

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا- سازه های هوایی

بررسی رفتار تیرها و ورق های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله های کربنی تحت نیروی محوری فشاری به روش تجربی

نگارنده:

حمیدرضا صابرممنش

استادان راهنما:

دکتر مهدی قنّاد

دکتر سید مهدی حسینی فراش

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۳۰۲۹۸/۱۲۲
تاریخ: ۹۸/۷/۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حمیدرضا صابومنی با شماره دانشجویی ۹۵۰۸۹۹۴ رشته مهندسی هوا فضا گرایش سازه‌های هوایی تحت عنوان بررسی رفتار تیرها و صفحه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تحت نیروی محوری فشاری به روش تجربی که در تاریخ ۹۸/۰۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ قبول (با درجه: <u>بسیار خوب</u>) ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی قنات	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر سید مهدی حسینی فرات	استادیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی وحدتی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسین نوزنده جانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علیرضا شاهرزاده	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۳ ماه برگزار شود).



تقدیم اثر به

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه می دلم

مادر مهربانم که زندگیم را دیون مهر و عطوفت آن می دانم.

پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

و تقدیم به همسر فداکار و صبورم

که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت

خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، دیون حضور سبز آن هست.

تشکر و قدردانی

پاس یکران پروردگار یکتا را که، مستیمان بخشد و به طریق علم و دانش، رهنمونان شد و به بهنشینی رهروان علم و دانش مصخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیان ساخت. نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و پاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم، کم گفته ام. اما تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند تا این می کند، بر حسب وظیفه تشکر میکنم از تمامی استادان گروه مکانیک به ویژه:

از استادان گرامی و بزرگوار جناب آقایان **دکتر مهدی قناد** و **دکتر سید مهدی حسینی فراش** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ لکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از خانواده ی مهربانم که تمام موفقیت های زندگی ام مرهون زحمات بی دریغ و دلسوزانی آن هاست و با صبرشان بنده را در این مدت همراهی نمودند کمال تشکر را دارم.

تعمدنامه

اینجانب حمیدرضا صابرمنش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوا فضا- سازه- های هوایی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان- نامه بررسی رفتار تیرها و ورق های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله های کربنی تحت نیروی محوری فشاری به روش تجربی تحت راهنمایی دکتر مهدی قنّاد- دکتر سیّد مهدی حسینی فراش متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

نانولوله‌های کربنی دارای خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردی هستند که باعث می‌شود آن‌ها را به عنوان یکی از تقویت‌کننده‌های ایده‌آل برای تقویت مواد پلیمری به کار برند. با افزودن مقدار بسیار کمی از نانولوله‌های کربنی به پلیمرها خواص مکانیکی آن‌ها به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. با این وجود به منظور استفاده‌ی کامل از خواص منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی هنوز موضوعات زیادی وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرد. به همین علت در این پژوهش اثر افزودن ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار داده شد، که با تأثیر تغییر در الیاف از شیشه به کربن بر بار بحرانی کمانش، انرژی ذخیره شده و انرژی ذخیره شده‌ی ویژه‌ی ورق‌های کامپوزیتی، تحت بارگذاری فشاری مورد مقایسه قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع جهت بررسی کیفیت پراکندگی درصدهای مختلف نانولوله در کامپوزیت‌ها تهیه شد. همچنین مدول الاستیسیته کامپوزیت شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی توسط آزمون کشش ساده از نمونه‌های تست کشش آن‌ها به دست آمد و جهت اعتبارسنجی آزمون‌های کمانش ورق‌ها و مدل‌سازی کمانش تیر کامپوزیتی توسط نرم‌افزار المان محدود استفاده گردید. آزمایش ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده توسط نانولوله‌ی کربنی نشان داد بهترین درصد افزودن نانولوله به کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۰/۵ درصد وزنی می‌باشد که بار بحرانی کمانش را بیش از ۲/۵ برابر افزایش می‌دهد، از طرفی تغییر در الیاف از شیشه‌ی ۴۰۰ گرمی به کربن ۳۰۰ گرمی بار بحرانی کمانش را ۲۱۱/۹ درصد افزایش داده در حالی که وزن ورق‌ها را هم کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش تجربی و تحلیل عددی با هم مقایسه شد که تطابق خوبی را نشان می‌داد.

کلیدواژگان: تیر و ورق کامپوزیتی، نانولوله‌ی کربنی، کمانش، بررسی تجربی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- ح. ر. صابرمنش، س. م. حسینی فراش، م. قنّاد؛ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه: بررسی تجربی، چهارمین همایش ملی و کارگاه‌های تخصصی علوم و فناوری نانو، دانشگاه یزد، شهریور ۱۳۹۸.

۲- ح. ر. صابرمنش، م. قنّاد، س. م. حسینی فراش؛ بررسی تجربی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی درون ماده‌ی زمینه، بر رفتار کمانشی و پس‌کمانشی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی، نشریه‌ی علمی- پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، درحال داوری.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها
۱-۱	مقدمه
۲-۱	تاریخچه‌ی مواد کامپوزیتی
۳-۱	تعریف
۱-۳-۱	تقسیم‌بندی کامپوزیت‌ها
۲-۳-۱	نقش الیاف در کامپوزیت‌ها
۳-۳-۱	نقش رزین در کامپوزیت‌ها
۱-۳-۳-۱	انواع رزین
۴-۱	فرایندهای تولید کامپوزیت‌ها
۵-۱	نانوتکنولوژی
۶-۱	تعریف نانو ساختار
۱-۶-۱	نانولوله‌های کربنی
۱-۱-۶-۱	ساختار نانولوله‌های کربنی
۲-۱-۶-۱	خواص و کاربردهای نانولوله‌های کربنی
۷-۱	تعریف نانوکامپوزیت‌ها
۱-۷-۱	دسته‌بندی نانوکامپوزیت‌ها
۱-۱-۷-۱	نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری
۲-۱-۷-۱	نانوکامپوزیت‌های پایه سرامیکی
۳-۱-۷-۱	نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی
۲-۷-۱	مزایا و معایب نانو کامپوزیت‌ها
۸-۱	نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و برخی کاربردها
۱-۸-۱	مقدمه‌ای بر پلیمر اپوکسی و ساختار آن
۲-۸-۱	نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / نانولوله‌ی کربنی

۱-۸-۳- تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / نانولوله‌ی کربنی ۲۴

۱-۸-۳-۱- تکنیک‌های فراوری ۲۴

۱-۸-۳-۲- خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / نانولوله‌ی کربنی ۲۵

فصل ۲: مفاهیم اولیه و پیشینه‌ی پژوهش ۲۷

۲-۱- مقدمه ۲۸

۲-۲- معرفی تیرها و ورق‌ها ۲۸

۲-۳- کمانش سازه‌ها ۲۹

۲-۳-۱- روش‌های تحلیلی بررسی پایداری سازه‌ها ۳۰

۲-۳-۱-۱- روش تعادل ایستایی ۳۰

۲-۳-۱-۲- روش انرژی ۳۱

۲-۴- مروری بر تحقیقات انجام‌شده ۳۲

۲-۶- اهداف پژوهش ۳۵

فصل ۳: ساخت و آزمون نمونه‌ها ۳۷

۳-۱- مقدمه ۳۸

۳-۲- مواد اولیه‌ی مصرفی ۳۸

۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات استفاده شده ۴۴

۳-۴- روش آماده‌سازی ماده‌ی زمینه ۴۶

۳-۵- ساخت نمونه‌ها ۴۷

۳-۵-۱- ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت ۴۷

۳-۵-۲- ساخت نمونه‌های تست کشش کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ۴۹

۳-۶- آزمون‌های انجام شده ۵۰

۳-۶-۱- آزمایش بار محوری فشاری ۵۰

۳-۶-۲- آزمون کشش ساده ۵۱

فصل ۴: بررسی نتایج آزمون‌های کشش و فشار ۵۳

۴-۱- مقدمه ۵۴

۵۴	۲-۴- بررسی نتایج حاصل از آزمون کمانش
۶۰	۴-۲-۱- بررسی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی
۶۶	۴-۲-۲- تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM)
۶۹	۴-۲-۲- بررسی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی و تغییر در نوع الیاف
۷۶	۴-۳- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش
۷۶	۴-۳-۱- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های شیشه/اپوکسی
۷۹	۴-۳-۲- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های کربن/اپوکسی
۸۲	۴-۴- اعتبارسنجی
۸۲	۴-۴-۱- تحلیل المان محدود ورق
۸۲	۴-۴-۱-۱- مدل‌سازی ورق
۸۳	۴-۴-۱-۲- خواص مواد
۸۳	۴-۴-۱-۳- شرایط مرزی و بارگذاری ورق
۸۴	۴-۴-۱-۴- مش‌بندی و تحلیل ورق
۸۶	۴-۴-۲- نتایج حاصل از روش المان محدود
۸۷	۴-۴-۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش تجربی و روش عددی
۸۷	۴-۵- محاسبه‌ی بار بحرانی کمانش تیرها به روش المان محدود
۸۸	۴-۵-۱- مدل‌سازی تیر
۸۸	۴-۵-۲- خواص مواد
۸۹	۴-۵-۳- شرایط مرزی و بارگذاری/ مش‌بندی و تحلیل تیر
۹۰	۴-۵-۴- نتایج حاصل از کمانش تیر به روش المان محدود

۹۵ فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۹۶	۵-۱- مقدمه
۹۶	۵-۲- جمع‌بندی
۹۷	۵-۳- بررسی نتایج
۹۷	۵-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی تیرهای کامپوزیت

۵-۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش ورق‌های کامپوزیت ۹۷

۵-۴- نتیجه‌گیری ۹۸

۵-۵- پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۹۹

مراجع ۱۰۱

فهرست جداول

- جدول (۴-۱) بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری ۶۰
- جدول (۴-۲) بیشینه نیروی قابل تحمل پیش از شکست ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری ۶۱
- جدول (۴-۳) مقدار انرژی جذب شده‌ی ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی حاصل از بارگذاری فشاری ۶۲
- جدول (۴-۴) مقدار انرژی جذب شده‌ی ویژه ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی حاصل از بارگذاری فشاری ۶۳
- جدول (۴-۵) بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری ۷۰
- جدول (۴-۶) بیشینه نیروی قابل تحمل پیش از شکست ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری ۷۱
- جدول (۴-۷) مقدار انرژی جذب شده‌ی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و کربن حاصل از بارگذاری فشاری ۷۲
- جدول (۴-۸) مقدار انرژی جذب شده‌ی ویژه ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و کربن حاصل از بارگذاری فشاری ۷۳
- جدول (۴-۹) مقادیر E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۸۰
- جدول (۴-۱۰) مقادیر E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت کربن/اپوکسی ۸۱
- جدول (۴-۱۱) مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ۸۱
- جدول (۴-۱۲) مقایسه‌ی بار بحرانی کمانش به‌دست آمده از مدل اجزاء محدود و روش تجربی ۸۷
- جدول (۴-۱۳) مشخصات مکانیکی کامپوزیت ۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی ۸۹
- جدول (۴-۱۴) بار بحرانی کمانش نمونه‌های تیر ۹۲
- جدول (۵-۱) بار بحرانی و بار نهایی ویژه ۹۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) برج‌های استوانه‌ای شکل رشد داده شده از نانولوله‌های کربنی چند جداره [۱۲]..... ۱۰
- شکل (۲-۱) ساختار نانولوله‌ی کربنی تک دیواره (سمت چپ) و چند دیواره (سمت راست) [۱۵].. ۱۲
- شکل (۳-۱) الگوی نانولوله‌های کربنی رشد داده شده در سه بزرگنمایی مختلف [۱۸]..... ۱۳
- شکل (۴-۱) اشکال مختلف نانولوله‌های کربنی [۱۱ و ۸]..... ۱۴
- شکل (۵-۱) تصویر میکروسکوپی از یک نانوکامپوزیت [۱۲]..... ۱۵
- شکل (۶-۱) تصویر میکروسکوپی از یک نمونه نانوکامپوزیت پایه سرامیک ۱۹
- شکل (۷-۱) تصویر میکروسکوپی از نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی [۲۲]..... ۲۰
-
- شکل (۱-۳) سمت راست رزین آر-ال-۶۲۰ و سمت چپ سخت‌کننده ۵۲۰ به کار رفته در نمونه‌ها ۳۹
- شکل (۲-۳) الیاف تک‌جهته‌ی کربن ۳۹
- شکل (۳-۳) الیاف تک‌جهته‌ی شیشه ۴۰
- شکل (۴-۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (TEM) نانولوله‌های کربنی مورد استفاده ۴۰
- شکل (۵-۳) تصویر واکس جدا کننده ۴۱
- شکل (۶-۳) تصویر کیسه‌ی خلأ ۴۱
- شکل (۷-۳) تصویر نوار آب‌بند ۴۲
- شکل (۸-۳) تصویر فیلم سوراخ‌دار ۴۲
- شکل (۹-۳) تصویر آستری ۴۳
- شکل (۱۰-۳) تصویر نمد رزین گیر ۴۳
- شکل (۱۱-۳) تصویر کامپوزیت تحت خلأ ۴۴
- شکل (۱۲-۳) تصویر دستگاه اینسترون ۴۵
- شکل (۱۳-۳) تصویر حمام آلتراسونیک ۴۵
- شکل (۱۴-۳) تصویر همزن مکانیکی ۴۶

- شکل (۳-۱۵) ساخت ورق کامپوزیت به کمک لایه چینی دستی تحت فشار خلأ ۴۸
- شکل (۳-۱۶) نمونه‌ی ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی (راست)، نانولوله‌ی کربنی/شیشه/اپوکسی (وسط) و کربن/اپوکسی (چپ) ۴۹
- شکل (۳-۱۷) نمونه‌های آزمایش کشش، الف: زاویه‌ی الیاف ۰ درجه به طول ۲۵۰ و عرض ۱۵ میلی-متر، ب: زاویه‌ی الیاف ۹۰ درجه به طول ۱۷۵ و عرض ۲۵ میلی-متر، ج: زاویه‌ی الیاف ۴۵ درجه به طول ۱۸۰ و عرض ۲۵ میلی-متر ۵۰
- شکل (۳-۱۸) ورق کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری ۵۱
- شکل (۳-۱۹) دستگاه تست، نمونه تحت کشش و اکستنسومتر بسته‌شده بر روی آن برای به‌دست آوردن کرنش ۵۲
- شکل (۴-۱) نمودار نیرو-جاب‌جایی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری درون صفحه‌ای در راستای طولی ۵۴
- شکل (۴-۲) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی ۵۵
- شکل (۴-۳) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به‌همراه ۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربنی ۵۶
- شکل (۴-۴) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به‌همراه ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربنی ۵۶
- شکل (۴-۵) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به‌همراه ۱ درصد نانولوله‌ی کربنی ۵۷
- شکل (۴-۶) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف کربن/اپوکسی ۵۷
- شکل (۴-۷) اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی مختلف بر نمودار نیرو-جاب‌جایی ورق-های کامپوزیتی ۵۸
- شکل (۴-۸) تأثیر تغییر نوع الیاف از شیشه به کربن بر نمودار نیرو-جاب‌جایی ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ۵۹
- شکل (۴-۹) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۰
- شکل (۴-۱۰) مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۱
- شکل (۴-۱۱) مقدار انرژی جذب شده برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۲

- شکل (۴-۱۲) مقدار انرژی جذب شده‌ی ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق-های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۳
- شکل (۴-۱۳) نمودار بی بعد بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۴
- شکل (۴-۱۴) نمودار بی بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده‌ی ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی ۶۵
- شکل (۴-۱۵) رزین اپوکسی تقویت‌شده با درصد‌های مختلف نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه ۶۷
- شکل (۴-۱۶) رزین اپوکسی تقویت‌شده با درصد‌های مختلف نانولوله‌ی کربن ۶۸
- شکل (۴-۱۷) نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های شیشه/اپوکسی، ۰/۵ درصد نانولوله-ی کربن/شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ۶۹
- شکل (۴-۱۸) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۰
- شکل (۴-۱۹) مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۱
- شکل (۴-۲۰) مقدار انرژی جذب شده برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۲
- شکل (۴-۲۱) مقدار انرژی جذب شده‌ی ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۳
- شکل (۴-۲۲) نمودار بی بعد بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۴
- شکل (۴-۲۳) نمودار بی بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده‌ی ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۷۵
- شکل (۴-۲۴) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه/اپوکسی با زاویه الیاف ۰ درجه ۷۶
- شکل (۴-۲۵) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه/اپوکسی با زاویه الیاف ۴۵ درجه ۷۷
- شکل (۴-۲۶) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه/اپوکسی با زاویه الیاف ۹۰ درجه ۷۷
- شکل (۴-۲۷) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن/اپوکسی با زاویه الیاف ۴۵ درجه ۷۹
- شکل (۴-۲۸) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن/اپوکسی با زاویه الیاف ۰ درجه ۷۹
- شکل (۴-۲۹) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن/اپوکسی با زاویه الیاف ۹۰ درجه ۸۰
- شکل (۴-۳۰) مدل‌سازی ورق کامپوزیت ۸۲
- شکل (۴-۳۱) نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در مدل المان محدود مدل ورق ۸۳

- شکل (۴-۳۲) مدل شبکه‌بندی شده‌ی ورق در نرم‌افزار ۸۴
- شکل (۴-۳۳) نمودار همگرایی مش ۸۵
- شکل (۴-۳۴) کمانش ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۸۶
- شکل (۴-۳۵) کمانش ورق کامپوزیت کربن/اپوکسی ۸۶
- شکل (۴-۳۶) مدل‌سازی تیر کامپوزیت ۸۸
- شکل (۴-۳۷) نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در مدل المان محدود مدل تیر ۸۹
- شکل (۴-۳۸) مدل شبکه‌بندی شده‌ی ورق در نرم‌افزار ۹۰
- شکل (۴-۳۹) کمانش تیر کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۹۰
- شکل (۴-۴۰) کمانش تیر کامپوزیت ۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی ۹۱
- شکل (۴-۴۱) کمانش تیر کامپوزیت کربن/اپوکسی ۹۱
- شکل (۴-۴۲) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده‌شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف تیرهای کامپوزیتی ۹۲
- شکل (۴-۴۳) نمودار بی‌بعد سازی شده‌ی بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده‌شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی ۹۳

فصل ۱: کامپوزیت ہونا نو کامپوزیت ہ

۱-۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی به واسطه‌ی چگالی کم، سادگی ساخت و مقاومت به وزن بالایشان به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از قبیل خودروسازی و هوافضا به‌کار گرفته شده‌اند [۱]. یکی از روش‌هایی که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است، استفاده از نانوذرات به‌ویژه نانولوله‌های کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشد. این مواد درعین حال که وزن سازه را دچار تغییر زیادی نمی‌کنند، تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی سازه دارند [۲]. از این رو مطالعه‌ی ویژگی و شناخت دقیق‌تر این مواد از اهمیت بالایی برخوردار است

۱-۲- تاریخچه‌ی مواد کامپوزیتی

کامپوزیت‌ها، گروهی از مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به‌منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اجزای تشکیل دهنده، ویژگی خود را حفظ کرده و در یک‌دیگر حل نشده و با هم ممزوج می‌شوند. استفاده از این مواد در طول تاریخ نیز مرسوم بوده است. قدیمی‌ترین مثال از کامپوزیت‌ها کاه‌گل است. افزودن کاه به گل جهت تقویت گل و ساخت آجر مقاوم جهت استفاده در بناها انجام می‌شد. قدمت این کار به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح بازمی‌گردد. در این مورد، کاه نقش تقویت‌کننده یا الیاف^۱ و گل نقش زمینه یا ماتریس^۲ را دارد. تقویت بتن توسط میله‌های فولادی نمونه‌ای دیگر از مواد مرکب است که قدمت آن به سال ۱۸۰۰ میلادی بازمی‌گردد. در بتن مسلح یا تقویت شده، میله‌های فلزی استحکام کششی لازم را در بتن ایجاد می‌نماید زیرا بتن یک ماده ترد است و مقاومت اندکی در برابر بارهای کششی دارد. بدین ترتیب بتن وظیفه‌ی

^۱ Fiber

^۲ Matrix

تحميل بارهای فشاری و میله‌های فولادی وظیفه‌ی تحمل بارهای کششی را بر عهده دارند. مزیت اولیه‌ی مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف، قابلیت استفاده از آن‌ها در شرایط خاص طراحی است. مواد تشکیل‌دهنده این کامپوزیت‌ها همچون الیاف و زمینه را می‌توان با توجه به شرایط طراحی در ترکیب‌های مختلف یا نسبت ترکیبی مختلف استفاده نمود. علاوه بر آن با جهت‌دهی به الیاف در راستاهای مختلف می‌توان این مواد را به‌منظور دستیابی به طراحی بهینه مورد استفاده قرار داد [۳].

۳-۱- تعریف

یک ماده‌ی کامپوزیتی را به‌صورت یک مخلوط فیزیکی در مقیاس میکروسکوپی از دو یا چند ماده‌ی مختلف تعریف می‌کنند که این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. این مخلوط در مجموع و با توجه به برخی معیارها خواص بهتری از هریک از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خود دارا می‌باشد. اگر مواد مهندسی را به سه دسته‌ی اصلی فلز، پلیمر و سرامیک طبقه‌بندی کنیم، کامپوزیت دسته‌ی چهارمی است که در واقع ترکیبی از سه دسته دیگر است. موادی چند جزئی که خواص آن‌ها در مجموع از هرکدام از اجزا خواص بهتری دارد، ضمن آن که اجزای مختلف کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. در کامپوزیت‌ها عموماً دو ناحیه‌ی متمایز وجود دارد: ۱- فاز پیوسته (ماتریس) ۲- فاز ناپیوسته (تقویت‌کننده)

در یک کامپوزیت به‌طور کلی الیاف عضو بارپذیر اصلی سازه هستند در حالی که ماده‌ی زمینه، آن‌ها را در محل و آرایش مطلوب نگاه داشته و به‌عنوان یک محیط منتقل‌کننده‌ی بار بین الیاف عمل می‌کند [۳]. به‌علاوه الیاف را از صدمات محیطی در اثر بالا رفتن دما و رطوبت حفظ می‌کند. خواص کامپوزیت‌ها به عوامل مختلفی از قبیل نوع مواد تشکیل‌دهنده، درصد ترکیب آن‌ها، شکل و آرایش الیاف تقویت‌کننده و اتصال دو جزء به یکدیگر بستگی دارد. خواص کامپوزیت‌ها تابع موارد زیر می‌باشد:

- خواص فازهای تشکیل دهنده‌ی آن (ماتریس و الیاف)

- توزیع فازها

- آثار متقابل فازها بر یکدیگر

- ابعاد ماده‌ی تقویت کننده شامل شکل و اندازه

۱-۳-۱- تقسیم‌بندی کامپوزیت‌ها

- کامپوزیت‌های زمینه‌ی سرامیکی (CMC)^۱

- کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی (MMC)^۲

- کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری (PMC)^۳

کامپوزیت‌های پایه پلیمری مهم‌ترین دسته از کامپوزیت‌ها می‌باشند. طیف وسیعی از صنایع، از صنایع رده بالا مانند تولید قطعات هواپیما گرفته تا صنایع رده پایین مانند تولید لوله‌های کامپوزیتی، از کامپوزیت‌های پایه پلیمری استفاده می‌کنند و در حال حاضر در حدود ۶۰ درصد بازارهای کامپوزیت را به‌خود اختصاص داده‌اند و به‌همین دلیل بزرگ‌ترین زیر مجموعه‌ی مواد مرکب محسوب می‌شوند. کامپوزیت‌های پایه پلیمری در حال حاضر تنها به میزان ۱ درصد در مهد تولید خود یعنی صنایع هوافضا کاربرد دارند و قسمت عمده‌ی آن در صنایع ساخت و ساز، حمل و نقل و دیگر صنایع به‌کار می‌رود. در حقیقت توسعه‌ی فناوری تولید کامپوزیت‌های پایه پلیمری این امکان را فراهم کرده است تا اغلب صنایع از مزایای منحصر به‌فرد این مواد بهره می‌جویند. مطابق آمار ارائه شده، بیشترین مصرف کامپوزیت‌ها معطوف به صنعت ساخت و ساز مشتمل بر ساختمان، ابرسازه‌ها، صنایع

^۱ Ceramic Matrix Composite

^۲ Metal Matrix Composite

^۳ Polymer Matrix Composite

نفت و گاز و لوله می‌باشد. مزایای سازه‌های مبتنی بر کامپوزیت‌های پلیمری نسبت به نمونه‌های سنتی بتنی، چوبی و فلزی که باعث نفوذ آن‌ها در گستره وسیعی از صنایع مختلف شده است را می‌توان در مواردی نظیر وزن سازه‌ی ساخته شده با توجه به معماری قابل تغییر بر اساس خواست طرح، ایمن بودن در برابر خوردگی، قابلیت تحمل بارهای سیکلی، مقاومت بسیار مناسب در برابر پدیده خستگی، سادگی روش‌های تولید و امکان تولید اشکال پیچیده با روش‌های آسان و مقرون به صرفه، سهولت فرایندهای تعمیر و عیب‌یابی، ضریب انبساط حرارتی پایین و عایق مناسب حرارتی، عایق الکتریکی، خصوصیات ارتعاشی بسیار مناسب و مقاوم بودن نسبت به پدیده‌ی تشدید در ارتعاشات خلاصه کرد.

۱-۳-۲- نقش الیاف در کامپوزیت‌ها

الیاف اصلی‌ترین بخش در مواد مرکب هستند. انتخاب صحیح نوع، مقدار و جهت الیاف بسیار مهم بوده و تأثیر زیادی در خصوصیات نظیر جرم مخصوص، استحکام، مدول کششی، استحکام فشاری، خواص الکتریکی و حرارتی دارند [۴]. الیاف در صنعت کامپوزیت به چند دسته کلی تقسیم می‌شوند. الیاف شیشه، الیاف کربن و الیاف آرامید و الیافی نظیر آریست، بازالت و پلی‌اتیلن از جمله الیاف موجود در صنعت هستند. رایج‌ترین و پرمصرف‌ترین الیاف، شیشه می‌باشد. ماده‌ی اصلی تشکیل‌دهنده آن سیلیکا می‌باشد. از مزایای آن‌ها می‌توان به قیمت پایین، استحکام بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایق عالی اشاره کرد. همچنین الیاف شیشه دارای معایبی نیز می‌باشند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مدول کششی پایین، وزن مخصوص بالا، حساسیت به سایش، مقاومت خستگی پایین و شکننده بودن اشاره کرد. الیاف شیشه دارای انواع مختلفی است که هر کدام از آن‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۵]:

الیاف نوع C: الیاف مقاوم در برابر مواد شیمیایی

الیاف نوع D: الیاف مقاوم در برابر امواج الکترومغناطیس

الیاف نوع E: عایق جریان الکتریسته

الیاف نوع M: الیاف با مدول بالا

الیاف نوع S: الیاف با استحکام بسیار بالا

عوامل مختلفی نظیر سرعت اعمال بار، افزایش دما و افزایش رطوبت بر میزان استحکام این نوع الیاف تأثیر می‌گذارد.

۱-۳-۳- نقش رزین در کامپوزیت‌ها

رزین نقش مهمی در کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند که از جمله‌ی آن می‌توان به نگهداری الیاف در کنار هم، انتقال تنش به الیاف، محافظت از الیاف در برابر عوامل محیطی و حفاظت سطح الیاف از سایش نام برد. همچنین رزین بر خواصی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و استحکام برشی در کامپوزیت‌ها تأثیرگذار است [۳]:

۱-۳-۳-۱- انواع رزین

رزین‌ها به دو گروه ۱- پلیمرهای گرماسخت، از قبیل رزین‌های پلی‌استرغیر اشباع، رزین‌های اپوکسی، رزین‌های فنولیک، رزین اپوکسی نووالانس، رزین پلی‌ایماید، رزین اوره و ملامین فرمالدئید ۲- پلیمرهای گرمانرم، از قبیل نایلون ۶ و ۶۶، پلی‌استرها، پلی‌کربنات، پلی‌استال‌ها، پلی‌سلفون‌ها و... تقسیم می‌شوند.

در این پژوهش از رزین‌های اپوکسی استفاده شده است که از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به خواص مکانیکی خوب، خواص الکتریکی خوب، مقاومت حرارتی عالی، چسبندگی عالی به بسیاری از مواد (فلزات، چوب، بتن، شیشه)، مقاومت ویژه خوب به‌ویژه در محیط‌های قلیایی و جمع‌شدگی کم پس از پخت اشاره کرد [۶].

۴-۱- فرایندهای تولید کامپوزیت‌ها

به‌طور کلی مواد اولیه‌ی تولید کامپوزیت‌ها هر کدام دارای خواص ویژه‌ای مانند استحکام، سفتی، چقرمگی، مقاومت حرارتی، قیمت و سرعت تولید هستند. خواص ویژه‌ی یک قطعه‌ی کامپوزیتی نه تنها تابعی از خواص ویژه‌ی مواد اولیه است، بلکه به شیوه‌ی طراحی، نحوه‌ی به‌کارگیری، قرار گرفتن در درون سازه و فرایند تولید نیز وابسته است. تعدادی از روش‌های متداول تولید قطعات کامپوزیتی عبارت- اند از [۷]:

- لایه‌گذاری خیس یا دستی^۱
- لایه‌گذاری پاششی^۲
- قالب‌گیری حرارتی^۳
- قالب‌گیری با کیسه خلأ(مکش)^۴
- رشته‌پیچی^۵
- کشش‌رانی^۶
- قالب‌گیری با انتقال رزین^۷
- پخش یا نفوذ ورقه رزین^۸

^۱ Hand Lay-up

^۲ Spray-up

^۳ Sheet Molding Compound (SMC)

^۴ Vacuum Bag Molding

^۵ Filament Winding

^۶ Pultrusion

^۷ Resin Transfer Molding (RTM)

^۸ Resin Film Infusion (RFI)

۱-۵- نانو تکنولوژی

نانو علمی است که درباره‌ی اجسام بسیار کوچک مطالعه می‌کند. یک نانومتر یک میلیاردم متر و ده مرتبه کوچکتر از اتم هیدروژن است. در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن^۱، متخصص نظریه‌ی کوانتومی و دارنده‌ی جایزه‌ی نوبل در سخنرانی معروف خود اساس تفکر کوچک شدن اجسام بزرگ صنعتی را ایجاد کرد [۸]. فاینمن طی سخنرانی خود گفت، می‌توان تمام دائرة المعارف بریتانیا را روی یک سنجاق نگارش کرد؛ یعنی ابعاد آن به اندازه یک بیست و پنج هزارم ابعاد واقعی آن کوچک شود. او همچنین از دوتایی کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد کامپیوترها سخن گفت. در آن زمان ابعاد رایانه‌ها بسیار بزرگتر از ابعاد رایانه‌های امروزی بود، اما او امیدوار بود که بتوان رایانه‌های بسیار کوچکتر از رایانه‌های آن زمان ساخت. امروزه علم تا حد دسترسی به اندازه‌های زیر محدوده‌ی میکرومتر پیشرفت کرده است. در این راستا، روش‌ها و تکنیک‌های دستیابی به محدوده‌های نانومتری، نانو تکنولوژی نامیده می‌شود. در واقع نانو تکنولوژی ایجاد و بهره‌برداری از مواد، قطعات و سیستم‌ها در مقیاس‌های بسیار ریز و در حد نانومتری یعنی همان مقیاس‌ها و اندازه‌های اتمی و مولکولی است. نانو تکنولوژی به روش‌های مناسب برای ساخت و سرهم‌بندی ساختارهای کارآمد که دارای حداقل یک بعد در ابعاد نانومتری باشند، می‌پردازد. این نانوساختارها که از کوچکترین بلوک‌های ساختمانی شناخته شده ساخته می‌شوند، ریزترین اشیاء ساخت بشر بوده، و دارای خصوصیات و رفتارهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی جدیدی هستند. هدف نانو تکنولوژی، آگاهی و بهره‌گیری از این خصوصیات و ساخت و استفاده مؤثر از آنها است. در حقیقت یکی از اهداف مهمی که در این فناوری دنبال می‌شود، بهره‌برداری از این خواص براساس کنترل ساختارها و ابزارآلات ساخته شده در سطوح اتمی و مولکولی است. از اهداف دیگر می‌توان از مجتمع نمودن این نانوساختارها در مقیاس میکرونی و میکروسکوپی نام برد.

