

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه طراحی کاربردی
پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل تجربی قابلیت جذب انرژی پوستهای استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده
به دو روش قالب‌گیری کیسه‌ای و فرایند تزریق رزین به کمک خلأ

سیدمرتضی حسینی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپک‌چی

استاد مشاور:

دکتر محمدباقر نظری

تیر ۱۳۹۴



دانشکده: مهندسی مکانیک
گروه: طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سیدمرتضی حسینی
تحت عنوان:

تحلیل تجربی قابلیت جذب انرژی پوستهای استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده به دو روش
قالب‌گیری کیسه‌ای و فرایند تزریق رزین به کمک خلأ

در تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه خوب
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر محمدباقر نظری		نام و نام خانوادگی: دکتر محمود شریعتی
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: دکتر حمیدرضا ایپک‌چی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر رضا طاهریان		نام و نام خانوادگی: دکتر سیدهادی قادری
			نام و نام خانوادگی: دکتر مجتبی قطعی
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم به:

روح پاک پدرم

که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

و به مادرم،

دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

و به همسرم،

اسطوره زندگیم، پناه خستگی و امید بودنم به پاس مهربانی‌ها، تحمل رنج‌ها،

همراهی بی دریغ و صبوری‌های بی حساب

و دو پسر فرزند و فرزند

تقدیر و تشکر

ضمن سپاس و ستایش به درگاه ایزد منان که به من توانایی داد که با استعانت از او بتوانم این پژوهش را انجام دهم، بر خود لازم می‌بینم از دلگرمی و تشویق اساتید و دوستان که در انجام این پژوهش مرا یاری نمودند، قدردانی نمایم:

آقایان دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپک‌چی، اساتید راهنمای بزرگوار، که در طول این پژوهش با راهنمایی‌های عالمانه و بجایشان، سکاندار شایسته‌ای در هدایت این پایان‌نامه بوده‌اند.

جناب آقای دکتر محمدباقر نظری، استاد مشاور عزیز، که با سعه صدر مشاوره این تحقیق را پذیرفتند و در طول این پژوهش همواره از نظرات کارشناسانه ایشان، بهره جستیم.

همچنین از جناب آقای دکتر احد ضابط، ریاست محترم پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد، که در طی اجرای این تحقیق، همکاری صمیمانه‌ای با اینجانب داشتند و بدون حمایت بی‌دریغ ایشان این پژوهش امکان پذیر نبود، بی‌نهایت سپاسگزارم.

و در خاتمه از جناب آقای دکتر بهنام معتکف ایمانی، مدیریت فنی پروژه توربین بادی پژوهشکده هواخورشید و دیگر دوستانی که مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند به ویژه پرسنل عزیز کارگاه‌های فلزی و غیرفلزی پژوهشکده هواخورشید، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

سید مرتضی حسینی
morteza.hoseiny@gmail.com

تیر ۱۳۹۴

تعهدنامه

اینجانب سید مرتضی حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه تحلیل تجربی قابلیت جذب انرژی پوستهای استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده به دو روش قالب‌گیری کیسه‌ای و فرایند تزریق رزین به کمک خلأ تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپک‌چی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «University of Shahrood» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه از روش تجربی استفاده شده است تا قابلیت جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی، مورد بررسی قرار گیرد. برای ساخت پوسته‌های استوانه‌ای از دو روش رایج موسوم به قالب‌گیری کیسه‌ای و فرایند تزریق رزین به کمک خلأ، استفاده شده است. در این پایان‌نامه شش پارامتر جهت بررسی اثر آنها بر روی جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: سه پارامتر هندسی قطر داخلی، طول و ضخامت پوسته‌ها و سه پارامتر چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده (الیاف شیشه و کربن) و فرایند ساخت. طراحی آزمایش به روش تاگوچی و با آرایه متعامد L₁₆ انجام شد و تعداد شانزده آزمون تعیین گردید. آزمایش‌های لهیدگی محوری روی پوسته‌ها انجام شد. با استفاده از مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمده از آزمون‌ها، مقدار جذب انرژی مخصوص آنها محاسبه شد؛ و سپس بر روی این داده‌ها تحلیل آماری انجام گردید که حاصل آن رتبه‌بندی پارامترهای شش‌گانه فوق و پیشنهاد یک سازه بهینه بر اساس پارامترهای انتخابی بود. در پایان انواع مودهای مکانیسم‌های فروریزی پیچیده‌ای که میزان جذب انرژی را کنترل می‌کنند، مطالعه شد و اثر پارامترهای شش‌گانه بر مودهای لهیدگی پایدار و ناپایدار در پوسته‌ها، بررسی گردید؛ که مقایسه تحلیل آماری و تحلیل مکانیسم‌های فروریزی، نشان داد که تطابق خوبی بین آنها وجود دارد و تحلیل‌های آماری بخصوص در کارهای تجربی بر اساس پارامتر جذب انرژی مخصوص، بهترین روش برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی است.

واژه‌های کلیدی

جذب انرژی مخصوص، پوسته استوانه‌ای، سازه‌های کامپوزیتی، تحلیل آماری تاگوچی، لهیدگی محوری، مکانیسم‌های فروریزی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

Hosseini S. M., Shariati M., (2015) “Taguchi statistical analysis of experimental tests designed to absorb the energy of the composite shells”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 345-352, (In Persian).

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل اول: مقدمه و مروری بر پژوهش‌های گذشته
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تعریف مواد کامپوزیت
۴	۳-۱- مواد کامپوزیت تقویت شده با الیاف
۵	۴-۱- الیاف یا تقویت کننده
۶	۱-۴-۱- الیاف یا تقویت کننده شیشه
۶	۲-۴-۱- الیاف یا تقویت کننده کربن
۸	۵-۱- پوشش‌دهی الیاف
۹	۶-۱- انواع و ساختار پارچه
۹	۱-۶-۱- پارچه‌های تک‌جهته
۱۰	۲-۶-۱- پارچه‌های (۰/۹۰) درجه
۱۰	۳-۶-۱- پارچه‌های چندمحوره
۱۱	۴-۶-۱- الیاف تقویت کننده از نظر بافت
۱۲	۵-۶-۱- بافتن و کوک‌زدن پارچه‌های چندمحوره
۱۲	۷-۱- زمینه مواد کامپوزیت
۱۳	۸-۱- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMC)
۱۴	۱-۸-۱- چسبندگی بین زمینه (رزین) و الیاف تقویت کننده
۱۴	۲-۸-۱- چقرمگی زمینه (رزین)
۱۵	۳-۸-۱- چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای
۱۵	۹-۱- دمای شیشه‌ای شدن رزین (T _g)
۱۶	۱۰-۱- مقایسه خواص مکانیکی زمینه‌های گرماسخت رایج و کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی
۱۷	۱۱-۱- معرفی روش انجام آزمون‌های خواص مکانیکی
۲۰	۱-۱۱-۱- پارامترهای اساسی جهت تحلیل یک چندلایه کامپوزیتی

- ۲۱-۱۱-۲- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌های آزمون خواص مکانیکی از چندلایه کامپوزیتی ۲۱
- ۲۱-۱۱-۲-۱- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف تک‌جهته ۲۱
- ۲۲-۱۱-۲- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجته (۰/۹۰) متقارن ۲۲
- ۲۳-۱۱-۲- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجته (۰/۹۰) نامتقارن ۲۳
- ۲۳-۱۰-۲-۴- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجته (۴۵/-/۴۵) ۲۳
- ۲۴-۱۱-۲-۵- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف سه‌جهته (۴۵/۰/۴۵) ۲۴
- ۲۴-۱۲- روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها ۲۴
- ۲۵-۱۲-۱- روش قالب‌گیری کیسه‌ای ۲۵
- ۲۶-۱۲-۲- تجهیزات روش قالب‌گیری کیسه‌ای ۲۶
- ۲۶-۱۲-۲-۱- جداکننده ۲۶
- ۲۶-۱۲-۲-۲- لایه پارچه‌ای غیرچسبیده ۲۶
- ۲۷-۱۲-۲-۳- فیلم جداکننده منفذدار (سوراخ‌دار) ۲۷
- ۲۷-۱۲-۲-۴- پارچه جاذب یا هواگیر ۲۷
- ۲۷-۱۲-۲-۵- لایه کیسه خلأ ۲۷
- ۲۷-۱۲-۲-۶- نوار آب‌بند کننده ۲۷
- ۲۷-۱۲-۲-۷- پمپ خلأ ۲۷
- ۲۸-۱۲-۳- روش تزریق رزین به کمک خلأ (VIP) ۲۸
- ۲۸-۱۲-۴- تجهیزات فرایند تزریق رزین به کمک خلأ ۲۸
- ۲۹-۱۲-۴-۱- شبکه جریان رزین ۲۹
- ۲۹-۱۲-۴-۲- لوله‌ها، اتصالات و دریچه‌های تزریق ۲۹
- ۲۹-۱۲-۴-۳- تله رزین ۲۹
- ۲۹-۱۲-۵- مزایا و معایب روش‌های قالب‌گیری کیسه‌ای و تزریق رزین به کمک خلأ ۲۹
- ۳۱-۱۳- تعریف، ضرورت و کاربرد پوسته‌ها ۳۱
- ۳۲-۱۴- بررسی روش‌های مختلف حل مسئله ۳۲
- ۳۳-۱۵- معرفی تحلیل آماری تاگوچی ۳۳
- ۳۶-۱۶- جذب انرژی ۳۶

- ۱۷-۱- مودهای فروریزی له شدن کامپوزیت‌ها ۴۱
- ۱-۱۷-۱- مودهای له شدن ناپایدار (فاجعه‌انگیز) ۴۱
- ۲-۱۷-۱- مودهای له شدن پایدار (پیش‌رونده) ۴۳
- ۳-۱۷-۱- انواع مودهای فروریزی پایدار (پیش‌رونده) ۴۳
- ۱-۳-۱۷-۱- مود بازشدن الیاف ۴۵
- ۲-۳-۱۷-۱- مود تکه‌تکه شدن ۴۸
- ۳-۳-۱۷-۱- مود شکست‌ترد ۴۹
- ۴-۳-۱۷-۱- مود چین خوردگی (تاشوندگی) ۴۹
- ۱۸-۱- معرفی کمیت‌های محاسبه جذب انرژی ۵۱
- ۱-۱۸-۱- معرفی کمیت جذب انرژی مخصوص (SEA) ۵۳
- ۲-۱۸-۱- معرفی کمیت تنش له‌شدگی مخصوص (SSCS) ۵۳
- ۳-۱۸-۱- مزایا و معایب کمیت‌های محاسبه جذب انرژی ۵۴
- ۴-۱۸-۱- سایر کمیت‌های مهم در جذب انرژی ۵۶
- ۱۹-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته ۵۸
- ۱-۱۹-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته پیرامون روش تزریق رزین به کمک خلأ ۵۸
- ۲-۱۹-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته پیرامون جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی ۵۹
- ۱-۲-۱۹-۱- اثر نوع الیاف تقویت‌کننده ۵۹
- ۲-۲-۱۹-۱- اثر نوع زمینه ۶۲
- ۳-۲-۱۹-۱- اثر لایه‌چینی ۶۳
- ۴-۲-۱۹-۱- اثر هندسه نمونه‌ها ۶۶
- ۵-۲-۱۹-۱- اثر شرایط تولید نمونه‌ها ۷۰
- ۶-۲-۱۹-۱- اثر کسر حجمی الیاف ۷۱
- ۷-۲-۱۹-۱- اثر نرخ بارگذاری نمونه‌ها ۷۲
- ۸-۲-۱۹-۱- پژوهش‌های اخیر در مورد جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی ۷۴
- ۹-۲-۱۹-۱- نتیجه‌گیری در مورد پژوهش‌های گذشته جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی ۷۸
- ۲۰-۱- کاربرد جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی در صنعت خودرو ۸۰

۸۲.....	۲۱-۱- تعریف مسئله و ضرورت انجام تحقیق
۸۵.....	فصل دوم: مواد و روش‌ها.....
۸۶.....	۱-۲- مواد مورد استفاده در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
۸۶.....	۱-۲-۱- الیاف تقویت‌کننده
۸۸.....	۲-۱-۲- رزین مصرفی
۹۱.....	۲-۱-۳- خواص الاستیک و شکست مواد پوسته‌های کامپوزیتی
۹۲.....	۲-۲- تجهیزات مورد استفاده در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
۹۲.....	۱-۲-۲- پمپ خلأ
۹۳.....	۲-۲-۲- لایه کیسه خلأ
۹۴.....	۲-۲-۳- فیلم سوراخ‌دار
۹۴.....	۲-۲-۴- شبکه جریان رزین
۹۵.....	۲-۲-۵- لایه پارچه‌ای غیرچسبنده
۹۵.....	۲-۲-۶- نوار آب‌بند کننده
۹۶.....	۲-۳- روش طراحی آزمایش
۹۸.....	۲-۴- روش نام‌گذاری پوسته‌ها
۱۰۰.....	۲-۵- روش‌های ساخت پوسته‌ها
۱۰۰.....	۲-۵-۱- مراحل ساخت پوسته‌های کامپوزیتی به روش قالب‌گیری کیسه‌ای
۱۰۲.....	۲-۵-۲- مراحل ساخت پوسته‌های کامپوزیتی به روش تزریق رزین به کمک خلأ
۱۰۴.....	۲-۵-۳- مشخصات هندسی پوسته‌های تولیدشده
۱۰۷.....	۲-۶- روش آزمایش‌های تجربی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
۱۰۷.....	۲-۶-۱- آزمایش‌های لهیدگی محوری
۱۰۸.....	۲-۶-۲- معرفی ماشین آزمایش
۱۰۹.....	۲-۶-۳- عوامل مؤثر در آزمایش‌های لهیدگی محوری
۱۰۹.....	۲-۶-۳-۱- تکرارپذیری آزمون لهیدگی محوری
۱۱۰.....	۲-۶-۳-۲- نرخ بارگذاری آزمون لهیدگی محوری

۱۱۰	..... روش محاسبه جذب انرژی
۱۱۱	..... فصل سوم: نتایج و بحث
۱۱۲	..... ۱-۳- نتایج آزمایش لهیدگی محوری پوسته‌ها
۱۱۳	..... ۲-۳- تحلیل تاگ‌وچی
۱۱۹	..... ۳-۳- تحلیل مکانیسم‌های جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
۱۱۹	..... ۱-۳-۳- دسته‌بندی آزمایش‌های تجربی از نظر مود فروریزی
۱۲۰	..... ۱-۱-۳-۳- آزمایش‌های لهیدگی محوری با مود فروریزی ناپایدار
۱۲۳	..... ۲-۱-۳-۳- آزمایش‌های لهیدگی محوری با مود فروریزی پایدار
۱۲۸	..... ۲-۳-۳- مدهای فروریزی و جذب انرژی مخصوص
۱۳۰	..... ۳-۳-۳- لایه‌چینی و مدهای فروریزی
۱۳۱	..... ۴-۳-۳- فرایند تولید و مدهای فروریزی
۱۳۳	..... ۵-۳-۳- نوع الیاف تقویت‌کننده و مدهای فروریزی
۱۳۳	..... ۶-۳-۳- هندسه پوسته‌ها و مدهای فروریزی
۱۳۶	..... ۱-۴- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها
۱۳۶	..... ۲-۴- نتایج
۱۳۹	..... ۳-۴- پیشنهادها
۱۴۱	..... مراجع
۱۵۰	..... پیوست الف

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱): مقایسه بین مواد مهندسی یکپارچه رایج و کامپوزیت‌ها [۱].....	۳
شکل (۲-۱): طبقه‌بندی مواد کامپوزیت [۵].....	۴
شکل (۳-۱): نمونه‌هایی از مواد کامپوزیت، الف) ذره‌ای، اتفاقی ب) رشته‌های ناپیوسته پ) رشته‌های ناپیوسته، اتفاقی ت) رشته‌های پیوسته تک‌جهته [۵].....	۵
شکل (۴-۱): ترتیب زنجیره‌های پلیمری و اتصال عرضی [۱۵].....	۱۴
شکل (۵-۱): الیاف تقویت‌کننده تک‌جهته کربن [۱۷].....	۱۸
شکل (۶-۱): الیاف تقویت‌کننده دوجهته (+۴۵/-۴۵) [۱۷].....	۱۸
شکل (۷-۱): الیاف تقویت‌کننده دوجهته (۰/۹۰) متقارن [۱۷].....	۱۹
شکل (۸-۱): الیاف تقویت‌کننده دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن [۱۷].....	۱۹
شکل (۹-۱): الیاف تقویت‌کننده سه‌جهته (+۴۵/۰/-۴۵) [۱۷].....	۱۹
شکل (۱۰-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف تک‌جهته برای بدست آوردن ضرایب $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ به همراه نحوه لایه‌چینی آن [۱۷].....	۲۲
شکل (۱۱-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف تک‌جهته برای بدست آوردن ضریب S به همراه نحوه لایه‌چینی آن [۱۷].....	۲۲
شکل (۱۲-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (۰/۹۰) متقارن برای ضرایب $S, E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ [۱۷].....	۲۲
شکل (۱۳-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن برای بدست آوردن ضرایب الف) $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ ب) ضریب S [۱۷].....	۲۳
شکل (۱۴-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (+۴۵/-۴۵) برای بدست آوردن ضرایب $S, E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ [۱۷].....	۲۳
شکل (۱۵-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف سه‌جهته (+۴۵/۰/-۴۵) برای بدست آوردن ضرایب الف) $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ ب) ضریب S [۱۷].....	۲۴
شکل (۱۶-۱): لوازم و تجهیزات مورد استفاده در روش قالب‌گیری کیسه‌ای [۸].....	۲۵
شکل (۱۷-۱): شماتیکی از فرایند تزریق رزین به کمک خلأ.....	۲۸
شکل (۱۸-۱): مقایسه مواد رایج و مواد کامپوزیت از نظر جذب انرژی مخصوص [۲۲].....	۳۹
شکل (۱۹-۱): انواع مودهای فروریزی ناپایدار، الف) کمانش، ب) نفوذ داخلی، پ) بشکه‌ای شدن [۲۷].....	۴۲
شکل (۲۰-۱): انواع مودهای فروریزی له‌شدن پیش‌رونده، الف) بازشدن الیاف، ب) تکه‌تکه شدن، پ) شکست ترد [۲۷].....	۴۶

- شکل (۱-۲۱): انواع خرابی یک چندلایه کامپوزیتی [۳۴] ۴۶
- شکل (۱-۲۲): مشخصات هندسی لوله تحت له شدن پیش‌رونده [۲۷] ۵۱
- شکل (۱-۲۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحت له شدن پیش‌رونده [۲۷] ۵۲
- شکل (۱-۲۴): ناحیه له شدن در مود فروریزی چین‌خوردگی (تاشوندگی) [۲۷] ۵۶
- شکل (۱-۲۵): توزیع نسبی موقعیت تصادم در خودروها [۹] ۸۱
- شکل (۱-۲۶): نمایش مسیر نیروها در موقعیت تصادم جلو و سمت چپ بر روی خودرو مدل BMW i3 [۹] ۸۱
- شکل (۱-۲۷): نواحی اصلی جذب انرژی در خودرو مدل BMW ICE [۹] ۸۲
- شکل (۲-۱): الیاف تقویت‌کننده کوک‌زده شده تک‌جهته شیشه نوع الکتريکی ۸۷
- شکل (۲-۲): الیاف تقویت‌کننده کوک‌زده شده دو‌جهته شیشه نوع الکتريکی (۹۰/۰) ۸۷
- شکل (۲-۳): الیاف تقویت‌کننده کوک‌زده شده دو‌جهته شیشه نوع الکتريکی (۴۵/-/۴۵+) ۸۷
- شکل (۲-۴): الیاف تقویت‌کننده کوک‌زده شده سه‌جهته شیشه نوع الکتريکی (۴۵/۰/-/۴۵+) ۸۸
- شکل (۲-۵): الیاف تقویت‌کننده تک‌جهته کوک‌زده شده کربن نوع (HS) ۸۸
- شکل (۲-۶): رسم دمای ایجاد حرارت بر حسب زمان برای میزان اختلاط‌های متفاوت [۱۰۹] ۹۰
- شکل (۲-۷): دستگاه پمپ خلأ پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد ۹۳
- شکل (۲-۸): فیلم سوراخ‌دار مورد استفاده ۹۴
- شکل (۲-۹): شبکه جریان رزین به‌عنوان آخرین لایه در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ ۹۵
- شکل (۲-۱۰): نوار آب‌بند کننده ۹۵
- شکل (۲-۱۱): مشخصات هندسی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ۹۶
- شکل (۲-۱۲): مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به روش قالب‌گیری کیسه‌ای، (الف) تمیزکاری سطح مندرل، (ب) اعمال واکس جداکننده، (ج) برش الیاف، (د) وزن کردن الیاف، (ک) لایه‌گذاری، (ل) لایه پارچه‌ای غیرچسبنده، (ن) فیلم جداکننده منفذدار، (و) پارچه جاذب/هواگیر، (ه) کیسه پلاستیکی و آب‌بندی با نوار آب‌بند، (ی) اعمال خلأ ۱۰۲
- شکل (۲-۱۳): مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به روش تزریق رزین به کمک خلأ (الف) قراردادن شبکه جریان رزین، (ب) کیسه پلاستیکی و آب‌بندی با نوار آب‌بند و نصب لوله‌های ورودی و خروجی رزین، (ج) آزمون نشتی، (د) حباب زدایی (گاززدایی)، (ک) فرایند تزریق رزین به کمک خلأ ۱۰۴
- شکل (۲-۱۴): پوسته‌های استوانه‌ای تولید شده ۱۰۷
- شکل (۲-۱۵): آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد، ماشین آزمایش پوسته‌ها ۱۰۸
- شکل (۳-۱): نسبت سیگنال به نویز پارامتر لایه‌چینی در سطوح چهارگانه ۱۱۵
- شکل (۳-۲): نسبت سیگنال به نویز پارامتر قطر داخلی در سطوح چهارگانه ۱۱۶
- شکل (۳-۳): نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی ضخامت در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌متر ۱۱۶
- شکل (۳-۴): نسبت سیگنال به نویز پارامتر فرایند تولید در دو سطح قالب‌گیری کیسه‌ای و تزریق رزین ۱۱۷
- شکل (۳-۵): نسبت سیگنال به نویز پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده در دو سطح الیاف شیشه و کربن ۱۱۸

- شکل (۳-۶): نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی طول در سطوح چهارگانه..... ۱۱۸
- شکل (۳-۷): فروریزی پوسته شماره ۱ در مود فروریزی ناپایدار له شدن ۱۲۰
- شکل (۳-۸): فروریزی پوسته شماره ۳ در مود فروریزی ناپایدار له شدن ۱۲۰
- شکل (۳-۹): فروریزی پوسته شماره ۷ در مود فروریزی ناپایدار له شدن ۱۲۱
- شکل (۳-۱۰): فروریزی پوسته شماره ۱۱ در مود فروریزی ناپایدار بشکته‌ای شدن ۱۲۱
- شکل (۳-۱۱): فروریزی پوسته شماره ۱۲ در مود فروریزی ناپایدار بشکته‌ای شدن ۱۲۲
- شکل (۳-۱۲): فروریزی پوسته شماره ۱۴ در مود فروریزی ناپایدار نفوذ داخلی ۱۲۲
- شکل (۳-۱۳): فروریزی پوسته شماره ۲ در مود فروریزی پایدار شکست ترد ۱۲۳
- شکل (۳-۱۴): فروریزی پوسته شماره ۴ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف ۱۲۳
- شکل (۳-۱۵): فروریزی پوسته شماره ۵ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف ۱۲۴
- شکل (۳-۱۶): فروریزی پوسته شماره ۶ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف ۱۲۴
- شکل (۳-۱۷): فروریزی پوسته شماره ۸ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف ۱۲۵
- شکل (۳-۱۸): فروریزی پوسته شماره ۹ در مود فروریزی پایدار چین خوردگی ۱۲۵
- شکل (۳-۱۹): فروریزی پوسته شماره ۱۰ در مود فروریزی پایدار چین خوردگی ۱۲۶
- شکل (۳-۲۰): فروریزی پوسته شماره ۱۳ در مود فروریزی پایدار شکست ترد ۱۲۶
- شکل (۳-۲۱): فروریزی پوسته شماره ۱۵ در مود فروریزی پایدار شکست ترد ۱۲۷
- شکل (۳-۲۲): فروریزی پوسته شماره ۱۶ در مود فروریزی پایدار شکست ترد..... ۱۲۷

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۱-۱): دسته‌بندی الیاف کربن بر حسب محدوده مدول کششی [۸]	۷
جدول (۲-۱): مقایسه پایه‌ای بین مشخصه‌های اصلی الیاف شیشه و کربن [۸]	۷
جدول (۳-۱): مقایسه کمی خواص مکانیکی تعدادی از الیاف و فلزات رایج [۹]	۸
جدول (۴-۱): مقایسه محدوده مقادیر خواص برای زمینه‌های گرماسخت و گرمانرم [۱۴]	۱۶
جدول (۵-۱): مقایسه کمی خواص مکانیکی زمینه‌های پلیمری گرماسخت اپوکسی و پلی‌استر [۹]	۱۶
جدول (۶-۱): مقایسه کمی خواص مکانیکی انواع کامپوزیت‌ها [۹]	۱۷
جدول (۷-۱): پتانسیل کاهش جرم مواد مختلف نامزد کاهش وزن نسبت به فولاد [۹]	۳۸
جدول (۸-۱): ویژگی‌های مودهای فروریزی پایدار به‌طور خلاصه [۲۷]	۵۰
جدول (۹-۱): خلاصه‌ای از مقادیر جذب انرژی مخصوص نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) و بارگذاری محوری	۷۶
جدول (۱۰-۱): خلاصه‌ای از مقادیر جذب انرژی مخصوص نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) و بارگذاری محوری	۷۶
جدول (۱۱-۱): اثر پارامترهای مختلف روی جذب انرژی مخصوص و چقرمگی شکست بین لایه‌ای [۱۰۷]	۷۷
جدول (۱-۲): نوع پارچه کوک‌زده‌شده مورد استفاده از نظر ساختار و دسته‌بندی الیاف تقویت‌کننده	۸۶
جدول (۲-۲): خواص الاستیک و شکست مواد مورد استفاده در ساخت پوسته‌ها به روش VIP	۹۱
جدول (۳-۲): پارامترهای طراحی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی و سطوح آنها در تحلیل آماری تاگوچی	۹۶
جدول (۴-۲): طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی	۹۷
جدول (۵-۲): نحوه نام‌گذاری پوسته‌های طراحی آزمایش‌شده به‌صورت خلاصه	۹۹
جدول (۶-۲): نام‌گذاری پوسته‌های طراحی آزمایش‌شده	۹۹
جدول (۷-۲): ضخامت تک لایه کامپوزیتی ساخته‌شده با الیاف مدنظر این پژوهش	۱۰۴
جدول (۸-۲): مشخصات هندسی نهایی پوسته‌های تولید شده	۱۰۶
جدول (۹-۲): آزمایش‌های طراحی‌شده به روش تاگوچی جهت آزمایش‌های هدیدگی محوری	۱۰۷
جدول (۱۰-۲): مشخصات فنی ماشین آزمایش پوسته‌ها در دمای محیط [۱۱۴]	۱۰۹
جدول (۱-۳): نتایج اندازه‌گیری شده از نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آزمایش‌های تجربی	۱۱۲
جدول (۲-۳): جذب انرژی مخصوص پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده	۱۱۴
جدول (۳-۳): نسبت سیگنال به نویز و رتبه‌بندی پارامترها برای بیشینه‌کردن جذب انرژی مخصوص	۱۱۴
جدول (۴-۳): نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر و اثر آن بر جذب انرژی مخصوص	۱۲۹
جدول (۵-۳): رابطه لایه‌چینی با مود فروریزی ناپایدار	۱۳۰

- جدول (۳-۶): رابطه لایه‌چینی با مود فروریزی پایدار ۱۳۱
- جدول (۳-۷): رابطه فرایند تولید با مود فروریزی ناپایدار ۱۳۲
- جدول (۳-۸): رابطه فرایند تولید با جذب انرژی مخصوص و مود فروریزی پایدار ۱۳۲
- جدول (۳-۹): نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر در تقابل با نوع تقویت‌کننده ۱۳۳
- جدول (۳-۱۰): بررسی اثر هندسه بر روی نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر ۱۳۴

فصل اول

مقدمه و مروری بر پژوهش‌های گذشته

۱-۱- مقدمه

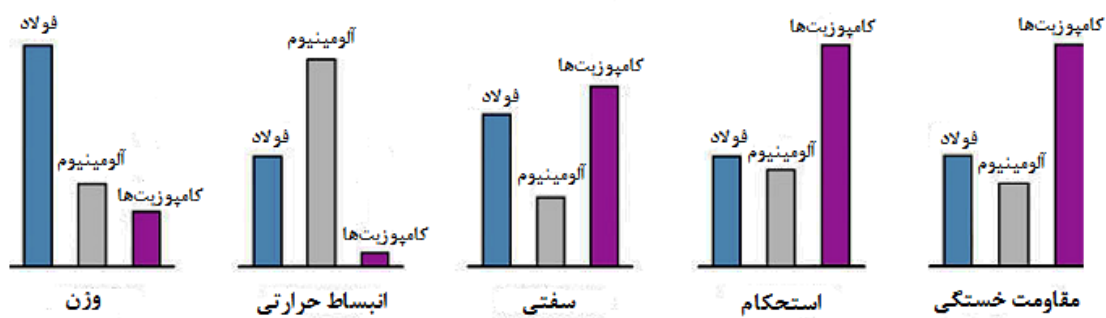
امروزه کاربرد سازه‌های کامپوزیتی در صنایع هوافضا، اتموبیل‌سازی و انرژی به جهت مزایایی همچون وزن کم و استحکام بالا، به طور فزاینده‌ای در حال رشد می‌باشد. لذا این سازه‌ها برای حصول وزن و سفتی بهینه تحلیل می‌شوند.

۲-۱- تعریف مواد کامپوزیت

استفاده از مواد کامپوزیت ایده‌ای نو و جدید نمی‌باشد، به طوری که در طبیعت می‌توان نمونه‌های مختلفی از این نوع مواد را یافت. به عنوان مثال برگ درخت نارگیل می‌تواند کامپوزیتی با تقویت-کننده الیافی باشد. استخوان نمونه دیگری از مواد کامپوزیت است که وزن اعضای بدن را تحمل می‌کند. علاوه بر این مواد کامپوزیت طبیعی، مواد مهندسی بسیاری نیز وجود دارند که از دیدگاه عمومی کامپوزیت هستند و برای مدت طولانی است که مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند سیمان و آسفالت که با ماسه مخلوط شده است [۱].

از سال ۱۹۶۰ میلادی پژوهش‌ها در زمینه مواد کامپوزیت مهندسی توسعه یافته است. از طرفی با توجه به مقایسه مواد یکپارچه^۱ مانند فولاد و آلومینیوم با مواد کامپوزیت که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از کامپوزیت‌ها به جای مواد یکپارچه که قدمت بیشتری دارند، پیشرفت‌های بیشتری به دست خواهد آمد که همین موضوع باعث افزایش اهمیت نسبی این نوع از مواد مهندسی شده است [۱].

^۱ Monolithic



شکل (۱-۱): مقایسه بین مواد مهندسی یکپارچه رایج و کامپوزیت‌ها [۱]

اگر بخواهیم تعریفی ساده از مواد کامپوزیت ارائه دهیم باید بگوییم که ماده‌ای است که از دو یا چند فاز مجزا تشکیل شده است، بنابراین ناهمگن است. البته تا اندازه زیادی این تعریف به سطح تحلیل وابسته است. به طوری که همه مواد ناهمگن می‌باشند، اگر مقیاس مدنظر به اندازه کافی کوچک باشد [۲].

طبق تعریف فوق در مقیاس‌های خیلی کوچک، همه مواد به نوعی کامپوزیت هستند. بنابراین یک قطعه ساده از جنس فولاد نیز چون ماده‌ای است چندبلور^۱ که از تعداد زیادی دانه تک‌بلور^۲ ساخته شده است، کامپوزیت به حساب می‌آید. با توجه به اینکه این تعریف، همه چیز را پیچیده می‌کند بایستی یک تعریف عملی^۳ از مواد کامپوزیت ارائه کرد. بنابراین کامپوزیت ماده‌ای است که [۱]:

۱- حتما ساخته شده باشد (این تعریف مواد کامپوزیت طبیعی را شامل نمی‌شود).

۲- باید شامل دو فاز یا بیشتر باشد به طوری که این فازها دارای خصوصیات فیزیکی و یا شیمیایی مشخصی باشند و نیز به طور مناسبی توزیع شده باشند، البته با وجود فصل مشترکی که آن‌ها را از هم جدا کند.

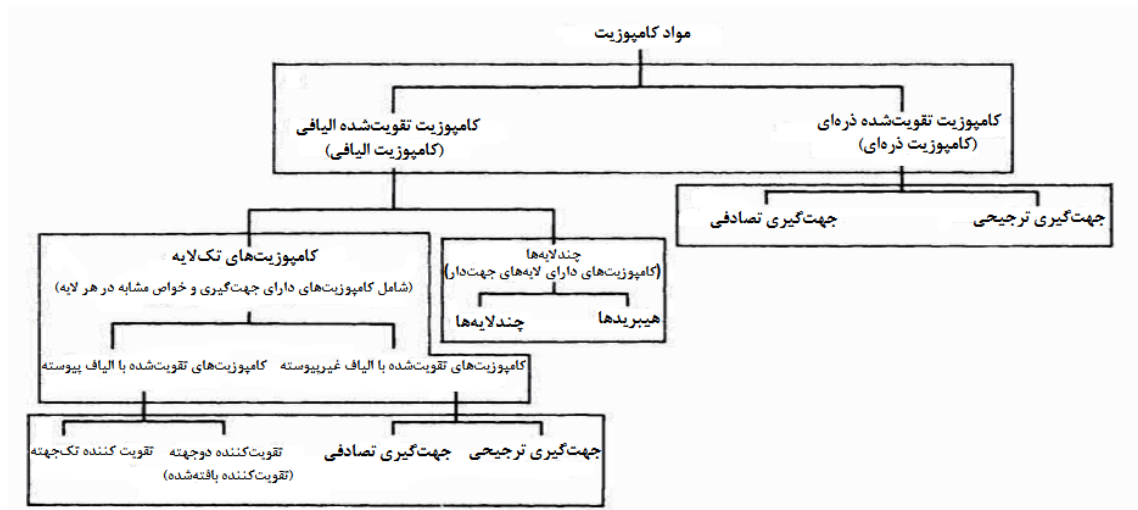
۳- دارای خصوصیات و ویژگی‌هایی باشند که هر کدام از اجزای تشکیل دهنده آن بصورت مجزا آن ویژگی را نداشته باشند.

¹ Polycrystal
² Single crystal
³ Operational

تعریف فوق برای سیستم‌هایی که دارای الیاف پیوسته، ناپیوسته و یا ذرات به عنوان تقویت‌کننده باشند، به گونه‌ای که الیاف در فاز مرکزی که زمینه نامیده می‌شود قرار گیرد، نیز به کار می‌رود (مانند پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه و کربن) [۳].

۳-۱- مواد کامپوزیت تقویت شده با الیاف

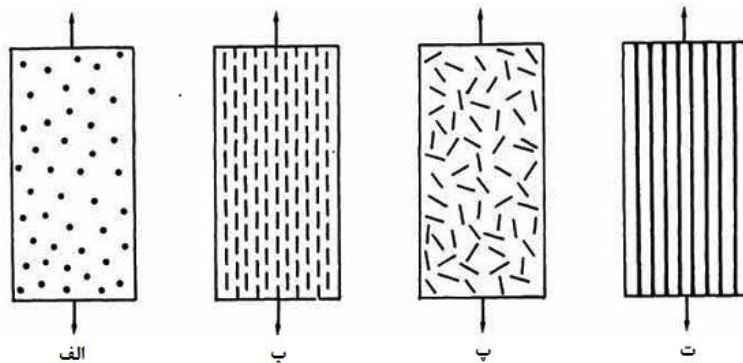
انواع مواد کامپوزیت در شکل (۲-۱) دسته‌بندی شده‌اند که متداول‌ترین آنها، نوع تقویت‌شده با الیاف است که در آن رشته‌های باریک پیوسته یا ناپیوسته از یک ماده، در زمینه‌ای از ماده دیگر جای گرفته‌اند. زمینه نیرو را به رشته‌ها منتقل و آن‌ها را در برابر محیط حفظ می‌کند و عامل شکل‌پذیری و چقرمگی است، در حالی که رشته‌ها بخش عمده بار را تحمل کرده و سختی بیشتری دارند. باید توجه کرد که مواد رشته‌ای محکم‌تر از همان ماده به شکل حجیم‌شان هستند، زیرا اندازه هر نوع عیب، حداکثر برابر قطر رشته است. از آن گذشته شکستن کامل رشته باعث از کارافتادگی کل مجموعه نمی‌شود، برخلاف وضعیت پیشرفت ترک در ماده حجیم [۴].



شکل (۲-۱): طبقه‌بندی مواد کامپوزیت [۵]

الیاف شیشه هنوز گسترده‌ترین مصرف را به عنوان تقویت‌کننده دارند که در اصل به خاطر قیمت پایین و خواص کاربردی مناسب آن است. در کامپوزیت جهت‌دادن الیاف تقویت‌کننده به شکل‌های

گوناگون انجام می‌پذیرد. مثلاً فایبرگلاس حاوی الیاف کوتاه است که آزادانه در جهات مختلف قرار گرفته‌اند. چنانچه همه الیاف در یک جهت قرار گیرند، خواص ماده کاملاً جهتی خواهد بود و می‌توان این جهت را به دلخواه در امتداد نیرو تنظیم کرد [۴]. در شکل (۳-۱) نمونه‌هایی از انواع مواد کامپوزیت ارائه شده است.



شکل (۳-۱): نمونه‌هایی از مواد کامپوزیت، الف) ذره‌ای، اتفاقی ب) رشته‌های ناپیوسته پ) رشته‌های ناپیوسته، اتفاقی ت) رشته‌های پیوسته تک‌جهته [۵]

خواص کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف به میزان قابل توجهی به عوامل زیر بستگی دارد [۴]:

- ۱- خواص ماده الیاف
- ۲- درصد حجمی الیاف
- ۳- نسبت طول به قطر الیاف
- ۴- جهت استقرار الیاف
- ۵- استحکام پیوند (درجه‌ی پیوند) میان الیاف و ماده‌ی زمینه (فصل مشترک)
- ۶- خواص ماده‌ی زمینه

۴-۱- الیاف یا تقویت‌کننده

نوع، مقدار و آرایش الیاف در مواد کامپوزیت بسیار مهم بوده و بر ویژگی‌های زیر از ماده کامپوزیت تاثیرگذار است:

- ۱- استحکام و مدول کششی، فشاری و خمشی

۲- وزن مخصوص کامپوزیت

۳- استحکام خستگی

۴- قیمت تمام شده

۵- ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته

مهمترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت بخصوص برای ساخت مواد کامپوزیت زمینه

پلی مری عبارتند از: شیشه، کربن و آرامید [۵-۷].

۱-۴-۱- الیاف یا تقویت کننده شیشه

الیاف شیشه رایج ترین و پرمصرف ترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت می باشد. که

برحسب نوع و ترکیب مواد به کار رفته در تهیه آنها، به انواع مختلفی تقسیم بندی می شوند [۵]:

- E-glass برای مصارف عمومی و عایق الکتریسیته

- S-glass خواص مکانیکی بالاتر

- C-glass مقاومت شیمیایی

- ECR-glass این نوع از الیاف شیشه خواص الکتریکی و شیمیایی نوع E و مقاومت شیمیایی

نوع C را باهم تلفیق نموده است.

- AR-glass مقاومت اسید و باز

۱-۴-۲- الیاف یا تقویت کننده کربن

الیاف کربن معمولاً بر طبق محدوده مدولی که در آن قرار می گیرند همانطور که در جدول (۱-۱)

مشاهده می شود، گروه بندی می شوند. این محدوده ها عبارتند از: استحکام بالا (HS)، مدول متوسط

(IM)، مدول بالا (HM) و مدول فوق بالا (UHM). قطر رشته ها در اکثر انواع الیاف کربن حدود ۵ تا

(μm) ۷ می باشد. الیاف کربن بالاترین سفتی مخصوص در مقایسه با هرگونه الیاف موجود دیگر،

استحکام بسیار بالا در هر دو حالت فشار و کشش و مقاومت بالا در برابر خوردگی، خزش و خستگی را

دارا می‌باشد. با این وجود در زمینه استحکام ضربه‌ای پایین‌تر از شیشه و آرامید بوده و بخصوص در

انواع مدول بالا و مدول فوق‌بالا خود، از شکنندگی بالایی برخوردار می‌باشد [۸].

جدول (۱-۱): دسته‌بندی الیاف کربن برحسب محدوده مدول کششی [۸]

الیاف کربن	محدوده مدول کششی (GPa)
استحکام بالا (HS)	کوچکتر از ۲۶۵
مدول متوسط (IM)	۲۶۵-۳۲۰
مدول بالا (HM)	۳۲۰-۴۴۰
مدول فوق‌بالا (UHM)	بزرگتر از ۴۴۰

جدول (۲-۱) امکان مقایسه پایه‌ای بین مشخصه‌های اصلی و مطلوب الیاف شیشه و کربن را فراهم

می‌سازد:

جدول (۲-۱): مقایسه پایه‌ای بین مشخصه‌های اصلی الیاف شیشه و کربن [۸]

خاصیت	الیاف شیشه	الیاف کربن
استحکام کششی بالا	متوسط	خوب
مدول کششی بالا	نه چندان خوب	خوب
استحکام فشاری بالا	متوسط	خوب
مدول فشاری بالا	نه چندان خوب	خوب
استحکام خمشی بالا	متوسط	خوب
مدول خمشی بالا	نه چندان خوب	خوب
استحکام ضربه‌ای بالا	متوسط	نه چندان خوب
استحکام برشی بین‌لایه‌ای بالا	خوب	خوب
استحکام برشی در صفحه بالا	خوب	خوب
وزن مخصوص پایین	نه چندان خوب	متوسط
مقاومت خستگی بالا	نه چندان خوب	خوب
مقاومت در برابر آتش بالا	خوب	نه چندان خوب
عایق حرارتی بالا	متوسط	نه چندان خوب
عایق الکتریکی بالا	خوب	نه چندان خوب
انبساط حرارتی پایین	خوب	خوب
قیمت پایین	خوب	نه چندان خوب

در نهایت برای مقایسه کمی خواص مکانیکی تعدادی از الیاف و فلزات رایج مطابق جدول (۳-۱) داریم:

جدول (۳-۱): مقایسه کمی خواص مکانیکی تعدادی از الیاف و فلزات رایج [۹]

چگالی (kg/m ³)	کرنش تا شکست (%)	استحکام نهایی (کشش) (MPa)	نسبت پواسون محوری	مدول برشی (GPa)	مدول یانگ (GPa)	مواد
۱۷۵۰	۱/۵	۳۵۳۰	۰/۲۳	۲۳	۲۳۰	الیاف کربن HS-T300
۱۸۰۰	۱/۹	۵۵۸۶	۰/۲۳	۲۳	۲۹۴	الیاف کربن IM-T800
۲۱۷۰	۰/۴	۳۶۳۰	۰/۲۳	۲۰	۳۸۵	الیاف کربن HM
۲۵۸۰	۴/۷	۳۴۵۰	۰/۳	۲۷/۷	۷۲	الیاف شیشه E-glass
۲۴۶۰	۵/۶	۴۷۱۰	۰/۳	۳۳/۵	۸۷	الیاف شیشه S-glass
۷۸۰۰	۴	۶۴۸	۰/۲۷	۸۱	۲۰۶	فولاد
۲۶۰۰	۳/۵	۲۳۴	۰/۳۵	۲۵/۶	۶۹	آلومینیوم

۵-۱- پوشش دهی الیاف

در مرحله پایانی ساخت، پوششی روی الیاف اعمال می شود که آنرا آهار (size) نیز می نامند. اگر چه در صنعت، هر دو اصطلاح سایز^۱ و سایزینگ برای این پوشش به کار می رود، اما اصطلاح درست همان سایز است و سایزینگ در واقع عمل پوشش دهی است. در هر حال این آهار، ۰/۵ تا ۰/۲٪ وزن الیاف را افزایش می دهد و شامل روان کننده^۲، چسب^۳ و یا عامل جفت کننده^۴ است. روان کننده از ساییده شدن و شکستن الیاف به هنگام جمع کردن و پیچش و نیز به هنگام بافت پارچه جلوگیری می نماید. عوامل جفت کننده، ترشوندگی الیاف را با یک رزین خاص و نیز چسبندگی رزین و الیاف را بهبود می بخشد. در برخی موارد یک سایز تنها برای یک رزین خاص مانند پلی استر یا اپوکسی مناسب است و در مواردی برای محدوده ای از رزین ها. هر کدام از شرکت ها از ماده ای خاص بدین منظور استفاده می نمایند. شرکت PPG اعتقاد دارد برای هر کاربردی بایستی فرمولاسیون سایز خاصی را بکار برد. به عنوان مثال برای سایز با کد ۲۰۲۶ این شرکت که با محصولات با نام تجاری HYBON

¹ Size

² Lubricant

³ Binder

⁴ Coupling agent

که برای ساخت توربین‌های بادی مصرف می‌شود، ضمن بهبود ترشوندگی الیاف و چسبندگی بهتر الیاف به رزین، برای عمر خستگی محصول ده برابر افزایش گزارش شده است. پوشش‌دهی الیاف به دو صورت اعمال می‌شود: ۱- به هنگام تولید الیاف که معمولاً این روش رایج‌تر است. ۲- پوشش‌دهی الیاف قبل از تولید قطعه کامپوزیت متناسب با فرایند تولید [۱۰].

۱-۶-۱- انواع و ساختار پارچه

در کامپوزیت‌های زمینه پلی‌مری، اصطلاح پارچه یعنی مجموعه‌ای از الیاف طویل شیشه، کربن یا آرامید و یا ترکیبی از این‌ها که برای تولید ورقه‌ای (شامل یک یا چندلایه از این الیاف) به کار برده می‌شوند. انسجام این لایه‌ها به دو طریق، یا به وسیله نیروی مکانیکی حاصل از بهم گیرکردن خودشان و یا با استفاده از ماده ثانویه‌ای که برای چسباندن لیف‌ها به همدیگر و نگهداری آنها در کنار هم به کار برده شده به دست می‌آید. ماحصل این امر ایجاد یکپارچگی و قابلیت حمل و جابه‌جایی را به محصول خواهد داد.

طبقه‌بندی انواع پارچه با توجه به جهت‌دهی الیاف مصرفی در آنها و نیز روش‌های متنوع ساخت و قراردادن الیاف در کنار هم، انجام می‌پذیرد. چهار دسته اصلی جهت‌یافتگی الیاف عبارتند از: تک-جهته^۱، (۰/۹۰) درجه، چندمحوره^۲ و اتفاقی [۸].

۱-۶-۱-۱- پارچه‌های تک‌جهته

پارچه تک‌جهته (UD) به نوعی گفته می‌شود که اکثریت الیاف آن فقط در یک جهت هدایت شده باشند. ممکن است در کنار این الیاف اصلی مقدار ناچیزی از لیف یا سایر مواد در جهات دیگر و با هدف نگهداشتن الیاف اولیه در جایگاه خود به کار گرفته شوند. بنابراین به آن دسته از پارچه‌هایی که بیش از ۹۰ درصد وزنشان در راستای یک جهت باشد، تک‌جهته می‌گویند. تک‌جهته‌ها معمولاً الیاف اصلیشان در جهت صفر درجه (یعنی در طول توپ یا رول پارچه یا جهت تار) قرار گرفته همچنین

¹ Unidirectional

² Multiaxial

می‌توانند در جهت ۹۰ درجه (یعنی جهت عمود بر جهت درازای توپ یا رول پارچه یا جهت پود) شکل گرفته باشند.

پارچه‌های تک‌جهته واقعی، توانایی قراردادن الیاف را در قطعات، به‌طور دقیق در جایی که به آن نیاز است و در مقادیر بهینه (نه کمتر و نه بیشتر) دارا می‌باشند. با توجه به اینکه این الیاف راست و بدون چین و شکن هستند، لذا در بین سایر پارچه‌ها بالاترین میزان خواص مکانیکی الیاف را در ساختار قطعه کامپوزیت از خود نمایان خواهند ساخت.

روش‌های متنوعی (مثل بافتن، کوک‌زدن و پیوندزدن) برای نگهداری الیاف اولیه در جای خود در پارچه تک‌جهته وجود دارد. همچنین مانند پارچه‌های دیگر کیفیت سطحی تک‌جهته‌ها توسط دو عامل اصلی تعیین می‌گردد:

۱- ترکیبی از وزن طولی (Tex) و شمارش تعداد گره‌های (یا کوک‌های) لیف اولیه. (تکس: وزن بر واحد گرم به ازای ۱۰۰۰ متر طول).

۲- مقدار و نوع لیف ثانویه [۸].

