

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی شیمی و مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد مرکب

# بررسی خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیوم- کامپوزیت به روش رشته پیچی و دستی مورد استفاده در صنعت خودرو

نگارنده: هانی یادگاری

اساتید راهنما:

دکتر رضا طاهریان

دکتر سهیل داریوشی

شهریور ۹۷

شماره: ۴۷/۱۸  
تاریخ: ۴۷/۹/۲۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

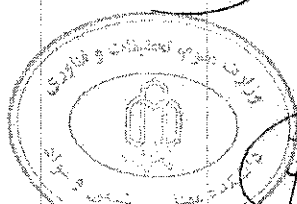
### فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای هانی یادگاری با شماره دانشجویی ۹۵۱۶۰۷۴ رشته مهندسی مواد گرایش مواد مرکب تحت عنوان بررسی خواص تجربی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با روش های رشته پیچی و دستی در صنعت خودرو که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

| قبول (با درجه: ..... ) <input checked="" type="checkbox"/> مردود <input type="checkbox"/> |                    |            |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|-------|
| نوع تحقیق: نظری <input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/>         |                    |            |       |
| عضو هیأت داوران                                                                           | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
| ۱- استاد راهنمای اول                                                                      | دکتر رضا طاهریان   | استادیار   |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم                                                                      | دکتر سهیل داریوشی  | استادیار   |       |
| ۳- استاد مشاور                                                                            | -                  | -          | -     |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی                                                                 | دکتر اسماعیل سلیمی | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول                                                                        | دکتر مجید محمدی    | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم                                                                        | دکتر شجاعی         | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



۴۷/۹/۲۵

تقدیم بہ پدر، مادر و خواہرم بابت

دلگرمی و امیدشان،

و ہمہ ی زحماتی کہ کشیدند.

از اساتید محترم

آقایان دکتر طاهریان و دکتر داریوشی

بابت حمایت، صبوری و راهنمایی‌هایشان صمیمانه سپاسگزارم.

## تعهد نامه

اینجانب **هانی یادگاری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مواد مرکب** دانشکده **مهندسی شیمی و مواد** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **هانی یادگاری** تحت راهنمایی **دکتر طاهریان و دکتر داریوشی** متعهد می شوم.

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

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

ساختارهای حفاظتی لوله‌ای شکل، به منظور کاهش آسیب رسیدن به سرنشینان خودرو ساخته می‌شوند. محققین ابتدا این لوله‌ها را به علت سبک بودن، از جنس آلومینیوم و سپس به منظور افزایش استحکام در برابر بارهای خمشی از مواد کامپوزیتی تولید کردند. این لوله‌ها با اینکه استحکام خمشی بالایی داشتند ولی با تغییرفرم الاستیک می شکستند و به دلیل نامناسب بودن رفتار شکست این لوله‌ها، رویکرد تحقیقات به سمت لوله‌های هیبریدی پیش رفت. لوله‌های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت جداره نازک با مقطع دایره‌ای با استفاده از روش رشته پیچی به منظور افزایش استحکام خمشی و بهبود رفتار شکست، همچنین تغییرفرم الاستیک و پلاستیک تولید شدند. ساخت این لوله‌ها با روش رشته پیچی به این صورت است که ابتدا الیاف قرقره ای<sup>۱</sup> پس از آغشته و ترسازي در حمام رزین اپوکسی و عبور از شانه‌ها به منظور مرتب سازی الیاف با زاویه پیچش ۲۵ درجه بر روی سنبه یا زیر لایه که لوله آلومینیومی است، پیچانده می شوند. سپس این لوله‌ها در آون<sup>۲</sup> و دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت تحت عملیات پخت قرار گرفته و عملیات ساخت لوله‌ها به پایان می رسد. به کمک آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup>، ساختار مقاطع لوله آلومینیوم و الیاف، مکانیزم و رفتار شکست مقطع آن در اثر بارگذاری‌های فشاری و خستگی، همچنین شناسایی عیوب به وجود آمده از جمله ترک، تورق و سایش بررسی شد. پیش از انجام آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون‌های مکانیکی خمشی، خستگی و فشاری انجام شد. در آزمون خمشی، نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت کامپوزیت، استحکام خمشی در اثر بارگذاری افزایش می‌یابد و استحکام الیاف کربنی نسبت به الیاف شیشه به دلیل انعطاف پذیر بودن ماده و مدول الاستیسیته بالا در اثر بارگذاری افزایش می‌یابد.

---

<sup>۱</sup>Creel

<sup>۲</sup>Oven

<sup>۳</sup>SEM

همچنین برای افزایش بیشتر استحکام خمشی و رفتار شکست بسیار مناسب از لوله‌های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن به صورت دولایه به عنوان لوله پیشنهادی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در آزمون فشاری نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت، استحکام فشاری افزایش می‌یابد و همچنین استفاده از الیاف کربنی و هیبریدی الیاف شیشه و کربن باعث بهبود مکانیزم شکست و کمتر شدن عیوب می‌شود. همچنین استحکام فشاری این لوله‌ها نسبت به الیاف شیشه‌ای افزایش می‌یابد. در آزمون خستگی مشاهده شد: که لوله کربنی به علت انعطاف پذیری و مدول الاستیسیته بالا، تنش بیشتری را در تعداد سیکل‌های بالا نسبت به لوله با الیاف شیشه‌ای تحمل می‌کنند و به دلیل انعطاف پذیر بودن، ترک و شکست ترد در آن‌ها کمتر ایجاد می‌شود.

**کلمات کلیدی:** لوله، کامپوزیت، آلومینیوم، الیاف هیبریدی کربن و شیشه، اپوکسی، رشته پیچی، آنالیز شکست، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت خستگی



# فهرست مطالب

|         |                                                                               |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ز       | فهرست اشکال                                                                   |
| ش       | فهرست جداول                                                                   |
| ۱.....  | فصل اول: مقدمه و مرور بر منابع.....                                           |
| ۲.....  | ۱-۱- مقدمه.....                                                               |
| ۳.....  | ۱-۲- تاریخچه تصادف خودرو.....                                                 |
| ۳.....  | ۱-۳- اهمیت ساختارهای حفاظتی.....                                              |
| ۴.....  | ۱-۴- ضرورت ساخت لوله‌های کامپوزیتی در کشور.....                               |
| ۵.....  | ۱-۵- تأثیر زاویه پیچش برروی استحکام خمشی.....                                 |
| ۹.....  | ۱-۶- مکانیزم شکست لوله‌های کامپوزیت در اثر بارگذاری خمشی.....                 |
| ۹.....  | ۱-۷- مکانیزم شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری.....      |
| ۱۰..... | ۱-۷-۱- خمش لمینا یا بازشدن الیاف.....                                         |
| ۱۱..... | ۱-۷-۲- تکه تکه شدن یا برش عرضی الیاف.....                                     |
| ۱۱..... | ۱-۷-۳- شکست ترد.....                                                          |
| ۱۱..... | ۱-۷-۴- کمانش موضعی یا خمیده شدن.....                                          |
| ۱۲..... | ۱-۸- مکانیزم شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری خستگی خمشی..... |
| ۱۳..... | ۱-۹- مروری بر منابع.....                                                      |
| ۲۵..... | فصل دوم: روش انجام آزمایش.....                                                |
| ۲۶..... | ۲-۱- مقدمه.....                                                               |
| ۲۷..... | ۲-۲- مواد مورد استفاده در ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت.....                   |
| ۲۷..... | ۲-۲-۱- رزین اپوکسی.....                                                       |
| ۲۷..... | ۲-۲-۲- الیاف شیشه.....                                                        |
| ۲۸..... | ۲-۲-۳- الیاف کربن.....                                                        |
| ۲۹..... | ۲-۳- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت.....                                        |
| ۲۹..... | ۲-۳-۱- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت به روش رشته پیچی.....                     |
| ۳۱..... | ۲-۳-۲- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت به روش لایه گذاری دستی.....               |
| ۳۴..... | ۲-۴- آزمایش‌های مورد نیاز لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت.....                    |
| ۳۴..... | ۲-۴-۱- آنالیز ساختاری و شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی.....               |
| ۳۵..... | ۲-۴-۲- آزمون خمش سه نقطه.....                                                 |
| ۳۶..... | ۲-۴-۳- آزمون فشار.....                                                        |
| ۳۷..... | ۲-۴-۴- آزمون خستگی خمشی.....                                                  |

## فصل سوم: نتایج..... ۴۱

۳-۱- آنالیز ساختاری و شکست لوله آلومینیوم- کامپوزیت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی..... ۴۲

۳-۱-۱- بررسی مقطع شکست لوله آلومینیوم- کامپوزیت الیاف شیشه..... ۴۲

۳-۱-۲- بررسی مقطع شکست پارچه شیشه..... ۴۳

۳-۱-۳- بررسی مقطع شکست هیبریدی الیاف کربن و شیشه..... ۴۵

۳-۱-۴- بررسی مقطع شکست الیاف کربن تحت بارگذاری خستگی خمشی..... ۴۶

۳-۲- آزمون خمش لوله های آلومینیوم- کامپوزیت..... ۴۷

۳-۲-۱- نتایج به دست آمده از آزمون خمش لوله های آلومینیوم- کامپوزیت..... ۴۸

۳-۲-۲- مقایسه..... ۵۴

۳-۳- نتایج آزمون فشار لوله های آلومینیوم- کامپوزیت..... ۵۵

۳-۳-۱- نتایج به دست آمده در اثر بارگذاری فشاری لوله های آلومینیوم- کامپوزیت..... ۵۶

۳-۳-۲- مقایسه..... ۵۹

## فصل چهارم: بحث..... ۶۱

۴-۱- بررسی مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم- کامپوزیت در اثر بارگذاری خمشی..... ۶۲

۴-۲- بررسی مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم- کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری..... ۷۰

۴-۳- بررسی مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم- کامپوزیت در اثر بارگذاری خستگی خمشی..... ۷۵

## فصل پنجم: نتیجه گیری..... ۸۳

۵-۱- نتیجه گیری..... ۸۴

منابع..... ۸۵

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تصویر ساختار لوله کامپوزیت..... ۵
- شکل ۱-۲- منحنی تنش بر حسب زاویه پیچش..... ۶
- شکل ۱-۳- منحنی شکست بر اثر بارگذاری خمشی بر حسب زاویه پیچش..... ۸
- شکل ۱-۴- مکانیزم های شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری..... ۱۲
- شکل ۱-۵- تصویر آزمایش خمش لوله آلومینیوم با مقطع مربع..... ۱۴
- شکل ۱-۶- تصویر دستگاه آزمایش خستگی خمش-دوران..... ۱۸
- شکل ۱-۷- تصویر بررسی شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت..... ۲۰
- شکل ۱-۸- منحنی لوله های کامپوزیتی تحت خمش..... ۲۱
- شکل ۱-۲-۱- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه به روش رشته پیچی..... ۳۰
- شکل ۲-۲- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربن به روش رشته پیچی..... ۳۱
- شکل ۲-۳- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه به روش دستی..... ۳۲
- شکل ۲-۴- تصویر ساخت لوله های آلومینیوم-کامپوزیت به روش رشته پیچی شده..... ۳۳
- شکل ۲-۵- تصویر دستگاه SEM..... ۳۴
- شکل ۲-۶- تصویر پوشش طلا داده شده بر روی مقطع شکست در اثر بارگذاری فشاری و خستگی با SEM..... ۳۵
- شکل ۲-۷- تصویر دستگاه آزمایش خمش سه نقطه لوله آلومینیوم-کامپوزیت..... ۳۶
- شکل ۲-۸- تصویر دستگاه آزمایش فشار محوری لوله آلومینیوم-کامپوزیت..... ۳۷
- شکل ۲-۹- تصویر دستگاه آزمایش خستگی لوله آلومینیوم-کامپوزیت..... ۳۸
- شکل ۲-۱۰- شماتیک کلی مواد، روش ساخت و آزمون های لوله های آلومینیوم-کامپوزیت..... ۳۹
- شکل ۳-۱- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۴۲
- شکل ۳-۲- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۴۳
- شکل ۳-۳- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری..... ۴۴
- شکل ۳-۴- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری..... ۴۴
- شکل ۳-۵- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربن دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۴۵
- شکل ۳-۶- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربن دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۴۶
- شکل ۳-۷- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربنی تحت بارگذاری خستگی..... ۴۷
- شکل ۳-۸- بررسی مقطع شکست نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربنی تحت بارگذاری خستگی..... ۴۷
- شکل ۳-۹- بررسی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه..... ۴۸
- شکل ۳-۱۰- بررسی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه دولایه..... ۴۹
- شکل ۳-۱۱- بررسی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه سه لایه..... ۴۹
- شکل ۳-۱۲- بررسی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه..... ۵۰

- شکل ۳-۱۳- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن دولایه..... ۵۰
- شکل ۳-۱۴- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه تک لایه..... ۵۱
- شکل ۳-۱۵- مقایسه تمام نمونه ها در اثر بارگذاری خمشی..... ۵۴
- شکل ۳-۱۶- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه دو لایه در اثر بارگذاری فشاری..... ۵۶
- شکل ۳-۱۷- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه سه لایه در اثر بارگذاری فشاری..... ۵۶
- شکل ۳-۱۸- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربن دو لایه در اثر بارگذاری فشاری..... ۵۷
- شکل ۳-۱۹- بررسی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه تک جهت در اثر بارگذاری فشاری..... ۵۷
- شکل ۳-۲۰- مقایسه تمام نمونه ها در اثر بارگذاری فشاری با نیروی 1kN..... ۵۹
- شکل ۴-۱- تصویر لوله های آلومینیوم-کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی..... ۶۲
- شکل ۴-۲- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه..... ۶۳
- شکل ۴-۳- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه دو لایه..... ۶۴
- شکل ۴-۴- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه سه لایه..... ۶۵
- شکل ۴-۵- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با پارچه شیشه تک جهته..... ۶۴
- شکل ۴-۶- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه..... ۶۷
- شکل ۴-۷- مکانیزم شکست فشاری لوله های آلومینیوم- کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربنی دو لایه..... ۶۸
- شکل ۴-۸- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه سه لایه تحت بارگذاری فشاری..... ۷۰
- شکل ۴-۹- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۷۰
- شکل ۴-۱۰- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم بارگذاری فشاری..... ۷۲
- شکل ۴-۱۱- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری..... ۷۲
- شکل ۴-۱۲- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربنی دولایه تحت بارگذاری فشاری..... ۷۳
- شکل ۴-۱۳- تصویر لوله‌های آلومینیوم، آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی و شیشه‌ای در اثر بارگذاری خستگی خمشی..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴- لوله آلومینیوم در اثر بارگذاری خستگی..... ۷۸
- شکل ۴-۱۵- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۹- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی..... ۸۱

## فهرست جداول

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۱-۲ - خواص مکانیکی مواد.....                                 | ۷  |
| جدول ۲-۲ - مشخصات فیزیکی رزین اپوکسی LR630.....                   | ۲۷ |
| جدول ۳-۲ - مشخصات فیزیکی الیاف شیشه E-glass WR6.....              | ۲۸ |
| جدول ۴-۲ - خواص مکانیکی الیاف شیشه.....                           | ۲۸ |
| جدول ۵-۲ - مشخصات فیزیکی الیاف کربنی Toray T300.....              | ۲۹ |
| جدول ۶-۲ - خواص مکانیکی الیاف کربنی.....                          | ۲۹ |
| جدول ۷-۲ - ابعاد، جنس و روش ساخت لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت..... | ۳۳ |
| جدول ۱-۳ - نتایج آزمون خمش در لوله‌های آلومینیوم - کامپوزیت.....  | ۵۲ |
| جدول ۲-۳ - نتایج آزمون فشار در لوله‌های آلومینیوم - کامپوزیت..... | ۵۹ |

# فصل اول: مقدمه و مروری بر منابع

## ۱-۱- مقدمه

کامپوزیت از دو جز زمینه و تقویت کننده ساخته می شود. کامپوزیت ها دارای خواص متفاوتی هستند که هر کدام از اجزای آن می توانند خواص دیگری را بهبود دهند. رایج ترین کامپوزیت ها به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

۱- کامپوزیت زمینه سرامیکی<sup>۴</sup>

۲- کامپوزیت زمینه فلزی<sup>۵</sup>

۳- کامپوزیت زمینه پلیمری<sup>۶</sup>

کامپوزیت ها می توانند خواص الکتریکی، مکانیکی، حرارتی، نوری و .... را بهبود دهند. در این پایان نامه خواص مکانیکی لوله های کامپوزیتی به روش رشته پیچی بررسی شده است. بدین منظور ابتدا فرآیند ساخت لوله های کامپوزیتی بیان می شود. به طور کلی روش های ساخت لوله های کامپوزیتی عبارت اند از:

۱- روش دستی<sup>۷</sup>

۲- روش رشته پیچی<sup>۸</sup>

۳- روش پالترژن<sup>۹</sup>

---

<sup>4</sup> Ceramic Matrix Composite

<sup>5</sup> Metal Matrix Composite

<sup>6</sup> Polymer Matrix Composite

<sup>7</sup> Hand Lay up

<sup>8</sup> Filament Winding

<sup>9</sup> Pultrusion

## ۱-۲- تاریخچه تصادف خودرو

در لندن به دلیل تصادفات بسیاری که اتفاق می افتاد، نگرانی‌های زیادی برای محققین به وجود آمده بود به طوری که مهندسان به فکر کاهش صدمات وارده به سرنشینان و قطعات خودرو افتادند. به همین علت ابزارهای ارزان مانند لوله انتخاب شد. همچنین مطالعات گسترده‌ای صورت گرفت و طراحی‌ها و آنالیزهای زیادی انجام گرفت. ابتدا از لوله‌های فلزی با مقاطع تک ضلعی یا چندضلعی استفاده گردید که در معرض بارگذاری‌های خمشی قرار بگیرند. لوله‌های جداره نازک به‌خوبی در معرض بارگذاری‌های خمشی و عرضی قرار گرفتند که مشکلاتی همچون آسیب به مسافران و همچنین بی‌نقص بودن ساختار، برطرف گردید. به طور کلی عوامل زیادی روی بارگذاری‌های خمشی تأثیرگذار است. این عوامل شامل: ۱- شکل ۲- خواص ماده ۳- ابعاد ۴- شرایط مرزی فیکسچر ۵- شکل و ابعاد پانچ است [1].

## ۱-۳- اهمیت ساختارهای حفاظتی

ساختارهای جداره نازک مانند لوله، ایمنی و خواص خمشی را افزایش می‌دهند. این لوله‌ها باید دارای استحکام و سفتی بالا و وزن پایین باشند. این لوله‌ها در صنعت خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند و کاربردهای زیادی دارند یکی از کاربردهای مهم که موضوع این تحقیق است، افزایش استحکام خمشی و خستگی در اثر بارگذاری‌های احتمالی است. این لوله‌ها در داخل دو طرف خودرو قرار می‌گیرند. هنگامی که تصادف اتفاق می‌افتد، نیرویی که بر دو طرف بدنه خودرو وارد می‌شود، به تمام قطعات خودرو هم وارد می‌شود و در نهایت به سرنشینان خودرو آسیب وارد می‌شود. با قراردادن این لوله‌ها، در هنگام تصادف نیرو به حداقل رسیده و به سرنشینان خودرو آسیب وارد نمی‌شود. از طرفی این لوله‌ها به خاطر جداره نازک بودن و پایین بودن وزنشان باعث بهبود عملکرد وسایل نقلیه و پایین آمدن مصرف سوخت می‌شوند. انتخاب

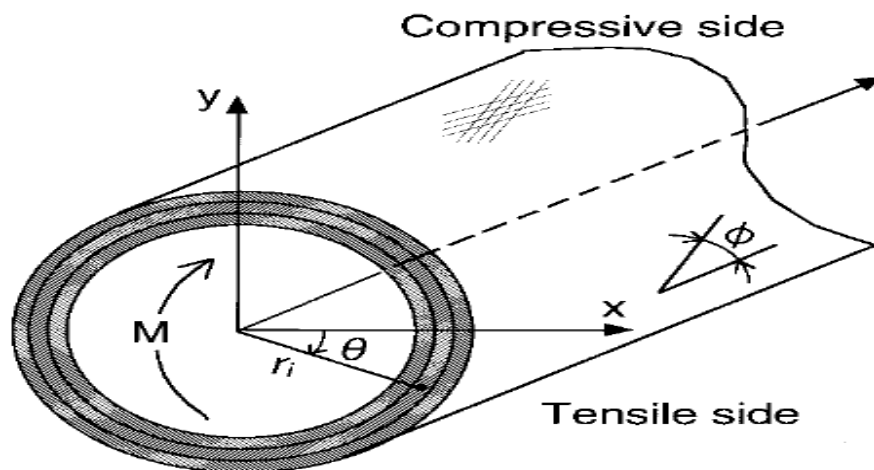


ماده کامپوزیتی با سفتی بالا و وزن پایین مناسب می‌باشد. کامپوزیت مورد استفاده برای ساخت لوله کامپوزیتی از جنس الیاف کربن و شیشه با رزین اپوکسی می‌باشد که خواص مورد نظر را بالا می‌برد.