¹ Richard Feynman

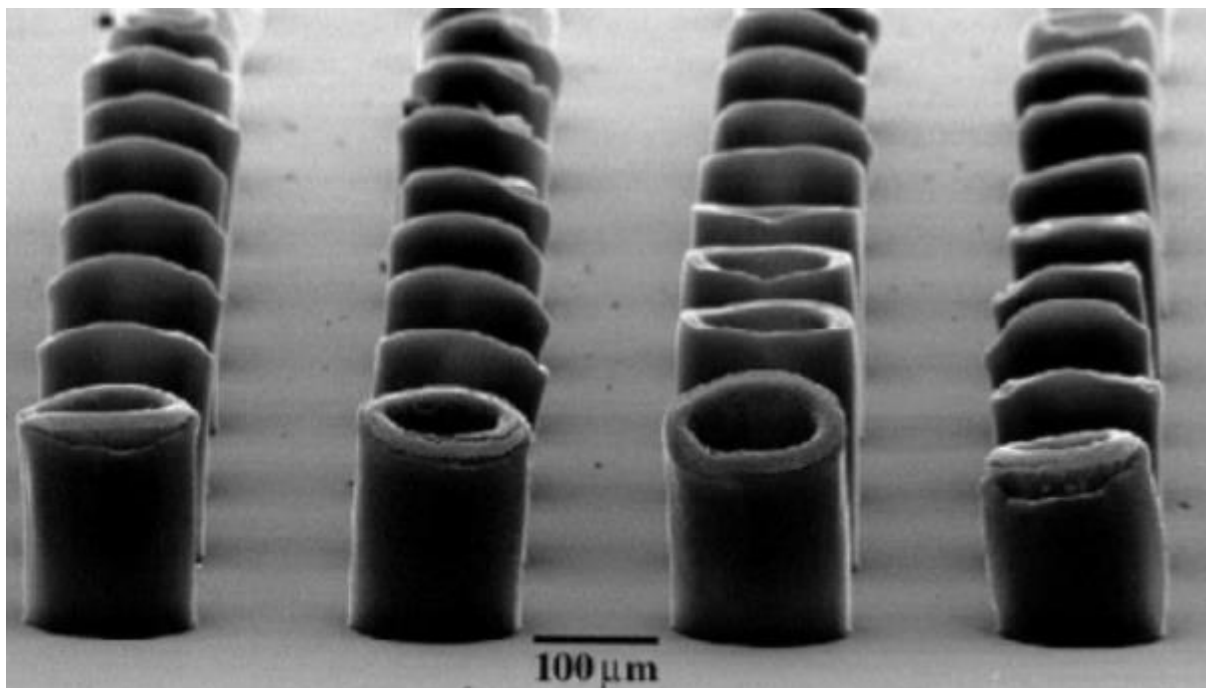
۱-۶- تعریف نانوساختار

تشخیص بین نانوساختارها و میکروساختارها در این جا بوسیله‌ی اندازه‌گیری طولی نشان داده می‌شود. نانوساختارها بر طبق ابعاد هندسی تعریف می‌شوند، که شکل، جهت‌گیری و موقعیت بر طبق یک سیستم مرجع مشخص می‌شود. یک تعریف محدود از نانوساختارها می‌تواند این باشد که ساختارشان شامل حداقل دو بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر و یک بعد کمتر از یک میکرون باشد. طبق این تعریف لایه‌های خیلی نازک که دارای ساختار جانبی زیر میکرون هستند نیز نانو ساختار محسوب می‌شوند. نانو ابزارها ابزارهایی هستند که در حداقل یکی از اجزای کاربردی اصلی آن‌ها نانوساختارها بکار رفته باشد.

۱-۶-۱- نانولوله‌های کربنی^۱

از زمان کشف نانولوله‌های کربنی، این ساختارها به دلیل خصوصیات منحصر به فرد در زمینه‌های بسیار متنوعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانولوله‌های کربنی می‌توانند مانند فلزات یا نیمه رساناها عمل کنند، و با توجه به ساختار، قطر و چرخش، خواص فلزی یا نیمه رسانا داشته باشند. مجموعه اندازه و ساختار نانولوله‌ها باعث ایجاد خصوصیات مکانیکی و سطحی مهم در این ترکیبات می‌شود. شکل (۱-۱) تصویری میکروسکوپی از برج‌های استوانه‌ای شکل، رشد داده شده از نانولوله‌های چند جداره را نشان می‌دهد.

¹ Carbon Nanotubes (CNTs)



شکل (۱-۱) برج‌های استوانه‌ای شکل رشد داده شده از نانولوله‌های کربنی چند جداره [۹]

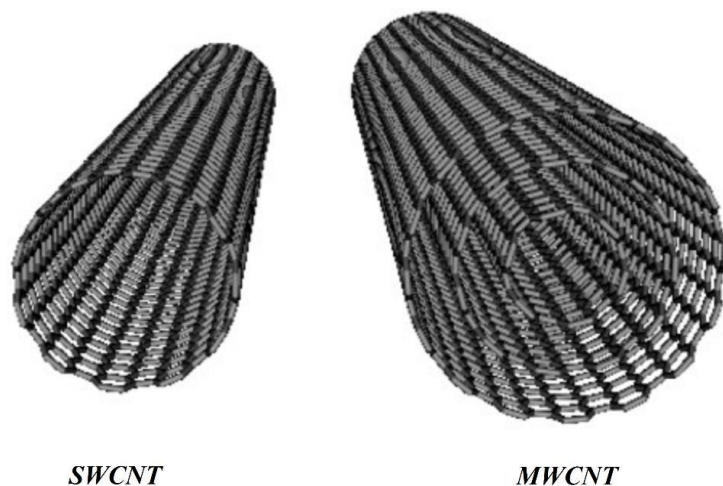
۱-۱-۶-۱- ساختار نانولوله‌های کربنی

در سال ۱۹۹۱ دانشمندی به نام سومیو ایجیما به‌طور کاملاً اتفاقی، ساختاری جدید از کربن را کشف و تولید کرد، که خواص منحصر به‌فردی دارد. وی در ابتدا این ساختار را نوعی فولرین تصور نمود، که در یک جهت کشیده شده است اما بعدها متوجه شد که این ساختار، خواص متفاوتی از فولرین‌ها دارد، و به همین دلیل آن را، نانولوله‌ی کربنی نامید. در یک نانولوله‌ی کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش یافته‌اند. یعنی یک لوله‌ی توخالی، که نوع دیواره‌اش از اتم‌های کربن است. آرایش اتم‌های کربن در دیواره‌ی این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در صفحات گرافیت است. در گرافیت، شش ضلعی‌های منظم کربنی در کنار یکدیگر صفحات گرافیت را می‌سازند. این صفحات کربنی بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند، و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به لایه زیرین متصل می‌شود.

نانولوله‌های کربنی، استوانه‌های ساخته شده از اتم‌های کربن در اندازه‌های نانومتری می‌باشند. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول ینگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف، و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به‌خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها، که نسبت به فلزات برای تولید ارزانتر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته، تحقیقات زیادی روی کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها انجام شود. خواص ویژه و منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی نظیر چگالی کم، استحکام بالا و خواص عالی الکتریکی، کاربردهای گسترده‌ای را برای این ساختار ایجاد کرده است، اما اکسیداسیون این نانولوله‌ها در دماهای بالا از کاربردهای ویژه‌ی آن کاسته است. هنگامی که صفحات گرافیت در هم پیچیده می‌شوند، نانولوله‌های کربنی را تشکیل می‌دهند. در واقع، نانولوله‌ی کربنی، یک صفحه گرافیتی است که به شکل لوله در آمده باشد. دو شکل مختلف از نانولوله‌های کربنی شناخته شده است که از لحاظ ساختار و گرافیت شدن با هم تفاوت دارند. یکی نانولوله‌های کربنی تک دیواره^۱ و دیگری نانولوله‌های کربنی چند دیواره^۲ که به ترتیب در سال ۱۹۹۱ و ۱۹۹۳ کشف شدند [۱۰ و ۱۱]. چنانچه نانولوله‌ی کربنی فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، نانولوله‌ی تک دیواره و اگر شامل تعدادی از لوله‌های هم‌مرکز باشد نانولوله‌ی چند دیواره نامیده می‌شود. این دو ساختار در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [۱۱].

^۱ Single Walled Carbon Nanotube (SWCNT)

^۲ Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT)



SWCNT

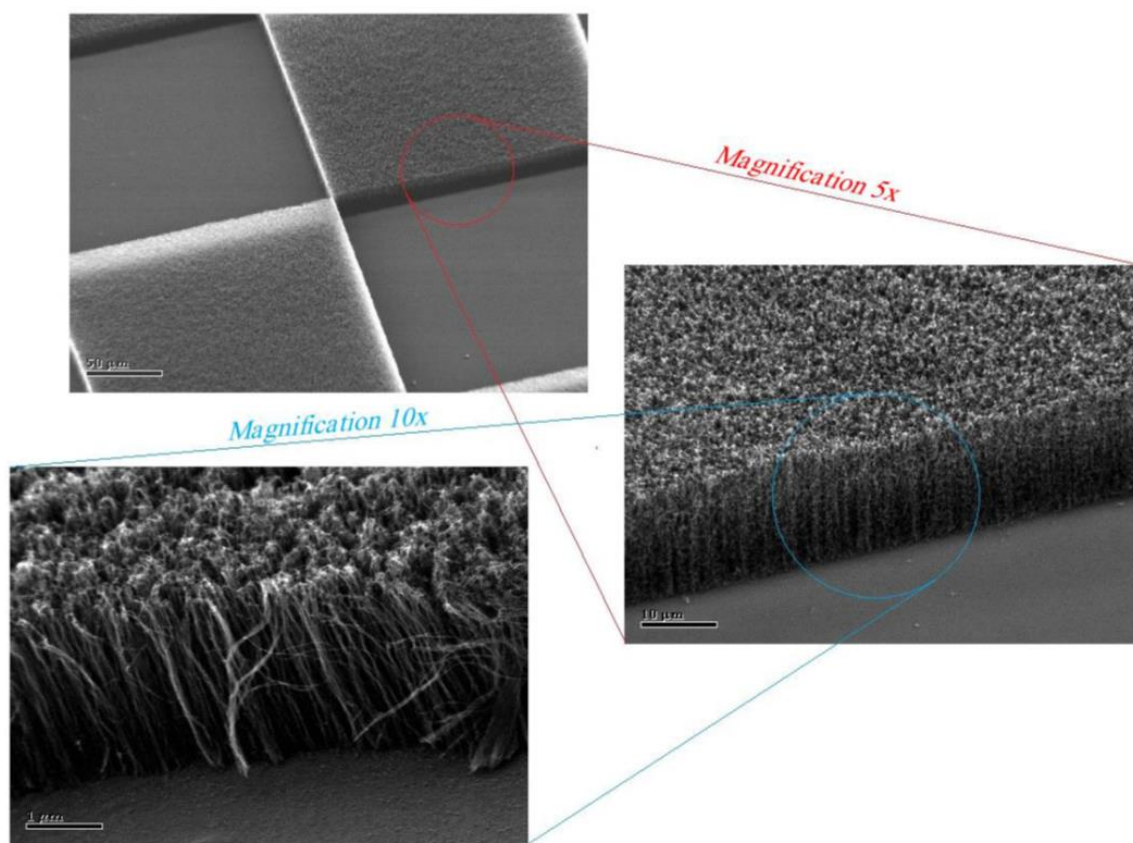
MWCNT

شکل (۱-۲) ساختار نانولوله‌ی کربنی تک دیواره (سمت چپ) و چند دیواره (سمت راست) [۱۱].

نانولوله‌های تک دیواره قطری در حدود ۱-۲ nm و طولی در حدود ۱-۵ μm دارند. هریک از نانولوله‌های تک دیواره دارای قطر یکسانی هستند، هرچند وقتی تشکیل می‌شوند، تمایل شدیدی به جمع شدن به صورت دسته‌های بزرگ^۱ دارند [۱۲]. قطر خارجی نانولوله‌های چند دیواره‌ای در محدوده‌ی ۲-۲۵ nm و قطر داخلی آن در محدوده‌ی ۱-۸ nm قرار دارد، و مابین لایه‌های منفرد گرافیت هیچ‌گونه نظم سه بعدی وجود ندارد. شکل (۱-۳) تصویری میکروسکوپی از نانولوله‌های رشد داده شده به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار^۲ در سه بزرگنمای مختلف را نشان می‌دهد [۱۳ و ۱۴].

^۱ Bundle

^۲ Chemical Vapor Deposition (CVD)



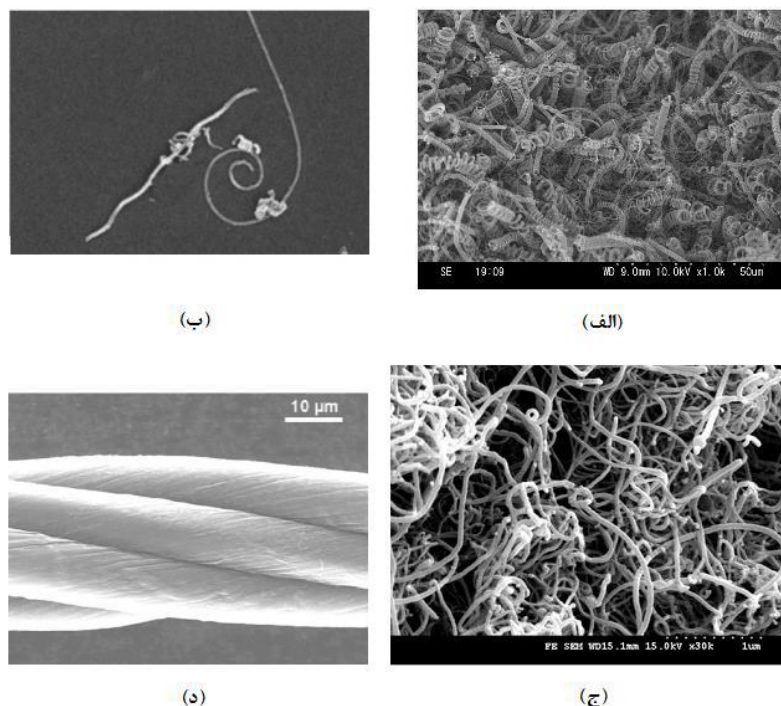
شکل (۱-۳) الگوی نانولوله‌های کربنی رشد داده شده در سه بزرگنمایی مختلف [۱۴].

نانولوله‌های کربنی دارای اشکال مختلفی از جمله صاف، هلیکال، حلزونی، خمیده و حلقه‌ای یا مارپیچ و غیره هستند، و اغلب به صورت دسته‌ای یافت می‌شوند، مانند دسته‌ای از نانولوله‌های صاف و دسته‌ای از نانولوله‌های هلیکال به شکل طناب که نمونه‌هایی از این ساختارها در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.

۱-۶-۱-۲- خواص و کاربردهای نانولوله‌های کربنی

کشف نانولوله‌های چند دیواره در سال ۱۹۹۱ موجب شده است که فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در علوم به بحث نانو ساختارهای کربنی و کاربردهای آن‌ها اختصاص یابد. دلیل عمده‌ی این مسئله تکامل ساختاری مورد انتظار آن‌ها، اندازه کوچک، چگالی کم، سختی بالا، استحکام بالا (استحکام کششی خارجی‌ترین جداره یک نانولوله‌ی کربنی چند دیواره تقریباً ۱۱۱ برابر بیشتر از آلومینیوم است) و خواص

الکتریکی بسیار خوب آن‌هاست نانولوله‌های کربنی از نظر اندازه بسیار کوچک می‌باشند، استحکامی حدود ۱۰۰ برابر فولادهای با استحکام بالا، چگالی حدود نصف آلومینیوم، رسانایی حرارتی ۱۰۰۰ برابر مس به همراه خواص حرارتی عالی در مقایسه با الماس داشته و در مقابل دمای ۱۴۰۰ درجه سلسیوس در خلاء پایدار هستند [۱۵] در نتیجه نانولوله‌های کربنی ممکن است به‌طور گسترده در تقویت مواد، صفحه نمایش مسطح با انتشار میدانی، حسگرهای شیمیایی، دارو رسانی و علم نانوالکترونیک کاربرد یابند.

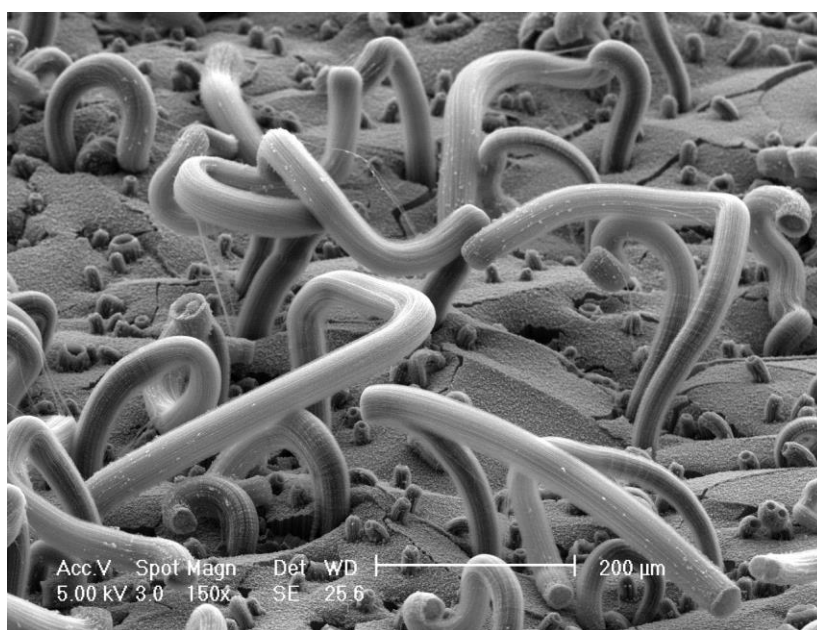


شکل (۱-۴) اشکال مختلف نانولوله‌های کربنی [۸].

۱-۷- تعریف نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها شامل ترکیب ذرات در حوزه‌ی مولکولی یا نانو در زمینه‌ی پلیمری، فلزی یا سرامیکی می‌باشد. در بحث نانومواد، نانوکامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولاً باعث ایجاد استحکام در ماده‌ی پایه می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک ماده‌ی پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به‌طور یکنواختی به

ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. با توزیع مواد پرکننده درون ماده‌ی پایه خصوصیات نظیر استحکام، سختی، خواص سایشی و تخلخل تغییر می‌کند. ماده‌ی پایه می‌تواند ذرات را به گونه‌ای از هم جدا نگه دارد که رشد ترک به تأخیر افتد. به علاوه اجزاء نانوکامپوزیت‌ها بر اثر برهم‌کنش سطحی بین ماده‌ی پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. نوع و میزان برهم‌کنش‌ها نقش مهمی در خواص مختلف نانوکامپوزیت‌ها مانند حلالیت، خواص نوری، خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها دارد. باید توجه کرد که تنها با اضافه کردن نانوذرات به یک زمینه به خواص شگفت‌آوری نمی‌رسیم، بلکه در این ترکیب باید شرایطی از قبیل توزیع‌پذیری مناسب در ماده‌ی زمینه را رعایت کرد [۱۶]. تصویر میکروسکوپی نمونه‌ای از نانوکامپوزیت در شکل (۱-۵) نشان داده شده است.



شکل (۱-۵) تصویر میکروسکوپی از یک نانوکامپوزیت [۹].

۱-۷-۱- دسته‌بندی نانوکامپوزیت‌ها

مواد نانوکامپوزیت در دو دسته تولید می‌شوند. در دسته‌ی اول، فاز دوم موادی با دمای ذوب بالا مانند سرامیک‌ها و یا فلزات بوده، و فاز زمینه ماده‌ای با دمای ذوب پایین مانند پلیمر می‌باشد. در دسته‌ی

دوم، فاز زمینه ماده‌ای سرامیکی یا فلزی با دمای ذوب بالا و فاز دوم ماده‌ای پلیمری با دمای ذوب پایین است به همین دلیل مواد نانوکامپوزیت را از نظر نوع مواد تشکیل دهنده به سه گروه تقسیم می‌کنند [۹].

- نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری^۱
- نانوکامپوزیت‌های پایه سرامیکی^۲
- نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی^۳

در ادامه به بررسی خواص و کاربرد هریک از این نانوکامپوزیت‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۱-۷-۱- نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری

این نانوکامپوزیت‌ها به عنوان نانوکامپوزیت‌های هیبریدی آلی-غیرآلی^۴ نیز شناخته می‌شوند که از دهه‌ی ۹۰ مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته‌اند. تفاوت عمده‌ی این نانوکامپوزیت‌ها با دو گروه دیگر در این است که در این نانوکامپوزیت‌ها، فاز ماتریس یا زمینه از جنس پلیمر است، و همین باعث می‌شود که روش‌های تهیه و شکل‌دهی این نوع از نانوکامپوزیت‌ها با دو گروه دیگر متفاوت باشد. مهم‌ترین علت استفاده از این نانوکامپوزیت‌ها بهبود خاصیت مکانیکی و حرارتی پلیمرهاست. در تحقیقات انجام شده در این گروه، از پلیمرهای مختلفی به عنوان فاز زمینه استفاده شده است. از جمله این پلیمرها می‌توان PP^۵، PMMA^۶، PA^۷، PET^۸، PE^۹، PS^{۱۰} و اپوکسی‌ها^{۱۱} را نام برد. ملاحظه می‌شود که از هر دو

^۱ Polymer Matrix Nanocomposites (PMNCs)

^۲ Ceramic Matrix Nanocomposites (CMNCs)

^۳ Metal Matrix Nanocomposites (MMNCs)

^۴ Hybrid Organic-Inorganic Nanocomposites

^۵ Polypropylene

^۶ Polymethyl Methacrylate

^۷ Polyamide

^۸ polyethylene Terephthalate

^۹ Polyethylene

^{۱۰} Polystyrene

^{۱۱} Epoxy

گروه گرمانرم^۱ و گرماسخت^۲، به عنوان فاز زمینه استفاده شده است. انواع مختلف کانی های خاک رس از جمله مونت موریلونیت^۳، میکا^۴، هالوسیت^۵، کائولن^۶ و کوارتز^۷ در این نانوکامپوزیت ها به عنوان فاز پخش شونده استفاده می شوند. این ذرات به عنوان ذرات پودری با اندازه ی نانومتر^۸ شناخته می شوند. موارد استفاده این نانوکامپوزیت ها در صنایع بسته بندی مواد غذایی، صنایع لاستیک، صنایع رنگ و ... است [۱۷].

در بین نانوکامپوزیت ها، بیش ترین توجه به نانوکامپوزیت های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت های پلیمری، خواص بی نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت های پلیمری اغلب دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی^۹، رسانایی الکتریکی و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. تقویت پلیمرها با استفاده از مواد آلی^{۱۰} و معدنی^{۱۱} بسیار مرسوم می باشد. برخلاف تقویت کننده های مرسوم که در مقیاس میکرون می باشند، در نانوکامپوزیت ها تقویت کننده ها ذراتی در ابعاد نانومتر می باشند. با افزودن درصد کمی از نانوذرات به یک پلیمر خالص، استحکام کششی، استحکام تسلیم و مدول یانگ افزایش چشمگیری می یابد. به عنوان مثال، با افزودن تنها ۰/۴ درصد حجمی میکا (یک نوع سیلیکات) با ابعاد ۵۰ نانومتر به اپوکسی، مدول یانگ این ماده ۵۸ درصد افزایش خواهد یافت. دلیل دوم توسعه ی نانوکامپوزیت های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی است. استحکام و خواص الکتریکی نانولوله های کربنی به شکل قابل ملاحظه ای با نانولایه های گرافیت و دیگر مواد پرکننده تفاوت دارد. نانولوله های

¹ Termoplastic

² Termoset

³ Montmorillonite

⁴ Mica

⁵ Halosite

⁶ Kaolinite

⁷ Quartz

⁸ Nano-Particle Powders

⁹ Thermal stability

¹⁰ Organic

¹¹ Inorganic

کربنی موجب رسانایی و استحکام فوق‌العاده‌ای در پلیمرها می‌شوند، به‌طوری که کاربردهای حیرت‌انگیزی همچون آسانسور فضایی را برای آن می‌توان متصور شد. از نظر نظامی نیز فراهم کردن هدایت الکتریکی در پلیمرها فرصت‌های انقلابی را به‌وجود خواهد آورد. به‌عنوان مثال از پوسته‌های الکتریکی مغناطیسی گرفته تا کامپوزیت‌های رسانای گرما و لباس‌های سربازان آینده. این دسته از کامپوزیت‌ها به‌دلیل خواص منحصر به‌فردی که دارند، به‌طور گسترده‌ای در صنایع خودرو، هوافضا و بسته‌بندی مواد غذایی گسترش یافته‌اند. از دیگر کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری پوشش‌های مقاوم به سایش^۱، پوشش‌های مقاوم به خوردگی^۲، پلاستیک‌های رسانا، حسگرها، آسترهای مقاوم در دمای بالا و غشاهای^۳ جداسازی گازها و سیالات نفتی می‌باشند. به‌عنوان مثال می‌توان به‌نوعی غشای نانوکامپوزیتی ساخته شده از یک نوع پلیمر و نانولایه‌های سیلیکا اشاره کرد، که توسط محققان دانشگاه کارولینای شمالی ساخته شده است. این غشاء توانایی فوق‌العاده‌ای در جداسازی مولکول‌های آلی از گازها دارد [۱۷]. در بخش‌های دیگر مباحث بیشتری در مورد نانوکامپوزیت‌های پلیمری ارائه می‌شود.

۱-۷-۱-۲- نانوکامپوزیت‌های پایه سرامیکی

به مواد معمولاً جامدی که بخش عمده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها غیرفلزی و غیرآلی باشد، سرامیک گفته می‌شود. سرامیک‌ها خواص بسیار خوبی نظیر مقاومت حرارتی بالا، پایداری شیمیایی خوب و استحکام مکانیکی مناسبی دارند اما به‌دلیل پیوندهای یونی و کووالانسی موجود در سرامیک‌ها، چقرمگی^۴ شکست آن‌ها پایین است و تغییر شکل پلاستیک این مواد محدود می‌باشد. به‌منظور رفع این مشکل با اضافه کردن و جداسازی الیاف و ذرات مناسب، می‌توان چقرمگی شکست را بالا برد. اگر این تقویت‌کننده‌ها ابعاد نانومتری داشته باشند، بالاترین چقرمگی شکست این مواد به‌دست می‌آید. برای ساخت این

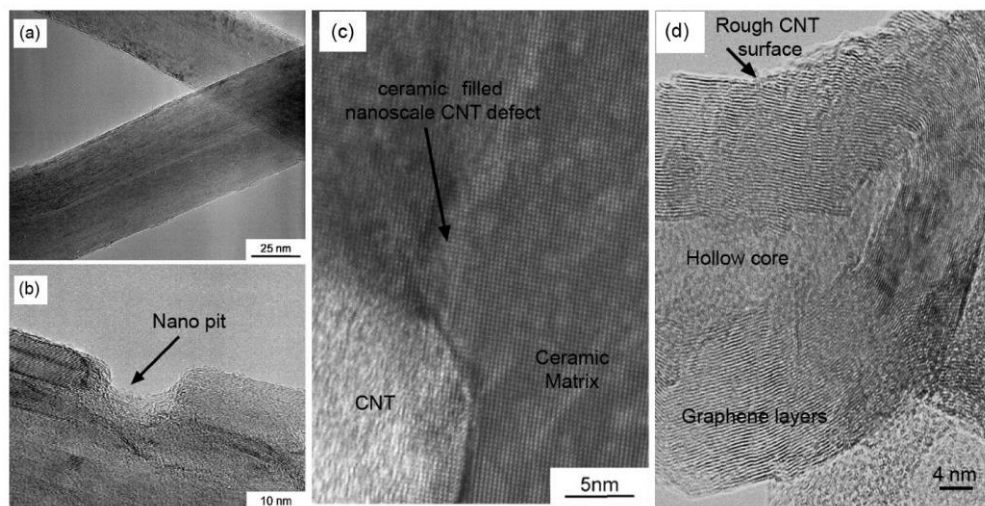
^۱ Abrasion

^۲ Corrosion

^۳ Membranes

^۴ Toughness

نانوکامپوزیت از پرس ایزواستاتیک گرم استفاده می‌شود. از خواص مکانیکی قابل توجه این نانوکامپوزیت-ها می‌توان به استحکام خمشی و مدول الاستیک قابل توجه آن‌ها اشاره کرد [۱۷]. در شکل (۱-۶) تصویری میکروسکوپی از نانوکامپوزیت پایه سرامیک تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و گرافن نشان داده شده است.



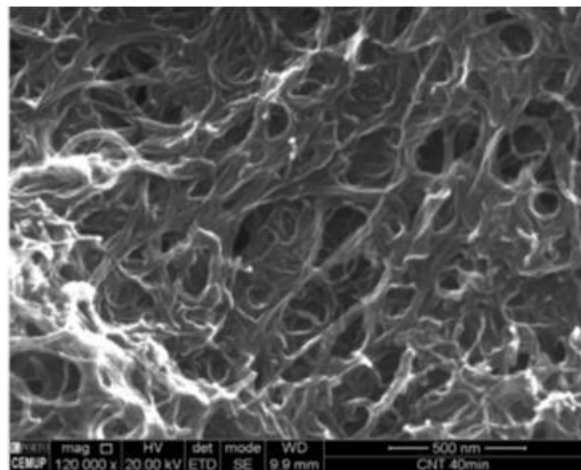
شکل (۱-۶) تصویر میکروسکوپی از یک نمونه نانوکامپوزیت پایه سرامیک تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی و گرافن [۱۷].

۱-۷-۳- نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی

کامپوزیت‌های پایه فلزی به علت استحکام و سختی بالا کاربردهای وسیع در صنایع خودرو و هوافضا پیدا کرده‌اند. اما این کاربردها به لحاظ کم بودن قابلیت کشش در این کامپوزیت‌ها محدود شده است. تبدیل کامپوزیت به نانوکامپوزیت سبب افزایش استحکام و رفع محدودیت‌های مذکور می‌شود. نانوکامپوزیت-های پایه فلزی اصولاً مشابه روش‌های متالوژی پودر تولید می‌شوند. این نانوکامپوزیت‌ها کاربردهای متفاوتی دارند، خصوصاً نانوکامپوزیت‌های پایه منیزیم که در سال‌های اخیر به دلیل چگالی کم، استحکام بالا، مقاومت به خزش^۱ بالا و پایداری حرارتی مناسب، گسترش چشمگیری داشته‌اند. نانوکامپوزیت‌های

^۱ Creep

پایه منیزیم کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هوایی و خودروسازی دارند. نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی حاوی نانولوله‌های کربنی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. نانولوله‌ها می‌توانند سبب افزایش و یا بهبود خواصی نظیر رسانایی، استحکام، مقاومت و ... در فلزات شوند [۱۸]. شکل (۷-۱) تصویر میکروسکوپی از نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی را نشان می‌دهد



شکل (۷-۱) تصویر میکروسکوپی از نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی [۱۸].

۱-۷-۲- مزایا و معایب نانوکامپوزیت‌ها

ظهور مواد نانوکامپوزیت، تحولی اساسی در خواص مکانیکی و حرارتی مواد ایجاد کرده است. نانوکامپوزیت‌ها خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل استحکام، سختی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالایی در محدوده‌ی وسیعی از دما دارند. افزودن پنج تا ده درصد حجمی فاز دوم به زمینه، باعث افزایش چشمگیری در خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌ی زمینه می‌شود لذا جدیدترین فناوری‌ها در طراحی ریزساختاری نانوکامپوزیت‌ها، برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌باشد. در مقابل خواص منحصر به فرد مواد نانوکامپوزیت، در ساخت این مواد مشکلات فرایندی قابل توجه‌ای وجود دارد که نقش تعیین کننده‌ای دارند. عدم توزیع یکنواخت فاز دوم در فاز زمینه در نانوکامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد. تجمع ذرات پودر بسیار ریز در نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش

انرژی سطحی آن‌ها شده و کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را به دنبال دارد. استفاده از مواد شیمیایی گران قیمت برای توزیع یکنواخت فاز دوم در داخل فاز زمینه و جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات پودر نانوکامپوزیتی و ساخت نانوکامپوزیت‌هایی با ریز ساختاری همگن و خواص مکانیکی بالا، باعث غیراقتصادی شدن و همچنین پیچیده‌تر شدن فرایند تولید می‌گردد [۱۸].

۸-۱- نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و برخی کاربردها

۸-۱-۱ مقدمه‌ای بر پلیمر اپوکسی و ساختار آن

اپوکسی و کامپوزیت‌های آن به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهایی اعم از کفپوش تا دماغه‌ی هواپیما استفاده شده است. از آغاز تجاری‌سازی آن‌ها در سال ۱۹۴۷ توسط کمپانی دیو-رینولدز^۱، اپوکسی به گسترده‌ترین پلیمر گرماسخت استفاده شده، مطالعه شده و تحقیق شده تبدیل گردیده است. خواص برتر مکانیکی، چسبندگی عالی، مقاومت شیمیایی و خوردگی بالا، استحکام بالا، راحتی در فرآوری و گزینه‌های چندگانه‌ی پخت، این گروه از رزین‌ها را به‌طور گسترده به‌عنوان یک ماده‌ی فنی مورد توجه قرار داده است. با توجه به انقباض کم و گزینه‌های پخت بسیار، اپوکسی به‌عنوان یکی از چسب‌های معمول استفاده می‌شود. کاربرد اصلی آن در زمینه‌ی پیوند سازه‌های فلزی در صنایع هوافضا از جمله مونتاژ قطعات کوچک می‌باشد. آن‌ها همچنین به‌علت مقاومت به خوردگی بالا، چسبندگی قوی و خواص فیزیکی خوب، به‌عنوان مواد پوشش‌دهی استفاده می‌شوند. شایع‌ترین پوشش‌های اپوکسی استفاده شده، محصولات بیسفنول آ^۲ (ترکیبات با دو گروه عاملی فنول) می‌باشند. همچنین استفاده از اپوکسی‌ها در اجزای مدارهای الکترونیکی، به‌عنوان کاربردهای عایق‌سازی الکتریکی، جداسازی از شرایط محیطی نامطلوب دمایی، رطوبتی و شیمیایی رایج می‌باشد. پلیمرهای اپوکسی همچنین به‌عنوان پایدارکننده برای پلاستیک‌ها استفاده می‌شوند. بسیاری از کاربردهای سازه‌ای اپوکسی نیازمند تقویت با شبکه‌ای از

^۱ Devoe-Raynolds

^۲ Bisphenol A

الیاف، به عنوان مثال، شیشه، کربن و الیاف پلیمری نایلون (کولار) به منظور افزایش استحکام می‌باشند. کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف به طور گسترده‌ای برای کاربردهای سازه‌ای به خصوص صنایع هوافضا، دریایی و ساخت و ساز به علت نسبت استحکام به وزن و همچنین سفتی به وزن بالای خود استفاده می‌شوند. در حال حاضر، بیش از پانصد کیلوگرم در هر هواپیما از کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف توسط نیروی هوایی و دریایی ایالات متحده استفاده می‌شود [۱۹].

