

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-سازه های هوایی

بررسی آزمایشگاهی کمانش ستون فلزی تقویت شده با کمربند

کامپوزیتی حاوی نانوذرات

نگارنده: محمد رئیسی

استادان راهنما:

دکتر علیرضا شاطرزاده

دکتر سید مهدی حسینی فراش

آذر ۹۹

شماره: ۱۴۰/۲۹۹
تاریخ: ۲۹/۱۰/۹۹

باسمه تعالی



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 محمد رئیسی با شماره دانشجویی ۹۶۳۴۱۰۴ رشته مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی کمانش ستون فلزی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی حاوی نانو ذرات که در تاریخ ۱۳۹۹/۹/۲۶ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☐
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
 نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علیرضا شاطرزاده	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر سید مهدی حسینی فراش	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسین تونزنده جانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مسعود مهدی زاده رخی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۹/۱۰/۲۹



تقدیم اثر

تقدیم به:

آن صنوبرهای سرخی که چون لاله زاده شدند

و چون شقایق ایستاده مردند

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌بینم تا قدردان زحمات و محبت‌های کسانی باشم که وجودشان بایه دگر می‌من بوده و کمک‌هایشان به انجام رساندن این پژوهش را ممکن ساخته است.

تخت خانواده عزیزم که همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند. آنان که محبتشان مهم‌ترین انگیزه من برای کار و تلاش است.

پس از اساتید راهنمای گران قدر آقایان دکتر علیرضا شاطرزاده و دکتر سید مهدی حسینی فراش که نقاط قوت این کار حاصل راهنمایی‌های بسیار ارزشمند ایشان، و نقاط ضعف آن نتیجه اِمالِ اینجانب می‌باشد. خداوند بزرگ را شاکرم که توفیق به سرانجام رساندن یک تجربه ارزشمند دکن را این اساتید را نصیب من کرد و از دگاش برای اینجانبان، همواره آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

همچنین تشکر و احترام فراوان از دوستان عزیزم آقای اکبر تاملادی و خانم سید فاطمه صفوی نسب که در انجام این پژوهش مرا یاری کردند.

محمدرئسی

تهدنامه

این جانب محمد رئیسی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی آزمایشگاهی کمانش ستون فلزی تقویت شده با کمربند کامپوزیتی حاوی نانوذرات تحت راهنمایی اساتید راهنما دکتر علیرضا شاطرزاده و سید مهدی حسینی فراش متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

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

چکیده

در این پژوهش اثر افزودن درصد‌های مختلف نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمانش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. ستون‌ها دارای مقطع دایره‌ای توپر بوده و بار فشاری به صورت محوری به نمونه‌ها اعمال شده است. بار بحرانی ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت‌های الیاف شیشه/ اپوکسی و الیاف شیشه/ اپوکسی/ نانولوله کربنی، با اضافه کردن مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به ماده زمینه در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی به صورت سه لایه، و زاویه الیاف در تمامی لایه‌ها هم‌جهت با راستای محور ستون در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در شرایط دوسر گیردار به یک دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون بسته شد و نمودارهای نیروی فشاری بر حسب جابجایی در راستای محوری برای هر نمونه ترسیم گردید. از هرجنس کمر بند کامپوزیتی تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج برای بار بحرانی کمانش تعیین گردید. نتایج حاکی از آن است که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در کمر بند کامپوزیتی می‌تواند بار بحرانی کمانش ستون را در حدود ۵۰ درصد نسبت به نمونه دارای کمر بند کامپوزیتی فاقد نانولوله کربنی افزایش دهد. این افزایش را می‌توان ناشی از پراکندگی مناسب نانولوله‌های کربنی درون ماده و زمینه و ایجاد چسبندگی مناسب بین کمر بند نانو کامپوزیتی و ستون آلومینیومی دانست. همچنین به منظور راستی آزمایی نتایج آزمایش، نمونه ستون آلومینیومی با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی در نرم افزار آباکوس مدل سازی شد و کمانش استاتیکی آن شبیه سازی گردید. نتایج شبیه سازی، تطابق خوبی را در تخمین بار بحرانی کمانش با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کمانش، تقویت کننده کامپوزیتی، نانوذرات، رزین اپوکسی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تاریخچه و کاربرد مواد مرکب	۲
۱-۲-۱- طبقه بندی کامپوزیت ها بر اساس نوع زمینه	۳
۱-۳-۱- اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت ها	۴
۱-۳-۱- الیاف	۵
۱-۳-۲- ماتریس ها (رزین یا چسب)	۷
۱-۴-۱- رفتار مواد مرکب	۸
۱-۴-۱- تک لایه ها	۸
۱-۴-۲- چند لایه ها	۸
۱-۵-۱- فرآیندهای ساخت کامپوزیت های زمینه پلیمری	۹
۱-۵-۱- قالب گیری باز	۹
۱-۵-۲- قالب گیری بسته	۱۳
۱-۶-۱- روش های مقاوم سازی ستون با الیاف	۱۴
۱-۶-۱- دورپیچی کردن	۱۴
۱-۶-۲- پوشش دادن با استفاده از FRP	۱۵
۱-۶-۳- پوشش دادن با استفاده از صفحات آماده FRP	۱۷
۱-۷-۱- آلومینیوم و انواع آلیاژهای آن	۱۷
۱-۷-۱- آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵	۱۸
۱-۸-۱- کاربرد مواد کامپوزیتی در صنایع هوافضا	۱۸
۱-۹-۱- نانولوله های کربنی	۱۹
۱-۱۰-۱- خواص و کاربرد نانولوله های کربنی	۲۱
۱-۱۲-۱- آشنایی با نرم افزار آباکوس	۲۱
۱-۲-۱- ساختار تحقیق	۲۳
فصل ۲: مفاهیم اولیه و پیشینه پژوهش	۲۵
۲-۱- مقدمه	۲۶

۲-۲-۲- کمانش.....	۲۶
۲-۲-۱- آنالیز کمانش ستون با شرایط مرزی ساده با استفاده از روش تعادل.....	۲۶
۲-۳- پیشینه پژوهش.....	۳۲
۲-۴- ضرورت، اهمیت و هدف تحقیق.....	۴۲

فصل ۳: ساخت و آزمون نمونه‌ها ۴۵

۳-۱- مقدمه.....	۴۶
۳-۲- مواد اولیه استفاده شده.....	۴۶
۳-۲-۱- واکس جداکننده.....	۴۶
۳-۲-۲- نمد صنعتی رزین گیر.....	۴۷
۳-۲-۳- پارچه آستری.....	۴۷
۳-۲-۴- کیسه خلاء.....	۴۸
۳-۲-۵- نوار سیل غیر حرارتی.....	۴۹
۳-۲-۶- الیاف شیشه تک جهت.....	۴۹
۳-۲-۷- رزین اپوکسی به همراه سخت کننده.....	۵۰
۳-۲-۸- نانولوله کربنی چند جداره.....	۵۱
۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده.....	۵۱
۳-۴- روش آماده سازی ماده زمینه.....	۵۳
۳-۵- ساخت نمونه ورق‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی.....	۵۴
۳-۶- ساخت نمونه‌های آزمون کشش کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی.....	۵۶
۳-۷- ساخت کمر بند کامپوزیت شیشه/اپوکسی.....	۵۶
۳-۸- آزمون‌های انجام شده.....	۵۸
۳-۸-۱- آزمون کشش ساده.....	۵۸
۳-۸-۲- آزمون بار فشار محوری.....	۵۹

فصل ۴: بررسی نتایج آزمون‌های کشش و فشار ۶۱

۴-۱- مقدمه.....	۶۲
۴-۲- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش شیشه/اپوکسی.....	۶۲
۴-۳- بررسی نتایج حاصل از آزمون فشار.....	۶۵

۴-۴- بررسی اثر افزودن نانولوله ی کربنی بر کمزش ستون.....	۶۸
۴-۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....	۷۱
۴-۵-۱- تعیین مورفولوژی سطحی.....	۷۲
۴-۶- اعتبارسنجی با استفاده از نرم افزار آباکوس.....	۷۷
۴-۶-۱- اثر تغییر زاویه و تعداد لایه های الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی.....	۷۸
فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات	۸۳
۵-۱- مقدمه.....	۸۴
۵-۲- نتایج حاصل از آزمون کشش ساده.....	۸۵
۵-۳- نتایج حاصل از آزمون فشار.....	۸۵
۵-۴- نتایج شبیه سازی المان محدود ستون تقویت شده.....	۸۶
۵-۵- نتایج تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی.....	۸۶
۵-۶- نتیجه گیری نهایی و جمع بندی.....	۸۷
۵-۷- پیشنهاد برای پژوهش های آینده.....	۸۸
پیوست الف: مدل سازی ستون تقویت شده با نرم افزار آباکوس	۸۹
مراجع	۹۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) اهمیت نسبی توسعه مواد در طول تاریخ..... ۴
- شکل (۲-۱) تقسیم بندی کامپوزیت های زمینه پلیمری..... ۵
- شکل (۳-۱) نمودار تنش و کرنش برای الیاف و رزین های مختلف..... ۶
- شکل (۴-۱) کامپوزیت های چند لایه و تک لایه..... ۹
- شکل (۵-۱) شماتیک روش لایه گذاری دستی..... ۱۱
- شکل (۶-۱) شماتیک روش پاشش رزین اپوکسی..... ۱۲
- شکل (۷-۱) شماتیک روش رشته پیچی..... ۱۳
- شکل (۸-۱) دور پیچ کردن با FRP..... ۱۵
- شکل (۹-۱) پوشش افقی ستون با مقطع دایره ای..... ۱۶
- شکل (۱۰-۱) پوشش طولی ستون با مقطع دایره ای..... ۱۶
- شکل (۱۱-۱) روند بکارگیری کامپوزیت ها در هواپیماهای مسافربری..... ۱۹
- شکل (۱۲-۱) صفحه گرافیتی نانولوله کربنی تک دیواره و چند دیواره..... ۲۰
- شکل (۱-۲) ستون با بار فشار محوری..... ۲۶
- شکل (۲-۲) علائم قرار دادی نیروها و گشتاورهای وارد بر المان ستون..... ۲۶
- شکل (۳-۲) نیروها و گشتاورهای وارد بر المان ستون در وضعیت تغییر شکل یافته..... ۲۷
- شکل (۴-۲) حد ترکیدن لوله های کامپوزیتی تهیه شده از الیاف شیشه و کربن..... ۲۷
- شکل (۵-۲) مقادیر بار کمانش کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بر حسب درصد مختلف نانو رس..... ۲۹
- شکل (۶-۲) مقادیر بار بحرانی کامپوزیت های شیشه/اپوکسی ۱ درصد وزنی نانو رس..... ۲۹
- شکل (۷-۲) نمودار تنش-کرنش آزمون کشش سه نمونه کامپوزیت..... ۳۳
- شکل (۸-۲) مقایسه مدول الاستیک در نمونه های مختلف و درصد تغییر در شیب..... ۳۳
- شکل (۹-۲) نمودار نیرو-جابجایی برای سه نمونه ورق کامپوزیتی..... ۳۵
- شکل (۱۰-۲) بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه بر حسب درصد نانولوله ای افزوده شده..... ۳۵
- شکل (۱-۳) واکس جداکننده..... ۴۴

- شکل (۲-۳) نمد صنعتی رزین گیر..... ۴۵
- شکل (۳-۳) پارچه آستری..... ۴۶
- شکل (۴-۳) کیسه خلاء..... ۴۶
- شکل (۵-۳) نوار سیل غیر حرارتی..... ۴۷
- شکل (۶-۳) الیاف شیشه تک جهت..... ۴۸
- شکل (۷-۳) رزین و سخت کننده..... ۴۹
- شکل (۸-۳) نانولوله کربنی چند دیواره..... ۴۹
- شکل (۹-۳) دستگاه هیدرولیک اینسترون ۵۰
- شکل (۱۰-۳) حمام التراسونیک..... ۵۱
- شکل (۱۱-۳) ورق کامپوزیت شیشه تحت خلاء..... ۵۳
- شکل (۱۲-۳) ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی..... ۵۳
- شکل (۱۳-۳) نمونه‌های آزمایش کشش شیشه/اپوکسی..... ۵۴
- شکل (۱۴-۳) مقادیر نانو ذره انداز گیری شده با ترازوی دیجیتالی آزمایشگاه..... ۵۵
- شکل (۱۵-۳) ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی..... ۵۶
- شکل (۱۶-۳) نمونه قرار داده شده در دستگاه اینسترون برای آزمون کشش ساده..... ۵۷
- شکل (۱۷-۳) نمونه قرار داده شده در دستگاه اینسترون برای آزمون فشار..... ۵۸
- شکل (۱-۴) نمونه‌های آزمون شده کشش ساده..... ۶۰
- شکل (۲-۴) نمودار تنش و کرنش با زاویه ۰، ۹۰، ۴۵ درجه..... ۶۱
- شکل (۳-۴) تصویر ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی پس از کمانش ۶۴
- شکل (۴-۴) نمودار نیرو-جابجایی برای ۰، ۲۵، ۵۰، ۱ درصد نانولوله کربن..... ۶۵
- شکل (۵-۴) نمودار بار بحرانی کمانش بر حسب درصد نانولوله افزوده شده به ماده زمینه..... ۶۷
- شکل (۶-۴) نمودار انرژی جذب شده بر حسب درصد نانولوله افزوده شده به ماده زمینه..... ۶۸
- شکل (۷-۴) نمودار انرژی جذب شده ویژه بر حسب درصد نانولوله افزوده شده به ماده زمینه ۶۹
- شکل (۸-۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های ۱ درصد وزنی..... ۷۲
- شکل (۹-۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های ۵/ درصد وزنی..... ۷۳

- شکل (۴-۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های ۲۵٪. درصد وزنی..... ۷۵
- شکل (۴-۱۱) اعتبارسنجی با نرم افزار آباکوس ستون آلومینیومی بدون تقویت..... ۷۵
- شکل (۴-۱۲) اعتبارسنجی با نرم افزار آباکوس ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی..... ۷۶
- شکل (۴-۱۳) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۰/۹۰/۰]..... ۷۷
- شکل (۴-۱۴) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۴۵/۴۵/۴۵]..... ۷۸
- شکل (۴-۱۵) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۰/۴۵/۰]..... ۷۸
- شکل (۴-۱۶) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۰/۰/۰]..... ۷۹
- شکل (۴-۱۷) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۰/۴۵/۴۵/۰]..... ۸۹
- شکل (۴-۱۸) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۰/۹۰/۹۰/۰]..... ۸۰
- شکل (۴-۱۹) کماتش ستون تقویت شده با کمر بند امپوزیتی در لایه چینی [۴۵/۴۵/۴۵/۴۵]..... ۸۰

فهرست جداول

جدول (۱-۱) مزایا و معایب الیاف کربن	۶
جدول (۲-۱) مزایا و معایب الیاف شیشه	۷
جدول (۳-۱) رزین ها و الیاف مختلف مورد استفاده در لایه گذاری دستی	۱۱
جدول (۴-۱) رزین ها و الیاف مختلف مورد استفاده در پاشش رزین	۱۲
جدول (۵-۱) نام گذاری آلیاژهای آلومینیوم	۱۸
جدول (۶-۱) تعریف محیط های نرم افزار آباکوس	۲۳
جدول (۱-۲) مقایسه تأثیر شرایط مرزی بر بار بحرانی	۳۱
جدول (۱-۴) مشخصات مکانیکی نمونه های مورد آزمایش	۶۳
جدول (۲-۴) مشخصات مکانیکی کامپوزیت شیشه / اپوکسی	۶۳
جدول (۳-۴) بار بحرانی کمانش بر حسب درصد های مختلف نانولوله های کربنی	۶۶
جدول (۴-۴) مقدار انرژی جذب شده بر حسب درصد های مختلف نانولوله های کربنی	۶۷
جدول (۵-۴) مقدار انرژی جذب شده ویژه بر حسب درصد های مختلف نانولوله های کربنی	۶۸
جدول (۶-۴) مقایسه نتایج تجربی و عددی بار بحرانی کمانش برای ستون آلومینیومی	۷۵
جدول (۷-۴) اثر تغییر زاویه الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی	۷۴
جدول (۸-۴) اثر تغییر تعداد لایه های الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی	۷۸
جدول (۱-۵) نتایج نهایی آزمون کشش	۸۳
جدول (۲-۵) نتایج نهایی آزمون فشار	۸۴

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

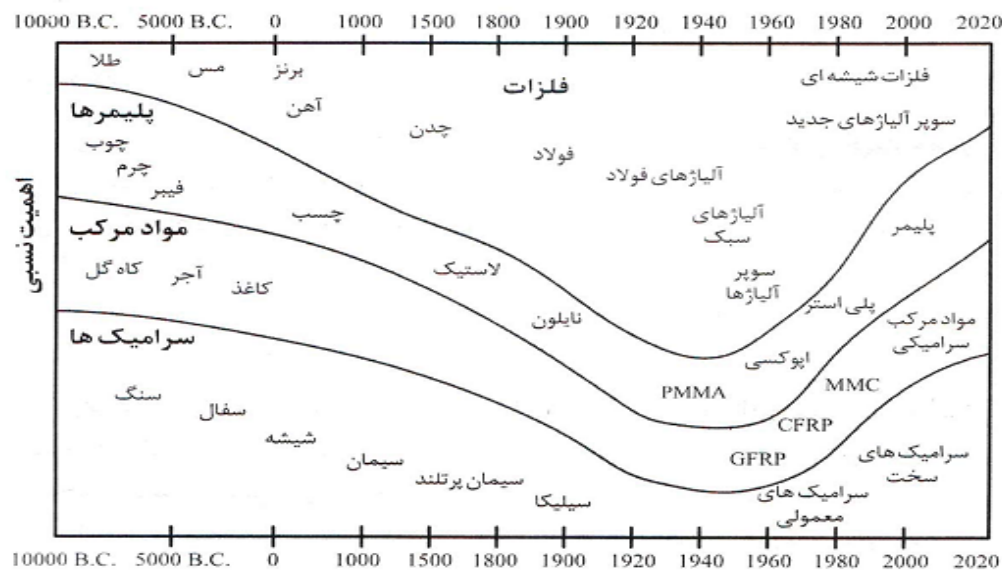
مواد کامپوزیت یا مواد مرکب همواره توسط بشر برای تولید محصولات با کارایی بهتر مورد استفاده قرار گرفته است و گستره کاربرد این مواد از تقویت سفال‌ها توسط موی حیوانات و یا الیاف طبیعی در قرون قبل از میلاد تا جایگزین نمودن فلزات سنگین با پلیمرهای تقویت شده با الیاف با کارایی بالا می‌باشد. توسعه علم مواد مرکب در چند دهه گذشته سرعت بسیار چشم‌گیری داشته است، زیرا نیاز به موادی که بتواند پاسخ‌گوی شاخص‌های مورد نظر برای عملی کردن طرح‌های توسعه‌ای باشد رو به افزایش است. امروزه استفاده از مواد کامپوزیت سبک‌تر و مستحکم‌تر در مقایسه با مواد فلزی سنتی در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی، هوایی، ورزشی و عمرانی نقش بسیار ویژه‌ای دارد.

۱-۲- تاریخچه و کاربرد مواد مرکب

بیش از ۵۰ سال است که از بافندگی تار-پودی، برای تولید پارچه‌های عریض یک لایه به عنوان تقویت کننده‌های لیفی کامپوزیت‌ها استفاده شده است. با این حال، شیوه‌های بافندگی تولید منسوجات سه بعدی شامل الیاف عرضی اتصال دهنده پارچه‌های صفحه‌ای به یکدیگر در حال بهبود هستند. کامپوزیت-های تار-پودی سه بعدی متنوعی از طریق اصلاح دستگاه‌های بافندگی و با استفاده از مقادیر مختلف الیاف در راستای طول، عرض و ضخامت تولید شده‌اند به طوری که می‌توان متناسب با کاربردهای ویژه، خواص آن‌ها را تغییر داد [۱].

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی و ساختمان‌سازی به ترکیب کردن مواد نیاز است و امکان استفاده از یک ماده‌ای که همه خواص را به صورت یک‌جا داشته باشد، وجود ندارد؛ به عنوان مثال در صنایع هوافضا به ساخت سازه‌ای نیاز است که در ضمن داشتن مقاومت بالا، تا حد ممکن سبک بوده و استحکام بالایی داشته باشند و در دماهای زیاد دچار شکست نشوند. بنابراین باید به دنبال روشی برای ترکیب مواد و به دست آوردن خواص مورد نیاز بود. یک راه حل، استفاده از مواد مرکب یا کامپوزیت می‌باشد.

مواد مرکب از ترکیب دو یا چند ماده با یکدیگر به طوری که به صورت شیمیایی مجزا و غیر محلول در یکدیگر باشند و بازده و خواص سازه‌ای این ترکیب نسبت به هریک از اجزاء تشکیل دهنده آن به تنهایی، در موقعیت برتری قرار بگیرد، گفته می‌شود. از نمونه‌های قدیمی کاربرد این نوع مواد می‌توان به کاه گل و یا مومیایی اشاره نمود. شکل (۱-۱) اهمیت نسبی توسعه مواد در طول تاریخ را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) اهمیت نسبی توسعه مواد در طول تاریخ [۲]

۱-۲-۱- طبقه بندی کامپوزیت‌ها بر اساس نوع زمینه

بر اساس نوع زمینه، کامپوزیت‌ها به سه دسته زیر تقسیم بندی می‌شوند [۳]:

الف- کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ (MMC)

ب- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی^۲ (CMC)

ج- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری^۳ (PMC)

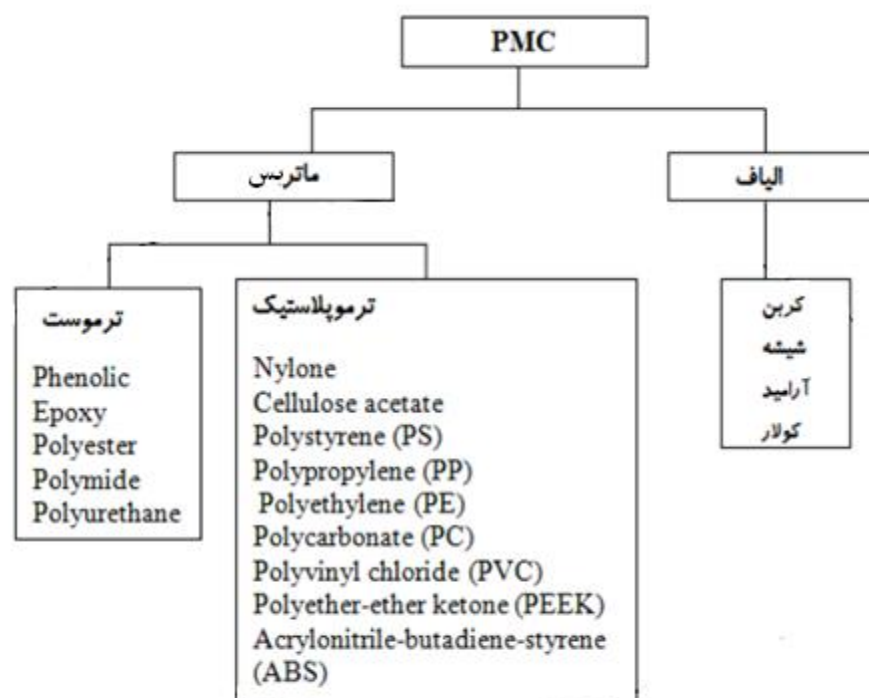
کامپوزیت‌های زمینه پلیمری دسته ای از کامپوزیت‌ها هستند که از الیاف کوتاه یا بلند در زمینه

1 Metal Matrix Composite

2 Ceramic Matrix Composite

3 Polymer Matrix Composite

پلیمری ساخته می‌شوند. این دسته از کامپوزیت‌ها برای انتقال بار از بین الیاف و ماتریس طراحی و بکاربرده می‌شوند. طیف گسترده‌ای از صنایع مهم همچون تولید قطعات هواپیما، کشتی‌سازی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌کنند. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شامل زمینه‌ای از جنس پلیمر (رزین) هستند که به فاز توزیع شده‌ی تقویت کننده متصل شده است. در شکل (۲-۱) تقسیم‌بندی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری مشاهده می‌شود.



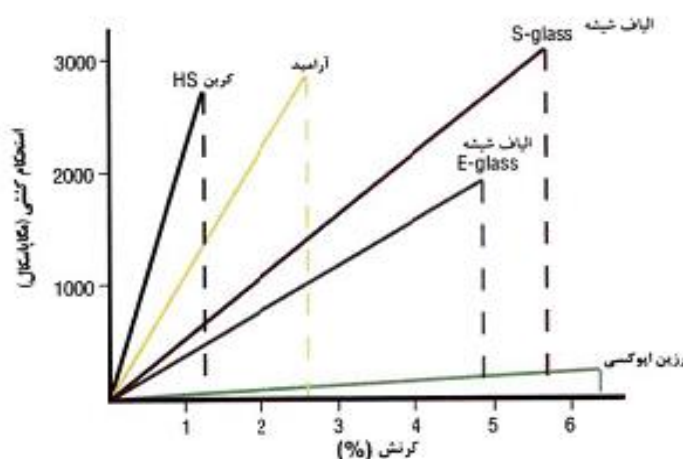
شکل (۲-۱) تقسیم‌بندی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری [۴]

۳-۱- اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها به دو قسمت ۱- الیاف ۲- رزین تقسیم می‌شوند که هر یک در ادامه به طور مختصر بیان می‌شوند.

۱-۳-۱- الیاف

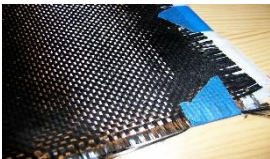
الیاف یک ماده است که توسط ویژگی هایی مانند انعطاف پذیری، میزان لطافت و نرمی و نسبت بالای طول به قطر (ضخامت) شناخته می شود. از آن جایی که الیاف دارای نسبت زیاد سطح به حجمش می باشد، مواد بسیار قدرتمند و قوی ای محسوب می شوند. سه نوع اصلی الیاف، الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف پلیمری (آرمید) بوده و باید توجه داشت که الیاف، حجم قابل توجهی از یک ماده مرکب را تشکیل می دهند. شکل (۳-۱) نمودار تنش- کرنش را برای الیاف مختلف و رزین اپوکسی نمایش می - دهد.



شکل (۳-۱) نمودار تنش-کرنش برای الیاف مختلف و رزین [۵]

در سازه های که وزن یک ویژگی بسیار پر اهمیت است، الیاف کربن به دلیل سبکی، استحکام بالا، مقاومت در برابر مواد شیمیایی و رطوبت و رسانا بودن بسیار پرکاربرد خواهد بود. در جدول (۱-۱) برخی از معایب و مزایای این الیاف ذکر شده است.

جدول (۱-۱) مزایا و معایب الیاف کربن [۶]

مزیای الیاف کربن	معایب الیاف کربن
	
- نسبت بسیار زیاد استحکام به وزن - نسبت بالای مدول کششی به وزن - استحکام بالای خستگی - ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین	- شکننده بودن - هادی الکتریکی - کرنش کم در شکست - قیمت بالا

همچنین الیاف شیشه رایج‌ترین و پر مصرف‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت است. الیاف‌های شیشه تارهای بسیار باریک از جنس شیشه با قطر ثابت و طول نامحدود هستند. تفاوت الیاف شیشه با پشم شیشه در این است که قطر تارها در پشم شیشه غیر یکنواخت و طول آن محدود است. بیش از نیمی از مواد اولیه مورد استفاده در ساخت الیاف شیشه، ماسه سیلیس است که قسمت اصلی هر نوع الیاف شیشه را تشکیل می‌دهد. سایر اجزاء شامل مقادیر ناچیز ترکیبات شیمیایی دیگر می‌باشند. در جدول (۱-۲) برخی از معایب و مزایای این الیاف ذکر شده است.

جدول (۲-۱) مزایا و معایب الیاف شیشه [۶]

مزایای الیاف شیشه	معایب الیاف شیشه
	
• قیمت پایین • استحکام کششی بالا • مقاومت شیمیایی بالا • خواص عایقی بالا (حرارتی)	• مدول کششی پایین • وزن مخصوص نسبتا بالا • حساسیت به سایش • مقاومت خستگی پایین و شکننده بودن

رشته الیاف شیشه از فیبرهای شیشه‌ای تشکیل می‌شوند که تارهایی به ضخامت حدود ۱۰ میکرون دارند. مقاومت کششی و شیمیایی بسیار بالای الیاف باعث شده تا استفاده از آن‌ها در ساخت قطعات صنایع هوافضا، خودرو، دریایی و ساختمانی، تجهیزات مبلمان و تجهیزات ورزشی، روز به روز بیشتر شود.

۱-۳-۲- ماتریس‌ها (رزین یا چسب)

مواد ماتریس در کامپوزیت‌ها، الیاف تقویت کننده را احاطه کرده تا نیروها را به الیاف منتقل نمایند و همچنین الیاف را از صدمات مکانیکی و محیطی حفظ می‌کنند. خواص شیمیایی و خواص حرارتی ماده کامپوزیت بوسیله ماتریس کنترل می‌شود. رزین نیروی اعمال شده به تمامی یا بخشی از الیاف‌ها را جذب می‌کند و کامپوزیت را در مقابل صدمات ناشی از ضربه و سایش مصون نگه می‌دارد. رزین‌ها به دو بخش اصلی ترموپلاستیک‌ها و ترموست‌ها تقسیم می‌شوند. تفاوت این دو دسته به رفتار آن‌ها در مقابل گرما وابسته است. ترموست‌ها پس از استفاده قابل بازگشت نیستند در حالی که ترموپلاستیک‌ها را می‌توان با ذوب کردن مورد بازیافت قرار داد و دوباره از آن استفاده کرد، اگر چه رزین‌های

ترموپلاستیک شکل پذیرتر از رزین‌های ترموست می‌باشند [۶].

