض خمش هستند مانند عرشه کشتی‌ها، محورهای انتقال قدرت و غیره. بعضی سازه‌ها نیز اصولاً برای شرایط ضربه و مقاومت در برابر آن طراحی می شوند مانند سازه های ایمن در برابر آوار زلزله که در زمان زلزله در معرض اصابت آوار قرار می‌گیرند و پس از زلزله این آوار بر روی سازه تجمع کرده و سازه باید بار خمشی ناشی از آن ها را تحمل کند و استحکام خمشی پسماند پس از ضربه کافی را داشته باشد.

۱-۳- تیرهای مرکب تولیدی به روش پولتروژن مورد استفاده در پایان نامه

یکی از اجزای پرکاربرد در سازه ها تیرها هستند. تیرهای مرکب در بسیاری کاربردها نظیر پل‌ها و ساختمان‌ها در ۲۰ سال اخیر استفاده شده‌اند. این تیرها عموماً از الیاف شیشه، کربن و آرامید با درصد حجمی بالاتر از ۳۰ درصد در زمینه اپوکسی، پلی استر، وینل استر و فنولیک ساخته می‌شوند.

یک روش تولید کارآمد برای ساخت تیرهای با سطح مقطع ثابت و با کیفیت بالا پولتروژن نامیده می‌شود که در سال ۱۹۵۰ در آمریکا توسعه پیدا کرد. در آغاز پروفیل های کوچک برای کاربردهای نیمه صنعتی تولید شدند و این روش تا سال ۱۹۶۰ برای ساخت تیرها و ستون ها و پنل ها در کاربردهایی نظیر ساخت پل‌ها و ساختمان‌ها فقط در حد تصور بود. اولین سازه‌های بزرگ ساخته شده از پروفیل های مرکب قاب‌های سه گوشی کنار شیروانی ساختمان‌های

ضد الکترومغناطیس بود. بعدها پروفیل‌های استاندارد برای ساخت ساختمان‌ها توسط شرکت CTI[1] توسعه یافت. توسعه بزرگ بعدی در صنعت ساخت با پروفیل‌های مرکب، صنعت برج‌های خنک کن بود. در زمینه مهندسی پل استفاده از پروفیل‌های مرکب از اواسط سال ۱۹۷۰ افزایش یافت. دو ویژگی وزن کم و عدم خوردگی کاربرد آنها را در ساخت کف پل و اجزای زیر سازه ای گسترش داد [۱].

۱-۴- جنبه های نوین تحقیق

۱- از سال ۱۹۹۸ که آبریت [۲] کتاب معروف خود با عنوان " ضربه بر سازه‌های مرکب" را نوشت و در آن مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه ضربه و استحکام پس از ضربه انجام داد و در آن کتاب بیان کرد که به استحکام خمشی پسماند پس از ضربه توجه کمی شده است تا سال ۲۰۱۰ که سانچز در مقاله خود به بررسی استحکام خمشی پسماند پس از ضربه تیرهای مرکب از جنس شیشه پلی استر پرداخت و تا سال ۲۰۱۲ همه تحقیقات انجام شده در مورد استحکام خمشی پسماند پس از ضربه آزمایشگاهی بوده و مدل اجزای محدودی برای بررسی این موضوع توسعه داده نشده است.

۲- با مطالعه تحقیقات انجام شده در زمینه ضربه و استحکام پس از ضربه سازه‌های مرکب مشخص گردید که این تحقیقات بر روی سازه‌های تخت مانند صفحه و تیر تخت انجام شده‌اند و در موارد انگشت شماری این تحقیقات بر لوله های مرکب و نه تیرهای مقطع دار معطوف گردیده است.

۳- روش پولتروژن روش نوینی برای تولید قطعات مرکب است که تحقیقات بر روی محصولات آن در مقالات ضربه منتشر شده خیلی زیاد به چشم نمی خورد لذا فضای زیادی برای تحقیق و توسعه دارد.