#### ۱-۴- ضرورت ساخت لوله‌های کامپوزیتی در کشور

خودروی دنا وزن خیلی زیادی دارد و وزن آن بدون سرنشین ۱۲۸۵ کیلوگرم می‌باشد. این مسئله به‌صورت یک بحران برای این خودرو تبدیل شده است. حتی خودروسازان ایران خودرو می‌خواهند که پیچ‌های رینگ لاستیک، توخالی شوند که ممکن است یک کیلوگرم از وزن خودرو کم شود. به‌هرحال کاهش وزن حتی به اندازه چند کیلو برای این ماشین اهمیت زیادی دارد؛ به همین دلیل سازندگان این خودرو به کامپوزیت سازان هم پیشنهاد داده‌اند که هر قطعه‌ای را که بتوان به‌صورت کامپوزیتی تولید کرد، آن‌ها مایل به تغییر آن هستند. ازجمله این قطعات پروفیل داخل رکاب خودرو است که به‌صورت محوری در داخل رکاب قرار می‌گیرد که باید تحمل وزن انسان را داشته باشد. این لوله در قسمت داخلی پروفیل داخل رکاب قرار می‌گیرد و جزو بدنه خودرو محسوب می‌شود. در حال حاضر این قطعه از نوعی فولاد ساخته می‌شود که وزن زیادی دارد. اگر این لوله از آلومینیوم و کامپوزیت ساخته شود، به علت کم بودن دانسیته آلومینیوم، وزن آن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد چون دانسیته به حدود  $2/7 \text{ g/Cm}^3$  می‌رسد و همین‌طور استحکام خمشی هم بالاتر می‌رود ولی قیمت تمام‌شده کامپوزیت (کربن/اپوکسی یا شیشه/اپوکسی) بالاتر است. حال برای آنکه ما بهینه‌سازی بین قیمت و استحکام داشته باشیم از یک لوله جداره نازک آلومینیومی استفاده می‌کنیم و سپس روی آن الیاف کامپوزیتی می‌پیچیم. قسمت کامپوزیتی مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد و قسمت آلومینیومی رفتار پلاستیک سازه را بر عهده می‌گیرد. زیرا همان‌طور که می‌دانید کامپوزیت‌های الیافی ناحیه پلاستیک بسیار کوچکی دارند و رفتار آن‌ها به‌صورت الاستیک تا مرز شکست مدل‌سازی می‌شود. با ترکیب آلومینیوم و کامپوزیت، هم قیمت کاهش می‌یابد (نسبت به نمونه تمام کامپوزیتی) و هم استحکام بالا می‌رود (نسبت به نمونه تمام آلومینیومی). بدین ترتیب در این پروژه

قصد ما بر این است که روی مقاومت به ضربه کار نشود، بلکه فقط استحکام خمشی، خستگی و فشاری مهم است. چون باری که دائم روی آن وارد می‌شود، بار خمشی است نه ضربه‌ای. البته مقاومت به ضربه در تصادفات اهمیت دارد ولی به دلیل اینکه این آزمون در اختیار معدودی از مراکز قرار دارد که دسترسی به آن خیلی سخت است و همین‌طور نیاز به فیکسچر و تمهیدات زیادی دارد که از عهده پروژه کارشناسی ارشد خارج است، لذا از آن در پروپوزال صرف نظر می‌نماییم. فقط در صورت فراهم بود امکانات این تست را انجام خواهیم داد.

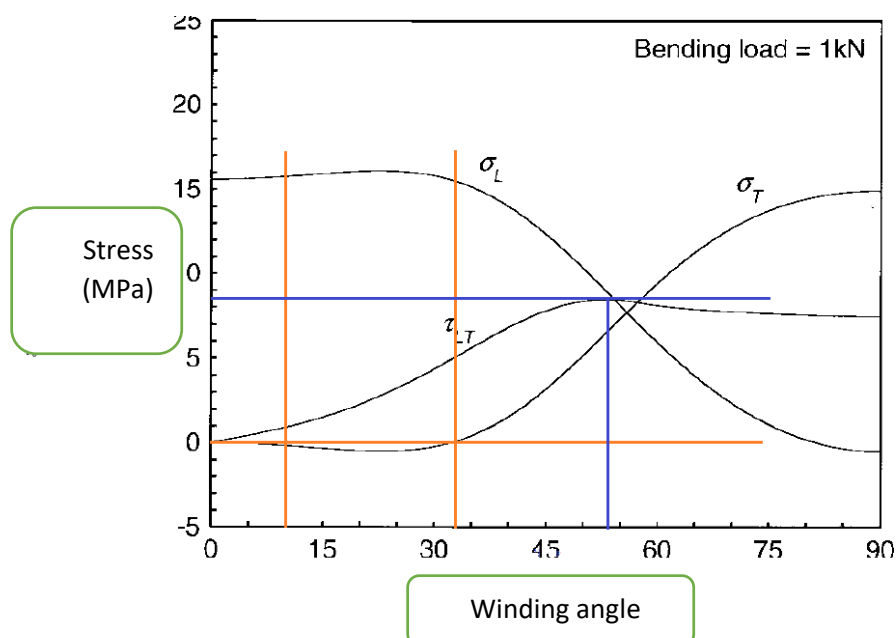


شکل ۱-۱- ساختار لوله کامپوزیتی [2]

#### ۱-۵- تأثیر زاویه پیچش بر روی استحکام خمشی

تحقیقات انجام گرفته درباره تأثیر زاویه پیچش بر روی استحکام خمشی لوله های کامپوزیتی توسط ناتسوکی انجام شد [2]. در نمودار شکل ۱-۲ تنش بر حسب زاویه پیچش، تنش در راستای الیاف و عمود بر الیاف، مشاهده می شود.  $\sigma_L$  تنش در راستای الیاف می‌باشد. چون الیاف باید مقاومت بسیار بالایی داشته باشند، بنابراین ماکسیمم تنش، باید در راستای الیاف اعمال شود. از طرف دیگر تنش عمود بر الیاف  $\sigma_T$ ،

وقتی در حالت کششی قرار می گیرد، اتفاق ناخوشایندی رخ می دهد. تنش عمود بر الیاف را، زمینه باید تحمل کند و همان طور که می دانیم زمینه مقاومت چندانی در برابر بارگذاری کششی ندارد اما در برابر بارگذاری فشاری، مقاومت خوبی از خود نشان می دهد. پس در نتیجه، زاویه پیچش کمتر از ۳۳ درجه باید باشد که در نمودار مشاهده می شود. بنابراین تنش، تنش فشاری است. پس ترجیح داده می شود که زاویه الیاف پیچیده شده کمتر از ۳۳ درجه انتخاب شود. از طرفی چون محدودیت دستگاهی داریم، زاویه پیچش باید بالاتر از ۱۰ درجه باشد [2].



شکل ۱-۲- منحنی تنش بر حسب زاویه پیچش [2]

در زوایای کمتر از ۱۰ درجه، هیچ دستگاه رشته پیچ معمولی، پیچش رشته ها را انجام نمی دهد. همان طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می شود، اگر زاویه پیچش بیشتر از ۳۳ درجه باشد به دلیل اینکه تنش کششی  $\sigma_T$  در جهت عمود بر الیاف با شیب تند، زیاد می شود برای ما مطلوب نیست و همچنین تنش برشی ( $\tau_{LT}$ ) وجود دارد. لذا تلاش می کنیم که بالاتر از محدودیت دستگاه انتخاب کنیم و هرچه که زاویه به صفر نزدیک تر شود، مقاومت برشی کمتر شده و برای ما بهتر خواهد بود [2].

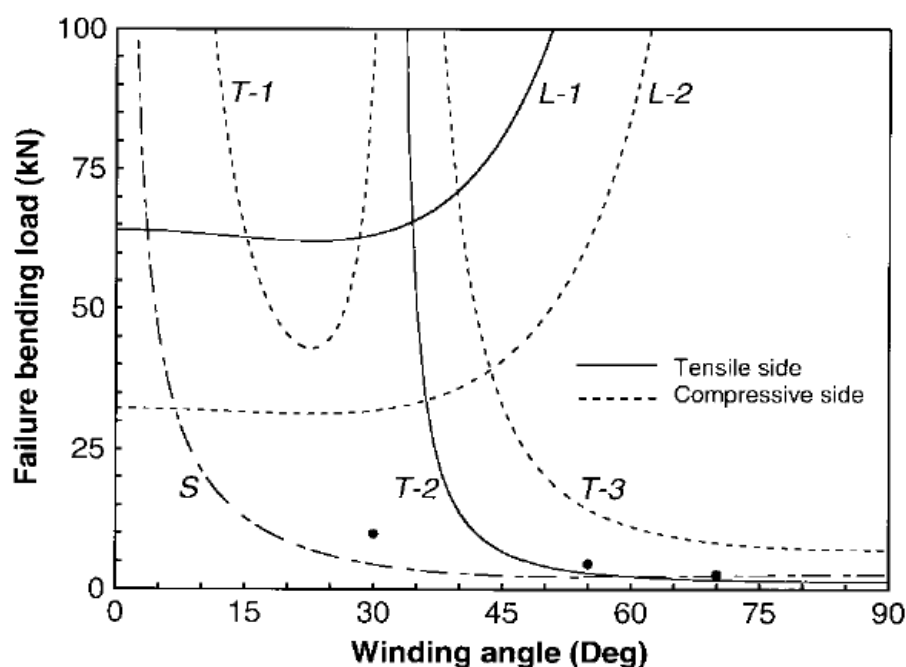
جدول ۱-۱- خواص مکانیکی مواد [2]

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| $E_L$ مدول طولی الیاف (GPa)            | ۳/۹۴ |
| $E_T$ مدول عرضی الیاف (GPa)            | ۸/۲۶ |
| $G_{LT}$ مدول برشی الیاف (GPa)         | ۵/۴۷ |
| ضریب پواسن                             | ۰/۳۱ |
| $F_L$ نیرو کششی (MPa) در راستای        | ۱۰۰۰ |
| $F_T$ الیاف                            | ۲۱/۴ |
| نیروی کششی (MPa) عمود بر الیاف         |      |
| $P_L$ نیرو فشاری (MPa) در راستای الیاف | ۵۰۴  |
| $P_T$ نیروی فشاری (MPa) عمود بر الیاف  | ۱۰۵  |
| $F_{LT}$ نیرو برشی (MPa)               | ۱۹/۲ |

در جدول ۱-۱ مقدار مدول الاستیسیته طولی، عرضی، مدول برشی، ضریب پواسن، مقدار نیروی کششی، فشاری عرضی و طولی و همچنین نیروی برشی کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی، نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۱-۱ مشاهده می‌شود، نیروی کششی در راستای الیاف برابر با ۱۰۰۰ MPa است و نیروی کششی در جهت عمود بر الیاف ۲۱/۴ MPa است. در نتیجه نیروی کششی در راستای الیاف، ۵۰ برابر بیشتر از راستای عمود بر الیاف است. اگر نیروی کششی در راستای الیاف اعمال شود، در برابر بارگذاری

ها مقاومت بیشتری خواهد داشت. نیروی فشاری در راستای الیاف  $50.4 \text{ MPa}$  و نیروی فشاری در جهت عمود بر الیاف  $10.5 \text{ MPa}$  است در نتیجه نیروی فشاری در راستای الیاف ۴ برابر بیشتر از نیروی فشاری در جهت عمود بر الیاف است؛ به همین دلیل اگر بخواهیم در راستای عمود بر الیاف مقاومتی داشته باشیم باید فشاری باشد. چون فشار در جهت عمود بر الیاف  $10.5 \text{ MPa}$  و کشش در جهت عمود بر الیاف  $21/4 \text{ MPa}$  است یعنی ۵ برابر بیشتر است [2].



شکل ۳-۱- منحنی شکست بر اثر بارگذاری خمشی بر حسب زاویه پیچش [2]

در شکل ۳-۱ مرزهای شکست، برای زوایای مختلف، مشخص شده است. اگر از مرز شکست رد شود، وارد منطقه شکست می‌شود. مثلاً نقاطی که در نمودار دیده می‌شود، نمونه‌های مختلف آزمایش شده می‌باشد. نمودار S تنش برشی است و T-1 فشار عمود بر الیاف است. اگر زاویه کمتر از  $12^\circ$  درجه یا بیشتر از  $33^\circ$  درجه باشد، مد شکستی که در اثر فشار در راستای عمود بر الیاف بشکند، نخواهیم داشت. لذا مد شکست به شکل دیگری خواهد بود، ممکن است مد شکست در ناحیه L-2 اتفاق بیافتد. L-2 تنش فشاری در راستای

الیاف است و به خاطر فشاری که در راستای الیاف وارد می شود، می شکند. اگر زاویه پیچش کمتر از ۱۵ درجه باشد، بارگذاری به سمت بالا می رود و به صورت برشی می شکند. اگر زاویه پیچش کمتر و با برش تقویت شده باشد به ناحیه L-2 می رسد؛ یعنی در قسمت فشار و در سمت بالای قطعه شکست اتفاق می افتد و اگر در ناحیه L-2 شکست اتفاق نیافتد حتما در ناحیه L-1 می شکند. اگر در اثر کشش بشکند، (لوله در اثر خمش در قسمت پایین به صورت کشش و در قسمت بالا به صورت فشاری است.) در اثر کشش که در پایین قطعه است L-1 و در قسمت بالا که به صورت فشاری است L-2 می باشد؛ اگر در اثر S بشکند به صورت برشی است یعنی شکستی که در وسط رخ می دهد ممکن است در اثر برش باشد. پس براساس این موضوع می توان به این نتیجه رسید که طبق نمودار ۱-۲ در تک لایه های کمتر از ۱۵ درجه بپیچیم. کاری که باید انجام دهیم این است که باید با مینیمم زاویه پیچش پیچانده شود چون هرچه به صفر نزدیک تر شویم برایمان بهتر است [2].

#### ۱-۶- مکانیزم شکست لوله های کامپوزیت در اثر بارگذاری خمشی

لوله ها وقتی که در معرض بارگذاری خمشی قرار می گیرند، ترک در لایه خارجی آن ها آغاز می شود. در اثر افزایش بارگذاری، تنش در حالت بحرانی قرار می گیرد و در نتیجه ترک ناپایدار می شود. ترک بحرانی با گسیختگی الیاف و زمینه مرتبط است و در هنگام بحرانی شدن ترک، الیاف ترک می خورند لذا لایه خارجی، شکسته شده و الیاف از زمینه خارج می شوند [3].

#### ۱-۷- مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری

استارباک و همکاران [4] رفتار شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری را بررسی کردند. در اثر بارگذاری فشاری، شکست نمونه های کامپوزیتی به دو صورت پایدار و ناپایدار می باشند.

حالت ناپایدار: در اثر بارگذاری، نیرو به بیشترین مقدار رسیده و بعد از آن دیگر نمونه کامپوزیتی نمی تواند باری را تحمل کند.

حالت پایدار: در اثر بارگذاری، وقتی نیرو افزایش می یابد، شکست اولیه و کمانش موضعی در نمونه ایجاد می شود و سپس نمونه قادر است بار بیشتری را تحمل کند و جابجایی، در اثر نیروی بیشتر صورت می گیرد[4].

انواع شکست در اثر بارگذاری فشاری بر نمونه های کامپوزیتی :

۱-خمش لمینا / بازشدن الیاف<sup>۱۰</sup>

۲-تکه تکه شدن/ برش عرضی الیاف<sup>۱۱</sup>

۳-شکست ترد<sup>۱۲</sup>

۴-کمانش موضعی / خمیده شدن نمونه<sup>۱۳</sup>

۱-۷-۱-خمش لمینا یا بازشدن الیاف

الیاف مقطع ضخامت لوله، در اثر بارگذاری شکست به صورت خمش یا باز شدن در می آیند. در اثر ترک در جهت الیاف و بین لمینیت ها جدایشی به وجود می آید که اصطلاحاً به آن برگ ساقه ای<sup>۱۴</sup> می گویند. این برگ ساقه ها در جهت داخل و بیرون ضخامت لوله خم می شوند و بستگی به نحوه بارگذاری، الیاف، زمینه و خواص الیاف دارای شعاع انحنای متفاوتی می باشند. در اثر بارگذاری، شکافی در مرکز ضخامت

---

<sup>10</sup> Lamina Bending/Fiber SplayingCrushing Mode

<sup>11</sup>Fragmentation/transverse shearing Crushing Mode

<sup>12</sup> Brittle Fracture Crushing Mode

<sup>13</sup>Folding/local buckling/accordion/concertina Crushing Mode

<sup>14</sup> Fronds

الیاف ایجاد شده، الیاف به صورت برگ ساقه باز شده و به سمت داخل و خارج لوله شروع به رشد می کند [4].

### نقش نیروها در منطقه شکست در حالت باز شدن الیاف

۱- نیروهای اعمالی فشاری بر روی ساقه برگ شدن و خرد شدن الیاف داخل درز

۲- سایش بین ساقه برگ شدن و خرد شدن الیاف داخل درز

۳- سایش بین لمیناهای کنارهم ساقه برگ [4]

### ۱-۷-۲- تکه تکه شدن یا برش عرضی الیاف

دو مکانیزم برای این حالت شکست وجود دارد: ۱- رشد ترک بین لمینا ۲- شکست دسته ای از الیاف ترک های ریزی در راستا و عمود بر الیاف و زمینه ایجاد می شوند. در اثر تنش های فشاری اعمالی و شکست نمونه، تنش های برشی در راستای لوله ایجاد شده و باعث تکه تکه شدن، تورق و پارگی بین لایه ها می شود [4].

### ۱-۷-۳- شکست ترد

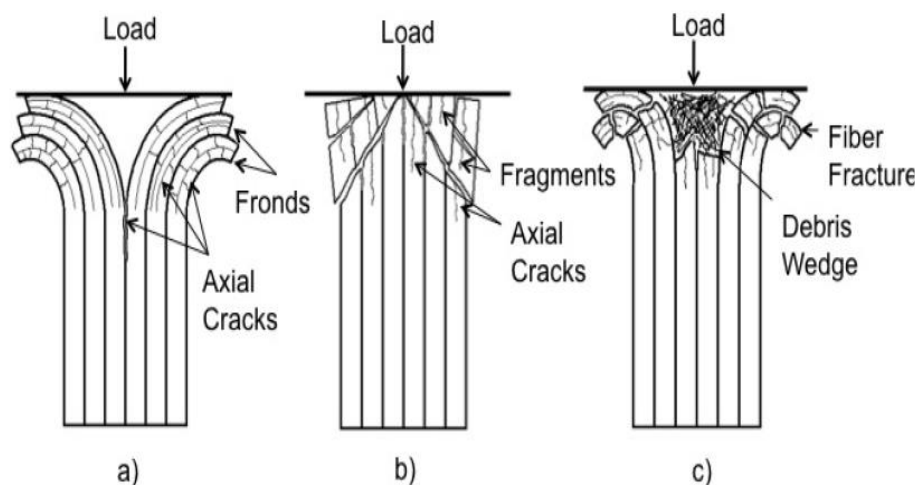
شکست ترد ترکیبی از تکه تکه شدن و باز شدن الیاف است. در مرکز نمونه، ترک طولی برگ ساقه ها را از هم جدا می کند. در اثر تنش های فشاری درز بین برگ ساقه ها زیاد شده و مواد الیافی خرد شده به صورت پودر در این درز زیاد می شوند [4].

### ۱-۷-۴- کمانش موضعی یا خمیده شدن

مکانیزم این حالت به صورت حد تسلیم پلاستیکی الیاف یا زمینه می باشد و برای مواد کامپوزیتی که ترد نیستند، این حالت شکست اتفاق می افتد. این نوع شکست برای مواد ترد به ندرت اتفاق می افتد یا در حالتی



اتفاق می افتد که ماده زمینه حد تسلیم داشته باشد. برای بعضی از کامپوزیت‌های هیبریدی این حالت از شکست مشاهده می‌شود [4].



شکل ۱-۴- مکانیزم های شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری  
 (a) خمش لمینا یا باز شدن الیاف (b) تکه تکه شدن یا برش عرضی الیاف (c) شکست ترد [4]

#### ۱-۸- مکانیزم شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری خستگی خمشی

خالد و همکاران [5] روی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت تحت اعمال بارگذاری خستگی خمشی تحقیق کردند، و به این نتیجه رسیدند که لوله‌های کامپوزیتی در اثر افزایش ضخامت، استحکام به وزن و مقاومت به خستگی بالاتری دارند. در اثر تکرار بار اعمالی، رشد ترک و شکست اتفاق افتاده و همچنین استحکام پسماند به وجود می‌آید. استحکام خستگی نسبت به استحکام استاتیکی کمتر است و به همین دلیل تنزل خواص در اثر بارگذاری سیکلی بیشتر می‌شود.

رفتار خستگی کامپوزیت‌ها، نسبت به سایر مواد متفاوت است. میکرو ترک، در مواد کامپوزیتی در مرحله اولیه بارگذاری شکل می‌گیرد. تنش‌ها در جهت الیاف و عمود بر صفحه ضعیف شده و شکست در فصل مشترک زمینه و تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. انتقال بار بین الیاف لمینا و لمیناهای مجاور از طریق تنش برشی غیریکنواخت شکل می‌گیرد و در نتیجه تمرکز تنش، باعث شکست لمینیت می‌شود [5].

در اثر بارگذاری خستگی، مکانیزم شکستی که اتفاق می‌افتد به این صورت است: ابتدا زمینه ترک برداشته و در منطقه پوسته خارجی ترک شروع می‌شود. ترک‌ها در راستای جهت بارگذاری ایجاد می‌شوند.

