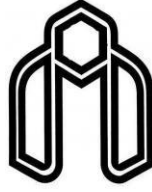


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی

عنوان
بررسی تجربی و عددی رفتار کامپوزیت الیاف-فلز تقویت شده با نانوذرات گرافن تحت ضربه‌ی
سرعت پایین

نگارش
علی حمیدی جلدہ باخانی

اساتید راهنما
دکتر مهدی گردویی
دکتر محمدباقر نظری

استاد مشاور
دکتر حسین توزنده جانی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۳۰۸۷/۱۵
تاریخ: ۹۷/۱۲/۴

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 علی حمیدی جلده باخانی با شماره دانشجویی ۹۵۰۴۹۷۴ رشته مهندسی هوافضا، گرایش سازه‌های هوایی تحت عنوان بررسی تجربی و عددی رفتار کامپوزیت الیاف-فلز تقویت شده با نانوذرات گرافن تحت ضربه سرعت پایین که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می-گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر حسین توژنده جانی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید علی سینا	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید مهدی حسینی قراش	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محمد جعفری	دانشیار	

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

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم‌نامه

تقدیم به وجود مبارک زیباترین یوسف خلقت، موعود مهربانی حضرت مهدی (عج) که لحظه لحظه‌ی
حیاطمان را وامدار اویم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه‌ی وجودشان بیاسایم و از
ریشه‌ی آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه‌ی وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

سپاس‌گزاری

خداوند بزرگ را شاکرم که یاری‌ام کرد تا بخش دیگری از مسیر زندگی را بپیمایم. پیمودن این مسیر بدون لطف بی‌دریغ بسیاری از اساتید و دوستان عزیز بسیار دشوار می‌نمود. لذا بر خود وظیفه می‌دانم در این فرصت از ایشان یاد کرده و حداقل مراتب سپاس‌گزاری را بجای آورم.

ابتدا از اساتید گران‌قدرم آقایان دکتر مهدی گردویی، دکتر محمدباقر نظری و دکتر حسین توزنده‌جانی که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند، کمال سپاس را دارم.

از مسئولین محترم آزمایشگاه‌های خواص مکانیکی، شکل‌دهی، ماشین‌ابزار، سرامیک‌های پیشرفته که طی این تحقیق، همکاری صمیمانه‌ای با بنده داشتند، متشکرم.

همچنین لازم است از تمامی اساتید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه شاهرود که در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد از حضورشان بهره‌ی علمی و معنوی بردم تشکر می‌کنم.

و در پایان از همه‌ی دوستان ارجمندم که مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند، قدردانی و تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب حسین جباری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک بر روی اهداف سرامیک/کامپوزیت تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی گردویی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز، ورق مرکبی است که از ترکیب کامپوزیت پلیمری و ورق‌های فلزی تشکیل شده است و کاربردهای وسیعی در سازه‌های هوافضا و دفاعی پیدا کرده، لذا در سال‌های اخیر تحلیل بارگذاری ضربه‌ای بر روی این نوع سازه‌ها مورد توجه محققین بوده است. در این پژوهش، به بررسی رفتار کامپوزیت الیاف-فلز تقویت‌شده با نانوذرات گرافن تحت ضربه‌ی سرعت پایین با ترکیب روش تجربی و عددی پرداخته شده است. به‌وسیله‌ی آزمون کشش رزین، از بین انواع مختلف نانوذرات گرافن، اکسید نانوغرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی به‌عنوان نوع بهینه، انتخاب و از بین درصدهای وزنی ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۲، افزودن ۰/۵ وزنی آزمون، از خواص مکانیکی بهتری برخوردار بود. نمونه‌های کامپوزیت الیاف-فلز در حالت‌های بدون نانوغرافن، با اکسید نانوغرافن چندلایه و تک‌لایه و همچنین ترکیب رزین اپوکسی و چسب پلی‌اورتان ساخته شد. آزمون‌های کشش تک‌محوری، پوست‌کنی و ضربه‌ی سرعت‌پایین بر روی نمونه‌های فوق انجام شد. همه‌ی نمونه‌های ذکرشده نسبت به نمونه‌ی بدون نانوغرافن، مقاومت به‌ضربه‌ی بهتری از خود نشان دادند. همچنین نتایج آزمون پوست‌کنی نشان داد، افزودن نانوغرافن چندلایه و تک‌لایه به رزین اپوکسی، به ترتیب باعث افزایش ۲۰۶٪ و ۳۹/۴٪ خواص چسب شده است. براساس نتایج آزمون پوست‌کنی، المان چسب در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. نتایج آزمون عددی ضربه با نتایج تجربی آن، از تطابق خوبی برخوردار بودند.

واژگان کلیدی: کامپوزیت الیاف-فلز، الیاف شیشه، اپوکسی، ضربه‌ی سرعت پایین، نانوذرات گرافن

فهرست عنوان‌ها

د	تقدیم‌نامه.....
ه	سپاسگزاری.....
و	تعهد نامه.....
ز	چکیده.....
ح	فهرست عنوان‌ها.....
ل	فهرست شکل‌ها.....
ص	فهرست جدول‌ها.....
ش	فهرست نشانه‌ها.....
۱	فصل ۱ پیش‌گفتار.....
۱	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- پیشینه‌ی تحقیق.....
۴	۳-۱- معرفی پایان‌نامه.....
۵	فصل ۲ ورق کامپوزیتی الیاف-فلز.....
۵	۱-۲- کامپوزیت.....
۶	۲-۱-۱- انواع رزین.....
۷	۲-۱-۲- انواع الیاف.....
۷	۲-۱-۳- فرآیندهای ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری.....
۱۱	۲-۲- نانوکامپوزیت.....
۱۱	۲-۲-۱- نانوگرافن.....
۱۲	۳-۲- کامپوزیت الیاف-فلز (FML).....
۱۳	۲-۳-۱- مزایای FML.....
۱۳	۲-۳-۲- انواع FML.....
۱۴	۲-۳-۳- کاربرد FML.....
۱۵	۲-۴- آزمون‌های ضربه بر روی نمونه‌های کامپوزیتی.....
۱۷	فصل ۳ مواد و روش تحقیق: تجربی و عددی.....

۱۸	۱-۳ معرفی مواد لازم در ساخت ورق کامپوزیتی الیاف-فلز
۱۸	۱-۱-۳ ورق فلزی
۱۸	۲-۱-۳ هسته‌ی کامپوزیتی
۱۹	۳-۱-۳ نانوذرات گرافن
۲۰	۲-۳ مراحل توزیع نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی
۲۱	۳-۳ ساخت نمونه‌های آزمون کشش رزین
۲۱	۱-۳-۳ مراحل ساخت نمونه‌های آزمون کشش رزین
۲۲	۲-۳-۳ نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوذرات گرافن
۲۳	۳-۳-۳ نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب نوع بهینه‌ی نانوگرافن
۲۴	۴-۳-۳ نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب درصد بهینه‌ی نانوگرافن
۲۵	۵-۳-۳ نمونه‌های آزمون کشش رزین اپوکسی با اکسید نانوذرات تک‌لایه‌ی گرافن
۲۶	۴-۳ نحوه‌ی ساخت نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی
۲۸	۵-۳ ساخت ورق FML
۲۸	۱-۵-۳ مواد
	۲-۵-۳ ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با و بدون نانوگرافن برای آزمون ضربه‌ی سرعت پایین و آزمون
۲۸	کشش FML
۳۳	۳-۵-۳ ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان
۳۵	۶-۳ طراحی آزمون‌های تجربی
۳۵	۱-۶-۳ آزمون کشش
۳۵	۲-۶-۳ آزمون فشردن استاتیکی با سنبه‌ی نیم‌کروی
۳۶	۳-۶-۳ آزمون ضربه
۳۸	۴-۶-۳ آزمون پوست‌کنی
۳۸	۷-۳ شبیه‌سازی عددی
۳۸	۱-۷-۳ مدل‌سازی هندسی آزمون پوست‌کنی
۴۱	۲-۷-۳ مدل‌سازی هندسی ضربه‌ی سرعت پایین
۴۳	۳-۷-۳ معیار آسیب