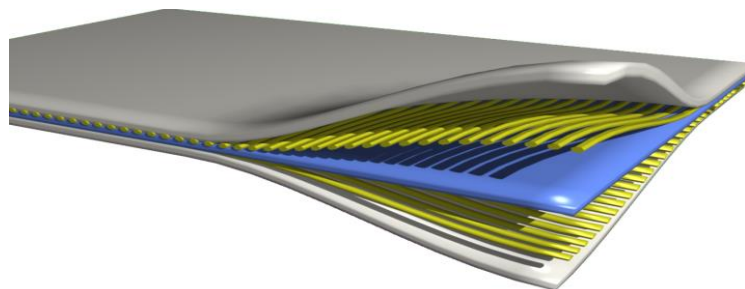
۴-۱- رفتار مواد مرکب

۴-۱-۱- تک لایه‌ها

مواد مرکب لایه‌ای از مجموع تعداد لایه‌های متفاوت شکل می‌گیرند و هر لایه از ترکیب الیاف و رزین ساخته می‌شود. تک لایه‌ها، صفحه‌هایی مسطح و یا پوسته‌هایی با انحنا می‌باشند، که از تعدادی الیاف تک جهته و یا بافته شده و در یک ماتریس نگه داشته می‌شوند. الیاف را به طور کلی به دلیل داشتن سفتی و مقاومت مناسب، در جهت اعمال نیرو قرار می‌دهند. عملکرد ماتریس برای نگهداری الیاف کنار یکدیگر و انتقال نیرو بین آن‌ها می‌باشد، تا استحکام و مقاومت مناسب را برای این لایه‌ها فراهم نماید [۶].

۴-۱-۲- چند لایه‌ها

چند لایه‌ها از چسباندن چند تک لایه در جهات مختلف نسبت به محورهای اصلی، جهت تامین سفتی و مقاومت مناسب به دست می‌آیند. جهات لایه‌ها می‌توانند نسبت به صفحه میانی چند لایه متقارن و یا دلخواه باشند که آنالیز آن‌ها متفاوت می‌باشد. شکل (۴-۱)، تک لایه‌ها و نحوه ایجاد یک چند لایه را نشان می‌دهد [۶].



شکل (۴-۱) کامپوزیت‌های چند لایه و تک لایه [۶]

۱-۵- فرآیندهای ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به عواملی مانند ماده زمینه و جنس الیاف، هندسه و شکل سازه، دمای به کارگیری، نحوه استفاده و غیره بستگی دارد. امروزه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند ولی عمده این روش‌ها در دو دسته مهم زیر قرار می‌گیرند [۷]:

۱. فرآیند قالب‌گیری باز

۲. فرآیند قالب‌گیری بسته

فرآیند قالب‌گیری باز ساده‌ترین روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. این فرآیند برای قطعات با اندازه بزرگ استفاده می‌شود. فرآیند قالب‌گیری بسته برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با تقویت کننده فایبرگلاس، الیاف کربن و آرامید وقتی تولید قطعات یکسان با سطوح صاف مورد نیاز است استفاده می‌شوند.

۱-۵-۱- فرآیند قالب‌گیری باز

فرآیندهای قالب‌گیری باز انواع و شکل‌های مختلفی دارد که در ادامه به بررسی و توضیح مختصری از هر نوع خواهیم پرداخت.

انواع فرآیندهای قالب‌گیری باز عبارتند از [۸]:

۱. لایه‌گذاری دستی^۱

۲. پاشش رزین^۲

۳. رشته پیچی^۳

1 Land Lay Up

2 Spray Up

3 Filament Winding

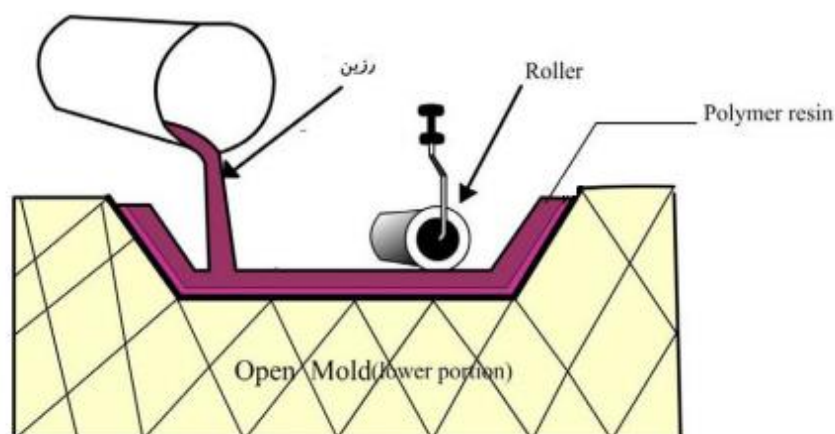
۱-۵-۱- لایه گذاری دستی

در این روش ابتدا جداکننده بر روی سطح قالب یا قطعه اسپری یا فرچه زده می شود تا جدا کردن قطعه ساخته شده به راحتی انجام گیرد. سپس الیاف یا بر روی قالب یا در درون قالب (بسته به قطعه) به تعداد لایه ها برای ساخت قرار گرفته داده می شود و مخلوط رزین اپوکسی و سخت کننده با دست بر روی آن ریخته و توسط قلم و یا غلطک آغشته سازی کامل صورت می گیرد. همچنین این امکان وجود دارد که الیاف ابتدا به رزین آغشته شود و بعد لایه گذاری انجام گیرد. حباب های هوای گیر کرده در قطعه با حرکت قلم یا غلطک و فشار دادن الیاف خارج می شوند. لایه گذاری و آغشته سازی تا رسیدن به ضخامت مورد نظر ادامه می یابد. قطعه به طور کلی در فشار و دمای محیط پخت می شود. با کاتالیزور و شتاب دهنده می توان زمان پخت را تنظیم نمود. بیشترین رزین های مورد استفاده در این روش، پلی استر و اپوکسی می باشند. پلی استر به دلیل قیمت ارزان، در دسترس بودن و سهولت کار، رزین مطلوبی محسوب می شود. همچنین پلی استر به راحتی با جداکننده استاندارد، از قالب جدا می شود. اپوکسی ها گران قیمت اند ولی خواص بهتری دارند. جداکننده قالب برای استفاده از اپوکسی ضروری است و در غیر این صورت قطعه به قالب می چسبد و منجر به مشکلات جدا کردن قطعه از قالب، صدمه به قطعه و حتی قالب می شود.

الیاف شیشه متداول ترین تقویت کننده در کامپوزیت های ساخته شده به روش لایه گذاری دستی می باشد. در جدول (۱-۳) رزین ها و الیاف های مناسب برای استفاده در لایه گذاری دستی مشاهده می شود. این الیاف از رشته های نازکی با جهت های تک و چند جهته تشکیل شده اند. در این فرآیند انواع الیاف از قبیل پارچه، نمد، الیاف کوتاه و رشته ای استفاده می شود و شکل الیاف نقش بحرانی در این فرآیند ندارد. در شکل (۱-۵) شماتیک استفاده از لایه گذاری دستی آورده شده است [۸].

جدول (۳-۱) رزین‌ها و الیاف مورد استفاده در لایه‌گذاری دستی [۸]

زمینه	اپوکسی، پلی استر، استر پی وی سی، رزین فنولیک، پلی استر غیر اشباع، رزین‌ها پلی اورتان
الیاف	الیاف شیشه، الیاف کربن، الیاف آرامید، الیاف گیاهی طبیعی (موز، گزنه، کنف، کتان و غیره)



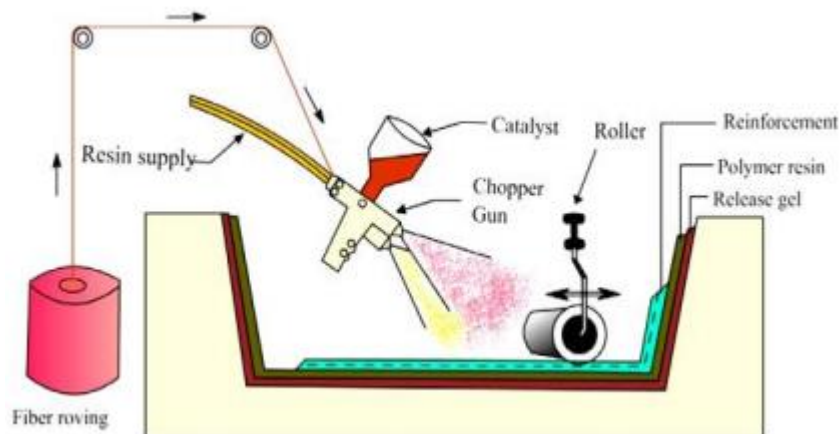
شکل (۵-۱) شماتیک روش لایه‌گذاری دستی [۸]

۱-۵-۲- پاشش رزین

در فرآیند پاشش رزین، الیاف و رزین به طور همزمان بر روی یا درون یک قالب پاشیده می‌شوند. الیاف رشته‌ای به یک خردکن وارد شده و بعد به داخل جریان رزین و سخت‌کننده وارد می‌گردد. سیستم پاشش ممکن است با هوا باشد. به منظور سهولت کار از یک تفنگ پاشش که به یک میله متحرک متصل است استفاده می‌شود. پس از پاشش رزین و الیاف و نشست آنها روی قالب، حباب‌های هوا توسط غلطک یا قلم با فشار دادن سطح الیاف خارج می‌شوند و الیاف سطحی صاف و یکنواخت به خود می‌گیرد. لایه‌های بعدی رزین و الیاف را نیز می‌توان تا رسیدن به ضخامت مطلوب اعمال نمود. در جدول (۴-۱) رزین‌ها و الیاف‌های مناسب در روش پاشش رزین آورده شده است. قطعه یا کامپوزیت ساخته شده در فشار و دمای محیط پخت می‌شود، هر چند می‌توان با استفاده از کاتالیزورهای مطلوب روند پخت را سریع‌تر انجام داد. در شکل (۶-۱) شماتیکی از فرآیند پاشش رزین مشاهده می‌شود [۸].

جدول (۴-۱) رزین‌ها و الیاف مورد استفاده در پاشش رزین [۸]

زمینه	اپوکسی، پلی استر، پلی وینیل استر، رزین فنولیک، رزین‌ها پلی اورتان
الیاف	الیاف شیشه، فیبرکربن، الیاف آرامید، میکا، فیبر بور

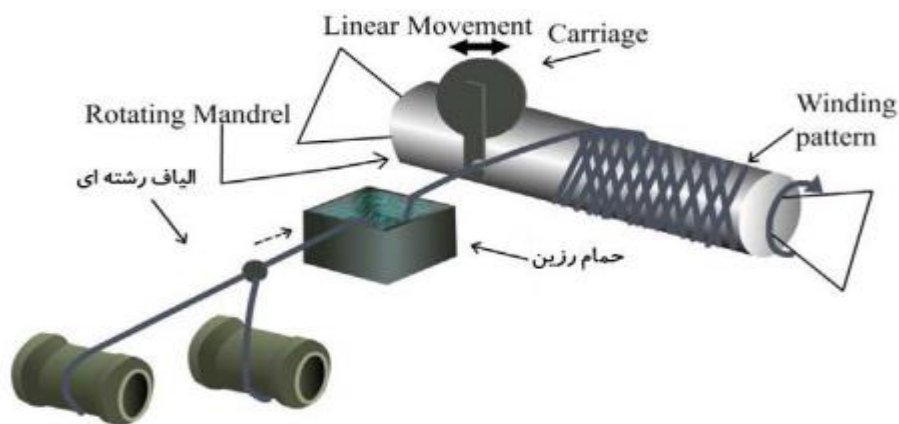


شکل (۶-۱) شماتیک روش پاشش رزین [۸]

۱-۵-۱-۳- رشته پیچی

روش رشته پیچی یک روش ساده و کارآمد برای تولید قطعات مدور مانند لوله و ظروف استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف با قطر ۶ تا ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. در ابتدا فقط از الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده در این فرآیند استفاده می‌شد ولی امروزه برای قطعات با استحکام بالا از الیاف کربن و برای قطعات چقرمه و سبک از الیاف آرامید نیز استفاده می‌شود. این الیاف به شکل های رشته ای، پارچه و نوارهای بافته و نابافته می‌توانند استفاده شوند. پلی استرها و وینیل استرها به دلیل قیمت پایین، خواص مکانیکی و شیمیایی، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فرآیند الیاف‌های رشته‌ای یا نوارهای پیوسته‌ی الیاف بر روی یک شفت پیچیده می‌شوند. در این روش رزین ممکن است قبل، همزمان و یا بعد از پیچش الیاف بر روی قطعه اعمال شود. همچنین در این روش به دلیل خارج کردن قطعه از سطح

کامپوزیت عملیات تکمیلی مانند ماشین‌کاری و سنباده‌زنی نیاز نیست. شکل (۷-۱) به طور شماتیکی فرآیند تهیه کامپوزیت زمینه پلیمری به روش رشته پیچی را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۱) شماتیک روش رشته پیچی [۹]

۱-۵-۲- فرآیند قالب‌گیری بسته

فرآیند قالب‌گیری بسته برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با تقویت کننده الیاف‌های شیشه، کربن و آرامید زمانی به کار می‌رود که قطعات یکسان با سطوح صاف مورد نیاز باشد. با توجه به روند استفاده از روش‌های قالب‌گیری باز در این پایان‌نامه، تنها به ذکر نام انواع این نوع قالب‌گیری پرداخته شده است.

انواع قالب‌گیری بسته عبارتند از [۹]:

۱. قالب‌گیری ورقه ای SMC^۱

۲. روش پالتروژن^۲

۳. قالب‌گیری فشاری^۳

1 Sheet Moulding Compound

2 Pultrusion

3 Injection molding

۱-۶- روش‌های مقاوم سازی ستون با الیاف

روش‌های متنوعی برای مقاوم سازی ستون‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده^۲ وجود دارد. این روش‌ها برای دو حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی صادق می‌باشند. روش‌ها را می‌توان به سه حالت زیر تقسیم بندی کرد [۱۰]:

۱. دورپیچی کردن^۳

۲. پوشش دادن با استفاده از FRP^۴

۳. پوشش دادن با استفاده از صفحه آماده FRP^۵

۱-۶-۱- دورپیچی کردن

یکی از مهم‌ترین روش‌های مقاوم‌سازی روش دورپیچی کردن ستون و یا اعضای سازه است. اجرای آن بسیار راحت و همچنین در مقایسه با سایر روش‌ها موثرتر است. به دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن FRP مقاومت و شکل‌پذیری مقطع افزایش می‌یابد و همچنین افزایش وزن زیادی ندارد. نمونه‌ای از دورپیچ کردن با FRP در شکل (۸-۱) مشاهده می‌شود.

1 Resin Transfer Molding and Autoclave Molding

2 Fiber Reinforce Polymer

3 Warping

4 Filament winding

5 Prefabricated shell jacketing



شکل (۸-۱) دورپیچ کردن با FRP

۱-۶-۲- پوشش دادن با استفاده از FRP

۱-۶-۲-۱- پوشش و تقویت با الیاف افقی

پوشش سطح خارجی ستون با استفاده از FRP می‌تواند ظرفیت برشی و همچنین شکل‌پذیری ستون را در برابر بارهای لرزه‌ای و فشاری افزایش دهد. این پوشش با استفاده از رزین اپوکسی به سطحی که نیاز به تقویت دارد در راستای طولی قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین مزایای این روش افزایش و بهبود مقاومت کششی، برشی و خمشی سطح عضو اشاره کرد. جهت مقاوم‌سازی برشی لازم است که ستون در کل ارتفاع پوشانده شود. در شکل (۹-۱) پوشش افقی یک ستون با مقطع دایره‌ای مشاهده می‌شود [۱۰].



شکل (۹-۱) پوشش افقی ستون با مقطع دایره‌ای [۱۰]

۱-۶-۲-۲- پوشش طولی FRP

پوشش افقی FRP باعث افزایش ظرفیت خمشی عضو می‌شود و اگر مقطع دارای بار محوری نیز باشد، استفاده از پوشش عرضی و طولی FRP می‌تواند بسیار موثر باشد، پوشش طولی برای مواقعی که از بار فشاری به صورت متمرکز اعمال می‌گردد، توصیه می‌شود. شکل (۱۰-۱) مقاوم‌سازی به روش طولی را نشان می‌دهد [۱۱].



شکل (۱۰-۱) پوشش طولی ستون با مقطع دایره‌ای [۱۱]

۱-۶-۳- پوشش دادن با استفاده از صفحه آماده FRP

پوشش با استفاده از صفحات آماده یکی از بهترین روش‌های تقویت ستون‌ها و سازه‌ها در صنعت ساختمان سازی است. در مواردی که سازه دارای نقص‌های ساختاری است و نیاز به اصلاح فرم دارد از این روش جهت بهبود فرم و همچنین تقویت آن استفاده می‌شود. همچنین به لحاظ کنترل کیفیت ساخت و زحمت کار کمتر نسبت به روش‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است اما محدودیت در شکل‌پذیری صفحات و هزینه گراف تهیه FRP به صورت صفحه منجر به کاهش استفاده از این روش شده است [۱۰].

۱-۷- آلومینیوم و انواع آلیاژهای آن

آلیاژهای آلومینیوم در حالت کلی به دو دسته کارپذیر^۱ و ریختگی^۲ تقسیم می‌شوند و هر کدام از این گروه‌ها به دو دسته عملیات حرارتی و غیر حرارتی تقسیم بندی می‌شوند. آلومینیوم معمولاً به منظور بهبود خواص مکانیکی یا شیمیایی با چندین عنصر مختلف به صورت آلیاژ ساخته می‌شود. در نتیجه تعداد زیادی از ترکیبات عناصر آلیاژی وجود دارد که می‌توانند برای دستیابی به خواص مورد نظر مورد استفاده قرار گیرند و منجر به طیف گسترده‌ای از انواع مختلف ورق آلومینیوم می‌شود. برای کمک به تشخیص همه این ترکیب‌ها، از یک سیستم نام‌گذاری برای آلیاژهای مختلف آلومینیوم استفاده می‌شود. مشخصات و نام‌گذاری آلیاژهای آلومینیوم در کشورهای مختلف متفاوت است و همین مسئله انتخاب آلیاژهای آلومینیوم برای به کار بردن در صنعت دشوار می‌کند. در ابتدای سالهای اولیه کشف فلز آلومینیوم هر آلیاژ نو و جدیدی که ساخته می‌شد توسط کمپانی‌های سازنده و به نام مورد نظر آنها اسم گذاری می‌شد و هیچ گونه نام‌گذاری بین المللی و جهانی وجود نداشت. در سال ۱۹۷۰ سیستم نام‌گذاری بین المللی برای محصولات آلیاژ آلومینیوم معرفی شد و بر اساس دسته‌بندی جامعه آلومینیوم

1 Workable

2 Casting

آمریکا آلیاژهای آلومینیوم نام‌گذاری شدند. نام‌گذاری آلیاژها کار شده آلومینیوم در جدول (۷-۱) نمایش داده شده است.

جدول (۵-۱) نام‌گذاری آلیاژهای آلومینیوم [۱۱]

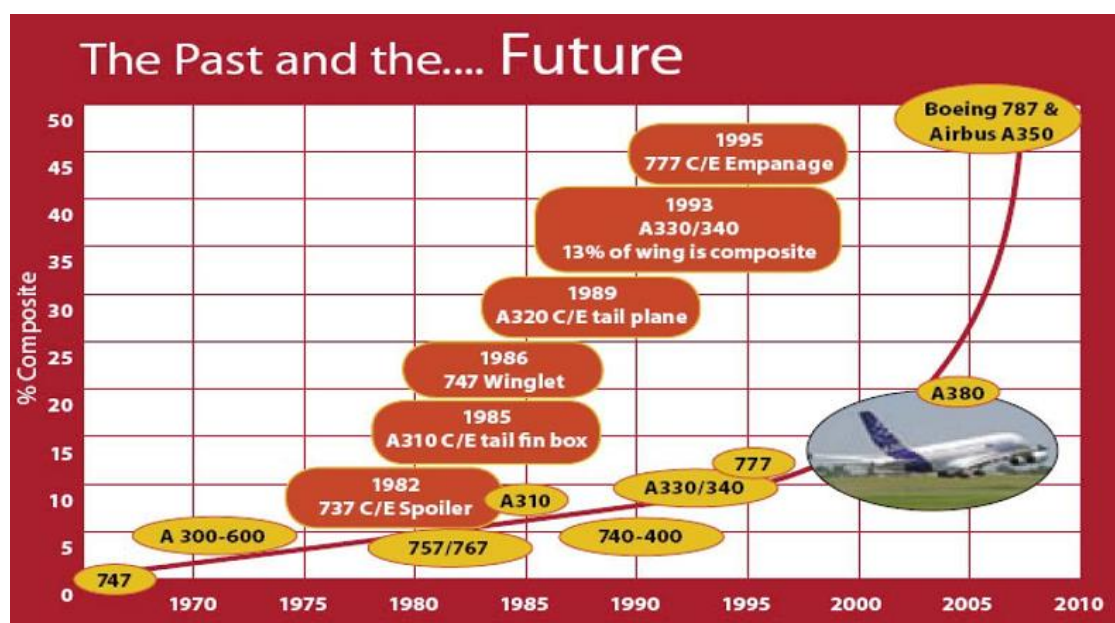
نام‌گذاری	عناصر آلیاژی اصلی
۱XXX	آلومینیوم با خلوص حداقل ۹۹ درصد
۲XXX	مس عنصر آلیاژی است و ممکن است عناصر دیگر مانند منیزیم نیز اضافه شود.
۳XXX	منگنز عنصر آلیاژی است.
۴XXX	سیلیسیم عنصر آلیاژی است.
۵XXX	منیزیم عنصر آلیاژی است.
۶XXX	منیزیم و سیلیسیم عنصر آلیاژی است.
۷XXX	روی عنصر آلیاژی است ولی سایر عناصر مانند مس، منیزیم، کروم و زیرکونیم نیز ممکن است اضافه شود.
۸XXX	عناصر دیگر (شامل قلع و برخی ترکیبات لیتیوم)
۹XXX	استفاده نشده (رزرو) و برای کاربردهای آینده اختصاص دارد.

۷-۱-۱- آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

در بین آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم که قابلیت عملیات رسوب سختی دارند آلیاژهای سری ۷xxx به علت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب از اهمیت خاصی برخوردار هستند. آلیاژ ۷۰۷۵ یکی از مهمترین آلیاژهای سری ۷xxx آلومینیوم است که به علت نسبت استحکام به وزن بالا کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا و نظامی دارد. این آلیاژ از عنصر پایه آلومینیوم، عناصر آلیاژی اصلی Zn، Mg و Cu و عناصر فرعی Cr، Zr، Mn و ناخالصی‌هایی نظیر Fe و Si که معمولاً همراه آلومینیوم وجود دارند، تشکیل شده است و بسته به ترکیب شیمیایی، انواع ترکیبات بین فلزی در آن وجود دارند. ذرات رسوبی نظیر $MgZn_2$ که در اثر عملیات رسوب سختی به وجود آمده و باعث افزایش استحکام آلیاژ می‌شوند از آن جمله هستند [۱۱].

۸-۱- کاربرد مواد کامپوزیتی در صنایع هوافضا

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا گسترش یافته است به گونه‌ای که توسعه کاربرد این مواد عموماً در تمامی طراحی‌ها و کارخانه‌ها در اولویت قرار گرفته است. نمونه بارز این گسترش کاربرد، ساخت هواپیمای ایرباس A۳۸۰ و بوئینگ ۷۸۷ می‌باشد که به ترتیب ۲۳ درصد و ۵۰ درصد وزن آن‌ها از قطعات کامپوزیت ساخته شده است. از مزایای استفاده از کامپوزیت‌ها به طور کلی می‌توان به یکپارچه سازی بهتر، کاهش تعداد قطعات، کاهش وزن، صافی سطحی بیشتر و مقاومت خستگی بالاتر اشاره کرد. در شکل (۱۱-۱) درصد کاربرد کامپوزیت‌ها در ساخت هواپیماهای مسافربری نشان داده شده است.

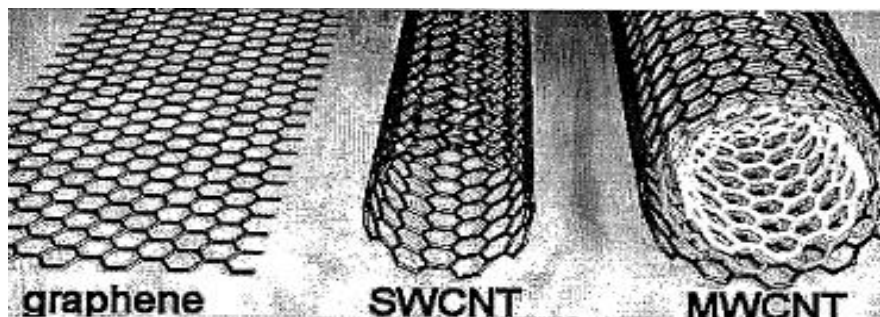


شکل (۱۱-۱) روند به کارگیری کامپوزیت‌ها در هواپیماهای مسافربری [۱۲]

۹-۱- نانو لوله های کربنی

اتم‌های کربن در یک نانولوله کربنی با ساختار استوانه‌ای قرار گرفته‌اند، یعنی لوله‌هایی تو خالی متشکل از اتم‌های کربن که به یکدیگر پیوسته‌اند. آرایش اتم‌های کربن در دیواره این ساختار استوانه‌ای، مشابه

آرایش اتم‌های کربن در لایه‌های گرافیت است. اتم‌های کربن در این لایه‌ها تشکیل دیواره استوانه‌ای می‌دهند که در یک ساختار شش گوشه با هیبریداسیون SP^2 قرار گرفته‌اند که سهم کوچکی از SP^3 که مربوط به انحنای شبکه در دو انتهای استوانه می‌باشد، در آن مخلوط شده است. در واقع نانولوله را می‌توان به یک صفحه لوله مانند بدون دوخت تعریف کرد که به شکل استوانه در آمده‌اند. آنچه باعث استحکام و مقاومت نانولوله‌ها می‌شود، همانند الماس پایداری باندهای اتمی کربن می‌باشد. ساختار چهار وجهی اتم‌های کربن در الماس در مقایسه با ساختار شش وجهی نانولوله‌ها مانند گرافیت، بسیار متفاوت است. تفاوت مهم دیگر بین ساختارهای داخلی این دو ماده در این است که هیچ الکترون آزاد وجود ندارد که از طریق سازه در الماس سرگردان شود و از این رو گفته می‌شود که عایق‌های عالی هستند. از طرف دیگر الکترون‌های آزاد در ساختار در گرافیت سرگردان می‌شوند. در شکل (۱-۱۲) انواع مختلف از نانولوله‌های کربنی مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۱۲) صفحه گرافیتی، نانو لوله کربنی تک دیواره و چند دیواره [۱۳]

نانولوله‌های کربنی به دو دسته نانولوله‌های کربنی تک دیواره و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم می‌شوند. در دسته اول، نانولوله‌ها شامل فقط یک صفحه گرافن لوله شده‌اند در حالی که نانولوله‌های کربنی چند دیواره شامل بیش از یک صفحه گرافن لوله شده و هم مرکز هستند. قطر نانولوله‌های کربنی از چند نانومتر در مورد تک دیواره‌ها تا چند ده نانومتر در مورد چند دیواره‌ها متغیر است. فاصله بین لایه‌های گرافن در نانولوله‌های کربنی چند دیواره، به علت نیروی دافعه اتمی نمی‌تواند کمتر از ۰.۳۴ نانومتر باشد [۱۳ و ۱۴].

۱-۱۰- خواص و کاربرد نانولوله‌های کربنی

در سال های اخیر نانولوله‌های کربنی به علت یک سری از خصوصیات ویژه، به انتخاب ایده‌آلی برای بسیاری از کاربردها تبدیل شده‌اند به طوری که امروزه در روند تحقیق درباره نانولوله‌ها، توجه زیادی بر روی کاربرد مواد در ساخت ابزارها می‌شود. اکثر پژوهشگرانی که در دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی سراسر دنیا بر روی نانولوله‌های کربنی کار می‌کنند امیدوارند که در آینده‌ای بسیار نزدیک نانولوله‌ها کاربرد صنعتی بسیار وسیعی پیدا کنند.

نانولوله‌ها یکی از مستحکم ترین مواد به شمار می‌روند و از این نظر بهترین ذراتی هستند که از ساختار گرافیت ساخته شده‌اند. از مهم ترین ویژگی های شناخته شده گرافیت مدول لایه‌ای (در امتداد صفحه گرافیت) در حدود $1/06 \text{ Tpa}$ است. از آنجایی که مدول یانگ یک ماده نشان دهنده سفتی آن است انتظار می‌رود که نانولوله‌ها هم سفتی مشابهی داشته باشند. در گذشته برای اندازه گیری خواص مکانیکی می‌بایست نانولوله‌ها به مقدار زیاد تولید می‌شدند و مطالعات روی خواص آنها هم با استفاده از تخمین-های کامپیوتری انجام می‌شد. به طور کلی می‌توان گفت که بیشتر این خواص به خاطر ساختار شش ضلعی دیواره نانولوله‌ها و ساختار لوله‌ای نانولوله‌های کربنی است. انعطاف‌پذیری نانولوله‌ها به انعطاف-پذیری بالای ورقه‌های گرافن و به قابلیت دوباره هیبرید شدن اتم‌های کربن نسبت داده می‌شود [۱۴].