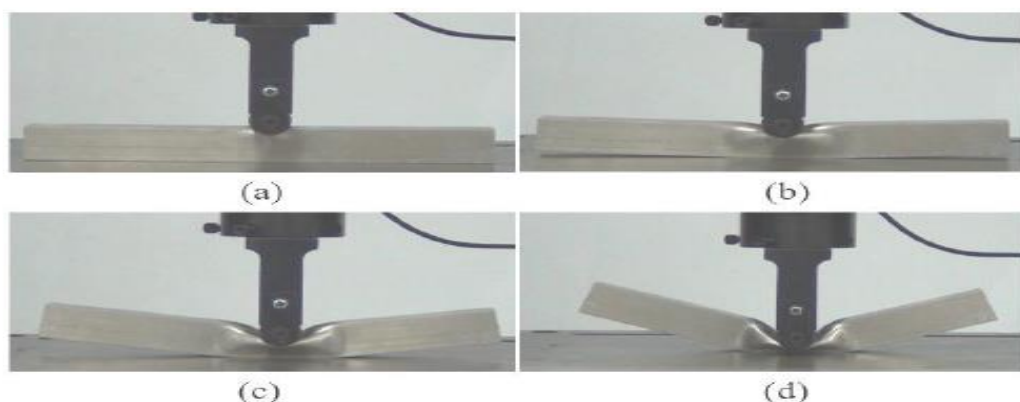
با افزایش تعداد سیکل‌ها، دومین مکانیزم شکست به صورت دو مکانیزم اتفاق می‌افتد: ۱- ترک از فصل مشترک الیاف با زمینه عبور می‌کند ۲- تورق بین لایه‌های کامپوزیت و سطح آلومینیوم و اولین لایه کامپوزیت ایجاد می‌شود. بعد از به وجود آمدن تورق، نمونه هنوز بار را تحمل می‌کند و تمام بارها توسط لوله آلومینیومی تحمل می‌شود و با افزایش تعداد سیکل‌ها، ترک در آلومینیوم شروع شده و در نهایت لوله می‌شکند [5].

## ۹-۱- مروری بر منابع

هوانگ [1] روی لوله‌های جداره نازک آلومینیومی با مقطع مستطیلی در معرض بارگذاری خمشی آزمایش‌هایی انجام داد. در این تحقیق اثر اعمال فرورونده استوانه ای<sup>۱۵</sup> روی مقاومت خمشی این لوله‌ها بررسی شد. در اثر تغییر شکل پلاستیک که برابر با میزان جذب انرژی است، هوانگ به صورت عددی و تئوری آزمایش‌هایی انجام داد و مدلی را آنالیز کرد. در نهایت، با استفاده از آنالیزهای تئوری مدلی به عنوان نیرو بر حسب فاصله شکست پیشنهاد داد و مقایسه‌هایی بین پیش‌بینی‌های تئوری و نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی انجام داد [1].

---

<sup>15</sup>Indentor



شکل ۱-۵- آزمایش خمش لوله آلومینیوم با مقطع مربع [1]

ناتسوکی و همکارانش [2] روی استحکام خمشی لوله‌های کامپوزیتی تحقیق کردند که این لوله‌ها را از پلیمر ترموست با الیاف تقویت شده به روش رشته پیچی ساخته بودند و به این نتیجه رسیدند که این لوله‌ها نسبت به لوله‌های فلزی مزایای زیادی دارند؛ این لوله‌ها دارای عایق حرارتی مناسب، استحکام و مقاومت به خوردگی بالا می‌باشند. از طرفی سایر محققان، روی تأثیر ضریب پواسون<sup>۱۶</sup> تنش داخلی لوله‌های چندلایه تحت خمش کار کرده بودند و توسط کاری که ناتسوکی و همکارانش انجام داده بودند، رفتار خمشی لوله‌های کامپوزیتی رشته پیچی را با استفاده از تئوری صفحه لمینیت پیش‌بینی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که زاویه پیچش روی تنش برشی و محوری تأثیر دارد. همچنین بر روی رفتار و مد شکست این لوله‌ها، تأثیر به سزایی دارد و لوله‌ها در زوایای  $\pm 30^\circ$  درجه، مقاومت زیادی در برابر شکست برشی از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که در زوایای  $\pm 55^\circ$  و  $\pm 70^\circ$  بیشترین مقاومت در برابر شکست عرضی را از خود نشان می‌دهند [2].

خواص لوله‌های کامپوزیتی فایبرگلاس/رزین اپوکسی تولیدشده به روش رشته پیچی تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای توسط استفانوسکا و همکارانش [3] مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از آنالیزهای SEM مشاهده شد که اتصال بین زمینه رزین اپوکسی با فایبرگلاس به خوبی صورت گرفته است. نتایج به

<sup>16</sup> Poisson's Ratio

دست آمده تطابق مناسبی با نتایج تئوری داشت. بیشترین استحکام خمشی با لایه گذاری روی هم و به ترتیب در زوایای پیچش [90/102/90/102/90/304/60] مشاهده شد (اعداد زیروند نشان دهنده ی تعداد لایه ها بوده و زوایای بدون زیروند نشان دهنده ی یک لایه هستند). در تمامی نمونه‌ها، ترک زمینه و شکست الیاف در حین انجام آزمایش مشاهده شد. این ترک ها نشان داد که با کوچک‌ترین زوایای پیچش، تنش خمشی افزایش می‌یابد [3].

استارباک و همکارانش [4] روی مکانیزم شکست لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار مطالعه کردند. تأثیرات نرخ بارگذاری، سرعت ضربه و طراحی لمینیت مورد بررسی قرار گرفت. پس از بارگذاری در راستای الیاف مشاهده شد لوله‌های کامپوزیتی در اثر اعمال بارگذاری فشاری، وابسته به شکل هندسی مقطع، ترکیبات ساختاری و مهندسی لمینیت، مکانیزم شکست و میزان جذب انرژی متفاوتی، از خود نشان می‌دهند. سه نوع لایه گذاری با طراحی های مختلف اعمال گردید و حالت‌های شکست متفاوتی مشاهده شد. نرخ بارگذاری با سرعت ثابت از 100 mm/s تا سرعت متحرک 6000 mm/s اعمال گردید و مشاهده شد: مکانیزم شکست آن‌ها متفاوت است و مقطع شکست دایره‌ای نسبت به مقاطع هندسی، بیشتر تغییر شکل یافته است. از طرفی مقطع دایره‌ای، جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر مقاطع هندسی از خود نشان داد و مقدار جذب انرژی حین مکانیزم شکست، تغییر شکل پیدا کرده بود. همچنین جهت‌گیری الیاف و شکل هندسی مقطع شکست در مکانیزم شکست تأثیرگذار بودند [4].

خالد و همکاران [5] روی خواص خستگی خمشی لوله‌های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت مورد استفاده در شفت خودرو مطالعه و تحقیق کردند. با استفاده از روش رشته پیچی، لوله‌های شفت هیبریدی را از جنس رزین اپوکسی/ فایبرگلاس و هاردنر به‌عنوان لایه خارجی لوله هیبریدی کامپوزیت ساختند. آن‌ها 4 نوع لوله آلومینیوم با لایه‌های مختلف مواد کامپوزیتی با زوایای جهت‌گیری مختلف الیاف را تولید کرده و حالت شکست شفت‌های هیبریدی را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از میکروسکوپ، ترک اولیه الیاف

در اثر آزمایش خستگی خمشی را مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد سیکل، نمونه سریع تر می شکند و با افزایش تعداد لایه ها استحکام خستگی لوله آلومینیوم با جهت گیری زاویه  $\pm 45^\circ$  درجه افزایش می یابد [5].

تاراکیگلو و همکاران [6] لوله های کامپوزیتی از جنس اپوکسی/E-glass را با استفاده از روش رشته پیچی با ۴ لایه با زوایای پیچش  $\pm 55^\circ$  درجه تولید کردند و مقاومت خستگی این لوله ها را تحت فشار داخلی مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. آزمون خستگی بر اساس استاندارد ASTM D-2992 با فرکانس ۰/۴۲ Hz و نسبت تنش  $R = 0/05$  و با بارگذاری ۳۰ تا ۷۰ درصد استحکام خمشی انجام شد و شکست نهایی سطوح لوله های فایبرگلاس مشاهده شد. در آخر، تمامی مراحل ماکرو و میکرو شکست این لوله ها، شامل تورق و عبور ترک از فصل مشترک زمینه و تقویت کننده، شروع شکست و شکست نهایی بررسی و مقایسه شدند. برای هر مرحله شکست، نمودار S-N رسم گردید و مشاهده شد، نسبت تنش اعمالی در نمودار شکست، تغییر پیدا کرد [6].

اسپنسر و هول [7] لوله های کامپوزیتی اپوکسی/ شیشه را با استفاده از روش رشته پیچی با دو نوع آزمایش فشار داخلی بررسی کردند. خواص الاستیکی این لوله ها، با استفاده از کرنش سنج و شکست در اثر بارگذاری تعیین شد. آن ها مدلی برای تنش کششی عرضی  $\sigma_t$  و تنش های برشی موازی در جهت الیاف  $\tau$  پیش بینی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میزان تغییر شکل و مکانیزم های شکست وابسته به زاویه پیچش هستند. محدوده تنش ها بین ۲۰-۳۵ MPa و کرنش الیاف، ۰/۲٪ به دست آمد [7].

شین و همکاران [8] بر روی توانایی جذب انرژی بارگذاری فشاری محوری و خمش لوله های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت (الیاف شیشه) تحقیق کردند. کامپوزیت اپوکسی با الیاف شیشه به شکل پری پرگ<sup>۱۷</sup>

---

<sup>17</sup>Prepreg

بر روی لوله های آلومینیوم پیچانده شد و در اتوکلاو در سیکل دمایی، به طور کامل پخت صورت گرفت. در طی فرآیند پخت این لوله ها، اتصال بین کامپوزیت و لوله آلومینیوم به خوبی انجام گرفت و رزین اضافی از آن گرفته شد. برای مقایسه توانایی جذب انرژی لوله های هیبریدی، با لوله های آلومینیوم و کامپوزیت، آزمایش هایی انجام شد. مکانیزم های شکست لوله های هیبریدی تحت بارگذاری فشاری محوری و خمشی مشاهده شد و مدل لولایی شدن و مدل بهبود یافته کزمن<sup>۱۸</sup> برای این لوله پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که در مورد آزمون فشاری، بیشترین جذب انرژی این لوله های هیبریدی برای الیاف، با جهت گیری ۹۰ درجه است؛ به دلیل اینکه لوله آلومینیوم داخل ماده کامپوزیتی باعث جلوگیری از رشد ترک و شکست ناگهانی می شود. در آزمون خمشی لوله های هیبریدی با جهت گیری ۹۰ درجه الیاف کامپوزیتی، استحکام خمشی افزایش یافته و همچنین مشاهده می شود که جذب انرژی این لوله ها نسبت به لوله های آلومینیوم و کامپوزیتی کمی بیشتر است [8].

شین و همکاران [9] رفتار شکست لوله هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی سه نقطه ای را به وسیله آنالیزهای المان محدود بررسی کردند. لوله آلومینیوم با مقطع مربع با ۴ لایه الیاف کربن تک جهت پیچانده شد. مکانیک شکست این لوله مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان دهنده رفتار غیرخطی در منطقه الاستیک و پلاستیک لوله کامپوزیتی بود. معیار شکست هاشین<sup>۱۹</sup> و شکست بر مبنای جذب انرژی بررسی شد. برای آنالیزهای عددی، خواص ماده آلومینیوم، ویژگی های شکست لمینیت الیاف کربن و اتصال بین آلومینیوم و الیاف کربن اندازه گیری شد. به وسیله المان محدود، تمرکز تنش در لبه ها تحت بارگذاری نشان داده شد. چینش لایه گذاری روی عملکرد لمینیت تأثیرگذار است. در اثر بارگذاری اولیه، شکست الیاف کربن و تورق در مناطق کمی اتفاق افتاد. آلومینیوم در منطقه پلاستیک به صورت شبکه ای درآمد و با

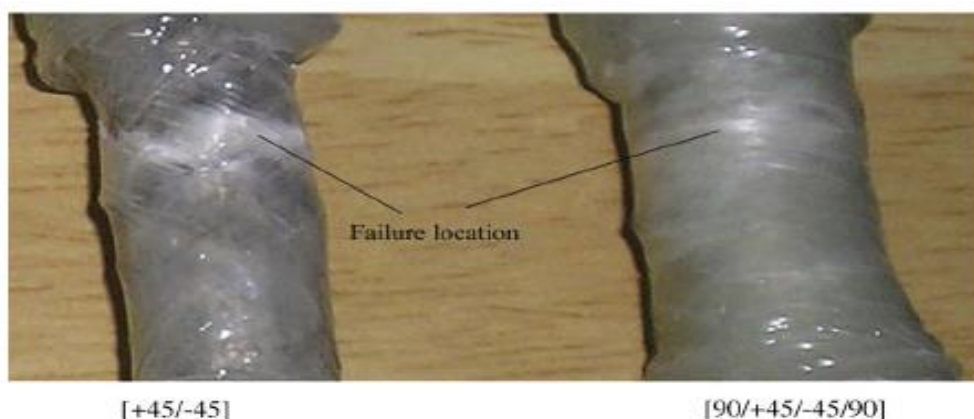
---

<sup>18</sup> Kezman Improved Model

<sup>19</sup> hashin failure criteria

افزایش بارگذاری، خمش لوله به صورت کامل اتفاق افتاد. عملکرد لوله هیبریدی به وسیله نمودارهای نیرو-جابجایی البته با در نظر گرفتن چینش لمینیت نشان داده شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید [9].

لیو [10] رفتار خمشی لوله‌های جداره نازک با مقطع دایره را بررسی کرد و تئوری معادله انرژی را با رابطه بین گشتاور و زاویه خمشی لوله‌های با مقطع دایره به دست آورد. در حالت خمش فرض کرد که تمام انرژی ضربه جذب و لولایی شدن به طور یکنواخت اتفاق می افتد. بعد از به دست آوردن رابطه، آن را با تئوری مقاومت خمشی ساختار لوله‌ای مقایسه کرد که با مطالعه و تحلیل و آزمایش، مقاومت خمشی را به مدل‌های لوله با مقطع دایره اعمال کرد البته با مواد و مقاطع مختلف توانست مقاومت خمشی خاص خود را به دست آورد. مقایسه نتایج آنالیز شکست این لوله‌ها با مدل مطرح شده نشان داد که می توان دقت مقاومت خمشی را به دست آورد [10].



شکل ۱-۶- تصویر لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیتی تحت آزمایش خستگی خمش-دوران [10]

لوله‌های با مقطع مستطیل و مربع به طور گسترده‌ای در اتوبوس‌ها، واگن‌ها، وسایل نقلیه خاص و ساختارهای حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لوله در اثر بارگذاری خمشی، با زاویه دوران بیش از ۳۰ درجه به صورت لولا در می‌آید؛ بنابراین مطالعه روی رفتار و طراحی لوله‌ها، همچنین تجزیه و تحلیل ساختارهای حفاظتی، انجام گرفت. کزمن [11] روی افت خمشی لوله‌های با سطح مقطع مربع و مستطیل

مطالعه کرد. با استفاده از روش های شبیه سازی، گشتاورهای مختلف لولایی شدن و افت خمشی ساختارها را به صورت کامل، تجزیه و تحلیل نمود. با این حال، بیشتر بر روی داده های آزمایشگاهی تمرکز کرد. در نهایت، خواص لولایی شدن لوله، پیش بینی و نتایج آن، بررسی گردید [11].

کاینک و مت [12] روی رفتار خستگی لوله های کامپوزیتی رشته پیچی شده مورد استفاده در مخازن تحت فشار و پرتاب کننده های راکت بررسی و تحقیق کردند. مکانیزم شکست ماکروسکوپی و میکروسکوپی این لوله ها تحت بارگذاری سیکلی محوری مشاهده و بررسی گردید. این لوله ها از جنس اپوکسی/ فایبرگلاس و با زاویه پیچش  $\pm 55^\circ$  درجه تولید و مقادیر تنش خستگی این لوله ها، برابر با ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد استحکام کششی تعیین گردید. این لوله ها با سه فرکانس ۱، ۱۰، ۱۰۰ Hz، با نسبت تنش  $R = 0.1$  بارگذاری شده و نتایج به دست آمده نشان داد شکست خستگی در سه مرحله اتفاق می افتد؛ همچنین تأثیر مقادیر تنش و فرکانس بررسی و در نمودار  $S-N$  ترسیم شد. در این مراحل مشاهده شد که ترک از زمینه آغاز شده، سپس رشد کرده و در راستای الیاف امتداد می یابد. در ادامه، تحت اعمال بارگذاری بیشتر، الیاف شکسته و لوله منهدم شد و همچنین مشاهده شد با افزایش مقادیر تنش، عمر خستگی لوله ها کاهش پیدا می کند [12].

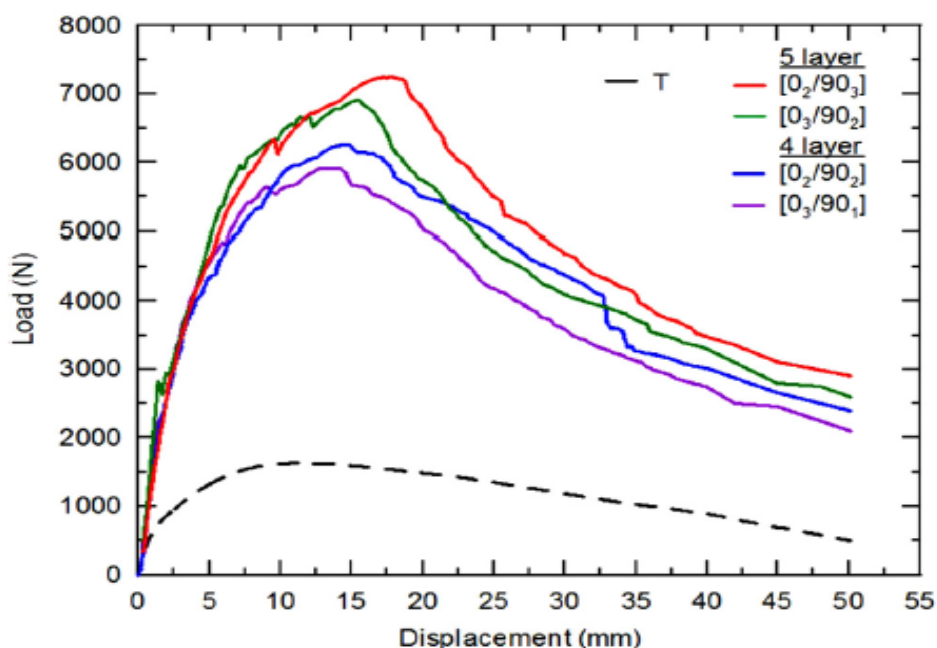
جانگ و همکارانش [13] روی خواص خمشی و توانایی جذب انرژی لوله های هیبریدی آلومینیوم- فایبرگلاس و تأثیرات لایه نازک فایبرگلاس بر روی رفتار شکست خمشی و مکانیزم های شکست مطالعه و تحقیق کردند. لوله های هیبریدی (لایه های پری پرگ و آلومینیوم) با اتصال چسب و با زوایای مختلف لایه گذاری ساختند. این لوله ها تحت خمش سه نقطه قرار گرفت و نتایج به دست آمده با لوله آلومینیوم و کامپوزیت مقایسه گردید. نتیجه ای که گرفتند این بود که ضخامت لایه گذاری، ۰/۵ mm و لایه گذاری با زوایای  $90^\circ$ ، باعث می شود که خواص خمشی ۶۷٪ و جذب انرژی ۲۹٪ بهبود یابد و با این ضخامت لایه گذاری کامپوزیت، سبب عملکرد بهتر لوله های هیبریدی می شود [13].





شکل ۱-۷- تصویر بررسی شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت [13]

با توسعه صنعت خودرو، اکسی و جنل [14] از لوله‌های آلومینیوم، به علت پایین بودن وزن در ساختارهای حفاظتی خودرو استفاده کردند. رفتار شکست این لوله‌ها تحت خمش با روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. قبل از این، سایر محققان روی لولایی شدن ممان-دوران لوله‌های با مقطع مربع و مقطع دایره‌ای از جنس فولاد و کامپوزیت ساندویچی با ابعاد مختلف مطالعه کرده بودند. با در نظر گرفتن کارهای محققان قبلی، اکسی و جنل توانستند لوله‌های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت به روش لایه گذاری دستی بسازند و آن‌ها را تحت خمش قرار دهند. اکسی روی ۱۲ لوله و ۳ میل به ساختارها و اجزای مختلف، آزمایش خمش انجام داد و آن‌ها را بررسی کرد. ۵ لوله با تقویت‌کننده داخلی درون لوله آلومینیوم و ۱۰ لوله با تقویت‌کننده خارجی، خارج لوله آلومینیوم و با قطرهای لایه گذاری مختلف ساخته شد و خواص خمشی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از آنالیز تئوری معادله خمش، برای لایه گذاری دستی، میزان افت خمش برای هر لوله محاسبه شد و منحنی نیرو برحسب جابجایی رسم گردید و مشاهده شد اعمال تقویت‌کننده‌های داخلی و خارجی بر روی خواص خمشی تأثیر گذار بوده و لوله‌های هیبریدی با تقویت‌کننده‌های خارجی، پس از افزایش تعداد لایه‌ها و تغییر جهت‌گیری، میزان بار بیشتری را تحمل می‌کنند. لوله‌های هیبریدی با تقویت‌کننده‌های داخلی پس از افزایش ضخامت، میزان بار بیشتری را تحمل کردند در حالی که جابجایی شکست آن‌ها کاهش یافته بود. بیشترین بارگذاری خمشی برای این لوله‌ها ۵/۹ kN گزارش شد [14].