فصل ۴ نتایج و بحث ۴۷

۴۷	۱-۴ مقدمه
۴۷	۲-۴ نتایج تجربی آزمون کشش
۴۷	۱-۲-۴ نتایج آزمون کشش آلومینیوم T۳-۲۰۲۴
۴۸	۲-۲-۴ نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی بدون نانوگرافن
۴۹	۳-۲-۴ نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب نوع بهینه‌ی نانوگرافن

۵۱	..... اثر نوع نانوغرافن و انتخاب نوع بهینه
۵۳	..... اثر زمان توزیع نانوذرات گرافن در روش آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین
۵۴	..... اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین
۵۵	..... نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب درصد بهینه‌ی اکسید نانوغرافن نوع صنعتی
۵۸	..... نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون اکسید نانوغرافن نوع صنعتی
۶۲	..... نتایج آزمون کشش ورق FML با و بدون اکسید نانوغرافن نوع صنعتی
۶۵	..... نتایج تجربی آزمون ضربه‌ی سرعت پایین
۶۷	..... نتایج آزمون استاتیکی ورق FML
۶۸	..... نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML بدون نانوغرافن
۷۰	..... نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با اکسید نانوغرافن نوع صنعتی
۷۲	..... نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با اکسید نانوغرافن تک‌لایه
۷۳	..... نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان
۷۷	..... بررسی میزان انحنای ایجادشده و نحوه‌ی تغییرشکل در اثر ضربه
۸۱	..... بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها بعد از برش
۸۲	..... نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی
۸۲	..... نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML بدون نانوغرافن
۸۳	..... نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML با اکسید نانوغرافن نوع صنعتی
۸۴	..... نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML با اکسید نانوغرافن تک‌لایه
۸۴	..... نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان
۸۶	..... نتایج شبیه‌سازی عددی
۸۶	..... نتایج شبیه‌سازی عددی آزمون پوست‌کنی
۸۷	..... نتایج عددی آزمون ضربه بر روی کامپوزیت الیاف-فلز بدون نانوغرافن
۹۱	..... بررسی میزان فرورفتگی و نحوه‌ی تغییرشکل در آزمون عددی
۹۳	..... بررسی خرابی در هسته‌ی کامپوزیتی با معیار خرابی هاشین
۹۵	..... بررسی خرابی در ورق آلومینیوم با معیار خرابی جانسون-کوک
۹۶	..... مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج تجربی
۹۶	..... مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی در آزمون پوست‌کنی
۹۶	..... مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی در آزمون ضربه
۱۰۱	..... فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها
۱۰۱	..... ۱-۵- نتیجه‌گیری
۱۰۶	..... ۲-۵- پیشنهادها

۱۱۲.....	پیوست ۱
۱۱۳.....	پیوست ۲
۱۱۴.....	پیوست ۳
۱۱۵.....	پیوست ۴
۱۱۶.....	پیوست ۵
۱۱۷.....	پیوست ۶
۱۱۸.....	پیوست ۷
۱۱۹.....	پیوست ۸
۱۲۰.....	پیوست ۹
۱۲۱.....	پیوست ۱۰
۱۲۲.....	پیوست ۱۱
۱۲۳.....	پیوست ۱۲
۱۲۴.....	پیوست ۱۳
۱۲۵.....	پیوست ۱۴
۱۲۶.....	پیوست ۱۵
۱۲۷.....	پیوست ۱۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی ۸
- شکل ۲-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پاشش رزین ۸
- شکل ۳-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش الیاف پیچی ۹
- شکل ۴-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش RTM ۹
- شکل ۵-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پالتروژن ۱۰
- شکل ۶-۲- طرحواره‌ی ساخت کامپوزیت به روش محفظه‌ی خلاء ۱۰
- شکل ۷-۲- ساختار اتمی صفحه‌ی گرافن ۱۲
- شکل ۸-۲- نحوه‌ی لایه‌چینی ورق FML ۱۲
- شکل ۹-۲- تقسیم‌بندی FML ۱۳
- شکل ۱۰-۲- بخش‌های ساخته شده‌ی هواپیمای ایرباس A380 از جنس FML (GLARE) ۱۴
- شکل ۱۱-۲- انواع ضربه از نظر سرعت، الف) ضربه سرعت پایین، ب) ضربه سرعت بالا، ج) ضربه بیش از حد پرسرعت ۱۵
- شکل ۱۲-۲- طرحواره‌ی دستگاه آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ۱۶
- شکل ۱-۳- نمونه‌های آزمون کشش ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ ۱۸
- شکل ۲-۳- الیاف شیشه ریزبافت دوجبهته ۱۸
- شکل ۳-۳- الف) اکسید نانوذرات گرافن تک‌لایه، ب) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه ۱۹
- شکل ۴-۳- تصاویر SEM نانوذرات گرافن، الف) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی، ب) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی ۲۰
- شکل ۵-۳- الف) دستگاه آلتراسونیک Sonicator-Q700، ب) توزیع نانوغرافن در رزین اپوکسی و داخل محلول آب و یخ با دستگاه آلتراسونیک، ج) همزن مکانیکی ۲۱
- شکل ۶-۳- قالب آلومینیومی برای ساخت نمونه‌ی آزمون کشش رزین ۲۲
- شکل ۷-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوغرافن ۲۲

- شکل ۳-۸- نمونه‌های ساخته‌شده با انواع مختلف نانوذرات گرافن ۲۳
- شکل ۳-۹- نمونه‌های ساخته‌شده با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات گرافن نوع صنعتی ۲۵
- شکل ۳-۱۰- نمونه‌های آزمون کشش رزین نانوذرات تک‌لایه‌ی گرافن اکساید ۲۵
- شکل ۳-۱۱- ساخت هسته‌ی کامپوزیتی به روش خلاء ۲۷
- شکل ۳-۱۲- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی در دو زاویه‌ی الیاف 0° و 45° ۲۷
- شکل ۳-۱۳- نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی با زاویه‌ی الیاف 0° ۲۸
- شکل ۳-۱۴- برخی مراحل آماده‌سازی سطح آلومینیوم ۳۰
- شکل ۳-۱۵- مراحل لایه‌چینی نمونه‌های FML، الف) قراردادن ورق‌های آلومینیومی بر روی شیشه، ب) لایه‌چینی الیاف شیشه، ج) قراردادن ورق‌های آلومینیومی بر روی الیاف لایه‌چینی‌شده، د) قراردادن شیشه بر روی نمونه‌ها ۳۱
- شکل ۳-۱۶- ساخت نمونه‌های آزمون پوست‌کنی، الف) ورق آلومینیوم با خم 90° درجه، ب) قراردادن ورق آلومینیومی فوقانی بعد از لایه‌چینی الیاف ۳۱
- شکل ۳-۱۷- نمونه‌های ساخته‌شده‌ی ضربه، الف) FML بدون نانوغرافن، ب) FML با نانوغرافن چندلایه، ج) FML با نانوغرافن تک‌لایه ۳۲
- شکل ۳-۱۸- نمونه‌های ساخته‌شده‌ی آزمون پوست‌کنی ۳۲
- شکل ۳-۱۹- ورق پلی‌اورتان استفاده شده ۳۳
- شکل ۳-۲۰- نحوه‌ی لایه‌چینی FML ساخته‌شده با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان ۳۴
- شکل ۳-۲۱- تصویر دستگاه پرس گرم کارگاه شکل‌دهی برای ساخت FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان ۳۴
- شکل ۳-۲۲- نمونه‌های FML ساخته‌شده با پلی‌اورتان برای آزمون ضربه ۳۴
- شکل ۳-۲۳- الف) دستگاه کشش اینسترون آزمایشگاه خواص مکانیکی، ب) آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی، ج) نمونه‌ی آزمون کشش رزین اپوکسی ۳۵
- شکل ۳-۲۴- دستگاه آزمون کشش/فشار انیورسال آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر ۳۶