۱-۱۱- آشنایی با نرم افزار آباکوس

یکی از پر کاربردترین نرم افزارها در زمینه انجام آنالیزهای اجزای محدود نرم افزار آباکوس^۱ است. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هیبیت^۲ و همکارانش ایجاد شد. در ابتدا برای کاربرد در انرژی هسته‌ای و مهندسی حفاری طراحی شده بود چرا که مهندسین در این شاخه‌ها به ابزاری برای مطالعه مسائل پیچیده و غیر خطی نیاز داشتند. از آنجا که این نرم افزار بر اساس مسائل غیرخطی ساخته شده

1 ABAQUS

2 David Hibbitt

توانایی بالایی جهت شبیه‌سازی سازه‌های طبیعی دارد. این نرم افزار به کاربر توانایی مدل کردن پیچیده-ترین پدیده‌ها را با در نظر گرفتن اثرات بسیار ظریف می‌دهد. بدین ترتیب با توسعه دامنه وسیع صنایع در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ این نرم افزار به عنوان نرم افزار منتخب در میان سایر نرم افزارها جایگاه ویژه‌ای یافت. استفاده از نرم‌افزار آباکوس با وجود اینکه مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. پیچیده‌ترین مسائل را می‌توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال مسائلی شامل بیش از یک جزء را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدل‌سازی‌ها، حتی مدل‌های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بار گذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی، آباکوس به طور اتوماتیک مقدار رشد بار و تفرانس‌های همگرایی را انتخاب، و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر کمتر می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. این نرم افزار دارای ۹ محیط است که مهم‌ترین بخش با توجه به مهم بودن نوع تکنیک مش‌بندی و تعیین نوع المان می‌باشد. در جدول (۱-۶) محیط‌های مختلف نرم افزار به همراه توضیح مختصری از آنها مشاهده می‌شود [۱۶].

جدول (۱-۶) تعریف محیط‌های نرم‌افزار آباکوس

محیط‌ها	توضیحات
Part	در این محیط کار مدل‌سازی هندسی قطعات انجام می‌شود.
Property	در این محیط کار تعریف خصوصیات مواد مورد تحلیل، تعریف پروفیل سطح مقطع، نسبت دادن خواص تعریف شده به قطعات صورت می‌گیرد.
Assembly	در این بخش کار مونتاژ قطعات مختلف در صورت وجود در تحلیل انجام می‌گیرد.
Step	در این محیط گام‌های حل مسئله انتخاب می‌شوند. در اینجا است که کاربر نوع حلگر را نیز مشخص می‌کند.
Interaction	در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعیین می‌شود.
Load	در این بخش بارگذاری و شرایط مرزی تعیین می‌شوند.
Mesh	کار المان بندی در این محیط صورت می‌گیرد.
Job	در این محیط با تعریف یک job کاربر شروع انجام مسئله را به پردازش‌گر اعلام می‌کند.
Visualization	در این محیط کاربر نتایج حل را مشاهده می‌کنند.

۱۲-۱- ساختار تحقیق

مطالب موجود در این پژوهش به صورت زیر سازماندهی شده‌اند:

در فصل اول مفاهیم اولیه، تعاریف و آشنایی با موضوعات کلی مربوط به ساخت کامپوزیت‌ها توضیح داده شد. در فصل دوم به تعریف مفهوم کمانش و محاسبه کمانش با استفاده از معادلات تعادل و روش رابلی-ریتز، نتایج برخی از مقالات مشابه با تحقیق حاضر و سپس پیشینه تحقیق و هدف از انجام آن پرداخته شده است. در فصل سوم مواد اولیه به کار رفته در ساخت، روش‌های ساخت، تجهیزات مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش به طور کامل شرح داده شده است. در فصل چهارم نتایج و نمودارها و صحت سنجی نرم‌افزاری و مقایسه نتایج عددی و تحلیلی، عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی،

مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم نتایج نهایی حاصل از تحلیل و پیشنهاداتی برای ادامه کار بیان شده است.

فصل دوم: معایم اولیه و پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

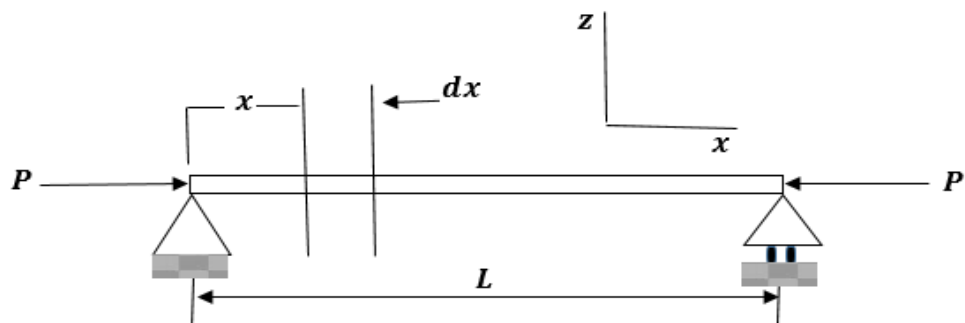
در این فصل ابتدا به معرفی پدیده کمانش در سازه‌ها و روش‌ها مقاوم‌سازی پرداخته می‌شود. سپس روش‌های تحلیلی برای محاسبه کمانش بررسی شده است. در ادامه فصل به مرور مقالات گذشته و پیشینه تحقیق در مورد نانو ذرات مختلف و پژوهش در مورد تقویت کامپوزیت‌ها و ستون‌ها و نتایج برخی مقالات مشابه به پروژه حاضر پرداخته شده است. همچنین در پایان فصل هدف از انجام پژوهش و ضرورت انجام آن بیان شده است.

۲-۲- کمانش

کمانش پدیده‌ای است که می‌تواند باعث به وجود آمدن ناپایداری در یک قطعه تحت بارگذاری شود. به عنوان نمونه هنگامی که بار فشاری به سازه در حال افزایش است، این امکان وجود دارد یک نقطه از سازه دچار ناپایداری شده و میزان خیز آن به صورت ناگهانی شروع به افزایش کند. بهترین مثال برای پدیده کمانش، یک ستون باریک و لاغر است که تحت بار فشار محوری قرار گرفته است. در صورتی که کوچک‌ترین نیروی غیر محوری به این ستون وارد شود، جابجایی‌هایی غیر محوری، به سرعت رشد کرده و پدیده کمانش رخ خواهد داد. باری که در آن، کمانش اتفاق می‌افتد، بار بحرانی کمانش نامیده می‌شود.

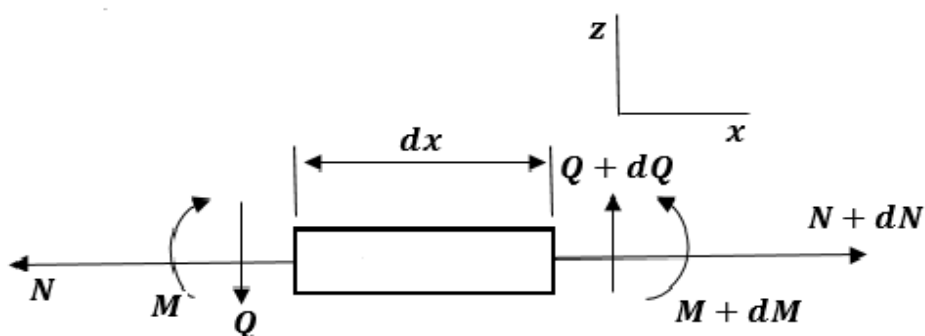
۲-۲-۱- آنالیز کمانش ستون با استفاده از روش تعادل

در شکل (۲-۱) ستونی به طول L دیده می‌شود که به طور محوری تحت بار فشاری P قرار دارد. علائم و جهات قرار دادی نیروها و گشتاورهای وارد بر یک المان از ستون در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. N و Q مؤلفه نیروهای طولی و جانبی وارد بر سطح مقطع ستون و M نیز گشتاور خمشی می‌باشد.



شکل (۱-۲) ستون با بار فشار محوری [۱۷]

برای تعیین اثر چرخش‌ها (β زاویه چرخش) روی رفتار سازه، معادله تعادل حاکم بر المان ستون برای بخش کوچکی که تغییر شکل یافته همانند شکل (۲-۲) اعمال می‌شوند. فرض می‌شود که β کوچک باشد در نتیجه مقادیر $\sin\beta$ و $\cos\beta$ به ترتیب با β و ۱ جایگزین می‌شوند. اگر نیروها در جهات x و z فرض شوند معادلات به دست آمده ساده‌ترین شکل را خواهند داشت.



شکل (۲-۲) علائم قرار دادی نیروها و گشتاورهای وارد بر المان ستون [۱۷]

از جمع مولفه‌های نیرو در راستای x خواهیم داشت:

$$-N + (N + dN) - Q\beta + (Q + dQ)(\beta + d\beta) = 0 \quad (۱-۲)$$

$$N' + Q\beta' + \beta Q' = 0 \quad (۲-۲)$$

که در رابطه (۲-۲) $N' = dN/dx$ است. همچنین جمع نیروها در جهت z نیز عبارتند از:

$$-Q + (Q + dQ) + N\beta - (N + dN)(\beta + d\beta) = 0 \quad (3-2)$$

$$-N\beta' - \beta N' + Q' = 0 \quad (4-2)$$

از جمع گشتاورها نیز خواهیم داشت:

$$M - (M + dM) + Qdx = 0 \quad (5-2)$$

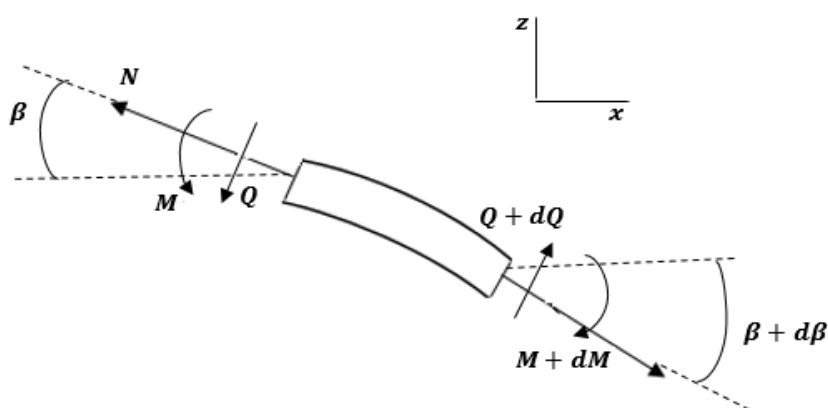
که نتیجه می‌دهد: $Q = M'$.

برای تیرهای نازک مورد مطالعه، تنش‌ها و نیروهای برشی عرضی کوچک هستند. ما این فرض بر این است که مجذور عبارت‌های بیانگر ارتباط غیر خطی بین نیروهای برشی عرضی کوچک و چرخش‌ها قابل چشم‌پوشی هستند. با این فرض سه معادله تعادل (۲-۶)، (۲-۷)، (۲-۸) به صورت ساده شده حاصل می‌گردند.

$$N' = 0 \quad (6-2)$$

$$Q' - N\beta' = 0 \quad (7-2)$$

$$Q = M' \quad (8-2)$$



شکل (۳-۲) نیروها و گشتاورهای وارد بر المان ستون در وضعیت تغییر شکل یافته [۱۷]

با حذف Q از معادلات (۲-۷) و (۲-۸) نتیجه می‌شود:

$$N' = 0 \quad (9-2)$$

$$M'' - N\beta' = 0 \quad (10-2)$$

بنابراین آنالیز تعادل منجر به دو معادله با سه مجهول M ، N ، β شده است. مشخصه تغییر مکان های رده میانی حاضر این است که چرخش β در شکل (۳-۲) کوچک می باشد. بنابراین در شکل (۳-۲) نتیجه می شود که دیفرانسیل تغییر مکان عمودی w' با چرخش β برابر است. از تئوری تیرها رابطه $M = -EIw''$ می باشد که I ممان اینرسی سطح مقطع است. معادلات تعادل را می توان بر حسب دو مجهول w و N به شکل زیر بیان نمود.

$$N' = 0 \quad (11-2)$$

$$EIw^{iv} - Nw'' = 0 \quad (12-2)$$

از معادله (۱۱-۲) دیده می شود که N تابعی ثابت است و با توجه به شکل مسأله می توان ملاحظه کرد که $N = -P$ است. در نتیجه پس از اعمال تغییرات به معادله آشنای زیر می رسیم.

$$EIw^{iv} - Pw'' = 0 \quad (13-2)$$

معادله (۱۳-۲) بیانی مشهور برای تعادل حاکم بر ستونها است که یک معادله همگن نیز می باشد. این معادله یک جواب بدیهی $w = 0$ دارد که بیانگر مسیر تعادل اولیه آن است. حل غیر صفر فقط برای مقادیر مجزای بار اعمالی P یافت می شود. برای این مقادیر که مقادیر ویژه نامیده می شوند معادله جواب های چندگانه ای مرتبط با وضعیت های خمیده و مستقیم ستون دارد. کوچک ترین مقدار ویژه را بار بحرانی می گویند و با P_{cr} نمایش داده می شود. حل عمومی معادله با ضرایب ثابت به آسانی با تابع (۱۴-۲) به دست می آید.

$$W = C_1 \sin Kx + C_2 \cos Kx + C_3 x + C_4 \quad (۱۴-۲)$$

که $K^2 = P/EI$ و C_1 و C_4 نیز ضرایب ثابتی هستند. مقادیر ویژه از جایگزینی معادله (۱۴-۲) در معادلات شرایط مرزی به دست می‌آیند.

شرایط مرزی عبارتند از:

$$w = w'' = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \text{ و } L$$

با جایگزینی شرایط مرزی در معادله (۱۴-۲) خواهیم داشت:

$$C_2 = C_3 = C_4 = C_1 \sin KL = 0 \quad (۱۵-۲)$$

برای ستون‌های دارای تغییر شکل بایستی C_1 غیر صفر باشد. در صورتی که C_1 غیر صفر باشد معادله (۱۵-۲) فقط در صورتی ارضاء می‌شود که $KL = 0$ و $K = n\pi/L$ باشد که در آن π عددی صحیح و مثبت است. معادلات (۱۴-۲) و (۱۵-۲) برای ستون‌های دارای تغییر شکل معادله (۱۶-۲) را حاصل می‌دهند.

$$w = C_1 \sin \frac{n\pi x}{L} \quad n = 1.2.3. \dots \quad (۱۶-۲)$$

رابطه $K = n\pi/L$ به همراه تعریف $K^2 = P/EI$ معادله (۱۷-۲) را برای مقادیر ویژه نتیجه می‌دهد.

$$P = n^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (۱۷-۲)$$

کوچکترین مقدار ویژه به ازای $n = 1$ حاصل می‌شود. بنابراین بار بحرانی به صورت معادله (۱۸-۲) حاصل می‌گردد [۱۸].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (۱۸-۲)$$

در ادامه برای شرایط مرزی دو سر گیردار بار بحرانی کمانش نیز به دست آمده است. معادلات شرایط مرزی ستون دو سرگیردار عبارتند از:

$$w = w' = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \text{ و } L$$

با جایگزینی شرایط مرزی دو سر گیردار در معادله (۲-۱۴) چهار معادله (۲-۱۹) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} C_2 + C_4 &= 0 \\ KC_1 + C_3 &= 0 \\ C_1 \sin KL + C_2 \cos KL + C_3 L + C_4 &= 0 \\ KC_1 \cos KL - KC_2 \sin KL + C_3 &= 0 \end{aligned} \quad (۲-۱۹)$$

حل غیر صفر این دستگاه معادلات همگن زمانی وجود دارد که دترمینان ضرایب C_1 تا C_4 برابر صفر باشد. دترمینان پس از مرتب شدن به شکل حاصل ضرب دو عبارت در می‌آید که جواب‌های آن یکی از عبارت‌های (۲-۲۰) است.

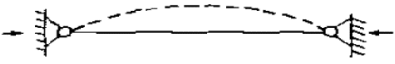
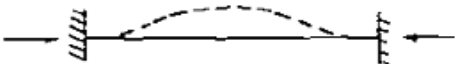
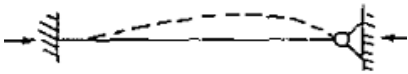
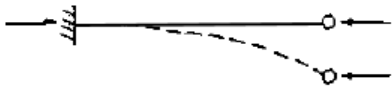
$$\sin \frac{KL}{2} = 0 \quad \text{یا} \quad \tan \frac{KL}{2} = \frac{KL}{2} \quad (۲-۲۰)$$

که کوچکترین مقدار $KL/2$ برای $\sin KL/2$ برابر π است. در حالیکه کوچکترین مقدار آن برای $\tan KL/2 = KL/2$ برابر $4/49$ می‌باشد. در نتیجه کوچکترین مقدار ویژه $KL/2 = \pi$ انتخاب می‌شود و با توجه به اینکه $K^2 = P/EI$ نتیجه می‌گیریم که:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (۲-۲۱)$$

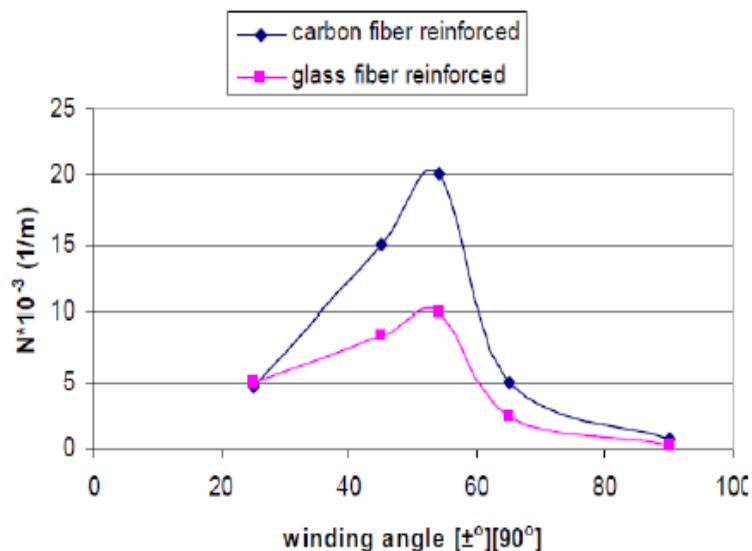
مشاهده می‌شود این نتیجه، که برای یک ستون با شرایط مرزی گیردار در دو انتها به دست آمده است، چهار برابر نتیجه مشابه برای یک ستون با شرایط مرزی ساده می‌باشد [۱۸]. در جدول (۲-۱) بار بحرانی برای شرایط مرزی مختلف آورده شده است.

جدول (۱-۲) مقایسه تأثیر شرایط مرزی بر بار بحرانی (P_{cr})

شرایط مرزی	بار بحرانی	شکل مود تغییر مکان	طول موثر
ساده - ساده	$\frac{\pi^2 EI}{L^2}$		L
گیردار - گیردار	$\frac{4\pi^2 EI}{L^2}$		$\frac{1}{2}L$
ساده - گیردار	$\frac{2/04\pi^2 EI}{L^2}$		$0/7L$
آزاد - گیردار	$\frac{\pi^2 EI}{4L^2}$		$2L$

۲-۳- پیشینه پژوهش

کارپوز [۱۹] در پژوهشی خواص مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی تهیه شده به روش پیچش الیاف را با استفاده از آزمون فشار داخلی بررسی کرد. نتایج آزمون فشار داخلی از لوله‌های تهیه شده نشان داد، لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن فشار بالاتری را در تمام زوایای پیچش الیاف نسبت به الیاف شیشه می‌توانند تحمل کنند. همچنین بیشترین مقدار تحمل فشار داخلی توسط لوله در زاویه ۵۳ درجه پیچش الیاف به دست آمد شکل (۲-۴).

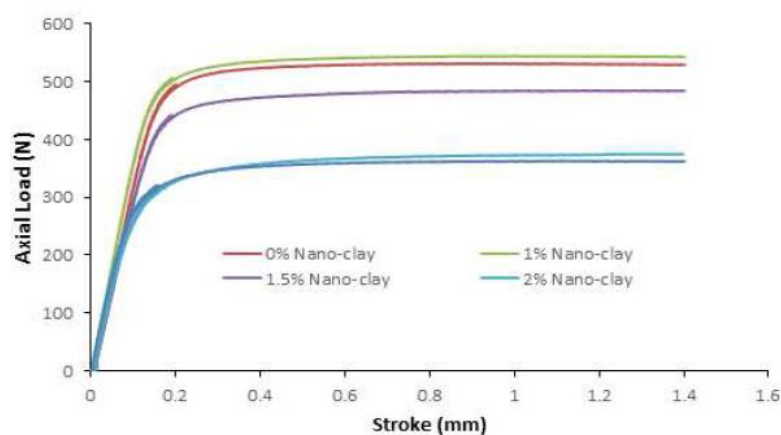


شکل (۲-۴) حد ترکیدن لوله‌های کامپوزیتی تهیه شده از الیاف شیشه و کربن بر حسب زاویه پیچش الیاف [۱۹]

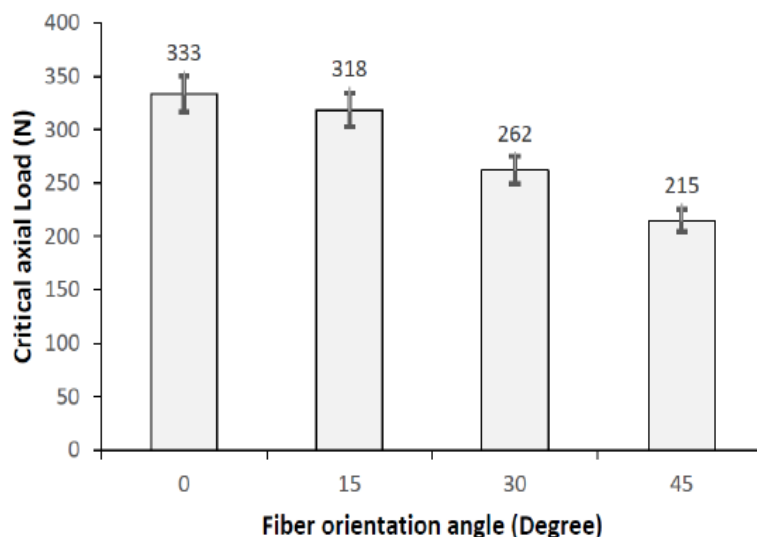
در پژوهش دیگری جیا و همکارانش [۲۰] اثر زاویه پیچش الیاف کربن را بر خواص مکانیکی ستون‌های تهیه شده از کامپوزیت زمینه پلیمری را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد، با افزایش زاویه پیچش الیاف استحکام و تحمل بار بحرانی کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [۲۱]، ۱۴ نمونه از ستون‌های فولادی با پوشش کامپوزیتی را مورد آزمایش قرار دادند. پارامترهای بررسی شده در این آزمایش‌ها، شامل تغییر شکل محوری، شکل مقطع عرضی و تعداد لایه‌های کامپوزیتی پیچیده شده به دور ستون بود. از نتایج مهم به دست آمده در این پژوهش می‌توان بیان کرد که برای ستون‌ها با مقطع دایره‌ای با ترکیب کردن زاویه بین لایه‌های الیاف کامپوزیتی، ظرفیت باربری نهایی در آنها افزایش یافت در حالی که این بهینه‌سازی در ستون‌ها با مقطع مربعی قابل مشاهده نبود. الریفی و همکاران [۲۲]، ۵ ستون بتنی تقویت شده با کامپوزیت الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفتند. آنها در طول این پژوهش متوجه شدند که با پوشش کامپوزیتی مذکور، ستون می‌تواند در مقایسه با ستون‌های معمولی ۵۵ درصد تا ۵۸ درصد بار بیشتری را تحمل کند. هاقانی و همکاران [۲۳ و ۲۴] تقویت سازه‌های فولادی با پوشش کامپوزیتی و بهبود عمر خستگی و بازگرداندن ظرفیت‌های فولاد به ستون را مورد بررسی قرار دادند. از مهمترین نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان به اندازه‌گیری دقیق از میزان شکست در سازه و تطبیق خوب روش تحلیلی با روش تجربی اشاره کرد. دیاب [۲۵] در تحقیق خود بر روی ۹ ستون در

سه بخش که هر بخش شامل ۳ ستون بود آزمایش‌هایی را انجام داد. در این پژوهش موارد بررسی شده بر روی این ستون‌ها شامل: اندازه‌گیری بار نهایی اعمالی، میزان خمش، کمانش و شکل ترک خوردگی بود. از مهم‌ترین نتایجی که در طول پژوهش به دست آمد می‌توان به استفاده از لوله‌های فولادی در ستون‌های بتنی در آزمایش نوع دوم اشاره کرد که منجر به کاهش ترک خوردگی و افزایش ظرفیت نهایی بار شد. السید و همکاران [۲۶] یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی ۱۳ نمونه از ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربعی شامل ستون‌های بلند و کوتاه را مورد آزمایش قرار دادند. از نتایج می‌توان به افزایش مقاومت محوری ستون‌های تقویت شده کوتاه تا ۶ درصد و ستون‌های تقویت شده بلند تا ۷۶ درصد اشاره کرد. پارک و همکارانش [۲۷] اقدام به ارائه نتیجه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی بارگذاری محوری مقطع‌های ستون مربعی توخالی فولادی تقویت شده به وسیله الیاف کربن نمودند. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش در تقویت ستون می‌توان به تأخیر انداختن کمانش موضعی در دو لبه موازی مقطع ستون، ظرفیت حمل بار محوری ستون را افزایش داد. رویکرد یانگ و همکاران [۲۸] در انجام این پژوهش، مدل‌سازی اتصال کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده به سطح ستون‌های بتنی بود. این شبیه‌سازی یک تقریب خوب از نحوه انتشار ترک در ستون و رفتار آن ارائه داد. همچنین در شبیه‌سازی این پژوهش با اضافه کردن تعداد لایه‌های الیاف با زاویه‌های مختلف ترک‌ها بسیار کاهش پیدا کرد و ظرفیت باربری ستون نیز افزایش یافت. شات و همکاران [۲۹] در پژوهش انجام شده بر روی تعمیر و تقویت ستون‌های فولادی با پوشش کامپوزیتی نشان داد که صفحات و نوارهای کامپوزیتی نه تنها در بازگرداندن ظرفیت از دست رفته بخش فولادی آسیب دیده مؤثر هستند بلکه سبب تقویت بخش‌های فولادی و مقاومت در برابر بارهای محوری بزرگتر، و افزایش عمر خستگی آن‌ها می‌شود. در پژوهش فینگ و همکاران [۳۰] برای تقویت ستون‌های فولادی یک روش جدید با استفاده از نوارهای پلیمر تقویت شده فیبر کربنی پیش ساخته شده پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری نمونه تقویت شده ۲ برابر بیشتر از نمونه‌ی بدون تقویت آن است و رشد ترک در نمونه‌های تقویت شده بسیار کاهش پیدا می‌کند. بازکورت و همکاران [۳۱] یک بررسی آزمایشگاهی بر روی کامپوزیت‌های شیشه‌ای تقویت

شده با نانو ذرات رس در ماتریس مشترک رزین اپوکسی مورد پژوهش قرار دادند. در این تحقیق با تغییر زاویه الیاف شیشه و درصد نانو رس به این نتیجه رسیدند که بارهای محوری و کمانش جانبی در زاویه $[0/90]$ مقدار ۱ درصد نانو رس به بهبود ۸.۶٪ منجر می‌شود. آن‌ها کمانش جانبی با محوریت ۱ درصد نانو رس برای زاویه الیاف‌های $[15/75]$ ، $[30/60]$ و 45° درجه را نیز مورد بررسی قرار دادند. در شکل (۵-۲) مقادیر کمانش جانبی به ازای درصدهای مختلف نانو رس مشاهده می‌شود. همچنین در شکل (۶-۲) کمانش جانبی نمونه با ۱ درصد وزنی نانو رس در زاویه‌های مختلف نشان داده شد که بهترین نتیجه در زاویه الیاف $[0/90]$ به دست آمد.