شکل ۸-۱- منحنی لوله‌های کامپوزیتی تحت خمش [14]

کاپلا و همکاران [15] روی خواص لوله‌های کامپوزیتی الیاف کربن با زمینه پلیمری تحت بارگذاری خستگی دو محوره تحقیق کردند. رفتار خستگی لوله‌های کامپوزیتی الیاف کربن تحت بارگذاری دینامیکی دو محوره خمش/پیچش را بررسی و مطالعه کردند. تأثیرات تنش پیچشی و تنش متوسط روی استحکام خستگی و مکانیزم های شکست مورد آنالیز قرار گرفت و در نتیجه دریافتند، با افزایش نسبت تنش‌های خمش/پیچشی، استحکام خستگی کاهش یافته و نمونه سریع‌تر می‌شکند [15].

ژیا و همکاران [16] بر مبنای تئوری صفحه لمینیت، لوله‌های کامپوزیتی رشته پیچی شده چندلایه تحت خمش را مطالعه نمودند. با استفاده از روش آنالیزی میزان تنش-کرنش و جابجایی این لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت. لوله‌های ساندویچی از دو قسمت تشکیل شده اند که شامل: (۱) هسته (۲) پوسته هستند. فوم به عنوان هسته در قسمت مرکزی لوله های ساندویچی در نظر گرفته شد و الیاف کامپوزیتی به عنوان پوسته به دور لوله پیچیده شدند. هنگامی که که سطح خارجی لوله، با مواد ناهمسانگردی پیچانده شد، تنش محوری

در سطح داخلی بیشتر از سطح خارجی مشاهده شد و سطح مقطع این لوله ها پس از بارگذاری خمشی، بدون تغییر باقی ماند [16].

حامد و همکاران [17] لوله‌هایی از کامپوزیت الیاف شیشه<sup>۲۰</sup> با رزین اپوکسی با استفاده از روش رشته پیچی در ۹ زاویه مختلف تولید کردند. سپس آزمون های فشاری، روی این لوله ها انجام گرفت. با استفاده از داده های آزمایشگاهی، تأثیر زوایای پیچش، با قطر ۴۶/۰۵ mm و طول ۳۰۰ mm، تحت سه نوع بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. لوله ها در سه حالت بارگذاری، شامل بارگذاری فشاری حلقه‌ای، بارگذاری فشاری دومحوره و بارگذاری فشاری تک‌محوره و دومحوره باهم، مورد آزمایش قرار گرفتند. میزان تنش-کرنش شکست برای سه زاویه مختلف پیچش، تحت حالت‌های مختلف بارگذاری، به دست آمد. نتایج آزمایش نشان داد زاویه پیچش روی رفتار غیرخطی تنش-کرنش تأثیر گذار است. همچنین استحکام در هر کدام از این سه حالت بارگذاری، وابسته به زاویه پیچش است. سپس با آزمایش های انجام گرفته، بهترین زوایای پیچش انتخاب گردید که برای بارگذاری حالت اول، زاویه پیچش ۵۵ درجه، برای بارگذاری حالت دوم، زاویه پیچش ۷۵ درجه و برای بارگذاری حالت سوم، زاویه پیچش ۸۵ درجه انتخاب شد [17].

سگار [18] خواص خمشی لوله‌های کامپوزیتی جداره نازک تحت آزمون خمش سه نقطه را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایشگاهی خود را با تئوری صفحه لمینیت مقایسه کرد و متوجه شد که نتایج به دست آمده با تئوری صفحه لمینیت مطابقت دارد. نتایج به دست آمده نشان داد که شعاع لوله، چینش و جهت‌گیری الیاف، روی استحکام خمشی این لوله ها تأثیر گذار است. همچنین عواملی شامل چینش لایه‌ها در جهت‌گیری های مختلف، باعث شکسته شدن لوله ها می شود. در اثر بارگذاری فشاری، شکست نهایی

---

<sup>20</sup> E-Glass

رخ داده و شکست الیاف و تورق<sup>۲۱</sup> در اثر شکست مشاهده می شود و در نهایت آنالیز شکست لوله ها با استفاده از اشعه X<sup>۲۲</sup> و میکروسکوپ نوری<sup>۲۳</sup> مورد بررسی قرار گرفت [18].

متدیوا و همکاران [19] روی لوله های کامپوزیتی با استفاده از روش رشته پیچی مطالعه کردند. با استفاده از آزمایش های انجام گرفته، سه عامل روی خواص لوله های رشته پیچی شده تأثیرگذار است (۱) جهت گیری الیاف (۲) تنش الیاف (۳) سرعت رشته پیچی. هدف اصلی آن ها، ساخت لوله های کامپوزیتی با وزن پایین بود. بر همین اساس ۸ نوع لوله کامپوزیتی ساخته شد و خواص هر کدام از این لوله ها به دست آمد. متغیرهای در نظر گرفته شده به ترتیب، سرعت رشته پیچی از ۲۱ m/min تا ۵۲۵ m/min، تنش الیاف از ۶۴ N تا ۱۱۰ N و زاویه پیچش از ۱۰ تا ۹۰ درجه انتخاب و بررسی شدند [19].

پوتیچ و همکاران [20] لوله های کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی را مطالعه کردند و میزان فشار داخلی در اثر بارگذاری خمشی، بررسی گردید. در اثر بارگذاری بیش از حد، روی سطح خارجی لوله ها، ترک و شکست اتفاق افتاد. تغییر فرم استحکام خمشی، مدول خمشی الاستیسیته و میزان جابجایی لوله های کامپوزیتی بررسی شد. با در نظر گرفتن مکانیزم ترک در بارگذاری خمشی، نتایج آزمون استحکام نهایی، مورد بررسی قرار گرفت. آنالیزهای میکرو مکانیکی روی سطح ماده انجام گرفت و در نتیجه تأثیر خواص خمشی، روی لوله ها مورد بررسی قرار گرفت. هنگامی که دو لوله کامپوزیتی پلی استر- شیشه با قطر mm ۶۰ و ۷۰ در معرض بارگذاری خمشی سه نقطه قرار گرفتند، نتایجی که از آن حاصل شد عبارت اند از: استحکام خمشی، مدول الاستیسیته و بیشترین میزان جابجایی که مقادیر به دست آمده برای لوله اول به

---

<sup>21</sup> Delamination

<sup>22</sup> X-Ray

<sup>23</sup> Optimal Microscopy

ترتیب  $۱۰۸/۴$  MPa،  $۲/۵$  GPa،  $۸$  mm و برای لوله دوم به ترتیب  $۶۴/۸$  MPa،  $۳$  GPa و  $۴/۷$  mm می‌باشند [20].

ویرزبیک و همکاران [21] روی ساختارهای جداره نازک، تحت بارگذاری خمشی مطالعه کردند. این لوله ها در صنایع خودرو و دریایی کاربردهای زیادی دارند. از این ساختارها در خودروهای سنگین مانند کامیون‌های حمل بار استفاده می‌کردند. این ساختارها، عمدتاً لوله ای شکل بودند و بیشترین جذب انرژی را از خود نشان می‌دادند. نتایج حاصل از آزمایش خمشی نشان داد که این لوله ها دارای استحکام نهایی خمشی و جذب انرژی بالایی هستند [21].

با مطالعه ی کارهای پژوهشگران پیشین، به این نتیجه رسیدیم که لوله های آلومینیوم-کامپوزیت جداره نازک، به روش رشته پیچی ساخته شوند. چون هم استحکام به وزن بالاتری دارند و هم مکانیزم و رفتار شکست مناسب تری از خود نشان می‌دهند.

## فصل دوم: روش انجام آزمایش‌ها

## ۲-۱- مقدمه

در این پروژه روی ساختارها یا لوله‌های حفاظتی مورد استفاده در خودرو، آزمایش و بررسی صورت گرفت. این لوله‌ها از جنس آلومینیوم-کامپوزیت با مقطع دایره جداره نازک می‌باشند. هدف ما رسیدن به لوله‌هایی با وزن پایین و استحکام خمشی و خستگی بالا است. از این رو به طور کلی مواد مورد استفاده در لوله‌ها به شرح زیر می‌باشند:

۱- لوله آلومینیومی سری ۵۰۰۰ با قطر خارجی ۱۸ mm و قطر داخلی ۱۶ mm و ضخامت ۱ mm با طول ۲۰ Cm

۲- رزین اپوکسی<sup>۲۴</sup> به عنوان ماده زمینه

۳- الیاف کربن<sup>۲۵</sup> و الیاف شیشه<sup>۲۶</sup>

۴- پارچه شیشه ریز بافت تک جهت

این لوله‌ها را به روش رشته پیچی می‌سازیم. مراحل ساخت به این صورت است که ابتدا آغشته سازی الیاف کربن و شیشه به رزین، با عبور از حمام رزین انجام می شود سپس با زاویه پیچش ۲۵ درجه به دور لوله آلومینیوم پیچیده شده و پخت این لوله‌ها با ضخامت مورد نظر، توسط هاردنر صورت می‌گیرد و در این قسمت ساخت لوله به اتمام می‌رسد. سپس این لوله‌ها به منظور بررسی خواص خمشی و خستگی مورد آزمایش قرار گرفته و از دستگاه SEM برای بررسی ساختار و آنالیز شکست آن ها استفاده می شود.

---

<sup>24</sup>Epoxy resin LR-630

<sup>25</sup> Carbon fiber Toray 300

<sup>26</sup> fiberglass E-glass WR6

## ۲-۲- مواد مورد استفاده در ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت

### ۲-۲-۱- رزین اپوکسی

از خواص این نوع رزین اپوکسی می توان به ویسکوزیته پایین، مقاومت به دمای بالا، ترسازری راحت با مواد تقویت کننده و خواص مکانیکی بالا اشاره کرد. این نوع اپوکسی ساخت کشور آلمان بوده و خواص فیزیکی آن به شرح زیر است:

جدول ۲-۲- مشخصات فیزیکی رزین اپوکسی LR630

| نوع رزین<br>اپوکسی | رنگ  | ویسکوزیته<br>[cps] | دانسیته<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | نسبت<br>مخلوط<br>سازی | عمر مصرف<br>(hr) (°C) | زمان ژل شدن<br>(hr) | دما<br>(°C) |
|--------------------|------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| دما      زمان      |      |                    |                                 |                       |                       |                     |             |
| LR630              | شفاف | ۱۰۰۰-۱۵۰۰          | ۱/۱۷                            | ۱۰۰                   | ۲۸۰-۱۷۳۲۰             | ۲۵۵۰۰               | ۴۲۰         |
|                    |      |                    |                                 |                       | ۱۱۰-۲۵۱۶۰             | ۴۰۱۵۰               | ۱۲۰         |

### ۲-۲-۲- الیاف شیشه

از خواص این نوع الیاف می توان به سرعت رشته پیچی بالا، عملکرد مناسب، عدم ریش ریش شدن الیاف، ترشوندگی سریع و خواص مکانیکی بالا اشاره کرد. این نوع الیاف ساخت شرکت ترکیه است. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه در این پروژه به روش رشته پیچی از نوع E-glass WR6 به شرح زیر است:



جدول ۲-۳- مشخصات فیزیکی الیاف شیشه E-glass WR6

| نوع الیاف             | تعداد | قطر فیلامنت (μm) | درصد رطوبت | سازگاری با رزین | وزن (kg) | ارتفاع (mm) | قطر داخلی الیاف (mm) | قطر خارجی الیاف (mm) |
|-----------------------|-------|------------------|------------|-----------------|----------|-------------|----------------------|----------------------|
| E-glass WR6           | ۲۴۰۰  | ۱۷               | ۰/۱        | اپوکسی          | ۱۶       | ۲۵۰         | ۱۶۰                  | ۲۹۰                  |
| پلی استر<br>وینل استر |       |                  |            |                 |          |             |                      |                      |

جدول ۲-۴- خواص مکانیکی الیاف شیشه

| الیاف شیشه  | کششی الیاف (MPa) | مدول کششی الیاف (GPa) | کرنش شکست (%) |
|-------------|------------------|-----------------------|---------------|
| E-glass WR6 | ۲۳۰۶             | ۸۱/۵                  | ۲/۹۷          |

## ۲-۲-۳- الیاف کربن

الیاف کربن مورد استفاده در این پروژه به روش رشته پیچی از نوع Toray T300، ساخت شرکت ژاپن است. از خواص این نوع الیاف، می توان به سرعت رشته پیچی بالا، عملکرد مناسب، کیفیت بالا، سازگاری بالا، ترشوندگی سریع و کامل و خواص مکانیکی بالا اشاره کرد. خواص فیزیکی و مکانیکی این الیاف در ادامه آورده شده است:

جدول ۲-۵- مشخصات فیزیکی الیاف کربنی Toray T300

| وزن (Kg) | سازگاری با رزین | چگالی (g/cm <sup>3</sup> ) | قطر فیلامنت (μm) | تعداد فیلامنت | نوع الیاف کربن |
|----------|-----------------|----------------------------|------------------|---------------|----------------|
| ۲        | اپوکسی          | ۱/۷۶                       | ۷                | ۳۰۰۰          | Toray T300     |
|          | پلی استر        |                            |                  |               |                |
|          | وینل استر       |                            |                  |               |                |

جدول ۲-۶- خواص مکانیکی الیاف کربنی

| کرنش شکست (%) | مدول الیاف (GPa) | کششی استحکام الیاف (MPa) | کششی | نوع الیاف کربن |
|---------------|------------------|--------------------------|------|----------------|
| ۱/۵           | ۲۳۰              | ۳۵۳۰                     |      | Toray T300     |

## ۲-۳- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت

### ۲-۳-۱- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت به روش رشته پیچی

۵ نوع لوله آلومینیوم-کامپوزیت با مقطع دایره، از الیاف های مختلف به کمک رزین اپوکسی با زاویه ۲۵ درجه در راستای لوله در ابعاد مختلف در پژوهشگاه پلیمر با استفاده از دستگاه رشته پیچی ساخت شرکت گوانگدونگ چین<sup>۲۷</sup> ساخته شد. ابتدا روی لوله آلومینیوم، توسط سنباده زبر، عملیات سطحی انجام شد تا

<sup>27</sup>

• China Guangdong Company

استحکام فصل مشترک خوبی بین آلومینیوم و کامپوزیت ایجاد شود. سپس با استفاده از استن سطح لوله به منظور حذف آلودگی‌ها و چربی‌ها شستشو داده شد.

لوله آلومینیوم را داخل سنبه (از جنس آهن) قرار داده و داخل دستگاه رشته پیچی قرار می‌گیرد. سپس رزین اپوکسی با ۵۰٪ هاردنر مخلوط شده و داخل حمام رزین ریخته شد. از دو نوع الیاف استفاده شد؛ لوله اول با استفاده از الیاف شیشه تک لایه پیچیده شده، لوله دوم با الیاف شیشه دولایه و لوله سوم با الیاف شیشه سه لایه روی لوله آلومینیوم پیچیده شدند.



شکل ۲-۱- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه به روش رشته پیچی

در ادامه از الیاف کربن و الیاف کربن- شیشه استفاده شد که لوله چهارم با یک لایه الیاف کربن روی لوله آلومینیوم و لوله پنجم هم ابتدا با یک لایه الیاف شیشه و سپس با یک لایه الیاف کربن روی الیاف شیشه به صورت هیبریدی تولید شدند.



شکل ۲-۲- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربن به روش رشته پیچی

### ۲-۳-۲- ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت به روش لایه گذاری دستی

با استفاده از روش پارچه پیچی (لایه گذاری دستی) پارچه شیشه<sup>۲۸</sup> ریزبافت به صورت تک جهت به دور لوله آلومینیوم پیچیده شد. مراحل ساخت لوله های آلومینیوم-کامپوزیت به این صورت است که ابتدا لوله آلومینیوم با سنباده زبر تحت عملیات سطحی قرار گرفت تا استحکام فصل مشترک خوبی بین آلومینیوم و کامپوزیت ایجاد شود. سپس سطح لوله با استفاده از استون به منظور حذف آلودگی ها و چربی های سطح شستشو داده شد. به منظور کاهش عیوب ایجاد شده در لوله، پارچه شیشه به رزین اپوکسی آغشته شده و به طور کامل عمل ترسازی انجام گرفت سپس پارچه، آرام آرام به دور لوله آلومینیوم پیچیده شد و به ضخامت مورد نظر رسید؛ سپس فرآیند پخت در دمای محیط صورت گرفت.

<sup>28</sup> E-glass Cloth



شکل ۲-۳- تصویر ساخت لوله آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه به روش دستی

در پایان روی لوله ها را آزمایش خمش، خستگی و فشار انجام شد تا استحکام لوله ها، با داده های به دست آمده مقایسه شوند. مشخصات لوله های ساخته شده در جدول ۲-۶ آمده است.

آخرین لوله، لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن به صورت هیبریدی است. پیش بینی می شود خواص خمشی، خستگی و فشاری افزایش یافته و رفتار شکست این لوله، نسبت به سایر لوله ها بهبود یابد. طبق تعریف تار خنثی،<sup>۲۹</sup> در اثر بارگذاری خمشی بیرونی ترین لایه پیچیده شده، باید بیشترین استحکام کششی را داشته باشد تا بار به خوبی منتقل گردد. مراحل ساخت این لوله در ادامه آورده شده است :

پس از آماده سازی لوله ی آلومینیوم یک لایه الیاف شیشه، با زاویه ۲۵ درجه روی لوله آلومینیوم پیچیده می شود؛ سپس لایه الیاف کربنی، روی الیاف شیشه به کمک دستگاه رشته پیچی پیچیده شد. پیش بینی می شود، با افزایش ضخامت و استفاده از دو ماده با خواص متفاوت، استحکام خمشی، فشاری و خستگی افزایش یابد که در قسمت نتایج توضیحات کامل آمده است.

<sup>29</sup> Neutral axis



شکل ۲-۴- ساخت لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت به روش رشته پیچی شده به ترتیب از پایین به بالا  
 الف) لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربن ب) لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه  
 سه لایه پ) لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه ج) لوله آلومینیوم د) لوله آلومینیوم-کامپوزیت  
 الیاف شیشه تک لایه ه) لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربنی تک لایه

جدول ۲-۷- ابعاد، جنس و روش ساخت لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت

| روش ساخت   | جنس           | طول (mm) | قطر خارجی (mm) | ضخامت (mm) |
|------------|---------------|----------|----------------|------------|
| رشته پیچی  | هیبریدی       | ۲۰۰      | ۲۳/۱۵          | ۲/۵۷       |
| رشته پیچی  | کربنی تک لایه | ۲۰۰      | ۱۹/۶           | ۱/۸        |
| رشته پیچی  | شیشه تک لایه  | ۲۰۰      | ۱۹/۷۱          | ۱/۸۵       |
| رشته پیچی  | شیشه دو لایه  | ۲۰۰      | ۲۱/۷           | ۲/۳۵       |
| رشته پیچی  | شیشه سه لایه  | ۲۰۰      | ۲۴/۸           | ۲/۹        |
| پارچه پیچی | شیشه تک جهت   | ۲۰۰      | ۲۲/۸           | ۱/۷۶       |

## ۲-۴- آزمایش‌های مورد نیاز لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت

### ۲-۴-۱- آنالیز ساختاری و شکست توسط میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی<sup>۳۰</sup>

آنالیز ساختاری و شکست نمونه‌ها، در دانشکده ی برق دانشگاه تهران توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی<sup>۳۱</sup> ساخت شرکت هیتاچی ژاپن<sup>۳۲</sup> بررسی شد. نوک نشر میدانی از جنس تنگستن مونوکریستال تیز است. افزایش یا کاهش ولتاژ برای رسیدن به ولتاژ مطلوب توسط اپراتور انجام گرفت و ساختار مقاطع لوله در دستگاه مشاهده گردید.



شکل ۲-۵- تصویر دستگاه SEM

---

<sup>30</sup> Field Emission

<sup>32</sup>Japan HIT4160 02 company



قبل از انجام آنالیز، از نوار طلایی<sup>۳۳</sup> به منظور انتقال خوب الکترون‌ها و رسانایی بالا برای مشاهده بهتر ساختار نمونه، استفاده شد. فاصله ساختار نمونه با استفاده از این دستگاه کمتر از ۶ mm بود.



شکل ۲-۶- تصویر پوشش طلا داده شده بر روی مقطع شکست لوله‌ها در اثر بارگذاری فشاری و خستگی به منظور آنالیز SEM

#### ۲-۴-۲- آزمایش خمش سه نقطه ای<sup>۳۴</sup>

در این آزمایش لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با جنس و ابعاد متفاوت مطابق جدول ۲-۶ مورد آزمایش خمش سه نقطه ای قرار گرفتند. استاندارد برای این آزمایش وجود نداشت و مطابق با مقالات محققین، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. ملاحظات صورت گرفته شامل فیکسچر با طول نگهدارنده<sup>۳۵</sup> ۱۶۰ mm،

<sup>۳۳</sup> Golden Tape

<sup>۳۴</sup> 3 point Bending Test

<sup>۳۵</sup>Span



نیروی بارگذاری<sup>۳۶</sup> ۱ kN، سرعت بارگذاری<sup>۳۷</sup> ۲ mm/min و میزان جابجایی<sup>۳۸</sup> یا افت لوله در اثر بارگذاری خمشی ۵۰ mm می باشد. هدف اصلی از این آزمایش، بررسی و مقایسه تأثیر ضخامت، مواد، روش ساخت و مکانیزم شکست لوله ها در اثر بارگذاری خمشی است.