- شکل ۳-۲۵- دستگاه آزمون سقوط آزاد سرعت پایین آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر، الف) سنسور تشخیص ضربه‌زننده برای شروع داده‌برداری، ب) شتاب‌سنج، ج) ضربه‌زننده، د) پردازشگر اطلاعات و ه) قید و بست نمونه‌ی ضربه ۳۷
- شکل ۳-۲۶- آزمون پوست‌کنی بر روی نمونه‌ی FML ۳۸
- شکل ۳-۲۷- الف) شکل هندسی نمونه‌ی آزمون پوست‌کنی و اندازه‌های هسته‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیوم برطبق استاندارد ASTM-D1876، ب) نحوه‌ی لایه‌چینی نمونه آزمون پوست‌کنی از نمای جانبی ۳۹
- شکل ۳-۲۸- هندسه و نحوه‌ی لایه‌چینی ورق FML ۴۱
- شکل ۳-۲۹- نحوه‌ی مش‌بندی ورق FML ۴۲
- شکل ۳-۳۰- نمودار همگرایی نتایج، انرژی جذب‌شده بر حسب تعداد المان‌ها ۴۳
- شکل ۴-۱- نمونه‌های آزمون کشش آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ پس از انجام آزمون ۴۸
- شکل ۴-۲- نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوغرافن پس از انجام آزمون ۴۸
- شکل ۴-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب نوع بهینه‌ی نانوغرافن پس از انجام آزمون کشش ۴۹
- شکل ۴-۴- نتایج آزمون کشش رزین با استفاده از نانوذرات گرافن مختلف، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست ۵۲
- شکل ۴-۵- اثر زمان توزیع نانوذرات به روش آلتراسونیک بر روی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست ۵۴
- شکل ۴-۶- اثر دامنه‌ی پراب آلتراسونیک بر روی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست ۵۵
- شکل ۴-۷- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب درصد بهینه‌ی اکسید نانوغرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست ۵۸
- شکل ۴-۸- نمونه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 45° بدون نانوذرات گرافن پس از کشش ۵۹
- شکل ۴-۹- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه بدون نانوذرات گرافن پس از انجام آزمون کشش ۶۰
- شکل ۴-۱۰- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با نانوغرافن چندلایه نوع صنعتی پس از انجام آزمون کشش ۶۰
- شکل ۴-۱۱- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با نانوغرافن تک‌لایه پس از انجام آزمون کشش ۶۱

- شکل ۴-۱۲- بررسی اثر نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه بر خواص مکانیکی هسته‌ی کامپوزیتی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست ۶۲
- شکل ۴-۱۳- نمودارهای نیرو-زمان آزمون کشش FML بدون نانوگرافن، الف) نمونه‌ی TN01، ب) نمونه‌ی TN02 و ج) نمونه‌ی TN03 ۶۳
- شکل ۴-۱۴- نمودارهای نیرو-زمان آزمون کشش FML با نانوگرافن نوع صنعتی، الف) نمونه‌ی TL01، ب) نمونه‌ی TL02 و ج) نمونه‌ی TL03 ۶۴
- شکل ۴-۱۵- نمونه‌ها پس از اعمال ضربه در انرژی J ۲۵، الف) سطح برخورد، ب) سطح پشت ۶۶
- شکل ۴-۱۶- نمونه‌ها پس از اعمال ضربه در انرژی J ۴۰، الف) سطح اصلی برخورد، ب) سطح پشت ۶۶
- شکل ۴-۱۷- نمونه‌ها پس از انجام آزمون استاتیکی، الف) سطح برخورد در نمای دور و نزدیک ب) سطح پشت در نمای دور و نزدیک ۶۷
- شکل ۴-۱۸- نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN05) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۲۵، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۶۸
- شکل ۴-۱۹- نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN06) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۴۰، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۶۹
- شکل ۴-۲۰- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL05) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۲۵، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۷۰
- شکل ۴-۲۱- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL06) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۴۰، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۷۱
- شکل ۴-۲۲- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (ILS02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۲۵، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۷۲
- شکل ۴-۲۳- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (ILS01) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۴۰، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیرو-جابجایی و و) جابجایی-زمان ۷۳

- شکل ۴-۲۴- نمودارهای نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن (IPN01) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۲۵، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان ۷۴
- شکل ۴-۲۵- نمودارهای نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن (IPN02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۴۰، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان ۷۵
- شکل ۴-۲۶- نمودارهای میله‌ای نمونه‌های تحت انرژی J ۲۵، (الف) پارامتر انرژی جذب‌شده، (ب) پارامتر نیروی بیشینه ۷۶
- شکل ۴-۲۷- نمودارهای میله‌ای نمونه‌های تحت انرژی J ۴۰، (الف) پارامتر انرژی جذب‌شده، (ب) پارامتر نیروی بیشینه ۷۷
- شکل ۴-۲۸- مسیر انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی ۲۵ ژول تجربی ۷۸
- شکل ۴-۲۹- نمودار مسیر انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۴۰ تجربی ۸۰
- شکل ۴-۳۰- سطح برخورد و صفحه‌ی پشت در اثر برخورد ضربه با انرژی J ۴۰ ۸۱
- شکل ۴-۳۱- سطح مقطع برش خورده نمونه‌ی، (الف) بدون نانوگرافن، (ب) با نانوگرافن چندلایه، (ج) با نانوگرافن تک‌لایه و (د) با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن ۸۱
- شکل ۴-۳۲- نمونه‌های بدون نانوگرافن پس از انجام آزمون پوست‌کنی ۸۳
- شکل ۴-۳۳- نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه پس از انجام آزمون پوست‌کنی ۸۳
- شکل ۴-۳۴- نمونه‌های با نانوگرافن تک‌لایه پس از انجام آزمون پوست‌کنی ۸۴
- شکل ۴-۳۵- نمونه‌ی با پلی‌اورتان پس از انجام آزمون پوست‌کنی ۸۵
- شکل ۴-۳۶- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمون تجربی پوست‌کنی ۸۶
- شکل ۴-۳۷- نمودارهای آزمون عددی پوست‌کنی ۸۷
- شکل ۴-۳۸- مراحل اعمال ضربه‌ی سرعت پایین بر روی نمونه، از نمای جانبی و برش خورده ۸۸
- شکل ۴-۳۹- جدایش بین ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی در اثر ضربه ۸۹
- شکل ۴-۴۰- نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN25) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی J ۲۵ ۹۰

- شکل ۴-۴۱- نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN40) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی J ۴۰..... ۹۱
- شکل ۴-۴۲- نمودارهای مسیر انحنای ایجادشده در آزمون عددی ضربه با انرژی J ۲۵..... ۹۲
- شکل ۴-۴۳- نمودارهای مسیر انحنای ایجادشده در آزمون عددی ضربه با انرژی J ۴۰..... ۹۳
- شکل ۴-۴۴- گسیختگی ماتریس در نمونه‌ی بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰..... ۹۴
- شکل ۴-۴۵- گسیختگی ماتریس در نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه در انرژی J ۴۰..... ۹۴
- شکل ۴-۴۶- خرابی آلومینیوم در نمونه‌ی بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰..... ۹۵
- شکل ۴-۴۷- خرابی آلومینیوم در نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه در انرژی J ۴۰..... ۹۵
- شکل ۴-۴۸- مقایسه‌ی نمودارهای آزمون پوست‌کنی در روش‌های تجربی و عددی..... ۹۶
- شکل ۴-۴۹- مقایسه‌ی نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه در انرژی J ۲۵..... ۹۸
- شکل ۴-۵۰- مقایسه‌ی نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه در انرژی J ۴۰..... ۹۹