۱-۶-۲- پارچه‌های (۰/۹۰) درجه

در مصارفی که نیاز به بیش از یک جهت از الیاف باشد، استفاده از الیاف (صفردرجه) و (۹۰ درجه) که اکثراً محصولات بافته شده هستند، مفید خواهد بود. این پارچه‌ها به جای بافته‌شدن با کوک‌زدن نیز تولید می‌شوند و انواع متقارن و نامتقارن را شامل می‌شود [۸].

۱-۶-۳- پارچه‌های چندمحوره

در سال‌های اخیر استفاده از این نوع پارچه‌ها در ساختار کامپوزیت‌ها، مورد التفات بیشتری واقع شده است. این پارچه‌ها ترکیبی از یک یا چند لایه از الیاف بلند بوده که به‌وسیله ریسمان‌های غیرسازه‌ای ثانویه، به هم کوک‌زده شده^۱ و در جایگاه‌شان نگه داشته می‌شوند. الیاف اصلی از جنس هر کدام از انواع الیاف سازه‌ای موجود و با هر ترکیبی می‌توانند باشند. نخ‌های کوک‌زدن نیز معمولاً به

^۱ Stitch

دلیل ترکیب خواص اختصاصی لیف (برای چسباندن پارچه به همدیگر) و قیمت، از انواع پلی استرها انتخاب می شوند. فرایند کوک زدن تنوعی از جهت دهی های مختلف لیف را، خارج از زاویه ۹۰-۰ درجه پارچه های بافته شده، ترکیب و یک پارچه جدید به ارمغان می آورد.

دو مزیت کلیدی پارچه های کوک زده شده چندمحوری در مقابل انواع بافته شده عبارتند از:

- ۱- خواص مکانیکی بهتر: به این دلیل که همواره الیاف، مستقیم و بدون چین و شکن بوده و اینکه جهت دهی های بیشتری از الیاف به واسطه افزایش تعداد لایه های پارچه امکان پذیر می باشد.
- ۲- بهبود سرعت ساخت قطعات: براساس این واقعیت که این پارچه ها می توانند ضخیم تر و با جهت دهی های چندگانه لیف، ساخته شوند، بنابراین تعداد لایه های کمتری به هنگام لایه چینی نیاز خواهد بود [۸].

۱-۶-۴- الیاف تقویت کننده از نظر بافت

اصولاً روش های متنوعی جهت دسته بندی الیاف وجود دارد. یکی از بارزترین این دسته بندی ها عبارت است از الیاف بافته شده و الیاف بافته نشده که این دسته های اصلی خود به زیرشاخه های دیگری تقسیم می شوند.

الگوی بافت، همواره تعیین کننده میزان الیاف در جهات مختلف است. برای مثال در الیاف بافته شده تک جهته^۱ الیاف به گونه ای بافته شده اند که بیشتر از ۹۰٪ الیاف در یک جهت می باشند. یا مثلاً در الگوهای بافت صفحه ای^۲، الیاف در جهات ۰ و ۹۰ به یک اندازه توزیع شده اند. در این الگو بیشترین مقدار فصل مشترک بر واحد سطح نسبت به دیگر انواع الیاف بافته شده وجود دارد. در نتیجه این دسته از الیاف مقاوم ترین در برابر برش صفحه ای و به عنوان محکم ترین بافت در بین انواع مختلف الیاف بافته شده است. این دسته از الیاف در حین جابجایی شکل کلی خود را حفظ کرده ولی به سختی توسط رزین آغشته می شوند [۱۱].

^۱ Unidirectional Woven Fibers

^۲ Plain Weave Pattern

غالباً میزان آغشته پذیری الیاف توسط رزین با پارامتری با نام نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود که این پارامتر مستقیماً بر روی سرعت فرایند ساخت و نیز کیفیت قطعه تولیدی (از نظر میزان حفرات) به شدت تأثیرگذار است. اصولاً با افزایش تعداد الیاف در داخل هر رشته از الیاف (تار و یا پود)^۱ میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد [۱۲].

۱-۶-۵- بافتن و کوک‌زدن پارچه‌های چندمحوره

در این روش می‌توان لایه‌های $+45$ و -45 درجه را به این ترتیب ساخت که ابتدا الیاف تک‌جهته در مسیر پود را بافته و سپس با دستگاه خاصی تا زاویه 45 درجه پیچاند. سپس تک‌جهته‌های به دست آمده را بر روی هم کوک زده تا پارچه‌ای حاوی دو لایه با جهت‌های -45 درجه و $+45$ درجه تولید شود. ضمناً اگر وجود تک‌جهته صفر درجه یا 90 درجه هم لازم باشد یک تک‌جهته تار و یک تک-جهته پود بافته شده و بر روی هم قرار گرفته و کوک زده می‌شوند [۸].

۱-۷- زمینه مواد کامپوزیت

مواد زمینه^۲ باید محکم، چقرمه، شکل‌پذیر و دارای قدرت چسبندگی بالا باشند تا بتوانند نیروهای وارده را به الیاف منتقل و از انتشار ترک حاصل در الیاف به داخل ساختمان کامپوزیت جلوگیری کنند. نقش زمینه در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف عبارت است از:

۱- نگهداری الیاف در کنار یکدیگر

۲- انتقال تنش به الیاف

۳- محافظت از الیاف در مقابل عوامل محیطی (مانند رطوبت)

۴- حفاظت سطح الیاف از سایش

¹ Tow Size

² Matrix

زمینه نقش اساسی در بعضی از خواص کامپوزیت، مانند استحکام و مدول عرضی، خواص برشی و خواص فشاری ایفا می‌کند. در ضمن زمینه اثر قابل توجهی بر استحکام برشی بین‌لایه‌ای و استحکام برشی صفحه‌ای کامپوزیت دارد [۱۳ و ۱۵].

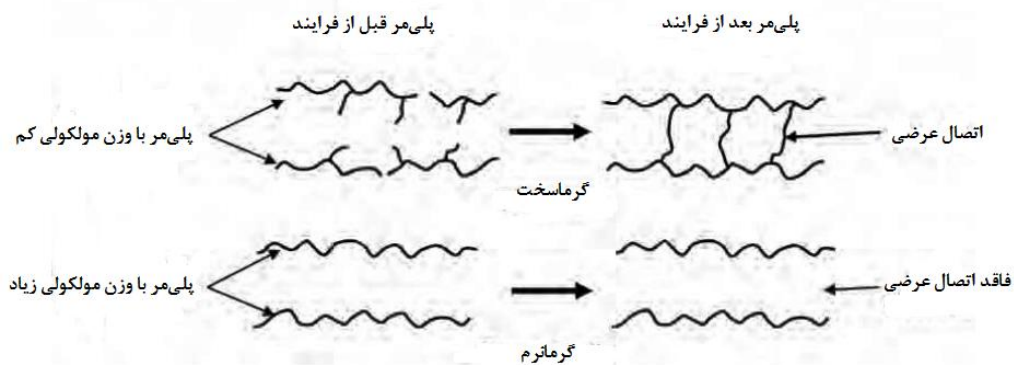
۸-۱- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMC)

کامپوزیت‌ها از نظر زمینه به سه دسته تقسیم می‌شوند: زمینه فلزی، زمینه سرامیکی و زمینه پلیمری. معمول‌ترین مواد زمینه در کامپوزیت‌ها، پلی‌مرها هستند که آنها نیز به سه گروه گرماسخت‌ها، گرمانرم‌ها و لاستیک‌ها طبقه‌بندی می‌گردند. در هر گروه پلی‌مرهای مختلف زیادی وجود دارد. مثلاً اپوکسی، پلی‌استر، پلی‌آمید و فنولیک که همگی گرماسخت هستند.

طبق برآوردها بیش از سه چهارم تمام زمینه‌های PMC‌ها را پلی‌مرهای گرماسخت تشکیل می‌دهند. پلی‌مرهای گرماسخت چسب‌هایی هستند که در طول فرایند پخت به راحتی اتصال عرضی^۱ برقرار می‌کنند. پختن عبارت است از کاربرد گرما و فشار یا افزودن کاتالیزوری که به عامل پختن یا سخت‌کننده^۲ معروف است. اتصال عرضی در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. اتصال‌های پیوند مانند اتصال عرضی از نوع اشتراکی (کووالانس) هستند. این پیوندهای قوی اتصال عرضی در کشیدن زنجیرها به سوی یکدیگر تاثیر دارند. این مساله تحرک زنجیرهای پلی‌مری را محدود می‌کند. همچنین به علت اتصالات عرضی نمی‌توان گرماسخت‌ها را با گرم کردن دوباره، تغییر شکل داد. با گرم کردن دوباره تنها کیفیت گرماسخت‌ها پایین می‌آید و در بعضی موارد ممکن است بسوزد، اما برای تغییر شکل به اندازه کافی نرم نمی‌شوند [۱۴].

^۱ Cross link

^۲ Hardner



شکل (۱-۴): ترتیب زنجیره‌های پلی‌مری و اتصال عرضی [۱۵]

به‌علاوه، ممکن است گرماسخت‌ها در دمای بالاتر مورد استفاده قرار گیرند زیرا نسبت به گرمانرم‌ها دارای دمای نرم‌شدگی بالاتر و دارای خصوصیات خزشی بهتری هستند. و بالاخره این‌که گرماسخت‌ها نسبت به بیشتر گرمانرم‌ها در برابر حمله شیمیایی مقاوم‌ترند [۱۴].

۱-۸-۱- چسبندگی بین زمینه (رزین) و الیاف تقویت‌کننده

قدرت چسبندگی بالا بین رزین و الیاف تقویت‌کننده ضروری است، زیرا در اینصورت می‌توان اطمینان داشت که نیروهای وارده به طور موثر به الیاف تقویت‌کننده منتقل شده و از ایجاد ترک‌ها و جدایش بین رزین و الیاف، تحت تنش‌های وارده جلوگیری می‌شود.

۱-۸-۲- چقرمگی زمینه (رزین)

مقدار مقاومت مواد در برابر انتشار ترک را چقرمگی^۱ می‌نامند، کمیتی که اندازه‌گیری آن در کامپوزیت‌ها مشکل به نظر می‌رسد. اما منحنی تنش - کرنش رزین به تنهایی (بدون تقویت‌کننده)، نشانه خوبی را برای رسیدن به چقرمگی قطعه حاصله برای ما فراهم می‌آورد. عموماً می‌توان گفت، هرچه تغییرات ابعادی رزین قبل از رسیدن به نقطه خرابی^۲ بیشتر باشد، محصول ساخته شده نهایی، دارای چقرمگی بیشتر و مقاومت بالاتر در مقابل ترک خواهد بود. بالعکس، رزین‌های با نسبت پایین

¹ Toughness

² Failure

کرنش به خرابی^۱، تمایل به وجود آوردن کامپوزیت‌های شکننده دارند، که به راحتی ترک می‌خورند. در نتیجه، انطباق چقرمگی رزین با خواص ازدیاد طول^۲ (کش آمدن) الیاف تقویت‌کننده آن حائز اهمیت است. همانطور که پیشتر گفته شد، پیوندهای قوی اتصال عرضی در کشیدن زنجیرها به سوی یکدیگر تاثیر دارند و این مساله تحرک زنجیرهای پلی‌مری را محدود می‌کند، در نتیجه گرماسخت‌ها در دمای اتاق شکننده‌اند و مقدار چقرمگی شکست^۳ (K_{IC}) پایینی در حدود ۰/۵ تا $1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$ دارند (مطابق جدول (۱-۴)) [۱۴].

۱-۸-۳- چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای

جدایش بین‌لایه‌ای^۴ یکی از شایع‌ترین انواع خرابی‌ها در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده که در انواع بارگذاری‌های مود I، II، یا ترکیبی از این مودها اتفاق می‌افتد. این آسیب‌ها ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای استحکام کامپوزیت را کاهش داده و منجر به شکست ساختاری فاجعه‌انگیز شوند. بنابراین استحکام ماده در برابر جدایش بین‌لایه‌ای و چقرمگی، مبنایی در مکانیک شکست بوده و در طراحی مهندسی اهمیت زیادی دارند. واحد اندازه‌گیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای (J/m^2) می‌باشد [۱۶].

۱-۹- دمای شیشه‌ای شدن رزین (T_g)

یکی از ویژگی‌های مهم رزین، دمای شیشه‌ای شدن^۵ می‌باشد. منظور از دمای شیشه‌ای شدن یک رزین بی‌شکل، دمایی است که رزین از حالت شیشه‌ای به حالت ویسکوالاستیک تغییر ماهیت می‌دهد. یا به عبارت دیگر در دماهای بالاتر از این دما رزین جریان پیدا می‌کند و در دمای کمتر از آن پایداری فیزیکی خوبی از خود نشان می‌دهد. از طرفی نکته قابل توجه این است که رزین‌های گرمانرم در ضمن حرارت‌دهی به مجرد اینکه به دمای شیشه‌ای شدن پلیمر که معمولاً خیلی هم بالا نیست می‌رسند، نرم می‌شوند [۵].

¹ Strain to Failure

² Elongation

³ Fracture Toughness

⁴ Delamination

⁵ Glass transition temperature

همانطور که پیشتر گفته شد، پیوندهای قوی اتصال عرضی در کشیدن زنجیرها به سوی یکدیگر تاثیر دارند و این مساله تحرک زنجیرهای پلی مری را محدود می کند، در نتیجه دمای شیشه ای شدن را به بالاتر از دمای اتاق افزایش می دهد. از سوی دیگر مزایای زیادی از وجود اتصالات عرضی حاصل می شود که در جدول (۴-۱) آمده است.

جدول (۴-۱): مقایسه محدوده مقادیر خواص برای زمینه های گرماسخت و گرمانرم [۱۴]

گرمانرم	گرماسخت	خواص پلی مر
۱-۴/۸	۱/۳-۶	مدول یانگ (GPa)
۴۰-۱۹۰	۲۰-۱۸۰	استحکام کششی (MPa)
۱/۵-۶	۰/۵-۱	چقرمگی شکست (K_{IC}), (MPa \sqrt{m})
۰/۷-۶/۵	۰/۰۲-۰/۲	چقرمگی شکست بین لایه ای (G_{IC}) (kJ/m ²)
۲۵-۲۳۰	۵۰-۴۵۰	حداکثر دمای کار ($^{\circ}C$)

۱-۱۰- مقایسه خواص مکانیکی زمینه های گرماسخت رایج و کامپوزیت های زمینه اپوکسی

حال مطابق جدول (۵-۱) به مقایسه کمی خواص مکانیکی زمینه های پلی مری اپوکسی و پلی استر که در دسته زمینه های گرماسخت پر کاربرد در صنعت قرار می گیرند، می پردازیم.

جدول (۵-۱): مقایسه کمی خواص مکانیکی زمینه های پلی مری گرماسخت اپوکسی و پلی استر [۹]

مواد	مدول یانگ (GPa)	مدول برشی (GPa)	نسبت پواسون محوری	استحکام نهایی (کشش) (MPa)	کرنش تا شکست (%)	چگالی (kg/m ³)
اپوکسی	۳/۱	۱/۲	۰/۳	۷۰	۴	۱۲۰۰
پلی استر	۳/۵	۱/۴	۰/۳	۷۰	۵	۱۱۰۰

در جدول (۶-۱) نیز مقایسه کمی تعدادی از کامپوزیت های زمینه اپوکسی آورده شده است تا محدوده تغییرات خواص مکانیکی کامپوزیت ها مشخص شود و معیاری برای مقایسه های آتی باشد.

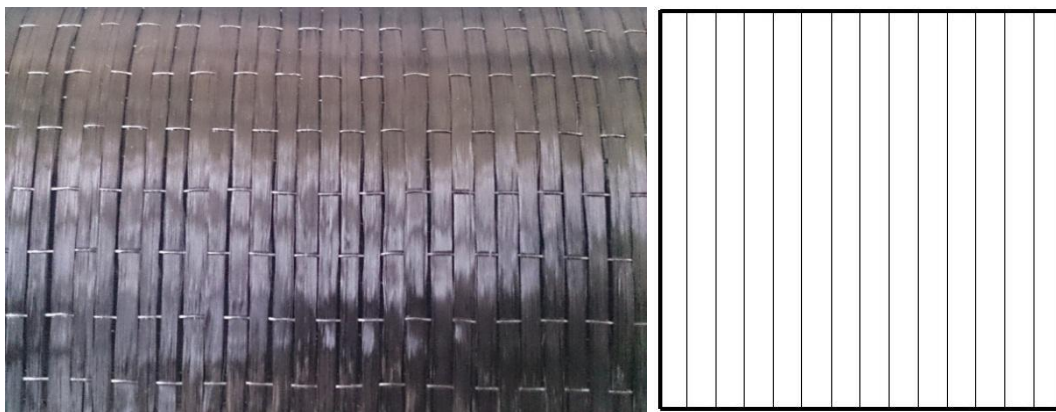
جدول (۱-۶): مقایسه کمی خواص مکانیکی انواع کامپوزیت‌ها [۹]

چگالی (kg/m ³)	استحکام نهایی (کشش) (MPa)	مدول یانگ طولی (GPa)	کامپوزیت
۱۶۰۰	۱۵۰۰	۱۸۱	الیاف تک‌جهته کربن/اپوکسی
۱۸۰۰	۱۰۶۲	۳۸/۶۰	الیاف تک‌جهته شیشه/اپوکسی
۱۶۰۰	۳۷۳	۹۵/۹۸	الیاف [0/90] کربن/اپوکسی
۱۸۰۰	۸۸/۲۵	۲۳/۵۸	الیاف [0/90] شیشه/اپوکسی

۱۱-۱- معرفی روش انجام آزمون‌های خواص مکانیکی

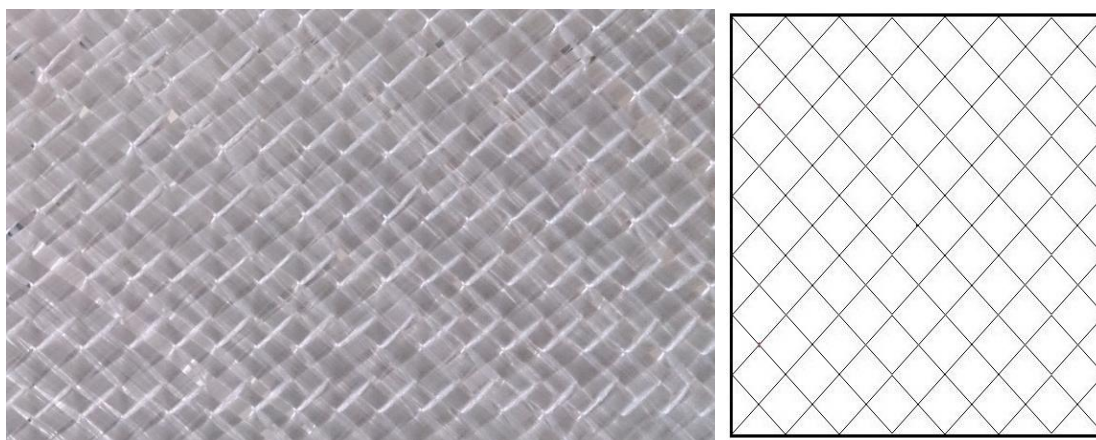
در این بخش به معرفی روش برش پارچه‌ها و لایه‌چینی آنها برای تولید نمونه‌های مربوط به آزمون‌های خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی به صورت کاربردی پرداخته شده است. روش‌های مختلف انجام آزمون با تاکید ویژه بر روی بدست آوردن سختی و استحکام برشی معرفی، و نحوه به کاربردن آنها در انواع الیاف تقویت‌کننده از قبیل تک‌جهته، دوجهته و سه‌جهته مشخص شده است [۱۷].

گام نخست در تحلیل تمامی سازه‌های کامپوزیتی، بدست آوردن خواص الاستیک و شکست مواد به کار رفته در آن می‌باشد. الیاف بعنوان مهمترین بخش کامپوزیت، دارای ساختار گوناگون می‌باشند که جهت بدست آوردن خواص آنها، روش‌هایی به کار می‌رود که در ذیل به آنها اشاره خواهیم نمود. جنس الیاف تقویت‌کننده معمول بکار رفته در صنعت کامپوزیت از نوع کربن و شیشه است که این الیاف همانطور که گفته شد بر اساس ساختار تار و پود آن به دو نوع بافته‌شده و کوک‌زده‌شده تقسیم‌بندی می‌شود. در الیاف تک‌جهته، چگالی الیاف در یک جهت متمرکز بوده که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است.

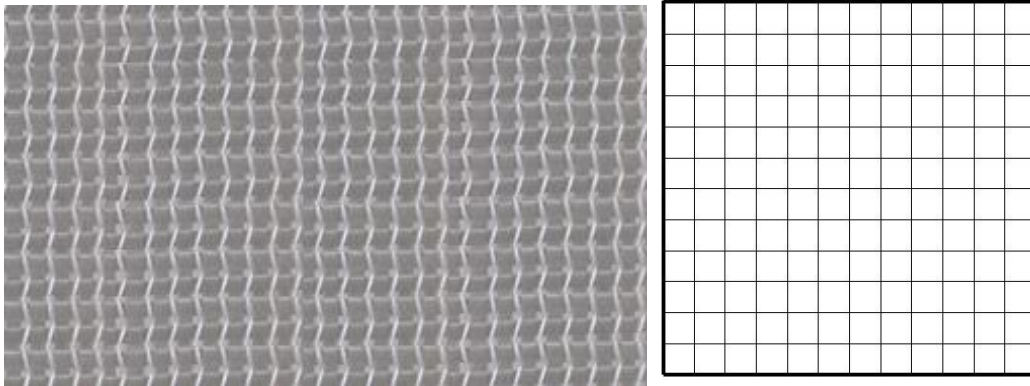


شکل (۱-۵): الیاف تقویت کننده تکجهته کربن [۱۷]

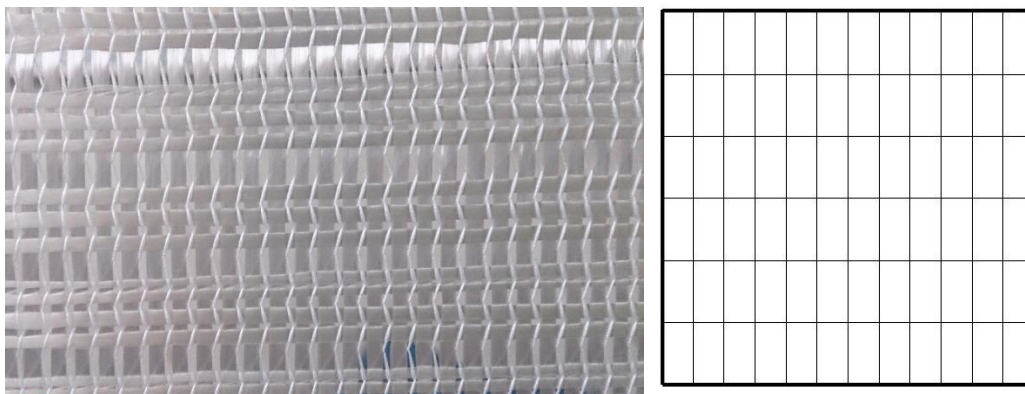
الیاف دوجهته از دو ردیف رشته عمود بر هم تشکیل شده است که از نظر بافت به دو نوع بافته شده و کوک زده شده تقسیم بندی می شوند. از نظر جهت گیری الیاف نیز، عموماً از سه نوع الیاف دوجهته $(+۴۵/-۴۵)$ ، $(۰/۹۰)$ و نامتقارن استفاده می شود که به ترتیب در شکل های (۱-۶) تا (۱-۸) نشان داده شده است.



شکل (۱-۶): الیاف تقویت کننده دوجهته $(+۴۵/-۴۵)$ [۱۷]

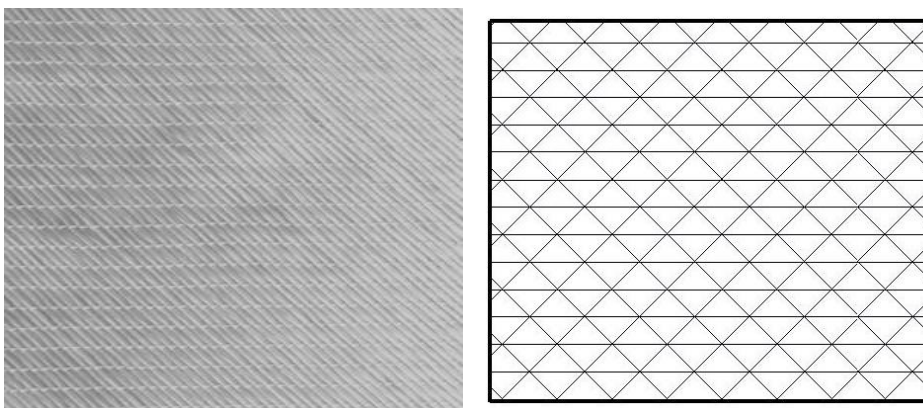


شکل (۷-۱): الیاف تقویت کننده دوجهته (۰/۹۰) متقارن [۱۷]



شکل (۸-۱): الیاف تقویت کننده دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن [۱۷]

الیاف سه‌جهته از ۳ رشته الیاف تشکیل شده است که از نظر جهت‌گیری، معمولاً دو رشته در جهات (۴۵- و ۴۵+) و رشته دیگر در جهت صفر درجه یا ۹۰ درجه قرار می‌گیرد. البته الیاف سه‌جهته (۶۰- / ۰ / ۶۰+) نیز مرسوم است. از نقطه نظر بافت الیاف نیز معمولاً الیاف سه‌جهته موجود از نوع کوک‌زده شده هستند. شکل (۹-۱) الیاف سه‌جهته (۴۵- / ۰ / ۴۵+) را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۱): الیاف تقویت کننده سه‌جهته (۴۵- / ۰ / ۴۵+) [۱۷]

۱-۱۱-۱- پارامترهای اساسی جهت تحلیل یک چندلایه کامپوزیتی

در حالت کلی، رابطه تنش با کرنش در یک ماده ارتوتروپیک با فرض قرار گرفتن محور مختصات

بر روی محورهای اصلی ماده، به صورت رابطه زیر است [۱۷]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

با فرض تنش صفحه‌ای، ماتریس فوق به شکل زیر کاهش می‌یابد:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

که در آن جهات ۱ و ۲، جهات اصلی ارتوتروپیک ماده هستند. همانطور که عنوان شد، معادله‌های

(۱-۱) و (۲-۱)، به شرطی برقرار می‌باشند که محورهای مختصات بر روی دستگاه ماده تک‌لایه

ارتوتروپیک قرار گیرد. با توجه به تعریف ماده ارتوتروپیک می‌توان عنوان کرد که هر دو جهت عمود بر

هم که صفحه حول آنها متقارن است، می‌تواند به عنوان جهت محورهای ماده تک‌لایه منظور شود.

بدین ترتیب برای تعیین خواص ماده ارتوتروپیک صفحه‌ای کفایت سه ضریب E_1 ، E_2 و E_{45} (که به

کمک E_{45} ، G_{12} محاسبه می‌شود) را با استفاده از آزمون‌ها بدست بیاوریم.

همچنین تحلیل شکست سازه به مقادیر استحکام نهایی کششی در جهت الیاف (محور ۱)، استحکام نهایی کششی در جهت عمود بر الیاف (محور ۲) و استحکام برشی نیازمند می‌باشد. بنابراین در حالت کلی پارامترهای زیر مورد نیاز می‌باشند:

E_1 : مدول الاستیک در جهت الیاف

E_2 : مدول الاستیک در جهت عمود بر الیاف

G_{12} : مدول برشی که از معادله (۳-۱) بدست می‌آید:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + 2 \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (3-1)$$

X_T : استحکام نهایی کششی در جهت الیاف

X_C : استحکام نهایی فشاری در جهت الیاف

Y_T : استحکام نهایی کششی در جهت عمود بر الیاف

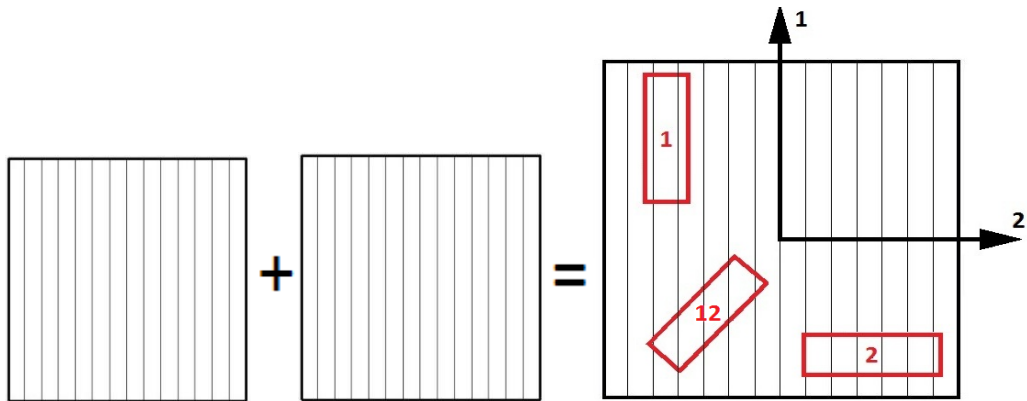
Y_C : استحکام نهایی کششی در جهت عمود بر الیاف

S : استحکام نهایی برشی

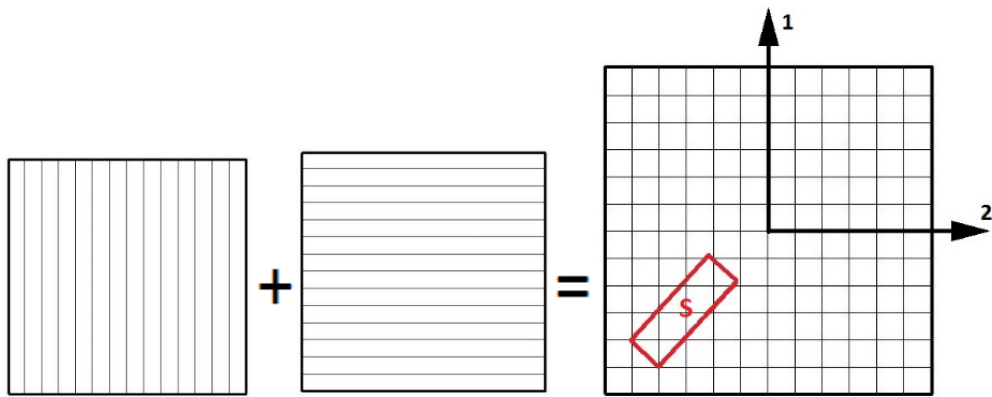
۱-۱۱-۲- نحوه لایه چینی و برش نمونه های آزمون خواص مکانیکی از چندلایه کامپوزیتی

۱-۱۱-۲-۱- نحوه لایه چینی و برش نمونه ها از الیاف تک جهته

جهت بدست آوردن ضرایب $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$ از شکل (۱۰-۱) استفاده می‌شود (لایه چینی در این حالت موازی و تمام الیافها در جهت محور ۱ می‌باشند). همانطور که ملاحظه می‌شود برش نمونه آزمونها از چندلایه کامپوزیتی باید در سه جهت صورت بگیرد که از نمونه ۱ ضرایب E_1, X_T و X_C بدست می‌آید. همچنین ضرایب E_2, Y_T و Y_C از نمونه ۲ و ضریب G_{12} نیز از نمونه ۱۲ بدست می‌آید. اما ضریب S باید در حالت تقارن محوری بدست آید که این موضوع در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است (لایه چینی در این حالت متقارن و الیافها یک در میان در جهت محور ۱ و محور ۲ می‌باشند).



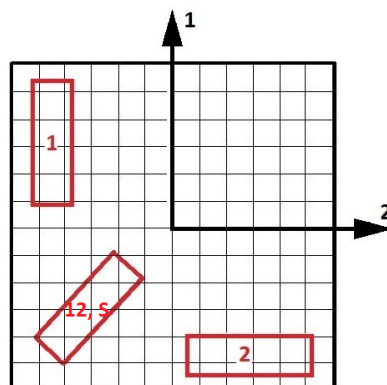
شکل (۱۰-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف تک‌جهته برای بدست آوردن ضرایب $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_c, Y_T, Y_c$ به همراه نحوه لایه‌چینی آن [۱۷]



شکل (۱۱-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف تک‌جهته برای بدست آوردن ضریب S به همراه نحوه لایه‌چینی آن [۱۷]

۱-۱۱-۲-۲- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجهته (۰/۹۰) متقارن

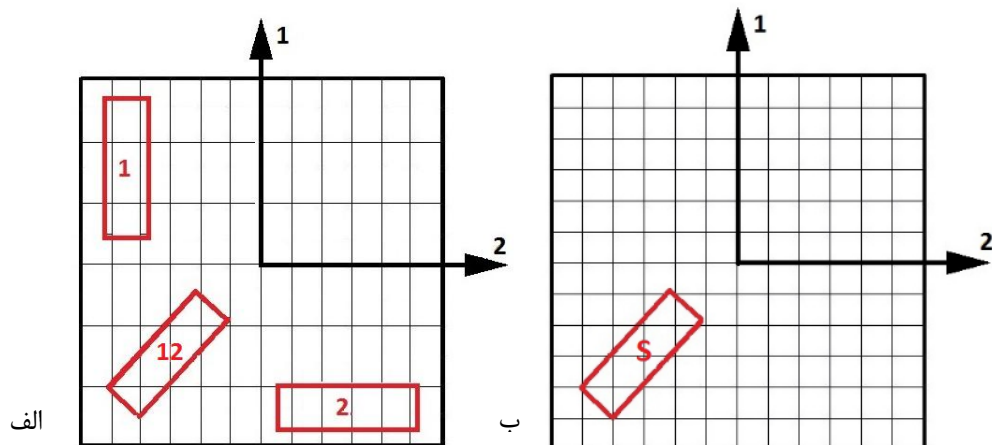
در شکل (۱۲-۱) نحوه برش نمونه‌های آزمون از چندلایی کامپوزیتی برای بدست آوردن ضرائب پارچه‌های با ساختار دوجهته (۰/۹۰) متقارن نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (۰/۹۰) متقارن برای ضرایب $S, E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_c, Y_T, Y_c$ [۱۷]

۱-۱۱-۲-۳- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن

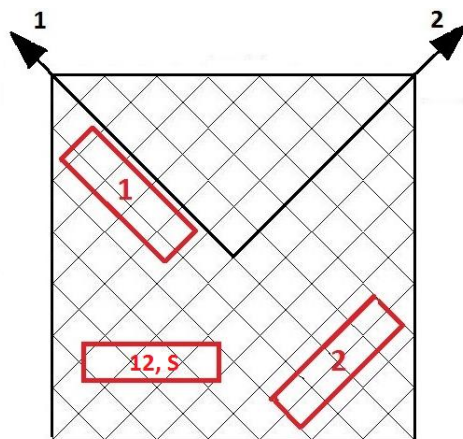
در شکل (۱۳-۱) نحوه برش نمونه‌های آزمون از چندلایی کامپوزیتی برای بدست آوردن ضرائب پارچه‌های با ساختار دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن نشان داده شده است.



شکل (۱۳-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (۰/۹۰) نامتقارن برای بدست آوردن ضرائب الف)
 ب) ضرائب S $[1\bar{1}\bar{7}]$ $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_c, Y_T, Y_c$

۱-۱۰-۲-۴- نحوه لایه‌چینی و برش نمونه‌ها از الیاف دوجهته (+۴۵/-۴۵)

در شکل (۱۴-۱) نحوه برش نمونه‌های آزمون از چندلایی کامپوزیتی برای بدست آوردن ضرائب پارچه‌های با ساختار دوجهته (+۴۵/-۴۵) نشان داده شده است.

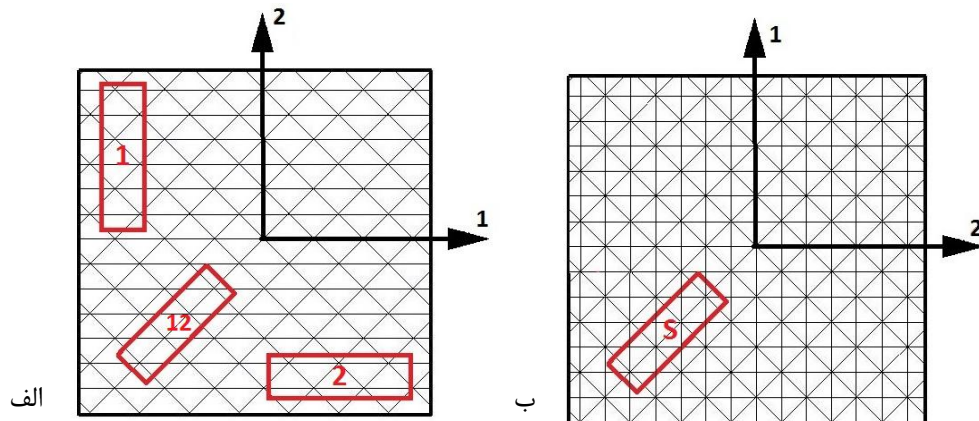


شکل (۱۴-۱): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف دوجهته (+۴۵/-۴۵) برای بدست آوردن ضرائب
 $[1\bar{1}\bar{7}] S, E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_c, Y_T, Y_c$

۱-۱۱-۲-۵- نحوه لایه چینی و برش نمونه‌ها از الیاف سه‌جهته (+۴۵/۰/-۴۵)

در شکل (۱-۱۵) نحوه برش نمونه‌های آزمون از چندلایی کامپوزیتی برای بدست آوردن ضرائب

پارچه‌های با ساختار سه‌جهته (+۴۵/۰/-۴۵) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۵): نحوه برش نمونه‌های آزمون از الیاف سه‌جهته (+۴۵/۰/-۴۵) برای بدست آوردن ضرائب الف)

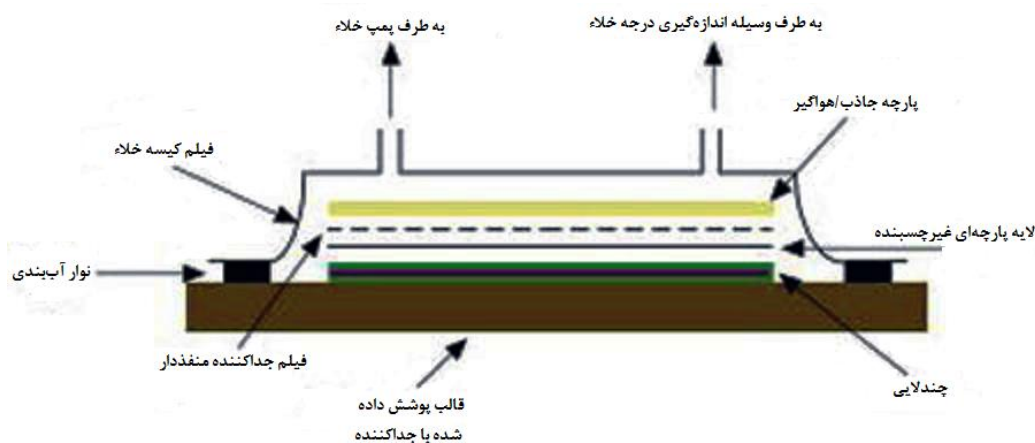
ب) ضرائب S [۱۷] $E_1, E_2, G_{12}, X_T, X_C, Y_T, Y_C$

۱-۱۲- روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها

با یک نگاه کلی به مواد کامپوزیت، متوجه می‌شویم مواد اولیه آنها شامل محدوده گسترده‌ای از انواع رزین‌ها و الیاف می‌باشند که هر کدام دارای خواص ویژه‌ای از قبیل استحکام، سفتی، چقرمگی، مقاومت حرارتی، قیمت، سرعت تولید و غیره هستند. با این وجود، خواص نهایی یک قطعه کامپوزیت تولید شده از این مواد متنوع، نه تنها تابعی از خواص ویژه مواد اولیه است، بلکه به شیوه طراحی، نحوه به‌کارگیری، قرارگرفتن در درون سازه و فرایند تولید نیز، وابسته است. در این بخش دو روش تولید قطعات کامپوزیت که در این پایان‌نامه برای ساخت پوسته‌ها مورد استفاده قرار گرفته است را بعد از معرفی، با هم مقایسه نموده و به تشریح بعضی از عواملی که باید در هر فرایند مد نظر قرار بگیرد از جمله تاثیر هر فرایند در انتخاب مواد اولیه خواهیم پرداخت [۸].

۱-۱۲-۱- روش قالب‌گیری کیسه‌ای

این شیوه در حقیقت ادامه فرایند لایه‌گذاری دستی^۱ (فرایندی می‌باشد که در آن الیاف به کمک قلم‌مو یا غلتک، روی قالب به رزین آغشته می‌گردند)، می‌باشد به طوری که برای فراهم‌شدن یک ترکیب محکم‌تر و یکپارچه‌تر، پس از اتمام لایه‌گذاری، بر روی آن فشار اعمال می‌شود. چنین موردی همانطور که در شکل (۱-۱۶) نشان داده شده است، به وسیله پوشاندن لایه (کیسه) پلاستیکی بر روی چندلایی^۲ خیس و از آنجا بر روی قالب انجام می‌شود. هوای زیر کیسه به وسیله پمپ خلأ مکیده شده و بدین ترتیب تا حد ۱ (Bar) فشار را می‌توان بر روی چندلایی برای یکپارچه شدنش اعمال نمود. روش قالب‌گیری کیسه‌ای^۳ از کیفیت بهتری نسبت به قطعات تولیدشده به روش لایه‌چینی دستی برخوردار می‌باشد. این بهبود ناشی از کاهش هوای حبس‌شده و همچنین حذف رزین اضافه در قطعات تولیدشده به این روش است [۸].



شکل (۱-۱۶): لوازم و تجهیزات مورد استفاده در روش قالب‌گیری کیسه‌ای [۸]

¹ Hand Layup

² Laminated

³ Vacuum Bagging

۱-۱۲-۲- تجهیزات روش قالب‌گیری کیسه‌ای

با توجه به اینکه تجهیزات تولید تاثیر بسزایی در روش‌های ساخت و تولید سازه‌های کامپوزیتی دارند، در این بخش به معرفی تجهیزات مورد استفاده در تولید به روش قالب‌گیری کیسه‌ای که در شکل (۱-۱۶) نشان داده شده‌اند، می‌پردازیم:

۱-۱۲-۲-۱- جداکننده

رایج‌ترین و قدیمی‌ترین انواع جداکننده‌های قالب در صنعت کامپوزیت، تحت عنوان عمومی واکس‌ها شناخته می‌شوند. یکی از نکات مهم در کاربرد واکس‌ها این است که سطح قالب را باید پیش از اعمال آنها توسط تمیزکننده‌های مناسب این کار (که سطح قالب را آسیب نمی‌رسانند) کاملاً تمیز نمود. واکس‌ها را معمولاً با پارچه‌های تمیز نخی و بدون کرک اعمال می‌کنند. پس از اعمال واکس روی سطح قالب باید آن را پیش از تبخیر کامل حلال‌ها با پارچه دیگری پرداخت نمود. این عمل چندین بار تکرار می‌شود تا از پوشش کامل و یکنواخت آن در تمام بخش‌های قالب اطمینان حاصل شود. عملکرد اصلی لایه واکس اعمال شده روی سطح قالب، پایین آوردن کشش سطحی یا به عبارت دیگر لیزکردن سطح است. شایان ذکر است در هنگام اعمال باید کاملاً از دستورالعمل تولیدکننده پیروی نمود و به تعداد دفعات پوشش‌دهی و فواصل زمانی لازم برای خشک‌شدن در هر مرحله دقت نمود.

۱-۱۲-۲-۱- لایه پارچه‌ای غیرچسبنده

اولین لایه پس از الیاف چیده شده بر روی هم است و معمولاً تا قبل از مرحله رنگ قطعه، روی آن باقی می‌ماند. وظیفه اصلی این لایه حفظ کیفیت سطحی قطعات تا زمان فرایندهای نهایی بر روی قطعه است.

۱-۱۲-۲-۳- فیلم جداکننده منفذدار^۱ (سوراخ‌دار)

این لایه به منظور عبور رزین اضافی واقع در الیاف اولیه و همچنین گازها استفاده شده و پس از لایه پارچه‌ای غیرچسبنده قرار می‌گیرد.

۱-۱۲-۲-۴- پارچه جاذب یا هواگیر

این لایه بعد از عبور رزین اضافی واقع در الیاف اولیه و همچنین گازها از لایه پارچه‌ای غیرچسبنده رزین اضافی را به خود جذب می‌کند و زمینه خروج گاز را فراهم می‌کند.

۱-۱۲-۲-۵- لایه کیسه خلأ

در آخرین مرحله لایه‌چینی روی لایه‌های دیگر قرار گرفته و به عبارتی دیگر کل سطح قالب را پوشانده و سیستم را کاملاً آب‌بند می‌کند. از مهم‌ترین خصوصیات این لایه نهایی قابلیت کشسانی بالا جهت تحمل سطوح کوچک، تیز و تحمل حرارتی در دماهای بالا جهت پایداری نمونه در هنگام پخت درون کوره است.

۱-۱۲-۲-۶- نوار آب‌بند کننده^۲

از این مواد برای آب‌بندی قالب و کیسه خلأ استفاده می‌شود. جنس این مواد از سیلیکون بوده و قابلیت تحمل دماهای بالا را به منظور اعمال پخت، داراست.

۱-۱۲-۲-۷- پمپ خلأ

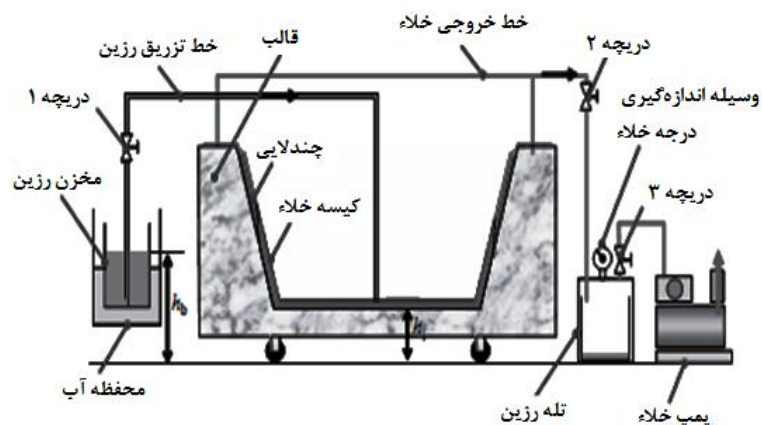
هوای زیر کیسه خلأ به وسیله پمپ خلأ مکیده شده و بدین ترتیب تا حد ۱ (Bar) فشار را می‌توان بر روی چندلایی برای یکپارچه شدنش اعمال نمود.

^۱ Perforated film

^۲ Sealant Tape

۱-۱۲-۳- روش تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)

روش تزریق رزین به کمک خلأ^۱ همان طور که در شکل (۱-۱۷) شماتیک نحوه اجرای آن نشان داده شده است، فرایندی است که در آن از فشار خلأ برای راندن رزین به داخل لایه‌ها استفاده می‌شود. الیاف تقویت‌کننده‌ای نظیر الیاف شیشه، الیاف کربن و آرامید به صورت خشک داخل قالب قرار داده می‌شوند و خلأ قبل از ورود رزین اعمال می‌شود. به محض اینکه خلأ به فشار لازم رسید، رزین از طریق لوله‌های تزریق به داخل لایه‌ها مکیده می‌شود. لازم به ذکر است که مهمترین انواع الیافی که با استفاده از فرایند ساخت تزریق رزین به کمک خلأ مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً با توجه به نوع بارگذاری به شکل‌های تک‌جهته، چندمحوره (دوجته و سه‌جهته) است که نوع بافت آن، متناسب با فرایند تولید به صورت‌های کوچک‌زده شده یا بافته شده خواهد بود.



شکل (۱-۱۷): شماتیکی از فرایند تزریق رزین به کمک خلأ

۱-۱۲-۴- تجهیزات فرایند تزریق رزین به کمک خلأ

همانطور که گفته شد با توجه به اینکه تجهیزات تولید تاثیر بسزایی در روش‌های ساخت و تولید سازه‌های کامپوزیتی دارند، در این بخش به معرفی تجهیزاتی که به طور خاص در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ استفاده می‌شود با ذکر این نکته که اکثر تجهیزات مورد استفاده در این روش با روش قالبگیری کیسه‌ای یکسان است، می‌پردازیم:

^۱ Vacuum Infusion Process

۱-۱۲-۴-۱- شبکه جریان رزین^۱

از این شبکه جهت عبور بهتر رزین در زیر کیسه خلأ استفاده می‌شود. از دیگر وظایف این لایه مشاهده و بررسی جبهه سیلان رزین در حین فرایند است. نوع شبکه‌بندی در این لایه بسته به ابعاد کار متفاوت خواهد بود. از دیگر وظایف فیلم سوراخ‌دار سهولت در جدایی شبکه جریان رزین از لایه پارچه‌ای غیرچسبنده در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ می‌باشد.

۱-۱۲-۴-۲- لوله‌ها، اتصالات و دریچه‌های تزریق

لوله‌ها، اتصالات و دریچه‌های تزریق برحسب استراتژی تزریق و محاسبات سیالاتی تعیین محل و اندازه می‌شود.

۱-۱۲-۴-۳- تله رزین

مخزنی قبل از پمپ خلأ می‌باشد که رزین اضافی تزریق شده بر اثر فشار خلأ مکیده شده و در خروجی در این مخزن به دام می‌افتد تا وارد پمپ خلأ نشود.