شکل (۵-۲) مقادیر بار کمانشی کامپوزیت شیشه/اپوکسی بر حسب درصد مختلف نانو رس [۳۱]



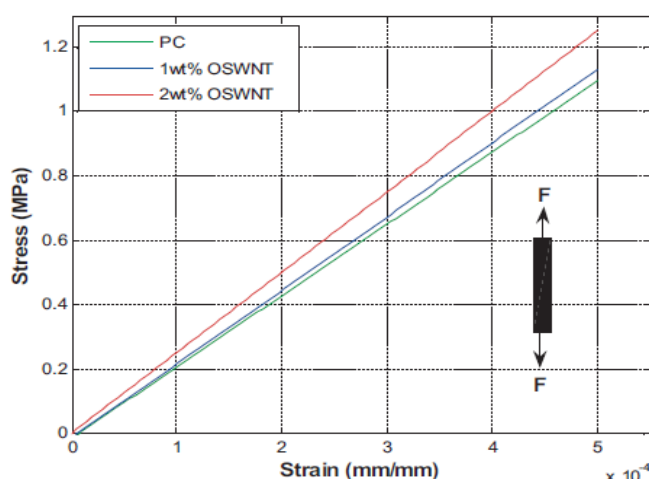
شکل (۶-۲) مقادیر بار بحرانی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی ۱ درصد وزنی نانو رس در زاویه‌های مختلف [۳۱]

سای رام و همکارانش [۳۲] کمانش پوسته‌های کامپوزیتی چند لایه را تحت بار متقاطع مورد بررسی

قرار دادند. آن‌ها آنالیز هندسی را با استفاده از روش المان محدود و بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر، انجام دادند. لام و همکاران [۳۳] به مدل‌سازی ستون‌های بتنی تقویت شده با کامپوزیت پرداختند. رفتار تنش و کرنش برای طراحی ایمن و اقتصادی پوشش کامپوزیتی چندین مدل از الیاف-های مختلف شبیه‌سازی شد. آن‌ها در طول انجام پژوهش نتیجه گرفتند که مدل تنش و کرنش برای ستون‌ها تحت نیروی محوری چرخشی بهترین نتیجه را می‌دهد. اقبال و همکاران [۳۴] مقاومت کامپوزیت‌های کربن تقویت شده با نانو رس در برابر ضربه را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با قرار گیری نانو رس در رزین اپوکسی علاوه بر افزایش چسبندگی بین پیوندهای رزین، کامپوزیت تقویت شده از حالت کمانش شکننده به حالت لایه لایه شدن تغییر حالت داد. جاناناتان و همکاران [۳۵] در یک بررسی مروری بر تأثیر نانولوله‌های کربن بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرداختند. دنیل و همکاران [۳۶] خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کربن را با استفاده از نانولوله‌های مخلف مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم این پژوهش بهبود استحکام کششی و فشاری کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند دیواره بود. گوجنی و همکاران [۳۷] تأثیر نانولوله‌های کربنی مختلف را در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری مورد بررسی قرار دادند. افزودن نانولوله‌های کربنی تک دیواره و چند دیواره منجر به افزایش مقاومت و استحکام کششی در کامپوزیت‌های پلیمری شد و همچنین رشد قابل توجهی در چقرمگی شکست داشت. در پژوهش کنول و همکاران [۳۸] تأثیر نانو ذرات کربن چند دیواره و گرافن لایه لایه را در خستگی کامپوزیت‌های فیبر کربن مورد آزمایش قرار گرفت. عمر خستگی برای هر دو نوع نانو ذره بهبودی چشم‌گیر به دست آمد و تغییر شکل پلاستیک در ماتریس نانو ذره کربن چند دیواره بسیار بیشتر از نانو ذره گرافن مشاهده شد. ویسلومسکی و همکاران [۳۹] به بررسی رفتار کمانشی ستون‌های کامپوزیت کربنی کوتاه و به شکل نعل اسب پرداختند. شرایط مرزی به صورت دو سرگیردار و ساده و نیروهای اعمالی از نوع بارگذاری دو محوره‌ی انتخاب شد. کوارسیمین و همکاران [۴۰] به بررسی رشد ترک و خرابی کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی که در معرض بارگذاری خستگی تنش و پیچش قرار دارند، پرداختند. از مهمترین نتایج که با استفاده از تصاویر الکترونی حاصل

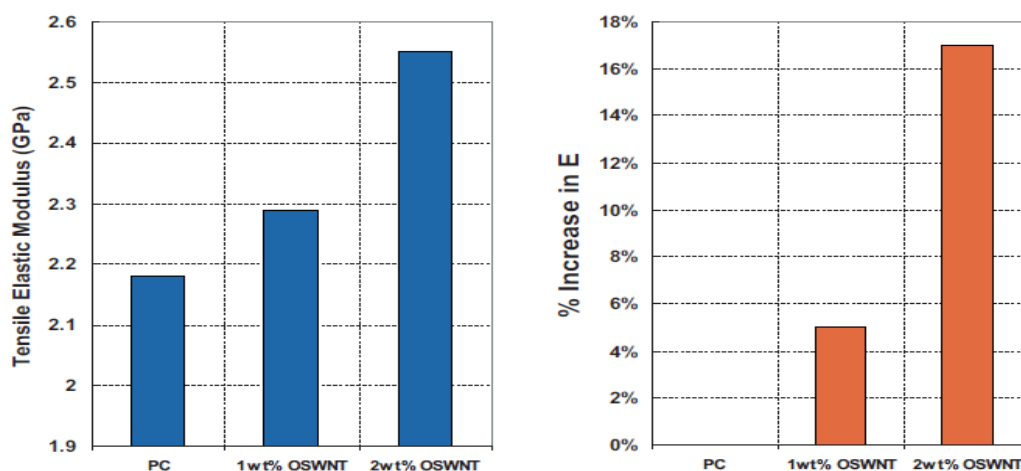
گردید تشدید رشد ترک و خرابی در زاویه الیاف ۹۰ درجه بود. فتاحی و همکاران [۴۱] به آنالیز کمانش تیرهای کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربن چند جداره با شرایط مرزی دلخواه پرداختند. آن‌ها خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک جداره با طول‌های بلند و کوتاه را با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی مولکولی بدست آوردند. در پژوهشی دیگر براتی و همکاران [۴۲] تجزیه و تحلیل کمانش و پس از کمانش ستون‌های تقویت شده با نانو کامپوزیت‌های حاوی گرافن را انجام دادند. محاسبات با استفاده از روش گلرکین انجام گرفت و توزیع یکنواخت نانو ذرات گرافن منجر به کاهش رشد ترک و بهبود عملکرد در ستون‌ها با نقص هندسی شد. یاس و همکاران [۴۳] ارتعاشات و کمانش تیرهای تیموشنکو تقویت شده با نانو کامپوزیت لوله‌های کربنی تک دیواره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از معادلات حاکم بر اصل همیلتون و معادلات دیفرانسیل درجه دوم تعمیم یافته پژوهش خود را انجام دادند. بورگو و همکاران [۴۴] به مطالعه و بررسی رفتار خستگی کامپوزیت شیشه تقویت شده با ترکیبی از نانو رس و نانو ذرات کربنی چند دیواره پرداختند. نتایج آزمون خستگی نشان داد که کامپوزیت‌هایی با مقادیر کمی از نانوذرات مقاومت خستگی مشابه با حالت بدون نانو ذره آن داشت اما با افزودن درصد بیشتر نانو ذره کربن نسبت به نانو رس این روند بیش از ۵۰ درصد منجر به بهبودی شد. خشابی و همکاران [۴۵] در پژوهشی رفتار خستگی کامپوزیت شیشه تحت بار استاتیکی را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم این بررسی می‌توان به افزایش خمشی نهایی و کاهش عمر خستگی نمونه‌های ساخته شده با زاویه صفر درجه به دلیل قرارگیری نیرو در راستای طولی الیاف شیشه اشاره کرد. ژانگ و همکاران [۴۶] به بررسی کمانش صفحات کامپوزیت تقویت شده با نانو ذره کربن تک دیواره به روش ریلی ریتز پرداختند. آن‌ها به یک حل دقیق برای به دست آوردن بار کمانش رسیدند. رضایی و همکاران [۴۷] در یک بررسی عددی به مدل‌سازی تیر تیموشنکو تقویت شده با نانو ذرات کربن با استفاده از اصل همیلتون و روش گلرکین برای بدست آوردن بار کمانش در شرایط مرزی متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. صفایی و همکاران [۴۸] رفتار کمانش حرارتی و مکانیکی صفحات ساندویچ نانو کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانو ذرات کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان

داد که تأثیر نانولوله‌های کربن در کمانش حرارتی را بهبود بخشید اما کمانش مکانیکی را کاهش داد. شن و همکاران [۴۹] تحلیل غیر خطی تیرهای کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله‌های کربن در محیط‌های حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها مطالعات عددی برای ارتعاشات غیرخطی، خمش غیرخطی و کمانش حرارتی تحت شرایط محیطی متفاوت انجام دادند. کومار و همکاران [۵۰] به کمانش تیرهای اویلر برنولی تقویت شده با نانو کامپوزیت‌های کربنی با استفاده از تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته پرداختند. وابستگی قابل توجه بار کمانش به شرایط مرزی مورد استفاده در معادلات از نتایج مهم این بررسی است. ماکوندی و همکاران [۵۱] با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی کمانش نانو کامپوزیت‌های کربنی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که جهت‌گیری نانولوله‌های کربنی تأثیر نامطلوبی در تقویت کامپوزیت دارد و منجر به کاهش بار کمانشی خواهد شد. دوارته و همکاران [۵۲] یک روش جدید برای تقویت آلیاژهای آلومینیوم با نانولوله‌های کربنی را ارائه دادند. آن‌ها ورق‌های آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌های کربن مخلوط شده در رزین اپوکسی را در شرایط محیطی متفاوت قرار دادند و تصاویر الکترونی نشان از توزیع غیر متراکم و کشیده‌شده نانولوله‌های کربنی در محیطی با دمای بیشتر از دمای اتاق داد. ژانگ و همکاران [۵۳] پایداری کمانش کامپوزیت‌های پلیمری نانولوله کربنی تک دیواره بررسی شد. بار بحرانی کمانش پس از اضافه کردن ۱ تا ۲ درصد نانولوله کربنی اکسید شده در پلی کربنات افزایش قابل توجهی را نشان داد. آن‌ها نانولوله‌های کربنی را با استفاده از ورقه‌های گرافن به شکل استوانه یکپارچه شکل دادند. در نمودار تنش-کرنش شکل (۲-۷) مقایسه بین پلی کربنات خالص و درصد‌های اکسید شده نانولوله‌های کربنی تک دیواره در پلی کربنات‌ها به‌خوبی قابل مشاهده است.



شکل (۷-۲) نمودار تنش- کرنش آزمون کشش سه نمونه نانو کامپوزیت با درصدهای مختلف [۵۳]

همچنین مدول‌های الاستیک در نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در نمونه با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی اکسید شده در پلی کربنات بهترین نتیجه را به همراه داشت. در شکل (۸-۲) مدول‌های الاستیک و رابطه مستقیم درصد افزایش شیب منحنی تنش-کرنش مشاهده می‌شود.

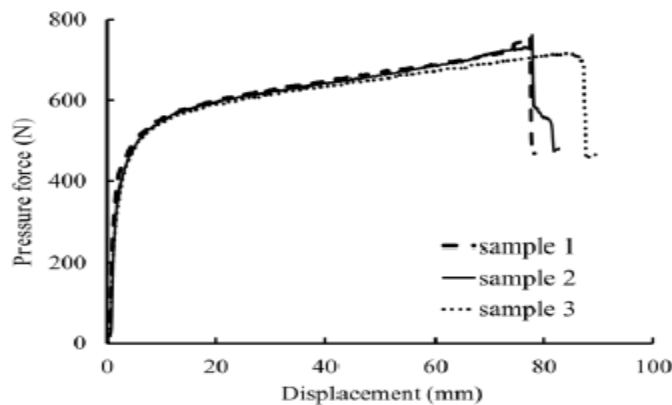


شکل (۸-۲) مقایسه مدول الاستیک در نمونه‌های مختلف و درصد تغییر در شیب منحنی نمودار تنش-کرنش [۵۳]

واتسنکوپانگ و همکاران [۵۴] با هدف بررسی رفتار خمشی، کمانشی و ارتعاشی تیرهای کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربن پژوهش خود را انجام دادند. نتایج جدید خمش، کمانش و ارتعاش تیرها بر اساس چندین تئوری برشی مرتبه بالا با جزئیات محاسبات ارائه شد. شن و همکاران [۵۵] آنالیز حرارتی کمانش و پس کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند دیواره در معرض افزایش دما را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دمای بحرانی کمانش و همچنین مقاومت

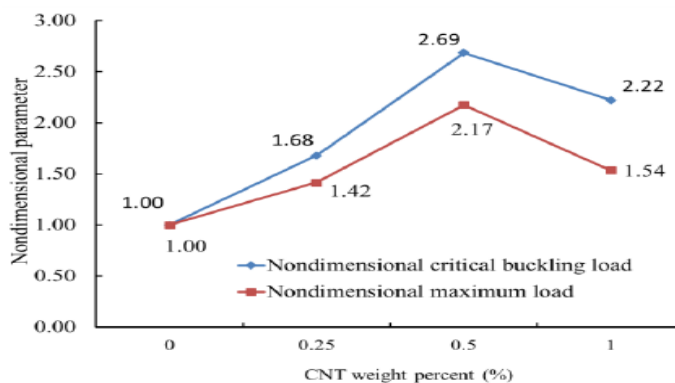
حرارتی پوسته را می‌توان با افزایش نانو ذره کربن به صورت تابعی از دما افزایش داد. چپو و همکاران [۵۶] یک مطالعه تحلیلی و تجربی از کمانش خمشی و پیچشی ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت فیبر کربن ارائه دادند. آن‌ها به یک انطباق خوب بین راه حل تحلیلی و آزمایش تجربی و روش المان محدود دست یافتند همچنین با افزایش بار عمودی در سطح مقطع جدایش کامپوزیت تقویت شده از سطح ستون بسیار ناچیز بود. وانگ و همکاران [۵۷] کمانش و پس کمانش تیرهای کامپوزیتی تقویت شده با نانو گرافن به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معادلات دیفرانسیل حاکم بر تیر کامپوزیت را از طریق تئوری تیر تیموشنکو، رابطه کرنش جابجایی غیر خطی و اصل کار مجازی به دست آوردند. نتایج نشان داد که مقدار استفاده از نانو گرافن دارای حد بحرانی است و اثر قابل توجهی در کمانش دارد. یوشین هی و همکاران [۵۸] تأثیر نانو لوله‌های کربن بر اصطکاک و عملکرد سایش کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم این پژوهش بهبود مقاومت کامپوزیت‌های تقویت شده شیشه حاوی نانو ذرات کربن تا چهار برابر در مقایسه با بدون نانو ذره آن بود. فراش و همکاران [۵۹] یک مطالعه تجربی در مورد فرکانسهای طبیعی و خواص میرایی تیرها و صفحات کامپوزیت هیبریدی انجام دادند. آن‌ها تأثیر نانولوله کربن در ماتریس جهت بررسی تغییرات ارتعاشات آزاد صفحات و تیرهای کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. از مهمترین نتایج این پژوهش کاهش $12/3\%$ نسبت میرایی و افزایش $9/4\%$ فرکانس پایه نمونه‌های کامپوزیتی با نانولوله کربن در مقایسه با بدون نانولوله کربن آن بود. فراش و همکاران [۶۰] به مطالعه تجربی اثر نانولوله‌های کربنی عامل‌دار آمین بر روی خواص ترمومکانیکی نانو کامپوزیت‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن $25/1\%$ درصد وزنی نانولوله کربنی عامل‌دار آمین بیشترین تأثیر را در مدول یانگ و ضریب انبساط حرارتی نانو کامپوزیت‌ها دارد. صابرمش و همکاران [۶۱] اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده به ماده زمینه و الیاف شیشه بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری، به روش تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن $5/1\%$ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، بیشترین تأثیر را بر بار بحرانی کمانش ورق‌ها دارد، به‌گونه‌ای که ورق‌های حاوی این مقدار نانولوله‌ی

کربنی، بیشتر از دو برابر بار فشاری را نسبت به ورق مشابه بدون نانولوله‌ی کربنی تا رسیدن به آستانه‌ی کمانش، می‌توانند تحمل کنند. در شکل (۹-۲) نمودار نیرو-جابجایی برای سه نمونه ورق کامپوزیتی با ۰/۵ درصد وزنی نانو ذره مشاهده می‌شود.



شکل (۹-۲) نمودار نیرو-جابجایی برای سه نمونه ورق کامپوزیتی با ۰/۵ درصد نانو ذره کربن [۶۱]

همچنین مقادیر بدون بعد بار بحرانی کمانش و بیش‌ترین نیروی قابل تحمل بر حسب درصد وزنی نانو لوله‌ی افزوده شده به ماده زمینه‌ی ورق‌های نانولوله‌ی کربنی الیاف شیشه/اپوکسی در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. مطابق شکل، افزودن ۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربنی رزین اپوکسی، بار بحرانی کمانش را نسبت به ورق الیاف شیشه/اپوکسی، حدود ۶۸ درصد افزایش می‌دهد. با رسیدن میزان نانو لوله‌ی کربنی به ۰/۵ درصد وزنی، میزان بار بحرانی کمانش، ۱۶۹ درصد افزایش را نسبت به مقدار بار بحرانی کمانش ورق فاقد نانولوله‌ی کربنی نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۲) بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه بر حسب درصد نانو لوله‌ی افزوده شده به ماده‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی الیاف شیشه/اپوکسی [۶۱]

فراش و همکاران [۶۲] تأثیر نانولوله‌های کربنی عامل‌دار آمین و درصد وزنی آن در اولین فرکانس طبیعی خمش و خواص میرایی نانو کامپوزیت‌های تقویت شده را در یک پژوهش تجربی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی عامل‌دار آمین در ماده زمینه بیشترین تأثیر را بر روی فرکانس طبیعی تیر کامپوزیتی دارد و در این حالت میرایی کمترین مقدار را داشت. همچنین از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که عامل‌دار کردن آمین‌ها منجر به انتشار بهتر نانولوله‌های کربنی در ماده زمینه می‌شود.

مرور مقالات حاضر نشان می‌دهد که تحقیقات اندکی به صورت تجربی در زمینه تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره در تقویت ستون‌های فلزی با کمر بند کامپوزیتی صورت گرفته است. همواره استفاده از نانو ذرات مختلف به ویژه نانولوله‌های کربن به دلیل خواص و شکل ساختاری آن بسیار قابل توجه است. از طرفی نانولوله‌های کربن به دلیل قرارگیری در فصل مشترک الیاف و رزین اپوکسی منجر به تقویت پیوند بین کمر بند کامپوزیتی و سطح ستون آلومینیومی، و در نتیجه افزایش چسبندگی می‌شود. در مقاله حاضر کمر بند کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی سه لایه و زاویه صفر درجه حاوی ۰ ، ۰/۲۵ ، ۰/۵ ، ۱ درصد وزنی از نانولوله کربنی جهت دورپیچ کردن به ستون آلومینیوم ساخته شد و هم چنین تأثیر افزودن درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی به رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمناش ستون‌های آلومینیومی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴- ضرورت، اهمیت و هدف تحقیق

ستون‌ها از اعضای مهم سازه‌ای هستند که بایستی توانایی مقاومت در برابر بارها و نیروهای مختلف را دارا باشند از این رو بایستی همواره در سازه‌ها، به ستون‌هایی که مستعد خرابی هستند توجه ویژه‌ای داشت تا بتوان از وقوع خرابی‌ها جلوگیری نمود. استفاده از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی یک روش سریع و مقرون به صرفه برای مقاوم‌سازی ستون‌ها می‌باشد. امروزه قیمت مقاوم‌سازی با کامپوزیت‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی کم بوده و نحوه اجرای آن آسان و ارزان می‌باشد. جدا شدن پوشش کامپوزیتی از

سطح به دلیل چسبندگی نامناسب می‌تواند هزینه‌های گزافی را به همراه داشته باشد. در این تحقیق بر روی مقدار چسبندگی کمر بند کامپوزیتی که به دور ستون پیچیده می‌شود نیز مطالعه صورت می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای مقاوم‌سازی ستون تحت بارگذاری‌های مختلف، استفاده از پوشش کامپوزیتی است. در طول فرآیند ساخت یک پوشش کامپوزیتی با رزین اپوکسی حاوی نانوذرات ساخته می‌شود که پس از پیچیده شدن به دور ستون در آزمایشگاه مقدار چسبندگی و بار بحرانی کمانش آن اندازه‌گیری می‌شود. این پژوهش می‌تواند گام بسیار بلندی در بهتر شدن مقدار چسبندگی و مقاومت سازه‌های کامپوزیتی به ویژه ستون‌ها باشد.

فصل سوم: ساخت و آزمون نمونه‌ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا فرآیندهای ساخت کامپوزیت و مواد و وسایل استفاده شده در ساخت تشریح خواهد شد. سپس به معرفی دستگاه‌ها و تجهیزات و مراحل ساخت نمونه‌ها برای آزمون‌های کشش و فشار پرداخته شده است.

۳-۲- مواد اولیه استفاده شده

۳-۲-۱- واکس جداکننده

واکس جدا کننده معمولاً در تولیدات با حجم کم که در آنها محصولات به صورت تکی آماده شده و سیکل زمانی بحرانی ندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ارائه‌ی یک کار خوب لازم است که واکس جدا کننده باکیفیت و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. واکس های جداکننده معمولاً به سه حالت جامد، مایع، گاز وجود دارند و با روش‌هایی نظیر اسپری و یا فرچه و اسفنج آغشته به سطح درونی قالب و مخصوصاً بخش‌های زاویه‌دار آن اعمال می‌شوند. همچنین واکس‌های جداکننده با ایجاد لایه بسیار نازکی از چربی بر روی قالب، مانع از چسبیدن قطعه به بدنه قالب می‌شوند. در شکل (۳-۱) تصویر واکس جداکننده قابل مشاهده است.



شکل (۳-۱) واکس جداکننده

۳-۲-۲- نمد صنعتی رزین گیر

این نوع پارچه‌ها برای جذب رزین اضافی قطعه در فرآیند و کیوم بگ^۱ و نیز توزیع یکنواخت فشار و کیوم به کار گرفته می‌شوند. وزن واحد سطح این پارچه ۳۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد که از نوع ضخیم حساب شده و تا فشار کاری حدود ۵ بار و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده می‌باشد. در شکل (۲-۳) تصویر نمد صنعتی رزین‌گیر مشاهده می‌شود.



شکل (۲-۳) نمد صنعتی رزین‌گیر

۳-۲-۳- پارچه آستری

از پارچه آستری در جدا شدن بهتر سطح کامپوزیت از نمد رزین‌گیر استفاده می‌شود. همچنین پارچه باید محکم و بادوام و در برابر فشار مقاومت کند و در جذب رزین و انتقال به نمد رزین‌گیر بسیار کارآمد باشد. در شکل (۳-۳) تصویر پارچه آستری مشاهده می‌شود.

^۱ Vacuum Bag



شکل (۳-۳) پارچه آستری

۳-۲-۴- کیسه خلاء

از کیسه خلاء در ساخت قطعات کامپوزیتی به روش وکیوم بگ استفاده می‌شود. در این بخش به وسیله پمپ خلاء هوای داخل کیسه مکیده شده و رزین و الیاف تحت فشار قرار می‌گیرند. به این ترتیب علاوه بر هوا، رزین اضافی نیز مجبور به خروج از سیستم شده که همین امر منجر به افزایش چسبندگی الیاف خواهد شد. به علاوه، با توجه به اینکه رزین و الیاف از همه طرف توسط کیسه خلاء محدود شده‌اند، قطعه نهایی پس از خروج از کیسه خلاء کاملاً صاف و یک‌دست خواهد بود. در شکل (۳-۴) تصویر کیسه خلاء نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) کیسه خلاء

۳-۲-۵- نوار سیل غیر حرارتی

نوار سیل که برخی اصطلاحاً خمیر سیل یا نوار آب بند می‌نامند برای آب‌بندی و وکیوم کردم استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای نوار سیل، استفاده برای ساخت کامپوزیت‌ها به روش وکیوم بگ می‌باشد. به‌طور کلی نوار سیل‌ها به دو دسته حرارتی و غیر حرارتی تقسیم می‌شوند. در شکل (۳-۵) تصویر نوار سیل نشان داده شده است.



شکل (۳-۵) نوار سیل غیر حرارتی

۳-۲-۶- الیاف شیشه تک جهته

از مهم ترین دلایل استفاده از الیاف شیشه در صنعت، مقاومت بالا، وزن کم و قیمت مناسب آن می‌باشد. الیاف شیشه تک جهته ۴۰۰ گرمی یکی از انواع این محصولات است. در این نوع از الیاف، جهت فیبرهای تشکیل دهنده در راستای صفر است و به اصلاح تک جهته می‌باشد. پارچه‌های کامپوزیتی شیشه با بسیاری از سیستم‌های رزینی نظیر پلی استر اشباع شده، رزین‌های فنولیک و رزین اپوکسی سازگاری دارد و همراه با آنها سیستم کامپوزیتی بسیار مناسبی را شکل می‌دهند. در شکل (۳-۶) تصویر الیاف شیشه تک جهته نشان داده شده است.



شکل (۳-۶) الیاف شیشه تک جهته

۳-۲-۷- رزین اپوکسی به همراه سخت کننده

رزین یک ماده شیمیایی دو جزئی است که به همراه سخت کننده یا خشک کن در بازار به فروش می‌رسد و مصارف صنعتی نیز دارد. رزین هوا خشک نیست به این معنا که در معرض هوا خشک نمی‌شود و برای خشک شدن و یا جامد شدن به جزء دوم که سخت کننده است احتیاج دارد. رزین اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش ال ار ۶۲۰^۱ به همراه سخت کننده ۶۲۰^۲ برای ساخت کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. نسبت ترکیب رزین به سخت کننده با توجه به اطلاعات شرکت ارائه دهنده ۵ به ۱ می‌باشد. در شکل (۳-۷) تصویر رزین و سخت کننده مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۳-۷) رزین و سخت کننده

1 LR 620

2 Hardener 620

۳-۲-۸- نانولوله کربنی چند جداره

نانولوله کربنی چند جداره با قطر بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۸٪ مورد استفاده قرار گرفت. نانولوله کربنی چند جداره به دلیل ساختار لوله‌ای شکل اتم‌های کربن آن سبب استحکام و چسبندگی بین پیوندهای کامپوزیت می‌شود. شکل (۳-۸) تصویر نانولوله استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۸) نانولوله کربنی چند جداره

۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده

۳-۳-۱- دستگاه اینسترون^۱

دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون (با قابلیت اعمال نیرو تا ۱۵۰ کیلونیوتن) جهت انجام آزمون‌های کشش، فشار و خستگی طبق استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این دستگاه جهت انجام آزمون کمانش نمونه‌های ستون آلومینیومی و آزمون کشش تیرهای کامپوزیتی در این پژوهش استفاده شده است. در شکل (۳-۹) تصویر دستگاه دیده می‌شود.

1 Instron STM-150



شکل (۳-۹) دستگاه هیدرولیک اینسترون

۳-۳-۲ - حمام آلتراسونیک^۱

حمام التراسونیک دستگاهی جهت حذف سریع و کامل آلاینده‌ها از اشیاء است که در مخزن مایع با امواج فراصوت با فرکانس بالا غوطه‌ور هستند. این امواج فراصوت غیر قابل شنیداری، یک عمل لایه-برداری خفیف را در داخل مایع در التراسونیک انجام می‌دهند و آلاینده‌ها را از تمام سطوح در تماس با مایع از بین می‌برند. حمام التراسونیک در واقع یک ظرف فلزی است که مقداری آب داخل آن می‌باشد. دستگاه متصل به این ظرف امواج فراصوت ایجاد می‌کند. یکی از موارد استفاده از حمام التراسونیک پخش ذرات داخل محلول و در نتیجه یکنواخت شدن محلول مورد نظر می‌باشد. این امواج می‌توانند پیوندهای بین تکه‌های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شود. ابتدا پس از مشخص کردن درصدهای مشخص از ماده زمینه مقادیر درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی به ماده زمینه اضافه شد سپس از هم‌زن مکانیکی جهت یکنواخت شدن مخلوط رزین اپوکسی و نانولوله استفاده شد. در نهایت ماده زمینه در دستگاه التراسونیک برای شکسته شدن پیوندهای کلوخه‌ای و ناخالصی قرار داده شد. در

^۱ Ultrasonic

شکل (۳-۱۰) تصویر حمام التراسونیک مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۱۰) حمام التراسونیک

۳-۴- روش آماده سازی ماده زمینه

رزین اپوکسی به مقدار ۵۰ سی سی و معادل وزن ۶۶/۸۶۲ گرم و سخت کننده ۲۰/۴۷۵ گرم با نسبت ۲۰ به ۱۰۰ اندازه گیری و برای ساخت نمونه صفحه کامپوزیتی با سه لایه الیاف شیشه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نانو ذره کربنی چند دیواره به مقدار ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ درصد وزنی با توجه به مقالات و پایان نامه های گذشته محاسبه و اندازه گیری شد و برای ساخت نمونه کامپوزیت تقویت شده به دور ستون آلومینیوم با آلیاژ ۷۰۷۵ مورد مطالعه، به کار گرفته شد. در فرآیند آماده سازی ماده زمینه در ساخت صفحه کامپوزیتی برای انجام تست کشش و به دست آوردن مدول الاستیسیته، ابتدا مقدار ۶۶/۸۶۲ گرم از رزین اپوکسی را با ۲۰/۴۷۵ گرم سخت کننده مخلوط کرده و پس از هم زدن با همزن مکانیکی ماده زمینه برای اضافه کردن به سه لایه الیاف شیشه تک جهته ۴۰۰ گرمی با زاویه صفر درجه استفاده شد.