پلیمر اپوکسی متشکل از دو جزء اصلی رزین اپوکسی و عامل پخت یا سخت کننده می‌باشد. رزین و هاردنر با نسبت از پیش تعیین شده مخلوط شده و استفاده می‌گردد. گرمایش مداوم برای به دست آوردن بهترین خواص پلیمر لازم می‌باشد. تطبیق پذیری اپوکسی در این واقعیت نهفته است، که ترکیب چندین نوع رزین و سخت کننده موجود، بازده ساختاری متفاوتی از سازه‌ی پلیمر با خواص مکانیکی قوی اما منعطف از خود نشان می‌دهد [۱۹].

۱-۸-۲- نانو کامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی

نانولوله‌های کربنی، به ویژه نانولوله‌های کربنی تک جداره، از زمانی که در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ گزارش شدند، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. به علت مدول کششی بالا (1000 Gpa)، استحکام کششی ($180 - 150\text{ Gpa}$)، هدایت الکتریکی (بزرگتر از 10000 S/cm)، هدایت حرارتی (بالتر از 200 W/m.K) و همچنین نسبت ابعادی بالا، نانولوله‌های کربنی به عنوان یک گزینه‌ی ایده‌آل برای استفاده در کامپوزیت‌های پلیمری چند منظوره مطرح می‌باشند. اولین نانو کامپوزیت پلیمری با استفاده از نانولوله‌ی کربنی به عنوان پرکننده در سال ۱۹۹۴ توسط آجایان^۱ و همکاران گزارش شد. از آن زمان، نانولوله‌های کربنی به طور گسترده در طیف وسیعی از زمینه‌های پلیمری برای کاربردهای کامپوزیت مطالعه گردید. با توجه به این که قطر نانولوله‌های کربنی تک جداره در همان مقیاس زنجیره‌های پلیمری می‌باشد، از نانولوله‌های کربنی تک جداره انتظار تقویت مواد ماتریس پلیمری در مقیاس مولکولی می‌رود. این تعامل

¹ Ajayan

می‌بایست خواص مکانیکی و فیزیکی ماده را در کل تا حد زیادی بهبود بخشد. نانولوله‌ی کربنی چند جداره با مزایای کاهش هزینه و توزیع راحت‌تر در مقایسه با نانولوله‌ی کربنی تک جداره، باعث می‌شود که نانولوله‌ی کربنی چند جداره مناسب برای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری در مقیاس‌های بزرگ باشد. بطور کلی، نانوکامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله‌ی کربنی، پتانسیل فوق‌العاده‌ای را در کاربردهای مهندسی با عملکرد بالا از خود نشان می‌دهند. در دو دهه‌ی گذشته، بهبود مستمر در تولید، عملکرد و قیمت رقابتی نانولوله‌ی کربنی، آن‌ها را برای کاربردهای تجاری مختلف جذاب کرده است. روش‌های متعددی برای آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی توسعه داده شده است. با این حال، هنوز هم چالش‌های بزرگی جهت بهره‌مندی کامل استحکام و هدایت بالای نانولوله در اپوکسی، یعنی رسیدن به توزیع مناسب، چسبندگی و جهت‌گیری مورد نظر نانولوله‌ی کربنی در ماتریس اپوکسی وجود دارد [۲۰]. به علت جاذبه‌ی ذاتی نیروهای واندروالس، سطح ویژه و نسبت ابعادی بالا، نانولوله‌های کربنی در شکل‌های طنابی و توده‌ای وجود دارند. بنابراین، توزیع نانولوله‌های کربنی در محیط، به خصوص در محیط اپوکسی با ویسکوزیته‌ی بالا، یک چالش می‌باشد. توزیع ضعیف نانولوله‌ها نه تنها به طور چشمگیری باعث کاهش کارایی آن‌ها می‌گردد، که ناشی از لغزش نانولوله‌ها توسط دیگری به هنگام اعمال نیرو می‌باشد، بلکه هم‌چنین منتج به تولید میکروحفره‌ها درون نانوکامپوزیت‌ها می‌گردد. علاوه بر این، بهبود در توزیع نانولوله‌ها درون ماتریس اپوکسی معمولاً موجب افزایش ویسکوزیته‌ی سیستم شده، که به نوبه‌ی خود ممکن است تأثیر منفی روی توزیع، جهت‌گیری و یکپارچه‌سازی فرایندهای آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی چند کاربردی بگذارد. افزایش ویسکوزیته‌ی سیستم، اغلب منجر به بروز مشکلات فرآوری می‌گردد. به دلیل نسبت ابعادی بالا و ویژگی‌های پیچشی، نانولوله‌های کربنی در یک محیط با درهم پیچیدن در یکدیگر توزیع می‌شوند. درهم تنیدگی نانولوله‌های کربنی معمولاً بهره‌وری تقویت را کاهش داده، و مانع از پراکندگی نانولوله‌های کربنی می‌شود. علاوه بر این، همراهی شدن نانولوله‌های کربنی در یک جهت مورد نظر می‌تواند به طور کامل رسانایی الکتریکی و حرارتی بالایی را برای کامپوزیت‌ها به ارمغان آورد. بنابراین، کنترل جهت‌گیری نانولوله‌های کربنی در ماتریس اپوکسی

بسیار مطلوب است. چسبندگی ضعیف میان نانولوله و رزین اپوکسی بسیار مشاهده شده، و این ناشی از ویژگی‌های سطح صاف غیرواکنشی اتم‌های نانولوله‌ها می‌باشد. عدم اتصال سطحی، انتقال بار از ماتریس به نانولوله را محدود می‌کند. نانولوله‌هایی که پراکندگی ضعیفی دارند، معمولاً به‌هنگام شکست از داخل ماتریس بیرون کشیده می‌شوند، بنابراین بهره‌وری از تقویت‌کنندگی را محدود می‌کند [۲۰]. تلاش‌های تحقیقاتی فوق‌العاده‌ای جهت برطرف نمودن چالش‌های ذکر شده در بالا انجام شده است، و پیشرفت‌های چشمگیری در این زمینه صورت گرفته است. لازم به ذکر است، که کیفیت نانولوله‌های کربنی از جمله خلوص و مورفولوژی، اثر چشمگیری روی رفتار نانولوله و آماده‌سازی نانوکامپوزیت دارد. برای مثال نانولوله‌هایی که به‌روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار تولید می‌شوند، معمولاً همراهیایی بهتر و توزیع راحت‌تری را دارند. از آن‌جا که سنتز نانولوله‌ها و کیفیت لوله‌ها موضوعات متفاوتی هستند و می‌تواند بسیار پیچیده باشد، روش‌های مختلف جهت بهبود توزیع، جهت‌دهی و چسبندگی نانولوله‌ها در بخش‌های آینده بررسی گردیده است [۲۰].

۱-۸-۳- تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی

درجه‌ی بالای پراکندگی نانولوله‌ها در ماتریس اپوکسی معمولاً یک پیش‌نیاز برای تولید نانوکامپوزیت-های اپوکسی/نانولوله می‌باشد. استراتژی‌های بسیاری که هر دو تکنیک‌های فراوری و اصلاحات نانولوله‌ی کربنی را پوشش دادند، توسعه یافته است. در بسیاری از موارد، رویکردهای چندگانه‌ای با هم ترکیب شده است، تا به نتیجه‌ی بهینه دست یابد. در همین حال، روش‌های مختلف عامل‌دار کردن جهت بهبود چسبندگی توسعه پیدا کرده‌اند. بعضی تکنیک‌های خاص فراوری نیز طراحی گردیده، تا به هم‌راستا کردن نانولوله‌ها در ماتریس اپوکسی کمک کند [۲۰].

۱-۸-۳-۱- تکنیک‌های فراوری

دستگاه همگن‌ساز مافوق صوت یکی از رایج‌ترین ابزارهای توزیع نانولوله‌های کربنی می‌باشد. هر دو نوع وسیله‌ی حمام و پروپ‌دار مافوق صوت بارها استفاده شده است. به‌طور کلی پذیرفته شده است که امواج

ما فوق صوت منتشر شده، توده‌های بزرگ را شکسته و نانولوله‌های مستقر روی لایه‌های خارجی توده‌ها را جدا می‌کند، که نتیجه‌ی آن پراکندگی تدریجی نانولوله‌ها می‌باشد. رویکرد شدت بالا و مدت زمان طولانی فرایند ما فوق صوت می‌تواند منجر به آسیب موضعی و کوتاه شدن طول نانولوله‌های کربنی شود. بعضی از آسیب‌ها می‌تواند باعث تضعیف خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی نانولوله‌ها گردد. فرایند ما فوق صوت همچنین بارها به همراه روش‌های دیگر جهت بهبود توزیع نانولوله از جمله عامل‌دار کردن کوالانسی و غیرکوالانسی، استفاده شده است [۲۰].

۱-۸-۳-۲- خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله‌ی کربنی

در حالی که قصد اولیه از ترکیب نانولوله‌ها با اپوکسی عمدتاً بهبود در خواص مکانیکی برای کاربردهای سازه‌ای بود، ویژگی‌های بیشتری از نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله شناسایی و به دست آمد. ناهمخوانی‌های بزرگی در یافته‌های تجربی مقالات پیشین با توجه به تغییرات بزرگ در ویژگی‌های نانولوله‌ها از منابع مختلف، انتخاب‌های مختلف فرمولاسیون اپوکسی، عامل‌دار کردن‌ها و تکنیک‌های آماده‌سازی مختلف، یافت می‌شود [۲۰].

انواع زیادی از نانوکامپوزیت‌های پلیمرهای گرمانرم/نانولوله در دهه‌ی گذشته مطالعه شده است. به‌طور کلی، نتایج نشان داده است که نانولوله‌ها می‌توانند در تقویت پلیمرهای گرمانرم بسیار موثرتر از پلیمرهای گرماسخت عمل کنند. این موضوع احتمالاً به این دلیل است که توزیع نانولوله‌ها در پلیمرهای گرمانرم به‌طور کلی، راحتی در اختلاط برشی، پراکندگی گام به گام و اختلاط جریان کششی موثرتر می‌باشد. یکی دیگر از دلایل بالقوه برای محدود کردن اثرات تقویتی نانولوله در اپوکسی، ضریب انبساط حرارتی پایین اپوکسی می‌باشد. انقباض کم هنگام خنک شدن اجتناب ناپذیر تا دمای اتاق، انتقال نیرو را به خطر انداخته، به‌خصوص اگر پیوند میان نانولوله‌ها و ماتریس اپوکسی برقرار نشده باشد. این فرضیه می‌تواند به‌طور غیر مستقیم با این واقعیت که انتقال بار در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانولوله به‌شکل قابل توجهی در فشار بهتر از کشش عمل می‌کند، اعتبار بخشد. لازم به ذکر است، از نظر تئوری

نانولوله‌های کربنی با نسبت ابعادی بالاتر می‌توانند در تقویت رزین اپوکسی عملکرد بهتری داشته باشند، اما این موضوع در عمل لزوماً صحت ندارد که می‌تواند به‌خاطر سختی در توزیع و هم‌راستاسازی نانولوله‌های با نسبت ابعادی بالا درون اپوکسی باشد [۲۰].

فصل ۲: معایم اولیه و پیشینه‌ی پژوهش

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی مفاهیم اولیه از قبیل تیر و ورق به عنوان سازه‌های مهندسی پرداخته می‌شود و شرایط در نظر گرفتن یک سازه به عنوان تیر و یا ورق بیان می‌گردد. سپس روش‌های تحلیلی بررسی پایداری سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و مروری انجام خواهد گرفت بر تحقیقات پیشین. در انتهای فصل اهداف پژوهش بیان می‌گردد.

۲-۲- معرفی تیرها و ورق‌ها

- **معرفی تیرها:** تیرها از رایج‌ترین سازه‌های مهندسی خصوصاً در مکانیک و عمران هستند. تیر یک عضو ساختاری شبیه به میله است که وظیفه‌ی اصلی آن، تحمل تنش‌های حاصل از نیروی برشی و لنگر خمشی، ناشی از بارهای وارد بر آن و وزن خود تیر و انتقال آن به تکیه‌گاه است. بنابراین تیرها برای تحمل بار عرضی (باری که عمود بر محور طولی تیر باشد) طراحی می‌شوند. این که تیر عضوی شبیه میله است بدین معنا است که یکی از ابعاد آن به صورت قابل ملاحظه‌ای از دو بعد دیگر بلندتر است. این بعد، بعد طولی یا محوری تیر نامیده می‌شود. فصل مشترک صفحات عمود بر بعد طولی تیر سطح مقطع نامیده می‌شود و صفحه‌ای که از محور تیر عبور می‌کند صفحه طولی نامیده می‌شود.
- **معرفی ورق‌ها:** در مکانیک جامدات اجسام دارای مساحت صفحه‌ای بزرگ در مقایسه با ضخامت در راستای عمود بر سطح را به صورت ورق مدل می‌کنیم. به عبارت دیگر، در صورتی که یکی از ابعاد یک جسم در مقایسه با دو بعد دیگرش قابل صرف نظر کردن باشد، از آن جسم به عنوان یک ورق یاد می‌کنیم و در تحلیل رفتار مکانیکی آن از ورق استفاده می‌کنیم. اگر بخواهیم به طور ریاضی‌وار مرز میان حالتی که یک سازه ورق باشد یا نباشد را مطرح کنیم،

می‌توان گفت که در مواردی که نسبت ضلع کوچکی که در صفحه بزرگ جسم قرار دارد به ضخامت جسم مورد نظر ۱۱ یا بیشتر از آن باشد از تئوری ورق‌ها در تحلیل رفتار مکانیکی آن سازه استفاده می‌کنیم.

۲-۳- کمانش سازه‌ها

تئوری پایداری سازه‌ها یک بخش مهم از مکانیک سازه است که اساسی برای طراحی منطقی سازه‌های جدید و آزمایش ایمنی سازه‌های موجود است. طراحی در واقعیت امر یک فرآیند ترکیبی مکرر می‌باشد، به این معنی که پارامترهای سازه برای داده‌ی ورودی شناخته شده، مانند بارهای اعمالی، محاسبه شده و پاسخ خروجی مانند تغییر مکان‌ها، شناخته می‌شوند. اگر در طی فرآیند طراحی پارامترهای سازه از معیارهای مشخصی پیروی کرده و آن‌ها را ارضاء کنند، می‌توان به انجام طراحی بهینه امیدوار بود. تئوری پایداری با بارهای بحرانی و تغییرشکل سازه‌هایی که مرتبط با تغییرات ناگهانی حالت سازه هستند، سروکار دارند. در این تئوری، پایداری حالت تعادل بررسی می‌شود. این بدان معنی است که در واقعیت امر معادلات پایداری غیر خطی هستند و می‌توان آن‌ها را مطابق با تئوری کمانش خطی، خطی سازی کرد. چنین تئوری ما را قادر می‌سازد که تعدادی از نتایج را به‌صورتی که در تئوری کلاسیک کمانش سازه‌ای وجود دارد، نمایش داد. تئوری پایداری سازه در حدود ۲۰۰ سال قبل ارائه شد. توسعه کلاسیک تئوری تا حدود دهه ۳۰-۴۰ قرن جاری ادامه یافت. در آن زمان آزمایشات و تحقیقات در مورد کمانش پوسته‌ها نقض تئوری خطی را آشکار ساخت. کوشش‌هایی در زمینه کاهش اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری برای کمانش پوسته‌های استوانه‌ای به‌طور عمده‌ای در توسعه‌ی تئوری‌های غیر خطی تحلیل سازه‌ها اثر گذاشت. شروع تئوری پایداری سازه ارتباط مستقیمی با رساله دکتر کویتز در سال ۱۹۴۵ میلادی در هلند دارد [۲۱]. نتیجه‌ی این تحقیق تا هنگامی که ترجمه انگلیسی آن در سال ۱۹۶۷ منتشر شد، ناشناخته ماند. در این سال تحقیقات مهمی درباره رفتار پس از کمانش سازه در نزدیکی نقطه‌ی بحرانی انجام شده است. در این تحقیقات تحلیل حساسیت سازه نسبت به تأثیر نقص‌های

موجود در ساختار سازه‌ها ارائه شده است. بررسی تأثیر عیوب ساختاری در پاسخ سازه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. رفتار بارها در طی فرایند تغییر شکل سازه‌ها فاکتور دیگری است که باید مد نظر باشد. همچنین مشخص شده که حالت بحرانی تحت عمل بارهای یکنواخت ثابت (بارهای مرده) از نظر مفهوم با بارهای متغیر متفاوت است [۲۱]. حالت اول مرتبط با سیستم‌های پایستار می‌باشد در حالی که دیگری در ارتباط با سیستم‌های غیر پایستار است. در حالت اول روش استاتیکی برای تحلیل پایداری نتایج خوبی به دست می‌دهد. در حالت ارتعاشات سیستم‌های غیر کنسرواتیو، سازه‌ها باید برای محاسبه‌ی پارامترهای بحرانی بارهای کمانشی بررسی شوند. توسعه‌ی پایداری سازه‌ای احتیاج به حل مدل‌های پیچیده‌ی سازه‌ها دارد که این امر باعث پیچیده‌تر شدن مسائل پایداری حتی در محدوده‌ی تحلیل‌های خطی نظیر استاتیکی خطی و دینامیک سازه‌ها می‌شود. به این دلیل بود که در دوره‌ی قبل از توسعه‌ی کامپیوتر و روش‌های عددی و محاسباتی تنها کمانش سازه‌های ساده با تعداد اندکی درجات آزادی تحلیل شد. توسعه‌ی کامپیوتر و روش‌های محاسباتی مرتبط، نظیر روش اجزای محدود، باعث شد که بتوان مسائل پیچیده‌ی پایداری سازه‌ها را مورد تحلیل قرار داد. توسعه‌ی سریع در این زمینه، عمده‌تاً مرهون پیشرفت و نیاز کاربردهای مهندسی مخصوصاً در ارتباط با علوم‌ی نظیر هوانوردی، کشتی‌سازی، هسته‌ای و البته سازه‌های هوافضایی بوده است. به‌خاطر توسعه‌ی روش‌های کامپیوتری و عمده‌ترین آن‌ها یعنی روش اجزای محدود، واقعی سازی انتظارات مهندسین به‌خاطر مدلسازی سازه‌های پیچیده ممکن شد. در این زمینه تحقیقات گسترده در حدود دهه‌ی ۶۰ توسط کسانی چون گالاگر، ارگیس، زینگویچ و دیگران در اروپا و آمریکا با ارائه‌ی ماتریس تنش‌های اولیه آغاز شد [۲۲].

۲-۳-۱- روش‌های تحلیلی بررسی پایداری سازه‌ها

۲-۳-۱-۱- روش تعادل ایستایی

اگر نیروهای استاتیکی عمل کننده بر روی یک سیستم بعد از یک تغییر مکان کوچک در حول حالت تعادل در جهتی باشند که موجب شوند سیستم به‌حالت تعادل اولیه خود بازگردد، موقعیت اولیه را یک

حالت تعادل پایدار می‌نامیم. و اگر نیروهای استاتیکی عمل کننده بر روی یک سیستم بعد از یک تغییر مکان کوچک در حول حالت تعادل در جهتی باشند که موجب شوند سیستم از حالت تعادل اولیه خود دور شده و آشفته شود، در این صورت موقعیت اولیه را یک حالت تعادل ناپایدار می‌نامیم.

۲-۳-۱-۲- روش انرژی

روش انرژی بر پایه دو اصل استوار است، الف- مقدار مانای تابع انرژی پتانسیل کل^۱ نسبت به یک متغیر حالت یا چند متغیر حالت، شرط لازم و کافی برای تعادل یک مسیر است.

$$\Pi = U - W$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = 0$$

ب - مینیمم نسبی تابع انرژی پتانسیل کلی^۲ نسبت به یک متغیر حالت (یا چند متغیر حالت)، شرط لازم و کافی برای پایداری یک حالت تعادل است. به عبارت دیگر، مشتق دوم تابع انرژی پتانسیل کلی یک سیستم نسبت به یک متغیر حالت (یا چند متغیر حالت)، پایداری یا ناپایداری حالات تعادل آن سیستم را مشخص می‌کند.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \theta^2} > 0 \quad \text{حالت تعادل پایدار} \quad \leftarrow \text{تابع انرژی پتانسیل کلی مینیمم است}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \theta^2} = 0 \quad \text{حالت تعادل پایدار} \quad \text{پایدار - ناپایدار - خنثی}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \theta^2} < 0 \quad \text{حالت تعادل پایدار} \quad \text{تابع انرژی پتانسیل کلی ماکزیمم است}$$

¹ Stationary Value

² Total Potential Energy Functional

۲-۴- مروری بر تحقیقات انجام شده

با کشف نانولوله‌های کربنی توسط ایچما [۲۳] در سال ۱۹۹۱، علاقه زیادی در عرصه علم و صنعت برای تحقیقات بیشتر در این زمینه پیدا شد. نانولوله‌های کربنی خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی خوبی را دارا می‌باشند. این مزیت قابل توجه، نانولوله‌های کربنی را به ماده‌ای مؤثر جهت تقویت مواد مرکب پلیمری تبدیل کرده است. جهت تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها تحقیقات زیادی به‌روش‌های تئوری و آزمایشگاهی انجام شده است. گوجنی و همکاران [۲۴] در زمینه‌ی تأثیر انواع نانولوله‌ی کربنی از جمله، تک دیواره، دود دیواره و چنددیواره و عامل‌دار شده‌ی هر کدا از موارد ذکر شده تحقیق کردند. مدل‌هایی را در این زمینه برای حالت تقویت‌کنندگی نانولوله‌ها و چسبندگی آن‌ها به زمینه ارائه دادند که نشان داد پیوندهای موضعی ماتریس باعث می‌شود که ترک پلی و شکست سطحی در مناطق بدون پیوند اتفاق افتد. واریز و همکاران [۲۵] تأثیرات افزودن نانولوله‌های کربن به کامپوزیت شیشه/اپوکسی بر خواص ترموفیزیکی و چقرمگی شکست آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. ژو و همکاران [۲۶] همچنین دریافتند که نانولوله‌های تک‌دیواره پتانسیل خوبی برای تقویت خواص سطحی و تأثیر بر چقرمگی در کامپوزیت‌های لایه‌ای دارند. کیم و همکاران [۲۷] در زمینه‌ی میزان چسبندگی بین الیاف کربن، نانولوله‌های کربن و زمینه گزارشی تهیه کردند. آن‌ها با موفقیت توانستند نانولوله را روی الیاف کربن سنتز کنند. گوجنی و همکاران [۲۸] تأثیر نانولوله‌های کربنی مختلف را بر خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری مورد مطالعه قرار دادند. کیم و همکاران [۲۹] چقرمگی شکست کامپوزیت پلیمری تقویت شده با ذرات کربن و کامپوزیت پلیمری تقویت شده با ذرات نانورس را با هم مقایسه کردند. کاراپاپاس و همکاران [۳۰] انرژی شکست کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله‌ی کربنی را به دو روش محاسبه کردند. هاوکینز و همکاران [۳۱] چقرمگی شکست نانو کامپوزیت کربن - گرافن/اپوکسی را مطالعه کردند. ناظم سلیمی و همکاران [۳۲] خواص کششی کامپوزیت اپوکسی الیاف شیشه و الیاف کربن تقویت‌شده با ذرات ثانویه را بررسی کردند. تارمن و همکاران [۳۳] خواص مکانیکی کامپوزیت

کربن/اپوکسی را با استفاده از تقویت کننده‌های نانوذره‌ای بهبود دادند. فراش و همکاران [۳۴] به روش آزمایشگاهی، تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار به زمینه اپوکسی را بر خواص ترمومکانیکی نانوکامپوزیت حاصل بررسی کردند. شکریه و همکاران [۳۵] اثر نانولوله‌های کربنی بر مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی در شروع ترک در نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی را به صورت تحلیلی مطالعه کردند و به کمک یک مدل پیوسته‌ی معادل، خواص الاستیک مواد مرکب تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را تعیین کردند. سیدل و همکاران [۳۶] خواص الاستیک مواد مرکب تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی مختلفی به دست آوردند. همچنین مدل المان محدودی جهت تعیین خواص مکانیکی این مواد توسط ایشان ارائه گردید. هان و همکاران [۳۷] نیز به کمک روش دینامیک مولکولی مدول الاستیسیته‌ی مواد مرکب تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را به دست آوردند و همچنین تأثیر درصد حجمی نانولوله‌های تک جداره را بر خواص مکانیکی ماده‌ی مرکب مطالعه کردند. گلستانیان و همکاران [۳۸] به بررسی اثر نسبت منظری نانولوله‌های کربنی روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری به روش المان محدود پرداختند. به کمک روابط ارائه شده جهت تخمین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها، تحلیل‌های مکانیکی مختلفی نیز بر روی این مواد انجام شده است. شن و همکاران [۳۹] کمانش و پس کمانش حرارتی ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربن را به روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. هوشن [۴۰] پس کمانش پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تحت اثر گرمایی را به روش تحلیلی بررسی نمود. جم و همکاران [۴۱] به بررسی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده توسط نانولوله‌های کربن به روش تحلیلی پرداختند. فروغی و همکاران [۴۲] به بررسی کمانش مکانیکی ورق‌های کامپوزیت ضخیم تقویت شده با نانولوله‌های کربن به روش نوار محدود^۱ پرداختند. اسکندری و همکاران [۴۳] کمانش پوسته‌های استوانه‌ای باز تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی تک جداره را تحلیل نمودند. همچنین مدهو و همکاران [۴۴] تأثیر تقویت کنندگی نانولوله‌های کربن را در ورق‌های کامپوزیتی پلیمری تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار

^۱ Finite Strip Method

دادند. زمانی و همکاران [۴۵] به‌طور تجربی به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رسی بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی پرداختند. آزاد و همکاران [۴۶] کمانش ورق‌های کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات را به‌طور تجربی به روش تاگچی مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۴۷] آنالیز کمانش ورق‌های مدرج تابعی تقویت شده با نانولوله‌های کربن را مطالعه کردند. چاندرا و همکاران [۴۸] کمانش کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با گرافن و نانولوله‌ی کربن را مورد بررسی قرار دادند. فتاحی و همکاران [۴۹] آنالیز کمانش تیر تقویت شده با نانولوله‌های کربن با شرایط مرزی دلخواه را به روش تحلیلی بررسی کردند. محمدی مهر و همکاران [۵۰] به تحلیل کمانش و ارتعاشات آزاد پنل استوانه‌ای تقویت شده با توزیع‌های مختلف نانولوله‌های کربنی بر بستر الاستیک به روش تحلیلی پرداختند. همچنین سونگ و همکاران [۵۱] خمش و کمانش ورق‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با نانو صفحه‌های گرافن را به‌کمک نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول مورد مطالعه قرار دادند. در صورتی که پلیمر تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، به‌عنوان یک ماده زمینه جدید بکارگیری شود و دوباره توسط الیافی نظیر الیاف کربن تقویت شود، یک ماده مرکب چندمقیاسی یا هیبریدی^۱ حاصل خواهد شد [۵۲]. چنگیو و همکاران [۵۳] شبیه‌سازی و بررسی تجربی کمانش کامپوزیت استوانه‌ای ۱۲۰ درجه‌ی تقویت شده، تحت بارگذاری محوری را انجام دادند. بزکرت و همکاران [۵۴] به‌طور تجربی کمانش محوری و جانبی کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی تقویت شده با نانوذرات رس را مورد بررسی قرار دادند. کیم و همکاران [۵۵] به‌کمک انرژی امواج فراصوت توانستند نانولوله‌های کربنی را درون اپوکسی به‌خوبی توزیع کنند و سپس با افزودن الیاف کربن، یک ماده‌ی مرکب هیبریدی تولید کنند. فرآش و همکاران [۵۶] به روش آزمایشگاهی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی را بر فرکانس‌های طبیعی و ضریب میرایی تیرها و ورق‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی بررسی کردند. آن‌ها اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را

^۱ Hybrid or multiscale composite

به‌عنوان ماده‌ی زمینه با الیاف شیشه و کربن تقویت نمودند. شرما و همکاران [۵۷] خواص مکانیکی یک نانوکامپوزیت هیبریدی را به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.

۶-۲- اهداف پژوهش

با توجه به تحقیقاتی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، افزودن نانولوله‌ی کربن یکی از راه‌های مهم برای تقویت و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌باشد. در این پژوهش تأثیر افزودن درصدهای مختلف نانولوله‌ی کربنی بر بار بحرانی کمانش تیر و ورق‌ها به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آن در بهبود بار بحرانی کمانش با اثر تغییر نوع الیاف از شیشه به کربن مورد مقایسه قرار داده شده است.

فصل ۳: ساخت و آزمون نمونه ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مواد مصرفی برای ساخت نمونه‌ها شرح داده شد. سپس معرفی دستگاه‌ها و تجهیزات استفاده شده، انجام گرفت. مراحل ساخت نمونه‌ها به صورت کامل تشریح گردید و در نهایت آزمون‌های گرفته شده از نمونه‌ها توضیح داده شد.

۳-۲- مواد اولیه‌ی مصرفی

- رزین آر-ال-۶۲۰^۱ به همراه سخت‌کننده‌ی ۵۲۰^۲ به عنوان ماتریس، در ساخت نمونه‌های کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت، لازم به ذکر است با توجه به مرسوم و موجود بودن این نوع از اپوکسی در بازار و همچنین کارهای مشابه انجام شده قبلی با این رزین و همین‌طور قیمت مناسب آن از این نوع رزین استفاده شده است. نسبت ترکیب رزین به سخت‌کننده با توجه به بروشور شرکت سازنده ۵ به ۱ است. در شکل (۳-۱) تصویر رزین و سخت‌کننده مورد اشاره مشاهده می‌شوند.

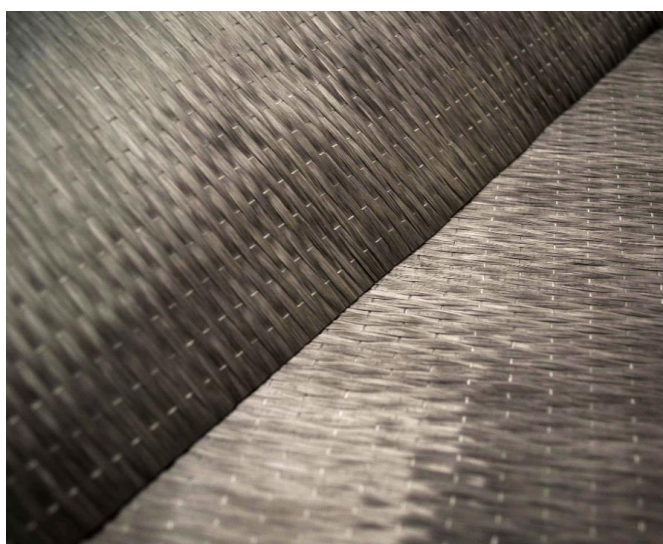
^۱ RL 620

^۲ Hardener 520



شکل (۳-۱) سمت راست رزین آر-ال-۶۲۰ و سمت چپ سخت کننده ۵۲۰ به کار رفته در نمونه‌ها

- الیاف مورد استفاده در ورق‌ها و نمونه‌های کشش شیشه/اپوکسی و ورق‌های شیشه/اپوکسی/نانولوله‌ی کربن، از نوع الیاف شیشه‌ی تک جهته‌ی ۴۰۰ گرمی می‌باشد و در ورق‌های کربن/اپوکسی، الیاف کربن تک جهته‌ی ۳۰۰ گرمی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۳-۲) و (۳-۳) به ترتیب تصاویر الیاف کربن و شیشه‌ی استفاده شده مشاهده می‌شوند.

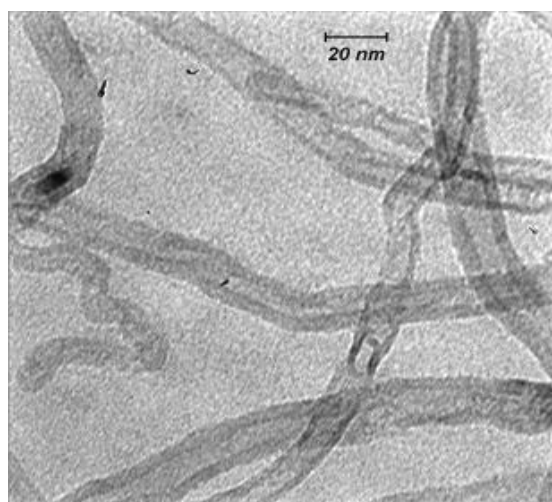


شکل (۳-۲) الیاف تک جهته‌ی کربن



شکل (۳-۳) الیاف تک‌جهته‌ی شیشه

- نانولوله‌های چند جداره محصول شرکت یو-اس نانو (US-Nano) امریکا با قطر بین ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و درصد خلوص بالای ۹۵ درصد خریداری شد. جهت اطمینان از ساختار میکروسکوپی نانولوله‌ها، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱، از آن‌ها گرفته شد که در شکل (۳-۴) آورده شده است.