شکل ۲-۷- تصویر دستگاه آزمایش خمش سه نقطه ای لوله آلومینیوم-کامپوزیت

## ۲-۴-۳- آزمایش فشار<sup>۳۹</sup>

در این آزمون، لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با جنس و ابعاد متفاوت مطابق جدول ۲-۶، مورد آزمایش قرار گرفت، با این تفاوت که طول نمونه ها ۱۰ mm بود. استاندارد برای این آزمایش وجود نداشت و طبق مقالات محققین، نمونه ها تحت آزمون فشار قرار گرفتند. مقادیر ثابت آن عبارت اند از: نیروی بارگذاری ۱ kN، سرعت بارگذاری ۵ mm/min و میزان جابجایی یا افت لوله در اثر بارگذاری فشاری ۱۲ mm. هدف

<sup>۳۶</sup> Loading Force

<sup>۳۷</sup> Loading Rate

<sup>۳۸</sup> Displacement

<sup>۳۹</sup> Compression Test

اصلی این آزمایش، بررسی و مقایسه تأثیر ضخامت، مواد، روش ساخت و مکانیزم شکست لوله ها در اثر بارگذاری فشاری است.



شکل ۲-۸- دستگاه آزمایش فشار محوری لوله آلومینیوم-کامپوزیت

#### ۲-۴-۴- آزمایش خستگی خمشی<sup>۴۰</sup>

به منظور قرارگیری نمونه ها داخل دستگاه خستگی، ابتدا وانتهای لوله ها توسط دستگاه ماشین کاری بریده شد. آزمایش خستگی خمشی این لوله ها با فرکانس 50Hz با نیروی 35kg، 30 و 6 انجام گرفت. در آزمون خستگی با افزایش تعداد سیکل های تنش، لوله ها در هنگام آزمایش یا می شکنند یا به حالت پایدار می رسند. تعداد 9 لوله، در آزمایشگاه خواص مکانیکی شاهرود توسط دستگاه سنتام<sup>۴۱</sup> مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. استاندارد برای این آزمایش وجود نداشت و طبق مقالات محققین، نمونه ها مورد آزمایش قرار گرفتند. یک لوله آلومینیوم، چهار لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه و چهار لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربن تک لایه با نیروهای ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین یک لوله آلومینیوم، دو لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه و دو لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربن تک لایه

<sup>40</sup>Bending Fatigue Test

<sup>41</sup>Santam

با نیروی 35kg، مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف اصلی این آزمایش بررسی تأثیر ضخامت، جنس و روش ساخت و همچنین مکانیزم شکست در اثر تعداد سیکل‌های تنش برروی لوله‌ها است.



شکل ۲-۹- دستگاه آزمایش خستگی لوله آلومینیوم-کامپوزیت

## لوله های آلومینیوم-کامپوزیت

### مواد

آلومینیوم

اپوکسی

الیاف شیشه

الیاف کربن

پارچه شیشه

### روش ساخت

رشته پیچی

لایه گذاری دستی

### آزمایش ها

آنالیز میکروسکوپی

آزمون خمشی

آزمون فشاری

آزمون خستگی

شکل ۲-۱۰- شماتیک کلی مواد، روش ساخت و آزمون های انجام شده روی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت



فصل سوم: نتایج

### ۳-۱- بررسی آنالیز ساختاری و شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت توسط میکروسکوپ

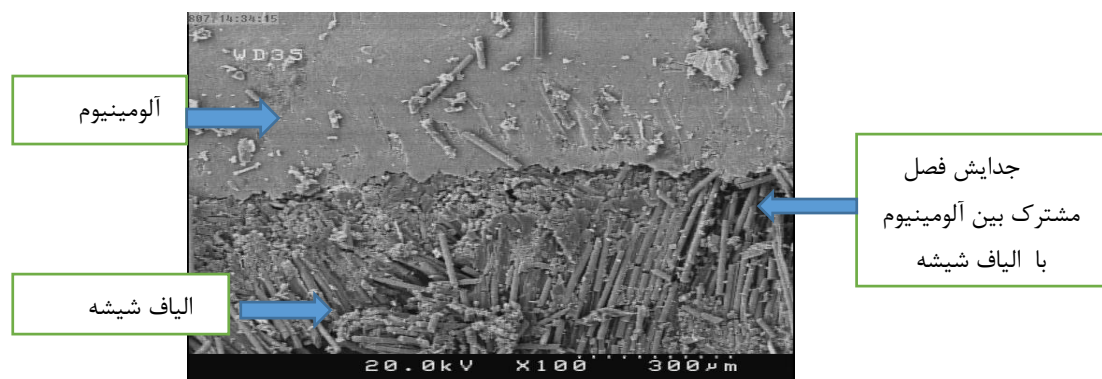
#### الکترونی روبشی

پس از انجام آزمایش و گرفتن تصویر از نمونه‌های مقطع لوله‌های کامپوزیتی می‌توان ساختار نمونه‌ها را تحلیل و بررسی نمود.

### ۳-۱-۱- بررسی میکروساختار مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت

#### بارگذاری فشاری

در شکل ۳-۱، ساختار مقطع لوله آلومینیوم-کامپوزیت و فصل مشترک آن‌ها مشاهده می‌شود. در اثر بارگذاری فشاری، ترک در فصل مشترک ایجاد می‌شود همچنین بعضی از الیاف به سمت آلومینیوم باز شده و سایر الیاف در اثر سایش و نیروهای برشی شکسته و تکه‌تکه شده‌اند.



شکل ۳-۱- بررسی مقطع شکست نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت

بارگذاری فشاری

در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود که الیاف شیشه، در اثر بارگذاری فشاری باز شده و به سمت داخل و خارج لوله خم شده اند و شکافی در وسط این الیاف باز شده مشاهده می‌شود همچنین دیده می‌شود مقداری از الیاف خرد شده و داخل این شکاف ریخته اند. مناطقی که به رنگ سفید دیده می‌شود، طبق مقالات، کنده شدن الیاف یا کشیدگی الیاف در اثر بارگذاری را نشان می‌دهند.

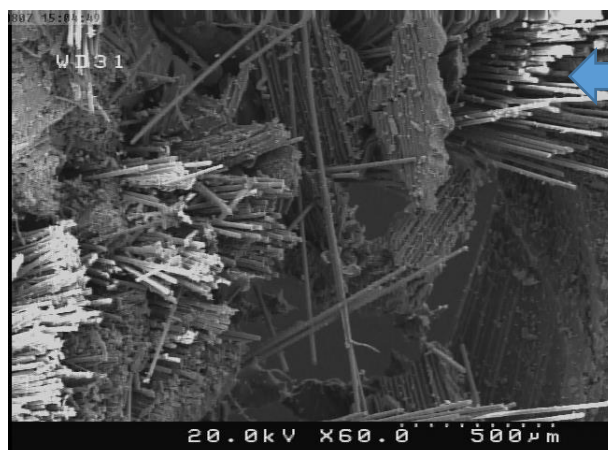


شکل ۲-۳- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت بارگذاری فشاری

### ۲-۱-۳- بررسی میکروساختار مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری

همانطور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، پارچه شیشه در اثر بارگذاری فشاری در جهت داخل و خارج باز نمی‌شود بلکه تحت سایش و نیروهای برشی قرار گرفته و به صورت تکه تکه شده و برش خورده دیده می‌شود. در مناطق سیاه رنگ، شکست زمینه و تورق به خوبی مشاهده می‌شود.

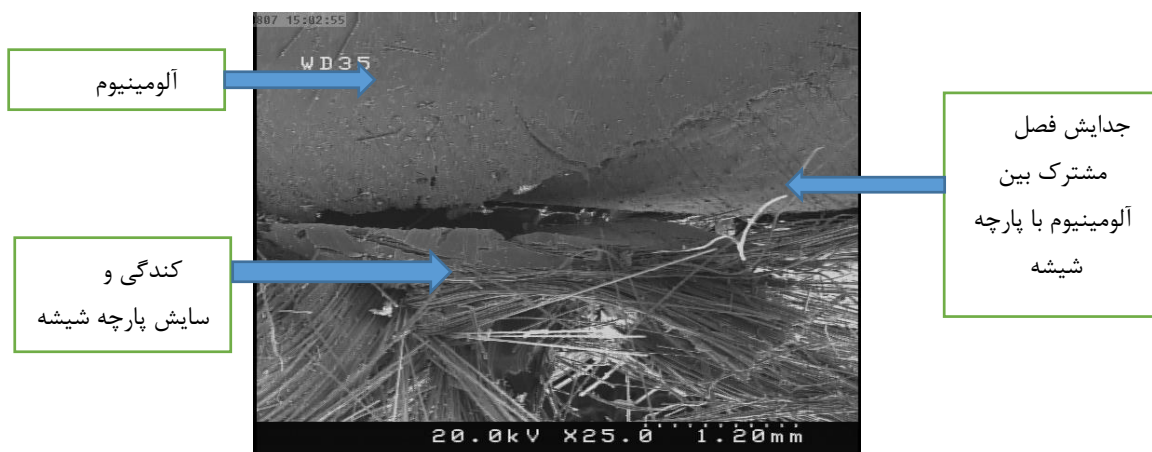




کندگی و  
سایش پارچه شیشه

شکل ۳-۳- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری

در شکل ۳-۴ آلومینیوم، کامپوزیت و فصل مشترک آن‌ها به خوبی دیده می‌شود. به دلیل دستی بودن این روش و عدم تر شوندگی مناسب، جدایش آلومینیوم با کامپوزیت دیده می‌شود و پارچه در اثر سایش با صفحه بارگذاری کنده می‌شود؛ تورق هم به خوبی در تصویر قابل مشاهده است.



آلومینیوم

جدایش فصل  
مشترک بین  
آلومینیوم با پارچه  
شیشه

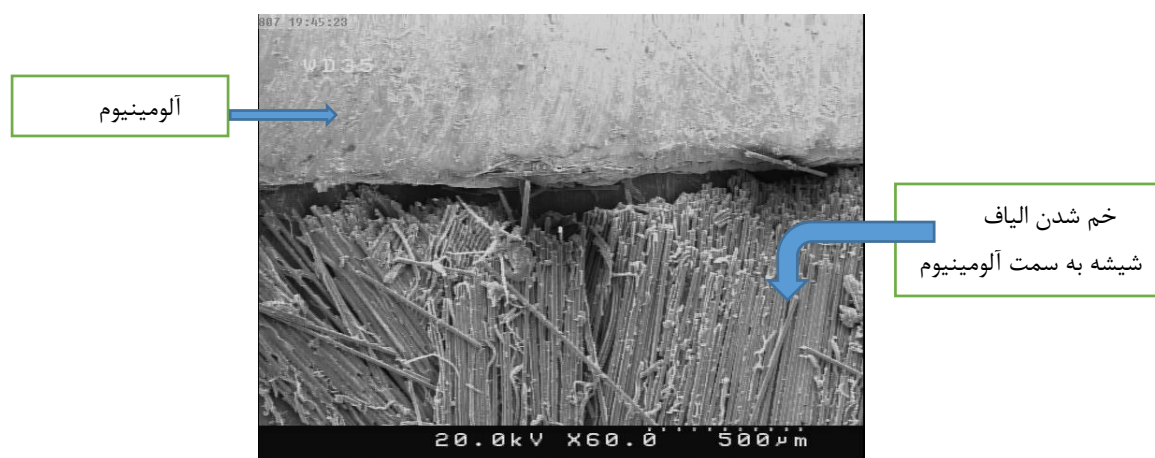
کندگی و  
سایش پارچه شیشه

شکل ۳-۴- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری

### ۳-۱-۳- بررسی میکروساختار مقطع نمونه ی لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف کربن و

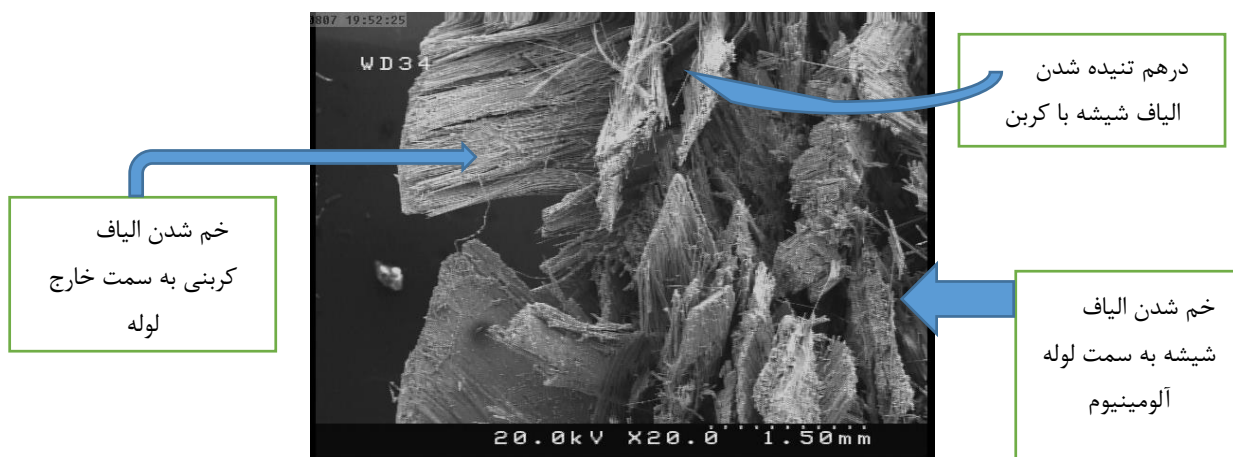
#### شیشه دولایه تحت بارگذاری

در شکل ۳-۵ آلومینیوم - کامپوزیت و فصل مشترک آن ها به خوبی دیده می شود. اکثر الیاف شیشه در اثر بارگذاری به سمت آلومینیوم خم شده و مقدار کمی از الیاف دچار سایش و کندگی شده اند همچنین مرز جدایش الیاف و آلومینیوم نیز به خوبی مشاهده می شود.



شکل ۳-۵- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربن دولایه تحت بارگذاری فشاری

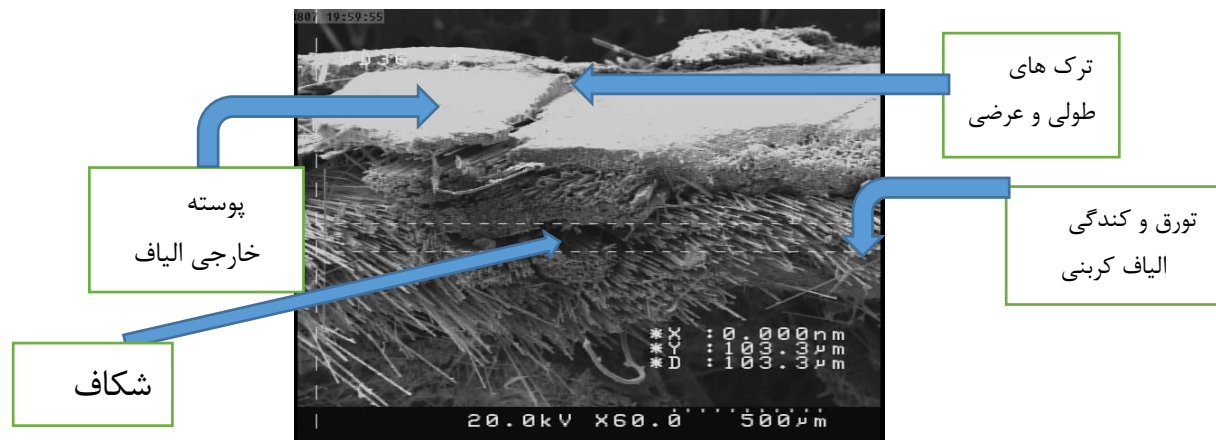
در شکل ۳-۶ دو الیاف شیشه و کربن به صورت هیبریدی و آلومینیوم مشاهده می شوند. الیاف کربنی در قسمت بیرونی مقطع رشد پیدا کرده و شعاع انحناي خمش آن به سمت بیرون زیاد است که علت آن بالا بودن مدول الاستیسیته و انعطاف پذیری الیاف کربن است. همچنین الیاف کربن به سمت داخل خم شده و با باز شدن الیاف شیشه به سمت خارج مقطع لوله، گره خورده و پیچیده شده اند. مرز بین الیاف کربنی به سمت داخل و خارج مشخص است ولی مرز بین الیاف کربن و شیشه به علت پیچیده شدن الیاف ها، قابل مشاهده نیست.



شکل ۳-۶- بررسی مقطع شکست مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربن دولایه تحت بارگذاری فشاری

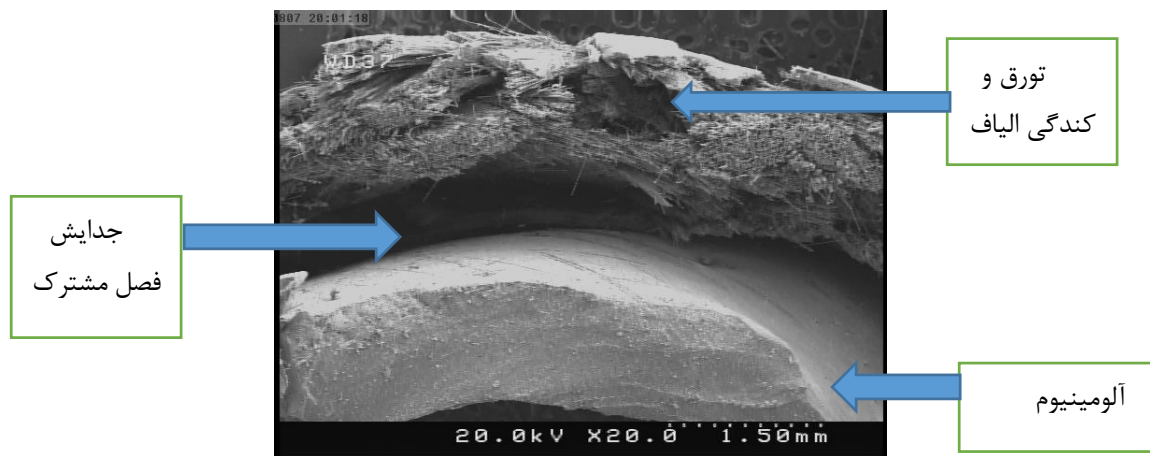
### ۳-۱-۴- بررسی میکروساختار مقطع نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربن تحت بارگذاری خستگی خمشی

در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود در اثر بارگذاری خستگی، الیاف شیشه در قسمت خارجی دچار ترک‌های طولی و عرضی شده اند همچنین تورق بین لایه‌های بالا و پایین نیز قابل مشاهده است. کندگی الیاف و همچنین شکاف الیاف در قسمت مرکزی نیز در تصویر نشان داده شده است. فاصله دهانه این شکاف به میزان  $103 \mu\text{m}$  اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳-۷- بررسی مقطع شکست نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربنی تحت بارگذاری خستگی

در شکل ۳-۸ تورق، سایش، گسیختگی و ترک های عرضی الیاف دیده می شود و جدا شدن مرز بین آلومینیوم و الیاف کربنی نیز قابل مشاهده است.



شکل ۳-۸- بررسی مقطع شکست نمونه لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف کربنی تحت بارگذاری خستگی

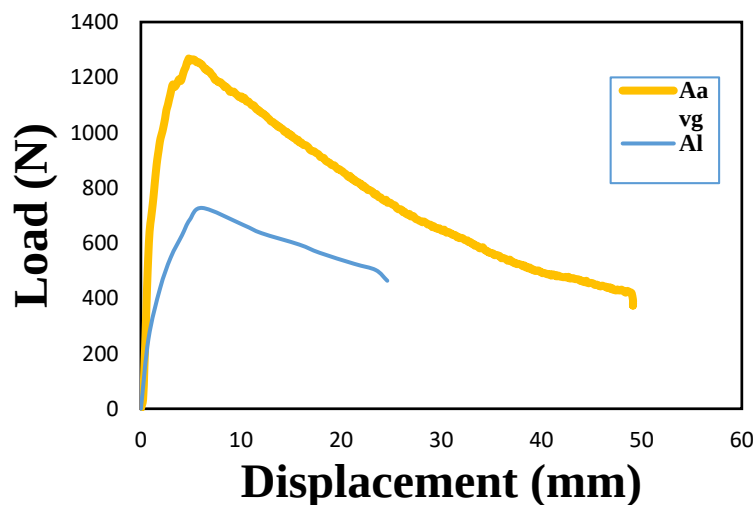
## ۳-۲- بررسی خواص خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت

نتایج آزمون خمش لوله های جداره نازک آلومینیوم و آلومینیوم-کامپوزیت به صورت هیبریدی، با ضخامت و مواد مختلف، به دست آمد. رفتار شکست این لوله ها با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه ای مورد بررسی

قرار گرفت. این لوله‌ها به علت داشتن جداره ی نازک و وزن کم، پس از اعمال بارگذاری خمشی به صورت بشکه ای<sup>۴۲</sup> و لولایی شدن<sup>۴۳</sup> درآمده و دو طرف آن به سمت بالا خم گردید و مقطع دایره‌ای لوله به شکل بیضی درآمده و میزان جابجایی در اثر بارگذاری به ۵۰ mm کاهش یافت. به طور کلی استحکام خمشی به ضخامت الیاف پیچیده شده به دور لوله آلومینیوم و همچنین ماده مورد نظر بستگی دارد.