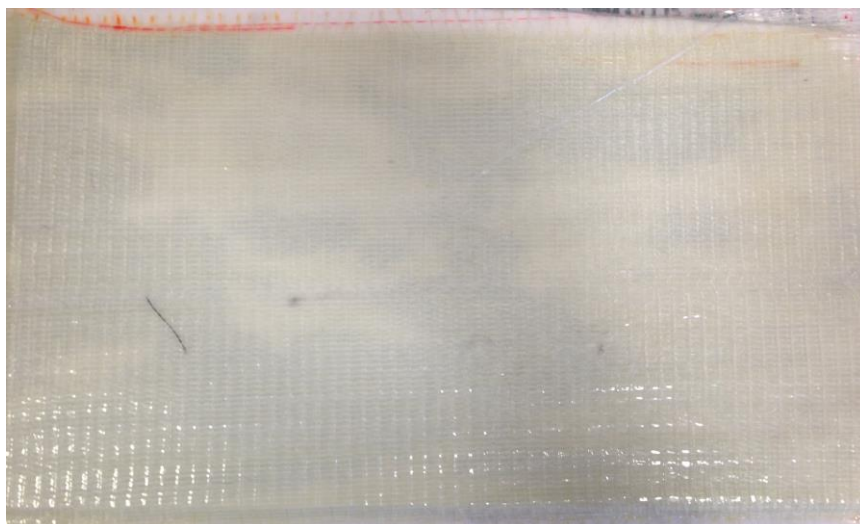
۳-۵- ساخت نمونه ورق‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی

در فرایند ساخت ورق‌های کامپوزیت ابتدا برای دقیق‌تر شدن فرایند ساخت مقدار رزین اپوکسی و سخت کننده اندازه گیری شد. مقدار ۶۶/۸۶۲ گرم رزین اپوکسی با ۲۰/۴۷۵ گرم سخت کننده برای ساخت صفحه کامپوزیتی با سه لایه الیاف شیشه مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد صفحات ساخته شده ۳۹ در ۲۵ سانتی‌متر و تمامی لایه‌ها با زاویه صفر درجه بر روی هم دیگر قرار گرفتند. فرایند ساخت با قرار دادن الیاف شیشه برش داده شده بر روی یک سطح شیشه‌ای که آغشته شده به جداکننده است، آغاز می‌شود. بر روی سطح شیشه‌ای ابتدا نمد صنعتی رزین گیر سپس پارچه آستری که هر دو به جدا کننده آغشته شده‌اند، قرار گرفت سپس لایه گذاری الیاف انجام شد. پس از چیدن هر لایه از الیاف، آن لایه به رزین اپوکسی آغشته شد و این عمل تا سه لایه ادامه پیدا کرد. در نهایت برای بهتر خارج شدن رزین اضافه مجموعه را در داخل کیسه خلاء که اطراف آن را با نوار سیل غیر حرارتی بسته و تا ۱۲ ساعت در شرایط خلاء تا زمان پخت کامل قرار گرفت. شکل (۳-۱۱) ورق کامپوزیتی تحت خلاء را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۱) ورق کامپوزیت شیشه تحت خلاء

پس از پخت شدن ورق کامپوزیت شیشه این ورق به مدت ۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. شکل (۳-۱۲) ورق کامپوزیت شیشه در شرایط محیطی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۲) ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی

۳-۶- ساخت نمونه‌های آزمون کشش کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی

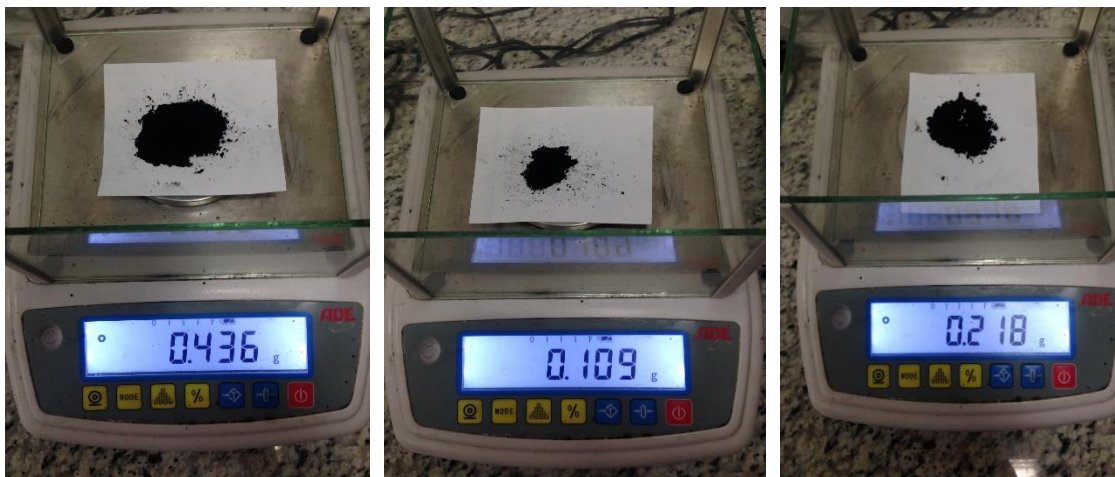
به منظور مدل کردن نمونه‌های تقویت شده میله آلومینیومی در نرم افزار آباکوس نیاز است که مدول یانگ ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی به کار رفته در ساخت نمونه‌ها، مشخص باشد. برای آزمون کشش نمونه‌هایی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی در زاویه‌های [۰°]، [۳۰°]، [۴۵°] و از هر نمونه، ۳ عدد به روش بیان شده در ساخت ورق کامپوزیت شیشه/اپوکسی ساخته شد ابعاد نمونه‌ها مطابق استاندارد تست کشش ASTM D3039 تعیین شده است [۶۳]. در شکل (۳-۱۳) نمونه‌های آزمایش کشش شیشه/اپوکسی، زاویه الیاف ۰ درجه به طول ۲۵ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتی‌متر، زاویه الیاف ۹۰ درجه به طول ۱۷/۵ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتی‌متر، زاویه الیاف ۴۵ درجه به طول ۲۵ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتی‌متر آورده شده است.



شکل (۳-۱۳) نمونه‌های آزمایش کشش شیشه/اپوکسی

۳-۷- ساخت کمر بند کامپوزیت شیشه/اپوکسی

تعداد ۱۷ نمونه ستون آلومینیومی آلیاژ ۷۰۷۵ با طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر از شرکت عصر صنعت تهیه شد. سطح این نمونه‌ها جهت چسبندگی بهتر لایه‌های الیاف شیشه سمباده کاری گردید. پس از محاسبه مساحت جانبی ستون‌ها، الیاف لازم برای ساخت سه لایه کمر بند کامپوزیتی برش داده شد و با اندازه‌گیری رزین و سخت کننده در آزمایشگاه مقدار لازم برای ساخت سه لایه کمر بند به صورت تجربی به دست آمد. در فرآیند ساخت سه لایه کمر بند کامپوزیتی مقدار ۳۳/۴ گرم رزین اپوکسی و ۱۰/۲۴ گرم سخت کننده برای هر نمونه مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی مقادیر ۲۵، ۵، ۱ درصد نانو ذره کربن چند دیواره را با درصد وزنی ۴۳/۶۸ رزین اپوکسی و سخت کننده اندازه‌گیری شد. در شکل (۳-۱۴) مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۱۴) مقادیر ۰/۲۵ ، ۰/۵ ، ۱٪ نانو ذره کربن چند دیواره با درصد وزنی ۴۳/۶۸ رزین اپوکسی و سخت کننده

پس از محاسبه درصد نانو ذره آن را با رزین اپوکسی مخلوط کرده و در حمام التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد تا باکیفیت و پراکندگی مطلوب برسد. سپس سخت کننده را به مخلوط یکنواخت شده رزین اپوکسی و نانو ذره اضافه، و با همزن مکانیکی به مدت یک ۸ دقیقه به صورت پیوسته هم زده شد.

پس از آماده شدن ماده زمینه، الیاف شیشه در جهت طول الیاف و به اندازه محیط ستون آلومینیومی برش زده شد. مساحت الیاف برای ساخت سه لایه کمر بند کامپوزیتی ۹/۴۲ سانتی متر محاسبه گردید. طی فرآیند ساخت به دلیل قرار گرفتن دو سر ستون در فک و همچنین بهتر نشان دادن نتیجه آزمون کمانش ۳۰ سانتی متر از طول ستون با کمر بند کامپوزیتی تقویت شد که این طول به صورت مساوی و با فاصله ۵ سانتی متر از دو سر ستون خواهد بود. در شکل (۳-۱۵) ستون های تقویت شده مشاهده می شود.



شکل (۳-۱۵) ستون تقویت شده با الیاف شیشه، رزین اپوکسی و نانو ذره کربن چند دیواره

۳-۸- آزمونهاى انجام شده

۳-۸-۱- آزمون کشش ساده

برای انجام آزمون کشش ساده نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی در شکل (۳-۱۶) در دستگاه اینسترون قرار داده شدند. پس از قرار دادن نمونه‌ها در دستگاه تست کشش استاندارد، دستگاه سنجش تغییر طول (اکتسنومتر) با طول گیج ۵۰ میلی‌متر در وسط نمونه نصب شده و نهایتاً نمونه‌ها با سرعت ۲ mm/min تست می‌شوند [۶۴]. به کمک نمودار تنش-کرنش مدول‌های یانگ E_1, E_2, E_X اندازه‌گیری و محاسبه شد. در شکل (۳-۱۶) آزمون کشش ساده مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۱۶) نمونه قرار داده شده در دستگاه اینسترون برای آزمون کشش ساده

۳-۸-۲- آزمون بار فشار محوری

آزمایش بار فشاری بر روی ستون‌های تقویت شده آلومینیوم آلیاژ ۷۰۷۵ توسط دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون صورت گرفت. این آزمایش بر روی ۱۵ نمونه از ستون‌ها با درصد نانوذرهای متفاوت انجام شد. شرایط مرزی آزمون به صورت دو سر گیردار، بین فک‌های بالا و پایین ستون آلومینیومی اعمال گردید. از استاندارد مورد استفاده در آزمون بار فشاری ASTM E2954 جهت تعیین سرعت حرکت فک‌ها استفاده شد [۶۴] که نتایج و نمودارهای مربوط به این نتایج در بخش نتیجه‌گیری آمده است. در شکل (۳-۱۷) کمانش ستون نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۷) نمونه قرار داده شده در دستگاه اینسترون
برای آزمون فشار

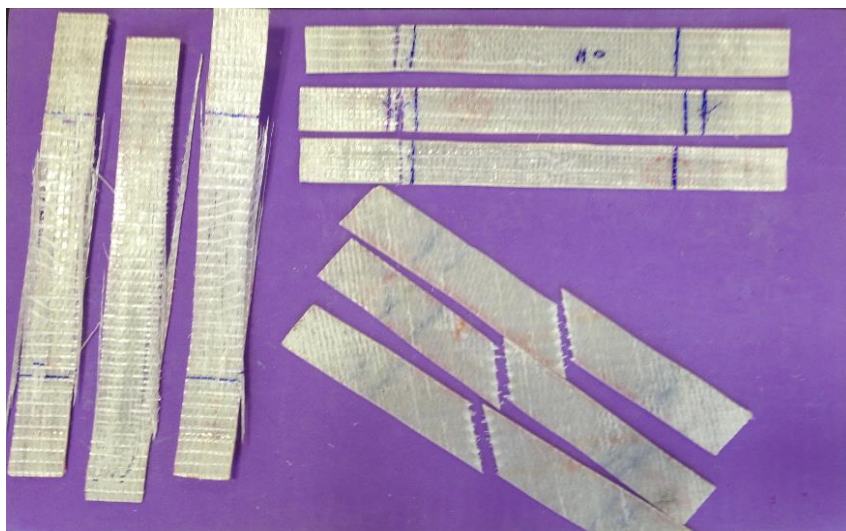
فصل چهارم: بررسی نتایج آزمون های کشش و فشار

۴-۱- مقدمه

در این بخش نتایج و نمودارهای حاصل از آزمون کشش و فشار و تحلیل نرم افزاری آورده شده است. همچنین در ادامه به بررسی تغییر زاویه الیاف و تعداد لایه‌های الیاف در کمانش ستون‌های تقویت شده در مدل‌سازی آباکوس پرداخته شده است.

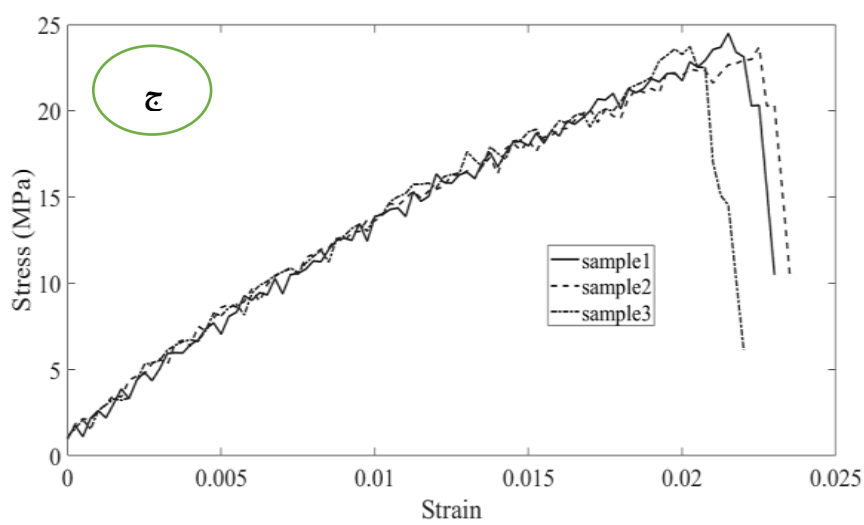
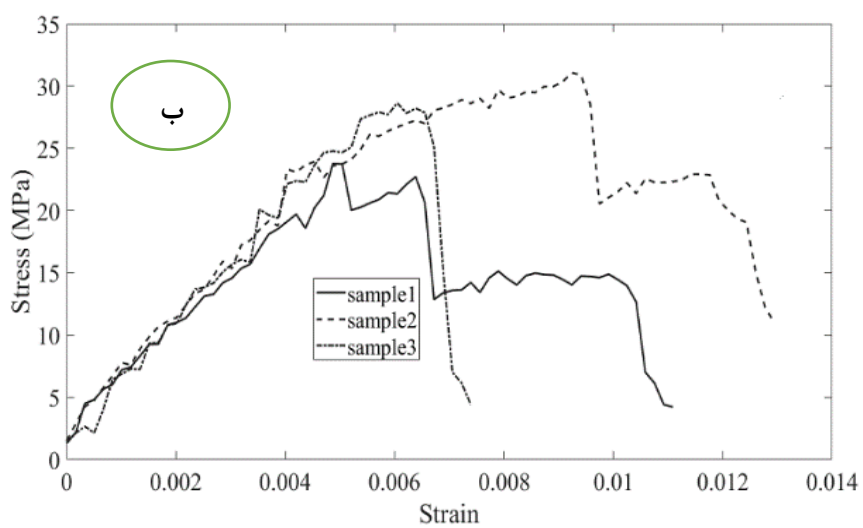
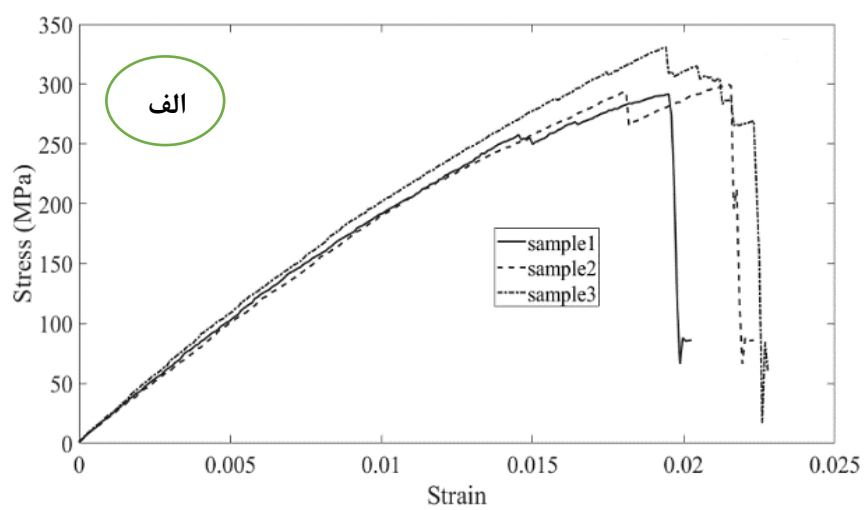
۴-۲- بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش شیشه / اپوکسی

نتایج به دست آمده از آزمون‌های کشش که در فک‌های دستگاه جابجا و یا در فاصله کمتر از ۱۰ میلی‌متر انتهای نمونه شکسته می‌شوند، پذیرفتنی نیستند. همچنین اجتناب از شکسته شدن در کامپوزیت‌ها با تعداد لایه کم امری دشوار است. خوشبختانه اینگونه مسایل اثر قابل توجهی بر روی نتایج به دست آمده ندارند و معمولاً مقاومت کششی در جهت الیاف کامپوزیت حداقل ۱۰ برابر مقاومت در جهت عمود بر الیاف است. در شکل (۴-۱) انواع مختلف شکست نمونه‌های کشش مشاهده می‌شود.



شکل (۴-۱) نمونه‌های آزمون شده کشش ساده

اعداد ذخیره شده از آزمون کشش ساده پس از مرتب‌سازی به نرم افزار متلب انتقال داده شد و نمودار تغییرات تنش-کرنش رسم گردید. در شکل (۴-۲) نمودارهای نمونه‌های آزمون شده کشش ساده مشاهده می‌شود.



شکل (۴-۲) نمودار تنش- کرنش برای سه نمونه کامپوزیت شیشه/ اپوکسی: الف: زاویه الیاف ۰ درجه ، ب: زاویه الیاف ۹۰ درجه ، ج: زاویه ۴۵ درجه

همان گونه که در نمودارها مشاهده می شود رفتار نمودار تنش- کرنش برای زاویه الیاف ۴۵ و ۹۰ درجه با تغییراتی بسیار کوچک همراه است. اما نمودار برای زاویه الیاف ۰ درجه عددی بزرگتر را نشان می دهد. دلیل این تفاوت طولی بودن جهت الیاف در زاویه ۰ درجه و تک جهته بودن آن می باشد. همچنین در حالت ۰ درجه به دلیل قرارگیری نیروی کشش در راستای الیاف مقاومت کامپوزیت ساخته شده بسیار بالاتر خواهد بود. بنابراین رفتار سه نمونه الیاف ۰ درجه با توجه به نمودار آن با یک هماهنگی خوب قابل مشاهده است. در حالت ۹۰ درجه به دلیل قرارگیری نیرو به صورت عمودی بر الیاف تحمل بار بسیار کمتری نسبت به حالت ۰ درجه دارد و تحمل بار بیشتر بر عهده ماده زمینه خواهد بود. بالاتر بودن تحمل بار در زاویه ۴۵ درجه نسبت به حالت ۹۰ درجه نه در راستای الیاف و نه عمود بر آن است لذا بخشی از مقاومت در برابر بار بر عهده الیاف می باشد و لذا عددی بزرگتر را نشان می دهد.

جهت تعیین خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش ساده از هر نمونه با چیدمان های [۰/۳]، [۴۵/۳]، [۹۰/۳] تعداد ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و با توجه به نمودارهای تنش-کرنش مقادیر E_1, E_2, E_X محاسبه شد. همچنین برای محاسبه مدول برشی شیشه- اپوکسی از رابطه (۴-۱) استفاده می شود.

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

که در این رابطه $m = \cos \theta$ و $n = \sin \theta$ که در این جا θ برابر با ۴۵ درجه است. ضریب پواسون (ν_{12}) برای کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه ۰/۲۷ در نظر گرفته شد [۶۵] و مقدار G_{12} برابر ۲/۹۴ گیگاپاسکال تعیین شد.

در جدول (۴-۱) مشخصات تجربی نمونه ها و میانگین بار بحرانی کامپوزیت شیشه به دست آمده مشاهده می شود. همچنین مدول برشی و ثابت پواسون به دست آمده با استفاده از رابطه (۴-۱) و مقادیر نهایی مدول یانگ در جدول (۴-۲) نشان داده شده است.

در جدول (۱-۴) مشخصات مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش (GPa)

کامپوزیت شیشه/اپوکسی	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین
E_1	۲۲/۱۸	۲۱/۴۶	۲۲/۴۷	۲۲/۰۳
E_2	۲/۹۳	۳/۱۳	۳/۴۸	۳/۱۸
E_X	۲/۵۱	۲/۴۴	۲/۲۹	۲/۴۱

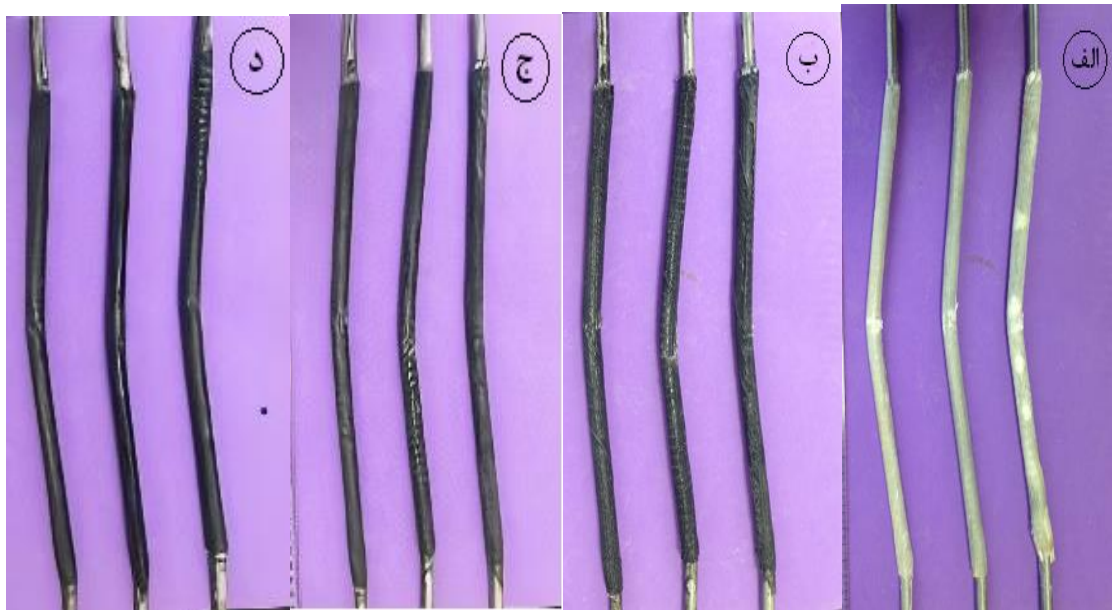
جدول (۲-۴) مشخصات کامپوزیت شیشه/اپوکسی (GPa)

نوع کامپوزیت	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}
شیشه / اپوکسی	۲۲/۰۳	۳/۱۸	۰/۲۷	۲/۹۴

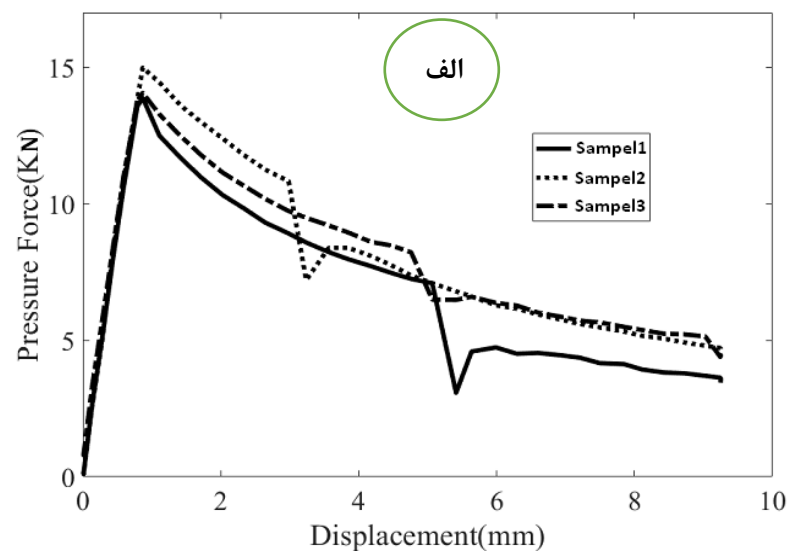
۳-۴- بررسی نتایج حاصل از آزمون فشار

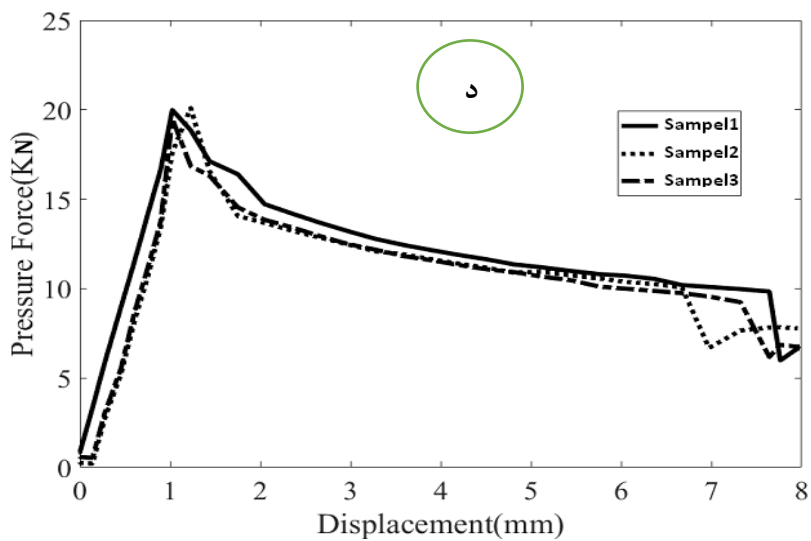
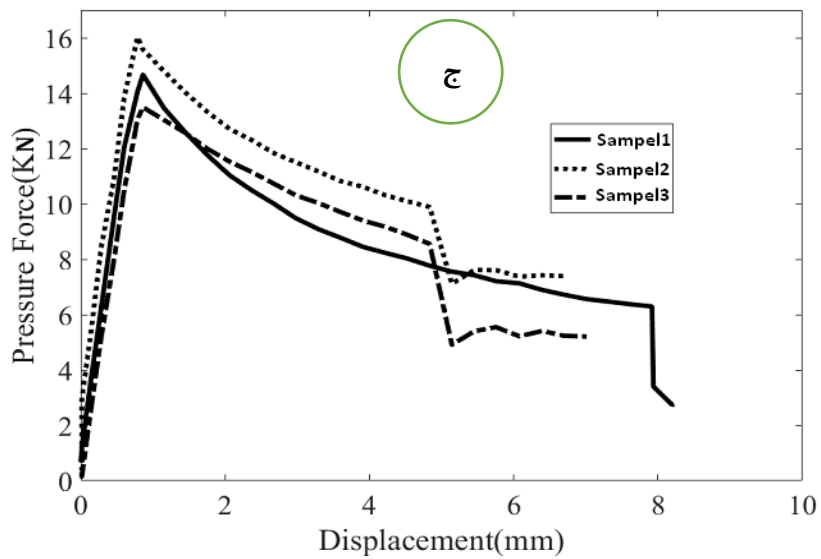
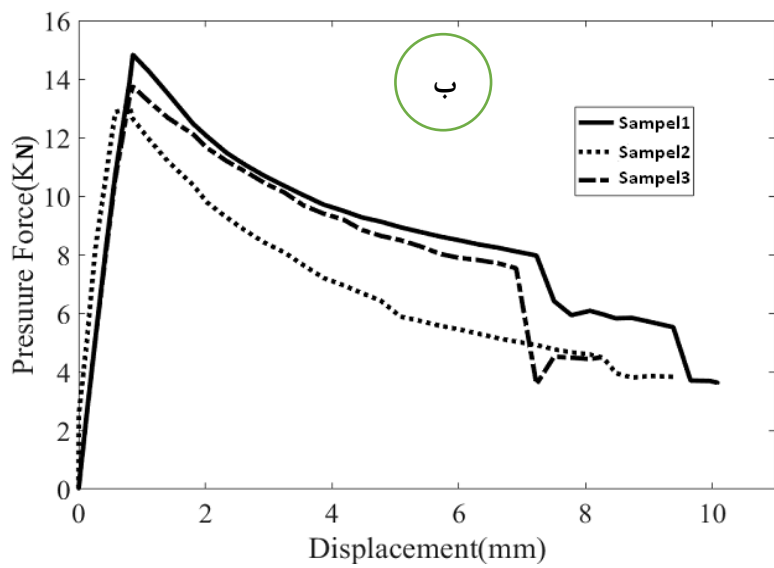
آزمون فشار بر روی ۱۵ نمونه از ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیت شیشه/اپوکسی انجام شد. در این بخش سه نمونه از هر ستون تقویت شده مورد آزمایش قرار گرفت. شکل (۳-۴) تصاویر ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بندهای کامپوزیتی مختلف را پس از وقوع کمانش نشان می‌دهد. نتایج آزمون کمانش به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است. همانگونه که در تمامی این نمودارها مشاهده می‌شود، بار محوری که توسط ستون تحمل می‌شود شروع به افزایش کرده و این صعود تا رسیدن به مقدار بیشینه بار که همان بار بحرانی کمانش است ادامه دارد. در این مرحله از صعود مشاهده می‌شود که مقدار جابجایی دوسر ستون نسبت به هم (کوتاه‌شدگی) ستون نسبتاً اندک است. با ادامه بارگذاری، رفتار پس از کمانش ستون ملاحظه می‌شود.