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳-۱- مشخصات اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی و نوع صنعتی ۲۰
- جدول ۲-۳-۲- نمونه‌های آزمون کشش رزین با ۰/۵ درصد وزنی نانوغرافن ۲۳
- جدول ۳-۳-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین با درصدهای وزنی مختلف ۲۴
- جدول ۴-۳-۴- مشخصات ساخت نمونه آزمون کشش رزین نانوذرات گرافن تک‌لایه ۲۵
- جدول ۵-۳-۵- مشخصات مکانیکی ورق آلومینیوم ۴۰
- جدول ۶-۳-۶- اطلاعات تنش-کرنش پلاستیک آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ ۴۰
- جدول ۷-۳-۷- مشخصات مکانیکی هسته‌ی کامپوزیتی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس ۴۱
- جدول ۸-۳-۸- اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی آسیب هشین هسته‌ی کامپوزیتی ۴۴
- جدول ۹-۳-۹- ضرایب و ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ ۴۶
- جدول ۱-۴-۱- نتایج آزمون کشش رزین بدون نانوغرافن ۴۸
- جدول ۲-۴-۲- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با ۵۰ دقیقه توزیع
آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $72\ \mu m$ ۴۹
- جدول ۳-۴-۳- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با ۳۰ دقیقه توزیع
آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $96\ \mu m$ ۵۰
- جدول ۴-۴-۴- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با ۳۰ دقیقه توزیع
آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $72\ \mu m$ ۵۰
- جدول ۵-۴-۵- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و
دامنه‌ی ارتعاش $72\ \mu m$ ۵۰
- جدول ۶-۴-۶- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک
و دامنه‌ی ارتعاش $72\ \mu m$ ۵۱
- جدول ۷-۴-۷- نتایج آزمون کشش رزین با نانوغرافن تک‌لایه با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش
 $72\ \mu m$ ۵۱

- جدول ۴-۸- نتایج میانگین آزمون کشش رزین با انواع مختلف نانوگرافن و میزان تغییرات آنها نسبت به نمونه‌ی رزین بدون نانوگرافن ۵۲
- جدول ۴-۹- مقایسه‌ی اثر زمان توزیع نانوذرات گرافن در روش آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین ۵۳
- جدول ۴-۱۰- مقایسه‌ی اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین ۵۵
- جدول ۴-۱۱- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۰/۵٪ وزنی نانوگرافن ۵۶
- جدول ۴-۱۲- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۰/۷۵٪ وزنی نانوگرافن ۵۶
- جدول ۴-۱۳- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۱٪ وزنی نانوگرافن ۵۶
- جدول ۴-۱۴- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۱/۲۵٪ وزنی نانوگرافن ۵۷
- جدول ۴-۱۵- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۲٪ وزنی نانوگرافن ۵۷
- جدول ۴-۱۶- مقایسه‌ی نتایج درصد‌های وزنی مختلف نانوگرافن بر خواص مکانیکی ۵۷
- جدول ۴-۱۷- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده‌ی بدون نانوگرافن با زاویه الیاف 45° ۵۹
- جدول ۴-۱۸- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن ۵۹
- جدول ۴-۱۹- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با نانوگرافن نوع صنعتی ۶۰
- جدول ۴-۲۰- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن تک‌لایه ۶۱
- جدول ۴-۲۱- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های کشش کامپوزیت بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه ۶۱
- جدول ۴-۲۲- نتایج آزمون کشش FML بدون نانوگرافن ۶۳
- جدول ۴-۲۳- نتایج آزمون کشش FML با نانوگرافن نوع صنعتی ۶۴
- جدول ۴-۲۴- نتایج میانگین و درصد اختلاف بین FML بدون نانوگرافن و FML با نانوگرافن چندلایه ۶۵
- جدول ۴-۲۵- نتایج آزمون استاتیکی ۶۷
- جدول ۴-۲۶- نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی J ۲۵ ۶۸
- جدول ۴-۲۷- نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰ ۶۹
- جدول ۴-۲۸- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی J ۲۵ ۷۰

- جدول ۴-۲۹- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی ۴۰ ژول ۷۱
- جدول ۴-۳۰- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌ی FML با نانوگرافن تک‌لایه در انرژی J ۲۵ ۷۲
- جدول ۴-۳۱- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌ی FML با لایه‌ی پلی‌اورتان در انرژی J ۲۵ و J ۴۰ ۷۳
- جدول ۴-۳۲- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی J ۲۵ ۷۵
- جدول ۴-۳۳- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی J ۴۰ ۷۶
- جدول ۴-۳۴- نتایج و مقایسه نتایج میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۲۵ ۷۸
- جدول ۴-۳۵- نتایج و مقایسه نتایج میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۴۰ ۷۹
- جدول ۴-۳۶- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۸۲
- جدول ۴-۳۷- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۸۳
- جدول ۴-۳۸- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۸۴
- جدول ۴-۳۹- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن ۸۴
- جدول ۴-۴۰- مقایسه‌ی نتایج میانگین آزمون تجربی پوست‌کنی ۸۵
- جدول ۴-۴۱- ضرایب به‌دست آمده برای المان چسب در آزمون عددی پوست‌کنی ۸۷
- جدول ۴-۴۲- نتایج انرژی جذب‌شده در آزمون عددی نمونه‌ی بدون نانوگرافن تحت انرژی J ۲۵ ۸۹
- جدول ۴-۴۳- نتایج انرژی جذب‌شده در آزمون عددی نمونه‌ی بدون نانوگرافن تحت انرژی J ۴۰ ۹۰
- جدول ۴-۴۴- نتایج و مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون عددی با انرژی J ۲۵ ۹۱
- جدول ۴-۴۵- نتایج و مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون عددی با انرژی J ۴۰ ۹۲
- جدول ۴-۴۶- مقایسه‌ی نتایج آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۲۵ ۹۷
- جدول ۴-۴۷- مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون تجربی و عددی ضربه، با انرژی J ۲۵ ۹۷
- جدول ۴-۴۸- مقایسه‌ی نتایج آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۴۰ ۹۸
- جدول ۴-۴۹- مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون تجربی و عددی ضربه، با انرژی J ۴۰ ۹۹

فهرست نشانه‌ها

T^*	دمای بی‌بعد	A, B, C	ثابت ماده
T_{\max} (N/mm)	حداکثر نیروی جدایش	a	شتاب ضربه‌زننده
T_{\min} (N/mm)	حداقل نیروی جدایش	d	پارامترهای شکست
T_{av} (N/mm)	نیروی جدایش میانگین	E	مدول کشسان
U	انرژی برخورد	E_1	مدول کشسان در جهت 0°
V	سرعت	E_2	مدول کشسان در جهت 90°
V_0	سرعت اولیه	E_{45}	مدول کشسان در جهت 45°
V_m	سرعت ضربه‌زننده پس از جداشدن	e_f	تغییر طول
W	انرژی	F	نیرو
W_a	انرژی جذب‌شده	G_{12}	مدول برشی
X	جابجایی	M	جرم ضربه‌زننده
X_t	استحکام کششی طولی	m, n	ثابت ماده
X_c	استحکام فشاری طولی	p	فشار یا تنش میانگین
Y_c	استحکام کششی عرضی	q	تنش میزز
Y_c	استحکام کششی عرضی	S	استحکام برشی صفحه‌ای ماده
$\dot{\epsilon}_0$	نرخ کرنش مرجع	S_T	استحکام برشی ماتریس
$\dot{\epsilon}_p$	نرخ کرنش پلاستیک موثر	T_m (C°)	دمای ذوب ماده
ϵ_p	کرنش پلاستیک موثر	T_r (C°)	دمای محیط

σ	تنش جریان
σ_{11}	تنش در الياف
σ_{12}	تنش در الياف
ν_{12}	ضريب پواسون
ω	پارامتر آسيب