۱-۵- مرور تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه سازی آسیب و ضربه بر مواد مرکب

دونادون [۳] مدل آسیبی سه بعدی برای مدل کردن پیشرفت آسیب در بارگذاری کششی بر چند لایه های مرکب با در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک و رفتار غیر خطی در برش ارائه کرد. پینهو [۴] معیارهای آسیب ارائه شده بر پایه فیزیک ماده[2] را در بارگذاری‌های استاندارد کشش و فشار و برش بررسی کرد. ایکاردی و همکارانش [۵] دقت معیارهای مختلف را در پیش بینی آسیب چند لایه های مرکب در بارگذاری‌های مختلف بررسی کردند. رامی و کلیک [۶] با استفاده از روش میکرو مکانیک آسیب پیش رونده در بارگذاری کششی بر صفحات مرکب تولید شده به روش پولتروژن را بررسی کردند. اوسیل و همکارانش [۷] مدل آسیب پیشرونده‌ای را با استفاده از المان‌های با تئوری تغییر شکل‌های بزرگ برای پیش بینی آسیب ناشی از بارگذاری کششی در محل اتصال صفحات مرکب با پین های فلزی به کار گرفتند. کامانهو و همکارانش [۸] مدل آسیبی سه بعدی برای پیش بینی شروع و رشد آسیب در

[1] Composites Technology, Inc
[2] phenomenological

محل اتصالات صفحات مرکب ارائه کردند. بن‌صلاح و همکارانش [۹] شکست و کاهش سختی ماده مرکب گرافیت اپوکسی را در خمش سه نقطه‌ای شبیه‌سازی کردند و دقت معیارهای آسیب مختلف را در این زمینه بررسی کردند. لاپزیک و همکارانش [۱۰] رشد آسیب را در تک لایه های مرکب با بهره‌گیری از معیار رشد آسیب کامانهو مدل کردند و این مدل را در نرم افزار اجزای محدود آباکوس وارد کردند. لیو و همکارانش [۱۱] رشد آسیب را در مخازن مرکب از جنس آلومینیوم- کربن – اپوکسی با استفاده از روش مکانیک آسیب شبیه سازی کردند. گارنیچ و همکارانش [۱۲] مدل های رشد آسیب ارائه شده تا سال ۲۰۰۹ را جمع آوری و مقایسه کردند. زنگ و یانگ [۱۳] پیشرفت های جدید تا سال ۲۰۰۹ در زمینه شبیه سازی اجزای محدود چند لایه های مرکب را مرور کردند. کوئینگ و میشناوسکی [۱۴] مدل رشد آسیب سه بعدی بر پایه معیار لیمتر برای تک لایه های مرکب ارائه کردند. ویگاند و همکارانش [۱۵] الگوریتمی برای محاسبه زاویه شکست برای معیار پاک در سه بعد ارائه کردند. کیلیک و حاج علی [۱۶] در کاری آزمایشگاهی به بررسی رفتار غیر خطی چند لایه های تولید شده به روش پولتروژن در کشش ناهمسو با جهت الیاف پرداختند. بازانت و اوه [۱۷] تئوری شکستی برای مواد ناهمگن که رفتار نرم شوندگی با رشد ترک پیدا می کنند ارائه کرند. پاک و شارمن [۱۸] مدل شروع آسیبی بر پایه آسیب ایجاد شده در فاز زمینه و الیاف ارائه کردند. لرکا و همکارانش [۱۹] رفتار چند لایه‌های از جنس کربن اپوکسی را در بارگذاری فشاری و برشی صفحه‌ای بررسی کردند. آنها فاز الیاف و زمینه و فصل مشترک بینشان را جداگانه مدل کردند و آسیب را برای هر فاز در نظر گرفتند و نتایج را با مدلی همگن شامل معیار آسیب هاشین مقایسه کردند. پینهو و همکارانش [۲۰] مدل آسیبی در سه بعد شامل رفتار غیرخطی زمینه در بارگذاری برشی ارائه دادند. سوزا و همکارانش [۲۱] مدل آسیبی سه بعدی بر پایه مکانیک آسیب محیط‌های پیوسته ارائه کردند. کاریا و همکارانش [۲۲] به بررسی رفتار تیرهای مرکب پولترود شده تحت بارگذاری ترکیبی خمشی پیچشی پرداختند و رابطه‌ای برای بار بحرانی در کمانش این تیرها به دست آوردند.