شکل (۳-۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (TEM) نانولوله‌های کربنی مورد استفاده

¹ Transmission Electron Microscopy

- برای جدا شدن راحت‌تر کامپوزیت‌ها از سطح زیرین (قالب کامپوزیت)، صاف، صیقلی و یکنواخت شدن سمت زیرین تمامی مدل‌های ساخته شده‌ی کامپوزیتی از واکس جدا کننده استفاده گردید. در شکل (۳-۵) تصویر واکس جدا کننده مورد اشاره مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۵) تصویر واکس جدا کننده

- جهت خارج نمودن هوای محبوس بین الیاف و رزین همچنین خروج رزین اضافی موجود در الیاف، که نتیجه‌ی آن افزایش نسبت الیاف به رزین در نتیجه افزایش کیفیت و بهبود مشخصات مکانیکی کامپوزیت، پس از آغشته نمودن الیاف با رزین، تحت خلأ قرار گرفت. برای این منظور از کیسه خلأ استفاده شد. در شکل (۳-۶) تصویر کیسه خلأ مورد اشاره مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۶) تصویر کیسه‌ی خلأ

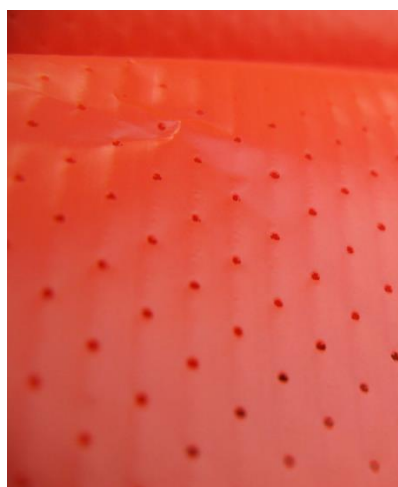
- برای ایجاد آب بندی و عایق کاری بین سطح زیرین (قالب) کامپوزیت تحت خلأ و کیسه‌ی خلأ از نوار آب‌بند استفاده گردید. در شکل (۷-۳) تصویر نوار آب‌بند مشاهده می‌شود.



شکل (۷-۳) تصویر نوار آب‌بند

بین الیاف آغشته شده به رزین تا کیسه خلأ سه لایه دیگر وجود دارد که نام و ویژگی‌های هر به‌ترتیب قرار گرفتن لایه به‌قرار زیر است.

- فیلم سوراخ‌دار: صاف و یکنواخت نگه‌داشتن سطح کامپوزیت، سهولت جدا شدن از کامپوزیت پس از پخت و عبور رزین به لایه‌های بعدی از ویژگی‌های فیلم سوراخ‌دار می‌باشد. در شکل (۸-۳) تصویر فیلم سوراخ‌دار مشاهده می‌شود.



شکل (۸-۳) تصویر فیلم سوراخ‌دار

- آستری: ایجاد فاصله بین فیلم سوراخدار و نمد رزین گیر برای جلوگیری از پُر شدن سوراخ- های فیلم توسط رزین و الیاف نمد دلیل استفاده از آستری است. در شکل (۳-۹) تصویر آستری را مشاهده می شود.



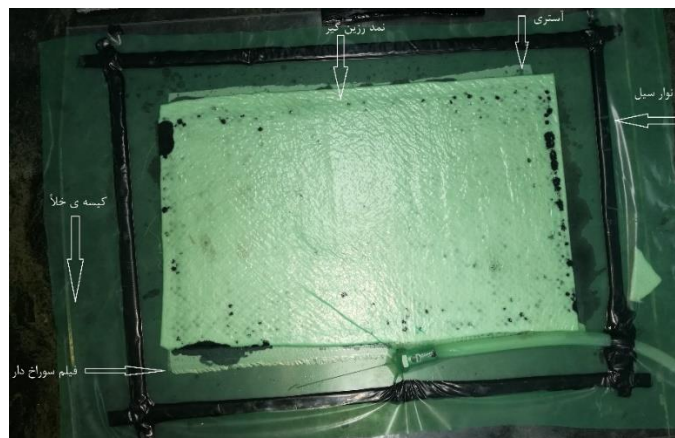
شکل (۳-۹) تصویر آستری

- نمد رزین گر: جذب رزین اضافه که در مرحله آغشته کردن الیاف به رزین در الیاف باقی مانده است دلیل استفاده از نمد رزین گیر است. در شکل (۳-۱۰) تصویر نمد رزین گیر را مشاهده می شود.



شکل (۳-۱۰) تصویر نمد رزین گیر

شکل (۱۱-۳) تصویری از کامپوزیت تحت خلأ را نشان می‌دهد که در آن کیسه‌ی خلأ، نوار سیل، فیلم سوراخ‌دار، آستری و نمد رزین‌گیر مشخص شده است.



شکل (۱۱-۳) تصویر کامپوزیت تحت خلأ

۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات استفاده شده

- دستگاه اینسترون^۱

دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون (مدل اس-تی-ام ۱۵۰ و با قابلیت اعمال نیرو تا ۱۵۰ کیلونیوتن) از این دستگاه جهت آزمون کمانش نمونه‌های ورق و آزمون کشش نمونه‌های تیر کامپوزیتی استفاده شده است که در شکل (۱۲-۳) تصویر دستگاه دیده می‌شود.

^۱ Instron STM-150



شکل (۳-۱۲) تصویر دستگاه اینسترون

• حمام آلتراسونیک^۱

مدل پارسونیک ۲۶۰۰-اس^۲ ساخت ایران (توان ۷۰ وات و فرکانس ۲۸ کیلوهرتز) از این دستگاه جهت جدا کردن نانولوله‌ها از یک‌دیگر و حصول کیفیت مناسب پخش شدگی ذرات درون رزین استفاده می‌شود که در شکل (۳-۱۳) تصویر دستگاه دیده می‌شود.



شکل (۳-۱۳) تصویر حمام آلتراسونیک

• همزن مکانیکی

^۱ Ultrasonic

^۲ Parasonic 2600 S

از همزن مکانیکی برای مخلوط کردن رزین و نانولوله‌های کربن به روش اختلاط برشی استفاده گردیده است که در شکل (۳-۱۴) تصویر همزن دیده می‌شود.



شکل (۳-۱۴) تصویر همزن مکانیکی

۳-۴- روش آماده‌سازی ماده‌ی زمینه

رزین اپوکسی را در بشر ریخته ماده‌ی سخت‌کننده با نسبت ۱۵ به ۱۰۰ به بشر اضافه و ۵ دقیقه توسط همزن مکانیکی هم زده شد و جهت ساخت نمونه اپوکسی/الیاف شیشه و اپوکسی/الیاف کربن مورد استفاده قرار گرفت. جهت ساخت نمونه‌های نانولوله کربنی/اپوکسی/الیاف شیشه در ابتدا نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به رزین اپوکسی اضافه شد و سپس ۱۰ دقیقه به وسیله‌ی همزن مکانیکی با سرعت چرخش (۱۵۰ دور در دقیقه) مخلوط گردید. مخلوط اپوکسی و نانولوله‌های کربنی به مدت ۲۲ دقیقه در حمام آلتراسونیک قرار گرفت. فرایندهای همزدن مکانیکی و حمام آلتراسونیک هرکدام سه نوبت تکرار شد. در نهایت ماده‌ی سخت‌کننده به مخلوط اضافه و ۵ دقیقه توسط همزن مکانیکی با سرعت (۱۵۰ دور در دقیقه) هم زده شد.

۳-۵- ساخت نمونه‌ها

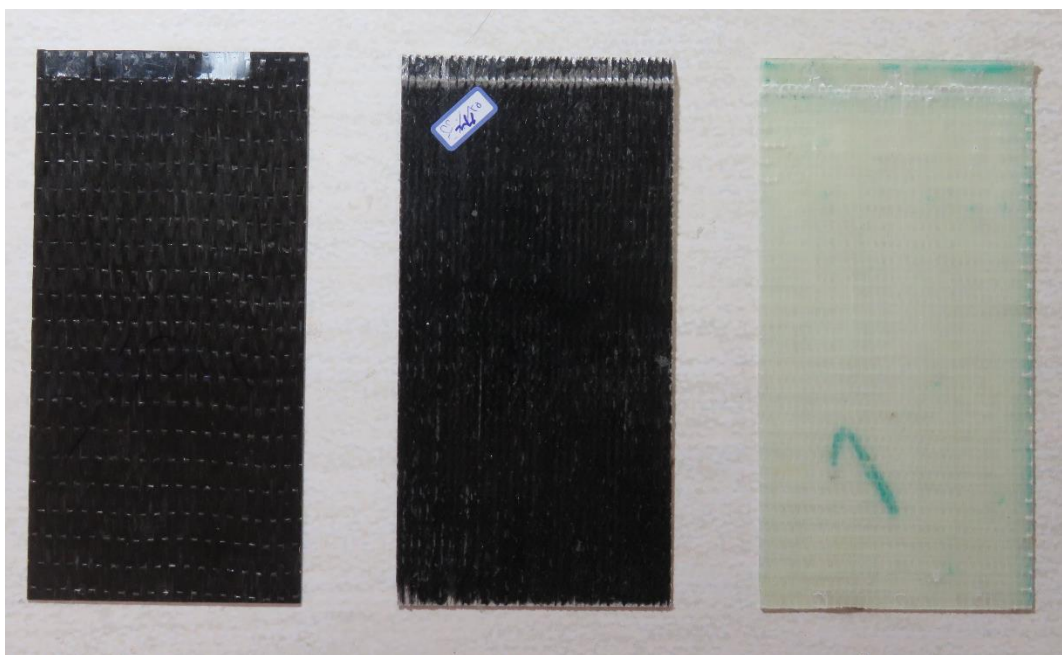
۳-۵-۱- ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی شیشه/اپوکسی از رزین اپوکسی و الیاف شیشه و برای ساخت نمونه‌های آزمایشی کربن/اپوکسی از رزین اپوکسی و الیاف کربن استفاده شد. ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیتی به روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت. هر ورق درمجموع شامل سه لایه‌ی الیاف تک‌جهت با ابعاد ۱۰ در ۲۰ سانتی‌متر بود که تمامی این لایه‌ها با زاویه‌ی صفر درجه بر روی یکدیگر قرار گرفتند. به عبارت بهتر کلیه‌ی الیاف در راستای طول (ضلع بزرگتر) ورق‌ها قرار دارند. برای یکنواختی و صافی سطح زیرین و جدا شدن آسان کامپوزیت بعد از فرایند پخت، از شیشه به عنوان سطح زیرین آن استفاده شد. برای جدایش راحت‌تر، شیشه به واکس مخصوص آغشته و سپس لایه‌گذاری الیاف انجام شد. پس از چیدن هر لایه از الیاف، آن لایه به رزین آغشته شد تا سه لایه ادامه یافت. سپس روی آن‌ها، یک لایه فیلم سوراخ‌دار و یک لایه‌ی آستری مخصوص و یک لایه‌ی نمد جهت جذب رزین اضافی قرار گرفت. درنهایت نوار آب‌بند دور الیاف کشیده و کیسه‌ی خلأ بر روی کل مجموعه نصب شد. برای خروج رزین اضافه و درنتیجه افزایش نسبت الیاف به رزین و نیز بهبود خواص مکانیکی، مجموعه تحت خلأ قرار گرفت. تجهیزات ساخت نمونه در شکل (۳-۱۵) آورده شده است.



شکل (۳-۱۵) ساخت ورق کامپوزیت به کمک لایه چینی دستی تحت فشار خلأ

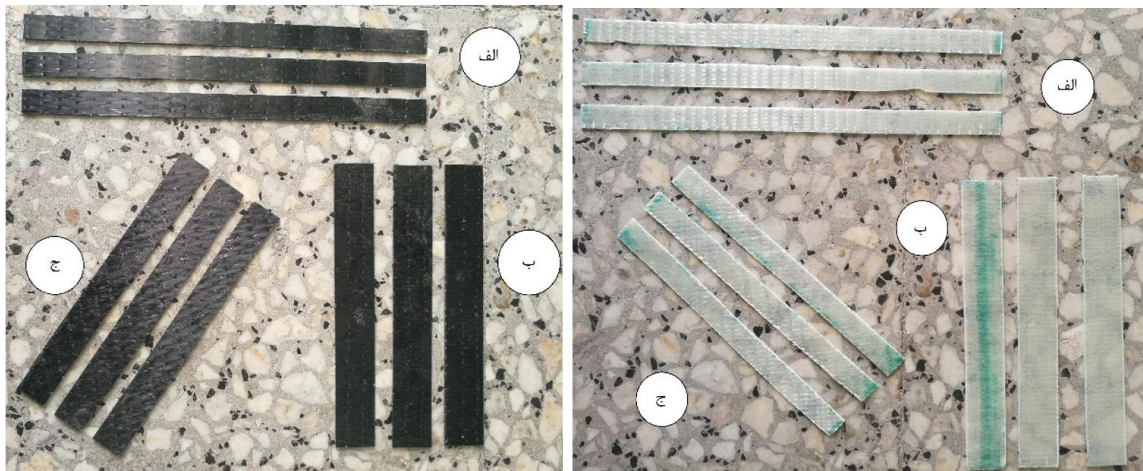
پس از قرار گرفتن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار خلأ، پلاستیک، نمد رزین‌گیر، آستری و فیلم سوراخ‌دار از نمونه‌ها جدا شد و قسمت‌های دور آن‌ها برای رسیدن به نمونه‌ای با ضخامت یکنواخت برش خورد. نمونه‌های ساخته شده در شکل (۳-۱۶) آورده شده است. این نمونه‌ها جهت پخت نهایی و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب به مدت دو روز در دمای محیط قرار گرفت.



شکل (۳-۱۶) نمونه‌ی ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی (راست)، نانولوله‌ی کربنی/شیشه/اپوکسی (وسط) و کربن/اپوکسی (چپ)

۳-۵-۲- ساخت نمونه‌های تست کشش کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی

لازم به ذکر است به منظور مدل کردن کمانش نمونه‌های تیر در نرم افزار المان محدود و اعتبار سنجی آزمون کمانش ورق‌ها نیاز است که مدول یانگ ورق کامپوزیتی که در نمونه‌ها استفاده شده، مشخص باشد. برای این منظور باید آزمایش کشش ساده بر روی نمونه‌هایی صورت گیرد که به‌طور کامل از جنس کامپوزیت‌هایی که تحت آزمون کمانش قرار گرفته اند باشند. برای انجام آزمایش کشش ساده، نمونه‌هایی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی و الیاف کربن/اپوکسی با لایه‌چینی [۰/۳]، [۹۰/۳] و [۴۵/۳] و از هر نمونه، ۳ عدد به روش بیان شده در قسمت قبلی ساخته شد ابعاد نمونه‌ها مطابق تست کشش استاندارد ASTM D 3039 تعیین شده است [۵۸]. نمونه‌های ساخته شده در شکل (۳-۱۷) آورده شده است.



شکل (۳-۱۷) نمونه‌های آزمایش کشش نمونه شیشه/اپوکسی سمت راست و نمونه‌های آزمایش کشش نمونه کربن/اپوکسی سمت چپ، الف: زاویه‌ی الیاف ۰ درجه به طول ۲۵۰ و عرض ۱۵ میلی‌متر، ب: زاویه‌ی الیاف ۹۰ درجه به طول ۱۷۵ و عرض ۲۵ میلی‌متر، ج: زاویه‌ی الیاف ۴۵ درجه به طول ۱۸۰ و عرض ۲۵ میلی‌متر

۳-۶- آزمونهاى انجام شده

۳-۶-۱- آزمایش بار محوری فشاری

آزمایش بار فشاری درون صفحه‌ای بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون انجام گرفت. طول و عرض همه‌ی نمونه‌ها دارای ابعاد 10×20 میلی‌متر می‌باشد. از هر حالت سه نمونه موردآزمون قرار گرفت. به منظور اعمال فشار بر نمونه‌ها، از دو فک فلزی در بالا و پایین ورق‌های کامپوزیتی استفاده شد. ورق‌ها تحت شرایط مرزی دوسر گیردار قرار گرفتند. شکل (۳-۱۸) نمونه‌ی ورق کامپوزیتی را در زمان آزمایش نشان می‌دهد. نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمایش‌ها، در بخش نتایج ارائه می‌شود.



شکل (۳-۱۸) ورق کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری

۳-۶-۲- آزمون کشش ساده

برای انجام آزمایش کشش ساده، نمونه‌های ساخته شده مطابق شکل (۳-۱۹) تحت آزمایش کشش قرار گرفت. برای این منظور از دستگاه هیدرولیک اینسترون استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دقیق کرنش و مدول کششی از یک اکستنسئومتر تک محوری در آزمون کشش استفاده شده است. سرعت جابه‌جایی فک بالایی دستگاه در حین انجام آزمون کشش، بنا به توصیه مسئول آزمایشگاه و کارهای مشابه قبلی، ۲ میلی‌متر در دقیقه بوده است. به کمک نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش، مدول یانگ مربوط به این نمونه‌ها که به ترتیب E_1 ، E_2 و E_x نام‌گذاری می‌شوند، محاسبه شد.



شکل (۳-۱۹) دستگاه آزمون کشش، نمونه تحت کشش و اکستنسومتر بسته شده بر روی آن
برای به دست آوردن کرنش

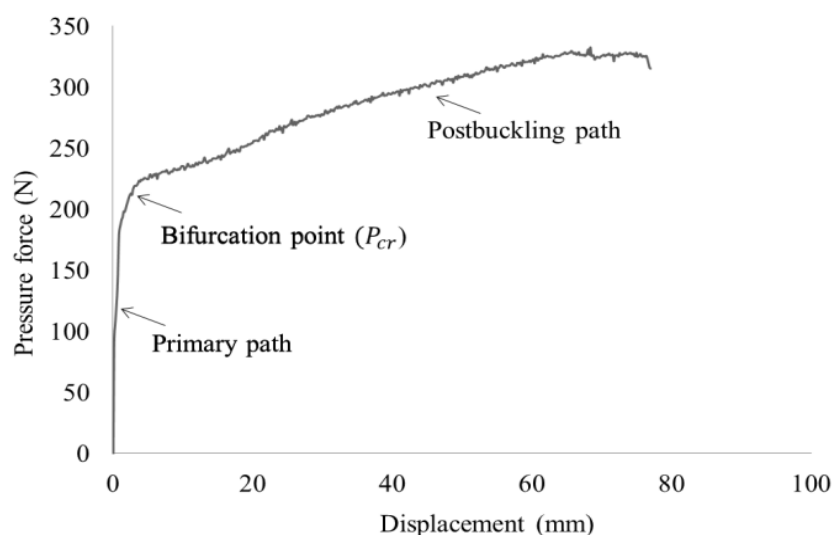
فصل ۴: بررسی نتایج آزمون های کشش و فشار

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا نتایج حاصل از آزمون کمانش نمونه‌ها بررسی شده. سپس نتایج حاصل از آزمون کشش جهت مشخص کردن خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در آخر با استفاده از خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها از روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار اباکوس نتایج حاصل از آزمایش کمانش اعتبار سنجی شد و کمانش تیر به روش المان محدود بررسی گردید.

۴-۲- بررسی نتایج حاصل از آزمون کمانش

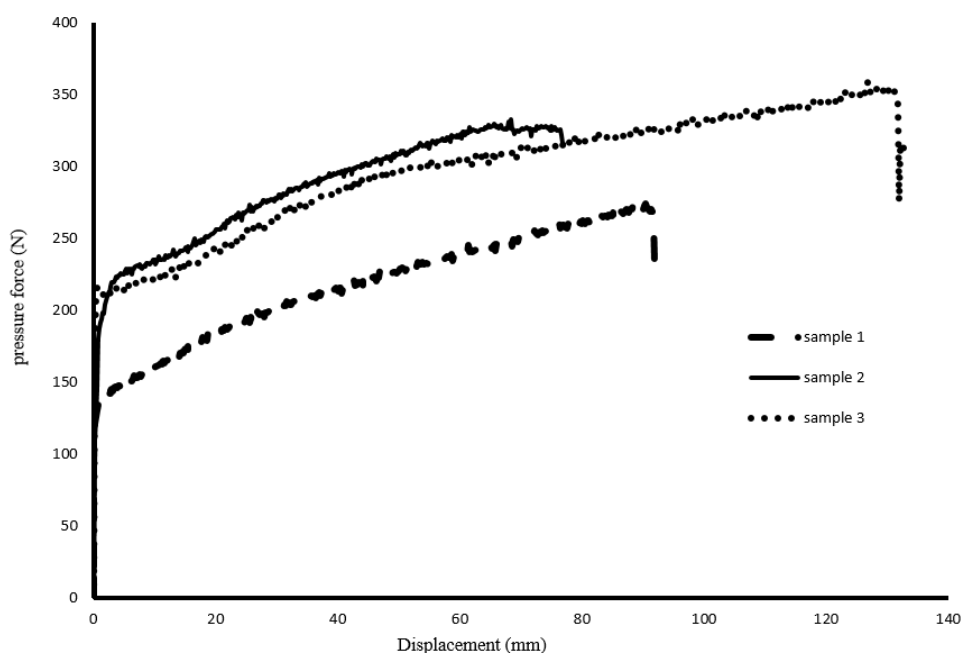
به‌منظور بررسی تأثیر نوع الیاف و همچنین درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر رفتار فشاری ورق کامپوزیتی، آزمایش بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای برای ورق‌های مستطیل شکل الیاف کربن/اپوکسی، الیاف شیشه/اپوکسی و نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌ی کربنی انجام شده است. شکل (۴-۱)، به‌عنوان نمونه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی آورده شده است.



شکل (۴-۱) نمودار نیرو-جابجایی ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری

همان گونه که در این نمودار مشاهده می شود، در ابتدای بارگذاری با افزایش بار، میزان جابه جایی ورق در راستای اعمال بار، تغییرات زیادی را نشان نمی دهد. این قسمت از نمودار، مسیر اولیه^۱ نامیده می شود. مسیر اولیه تا رسیدن بار به بار بحرانی کمانش (P_{cr}) ادامه می یابد. در نقطه ی بحرانی که نقطه ی دوشاخگی^۲ نیز نامیده می شود، رفتار نمودار تغییر کرده و با افزایش بار، میزان جابه جایی تغییر زیادی را نشان می دهد. این قسمت از نمودار که تا نقطه ی شکست نمونه ادامه پیدا می کند، مسیر پس کمانش^۳ نامیده می شود.

همان طور که بیان شد از هر جنس ورق، تعداد سه نمونه ساخته شده و آزمایش فشار بر روی آنها انجام گرفته است. در ادامه نمودارهای نیرو-جابه جایی نمونه ها مشاهده می شود.

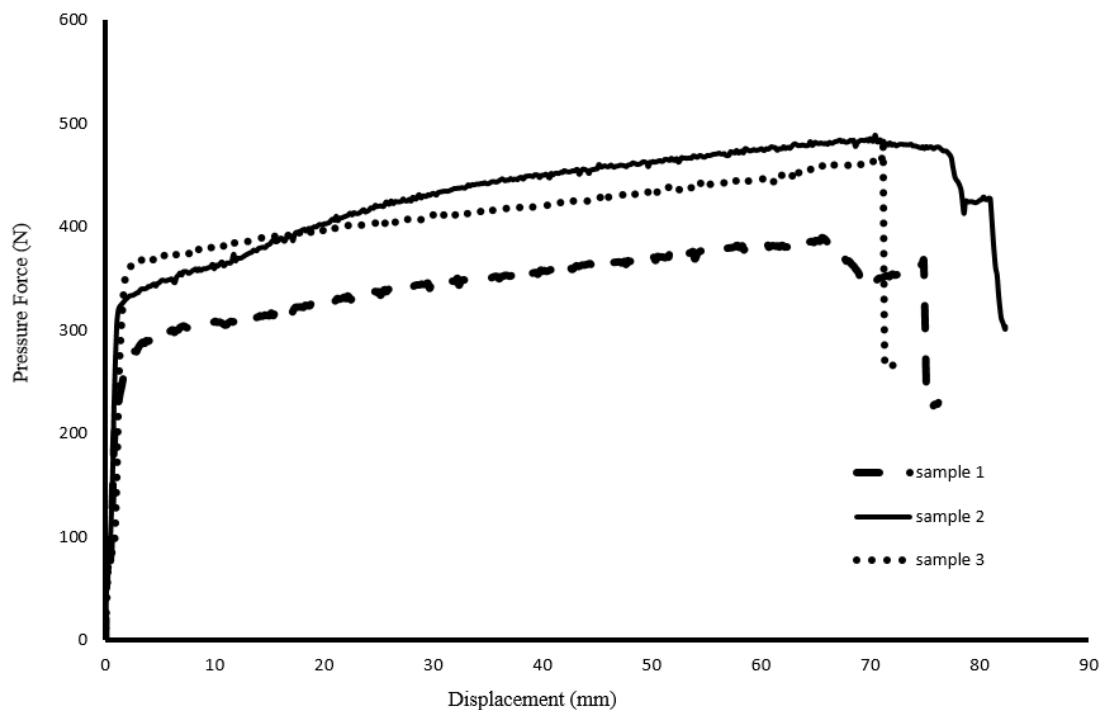


شکل (۴-۲) نمودار نیرو-جابه جایی برای هر سه نمونه ی الیاف شیشه / اپوکسی

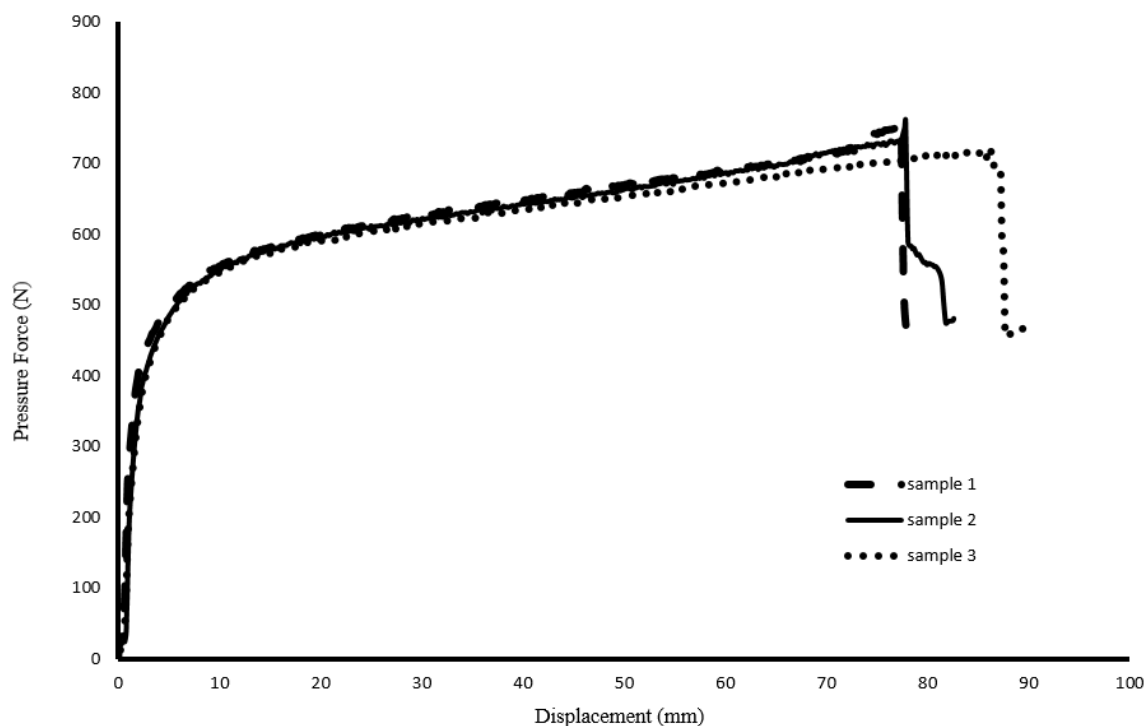
¹ Primary or fundamental path

² Bifurcation point

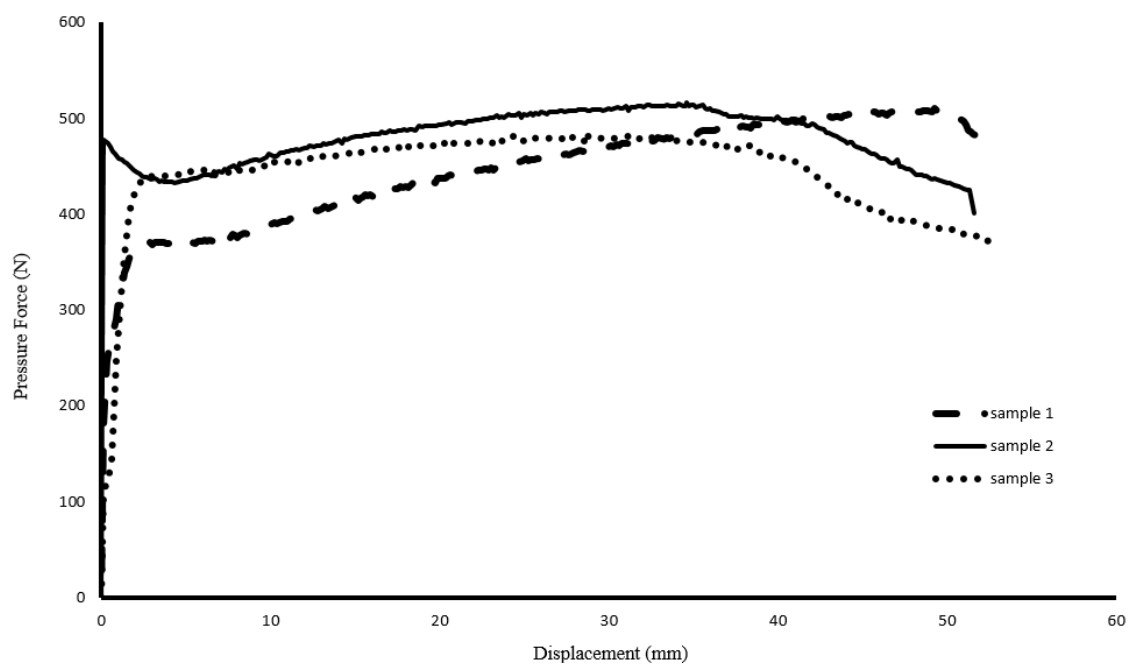
³ Postbuckling path



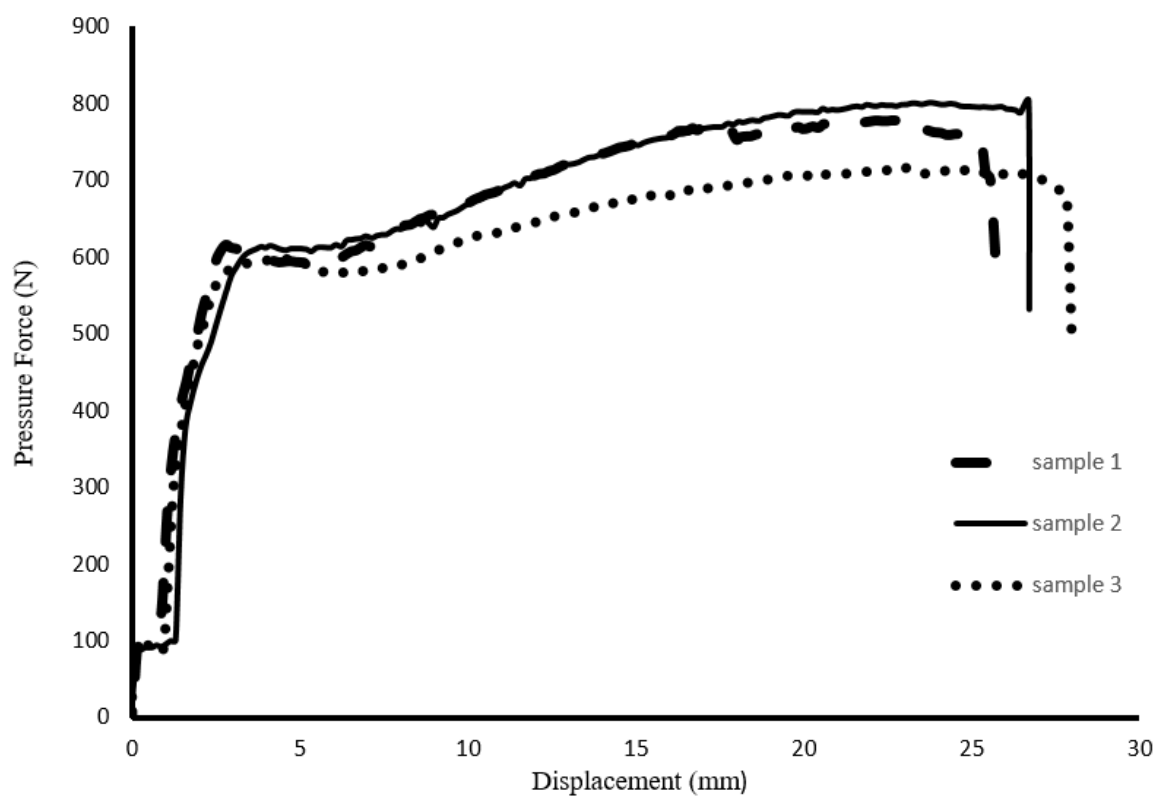
شکل (۳-۴) نمودار نیرو-جابجایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به همراه ۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربنی



شکل (۴-۴) نمودار نیرو-جابجایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به همراه ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربنی

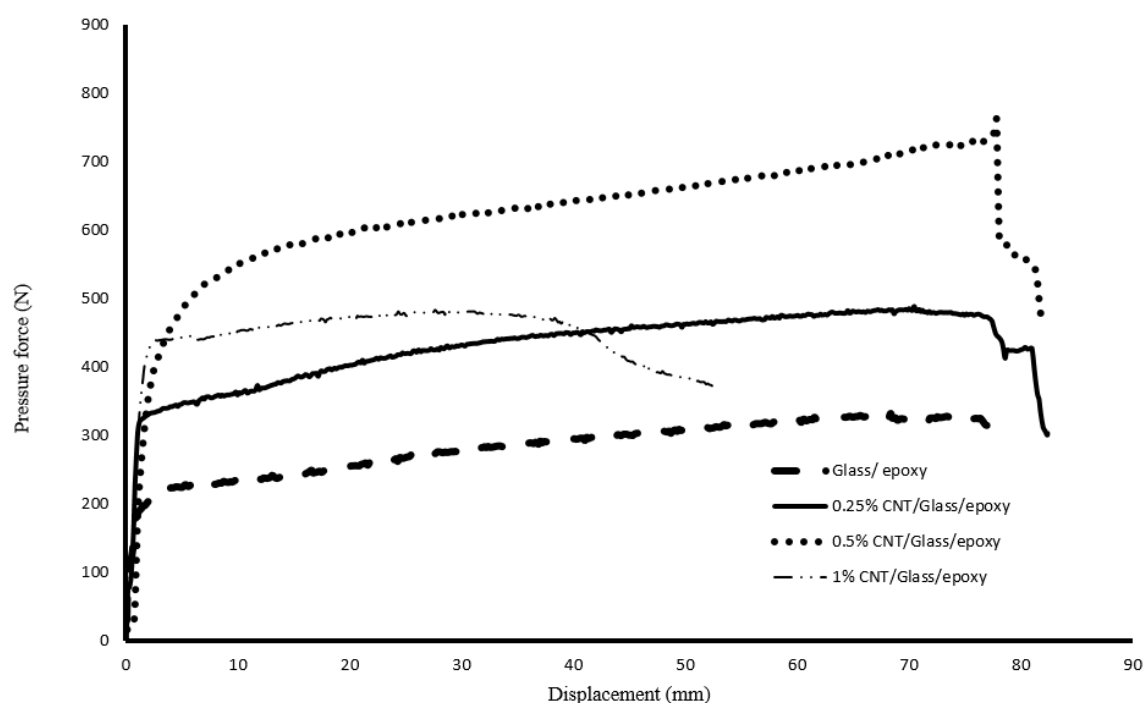


شکل (۴-۵) نمودار نیرو-جابجایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی به همراه ۱ درصد نانولوله‌ی کربنی

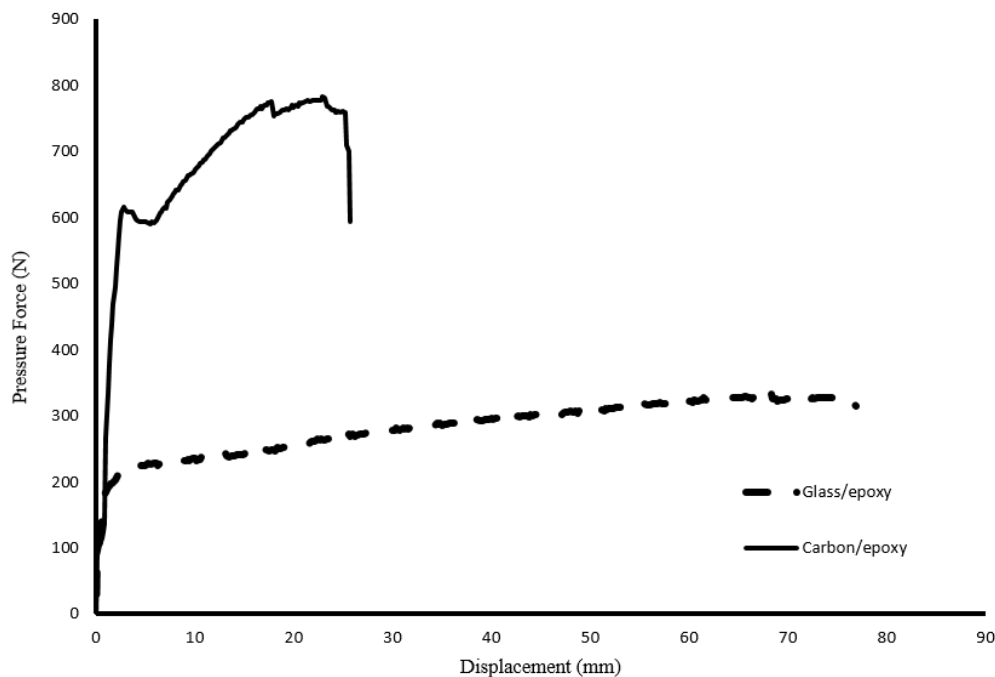


شکل (۴-۶) نمودار نیرو-جابجایی برای هر سه نمونه‌ی الیاف کربن/اپوکسی

در شکل‌های (۷-۴) و (۸-۴)، نمودار نیرو-جاب‌جایی به‌دست آمده از آزمایش برای نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف نانولوله‌ی کربنی آورده شده و با نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ی الیاف شیشه/اپوکسی و الیاف کربن/اپوکسی مقایسه شده است. در این شکل‌ها برای هر جنس ورق، تنها یک نمودار به‌عنوان نماینده، جهت بیان رفتار آن ماده آورده می‌شود.



شکل (۷-۴) اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی با درصد‌های وزنی مختلف بر نمودار نیرو-جاب‌جایی ورق‌های کامپوزیتی



شکل (۴-۸) تأثیر تغییر نوع الیاف از شیشه به کربن بر نمودار نیرو-جابجایی ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی

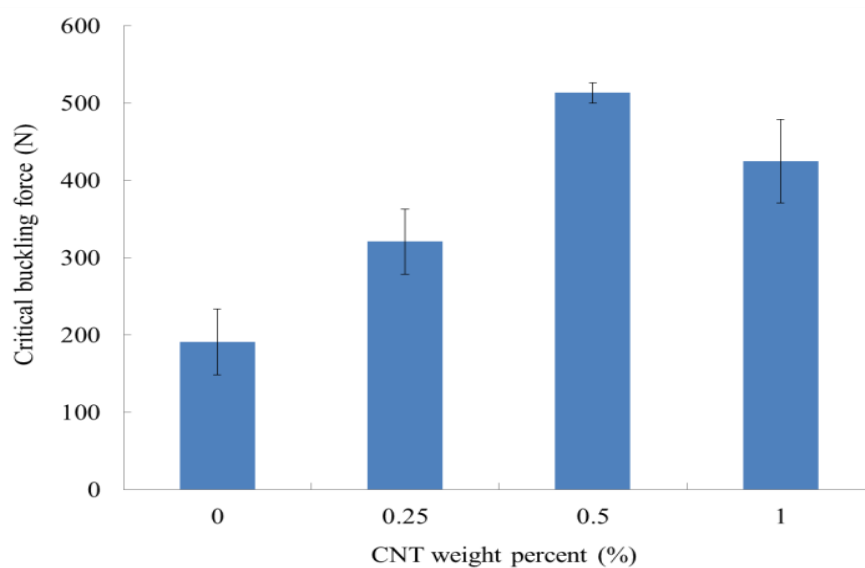
با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی، پارامترهای: بار بحرانی کمانش (P_{cr})، بیشینه نیروی قابل تحمل پیش از شکست (P_{max})، انرژی جذب شده‌ی شکست (E_{abc}) و انرژی جذب شده‌ی ویژه (E_s) که نسبت انرژی جذب شده‌ی شکست به جرم نمونه است، به دست آمد [۵۹].

پارامترهای استخراج شده برای هر جنس ورق، در جداول زیر آورده شده است و توسط نمودارهای میله‌ای مورد مقایسه گرفت. همچنین مقدار انحراف از استاندارد، که بیانگر پراکندگی اطلاعات استخراج شده از سه نمونه با جنس مشابه نسبت به مقدار میانگین است، به صورت میله‌ی خطا در نمودارها آورده شده است. همان‌گونه که این نمودارها نشان می‌دهند، پارامترهای اخذ شده از نمونه‌هایی با جنس یکسان، انحراف قابل قبولی از مقدار میانگین را نشان می‌دهند. تنها در یک مورد از نمونه‌های الیاف شیشه/اپوکسی، مقادیر پارامترها با دو نمونه‌ی دیگر اختلاف زیادی را نشان می‌دادند که این نمونه از جدول داده‌ها حذف شد. دلیل آن، احتمالاً مربوط به خطاهای ایجاد شده در هنگام ساخت یا آزمایش نمونه بوده است.

۴-۲-۱- بررسی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی

جدول (۴-۱) بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری

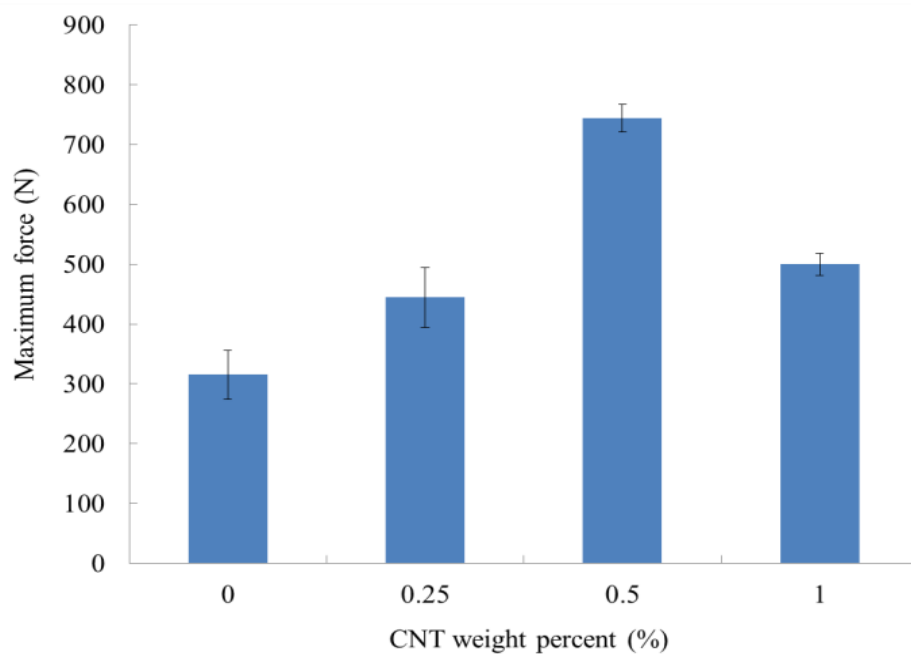
$P_{cr}(N)$	$P_{cr}(N)$	$P_{cr}(N)$	$P_{cr}(N)$	مشخصات کامپوزیت
میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	
۱۹۱/۱۴	۲۱۱/۵۹	۲۱۹/۲۶	۱۴۲/۵۸	شیشه / اپوکسی
۳۲۱/۱۶	۳۶۳/۸۷	۳۱۹/۹	۲۷۹/۷	۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربن / شیشه / اپوکسی
۵۱۳/۴۲	۵۰۲/۰۲	۵۱۰/۱۳	۵۲۸/۱۲	۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن / شیشه / اپوکسی
۴۲۴/۸۷	۴۳۹/۶	۴۷۰/۱۴	۳۶۴/۸۸	۱ درصد نانولوله‌ی کربن / شیشه / اپوکسی



شکل (۴-۹) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی

جدول (۴-۲) بیشینه نیروی قابل تحمل پیش از شکست ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری

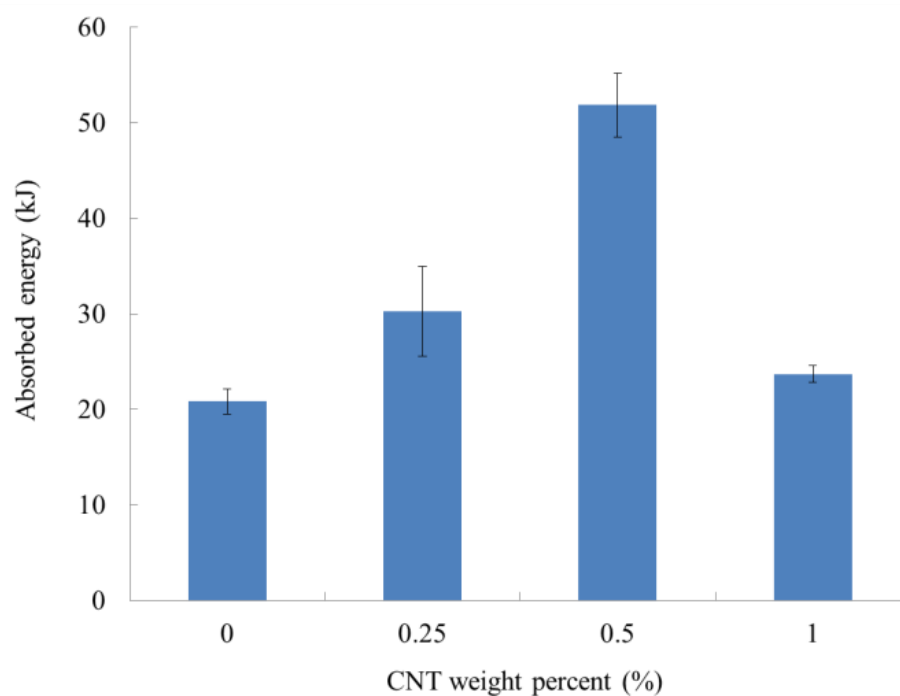
مشخصات کامپوزیت	$P_{max}(N)$ نمونه اول	$P_{max}(N)$ نمونه دوم	$P_{max}(N)$ نمونه سوم	$P_{max}(N)$ میانگین
شیشه/اپوکسی	۲۷۰/۱۸	۳۲۵/۵۵	۳۵۰/۳۵	۳۱۵/۳۶
۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۳۸۶/۹۳	۴۷۸/۱	۴۶۸/۸۲	۴۴۴/۶۲
۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۷۵۱/۶۵	۷۶۱/۶۵	۷۱۷/۶۹	۷۴۳/۶۶
۱ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۵۰۶/۹۲	۵۱۳/۱۷	۴۷۸/۹۹	۴۹۹/۶۹



شکل (۴-۱۰) مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی

جدول (۴-۳) مقدار انرژی جذب شده‌ی ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی حاصل از بارگذاری فشاری

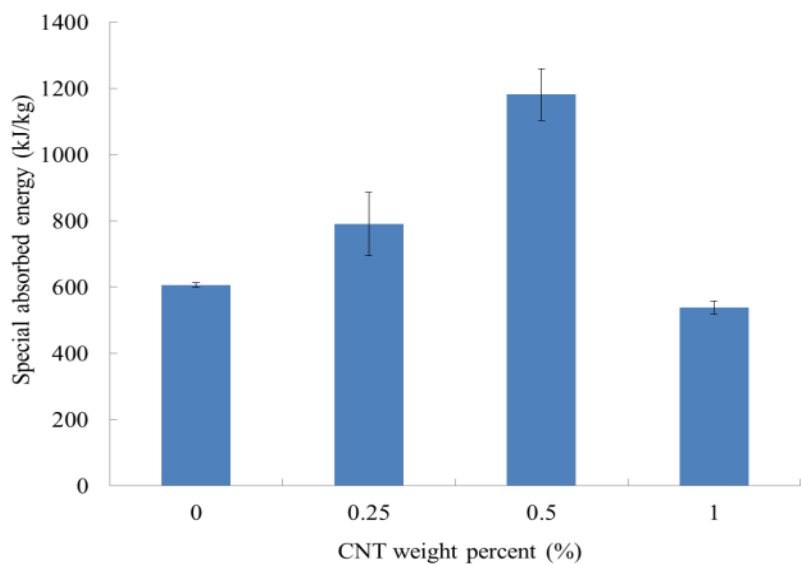
مشخصات کامپوزیت	$E_{abc}(kj)$ نمونه اول	$E_{abc}(kj)$ نمونه دوم	$E_{abc}(kj)$ نمونه سوم	$E_{abc}(kj)$ میانگین
شیشه/اپوکسی	۱۹/۹۴	۲۱/۸	۳۹/۴۹	۲۰/۸۷
۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/اپوکسی	۲۵/۹۹	۳۵/۳۱	۲۹/۴۶	۳۰/۲۵
۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/اپوکسی	۴۹/۰۱	۵۰/۹۹	۵۵/۵۶	۵۱/۸۵
۱ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/اپوکسی	۲۳/۱۷	۲۴/۷	۲۳/۳	۲۳/۷۲



شکل (۴-۱۱) مقدار انرژی جذب شده برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی

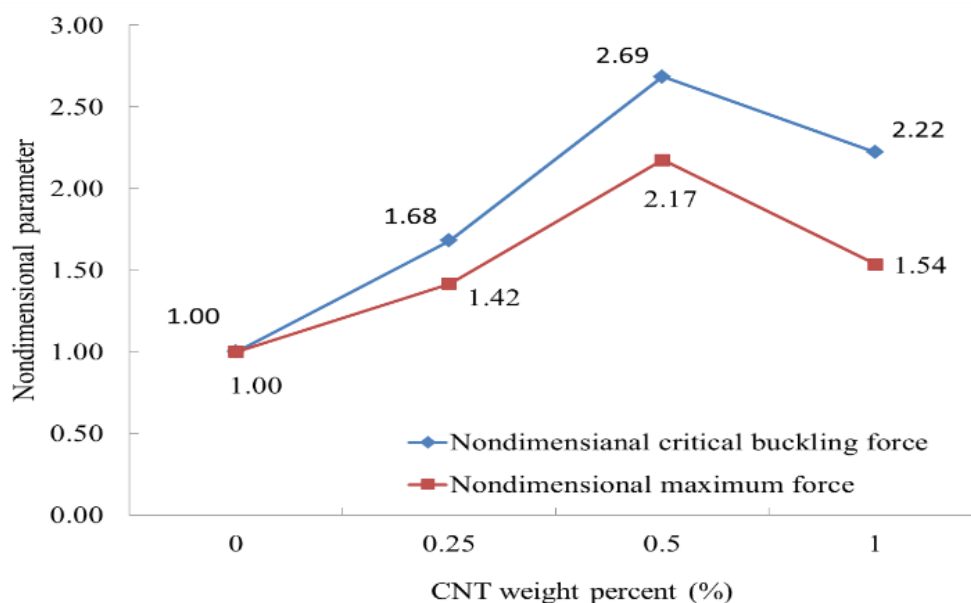
جدول (۴-۴) مقدار انرژی جذب شده ویژه ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی حاصل از بارگذاری فشاری

مشخصات کامپوزیت	$E_s(kj/kg)$ نمونه اول	$E_s(kj/kg)$ نمونه دوم	$E_s(kj/kg)$ نمونه سوم	$E_s(kj/kg)$ میانگین
شیشه/اپوکسی	۶۰۰/۲۴	۶۱۰/۶۴	۱۱۴۹/۳	۶۰۵/۴۴
۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۷۱۰/۱	۸۹۶/۴۲	۷۶۶/۱۸	۷۹۰/۹
۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۱۱۱۹/۲	۱۱۵۶/۴۹	۱۲۶۹/۶۵	۱۱۸۱/۷۸
۱ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۵۳۴/۱۱	۵۵۹/۳۲	۵۲۲/۰۷	۵۳۸/۵



شکل (۴-۱۲) مقدار انرژی جذب شده ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق-های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی

برای درک صحیح‌تر تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی مختلف درون رزین اپوکسی، پارامترهای بررسی‌شده بدون بعد شدند. برای بدون بعد کردن هر پارامتر، مقدار آن بر مقدار پارامتر مشابه، حاصل از آزمایش فشار برای ورق الیاف شیشه/ اپوکسی تقسیم شد. بنابراین برای ورق الیاف شیشه/ اپوکسی، مقادیر تمامی پارامترهای بدون بعد، برابر با ۱ است. مقادیر بدون بعد بار بحرانی کمانش

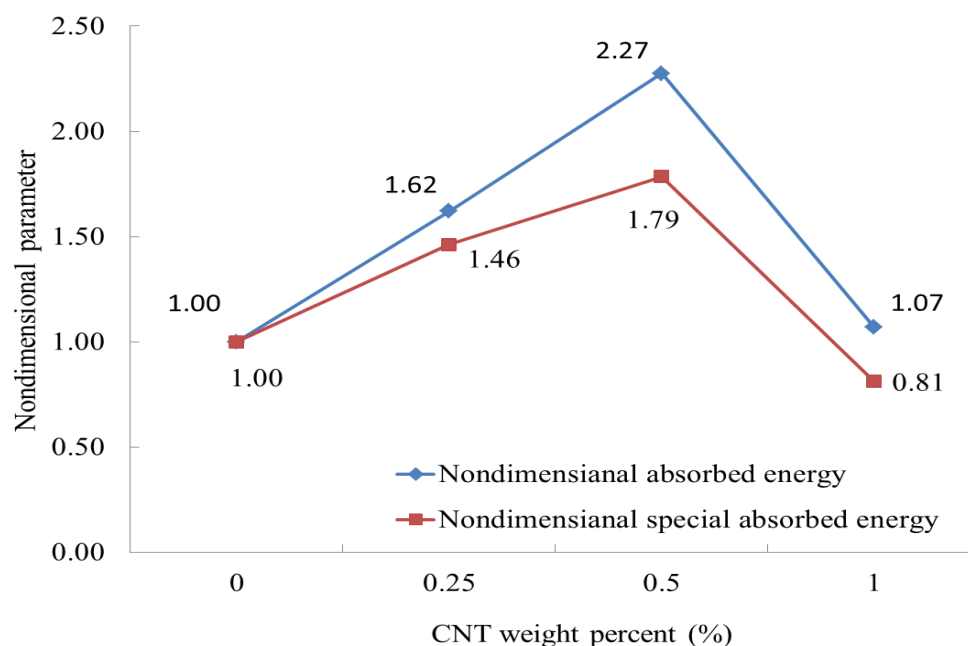


شکل (۴-۱۳) نمودار بی بعد بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی

و بیش‌ترین نیروی قابل تحمل برحسب درصد وزنی نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. مطابق شکل، افزودن ۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، بار بحرانی کمانش را نسبت به ورق الیاف شیشه/ اپوکسی، حدود ۶۸ درصد افزایش می‌دهد. با افزایش میزان نانولوله‌ی کربنی به ۰/۵ درصد وزنی، میزان بار بحرانی کمانش به بیشتر از ۲/۵ برابر مقدار بار بحرانی کمانش ورق الیاف شیشه/ اپوکسی می‌رسد. افزودن بیشتر نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، یعنی مقدار ۱/۰ درصد وزنی، باعث توقف روند صعودی میزان بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی شده و نمودار، روند نزولی پیدا می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار نانولوله‌ی کربنی درون رزین اپوکسی، توزیع یکنواخت نانولوله‌ها درون ماده‌ی

زمینه مشکل تر می شود. ایجاد کلوخه های نانولوله درون رزین اپوکسی و عدم پراکندگی مناسب آن ها از عوامل کاهش تأثیر افزودن نانولوله بر افزایش مقدار بار بحرانی کمانش ورق های نانولوله کربنی / الیاف شیشه / اپوکسی است.

در شکل (۴-۱۴) مقادیر بدون بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده ی ویژه نشان داده شده است. همان گونه که این شکل نشان می دهد، افزودن مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله ی کربنی به رزین اپوکسی، مقدار انرژی جذب شده تا لحظه ی شکست را نسبت به ورق الیاف شیشه / اپوکسی به ترتیب ۶۲، ۱۲۷ و ۷ درصد افزایش می دهد. مقدار این تأثیرها بر انرژی جذب شده ویژه نیز در شکل (۴-۱۴) آمده است. با توجه به این شکل و اعداد ذکر شده در جدول (۴-۳)، مشاهده می شود که بیشترین مقدار انرژی جذب شده ی ویژه متعلق به نمونه با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله ی کربنی به میزان $1181/78 \text{ kJ/kg}$ می باشد. انرژی جذب شده ی ویژه در حالت بدون نانولوله ی کربنی kJ/kg ۶۳۳/۴۴ می باشد و کمترین آن به ورق های با ۱/۰ درصد وزنی نانولوله ی کربنی به میزان kJ/kg ۵۱۳/۳۷ تعلق دارد.



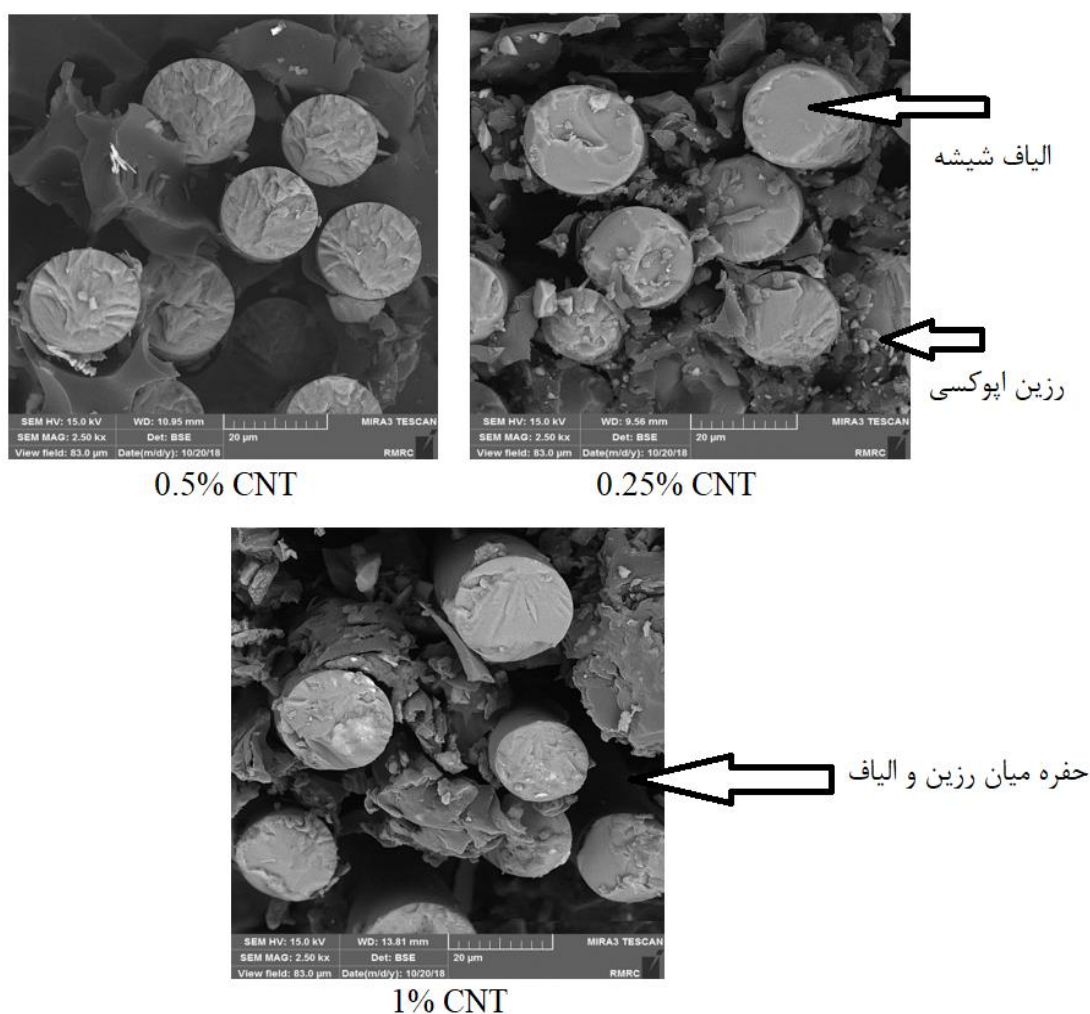
شکل (۴-۱۴) نمودار بی بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده ی ویژه بر حسب نانولوله ی افزوده شده به ماده ی زمینه ی ورق های کامپوزیتی نانولوله ی کربنی / الیاف شیشه / اپوکسی

کاهش انرژی جذب شده‌ی ویژه در ورق‌های کامپوزیت با ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی در مقایسه با ورق‌های فاقد نانولوله، به دلیل افزایش وزن آن‌ها و همچنین شکنندگی حاصل از کلوخه شدن نانولوله-های کربنی می‌باشد. نتیجه‌ی حاصل بیانگر این است که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به ورق‌های کامپوزیت، انرژی جذب‌شده‌ی ویژه‌ی آن‌ها را حدود ۷۹ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله، افزایش می‌دهد.

۴-۲-۲- تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM)

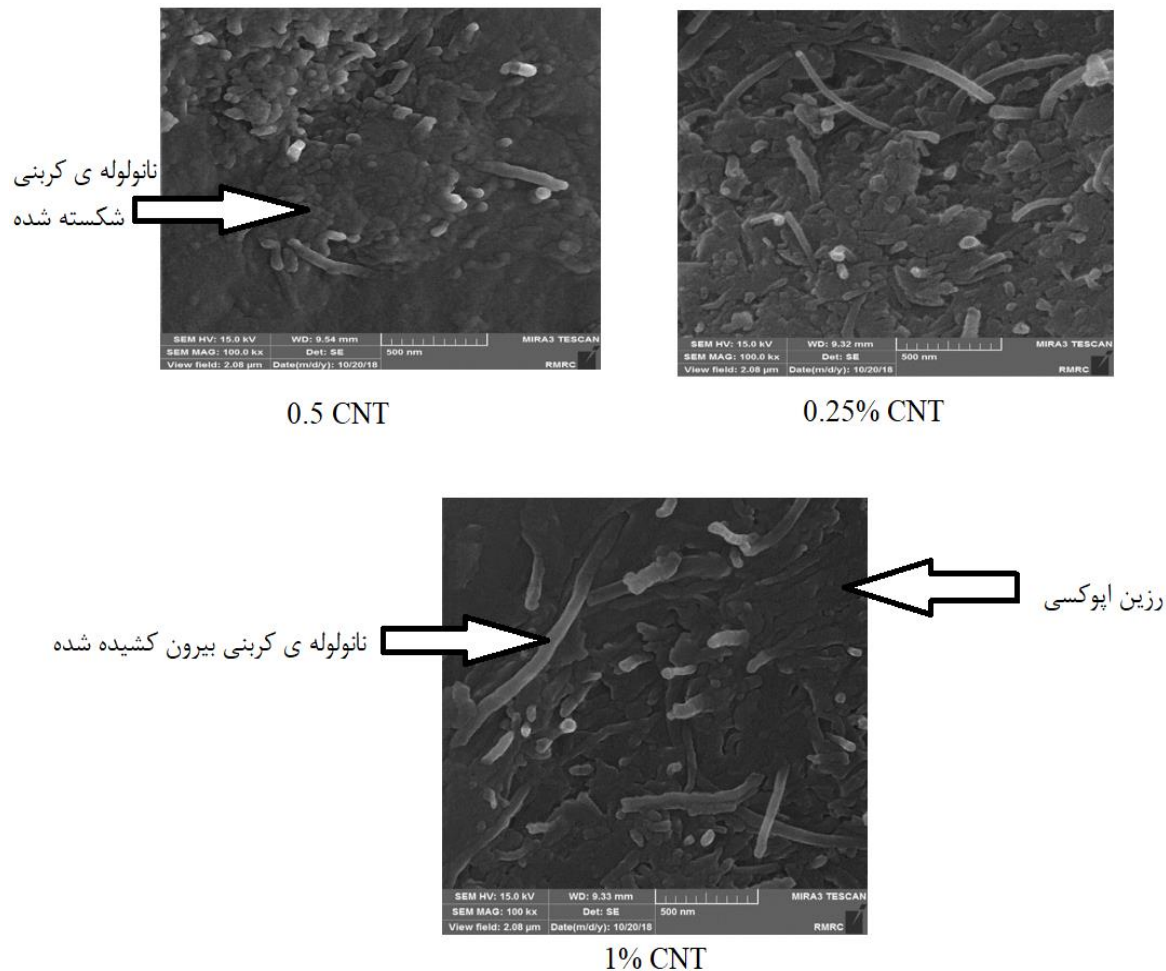
جهت گرفتن تصاویر SEM ابتدا باید فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شود. برای انجام این فرایند در ابتدا برشی به طول تقریبی ۱ سانتی‌متر از نمونه‌های شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌ی کربن تهیه می‌شود. از آنجا که الکترون حین عملیات تصویر برداری باید بتواند از سطح نمونه عبور کند، کل سطح نمونه بجز سطح شکست توسط یک ورق نازک آلومینیومی احاطه می‌شود و سپس توسط دستگاه پوشش دهی، پوششی از جنس آلیاژ طلا- پالادیوم در شرایط خلأ روی سطح شکست نمونه نشانداده می‌شود. نمونه‌ها پس از آماده سازی روی جانمونه‌ای میکروسکپ الکترونی روبشی قرار می‌گیرند و آماده‌ی تصویر برداری هستند. شکل (۴-۱۵) سطح مقطع سه نمونه کامپوزیت تقویت شده با ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی را نشان می‌دهد. در این تصاویر میزان چسبندگی بین الیاف و رزین مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود. بیش‌ترین میزان چسبندگی رزین به الیاف متعلق به نمونه‌ی دارای ۰/۵ درصد وزنی نانولوله می‌باشد که حاکی از توزیع مناسب آن در رزین همچنین پیوند قوی بین ماده‌ی زمینه، نانولوله و الیاف می‌باشد. میزان چسبندگی میان الیاف و رزین نسبت به حالت تقویت شده با ۰/۲۵ وزنی نانولوله بهبود چشم‌گیری داشته است. با افزایش درصد وزنی نانولوله به ۱ درصد کاهش میزان چسبندگی میان الیاف و رزین مشاهده می‌شود که علت آن کلوخه شدن نانولوله‌ها در نتیجه توزیع نامناسب آن در ماده‌ی زمینه و پیوند ضعیف بین

ماده‌ی زمینه، نانولوله و الیاف می‌باشد. در تصاویر (۴-۱۶) پیوند میان ماده‌ی زمینه و نانولوله مورد بررسی قرار گرفته است. در این تصاویر شاهد دو پدیده هستیم که ما را در بررسی پیوند میان نانولوله و ماده‌ی زمینه یاری می‌کند. اولی نانولوله‌هایی هستند که دچار شکست شده‌اند. این امر حاکی از پیوند قوی ماده‌ی زمینه و نانولوله‌ی کربنی است. یعنی ارتباط قوی بین ماده‌ی زمینه و نانولوله مانع از خروج نانولوله از ماده‌ی زمینه در هنگام جدا سازی نمونه شده و در نتیجه نانولوله دچار شکست گردیده است.