فصل ۱ پیش‌گفتار

۱-۱- مقدمه

مواد مرکب موادی چند جزئی هستند که خواص آنها در مجموع از هر کدام از اجزا بهتر و اجزای مختلف کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. نخستین بار مواد مرکب^۱ به صورت گسترده در زمان جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفت. ولی امروزه محصولات کامپوزیتی در صنایع مختلفی مانند هوافضا، اتوموبیل‌سازی، نظامی، ورزشی و پزشکی به کار می‌رود. کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز^۲ ورق‌های مرکبی هستند که از ترکیب کامپوزیت‌های پلیمری و ورق‌های فلزی تشکیل شده‌اند. در صورت طراحی مناسب، FMLها نسبت به چندلایه‌های کامپوزیتی دارای مقاومت خستگی و مقاومت در برابر ضربه بالاتری خواهند بود. بسیاری از سازه‌های مورد استفاده در بدنه‌ی هواپیماها، از آلیاژهای آلومینیوم ساخته می‌شوند که توسط پرچ به هم متصل شده‌اند. از آنجا که پیش‌بینی می‌شود ترافیک هوایی افزایش چشم‌گیری پیدا کرده و تعداد مسافران افزایش یابند، نیاز به فناوری که تحمل پذیرش این تعداد مسافر را داشته باشد، به‌خوبی مشخص است. در ایجاد این فناوری، کاستن از وزن سازه، مهم‌ترین پارامتر به حساب می‌آید. کامپوزیت‌ها با وجود مزایای متعددی چون وزن کم، استحکام ویژه و سفتی ویژه‌ی بالا، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، معایبی نیز دارند که سبب عدم استفاده‌ی عمده از آنها در سازه‌های باربر اصلی شده است که از جمله این معایب، می‌توان به چقرمگی کم آنها و همچنین مقاومت کم در برابر بارهای ضربه‌ای اشاره کرد.

^۱ Composites

^۲ Fiber Metal Laminates (FML)

ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی به دو صورت کلی ضربه با سرعت پایین^۱ و ضربه با سرعت بالا^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. در سال‌های اخیر به منظور افزایش مقاومت به ضربه سرعت پایین و بالا از افزودنی‌های ریز در مقیاس نانو مانند نانولوله‌های کربنی^۳ و نانوذرات گرافن^۴ در ساخت کامپوزیت‌ها استفاده شده است. نانوذرات گرافن همان تک‌لایه‌های ساختار گرافیت هستند که به صورت شبکه‌ی دوبعدی لانه‌زنبوری منظم شده‌اند. گرافن دارای خصوصیات برجسته‌ی مکانیکی، فیزیکی، الکتریکی و حرارتی است. در ذیل به تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات مرتبط با این موضوع اشاره شده است.

۱-۲- پیشینه‌ی تحقیق

در سال ۱۹۸۲ تحقیقاتی برای افزایش عملکرد خستگی آلیاژهای آلومینیوم در دانشگاه دلفت^۵ هلد انجام شد که نتیجه‌ی آن ساخت لایه‌های الیاف-فلز آرامید^۶ بود و این لایه‌ها با نام آرال^۷ معرفی شد [۱]. در سال ۱۹۸۴ در کارخانه‌ی آلکوا^۸ نمونه‌های تجاری آرال توسط لایه‌های آلومینیومی ۷۰۷۵ و لایه‌های آلومینیومی ۲۰۲۴ ساخته شدند [۲]. بعدها برای اینکه سفتی آرال را افزایش دهند از الیاف کربن به جای الیاف آرامید استفاده کردند که لایه‌های کارال^۹ نامیده شد و تحقیقات نشان داد این لایه‌ها با افزایش تنش‌ها دچار شکست می‌شوند که ناشی از ضعف خستگی آن بود و مشکلات دیگری از قبیل خوردگی بین الیاف کربن و ورقه‌های آلومینیوم در محیط مرطوب مشاهده شد. در سال ۱۹۹۰ تلاش‌های دیگری برای بهبود لایه‌ی آرال صورت گرفت که این بار از الیاف شیشه با استحکام بالا به جای الیاف آرامید استفاده شد و گلاره^{۱۰} نامیده شد. این FML به طور موفقیت‌آمیزی باعث بهبود خواص گشت [۳].

کانتول و همکاران [۴] در تحقیقی جامع به کاربرد ورق‌های FML در سازه مدرن هوافضایی پرداختند. آنها دو نوع هسته‌ی کامپوزیتی گلاره و آرال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چندلایه‌ی الیاف-فلز گلاره عملکرد بهتری دارد. آنها دریافتند که ورق FML مقاومت بالایی در مقابل فرورفتگی ناشی از ضربه‌های وارد شده به بدنه هواپیما دارد. کانتول و همکاران [۵] در تحقیقی به بررسی خواص مکانیکی ورق FML پرداختند. آنها با آزمون ضربه دریافتند که زاویه‌ی الیاف کامپوزیت در هسته‌ی FML نقش اندکی در خواص مکانیکی آن دارد. همچنین در آزمون ضربه، ورق FML جذب انرژی بسیار بالایی از خود نشان داد و رابطه‌ی مستقیمی بین انرژی ضربه و افزایش فرورفتگی تا رسیدن به حالت شکست در ورق مشاهده شد. ولات و همکاران [۶-۹] در تحقیقی به کاربرد ورق‌های FML در بدنه و بال هواپیماهای مدرن پرداختند و با آزمون

^۱ Low Velocity Impact (LVI)

^۲ High Velocity Impact (HVI)

^۳ Carbon nanotubes

^۴ Graphene Nanoparticles

^۵ Delft

^۶ Aramid

^۷ Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARALL)

^۸ Alcoa

^۹ Carbon Reinforced Aluminum Laminate (CRALL)

^{۱۰} Glass laminate aluminum reinforced epoxy (GLARE)

ضربه، به مقاومت بالای این ورق در مقابل فرورفتگی ناشی از ضربه‌های وارد شده به بدنه هواپیما پی بردند. فوو [۱۰] با بررسی ورق ساندویچی از جنس آلومینیوم در آزمون ضربه سرعت پایین، به این نتیجه رسید که میزان جذب انرژی توسط ورق ارتباط مستقیم با چگالی هسته‌ی ورق ساندویچی دارد. مو و همکارانش [۱۱] به بررسی پاسخ ورق‌های ساندویچی در مقابل آزمون ضربه سرعت پایین پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش انرژی ضربه، عمق فرورفتگی در ورق افزایش می‌یابد و پس از اعمال ضربه، آسیب در هسته‌ی ورق اتفاق می‌افتد که موجب کاهش استحکام ورق می‌شود و این آسیب با چشم قابل مشاهده نیست. گوکای و همکارانش [۱۲] در تحقیقی که بر روی ورق‌های FML انجام دادند، خواص ضربه‌پذیری و مقاومت فرورفتگی ورق را بررسی کردند. آنها دریافتند که ورق FML، خواص ضربه‌پذیری بهتری از نظر انرژی جذب‌شده، میزان آسیب و عمق فرورفتگی ماندگار نسبت به ورق تک‌لایه‌ی آلومینیومی نشان می‌دهند. محققین در تحقیقات متعدد [۱۳-۲۷] به دسته‌های مختلفی از FMLها پرداختند و آنها را بر اساس نوع فلز، نوع الیاف، نوع رزین و نحوه‌ی چیدمان الیاف، ساخته و پاسخ آزمون ضربه‌ی سرعت پایین را بررسی کردند.