جانسون و لوکا [۲۳] دقت معیارهای آسیب مختلف را در مدل کردن آسیب ایجاد شده در اثر ضربه با سرعت پایین در مقیاس کوچک و بزرگ بررسی کردند. دونادون و یانوچی [۲۴] مدل آسیب پیش رونده‌ای را برای مدل کردن آسیب ایجاد شده در ضربه با سرعت پایین در چند لایه‌های مرکب ارائه کردند. یانوچی و ویلوز [۲۵و۲۶] مدل آسیبی بر پایه انرژی برای رشد آسیب مواد مرکب با الیاف بافته در ضربه توسعه دادند. خلیلی و همکارانش [۲۷] اثر نوع و اندازه المان را در مدل کردن ضربه بر صفحات مرکب تخت و استوانه ای بررسی کردند. سادرلند و همکارانش [۲۸] اثر شکل الیاف، نوع رزین و ضخامت چندلایه را در شکل‌های مختلف آسیب و جذب انرژی چند لایه های از جنس شیشه – پلی استر تحت بارگذاری ضربه ای تعیین کردند. منا و همکارانش [۲۹] پدیده ضربه بر چند لایه های با الیاف بافته را با مدل‌های آسیب موجود در نرم افزار Ls Dyna شبیه سازی کردند و نتایج آن را با نتایج حاصل از

آزمایش ضربه اعتبارسنجی کردند. کلکار و همکارانش [۳۰] اثر ضربه بر چندلایه های با الیاف بافته و تولید شده به روش H-VARTM را در نرم افزار Ls Dyna بررسی کردند. آن‌ها از مدل های میکرومکانیک برای محاسبه خواص ماده استفاده کردند و نتایج قابل قبولی با مقایسه نیروی ضربه و انرژی جذب شده در شبیه سازی‌ها و آزمایش‌ها به دست آوردند.

برگ و همکارانش [۳۱] اثر ضربه با سرعت پایین را بر چند لایه های مرکب با استفاده از المان چسب برای مدل کردن پدیده لایه لایه شدن بین لایه‌های با جهت الیاف مختلف بررسی کردند. آیمریچ و همکارانش [۳۲] پدیده لایه لایه شدن را در چند لایه های با چیدمان الیاف ۰ و ۹۰ درجه با استفاده از المان چسب و مدل‌های آسیب مربوط به آن در بارگذاری ضربه‌ای بررسی کردند. هو و همکارانش [۳۳] از مدل آسیب هو برای پیش‌بینی مدهای شکست ایجاد شده در هر لایه و مدل آسیبی که خود توسعه دادند برای شبیه‌سازی پدیده لایه لایه شدن در بارگذاری ضربه‌ای بر صفحات مرکب استفاده کردند. بووت و همکارانش [۳۴] پدیده لایه لایه شدن را در چند لایه‌های مرکب با استفاده از المان چسب و معیار آسیب مناسب مدل کردند و نتایج قابل قبولی در مقایسه با آزمایش های ضربه به دست آوردند. بووت و همکارانش [۳۵] آسیب ضربه‌ای و فرورفتگی دائمی ایجاد شده در اثر ضربه و همچنین لایه لایه شدن را به نحو مناسبی شبیه‌سازی کردند و نتایجی سازگار با آزمایش‌های ضربه به دست آوردند. هو و همکارانش [۳۶] مدل آسیب جدیدی برای رشد لایه لایه شدن در بارگذاری عمودی خارج صفحه‌ای بر صفحات مرکب ارائه کرد.

کارئنفان و همکارانش [۳۷] پارگی پیشرونده را در لوله‌های تولید شده به روش پولتروژن به روش مکانیک شکست مدل کردند و مکانیزم جذب انرژی در این لوله‌ها را در نرم افزار اجزای محدود Ls Dyna بررسی کردند. سانتیوسته و همکارانش [۳۸] مقایسه‌ای بین دو معیار شروع آسیب هو و هاشین در پیش‌بینی شکست چندلایه‌های مرکب در بارگذاری خمشی دینامیک انجام دادند. سوی و همکارانش [۳۹] روشی مجتمع برای پیش بینی آسیب و استحکام کششی پسماند پس از ضربه چندلایه‌های مرکب تحت ضربه با سرعت پایین ارائه کردند. وانگ و همکارانش [۴۰] در کاری مشابه با مقاله قبلی استحکام کششی پسماند پس از ضربه چندلایه‌های مرکب از جنس کربن اپوکسی را با استفاده از معیار آسیب هو در نرم افزار آباکوس به دست آوردند. باربرو و همکارانش [۴۱] تحلیلی بر خمش دینامیک تیرهای مرکب در دمای پایین انجام دادند. لیو و زنگ [۴۲] جدیدترین روش‌ها برای مدل کردن شروع و پیشرفت آسیب از جمله روش‌های چند مقیاسی را در مقاله خود مرور کردند.