۱-۱۲-۵- مزایا و معایب روش قالب‌گیری کیسه‌ای و تزریق رزین به کمک خلأ

یکی از اساسی‌ترین اهداف سازندگان، دستیابی به کاهش زمان ساخت، افزایش طول عمر قطعات، تأمین خواص مکانیکی، فیزیکی و کاهش هزینه‌های تولید است و هنگامی که مسئله رقابت در صنعت مطرح باشد، عامل زمان ساخت و کاهش هزینه بسیار اهمیت پیدا می‌کند. برای رسیدن به کیفیت بالاتر کامپوزیت‌ها، باید از روش‌های ساخت مناسب‌تری نسبت به روش‌های سنتی استفاده شود. در این جا به بررسی معایب و مزایای تولید قطعات کامپوزیتی به روش قالب‌گیری کیسه‌ای و فرایند تزریق رزین به کمک خلأ پرداخته می‌شود. مزایای روش قالب‌گیری کیسه‌ای که قبلاً گفته شد اما معایب این روش عبارت‌اند از:

^۱ Net Bleeder

۱- با اینکه قالب‌گیری کیسه‌ای خواص لایه‌چینی دستی را بهبود می‌بخشد، اما باز هم مقدار جذب رزین اضافی، وابستگی زیادی به متغیرهایی مثل عوامل زمانی، مقدار رزین مصرفی و زمان اعمال خلأ دارد.

۲- وابستگی کیفیت قطعه تولیدی به نحوه کار کارور، همچنان پابرجاست.

۳- زمان کاری بسیار وابسته به زمان سرویس‌دهی^۱ رزین است.

۴- احتمال قرارگیری نامناسب الیاف و افت خواص مکانیکی به دلیل ذات فرایند دستی این روش.

۵- تغییر ضخامت چندلایه‌ها و در نتیجه تغییر وزن قطعه نسبت به مقدار پیش‌بینی‌شده در

طراحی، ناهماهنگی قطعات و تغییر درصد الیاف و در نتیجه افت خواص مکانیکی قطعه [۶ و ۱۸].

به‌منظور برطرف کردن این معایب محققان در پی روش‌های جدیدی برآمده‌اند. روش تزریق رزین

به کمک خلأ یکی از روش‌های مدرن تولید است که هم کیفیت بالای قطعات حاصل می‌گردد و هم

امکان مکانیزه کردن خط تولید به این روش وجود دارد. با توجه به هدفی که از طراحی فرایند تولید

به این روش مورد توجه بوده است، انتظار داریم این روش نسبت به روش‌های قبلی دارای مزایایی باشد.

مزایای روش فرایند تزریق رزین به کمک خلأ را می‌توان به صورت خلاصه چنین بیان کرد:

۱- افزایش درصد حجمی الیاف: رزین به‌تنهایی ترد و شکننده است و وجود رزین اضافی سبب

شکننده‌تر شدن قطعه و کاهش استحکام آن می‌شود. در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ به دلیل

اینکه الیاف در ابتدا فشرده‌شده و سپس رزین عبور می‌کند، رزین اضافی کشیده شده و در نتیجه

قطعه حاصل سبک‌تر و درعین حال خواص مکانیکی بهتری خواهد داشت.

۲- اتلاف کمتر رزین: پس از چند بار انجام فرایند تزریق رزین به کمک خلأ، مقدار رزین قابل

پیش‌بینی بوده و می‌تواند اتلاف آن به مقدار کمی برسد.

^۱ Pot Life

- ۳- محدودیت کمتر در زمان مجاز استفاده از رزین (زمان سرویس‌دهی): از آنجا که در فرایند تزریق، الیاف به صورت خشک چیده‌مان می‌شوند می‌توان لایه‌چینی را در فرصت لازم به بهترین شکل انجام داد و سپس تزریق رزین را اعمال کرد.
- ۴- قابلیت کنترل خوب خواص مکانیکی قطعه تولیدشده با استفاده از لایه‌چینی مناسب (آرایش الیاف در روش قالب‌گیری کیسه‌ای وابسته به نحوه اجرا توسط کارور است).
- ۵- آلودگی بسیار کمتر: چون در حین کار از هیچ‌گونه قلم یا غلتک آغشته به رزین استفاده نمی‌شود و بخار سمی بسیار کمتری در محیط تولید می‌شود لذا آلودگی کمتری دارد.
- ۶- یکنواختی بسیار خوب قطعه: چون در این فرایند رزین با حجم مشخصی و در یک مرحله در داخل الیاف تزریق می‌شود، لذا یکنواختی بیشتری در قطعه مشاهده می‌شود.
- ۷- با این روش امکان تولید قطعات بزرگ مانند پره‌های توربین بادی وجود دارد.

۱-۱۳- تعریف، ضرورت و کاربرد پوسته‌ها

پوسته‌ها سازه‌هایی هستند که شکل اولیه آنها خمیده است و ضخامت آنها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر است [۱۹]. معیاری که برای تعریف یک پوسته جدار نازک به کار برده می‌شود، این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچک‌تر، کمتر از $0/05$ باشد.

امروزه پوسته‌ها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد کاربرد وسیعی در صنایع دارند. سازه‌های پوسته‌ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه‌ای از بهترین سازه‌ها محسوب می‌شوند و به همین دلیل و با درک ویژگی‌های مهم سازه‌های پوسته‌ای از جمله ظرفیت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسين همواره از سازه‌های پوسته‌ای در طراحی و ساخت سازه‌های مختلف استفاده می‌کنند. از کاربردهای پوسته‌ها می‌توان در سازه‌های هوایی برای بدنه، بال و دم هواپیما، بدنه موشک و غیره اشاره کرد [۲۰].

۱-۱۴- بررسی روش‌های مختلف حل مسئله

استفاده بسیار وسیع از پوسته‌ها به‌عنوان اجزاء سازه‌ای باعث شده است که پژوهش‌های دیرینه و بسیار وسیعی پیرامون آنها انجام شود. پژوهش‌ها به یکی از سه روش زیر استوار هستند:

۱- بررسی تحلیلی سازه‌ها

۲- بررسی عددی سازه‌ها

۳- بررسی تجربی سازه‌ها

امروزه سه روش فوق رایج بوده و گاهی از هر سه روش برای انجام یک تحقیق استفاده می‌شود. حل تحلیلی سازه‌ها، روشی است که بر یک یا چند اصل فیزیکی استوار است که توسط روش‌های ریاضی توسعه داده شده‌اند. این روش حل عمدتاً برای مسائل و سازه‌های با هندسه‌های ساده و بارگذاری‌ها و شرایط مرزی متقارن جواب‌های دقیقی ارائه می‌دهد و حل بسیاری از مسائل ساده در کتاب‌های منتشرشده موجود است. از روش‌های تحلیلی سازه‌ها می‌توان به تحلیل تنش یک مخزن استوانه‌ای تحت فشار داخلی یا خارجی و یا یک ورق تحت کشش که یک سوراخ در آن ایجاد شده است، اشاره نمود. در روش تحلیلی اگر اندکی مسئله از لحاظ هندسه، بارگذاری یا شرایط مرزی پیچیده شود، دست یافتن به جواب دقیق بسیار دشوار و حتی غیرممکن می‌گردد. در مواردی نیز جواب‌های تقریبی برای حل تحلیلی سازه‌ها به دست می‌آید. شاید دلیل تقریبی بودن این جواب‌ها فرض‌های ساده کننده‌ای باشد که برای حل معادلات به‌کار رفته‌اند. عدم توانایی در حل معادلات دیفرانسیلی که از حل‌های تحلیلی حاصل می‌شوند، از مهم‌ترین مشکلات انجام حل تحلیلی است. حل عددی سازه‌ها نیز روش دیگری است که امروزه توسط برنامه‌های قدرتمند المان محدودی که به بازار صنعت آمده است، انجام می‌گیرد. این روش بسیار ارزان‌قیمت و مقرون به‌صرفه است و همواره می‌توان از آن بهره برد. زمانی که استفاده از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی گران‌قیمت و یا غیرممکن باشد، استفاده از حل عددی می‌تواند کمک زیادی به انجام تحلیل بکند.

رایج‌ترین روش عددی که امروزه مورد استفاده مهندسين و محققين قرار می‌گیرد، روش المان محدود است که به وسیله آن یک سازه پیوسته تبدیل به تعداد محدودی المان سازه‌ای می‌شود. در این زمینه کتاب‌های بسیار زیادی تألیف و منتشر شده است که بیانگر اهمیت و قابلیت استفاده از این روش در حل مسائل سازه‌ای است.

آخرین روش برای حل مسائل سازه‌ای روش آزمایش یا روش تجربی است. هیچ‌گاه نمی‌توان جواب‌های تحلیلی یا عددی را بر جواب‌های حل تجربی ترجیح داد. در بسیاری از مسائل روابط تحلیلی وجود دارند که توسط نتایج آزمایش بهینه شده‌اند؛ بنابراین اولین معیار مقایسه برای صحت نتایج عددی یا تحلیلی مقایسه با نتایج تجربی است. به دست آوردن نتایج تجربی می‌تواند به قیمت بسیار بالایی تمام شود؛ بنابراین استفاده از آن مستلزم عدم محدودیت در مسائل اقتصادی است [۲۰]. با توجه به اینکه روش عددی تحلیل له‌شدن^۱ سازه‌های کامپوزیتی بسیار پیچیده است، آزمایش‌های تجربی نقش اصلی را در تحلیل این سازه‌ها ایفا می‌کنند و در این پایان‌نامه نیز از روش تحلیل تجربی استفاده شده است.

۱-۱۵- معرفی تحلیل آماری تاگوچی

در روش‌های آماری سنتی، میانگین‌ها برای مقایسه نتایج و انحراف از معیار برای توانایی ادعای وجود اختلاف مشخص بین دو گروه استفاده می‌شوند. در روش تاگوچی نسبت سیگنال به نویز^۲ (S/N) برای مقایسه نتایج به کار می‌رود. مقوله نسبت سیگنال به نویز کاملاً در ارتباط با توانا بودن طراحی یک محصول است. استحکام طراحی به توانایی محصول برای مقابله با تغییرات بستگی دارد و بر مبنای این ایده است که کیفیت، تابع طراحی مناسب است. یک طراحی بدون عیب یا یک محصول خوب دارای سیگنال قوی است که کارایی موردنظر را داشته باشد و با تغییرات نویزهای داخلی یا خارجی مقابله کند [۲۱].

^۱ Crush

^۲ Signal to Noise Ratio

در روش تاگوچی متغیرها به دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل (دارای هزینه زیاد برای کنترل)، تقسیم می‌شوند. هرچه مقدار نویز بیشتر باشد، ناسازگاری محصول بیشتر است. از آن جایی که یک فرایند تولید خوب نیازمند طراحی خوب است، قبل از شروع فرایند تولید باید استحکام طراحی مطالعه شود. از نظر تاگوچی، اگر یک محصول برای جلوگیری از شکست در زمینه کاری‌اش طراحی شود، در نتیجه آن محصولات معیوب به‌طور هم‌زمان کاهش پیدا می‌کند. این یکی از جنبه‌های روش تاگوچی است که اغلب برداشت اشتباهی از آن می‌شود. در این روش درواقع تلاشی برای کاهش تغییرات نمی‌شود؛ بلکه تلاش بسیاری می‌شود که اثرات ناشی از آن را کم کرد. نویز در طی فرایند وجود دارد، ولی تلاش این است که با طراحی یک سیگنال قوی اثرات ناشی از آن را کم کرد. تلاش روش تاگوچی تنها انتخاب عامل‌های کنترلی که به محصولی بهتر می‌انجامند، نیست. بلکه هدایت کردن یک فرایند با حساسیت کم به نویز مد نظر است. باوجود اینکه نویز را نمی‌توان حذف کرد، می‌شود آن را به حداقل رساند [۲۱].

نسبت سیگنال به نویز، میانگین را همانند انحراف بین جواب‌ها به حساب می‌آورد؛ بنابراین می‌توان تحلیل با آن را دوبعدی در نظر گرفت؛ درحالی‌که روش‌های عادی تحلیل تک‌بعدی هستند. بااین‌حال، سیگنال به نویز بی‌بعد برای اندازه‌گیری عامل‌های کنترلی که اثر منفی بر کارایی یک طراحی دارند، استفاده می‌شود و اجازه تنظیم راحت عامل‌ها را می‌دهد. با داشتن یک فرایند مطمئن، تنظیمات به‌راحتی با استفاده از نسبت سیگنال به نویز، برای رسیدن به هدف مطلوب انجام می‌شوند. نسبت سیگنال به نویز از جهتی ترکیب میانگین و انحراف‌هاست. ایجاد ثبات بیشتر و یا کم شدن انحرافات بین مقادیر، به این نسبت می‌افزایند. از نسبت سیگنال به نویز می‌توان برای نزدیک شدن به مقدار هدف و یا برای کاهش انحرافات در کیفیت محصول استفاده کرد. برای مثال یکی از نسبت‌هایی که به تاگوچی مربوط است، مقدار بزرگ‌تر بهتر است، می‌باشد. این چنین نسبتی وقتی انتخاب می‌شود که مقدار هدف مشخصی مورد نظر باشد [۲۱].

روش تاگوچی ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی است که در مطالعات تجربی استفاده می‌شود. این روش می‌تواند با کمترین تعداد آزمایش‌ها، شرایط بهینه را تعیین کند. در این روش تغییرات با عاملی با نام نسبت سیگنال به نویز معرفی می‌شود و شرایط آزمایشی که دارای بیشترین مقدار سیگنال به نویز باشد به‌عنوان شرایط بهینه مطرح می‌شود.

برخی از مزایای این روش عبارت‌اند از:

۱- سادگی درک و به‌کارگیری روش

۲- گستره نامحدود کاربردها

۳- کاهش تغییرات بدون جابجایی اثرات آنها

۴- کاهش زمان و هزینه آزمایش‌ها

۵- کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز

گام‌های اجرایی روش تاگوچی نیز عبارت‌اند از:

۱- تعیین تابع هدفی که باید بهینه شود.

۲- تعیین عوامل کنترلی و سطوح هر کدام.

۳- انتخاب یک آرایه متعامد مناسب.

۴- انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری خروجی‌ها.

۵- محاسبه نسبت سیگنال به نویز و انتخاب پارامترهای مربوط به شرایط بهینه.

۶- تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی خروجی در حالت بهینه.

۷- انجام آزمایش‌های تأییدی و برنامه‌ریزی برای عملکردهای آینده.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در روش تاگوچی برای مشخص کردن پارامترهای بهینه و تأثیرگذاری

آنها پارامترهای ورودی فرایند را به دو دسته عوامل کنترلی و عوامل غیر کنترلی تقسیم می‌کنیم.

۱- عوامل کنترلی عواملی هستند که به‌منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی فرایندهای ساخت

بکار می‌روند.

۲- عوامل غیر کنترلی تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند؛ اما ما آنها را بر حسب شرایط ثابت فرض می‌کنیم.

در روش تاگوچی از یک تابع زیان^۱ برای محاسبه تغییرات موجود بین نتایج و مقدار مورد نظر استفاده می‌شود؛ و این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالت‌های مختلف است:

حالتی که مقدار کوچک‌تر، برای ما مد نظر است و بهترین انتخاب می‌باشد تابع زیان طبق معادله (۴-۱) می‌باشد:

$$SB = \frac{1}{n} \sum (y_i)^2 \quad (4-1)$$

حالتی که مقدار بزرگ‌تر، برای ما مد نظر است و بهترین انتخاب می‌باشد تابع زیان طبق معادله (۵-۱) می‌باشد:

$$LB = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{1}{y_i}\right)^2 \quad (5-1)$$

حالتی که اندازه اسمی، برای ما مد نظر است و بهترین انتخاب می‌باشد تابع زیان طبق معادله (۶-۱) می‌باشد:

$$NB = \frac{1}{n} \sum (y_i - y_o)^2 \quad (6-1)$$

(در این فرمول‌ها n تعداد تکرارها و y خروجی‌های اندازه‌گیری شده است.)

سپس بعد از محاسبه مقدار تابع زیان برای هر خروجی از معادله (۷-۱) مقدار سیگنال به نویز کل را محاسبه می‌نماییم [۲۱]:

$$SN = -10\text{Log}(L_i) \quad (7-1)$$

۱-۱۶- جذب انرژی

در نیمه دوم قرن گذشته، مسائل زیادی مربوط به جذب انرژی مطرح شده است که این مسائل به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه‌هایی، در حین له‌شدن کمک

^۱ Loss Function

می‌کند. این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه‌های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارت‌های انسانی و مادی به شدت کاهش می‌یابد. کاربردهای این شاخه از علم مهندسی به‌طور گسترده در زندگی امروز مورد استفاده قرار می‌گیرد، مثل تصادفات وسایل نقلیه (اتومبیل، هواپیما، کشتی و ...) و سازه‌های ساحلی و تانکرهای نفتی. یک جاذب انرژی، سیستمی است که بتواند تمام یا قسمتی از انرژی جنبشی را به شکل دیگری از انرژی تبدیل کند.

برای نشان دادن قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک، از پارامترهای نیروی بحرانی له‌شدن و انرژی جذب‌شده بر واحد جرم^۱ (SEA) استفاده می‌شود. نیروی بحرانی له‌شدن، مقدار حداکثر نیرو در نمودار نیرو - جابه‌جایی است که باعث له‌شدن سازه می‌شود و مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم نیز برابر است با نسبت سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی بر جرم سازه.

یک جاذب انرژی ایده‌آل، خطی موازی با محور افقی در نمودار نیرو - جابه‌جایی است که حداقل نیروی بحرانی له‌شدن و بیشترین مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم را دارد. همچنین برای نشان دادن قابلیت جذب انرژی از پارامتر دیگری با نام نیروی میانگین له‌شدن استفاده می‌شود که برابر با مقدار سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی تقسیم بر ارتفاع فشردگی نمونه است.

تعداد جاذب‌های انرژی شناخته‌شده زیاد است؛ ولی متداول‌ترین اجزاء سازه‌ای کامپوزیتی که به‌عنوان جاذب انرژی شناخته می‌شوند عبارت‌اند از:

۱- پوسته‌های جدار نازک (با مقاطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی)

۲- ناودانی^۲

۳- نبشی^۳

۴- نمونه‌های موج‌دار^۴

^۱ Specific Energy Absorption

^۲ Channel

^۳ Corner

^۴ Corrugated

محققین زیادی روی قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی کار کرده‌اند. همانطور که در جدول (۷-۱) نشان داده شده است، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سازه‌های کامپوزیتی در مقایسه با سازه‌های فلزی، توانایی جذب انرژی بر واحد جرم بالایی دارند؛ بنابراین قابلیت خوبی برای کاهش وزن سازه‌ها داشته درحالی‌که همزمان کارایی له‌شدن سازه در برابر ضربه را بالا می‌برند.

جدول (۷-۱): پتانسیل کاهش جرم مواد مختلف نامزد کاهش وزن نسبت به فولاد [۹]

مواد	چگالی (g/cm ³)	چگالی/استحکام	چگالی/مدول	هزینه	پتانسیل کاهش جرم (%)
فولاد نرم	۷/۸۷	۱	۱	۱X	۰
فولاد استحکام بالا	۷/۸۷	۱/۸۶X	۱X	۰/۹-۱/۲X	۰-۱۰
فولاد استحکام بالا پیشرفته	۷/۸۷	۲/۲۵X	۱X	۰/۸-۱/۵X	۰-۳۰
آلومینیوم	۲/۷	۳/۹۵X	۱/۰۲X	۱/۳-۲X	۳۰-۶۰
منیزیم	۱/۷۴	۳/۶۶X	۱/۰۲X	۱/۵-۲/۵X	۳۰-۷۰
تیتانیوم	۴/۵۱	۴/۷۳X	۰/۹۸X	۱/۵-۱۰X	۴۰-۵۵
کامپوزیت‌های زمینه فلزی	۱/۹-۲/۷	۳/۸۱X	۱/۴۵X	۱/۵-۳X	۳۰-۷۰
سرامیک‌ها	۳/۹	۰/۷X	۳/۰۵X	۱/۵-۳X	۱۰-۳۰
پلاستیک‌ها	۰/۹-۱/۵	۰/۸۲X	۰/۰۸X	۰/۷-۳X	۲۰-۵۰
SMC	۱/۱-۱/۹	۴/۳۹X	۱/۱۶X	۰/۵-۱/۵X	۲۰-۳۰
کامپوزیت‌های الیاف شیشه	۱/۴-۲	۴/۷۴X	۰/۵X	۰/۹-۱/۵X	۲۵-۳۵
کامپوزیت‌های الیاف کربن	۱/۴-۱/۶	۱۸/۳X	۱/۹۳X	۱/۵-۵X	۵۰-۹۰

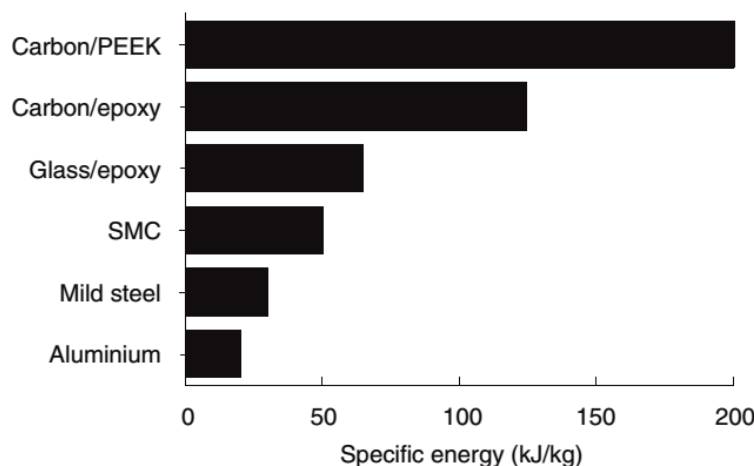
لوله‌های متقارن محوری^۱، به علت سادگی ساخت و نزدیک بودن به هندسه سازه‌های مقاوم به له-شدن^۲ واقعی، برای انجام بیشتر کارهای تجربی روی مواد کامپوزیتی جاذب انرژی به کار می‌رود. شکل (۱۸-۱) مقادیر جذب انرژی مخصوص را برای تعدادی از فلزات و مواد کامپوزیت پلی‌مری نشان می‌دهد. با نامهای، الیاف کربن در زمینه گرمانرم پلی‌اتراکتون^۳ (PEEK)، الیاف کربن در زمینه

¹ Axi-symmetrical

² Crashworthy

³ Polyetheretherketone

اپوکسی، الیاف شیشه در زمینه اپوکسی، الیاف شیشه ناپیوسته اتفاقی^۱ (mat) در زمینه پلی استر (SMC). مقدار انرژی جذب شده برای الیاف کربن در زمینه گرمانرم پلی اتراکتون (PEEK)، (تقریباً ۲۰۰ (kJ/kg) حدوداً ۲ برابر کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی می‌باشد. که این موضوع همانطور که قبلاً در جدول (۴-۱) نشان داده شده بود به دلیل چقرمگی شکست و چقرمگی شکست بین لایه‌ای بالاتر رزین‌های گرمانرم است. اما از آنجایی که رزین‌های گرماسخت نسبت به گرمانرم‌ها دارای دمای نرم‌شدگی بالاتر و دارای خصوصیات خزشی بهتری هستند، در دمای بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بالاخره این‌که گرماسخت‌ها نسبت به بیشتر گرمانرم‌ها در برابر حمله شیمیایی مقاوم‌ترند. بنابراین برای کاربرد به عنوان جاذب انرژی اولویت دارند.



شکل (۱-۱۸): مقایسه مواد رایج و مواد کامپوزیت از نظر جذب انرژی مخصوص [۲۲]

لوله‌های کامپوزیتی به راحتی می‌توانند برای یک لهیدگی پایدار^۲ طراحی شوند. آنها می‌توانند برای جذب انرژی ضربه^۳ در شرایط کنترل شده با فراهم کردن یک ماشه^۴ برای شروع له شدن پیش‌رونده^۵ طراحی شوند. توانایی سازه برای جذب انرژی ضربه و بقا، له‌شدگی^۶ سازه نامیده می‌شود. از این تعریف

¹ Chopped strand glass fibre mat

² Stable Crashing

³ Impact

⁴ Trigger

⁵ Progressive Crushing

⁶ Crashworthiness

استنباط می‌شود که سازه شایسته له‌شدن ایده‌آل که مثلاً در اتومبیل به کار می‌رود در یک حادثه برخورد بایستی:

۱- انرژی جنبشی اتومبیل را جذب کند.

۲- این انرژی را در یک بازه زمانی تلف کند به‌گونه‌ای که مطمئن شد این کاهش سرعت وسیله نقلیه از یک مقدار بحرانی (کاهش سرعتی که شتابی ۲۰ برابر شتاب جاذبه زمین ایجاد می‌کند) کمتر است؛ زیرا در غیراینصورت منجر به صدمات جبران‌ناپذیر مغزی در سرنشین‌ها می‌گردد.

بنابراین نمونه‌های آزمایش در آزمایشگاه بایستی به‌گونه‌ای آزمایش شوند که هم میزان انرژی قابل جذب ثبت شود و هم طول مدت‌زمانی که این انرژی جذب می‌گردد؛ یعنی در واقع هم مقدار و هم نرخ جذب انرژی از ویژگی‌های مهم مواد خاص است. اگر دو نوع متفاوت از مواد با قابلیت جذب انرژی یکسان موجود باشند، موادی که این انرژی جذب‌شده را در یک بازه زمانی طولانی‌تر تلف می‌کنند، مناسب‌تر می‌باشند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، مقدار انرژی جذب‌شده توسط المان سازه‌ای با مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی برابر است که نیرو حاصل جرم ضربه زننده و کاهش سرعت بعد از ضربه است و نرخ انرژی جذب‌شده، به مواد تشکیل‌دهنده آن و همچنین شکل سازه بستگی دارد. برای بررسی این مسائل هم آزمایش‌های شبه‌استاتیک^۱ و هم ضربه در آزمایشگاه می‌تواند انجام گیرد.

آزمایش ضربه، یک شبیه‌سازی واقعی از شرایط واقعی برخورد است. مقدار انرژی جذب‌شده در سازه وقتی که آزمایش ضربه انجام می‌شود و نرخ انرژی که تلف می‌شود به‌طور دقیق می‌تواند رفتار سازه در حادثه برخورد واقعی را تفسیر نماید.

در آزمایش‌های شبه‌استاتیک نمونه‌های لوله‌ای، له‌شدن در یک نرخ ثابت صورت می‌گیرد که در این حالت نیز انرژی جذب شده مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی است. به‌هرحال نیرو در این

^۱ Quasi-Static

حالت در واقع واکنش نمونه آزمایش به له شدن آن است و دیگر در این روش آزمایش، عبارت کاهش سرعت وجود ندارد به علت اینکه له شدن در یک نرخ بارگذاری ثابت رخ می دهد.

۱-۱۷- مودهای فروریزی له شدن کامپوزیت‌ها

رفتار له شدگی نمونه‌های کامپوزیتی به‌طور کلی می‌تواند به دو دسته پایدار^۱ و ناپایدار^۲ طبقه‌بندی گردد. له شدن ناپایدار به‌وسیله یک قله^۳ نیرو اولیه که با فروریزی فاجعه‌انگیز ناگهانی دنبال می‌شود، شناخته می‌شود که به همین دلیل به آن مود فروریزی فاجعه‌انگیز^۴ نیز می‌گویند. بعد از این فروریزی، نمونه دیگر قادر به تحمل نیروی فشاری قابل ملاحظه‌ای نیست. از طرفی، له شدن پایدار که به آن مود فروریزی پیش‌رونده^۵ نیز می‌گویند به‌وسیله افزایش در نیرو تا رُخ دادن فروریزی اولیه شناخته می‌شود. در این نقطه نمونه اگرچه به‌صورت محلی صدمه می‌بیند، هنوز می‌تواند نیروی فشاری قابل ملاحظه‌ای را از طریق جابه‌جایی بیشتر تحمل کند؛ و با توجه به اینکه اگر له شدن پایدار صورت گیرد جذب انرژی بیشتری داریم. بنابراین تشخیص پایدار یا ناپایدار بودن رفتار له شدن از طریق مودهای فروریزی بسیار مهم است.

ابعاد نسبی یک نمونه لوله کامپوزیتی نقش مهمی در له شدن پایدار در مقابل له شدن ناپایدار بازی می‌کند. نسبت‌های طول به قطر و طول به عرض^۶ برای بیان باریکی نمونه لوله به‌کار می‌رود و ممکن است برای پیش‌بینی اینکه آیا کمانش رخ خواهد داد یا خیر، به کار گرفته می‌شود. به‌طور مشابه، نسبت قطر نمونه به ضخامت دیواره در مقطع گرد یا طول پهلو (ضلع کنار) به ضخامت دیواره در مقاطع چهارضلعی یا سه‌ضلعی، بدین منظور به‌طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۱۷-۱- مودهای له شدن ناپایدار (فاجعه‌انگیز)

همان‌طور که در شکل (۱-۱۹) قابل مشاهده است، یک لوله نازک ممکن است به جهت ناپایداری ستون، دچار کمانش شود.

¹ Stable

² Unstable

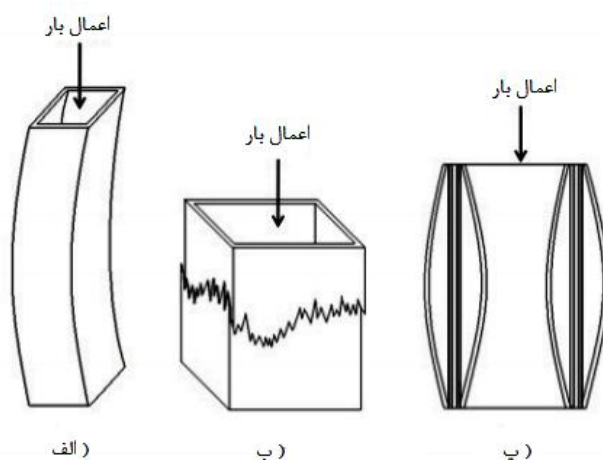
³ Peak

⁴ Catastrophic Failure

⁵ Progressive Failure

⁶ Side

یا به طور مشابه ممکن است وقتی تنش‌های کمانش به اندازه کافی بزرگ باشند، نفوذ داخلی^۱ رخ دهد که در آن ترک‌های محیطی^۲ از نزدیک مرکز نمونه شروع شده و باعث شکافته شدن دیوارها می‌شوند [۲۳ و ۲۴]. وقتی که نفوذ داخلی رخ می‌دهد، نمونه به طور کامل فرو نمی‌ریزد؛ بلکه دو نیمه شروع به جدایش از یکدیگر می‌کنند. سرانجام، جدایش لایه‌ها^۳ می‌تواند به طور ناپایدار رخ دهد. به طور مشخص، گاهی ممکن است به سمت خارج یا داخل لوله، قوس ایجاد شود و در بارهای پائین‌تری فرو بریزد [۲۳ و ۲۵ و ۲۶]. این مود نیز تحت عنوان بشکه‌ای شدن شناخته می‌شود.



شکل (۱-۱۹): انواع مودهای فروریزی ناپایدار، (الف) کمانش، (ب) نفوذ داخلی، (پ) بشکه‌ای شدن [۲۷]

به طور خلاصه، مودهای له‌شدن ناپایدار (فاجعه‌انگیز) برای طراحی سازه‌های جاذب انرژی مناسب نمی‌باشند، زیرا آنها زمانی رخ می‌دهند که:

- ۱- رشد ترک بین لایه‌ای یا بین لایه‌ای ناپایدار رخ دهد.
- ۲- در لوله‌های جدارنازک بلند به خاطر ناپایداری ستون.
- ۳- در لوله‌های تشکیل شده از الیاف تقویت کننده ترد، وقتی که دسته لایه‌ها^۴ به خاطر ترک بین-لایه‌ای کمتر از ضخامت لایه، خم نشوند و یا نشکنند.

موارد زیر از معایب له‌شدن ناپایدار (فاجعه‌انگیز) در طراحی سازه‌های مقاوم به له‌شدن است:

¹ Interpenetration
² Circumferential Cracks
³ Delamination
⁴ Lamina Bundles

۱- له شدن فاجعه‌انگیز با افزایش ناگهانی در نیرو تا یک مقدار قله‌ای که توسط یک نیروی پس‌لهیدگی^۱ پایین دنبال می‌شود، قابل‌شناسایی بوده و در نتیجه آن، مقدار واقعی انرژی جذب‌شده خیلی کمتر است و قله نیرو با توجه به خطر آسیب‌دیدگی مسافران، بسیار بالا است.

۲- سازه‌های جاذب انرژی که بر اساس له شدن فاجعه‌انگیز طراحی می‌شوند، بسیار سنگین‌تر از سازه‌هایی هستند که بر اساس له شدن پیش‌رونده طراحی می‌گردند.

۱-۱۷-۲- مودهای له شدن پایدار (پیش‌رونده)

له شدن پیش‌رونده می‌تواند به وسیله فراهم کردن یک ماشه در یکی از دو انتهای لوله به دست آید. ماشه، در واقع یک متمرکز کننده تنش است که باعث می‌شود، فروریزی در یک محل خاص، در درون سازه شروع شود؛ که این سبب می‌شود، فروریزی با یک رفتار قابل پیش‌بینی کنترل‌شده، از میان سازه با نرخ بارگذاری، پیشروی کند.

موارد زیر مزایای له شدن پیش‌رونده در طراحی سازه‌های جاذب انرژی است:

۱- انرژی جذب‌شده در له شدن پیش‌رونده بزرگ‌تر از انرژی جذب شده در له شدن فاجعه‌انگیز است.

۲- سازه‌هایی که بر اساس له شدن پیش‌رونده طراحی می‌شوند نسبت به سازه‌هایی که بر اساس له شدن فاجعه‌انگیز طراحی می‌گردند، سبک‌تر می‌باشند.

۱-۱۷-۳- انواع مودهای فروریزی پایدار (پیش‌رونده)

مودهای فروریزی زیادی که در یک سازه کامپوزیتی حین له شدن پایدار رخ می‌دهد، مشاهده شده است. دسته‌بندی و تعداد این مودها در پژوهش‌های گذشته، متنوع و گوناگون است. این نکته بایستی مورد توجه قرار گیرد که این مودهای فروریزی ممکن نیست به‌طور دقیق همه فروریزی‌هایی که در نمونه لوله کامپوزیتی مشاهده می‌شود را توصیف کنند.

^۱ Post Failure Load

هول [۲۳] در ۱۹۸۲ میلادی یکی از اولین کسانی بود که مودهای فروریزی مربوط به له شدن پایدار را برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه نوع الکتريکی و کربن دسته‌بندی نمود. مودهای فروریزی را تحت عنوان بازشدن الیاف^۱ و خمش الیاف^۲، بازشدن الیاف و پارگی محوری^۳ و ریزتکه‌تکه‌شدن^۴ دسته‌بندی نمود. در ۱۹۸۵ میلادی کیندرواثر [۲۸] مودهای فروریزی مشاهده شده در یک اندازه عمومی را برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با شیشه، کربن و کولار را تحت عنوان تاشوندگی^۵، لیست نمود. در ۱۹۸۷ میلادی، فارلی [۲۹] چهار مود فروریزی را تحت عنوان کمانش محلی^۶، برش عرضی^۷، شکست ترد^۸ و خمش لایه‌ای^۹ دسته‌بندی نمود. در ۱۹۹۱ میلادی بعد از آزمون دامنه وسیعی از نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با شیشه و کربن، هول به این نتیجه رسید که دو نوع مود فروریزی گسترده وجود دارد: بازشدن الیاف و تکه‌تکه شدن [۲۶].

فارلی و جونز [۳۰] در ۱۹۹۲ میلادی به‌طور اساسی روی این مودهای فروریزی به توافق رسیدند، اما آنها نام‌گذاری متفاوتی انجام دادند، تحت عنوان برش عرضی و خمش لایه‌ای. یک مود فروریزی سوم نیز تحت عنوان کمانش محلی نام‌گذاری شد که برای کولار و سایر کامپوزیت‌های تقویت‌شده انتخاب‌شده به کار گرفته شد. انواع دسته‌بندی‌های دیگری نیز برای مودهای فروریزی پیشنهاد شده است که همه مؤلفین با آن ترکیب از مودهای فروریزی موافق هستند و به جهت تعداد متغیرهایی که روی ویژگی‌های له‌شدگی نمونه‌های لوله کامپوزیتی اثر می‌گذارند، رایج می‌باشند [۲۴ و ۲۶ و ۲۸ و ۳۰ و ۳۱].

¹ Fiber Splaying

² Fiber Bending

³ Axial Tearing

⁴ Micro-Fragmentation

⁵ Fracture or Folding

⁶ Local Buckling

⁷ Transverse Shearing

⁸ Brittle Fracture

⁹ Lamina Bending

دسته‌بندی‌هایی که توسط هول و فارلی [۲۶ و ۳۰] ارائه شده‌اند، اغلب از اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی بوده و آنها معتقد بودند که این استاندارد برای توصیف له‌شدن پایدار کامپوزیت‌ها بایستی به کار برده شود. بر این اساس سه دسته پرکاربرد موده‌های فروریزی تحت عناوین زیر می‌تواند نام‌گذاری شود:

۱- بازشدن الیاف (خمش لایه‌ای)

۲- تکه‌تکه شدن (برش عرضی)

۳- چین خوردگی (تاشوندگی یا کمانش محلی یا آکاردئونی)

به‌علاوه، ترکیب بازشدن الیاف و تکه‌تکه شدن، تحت عنوان شکست ترد نام‌گذاری می‌شود و بسیار پرکاربرد است؛ بنابراین چهار مود فروریزی پایدار وجود دارد. ویژگی‌های کلیدی انواع فروریزی که تولید می‌شود و مکانیسم‌های جذب انرژی اصلی مرتبط با هر مود فروریزی در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۱۷-۳-۱- مود بازشدن الیاف

شکل (۱-۲۰ الف)) سطح مقطع یک لوله خاص که با مود فروریزی بازشدن الیاف تخریب شده است را نشان می‌دهد. ویژگی کلیدی این مود فروریزی، ترک‌های بزرگ (بلندتر از ضخامت چندلایه) بین-لایه‌ای^۱، درون‌لایه‌ای^۲ و محوری است که الیاف را به دسته لایه‌های مجزا تقسیم می‌کند و تحت عنوان ساقه برگ‌ها^۳ نامیده می‌شود [۲۹]. این ساقه برگ‌ها توسط صفحه اعمال بار وادار به خم شدن یا انحناء به داخل یا خارج دیواره لوله می‌شوند. شعاع این انحناء وابسته به خواص الیاف، زمینه و چندلایه است (انواع خرابی یک چندلایه کامپوزیتی عبارتند از: ۱- بین‌لایه‌ای، در صفحه چندلایه که در آن لایه‌ها از هم جدا شده‌اند. ۲- درون‌لایه‌ای، در امتداد ضخامت که تنها در آن زمینه یا فصل-

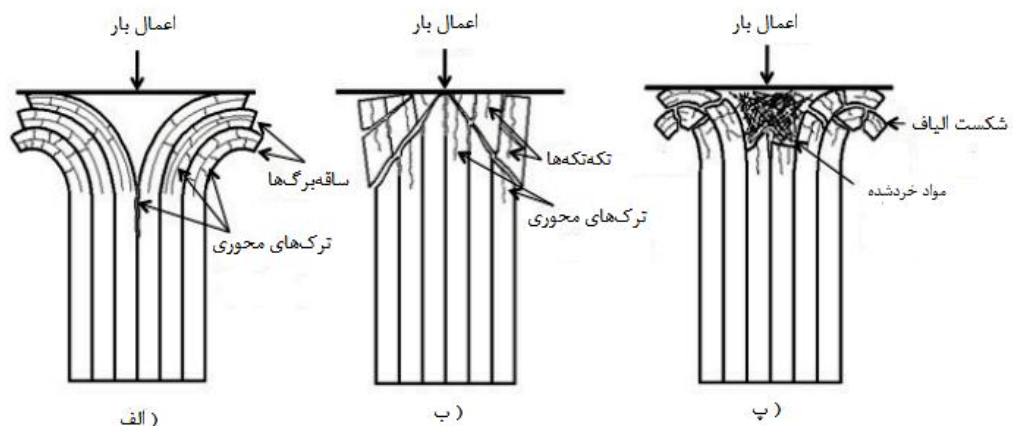
¹ Interlaminar

² Intralaminar

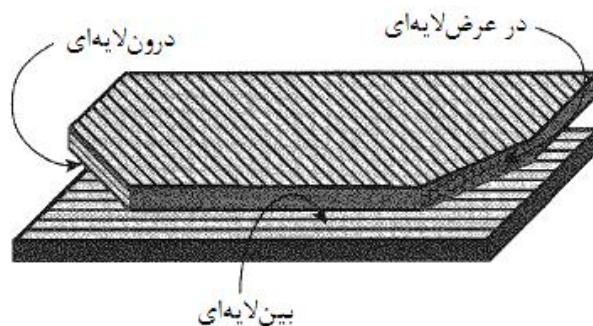
³ Fronds

مشترک الیاف/زمینه شکسته است. ۳- در عرض لایه‌ای^۱، در امتداد ضخامت که الیاف در آن شکسته- اند. که این سه در شکل (۲۱-۱) نشان داده شده است).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌وسیله اختلافات انحناء در ساقه برگ‌ها و جدایش لایه‌ها در دیواره لوله، تنش‌های برشی و کششی در کامپوزیت در حین له‌شدن توسعه می‌یابد. وقتی که این تنش‌ها به سطوح بحرانی می‌رسند، ترک‌ها بر اساس مود I و II شکست پیشروی می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۲۱-۱) نشان داده‌شده است، ترک‌های محوری با نرخ یکسان در نزدیکی صفحه اعمال بار رشد می‌کنند [۳۳].



شکل (۱- ۲۰): انواع موده‌های فروریزی له‌شدن پیش‌رونده، الف) باز شدن الیاف، ب) تکه‌تکه شدن، پ) شکست ترد [۲۷]



شکل (۱- ۲۱): انواع خرابی یک چندلایه کامپوزیتی [۳۴]

¹ Translaminar

تعدادی از ساقه برگ‌ها و الیاف فروریخته به جهت شعاع انحناء کوچک، انتظار می‌رود که از صفحه اعمال بار دور شوند [۲۶ و ۳۰ و ۳۳ و ۳۵]. به‌هرحال، اگر فروریزی گسترده رخ دهد، شکل‌شناسی له‌شدن، ممکن است به‌وسیله مود شکست ترد بهتر توصیف شود.

یکی دیگر از ویژگی‌های منطقه له‌شدن برای مود فروریزی بازشدن‌الیاف، این است که توده الیاف و رزین تخریب‌شده در فاصله بین ساقه برگ‌های خم شده داخلی و خارجی انباشته می‌شود؛ که تحت عنوان توده مواد خردشده^۱ شناخته می‌شود. به‌طورکلی این توده در حین مرحله له‌شدن اولیه شکل می‌گیرد و به‌عنوان مکانیسم پایدار توسعه می‌یابد. این توده وقتی که اندازه آن افزایش می‌یابد، مهم‌تر هم می‌شود و یک عامل کلیدی در مود شکست ترد به‌حساب می‌آید.

هول [۲۶]، نیروهایی که در منطقه له‌شدن حین مود بازشدن الیاف توسعه می‌یابند لیست نمود: نیروهای فشاری روی ساقه برگ‌ها و مواد خردشده، نیروهای اصطکاکی به‌عنوان مثال بین ساقه برگ‌ها و صفحه اعمال بار زمانی که ساقه برگ‌ها روی صفحه اعمال بار می‌لغزند، نیروهای اصطکاکی بین مواد خردشده و ساقه برگ‌ها، نیروهای اصطکاکی بین لایه و ساقه برگ‌ها که آنها با شعاع انحناء‌های مختلفی خم می‌شوند و نیروهای محیطی (هوپ) که از مقاومت الیاف داخلی و خارجی در مقابل انتشار ترک طولی ناشی می‌شوند.

روش‌های اتلاف انرژی برای این مود فروریزی به شرح ذیل خلاصه شده است:

انرژی جذب شده به‌وسیله ترک طولی دیواره، انرژی جذب شده توسط جدایش لایه‌ها و شکل‌گیری ساقه برگ‌ها، انرژی موردنیاز برای خمش ساقه برگ‌ها، انرژی مورد نیاز برای شکست الیاف، انرژی جذب شده به‌وسیله اشکال مختلف اصطکاک که در بالا عنوان شد و سرانجام، سایر روش‌های شکل‌گیری ترک مانند شکافت‌های محوری لوله [۳۳]؛ اما مقدار انرژی جذب شده به‌وسیله هر روش اتلاfi، اگرچه نشان داده شده است که اثرات اصطکاکی گوناگون بیش از نیمی از کل انرژی جذب شده برای مود فروریزی بازشدن‌الیاف را تشکیل می‌دهند، همچنان غیرواضح باقی می‌ماند [۳۶].

^۱ Debris Pile

۱-۱۷-۳-۲- مود تکه تکه شدن

شکل (۱-۲۰ (ب)) یک سطح مقطع خاص از دیواره لوله که به وسیله مود تکه تکه شدن فرو ریخته است را نشان می دهد. ویژگی کلیدی این مود فروریزی شکل گیری ترک های بین لایه ای، درون لایه ای و محوری کوتاه (کمتر از ضخامت چند لایه) است [۳۰]. علت کوتاه تر بودن ترک ها می تواند یا ناشی از حداکثر تنش برشی مجاز بیشتر زمینه یا به هم پیوستگی بالاتر الیاف باشد.

هنگامی که له شدن رخ می دهد، تنش های فشاری ایجاد می شوند تا زمانی که فروریزی ناشی از تنش برشی ایجاد شده روی یک صفحه شیب دار نسبت به محور لوله، رخ دهد. این فروریزی برشی از مخلوط شکست الیاف، زمینه، له شدن الیاف و ترک های بین لایه ای نتیجه می شود [۳۱].

در نتیجه این فروریزی برشی، تکه های لایه های مجزا یا تکه تکه های گوه ای شکل در داخل یا خارج لوله ایجاد می شوند. تنش های فشاری در مابقی مواد جداره لوله نیز ایجاد می شود تا فروریزی رخ دهد و فرایند دوباره تکرار شود. این فرایند می تواند اساساً خود تنظیم باشد به مانند لوله هایی با شرایط اولیه مختلف (به عنوان مثال زوایای پخ ماشه) که شکل له شدن یکسانی را تجربه می کنند، به یکباره منطقه له شدن اولیه توسعه می یابد [۳۷].

جذب انرژی مود فروریزی تکه تکه شدن اساساً از شکست الیاف و زمینه ناشی می شود. تا زمانی که ساقه برگ ها یا تکه های دیگری برای لغزش در طول یکدیگر یا صفحه اعمال بار وجود ندارد، اثرات اصطکاکی همان طور که در شکل (۱-۲۰) نشان داده شده است برای کمک به قابلیت جذب انرژی لوله هایی که به وسیله تکه تکه شدن فرو می ریزند، بسیار کوچک هستند [۳۸].

به طور خاص، توده مواد خرد شده در مود تکه تکه شدن وجود ندارد. تکه های شکسته شده در نقطه جلوی برخورد واضح هستند و نقش بیشتری در جذب انرژی بازی نمی کنند. البته به هر حال برای مواد شکسته شده، توده مواد خرد شده می تواند ترک های بزرگ تری را ایجاد کند و در نتیجه مود فروریزی را به نوع مود شکست ترد تغییر دهد [۳۹].

۱-۱۷-۳-۳- مود شکست ترد

شکل (۱-۲۰ (پ)) یک بخش خاص از جداره لوله را نشان می‌دهد که به وسیله مود شکست ترد، تخریب شده است. این مود فروریزی اساساً ترکیبی از مودهای بازشدن الیاف و تکه‌تکه شدن است و خواصی یکسان با هر دو مود فروریزی دارد. ترک‌های طولی که شکل می‌گیرند در نسبت طول به ضخامت دیواره (جداره) مشابه هستند و به اندازه کافی بلند هستند که ساقه برگ‌ها از لایه‌هایی که به وسیله ترک‌ها از یکدیگر مجزا شده‌اند، شکل بگیرند. به هر حال ساقه برگ‌ها با یک شعاع انحناء خم می‌شوند تا اینکه همه ساقه برگ‌ها می‌شکنند. تنش‌های فشاری، بخصوص در بخش مرکزی جداره به اندازه کافی زیاد است که ماده در فشار دچار تخریب شده و یک توده مواد خردشده بزرگ مواد ساییده شده را شکل می‌دهند. این توده مواد خردشده برای شکافتن جداره لوله نزدیک مرکز تلاش می‌کند و به شکل‌گیری ساقه برگ‌ها کمک می‌کند [۲۷].

مودهای فروریزی برای شکست ترد شامل همه موارد مربوط به هم بازشدن الیاف و هم مود فروریزی تکه‌تکه شدن می‌شود. شکست الیاف و زمینه، اصطکاک، خمش ساقه برگ‌ها و رشد ترک همه به کل انرژی جذب شده با این مود فروریزی کمک می‌کنند [۲۷].