به موازات تحقیقات ذکرشده، پژوهشگران [۲۸-۳۵] به بررسی عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با افزودن نانوذرات پرداختند. نووسلو و همکاران [۳۶] با موفقیت تک‌لایه‌های گرافن را شناسایی کردند. شکریه و همکاران [۳۷] تنها با اضافه کردن ۰/۵٪ وزنی گرافن به پلی‌پروپیلن، ۳۰٪ افزایش در استحکام ضربه‌ای مشاهده کردند. رفیعی و همکاران [۳۸] اثر گرافن و نانولوله‌های کربنی را روی رزین اپوکسی بررسی کردند و متوجه شدند که اثر تقویت‌کنندگی گرافن نسبت به نانولوله‌های کربنی بالاتر است. لیانگ و همکاران [۳۹] اکسید گرافن را بر روی پلی‌وینیل الکل بررسی کردند که ۷۶٪ استحکام کششی و ۶۲٪ افزایش مدول را تنها با افزودن ۰/۷٪ بدست آوردند. شکریه [۴۰] با افزودن نانوغرافن به اپوکسی، افزایش چشم‌گیر مقاومت خمشی و عمر خستگی را مشاهده کرد. طاهری و همکاران [۴۱] با اضافه کردن نانوغرافن به FML با الیاف شیشه‌ی سه‌بعدی، افزایش استحکام به ضربه و به حداقل رساندن آسیب را در حضور مقدار بهینه‌ی ۱٪ وزنی مشاهده کردند و کاهش استحکام به ضربه را با افزودن ۲٪ وزنی به علت کلوخه‌شدن نانوذرات شاهد بودند. طاهری و همکاران [۴۲] با اضافه کردن نانوغرافن به FML، ۵۰٪ افزایش در مقاومت خمشی و کماتش مشاهده کردند. کوثر و همکاران [۴۳] در کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوغرافن، بهبود قابل ملاحظه‌ای در خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مشاهده کردند. کامار و همکاران [۴۴] با افزودن ۰/۲۵٪ وزنی نانوغرافن، ۲۵٪ افزایش در چقرمگی شکست در کامپوزیت مشاهده کردند. احمدی‌مقدم و همکارانش [۴۵] با افزودن ۰/۵٪ وزنی نانوغرافن عامل‌دار به نانوکامپوزیت پلیمری، در انرژی شکست و استحکام نهایی به ترتیب ۸۲٪ و ۳۸٪ افزایش خواص مکانیکی مشاهده کردند. سمندری و همکاران [۴۶] با افزودن ۵٪ وزنی نانورس به تیرهای کامپوزیتی تحت ضربه‌ی سرعت پایین، انرژی جذب‌شده را بهبود بخشیدند. دیزجی و همکاران [۴۷] جذب انرژی ضربه در کامپوزیت‌های ساخته‌شده با الیاف سه‌بعدی و پارچه‌ای را بررسی کردند و دریافتند که بازدهی الیاف دوبعدی در برابر ضربه، بهتر از الیاف سه‌بعدی می‌باشد. احمدی و همکاران [۴۸] اثر شکل ضربه‌زننده بر روی کامپوزیت الیاف-فلز تحت ضربه‌ی سرعت پایین را بررسی کردند و دریافتند که حداکثر نیروی تماس و انرژی برای ضربه‌زننده‌ی تخت و کم‌ترین انرژی و نیروی تماس برای ضربه‌زننده‌ی مخروطی می‌باشد. رحمانی و همکاران [۴۹] جذب انرژی در کامپوزیت الیاف-فلز تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار دادند و افزایش

۱۴/۳۶٪ انرژی جذب‌شده را با افزودن ۰/۳٪ وزنی مشاهده کردند. فارسانی و همکاران [۵۰] با افزودن ۰/۴٪ وزنی نانوگرافن عامل‌دار، در استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست به ترتیب ۸۹/۶٪، ۲۵۲/۶٪ و ۴۴/۶٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن مشاهده کردند.

۱-۳- معرفی پایان‌نامه

رفتار کامپوزیت‌ها در برابر ضربه‌ی اجسام خارجی، یکی از نگرانی‌ها در طراحی سازه‌های هوافضایی است. عیوب ایجادشده در اثر ضربه‌های سرعت پایین، از جمله برخورد ابزار یا اجسام بزرگ‌تر با سرعت کم، بارش تگرگ بر روی بدنه‌ی هواپیماها و برخورد پرندگان، حتی اگر قابل مشاهده نباشد، در مقاومت کامپوزیت‌ها تاثیرگذار است. در این پایان‌نامه به بررسی تاثیر نانوذرات گرافن بر استحکام ورق‌های FML تحت ضربه‌ی سرعت پایین و بدست آوردن درصدوزنی بهینه‌ی نانوذرات گرافن پرداخته می‌شود. در روش تجربی از این تحقیق برای ساخت FML از ورق نازک آلومینیومی T۳-۲۰۲۴، رزین اپوکسی با انواع و درصد‌های مختلف نانوذرات گرافن و الیاف شیشه استفاده خواهد شد. خواص مکانیکی ورق اولیه با استفاده از آزمون کشش تک‌محوری در جهات مختلف بدست می‌آید. نمونه‌های مختلف رزین اپوکسی برای انتخاب نوع بهینه و سپس درصد بهینه و نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه با وبدون نانوذرات گرافن ساخته و خواص مکانیکی آن نیز به کمک آزمون‌های استاندارد مکانیکی استخراج خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود که استفاده از نانوذرات گرافن موجب افزایش چسبندگی بین الیاف و رزین و همچنین بین هسته و فلز شود، لذا برای اندازه‌گیری استحکام چسبندگی فلز به هسته‌ی کامپوزیتی آزمون پوست‌کنی^۱ اجرا خواهد شد. آزمون ضربه‌ی سرعت پایین بر روی نمونه‌های برگزیده از ورق‌های FML اجرا و اثر استفاده از نانوذرات تقویت‌کننده بر انرژی جذب‌شده و همچنین هندسه نمونه‌های تغییر شکل یافته مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. در بخش عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی آزمون ضربه سرعت پایین ورق FML استفاده خواهد شد. در این بخش ضمن مدل‌سازی آزمون پوست‌کنی ثوابت المان چسب برای حالت با و بدون استفاده از نانوذرات استخراج و از آن برای مدل‌سازی آزمون ضربه استفاده خواهد شد. در پایان نتایج آزمون تجربی با شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

از مهم‌ترین نوآوری‌های این پایان‌نامه می‌توان در بررسی اثر درصد نانوذرات گرافن چندلایه و تک‌لایه بر چسبندگی بین‌لایه‌ی ورق FML و همچنین بر روی رفتارشان در برابر آزمون ضربه‌ی سرعت پایین این کامپوزیت‌ها اشاره کرد.

در فصل دوم این پایان‌نامه مقدمه‌ای از کامپوزیت‌ها و نحوه‌ی ساخت آن بیان می‌شود. در فصل سوم، مواد و روش تحقیق تجربی و عددی مطرح می‌شود. در فصل چهارم به بحث و ارائه‌ی نتایج به‌دست آمده پرداخته خواهد شد و در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه خواهد شد.

^۱ Peeling

فصل ۲ ورق کامپوزیتی الیاف-فلز

۲-۱- کامپوزیت

ماده‌ی کامپوزیتی (مرکب) ماده‌ای است که از چند جزء تشکیل شده‌است و خواص آن از هر یک از اجزا تشکیل‌دهنده بیشتر است، ضمن آن که اجزای مختلف کارایی و عیوب یکدیگر را بهبود می‌بخشند. کامپوزیت‌ها در صنایع مختلفی همچون صنایع هوافضا، دفاعی، دریایی، ورزشی، خودروسازی، الکترونیک و الکترونیک، راه و ساختمان و پزشکی کاربرد چشم‌گیری دارند. کامپوزیت‌ها از نظر شکل تقویت‌کننده^۱ به دو دسته‌ی؛ مواد مرکب ذره‌ای (تقویت شده با ذرات) و مواد مرکب الیافی (تقویت شده با الیاف) تقسیم‌بندی می‌شوند. کامپوزیت‌ها عموماً از یک فاز بستر (فاز پیوسته، نگهدارنده یا ماتریس) و یک فاز تقویت‌کننده (ناپیوسته) تشکیل شده‌اند. بستر، ماده‌ای پیوسته است که ماده‌ی تقویت‌کننده را در بر می‌گیرد. از دیدگاهی دیگر، کامپوزیت‌ها بر اساس نوع بستر^۲ (زمینه) آنها طبقه‌بندی می‌شوند که به سه دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۵۱]:

۱- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMC)^۳:

^۱ Reinforcement

^۲ Matrix

^۳ Polymer Matrix Composites (PMC)

این نوع کامپوزیت‌ها از یک رزین پلیمری به‌عنوان بستر با رشته‌هایی از مواد مختلف به‌عنوان تقویت‌کننده ساخته می‌شوند. کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری خصوصیات خوبی از جمله استحکام ویژه‌ی بالا، سختی ویژه‌ی بالا، چقرمگی شکست بالا، عمر خستگی طولانی و مقاومت بالا در برابر خوردگی و سوراخ‌شدن دارند و تقریباً در میان کامپوزیت‌ها بیشترین حجم استفاده را دارند.