نیلسون [۴۳] استحکام پسماند فشاری پس از ضربه صفحات مرکب چند لایه را بررسی کرد. کارگر و همکارانش [۴۴] کارایی دو نرم افزار IDAT و CODAC را در شبیه‌سازی آسیب ناشی از ضربه مقایسه کردند. لس و همکارانش

[۴۵] دقت دو معیار آسیب larc04 و پاک را در پیش‌بینی شروع و رشد آسیب در بارگذاری کششی و ضربه بر چند لایه‌های مرکب بررسی کردند.

آکین و سنل [۴۶] در کاری آزمایشگاهی به بررسی رفتار چندلایه‌های مرکب از جنس شیشه - اپوکسی تحت ضربه با سرعت پایین پرداختند و اثر انرژی ضربه و شرایط تکیه گاهی را بر آسیب ناشی از ضربه بررسی کردند. داوالوس و همکارانش [۴۷] روشی برای محاسبه درصد حجمی الیاف لایه‌های مختلف چندلایه‌های تولید شده به روش پولتروژن ارائه کردند و پاسخ تیرهای با مقطع قوطی را در خمش سه نقطه ای به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم افزار انسیس بررسی کردند.

یانوچی و دونادون [۴۸] برخورد پرنده با صفحات مرکب را با مدل رشد آسیبی که خود توسعه داده بودند مدل کردند. میناک و همکارانش [۴۹] به بررسی رفتار لوله‌های مرکب از جنس کربن - اپوکسی پرداختند و اثر وجود و عدم وجود پیش‌بار پیچشی را بر مقاومت در برابر آسیب ناشی از ضربه با سرعت پایین این لوله ها بررسی کردند. هو و زانگ [۵۰] مدل آسیبی برای رشد آسیب چندلایه‌های مرکب با الیاف بافته تحت بارگذاری ضربه‌ای ارائه دادند.

لاپرستو و همکارانش [۵۱] به بررسی فرورفتگی دائم در صفحات مرکب از جنس شیشه - اپوکسی تحت ضربه با سرعت پایین پرداختند و توانستند رابطه آن را با انرژی شکست مشخص کنند.

میناک و همکارانش [۵۲] به بررسی آسیب ایجاد شده در اثر ضربه در چندلایه‌های شبه ایزوتروپ از جنس کربن - اپوکسی پرداختند و ارتباط استحکام کششی پسماند این صفحات را با پارامترهای بازتابش نور از آن‌ها بررسی کردند.

رچاک و همکارانش [۵۳] از تئوری صفحه میندلین و المان های نه گرهی برای شبیه‌سازی ضربه بر صفحات مرکب استفاده کرند و به بررسی نیروی ضربه و آسیب ایجاد شده در اثر ضربه با معیار چوی و چانگ پرداختند.

اربیل و همکارانش [۵۴] اثر لایه‌های با زاویه $\theta\pm$ و همچنین اثر ضخامت چندلایه را بر آسیب ایجاد شده در اثر ضربه در چندلایه‌های با چیدمان [$۰/\pm\theta/۹۰$] تعیین کردند.

لیا و همکارانش [۵۵] به بررسی پاسخ چندلایه‌های با الیاف بافته از جنس شیشه – گرافیت - اپوکسی پرداختند و در کاری عددی و تجربی آسیب ایجاد شده در این چندلایه‌ها را تحت ضربه با انرژی‌های مختلف مقایسه کردند.