شکل (۴-۱۵) رزین اپوکسی تقویت شده با درصدهای مختلف نانولوله‌ی کربنی / الیاف شیشه

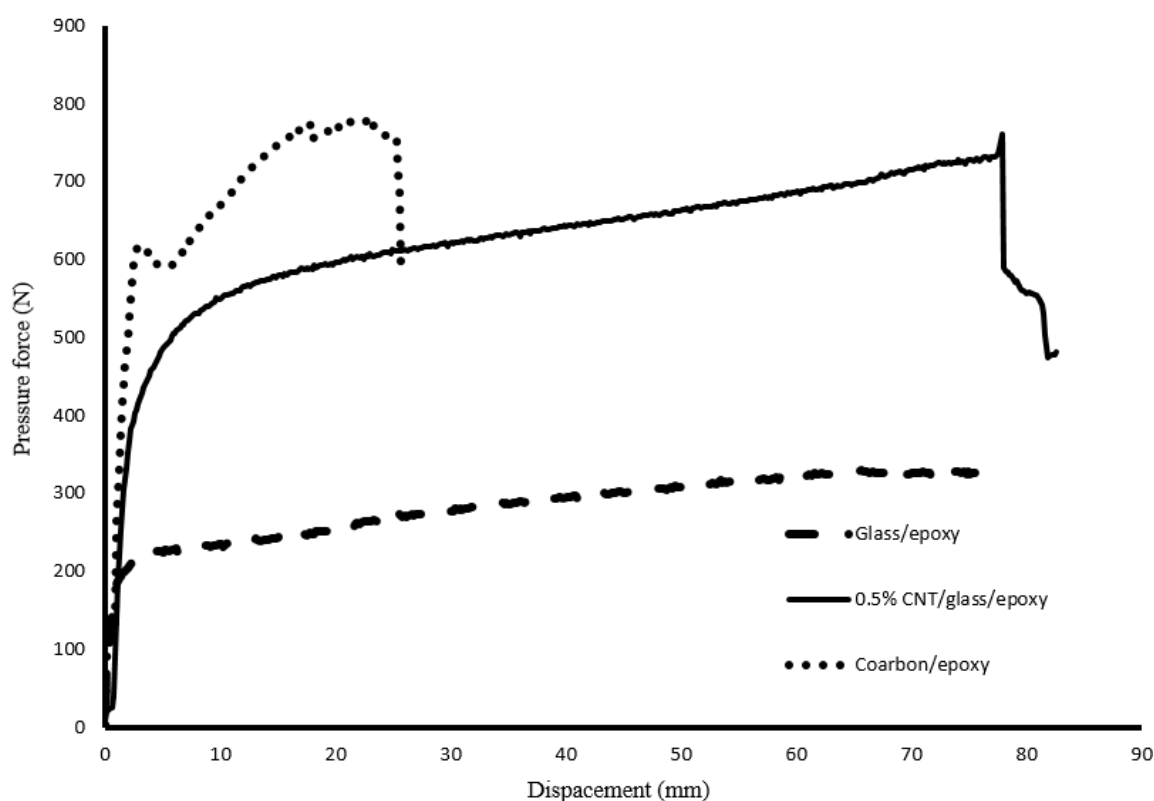
دومین پدیده مکانیزم بیرون کشیده شدن نانولوله‌های کربنی از درون رزین می‌باشد. که بیان‌گر ارتباط ضعیف بین نانولوله و ماده‌ی زمینه می‌باشد. در تصاویر (۴-۱۶) خواهید دید میزان شکست در نانولوله‌های کربن با افزایش درصد وزنی آن از ۰/۲۵ درصد وزنی به ۰/۵ درصد وزنی افزایش می‌یابد که بیان‌گر قوی‌تر شدن پیوند بین نانولوله و ماده‌ی زمینه است اما با افزایش دوباره‌ی درصد وزنی نانولوله از ۰/۵ به ۱ درصد وزنی، مقدار نانولوله‌ی شکسته کاهش و میزان نانولوله‌ی بیرون کشیده شده افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان کاهش ترشوندگی نانولوله به‌دلیل افزایش درصد وزنی دانست.



شکل (۴-۱۶) رزین اپوکسی تقویت‌شده با درصدهای مختلف نانولوله‌ی کربن

۴-۲-۲- بررسی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی و تغییر در نوع الیاف

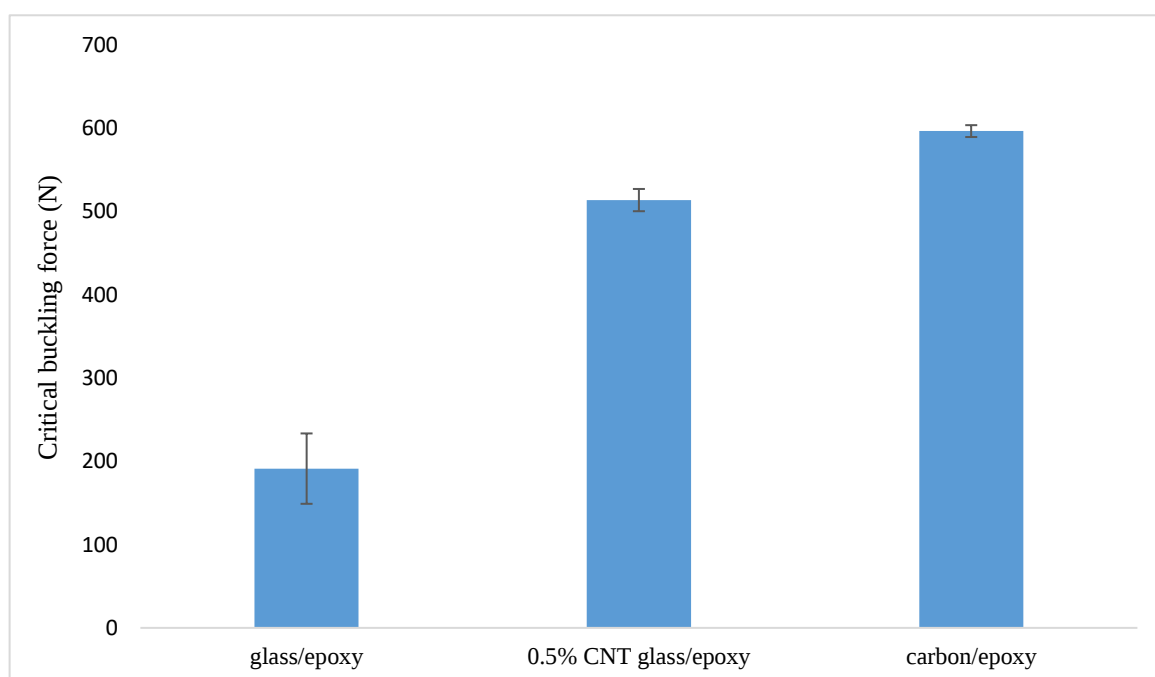
برای این منظور پارامترهای حاصل از نمودار نیرو- جابجایی برای سه ورق کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی، ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی و کربن/ اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۴-۱۷)، نمودارهای نیرو- جابه‌جایی به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌های ساخته شده از الیاف شیشه/ اپوکسی و ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی آورده شده و با نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌ی الیاف کربن/ اپوکسی مقایسه شده‌اند. در این شکل نیز برای هر جنس ورق، تنها یک نمودار به‌عنوان نماینده، جهت بیان رفتار آن ماده آورده شده است.



شکل (۴-۱۷) نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های شیشه/ اپوکسی، ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی و کربن/ اپوکسی

جدول (۴-۵) بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری

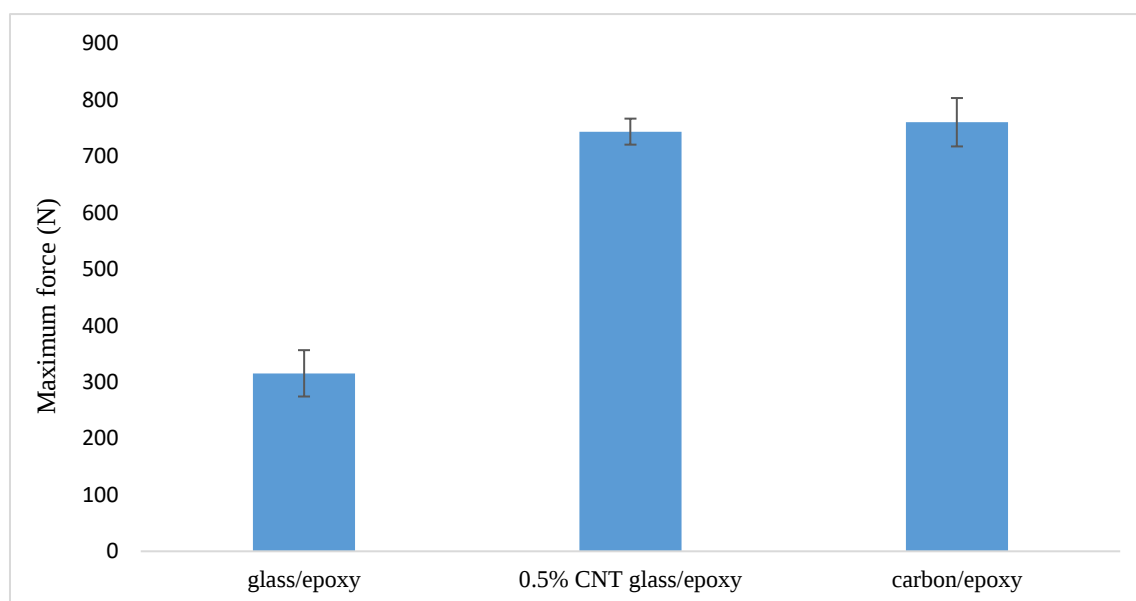
مشخصات کامپوزیت	$P_{cr}(N)$ نمونه اول	$P_{cr}(N)$ نمونه دوم	$P_{cr}(N)$ نمونه سوم	$P_{cr}(N)$ میانگین
شیشه/اپوکسی	۱۴۲/۵۸	۲۱۹/۲۶	۲۱۱/۵۹	۱۹۱/۱۴
۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۵۲۸/۱۲	۵۱۰/۱۳	۵۰۲/۰۲	۵۱۳/۴۲
کربن/اپوکسی	۶۰۳/۷۶	۵۹۵/۳۵	۵۸۹/۵۸	۵۹۶/۲۳



شکل (۴-۱۸) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

جدول (۴-۶) بیشینه نیروی قابل تحمل پیش از شکست ورق‌های کامپوزیتی حاصل از آزمایش بارگذاری فشاری

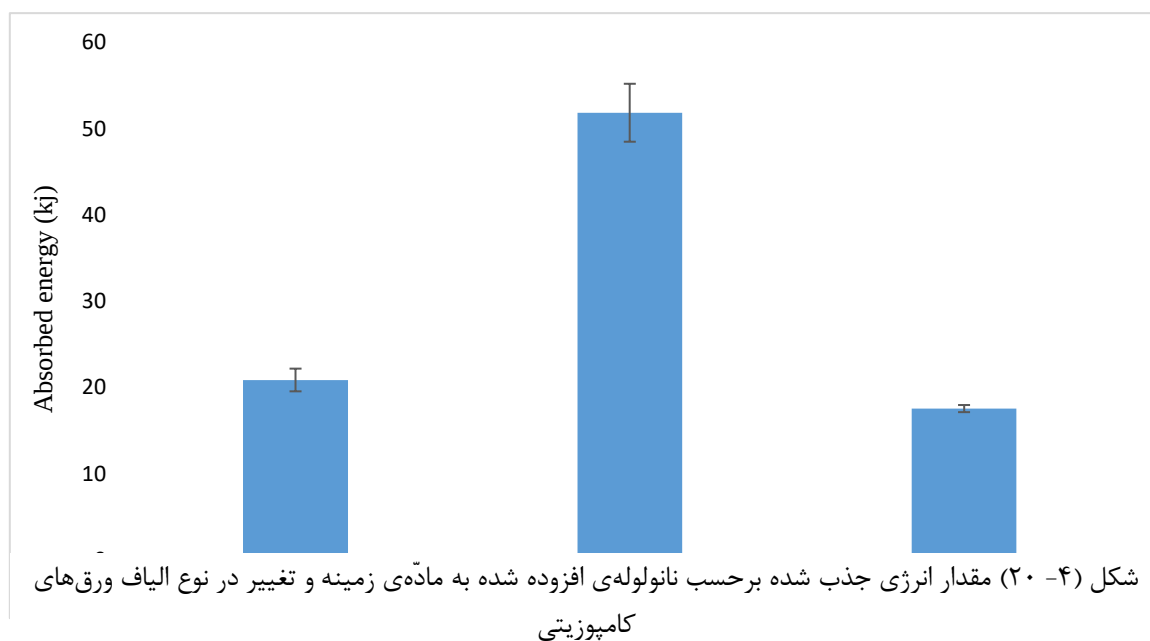
$P_{max}(N)$	$P_{max}(N)$	$P_{max}(N)$	$P_{max}(N)$	مشخصات کامپوزیت
میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	
۳۱۵/۳۶	۳۵۰/۳۵	۳۲۵/۵۵	۲۷۰/۱۸	شیشه/اپوکسی
۷۴۳/۶۶	۷۱۷/۶۹	۷۶۱/۶۵	۷۵۱/۶۵	۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی
۷۶۰/۳	۷۱۲/۵۹	۷۹۵/۶۶	۷۷۲/۶۵	کربن/اپوکسی



شکل (۴-۱۹) مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

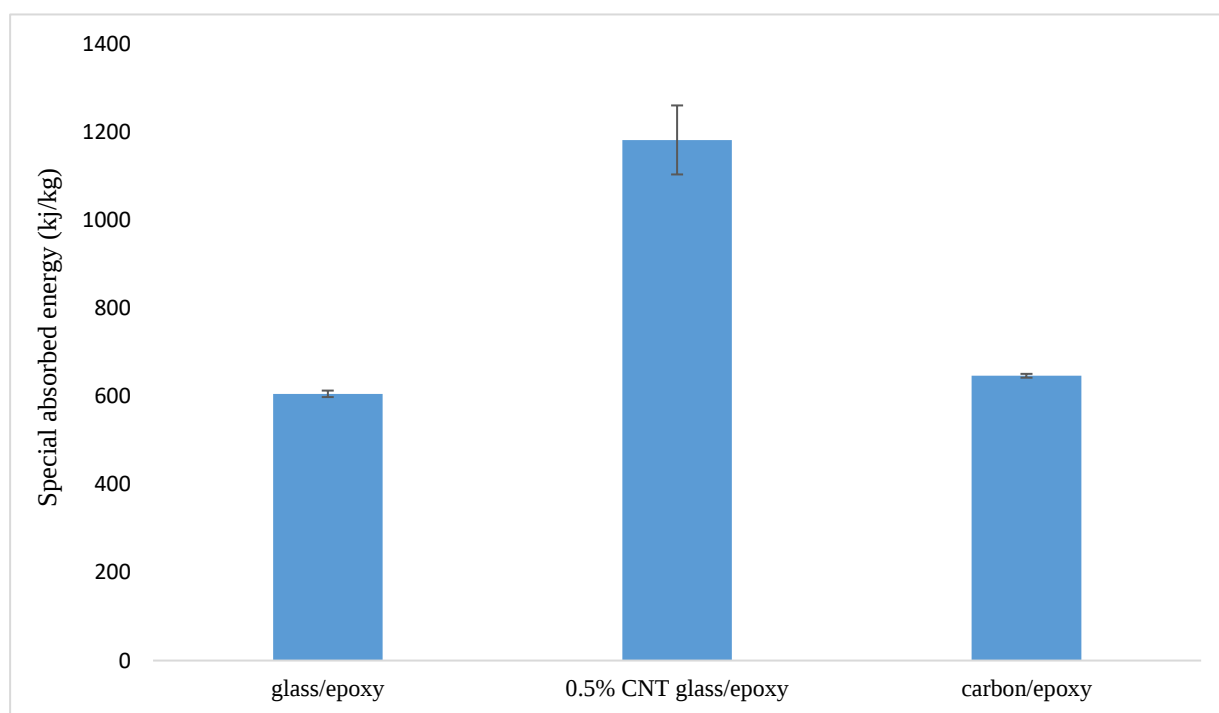
جدول (۴-۷) مقدار انرژی جذب شده‌ی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و کربن حاصل از بارگذاری فشاری

$E_{abc}(kj)$	$E_{abc}(kj)$	$E_{abc}(kj)$	$E_{abc}(kj)$	مشخصات کامپوزیت
میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	
۲۰/۸۷	۳۹/۴۹	۲۱/۸	۱۹/۹۴	شیشه/اپوکسی
۵۱/۸۵	۵۵/۵۶	۵۰/۹۹	۴۹/۰۱	۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی
۱۷/۵۵	۱۷/۵	۱۷/۹۹	۱۷/۱۷	کربن/ اپوکسی



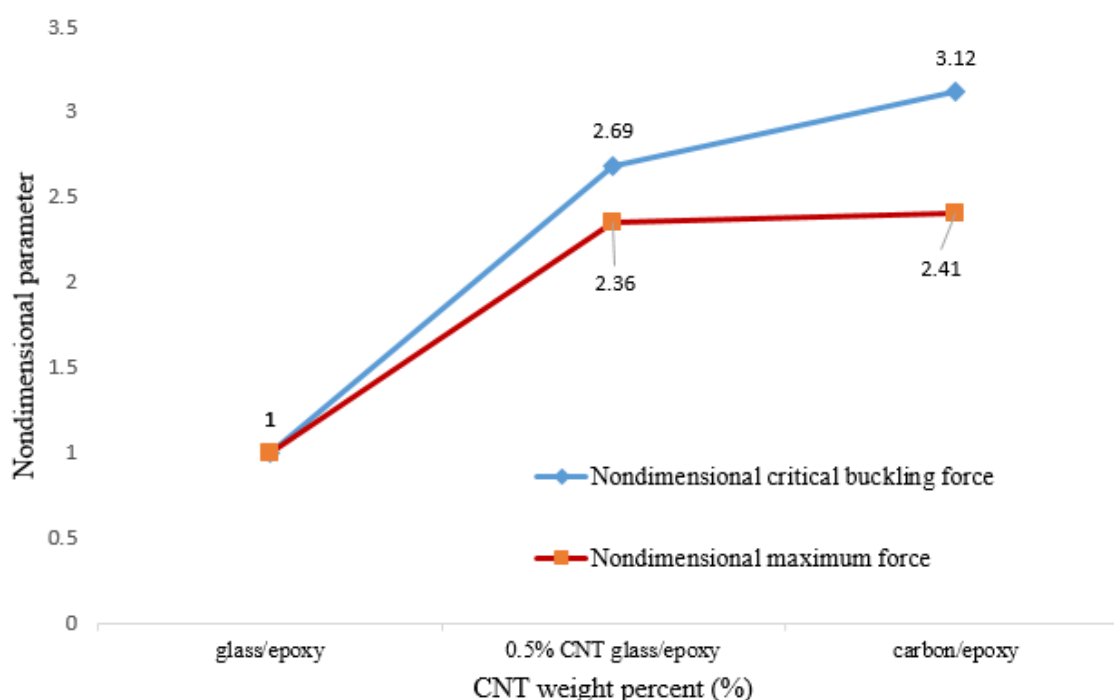
جدول (۴-۸) مقدار انرژی جذب شده و ویژه ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و کربن حاصل از بارگذاری فشاری

مشخصات کامپوزیت	E_s (kj/kg)	E_s (kj/kg)	E_s (kj/kg)	E_s (kj/kg)
نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین	
شیشه/ اپوکسی	۶۰۰/۳۴	۶۱۰/۶۴	۱۱۴۹/۳	۶۰۵/۴۴
۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی	۱۱۱۹/۲	۱۱۵۶/۴۹	۱۲۶۹/۶۵	۱۱۸۱/۷۸
کربن/ اپوکسی	۶۴۱/۳۹	۶۴۹/۴۶	۶۴۸/۳۹	۶۴۶/۴۱



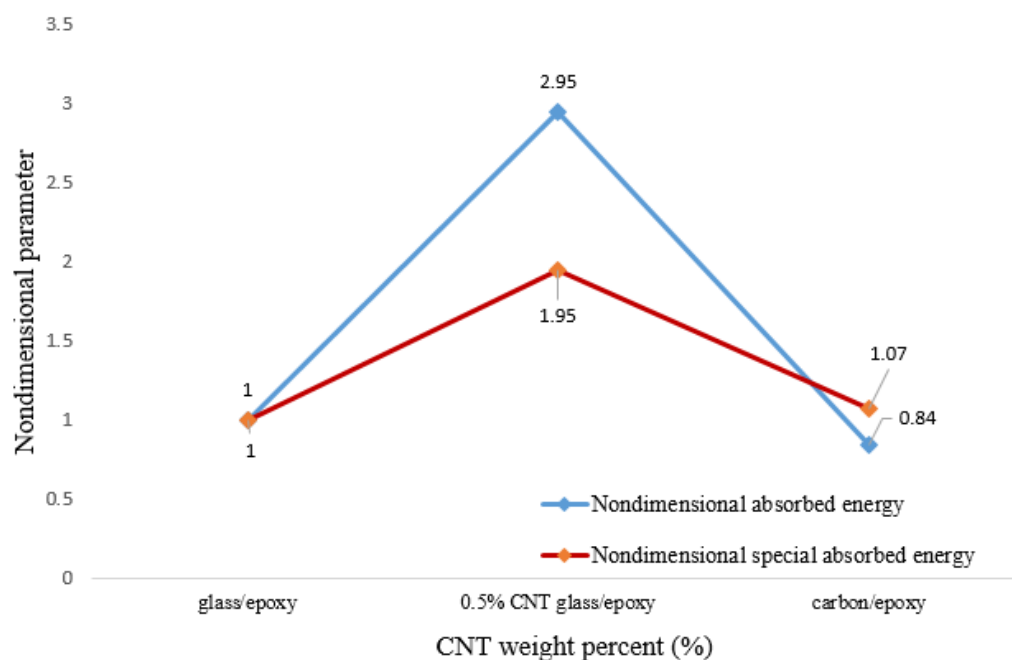
شکل (۴-۲۱) مقدار انرژی جذب شده و ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

برای درک صحیح‌تر تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی درون رزین اپوکسی و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی، پارامترهای بررسی‌شده بدون بعد شدند. که چگونگی بی بعد سازی در قسمت قبل بیان شد. مقادیر بدون بعد بار بحرانی کمانش و بیش‌ترین نیروی قابل تحمل در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی میزان بار بحرانی کمانش و بیش‌ترین نیروی قابل تحمل به ترتیب ۱۶۹ و ۱۳۶ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله افزایش می‌یابد. این در حالی است که با تغییر نوع الیاف از شیشه به کربن بار بحرانی کمانش و بیش‌ترین نیروی قابل تحمل به ترتیب ۲۱۲ و ۱۴۱ درصد نسبت به حالت الیاف شیشه/اپوکسی افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۲۲) نمودار بی بعد بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

در شکل (۴-۲۳) مقادیر بدون بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده‌ی ویژه نشان داده شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، مقدار انرژی جذب شده تا لحظه‌ی شکست را نسبت به ورق الیاف شیشه/اپوکسی ۱۹۵ درصد افزایش می‌دهد. در حالی که تغییر در نوع الیاف از شیشه به کربن باعث کاهش انرژی جذب شده به میزان ۷ درصد گردیده است. مقدار این تأثیرها بر انرژی جذب‌شده‌ی ویژه نیز در شکل (۴-۲۳) و اعداد ذکر شده در جدول (۴-۸)، مشاهده می‌شود.



شکل (۴-۲۳) نمودار بی بعد انرژی جذب شده و انرژی جذب شده‌ی ویژه برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

انرژی جذب‌شده‌ی ویژه در ورق‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی اختلاف چندانی با یک‌دیگر نداشته که با توجه به بار بحرانی کم‌انرژی‌تر کامپوزیت کربن/اپوکسی نسبت به شیشه/اپوکسی بیانگر این موضوع می‌باشد که کامپوزیت کربن/اپوکسی تردتر و شکننده‌تر بوده و پس از رسیدن به بار بحرانی کم‌انرژی‌تر دچار شکست می‌شود. این در حالی است که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به ورق‌های کامپوزیت، انرژی جذب‌شده‌ی ویژه‌ی آن‌ها را حدود ۹۵ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله، افزایش می‌دهد.

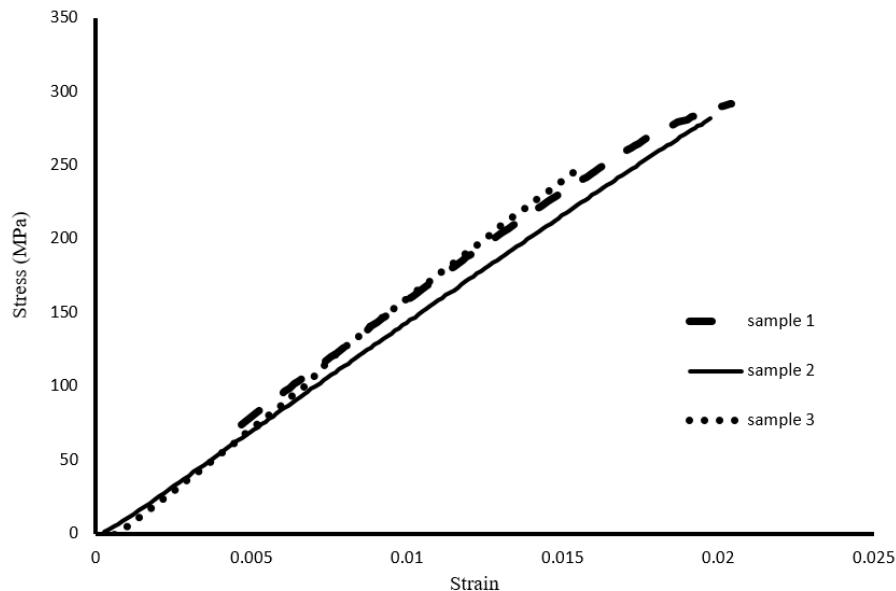
۴-۳- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش

جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها آزمون کشش ساده روی نمونه‌هایی از جنس الیاف شیشه / اپوکسی و کربن / اپوکسی با لایه‌چینی [۰/۳]، [۹۰/۳] و [۴۵/۳] و از هر نمونه، ۳ عدد انجام گرفت. به کمک نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمایش کشش، مدول یانگ مربوط به این نمونه‌ها که به ترتیب E_1 ، E_2 و E_x نام‌گذاری می‌شوند، محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر E_1 ، E_2 و E_x ، به کمک انجام آزمایش کشش ساده، جهت تعیین مدول برشی (G_{12}) ماده‌ی کامپوزیت از رابطه (۴-۱) استفاده می‌شود [۶۰].

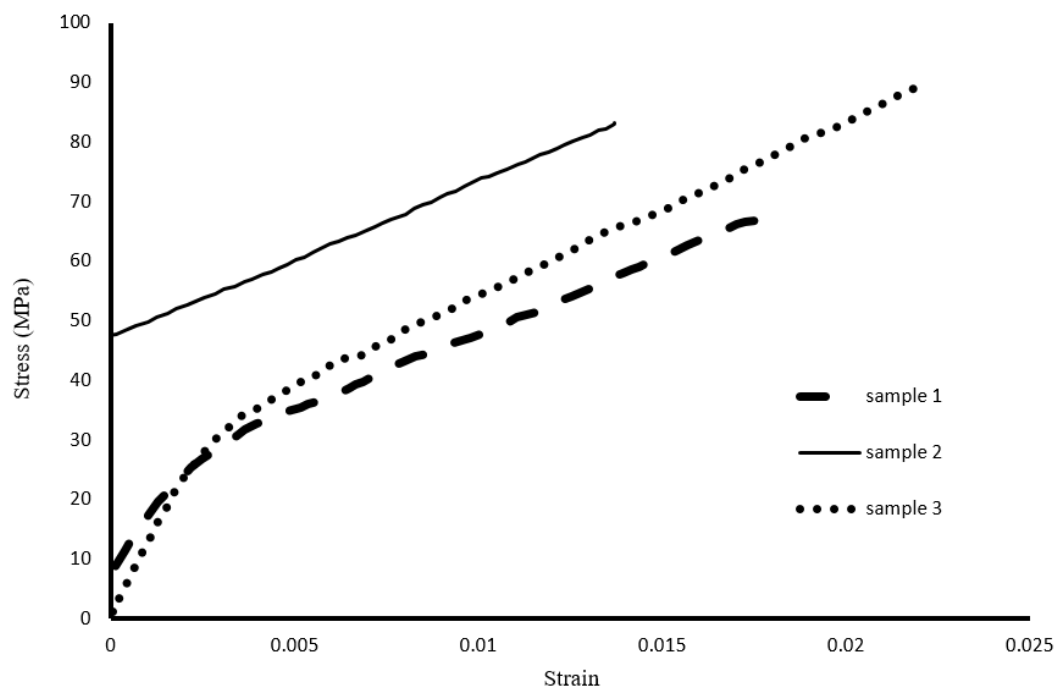
$$E_x = \frac{E_1}{m^4 + m^2 n^2 \left(-2\nu_{12} + \frac{E_1}{G_{12}} \right) + n^4 \frac{E_1}{E_2}} \quad (4-1)$$

۴-۳-۱- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های شیشه / اپوکسی

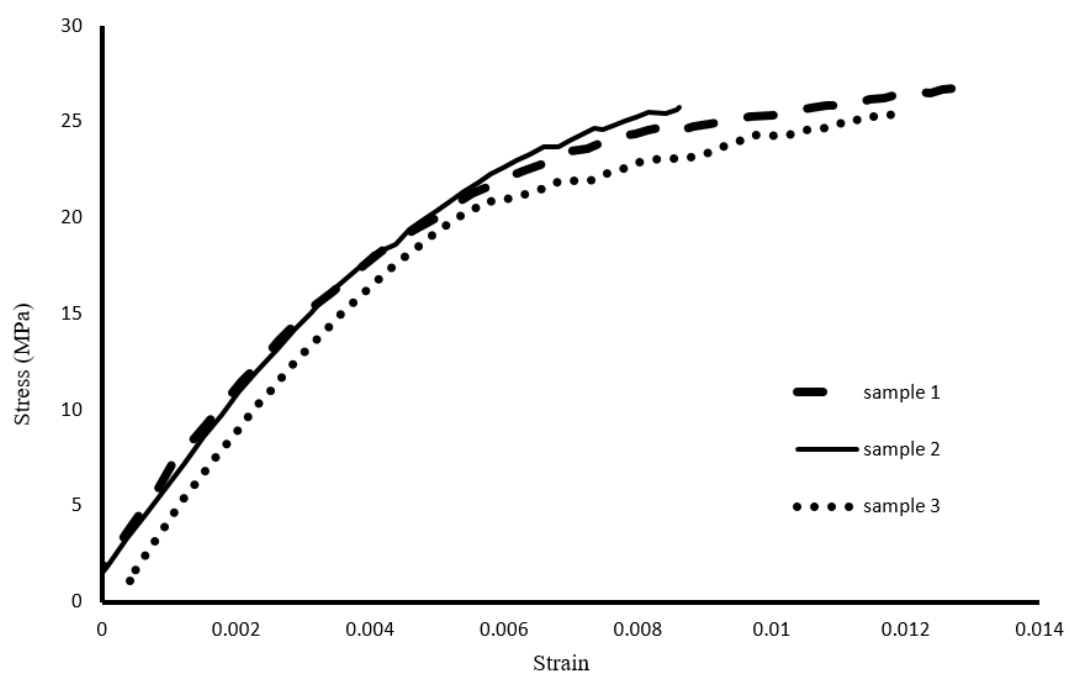
در ادامه نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های شیشه / اپوکسی آورده شده است.