۱-۱۷-۳-۴- مود چین خوردگی (تاشوندگی)

این مود فروریزی مشابه مود فروریزی است که توسط لوله‌های فلزی وقتی که تحت بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرند، تجربه می‌شود. این نوع فروریزی زمانی رخ می‌دهد که تنش در دیواره لوله به اندازه کافی بزرگ است تا به طور محلی کمانش کند و یک لولا را شکل دهد. وقتی که تنش دوباره به سطح مورد نیاز افزایش می‌یابد، لولای دیگری زیر قبلی شکل می‌گیرد و فرایند تکرار می‌شود. هر لولا یک تای جدید را شکل می‌دهد تا تمام طول لوله تخریب گردد. این مود فروریزی همچنین تحت عنوان آکاردئونی نیز شناخته می‌شود.

لوله‌هایی که در مود فروریزی چین‌خوردگی (تاشوندگی) فرومی‌ریزند، ممکن است مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از ترک‌های طولی و بین‌لایه‌ای را در طول شکل‌گیری لولا تجربه کنند. شکست الیاف، بخصوص در جهت کشش لولا ممکن است رخ دهد [۳۰]. یکی از مزایای مود فروریزی چین‌خوردگی (تاشوندگی) نسبت به مود بازشدن الیاف یا تکه‌تکه شدن این است که هم زمینه و هم الیاف تا اندازه زیادی بی‌عیب باقی می‌مانند. این اجازه می‌دهد که لوله‌ها یکپارچگی بعد از له‌شدن داشته باشند که می‌تواند برای کاربردهایی که سازه‌های جاذب انرژی در آن نیاز دارند که بعد از برخورد متصل باقی بمانند، مطلوب باشد. این نمونه لوله‌ها شامل بخشی از الیاف نرم هستند که کامپوزیت‌های هیبریدی گاهی اوقات به همین دلیل مورد توجه قرار می‌گیرند [۴۰]. جدول (۸-۱) شامل خلاصه‌ای از ویژگی‌ها و مکانیسم‌های فروریزی و همچنین مکانیسم‌های غالب جذب انرژی کامپوزیت‌ها است.

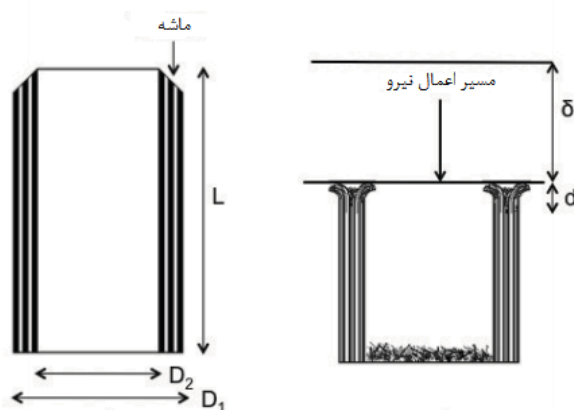
جدول (۸-۱): ویژگی‌های مودهای فروریزی پایدار به‌طور خلاصه [۲۷]

مودهای فروریزی	باز شدن الیاف	تکه تکه شدن	شکست ترد	چین خوردگی
ویژگی‌ها	ترک‌های محوری بلند ساقه برگ‌ها توسعه می‌یابند اما نمی‌شکنند. ممکن است توده مواد خردشده کوچک ایجاد شود.	ترک‌های محوری کوتاه مقاطع دیواره سازه به خارج سازه برش می‌خورد. توده مواد خردشده وجود ندارد.	ترک‌های محوری با طول متوسط ساقه برگ‌ها توسعه می‌یابند و می‌شکنند. توده مواد خردشده بزرگ ایجاد می‌شود.	لولاهای پلاستیکی به‌صورت محلی شکل می‌گیرند. نزدیک لولاها ترک‌های بین- لایه‌ای و درون‌لایه‌ای ایجاد می‌شود.
مکانیسم‌های شکست	مود I و II شکست	شکست الیاف و زمینه	مود I و II شکست شکست الیاف و زمینه	- له‌شدن و تغییر شکل پلاستیک - اندکی شکست الیاف و زمینه
مکانیسم‌های جذب انرژی	- اصطکاک - رشد ترک - خمش ساقه برگ‌ها	شکست الیاف و زمینه	- اصطکاک - شکست الیاف و زمینه - رشد ترک	- تغییر شکل - شکست الیاف و زمینه

۱۸-۱- معرفی کمیت‌های محاسبه جذب انرژی

به لحاظ نظری، مواد جاذب انرژی ایده‌آل یک بار فشاری ثابت را در تمام جابه‌جایی له‌شدن تحمل می‌کنند. در شکل (۱-۲۲) یک مقطع لوله‌ای خاص نشان داده شده است. نمونه از لوله دایره‌ای به طول L با قطرهای خارجی و داخلی به ترتیب D_1 و D_2 تشکیل شده است. یک نوع رایج از مکانیسم ماشه که له‌شدن پایدار را تضمین می‌کند در بالای نمونه که تحت عنوان ماشه با پخ مورب 45° شناخته می‌شود، نشان داده شده است.

لوله بین دو صفحه صاف در یک نرخ جابه‌جایی مشخص تحت فشار له‌شدگی قرار می‌گیرد. اگر لوله کامپوزیتی رفتار له‌شدن پایدار را تجربه کند، ویژگی‌های پس از له‌شدن خاصی را خواهد داشت. علامت (δ) بیان‌کننده جابه‌جایی صفحه بالایی (صفحه اعمال نیرو) است و d ، طول منطقه له‌شدن را بیان می‌کند که قسمتی از لوله است که صدمه^۱ را تحمل می‌کند.



شکل (۱-۲۲): مشخصات هندسی لوله تحت له‌شدن پیش‌رونده [۲۷]

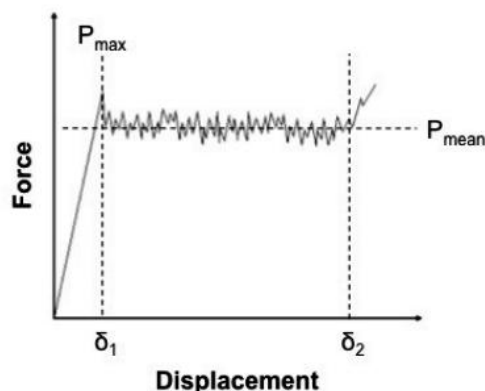
بعد از منطقه له‌شدن^۲ (d)، نمونه هنوز در حالت اولیه و اصلی خود است. توده مواد خردشده از قطعات لایه‌های خم‌شده تشکیل شده است که در داخل حجم لوله دیده می‌شوند.

شکل (۱-۲۳) پاسخ نیرو - جابه‌جایی خاص برای یک لوله که له‌شدن پایدار را تجربه می‌کند، نشان می‌دهد (منحنی با یک منطقه بارگذاری خطی اولیه آغاز می‌شود و تا قله نیرو (P_{max}) بالا

¹ Damage

² Crush Zone

می‌رود که آن از فروریزی محلی لوله در ماشه نتیجه می‌شود). این نقطه را δ_1 می‌نامیم. این قله نیرو با منطقه پس‌له‌شدگی^۱ پایدار دنبال می‌شود که شکل نمودار نیرو - جابه‌جایی در این منطقه دنداندار است. البته نیرو در این منطقه با یک نیروی متوسط ثابت و به‌طور تقریبی (P_{mean}) مشخص می‌گردد. دلیل دنداندار بودن نمودار در منطقه پس‌له‌شدگی این است که وقتی سطح مقطع لوله شروع به فروریزی می‌کند، مقداری توده مواد خردشده در داخل یا خارج لوله تشکیل می‌شود که از سطح مقطع لوله کاسته و بنابراین سفتی لوله را افزایش می‌دهد در نتیجه دوباره نیرو افزایش می‌یابد تا به مقداری می‌رسد که فروریزی محلی رخ دهد و این سیکل بارها و بارها تکرار می‌شود و باعث دنداندار شدن نمودار نیرو - جابه‌جایی در منطقه پس‌له‌شدگی می‌شود. این فرایند تا زمانی که جابه‌جایی به δ_2 برسد، تکرار می‌شود.



شکل (۱-۲۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحت له‌شدن پیش‌رونده [۲۷]

سطح زیر منحنی نیرو - جابه‌جایی، کل انرژی جذب شده توسط نمونه را تحت شرایط له‌شدن نشان می‌دهد. کل انرژی جذب شده ممکن است به‌وسیله یکی از دو روشی که در ادامه خواهد آمد، محاسبه شود. به‌منظور مقایسه داده‌ها بهتر است از لوله‌های دارای اندازه، اشکال یا لایه‌چینی‌های مختلف در جابه‌جایی‌های له‌شدن متفاوت آزمایش گرفت و انرژی جذب شده را به‌عنوان یک خاصیت مخصوص نرمال‌سازی نمود (به‌عنوان‌مثال با تقسیم کردن بر واحد جرم). دو روش رایج برای اندازه‌گیری کل انرژی جذب‌شده بر واحد جرم وجود دارد.

^۱ Post Buckling

۱-۱۸-۱- معرفی کمیت جذب انرژی مخصوص (SEA)

روش اول، به وسیله تقسیم کردن سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی (w)، بر سطح مقطع (A)، چگالی (ρ) و طول له‌شدن لوله. این مقدار تحت عنوان جذب انرژی مخصوص (SEA) و یا (E_s) شناخته می‌شود. برای لوله‌های کامپوزیتی که دارای الیاف تقویت‌کننده شیشه و کربن هستند، منطقه له‌شدن آنها (d)، نسبتاً کوچک گزارش شده است (مرتبه‌ای از ضخامت لوله است)؛ بنابراین، منطقه له‌شدن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با جابه‌جایی صفحه اعمال بار دستگاه در طول تغییر نمی‌کند. به همین دلیل طول له‌شدن لوله که در محاسبات جذب انرژی مخصوص به کار می‌رود، می‌تواند جابه‌جایی صفحه صلب دستگاه در نظر گرفته شود (δ)؛ بنابراین با فرض خواص سطح مقطع و چگالی ثابت، E_s به‌صورت معادله (۸-۱) بیان می‌شود:

$$E_s = \frac{W}{\rho A \delta} \quad (8-1)$$

واحد کمیت جذب انرژی مخصوص که از معادله (۸-۱) به دست می‌آید، کیلوژول بر کیلوگرم یا فوت پوند نیرو بر اسلاگ است. این نکته بایستی مدنظر باشد که δ بایستی به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا طول منطقه له‌شدن (d) قابل صرف نظر کردن باشد؛ اما هرگز نباید بزرگ‌تر از δ_2 باشد. برای برخی از کاربردها، انرژی جذب‌شده بر واحد حجم یا واحد طول نیز ممکن است بیان شود.

۱-۱۸-۲- معرفی کمیت تنش له‌شدگی مخصوص (SSCS)

روش رایج دوم برای اندازه‌گیری انرژی جذب‌شده بر واحد جرم، تقسیم کردن تنش له‌شدگی میانگین $\bar{\sigma}$ بر چگالی مواد آزمایش شده است که در معادله (۹-۱) نشان داده شده است:

$$\bar{\sigma}_s = \frac{\bar{\sigma}}{\rho} \quad (9-1)$$

$\bar{\sigma}_s$ به‌عنوان تنش له‌شدگی متحمل شده مخصوص^۱ (SSCS) نامیده می‌شود. تنش له‌شدگی میانگین $\bar{\sigma}$ به‌وسیله تقسیم P_{mean} بر سطح مقطع لوله (A)، به دست می‌آید. این روش اندازه‌گیری

^۱ Specific Sustained Crushing Stress

جذب انرژی بر واحد جرم نیز به طور قابل ملاحظه‌ای قابل قبول است. به علت اینکه بخش بارگذاری اولیه منحنی نیرو - جابه‌جایی نسبتاً کوچک است و طول له‌شدن با جابه‌جایی صفحه اعمال بار دستگاه سازگار است. البته این با فرض نوسانات کوچک نسبی نیرو در منطقه له‌شدن پایدار وجود دارد. اختلاف بین SEA و SSCS معمولاً تا زمانی که اختلاف کلیدی مساحت بخش اولیه منحنی نیرو - جابه‌جایی است، ناچیز است.

۱-۱۸-۳- مزایا و معایب روش‌های محاسبه جذب انرژی

حال در این بخش مزایا و معایب هر دو روش اندازه‌گیری جذب انرژی نام برده می‌شود:

مزایای روش SEA:

- این روش به شکل منحنی نیرو - جابه‌جایی وابسته نیست (اگر نمونه‌های آزمون نیروهای کاهشی، افزایشی و حتی نامعقولی را تجربه کنند، این پارامتر به راحتی قابل اندازه‌گیری است).
- این روش کل انرژی جذب شده توسط نمونه آزمون را به صورت واقعی اندازه‌گیری می‌کند (این روش تمام منحنی نیرو را مورد محاسبه قرار می‌دهد).
- این روش برای نمونه‌هایی که در مودهای له‌شدن ناپایدار نیز فرو می‌ریزند، به کار می‌رود (نیازی به له‌شدن پایدار برای محاسبه جذب انرژی مخصوص در این روش وجود ندارد).

عیب روش SEA:

- تنها عیب این روش، نیازمندی آن به محاسبات اضافی است. (به عنوان مثال محاسبه سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی با روش انتگرال عددی دوزنقه‌ای که نیازمند برنامه‌نویسی یا کدنویسی است).

مزایای روش SSCS:

- روش ساده‌ای است و تنها نیازمند نیروی میانگین له‌شدن از منحنی نیرو - جابه‌جایی است.

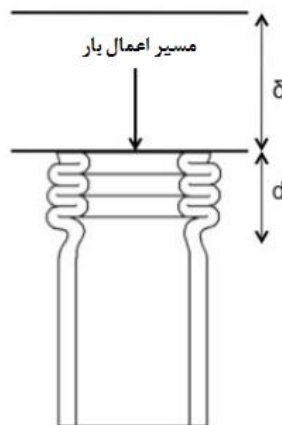
- این روش می‌تواند برای نمونه‌هایی که جابه‌جایی له‌شدگی متفاوتی دارند به کار رود. البته اگر نیرو در له‌شدن پایدار، همسانی مناسبی داشته باشد (اندازه نسبی بخش اول نمودار نیرو - جابه‌جایی، بر روی نتایج اثری ندارد).

معایب روش SSCS

- منطقه له‌شدن پایدار، نیازمند نیروی همسان (سازگار) است (اگر نمونه‌های آزمون نیروهای کاهش، افزایشی و حتی نامعقولی را تجربه کنند این پارامتر نیروهای متوسط دقیقی را به همراه نخواهد داشت).

- این روش را نمی‌توان برای نمونه‌هایی که در مود له‌شدن ناپایدار فرو می‌ریزند، به کار برد.
- اولین نقطه فروریزی پایدار بایستی با دقت زیاد انتخاب شود (برای نمونه‌ها این نقطه، اولین نقطه حداقل نیرو بعد از قله نیروی اولیه در منحنی نیرو است که برای برخی نمودارها تشخیص اولین نقطه مشکل است که طبق یک قاعده کلی در این موارد این نقطه در فاصله ۹۰ درصدی قله نیرو اولیه انتخاب می‌شود).

- برای نمونه‌های لوله‌ای شکل کامپوزیتی و فلزی که در مود تاشوندگی^۱ دچار فروریزی می‌گردند، همان‌طور که در شکل (۱-۲۴) مشاهده می‌شود، طول لوله در ناحیه له‌شدن ($d+\delta$) در یک نقطه در یک زمان خاص $1/4$ تا $1/5$ برابر جابه‌جایی صفحه اعمال بار دستگاه (δ) است.



¹ Folding Mode

شکل (۱-۲۴): ناحیه له‌شدن در مود فروریزی چین‌خوردگی (تاشوندگی) [۲۷]

برای محاسبه جذب انرژی مخصوص در لوله‌هایی که با این مود فروریزی دچار له‌شدگی شده‌اند، حجم کلی مواد تغییر شکل یافته در نمونه باید مورد توجه قرار گیرد؛ بنابراین معادله (۱-۸) به معادله (۱۰-۱) تبدیل می‌شود:

$$E_s = \frac{W}{\rho A(\delta + d)} \quad (10-1)$$

۱-۱۸-۴- سایر کمیت‌های مهم در جذب انرژی

کمیت‌های دیگری که اغلب وقتی که آزمایش له‌شدن لوله‌های کامپوزیتی صورت می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شوند، عبارت‌اند از:

کارایی جابه‌جایی طی‌شده، که اندازه طول پایدار له‌شدن به کل طول نمونه است و نحوه محاسبه آن در معادله (۱۱-۱) آمده است:

$$J = \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{L} \quad (11-1)$$

ترکیب معادلات (۱-۸) و (۱۱-۱) با فرض اینکه جابه‌جایی صفحه اعمال بار دستگاه برابر است با δ_2 معادله (۱۲-۱) را نتیجه می‌دهد:

$$E_s = \frac{W(\delta_2 - \delta_1)}{m\delta_2} \quad (12-1)$$

توجه کنید که m جرم تمام نمونه لوله‌ای شکل است؛ بنابراین معادله (۱۲-۱) می‌تواند برای محاسبه کل فاصله‌ای که لوله قادر به جذب انرژی است، قبل از اینکه پدیده مواد خردشده رخ دهد، به کار گرفته شود. به همین دلیل معادله (۱۲-۱) برای استفاده در اهداف طراحی چنین سازه‌هایی، پیشنهاد می‌گردد. به‌عکس، معادله (۱-۹) به این دلیل مفید است که به انتگرال‌گیری منحنی نیرو - جابه‌جایی نیازی ندارد، اما به کارایی جابه‌جایی طی‌شده نیاز دارد؛ بنابراین این روش اندازه‌گیری،

بیان‌کننده قابلیت مواد است. به‌هرحال نتایج به جهت اختلاف‌هایی که در مقادیر اندازه‌گیری‌ها وجود دارد، بایستی هنوز با احتیاط به‌کار روند؛ و در هر طراحی یا پژوهشی نتایج آزمایش‌ها را با روش اندازه‌گیری آن ذکر شوند.

نیروی بحرانی له‌شدن (P_{max}) که برابر است با بیشترین مقدار نیرو و معمولاً در اولین قله نمودار نیرو - جابه‌جایی اتفاق می‌افتد. نیروی میانگین له‌شدن (P_{mean}) که برابر است با میانگین قله‌های نیرو در محدوده پس‌له‌شدگی و از تقسیم میزان جذب انرژی بر جابه‌جایی حداکثر^۱ در نمودار نیرو - جابه‌جایی قابل محاسبه است. جذب انرژی^۲ (W) که برابر است با مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی و به روش انتگرال دوزنقه‌ای قابل محاسبه است؛ که اگر نیرو برحسب کیلو نیوتن و جابه‌جایی برحسب میلی‌متر باشد، سطح زیر نمودار برحسب ژول است. ضریب انحراف^۳ (CoV)، در نظریه آمار و احتمال، یک مقیاس استاندارد شده از پراکندگی توزیع احتمال^۴ یا توزیع فراوانی^۵ است؛ که برابر است با نسبت انحراف معیار^۶ به میانگین.

بازده نیروی لهیدگی^۷ (CLE or CFE) که از تقسیم نیروی میانگین له‌شدن بر نیروی ماکزیمم له‌شدن به‌دست می‌آید و عددی بین ۰ و ۱ است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد جذب انرژی بهتری است؛ و برای ارزیابی کارایی ماشه نیز به‌کار می‌رود به‌طوری که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد ماشه به کار گرفته شده بهتر است. به همین دلیل به این نسبت اثر ماشه^۸ (ϵ_f) نیز می‌گویند [۲۷]. دو کمیت SEA و CFE برای مقایسه بازده نسبی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی به کار می‌روند. همانطور که در معادله (۱-۱۳) نشان داده شده است بازده نیروی لهیدگی با شاخص یکنواختی نیرو^۹ (LU) نیز رابطه عکس دارد [۹].

¹ Crushed Length

² Energy Absorption

³ Coefficient of Variation

⁴ Dispersion of a Probability Distribution

⁵ Frequency Distribution

⁶ Standard Deviation

⁷ Crushing Load (Force) Efficiency

⁸ Trigger Effectiveness

⁹ Load Uniformity index

$$CFE = \frac{P_{\text{mean}}}{P_{\text{max}}} = \frac{1}{LU} \quad (13-1)$$

سرانجام، یک کمیت تحت عنوان نسبت فشاری له شدن^۱ (CCR) شناخته می‌شود که مطابق

معادله (۱۴-۱) نسبت تنش له شدن میانگین به استحکام فشاری نهایی ماده، تعریف می‌شود [۲۷]:

$$CCR = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{uc}} \quad (14-1)$$

مثلاً نسبت فشاری برخورد، ۰/۵ می‌گوید که تنش له شدن میانگین نصف استحکام فشاری ماده است. این کمیت در حین انتخاب مواد برای بیان اینکه آیا یک سازه کامپوزیتی ممکن است در فشار، درون سازه پشتیبان^۲ خراب شود یا خیر، به کار می‌رود. البته این موضوع به جهت تغییرات نیرو در حین له شدن، رخ می‌دهد [۲۷].

۱-۱۹- مروری بر پژوهش‌های گذشته

۱-۱۹-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته پیرامون روش تزریق رزین به کمک خلأ

در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ با توجه به انعطاف‌پذیری قالب در یک سمت (کیسه پلاستیکی)، فشار اتمسفر و تغییرات فشار رزین، سبب فشردگی لایه‌چینی و تغییر ضخامت آن در شرایط مختلف می‌گردد. در این فرایند، مکش خلأ در مقایسه با فشار تزریق، نقش عمده‌ای در حرکت جریان در لایه‌چینی دارد و از این رو فرایند تزریق رزین به کمک خلأ برای قالب‌گیری قطعات بزرگ کامپوزیتی مفید خواهد بود.

در این زمینه، تحقیقاتی توسط آقای می‌چل اسکولارت بر روی توربین‌های بادی انجام شده است [۴۱]. آقای آرچن کوروار و تئون دیوریس بر روی بهینه‌سازی محل لوله‌های وکیوم و تزریق در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ در زمینه ساخت قایق‌ها پژوهش کردند [۴۲]. آقای یون و همکاران نیز بر روی بهینه‌سازی لوله تزریق رزین در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ [۴۳] و همچنین آقای

¹ Crush Compression Ratio

² Backup Structure

سانگ در رابطه با توسعه مدل و آنالیز فرایند تزریق رزین به کمک خلا [۴۴] و آقای آوالوس و همکاران بر روی تعریف پارامترهای مواد تحقیقات خود را انجام داده‌اند [۴۵].

۱-۱۹-۲- مروری بر پژوهش‌های گذشته پیرامون جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی

ویژگی‌های جذب انرژی یک سازه کامپوزیتی می‌تواند بر اثر پارامترهای مختلفی مانند نوع الیاف، نوع زمینه (رزین)، نوع لایه‌چینی^۱، هندسه نمونه، شرایط تولید، کسر حجمی الیاف^۲ و نرخ بارگذاری، متغیر باشد. بنابراین در این بخش به مرور پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پارامترهای فوق پرداخته می‌شود [۲۲].

۱-۱۹-۲-۱- اثر نوع الیاف تقویت‌کننده

فارلی [۴۸-۴۶ و ۲۹]، تورنتن و ادواردز [۲۵] و هول [۲۶ و ۴۹] مشاهده کردند که لوله‌های ساخته‌شده از الیاف شیشه و کربن و رزین‌های گرماسخت، بصورت پیش‌رونده در موده‌های تکه‌تکه‌شدن و بازشدن الیاف و از طرف دیگر لوله‌های ساخته‌شده از الیاف آرامید (کولار و دینما)، در مود تاشوندگی پیش‌رونده دچار لهیدگی می‌گردند [۲۹ و ۵۰].

همچنین نتایج مشابهی وقتی که اشموسر و ویکلیف [۵۱]، آزمایش‌های فشاری استاتیک و ضربه را روی لوله‌های کامپوزیتی از نوع گرافیت/اپوکسی و شیشه/اپوکسی انجام دادند به دست آمد که تأییدکننده نتایج فوق بود.

لوله‌های ساخته‌شده با لایه‌های جهت‌دار (چندلایه)، از نوع گرافیت/اپوکسی و شیشه/اپوکسی، مود فروریزی شکست‌ترد را نشان می‌دهند که از شکافته شدن^۳ و جدایش لایه‌ها ناشی می‌شود. این در حالی است که لوله‌های با لایه‌های جهت‌دار کولار/اپوکسی، در مود کمانش آکاردئونی^۴ دچار فروریزش

¹ Fiber Architecture

² Fiber Volume Fraction

³ Fiber Splitting

⁴ Accordion Buckling Mode

می‌شوند. کرنش تا خرابی^۱ پائین‌تر الیاف شیشه و کربن که در کرنش ۱٪ از کار می‌افتند^۲ در مقایسه با الیاف آرامید که در کرنش ۸٪ از کار می‌افتد، علت این تفاوت در رفتار است.

نتایج آزمایش‌های لهیدگی استاتیک لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با گرافیت که توسط فارلی [۳۹] برای مطالعه اثرات کرنش خرابی^۳ الیاف و زمینه روی قابلیت جذب انرژی صورت گرفت، این نتیجه مهم را در پی داشت که برای رسیدن به حداکثر انرژی جذب شده از یک نوع الیاف خاص، زمینه ماده در کامپوزیت بایستی کرنش شکست^۴ بزرگ‌تری نسبت به الیاف داشته باشد.

لوله‌های گرافیت/اپوکسی مقادیر انرژی جذب‌شده مخصوص بزرگ‌تری نسبت به لوله‌های کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی با ساختار لایه‌ای مشابه، دارند. این به جهت چگالی کمتر الیاف کربن در مقایسه با الیاف شیشه و کولار است. چگالی تئوری کربن (g/cm^3) ۲/۱ است، اما چگالی حقیقی الیاف کربن در دامنه بین ۱/۳ تا $1/9 (g/cm^3)$ بوده که نسبت به مقدار تئوری آن پایین‌تر است. این امر بدان علت است که در عملیات تولید الیاف، حفره‌هایی^۵ در آن تولید می‌شود که باعث کاهش چگالی الیاف می‌شود.

هامادا و راماکریشنا [۵۲] روی لوله‌های کامپوزیتی با زمینه پلی‌اتراترکتون که با الیاف کربن آس^۶ و آی‌ام^۷ و الیاف شیشه اس^۸ تقویت‌شده بود، تحقیقاتی را انجام دادند. درحالی که الیاف موازی محور اصلی لوله قرار گرفته بودند ($\theta = 0$)، لوله بصورت پیش‌رونده با مود بازشدن الیاف له شد. لوله‌های اس ۲/پلی‌اتراترکتون جذب انرژی مخصوص حدوداً ۲۰٪ پایین‌تری نسبت به لوله‌های آس ۴- /پلی‌اتراترکتون و آی‌ام ۷/پلی‌اتراترکتون داشتند. گرچه تنش له‌شدن میانگین لوله‌های اس ۲- /پلی‌اتراترکتون در مقایسه با لوله‌های دو نوع دیگر قابل ملاحظه بود. این نتیجه مستقیم چگالی پائین-

¹ Strain to Failure

² Fail

³ Strain Failure

⁴ Strain at Failure

⁵ Voids

⁶ AS4

⁷ IM7

⁸ S2

تر، مواد تقویت‌شده با الیاف کربن نسبت به شیشه است البته تا زمانیکه جذب انرژی مخصوص نسبت تنش له‌شدن میانگین به چگالی کامپوزیت تعریف می‌شود.

فارلی [۲۹] مشاهده نمود که لوله‌هایی که با الیافی تقویت می‌شوند که کرنش به خرابی بزرگتری دارند، خواص جذب انرژی بالاتری نیز از خود نشان می‌دهند. فارلی و جونز [۵۳] مودهای له‌شدن و کنترل مکانیسم‌ها روی لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف پیوسته را بررسی کردند. آنها پیشنهاد کردند که پاسخ له‌شدن لوله‌های کامپوزیتی می‌تواند به سه مود اساسی طبقه‌بندی شود: برش‌عرضی، خمش‌لایه‌ای و کمانش محلی و خواص مکانیکی مواد سازنده و سازه نمونه کامپوزیتی روی مکانیسم‌هایی که مودهای له‌شدن مختلف را کنترل می‌کنند، اثر می‌گذارد.

تحلیل‌های اجزاء محدود برای مدل‌سازی فرایند له‌شدن لوله‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته توسط فارلی [۵۴] صورت گرفت. تحلیل‌ها با آزمایش‌های تجربی روی لوله‌های گرافیت/اپوکسی و کولار/اپوکسی مقایسه شد. روش مبتنی بر مود، وابسته به پدیده‌شناسی^۱ فرایند له‌شدن صورت گرفت و تطابق خوبی بین تحلیل و آزمایش‌های تجربی برقرار شد.

آزمایش‌های له‌شدن استاتیک توسط چیو و همکاران [۵۵] روی لوله‌های با مقطع مربعی کامپوزیتی قیطان‌دوزی‌شده^۲ سه‌بعدی کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی برای تحقیق روی قابلیت جذب انرژی این نوع سازه‌ها صورت گرفت که لوله‌های کامپوزیتی قیطان‌دوزی‌شده سه‌بعدی از جنس کربن، جذب انرژی مخصوص بالاتری را نسبت به لوله‌های کولار نشان دادند. این نتیجه نشان‌دهنده این است که لوله‌های کربنی در آزمایش‌های له‌شدن قادر به جذب انرژی بیشتری هستند. به‌هرحال لوله‌های از جنس کولار یکپارچگی سازه‌ای^۳ پس له‌شدن^۴ خوبی را نشان داده‌اند.

^۱ Phenomenological Mode

^۲ Braided

^۳ Structural Integrity

^۴ Post Crush

یک پژوهش دیگر توسط چپو و همکاران [۵۶] نتایج مشابه فوق را نشان داد. به صورتی که جذب انرژی مخصوص لوله کامپوزیتی با مقطع مربعی قیطان دوزی شده سه بعدی کربن/اپوکسی، ۲۴٪ بیشتر از لوله با مقطع مربعی کامپوزیتی قیطان دوزی شده سه بعدی کولار/اپوکسی بود.

۱-۱۹-۲-۲- اثر نوع زمینه

لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن با انواع مختلف زمینه‌های گرمانرم توسط راماکریشنا و همکاران [۵۷] مورد مطالعه قرار گرفت. در میان همه انواع لوله‌هایی که مورد تحقیق قرار گرفت، لوله‌های کربن/پلی‌اتراکتون، بالاترین انرژی مخصوص را به علت چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای بالاتر از خود نشان دادند (چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای $1/6$ تا $2/4$ (kJ/m²). این در مقایسه با کربن/پلی‌اترآمید (چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای 1 تا $1/2$ (kJ/m²) و کربن/پلی‌آمید (چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای 1 تا $1/2$ (kJ/m²) است [۵۸ و ۵۹]. لوله‌های کربن/پلی‌آریل‌سولفون، پایین‌ترین قابلیت جذب انرژی را به معرض نمایش گذاشتند و انرژی مخصوص لوله‌های گرمانرم از ترتیب ذیل تبعیت می‌کرد:

پلی‌اتراکتون (PEEK) < پلی‌اترآمید (PEI) < پلی‌آمید (PI) < پلی‌آریل‌سولفون (PAS)

در یک مطالعه مشابه ساتو و همکاران [۶۰] جذب انرژی کربن/پلی‌اترآمید، کربن/پلی‌آمید، کربن/پلی‌آریل‌سولفون و کربن/پلی‌اتراکتون را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. لوله‌های کربن/رزین گرمانرم (با جذب انرژی مخصوص (kJ/kg) ۱۹۴-۱۲۸) قابلیت‌های جذب انرژی به مراتب بالاتری را نسبت به کربن/اپوکسی (با جذب انرژی مخصوص (kJ/kg) ۱۱۰) یا سازه‌های شیشه/پلی‌استر (با جذب انرژی مخصوص (kJ/kg) ۸۰) از خود نشان داد. کربن/پلی‌اتراکتون به صورت پیش‌رونده له شد و مقدار جذب انرژی مخصوص (kJ/kg) ۱۹۴ را به ثبت رسانید.

قابلیت جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی و کربن/پلی‌اتراترکتون ساخته شده از مواد پیش‌آغشته شده^۱ از نوع تک‌جهته توسط هامادا و همکاران [۶۱] به وسیله آزمایش‌های فشاری محوری روی نمونه‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. قابلیت جذب انرژی بالاتر لوله‌های کربن/پلی‌اتراترکتون به علت چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای (۱/۵۶ تا $2/4 \text{ (kJ/m}^2\text{)}$) بالاتر کامپوزیت‌های با زمینه پلی‌اتراترکتون که از نوع زمینه‌های گرمانرم است، می‌باشد. لوله‌های کربن/اپوکسی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در محدوده ۰/۱۲ تا $0/18 \text{ (kJ/m}^2\text{)}$ دارند که تنها 53 (kJ/kg) انرژی مخصوص جذب شده آنها است.

فارلی [۴۸] بر اساس مشاهداتش و فهم کلی فرایند له‌شدن نتیجه‌گیری نمود که: جذب انرژی موادی که به وسیله برش‌عرضی یا شکست‌ترد از کار می‌افتند، کمی متأثر از سفتی زمینه است. به‌رحال موادی که به وسیله خمش‌لایه‌ای از کار می‌افتند، به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای از سفتی زمینه تأثیر می‌پذیرند. هرگونه تغییر سفتی در زمینه می‌تواند باعث شود که کامپوزیت‌های ترد در یک مود متفاوت از کار بیفتند. به‌رحال تغییرات در سفتی زمینه اثر کمی روی جذب انرژی تقویت‌کننده‌های نرم^۲ دارد.

۱-۱۹-۲-۳- اثر لایه‌چینی

توسط فارلی [۲۹] روی لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی با لایه‌چینی^۴ $[0 \pm \theta]$ ، به صورتی که θ از ۰ تا 90° متغیر بود، آزمایش‌هایی صورت گرفت که تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در روند جذب انرژی این مواد دیده شد. تفاوت در روند، با آزمایش مودهای له‌شدن قابل توضیح است. انرژی مخصوص لوله‌های شیشه/اپوکسی و کولار/اپوکسی با افزایش زاویه θ تا 45° و بالای آن افزایش می‌یابد. نمونه‌های شیشه/اپوکسی و کولار/اپوکسی به ترتیب در مودهای خمش‌لایه‌ای و کمانش محلی له می‌شوند. این افزایش در انرژی منسوب به افزایش حمایت عرضی^۳

^۱ Prepreg

^۲ Ductile

^۳ Lateral Support

الیاف محوری با افزایش زاویه θ است. از طرف دیگر انرژی مخصوص لوله‌های کربن/اپوکسی ابتدا با افزایش زاویه θ تا 45° کاهش می‌یابد و بعد از آن ثابت باقی می‌ماند و این نمونه‌ها در مود شکست ترد له می‌شوند. این کاهش ابتدایی در جذب انرژی مربوط به کاهش در سفتی محوری مواد کامپوزیتی با افزایش زاویه θ است.

فارلی و جونز [۶۲] در مطالعه بعدی خود له‌شدن شبه استاتیکی لوله‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی با لایه‌چینی $[0 \pm \theta]_s$ را برای اثر جهت‌گیری الیاف روی قابلیت جذب انرژی، مورد بررسی قرار دادند. همان‌طور که θ افزایش می‌یابد، قابلیت جذب انرژی لوله‌های کربن/اپوکسی به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد و مود اصلی له‌شدن، شکست ترد است. قابلیت جذب انرژی لوله شیشه/اپوکسی به‌طور غیرخطی با θ افزایش می‌یابد و مود له‌شدن لوله شیشه/اپوکسی خمش لایه‌ای است.

هول [۲۶] اثر ترتیب لایه‌ها را روی له‌شدن پیش‌رونده در لوله‌های تک‌جهته کربن/اپوکسی و لوله‌های تولید شده با پارچه‌های دوجهته شیشه/اپوکسی و لوله‌های رشته پیچی شده شیشه/پلی‌استر و لوله‌های شامل الیاف بریده‌شده اتفاقی صفحه‌ای^۱، شیشه/پلی‌استر را مورد مطالعه قرارداد. لوله‌های رشته پیچی شده شیشه/پلی‌استر که با روش رشته پیچی رایج و زوایای پیچش (φ) بین $35^\circ \pm$ تا 90° ساخته شدند، چهار لایه داشتند و کسر حجمی الیاف در حدود $0/45$ بود. همچنین این لوله‌ها (mm) ۵ قطر و در حدود ۳ الی (mm) ۴ ضخامت داشتند. همه آزمایش‌ها با نرخ (mm/s) $0/2$ با یک ماشین آزمایش سرو هیدرولیک که حداکثر ظرفیت بار استاتیک (kN) ۱۸۰ را داشت، انجام گرفت. انرژی مخصوص با افزایش φ تا $65^\circ \pm$ افزایش یافت و بعد از آن کاهش را نشان داد. بنابراین مقدار حداکثر انرژی مخصوص در $\varphi = \pm 65$ رخ داد و یک تغییر هدفمند در منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی و شکل‌شناسی^۲ منطقه له‌شدن با زاویه پیچش φ رخ داد. این تغییرات در شکل‌شناسی منطقه له‌شدن (وقتی که φ بین $35^\circ \pm$ تا $55^\circ \pm$ است، لوله‌ها در مود بازشدن الیاف فرو می‌ریزند و وقتی که $\varphi <$

¹ Plane Random Chopped

² Morphology

$\pm 65^\circ$ است، فروریزی در مود تکه‌تکه شدن صورت می‌گیرد) سبب تغییرات در انرژی مخصوص می‌شود. لوله با الیاف محوری یک له‌شدن پیش‌رونده خیلی ناچیز، قبل از فروریزی کامل به‌وسیله شکل‌گیری و رشد ترک‌های طولی را نشان می‌دهد.

هامادا و همکاران [۵۰] اثر لایه‌چینی روی قابلیت جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی هیبریدی تقویت‌شده با الیاف کربن و دینما (پلی‌اتیلن) را مورد مطالعه قرار دادند. رزینی که به‌عنوان زمینه مورد استفاده قرار گرفت اپوکسی بود و دیده شد که قابلیت جذب انرژی با افزایش زاویه الیاف نسبت به محور طولی لوله‌ها، کاهش یافت.

بری [۶۳] لوله‌های تولیدشده با الیاف دوجته شیشه/پلی‌استر را با زوایای لایه‌چینی مختلف مورد مطالعه قرار داد. جذب انرژی لوله‌های با جهت‌های تار و پود 45° نسبت به محور لوله، 30% کمتر از لوله‌های مشابه با جهت تار و پود موازی جهت محوری (0°) و هوپ (90°) را نشان دادند. این افزایش در انرژی جذب شده به علت تغییر شکل و شکست بیشتر مواد در لوله‌های نوع آخر بود.

لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن و با زمینه‌های گرمانرم مختلف: پلی‌اتراکتون، پلی‌اترآمید، پلی‌آمید و پلی‌آریل‌سولفون توسط راماکریشنا و همکاران [۵۷] مورد بررسی قرار گرفت. زوایای الیاف 0° و $\pm 5^\circ$ و $\pm 10^\circ$ و $\pm 15^\circ$ و $\pm 20^\circ$ و $\pm 25^\circ$ و $\pm 30^\circ$ نسبت به محور لوله مورد استفاده قرار گرفت. قابلیت جذب انرژی مخصوص لوله‌های له‌شده بصورت پیش‌رونده، تابعی از مقدار θ بود. به‌طور کلی همان‌طور که θ افزایش پیدا می‌کرد، طول ترک‌های طولی کاهش می‌یافت. این به جهت افزایش چقرمگی شکست با افزایش θ بود. این بهبود چقرمگی شکست سبب افزایش مقاومت در فرایند رشد ترک شده بنابراین باعث افزایش مقدار قابلیت جذب انرژی سازه کامپوزیتی می‌شود.

فرایندهای ریزشکستی^۱ مانند شکست الیاف^۱ و شکافت‌های ساقه برگگی^۲ با افزایش θ نیز افزایش می‌یافتند؛ بنابراین این نتیجه حاصل می‌شود که افزایش در فرایندهای ریزشکستی است که باعث افزایش در کل انرژی جذب شده می‌شود.

^۱ Microfracture

۱-۱۹-۲-۴- اثر هندسه نمونه‌ها

تورنتن و ادواردز [۲۵] اثرات هندسه در جذب انرژی لوله‌های با مقاطع گرد، مربعی و مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. اگرچه دامنه پارامترهای هندسی خیلی گسترده بود، ولی شرایط آزمایش‌های تجربی محدود شد. محدودیت تعداد آزمایش‌ها تعریف یک روند مشخص دقیق را با مشکل مواجه کرد؛ اما آنها نشان دادند که برای یک لایه‌چینی و هندسه لوله مشخص، انرژی مخصوص برای مقاطع ترتیب زیر را دنبال می‌کند: دایروی < مربعی < مستطیلی

نمونه‌ها از گرافیت، کولار، شیشه و هیبریدی که مرکب از تقویت‌کننده‌های نامبرده شده فوق در زمینه اپوکسی بود ساخته شد. پیش آغشته شده‌های نواری و الیافی برای ساخت لوله‌های با زوایای لایه‌چینی (± 45) و $(0/90)$ به کار گرفته شد. لوله‌های ساخته‌شده از شیشه و الیاف گرافیت، با مود شکست ترد له شدند؛ که له‌شدن پایدار با جذب انرژی بالا روی یک دامنه بحرانی از هندسه لوله‌ها رخ داد. کامپوزیت‌های کولار و هیبرید کولار جاذب‌های انرژی ناپایداری از کار در آمدند که این به علت رفتار ناپایدار آنها بود که نتیجه صعود و نزول‌های نیروی له‌شدن است. این نتایج در تضاد با نتایج تیرهای له‌شده توسط فارلی [۶۴] است. فارلی دریافت که تیرهای تقویت‌شده با کولار به‌طور پیچیده‌ای در یک رفتار پایدار له می‌شود و لوله‌های گرافیتی پژوهش تورنتن و ادواردز [۲۵] مودهای له‌شدن شکست ترد و خمش‌لایه‌ای را به صورت همزمان به نمایش گذاشت. نیروهای لهیدگی لوله‌های کامپوزیتی از جنس شیشه و گرافیت نسبت به لوله‌های کولار یکنواخت‌تر بودند.

فارلی [۴۶] مقیاس‌پذیری هندسی^۳ لوله‌های گرافیت/اپوکسی و کولار/اپوکسی $N[\pm 45]$ را با روش آزمایش له‌شدن شبه‌استاتیکی مورد تحقیق قرارداد. در آن پژوهش قطر داخلی لوله بین ۱/۲۷ تا (cm) ۱۰/۱۶ متغیر بود و تعداد لایه‌ها (N) بین ۲ تا ۲۴ تغییر می‌کرد و نسبت قطر داخلی به ضخامت آن (D/t) بین ۱/۴ و ۱۲۵ بود. همه لوله‌های با مقطع دایره‌ای، گرافیت/اپوکسی، مود شکست ترد

¹ Fiber Fracture

² Frond Splits

³ Geometrical Scalability

پیش‌رونده را نشان دادند. همه لوله‌های کولار/اپوکسی وقتی که له شدند ویژگیهای مود له‌شدن کمانش محلی را به معرض نمایش گذاشتند. طول موج کمانش با قطر لوله متفاوت بود. نسبت قطر داخلی به ضخامت لوله (D/t) اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی قابلیت جذب انرژی، سازه کامپوزیتی داشت. جذب انرژی به صورت یک تابع غیرخطی کاهشی از نسبت (D/t)، لوله است. این کاهش در نسبت (D/t)، افزایش در انرژی مخصوص را نتیجه می‌دهد. این افزایش به جهت کاهش در ترک‌خوردگی بین‌لایه‌ای در منطقه له‌شدن لوله است.

فارلی و جونز [۳۲] لوله‌های کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی با مقطع بیضوی را مورد تحقیق قرار دادند که نتایج روند مشابهی را نشان داد. وقتی که به‌طور استاتیک له‌شدن صورت گیرد، قابلیت جذب انرژی به صورت یک تابع غیرخطی کاهشی، برحسب نسبت قطر داخلی به ضخامت لوله (D/t)، بیان می‌گردد.

تورنتن و همکاران [۶۵] اثر ابعاد لوله را به‌عنوان یک سازه کامپوزیتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های کربن/اپوکسی در دامنه‌ای از مقادیر قطر لوله (D)، ضخامت دیواره لوله (t) و نسبت (D/t) تغییرات زیادی را از خود نشان می‌دهند. طول له‌شدن لوله ناپایدار است و اندازه بحرانی لوله به نوع الیاف و لایه‌چینی آن وابسته است. انرژی مخصوص به‌طور اساسی مستقل از ابعاد لوله برای لوله‌هایی است که در یک رفتار پایدار له شده‌اند.

در کل ۲۸ نمونه ورق تخت و ۶ نمونه لوله‌ای گرافیت/اپوکسی، توسط دویی و ویزی [۶۶] تحت شرایط شبه‌استاتیک برای مقایسه اساسی جذب انرژی اندازه‌گیری شده توسط این دو هندسه، تحت آزمایش له‌شدن قرار گرفتند. نمونه‌های ورق و لوله‌ای در مودهای فروریزی مشابه له‌شدند که ورق تخت، ۱۲٪ انرژی بر واحد جرم کمتری را جذب کرد. که درنهایت این نتیجه‌گیری به دست می‌آید که نمونه تخت می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین ارزان‌تر برای نمونه لوله‌ای شکل در نظر گرفته شود یا در برنامه‌های آزمایشی که به یک هندسه ساده‌تر نیاز دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

لوله‌های شیشه/اپوکسی و کربن/پلی‌اتراکتون با سطح مقطع تماماً دایره‌ای، سه ربع دایره، نیم‌دایره و ربع دایره توسط هامادا و همکاران [۵۰] مورد مطالعه قرار گرفت. دو نوع از لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند که یکی از انواع لوله‌ها شامل الیاف شیشه با عامل جفت‌کننده آمینوسیلان و نوع دیگر لوله‌های شامل الیاف شیشه با عامل جفت‌کننده آکریل‌سیلان، پوشش‌دهی شده بود. آزمایش‌های شبه‌استاتیک به وسیله فشار محوری بین دو ورق تخت انجام گرفت. همه نمونه‌ها به‌طور پیش‌رونده‌ای از انتهای پخ خورده له شدند. یکی از نتایج مهم این مطالعه این بود که له‌شدن پیش‌رونده مستقل از شکل مقطع لوله‌های کامپوزیتی است. اجزاء مواد در کامپوزیت به‌طور اساسی ساختار آن را بیان می‌کنند. نمونه‌های شیشه/اپوکسی با عامل آمینوسیلان به علت پیوند سطحی^۱ الیاف آنها به زمینه، به وسیله مود بازشدن الیاف له شدند و نمونه‌های شیشه/اپوکسی با عامل آکریل‌سیلان به جهت حضور نیروهای اصطکاکی بزرگ‌تر، در منطقه له‌شدن در مود تکه‌تکه شدن له شدند. نمونه‌های کربن/پلی‌اتراکتون به‌طور پیش‌رونده‌ای در مود بازشدن الیاف له شدند که این اساساً به علت جهت‌گیری الیاف کربن به موازات محور لوله است. نتیجه مهم دیگر این مطالعه و تحقیق این بود که شکل سطح مقطع لوله، قابلیت جذب انرژی مخصوص را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مورد نمونه‌های شیشه/اپوکسی انرژی مخصوص حدود ۲۰٪ با تغییر در مقطع لوله از دایره کامل تا ربع دایره کاهش می‌یابد. انرژی مخصوص لوله‌های کربن/پلی‌اتراکتون تنها ۵٪ با تغییر مشابه در مقطع لوله کاهش می‌یابد.

لوله‌های مربعی، گرد و مخروطی ساخته شده از الیاف شیشه و زمینه‌های پلی‌استر یا وینیل‌استر توسط مامالیس و همکاران [۶۷] تحت شرایط برخورد استاتیک و دینامیک در سرعت بین ۱۸ تا ۲۴ متر بر ثانیه آزمایش شد. این نتایج حاصل شد که نشان می‌داد در له‌شدن پایدار لوله‌های مربعی، انرژی مخصوص کمتری نسبت به لوله‌های گرد از خود نشان دادند و زاویه مخروط بزرگ‌تر، جذب انرژی مخصوص پایین‌تری را نتیجه داد.

^۱ Interfacial Bonding

فیرفول [۶۸] و فیرفول و هول [۶۹] اثرات ابعاد نمونه‌ها روی انرژی مخصوص لوله‌های شیشه/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند که ۵ سری از لوله‌ها با دامنه قطر بین ۱۶ تا ۵۰ (mm) مورد بررسی واقع شد. انرژی مخصوص با افزایش قطر لوله کاهش یافت. انرژی مخصوص برای یک قطر داده شده ابتدا افزایش یافت و سپس با کاهش نسبت D/t ، کاهش یافت. این نتیجه به دست آمد که نمی‌تواند یک رابطه جهانی برای پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی معرفی کند.