۲- کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC)^۱:

در این نوع کامپوزیت‌ها، از یک فلز انعطاف‌پذیر به‌عنوان زمینه استفاده می‌شود. دمای عملکرد بالاتر، شعله‌پذیر نبودن و مقاومت بیشتر در برابر تهاجم سیالات آلی از مزایای کامپوزیت زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌باشد. برای ساخت این نوع کامپوزیت‌ها، از آلیاژهایی مانند آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و مس به‌عنوان زمینه استفاده می‌شود و مواد تقویت‌کننده می‌تواند به شکل ذرات، رشته‌های پیوسته و ناپیوسته از جنس کربن^۲، کاربید سیلیسیم^۳، آلومینا^۴ و دیگر فلزات دیرگداز باشد.

۳- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC)^۵:

اصلی‌ترین کاربرد کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی زمانی است که به ماده‌ای با قابلیت تحمل شرایط کاری با دمای بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی نیاز باشد. این کامپوزیت‌ها از بستر سرامیکی و الیاف کوتاه به‌عنوان تقویت‌کننده ساخته می‌شوند و در قطعات موتور خودرو و توربین‌های گازی هواپیما کاربرد بسیاری دارند.

۲-۱-۱- انواع رزین

رزین‌ها به‌تنهایی استحکام کافی برای استفاده در اجزای سازه‌ای را ندارند، ولی وقتی که توسط ماده‌ی دیگری مانند الیاف تقویت شوند، می‌توان به‌عنوان اجزای سازه‌ای مستحکم با وزن پایین به‌کار برد. رزین‌ها به دو دسته‌ی گرماسخت و گرمانرم تقسیم‌بندی می‌شوند [۵۲].

رزین گرماسخت (ترموست)^۶

این نوع رزین از دو مایع تشکیل شده که در هنگام ترکیب با یکدیگر و انجام واکنش شیمیایی تبدیل به یک ماده چسبنده شده و سپس سخت شود. اپوکسی‌ها جز این دسته می‌باشند. اپوکسی‌ها دارای خواص و عملکرد بسیار خوبی هستند. از مهم‌ترین خواص آنها می‌توان به سفتی و مقاومت بسیار بالا، مقاومت حرارتی مناسب، چسبندگی عالی و مقاومت شیمیایی خوب به ویژه در محیط‌های قلیایی اشاره کرد. رزین‌های ترموست پس از اینکه پخته شدند به یک شکل دائمی در می‌آیند و دیگر قابلیت ذوب و شکل‌دهی مجدد را ندارند.

رزین گرمانرم (ترموپلاستیک)^۷

^۱ Metal Matrix Composites (MMC)

^۲ Carbon

^۳ Silicon carbid

^۴ Aluminium oxide

^۵ Ceramic Matrix Composites (CMC)

^۶ Thermoset

^۷ Thermoplastic

رزین‌های گرمانرم مواد جامدی هستند که هنگام گرم شدن به مایع تبدیل شده و خاصیت چسبندگی پیدا می‌کنند. رزین‌های پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پی‌وی‌سی از پرکاربردترین انواع رزین‌های گرمانرم می‌باشند. این دسته از رزین‌ها را می‌توان بارها حرارت داد و ذوب نمود بدون اینکه تغییر قابل توجهی در خواص آنها ایجاد شود.

۲-۱-۲- انواع الیاف

مشخصات کامپوزیت‌ها به انتخاب نوع الیاف بستگی دارد. انواع مختلف الیاف مانند الیاف شیشه، کربن، آهن، آرامید، بور، کربید، سیلیکون، اکسید آلومینیوم و چند فازی وجود دارد که سه نوع الیاف شیشه، کربن و آرامید کاربرد بیشتری دارند و کامپوزیت‌های تقویت‌شده توسط این الیاف‌ها به ترتیب GFRP^۱، CFRP^۲ و AFRP^۳ نامیده می‌شوند [۵۳].

• الیاف شیشه

الیاف شیشه دارای کاربرد عمده در پنل‌های هواپیما، ملخ هلی‌کوپتر، موتور موشک‌ها و کشتی‌های سنگین وزن می‌باشد. دلیل استفاده این الیاف قیمت پایین آن نسبت به دیگر الیاف، قابلیت دسترسی بالای آن، مقاومت بالا در برابر خوردگی و مقاومت بالا در برابر خستگی و دیگر خواص قابل قبول آن می‌باشد و همچنین مقاومت کششی مناسب این الیاف باعث می‌شود تا این الیاف در مخازن تحت فشار، موشک‌ها، لاستیک‌ها و دیگر سازه‌ها نیز مورد استفاده قرار بگیرد. در بین الیاف شیشه، طبقه بندی دیگری به صورت R-glass، A-glass و S-glass و E-glass وجود دارد که عمومی‌ترین نوع الیاف شیشه E-glass می‌باشد که دارای خواص الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی مطلوب می‌باشد [۵۳].

۲-۱-۳- فرآیندهای ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری

این فرآیندها به‌طور کلی به دو دسته‌ی فرآیندهای قالب‌گیری باز و فرآیندهای قالب‌گیری بسته تقسیم می‌شوند [۵۴].

• فرآیندهای قالب‌گیری باز

این فرایند ساده‌ترین روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌باشد که معمولاً برای ساخت قطعات بزرگ استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از تکنیک‌های دستی آغشته‌سازی الیاف به رزین انجام می‌شود و با کمک قلم‌مو یا غلتک کاری روی لایه‌ها، هوای محبوس خارج می‌شود. فاکتور اصلی در این فرایند نحوه‌ی انتقال رزین از یک مخزن به قالب است. روش‌های انتقال رزین در برخی حالت‌ها نوع فرآیند را مشخص می‌کند که به سه روش فرایند لایه‌چینی دستی^۴، فرآیند پاشش رزین^۵، فرآیند الیاف‌پیچی^۶ انجام می‌شود. در شکل ۱-۲