لوله آلومینیوم جهت مقایسه با سایر لوله ها، تحت آزمون خمشی قرار گرفت. در اثر بارگذاری های خمشی لوله آلومینیوم به علت وزن کم و انعطاف پذیری بالا، وارد منطقه الاستیک شده و به صورت غیرخطی ترسیم شده است. این لوله در ادامه وارد منطقه پلاستیک شده و بیشترین نیروی خمشی در اثر افت جابجایی ۶/۱۵ mm برابر با ۷۲۶/۶۷۹ N محاسبه شد. سپس با افت نیرو، جابجایی به شدت افزایش یافته و در نهایت لوله آلومینیوم در اثر تغییر شکل با جابجایی ۲۵ mm از وسط خم شد.

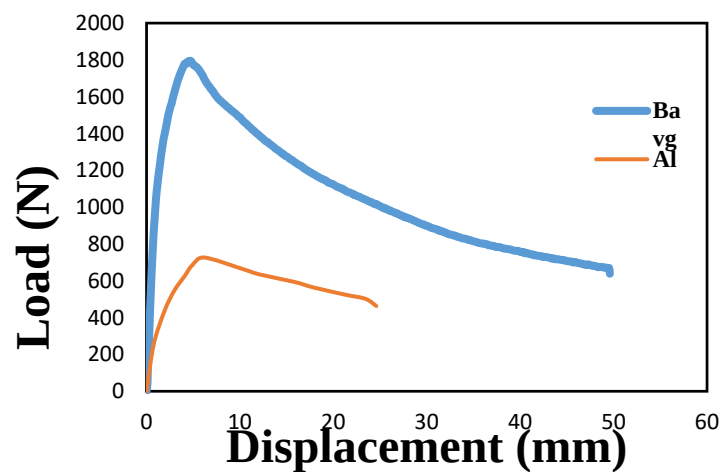
### ۳-۲-۱- نتایج به دست آمده از آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت



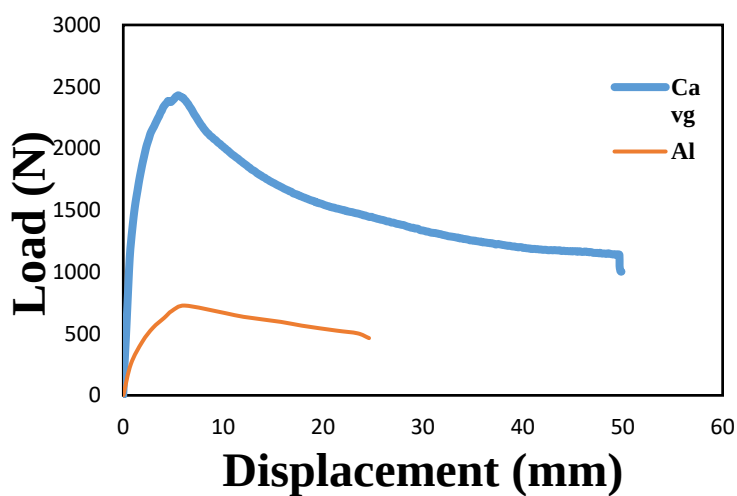
شکل ۳-۹- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه با بارگذاری ۱ kN با سه بار تکرار

<sup>۴۲</sup>Buckling

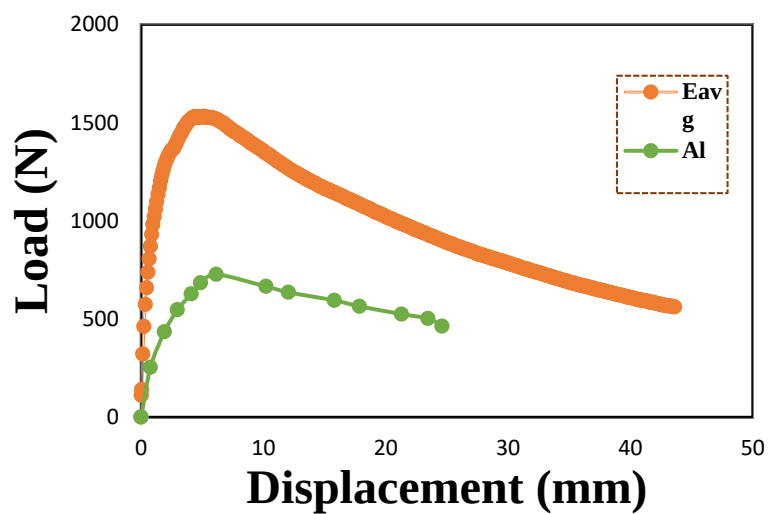
<sup>۴۳</sup> Hinge



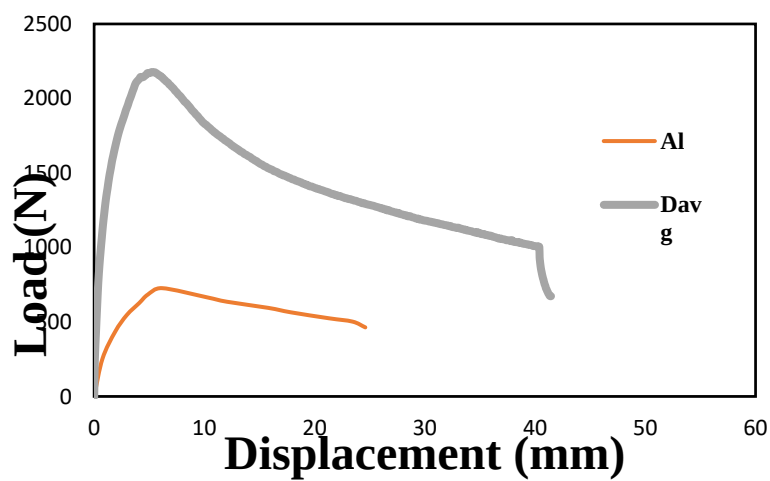
شکل ۳-۱۰- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه دولایه با بارگذاری ۱ kN  
با سه بار تکرار



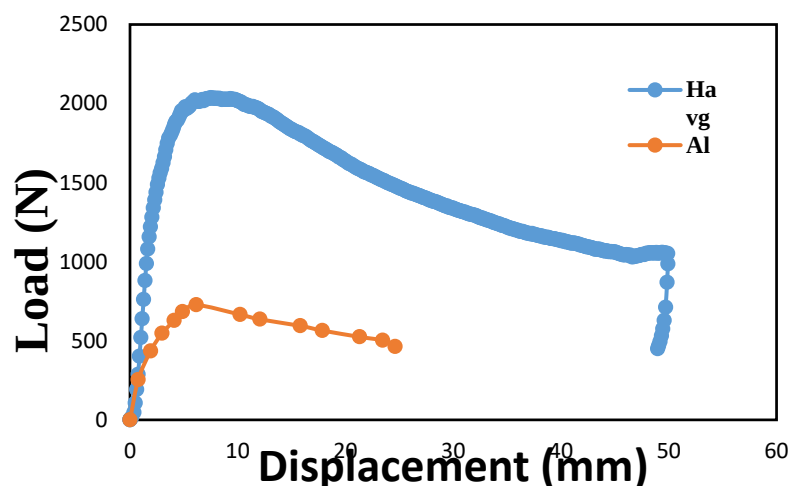
شکل ۳-۱۱- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه سه لایه با بارگذاری ۱ kN  
با سه بار تکرار



شکل ۳-۱۲- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه با بارگذاری ۱ kN  
با سه بار تکرار



شکل ۳-۱۳- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن دولایه با بارگذاری ۱ kN  
با سه بار تکرار



شکل ۳-۱۴- نمودار آزمون خمشی لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه تک لایه با بارگذاری kN  
۱ با سه بار تکرار

لوله ها با سه بار تکرار و با درصد خطای پایین، مورد آزمایش قرار گرفته و در ادامه بین نتایج میانگین گرفته شد. مطابق نمودارهای ۳-۹ الی ۳-۱۱ رفتار خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه ( $A_{avg}$ )، دولایه ( $B_{avg}$ ) و سه لایه ( $C_{avg}$ ) مشاهده می شود، این لوله ها به دلیل ترد بودن الیاف شیشه در اثر بارگذاری، وارد منطقه الاستیک شده سپس با افزایش بارگذاری به شکل غیرخطی، وارد منطقه پلاستیک می شوند و ماکسیمم مقدار نیرو حاصل می شود. در اثر افزایش بارگذاری، نیرو کاهش یافته و در اثر کاهش نیرو، خمش نهایی در این لوله ها مشاهده می شود. به طور کلی رفتار این لوله ها در اثر بارگذاری مطابق با توضیحات داده شده می باشد، با این تفاوت که با افزایش ضخامت الیاف پیچیده شده روی لوله آلومینیوم، نیروی ماکسیمم هم افزایش می یابد. نمودار ۳-۱۲ رفتار خمشی لوله آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه ( $E_{avg}$ ) را نشان می دهد. به دلیل انعطاف پذیری الیاف کربن در اثر بارگذاری، نیرو کمی با شیب ثابت، افزایش یافته سپس به شکل غیر خطی وارد منطقه پلاستیک می شود و بیشترین مقدار نیرو مشاهده می شود.



در تصاویر ۹-۳ الی ۱۱-۳ نمودار های آزمون خمش مشاهده می شوند. همچنین رفتار خمشی لوله آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه دو لایه ( $D_{avg}$ ) در نمودار ۱۳-۳ آورده شده است. تفاوت نمودار ۱۳-۳ و نمودار ۱۲-۳، استفاده از الیاف شیشه و کربن به صورت هیبریدی است. در نمودارهای ۹-۳ الی ۱۱-۳ افزایش نیرو نسبت به نمودار ۱۲-۳ کمتر است که دلیل آن استفاده از مواد ترد و انعطاف پذیر الیاف شیشه و کربن به صورت هیبریدی است. نمودار ۱۴-۳ رفتار خمشی لوله آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه ( $H_{avg}$ ) را نشان می دهد. در این لوله از پارچه شیشه استفاده شد؛ با این تفاوت که جهت گیری پارچه شیشه در راستای لوله آلومینیوم است، لذا مقدار نیرو با وجود یک لایه ضخامت پیچیده شده بر روی آلومینیوم، بیشتر است.

جدول ۱-۳- نتایج آزمون خمش در لوله های آلومینیوم - کامپوزیت

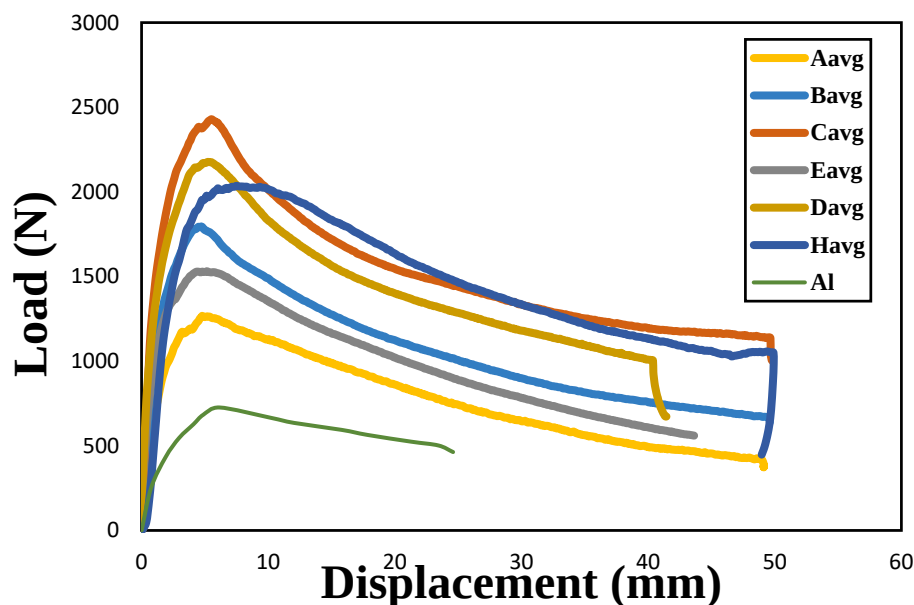
| افت خمشی (mm) | بیشترین نیروی خمشی (N) |               |
|---------------|------------------------|---------------|
| ۶.۷           | ۱۲۳۴                   | ( $A_{avg}$ ) |
| ۳.۷۲          | ۱۷۶۲                   | ( $B_{avg}$ ) |
| ۵.۷           | ۲۴۲۳                   | ( $C_{avg}$ ) |
| ۳.۹۳          | ۱۵۳۰                   | ( $E_{avg}$ ) |
| ۳.59          | ۲۲۳۹                   | ( $D_{avg}$ ) |
| ۶.۸           | ۲۰۱۶                   | ( $H_{avg}$ ) |
| ۶.۱۵          | ۷۲۶                    | ( $A_{avg}$ ) |

بنابراین می توان مقایسه ای بین نیروهای نهایی خمشی و رفتار شکست تمام لوله های کامپوزیتی با لوله آلومینیوم انجام داد. نسبت مقادیر نیروی خمشی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه،

دو لایه، سه لایه و لوله های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه و هیبریدی الیاف کربن و شیشه دو لایه و همچنین پارچه شیشه به لوله آلومینیوم به ترتیب ۱/۷، ۲/۴۲، ۳/۳۳، ۲/۱، ۳/۰۸ و ۲/۷ برابر بیشتر است. رفتار شکست لوله های آلومینیوم – کامپوزیت در منطقه الاستیک، ابتدا به صورت خطی بوده و سپس غیرخطی می شود ولی لوله آلومینیوم از ابتدا به صورت غیرخطی در نمودار مشاهده می شود.

در نمودار ۳-۱۵ که مقایسه کلی بین تمام لوله ها است مشاهده می شود هر چه ضخامت الیاف و لوله بیشتر شود، نیروی خمشی افزایش می یابد. همچنین نیروی خمشی لوله های کربنی تک لایه ( $E_{avg}$ ) نسبت به لوله های شیشه ای ( $A_{avg}$ )، ( $B_{avg}$ )، ( $C_{avg}$ ) بیشتر است. نیروی خمشی لوله های پارچه شیشه ( $H_{avg}$ ) چون جهت گیری رشته ها در راستای لوله است و زاویه آن صفر درجه می باشد، نسبتاً زیاد است. همچنین استحکام خمشی لوله های هیبریدی دولایه ( $D_{avg}$ ) نسبت به لوله های شیشه ای دولایه ( $B_{avg}$ ) بیشتر است. در نتیجه برای بهبود خواص خمشی می توان از لوله های هیبریدی ( $D_{avg}$ ) استفاده کرد که نسبت به لوله های شیشه ( $A_{avg}$ )، ( $B_{avg}$ )، ( $C_{avg}$ ) و کربنی ( $E_{avg}$ )، خواص خمشی آن بهتر است.

از مقایسه ی هریک از لوله ها با لوله ی آلومینیوم ( $A_{avg}$ ) می توان دریافت که بیشترین نیروی خمشی لوله هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن ( $D_{avg}$ ) دولایه تقریباً برابر با آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه سه لایه ( $C_{avg}$ ) است و از نظر هزینه، زمان و استحکام مناسب تر است.



شکل ۳-۱۵- مقایسه تمام نمونه ها در اثر بارگذاری خمشی

نتیجه ی کلی که از مقایسه ی خواص خمشی این ۶ لوله آلومینیوم-کامپوزیت در شکل ۳-۱۵ می توان گرفت این است که هر چه ضخامت الیاف و لوله بیشتر شود، نیروی خمشی افزایش می یابد. همچنین استحکام خمشی لوله های کربنی تک لایه ( $E_{avg}$ ) نسبت به لوله های شیشه ای ( $A_{avg}$ ), ( $B_{avg}$ ), ( $C_{avg}$ ) بیشتر است. لوله های پارچه شیشه ( $H_{avg}$ ) به دلیل اینکه جهت گیری رشته ها در راستای لوله بوده و زاویه آن صفر درجه است، استحکام خمشی نسبتاً زیادی دارند. استحکام خمشی لوله های هیبریدی دولایه ( $D_{avg}$ ) هم نسبت به لوله های شیشه ای دولایه ( $B_{avg}$ ) بیشتر است. در نتیجه برای بهبود خواص خمشی می توان از لوله های هیبریدی ( $D_{avg}$ ) استفاده کرد که نسبت به لوله های شیشه ( $A_{avg}$ ), ( $B_{avg}$ ), ( $C_{avg}$ ) و کربنی ( $E_{avg}$ ), خواص خمشی آن بیشتر است.

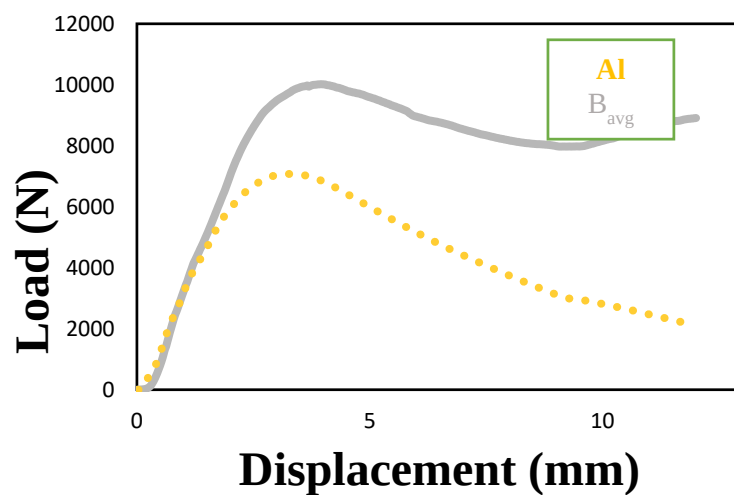
در مقایسه ی هر کدام از لوله ها با لوله آلومینیوم ( $Al_{avg}$ ) به این نتیجه رسیدیم که استحکام خمشی لوله هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن ( $D_{avg}$ ) به دلیل اینکه با دولایه پیچیده شده بودند، تقریباً برابر با لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه سه لایه ( $C_{avg}$ ) است و از نظر هزینه، زمان و استحکام مناسب تر هستند.

### ۳-۳- بررسی نتایج آزمون فشار لوله های آلومینیوم-کامپوزیت

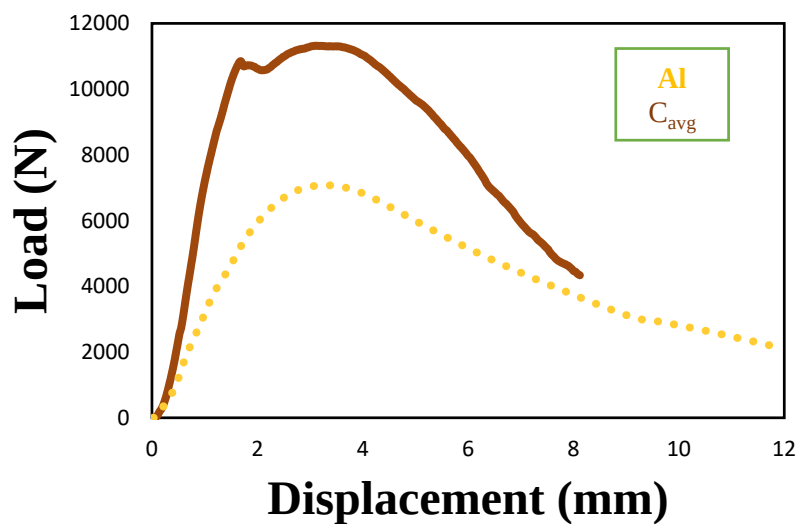
نتایج آزمون فشاری لوله های جداره نازک آلومینیوم و هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با ضخامت و مواد مختلف بررسی گردید. ۱۴ لوله با سه بار تکرار، مورد آزمایش قرار گرفتند و میزان جابجایی تمام لوله ها در اثر بارگذاری فشاری تا ۱۲ mm مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت، نحوه شکست لوله ها مورد بررسی قرار گرفت.

لوله ها با سه بار تکرار و درصد خطای پایین مورد آزمایش قرار گرفتند و بین نتایج میانگین گرفته شد. دو لوله آلومینیوم جهت مقایسه با دیگر لوله ها، مورد آزمایش قرار گرفتند. بیشترین نیروی فشاری در اثر جابجایی ۲/۸ mm، ۷۱۱۸ N به دست آمد. سپس نیرو به شدت افت کرده و جابجایی به شدت افزایش یافت. مقادیر نیرو و جابجایی به ترتیب به ۲۱۵۹ N و ۱۲ mm رسید. در نهایت لوله های آلومینیومی شکستند و فقط تغییر فرم پلاستیک پیدا کردند.