آزمایش‌های له‌شدن استاتیک توسط فارلی [۷۰] روی لوله‌های گرافیت/اپوکسی و کولار/اپوکسی با مقطع مربعی برای مطالعه اثر هندسه نمونه‌ها روی قابلیت جذب انرژی آنها و مقیاس‌پذیری مواد کامپوزیتی صورت گرفت. جهت‌گیری لایه‌های لوله $[45]_{\pm}$ بود. مقطع لوله، مربعی به عرض بین ۱/۲۷ تا ۷/۶۲ (cm) بود. نسبت عرض به ضخامت نمونه (W/t) بین ۶ و ۱۲۵ بود. این هندسه لوله و مواد بیانگر کاربردهای سازه‌ای تیرهای کف بالگرد است. نسبت عرض داخلی لوله به ضخامت دیواره آن (W/t)، برای بیان اثر قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی به کار می‌رود. قابلیت جذب انرژی لوله‌های گرافیت/اپوکسی و کولار/اپوکسی یک تابع غیرخطی از نسبت‌های (W/t)، لوله است. جذب انرژی به‌طور کلی با کاهش نسبت (W/t)، افزایش پیدا می‌کند. برای لوله‌های گرافیت/اپوکسی که نسبت (W/t)، بین ۲۲۰ تا ۵۵۰ دارند، تغییراتی که در مود له‌شدن به وجود می‌آید، منتج به کاهش در قابلیت جذب انرژی همزمان با کاهش نسبت (W/t) می‌شود. هم لوله‌های گرافیت/اپوکسی و هم لوله‌های کولار/اپوکسی به‌صورت پیش‌رونده و با رفتار پایدار دچار له‌شدن می‌شوند. همه لوله‌های گرافیت/اپوکسی مود له‌شدن خمش‌لایه‌ای را از خود نشان می‌دهند؛ درحالی‌که لوله‌های کولار/اپوکسی دارای مود فروریزی کمانش محلی می‌باشند. نتیجه آزمایش پیشنهاد می‌کند که لوله‌های کولار/اپوکسی به‌طور هندسی مقیاس‌پذیری نامحدود دارند؛ در صورتی‌که لوله‌های گرافیت/اپوکسی این گونه نیستند.

راما کریشنا و هامادا [۳۳] عملکرد له‌شدن لوله‌های کربن/پلی‌اتراکتون با تفاوت در مقادیر ضخامت و قطر را مورد مطالعه قرار دادند. وقتی که ضخامت بین ۲ تا ۳ (mm) بود، همه انواع لوله‌ها بالاترین

انرژی مخصوص را به نمایش می‌گذاشتند. با افزایش ضخامت تا این دامنه بحرانی انرژی مخصوص افزایش می‌یافت؛ درحالی‌که بالای این محدوده مقدار آن کاهش می‌یافت. تغییرات در شکل‌شناسی منطقه له‌شدن علت تغییرات انرژی مخصوص بود. فرایندهای ریزشکستی در منطقه له‌شدن با ضخامت، متغیر بود؛ به خاطر اینکه لوله‌ها به‌صورت پیش‌رونده در مود بازشدن‌الیاف له می‌شدند. با افزایش ضخامت تا دامنه بحرانی شکافت‌های ساقه برگی و شکست الیاف افزایش می‌یابد.

آزمایش‌های جذب انرژی استاتیک روی هندسه شش لایه گرافیت/اپوکسی^۱ توسط هاناگاد و همکاران [۷۱] هدایت گردید. آنها گزارش کردند که شبکه سینوسی^۲ مواد کامپوزیتی، قابلیت‌های جذب انرژی خوبی را وقتی که له‌شدن در جهت شبکه صورت گیرد، از خود نشان می‌دهند. آنها اثبات کردند که کارایی جذب انرژی نمونه‌های شبکه‌ای با زاویه 180° با نمونه‌های لوله‌ای شکل مربوطه برابر است. با کاهش دادن زاویه شبکه سینوسی از 90° تا 60° مود فروریزی به‌طور ناگهانی از له‌شدن پیش‌رونده پایدار به کم‌انرژی عمومی^۳ ناپایدار تغییر کرد.

۱-۱۹-۲-۵- اثر شرایط تولید نمونه‌ها

هامادا و همکاران [۷۲] اثر شرایط تولید روی قابلیت‌های جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی کربن/پلی‌اتراترکتون را مورد تحقیق قرار دادند. لوله‌های گرمانرمی که الیاف کربن آن موازی با محور لوله قرار گرفته و با به کار بردن روش استفاده از مندرلی از جنس پی‌تی‌اف‌ای^۴ که با حرارت قابل انبساط است، ساخته شده است. سه نرخ سرمایش به کار رفت: سرمایش سریع با غوطه‌وری در آب خنک ($95/5^\circ\text{C}/\text{min}$)، سرمایش تدریجی در هوا ($8/2^\circ\text{C}/\text{min}$) و سرمایش کند در کوره با خاموش کردن بخاری برقی آن ($0/7^\circ\text{C}/\text{min}$). همه لوله‌ها به‌طور پیش‌رونده با مود فروریزی بازشدن‌الیاف، له شدند. در زمانی که آزمایش له‌شدن به‌صورت شبه‌استاتیکی انجام گرفت. لوله‌های

¹ T300/934

² Sine Web

³ Global Buckling

⁴ PTFE

سریع سرد شده جذب انرژی مخصوص (kJ/kg) ۲۲۶ را نشان دادند که ۱۵٪ بالاتر از (kJ/kg) ۱۹۷ انرژی جذب شده مخصوص لوله‌های تدریجی و آهسته خنک‌کاری شده است.

۱-۱۹-۲-۶- اثر کسر حجمی الیاف

راما کریشنا و هول [۷۳] قابلیت جذب انرژی لوله‌های از جنس الیاف کربن دوخته شده^۱/اپوکسی را به وسیله انجام آزمایش‌ها تحت بار فشاری محوری مورد تحقیق قرار دادند. در لوله‌های با محتوای الیاف^۲ کم، به طور نامنظم له شدن صورت گرفت؛ در حالی که در لوله‌هایی که محتوای الیاف بالای ۱۵٪ داشتند، له شدن پیش‌رونده رخ داد؛ بنابراین قابلیت جذب انرژی مخصوص با محتوای الیاف افزایش می‌یابد.

راما کریشنا [۷۴] دو سال بعد دوباره اثر محتوای الیاف را روی قابلیت جذب انرژی مخصوص لوله‌های با الیاف دوخته شده کربن/اپوکسی و الیاف دوخته شده شیشه/اپوکسی را بررسی کرد. انرژی مخصوص هر دو نوع لوله با افزایش محتوای الیاف افزایش یافت. یک توضیح مناسب برای این موضوع این است که جدایش الیاف/زمینه منجر به افزایش قابلیت جذب انرژی می‌شود.

برخلاف یافته‌های فوق، فارلی [۲۹] کاهش در انرژی مخصوص مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی، با افزایش در کسر حجمی الیاف از ۴۰ تا ۷۰٪ را گزارش نموده است. کاهش در انرژی مخصوص مربوط به کاهش در استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها با افزایش محتوای الیاف است.

در مطالعه بعدی فارلی و جونز [۶۲] دوباره لوله‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی با کسر حجمی بین ۴۰ تا ۵۵٪ را مورد تحقیق قرار دادند و نتایج مشابهی را به دست آوردند. آنها گزارش کردند که تعدادی از نمونه‌ها کاهش زیادی در قابلیت جذب انرژی خود با افزایش کسر حجمی الیاف را نشان دادند؛ در حالی که سایر نمونه‌ها کاهش کمی را نشان دادند. بنابراین بایستی نتیجه‌گیری کرد که

¹ Knitted

² Fiber Content

افزایش در محتوای الیاف اساساً همیشه سبب بهبود قابلیت جذب انرژی مخصوص سازه کامپوزیتی نمی‌گردد. پاسخ لهیدگی است که بیان‌کننده روند جذب انرژی است.

اسنودن و هول [۷۵] روی الیاف شیشه (SMC) با رزین‌های پلی‌استر و الیاف شیشه کار کردند که نتایج کار آنها نشان داد که با افزایش کسر حجمی الیاف، انرژی مخصوص نیز افزایش می‌یابد. نمونه لوله‌های تولید شده با روش قالبگیری حرارتی، تحت فشار محوری با نرخ بارگذاری (m/s) ۱۵ ساخته شد.

تورنتن و همکاران [۷۶] میله‌های از جنس شیشه/وینیل‌استر با کسر حجمی الیاف در دامنه ۱۰ تا ۵۰٪ را مطالعه نمودند که گزارش دادند انرژی مخصوص با افزایش کسر حجمی الیاف، افزایش می‌یابد.

۱-۱۹-۷- اثر نرخ بارگذاری نمونه‌ها

بنرمن و کیندرواتر [۷۷] نمونه‌های لوله‌ای شکل و تیر مانند کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که جذب انرژی با افزایش نرخ بارگذاری له‌شدن، افزایش می‌یابد. تورنتن [۷۸] تغییرات بسیار ناچیزی در جذب انرژی مخصوص لوله‌های گرافیت/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی (۹۰/۰) را روی یک دامنه وسیعی از نرخ‌های بارگذاری گزارش نمود. تورنتن [۷۹] همچنین رفتار جذب انرژی لوله‌های پالتروزن شیشه/پلی‌استر و شیشه/وینیل‌استر را در نرخ بارگذاری له‌شدن (بین ۰/۲۱ تا ۱۵ (m/s)) مورد بررسی قرارداد. او ۱۰٪ کاهش را با افزایش نرخ بارگذاری در مورد لوله شیشه/وینیل‌استر و ۲۰٪ افزایش در جذب انرژی را در مورد شیشه/پلی‌استر گزارش نمود. این می‌تواند استحکام کششی و مدول بالاتر وینیل‌استر را نشان دهد. تورنتن و همکاران [۷۶] در ادامه کار خود، میله‌های شیشه/وینیل‌استر را با نرخ بارگذاری بین ۰/۱۳ تا ۲/۵۴ (mm/min) بررسی نمودند.

فارلی [۴۷] لوله‌های کامپوزیتی کولار/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی با لایه‌چینی $[0 \pm \theta]_4$ را در نرخ بارگذاری له‌شدن شبه‌استاتیک (m/s) ۷/۶ بررسی نمود و دریافت که انرژی مخصوص مستقل از نرخ بارگذاری له‌شدن است.

وقتی فارلی [۸۰] لوله‌های کربن/اپوکسی و کولار/اپوکسی با لایه‌چینی $3[\pm\theta]$ را مورد مطالعه قرارداد، دریافت که انرژی مخصوص با تغییر در شرایط له‌شدن از شبه‌استاتیک به ضربه، ۳۵٪ افزایش می‌یابد. اندازه اثرات نرخ بارگذاری له‌شدن روی انرژی مخصوص تابع مکانیسمی است که فرایند له‌شدن را کنترل می‌کند.

آزمایش‌های له‌شدن استاتیک و دینامیک در دامنه نرخ بارگذاری بین ۱۸ تا ۲۴ (m/s) توسط ممالیس و همکاران [۶۷] روی سه نوع متفاوت از مواد کامپوزیتی مورد تحقیق قرار گرفت. دو نوع از مواد کامپوزیتی تشکیل شده بود از رزین‌های فایبرگلاس و وینیل‌استر و سومی از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر ساخته شده بود. نمونه‌های تحت بررسی هندسه متفاوتی داشتند: مربعی، دایروی و مخروطی دایروی. انرژی مخصوص نمونه مخروطی دایروی جدارنازک که از رزین پلی‌استر و الیاف بریده شده اتفافی مت از نوع شیشه ساخته شده بود، ۳۵٪ کاهش را تحت نرخ بارگذاری له‌شدن (m/s) ۲۱ نشان داد. بنابراین، نتیجه این بود که نرخ بارگذاری له‌شدن با زاویه مخروط و ضخامت نمونه ارتباط برقرار می‌کند. کاهش در انرژی مخصوص به سبب افزایش نرخ بارگذاری له‌شدن، قابل ملاحظه‌تر می‌شود، وقتی که ضخامت دیواره و زاویه مخروط بزرگ‌تر باشد. به‌رحال نرخ بارگذاری له‌شدن اثر قابل ملاحظه‌ای روی جذب انرژی مخصوص لوله‌های دایروی و مربعی جدارنازک ساخته شده از سه نوع ماده کامپوزیتی مختلف را از خود نشان نداد.

در یک تحقیق دیگر کیندرواثر [۸۱] یک اختلاف کم را در جذب انرژی بین لوله‌های کولار/اپوکسی شبه‌استاتیک و دینامیک مشاهده نمود.

اشموسر و ویکلیف [۵۱] کاهش تا ۳۰٪ در جذب انرژی لوله‌های کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی را در آزمایش ضربه با لایه‌چینی $0_2 \pm 45$ s در مقایسه با نتایج آزمایش استاتیک گزارش کردند.

راماگریشنا [۷۴] اثر نرخ بارگذاری روی قابلیت جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه دوخته شده/اپوکسی و الیاف کربن دوخته شده/اپوکسی را مطالعه نمود. انرژی مخصوص هر دو نوع لوله

کامپوزیتی حدود ۲۰٪ بر اثر تغییر در شرایط آزمایش از شبه‌استاتیک به ضربه کاهش یافت. این امر به خاطر کاهش در چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای (GIC) مواد کامپوزیتی با افزایش نرخ بارگذاری، رخ می‌دهد. هنگامی که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کاهش می‌یابد، مقاومت در برابر ترک‌های طولی دیواره لوله کمتر می‌شود و بنابراین جذب انرژی پایین‌تری را به همراه خواهد داشت.

۱-۱۹-۲-۸- پژوهش‌های اخیر در مورد جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی

در سال‌های اخیر نیز اوچلسکی و گوتوویچی [۸۲] یک تحقیق تجربی روی قابلیت جذب انرژی لوله‌ها و مخروط‌های ناقص کامپوزیتی از نوع کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی انجام دادند و اثر پارامترهای نوع الیاف، نوع سازه، هندسه و شکل نمونه‌ها، زاویه الیاف و نوع لایه‌چینی را روی قابلیت جذب انرژی تحلیل کردند.

پالانیولو و همکاران [۸۳] با انجام آزمایش‌های شبه‌استاتیک روی ۹ نمونه هندسه متفاوت از لوله‌های کامپوزیتی، اثر هندسه، ابعاد و مکانیسم ماشه‌گذاری را روی تغییر شکل پیش‌رونده لوله‌های کامپوزیتی سائز کوچک بررسی کردند. آنها نمونه‌های خود را به روش لایه‌چینی دستی از الیاف شیشه تک‌جهته و رزین پلی‌استر ساختند. تحقیقات ایشان نشان داد که جذب انرژی اشکال هندسی خاص نسبت به اشکال هندسی استاندارد مانند مقاطع مربعی و شش‌گوش، بهتر است.

جکسون و همکاران [۸۴] با انجام آزمایش‌های شبه‌استاتیک و دینامیک روی نمونه نیم‌دایره‌ای شکل پوسته کامپوزیتی از نوع کربن/اپوکسی، اثر طراحی چندلایه را روی قابلیت جذب انرژی آن به صورت تجربی مورد پژوهش قرار دادند و یک چندلایه با لایه‌چینی شبه‌ایزوتروپیک را دارای بالاترین جذب انرژی مخصوص معرفی نمودند.

نیک‌نژاد و همکاران [۸۵] آزمایش‌های شبه‌استاتیک را روی لوله‌های کامپوزیتی از نوع شیشه/وینیل‌استر، توخالی و همچنین توپر پر شده از فوم پلی‌اورتان با ویژگی‌های هندسی مختلف جهت بررسی ویژگی‌های جذب انرژی نمونه‌ها انجام دادند. لازم به ذکر است که آنها تعدادی از لوله‌های

کامپوزیتی توخالی و توپر را به صورت عرضی بین دو صفحه صلب تحت بار فشاری قرار دادند که نتایج تجربی نشان داد که وجود فوم پلی‌اورتان در داخل لوله‌های کامپوزیتی میزان جذب انرژی مخصوص را افزایش می‌دهد.

پیکت و دایال [۸۶] اثر هندسه لوله و زاویه الیاف را روی جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی دایره‌ای از جنس شیشه/اپوکسی به صورت عددی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و با نتایج تجربی که در جایی دیگر انجام شده بود مقایسه کردند که تطابق قابل توجهی بین نتایج عددی و تجربی وجود داشت. کیم و همکاران [۸۷] مطالعه‌ای بر روی ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای کامپوزیتی با الیاف تقویت‌کننده متفاوت کربن، کولار و هیبرید کربن - کولار به وسیله آزمایش‌های شبه‌استاتیک انجام دادند.

پالانیولو و همکاران [۸۸] یک تحقیق تجربی روی لوله‌های کامپوزیتی پالترژن با پروفیل‌های مربعی و دایره‌ای از جنس شیشه/پلی‌استر و شیشه/وینیل‌استر انجام دادند و اثرات شکل هندسی، ماشه، نرخ کرنش و نوع رزین را روی جذب انرژی بررسی نمودند.

وریر و همکاران [۸۹] اثر شرایط مرزی را روی جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی پلی‌مری جدارنازک، مورد پژوهش قرار دادند.

در جدول‌های (۹-۱) و (۱۰-۱) خلاصه‌ای از مقادیر جذب انرژی مخصوص نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده به ترتیب با الیاف کربن و شیشه تحت بارگذاری محوری جهت مقایسه و تعیین محدوده نسبی جذب انرژی آورده شده است.

جدول (۹-۱): خلاصه‌ای از مقادیر جذب انرژی مخصوص نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) و بارگذاری محوری

شکل مقطع	نوع زمینه	نوع لایه چینی	جذب انرژی مخصوص	واحد مرجع
دایره	اپوکسی/PEEK	تک‌جهته	۵۷-۱۲۷	[۶۱] kJ/kg
دایره	اپوکسی	دوخته‌شده	۲۶-۶۰	[۷۳] kJ/kg
دایره	PEEK	تک‌جهته	۱۷۱	[۹۰] J/kg
مربع	اپوکسی	پارچه	۱۵	[۹۱] kJ/kg
مربع	وینیل-استر/اپوکسی	قیطان‌دوزی‌شده	۲۰	[۹۲] kJ/kg
دایره/مربع	اپوکسی	رشته‌پیچی‌شده	۳۵-۴۳	[۹۳] kJ/kg
مخروطی	اپوکسی	پارچه	۷۰	[۸۲] kJ/kg
مخروطی	اپوکسی	بافته‌شده	۶۵	[۹۴] J/kg
دایره	PA/PEEK	نامشخص	۱۶۰	[۹۵] J/kg
دایره	اپوکسی	تک‌جهته/بافته‌شده ساده	۷۳-۸۲	[۸۷] J/kg
مربع	اپوکسی	تک‌جهته	۳۷	[۹۶] kJ/kg
دایره	اپوکسی	قیطان‌دوزی‌شده	۵۱	[۹۷] J/kg
مربع	اپوکسی	قیطان‌دوزی‌شده	۳۰	[۹۸] kJ/kg

جدول (۱۰-۱): خلاصه‌ای از مقادیر جذب انرژی مخصوص نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) و بارگذاری محوری

شکل مقطع	نوع زمینه	نوع لایه چینی	جذب انرژی مخصوص	واحد مرجع
مربع/شش‌گوش	PA	پارچه بافته‌شده	۴۰-۴۹	[۹۹] kJ/kg
مربع/تیر I	پلی‌استر	تک‌جهته	۳۶-۴۴	[۱۰۰] kJ/kg
دایره	پلی‌استر	مت	۳۲-۵۱	[۱۰۱] kJ/kg
دایره	پلی‌استر/وینیل‌استر	مت سوزنی اتفاقی و NCF	۳۵-۷۷	[۱۰۲] kJ/kg
دایره	وینیل‌استر	مت سوزنی	۶۲	[۱۰۳] kJ/kg
دایره	اپوکسی	تک‌جهته	۵۸-۷۶	[۱۰۴] kJ/kg
مربع	پلی‌استر	پارچه (بافته ریز الیاف شیشه)	۳۲	[۱۰۵] kJ/kg
مخروطی	اپوکسی	مت سوزنی اتفاقی	۶۸	[۱۰۶] kJ/kg

از طرفی به‌عنوان یک مطالعه موردی در پژوهشی که توسط ژاکوب و همکاران [۱۰۷] برای بررسی پارامترهای موثر بر روی جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای صورت گرفت، آزمایش‌هایی طراحی شدند که نتایج آن به‌طور خلاصه در جدول (۱۱-۱) آمده است.

جدول (۱۱-۱): اثر پارامترهای مختلف روی جذب انرژی مخصوص و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای [۱۰۷]

پارامتر	نوع الیاف	نوع رزین	نوع لایه چینی	کسر حجمی الیاف	شرایط تولید	نرخ بارگذاری (m/s)	نوع ماشه	مشخصات هندسی (D/t)	جذب انرژی مخصوص (kJ/kg)	چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای (J/m ²)
آزمایش اول	کولار ^۱	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۸۰	۱۱۳۰
آزمایش دوم	کربن	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۹۰	۱۱۵۰
آزمایش سوم	کولار	پلی اتراتر کتون	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۷۰	۱۲۳۰
آزمایش چهارم	کولار	اپوکسی	[±۵۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۷۵	۱۳۰۰
آزمایش پنجم	کولار	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۲۲/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۷۶	۱۴۳۰
آزمایش ششم	کولار	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	به‌سرعت خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۲۵	۶۷	۱۲۳۴
آزمایش هفتم	کولار	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۵	پخ خورده	۲۵	۷۸	۱۳۴۲
آزمایش هشتم	کولار	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	مورب	۲۵	۶۵	۱۴۳۲
آزمایش نهم	کولار	اپوکسی	[±۴۵°]	٪۱۵/۷۵	آهسته خنک‌شده	۱۰	پخ خورده	۴۵	۷۸	۱۲۳۶

^۱ Kevlar

۱-۱۹-۲-۹- نتیجه‌گیری در مورد پژوهش‌های گذشته جذب انرژی پوستانه‌های کامپوزیتی

اثر پارامترهای مختلف روی قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی در ۹ آزمایش انجام شده توسط ژاکوب و همکاران بررسی شد که نتایج آن به‌طور خلاصه به شرح ذیل است:

نوع تقویت‌کننده به‌کار رفته در سازه‌های کامپوزیتی تأثیر بسیار زیادی روی خواص جذب انرژی آن دارد که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

۱- کاهش در چگالی الیاف، سبب افزایش قابلیت جذب انرژی ویژه لوله‌های جاذب انرژی کامپوزیتی می‌گردد.

۲- کرنش به‌خرابی^۱ بالاتر الیاف (مقدار کرنشی که یک جامد می‌تواند تحمل کند قبل از اینکه به شکست برسد) سبب افزایش قابلیت جذب انرژی، لوله‌های جاذب انرژی کامپوزیتی می‌گردد.

۳- وقتی لوله‌های جاذب انرژی در مودهای مشابهی دچار له‌شدن می‌شوند، تغییرات در سفتی الیاف، اثر کمتری نسبت به کرنش شکست روی قابلیت جذب انرژی آن دارد.

مهم‌ترین تأثیرات نوع زمینه (رزین) روی قابلیت جذب انرژی کامپوزیت‌ها عبارت‌اند از:

۱- چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای بالاتر رزین‌های گرمانرم، باعث افزایش قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی با این نوع زمینه می‌شود.

۲- افزایش کرنش شکست رزین، سبب بزرگ‌تر شدن قابلیت جذب انرژی در الیاف تقویت‌کننده ترد^۲ می‌شود و به‌طور عکس جذب انرژی الیاف تقویت‌کننده نرم، با افزایش کرنش شکست رزین، کاهش می‌یابد.

۳- تغییرات در سفتی رزین، اثر بسیار ناچیزی روی قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی با الیاف تقویت‌کننده نرم دارد.

۴- مطالعات بیشتری برای فهم بهتر نقش رزین‌های گرماسخت روی قابلیت جذب انرژی مواد

کامپوزیت لازم است [۱۰۷].

^۱ Strain to Failure

^۲ Brittle

لایه‌چینی بر اساس جهت‌گیری‌های مختلف الیاف برای افزایش قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی در موارد ذیل بخصوص موردنیاز است:

۱- افزایش تعداد الیاف شکسته شده

۲- افزایش تغییر شکل مواد

۳- افزایش سفتی محوری مواد کامپوزیت

۴- افزایش حمایت عرضی الیاف محوری [۱۰۷].

یافته‌های مهم در زمینه اثر هندسه نمونه‌ها عبارت‌اند از:

۱- مکانیسم‌های فروریزی منطقه له‌شدن نشان می‌دهد که قابلیت جذب انرژی مجموع مواد کامپوزیت و ابعاد هندسی لوله‌های جاذب انرژی، تأثیر بسیار زیادی روی این مکانیسم‌های فروریزی دارند.

۲- جذب انرژی مخصوص، برای یک لایه‌چینی و هندسه لوله جاذب خاص، بر اساس ترتیب زیر برای مقاطع مختلف رتبه‌بندی می‌شود [۱۰۷]:
دایره < مربع < مستطیل

مهم‌ترین تأثیرات روش تولید روی قابلیت جذب انرژی کامپوزیت‌ها عبارت‌اند از:

۱- علت متغیر بودن قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی با نرخ سرمایش^۱ مواد کامپوزیتی، وابستگی نرخ سرمایش با چقرمگی شکست مواد کامپوزیتی گرمانرم شبه بلوره‌ای^۲ است. چقرمگی شکست با افزایش نرخ سرمایش، افزایش یافته که در نهایت سبب افزایش قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی گرمانرم می‌شود.

۲- مطالعات مشابهی روی تأثیر فرایند تولید در قابلیت جذب انرژی لوله‌های جاذب کامپوزیتی از نوع مواد گرماسخت تا زمان پژوهش ژاکوب و همکاران [۱۰۷] گزارش نشده است.

یافته‌های مهم پیرامون اثر کسر حجمی الیاف عبارت‌اند از:

۱- در مورد بررسی اثر کسر حجمی الیاف روی جذب انرژی تا زمان پژوهش ژاکوب و همکاران [۱۰۷] کمتر پژوهشی صورت گرفته است.

^۱ Cooling Rate

^۲ Semi-Crystalline

۲- در عمل این مطلب صحت ندارد که فکر کنیم با افزایش مقدار الیاف، میزان جذب انرژی مخصوص مواد کامپوزیتی بهتر می‌شود. توضیح قابل قبول این موضوع این است که با افزایش کسر حجمی الیاف، در واقع حجم رزین (ماتریس) بین الیاف کاهش می‌یابد که این سبب افزایش چگالی رزین شده که در نهایت منجر به کاهش استحکام بین لایه‌ای مواد کامپوزیتی می‌گردد و کاهش استحکام بین لایه‌ای، سبب ایجاد ترک‌های بین لایه‌ای در بارهای پایین شده و در نهایت قابلیت جذب انرژی کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین تغییرات در جذب انرژی در اثر تغییر کسر حجمی الیاف، به وسیله پاسخ له شدن مواد کامپوزیتی تعیین می‌گردد [۱۰۷].

یافته‌های مهم پیرامون اثر نرخ بارگذاری روی قابلیت جذب انرژی عبارت‌اند از:

۱- قابلیت جذب انرژی تابعی از نرخ بارگذاری است، حال آن که پاسخ مکانیکی مکانیسم‌های له شدن، تابعی از نرخ کرنش است.

۲- قابلیت‌های جذب انرژی کرنشی الیاف و شکل هندسی هدف، عامل بسیار مهمی است که مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌ها در نرخ‌های پایین کرنش را نشان می‌دهد.

۳- قابلیت‌های جذب انرژی کرنشی الیاف و شکل هندسی سازه در نرخ‌های بسیار بالای کرنش، تا زمانی که سازه در یک مود محلی^۱ پاسخ می‌دهد، کم اهمیت است. چیزی که مهم است مقدار انرژی تلف شده در مکانیسم‌های: جدایش لایه‌ها، جدایش^۲ و بیرون کشیدگی الیاف^۳ است [۱۰۷].

۱-۲۰- کاربرد جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی در صنعت خودرو

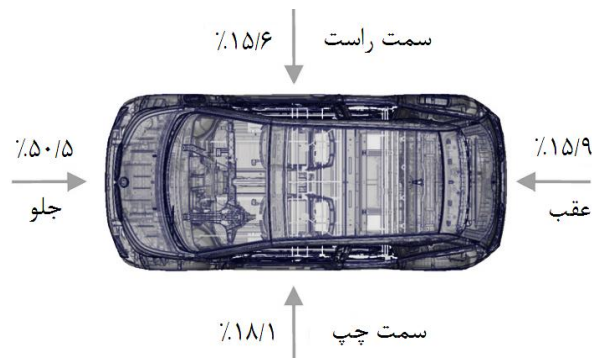
همانطور که گفته شد سازه‌های کامپوزیتی به جهت پتانسیل کاهش وزن بالایی که دارند در صنایع امروزی به جهت کاهش مصرف سوخت و آلودگی کمتر محیط زیست بسیار مورد توجه می‌باشند که یکی از این صنایع، صنعت خودروسازی می‌باشد. از طرفی به جهت ایمنی مسافری، در ساخت وسایل- نقلیه بایستی از سازه‌های جاذب انرژی سبک استفاده شود لذا با توجه به اینکه در طراحی چنین

¹ Local Mode

² Debonding

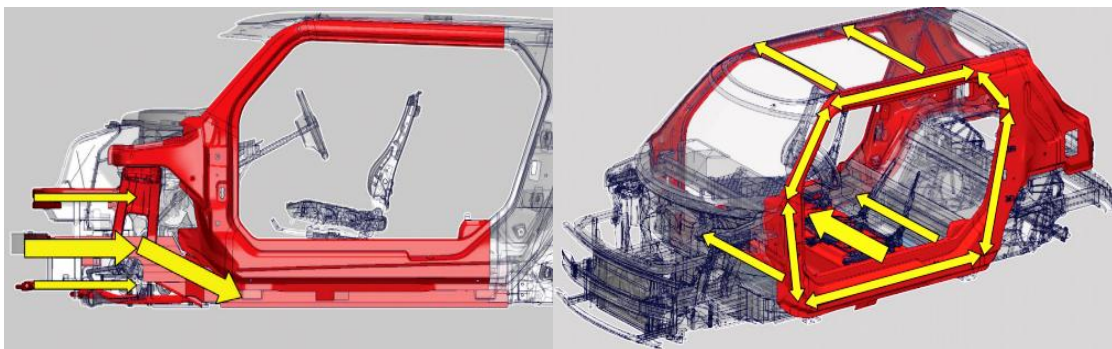
³ Fiber Pull-out

سازه‌هایی شناخت موقعیت وقوع حوادث مهم می‌باشد، پژوهش‌هایی در زمینه توزیع موقعیت تصادم در خودروها صورت گرفته، که وضعیت توزیع نسبی موقعیت تصادم مطابق شکل (۱-۲۵) می‌باشد. همانطور که در شکل (۱-۲۵) مشخص است بیشترین موقعیت تصادم مربوط به جلو و سمت چپ وسیله‌نقلیه می‌باشد.



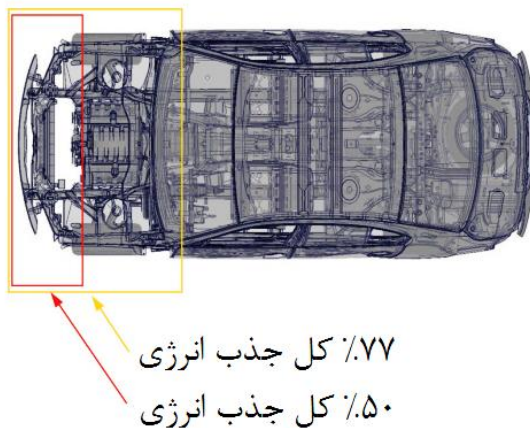
شکل (۱-۲۵): توزیع نسبی موقعیت تصادم در خودروها [۹]

در شکل (۱-۲۶) مسیر اعمال نیرو در تصادم از موقعیت جلو و سمت چپ نشان داده شده است که بایستی در سازه‌های این دو بخش به منظور جذب انرژی مدنظر قرار گیرد.



شکل (۱-۲۶): نمایش مسیر نیروها در موقعیت تصادم جلو و سمت چپ بر روی خودرو مدل BMW i3 [۹]

به طور کلی، بخش جلوی خودرو از طریق پارامترهای سفتی، اتلاف انرژی و کنترل تغییر شکل نقش بسیار مهم و تاثیرگذاری را در حفاظت از سرنشینان خودرو ایفا می‌کند. هر سه هدف فوق با استفاده از مواد کامپوزیت به طور همزمان قابل تامین می‌باشد. در شکل (۱-۲۷) سهم نواحی اصلی جلوی خودرو در جذب انرژی نشان داده شده است.



۷۷٪ کل جذب انرژی

۵۰٪ کل جذب انرژی

شکل (۱-۲۷): نواحی اصلی جذب انرژی در خودرو مدل BMW ICE [۹]

۱-۲۱- تعریف مسئله و ضرورت انجام تحقیق

امروزه بکارگیری سازه‌های کامپوزیتی در صنایعی مانند هوافضا و خودروسازی به جهت استحکام و سفتی مخصوص بالایی که دارند، به سرعت در حال رشد است. از طرفی با توجه به اینکه ایمنی سرنشینان وسایل نقلیه در رقابت بین سازندگان بسیار مهم است، سازه‌های جذب انرژی نقشی تاثیرگذار دارند. پوسته‌های استوانه‌ای، یکی از تجهیزات مهم جذب انرژی به‌شمار می‌رود که دارای سه ویژگی: قیمت مناسب، سبکی و ساختمان ساده است. بنابراین در این پایان‌نامه از روش آماری تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل پارامترهای شش‌گانه: قطر داخلی، طول، ضخامت، چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده و نوع فرایند ساخت که بر قابلیت جذب انرژی پوسته‌ها موثرند، استفاده شده است و در نهایت نیز انواع مودهای مکانیسم‌های فروریزی پیچیده‌ای که میزان جذب انرژی را کنترل می‌کنند، مورد مطالعه قرار گرفت.

ساختار این پایان‌نامه براساس چهار فصل و یک پیوست استوار است. فصل اول مقدمه است که در آن تعاریف مربوط به مسئله شرح داده شده و پس از مروری بر پژوهش‌های گذشته که در قالب بررسی هفت پارامتر موثر بر قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی، انجام شده است به ضرورت انجام تحقیق پرداخته است. فصل دوم، به معرفی مواد، روش‌های ساخت و نحوه اجرای آزمایش‌های تجربی لهیدگی محوری پوسته‌ها که به روش شبه استاتیک انجام شده است، می‌پردازد. در فصل سوم

با استفاده از کمیت جذب انرژی مخصوص، پوسته‌ها به روش تاگوچی تحلیل آماری شده‌اند؛ و ضمن معرفی مکانیسم‌های فروریزی پوسته‌ها، اثر پارامترهای ششگانه بر آنها بررسی می‌شود. در فصل چهارم نیز به طور خلاصه نتایج تجربی به دست آمده در این پژوهش ذکر شده و برای کارهای آینده پیشنهادهایی ارائه شده است. در انتها نیز پیوست الف آمده است که در آن اطلاعات فنی مواد و تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت پوسته‌ها آورده شده است.

فصل دوم

مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

با توجه به اینکه مواد مورد استفاده در فرایند ساخت تاثیر مهمی در سازه‌های کامپوزیتی دارند، در این بخش به معرفی مواد مورد استفاده در تولید پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی مربوط به این پایان-نامه پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- الیاف تقویت‌کننده

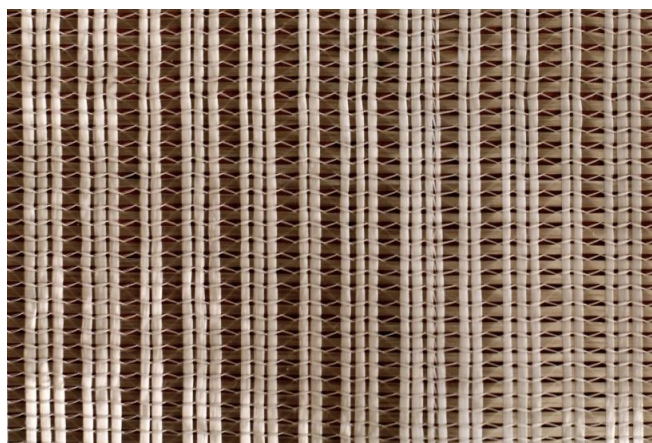
همانطور که قبلا در فصل اول گفته شد پارچه‌های کوک‌زده‌شده به جهت خواص مکانیکی بهتر و بهبود سرعت ساخت قطعات نسبت به پارچه‌های بافته‌شده در اولویت اول انتخاب قرار دارند. بنابراین از الیاف کوک‌زده‌شده تک‌جهته و چند محوره شیشه نوع الکتريکی (E-Glass) و کربن نوع استحکام بالا (HS) مطابق جدول (۲-۱)، در این پایان‌نامه استفاده شده است. اطلاعات برگه‌های فنی مربوط به انواع الیاف مورد استفاده در این پایان‌نامه در جدول‌های (الف-۱) تا (الف-۷) پیوست الف و تصاویر آنها نیز در شکل‌های (۲-۱) تا (۲-۵) نشان داده شده است.

جدول (۲-۱): نوع پارچه کوک‌زده‌شده مورد استفاده از نظر ساختار و دسته‌بندی الیاف تقویت‌کننده

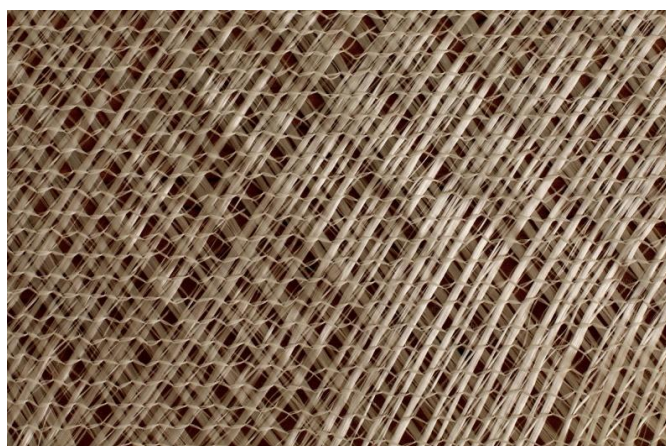
ردیف	نوع پارچه کوک‌زده‌شده	نوع و ترکیب مواد به کار رفته در تهیه الیاف
۱	پارچه تک‌جهته	E-Glass
۲	پارچه چندمحوره ۹۰/۰	E-Glass
۳	پارچه چندمحوره ۴۵/۰-۴۵+	E-Glass
۴	پارچه چندمحوره ۴۵/۰-۴۵+	E-Glass
۵	پارچه تک‌جهته	(HS)-Carbon
۶	پارچه چندمحوره ۹۰/۰	(HS)-Carbon
۷	پارچه چندمحوره ۴۵/۰-۴۵+	(HS)-Carbon
۸	پارچه چندمحوره ۴۵/۰-۴۵+	(HS)-Carbon



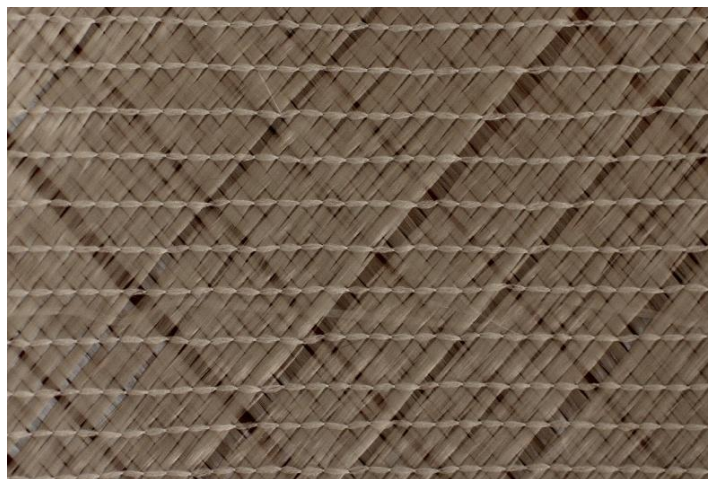
شکل (۱-۲): الیاف تقویت کننده کوک زده شده تک جهته شیشه نوع الکتريکی



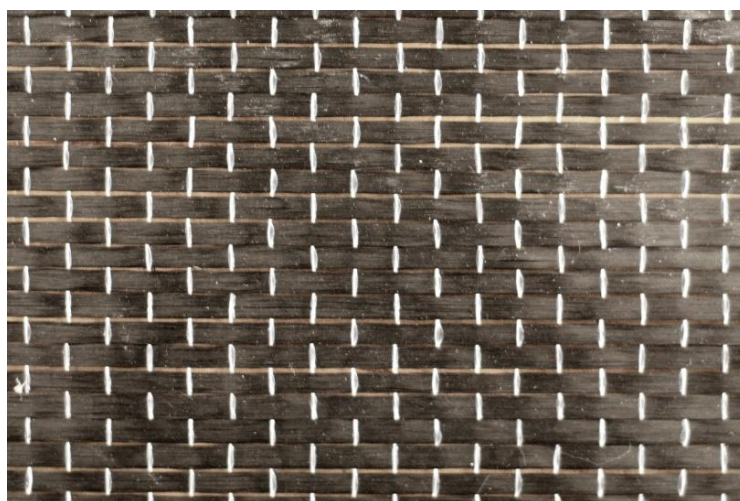
شکل (۲-۲): الیاف تقویت کننده کوک زده شده دو جهته شیشه نوع الکتريکی (۹۰/۰)



شکل (۳-۲): الیاف تقویت کننده کوک زده شده دو جهته شیشه نوع الکتريکی (۴۵/-۴۵)



شکل (۲-۴): الیاف تقویت کننده کوک زده شده سه جهته شیشه نوع الکتريکی (۴۵/۰/-۴۵+)



شکل (۲-۵): الیاف تقویت کننده تک جهته کوک زده شده کربن نوع (HS)

۲-۱-۲- رزین مصرفی

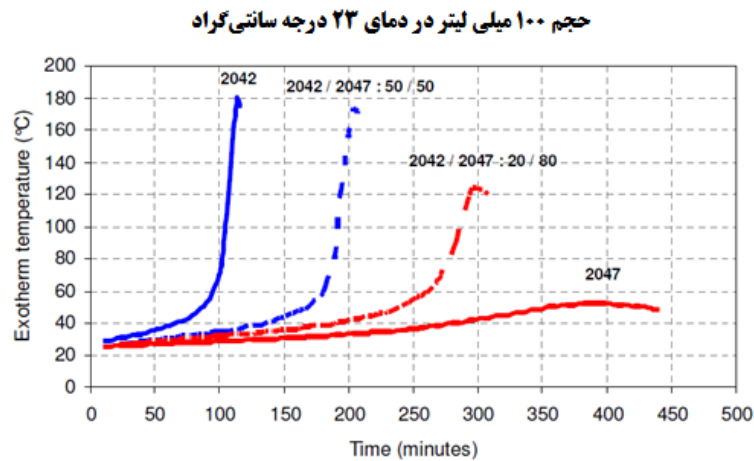
یکی دیگر از تأثیرگذارترین پارامترهای مورد استفاده در فرایند ساخت، نوع رزین مصرفی است که به شدت بر روی سرعت فرایند و کیفیت قطعه نهایی تأثیرگذار است. با توجه به این نکته که رزین های اپوکسی از لحاظ انطباق با محیط زیست مناسب تر از دیگر رزین های مورد استفاده در صنعت بوده و از سویی دیگر خواص مکانیکی مناسب تری در مقایسه با دیگر رزین های مصرفی دارد، جزء پرفردارترین رزین های مصرفی در صنعت کامپوزیت است. البته لازم به ذکر است که این دسته از رزین ها به واسطه لزجت بالا و دوجزئی بودن آنها مشکلاتی در حین فرایند تزریق رزین به کمک خلأ ایجاد می کنند.

از آنجایی که در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ با توجه به اینکه رزین فقط با فشار خلأ الیاف را آغشته به رزین می‌کند، لذا هرچه لزجت کمتر باشد، نفوذپذیری بیشتر شده و در نتیجه فرایند ساخت سریع‌تر پیش می‌رود. لزجت مناسب برای رزین‌های اپوکسی مورد استفاده در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ، بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ (cP) است.

با توجه به اینکه رزین‌های اپوکسی دوجزئی می‌باشند، به‌محض ترکیب رزین و هاردنر واکنش صورت گرفته و در یک زمان مشخص رزین باید مورد استفاده قرار بگیرد، در غیر این صورت لزجت رزین افزایش یافته و تزریق به‌سختی صورت گرفته یا انجام نمی‌شود. افزایش دما نیز لزجت رزین را کاهش داده و از طرفی باعث کاهش زمان کارکرد آن نیز می‌شود. این موضوع با افزایش ابعاد قطعه تولیدی بحرانی‌تر شده و نیازمند دقت بیشتر در انتخاب مواد و شرایط قطعه تولیدی است. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب رزین، دمای انتقال شیشه‌ای است که به‌واسطه آن رزین باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که در اثر افزایش دما حین پخت قطعه تغییر فرم ندهد؛ یعنی دمای پخت و کاری نمونه کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای آن باشد.

پارامتری دیگر که در انتخاب نوع رزین مصرفی و کیفیت نهایی قطعه بسیار تأثیرگذار است، حداکثر گرمای ایجاد شده در حین تزریق^۱ است. اصولاً در هنگام ترکیب رزین و هاردنر، با گذشت زمان مشخص، حرارتی حاصل می‌شود که می‌تواند عاملی جهت ایجاد خواص منفی در قطعه گردد. برای مثال در نقاطی از قطعه که حجم الیاف زیاد است، به خاطر تجمع رزین، حرارت ایجاد شده در آن نقطه افزایش یافته و رزین زودتر به مرحله ژل شدن می‌رسد و این عامل منجر به کاهش سرعت حرکت رزین و در نتیجه آن تغییر تمامی پارامترهای وابسته به آن در فرایند می‌گردد [۱۰۸]. لذا باید دقت کرد رزینی انتخاب شود که قله دمایی پایینی داشته باشد. در این رابطه مقایسه لازم با دیگر رزین‌ها انجام شده و در شکل (۲-۶) نمودار مربوط به قله دمایی رزین ۲۰۴۰ با هاردنر ۲۰۴۷ در درصد‌های اختلاط مختلف آورده شده است.

^۱ Exothermic Peak



شکل (۲-۶): رسم دمای ایجاد حرارت بر حسب زمان برای میزان اختلاطهای متفاوت [۱۰۹].

نوع رزین مورد استفاده در این پایان نامه از نوع اپوکسی است که خواص فیزیکی مناسب تری نسبت به سایر رزین ها داشته و از طرفی گران تر است. رزین مورد استفاده (با در نظر گرفتن خواص مطلوب و قیمت مناسب) با نام تجاری ۲۰۴۰ و هاردنر ۲۰۴۷ از شرکت آکسون^۱ فرانسه با درصد اختلاط وزنی ۱۰۰ به ۳۲ است.

کاربرهای ذکر شده برای این نوع رزین در برگه اطلاعات فنی شرکت سازنده آن عبارت است از:

- تولید سازه های کامپوزیتی به روش های تزریق رزین مایع
- تزریق به کمک خلأ و در فشار پایین
- رشته پیچی

و خصوصیات ذکر شده برای این نوع رزین در برگه اطلاعات فنی شرکت سازنده آن نیز عبارت

است از:

- لزجت بسیار پایین
- قابلیت ترشوندگی^۲ بالا در الیاف
- رفتار مناسب در محیط مرطوب
- خواص مکانیکی مناسب

¹ Axson

² Wetting Ability

• قابلیت ترشوندگی مناسب فوم‌ها و چوب بالسا

و خواص فیزیکی و مکانیکی رزین فوق بر اساس اهمیت پارامترها در جدول‌های (الف-۸) و (الف-۹) پیوست الف آمده است.

۲-۱-۳- خواص الاستیک و شکست مواد پوسته‌های کامپوزیتی

بعد از لایه‌چینی و برش نمونه‌های آزمون از چندلایی‌های تخت تولید شده به روش تزریق رزین به کمک خلأ از مواد مورد استفاده در پوسته‌ها مطابق روش معرفی شده در بخش ۱-۱۱ و انجام آزمون-های خواص مکانیکی جهت محاسبه خواص الاستیک و شکست، نتایج مطابق جدول (۲-۲) بدست آمد.

لازم به ذکر است که آزمون‌ها، مطابق استاندارد ASTM D3039 برای بدست آوردن مدول الاستیک، ضریب پواسون و استحکام نهایی کششی در جهت الیاف و عمود بر الیاف صورت گرفت [۱۱۰] و مطابق استاندارد ASTM D3518 برای بدست آوردن مدول برشی و استحکام نهایی در برش صورت گرفت [۱۱۱]. همچنین آزمون‌هایی نیز مطابق استاندارد ASTM D6641 برای بدست آوردن استحکام نهایی فشاری در جهت الیاف و عمود بر الیاف صورت گرفت [۱۱۲].