در این مرحله، ستون ناپایدار شده و بدون اینکه قابلیت تحمل بار ستون افزایش یابد، ازدیاد شدید مقدار کوتاه‌شدگی تا رسیدن به نقطه شکست مشاهده می‌شود. همچنین با افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانو ذره کربن تحمل بار ستون تقویت شده به مقدار ناچیزی بهبود یافته است و در نمونه‌های با نانو ذره ۰/۵ درصد این روند ادامه یافته و در نمونه‌های ۱ درصد وزنی نانو ذره کربن این بهبود تا حدود ۵۰ درصد افزایش داشته است.



شکل (۴-۳) - تصویر ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی پس از کمانش، الف: بدون نانو ذره ب: حاوی ۰/۲۵ درصد نانولوله کربنی، ج: حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی، د: حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی





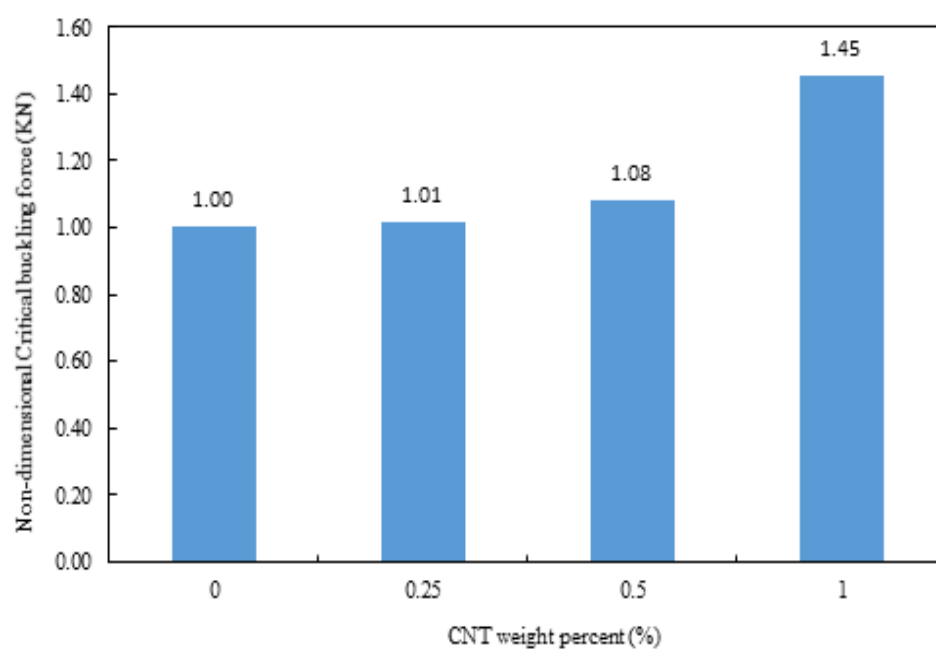
شکل (۴-۴) - نمودارهای نیرو-جابجایی برای ستون‌های تقویت شده با کمربندهای کامپوزیتی مختلف، الف: بدون نانو ذره کربنی، ب: حاوی ۰/۲۵ درصد نانولوله کربنی، ج: حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی، د: حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی

۴-۴- بررسی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی بر کمانش ستون

نانولوله‌های کربنی به دلیل ساختاری استوانه‌ای که دارند همواره سبب بهبود استحکام فشاری و کششی در سازه‌های ساختمانی و هوافضا و ... می‌شوند. بررسی انجام شده نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به ماده زمینه منجر به افزایش استحکام بین پیوند الیاف و رزین می‌شود. همچنین در نمونه ۱ درصد به دلیل تراکم بیشتر نسبت به درصدهای آزمون شده دیگر، سطح چسبندگی کمربند کامپوزیتی به ستون نیز افزایش یافت و در نتیجه بار بحرانی کمانش مقدار بیشتری را ثبت نمود. روند رو به رشد در تمام نمونه‌ها در جدول (۳-۴) به‌خوبی نشان می‌دهد که افزودن درصدهای کم، بار بحرانی کمانش ستون را بهبود می‌بخشد به گونه‌ای که این جهش با افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله بسیار ضعیف بوده ولی افزایش تا ۱ درصد منجر به افزایش بار بحرانی تا بیش از ۴۵ درصد نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی آن شد. همچنین نمودار میله‌ای بار بحرانی کمانش در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. با محاسبه مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی انرژی جذب شده نمونه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود.

جدول (۳-۴) بار بحرانی کمانش در نمونه‌های مختلف (kN)

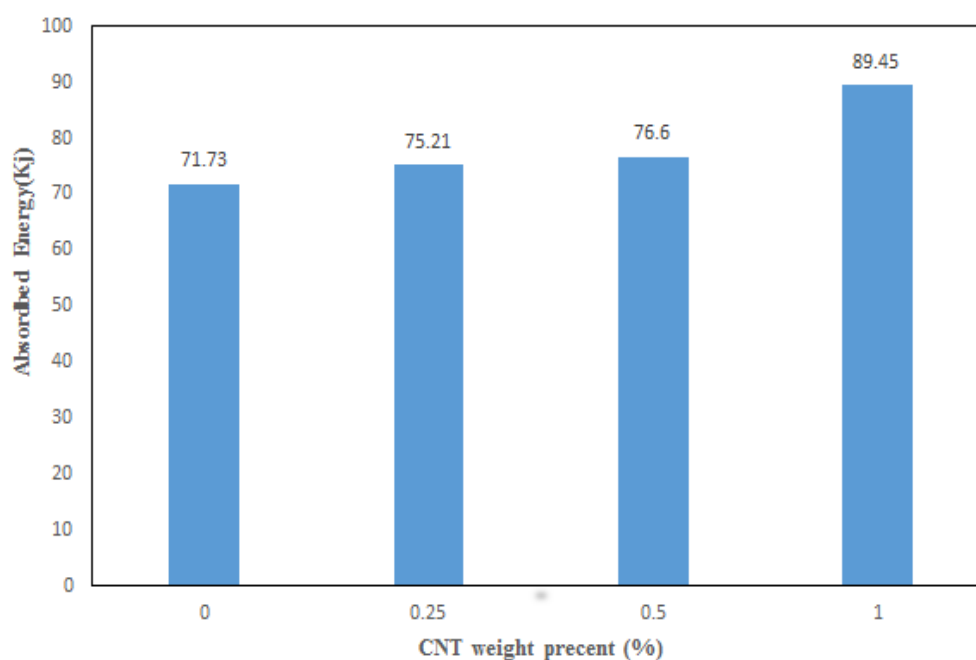
درصد نانولوله کربنی	P_{cr}	P_{cr}	P_{cr}	P_{cr}
	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین
۰	۱۴/۰۶	۱۲/۴۹	۱۴/۴۴	۱۳/۶۶
۰/۲۵	۱۳/۰۵	۱۴/۸۲	۱۳/۷۳	۱۳/۸۶
۰/۵	۱۴/۶۷	۱۶/۰۲	۱۳/۴۹	۱۴/۷۶
۱	۱۹/۹۸	۲۰/۰۹	۱۹/۴۹	۱۹/۸۵



شکل (۴-۵) بار بحرانی کماتش بر حسب درصد نانولوله افزوده شده به ماده زمینه در کامپوزیت

جدول (۴-۴) انرژی جذب شده بر حسب درصدهای مختلف از نانو ذرات کربن (kJ)

درصد نانولوله کربنی	E_{abc} نمونه اول	E_{abc} نمونه دوم	E_{abc} نمونه سوم	E_{abc} میانگین	درصد اختلاف
۰	۷۰/۶۹	۷۰/۱۴	۷۴/۳۷	۷۳/۷۱	۰
۰/۲۵	۶۷	۸۵/۶۷	۷۲/۹۶	۷۵/۲۱	۲/۳
۰/۵	۷۳/۲۴	۷۹/۰۱	۷۷/۵۷	۷۶/۶۰	۳/۹
۱	۹۵/۳۷	۸۶/۰۱	۸۶/۹۷	۸۹/۴۵	۲۱/۳

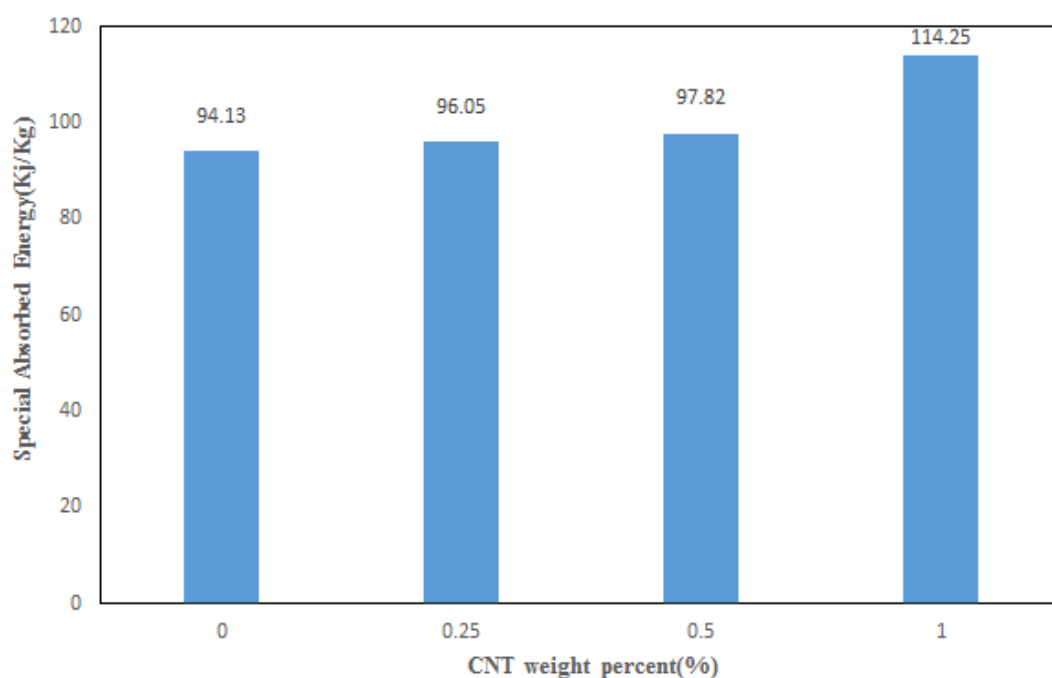


شکل (۴-۶) نمودار انرژی جذب شده بر حسب درصد نانو لوله افزوده شده به ماده زمینه در کامپوزیت

نسبت انرژی جذب شده به وزن نمونه را انرژی جذب شده ویژه می‌گویند. وزن هر نمونه تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی به صورت میانگین ۷۸۳ گرم اندازه‌گیری شد. جدول (۴-۵) مقادیر انرژی جذب شده ویژه تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۴-۷) نمودار میله‌ای انرژی جذب شده ویژه بر حسب نانولوله‌های کربن مشاهده می‌شود.

جدول (۴-۵) انرژی جذب شده ویژه بر حسب درصد‌های مختلف از نانو ذرات کربن (kJ/kg)

E_{abc}	E_{abc}	E_{abc}	E_{abc}	درصد نانولوله کربنی
میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	
۹۴/۱۳	۹۴/۹۸	۸۹/۵۷	۹۰/۲۸	۰
۹۶/۰۵	۹۳/۱۸	۱۰۹/۴۱	۸۵/۵۶	۰/۲۵
۹۷/۸۲	۹۹/۰۷	۱۰۰/۹۰	۹۳/۵۴	۰/۵
۱۱۴/۲۵	۱۱۱/۰۷	۱۰۹/۸۴	۱۲۱/۸۰	۱



شکل (۴-۷) نمودار انرژی جذب شده ویژه بر حسب درصد نانولوله افزوده شده به ماده زمینه در کامپوزیت

۴-۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

نمونه‌ها برای فرایند تصویر برداری الکترونی روبشی به ابعاد یک سانتی‌متر برش، و سطوح فرز خورده جهت واضح‌تر شدن تصاویر شکسته شدند تا نحوه پراکندگی نانولوله‌های کربنی بهتر مشخص شود. از آنجا که الکترون‌ها جهت تصویر برداری باید بتوانند از نمونه عبور کرده و همچنین تصویر دچار شارژ شدگی الکترونی نشود، نمونه‌ها با پوششی از ورقه طلا احاطه می‌شوند. نمونه‌ها پس از آماده شدن در جانمونه‌ای دستگاه قرار داده شد. شکل (۴-۸) سه تصویر مختلف از شکست، چسبندگی و نحوه پراکندگی نانولوله‌ها در ۱ درصد وزنی (بهترین نتیجه) از ماده زمینه را نشان می‌دهند. همچنین در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی، چسبندگی و پراکندگی نمونه‌های ۵/۰، ۲۵/۰ درصد وزنی ماده زمینه به‌خوبی قابل مشاهده است.

^۱ Scanning Electron Microscope

۴-۵-۱- تعیین مورفولوژی^۱ سطحی

بررسی مورفولوژی یک ماده به معنی بررسی شکل و اندازه آن است. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان به کلیت مورفولوژی سطح یک ماده، ابعاد تک تک دانه‌ها را هم مورد مطالعه قرار داد. با بزرگنمایی کم می‌توان کلیات شکل و اندازه سطوح، به عبارت دیگر تراکم ریزساختار و وجود شکاف‌ها و ترک‌های بزرگ و شکل کلی دانه‌های موجود در ساختار را بررسی کرد. همچنین با بزرگنمایی^۲ متوسط می‌توان نحوه توزیع ذرات، به خصوص در مواد کامپوزیتی را مطالعه کرد. بزرگنمایی بیشتر امکان مشاهده شکل دانه‌ها، وجود عیوب بسیار ریز مانند میکرو حفره‌ها و میکرو ترک‌ها، شکل ذرات نانو مقیاس و ذرات کلوخه شده را فراهم می‌کند. در قسمت پایینی تصاویر اطلاعاتی مانند: مقدار بزرگنمایی، فاصله کاری و ولتاژ اعمالی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. به عنوان مثال، در قسمت (ج) شکل (۴-۹)، از بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر، فاصله کاری^۳ ۸/۴ میلی‌متر، ولتاژ^۴ ۳۰۰۰ ولت استفاده شده است.

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود کمترین شکست در هنگام اعمال نیروی فشاری، بیشترین چسبندگی الیاف و رزین به سطح ستون آلومینیوم متعلق به نمونه‌های ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. میزان چسبندگی و شکست در نمونه‌های با ۵٪ درصد وزنی نانولوله نسبت به نمونه‌های ۲۵٪ پیشرفت قابل چشم‌گیری داشته است.

افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله مطابق شکل (۴-۸) نشان داد که دلیل افزایش تحمل بار در این نمونه‌ها مقاومت خوب این نانو ذرات در فصل مشترک الیاف و ستون آلومینیوم است. در بررسی ارتباط بین نانولوله‌ها و ماده زمینه می‌توان عنوان کرد که در نمونه‌های ۱ درصد وزنی به دلیل قرارگیری نانو ذرات، در لابه‌لای الیاف و ماده زمینه این پیوند سبب تقویت استحکام کمر بند کامپوزیتی و در نتیجه بهبود

۱ Morphology

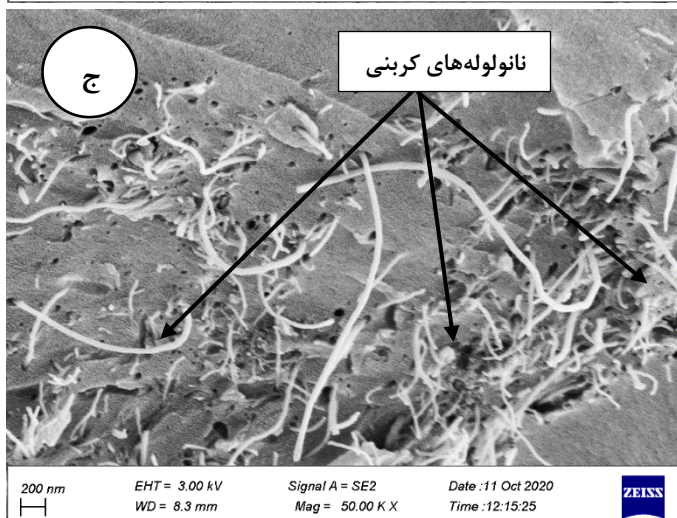
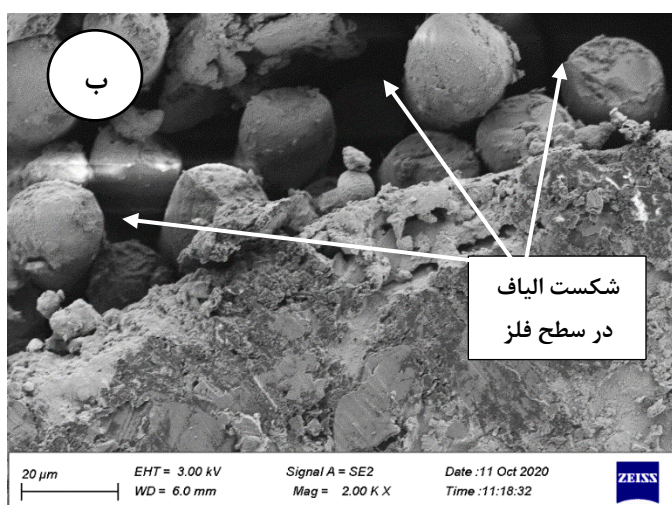
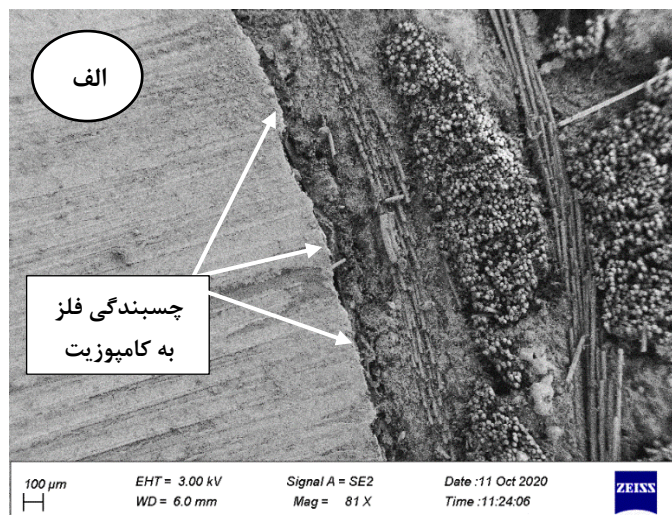
۲ Magnification

۳ Working Distance

۴ Voltage

مقاومت در برابر کمانش شده است. همچنین این تقویت مطابق شکل (۴-۹) به دلیل ضعف در پراکندگی و مقاومت پایین در نمونه‌های ۵/۰ درصد و فشار بیشتر بر دانه‌های مجزای نانو ذره منجر به بیرون کشیدگی و در نتیجه کاهش تحمل بار نسبت به نمونه ۱ درصد شد. نانو ذرات در نمونه ۲۵/۰ درصد وزنی نانولوله به ندرت قابل مشاهده بودند که به‌خوبی تحمل بار پایین و اختلاف کم آن با نمونه‌های بدون نانو ذره را به‌خوبی توجیه می‌کند.

نکته دیگری که از تصاویر الکترونی روبشی به وضوح قابل مشاهده است وجود حفره بین سطح ستون آلومینیوم و کمر بند کامپوزیتی در نمونه‌های ۲۵/۰ و ۵/۰ درصد وزنی نانولوله می‌باشد که به نظر می‌رسد دلیل آن نبود چسبندگی مطلوب باشد اما در نمونه‌های ۱ درصد وزنی نانولوله، این حفره‌ها در فصل مشترک بین الیاف و آلومینیوم بسیار کمتر دیده می‌شود که دلیل آن را می‌توان وجود نانو ذره بیشتر و در نتیجه چسبندگی بیشتر عنوان کرد.



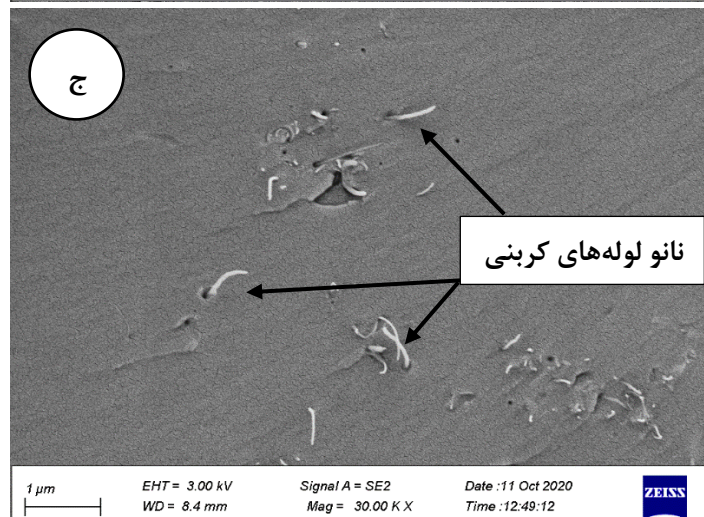
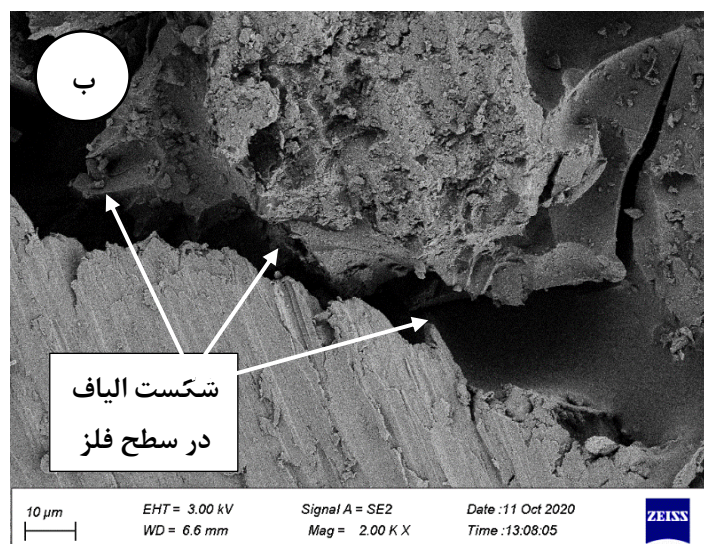
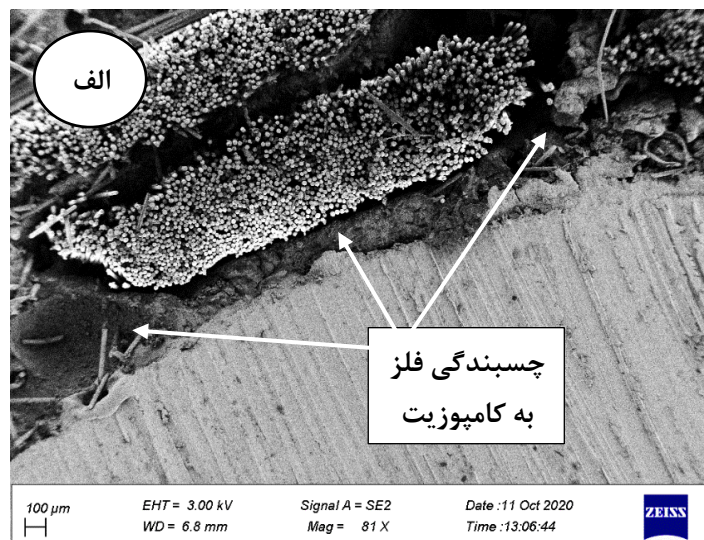
شکل (۴-۸) - الف: چسبندگی سطح کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۱ درصد وزنی نانولوله به سطح فلز آلومینیوم، ب: شکست الیاف با ۱ درصد وزنی نانولوله در سطح فلز آلومینیوم، ج: نانولوله‌های کربنی بیرون کشیده در نمونه با ۱ درصد

وزنی



شکل (۹-۴) - الف: چسبندگی سطح کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۵٪ درصد وزنی نانولوله به سطح فلز آلومینیوم، ب: شکست

الیاف با ۵٪ درصد وزنی نانولوله در سطح فلز آلومینیوم، ج: نانولوله های کربنی بیرون کشیده در نمونه با ۵٪ درصد وزنی



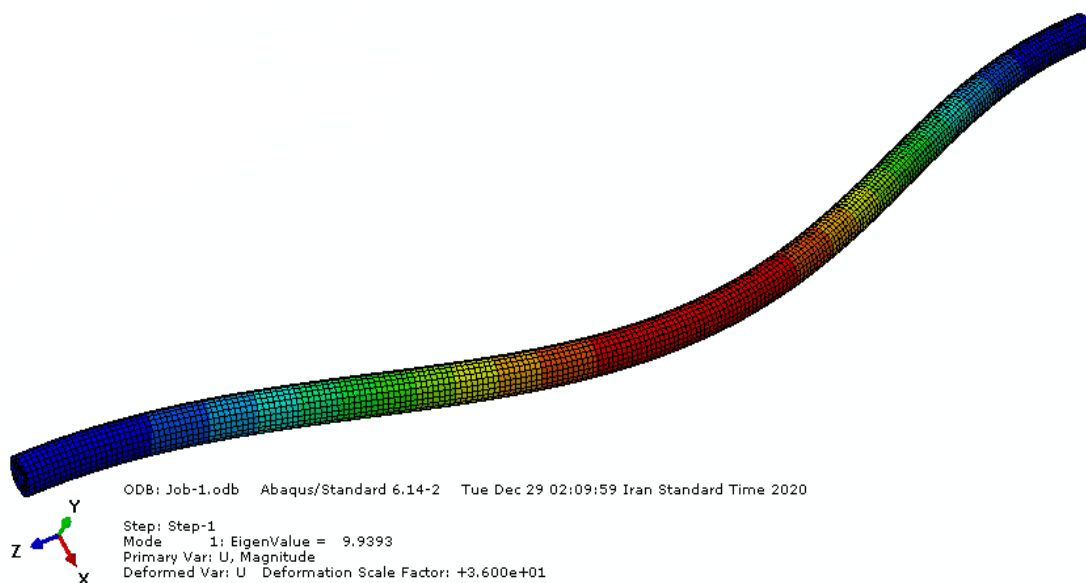
شکل (۴-۱۰) - الف: چسبندگی سطح کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۲۵٪ درصد وزنی نانولوله به سطح فلز آلومینیوم، ب: شکست الیاف با ۲۵٪ درصد وزنی نانولوله در سطح فلز آلومینیوم، ج: نانولوله های کربنی بیرون کشیده در نمونه با ۲۵٪ درصد

۴-۶- اعتبارسنجی با استفاده از نرم افزار آباکوس

جهت اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی، بار بحرانی کمانش و شکل مود مربوطه در نرم افزار آباکوس در شکل (۴-۱۲) مود اول کمانش به خوبی قابل مشاهده است. همچنین در جدول (۴-۶) که نیروی بحرانی کمانش^۱ به دست آمده از روش عددی و روش تجربی در آن آورده شده است. بار بحرانی کمانش ستون آلومینیومی بدون تقویت کننده با مدول ۷۰ گیگاپاسکال و طول ۴۰۰ میلی متر (به دلیل قرارگیری دو سر ستون در دستگاه طول ستون ۳۸۰ میلی متر در رابطه آورده شده است) و قطر ۱۰ میلی متر با استفاده از رابطه (۲-۲۱) که در فصل دوم محاسبه شد. همچنین بار بحرانی کمانش در نرم افزار آباکوس نیز با مقدار ۹/۹۹۳ کیلونیوتن به دست آمد که به درصد اختلاف ۶ درصدی منجر شد. شکل (۴-۱۱) کمانش ستون آلومینیومی در محیط نرم افزار آباکوس را نشان می دهد.