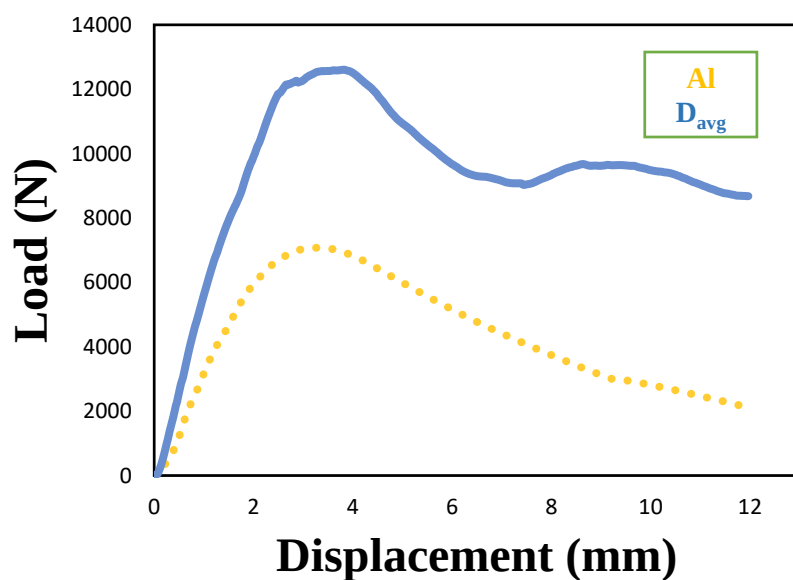
۱-۳-۳- نتایج به دست آمده در اثر بارگذاری فشاری لوله‌های آلومینیوم- کامپوزیت



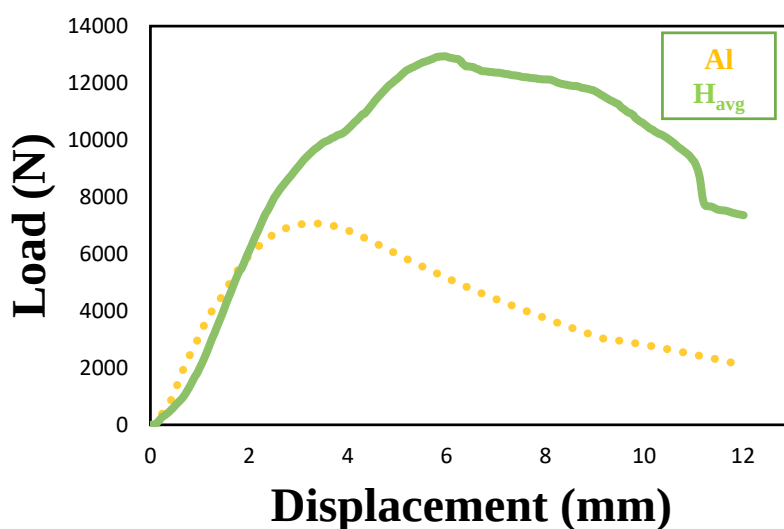
۱۶-۳- لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه دو لایه در اثر بارگذاری فشاری با نیروی ۱kN



۱۷-۳- لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه سه لایه در اثر بارگذاری فشاری با نیروی ۱kN



۳-۱۸- لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربن دو لایه در اثر بارگذاری فشاری با نیرو ۱kN



۳-۱۹- لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه تک جهت در اثر بارگذاری فشاری با نیروی ۱kN

نتایج آزمون فشاری لوله‌های جداره نازک آلومینیوم و لوله‌های هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با ضخامت و لایه‌های مختلف بررسی شد. ۱۴ لوله با سه بار تکرار، مورد آزمایش قرار گرفتند. میزان جابجایی تمام

لوله‌ها در اثر بارگذاری فشاری تا ۱۲ mm بررسی شد. نمودارهای مربوط به آزمون فشار در ادامه آورده شده است و در انتها نحوه شکست لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

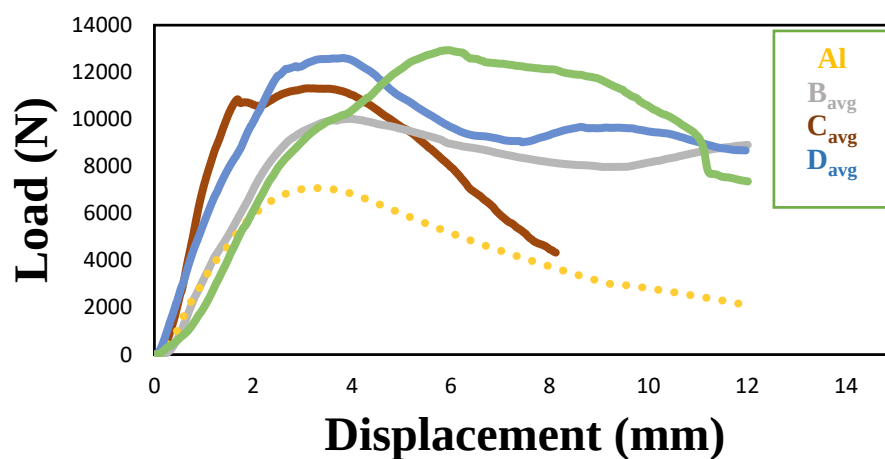
دو لوله آلومینیوم به عنوان مقایسه با دیگر لوله‌ها، مورد آزمایش قرار گرفتند. آلومینیوم به دلیل سبک بودن و انعطاف‌پذیری بالا در اثر بارگذاری فشاری وارد منطقه الاستیک شده و نمودار آن به شکل خطی می‌باشد و در منطقه پلاستیک به صورت غیر خطی درمی‌آید. سپس نیرو به شدت افت کرده در نهایت لوله‌های آلومینیومی شکسته نشده و فقط تغییر فرم پلاستیک می‌دهند.

در نمودارهای ۱۶-۳ و ۱۷-۳ مشاهده می‌شود که در لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه دولایه و سه لایه ( $B_{avg}$ ) و ( $C_{avg}$ ) در اثر بارگذاری فشاری، نیرو با شیب ثابت افزایش یافته و نمودارها به صورت غیر خطی وارد منطقه پلاستیک می‌شوند که دلیل آن ترد بودن الیاف شیشه است.

همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود هرچه الیاف پیچیده شده بر روی لوله آلومینیوم بیشتر باشد، مقدار نیروی فشاری بیشتر است. بنابراین نیروی ماکسیمم نمودار ۱۷-۳ بیشتر از ۱۶-۳ است. در نمودار ۱۸ به دلیل استفاده از الیاف شیشه و کربن ( $D_{avg}$ )، شیب ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و ماکسیمم نیروی آن محاسبه می‌شود.

در نمودار ۱۹-۳ به دلیل استفاده از پارچه شیشه ( $H_{avg}$ ) شیب منحنی نیرو افزایش یافته، سپس مانند نمودارهای ۱۶-۳ و ۱۷-۳ به صورت غیر خطی وارد منطقه پلاستیک می‌شود. نمودارهای فشار برخلاف نمودارهای خمشی شیب کمتری دارند و در اثر جابجایی بیشتر، نیرو افزایش پیدا می‌کند.

### ۲-۳-۳- مقایسه



### ۲-۳-۴- مقایسه تمام لوله ها در اثر بارگذاری فشاری با نیروی ۱kN

### جدول ۲-۳- نتایج آزمون فشاری لوله های آلومینیوم کامپوزیت

| تغییرات جابجایی (mm)      بیشترین نیروی فشاری (N) |       |      |
|---------------------------------------------------|-------|------|
| (B <sub>avg</sub> )                               | ۱۰۶۴۲ | 2.4  |
| (C <sub>avg</sub> )                               | ۱۱۳۰۴ | 2.56 |
| (D <sub>avg</sub> )                               | ۱۲۶۴۷ | 3.69 |
| (H <sub>avg</sub> )                               | ۱۲۹۳۳ | 5.69 |
| (Al <sub>avg</sub> )                              | ۷۱۱۸  | 3.4  |



نتیجه ای که از مقایسه این ۵ لوله با توجه به شکل ۳-۲۰ می توان گرفت این است که نیروی فشاری لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی ( $D_{avg}$ ) نسبت به بقیه لوله ها بیشتر است؛ دلیل آن دولایه بودن الیاف و رفتار شکست مناسب است.

نیروی فشاری نمونه آلومینیوم-کامپوزیت سه لایه ( $C_{avg}$ ) به دلیل ضخامت بالاتر نسبت به سایر لوله ها، به جز هیبریدی بیشتر است. لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه پیچی شیشه ( $H_{avg}$ )، رفتار شکست مناسبی از خود نشان نمی دهد که این موضوع به دلیل ترک، شکست ترد، دستی بودن این روش و عیوبی مثل تورق و رطوبت به جامانده از رزین می باشد.

نیروی فشاری آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی دو برابر آلومینیوم ( $A_{avg}$ ) می باشد چون لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی ضخامت بیشتری نسبت به آلومینیوم دارد.

از مقایسه ی هر یک از لوله ها با لوله ی آلومینیوم می توان نتیجه گرفت که نیروی فشاری لوله هیبریدی آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن ( $D_{avg}$ ) به دلیل دولایه بودن کمی بیشتر از لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه سه لایه ( $C_{avg}$ ) است و از نظر هزینه، زمان و استحکام مناسب تر می باشد.

## فصل چہارم: بحث

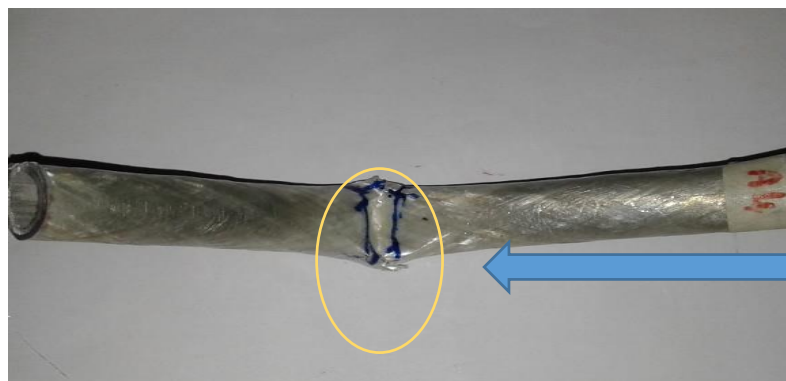
#### ۴-۱- بررسی مکانیزم شکست لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری خمشی

لوله‌ها وقتی در معرض بارگذاری خمشی قرار می‌گیرند، ترک در لایه خارجی آن‌ها آغاز می‌شود. در اثر افزایش بارگذاری، تنش در حالت بحرانی قرار گرفته و در نتیجه ترک ناپایدار می‌شود. ترک بحرانی با گسیختگی الیاف و زمینه مرتبط است و در موقع بحرانی شدن ترک، الیاف ترک می‌خورند. لایه خارجی، شکسته شده و الیاف از زمینه خارج می‌شوند. لوله‌های تحت خمش در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شوند.



شکل ۴-۱- تصویر لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی

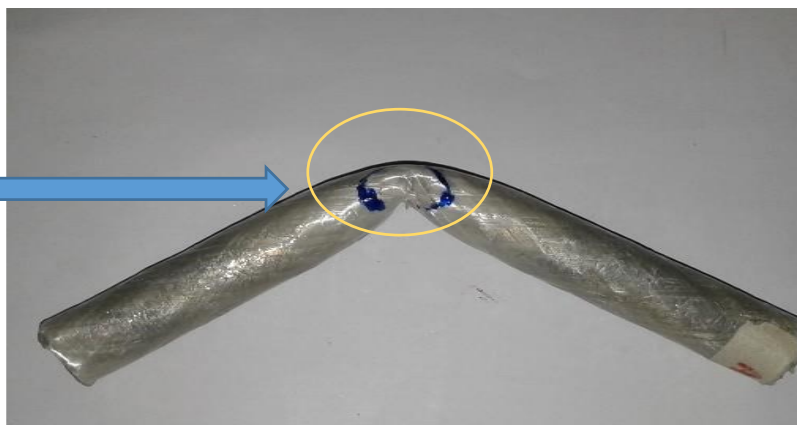
با اعمال نیرو، ترک در قسمت پایین لوله در لایه بیرونی ظاهر می‌شود، سپس با افزایش نیرو، ترک رشد کرده و افت جابجایی افزایش پیدا می‌یابد. گسیختگی وقتی به وجود می‌آید که نیرو و جابجایی ناگهان کاهش پیدا کنند. همچنین هنگامی که نیرو اعمال می‌شود عیب دیگری هم به وجود می‌آید مانند جدایش فصل مشترک الیاف با زمینه که به آرامی ظاهر می‌شود.



لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی

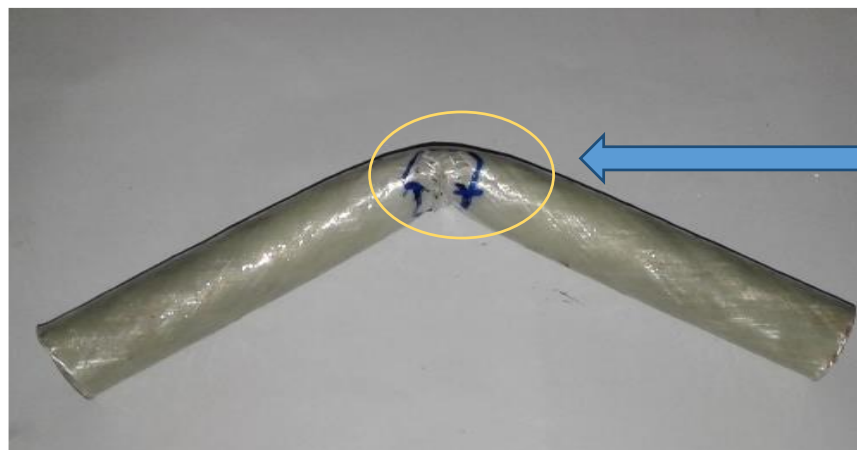


ترک های  
عرضی و  
طولی



تورق و  
جدایش الیاف  
از زمینه

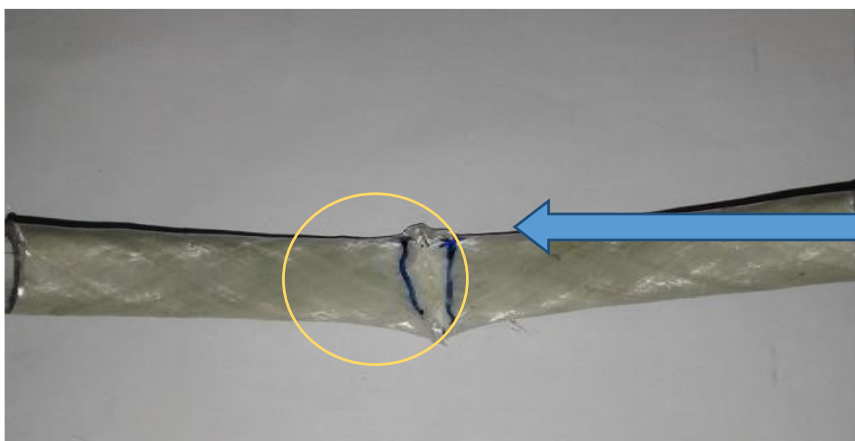
شکل ۴-۲- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه



لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی

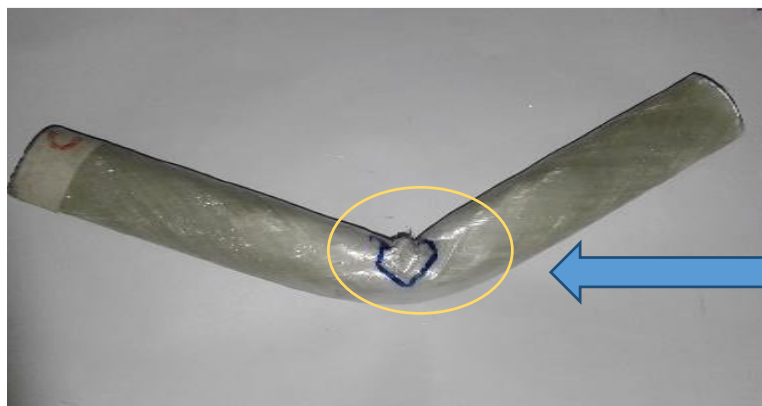


ترک های  
عرضی و طولی



تورق و  
جدایش الیاف  
از زمینه

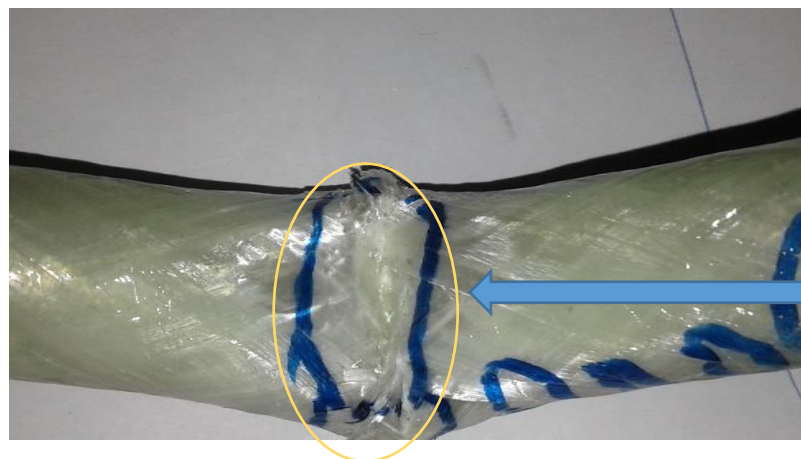
شکل ۳-۴- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه دو لایه



لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی



ترک های  
عرضی و طولی

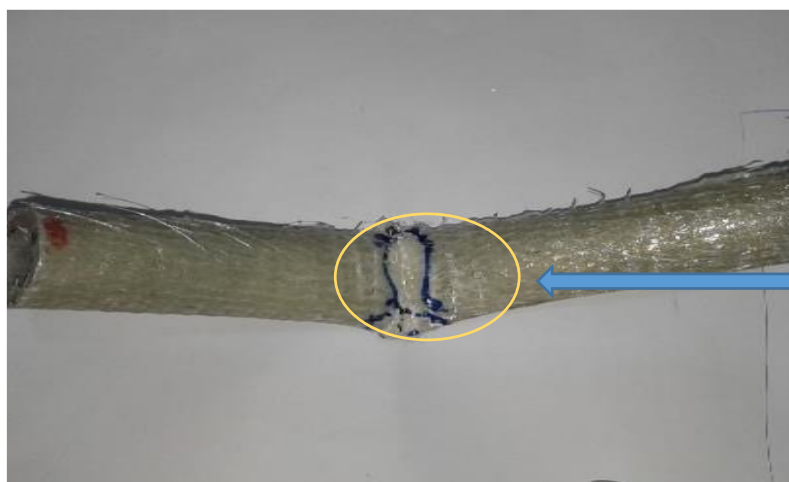


تورق و  
جدایش الیاف  
از زمینه

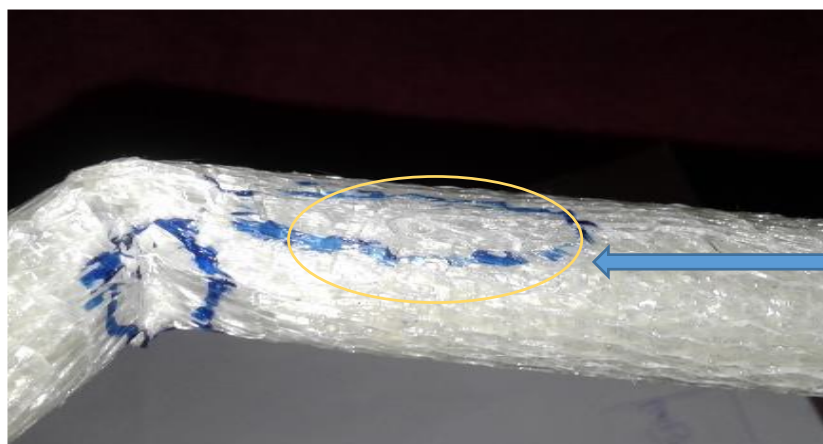
شکل ۴-۴- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف شیشه  
سه لانه



لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی

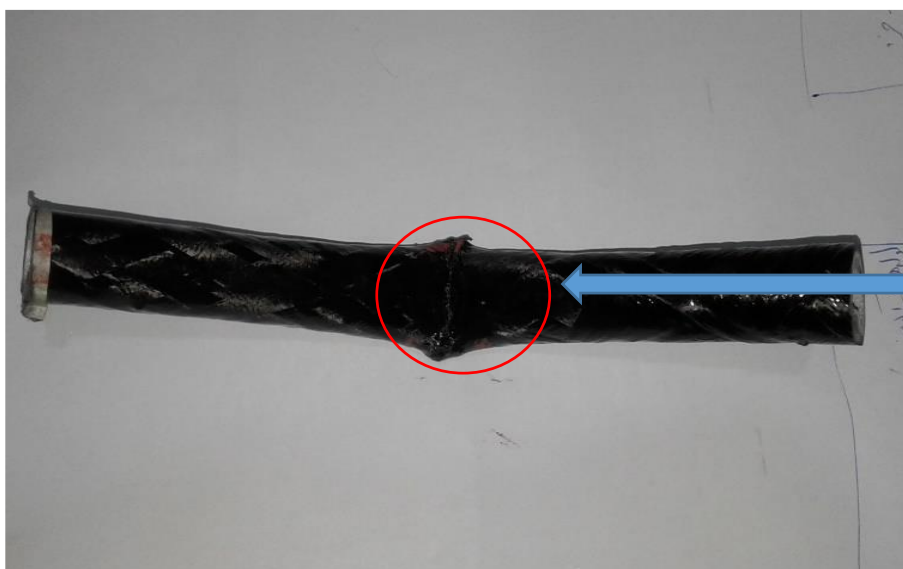


فرورفتگی



تورق و  
جدایش پارچه  
از آلومینیوم

شکل ۴-۵- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با پارچه شیشه تک  
جهته



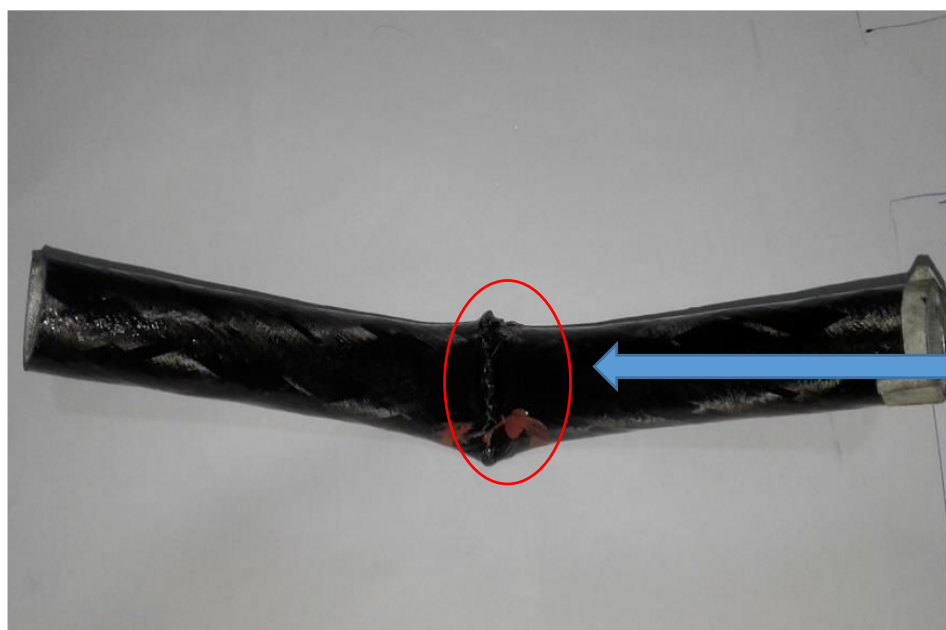
لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی



ترک ها  
در راستای  
الیاف

شکل ۴-۶- مکانیزم شکست خمشی لوله های آلومینیوم- کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه





لولایی شدن  
و کمانش های  
موضعی

شکل ۴-۷- مکانیزم شکست لوله های خواص فشاری لوله های آلومینیوم- کامپوزیت هیبریدی با الیاف شیشه و کربنی دو لایه

در شکل های ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴ آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه، دولایه و سه لایه مشاهده می شوند. با اعمال بارگذاری خمشی، عیوبی در اثر مکانیزم شکست ایجاد می شود. همانطور که با فلش برروی عیوب به وجود آمده نشان داده شده، در تصویر وسط ابتدا با بارگذاری اولیه ترک های طولی و عرضی در قیمت زیرین لوله ایجاد می شود و با افزایش نیرو، ترک رشد پیدا کرده و کامپوزیت، پس از فرورفتگی و افزایش افت جابجایی در اثر بارگذاری، بیرون زدگی الیاف در دو طرف لوله ظاهر می شود که اصطلاحاً کمانش موضعی یا لولایی شدن می گویند. در مناطق سفید رنگ، تورق یا جدایش فصل مشترک الیاف و زمینه مشاهده می شود.