شکل (۴-۲۴) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه / اپوکسی با زاویه الیاف ۰ درجه



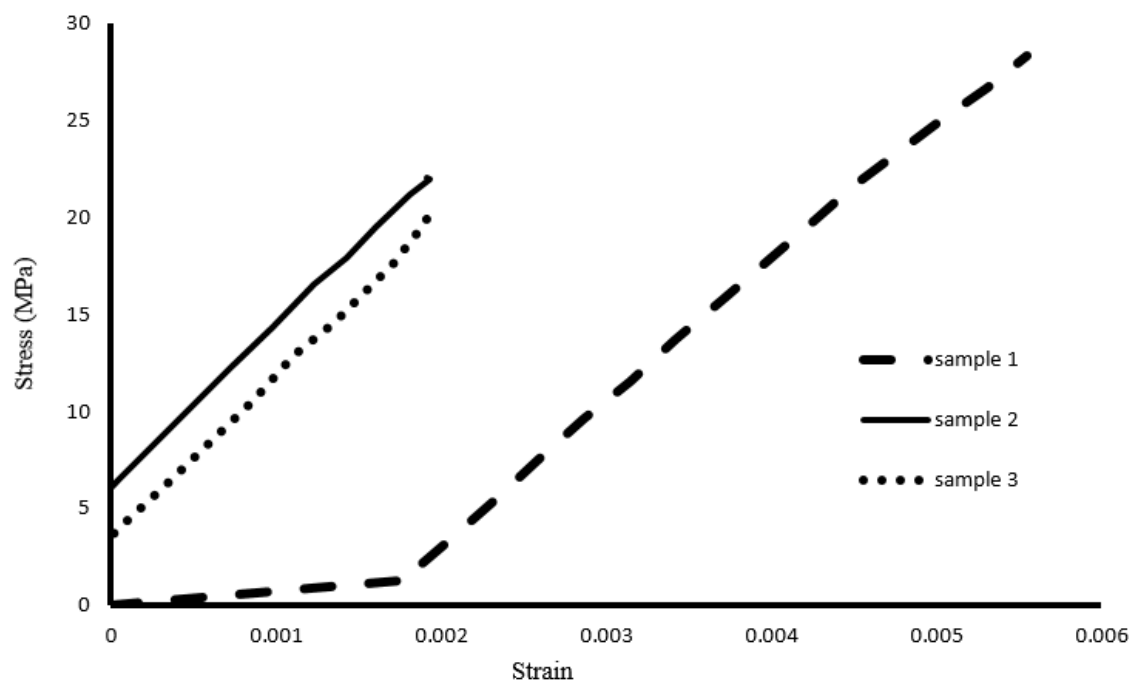
شکل (۴-۲۵) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه/ اپوکسی با زاویه الیاف ۴۵ درجه



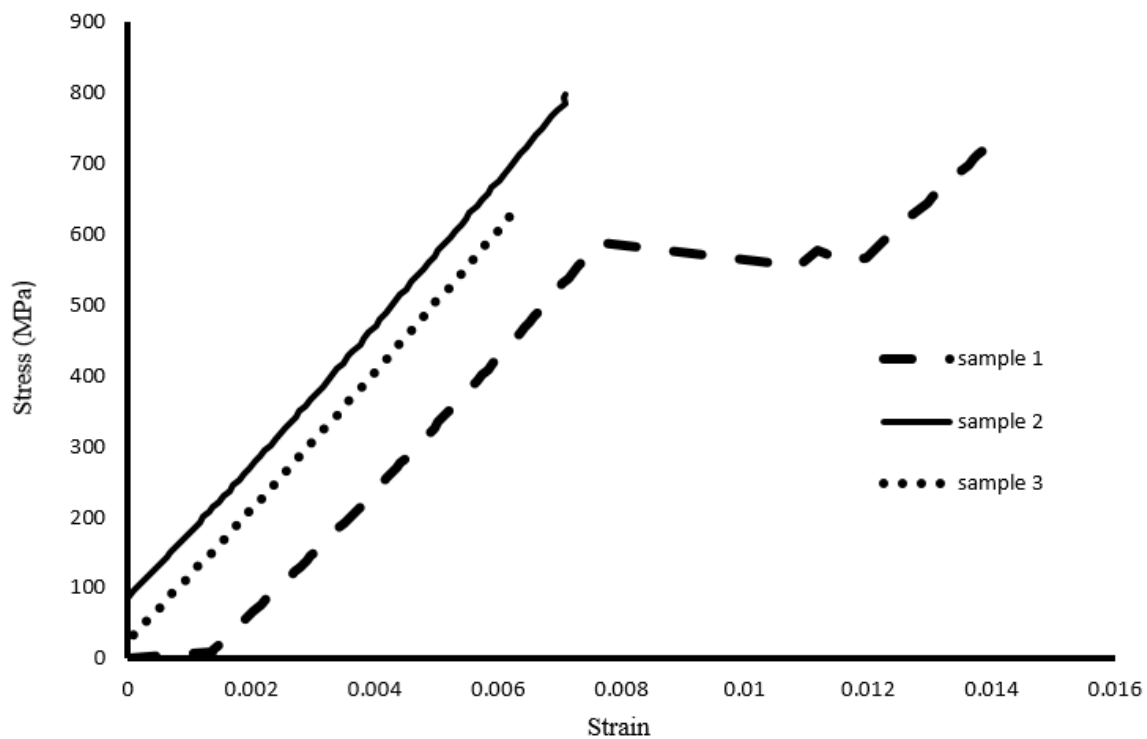
شکل (۴-۲۶) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های شیشه/ اپوکسی با زاویه الیاف ۹۰ درجه

همان‌طور که در شکل‌های (۴-۲۸) تا (۴-۳۰) مشاهده می‌شود رفتار نمودارهای تنش- کرنش برای زاویه الیاف ۰ و ۹۰ درجه هماهنگی بیشتری دارد. با این تفاوت که نمودار برای زاویه الیاف ۰ درجه عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. دلیل این اتفاق تک جهت بودن الیاف است. یعنی زمانی که نمونه‌ها با زاویه الیاف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه ساخته می‌شوند در حالت ۰ درجه تمام الیاف در راستای نمونه قرار دارند و نمونه در راستای الیاف کشیده می‌شود که در این حالت الیاف بیشترین مقاومت را دارا می‌باشند، بنابراین رفتار هر سه نمونه کشش با هم هماهنگ و نمودار تنش- کرنش نیز عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. در حالت ۹۰ درجه الیاف عمود بر راستای نمونه قرار دارند و نمونه در راستای عمود بر الیاف کشیده می‌شود که در این حالت الیاف باری را تحمل نمی‌کنند و تحمل بار بر عهده‌ی ماده‌ی زمینه می‌باشد بنابراین رفتار هر سه نمونه کشش با هم هماهنگ و نمودار تنش- کرنش نیز عدد کوچکی را نشان می‌دهد. اما در حالت ۴۵ درجه کشش نه در راستای الیاف است و نه عمود بر آن بنابراین الیاف قسمتی از بار را تحمل می‌کنند.

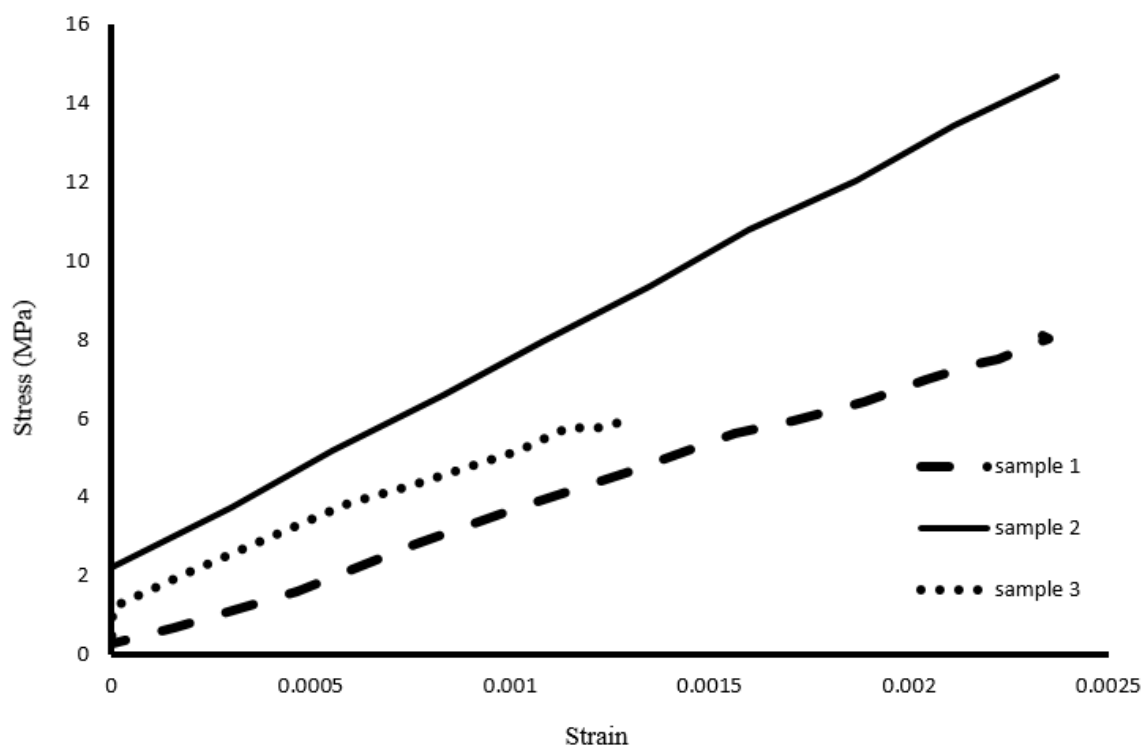
۴-۳-۲- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های کربن / اپوکسی



شکل (۴-۲۸) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن / اپوکسی با زاویه الیاف ۰ درجه



شکل (۴-۲۷) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن / اپوکسی با زاویه الیاف ۴۵ درجه



شکل (۴-۲۹) نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های کربن/ اپوکسی با زاویه الیاف ۹۰ درجه

برای محاسبه‌ی مدول یانگ از شیب این نمودارها استفاده شده است. در فرایند میانگین‌گیری از شیب نمودارهایی که با بقیه نمودارها هم‌خوانی ندارند صرف‌نظر شد.

در جداول زیر مقادیر E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت‌های شیشه/ اپوکسی و کربن/ اپوکسی آمده است.

جدول (۴-۹) مقادیر E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت شیشه/ اپوکسی

کامپوزیت شیشه/ اپوکسی	نمونه‌ی اول	نمونه‌ی دوم	نمونه‌ی سوم	میانگین
E_1 (GPa)	۱۴/۴۱	۱۴/۵۵	۱۶/۹۴	۱۴/۴۸
E_2 (GPa)	۱/۹۱	۲/۹۵	۱/۹۸	۱/۹۵
E_x (GPa)	۳/۱۱	۳/۰۷	۳/۴۳	۳/۰۹

جدول (۴-۱۰) مقادیر E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت کربن/اپوکسی

کامپوزیت کربن/اپوکسی	نمونه‌ی اول	نمونه‌ی دوم	نمونه‌ی سوم	میانگین
E_1 (GPa)	۴۵/۶۳	۴۵/۷۲	۵۳/۸۷	۴۵/۶۷
E_2 (GPa)	۴/۰۳	۴/۰۸	۵/۹۴	۴/۰۵
E_x (GPa)	۴/۶۸	۶/۳۶	۶/۳۷	۶/۳۶

با استفاده از مقادیر به دست آمده ی E_1 ، E_2 و E_x برای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی و رابطه‌ی (۴-۱) مقادیر مدول برشی (G_{12}) برای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی به دست می‌آیند. در رابطه‌ی (۴-۱) v_{12} نسبت پواسون کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی می‌باشد. همچنین $m = \cos \theta$ و $n = \sin \theta$ که در این جا θ برابر با ۴۵ درجه است. نسبت پواسون نانولوله‌ی کربنی/اپوکسی برابر با ۰/۲۷ و نسبت پواسون کامپوزیت کربن/شیشه ۰/۲۴ در نظر گرفته شده است [۶۰]. در نهایت مقادیر خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده، پس از میانگین‌گیری در جدول (۴-۱۱) آمده است.

جدول (۴-۱۱) مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی

نوع کامپوزیت	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	v_{12}	G_{12} (GPa)
شیشه/اپوکسی	۱۴/۴۸	۱/۹۵	۰/۲۷	۴/۶۷
کربن/اپوکسی	۴۵/۶۷	۴/۰۵	۰/۲۴	۹/۸۵

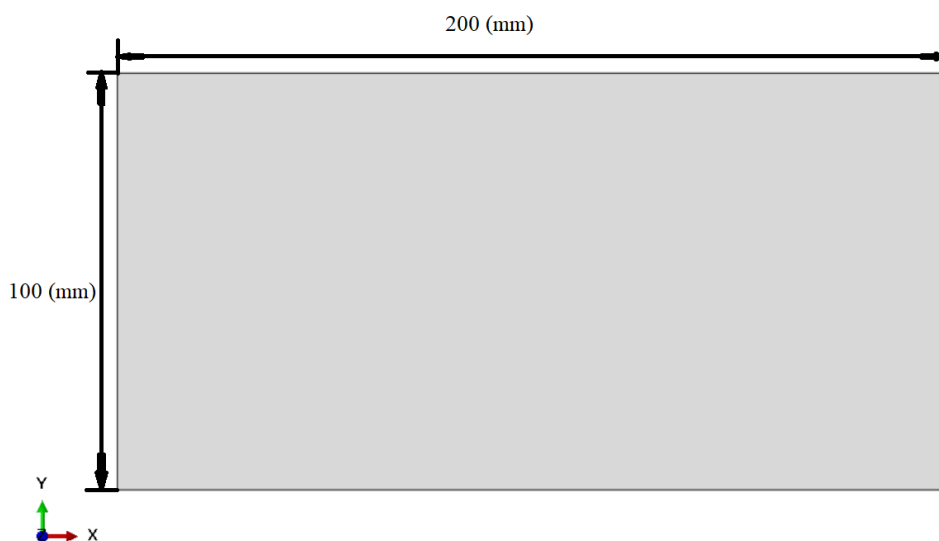
۴-۴- اعتبارسنجی

برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از آزمون کمانش نمونه‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی به روش المان محدود مورد تحلیل قرار گرفتند.

۴-۴-۱- تحلیل المان محدود ورق

در این بخش به نحوه‌ی مدل‌سازی نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است. برای مدل کردن نمونه‌ها از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. در ادامه مراحل این مدل‌سازی به تفصیل شرح داده شده است.

۴-۴-۱-۱- مدل‌سازی ورق



شکل (۴-۳۰) مدل‌سازی ورق کامپوزیت

مدل‌سازی به این ترتیب صورت پذیرفت که در ابتدا ورق کامپوزیتی ایجاد گردید. مدل هندسی ساخته شده در نرم‌افزار، از نوع مدل پوسته‌ای است. پوسته‌های مورد آزمایش از نظر هندسی ساده هستند. در این مرحله تنها یک ورق با مشخصات هندسی که در شکل مشاهده می‌شود و قطر ($1/2 \text{ mm}$) در محیط نرم‌افزار ساخته می‌شود.

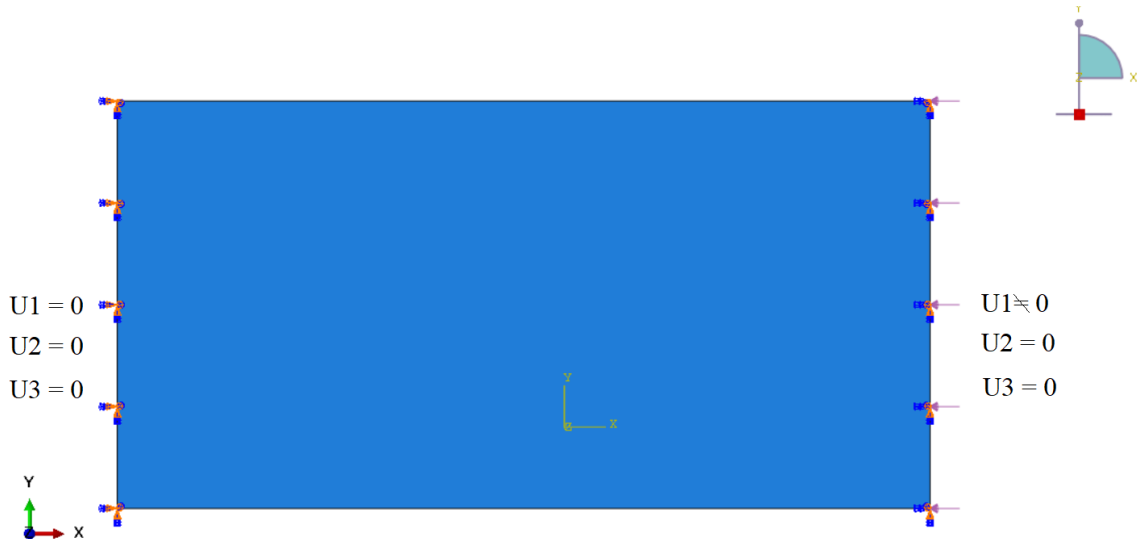
۴-۱-۲- خواص مواد

مدول یانگ E_1 و E_2 ورق‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی از طرق آزمون کشش به‌دست آمدند و مدول برشی G_{12} از رابطه‌ی میکرمکانیک (۴-۱) حاصل گردید که شرح آن‌ها در قسمت قبل آمده است. با توجه به این‌که الیاف شیشه به‌صورت یکنواخت و با جهت‌گیری یکسان درون ماده‌ی زمینه قرار داده شده‌اند، می‌توان ماده‌ی کامپوزیت را به‌صورت اورتوتروپیک در نظر گرفت که در نتیجه

$$E_2 = E_3, \quad G_{12} = G_{13} = G_{23}$$

بنابراین تمام خواص مکانیکی مورد نیاز برای تحلیل المان محدود ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی حاصل شده است.

۴-۱-۳- شرایط مرزی و بارگذاری ورق



شکل (۴-۳۱) نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در مدل المان محدود مدل ورق

سیستم مختصات عمومی برای ورق به‌صورتی انتخاب می‌گردد که طول ورق در صفحه‌ی X قرار گرفته و عرض آن در جهت مثبت محور Y است. همچنین جهت Z در راستای ضخامت ورق است. شرایط مرزی

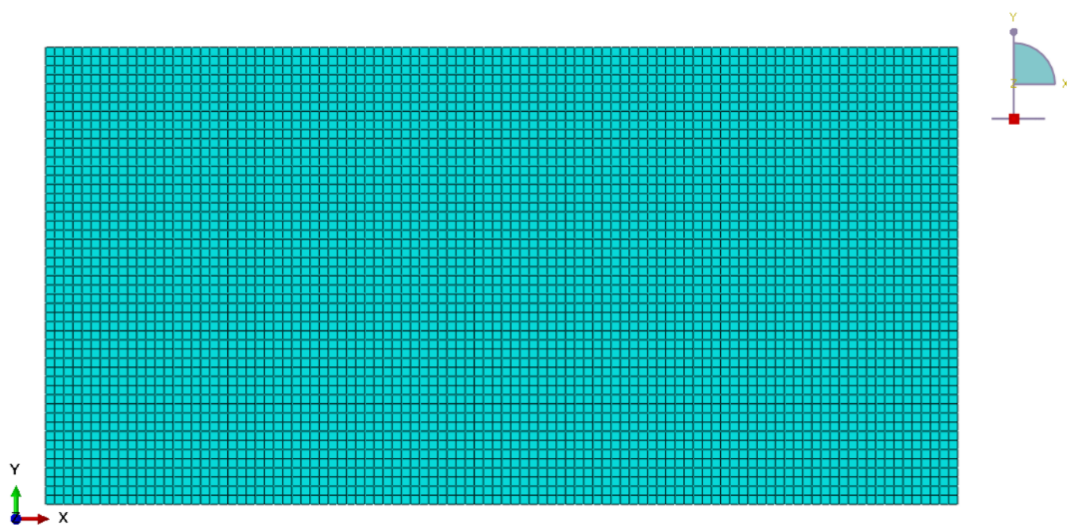
قرار گرفته بر روی ورق به صورت دولبه گیردار (لبه‌های طولی) و دولبه آزاد (لبه‌های عرضی) در نظر گرفته شد.

بارگذاری سازه مشابه شرایط آزمایشگاهی به صورت فشاری روی لبه‌های گیردار مدل شدند. نمایی از نحوه‌ی بارگذاری و اعمال شرایط مرزی به طور شماتیک در شکل (۴-۳۱) نشان داده شده است

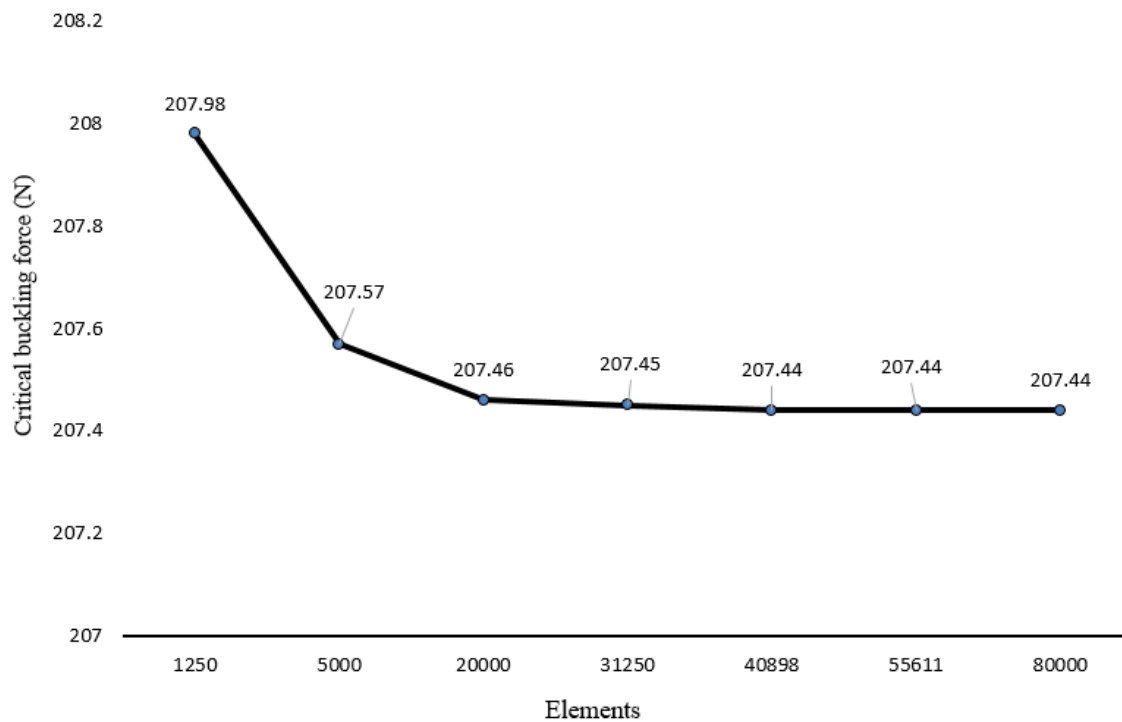
۴-۱-۴-۴- مش‌بندی و تحلیل ورق

برای مش‌بندی سازه، بایستی با تعریف نوع المان، آن را مش‌بندی کرد. جهت مش‌بندی پوسته و ورق‌های صلب از المان S4R استفاده می‌گردد. این المان، المانی پوسته‌ای مربع شکل است که دارای ۴ گره می‌باشد و برای هر دو نوع پوسته‌های نازک و ضخیم استفاده می‌شود.

در روش‌های المان محدود دقت نتیجه به نوع المان، دانه‌بندی و مش‌بندی بسیار وابسته است. با این حال به دلیل افزایش هزینه‌های محاسباتی همزمان با افزایش تعداد المان‌ها، در یک مدل‌سازی دقیق انتخاب اندازه مناسب المان‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در شکل (۴-۳۲) می‌توان نمونه‌ی مدل‌سازی شده‌ی نهایی را پیش از شروع تحلیل مشاهده کرد و در شکل (۴-۳۳) نمودار همگرایی مش آمده است. در نهایت تحلیل صورت می‌پذیرد.



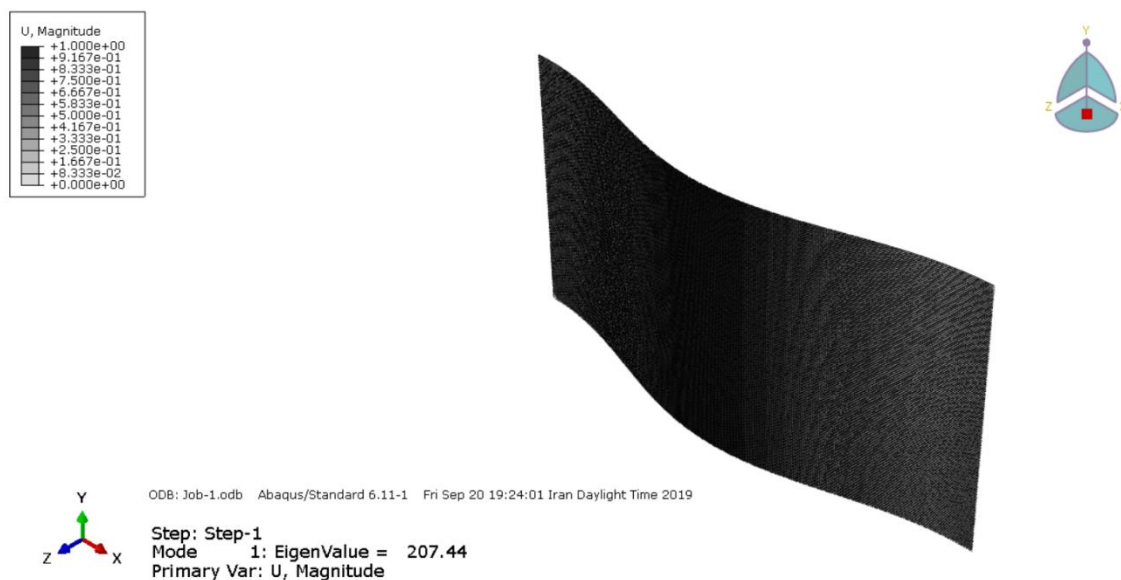
شکل (۴-۳۲) مدل شبکه‌بندی شده‌ی ورق در نرم‌افزار



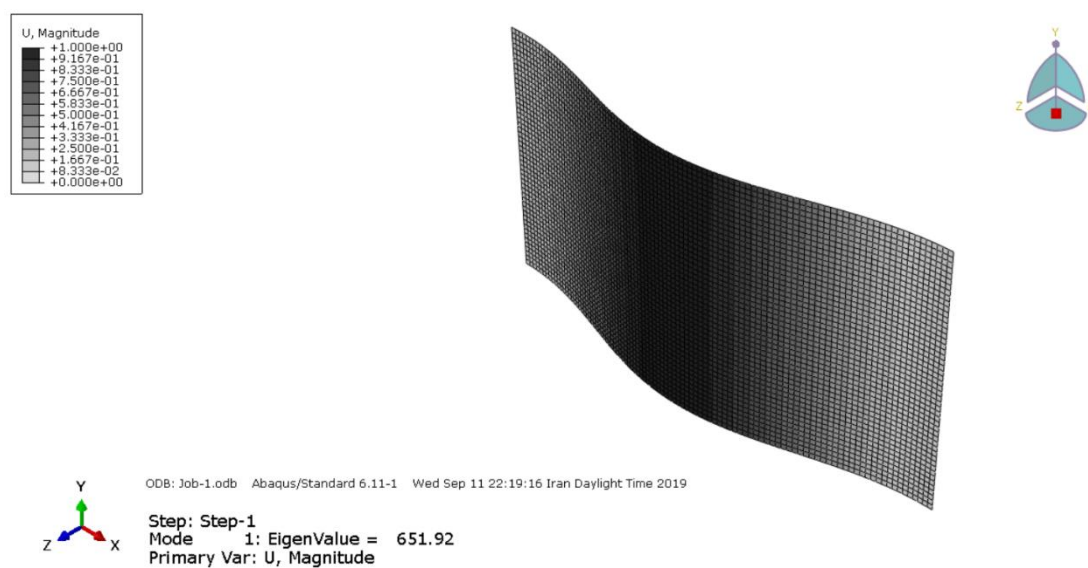
شکل (۴-۳۳) نمودار همگرایی مش

همان طور که نمودار همگرایی مش نشان می دهد نتیجه بارگذاری محوری در نرم افزار المان محدود برای تعداد مش های از ۴۰۸۹۸ به بعد عددی ثابت است بنابراین جهت صرفه جویی در وقت تعداد مش ها را ۴۰۸۹۸ انتخاب می کنیم.

۴-۲- نتایج حاصل از روش المان محدود



شکل (۴-۳۴) کمانش ورق کامپوزیت شیشه/ اپوکسی



شکل (۴-۳۵) کمانش ورق کامپوزیت کربن/ اپوکسی

در تصاویر نتایج حاصل از تحلیل ورق‌های کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی و کربن/ اپوکسی به روش المان محدود را مشاهده می‌کنید.

۴-۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش تجربی و روش عددی

نتایج نشان می‌دهند که نیروی بحرانی کمانش به‌دست آمده از مدل اجزای محدود و روش تجربی، در این حالت انطباق خوبی با یکدیگر دارند. مقایسه نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در جدول (۴-۱۲) آمده است.

جدول (۴-۱۲) مقایسه‌ی بار بحرانی کمانش به دست آمده از مدل اجزاء محدود و روش تجربی

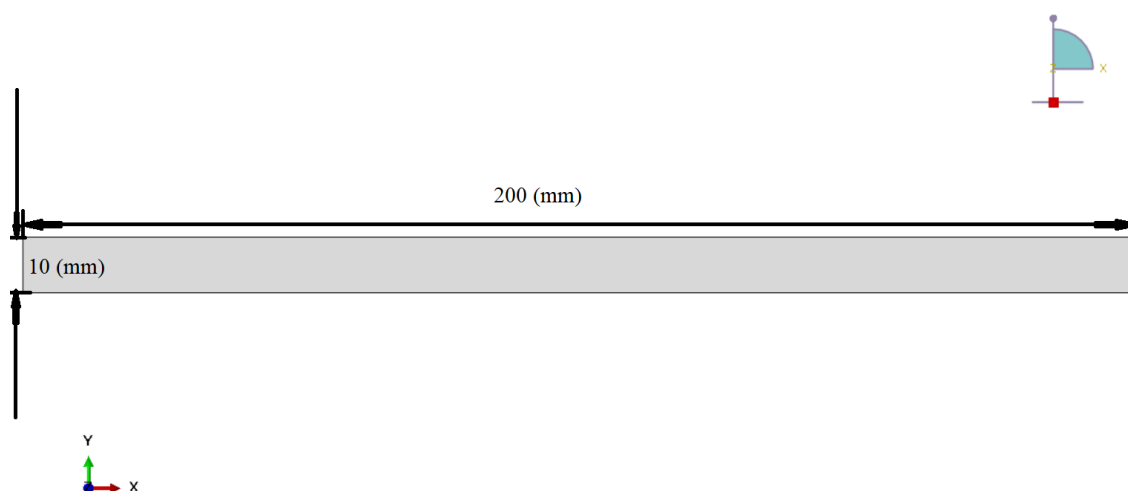
نوع کامپوزیت	روش آزمایشگاهی P_{Cr} (N)	روش عددی P_{Cr} (N)	درصد اختلاف
شیشه/اپوکسی	۱۹۱/۱۴	۲۰۷/۴۴	۸/۵
کربن/اپوکسی	۵۹۶/۲۳	۶۵۱/۹۲	۹/۲

۴-۵- محاسبه‌ی بار بحرانی کمانش تیرها به روش المان محدود

برای مدل‌سازی تیرهای شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و ۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی به روش المان محدود تمام مراحل بیان شده در قسمت‌های ۴-۴-۱ تا ۴-۴-۱-۴ به‌ترتیب طی شدند. که به‌طور خلاصه شرح داده می‌شود.

۴-۵-۱- مدل سازی تیر

مدل سازی به این ترتیب انجام شد که در ابتدا تیر کامپوزیتی ایجاد گردید. مدل هندسی ساخته شده در نرم افزار، از نوع مدل پوسته ای است. تیری به ضخامت $1/2$ میلی متر و ابعادی که در شکل مشخص گردیده.



شکل (۴-۳۶) مدل سازی تیر کامپوزیت

۴-۵-۲- خواص مواد

روش به دست آوردن مدول یانگ E_1, E_2 و محاسبه ی مدول برشی G_{12} ورق های کامپوزیتی شیشه / اپوکسی و کربن / اپوکسی در قسمت ۴-۱-۲-۴ شرح داده شد و در جدول (۴-۱۱) آمده است. از آن جا که بار بحرانی کمانش ورق کامپوزیت 0.5 درصد نانولوله ی کربن / شیشه / اپوکسی از طریق آزمون کمانش به دست آمده بود E_1 آن را از طریق درون یابی میان E_1 شیشه / اپوکسی و کربن اپوکسی محاسبه گردید. مدول برشی G_{12} از رابطه ی میکرو مکانیک (۴-۱) حاصل گردید که در جدول (۴-۱۳) مشاهده می کنید.