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{1}{4} (3.14) \times (5 \times 10^{-3})^4 = 490.625 \times 10^{-12} m^4$$

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} = \frac{4 \times (3.14)^2 \times (70) \times (490.625 \times 10^{-12})}{(380 \times 10^{-3})^2} = 9.379 kN$$

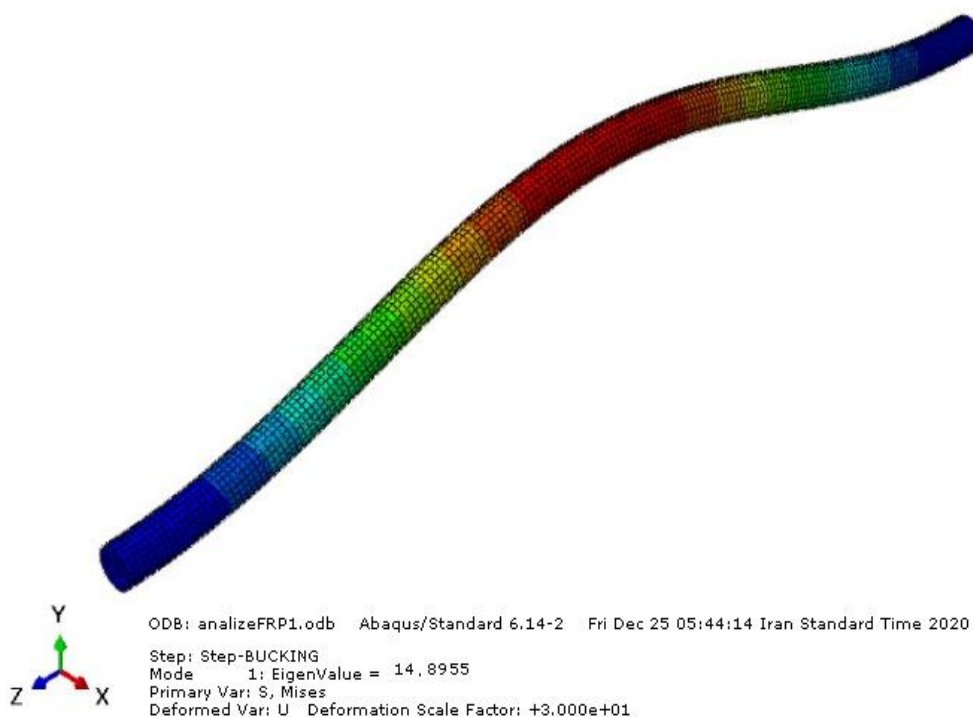


شکل (۴-۱۱) کمانش ستون آلومینیومی در محیط نرم افزار آباکوس

^۱ Critical load buckling

جدول (۴-۶) مقایسه نتایج تجربی و عددی بار بحرانی کمانش برای ستون آلومینیومی و ستون آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت شیشه/اپوکسی با مش بندی دستی و خودکار (kN)

نوع نمونه	تجربی	عددی	درصد اختلاف
ستون بدون کمر بند	۱۰/۱۵	۹/۹۹۳	۱/۸
ستون با کمر بند مش بندی دستی	۱۴/۱۹	۱۴/۸۹	۴/۹
ستون با کمر بند مش بندی اتوماتیک	۱۴/۱۹	۱۵/۳	۷/۸



شکل (۴-۱۲) مدل سازی آباکوس کمانش ستون آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت شیشه/اپوکسی

۴-۶-۱- اثر تغییر زاویه و تعداد لایه های الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی

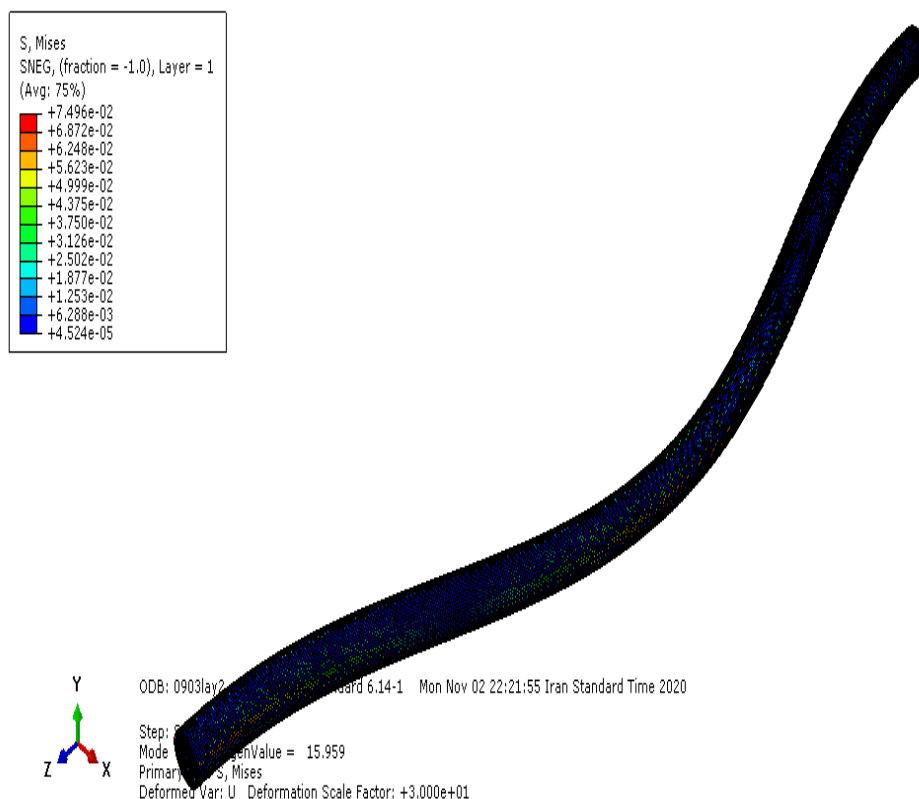
۴-۶-۱-۱- تغییر زاویه

تحلیل نرم افزاری ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی با زاویه های متفاوت و با تعداد لایه ثابت سه نشان داد که با ترکیب زوایا می توان به نتایج مطلوب تری دست یافت. همان طور که در جدول (۴-۷) مشاهده می شود در چیدمان $[0/45/0]$ ، $[0/90/0]$ مقدار بار بحرانی کمانش بیشتر از زاویه مورد استفاده در آزمایش تجربی است که این عملکرد را می توان به هم پوشانی الیاف ها از همدیگر در هنگام

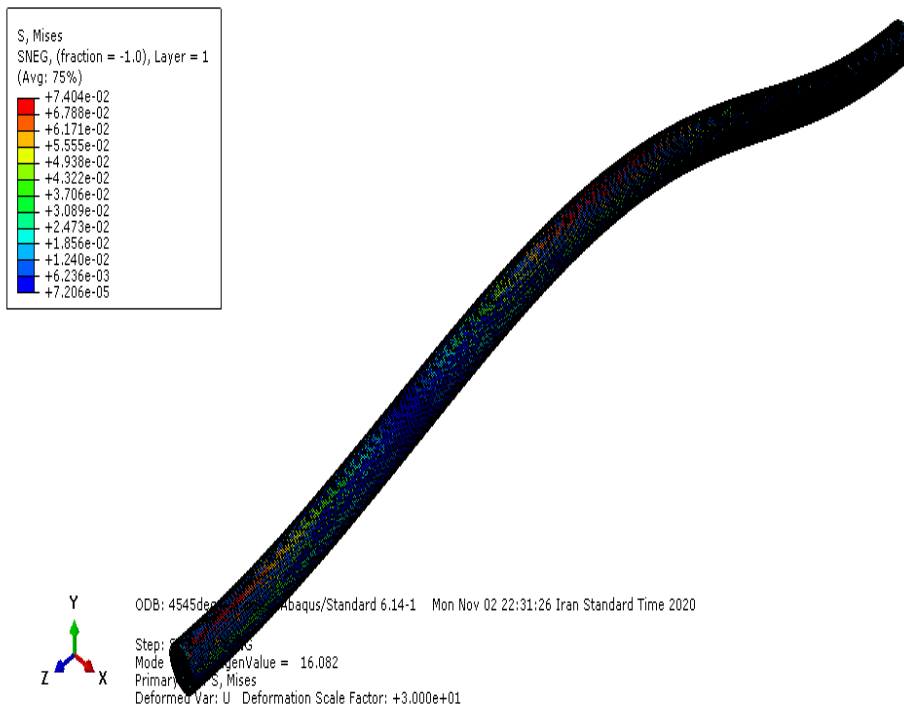
اعمال نیرو نسبت داد. در هنگام ساخت کمر بند کامپوزیتی با تعداد لایه کم به دلیل مشکلات ناشی از پیچش کمر بند به دور ستون، استفاده از زوایای دیگر نیازمند دستگاه‌های پیچش الیاف خواهد بود و در صورت ساخت با لایه‌گذاری دستی ممکن است خطاهای ناشی از پیچش الیاف منجر به اختلاف زیاد با نتایج عددی شود. لذا در این پژوهش جهت تطبیق بهتر نتایج عددی و تجربی از زاویه الیاف [۰/۳] استفاده شده است. همچنین در ادامه تصاویر مربوط به کمانش ستون آلومینیومی با تعداد ۳ لایه و زاویه‌های مختلف مشاهده می‌شود.

جدول (۴-۷) اثر تغییر زاویه الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی (kN)

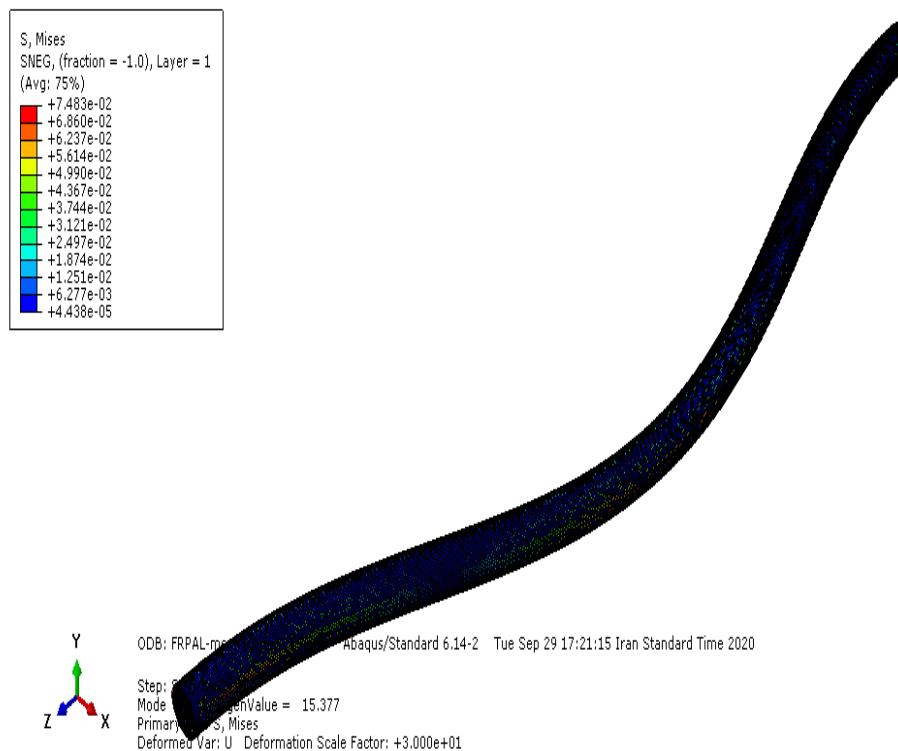
$P_{cr}[45/-45/45]$	$P_{cr}[0/90/0]$	$P_{cr}[0/45/0]$	$P_{cr}[0/0/0]$
۱۶/۰۸	۱۵/۹۵	۱۵/۳۷	۱۴/۸۹



شکل (۴-۱۳) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه‌چینی [۰/۹۰/۰]



شکل (۴-۱۴) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه چینی [۴۵/-۴۵/۴۵]



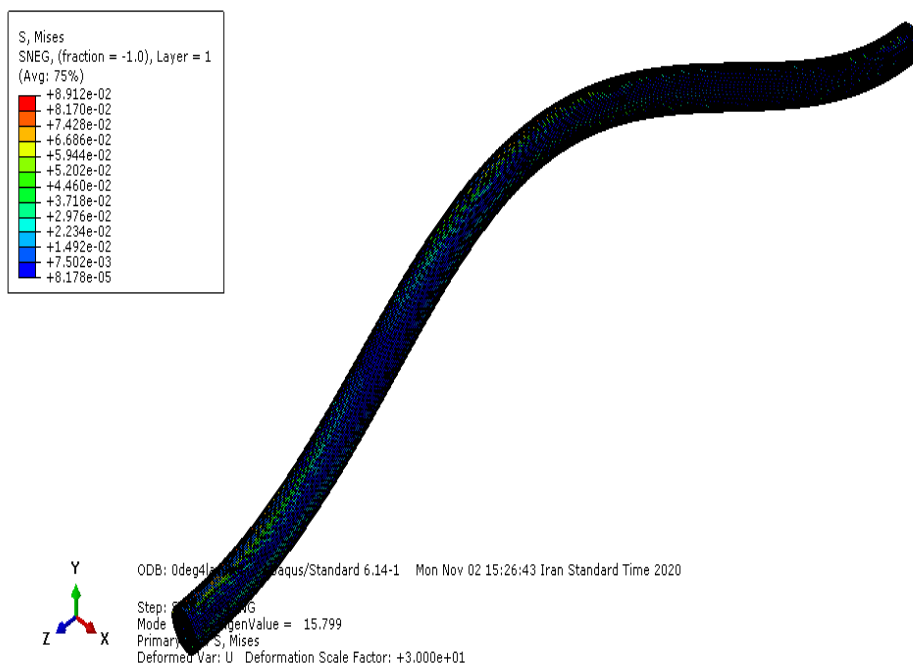
شکل (۴-۱۵) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه چینی [۰/۴۵/۰]

۴-۱-۶-۲- تغییر تعداد لایه‌های الیاف

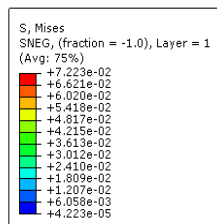
همواره افزایش تعداد لایه‌های الیاف می‌تواند منجر به بهبود بار کمانش و افزایش تحمل بار سازه شود اما این افزایش تا زمانی مفید خواهد بود که وزن نمونه‌های ساخته شده نسبت به تحمل بار آن‌ها قابل صرف‌نظر باشد. در این بخش به بررسی افزایش تعداد لایه‌های کمربند کامپوزیتی و ترکیب آن با تغییر زاویه الیاف پرداخته شده است. در جدول (۴-۸) نشان داده شده که افزایش تنها یک لایه به کمربند کامپوزیتی می‌تواند نتایج را بسیار بهبود ببخشد. همچنین در مدل‌سازی چیدمان [۰۴] مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌ها بار بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد و می‌توان به رابطه مستقیم بین آن‌ها پی برد. در ادامه تصاویر مربوط به کمانش ستون آلومینیومی با تعداد ۴ لایه و زاویه‌های مختلف مشاهده می‌شود.

جدول (۴-۸) اثر تغییر لایه‌های الیاف بر بار بحرانی ستون آلومینیومی (kN)

$P_{cr}[45/-45/-45/45]$	$P_{cr}[0/90/90/0]$	$P_{cr}[0/45/45/0]$	$P_{cr}[0/0/0/0]$
۱۶/۶۶	۱۶/۷۰	۱۶/۹۴	۱۵/۷۹



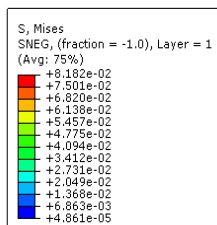
شکل (۴-۱۶) کمانش ستون تقویت شده با کمربند کامپوزیتی در لایه‌چینی [۰/۰/۰/۰]



ODB: 045DE6... Abaqus/Standard 6.14-1 Tue Nov 03 04:03:02 Iran Standard Time 2020

Step: 5
Mode: S, Mises
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

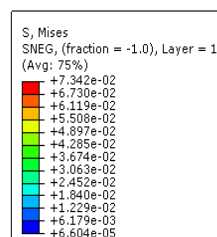
شکل (۴-۱۷) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه چینی [۰/۴۵/۴۵/۰]



ODB: 0904la... Abaqus/Standard 6.14-1 Mon Nov 02 22:40:41 Iran Standard Time 2020

Step: 5
Mode: S, Mises
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

شکل (۴-۱۸) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه چینی [۰/۹۰/۹۰/۰]



ODB: 4545-31... Abaqus/Standard 6.14-1 Mon Nov 02 23:03:07 Iran Standard Time 2020

Step: 5
Mode: S, Mises
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

شکل (۴-۱۹) کمانش ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی در لایه چینی [۴۵/-۴۵/-۴۵/۴۵]

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این بخش به طور اجمالی نتایج کلی پایان نامه بیان شده است. در این پایان نامه، پس از بدست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی در محیط آزمایشگاهی به تحلیل المان محدود ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی و مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی پرداخته شد. همچنین بار بحرانی کمانش، انرژی جذب شده و انرژی جذب شده ویژه ی ستون های تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با درصدهای متفاوت از نانولوله کربنی مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج آن در ادامه آمده است. در نهایت پیشنهاداتی برای پژوهش های آینده نیز ارائه شده است.

۵-۲- نتایج حاصل از آزمون کشش ساده

خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با استفاده از روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در حالت ۰ درجه نیرو در راستای طولی و در حالت ۴۵ درجه نیرو نه در راستای الیاف و نه عمود بر آن و در حالت ۹۰ درجه نیرو عمود بر الیاف اعمال می شود که به دلیل تحمل بار بیشتر در حالت ۰ درجه این زاویه الیاف مورد بررسی قرار است. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش مقادیر E_1 ، E_2 و E_x محاسبه شدند. در جدول (۵-۱) نتایج نهایی آزمون کشش مشاهده می شود.

جدول (۵-۱) نتایج نهایی آزمون کشش (GPa)

نوع کامپوزیت	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}
شیشه/اپوکسی	۲۲/۰۳	۳/۱۸	۰/۲۷	۲/۹۴

۵-۳- نتایج حاصل از آزمون فشار

با انجام آزمون کمانش بر روی ستون‌های تقویت شده با کمربند کامپوزیت شیشه/پوکسی حاوی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و بدون نانولوله کربنی بیشترین بار بحرانی و تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفت. بار محوری که توسط ستون تحمل می‌شود شروع به افزایش کرده و این صعود تا رسیدن به مقدار بیشینه بار که همان بار بحرانی کمانش است تغییر کرد. با مقایسه انرژی جذب شده، میانگین بار بحرانی قابل تحمل، بیشینه بار بحرانی در درصدهای مختلف نانولوله کربن نشان داده شد که در نمونه‌های ۱ درصد وزنی بار بحرانی قابل تحمل برای ستون تا بیش از ۴۵ درصد نسبت به نمونه بدون نانو ذره آن، بهبود یافت. از دیگر نتایج حاصل می‌توان به تفاوت بسیار ناچیز افزودن ۰/۲۵. درصد نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون ذره اشاره کرد در صورتی که این تفاوت در نمونه ۰/۵. درصد وزنی نسبت به نمونه ۰/۲۵. درصد بسیار بهتر دیده می‌شد. در جدول (۵-۲) برخی از نتایج نهایی حاصل از نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود.

جدول (۵-۲) نتایج نهایی آزمون فشار

درصد نانولوله کربنی	انرژی جذب شده (kJ)	میانگین بار بحرانی قابل تحمل (kN)	بیشینه بار بحرانی قابل تحمل (kN)
۰	۷۳/۷۱	۱۳/۶۶	۱۴/۴۴
۰/۲۵	۷۵/۲۱	۱۳/۸۶	۱۴/۸۲
۰/۵	۷۶/۶۰	۱۴/۷۶	۱۶/۰۲
۱	۸۹/۴۵	۱۹/۸۵	۱۹/۹۸

۵-۴- نتایج شبیه‌سازی المان محدود ستون تقویت شده

جهت اعتبار سنجی نتایج آزمایشگاهی آزمون فشار، نمونه ستون تقویت شده بدون نانولوله کربنی مورد آنالیز عددی قرار گرفت. مدول‌های یانگ حاصل شده در آزمون کشش به کمر بند کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس اختصاص داده شد. اختلاف بسیار کم بار بحرانی کمانش در آنالیز عددی و تجربی با استفاده از مش‌بندی دستی و مش‌بندی اتوماتیک بررسی شد که در حالت مش‌بندی دستی با ۴/۵ درصد خطا و در حالت مش‌بندی اتوماتیک ۱۱/۰۹ درصد اختلاف به دست آمد.

۵-۵- نتایج تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با سه نوع بزرگنمایی جهت بررسی چسبندگی بین سطح کمر بند کامپوزیتی و ستون آلومینیومی، نحوه انتشار شکست و نحوه پراکندگی نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌ها با ۲۵٪ درصد وزنی رشد ترک و شکست در سطح و پراکندگی نانولوله‌ها با فاصله زیاد از همدیگر منجر به ضعیف‌ترین نتیجه شد در حالی که با افزایش نانولوله کربنی تا ۱ درصد وزنی ترک‌ها و شکست‌ها به طرز چشم‌گیری کاهش یافت. همچنین در تصاویر با بزرگنمایی بیشتر نانولوله‌ها با تراکم مطلوب در فاصله‌های نزدیک به هم قرار گرفته بودند که می‌توان دلیل چسبندگی و تحمل بار این نوع نمونه را پیوند قوی بین این نانو ذرات عنوان کرد.

۵-۶- نتیجه‌گیری نهایی و جمع‌بندی

در این پژوهش اثر افزودن درصدهای مختلف نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی بر افزایش بار بحرانی کمانش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی به کمک انجام آزمون کمانش تحت بار فشاری محوری به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در صورت افزودن یک درصد وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی، مقدار بار بحرانی کمانش مربوط به ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی ۴۵ درصد افزایش

را نسبت به بار بحرانی کمانش ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی فاقد نانولوله کربنی نشان می‌دهد. افزایش مدول الاستیک ماده زمینه به همراه ازدیاد چسبندگی بین کمر بند کامپوزیتی و ستون آلومینیومی در حضور نانولوله کربنی را می‌توان دو علت اصلی در افزایش بار بحرانی کمانش ستون‌های تقویت شده است.

۵-۷- پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

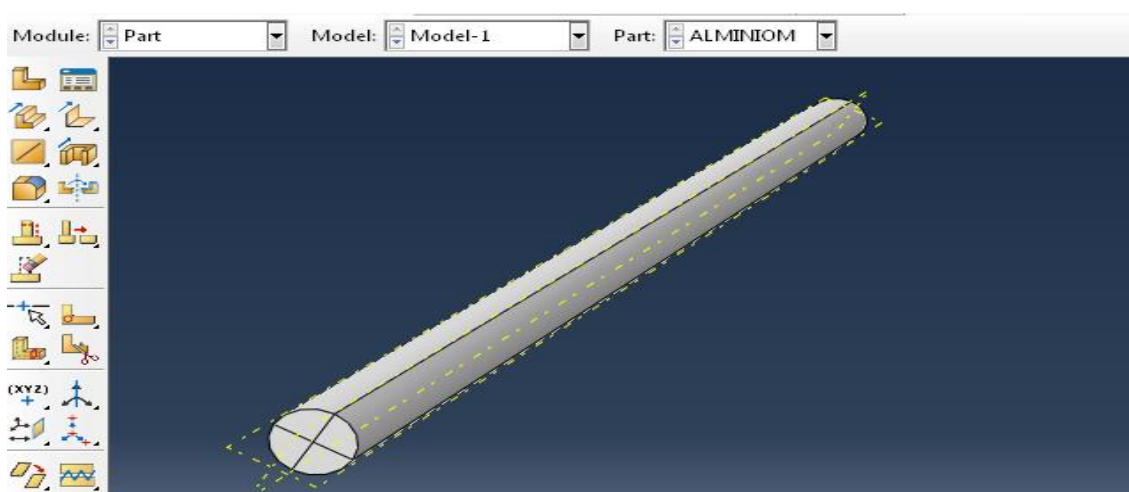
با توجه به بررسی‌ها و اقداماتی که در این تحقیق صورت گرفت، موارد زیر را می‌توان به عنوان پیشنهاد جهت ادامه کار در زمینه تقویت ستون‌ها و سازه‌های مهندسی ارائه داد:

۱. مطالعه و بررسی آزمون‌های نظیر ارتعاشات نمونه‌های تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی، آزمون ضربه و آزمون خمش.
۲. استفاده از رزین اپوکسی با غلظت و چسبندگی بیشتر و بررسی تأثیر روند بهبود آنالیزها.
۳. استفاده از نانو ذرات به صورت ترکیبی و بررسی غالب بودن نوع نانو ذرات در نحوه چسبندگی و شکست.
۴. بررسی اثر پارامترهایی نظیر تغییر دادن تعداد لایه‌های انجام آزمایش، تغییر در زاویه-هایی که کم‌تر مرسوم هستند نظیر زاویه ۱۵ درجه و ۷۵ درجه.
۵. بررسی تأثیرات تغییر نوع سطح خارجی، هندسه، جنس مواد اولیه، بر رفتار کمانش.

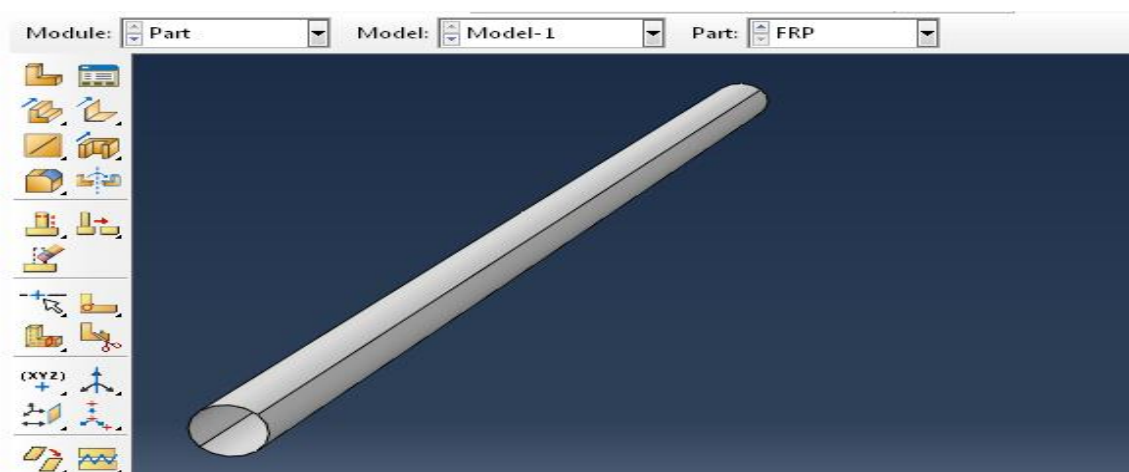
پیوست الف: مدل سازی ستون تقویت شده با نرم افزار آباکوس

پیوست الف-۱- مدل سازی ستون و کامپوزیت تقویت کننده

مدل سازی یک ستون با طول ۳۰ سانتی متر و قطر ۱ سانتی متر در بخش ترسیم^۱ نرم افزار انجام شده است. برای تعریف کردن بخش کامپوزیت تقویت کننده نیز ستونی با ابعاد ستون آلومینیومی، اما از جنس کامپوزیت چند لایه و به صورت توخالی تعریف شد. این مدل سازی با استفاده از ابزارهایی که نرم افزار آباکوس در اختیار کاربران قرار داده است صورت می گیرد. در شکل (الف-۱) و شکل (الف-۲) افزار ترسیم ستون و کامپوزیت تقویت کننده به صورت توخالی قابل مشاهده است.



شکل (الف-۱) ترسیم ستون



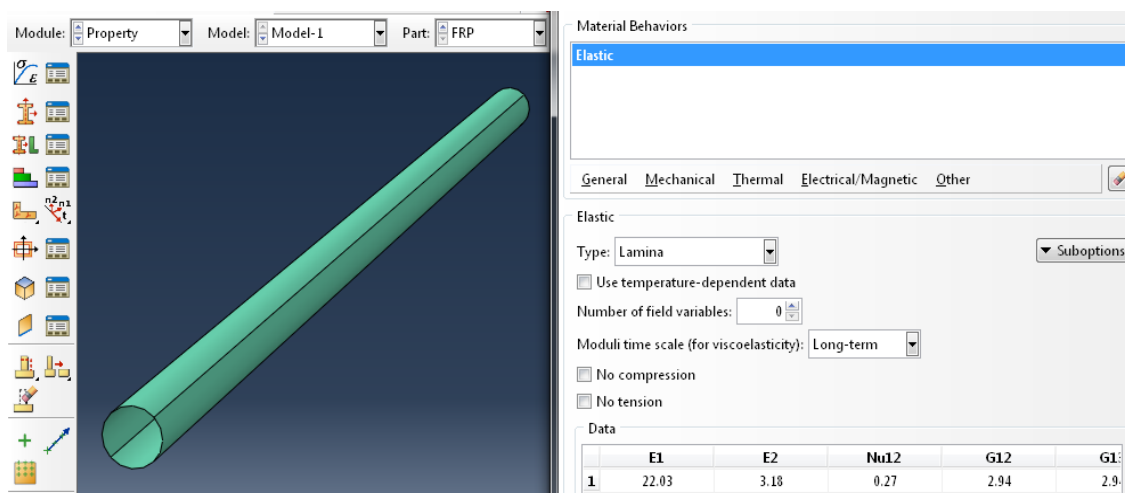
شکل (الف-۲) ترسیم کامپوزیت تقویت کننده به صورت توخالی

^۱ Part

پیوست الف-۲- تعریف خواص مواد

در بخش (۲-۴) در قسمت نتایج مدول‌های یانگ برای تحلیل عددی به صورت آزمون تجربی کشش بدست آمد. و مدول برشی G_{12} بر طبق روابط میکرومکانیک محاسبه گردید. از آن جا که در ساخت کامپوزیت از الیاف تک جهته و به صورت یکسان استفاده شد بنابراین می‌توان آن را به صورت ارتوتروپیک در نظر گرفت که با این دیدگاه روابط زیر برای خواص مکانیکی کامپوزیت توخالی طراحی شده صدق می‌کند. همچنین برای ستون آلومینیومی مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون نیز اعمال گردید. در شکل (الف-۳) نحوه تعریف خواص ماده برای کامپوزیت تقویت کننده مشاهده می‌شود. در این بخش از منوی تعریف خواص^۱ و قرار دادن نوع^۲ آن برای ستون آلومینیومی ایزوتروپیک، و برای کمربند کامپوزیتی، از نوع لایه‌لایه‌ای استفاده مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه پس از تعریف مواد مورد نظر و ایجاد دو بخش^۳، مواد به قسمت مربوط به آن اختصاص داده شد.