جدول (۲-۲): خواص الاستیک و شکست مواد مورد استفاده در ساخت پوسته‌ها به روش VIP

مدول برشی G_{12} (MPa)	ضریب پواسون ν_{12}	مدول الاستیک در جهت عمود بر الیاف E_2 (MPa)	مدول الاستیک در جهت الیاف E_1 (MPa)	نوع الیاف چندلایی
۴۰۰۰	۰/۳	۳۰۰۰	۳۰۰۰۰	الیاف شیشه تک‌جهته
۴۰۰۰	۰/۳	۱۶۵۰۰	۲۰۰۰۰	الیاف شیشه دو‌جهته (۹۰/۰)
۲۳۰۰	۰/۳	۱۹۰۰۰	۱۹۰۰۰	الیاف شیشه دو‌جهته (۴۵/+۴۵)
۱۴۱۵۰	۰/۳	۹۰۰۰	۲۲۰۰۰	الیاف شیشه سه‌جهته (۴۵/۰/+۴۵)
۵۷۰۰	۰/۲۷	۶۰۰۰	۸۰۰۰۰	الیاف کربن تک‌جهته

استحکام نهایی	استحکام نهایی	استحکام نهایی	استحکام نهایی	استحکام نهایی	نوع الیاف چندلایی
کششی	کششی در جهت	فشاری	فشاری در جهت	کششی	
در جهت الیاف	عمود بر الیاف	در جهت الیاف	عمود بر الیاف	در جهت الیاف	
X_T (MPa)	Y_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_C (MPa)	S (MPa)	
۶۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۶۶	۶۵	الیاف شیشه تک‌جهته
۳۷۰	۳۱۸	۲۴۶	۲۱۲	۴۶	الیاف شیشه دوجته (۹۰/۰)
۲۰۷	۲۰۷	۱۴۳/۸۸	۱۴۳/۸۸	۳۳/۵	الیاف شیشه دوجته (-۴۵/ +۴۵/)
۳۹۰	۱۸۰	۲۶۰	۱۲۰	۱۷۰	الیاف شیشه سه‌جهته (-۴۵/ +۴۵/۰)
۱۱۰۰	۲۷	۷۳۰	۱۸	۵۶/۵	الیاف کربن تک‌جهته

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

با توجه به اینکه تجهیزات تولید تاثیر بسزایی در تولید سازه‌های کامپوزیتی دارند، در این بخش به معرفی تجهیزات مورد استفاده در تولید پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی مربوط به این پایان‌نامه می‌پردازیم.

۲-۲-۱- پمپ خلأ

ایجاد خلأ به منظور نیروی محرکه، جهت حرکت رزین به داخل الیاف از مهم‌ترین بخش‌های تولید است. در این راستا محدوده کاری پمپ‌ها بسته به میزان نیرومحرکه موردنیاز، از ۱۶ تا $300 \text{ (m}^3/\text{h)}$ است. پمپ خلأ موردنیاز از یک شرکت ایرانی با نام پوش تهیه شده که حجم خلأ $300 \text{ (m}^3/\text{h)}$ ، فشار مطلق آن 0.5 (mbar) و همچنین دارای یک مخزن 500 (L) است. لازم به ذکر است فشار بهینه برای فرایند تزریق رزین به کمک خلأ بین 0.7 الی 0.8 (Bar) است [۱۰۸].

همان‌طور که در شکل (۲-۷) دیده می‌شود، برای ساخت لوله‌های کامپوزیتی جاذب انرژی از دستگاه پمپ خلأ کارگاه غیرفلزی پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است که این دستگاه شامل دو پمپ است که به صورت موازی در مدار قرار گرفته‌اند و این امر، به دلیل

حساسیت روش تزریق رزین به کمک خلأ به توقف ناگهانی پمپ است که ممکن است در قطعه کامپوزیتی ایجاد عیبی تحت عنوان نقطه خشک^۱ نماید. همچنین این دستگاه شامل محفظه‌ای تحت عنوان تله رزین است تا رزین اضافی که از داخل قالب مکش می‌شود در آن به دام افتد و به داخل پمپ و مخزن آن وارد نشود.



شکل (۲-۷): دستگاه پمپ خلأ پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد

۲-۲-۲- لایه کیسه خلأ

در آخرین مرحله لایه‌چینی روی لایه‌های دیگر قرار گرفته و به عبارتی دیگر کل سطح قالب را پوشانده و سیستم را کاملاً آب‌بند می‌کند. از مهم‌ترین خصوصیات این لایه نهایی قابلیت کشسانی بالا جهت تحمل سطوح کوچک، تیز و تحمل حرارتی در دماهای بالا جهت پایداری نمونه در هنگام پخت درون کوره است. در جدول (الف-۱۰) پیوست الف مشخصات کیسه خلأ مورد استفاده برای ساخت پوسته‌های این پایان‌نامه بیان شده است.

^۱ Dry Spot

۲-۲-۳- فیلم سوراخ‌دار

این لایه به‌منظور عبور رزین اضافی واقع در الیاف اولیه و همچنین گازها استفاده شده و پس از لایه پارچه‌ای غیرچسبنده قرار می‌گیرد. از دیگر وظایف این لایه سهولت در جدایی شبکه جریان رزین از لایه پارچه‌ای غیرچسبنده نیز است. حد تحمل دمایی و درصد کشش از مشخصه‌های تأثیرگذار در این فرایند است. در جدول (الف-۱۱) پیوست الف مشخصات فیلم سوراخ‌دار مورد استفاده بیان شده است؛ و در شکل (۲-۸) نوع مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۲-۸): فیلم سوراخ‌دار مورد استفاده

۲-۲-۴- شبکه جریان رزین

از این شبکه جهت عبور بهتر رزین در زیر کیسه خلأ استفاده می‌شود. از دیگر وظایف این لایه مشاهده و بررسی جبهه سیلان رزین در حین فرایند است. نوع شبکه‌بندی در این لایه بسته به ابعاد کار متفاوت خواهد بود. در جدول (الف-۱۲) پیوست الف مشخصات لایه مورد استفاده مشاهده می‌گردد؛ و در شکل (۲-۹) نوع مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۹-۲): شبکه جریان رزین به‌عنوان آخرین لایه در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ

۲-۲-۵- لایه پارچه ای غیرچسبنده

اولین لایه پس از الیاف چیده شده بر روی هم است و معمولاً تا قبل از مرحله رنگ قطعه، روی آن باقی می‌ماند. وظیفه اصلی این لایه حفظ کیفیت سطحی قطعات تا زمان فرایندهای نهایی بر روی قطعه است. در جدول (الف-۱۳) پیوست الف مشخصات لایه پارچه ای غیرچسبنده مورد استفاده مشاهده می‌گردد.

۲-۲-۶- نوار آب‌بند کننده

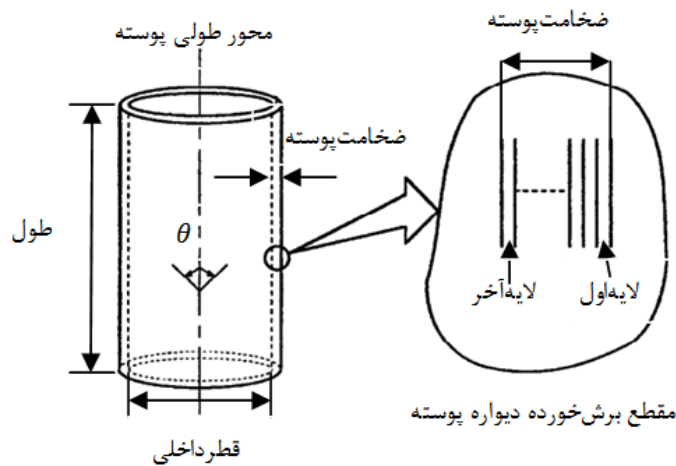
از این مواد برای آب‌بندی قالب قبل از تزریق استفاده می‌شود. جنس این مواد از سیلیکون بوده و قابلیت تحمل دماهای بالا را داراست. جدول (الف-۱۴) پیوست الف مشخصات فنی این مواد مورد استفاده را نشان می‌دهد؛ و در شکل (۲-۱۰) نوع مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۰): نوار آب‌بند کننده

۳-۲- روش طراحی آزمایش

برای بررسی پارامترهای ششگانه: قطر داخلی، طول، ضخامت، چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده و نوع فرایند ساخت، مطابق جدول (۳-۲) برای هر پارامتر سطوحی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش آماری تاگوچی آزمایش‌های تجربی شبه‌استاتیک محوری پوسته‌های استوانه‌ای با مشخصات هندسی مطابق شکل (۱۱-۲)، طراحی گردید.



شکل (۱۱-۲): مشخصات هندسی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

جدول (۳-۲): پارامترهای طراحی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی و سطوح آنها در تحلیل آماری تاگوچی

پارامتر طراحی سازه	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
قطر داخلی (mm)	۹۰	۱۱۰	۱۲۵	۶۳
طول (mm)	۴۰	۸۰	۱۲۰	۱۶۰
ضخامت (mm)	۱	۲	-	-
چیدمان لایه‌ها	(۰)	(۹۰/۰)	(±۴۵)	(+۴۵/۰/-۴۵)
نوع الیاف تقویت‌کننده	الیاف شیشه	الیاف کربن	-	-
فرایند تولید	قالب‌گیری کیسه‌ای	تزریق رزین	-	-

برای تحلیل آماری به روش تاگوچی با توجه به اینکه طبق جدول (۳-۲)، سه پارامتر چهار سطحی و سه پارامتر دیگر دوسطحی بودند، آرایه متعامد L_{۱۶} برای طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

مزیت اصلی این روش کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش هزینه مواد مصرفی و زمان می‌شود. رتبه‌بندی پارامترها جهت تعیین اولویت‌های طراحی و از طرفی نیز تغییرات در اطراف هدف، از طریق بهینه‌سازی فرایند به حداقل می‌رسد. عامل کلیدی فلسفه تاگوچی کاهش تغییرپذیری است. عموماً، مشخصه عملکرد هر محصول یا فرایند دارای یک مقدار هدف یا اسمی است. منظور، کاهش تغییرپذیری پیرامون این مقدار هدف است. پس از طراحی آزمایش‌ها، تعداد ۱۶ آزمایش پیشنهاد داده شد که در جدول (۴-۲) فهرست شده است.

جدول (۴-۲): طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

شماره آزمایش	قطر داخلی (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	لایه چینی	نوع تقویت‌کننده	فرایند تولید
۱	۶۳	۴۰	۱	(۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۲	۹۰	۸۰	۲	(۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۳	۱۱۰	۱۲۰	۱	(۰)	کربن	تزریق رزین
۴	۱۲۵	۱۶۰	۲	(۰)	کربن	تزریق رزین
۵	۶۳	۸۰	۱	(۹۰/۰)	کربن	تزریق رزین
۶	۹۰	۴۰	۲	(۹۰/۰)	کربن	تزریق رزین
۷	۱۱۰	۱۶۰	۱	(۹۰/۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۸	۱۲۵	۱۲۰	۲	(۹۰/۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۹	۶۳	۱۲۰	۲	(±۴۵)	کربن	قالب‌گیری کیسه‌ای
۱۰	۹۰	۱۶۰	۱	(±۴۵)	کربن	قالب‌گیری کیسه‌ای
۱۱	۱۱۰	۴۰	۲	(±۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۲	۱۲۵	۸۰	۱	(±۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۳	۶۳	۱۶۰	۲	(۴۵/۰/-۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۴	۹۰	۱۲۰	۱	(۴۵/۰/-۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۵	۱۱۰	۸۰	۲	(۴۵/۰/-۴۵)	کربن	قالب‌گیری کیسه‌ای
۱۶	۱۲۵	۴۰	۱	(۴۵/۰/-۴۵)	کربن	قالب‌گیری کیسه‌ای

۲-۴- روش نام‌گذاری پوسته‌ها

از آنجایی که پوسته‌ها برای بررسی شش پارامتر طراحی آزمایش شده‌اند، نام این پوسته‌ها نیز از شش بخش تشکیل شده است. در نام‌گذاری پوسته‌ها از مخفف‌هایی استفاده شده است که ضمن خلاصه نمودن تمام ویژگی‌های پوسته، خیلی سریع قابل درک دقیق نیز باشد تا کار به هنگام بخصوص انجام آزمون فشاری محوری (آزمایش له‌شدن) ساده گردد که نحوه نام‌گذاری بر اساس اصول شش‌گانه زیر به صورت خلاصه در جدول (۲-۵) نشان داده شده است؛ بنابراین به ترتیب از چپ به راست شش بخش نام پوسته‌ها به صورت زیر مخفف شده‌اند:

۱- نوع فرایند تولید که برای فرایند قالب‌گیری کیسه‌ای که مخفف آن به زبان انگلیسی (VB) است از حرف انگلیسی (B) و برای فرایند تزریق رزین به کمک خلأ که مخفف آن به زبان انگلیسی (VIP) است از حرف انگلیسی (P) استفاده گردید.

۲- نوع تقویت‌کننده که برای الیاف شیشه که نام آن به زبان انگلیسی (Glass) است از حرف انگلیسی (G) و برای الیاف کربن که نام آن به زبان انگلیسی (Carbon) است از حرف انگلیسی (C) استفاده گردید.

۳- لایه‌چینی که به جهت اهمیت آن به طور کامل در نام پوسته ذکر شده است و فقط برای راحتی تشخیص برای لایه چینی صفر درجه نسبت به محور طولی پوسته از نام انگلیسی (UNI) استفاده شده است.

۴- قطر داخلی که از ذکر قطر داخلی بعد از حرف انگلیسی (D) برای مشخص کردن آن در نام پوسته استفاده شده است.

۵- طول که از ذکر طول بعد از حرف انگلیسی (L) برای مشخص کردن آن در نام پوسته استفاده شده است.

۶- ضخامت که از ذکر ضخامت بعد از حرف انگلیسی (T) برای مشخص کردن آن در نام پوسته استفاده شده است.

جدول (۵-۲): نحوه نام‌گذاری پوسته‌های طراحی آزمایش‌شده به صورت خلاصه

نوع فرایند تولید		نوع تقویت‌کننده		لایه چینی		قطر داخلی		طول		ضخامت	
تزریق رزین VIP	P	شیشه Glass	G	0	UNI	D=63	D63	L=40	L40	T=1	T1
				90/0	90/0	D=90	D90	L=80	L80		
قالب‌گیری کیسه‌ای VB	B	کربن Carbon	C	+45/-45	+45/-45	D=110	D110	L=120	L120	T=2	T2
				+45/0/-45	+45/0/-45	D=125	D125	L=160	L160		

بنا بر اصول بالا نام هر شانزده پوسته در جدول (۶-۲) آمده است.

جدول (۶-۲): نام‌گذاری پوسته‌های طراحی آزمایش‌شده

نام پوسته	شماره آزمایش یا پوسته
BGUNID63L40T1	۱
BGUNID90L80T2	۲
PCUNID110L120T1	۳
PCUNID125L160T2	۴
PC90/0D63L80T1	۵
PC90/0D90L40T2	۶
BG90/0D110L160T1	۷
BG90/0D125L120T2	۸
BC+45/-45D63L120T2	۹
BC+45/-45D90L160T1	۱۰
PG+45/-45D110L40T2	۱۱
PG+45/-45D125L80T1	۱۲
PG+45/0/-45D63L160T2	۱۳
PG+45/0/-45D90L120T1	۱۴
BC+45/0/-45D110L80T2	۱۵
BC+45/0/-45D125L40T1	۱۶

۲-۵- روش‌های ساخت پوسته‌ها

در این بخش به اختصار مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است که مراحل بصورت تصویری نیز در شکل‌های (۲-۱۲) و (۲-۱۳) نیز نشان داده شده است.

۲-۵-۱- مراحل ساخت پوسته‌های کامپوزیتی به روش قالب‌گیری کیسه‌ای

در اینجا مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به ترتیب اجرا در روش قالب-گیری کیسه‌ای بیان می‌شود:

۱- در ابتدا لوله‌های پی‌وی‌سی مورد استفاده به‌عنوان مندرل را با دستمال نرم آغشته به استون، کاملاً تمیز کرده و تمام آلودگی‌ها و چربی‌ها از روی آن پاک می‌شود.

۲- بعد از تمیزکاری سطح مندرل و خشک شدن آن، سطح مندرل را به واکس جداکننده آغشته ساخته که البته این کار در سه مرتبه و با فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای صورت می‌گیرد. این موضوع به جهت جداسازی آسان قطعه از مندرل بعد از پخت و اتمام ساخت پوسته انجام گرفت.

۳- در این مرحله الیاف موردنظر با ابعادی که در نقشه ساخت پوسته کامپوزیتی آمده است، برش خورده و برای لایه‌چینی آماده می‌شود.

۴- پس از برش الیاف با یک ترازوی دقیق دیجیتالی وزن الیاف اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری، هم برای تخمین میزان رزین لازم جهت ساخت پوسته و هم تخمین حدودی کسر حجمی الیاف قابل استفاده است.

۵- در این مرحله به کمک اسپری چسب الیاف مربوطه که با جهت‌بندی مناسب برش خورده و آماده شده است بر روی خط مرجع که مشخص‌کننده منطقه شروع لایه‌گذاری است، چسبانده می‌شود و رزین و سخت‌کننده (هاردنر) به نسبت وزنی مربوطه با هم مخلوط می‌شوند.

۶- سپس به کمک قلم‌مو یا غلتک، الیاف بر روی مندرل به رزین آغشته می‌شود. البته لازم به ذکر است که این مهم بایستی باکمال دقت صورت پذیرد تا جهت بندی الیاف در اثر ضربات قلم‌مو تغییر نکند.

۷- در ادامه فرایند لایه‌گذاری دستی جهت دستیابی به یک ترکیب محکم‌تر و یکپارچه‌تر، پس از اتمام لایه‌گذاری، اعمال فشار منفی خلأ صورت می‌گیرد. این شیوه به‌وسیله پوشاندن لایه پلاستیکی بر روی چندلایه آغشته به رزین و از آنجا بر روی مندرل انجام می‌شود. هوای زیر کیسه به‌وسیله پمپ خلأ مکیده شده و بدین ترتیب تا نزدیک ۱ (Bar) فشار را می‌توان بر روی چندلایه برای یکپارچه شدنش اعمال نمود. در این مرحله روی چندلایه به ترتیب از لایه‌های پارچه‌ای غیرچسبنده، فیلم جداکننده منفذدار، پارچه جاذب (هواگیر) و درنهایت کیسه پلاستیکی استفاده می‌شود.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)



(ل)

(ک)



(و)



(ن)



(ی)



(ه)

شکل (۲-۱۲): مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به روش قالب‌گیری کیسه‌ای، (الف) تمیزکاری سطح مندرل، (ب) اعمال واکس جداکننده، (ج) برش الیاف، (د) وزن کردن الیاف، (ک) لایه‌گذاری، (ل) لایه پارچه‌ای غیرچسبنده، (ن) فیلم جداکننده منفردار، (و) پارچه جاذب/هواگیر، (ه) کیسه پلاستیکی و آببندی با نوار آببند، (ی) اعمال خلأ.

۲-۵-۲- مراحل ساخت پوسته‌های کامپوزیتی به روش تزریق رزین به کمک خلأ

حال مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به ترتیب اجرا در روش تزریق رزین به کمک

خلأ بیان می‌شود:

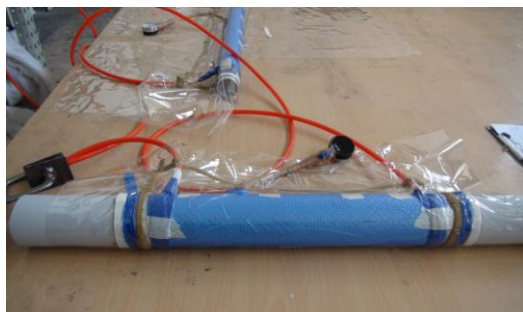
۱- در این روش نیز پنج مرحله اول روش قبل، عیناً تکرار می‌شود.

۲- در این روش نیز بعد از فرایند لایه‌پیچی دستی، اعمال فشار منفی خلأ صورت می‌گیرد. این کار به‌وسیله پوشاندن لایه پلاستیکی بر روی چندلایی پیچیده شده و از آنجا بر روی مندرل انجام می‌شود. هوای زیر کیسه به‌وسیله پمپ خلأ مکیده شده و بدین ترتیب تا نزدیک ۱ (Bar) فشار را می‌توان بر روی چندلایی برای مکش مورد نیاز فرایند تزریق اعمال نمود. در این مرحله روی چندلایی از لایه‌های شبکه جریان و درنهایت کیسه پلاستیکی استفاده می‌شود.

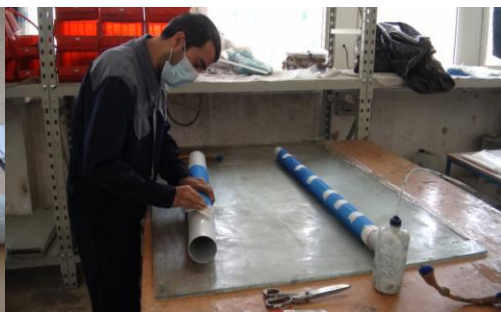
۳- بعد از رسیدن به خلأ موردنیاز، آزمون نشتی برای چک کردن نشت هوا در نمونه به وسیله خواندن عدد گیج فشاری که قبل از تزریق داخل کیسه پلاستیکی قراردادده می شود، صورت می گیرد. آزمون نشتی در صورتی که میزان کاهش فشاری کمتر از 0.2 (atm) در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه را نشان دهد، موفقیت آمیز است. لازم به ذکر است که این مرحله یکی از مهم ترین قسمت های این فرایند است.

۴- از آنجایی که فرایند تزریق رزین به کمک خلأ به شدت به حباب و هوای محبوس در رزین حساس است بایستی قبل از فرایند تزریق، حباب زدایی رزین حداقل به مدت ۱۵ دقیقه صورت گیرد. حباب زدایی داخل یک دستگاه حباب زدا صورت می گیرد که کاملاً آب بند بوده و ضمن هم زدن رزین، فشار خلأ را اعمال نموده و هوای رزین را مکش می نماید.

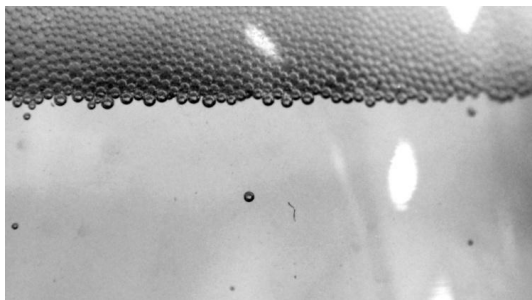
۵- در نهایت فرایند تزریق رزین به کمک خلأ به این صورت انجام می شود که شیر ورودی رزین حباب زدایی شده، باز می شود و تحت فشار خلأ که در لوله خروجی اعمال شده است، رزین از ورودی وارد پوسته لایه پیچی شده می شود و طی زمانی مشخص کل پوسته را آغشته می نماید تا شیر خروجی پوسته بعد از اتمام فرایند بسته شود.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(ک)

شکل (۲-۱۳): مراحل ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی به روش تزریق رزین به کمک خلأ، (الف) قراردادن شبکه جریان رزین، (ب) کیسه پلاستیکی و آببندی با نوار آببند و نصب لوله‌های ورودی و خروجی رزین، (ج) آزمون نشتی، (د) حباب زدایی (گاززدایی)، (ک) فرایند تزریق رزین به کمک خلأ.

۲-۵-۳- مشخصات هندسی پوسته‌های تولید شده

برای تخمین تعداد لایه‌های مناسب برای رسیدن به ضخامت موردنظر در پوسته‌های کامپوزیتی که طراحی آزمایش شدند، تک لایه‌هایی از انواع الیاف تقویت‌کننده تهیه شدند و ضخامت آنها اندازه‌گیری شده و در جدول (۲-۷) آمده است، البته این اندازه‌ها تقریبی است و با توجه به پارامترهای مختلفی که طی فرایند ساخت در ضخامت پوسته‌ها مؤثرند، مانند فشار بهینه، دمای محیط آزمایشگاه محل ساخت پوسته‌ها، تجهیزات مورد استفاده در فرایندهای تولید و بخصوص نوع فرایند تولید در مشخصات هندسی نهایی پوسته‌ها بسیار تأثیرگذار هستند.

جدول (۲-۷): ضخامت تک لایه کامپوزیتی ساخته شده با الیاف مدنظر این پژوهش

ضخامت تک لایه کامپوزیتی (mm)	نوع الیاف	ردیف
۰/۳	تک جهتی شیشه	۱
۰/۲۵	تک جهتی کربن	۲
۰/۳	دو جهتی ۹۰/۰ شیشه	۳
۰/۵	دو جهتی ۹۰/۰ کربن	۴
۰/۳	دو جهتی ۴۵/-۴۵+ شیشه	۵

ردیف	نوع الیاف	ضخامت تک لایه کامپوزیتی (mm)
۶	دو جهتی ۴۵/-۴۵+ کربن	۰/۵
۷	سه جهتی ۴۵/-۰/۴۵+ شیشه	۰/۳۳
۸	سه جهتی ۴۵/-۰/۴۵+ کربن	۰/۷۵

حال در این مرحله مشخصات هندسی نهایی پوسته‌های تولید شده که در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است را بعد از فرایند ساخت با ابزار اندازه‌گیری دقیق و کالیبره شده، (کولیس عقربه‌ای یا ساعتی میتوتویو^۱ مدل ۶۷۲-۵۰۵ با دقت (mm) ۰/۰۲ با شماره سریال ۰۸۰۴۰۰۸۲) اندازه گرفته و در جدول (۲-۸) ثبت شده است. برای مشخصات هندسی قطرداخلی، قطر خارجی، طول و ضخامت هرکدام سه اندازه ثبت شده و اندازه نهایی از میانگین‌گیری این سه اندازه بدست آمده است. چگالی که در این جدول آمده است، براساس استاندارد ASTM D 2734-94 محاسبه شده است [۱۱۳] و در واقع چگالی هندسی است که از تقسیم کردن جرم پوسته‌ها بر حجم آنها که حاصلضرب مساحت مقطع پوسته‌ها ($A = \frac{\pi}{4} [(d_o)^2 - (d_i)^2]$) در طول آنهاست، بدست آمده است. جرم نیز با یک ترازوی دیجیتال (با نام مقیاس فشرده الکترونیک^۲ مدل SF-400C با دقت صدم گرم) اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که میانگین‌گیری برای کمیت‌های جرم و چگالی بین پوسته‌هایی که جذب انرژی آنها از نظر تکرارپذیری انتخاب شده‌اند، صورت گرفته است.

^۱ Mitutoyo

^۲ Electronic Compact Scale

جدول (۲-۸): مشخصات هندسی نهایی پوسته‌های تولید شده

شماره پوسته	قطر داخلی میانگین (mm)	قطر خارجی میانگین (mm)	ضخامت میانگین (mm)	طول میانگین (mm)	تعداد لایه	جرم میانگین (g)	چگالی میانگین (g/cm ³)
۱	۶۲/۴۶	۶۴/۵۱	۱/۱۶	۴۰/۰۵	۳	۱۵/۳۴	۱/۸۸
۲	۹۰/۰۸	۹۴/۳۵	۲/۰۴	۸۰/۱۹	۷	۷۳/۰۶	۱/۴۸
۳	۱۰۹/۲۱	۱۱۱/۵۸	۱/۱۸	۱۲۰/۱۸	۴	۵۶/۵۴	۱/۱۵
۴	۱۲۴/۴۴	۱۲۸/۲۳	۲/۰۹	۱۶۰/۰۵	۸	۱۶۷/۹۶	۱/۴۰
۵	۶۲/۴۷	۶۴/۶۰	۱/۰۸	۸۰/۱۳	۲	۲۲/۲۲	۱/۳۱
۶	۸۹/۳۸	۹۳/۳۳	۲/۰۷	۴۰/۱۶	۴	۳۱/۳۲	۱/۳۸
۷	۱۰۹/۵۰	۱۱۱/۳۲	۱/۰۲	۱۶۰/۱۲	۳	۹۱/۵۵	۱/۸۴
۸	۱۲۴/۴۹	۱۲۸/۳۹	۲/۴۹	۱۲۰/۰۹	۷	۱۶۱/۱۳	۱/۷۴
۹	۶۲/۶۰	۶۷/۸۶	۲/۷۷	۱۲۰/۱۳	۴	۸۸/۸۶	۱/۳۸
۱۰	۹۰/۰۹	۹۳	۱/۲۷	۱۶۰/۰۷	۲	۷۱/۷۴	۱/۰۷
۱۱	۱۰۹/۵۸	۱۱۳/۳۳	۲/۰۸	۴۰	۷	۴۷/۳۰	۱/۸۲
۱۲	۱۲۴/۰۷	۱۲۶/۰۷	۰/۹۹	۸۰/۰۵	۴	۴۵/۷۲	۱/۴۵
۱۳	۶۲/۲۹	۶۶/۳۴	۱/۷۷	۱۶۰/۱۷	۶	۱۰۳/۷۸	۱/۵۸
۱۴	۸۹/۴۵	۹۱/۵۴	۱/۰۱	۱۱۹/۹۳	۳	۵۱/۷۴	۱/۴۵
۱۵	۱۰۹/۵۶	۱۱۳/۸۱	۲/۳۷	۸۰/۲۱	۳	۸۷/۸۹	۱/۴۷
۱۶	۱۲۴/۹۶	۱۲۷/۵۰	۱/۴۸	۴۰/۲۹	۲	۲۸/۰۸	۱/۳۸



شکل (۲-۱۴): پوسته‌های استوانه‌ای تولید شده

۲-۶- روش آزمایش‌های تجربی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

۲-۶-۱- آزمایش‌های لهیدگی محوری

با توجه به اینکه تحلیل عددی له‌شدن سازه‌های کامپوزیتی بسیار پیچیده است، آزمایش‌های تجربی نقش مهمی در تحلیل این نوع سازه‌ها ایفا می‌کنند و اغلب شبیه‌سازی‌های عددی بر اساس آزمایش‌های تجربی کالیبره می‌شوند؛ بنابراین در این پژوهش برای تحلیل پوسته‌ها از آزمون تجربی فشاری محوری (له‌شدن) به روش شبه استاتیک استفاده شد.

تعداد شانزده عدد پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی که برای بررسی شش پارامتر طراحی سازه‌های جاذب انرژی به روش تاگوچی، طراحی آزمایش شدند؛ که مشخصات آنها در جدول (۲-۹) آمده است. جدول (۲-۹): آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی جهت آزمایش لهیدگی محوری.

شماره آزمایش	قطر داخلی (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	لایه چینی	نوع تقویت‌کننده	فرایند تولید
۱	۶۳	۴۰	۱	(۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۲	۹۰	۸۰	۲	(۰)	شیشه	قالب‌گیری کیسه‌ای
۳	۱۱۰	۱۲۰	۱	(۰)	کربن	تزریق رزین
۴	۱۲۵	۱۶۰	۲	(۰)	کربن	تزریق رزین
۵	۶۳	۸۰	۱	(۹۰/۰)	کربن	تزریق رزین
۶	۹۰	۴۰	۲	(۹۰/۰)	کربن	تزریق رزین

شماره آزمایش	قطر داخلی (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	لایه چینی	نوع تقویت کننده	فرایند تولید
۷	۱۱۰	۱۶۰	۱	(۹۰/۰)	شیشه	قالب گیری کیسه ای
۸	۱۲۵	۱۲۰	۲	(۹۰/۰)	شیشه	قالب گیری کیسه ای
۹	۶۳	۱۲۰	۲	(±۴۵)	کربن	قالب گیری کیسه ای
۱۰	۹۰	۱۶۰	۱	(±۴۵)	کربن	قالب گیری کیسه ای
۱۱	۱۱۰	۴۰	۲	(±۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۲	۱۲۵	۸۰	۱	(±۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۳	۶۳	۱۶۰	۲	(۴۵/۰/-۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۴	۹۰	۱۲۰	۱	(۴۵/۰/-۴۵)	شیشه	تزریق رزین
۱۵	۱۱۰	۸۰	۲	(۴۵/۰/-۴۵)	کربن	قالب گیری کیسه ای
۱۶	۱۲۵	۴۰	۱	(۴۵/۰/-۴۵)	کربن	قالب گیری کیسه ای

۲-۶-۲- معرفی ماشین آزمایش

آزمایش تمام پوسته‌ها مطابق شکل (۲-۱۵) با ماشین آزمایش مواد یونیورسال^۱ (Zwick Z250) با مشخصات فنی جدول (۲-۱۰) و در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت.



شکل (۲-۱۵): آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد، ماشین آزمایش پوسته‌ها

^۱ Universal

جدول (۲-۱۰): مشخصات فنی ماشین آزمایش پوسته‌ها در دمای محیط [۱۱۴]

ویژگی	مقدار	واحد
ظرفیت بار حداکثر ^۱	۲۵۰	کیلو نیوتن، [kN]
حداکثر جابه‌جایی کلگی ^۲	۳۲۰	میلی‌متر، [mm]
دامنه مجاز نرخ بارگذاری ^۳	۰/۰۰۰۵-۶۰۰	میلی‌متر بر دقیقه، [mm/min]
دقت اندازه‌گیری نیرو با لودسل ^۴	۰/۵	کیلو نیوتن، [kN]
دقت جابه‌جایی ^۵	±۲	میکرومتر، [μm]

۲-۶-۳- عوامل مؤثر در آزمایش‌های لهیدگی محوری

دو عامل تکرارپذیری و سرعت آزمون از جمله عوامل مهمی هستند که بایستی در آزمون فشاری محوری پوسته‌ها آنها را مدنظر قرار داد.

۲-۶-۳-۱- تکرارپذیری آزمون لهیدگی محوری

با توجه به پراکندگی که معمولاً در داده‌های خروجی آزمایش‌های تجربی مواد کامپوزیت وجود دارد، بهتر است که هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شود؛ بنابراین پوسته‌ها بر روی مندرلهایی با طول مناسب برای تعداد حداقل ۳ پوسته تولید شدند که البته پوسته‌ها به صورت پیوسته تولید شدند و در اندازه‌های موردنظر با ابزار برش مخصوص مواد کامپوزیت و با دور برش پایین برای پرهیز از ایجاد حرارت، نمونه‌های اصلی آماده شدند. البته خود این تولید پیوسته پوسته‌ها باعث شد که شرایط تولید هر سه پوسته یکسان و یکنواخت باشد و آزمون‌ها تکرارپذیری مناسبی داشته باشد.

در نهایت حداقل آزمون ۳ مرتبه تکرار شد و دو خروجی نزدیک به هم که از نظر سه پارامتر:

۱- نیروی بحرانی له‌شدن در نمودار نیرو - جابه‌جایی

^۱ Maximum test force (tensile/compression)

^۲ Maximum crosshead travel

^۳ Test speed

^۴ Force measurement accuracy with load cell

^۵ Position accuracy

۲- شکل پس له شدگی در نمودار نیرو - جابه‌جایی

۳- مود فروریزی در حین آزمون فشاری محوری

نزدیکی بیشتری را به هم داشتند، میانگین‌گیری شده و مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گرفت.

۲-۶-۳-۲- نرخ بارگذاری آزمون لهیدگی محوری

از آنجایی که نوع آزمون انتخابی شبه استاتیک و جابه‌جایی کنترل است، بنابراین آزمون بایستی با نرخ بارگذاری شود که شرایط تقریباً استاتیک را داشته باشد که طبق بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های گذشته [۲۷] نرخ بارگذاری کمتر از 1 (mm/s) برای آزمون شبه استاتیک مناسب است که نرخ بارگذاری 0.3 (mm/s) برای این پژوهش انتخاب شد.

۲-۶-۴- روش محاسبه جذب انرژی

با توجه به مزایای نامبرده شده در ذیل روش اندازه‌گیری جذب انرژی در این پایان‌نامه با استفاده از کمیت جذب انرژی مخصوص (SEA)، صورت گرفته است:

- این روش به شکل منحنی نیرو - جابه‌جایی وابسته نیست.
- این روش کل انرژی جذب‌شده توسط نمونه آزمون را به صورت واقعی اندازه‌گیری می‌کند (این روش تمام منحنی نیرو - جابه‌جایی را مورد محاسبه قرار می‌دهد).
- این روش برای نمونه‌هایی که در مودهای له‌شدن ناپایدار نیز فرو می‌ریزند، به کار می‌رود (نیازی به له‌شدن پایدار برای محاسبه جذب انرژی مخصوص در این روش وجود ندارد).

فصل سوم

نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش لهیدگی محوری پوسته‌ها

پس از انجام آزمایش‌ها و ثبت نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ها، کمیت‌هایی ذیل از این نمودارها اندازه‌گیری شد. لازم به یادآوری است که در اکثر موارد از بین سه پوسته‌ای که مورد آزمایش قرار گرفته است دو عدد از نتایج که به یکدیگر نزدیک‌تر بودند، انتخاب شدند که مقادیر جدول (۳-۱) از میانگین‌گیری این دو عدد محاسبه شده است (برای پوسته‌های ۷ و ۱۰ و ۱۳ تنها یک عدد از پوسته‌ها شرایط مناسب ثبت نتیجه را داشته است؛ بنابراین ضریب انحراف برای آنها ثبت نشده است).

جدول (۳-۱): نتایج اندازه‌گیری شده از نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	نیروی میانگین له- شدن (N)	نیروی بحرانی له- شدن (N)	بازده نیروی له‌شدن میانگین (J)	جذب انرژی میانگین جذب انرژی مخصوص (J/g)	ضریب انحراف (%)
۱	۵۴۲۸/۳۶	۳۰۸۶۳/۵۵	۰/۱۷۶۲	۱۴/۲۰	۱/۳۴
۲	۳۱۶۰۵/۱۰	۹۶۸۸۱/۴۵	۰/۳۲۶۲	۳۴/۶۹	۱/۴
۳	۳۴۳۰/۲۴	۲۲۸۱۲/۱۵	۰/۱۵۰۴	۷/۲۹	۵/۲۴
۴	۲۲۸۰۹/۴۴	۱۰۴۷۶۱/۸۰	۰/۲۱۷۷	۲۱/۷۱	۲۰/۳۵
۵	۱۳۹۵۰/۵۴	۲۶۳۹۴/۹۰	۰/۵۲۸۵	۷۶۱/۷۴	۸/۳۲
۶	۲۶۳۵۰/۱۷	۶۴۸۸۱/۵	۰/۴۰۶۱	۷۹۰/۴۲	۱۹/۸۰
۷	۱۲۸۸۹/۸۱	۲۸۲۲۷/۱۷	۰/۴۵۶۶	۷۱۲/۸۵	-
۸	۴۹۸۸۷/۲	۱۱۷۲۰۷	۰/۴۲۵۶	۳۷/۱۸	۴/۴۷
۹	۳۲۳۱۲/۶۸	۵۴۳۶۴/۹۴	۰/۵۹۴۴	۴۳/۹۸	۱۹/۹۰
۱۰	۸۷۵۷/۶۴	۱۵۱۴۵/۶۰	۰/۵۷۸۲	۱۹/۵۴	-
۱۱	۱۱۷۹۴/۵۱	۷۱۳۸۸/۶۵	۰/۱۶۵۲	۹/۹۷	۹/۱۴
۱۲	۳۳۰۲/۳۰	۱۷۶۴۳/۳۵	۰/۱۸۷۲	۱۹۷/۹۸	۱/۸۳
۱۳	۲۸۳۲۴/۷۱	۸۴۸۴۷/۱۰	۰/۳۳۳۸	۴۳/۷۱	-
۱۴	۳۷۷۴/۹۲	۲۴۲۴۹/۳۵	۰/۱۵۵۷	۸/۸۱	۴۳/۲
۱۵	۳۶۸۵۵/۶۷	۱۱۲۸۷۰	۰/۳۲۶۵	۳۳/۶۰	۵/۴۳
۱۶	۱۷۵۵۴/۹۵	۵۲۶۵۵/۶۵	۰/۳۳۳۴	۲۵/۲۱	۱۳/۲۴

۳-۲- تحلیل تاگوچی

در این پژوهش روش آماری تاگوچی، در طراحی سازه پوسته‌های جاذب انرژی کامپوزیتی با هندسه استوانه‌ای پیاده‌سازی شد. پارامترهای شش‌گانه طراحی سازه جاذب انرژی در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارت‌اند از: پارامترهای هندسی قطر داخلی، طول و ضخامت و پارامترهای چیدمان لایه‌ها، نوع الیاف تقویت‌کننده و نوع فرایند ساخت که پارامترهای قطر داخلی، طول و چیدمان لایه‌ها چهار سطحی و سه پارامتر دیگر دوسطحی می‌باشند. انتخاب آرایه متعامد مناسب با توجه به تعداد پارامترها و تعداد سطوح هر پارامتر از جداول یکی از مهم‌ترین مراحل این نوع تحلیل است که در این پژوهش از آرایه متعامد L₁₆ برای تحلیل تاگوچی استفاده شده است.

با توجه به اینکه در این پژوهش هدف از تحلیل تاگوچی بیشینه‌کردن جذب انرژی مخصوص است؛ بنابراین برای بیشینه‌شدن این عامل بایستی بالاترین نسبت سیگنال به نویز مربوط به جذب انرژی مخصوص را در تحلیل، مورد توجه قرار داد. پس از محاسبه مقادیر جذب انرژی مخصوص مربوط به هر آزمایش، تحلیل آماری صورت گرفت که نتایج سیگنال به نویز هر آزمایش و نسبت سیگنال به نویز پارامترها و رتبه‌بندی آنها به ترتیب در جدول‌های (۳-۲) و (۳-۳) گزارش شده است.

نتایج نشان داد که به ترتیب چیدمان لایه‌ها و پارامترهای هندسی شامل قطر داخلی و ضخامت بیشترین اثر و در طرف مقابل، پارامترهای دیگر کمترین اثر را بر روی میزان جذب انرژی مخصوص این دسته از سازه‌ها دارند و لذا پیشنهاد می‌گردد به سه پارامتر اول در فرایند طراحی سازه‌های جاذب انرژی اهمیت بیشتری داده شود.

جدول (۳-۲): جذب انرژی مخصوص پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تولید شده

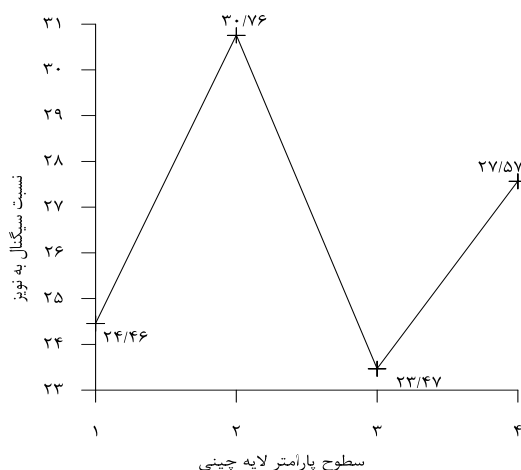
شماره آزمایش	جذب انرژی مخصوص (J/g)	نسبت سیگنال به نویز
۱	۱۴/۲۰	۲۳/۵
۲	۳۴/۶۹	۳۰/۸۰
۳	۷/۲۹	۱۷/۲۵
۴	۲۱/۷۱	۲۶/۷۳
۵	۵۰/۲۵	۳۴/۲
۶	۳۳/۷۴	۳۰/۵۶
۷	۲۲/۵۲	۲۷/۵
۸	۳۷/۱۸	۳۱/۴۱
۹	۴۳/۹۸	۳۲/۸۷
۱۰	۱۹/۵۴	۲۵/۸۲
۱۱	۹/۹۷	۱۹/۹۷
۱۲	۵/۷۸	۱۵/۲۴
۱۳	۴۳/۷۱	۳۲/۸۱
۱۴	۸/۸۱	۱۸/۹۰
۱۵	۳۳/۶۰	۳۰/۵۳
۱۶	۲۵/۲۱	۲۸/۳

جدول (۳-۳): نسبت سیگنال به نویز و رتبه‌بندی پارامترها برای بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص

نسبت سیگنال به نویز	لایه چینی	قطر داخلی	ضخامت	فرایند تولید	نوع تقویت‌کننده	طول
سطح ۱	۲۴/۴۶	۲۶/۵۲	۲۳/۶۷	۲۸/۶۹	۲۴/۹۰	۲۵/۴۰
سطح ۲	۳۰/۷۶	۲۳/۷۰	۲۹/۴۶	۲۴/۴۴	۲۸/۲۳	۲۷/۶۵
سطح ۳	۲۳/۴۷	۲۵/۳۵	-	-	-	۲۵/۱۱
سطح ۴	۲۷/۵۷	۳۰/۶۹	-	-	-	۲۸/۱۰
دلته (*)	۷/۲۹	۶/۹۸	۵/۷۹	۴/۲۶	۳/۳۲	۳
رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶

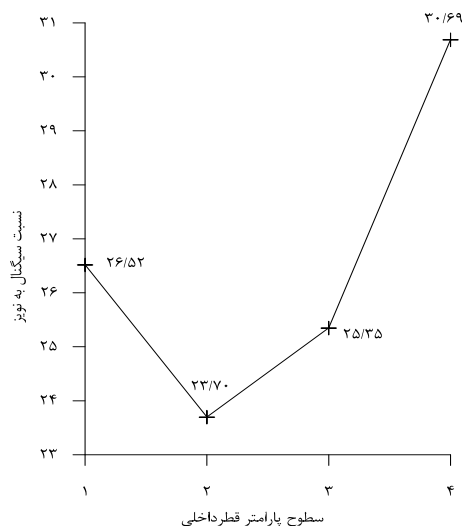
(*) اختلاف مقدار بیشینه و کمینه است.

همان‌طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، بیشترین نسبت سیگنال به نویز مربوط به چیدمان الیاف سطح ۲ یعنی لایه‌چینی با الیاف دوجته (۹۰/۰) است که الیاف در جهت صفر یا هم‌راستا با محور طولی پوسته استوانه‌ای توسط الیاف جهت ۹۰ به صورت عرضی حمایت می‌شود و لذا از له‌شدن یا فروریزی ناپایدار آن جلوگیری نموده و باعث افزایش جذب انرژی مخصوص آن می‌شود و لذا این موضوع تأییدکننده صحت نتایج است. نسبت سیگنال به نویز بعدی مربوط به سطح چهار، یعنی لایه‌چینی با الیاف سه‌جته (۴۵/۰/۴۵+) است که این موضوع در مقایسه با جذب انرژی مخصوص به ترتیب الیاف تک‌جته و دوجته سطوح ۱ و ۳ بسیار قابل توجه بوده و لذا اثر ترکیب و ترتیب لایه‌چینی را به وضوح آشکار ساخته و اهمیت آن را با رتبه اول در طراحی این نوع سازه‌ها آشکار می‌سازد.



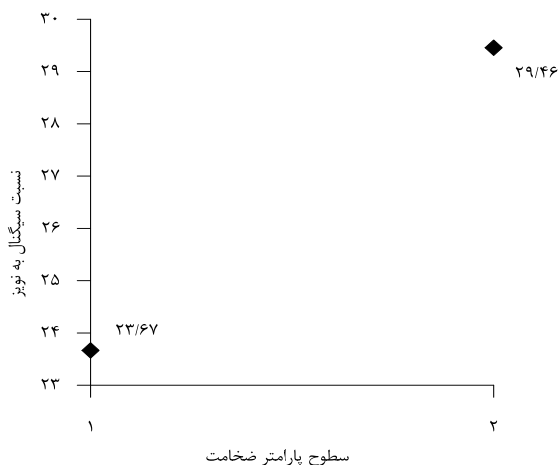
شکل (۱-۳): نسبت سیگنال به نویز پارامتر لایه‌چینی در سطوح چهارگانه

طبق شکل (۲-۳) نمی‌توان یک رابطه کلی برای پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی بر اساس این دامنه قطر (۶۳ تا ۱۲۵ mm) داشت که البته این موضوع برای لوله‌های شیشه/اپوکسی با دامنه قطرهای بین ۱۶ تا ۵۰ mm نیز در پژوهش‌های گذشته اتفاق افتاده بود. بنابراین استنباط منطقی که می‌توان داشت این است که بایستی برای یک سازه جاذب انرژی خاص قطر بهینه را به دست آورد و طراحی سازه مربوطه را براساس آن انجام داد.



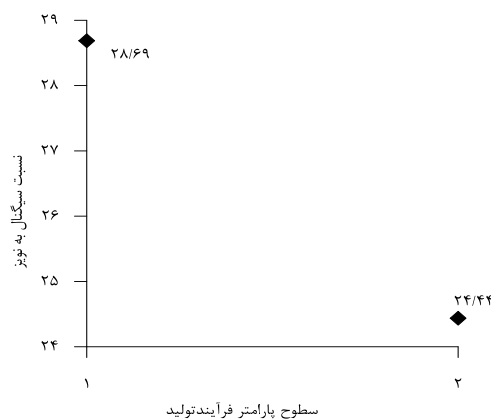
شکل (۳-۲): نسبت سیگنال به نویز پارامتر قطر داخلی در سطوح چهارگانه

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، طبق شکل (۳-۳) میزان جذب انرژی پوسته‌های با ضخامت ۲ (mm) بیشتر بود که این می‌تواند اعتبار نتایج را تأیید کند. البته راماکریشنا و هامادا [۳۳] عملکرد برخورد لوله‌های کربن/پلی‌اتراکتون با تفاوت در مقادیر ضخامت و قطر را مورد مطالعه قرار دادند که وقتی ضخامت بین ۲ تا ۳ (mm) بود، همه انواع لوله‌ها بالاترین انرژی مخصوص را به نمایش می‌گذاشتند. با افزایش ضخامت تا این دامنه بحرانی، انرژی مخصوص افزایش می‌یافت؛ درحالی‌که بالای این محدوده مقدار آن کاهش می‌یافت. بنابراین به نظر می‌رسد که ضخامت پوسته‌ها نیز در محدوده‌ای مشخص دارای جذب انرژی مخصوص بالاتر نسبت به سایر ضخامت‌ها می‌باشند و این دامنه بهینه برای طراحی سازه‌های جاذب انرژی با مشخصات فوق است.