بینیندا و زنگ [۵۶] اثر فرورفتگی دائم ایجاد شده در اثر ضربه بر سرعتی که در آن لایه لایه شدن صفحه مرکب اتفاق می افتد را تعیین کردند.

ماتیوانان و جرالد [۵۷] آسیب ایجاد شده در اثر ضربه با سرعت پایین را بر چندلایه‌های از جنس کربن اپوکسی با الیاف بافته در سرعت‌های ضربه مختلف بررسی کردند. ریلو و فررا [۵۸] در کاری آزمایشگاهی به مطالعه آسیب ایجاد شده در اثر ضربه با سرعت پایین بر چندلایه‌های از جنس شیشه - اپوکسی پرداختند و نتایج را با همان بارگذاری به صورت شبه استاتیک مقایسه کردند.

چونگ و همکارانش [۵۹] رفتار چندلایه‌های مرکب از جنس شیشه پلی‌استر را در مقابل ضربه به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. سانتیوسته و همکارانش [۶۰] انرژی بحرانی شروع آسیب در اثر ضربه با سرعت پایین را برای لوله‌های جدار نازک مرکب به دست آوردند. چان و همکارانش [۶۱] از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر و قانون هرتز اصلاح شده در تماس، برای مطالعه پاسخ دینامیک صفحات تاشده مرکب در مقابل ضربه با سرعت پایین استفاده کردند. باربرو و سونتی [۶۲] آزمایش‌های کشش، خمش و برش را روی نمونه‌های تهیه شده از پروفیل‌های پولترود شده مرکب انجام دادند و از مدل‌های میکرومکانیک و ماکرومکانیک برای محاسبه دیگر ویژگی‌های این پروفیل استفاده کردند همچنین داده‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای را با نتایج حاصل از مکانیک تیرهای چندلایه مقایسه کردند. حاج علی و کیلیک [۶۳ و۶۴] مدل متشکله غیرخطی برای مواد مرکب پولترود شده پلیمری ارائه کردند.

بامفورد و همکارانش [۶۵] به صورت تحلیلی و عددی رشد آسیب را در مواد مرکب با الیاف بافته از جنس شیشه اپوکسی بررسی کردند و مدل متشکله غیرخطی با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش برای بارگذاری ضربه‌ای توسعه دادند. زنگ و ریچاردسون [۶۶] از روش‌های غیر مخرب برای بررسی آسیب داخلی ایجاد شده در اثر ضربه با سرعت پایین استفاده کردند.

۱-۶- مرور تحقیقات انجام شده در زمینه استحکام خمشی پس از ضربه

روتم [۶۷] در سال ۱۹۸۸ اثر آسیب خمشی را بر صلبیت خمشی و استحکام خمشی تیرهای چندلایه بررسی کرد. چند لایه‌های از جنس گرافیت اپوکسی با ساختار $[۰/۹۰]_{۲s}$ و شیشه اپوکسی با ساختار $[-۴۵/۴۵]_{۲s}$ آزمایش شدند. اندازه نمونه‌ها ۱۹ mm×۶۰ با ضخامت حدود ۱mm برای گرافیت اپوکسی و ۲ mm برای شیشه اپوکسی بود. نمونه‌های نرم تر کاهش بیشتری را هم در سختی و هم در استحکام نشان دادند در حالی که در نمونه‌های تردتر هیچ کاهشی تا شکست کامل مشاهده نشد. حفظ صلبیت خمشی و استحکام خمشی صفحات گرافیت اپوکسی، شیشه اپوکسی و کولار اپوکسی پس از ضربه به وسیله ملورن و همکارانش [۶۸] در سال ۱۹۸۹مطالعه شد. از سه چند لایه متعامد متقارن هر کدام با ۳۰ لایه استفاده شد. اولین چند لایه با چیدمان $[۰_۵/۹۰_۵/۰_۵]$ دارای دو فصل مشترک، چند لایه ۵ لایه‌ای $[۰_۳/۹۰_۳/۰_۳/۹۰_۳/۰_۳]$ دارای چهار فصل مشترک و چندلایه ۱۵ لایه‌ای $[۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰]$ دارای ۱۴ فصل مشترک بودند. هر دو چند لایه گرافیت اپوکسی و کولار اپوکسی با این چیدمان آزمایش شدند. ناحیه لایه لایه شده تصویر شده به طور خطی با انرژی جنبشی اولیه ضربه‌زن افزایش می یافت و مساحت این ناحیه برای چند لایه‌های با تعداد فصل مشترک بیشتر، کمتر بود و همچنین پراکندگی بیشتری در نتایج چند لایه های از جنس گرافیت اپوکسی نسبت به چند لایه های از جنس شیشه اپوکسی مشاهده شد. فاکتور حفظ استحکام در سه چندلایه از جنس کولار اپوکسی هنگامی که بر حسب ناحیه لایه لایه شده