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



شکل (الف-۳) نحوه اعمال مدول‌های یانگ به کامپوزیت تقویت کننده در آباکوس

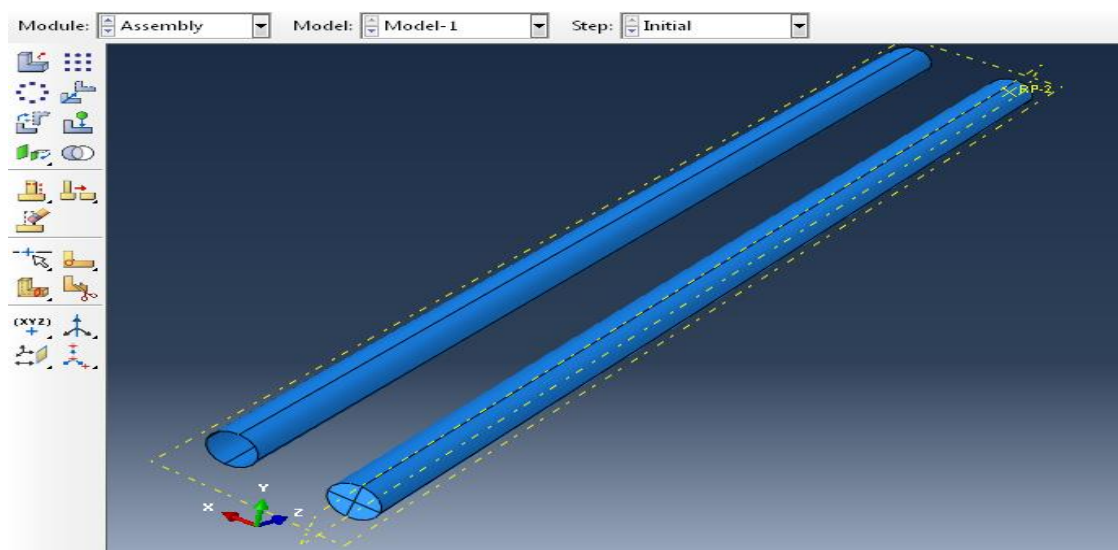
^۱ Property

^۲ Type

^۳ Section

پیوست الف-۳- مونتاژ کردن ستون و تقویت کننده

در بخش مونتاژ کردن^۱ ابتدا پس از فرا خوانی دو قسمت مدل سازی، باید کامپوزیت تقویت کننده به دور ستون آلومینیومی پیچیده شود. برای انجام این بخش مراکز دو مدل طراحی شده را به هم دیگر وصل می کنیم. در شکل (الف-۴) زیر ستون و کمر بند کامپوزیتی جهت مونتاژ کردن نشان داده شده است.



شکل (الف-۴) مونتاژ کردن ستون و کمر بند کامپوزیتی در محیط نرم افزار آباکوس

پیوست الف-۴- تعیین گام^۲

گام های انجام شده برای این مدل سازی به صورت ۵ مقدار ویژه و در گام کمانش در نظر گرفته شد. جهت تعریف گام کمانش در قسمت ایجاد گام در سربرگ نوع پردازش^۳ دو نوع پردازش معرفی شده است که با انتخاب پراکندگی خطی^۴ و زیر بخش کمانش^۵ گام محاسباتی تعریف می شود.

^۱ Assembly

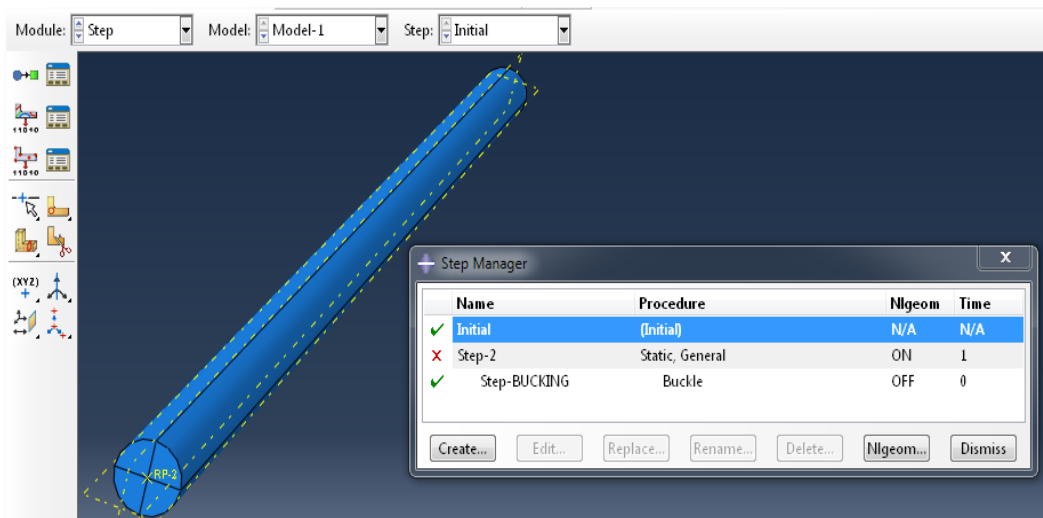
^۲ Step

^۳ Procedure Type

^۴ Linear Perturbation

^۵ Buckle

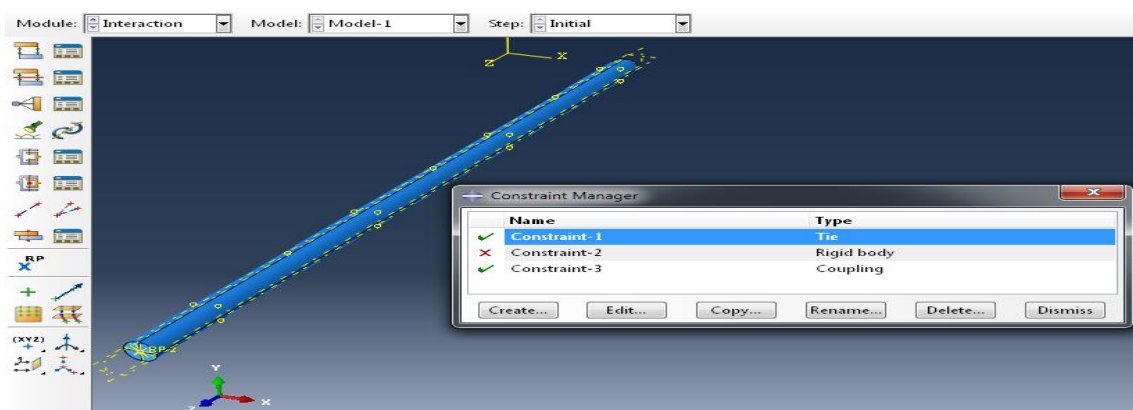
در شکل (الف-۵) نحوه وارد کردن گام‌ها مشاهده می‌شود.



شکل (الف-۵) تعیین گام‌های تحلیل کمانش

پیوست الف-۵- تعامل سطوح

در این بخش سطح ستون به سطح داخلی درون توخالی جوش^۱ داده می‌شود تا تمامی رفتارهای اعمال شده به ستون و کامپوزیت به عنوان یک سازه پیوسته بررسی گردد. همچنین یک نقطه مرجع^۲ در مرکز ستون جهت قرار دادن نیروی فشاری در بخش اعمال نیرو تعریف شد. در شکل (الف-۶) نحوه تعریف کردن گام‌های مدل سازی نشان داده شده است.



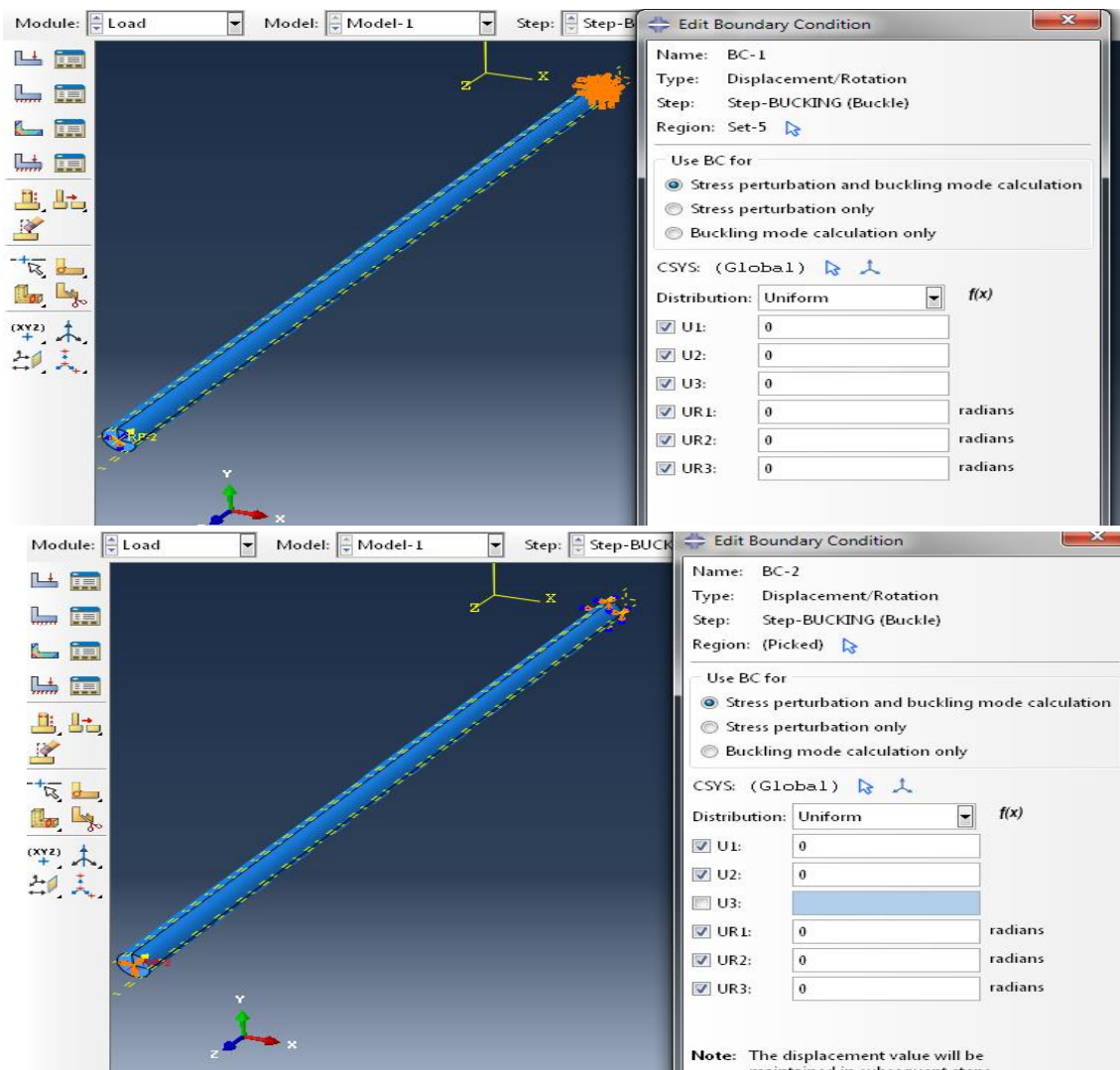
شکل (الف-۶) تعیین گام‌های تحلیل کمانش

^۱ Tie

^۲ Reference Point

پیوست الف-۶- شرایط مرزی و بار گذاری

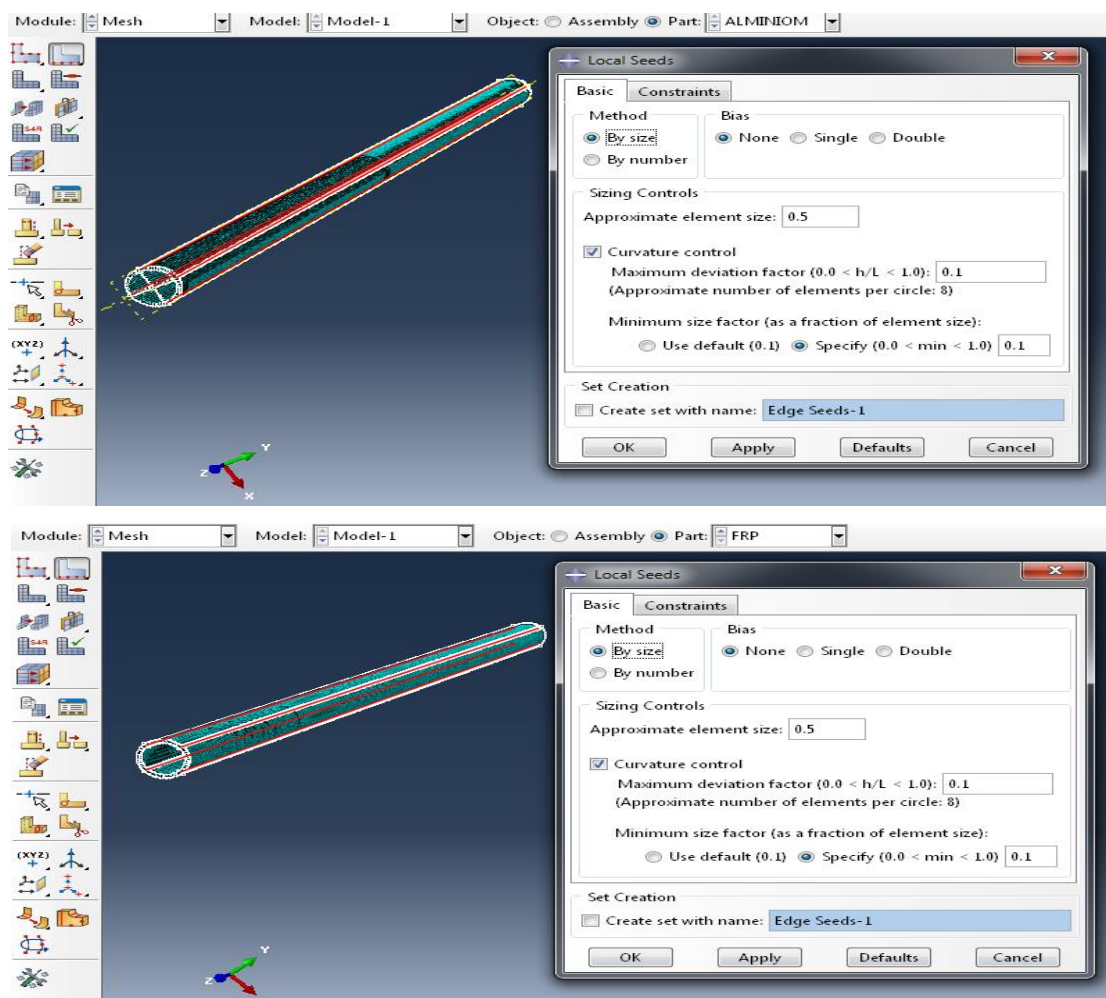
شرایط مرزی مورد استفاده در این مدل سازی به صورت دوسر گیردار بود. تمامی جابجایی ها در یک سر ستون بسته شد و در سر دیگر آن تنها جابجایی در راستای Z - و بار وارد بر ستون با مقدار یک نیوتن به صورت متمرکز برای نمایش بهتر بار بحرانی اعمال گردید. در شکل (الف-۷) شرایط مرزی دوسر گیردار نشان داده شده است.



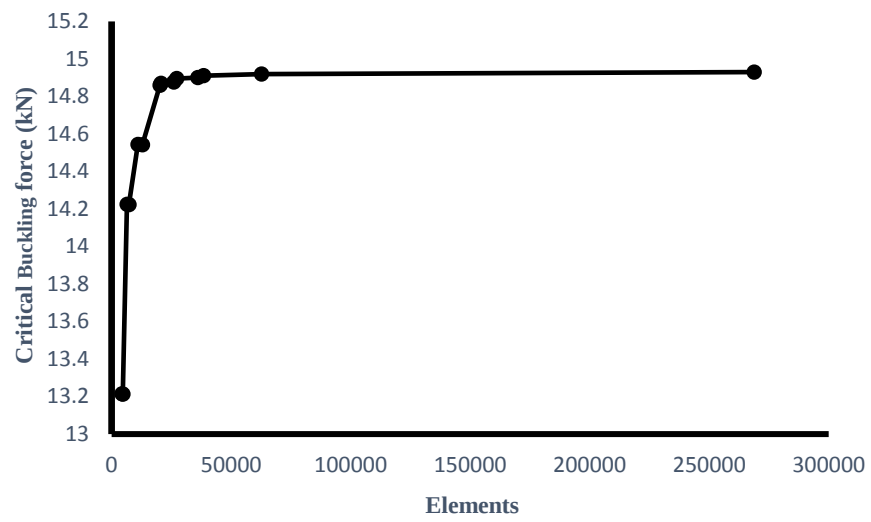
شکل (الف-۷) شرایط مرزی دو سرگیردار

پیوست الف-۷- مش بندی

برای شبکه بندی ستون آلومینیومی از المان C3D8R با هشت گره و سه درجه آزادی در هر گره استفاده شد. همچنین، شبکه بندی کمر بند کامپوزیتی، با المان پوسته ای S4R با چهار گره و شش درجه آزادی در هر گره انجام شد. در تعیین گام های محاسباتی پس از مشخص کردن تعداد مودها و دستور بررسی کمانش به نرم افزار، دو روش مش بندی به ترتیب با نام های مش بندی خودکار و مش بندی دستی اعمال شد. برای اعمال مش بندی منظم روی مدل ها، در دو قسمت انتهایی ستون از عملیات قسمت بندی استفاده شد. در شکل (الف-۸) به منظور دستیابی به مناسب ترین مش بندی جهت تحلیل و جواب دقیق تر از آنالیز حساسیت مش مطابق شکل (الف-۹) استفاده شده است.



شکل (الف-۸) مش بندی ستون و کمر بند کامپوزیتی



شکل (الف-۹) نمودار همگرایی مش

مراج

[1] Mazumdar S. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. CRC press; 2001.

[2] Ashby MF. Technology of the 1900s: Advanced material and predictive design. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1987 Jul; 322(1567):393-407.

[3] Mallick PK. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. CRC press; 2007.

۴. صدیق‌زاده حمیدرضا. شبیه‌سازی ساخت و بررسی خواص مکانیکی لوله آلومینیومی حمایت شده توسط کامپوزیت پایه پلیمری با تقویت‌کننده الیاف کربن. (پایان نامه کارشناسی ارشد). دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تبریز؛ ۱۳۹۵.

۵. هاشمی حمید رضا و همکاران. راهنمای صنعت کامپوزیت. انجمن کامپوزیت ایران؛ ۱۳۸۶.

۶. محسنی شکیب محسن. مکانیک سازه‌های مرکب. انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)؛ ۱۳۸۶.

[7] Lubin G. Handbook of composites. New York city: Springer; 2013.

[8] Wittman C, Shook GD. Hand lay-up techniques. In: Lubin G, editor. Handbook of composites. Boston: Springer; 1982. p. 321-367.

۹. ملکی، ش، ناطق الهی، ف. مقاوم سازی سازه‌های بتنی با استفاده FRP. انتشارات نورپردازان؛ ۱۳۸۵.

[10] Smith WF. Structure and properties of engineering alloys. McGraw-Hill; 1993.

[11] Flower HM. High performance materials in aerospace. Springer Science & Business Media; 2012.

[12] Konsta Gdoutos MS, Metaxa ZS, Shah SP. Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high-performance carbon nanotube/cement nanocomposites. Cement and Concrete Composites. 2010 Feb; 32(2): 10-115.

[13] Grobert N. Carbon nanotubes becoming clean. Materials Today. 2007 Jan-Feb; 10 (1-2):28-35.

[14] Yakobson BI, Avouris P. Mechanical properties of carbon nanotubes. Springer. 2001 Mar; 80:278-327.

[15] Coleman JN, Khan U, Blau WJ, Gun'ko YK. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotubes polymer composites. Carbon. 2006 Aug; 44(9): 1624-1652.

- [16] Guide Abaqus version 6.14 Dassault System Simulia Crop. Providence. RI. 2014.
- [17] Brush DO, Almroth BO. Buckling of bars, plates, and shells. McGraw-Hill; 1975.
- [18] Yoo CH, Lee S. Stability of structures: principles and applications. Butterworth-Heinemann; 2011.
- [19] Karpuz P. Mechanical characterization of filament wound composite tubes by internal pressure testing [Master of Science Thesis]. Department of Metallurgical and Materials Engineering: University of Ankara; 2005.
- [20] Jia X, Chen G, Yu Y, Li G, Zhu J, Luo X, et al. Effect of geometric factor, winding angle and pre-crack an angle and pre-crack angle on quasi-static crushing behavior of filament wound CFRP cylinder. Composites Part B: Engineering. 2013 Feb; 45 (1): 1336-1343.
- [21] Wang J, Chen L, Yang J. Compressive behavior of CFRP-steel composite tubed steel-reinforced columns with high-strength concrete. Journal of Constructional Steel Researcher. 2018 Nov; 150: 354-370.
- [22] El-Refaie S, Ashour A, Garrity S. Strengthening of reinforced concrete continuous beams with CFRP composites. Structural engineering, Mechanics and Computation. 2001 Apr; 2:1519-1598.
- [23] Haghani R, Al-Emrani M. A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams-Part A: Background and theory. Construction and Building Materials. 2012 May; 34:486-493.
- [24] Haghani R, Al-Emrani M. A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams-Part B: Experimental verification. Construction and Building Materials. 2012 May; 30:686-694.
- [25] Diab Y. Strengthening of RC beams by using sprayed concrete: experimental approach. Engineering Structures. 1998 Jul; 20(7): 631-643.
- [26] El-Sayed KM, Debaiky SA, Khalil NK, El-Shenawy IM. Improving buckling resistance of hollow structural steel columns strengthened with polymer-mortar. Thin-Walled Structures. 2019Apr; 137:515-526.
- [27] Park JS, Hong ChS, Kim ChG, Kim ChU. Analysis of filament wound composites structures considering the change of winding angles through the thickness direction. Composites Structures. 2002 Jan; 55(1): 63-71.
- [28] Yang Z, Chen J, Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams. Constructions and Building Materials. 2003 Feb; 17(1):3-13.

- [29] Shaat A, Fam A. Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fiber reinforced polymers. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2006 Apr; 33:458-470.
- [30] Feng P, Hu L. Steel columns strengthened/reinforced by prestressed CFRP strips: concepts and behaviors under axial compressive loads. *Composite Structures*. 2019 Jun; 217: 150-164.
- [31] Bozkurt ÖY, Bulut M, Erkiğ A, Faydh WH. Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clay particles. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Feb; 158:82-91.
- [32] Ram KS, Babu TS. Buckling of laminated composite shells under transverse load. *Composite Structure*. 2002 Feb; 55(2): 157-168.
- [33] Lam L, Teng J. Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression. *Engineering Structures*. 2009 Feb; 31(2): 308-321.
- [34] Iqbal K, Khan ShU, Munir A, Kim JK. Impact damage resistance of CFRP with nano clay-filled epoxy matrix. *Composites Science and Technology*. 2009 Sep; 69(11-12): 1949-1957.
- [35] Coleman JN, Khan U, Blau WJ, Gun'ko YK. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*. 2006 Aug; 44(9): 1624-1652.
- [36] Daniel IM, Ishai O. *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford: University Press New York; 1994.
- [37] Gojny F, Wichman MHG, Köpke U, Fiedler B, Schulte k. Carbon nanotube-reinforced epoxy- composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composites Sciences and Technology*. 2004 Nov; 64(15): 2363-2371.
- [38] Knoll J, Riecken BT, Kosmann N, Chandrasekaran S, Schulte k, Fiedler B. The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fiber reinforced epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014 Dec; 67:233-240.
- [39] Wysmulski P. Effect of load eccentricity on buckling of short composite profiles. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2017 Aug; 21(3):523-530.
- [40] Quaresimin M, Carraro P. Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension–torsion fatigue loading. *International Journal of Fatigue*. 2014 Jun; 63:25-35.
- [41] Fattahi A, Safaei B. Buckling analysis of CNT-reinforced beams with arbitrary boundary conditions. *Microsystem Technologies*. 2017 Mar; 23(10): 5079-5091.

- [42] Barati MR, Zenkour AM. Post-buckling analysis of refined shear deformable graphene platelet reinforced beams with porosities and geometrical imperfection. *Composite Structures*. 2017 Dec; 181:194-202.
- [43] Yas M, Samadi N. Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composites Timoshenko beams on elastic foundation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012 Oct; 98: 119-128.
- [44] Borrego L, Costa JDM, Ferreira JAM, Silva M. Fatigue behavior of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*. 2014 Jun; 62:65-72.
- [45] Khashaba U, Selmy AL, El-Sonbaty AL, Megahed, M. Behavior of notched and unnotched $[0/\pm 30/\pm 60/90]$ s GFR/EPOXY composites under static and fatigue loads. *Composite Structures*. 2007 Dec; 81(4): 606-613.
- [46] Zhang L, Lei Z, Liew K. An element-free IMLS-Ritz framework for buckling analysis of FG–CNT reinforced composite thick plates resting on Winkler foundations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2015 Sep; 58:7-17.
- [47] Rezaiee-Pajand M, Mokhtari M, Hozhabrossadati S. Application of Henchy bar-chain model to buckling analysis of elastically restrained Timoshenko axially functionally graded carbon nanotube reinforced composite beams. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2019 Apr; 47(5): 599-620.
- [48] Safaei B, Moradi-Dastjerdi R, Behdinin K, Chu F, et al. Critical buckling temperature and force in porous sandwich plates with CNT-reinforced nanocomposite layers. *Aerospace Science and Technology*. 2019 Aug; 91:175-185.
- [49] Shen HS, Xiang Y. Nonlinear analysis of nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundations in thermal environments. *Engineering Structures*. 2013 Nov; 56: 698-708.
- [50] Kumar D, Heinrich C, Waas AM. Buckling analysis of carbon nanotubes modeled using nonlocal continuum theories. *Journal of Applied Physics*. 2008 Jan; 103(7): 073521.
- [51] Makvandi R, Öchsner A. On a Finite Element Approach to Predict the Thermal Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Composite Materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2014 Jun; 354: 215-225.
- [52] Duarte I, Ventura E, Olhero S, Ferreira J MF. A novel approach to prepare aluminum-alloy foams reinforced by carbon-nanotubes. *Materials Letters*. 2015 Dec; 160:162-166.
- [53] Zhang W, Suhr J, Koratkar NA. Observation of high buckling stability in carbon nanotube polymer composites. *Advanced Materials*. 2006 Jan; 18 (4): 425-456.

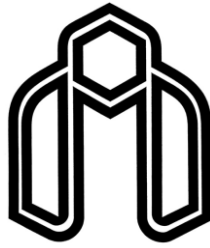
- [54] Wattanasakulpong N, Ungbhakorn V. Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. *Computational Materials Science*. 2013 Apr; 71: 201-208.
- [55] Shen HS. Thermal buckling and post buckling behavior of functionally graded carbon nanotube- reinforced composite cylindrical shells. *Composites Part B: Engineering*. 2012 Apr; 43(3): 1030-1038.
- [56] Qiao P, Zou G, Davalos JF. Flexural–torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams. *Composite Structures*. 2003 May; 60(2): 205-217.
- [57] Wang Y, Feng C, Santiudte C, Zhao Z, Yang J. Buckling and post buckling of dielectric composite beam reinforced with Graphene Platelets (GPLs). *Aerospace Science and Technology*. 2019 Aug; 91: 208-218.
- [58] He Y, Wu D, Zhou M, Liu H, Zhang L, Chen Q, et al. Effect of MoO₃/carbon nanotubes on friction and wear performance of glass fabric reinforced epoxy composites under dry sliding. *Applied surface Science*. 2020 Mar; 506: 144946.
- [59] Hosseini Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Aug; 122: 1-8.
- [60] Hosseini Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. Dynamic characteristics of functionalized carbon nanotube reinforced epoxy composites: an experimental approach. *Journal of Solid Mechanics*. 2020 Jun; 12(2): 358-365.
- [61] Sabermanesh HR, Ghannad M, Hosseini Farrash S. Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study. *Shahrood University of Technology*; 2020. (article in press)
- [62] Hosseini Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of CNT/ Epoxy nanocomposites. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2018 Nov; 5(1): 41-48.
- [63] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS., Standard test method for tensile properties of polymer ASTM D3039/DM, 2008.matrix composite materials.
- [64] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS., Standard test method for axial compression test of reinforced plastic and polymer matrix composite vertical members ASTM E2954, 2015.
- [65] Chen WF, Lui EM. Structural stability: theory and implementation. London: Elsevier; 1987.

Abstract

In this thesis, experimental study on the critical buckling load of aluminum columns reinforced with glass/epoxy composite belts containing carbon nanotubes (CNTs) are presented. The columns with solid circular cross section are subjected to axially pressure load. Aluminum column specimens reinforced with glass/epoxy and CNT/glass/epoxy are fabricated. CNTs with 0.25, 0.5 and 1 weight percent (wt.%) are dispersed into the epoxy resin. Three layers composite belts are wrapped around the column. Glass fibers are placed along the column axes in each layer. The columns are tested under fix ended boundary conditions utilizing Instron hydraulic universal testing machine. Pressure load with respect to the end shortening are plotted for each specimen. To achieve the average value of critical buckling load, four specimens are examined for each composite belt material. Results show that when 0.5% CNT/glass/epoxy composite belt is used to reinforce the column, the critical buckling load of the column increases by 50% with respect to the column with glass/epoxy composite belt. The proper dispersion of CNTs into the matrix material along with appropriate adhesion between the nanocomposite belt and the aluminum column lead to the increase of buckling load. Furthermore, to validate the results, buckling analysis of aluminum column reinforced with glass/epoxy composite belt was done in Abaqus finite element software. Finite element simulation confirms the experimental results obtained.

Keywords

Buckling, Aluminum column, Composite belt, Carbon nanotube



Shahrood University of Technology
Department of Mechanic and Mechatronic Engineering

**Experimental Buckling Investigation of Reinforced
Metal Column by Composite Belt Containing
Nanoparticles**

By:
Mohammad Raeisi

Supervisors:

Dr. Alireza Shaterzadeh
Dr. Seyyed Mahdi Hosseini Farrash

November 2020