شکل (۳-۳): نسبت سیگنال به نویز پارامتر هندسی ضخامت در دو سطح ۱ و ۲ میلی‌متر

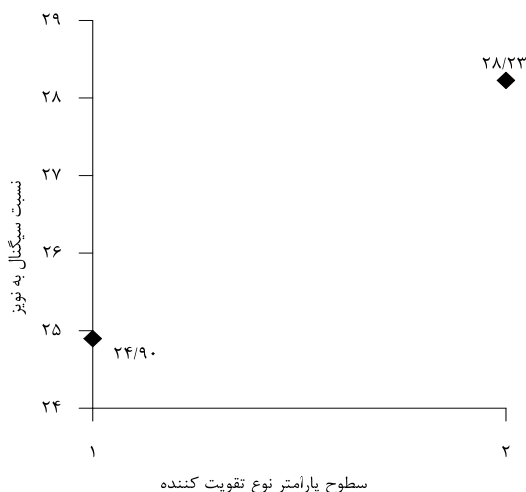
بر اساس شکل (۳-۴) نسبت سیگنال به نویز فرایند تولید قالب‌گیری کیسه‌ای نسبت به فرایند تزریق رزین به کمک خلأ بیشتر بود. این موضوع با توجه به تحقیقاتی که توسط ولی‌زاده و همکاران [۱۱۵] روی نمونه‌های ساخته‌شده از همین نوع رزین و الیاف انجام شده است و نتایج آن حاکی از افزایش استحکام نمونه‌های ساخته‌شده به روش تزریق رزین به کمک خلأ نسبت به قالب‌گیری کیسه‌ای می‌باشد، به‌ظاهر در تضاد بود. البته علت این مسئله در تحقیق آنها، کسر حجمی الیاف بیشتر در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ عنوان شده بود؛ اما در واقعیت این مطلب صحت ندارد که فکر کنیم با افزایش مقدار الیاف، میزان جذب انرژی مخصوص مواد کامپوزیتی بهتر می‌شود. توضیح قابل‌قبول این موضوع این است که با افزایش کسر حجمی الیاف، در واقع حجم رزین (ماتریس) بین الیاف کاهش می‌یابد که این سبب افزایش چگالی رزین شده که در نهایت منجر به کاهش استحکام بین‌لایه‌ای مواد کامپوزیتی می‌گردد و کاهش استحکام بین‌لایه‌ای، سبب ایجاد ترک‌های بین‌لایه‌ای در بارهای پایین شده و در نهایت قابلیت جذب انرژی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین تغییرات در جذب انرژی در اثر تغییر کسر حجمی الیاف، به‌وسیله پاسخ لهیدگی^۱ مواد کامپوزیتی تعیین می‌گردد [۱۰۷]؛ و از طرفی نیز با توجه به اختلاف کم نسبت سیگنال به نویز در این پارامتر به نظر می‌رسد که فرایند تولید در مقایسه با پارامتر لایه‌چینی و پارامترهای هندسی قطر داخلی و ضخامت تأثیر مهمی در جذب انرژی مخصوص ندارد.



شکل (۳-۴): نسبت سیگنال به نویز پارامتر فرایند تولید در دو سطح قالب‌گیری کیسه‌ای و تزریق رزین

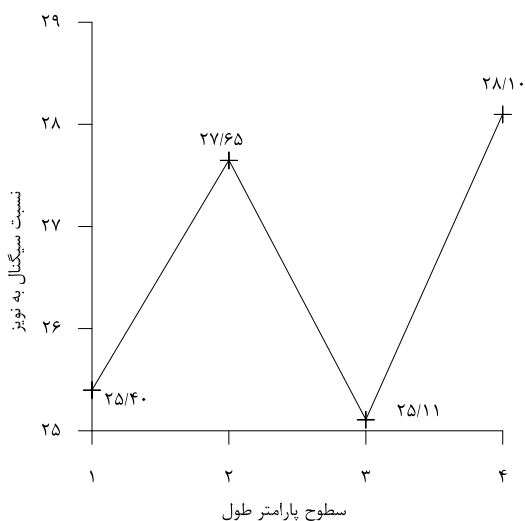
^۱ Crushing Response

بر اساس شکل (۳-۵) همان‌طور که تحقیقات پیشینیان نیز نشان می‌داد، میزان جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کربنی با مشخصات فوق نسبت به پوسته‌های دارای الیاف تقویت‌کننده شیشه بیشتر بود که این خود نیز می‌تواند به‌عنوان یکی دیگر از نقاط تأیید اعتبار نتایج تحلیل به‌شمار رود.



شکل (۳-۵): نسبت سیگنال به نوز پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده در دو سطح الیاف شیشه و کربن

مطابق شکل (۳-۶) یک پراکندگی در نسبت سیگنال به نوز پارامتر هندسی طول وجود دارد که نتیجه‌گیری مشخصی در مورد این پارامتر را با مشکل مواجه می‌سازد، لذا این پارامتر نیز به‌نظر می‌رسد بایستی برای سازه‌ای خاص بهینه گردد و به‌طور کل پارامتری با تأثیرگذاری ناچیز به‌حساب می‌آید.



شکل (۳-۶): نسبت سیگنال به نوز پارامتر هندسی طول در سطوح چهارگانه

یکی دیگر از نتایج مهم این تحلیل آماری این بود که پوسته جاذب انرژی کامپوزیتی بهینه دارای چیدمان الیاف (۹۰/۰)، قطر داخلی (mm) ۶۳، طول (mm) ۱۶۰، ضخامت (mm) ۲، فرایند تولید قالب‌گیری کیسه‌ای و نوع الیاف تقویت‌کننده کربن پیشنهاد شد که نسبت سیگنال به نویزی که برای این سازه بهینه پیش‌بینی گردید، ۴۳/۱۰ است.

در انتها لازم به ذکر است که دو پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده و ضخامت با توجه به تحقیقات زیادی که در گذشته توسط محققین روی این دو پارامتر صورت گرفته است و همچنین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش قابل پیش‌بینی بودند؛ که این موضوع خود تأییدکننده اعتبار این سازه بهینه پیشنهادی است.

۳-۳- تحلیل مکانیسم‌های جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

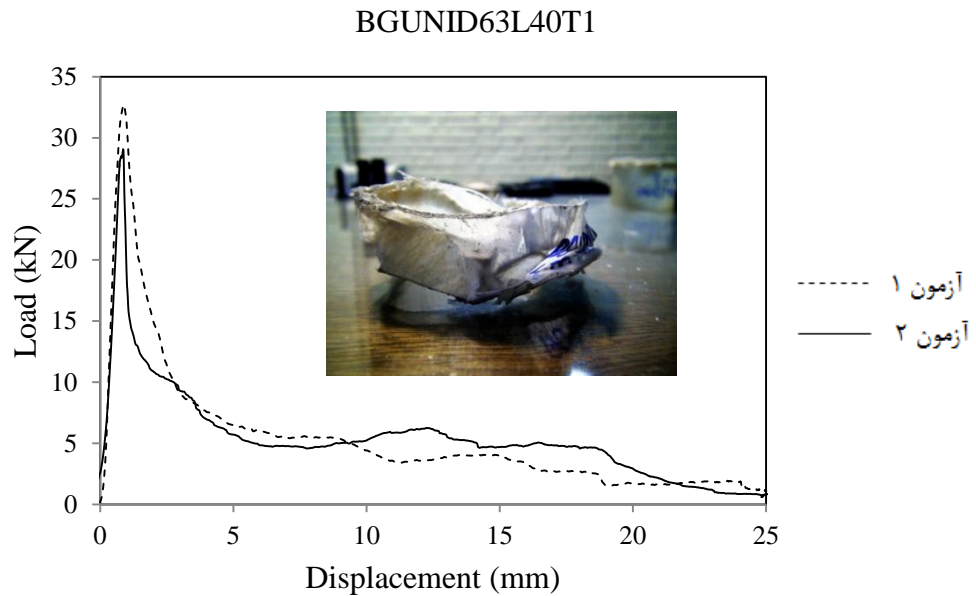
از آنجایی که مواد کامپوزیت بخشی از سازه‌های اصلی وسایل نقلیه امروزی است، این مهم است که ویژگی‌های له‌شدن آنها به‌خوبی درک شود. این بخش روی مکانیسم‌های جذب انرژی که در پوسته‌های کامپوزیتی در حین لهیدگی محوری رخ می‌دهد، تمرکز می‌کند و اینکه چطور این مکانیسم‌ها به‌وسیله نوع لایه‌چینی، مشخصات هندسی، نوع الیاف تقویت‌کننده و فرایند تولید تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ زیرا این مکانیسم‌ها هستند که جذب انرژی را کنترل می‌کنند.

۳-۳-۱- دسته‌بندی آزمایش‌های تجربی از نظر مود فروریزی

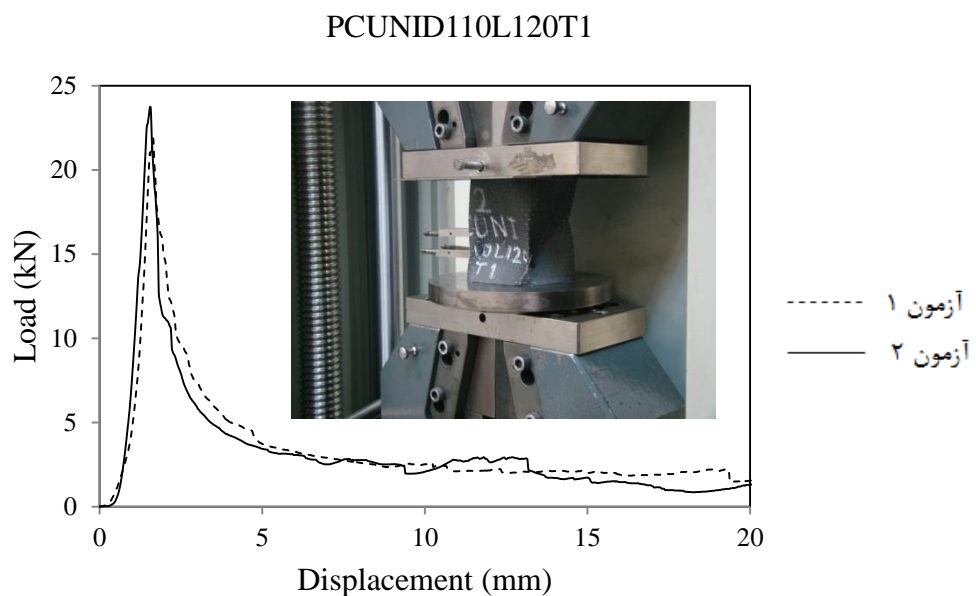
همان‌طور که گفته شد مدهای فروریزی از روی نمودار نیرو - جابه‌جایی و نحوه فروریزی حین آزمایش‌های تجربی لهیدگی محوری قابل‌شناسایی است که بر این اساس ۱۶ عدد پوسته‌های کامپوزیتی تولیدشده بررسی شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در ادامه تحلیل خواهند شد.

۳-۳-۱-۱- آزمایش‌های لهیدگی محوری با مود فروریزی ناپایدار

از آنجایی که در تولید لوله‌های کامپوزیتی جدار نازک ماشه ایجاد نشد (علت آن نیز بررسی نوع چیدمان لایه‌هایی بود که احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار را افزایش می‌دهند) تعداد شش عدد از پوسته‌ها در مود ناپایدار دچار فروریزی شدند که در شکل‌های (۳-۷) تا (۳-۱۲) نشان داده شده است.

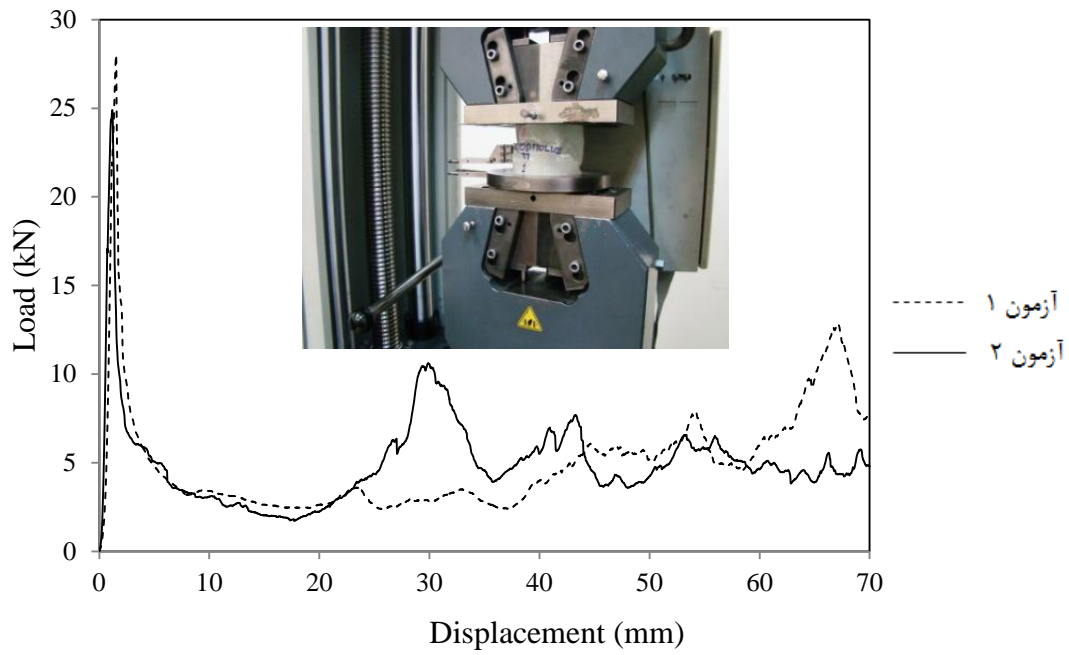


شکل (۳-۷): فروریزی پوسته شماره ۱ در مود فروریزی ناپایدار کمانش



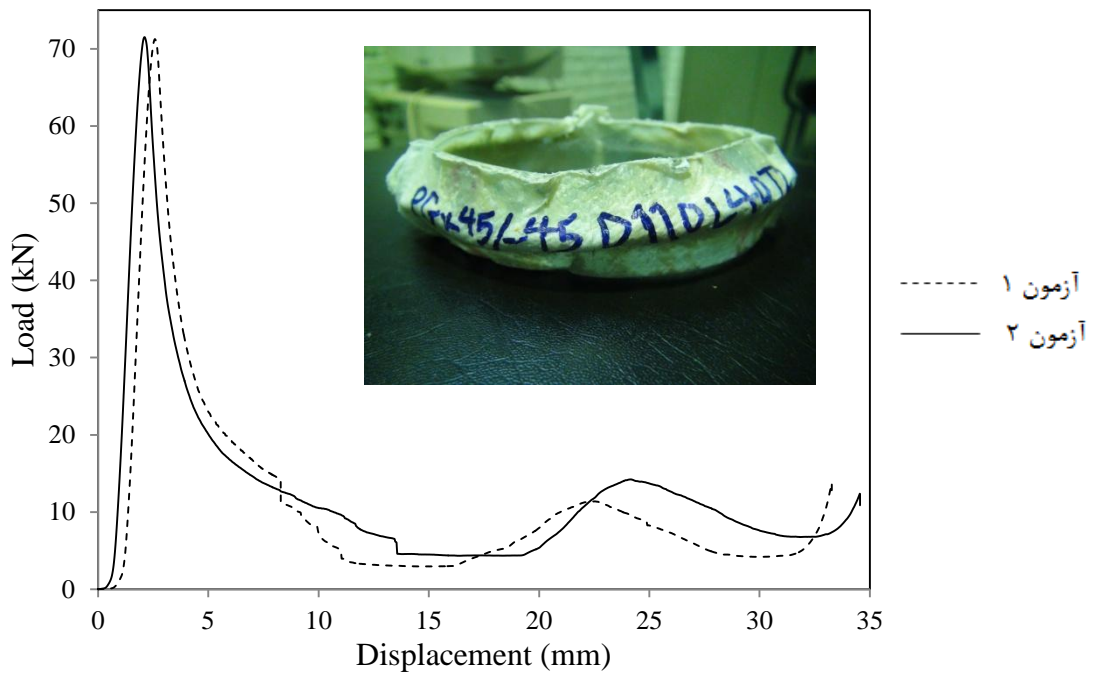
شکل (۳-۸): فروریزی پوسته شماره ۳ در مود فروریزی ناپایدار کمانش

BG90/0D110L160T1



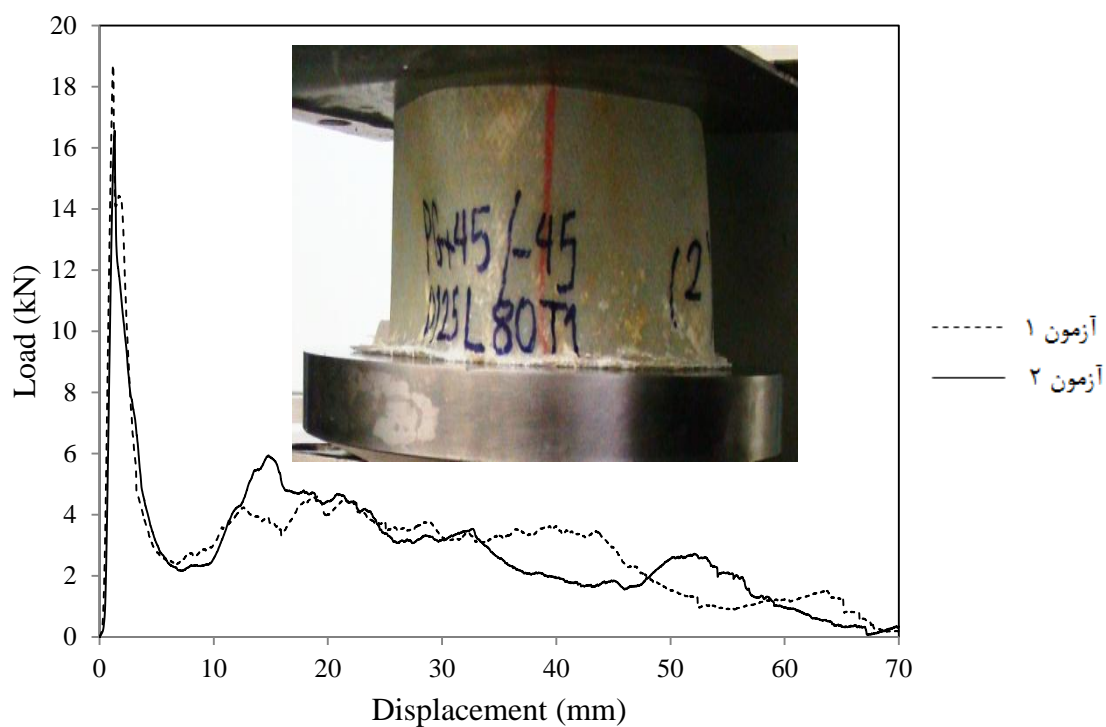
شکل (۹-۳): فروریزی پوسته شماره ۷ در مود فروریزی ناپایدار کمانش

PG+45/-45D110L40T2



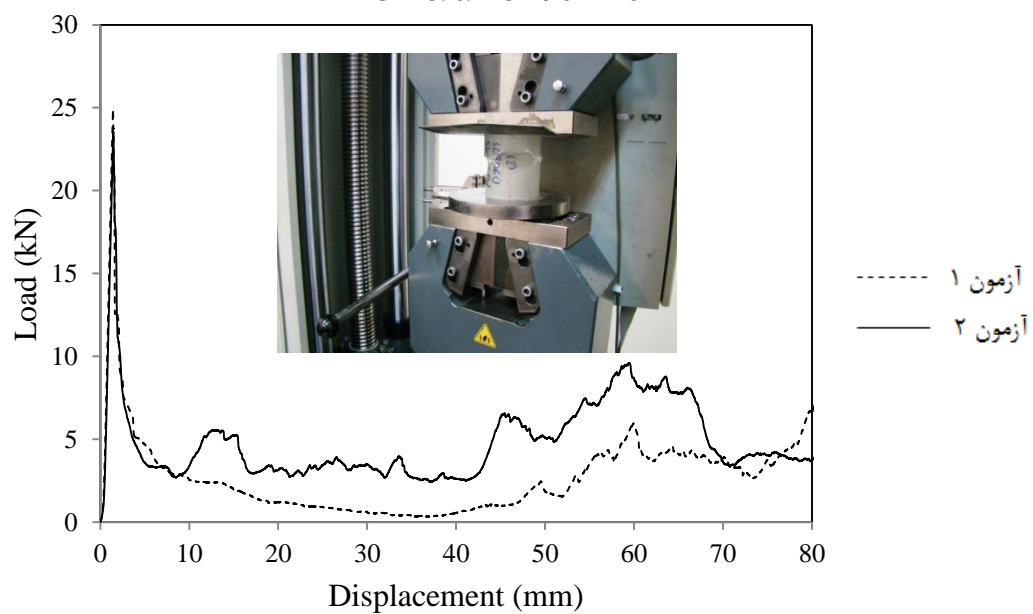
شکل (۱۰-۳): فروریزی پوسته شماره ۱۱ در مود فروریزی ناپایدار بشکهای شدن

PG+45/-45D125L80T1



شکل (۳-۱۱): فروریزی پوسته شماره ۱۲ در مود فروریزی ناپایدار بشکهای شدن

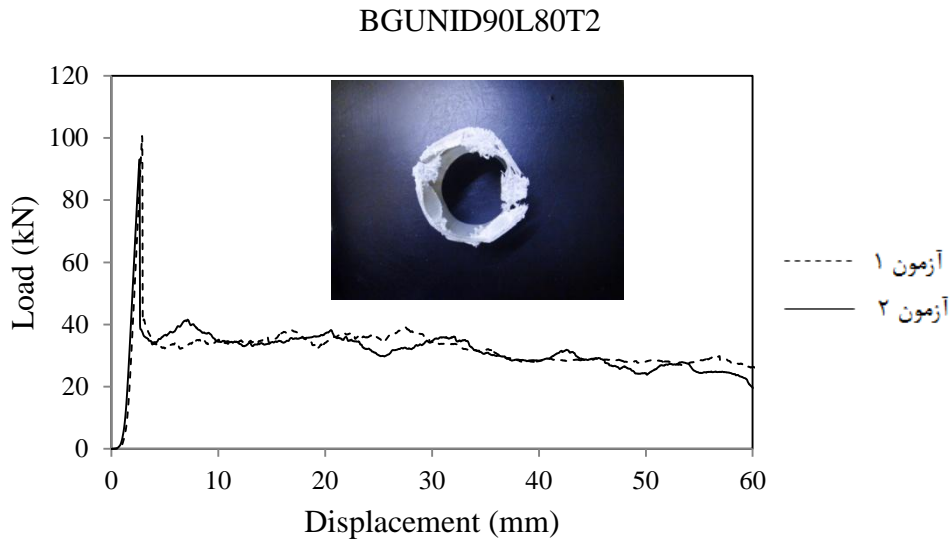
PG+45/0/-45D90L120T1



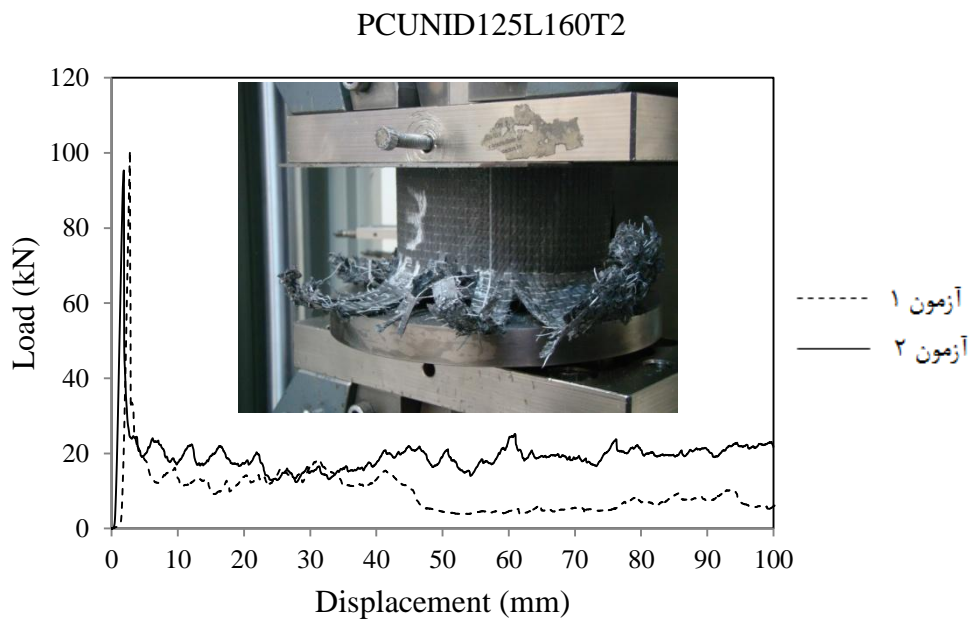
شکل (۳-۱۲): فروریزی پوسته شماره ۱۴ در مود فروریزی ناپایدار نفوذ داخلی

۳-۱-۲- آزمایش‌های لهیدگی محوری با مود فروریزی پایدار

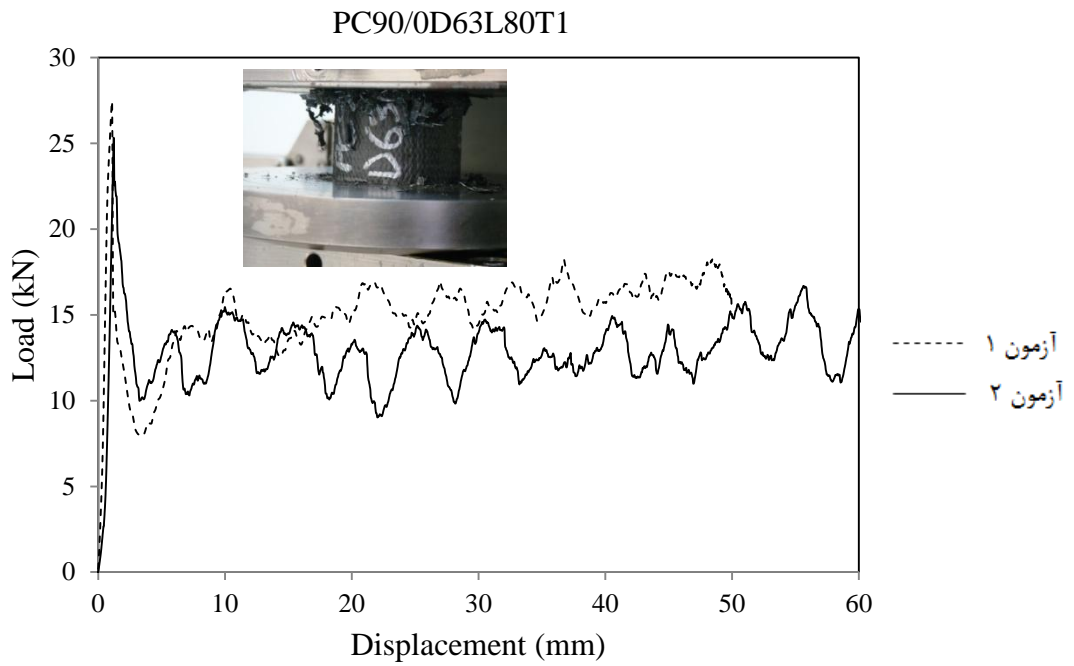
همان‌طور که در شکل‌های (۳-۱۳) تا (۳-۲۲) نشان داده شده است، تعداد ده عدد از پوسته‌ها با مود پایدار فروریختند که پنج عدد از این پوسته‌ها در مود بازشدن‌الیاف و سه عدد نیز در مود شکست‌ترد و دو عدد از آنها هم در مود چین‌خوردگی تخریب شدند.



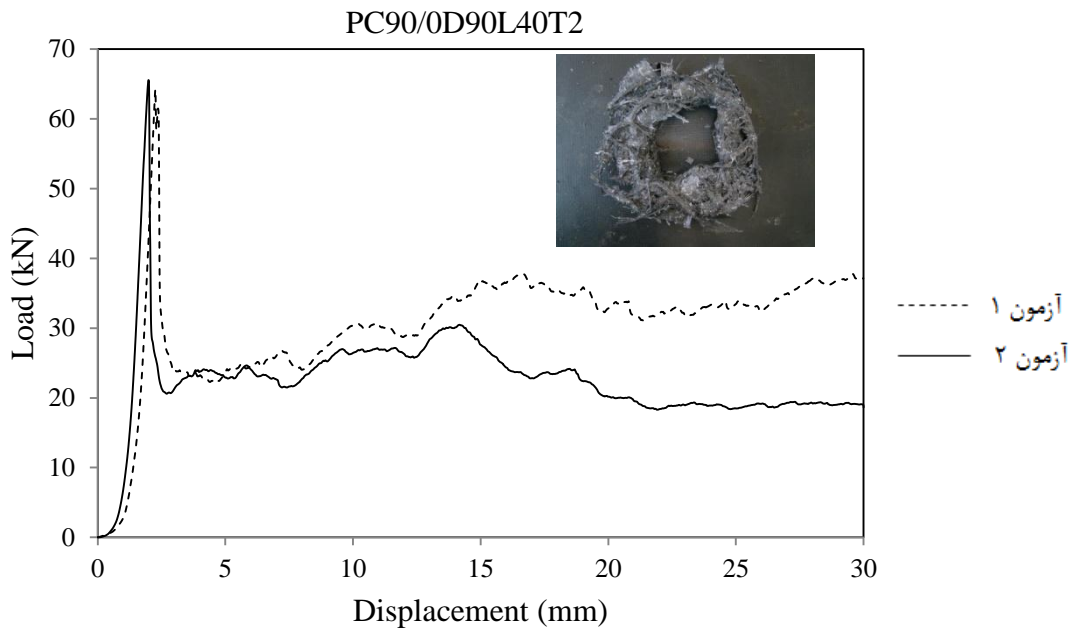
شکل (۳-۱۳): فروریزی پوسته شماره ۲ در مود فروریزی پایدار شکست‌ترد



شکل (۳-۱۴): فروریزی پوسته شماره ۴ در مود فروریزی پایدار بازشدن‌الیاف

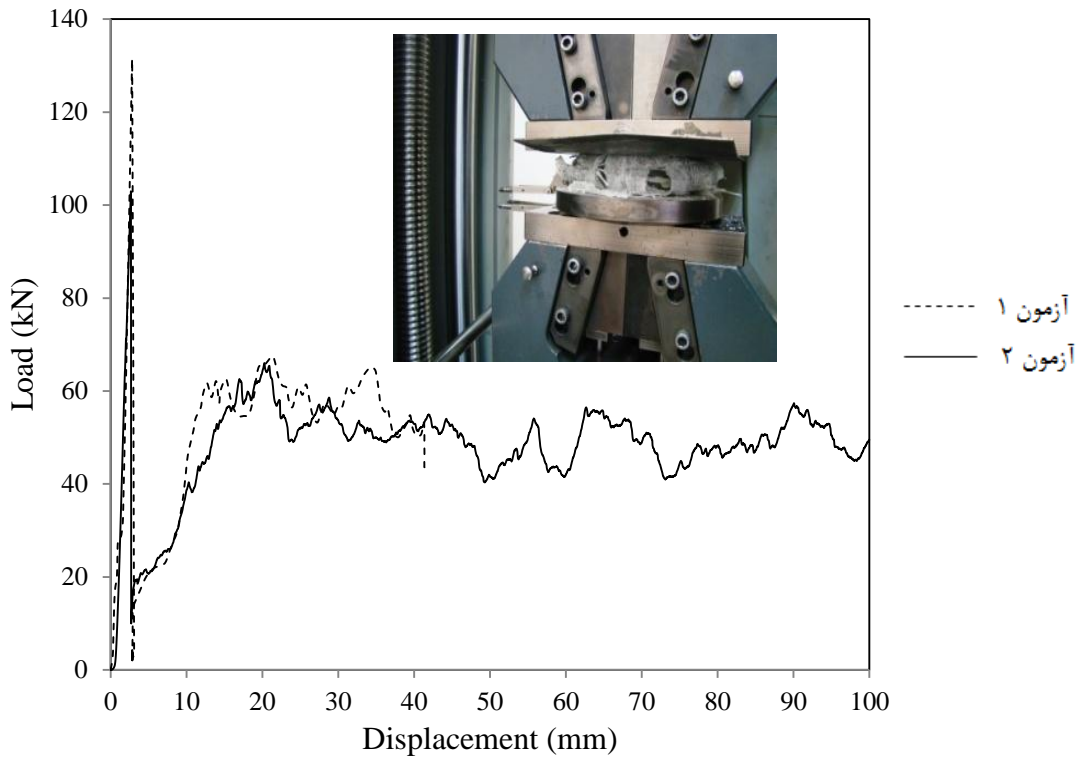


شکل (۳-۱۵): فروریزی پوسته شماره ۵ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف



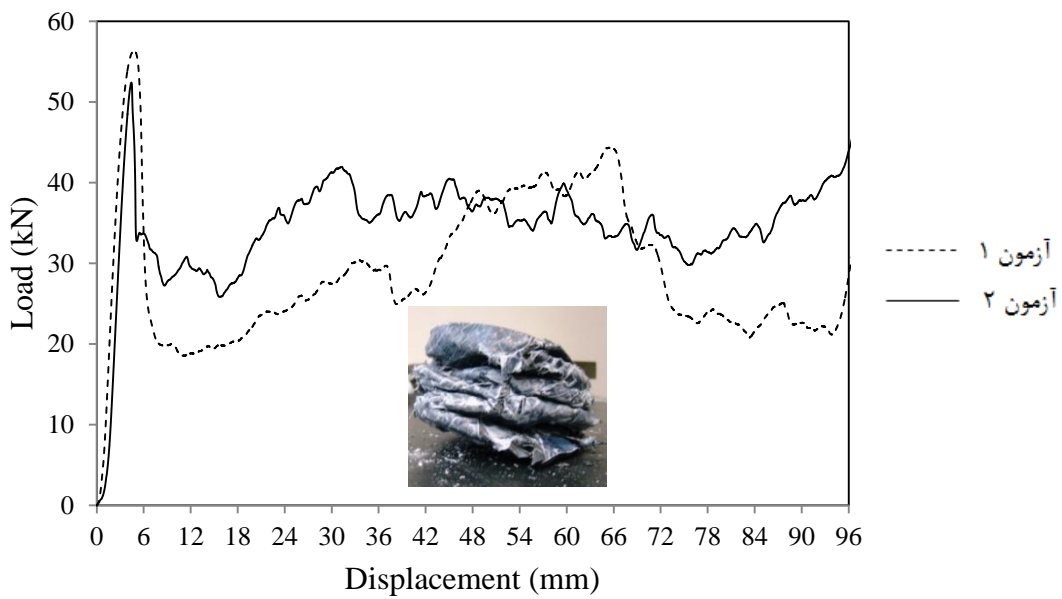
شکل (۳-۱۶): فروریزی پوسته شماره ۶ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف

BG90/0D125L120T2

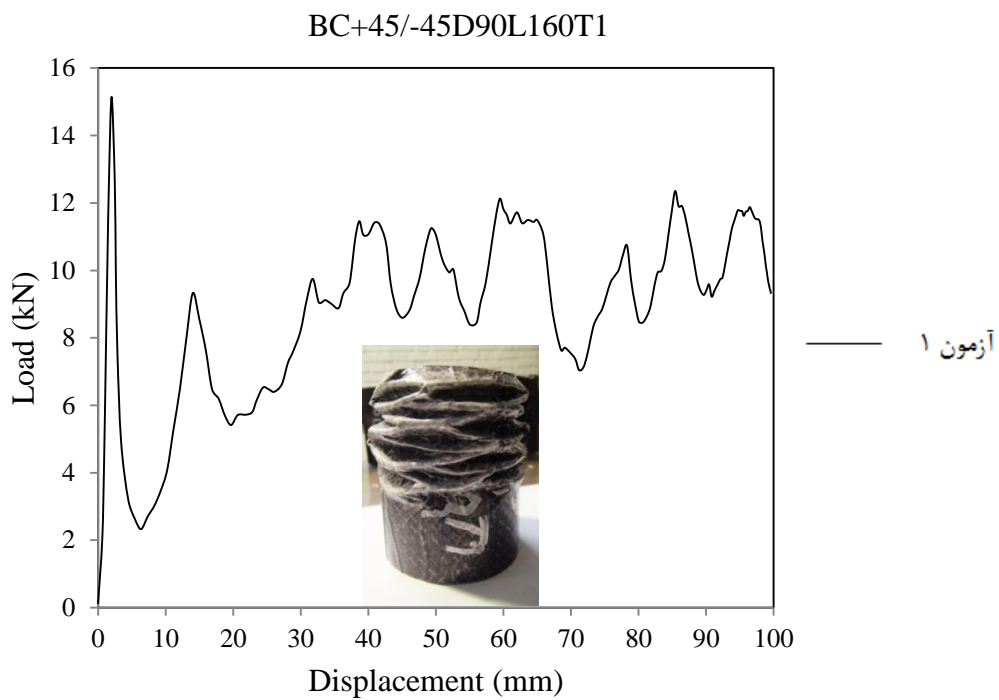


شکل (۳-۱۷): فروریزی پوسته شماره ۸ در مود فروریزی پایدار بازشدن الیاف

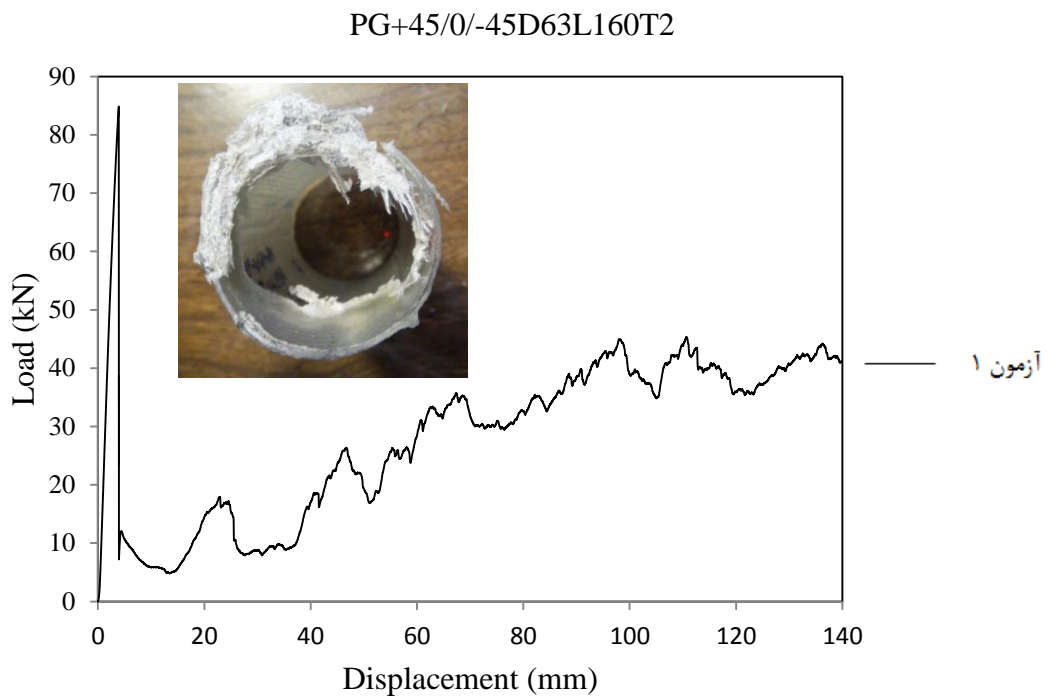
BC+45/-45D63L120T2



شکل (۳-۱۸): فروریزی پوسته شماره ۹ در مود فروریزی پایدار چین خوردگی

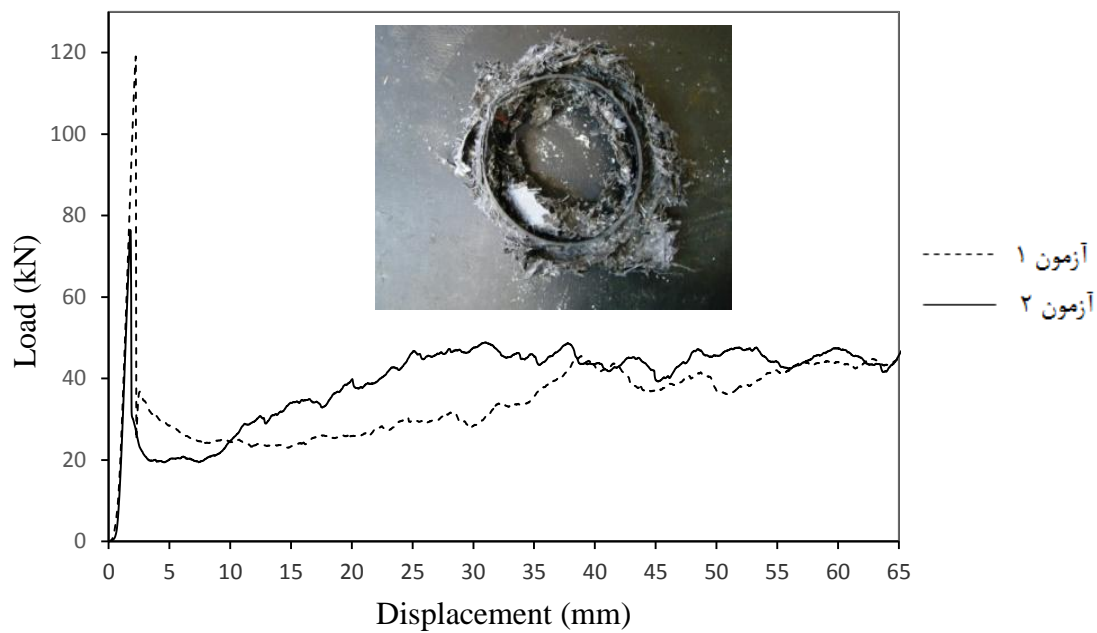


شکل (۳-۱۹): فروریزی پوسته شماره ۱۰ در مود فروریزی پایدار چین خوردگی



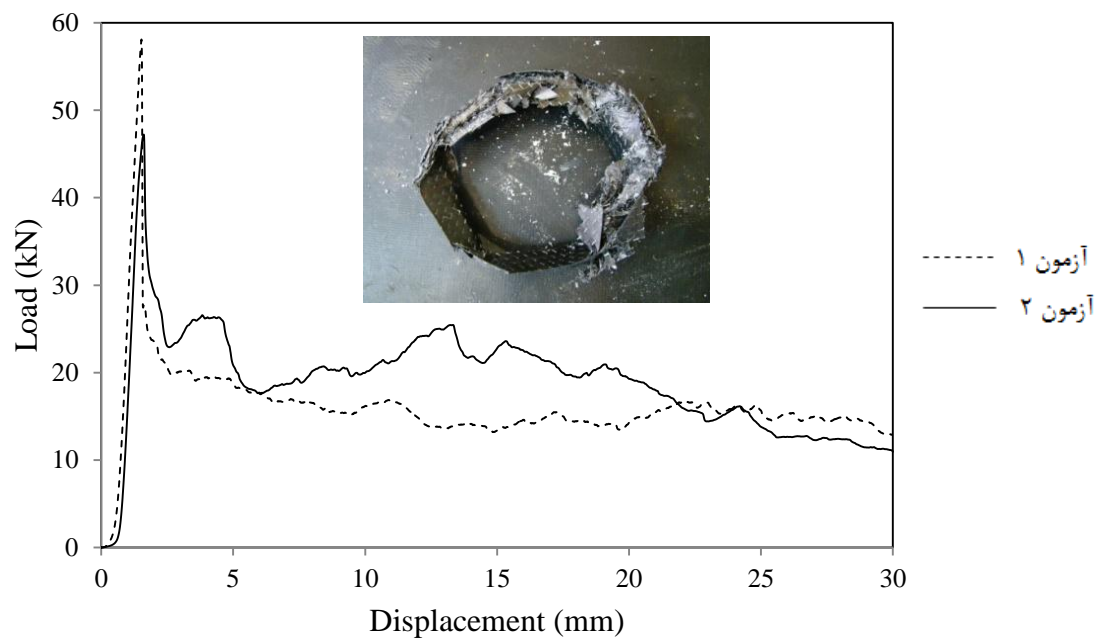
شکل (۳-۲۰): فروریزی پوسته شماره ۱۳ در مود فروریزی پایدار شکست ترد

BC+45/0/-45D110L80T2



شکل (۳-۲۱): فروریزی پوسته شماره ۱۵ در مود فروریزی پایدار شکست ترد

BC+45/0/-45D125L40T1



شکل (۳-۲۲): فروریزی پوسته شماره ۱۶ در مود فروریزی پایدار شکست ترد

۳-۳-۲- مودهای فروریزی و جذب انرژی مخصوص

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، با توجه به اینکه این مودهای فروریزی هستند که جذب انرژی را کنترل می‌کنند، پوسته‌هایی که مود له‌شدن ناپایدار (فاجعه‌انگیز) داشته باشند، جذب انرژی مخصوص پایین‌تری نیز دارند. این موضوع در جدول (۳-۴) به‌خوبی قابل مشاهده است. پوسته‌هایی که مود فروریزی ناپایدار دارند، اکثراً جذب انرژی مخصوص پایین‌تر از 10 (J/g) دارند. البته پوسته‌های شماره ۱ و ۷ از این قاعده مستثنی هستند که جذب انرژی متوسطی دارند و این می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- جذب انرژی آنها بعد از ناپایداری له‌شدگی، ناشی از مقاومت توده الیاف جمع شده بر روی هم بر اثر جابه‌جایی بیش از حد فرایند آزمایش لهیدگی محوری باشد؛ که البته با توجه به نمودار نیرو - جابه‌جایی شکل (۳-۷) برای پوسته شماره ۱ و شکل (۳-۹) برای پوسته شماره ۷، این احتمال برای پوسته شماره ۷ با توجه به بالا رفتن سطح زیر نمودار بعد از قله نیرو اولیه در منطقه پس‌له‌شدگی، قوی‌تر است (البته ملاک حد انتهایی جابه‌جایی در آزمایش لهیدگی محوری این پوسته‌ها جابه‌جایی تا حداقل 50% طول پوسته یا افت 90% نیرو بوده است که این دو مورد در تنظیمات نرم‌افزار آزمون در نظر گرفته شده بود و به‌صورت دستی نیز زمانی که بعد از طی شدن جابه‌جایی 50% نیرو افزایش شدیدی پیدا می‌کرد، فرایند آزمون متوقف می‌گردید).

- از طرفی تشخیص نوع مود فروریزی با بررسی سه پارامتر به‌صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: ۱- میزان جذب انرژی، ۲- شکل منحنی نیرو، ۳- مکانیسم‌های فروریزی که به نظر می‌رسد علیرغم اینکه این دو پوسته میزان جذب انرژی متوسطی دارند در دو پارامتر بعدی شکی مبنی بر ناپایدار بودن له‌شدن خود باقی نمی‌گذارند.

جدول (۳-۴): نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر و اثر آن بر جذب انرژی مخصوص

شماره آزمایش	جذب انرژی مخصوص (J/g)	مود فروریزی
۱	۱۴/۲۰	ناپایدار - کمانش
۲	۳۴/۶۹	پایدار - باز شدن الیاف
۳	۷/۲۹	ناپایدار - کمانش
۴	۲۱/۷۱	پایدار - باز شدن الیاف
۵	۵۰/۲۵	پایدار - باز شدن الیاف
۶	۳۳/۷۴	پایدار - باز شدن الیاف
۷	۲۲/۵۲	ناپایدار - کمانش
۸	۳۷/۱۸	پایدار - باز شدن الیاف
۹	۴۳/۹۸	پایدار - چین خوردگی
۱۰	۱۹/۵۴	پایدار - چین خوردگی
۱۱	۹/۹۷	ناپایدار - بشکهای شدن
۱۲	۵/۷۸	ناپایدار - بشکهای شدن
۱۳	۴۳/۷۱	پایدار - شکست ترد
۱۴	۸/۸۱	ناپایدار - نفوذ داخلی
۱۵	۳۳/۶۰	پایدار - شکست ترد
۱۶	۲۵/۲۱	پایدار - شکست ترد

اما به‌طور کلی اگر بخواهیم مدهای له‌شدن ناپایدار را از نظر میزان جذب انرژی دسته‌بندی کنیم، بیشترین جذب انرژی مربوط به مود له‌شدگی ناپایدار کمانش است؛ بنابراین حتی‌المقدور بایستی در لایه‌چینی پوسته‌های جاذب انرژی لوله‌ای شکل از لایه‌چینی‌هایی که احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار به‌خصوص با مود فروریزی بشکهای شدن را افزایش می‌دهند، خودداری کرد.