جدول (۴-۱۳) مشخصات مکانیکی کامپوزیت ۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی

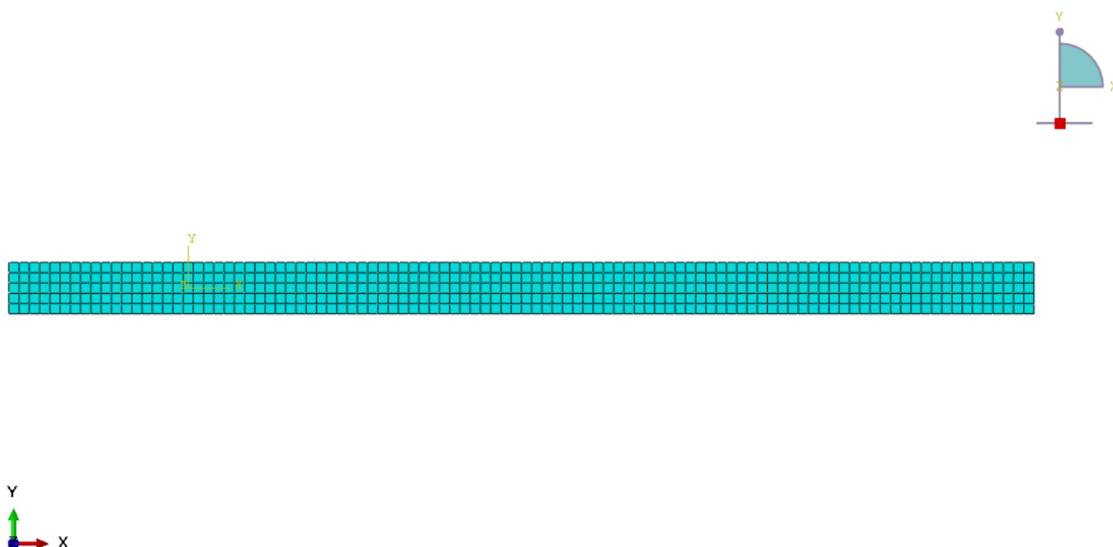
نوع کامپوزیت	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)
۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی	۳۵/۹	۲/۷۳	۰/۲۷	۷/۴۵

۴-۵-۳- شرایط مرزی ، بارگذاری ، مش‌بندی و تحلیل تیر

شرایط مرزی ، بارگذاری ، مش‌بندی و تحلیل به‌ترتیب مطابق روش بیان‌شده در ۴-۴-۱ و ۴-۴-۳ اجرا شد. شکل‌های (۴-۳۶) و (۴-۳۷) به ترتیب اعمال شرایط مرزی و مش‌بندی را نمایش می‌دهند.



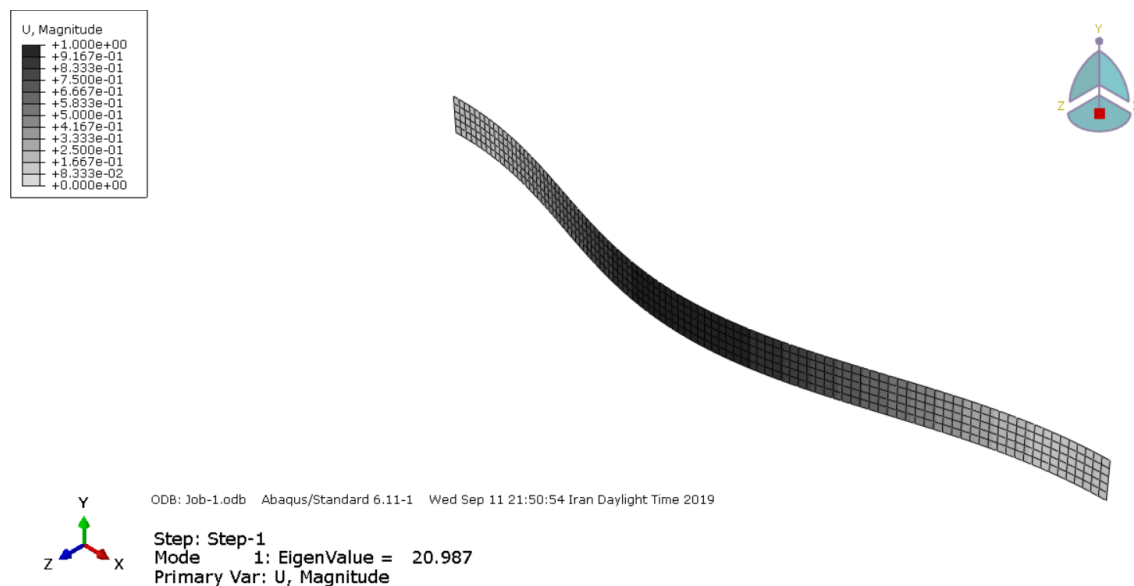
شکل (۴-۳۷) نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در مدل المان محدود مدل تیر



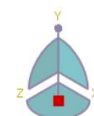
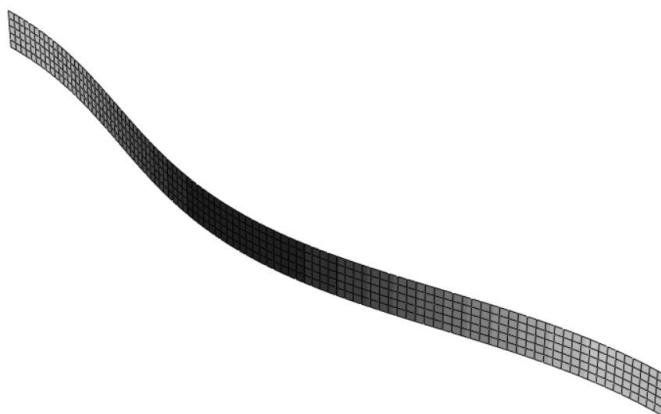
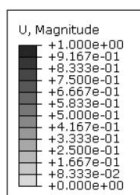
شکل (۴-۳۸) مدل شبکه‌بندی شده‌ی ورق در نرم‌افزار

۴-۵-۴- نتایج حاصل از کمانش تیر به روش المان محدود

در تصاویر زیر نتایج حاصل از تحلیل تیرهای کامپوزیتی شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و ۵۰ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی، به روش المان محدود آورده شده است.



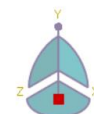
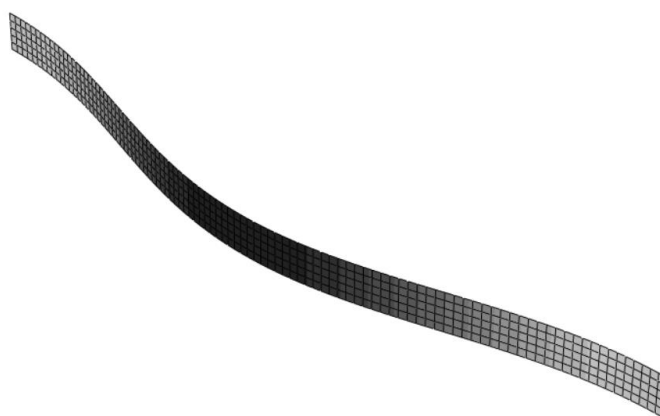
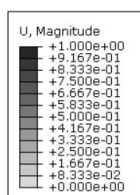
شکل (۴-۳۹) کمانش تیر کامپوزیت شیشه/اپوکسی



ODB: Job-1.odb Abaqus/Standard 6.11-1 Wed Sep 11 21:56:48 Iran Daylight Time 2019

Step: Step-1
 Mode 1: EigenValue = 51.640
 Primary Var: U, Magnitude

شکل (۴-۴۰) کمانش تیر کامپوزیت ۵/۰ درصد نانولوله‌ی کربن/ شیشه/ اپوکسی



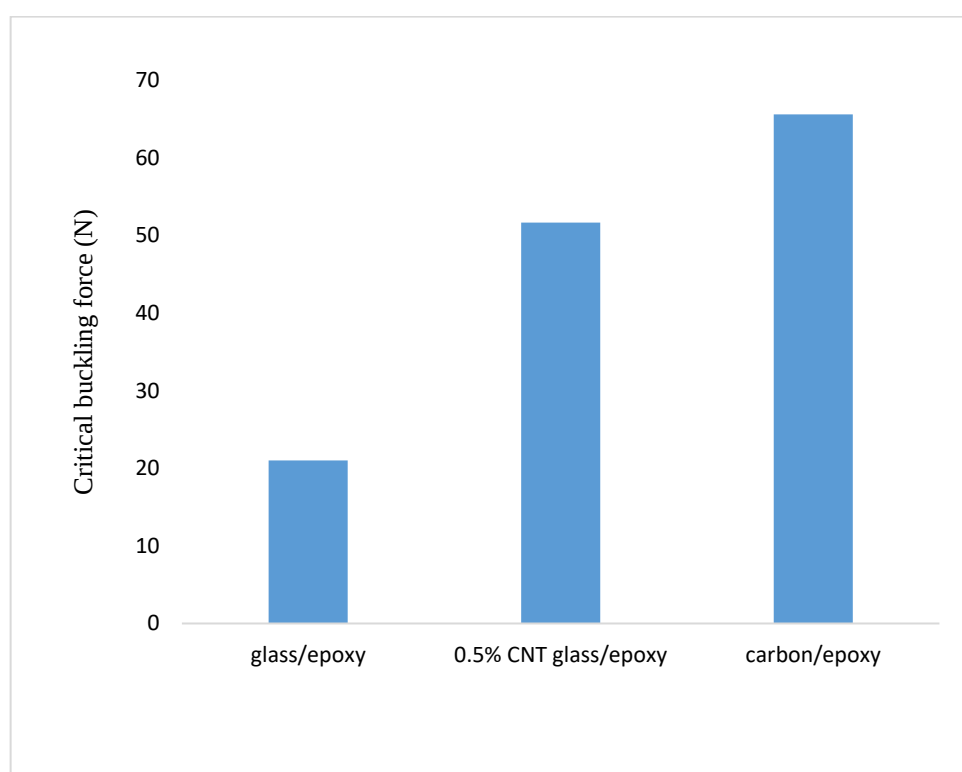
ODB: Job-1.odb Abaqus/Standard 6.11-1 Wed Sep 11 21:59:23 Iran Daylight Time 2019

Step: Step-1
 Mode 1: EigenValue = 65.592
 Primary Var: U, Magnitude

شکل (۴-۴۱) کمانش تیر کامپوزیت کربن/ اپوکسی

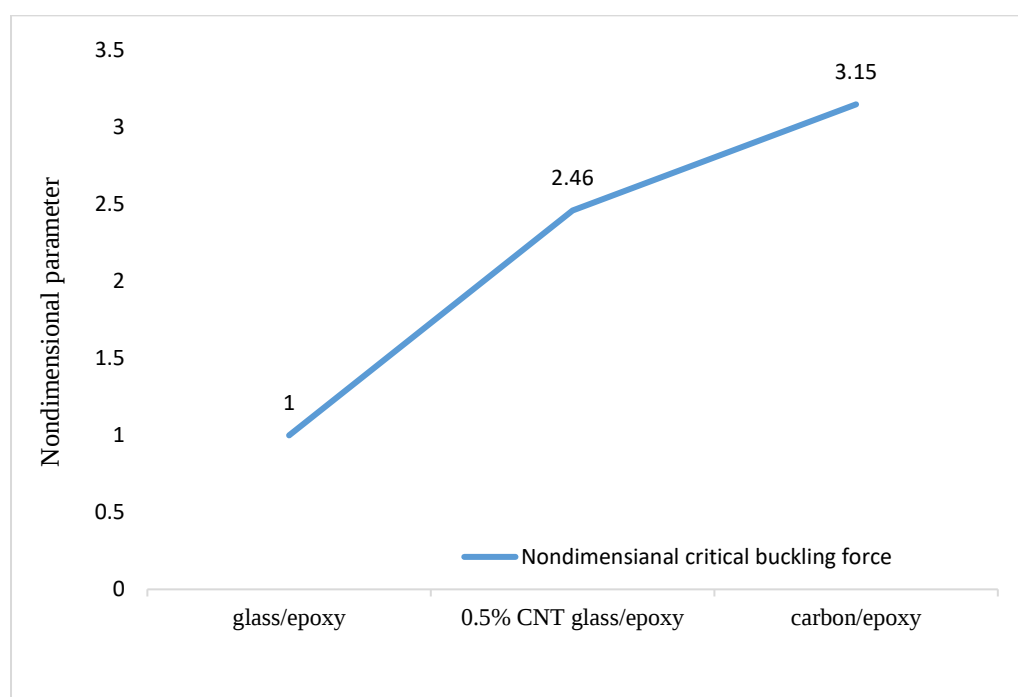
در جدول زیر مقادیر بار بحرانی کمانش تیرهای کامپوزیتی، به دست آمده به روش المان محدود آورده شده است.

جدول (۴-۱۴) بار بحرانی کمانش نمونه‌های تیر حاصل از روش عددی	
نوع کامپوزیت	P_{cr} (N)
شیشه/اپوکسی	۲۰/۹۸
۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۵۱/۶۴
کربن/اپوکسی	۶۵/۵۹



شکل (۴-۴۲) مقدار بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف تیرهای کامپوزیتی

برای درک صحیح‌تر تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی درون رزین اپوکسی و تغییر در فاز تقویت‌کننده‌ی ورق‌های کامپوزیتی، پارامترهای بررسی‌شده بدون بعد شدند که چگونگی بی بعد سازی در قسمت قبل بیان شد. مقادیر بدون بعد بار بحرانی کمانش در شکل (۴-۴۸) نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی میزان بار بحرانی کمانش ۱۴۶ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله افزایش می‌یابد. این در حالی است که با تغییر فاز تقویت‌کننده از شیشه به کربن بار بحرانی کمانش ۲۱۵ درصد نسبت به حالت الیاف شیشه/اپوکسی افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۴۳) نمودار بی بعد سازی شده‌ی بار بحرانی کمانش برحسب نانولوله‌ی افزوده‌شده به ماده‌ی زمینه و تغییر در نوع الیاف ورق‌های کامپوزیتی

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهاد

۵-۱- مقدمه

در این بخش به طور اجمالی نتایج ارائه شده در طول انجام پایان نامه بیان شده است. در این پایان نامه، بار بحرانی کمانش تیرهای کامپوزیتی شیشه/اپوکسی، نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی، به روش المان محدود محاسبه گردید. همچنین بار بحرانی کمانش، خواص مکانیکی، بیشینه نیروی قابل تحمل، انرژی جذب شده و انرژی جذب شده‌ی ویژه‌ی ورق‌های کامپوزیتی، شیشه/اپوکسی، نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی، به روش تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، که نتایج آن در ادامه آمده است. در نهایت پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار آورده شده است.

۵-۲- جمع بندی

در این پایان نامه جهت مشخص کردن خواص مکانیکی مورد نظر، ابتدا ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ساخته شد. سپس برای تشخیص درصد بهینه‌ی نانولوله‌ی کربنی جهت تقویت کامپوزیت شیشه/اپوکسی، ورق‌های شیشه/اپوکسی با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوی کربنی ساخته شد. بعد از آن ورق‌های ساخته شده تحت آزمون کمانش قرار گرفت. در این بخش نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. برای اعتبار سنجی آزمون‌های انجام شده و مدل‌سازی، نمونه‌های کامپوزیتی استاندارد تست کشش از جنس شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی ساخته شد و تست گردید. با استفاده از مدول الاستیسیته به دست آمده، تیرها و ورق‌ها در نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی شد. جهت بررسی سطح پراکندگی نانولوله‌ها درون کامپوزیت، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت تصویربرداری استفاده گردید.

۵-۳- بررسی نتایج

۵-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی تیرهای کامپوزیت

همان‌طور که گفته شد تیرهای کامپوزیت فقط از نظر بار بحرانی کمانش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. و نتایج نشان داد. افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به کامپوزیت شیشه اپوکسی بار بحرانی کمانش را ۱۴۶/۲ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله افزایش می‌دهد. این درحالی است که با تغییر فاز تقویت‌کننده از شیشه به کربن بار بحرانی کمانش ۲۱۲/۶۳ درصد نسبت به حالت الیاف شیشه/اپوکسی افزایش می‌یابد. بار بحرانی کمانش کامپوزیت کربن/اپوکسی ۲۷/۰۱ درصد بیشتر از نانوکامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌باشد.

۵-۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش ورق‌های کامپوزیت

در این جا برای نتیجه‌گیری صحیح باید پارامتر وزن را نیز در مقایسه‌ها دخیل گردانیم.

جدول (۵-۱) بار بحرانی و بار نهایی ویژه

نوع کامپوزیت	$P_{s\ cr} (kN/m)$	$P_{s\ max} (kN/m)$
شیشه/اپوکسی	۵۶۲۱/۷۶	۹۲۶۴/۷
۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربن/شیشه/اپوکسی	۱۱۹۴۰	۱۷۲۹۳/۷۲
کربن/اپوکسی	۲۲۰۸۲/۵۲	۲۸۱۵۹/۲۵

الف: مقایسه‌ی شیشه/اپوکسی و نانولوله/شیشه/اپوکسی

در آزمایش صورت گرفته مشخص گردید که درصد بهینه افزودن نانولوله‌ی کربنی به کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۰/۵ درصد وزنی می‌باشد. به‌طوری که بار بحرانی کمانش را ۱۶۸/۶ درصد، بار بحرانی کمانش ویژه را ۱۱۲/۳ درصد، بیشینه نیروی قابل تحمل را ۱۳۵/۸ درصد، بیشینه نیروی قابل تحمل ویژه را

۸۶/۶ درصد، انرژی جذب شده را ۱۴۸/۴ درصد و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه را ۹۵/۱ درصد نسبت به کامپوزیت شیشه/اپوکسی بدون نانولوله‌ی کربنی افزایش داد.

ب: مقایسه‌ی شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی

با تغییر فاز تقویت‌کننده از شیشه به کربن بار بحرانی کمانش ۲۱۱/۹ درصد، بار بحرانی کمانش ویژه ۲۹۲/۸ درصد، بیشینه نیروی قابل تحمل ۱۴۱ درصد، بیشینه نیروی قابل تحمل ویژه ۲۰۳ درصد و انرژی ذخیره‌شده‌ی ویژه ۶ درصد افزایش داشتند. اما انرژی ذخیره شده ۱۸ درصد کاهش یافت.

ج: مقایسه‌ی نانولوله‌ی کربنی/شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی

مقایسه این دو کامپوزیت نشان داد بار بحرانی کمانش، بار بحرانی کمانش ویژه، بیشینه نیروی قابل تحمل و بیشینه نیروی قابل تحمل ویژه نمونه کربن/اپوکسی به ترتیب ۱۶/۱ ، ۸۴/۹ ، ۲/۰۲ و ۶۲/۸ درصد بیشتر از نمونه‌ی ۰/۵ درصد نانولوله/شیشه/اپوکسی است. در مقابل انرژی جذب‌شده و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه‌ی نمونه‌ی ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربنی/شیشه/اپوکسی به ترتیب ۱۹۵/۴ و ۸۲/۸ درصد بیشتر از نمونه‌ی کربن/اپوکسی می‌باشد.

۵-۴- نتیجه‌گیری

با انجام آزمون کمانش بر روی کامپوزیت شیشه/اپوکسی که یک بار از طریق افزودن نانولوله‌ی کربنی به فاز زمینه و بار دیگر به روش تغییر در فاز تقویت‌کننده از الیاف شیشه ۴۰۰ گرمی به الیاف کربن ۳۰۰ گرمی نتایج زیر حاصل گردید.

۱. اگر نکته‌ی محوری افزایش بار بحرانی کمانش، افزایش بیشینه نیروی قابل تحمل، افزایش انرژی جذب‌شده و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه باشد افزودن نانولوله‌ی کربنی به عنوان تقویت‌کننده انتخاب مناسب‌تری می‌باشد.

۲. اگر نکته‌ی محوری افزایش بار بحرانی کمانش ویژه و بیشینه نیروی قابل تحمل ویژه باشد
گزینه‌ی مناسب‌تر تغییر فاز تقویت‌کننده از شیشه ۴۰۰ گرمی به کربن ۳۰۰ گرمی است.

۵-۵- پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

۱. مطالعه‌ی حالت‌های دیگری از بارگذاری‌ها نظیر باگذاری‌های همزمان فشاری و خمشی.
۲. بررسی اثر تغییر نانوذرّهی تقویت‌کننده از نانولوله‌ی کربن به نانوگرافن یا نانوذرّهی دیگر.
۳. بررسی روش‌های جدید جهت توزیع درصدهای وزنی بیشتر نانولوله‌ی کربن درون ماده‌ی زمینه.
۴. بررسی اثر تغییر پارامترهای دیگر از قبیل افزایش تعداد لایه‌های الیاف، تغییر نوع الیاف و تغییر زاویه‌ی الیاف.
۵. بررسی اشکال هندسی دیگر نظیر پوسته‌های استوانه‌ای

مراج

- [1] N. K. Gupta, G. L. Easwara Prasad; **Quasi-static and dynamic axial compression of glass/polyester composite hemi-spherical shells**, international Journal of Impact Engineering, Vol. 22, pp. 757-774, 1999.
- [2] D. R. Paul, L. M. Robeson, **Polymer nanotechnology: Nanocomposites**, Polymer, Vol. 49, pp. 3187-3204, 2008.
- [3] R. M. Jones, **Mechanics of composite materials**, 2nd ed., Taylor & Francis., Virginia, 1999.
- [4] V. K. Tewary, **Mechanics of fibre composites**, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [5] T. Frederick, C. Watson, H. Li, **Glass Fibers, ASM Handbook**, Ohio, Vol. 21, 2001.
- [6] C. Basara, U. Yilmazer, G. Bayram; **Synthesis and characterization of epoxy based nanocomposites**, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 98, pp. 1081-1086, 2005.
- [7] J. Campbell, C. Flake; **Manufacturing processes for advanced composites**, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [8] T. Akiskalos; **Mechanics of deformation of carbon nanotube-polymer nanocomposites**, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 20-25, 2004.
- [9] A. M. Cassell, S. Verma, L. Delzeit, M. Meyyappan, J. H. Langmuir; **Multi walled carbon nanotubes by chemical vapor deposition using multi layered metal catalysts**, American Chemical Society, Vol. 17, pp. 266, 2001.
- [10] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito; **Physics of carbon nanotubes**, Carbon, Vol. 33, No. 7, pp. 883-891, 1995.
- [11] D. Robertson, D. Brenner, J. Mintmire; **Energetics of nanoscale graphitic tubules**, in Proceeding of American Physical Society, Vol. 45, pp. 12592-12595, 1992.
- [12] S. Reich, C. Thomsen, J. Maultzsch; **Carbon nanotubes-basic concepts and physical properties**, John Wiley, New Jersey, 2004.
- [13] H. T. Ng, B. Chen, J. Li, M. Meyyappan; **Optical properties of single-crystalline ZnO nanowires on m-sapphire**, Applied Physics Letters, Vol. 82, pp. 8484-8484, 2003.
- [14] L. Delzeit, R. Stevens, C. Nguyen, M. Meyyappan; **Growth of carbon nanotubes by thermal and plasma chemical vapour deposition processes and applications in microscopy**, Nanotechnology, Vol. 13, pp. 280-284, 2002.
- [15] S. Iijima; **Carbon nanotubes: Past, present and future**, Physical B, Vol. 323, pp. 1-5, 2002.

[۱۶] م. محسنی شکیب؛ مکانیک سازه‌های مرکب، انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ۱۳۸۵.

- [17] P. Calvert; **Potential applications of nanotubes**, Carbon nanotubes, CRC Press, Boca Raton, pp. 277-292, 1997

- [18] L. A. Utraki, **Clay containing polymeric nanocomposites**, Rapra Technology, Vol. 1, pp. 147-152, 2004.
- [19] P. Mukhopadhyay, R. K. Gupta; **Graphite, graphene, and their polymer nanocomposites**, CRC Press, Florida, 2013.
- [20] J. P. Pascault, R. J. J. Williams; **Epoxy polymers**, Wiley, Wein Heim, pp. 185-205, 2010.
- [21] G. J. Simitses; **An introduction to elastic Stability of Structures**, Prentice Hall, New Jersey, 1976.
- [22] S. P. Timoshenko, J. M. Gere; **Theory of elastic stability**, McGraw Hill, New York, 1961.
- [23] S. Iijima; **Helical microtubules of graphitic carbon**, Nature, Vol. 354, No. 6348, pp. 56-58, 1991.
- [24] F. Gojny; **Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content**, Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 2363-2371, 2004.
- [25] A. Warrier, A. Godara; **The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix**, Composites Part A, vol. 41, pp. 532-538, 2010.
- [26] J. Zhu; **Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength**, Composites Science and Technology, vol. 67, pp. 1509-1517, 2007.
- [27] E. O. Hansang Kim; **Enhancement of fracture toughness of hierarchical carbon fiber composites via improved adhesion between carbon nanotubes and carbon fibers**, Composites Part A, vol. 71, pp. 72-83, 2015.
- [28] F. H. Gojny, H. Florian; **Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study**, Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 15, pp. 2300-2313, 2005.
- [29] J. Kim, B. Chul, S. W. Park; **Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite**, Composite structures, Vol. 86, No. 3, pp 69-77 2008.
- [30] P. Karapappas; **Enhanced fracture properties of carbon reinforced composites by the addition of multi-wall carbon nanotubes**, Journal of Composite Materials, Vol. 43, No. 9, pp. 977-985, 2009.
- [31] J. Hawkins, A. David, A. Haque; **Fracture toughness of carbon-graphene/epoxy hybrid nanocomposites**, Procedia Engineering, No. 90, pp. 176-181, 2014.
- [32] M. Nazem Salimi, M. Torabi Merajin, M. K. Besharati Givi; **Enhanced mechanical properties of multifunctional multiscale glass/carbon/epoxy composite reinforced with carbon nanotubes and simultaneous carbon nanotubes/nanoclays**, Journal of Composite Materials, Vol. 51, No. 6, pp 745-758, 2017.

[33] M. Tüzemen, E. S. Çağrı, A. Avcı; **Enhancing mechanical properties of bolted carbon/epoxy nanocomposites with carbon nanotube, nanoclay, and hybrid loading**, Composites Part B, Vol. 128, pp 146-154, 2017.

[34] S. M. Hosseini Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand; **Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of CNT/Epoxy nanocomposites**, In press, Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 5, No. 1, pp. 41-48, 2010.

[35] M. M. Shokrieh, A. Zeinedini; **Analytical prediction of mode I strain energy release rate at crack growth initiation of polymeric nanocomposites**, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 2016. (In Persian)

[36] G. D. Seidel, D. C. Lagoudas; **Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites**, Mechanics of Materials, Vol. 38, No. 8–10, pp. 884-907, 2006.

[37] Y. Han, J. Elliott; **Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites**, Computational Materials Science, Vol. 39, No. 2, pp. 315-323, 2007.

[۳۸] ح. گلستانی، م. هاشمی گهروئی، م. ت. سلمانی؛ **بررسی اثر نسبت منظری نانولوله‌های کربنی روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری**، چهارمین همایش ملی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، آذرماه ۱۳۹۰

[39] H. S. Shen, C. L. Zhang; **Thermal buckling and postbuckling behavior of functionally graded carbon nanotube reinforced composite plates**, Materials and Design, Vol. 31, No. 7, pp. 3403-3411, 2010.

[40] H. Shen; **Postbuckling of nanotube-reinforced composite cylindrical shells in thermal environments, Part I: Axially-loaded shells**, Composite Structures, Vol. 93, No. 8, pp. 2096-2108, 2011.

[41] J. E. Jam, E. Asadi; **Buckling analysis of composite cylindrical shells reinforced by carbon nanotubes**, Archive of Mechanical Engineering, Vol. 59, No. 4, pp. 413–434, 2012.

[42] H. Foroughi, H. Askariyeh, M. Azhari; **Mechanical buckling of thick composite plates reinforced with randomly oriented, straight, single-walled carbon nanotubes resting on an elastic foundation using the finite strip method**, Journal of Nanomechanics and Micromechanics, Vol. 3, No. 3, pp. 49-58, 2013.

[43] S. Mehrabadi, J. Karimi Samar, R. M. Bohluli; **Mechanical buckling analysis of open circular cylindrical shells reinforced with single walled carbon nanotubes**, Aerospace Mechanics Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 51-59, 2013.

[44] S. Madhu, V. V. Subbarao; **Effect of carbon nanotube reinforcement in polymer composite plates under static loading**, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 200-205, 2014.

- [45] R. Zamani, G. H. Rahimi, M. H. Pol, M. Hedayatian; **Reinforcing effect of nanoclay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: Experimental Investigation**, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015. (In person)
- [46] R. Azadi, Y. Rostamiyan; **Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization**, Construction and Building Materials, Vol. 88, pp. 212-224, 2015.
- [47] Z. X. Lei, L. W. Zhang, K. M. Liew; **Buckling analysis of CNT reinforced functionally graded laminated composite plates**, Composite Structures, Vol. 152, pp. 62-73, 2016.
- [48] Y. Chandra, E. I. S. Flores, F. Scarpa, S. Adhikari; **Buckling of hybrid nanocomposites with embedded graphene and carbon nanotubes**, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 83, pp. 434-441, 2016.
- [49] A. M. Fattahi, B. Safaei; **Buckling analysis of CNT reinforced beams with arbitrary boundary conditions**, Microsystem Technologies, Vol. 23, No. 10, pp. 5079-5091, 2017.
- [۵۰] م. محمدی‌مهر، س. م. اخوان‌علوی، س. اخروی؛ **تحلیل کماتش و ارتعاشات آزاد پنل استوانه‌ای تقویت‌شده با توزیع‌های مختلف نانولوله‌های کربنی بر بسترالاستیک**، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، دوره ۱۸، ش ۳، صص ۱۹-۴۴، ۱۳۹۵.
- [51] M. Song, J. Yang, S. Kitipornchai; **Bending and buckling analyses of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphene nanoplatelets**, Composites Part B: Engineering, Vol. 134, pp. 106-113, 2018.
- [52] A. M. K. Esawi, M. M. Farag; **Carbon nanotube reinforced composites: Potential and current challenges**, Materials & Design, Vol. 28, No. 9, pp. 2394-2401, 2007.
- [53] C. Li, W. Zhe; **Buckling of 120° stiffened composite cylindrical shell under axial compression Experiment and simulation**, Composite Structures, Vol. 128, pp. 199-206, 2015.
- [54] Ö. Bozkurt, M. Bulut, A. Erklığ, W. A. Faydh; **Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clay particles**, Composites Part B: Engineering, Vol. 158, pp. 82-91, 2018.
- [55] M. Kim, Y. B. Park, O. I. Okoli, C. Zhang; **Processing, characterization, and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites**, Composites Science and Technology, Vol. 69, No. 3-4, pp. 335-342, 2009.
- [56] S. M. Hosseini Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand; **The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach**, Composites Part B: Engineering, Vol. 122, pp.1-8, 2017.

- [57] K. Sharma, M. Shukla; **Three-phase carbon fiber amine functionalized carbon nanotubes epoxy composite: processing, characterisation, and multiscale modeling**, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2014, No. 2, pp. 1-10, 2014 .
- [58] **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, Annual Book of ASTM Standard, D30.04, D3039/D3039M, 2000.
- [59] A. G. Mamalis, D. E. ManolakosM. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou; **On the Crushing Response of Composite Sandwich Panels Subjected to Edgewise Compression: Experimental**, *Composite Structures*, Vol. 71, No. 2, pp. 246-257, 2005.
- [60] C. T. Heracovich; **Mechanics of Fibrous Composites**, John Wiley, New York, 1998.

Abstract

Carbon nanotubes have unique physical and mechanical properties that make them to be used as one of the ideal fillers to reinforce polymeric materials. Adding a very small amount of carbon nanotubes to the polymers improves their mechanical properties significantly. However, in order to use all advantages of the unique properties of carbon nanotubes, there are still many subjects that need to be investigated. To this end, in this research, the effect of adding 0.25, 0.5 and 1 weight percentages of carbon nanotubes to the epoxy resin of glass/epoxy composite on the critical buckling load, stored energy and the specific stored energy of the composite plates under compressive loading is studied. Scanning electron microscopy images were obtained from cross-sections of specimens to investigate the scattering quality of different percentages of nanotubes in composites. Also, the values of Young's modulus of glass / epoxy and carbon / epoxy composites were obtained by simple tensile testing and these values were used to validate the experimental buckling tests results using finite element software. Results show that adding 0.5 weight percent of carbon nanotubes into the epoxy resin has the most effect on the critical buckling load of glass/epoxy composite plate and increases this load more than 2.5 times with respect to the specimen without carbon nanotube. Moreover, replacing T400 glass fibers with T300 carbon fibers in glass/epoxy composite plate, leads to the increase of buckling load by 211.9 percent. Comparison between analytical and experimental results indicates that analytical results are in good agreement with those obtained from the experimental tests.

Keywords: composite beam and plate, carbon nanotubes, buckling, experimental study



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Aerospace - Space Structures

Experimental study of composite beams and plates reinforced with carbon nanotubes under axial compressive force

By:

Hamid Reza Sabermanesh

Supervisor:

Dr.Mehdi Ghannad

Dr.Seyyed Mahdi Hosseini Farrash

September, 2019