تصویر شده رسم می شد بر یک منحنی قرار می گرفت که این نشان می داد که کاهش استحکام به طور مستقیم با اندازه آسیب اندازه گیری شده با C scan رابطه دارد. کیم و همکارانش [۶۹] در سال ۱۹۹۱ اثر چقرمگی زمینه اپوکسی را بر استحکام خمشی پسماند پس از ضربه چندلایه های از جنس کربن- اپوکسی بررسی کردند و از رابطه ای که کاپرینو در سال ۱۹۸۳ برای به دست آوردن استحکام کششی مواد مرکب پس از ضربه ارائه کرده بود و داده های تجربی استفاده کردند و ضرایب این رابطه را به دست آوردند. آمارو و همکارانش [۷۰] در سال ۲۰۰۶ اثر ضربه با انرژی پایین را بر استحکام خمشی پسماند دو چند لایه با چیدمان متعامد یکی متقارن و دیگری غیر متقارن بررسی کردند که نمونه متقارن به دلیل صلبیت خمشی بالاتر، استحکام خمشی پسماند پس از ضربه بیشتری داشت. زانگ و همکارانش [۷۱] اثر ضربه با سرعت پایین را بر استحکام خمشی و مدول پسماند پس از ضربه ماده مرکب از جنس شیشه- پلی استر تولید شده به روش پولتروژن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استحکام پسماند بیشتر از مدول یانگ تحت تاثیر ضربه کاهش نشان می‌دهد.

چنگنگ و همکارانش [۷۲] شکل‌های آسیب ایجاد شده در اثر ضربه را در سه چندلایه تک جهته با ۱۶ لایه و از جنس‌های مختلف شیشه-اپوکسی، بازالت اپوکسی و تاوارون۱۰۰۰- اپوکسی با آزمایش به دست آوردند و استحکام خمشی پسماند آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. در نمودارهای استحکام خمشی پسماند و مدول بر حسب انرژی ضربه دو روند خطی مشاهده می‌شد که او معادلات آنها را به دست آورد. سانتیوسته و همکارانش [۷۳] در سال ۲۰۱۰ اثر عرض نمونه و شکل بینی ضربه‌زن را بر استحکام خمشی پسماند تیرهای از جنس شیشه- پلی استر با الیاف بافته مسطح بررسی کردند و نمودار استحکام خمشی پسماند را بر حسب انرژی ضربه به دست آوردند طبق این نمودار هر دو پارامتر عرض نمونه و شکل ضربه زن بر استحکام خمشی پسماند تاثیر گذار بودند ولی وقتی همین نمودار را بر حسب انرژی جذب شده رسم می کردند همه نمودارها بر هم منطبق می شدند و تاثیری مشاهده نمی شد.

۱-۷- مباحث مطرح شده در فصل های بعدی

فصل دوم: در این فصل به بیان تعریف مواد مرکب، اجزای سازنده و روش های ساخت آن‌ها پرداخته می‌شود همچنین به بیان موضوع ضربه بر این مواد و اهمیت آن، دینامیک ضربه و آسیب ایجاد شده در اثر ضربه پرداخته می شود.

فصل سوم: در این فصل روش‌های مختلف برای شبیه‌سازی آسیب ضربه‌ای بررسی می‌شود و مفاهیم هر یک از روش ها بیان می شود و به شرح بیشتر روش مورد استفاده در این پایان نامه پرداخته می‌شود.

فصل چهارم: در این فصل به بیان برنامه‌های نوشته شده و روش شبیه سازی ضربه و خمش پس از ضربه بر تیر با مقطع کانال پرداخته می‌شود.