۳-۳-۳- لایه‌چینی و مودهای فروریزی

همان‌طور که از جدول (۳-۵) قابل مشاهده است، از شش مورد پوسته‌ای که له‌شدن ناپایدار داشته‌اند، دو پوسته دارای چیدمان لایه ۰ و دو پوسته هم دارای چیدمان لایه (۴۵/-۴۵) بوده‌اند که این نشان‌دهنده این موضوع است که این دو نوع لایه‌چینی احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار را افزایش می‌دهند و در نتیجه جذب انرژی در این دو نوع لایه‌چینی کاهش می‌یابد. البته لازم به ذکر است که از بین این دو لایه‌چینی، لایه‌چینی (۴۵/-۴۵) بحرانی‌تر است، چون در صورت وقوع له‌شدن ناپایدار مود فروریزی آن احتمالاً از نوع بشکه‌ای شدن خواهد بود.

نتایج فوق مشابه نتایجی است که از تحلیل آماری تاگوچی به دست آمد. البته این امر با توجه به اینکه تحلیل تاگوچی نیز بر اساس میزان جذب انرژی مخصوص صورت گرفته قابل‌انتظار بود؛ زیرا جذب انرژی مخصوص بر اثر له‌شدن ناپایدار کاهش می‌یابد. بنابراین لایه‌چینی‌های (۹۰/۰) و (۴۵/-۴۵) به ترتیب میزان جذب انرژی مخصوص، برای سازه‌های جاذب انرژی بهتر می‌باشند.

جدول (۳-۵): رابطه لایه‌چینی با مود فروریزی ناپایدار

شماره آزمایش	لایه‌چینی	مود فروریزی
۱	(۰)	ناپایدار - کمانش
۳	(۰)	ناپایدار - کمانش
۷	(۹۰/۰)	ناپایدار - کمانش
۱۱	(±۴۵)	ناپایدار - بشکه‌ای شدن
۱۲	(±۴۵)	ناپایدار - بشکه‌ای شدن
۱۴	(+۴۵/۰/-۴۵)	ناپایدار - نفوذ داخلی

در نهایت همان‌طور که از جدول (۳-۶) قابل مشاهده است، مشخص است که مودهای له‌شدن پایدار با لایه‌چینی رابطه مشخصی دارند؛ به‌طوری که برای پوسته‌هایی که لایه‌چینی آنها ۰ و (۹۰/۰) بوده است، مود فروریزی له‌شدن پایدار آنها مود بازشدن‌الیاف و برای پوسته‌هایی که لایه‌چینی آنها

(+۴۵/-۴۵) بوده مود له شدن پایدار آنها مود چین خوردگی و نیز برای پوسته‌هایی که لایه چینی آنها

(+۴۵/۰/-۴۵) بوده است، مود له شدن پایدار آنها مود شکست ترد است.

جدول (۳-۶): رابطه لایه چینی با مود فروریزی پایدار

شماره آزمایش	لایه چینی	مود فروریزی
۲	(۰)	پایدار - باز شدن الیاف
۴	(۰)	پایدار - باز شدن الیاف
۵	(۹۰/۰)	پایدار - باز شدن الیاف
۶	(۹۰/۰)	پایدار - باز شدن الیاف
۸	(۹۰/۰)	پایدار - باز شدن الیاف
۹	(±۴۵)	پایدار - چین خوردگی
۱۰	(±۴۵)	پایدار - چین خوردگی
۱۳	(+۴۵/۰/-۴۵)	پایدار - شکست ترد
۱۵	(+۴۵/۰/-۴۵)	پایدار - شکست ترد
۱۶	(+۴۵/۰/-۴۵)	پایدار - شکست ترد

۳-۳-۴- فرایند تولید و مودهای فروریزی

همان‌طور که از جدول (۳-۷) قابل مشاهده است، از شش مورد پوسته‌ای که له شدن ناپایدار داشته‌اند دو پوسته با فرایند قالب‌گیری کیسه‌ای و چهار پوسته با فرایند تزریق رزین به کمک خلأ تولید شده‌اند که مود فروریزی هر دو پوسته‌ای که با قالب‌گیری کیسه‌ای دچار له شدن ناپایدار شده‌اند، از نوع مود کمانش است که در میان مودهای ناپایدار بیشترین جذب انرژی را داشته است. نتایج فوق مشابه نتایجی است که از تحلیل آماری تاگوچی به دست آمد و فرایند قالب‌گیری کیسه‌ای برای طراحی سازه‌های جاذب انرژی بهینه مناسب‌تر تشخیص داده شد.

جدول (۷-۳): رابطه فرایند تولید با مود فروریزی ناپایدار

شماره آزمایش	فرایند تولید	مود فروریزی
۱	قالب‌گیری کیسه‌ای	ناپایدار - کمانش
۳	تزریق رزین	ناپایدار - کمانش
۷	قالب‌گیری کیسه‌ای	ناپایدار - کمانش
۱۱	تزریق رزین	ناپایدار - بشکه‌ای شدن
۱۲	تزریق رزین	ناپایدار - بشکه‌ای شدن
۱۴	تزریق رزین	ناپایدار - نفوذ داخلی

البته از آنجایی که پوسته‌ای که بیشترین جذب انرژی را دارد، پوسته شماره ۵ بوده و فرایند تولید آن تزریق رزین به کمک خلأ است و مطابق جدول (۸-۳) میانگین جذب انرژی مخصوص پوسته‌هایی که به این روش تولید شده‌اند و مود فروریزی آنها له‌شدن پایدار است، بیشتر می‌باشد. به نظر می‌رسد که تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین این دو فرایند وجود ندارد که همین امر باعث شده که در رتبه‌بندی انجام‌شده در روش تاگوچی فرایند تولید در بین شش پارامتر طراحی در نظر گرفته‌شده رتبه چهارم را داشته باشد.

جدول (۸-۳): رابطه فرایند تولید با جذب انرژی مخصوص و مود فروریزی پایدار

شماره آزمایش	جذب انرژی مخصوص (J/g)	فرایند تولید	مود فروریزی
۲	۳۴/۶۹	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - باز شدن الیاف
۸	۳۷/۱۸	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - باز شدن الیاف
۹	۴۳/۹۸	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - چین خوردگی
۱۰	۱۹/۵۴	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - چین خوردگی
۱۵	۳۳/۶۰	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - شکست ترد
۱۶	۲۵/۲۱	قالب‌گیری کیسه‌ای	پایدار - شکست ترد
۴	۲۱/۷۱	تزریق رزین	پایدار - باز شدن الیاف
۵	۵۰/۲۵	تزریق رزین	پایدار - باز شدن الیاف
۶	۳۳/۷۴	تزریق رزین	پایدار - باز شدن الیاف
۱۳	۴۳/۷۱	تزریق رزین	پایدار - شکست ترد

۳-۳-۵- نوع الیاف تقویت کننده و مودهای فروریزی

همان‌طور که از جدول (۳-۹) قابل مشاهده است، از شش مورد پوسته‌ای که مود له‌شدن ناپایدار داشته‌اند پنج پوسته دارای تقویت‌کننده از نوع الیاف شیشه بوده‌اند که البته یک موردی که تقویت‌کننده کربن داشته است، دارای ضخامت یک میلی‌متر است که خود تأییدکننده این موضوع است که پوسته‌های کربنی با ضخامت بهینه، جاذب‌های انرژی بهتری هستند.

جدول (۳-۹): نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر در تقابل با نوع تقویت‌کننده

شماره آزمایش	نوع تقویت‌کننده	مود فروریزی
۱	شیشه	ناپایدار - کمانش
۳	کربن	ناپایدار - کمانش
۷	شیشه	ناپایدار - کمانش
۱۱	شیشه	ناپایدار - بشک‌های شدن
۱۲	شیشه	ناپایدار - بشک‌های شدن
۱۴	شیشه	ناپایدار - نفوذ داخلی

۳-۳-۶- هندسه پوسته‌ها و مودهای فروریزی

همان‌طور که در جدول (۳-۱۰) نشان داده شده است، برای بررسی اثر قطر داخلی بر مود فروریزی تنها نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که با توجه به اینکه از شش پوسته‌ای که دچار له‌شدن ناپایدار شده‌اند، سه عدد از آنها دارای قطر داخلی (mm) ۱۱۰ می‌باشند؛ لذا این قطر به شدت احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار را در مود فروریزی کمانش افزایش می‌دهد و بایستی از طراحی سازه جاذب انرژی با مشخصات مربوط به این پژوهش کنار گذاشته شود. در مورد پارامتر هندسی طول، نتیجه‌گیری خاصی نمی‌توان ارائه کرد؛ اما بررسی پارامتر ضخامت نشان می‌دهد که از شش پوسته‌ای که دچار له‌شدن ناپایدار شده‌اند، پنج عدد از آنها دارای ضخامت (mm) ۱ بوده‌اند؛ بنابراین این ضخامت احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار بخصوص با مود فروریزی له‌شدن را افزایش می‌دهد.

جدول (۳-۱۰): بررسی اثر هندسه بر روی نوع مود فروریزی پوسته‌های پژوهش حاضر

شماره آزمایش	قطر داخلی (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	مود فروریزی
۱	۶۳	۴۰	۱	ناپایدار - کمانش
۲	۹۰	۸۰	۲	پایدار - باز شدن الیاف
۳	۱۱۰	۱۲۰	۱	ناپایدار - کمانش
۴	۱۲۵	۱۶۰	۲	پایدار - باز شدن الیاف
۵	۶۳	۸۰	۱	پایدار - باز شدن الیاف
۶	۹۰	۴۰	۲	پایدار - باز شدن الیاف
۷	۱۱۰	۱۶۰	۱	ناپایدار - کمانش
۸	۱۲۵	۱۲۰	۲	پایدار - باز شدن الیاف
۹	۶۳	۱۲۰	۲	پایدار - چین خوردگی
۱۰	۹۰	۱۶۰	۱	پایدار - چین خوردگی
۱۱	۱۱۰	۴۰	۲	ناپایدار - بشکهای شدن
۱۲	۱۲۵	۸۰	۱	ناپایدار - بشکهای شدن
۱۳	۶۳	۱۶۰	۲	پایدار - شکست ترد
۱۴	۹۰	۱۲۰	۱	ناپایدار - نفوذ داخلی
۱۵	۱۱۰	۸۰	۲	پایدار - شکست ترد
۱۶	۱۲۵	۴۰	۱	پایدار - شکست ترد

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

۴-۱- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

در این فصل نتایج به‌دست‌آمده به‌طور خلاصه بیان می‌شود و پیشنهادهایی نیز برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌گردد.

۴-۲- نتایج

۱- به ترتیب پارامترهای چیدمان لایه‌ها و پارامترهای هندسی قطر داخلی و ضخامت بیشترین اثر را روی میزان جذب انرژی مخصوص این نوع سازه‌ها دارند و فرایند تولید، نوع الیاف تقویت‌کننده و پارامتر هندسی طول کمترین اثر را دارند و لذا بایستی در فرایند طراحی سازه‌های جاذب انرژی به سه پارامتر اول و بخصوص پارامتر چیدمان لایه‌ها اهمیت بیشتری داد.

۲- چیدمان لایه‌ها با الیاف تقویت‌کننده دوجته (۹۰/۰) بیشترین جذب انرژی مخصوص را در بر داشت و الیاف تقویت‌کننده سه‌جته (۴۵/۰/-۴۵) در مرتبه بعدی از نظر میزان جذب انرژی قرار داشت.

۳- بررسی پارامتر هندسی قطر داخلی پوسته‌ها نیز نشان داد بایستی برای یک سازه جاذب انرژی خاص، قطر بهینه را به دست آورده و طراحی سازه مربوطه را بر اساس آن انجام داد. البته این اتفاق در پارامتر هندسی طول نیز می‌افتد که درجه اهمیت آن بسیار کمتر است.

۴- تحقیق در مورد پارامتر هندسی ضخامت مطابق پیش‌بینی‌های اولیه پیش رفت و پوسته با ضخامت بیشتر جذب انرژی مخصوص بالاتری را از خود نشان داد.

۵- با توجه به اینکه کسر حجمی الیاف در فرایند تزریق رزین به کمک خلأ نسبت به فرایند قالب‌گیری کیسه‌ای بیشتر بود، نتایج نشان دادند که با افزایش کسر حجمی الیاف، قابلیت جذب انرژی کاهش پیدا می‌کند؛ و از طرفی با توجه به رتبه‌بندی که به دست آمد به نظر پارامتر فرایند تولید خیلی تأثیرگذار نیست.

۶- در بررسی پارامتر نوع الیاف تقویت‌کننده نیز همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، جذب انرژی پوسته‌های کربنی بیشتر از نوع شیشه‌ای بود.

۷- یکی دیگر از نتایج مهم تحلیل آماری این بود که پوسته جاذب انرژی کامپوزیتی بهینه دارای چیدمان الیاف (۹۰/۰)، قطر داخلی (mm) ۶۳، طول (mm) ۱۶۰، ضخامت (mm) ۲، فرایند تولید قالب‌گیری کیسه‌ای و نوع الیاف تقویت‌کننده، کربن است.

۸- میزان جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی که در مود له‌شدن پایدار دچار فروریزی می‌شوند، از سازه‌هایی که در مود ناپایدار فرو می‌ریزند، بیشتر است.

۹- پوسته‌هایی که مود فروریزی ناپایدار دارند، اکثراً جذب انرژی مخصوص پایین‌تر از (J/g) ۱۰ دارند.

۱۰- تشخیص پایدار یا ناپایدار بودن فرایند له‌شدن بایستی بر اساس سه پارامتر زیر به‌طور هم‌زمان صورت گیرد:

- میزان جذب انرژی
- شکل پروفیل نمودار نیرو - جابه‌جایی
- مودهای فروریزی در حین آزمون

۱۱- علیرغم اینکه میزان جذب انرژی در پوسته‌های کامپوزیتی که در مود ناپایدار دچار فروریزی می‌شوند، پایین است؛ اما به نظر می‌رسد که این مودها نیز از نظر میزان جذب انرژی قابل رتبه‌بندی می‌باشند:

مود کمانش < مود نفوذ داخلی < مود بشکه‌ای شدن

۱۲- حتی‌المقدور بایستی در لایه‌چینی پوسته‌های جاذب انرژی لوله‌ای شکل از لایه‌چینی‌هایی که احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار به‌خصوص با مود فروریزی بشکه‌ای شدن را افزایش می‌دهند، خودداری کرد.

۱۳- دو نوع لایه‌چینی ۰ و (+۴۵/-۴۵) احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار را افزایش می‌دهند و در نتیجه جذب انرژی در این دو نوع لایه‌چینی کاهش می‌یابد، البته لازم به ذکر است که از بین این دو لایه‌چینی، لایه‌چینی (+۴۵/-۴۵) بحرانی‌تر است؛ چون در صورت وقوع له‌شدن ناپایدار مود فروریزی آن احتمالاً از نوع بشکه‌ای شدن خواهد بود.

۱۴- مودهای له‌شدن پایدار با لایه‌چینی رابطه مشخصی دارند به طوری که:

- برای پوسته‌هایی که لایه‌چینی آنها ۰ و (۹۰/۰) بوده است مود فروریزی له‌شدن آنها مود بازشدن‌الیاف است.

- برای پوسته‌هایی که لایه‌چینی آنها (+۴۵/-۴۵) بوده است مود له‌شدن پایدار آنها مود چین‌خوردگی است.

- برای پوسته‌هایی که لایه‌چینی آنها (+۴۵/۰/-۴۵) بوده است مود له‌شدن پایدار آنها مود شکست‌ترد است.

۱۵- از نظر مودهای فروریزی له‌شدن نیز فرایند قالب‌گیری کیسه‌ای برای طراحی سازه‌های جاذب انرژی بهینه مناسب‌تر است.

۱۶- از نظر مودهای فروریزی له‌شدن نیز پوسته‌های کربنی با ضخامت بهینه و مناسب، جاذب‌های انرژی بهتری هستند.

۱۷- قطر داخلی (mm) ۱۱۰ برای پوسته به‌شدت احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار را در مود فروریزی کم‌انرژی افزایش می‌دهد و بایستی از طراحی این نوع از سازه‌های جاذب انرژی کنار گذاشته شود.

۱۸- بررسی پارامتر هندسی ضخامت نشان می‌دهد که پوسته دارای ضخامت یک میلی‌متر احتمال وقوع له‌شدن ناپایدار بخصوص با مود فروریزی له‌شدن را افزایش می‌دهد و بایستی از طراحی سازه جاذب انرژی با مشخصات مربوط به این پژوهش کنار گذاشته شود.

۱۹- از آنجایی که این مکانیسم‌های فروریزی هستند که میزان جذب انرژی را کنترل می‌کنند، پژوهش حاضر تطابق کامل بین نتایج تحلیل آماری و تحلیل مکانیسم‌های فروریزی له‌شدن که هر دو تحلیل بر اساس میزان جذب انرژی مخصوص صورت گرفته بود را نشان داد.

۲۰- تحلیل‌های آماری بخصوص در کارهای تجربی بر اساس پارامتر جذب انرژی مخصوص، بهترین روش برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی جاذب انرژی است.

۳-۴- پیشنهادها

- ۱- تحلیل عددی قابلیت جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی جهت پیش‌بینی سایر پارامترهای مؤثر در افزایش جذب انرژی این نوع سازه‌ها توسط نرم‌افزارهای ال‌اس‌داین^۱، رادیوس^۲، پم‌کراش^۳ و ماژول سی‌زون آباکوس^۴.
- ۲- تحلیل تجربی سایر پارامترهای مؤثر بر جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی مانند نوع ماتریس (زمینه)، نوع ماشه، سرعت آزمون، و ...
- ۳- بررسی جاذب‌های انرژی کامپوزیتی شبکه سینوسی.

^۱ LS-DYNA

^۲ RADIOSS

^۳ PAMCRASH

^۴ ABAQUS C-Zone

مراجع

- [1]Chawla K. K., (1987) “Composite materials: science and engineering”, 1st edition, New York: Springer Verlag, USA.
- [2]Herakovich C. T., (1998) “Mechanics of Fibrous Composites”, University of Virginia, John Wiley & Sons Inc, USA.
- [3]Deborah Chung D. L., (2010) “Composite materials: science and applications”, 2nd edition, New York: Springer, USA.
- [۴] دکتر حائریان اردکانی، علی، مهندس حائریان اردکانی، لیلا، مهندس حائریان اردکانی، لاله، (۱۳۸۲). "مواد و فرایندهای تولید (جلد اول)", انتشارات نما، تهران.
- [5]Rawlings R. D., Mattheu's F. L., (1994) “Composite materials: engineering and science”, 1st edition, London: Chapman & Hall, UK.
- [۶] دکتر بهشتی، محمدحسین، مهندس رضادوست، امیر مسعود، (۱۳۸۴). "پلاستیک‌های تقویت‌شده (کامپوزیت‌ها)", پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران.
- [7]Penn W. S., (1966) “GRP Technology: Handbook to the polyester/glass fibre plastic industry”, London: Maclaren, UK.
- [۸] اسفندیاری، کیومرث، حجتی، رضا، علاقه‌بند، ایرج، گلپریان، نغمه، هاشمی، حمیدرضا، (۱۳۸۶). "راهنمای صنعت کامپوزیت"، انجمن کامپوزیت ایران، تهران.
- [9]Elmarakbi A., (2014) “ADVANCED COMPOSITE MATERIALS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS”, University of Sunderland, John Wiley & Sons, Ltd, UK.
- [۱۰] شبکه ایران کامپوزیت، (۱۳۸۸). "مجله الکترونیکی انجمن کامپوزیت ایران"، انجمن کامپوزیت ایران، تهران.
- [11]Mazumdar S., (2002) “Composites Manufacturing, Materials, Product and Process engineering”, CRC press, USA.
- [12]Campbell F. C., (2004) “Manufacturing Process of Advanced Composites”, Elsevier.
- [13]Hollaway L., (1993) “Polymer composites for civil and structural engineering”, 1st edition, Glasgow, UK: Blackie Academic and Professional.
- [۱۴] دکتر شکوه‌فر، علی، دکتر حدادسبزواری، محسن، دکتر حائریان اردکانی، علی، (۱۳۸۶). "علم و مهندسی مواد مرکب"، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- [15]Campbell F. C., (2010) “Composite materials”, 1st edition, ASM International, USA.
- [۱۶] دکتر فریدون، عبدالحسین، ثابت، سید علیرضا، دولتی، شکوفه، اسماعیلی، محمدرضا، (۱۳۹۳). "اثر زاویه قرارگیری الیاف بر روی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در مود I ماده مرکب الیاف شیشه/اپوکسی"، دانشگاه شاهرود، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۱۸۷-۱۸۳، شاهرود.
- [۱۷] رضازاده همدانی، مهدی، (۱۳۹۳). "دستورالعمل انجام تست‌های خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها"، پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، گزارش فنی به شماره-93-RWT.054.000.AN-ST (007).

- [18] Mastbergen D. B., (2004) “**Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures**”, MS Thesis, Montana State University-Bozeman, USA.
- [19] Wang C.M, Wang C.Y, Reddy J.N., (2005) “**Exact solutions for buckling of structural members**”, Texas A&M University, CRC Press LLC, USA.
- [۲۰] صائمی ج، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل عددی و تجربی کمانش و پس‌کمانش پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار فولادی تحت بار محوری و خارج از مرکز"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- [21] Roy R. K., (2001) “**Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement**”, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- [22] Lu G., Yu T., (2003) “**Energy absorption of structures and materials**”, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, England.
- [23] Hull D., (1982) “Energy Absorption of Composite Materials Under Crash Conditions”, Proc. of ICCM-4, Edited by T. Hayashi, K. Kawata and S. Umekawa, pp. **861-870**, Tokyo, Japan.
- [24] Mamalis A.G., Manolakos D.E., (1990) “Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fibreglass Composite Materials Subjected to Axial Loading”, *Journal of Composite Materials*, Vol. **24**, pp. **72-91**.
- [25] Thornton P. H., Edwards P. J., (1982) “Energy absorption in composite tubes”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **16**, pp. **521-545**.
- [26] Hull D., (1991) “A Unified Approach to Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite Tubes”, *Comp. Sci. & Tech.*, Vol. **40**, pp. **377-421**.
- [27] Courteau M.A., (2011) “**INVESTIGATING THE CRASHWORTHINESS CHARACTERISTICS OF CARBON FIBER/EPOXY TUBES**”, MSc. thesis, University of Utah, USA.
- [28] Kindervater C.M., (1985) “Crash Impact Behavior and Energy Absorbing Capability of Composite Structural Elements”, 30th International National SAMPE Symposium.
- [29] Farley G. L., (1987) “Energy Absorption of Composite Material and Structures”, Proc. 43rd American Helicopter Society Annual Forum, pp. **613-627**, St. Louis, USA.
- [30] Farley G.L., Jones R.M., (1992) “Crushing Characteristics of Continuous Fiber Reinforced Composite Tubes”, *Journal of Composite Materials*, Vol. **26**, pp. **37-50**.
- [31] Czaplicki M.J., Robertson R.E., Thornton P.H., (1990) “Comparison of Bevel Tulip Triggered Pultruded Tubes for Energy Absorption”, *Composites science and Technology*, Vol. **40**, pp. **31-46**.
- [32] Farley G. L., Jones R. M., (1992) “Crushing Characteristics of Composite Tubes with ‘Near- Elliptical’ Cross Sections”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **26**, No. **12**, pp. **1741-1751**.
- [33] Ramakrishna S., Hamada H., (1998) “Energy Absorption Characteristic of Crash Worthy Structural Composite Materials”, *Key Engineering Materials*, Vol. **141-143**, pp. **585-620**.

- [34] Greenhalgh E. S., (2009) “**Failure analysis and fractography of polymer composites**”, 1st edition, Woodhead publishing in materials, Cambridge, UK.
- [35] Carruthers J.J., Kettle A.P., Robinson A.M., (1998) “Energy Absorption Capability and Crashworthiness of Composite Material Structures: A Review”, *Applied Mechanics Review*, Vol. **51**, no. **10**, pp. **635-649**.
- [36] Fairfull A.H., Hull D., (1988) “Energy Absorption of Polymer Matrix Composite Structures: Frictional Effects”, *Structural Failure*, T Wierzbicki and N Jones (editors), pp. **255-279**.
- [37] Sigalas I., Kumosa M., Hull D., (1991) “Trigger Mechanisms in Energy Absorbing Glass Cloth/Epoxy Tubes”, *Composites Science and Technology*, Vol. **40**, pp. **265-287**.
- [38] Farley G.L., Wolterman R.L., Kennedy J.M., (1992) “Effects of Crushing Surface Roughness on the Crushing Characteristics of Composite Tubes”, *Journal of the American Helicopter Society*, pp. **53-60**.
- [39] Farley G. L., (1985) “Effect of Fiber and Matrix Maximum Strain on the Energy Absorption of Composite Materials”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **20**, pp. **322-334**.
- [40] Karbhari V.M., Falzon P.J., Herzberg I., (1997) “Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes”, *Journal of Composite Materials*, Vol. **31**, no. **12**, pp. **1164-1186**.
- [41] Scholarth M., (2003) “**Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades**”, Industrial Ph.D Thesis Dissertation, Special Report NO. 50, Institute of Mechanical Engineering, Danish Academy of Technical Sciences.
- [42] Koorevaar, A., (2003) “How Flow Analysis Technology Improves the Vacuum Infusion Process”, MC/SAMPE Conference on Marine Composites Plymouth.
- [43] Yoon, M.K., Baidoo, J., Gillespie, J. W. and Heider, D., (2005) “Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process Incorporating Gravitational Effects: A Closed-form Solution”, *Journal of Composite Materials*, Vol. **39**, pp. **2227-2242**.
- [44] Song, X., (2000) “**Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Model Development, Verification, and Process Analysis**”, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA.
- [45] Avalos, F., Pincheira, G., and Inostroza, J., (2010) “Material Parameter Identification for Vacuum Infusion Manufactured Components”, *International Journal of Material Forming*, Vol. **3**, Suppl **1**, pp. **579-582**.
- [46] Farley G. L., (1986) “Effect of Specimen Geometry on the Energy Absorption Capability of Composite Materials”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **20**, pp. **390-400**.
- [47] Farley G. L., (1983) “Energy Absorption of Composite Materials”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **17**, pp. **267-279**.
- [48] Farley G. L., (1987) “Energy Absorption in Composite Materials for Crashworthy Structures”, Proc. Of ICCM 6, Edited by F. L. Matthews, N. C. R. Buskell, J. M.Hodgkinson and J. Mortan, Elsevier Science Publishers Limited, pp. **3.57-3.66**, London, UK.

- [49] Hull D., (1983) "Axial Crushing of Fibre Reinforced Composite Tubes", *Structural Crashworthiness*, Editors N. Jones and T. Weirzbicki, Butterworths, London, UK, pp. 118-135.
- [50] Hamada H., Ramakrishna S., Maekawa Z., Nakamura M., (1994) "Energy Absorption Behavior of Hybrid Composite Tubes", Proc. 10th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference, pp. 523-534, Dearborn, Michigan, USA.
- [51] Schmuesser D. W., Wickliffe L. E., (1987) "Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes", *J. Engng. Mat. & Tech.*, Vol. 109, pp. 72-77.
- [52] Hamada H., Ramakrishna S., (1996) "Effect of fiber material on the energy absorption behavior of Thermoplastic composite tubes", *J. Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 9, No. 3, pp. 259-279.
- [53] Farley G. L., Jones R. M., (1992) "Analogy for the Effect of Material and Geometrical Variables on Energy Absorption Capability of Composite Tubes", *J. Comp. Mater.*, Vol. 26, No. 1, pp. 78-89.
- [54] Farley G. L., (1992) "Prediction of the Energy Absorption Capability of Composite Tubes", *J. Comp. Mater.*, Vol. 26, No. 3, pp. 388-404.
- [55] Chiu C. H., Lu C. K., Wu C. M., (1997) "Crushing Characteristics of 3-D Braided Composite square Tubes", *J. Comp. Mater.*, Vol. 31, No. 22, pp. 2309-2327.
- [56] Chiu C. H., Lu C. K., Wu C. M., (1995) "Energy Absorption of Three-Dimensional Braided Composite Tubes", Proc. of ICCM 10, Edited by B. C. Whistler, pp. 4.187-4.194, Canada.
- [57] Ramakrishna S., Hamada H., Maekawa Z., Sato H., (1995) "Energy Absorption Behavior of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Tubes", *J. Thermo. Comp. Mater.*, Vol. 8, pp. 323-344.
- [58] Chang I. Y., Lees J. K., (1988) "Recent Development in Thermoplastic Composites: A Review of Matrix Systems and Processing Methods", *J. Thermo. Comp. Mater.*, Vol. 1, pp. 277-295.
- [59] Chang I. Y., (1985) "Thermoplastic Matrix Continuous Filament Composites of Kevlar, Aramid or Graphite Fiber", *Comp. Sci. & Tech.*, Vol. 24, pp. 61-79.
- [60] Satoh H., Hirakawa H., Maekawa Z., Hamada H., Nakamura M., Hull D., (1993) "Comparison of Energy Absorption Among Carbon/Thermoplastic Tubes", 38th International SAMPE Symposium, Science of Advanced Materials and Process Engineering Series, Vol. 38, pp. 952-966.
- [61] Hamada H., Coppola J. C., Hull D., Maekawa Z., Sato H., (1992) "Comparison of Energy Absorption of Carbon/Epoxy and Carbon/PEEK Composite Tubes", *Composites*, Vol. 23, No. 4, pp. 245-252.
- [62] Farley G. L., Jones R. M., (1989) "Energy Absorption Capability of Composite Tubes and Beams", NASA TM-101634, AVSCOM TR-89-B-003.
- [63] Berry J. P., (1984) "Energy Absorption and Failure Mechanisms of Axially Crushed GRP Tubes", Ph.D., Thesis, University of Liverpool, UK.
- [64] Farley G. L., (1986) "Crash Energy Absorbing Composite Sub-floor Structure", 27th SDM conference, also submitted for publication to The American Helicopter Society.

- [65] Thornton P. H., Harwood J. J., Beardmore P., (1985) "Fiber Reinforced Plastic Composites for Energy Absorption Purposes", *Comp. Sci. & Tech.*, Vol. **24**, pp. **275-298**.
- [66] Dubey D. D., Vizzini J. A., (1998) "Energy Absorption of Composite Plates and Tubes", *J. Comp. Mater.*, Vol. **32**, pp. **158-176**.
- [67] Mamalis A. G., Yuan Y. B., G. L. Viegelaun G. L., (1992) "Collapse of Thin Wall Composite Sections Subjected to High Speed Axial Loading", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. **13:5/6**, pp. **564-579**.
- [68] Fairfull A. H., (1986) "**Scaling Effects in the Energy Absorption of Axially Crushed Composite Tubes**", Ph.D., Thesis, University of Liverpool, UK.
- [69] Fairfull A. H., Hull D., (1987) "Effects of Specimen Dimensions on the Specific Energy Absorption of Fibre Composite Tubes", Proc. of ICCM 6, Edited by F. L. Matthews, N. C. R. Buskell, J. M. Hodgkinson, J. Morton, Elsevier Science and Publishers, pp. **3.36-3.45**.
- [70] Farley G. L., "Energy Absorption Capability and Scalability of Square Cross Section Composite Tube Specimens", U.S. Army Research and Technology Activity– AVSCOM, pp. **1-17**, USA.
- [71] Hanagud S., Craig J. I., Sriram P., Zhou W., (1989) "Energy Absorption Behavior of Graphite Epoxy Composite Sine Webs", *J. Comp. Mater.*, Vol. **23**, pp. **448-459**.
- [72] Hamada H., Ramakrishna S., Maekawa Z., Sato H., (1995) "Effect of Cooling Rate on the Energy Absorption Capability of Carbon Fibre/PEEK Composite Tubes", *J. Poly. & Poly. Comp.*, Vol. **3**, No. **2**, pp. **99-104**.
- [73] Ramakrishna S., Hull D., (1993) "Energy Absorption Capability of Epoxy Composite Tubes with Knitted Carbon Fibre Fabric Reinforcement", *Comp. Sci. & Tech.*, Elsevier Science Publishers Limited, Vol. **49**, pp. **349-356**.
- [74] Ramakrishna S., (1995) "Energy Absorption Characteristics of Knitted Fabric Reinforced Epoxy Composite Tubes", *J. Reinf. Plast. & Comp.*, Vol. **14**, pp. **1121-1141**.
- [75] Snowdon P., Hull D., (1984) "Energy Absorption of SMC under Crash Conditions", Proc. Fiber Reinforced Composites Conference '84, Plastics and Rubber Institute, pp. **5.1-5.10**.
- [76] Thornton P. H., Tao W. H., Robertson R. E., (1991) "Crash Energy Management: Axial Crush of Unidirectional Fiber Composite Rods", Advanced Composite Materials: New Development and Applications Conference Proceedings, pp. **489-496**, Detroit, Michigan, USA.
- [77] Bannerman D. C., Kindervater C. M., (1984) "Crash Energy Absorption Properties of Composite Structural Elements", Proc. 4th International SAMPE European Chapter, pp. **155-167**, Bordeaux, France.
- [78] Thornton P. H., (1979) "Energy Absorption in Composite Structures", *J. Comp. Mater.*, Vol. **13**, pp. **247**.
- [79] Thornton P. H., (1990) "The Crush Behavior of Pultruded Tubes at High Strain Rate", *J. Comp. Mater.*, Vol. **24**, pp. **594-615**.

- [80] Farley G. L., (1991) “The Effects of Crushing Speed on the Energy Absorption Capability of Composite Tubes”, *J. Comp. Mater.*, Vol. **25**, pp. **1314-1329**.
- [81] Kindervater C. M., (1983) “Energy Absorbing Qualities of Fiber Reinforced Plastic Tubes”, National Specialists Meeting, Composite Structures of the American Helicopter Society, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- [82] Ochelski S., Gotowicki P., (2009) “Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites”, *Composite Structures*, Vol. **87**, pp. **215-224**.
- [83] Palanivelu S., Paepegem W. V., Degrieck J., Vantomme J., Kakogiannis D., Ackeren J. V., Hemelrijck D. V., Wastiels J., (2011) “Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions”, *Composite Structures*, Vol. **93**, pp. **992-1007**.
- [84] Jackson A., Dutton S., Gunnion A. J., Kelly D., (2011) “Investigation into laminate design of open carbon–fibre/epoxy sections by quasi–static and dynamic crushing”, *Composite Structures*, Vol. **93**, pp. **2646-2654**.
- [85] Niknejad A., Assaee H., Elahi S. A., Golriz A., (2013) “Flattening process of empty and polyurethane foam-filled E-glass/vinylester composite tubes – An experimental study”, *Composite Structures*, Vol. **100**, pp. **479-492**.
- [86] Pickett L., Dayal V., (2012) “Effect of tube geometry and ply-angle on energy absorption of a circular glass/epoxy crush tube – A numerical study”, *Composites: Part B*, Vol. **43**, pp. **2960-2967**.
- [87] Kim J. S., Yoon H. J., Shin K. B., (2011) “A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **38**, pp. **198-207**.
- [88] Palanivelu S., Paepegem W. V., Degrieck J., Ackeren J. V., Kakogiannis D., Hemelrijck D. V., Wastiels J., Vantomme J., (2010) “Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes”, *Polymer Testing*, Vol. **29**, pp. **224-234**.
- [89] Warrior N. A., Turner T. A., Cooper E., Ribeaux M., (2008) “Effects of boundary conditions on the energy absorption of thin-walled polymer composite tubes under axial crushing”, *Thin-Walled Structures*, Vol. **46**, pp. **905-913**.
- [90] Hamada H., Ramakrishna S., (1995) “Scaling Effect in the energy absorption carbon-fiber-PEEK composite tubes”, *Composite Science & Technology*, Vol. **55**, pp. **211-221**.
- [91] Mamalis, A.G., Manolacos, D.E., Ioannidis, M.B. and Papastolou, D.P., (2005) “On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading: experimental”, *Composite Structures*, Vol. **69(4)**, pp. **407–420**.
- [92] Xiao, X., McGregor, C.J., Vaziri, R. and Poursartip, A., (2009) “Progress in braided composite tube crush simulation”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **36(5)**, pp. **711–719**.

- [93] Schultz, M.R. and Hyer, M.W., (2001) “Static energy absorption capacity of graphite-epoxy tubes”, *Journal of Composite Materials*, Vol. **35**(19), pp. **1747–1761**.
- [94] Obradovic, J., Boria, S. and Belingardi, G., (2012) “Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures”, *Composite Structures*, Vol. **94**(2), pp. **423–430**.
- [95] Ramakrishna, S., (1997) “Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications”, *Materials and Design*, Vol. **18**(3), pp. **167–173**.
- [96] Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F. and Rassain, M., (2009) “Crush energy absorption of composite channel section specimens”, *Composites: Part A*, Vol. **40**(8), pp. **1248–1256**.
- [97] Chiu, C.H., Tsai, K.H. and Huang, W.J., (1999) “Crush-failure modes of 2D triaxially braided hybrid composite tubes”, *Composite Science and Technology*, Vol. **59**, pp. **1713–1723**.
- [98] McGregor, C., Vaziri, R. and Xiao, X., (2010) “Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **37**(6), pp. **662–672**.
- [99] Zarei, H., Kroeger, M. and Albertsen, H., (2008) “An experimental and numerical crashworthiness investigation thermoplastic composite crash boxes”, *Composite Structures*, Vol. **85**(3), pp. **245–257**.
- [100] Jimenez, M.A., Miravete, A., Larrode, E. and Revuelta, D., (2000) “Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles”, *Composite Structures*, Vol. **48**(1–3), pp. **107–111**.
- [101] Solaimurugan, S. and Velmurugan, R., (2007) “Progressive crushing of stitched glass/polyester composite cylindrical shells”, *Composite Science and Technology*, Vol. **67**(3–4), pp. **422–437**.
- [102] Warrior, N.A., Turner, T.A., Robitaille, F. and Rudd, C.D., (2004) “The effect of interlaminar toughening strategies on the energy absorption of composite tubes”, *Composites: Part A*, Vol. **35**(4), pp. **431–437**.
- [103] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Demosthenous, G.A. and Ioannidis, M.B., (1997) “Analytical modelling of the static and dynamic axial collapse of thin-walled fibreglass composite conical shells”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **19**(5), pp. **477–492**.
- [104] Song, H.W. and Du, X.W., (2002) “Off axis crushing of GFRP tubes”, *Composite Science and Technology*, Vol. **62**, pp. **2065–2073**.
- [105] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Demosthenous, G.A. and Ioannidis, M.B., (1996) “Energy absorption capability of fibreglass composite square frusta subjected to static and dynamic axial collapse”, *Thin-Walled Structures*, Vol. **25**(4), pp. **269–295**.
- [106] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Demosthenous, G.A. and Ioannidis, M.B., (1997) “Experimental determination of splitting in axially collapsed thick-walled fibre-reinforced composite frusta”, *Thin-Walled Structures*, Vol. **28**(3–4), pp. **279–296**.

- [107] Jacob G. C., Fellers J. F., Simunovic S., Starbuck J. M., (2002) "Energy Absorption in Polymer Composite Materials for Automotive Crashworthiness", *J. Comp. Mater.*, vol. **36**, pp. **813-889**.
- [108] Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L., (2009) "**Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**", John Wiley and Son, Second Edition, USA.
- [109] Axson EPOLAM2040 Data Sheet.
- [110] ASTM D 3039/D 3039M, (2004) "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM International, USA.
- [111] ASTM D 3518/D 3518M, (2004) "Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a ± 45 Laminate", ASTM International, USA.
- [112] ASTM D 6641/D 6641-01M, (2001) "Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture", ASTM International, USA.
- [113] ASTM D 2734-94, (2004) "Standard Test Method for Void Content of Reinforced Plastics", ASTM International, USA.
- [114] Product Information Book of Zwick Z250 materials testing machine with central ball-lead screw.
- [115] Valizadeh P., Hosseini S. M., Alvandi H., (2012) "Studying the physical and mechanical behavior of fibre-reinforced epoxy composite fabricated by VARTM and VB", The 3rd International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-3), Tehran, Iran.

پیوست الف

اطلاعات فنی مواد و تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت پوسته‌ها

جدول (الف-۱): اطلاعات مربوط به الیاف تقویت کننده مورد استفاده در این پژوهش

نام الیاف تقویت کننده	نوع الیاف تقویت کننده	کد تجاری	کشور- کارخانه سازنده
تکجهته شیشه	الکتریکی-کوک زده شده	0(UD)/۲۵۵-۸۲۰۷۱۷۵	ترکیه-STA
دوجته شیشه (۹۰/۰)	الکتریکی-کوک زده شده	۰۹۰/۳۰۰-۸۲۰۸۰۰۰	ترکیه-STA
دوجته شیشه (۴۵/-۴۵)	الکتریکی-کوک زده شده	+۴۵-۴۵/۲۷۰-۸۲۰۸۱۰۰	ترکیه-STA
سه جهته شیشه (۴۵/۰/-۴۵)	الکتریکی-کوک زده شده	+۴۵۹۰-۴۵/۳۲۰-۸۲۰۴۶۰۰	ترکیه-STA
تکجهته کربن	A-42-12k-کوک زده شده)	ESA-C200UD Carbon Fabric-12k (800 Tex)	-

جدول (الف-۲): مشخصات الیاف تقویت کننده تکجهته شیشه ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد استفاده در

این پژوهش

نوع کوک ^۲	نوع نخ ^۱	وزن لایه (g/m ²)	تکس الیاف g/(1000m)		عرض رول (cm)
			کوک	لایه ۰	
Tricot	TEXTURED Polyester	۲۴۸	۸۴	۹۰۰	۱۰۰

جدول (الف-۳): مشخصات الیاف تقویت کننده دوجته شیشه (۹۰/۰) ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد

استفاده در این پژوهش

نوع کوک	نوع نخ	وزن لایه (g/m ²)		تکس الیاف g/(1000m)			عرض رول (cm)
		۰ لایه	۹۰ لایه	کوک	۰ لایه	۹۰ لایه	
Tricot	TEXTURED	۱۶۵	۱۳۰	۷۵	۶۰۰	۶۰۰	۱۲۷

جدول (الف-۴): مشخصات الیاف تقویت کننده دوجته شیشه (۴۵/-۴۵) ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد

استفاده در این پژوهش

¹ Yarn

² Stitch

نوع کوک	نوع نخ	وزن لایه (g/m ²)		تکس الیاف g/(1000m)			عرض رول (cm)
		لایه +۴۵	لایه -۴۵	کوک	لایه +۴۵	لایه -۴۵	
Tricot	TEXTURED	۱۳۴	۱۳۴	۷۵	۶۰۰	۶۰۰	۱۲۷
		۱۳۴	۱۳۴	۷۵	۶۰۰	۶۰۰	

جدول (الف-۵): مشخصات الیاف تقویت کننده سه جهته شیشه (+۴۵/۰/-۴۵) ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد استفاده در این پژوهش

نوع کوک	نوع نخ	وزن لایه (g/m ²)			تکس الیاف g/(1000m)				عرض رول (cm)
		لایه +۴۵	لایه ۹۰	لایه -۴۵	کوک	لایه +۴۵	لایه ۹۰	لایه -۴۵	
TRIKOT	TEXTURED	۱۱۷	۸۲	۱۱۷	۷۵	۳۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۱۲۷
		۱۱۷	۸۲	۱۱۷	۷۵	۳۰۰	۶۰۰	۳۰۰	

جدول (الف-۶): مشخصات الیاف تقویت کننده کربن ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد استفاده در این پژوهش

ESA-C200UD Carbon Fabric-12k (800 Tex)			
عرض رول (mm)	نوع الیاف	وزن (g/cm ²)	ضخامت (mm)
۵۰۰	پارچه تک جهته	۲۰۰±۱۵	۰/۲۵

جدول (الف-۷): خواص مکانیکی الیاف تقویت کننده تک جهته کربن ذکر شده در برگه اطلاعات فنی الیاف و مورد استفاده در این پژوهش

نوع الیاف کربن	استحکام کششی		مدول کششی		کرنش	چگالی	تکس پارچه
	Ksi	MPa	Msi	GPa			
A-42-12k	۶۱۰	۴۲۰۰	۳۴/۸	۲۴۰	۱/۸	۱/۷۶	۸۰۰
روش آزمون	Iso ۱۰۶۱۸		Iso ۱۰۶۱۸		Iso ۱۰۶۱۸	Iso ۱۰۱۱۹	Iso ۱۸۸۹

جدول (الف-۸): خواص فیزیکی ذکر شده در برگه اطلاعات فنی رزین مورد استفاده در این پژوهش

EPOLAM 2047 Hardner	EPOLAM 2040 Resin	استاندارد/دستگاه آزمون	ویژگی فیزیکی
مایع	مایع		حالت
کهربایی روشن	کهربایی روشن		رنگ
۱۰	۱۳۰۰	Brookfield LVT	ویسکوزیته در ۲۵ °C (mPa.s)
۰/۹۴	۱/۱۶	ISO 1675: 1985	چگالی در ۲۵ °C (g/cm ³)
۳۲	۱۰۰		نسبت اختلاط وزنی
۳۹	۱۰۰		نسبت اختلاط حجمی
۲۲۰		Brookfield LVT	ویسکوزیته مخلوط در ۲۵ °C (mPa.s)
۱/۱۰		ISO 1675: 1985	چگالی مخلوط در ۲۵ °C (g/cm ³)
۳۰۰		ASTM D2471 - 99	زمان ژل شدن در ۲۵ °C و در (min) ۱۰۰ ml

جدول (الف-۹): خواص مکانیکی ذکر شده در برگه اطلاعات فنی رزین مورد استفاده در این پژوهش

روش آزمون	EPOLAM 2040/2047	واحد	ویژگی مکانیکی
ISO 178: 1993	۲۹۰۰	MPa	مدول خمشی
ISO 178: 1993	۱۱۵	MPa	بیشترین استحکام خمشی
ISO 527: 1993	۷۱	MPa	استحکام کششی
ISO 527: 1993	۸	%	انعطاف پذیری در شکست

جدول (الف-۱۰): مشخصات کیسه خلأ

نام تجاری	حد بالایی دما (°C)	ضخامت (µm)	پهنا (m)	طول (m)	ازدیاد طول حین خلأ (%)	آزادی خودبه خود	رزین سازگار
P0180	۱۸۰	۵۰	۴	۸۰	۴۰۰	بلی	E ¹ , P ² , VE ³ , PH ⁴ , EL ⁵

¹ Epoxy

² Polyester

³ Vinylester

⁴ Phenolic

⁵ Elastomer

جدول (الف-۱۱): مشخصات فیلم سوراخ‌دار

نام تجاری	حد بالایی دما (°C)	ضخامت (µm)	پهنا (m)	طول (m)	ازدیاد طول حین خلأ (%)	نوع	رنگ	سوراخ
PP40	۱۶۰	۴۰	۱/۶	۲۰۰	۷۰۰	C.Polypropylene	قرمز	P1 P3 N

جدول (الف-۱۲): مشخصات شبکه جریان‌رزی

نام تجاری	حد بالایی دما (°C)	ضخامت (µm)	پهنا (m)	طول (m)	وزن (g/m ²)	نوع	رنگ	سرعت سیلان رزین
ISONET	۹۰	۹۰۰	۲/۴	۵۰	۱۱۵	CO PE	آبی	متوسط

جدول (الف-۱۳): مشخصات لایه پارچه‌ای غیرچسبنده

نام تجاری	حد بالایی دما (°C)	بافت	پهنا (m)	طول (m)	وزن (g/m ²)	نوع	رنگ	آزادی خودبه‌خود	سرعت سیلان رزین
PA80	۱۸۵	تافتا	۱/۶۱	۱۰۰	۸۰	Polyamide	سفید	بلی	متوسط

جدول (الف-۱۴): مشخصات نوار آب‌بندکننده

نام تجاری	حد بالایی دما (°C)	ابعاد (cm)	تعداد در رول/جعبه	استفاده	رنگ
LSM6000	۹۰	۰/۳ x ۱/۳ x ۱۳۰۰	۲۲	دمای پایین	قهوه‌ای

Abstract

In the present thesis, the experimental method is used to investigate the energy absorption capability of composite cylindrical shells. Traditionally two methods of vacuum bag molding (VB) and vacuum infusion process (VIP) are used in manufacturing composite shell cylinders. In the thesis, six parameters were opted to study their effects on absorption energy of composite shells including three geometric parameters of inner diameter, length and shell thickness and other three parameters of layer orientation, reinforcing fibers (glass and carbon fibers) and manufacturing process. The design of experiment was accomplished by Taguchi method and deploying an orthogonal array of L16 and sixteen experiments were determined accordingly. Axial Crushing tests were conducted on shells. Amounts of specific absorption energy of the specimens were calculated using the generated area under force-displacement diagram. Next, the resulting data was statistically analyzed which led into ranking the six parameters and proposing an optimized structure based on the selected parameters. Finally, different kinds of complicated failure modes controlling absorption capacity were studied. Also effects of the six mentioned parameters on both stable and unstable crushing modes of shells were investigated. The comparisons showed the statistical analysis and failure mechanism analysis were highly consistent to each other and it is concluded that statistical analysis especially in experimental trials based on the parameter of specific absorption energy is the best method for design and optimization of energy absorbing composite structures.

Keywords: Specific energy absorption, Cylindrical shell, Composite structures, Taguchi statistical analysis, Axial Crushing, Failure mechanisms.



**University of Shahrood
Faculty of Mechanical Engineering**

**Experimental analysis of energy absorption capability
for cylindrical composite shells that produced with two
procedure: vacuum bag molding and vacuum infusion
process**

Seyed Morteza Hosseini

**Supervisors
Dr. M. Shariati
Dr. H. R. Eipakchi**

July 2015