در شکل ۴-۵ آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت مشاهده می شود. به دلیل ساخت این لوله ها به روش پارچه پیچی (دستی)، هنگامیکه تحت بارگذاری خمشی قرار می گیرند، عیوب زیادی در این لوله ها ایجاد می شود. معایب این روش شامل ترک های زیاد، جدایش پارچه از زمینه، جدا شدن پارچه از لوله آلومینیوم و همچنین به علت رطوبت به جا مانده در زمینه، می توان نتیجه گرفت که این روش معایب زیادی نسبت به روش رشته پیچی دارد. تنها مزیت آن، این است که الیاف پارچه شیشه در راستای لوله پیچیده شده اند و مکانیزم شکست را تا حدودی بهبود می دهند.

در شکل ۴-۶ در اثر بارگذاری برروی الیاف کربنی، به علت انعطاف پذیری و مدول الاستیسیته و چقرمگی بالا، ترک ها از الیاف عبور کرده و نسبت به الیاف شیشه ای دیرتر دچار شکست می شود.

در شکل ۴-۷ آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی به علت استفاده از دو نوع الیاف با خواص متفاوت، خواص خمشی را بهبود داده و رفتار شکست مناسب تری از خود نشان می دهد.

وظیفه فلز آلومینیوم داخل این لوله ها جلوگیری از تغییرفرم الاستیک و شکست ترد می باشد که در اثر اعمال بار خمشی لوله های آلومینیوم-کامپوزیت به صورت تغییرفرم پلاستیک می شکند و ترک ایجاد شده به حداقل می رسد.

به طور کلی طبق مشاهدات می توان نتیجه گرفت، به دلیل شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف کربن و شیشه در اثر بارگذاری های بسیار زیاد، مکانیزم شکست مناسب و همچنین تغییرفرم پلاستیک بهتر نسبت به سایر لوله ها، این لوله ها می توانند در صنعت خودرو برای حفاظت از سرنشینان مورد استفاده قرار بگیرند.

۲-۴- بررسی مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری فشاری



شکل ۴-۸- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه سه لایه تحت بارگذاری فشاری



شکل ۴-۹- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه دولایه تحت بارگذاری فشاری

تصاویر ۸-۴ و ۹-۴ مربوط به مقاطع لوله‌های آلومینیوم-کامپوزیت الیاف شیشه به ترتیب سه لایه و دولایه تحت بارگذاری فشاری هستند. افت جابجایی این لوله‌ها تحت بارگذاری فشاری به میزان 12mm رسید. تحت اعمال بارگذاری فشاری روی مقطع این لوله‌ها، ترک‌های مختلفی روی مقطع و طول لوله‌ها ایجاد می‌شود. یکی از ترک‌های ایجاد شده در مرکز ضخامت این لوله‌ها است. در اثر ایجاد این ترک، الیاف باز شده و به سمت داخل و خارج لوله متمایل می‌شوند. در سایر مناطق برش‌های الیاف ایجاد شده است. این برش‌ها به علت سایش نیروهای فشاری روی الیاف رخ داده و ترک‌های برشی و عرضی در الیاف ایجاد شده است. در اثر سایش، مقدار کمی از الیاف پودر شده و روی درز می‌ریزد. در سایر مناطق تورق و جدایش بین الیاف، مخصوصاً در الیاف‌هایی که به سمت خارج خم شده‌اند مشاهده می‌شود. از طرفی به خاطر وجود لوله آلومینیوم داخل ماده کامپوزیتی، تغییرفرم پلاستیک صورت گرفته و کمانش موضعی در درون این لوله‌ها ایجاد شده است. این رفتار شکست، از شکست ترد تا حدودی جلوگیری می‌کند.

در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، لوله آلومینیوم تحت اعمال بارگذاری فشاری قرار گرفته است. لوله آلومینیوم به علت انعطاف پذیری در اثر فشار، باعث تغییرفرم پلاستیک شده و کمانش موضعی در قسمت وسط، بالا و پایین لوله ایجاد شده است.

شکل ۴-۱۱ نشان می‌دهد، لوله آلومینیوم-کامپوزیت با پارچه شیشه تحت اعمال بارگذاری فشاری قرار گرفته است. با اعمال بارگذاری فشاری تورق، سایش الیاف و جدایش فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیت ایجاد شده است.



شکل ۴-۱۰- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم تحت بارگذاری فشاری



شکل ۴-۱۱- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت پارچه شیشه تک جهت تحت بارگذاری فشاری



شکل ۴-۱۲- مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و کربنی دولایه تحت بارگذاری فشاری

در شکل ۴-۱۲ لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی الیاف کربنی و شیشه تحت بارگذاری فشاری مشاهده می شود. در شکل ۴-۱۲ در قسمت فوقانی، پس از اینکه لوله ها تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند، در برخی از لوله های آلومینیوم-کامپوزیت تغییر فرم پلاستیک و کمانش موضعی مشاهده شد. همچنین ترک و تورق در سایر مناطق مخصوصاً در قسمت طول لوله ایجاد شد. همان لوله آلومینیوم-کامپوزیت هیبریدی

الیاف کربن و شیشه در تصویر پایین مشاهده می‌شود که الیاف کربن و شیشه تحت بارگذاری از هم باز شده و بین آن‌ها درز ایجاد شده است.

مقایسه الیاف کربنی با الیاف شیشه ای در اثر بارگذاری فشاری :

۱- بالا بودن مدول الاستیسیته الیاف کربن

۲- انعطاف پذیر بودن ماده کربنی

۳- خم شدن یا انحنای شعاع بیشتر الیاف کربنی

۴- گسیختگی بسیار کم الیاف کربنی

تحت اعمال بارگذاری فشاری الیاف شیشه دچار سایش و تکه تکه شده و همچنین در آلومینیوم در اثر تغییر فرم پلاستیک، کمانش موضعی اتفاق افتاده است.

به طور کلی با مشاهدات و بررسی های صورت گرفته می توان نتیجه گرفت:

۱-افزایش استحکام فشاری لوله های آلومینیوم-کامپوزیت الیاف هیبریدی کربن و شیشه

۲- بهبود رفتار شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت الیاف هیبریدی کربن و شیشه

۳-جذب انرژی بالای لوله های آلومینیوم-کامپوزیت الیاف هیبریدی کربن و شیشه

به همین دلیل این لوله ها می‌تواند به عنوان ماده پیشنهادی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرند.

#### ۳-۴- بررسی مکانیزم شکست لوله های آلومینیوم-کامپوزیت در اثر بارگذاری خستگی

همانطور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می شود ۷ لوله، از سه نوع ماده (آلومینیوم، لوله آلومینیوم-کامپوزیت شیشه تک لایه و لوله آلومینیوم-کامپوزیت کربنی تک لایه)، با نیروهای ۳۵ kg و ۳۰، ۶ kg تحت آزمون خستگی خمشی قرار گرفتند. فقط یک لوله آلومینیوم با نیروی ۳۵ kg مورد آزمایش قرار گرفته و دو لوله از دو ماده کامپوزیتی با نیروی ۳۵ kg با دو بار تکرار و یک لوله از این دو ماده با نیروی ۳۰ kg مورد آزمون قرار گرفتند. پس از اعمال نیروی ۶ kg به دلیل عدم وجود نیروی کافی، هیچ شکستی صورت نگرفت.



شکل ۴-۱۳- تصویر لوله های آلومینیوم، آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی و شیشه ای در اثر بارگذاری خستگی خمشی

همانطور که در شکل ۴-۱۴ مشاهده می شود آلومینیوم در اثر بارگذاری خستگی خمشی با نیروی ۳۵ kg با تعداد سیکل ۲۰۴ دور با فرکانس ۵۰ Hz به صورت تغییر فرم پلاستیک و کمانش های موضعی در مرکز لوله ایجاد شده است.



در شکل ۴-۱۵ مشاهده می شود مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه در اثر بارگذاری خستگی خمشی با نیروی ۳۵ kg با تعداد سیکل ۶۰۰۵۹۷ و با فرکانس ۵۰ Hz، ابتدا در اثر بارگذاری اولیه، زمینه ترک برداشته، سپس با افزایش تعداد سیکل، به علت انعطاف پذیری ماده کربنی و مدول الاستیسیته بالا، ترک بین زمینه و الیاف عبور کرده و همچنین تورق بین زمینه و الیاف و جدایش بین کامپوزیت و آلومینیوم صورت گرفته و وقتی تعداد سیکل افزایش می یابد، روی آلومینیوم تاثیر گذاشته و ترک هایی روی لوله آلومینیوم ایجاد می شود و در نهایت شکست نهایی در لوله رخ می دهد. همچنین در جهت طول لوله، ترک های عرضی و ترک هایی در راستای الیاف ایجاد می شود.

در شکل ۴-۱۶ مشاهده می شود، لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه، با نیروی ۳۵ kg با تکرار مجدد مورد آزمون قرار گرفت. به علت نامناسب بودن ضخامت مقطع دو طرف لوله، آماده سازی و برشکاری صورت گرفت. طول لوله کوتاه و به ۵۵ mm رسید. انجام آزمون خستگی ۵ روز طول کشید و پس از اعمال ۱۰۲۷۸۱۹۹ سیکل با فرکانس ۵۰ Hz هیچ عیبی ایجاد نشده و شکست نهایی اتفاق نیفتاد.

به علت هیبریدی بودن ماده و همچنین وجود الیاف کربنی، با مشاهده ی شکل ۴-۱۷ می توان نتیجه گرفت که با افزایش استحکام خستگی، تغییر فرم و عیبی در ماده ایجاد نمی شود. مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی تک لایه، با نیروی ۳۰ kg با تعداد سیکل ۸۳۵۷۶ و با فرکانس ۵۰ Hz، ابتدا در اثر بارگذاری اولیه ترک های ریزی در زمینه ایجاد شد و پس از افزایش تعداد سیکل ها، جدایش فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیت اتفاق افتاد. دستگاه در حین کار ناگهان متوقف شد و الیاف کربنی در قسمت وسط طول لوله شکسته ولی هیچ شکستی در لوله آلومینیومی صورت نگرفت. مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی و همچنین الیاف شیشه ای تک لایه، با نیروی ۶ kg با تعداد سیکل بسیار زیاد با فرکانس ۵۰ Hz، در اثر بارگذاری خستگی منجر به شکست نشد؛ به همین دلیل تصویری از این لوله ها آورده نشده است.

در شکل ۴-۱۸ لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه ای تک لایه، با نیروی ۳۵ kg با تعداد سیکل ۴۷۰۰۶۸ و با فرکانس ۵۰ Hz مشاهده می شود. مکانیزم شکست این لوله به این صورت است که ابتدا زمینه در اثر بارگذاری اولیه ترک خورده، سپس با افزایش تعداد سیکل ها، به دلیل ترد بودن الیاف شیشه، ترک در الیاف ایجاد و رشد یافته و در ادامه الیاف از زمینه جدا شده ( تورق بین الیاف و زمینه) همچنین جدایش بین آلومینیوم و کامپوزیت ایجاد می شود. با افزایش تعداد سیکل ها، لوله آلومینیوم ترک خورده، سپس ترک در آلومینیوم و کامپوزیت به سرعت رشد کرده و در نهایت شکست نهایی در لوله رخ می دهد.

در شکل ۴-۱۹ مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت با شیشه تک لایه، با بارگذاری مجدد با نیروی ۳۵ kg و فرکانس ۵۰ Hz، مشاهده می شود که دستگاه در حین چرخش متوقف شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده ی این است که تعداد سیکل مناسبی از این آزمون به دست نیامده و رفتار لوله مطابق با نتایج سایر محققان نبود. امکان دارد به دلیل عیوبی که در لوله وجود داشت، آزمون موفقی صورت نگرفت و به همین منظور لوله آزمایش شده مورد قبول واقع نشد.

در شکل ۴-۲۰ مکانیزم شکست لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه تک لایه، با نیروی ۳۰ kg و فرکانس ۵۰ Hz، نشان داده شده است که هیچ شکستی صورت نگرفت.



شکل ۴-۱۴- لوله آلومینیوم در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۱۵- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۱۶- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۱۷- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه کربنی در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۱۸- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۱۹- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی



شکل ۴-۲۰- لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه در اثر بارگذاری خستگی

به طور کلی می توان نتیجه گرفت، مقاومت خستگی لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف تک لایه کربنی به علت استحکام به وزن بالا، انعطاف پذیری، مدول الاستیسیته بالا و عیوب کمتر نسبت به لوله آلومینیوم-کامپوزیت تک لایه شیشه بیشتر است. تحت اعمال بارگذاری خستگی وقتی لوله آلومینیوم داخل ماده کامپوزیتی قرار می گیرد، با افزایش تعداد سیکل به راحتی شکسته نمی شود خصوصا اگر از الیاف کربنی استفاده شود. پس نتیجه می گیریم لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی مقاومت به خستگی بالایی دارد. همچنین لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن به عنوان ماده پیشنهادی می تواند در صنعت خودرو استفاده شود؛ زیرا استحکام خستگی این لوله نسبت به لوله الیاف کربنی و شیشه بسیار بالاتر است.



فصل پنجم: نتیجه گیری



## ۵-۱- نتیجه گیری

- ۱- در آزمون خمشی، لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن دولایه، به علت هیبریدی بودن و رفتار شکست مناسب و همچنین استحکام بالای خمشی به میزان  $2239\text{ N}$ ، نسبت به سایر مواد مناسب تر است. همچنین به علت اینکه از آلومینیوم استفاده شد، شکستی صورت نگرفت و لوله فقط تغییر شکل پلاستیک پیدا کرد.
- ۲- بر اساس آزمون فشار مشاهده می شود که لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن دولایه، به علت رفتار شکست مناسب و استحکام بالا به میزان  $12647\text{ N}$  و همچنین به خاطر جذب بالای انرژی در اثر بارگذاری، ماده مناسب تری نسبت به بقیه مواد مورد آزمایش است.
- ۳- طبق مشاهدات آزمون خستگی، لوله آلومینیوم-کامپوزیت با الیاف کربنی، به علت استحکام به وزن بالاتر، انعطاف پذیری بهتر، مدول الاستیسیته بالاتر الیاف کربنی (نسبت به الیاف شیشه) و تحمل تعداد سیکل بیشتر مناسب تر از الیاف شیشه ای است.

منابع

- [1]Huang, Z. et al. Transverse crush of thin-walled rectangular section tubes. International Journal of Mechanical Sciences, 2017.
- [2]Natsuki, T. et al., Prediction of Bending Strength for Filament-Wound Composite Pipes. Journal of Reinforced Plastics And Composites, 2003.22(8).
- [3]Stefanovska, M. et al. Theoretical and Experimental Bending Properties of Composite Pipes. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering, 2015.9(6).
- [4]Starbuck, M. et al., Energy Absorbing Damage Mechanisms in Progressive Crushing of Composite Tubes: P. 0- 433.
- [5]Khalid, Y.A., et al., Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts. Materials and Design, 2007 : p. 329–334.
- [6]Tarakcioglu, N. et al. Fatigue failure behavior of glass/epoxy  $\pm 55$  filament wound pipes under internal pressure. Composites Science and Technology, 2004: p. 703–708.
- [7]spencer, B. Hull, D. Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe. Composites, 1978.
- [8]Shin, D.K. et al. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three point bending. Composites, 2014: p. 397–407.
- [9]Shin, K.C. et al. Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability. Composite Structures, 2002: p. 279–287.
- [10]Liu, R., L. Day, M., Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application. Thin-Walled Structures, 2008 : p. 442–450.
- [11]Kecman, D., Bending collapse of rectangular and square section tubes. Int. J. Mech. Sci, 1983 : p. 623-636.
- [12]Kaynak, C., Mat, O., Uniaxial fatigue behavior of filament-wound glass fiber/epoxy composite tubes. Composites Science and Technology, 2001 : p. 1833–1840.
- [13]Jung, D.W., et al., Aluminum–GFRP hybrid square tube beam reinforced by a thin composite skin layer. Composites, 2009 : p. 1558–1565.
- [14]Eksi, S., Genel, K., Bending response of hybrid composite tubular beams. Thin-Walled Structures, 2013 : p. 329–336.
- [15]Capela, C., et al., Fatigue strength of tubular carbon fibre composites under bending/torsion loading. International Journal of Fatigue, 2015 : p. 216–222.

[16]Xia, M., et al., Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes. Composite Structures, 2002 : p. 201–210.

[17]Hamed, A.F., et al., Effects of Winding Angles on the Strength of Filament Wound Composite Tubes Subjected to Different Loading Modes. Polymers & Polymer Composites, 2007.15(3).

[18]Saggar, P., Experimental Study Of Laminated Composite Tubes Under Bending. Master Of Science In Materials Science And Engineering, 2007.

[19]Metodieva, P., et al., Design Of Polymer Composite Pipes Produced By Filament Winding Technology. Scientific Proceeding XII International Congress "Machines, Technologies, Materials, 2015 : p. 123 – 125.

[20]Putic, S., et al., Bending Properties of Glass-Polyester Composite Pipes.

[21]Wierzbicki, T. et al., Stress Profiles In Thin-Walled Prismatic Column Subjected To Crush Loading--II. Bending. Composites & Structures, 1994. 51(6) : p. 625-641.

## Abstract

Tubular safety structures are made in order to decrease the injury of passengers. The researchers previously have made these tubes from lightweight aluminum, and then made of composite materials to enhance the strength against bending loads. These tubes, although contain a high flexural strength, but break in the zone of elastic deformation. Due to the weak failure behavior of these tubes, the research approach is directed to the hybrid tubes. Thin-walled hybrid tubes (containing aluminium tube covered by composite) with circular cross-section are produced by filament winding and hand-layup methods to improve flexural strength and fracture behavior. In filament winding, the filaments are impregnated by epoxy resin and are wound by angle of  $25^\circ$ . Finally, the tubes are cured at  $100^\circ\text{C}$  for 2 hours. Characterizations are performed by scanning electron microscopy (SEM), bending, fatigue, and compression tests. Fibers microstructures, fracture cross-sections, as well as defects such as cracks, delamination, fragmentation and tear are investigated by SEM analysis. In the compression test, the results show that by increasing the composite thickness, the compressive strength increase. The compressive strength of carbon tubes is also increased compared to glass fiber. In the fatigue test, it is observed that the epoxy/CF tubes, due to higher flexibility and elasticity modulus, tolerate more fatigue cycles in comparison to the glass fiber tube.

**Key words:** Tubes, Composite, Aluminum, Carbon and Glass Hybrid Fiber, Epoxy Resin, Filament winding, Failure Analysis, Flexural Strength, Compressive Strength, Fatigue Strength



Shahrood University of  
Technology

Faculty of Chemical and Materials Engineering  
M.Sc. Thesis in Composite Engineering

# **Evaluation Of Mechanical Properties Of Aluminium-Composite Tubes By Filament Winding And Hand Lay-Up Method For Used In Automobile Industry**

**By:** Hani Yadegari

**Supervisors:**

Dr. Reza Taherian

Dr. Soheil Darushi

September 2018