^۱ Glass Fiber Reinforce Polymer

^۲ Carbon Fiber Reinforce Polymer

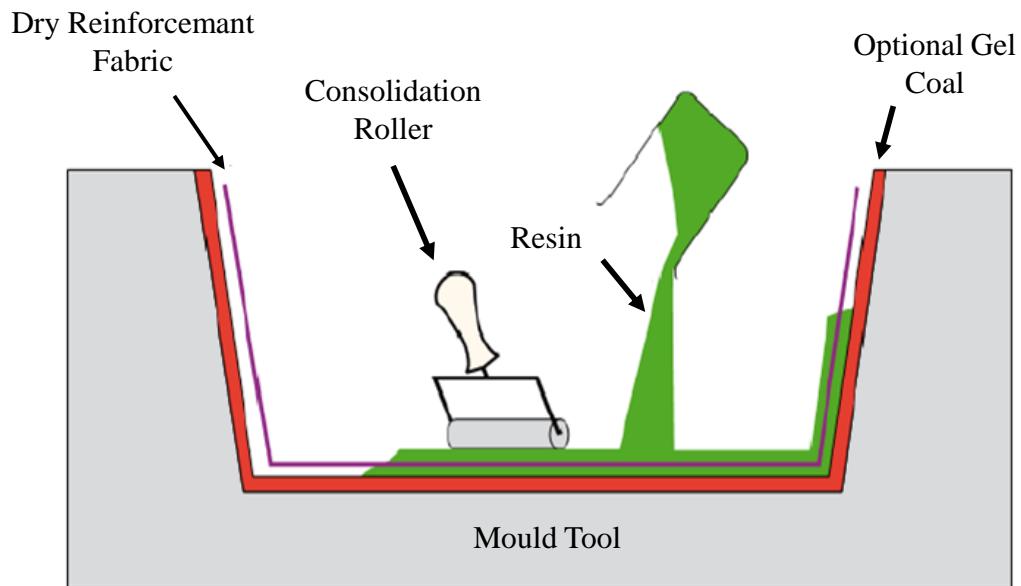
^۳ Aramid Fiber Reinforce Polymer

^۴ Hand lay-up process

^۵ Spray up

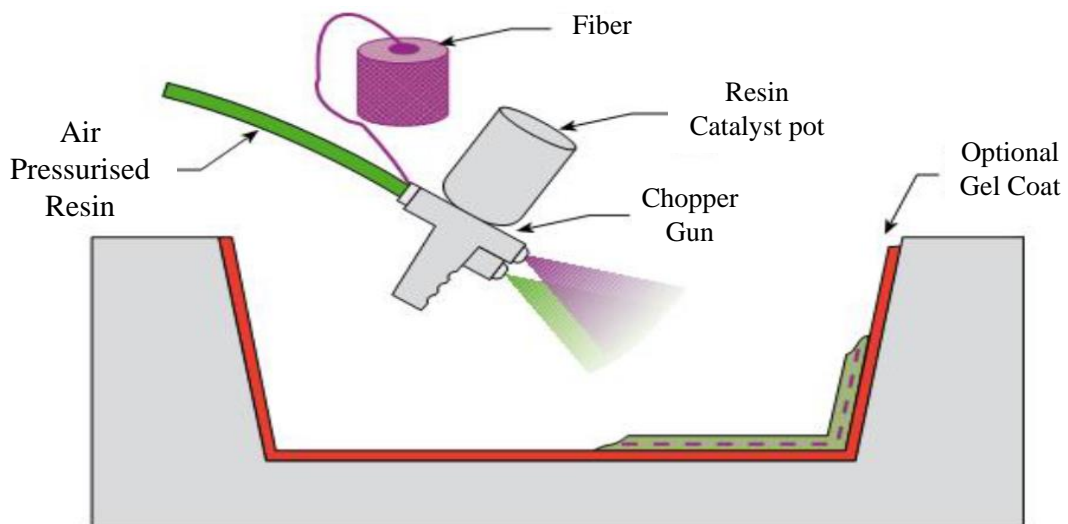
^۶ Filament winding process

طرح‌واره ساخت کامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی ارائه شده است. در این روش، ابتدا سطح قالب به واکس جداکننده آغشته شده و سپس لایه‌چینی الیاف همراه با آغشته‌سازی آن‌ها در رزین انجام می‌شود.



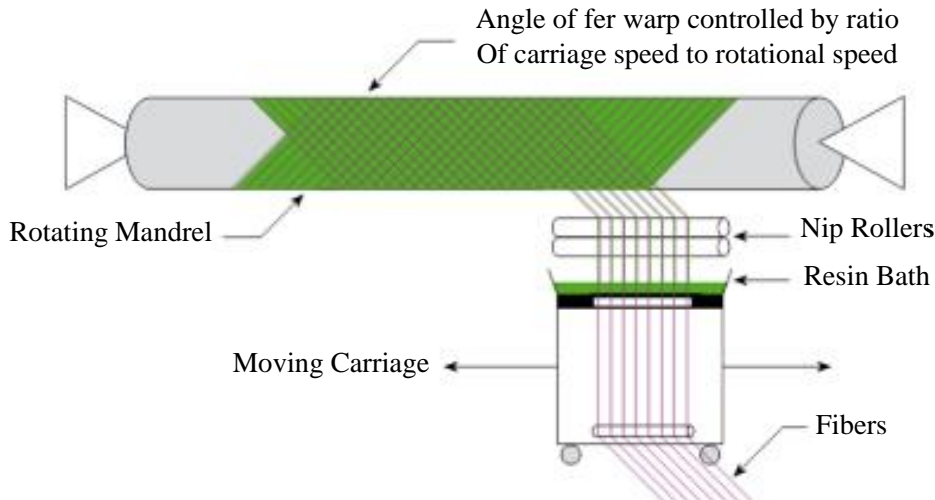
شکل ۲-۱- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی [۵۱]

در شکل ۲-۲ طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پاشش رزین، ارائه شده است. در این روش، الیاف خرد شده به همراه رزین درون قالب پاشیده می‌شوند.



شکل ۲-۲- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پاشش رزین [۵۱]

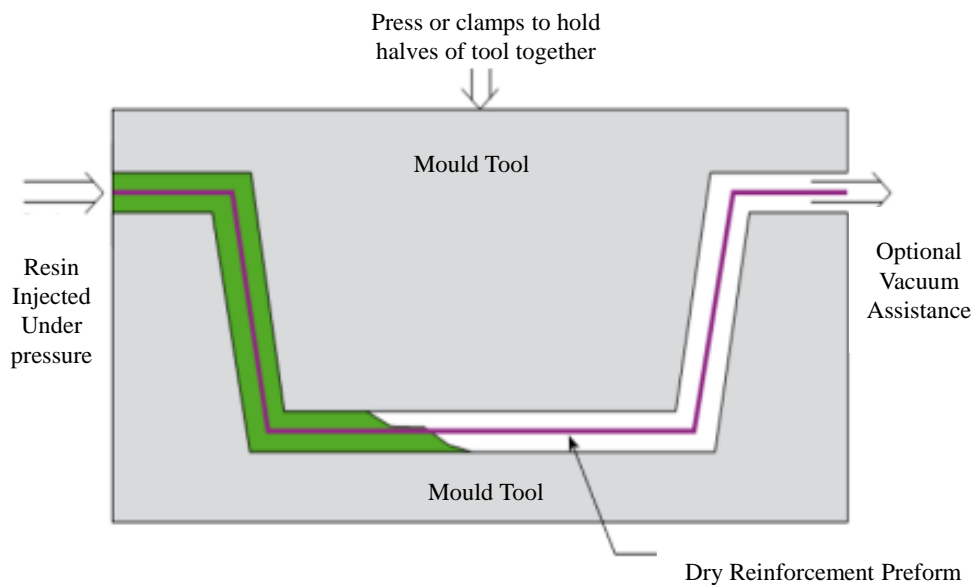
در شکل ۲-۳ طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش الیاف پیچی، ارائه شده است. در این روش، الیاف به رزین آغشته شده و سپس دور قالب در حال دوران پیچیده و رزین تحت خلاء کشیده می‌شود. روش الیاف پیچی برای تولید قطعات مدور کاربرد دارد.



شکل ۲-۳- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش الیاف پیچی [۵۱]

• فرآیندهای قالب‌گیری بسته

این فرآیند برای ساخت قطعات کامپوزیتی دقیق و یکسان با سطوح صاف استفاده می‌شود و به‌طور کلی به فرآیندهای قالب‌گیری تزریقی، فشاری، RTM^۱ و پالتروژن^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۲-۴ طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش RTM، ارائه شده است. در این روش، رزین در ظرفی بسته قرار دارد که توسط لوله‌ای به قالب متصل است، به‌وسیله‌ی پمپ خلاء در سمت دیگر قالب مکش ایجاد شده و رزین را به داخل قالب هدایت می‌کند و در آخر رزین اضافی را از قالب خارج می‌کند.

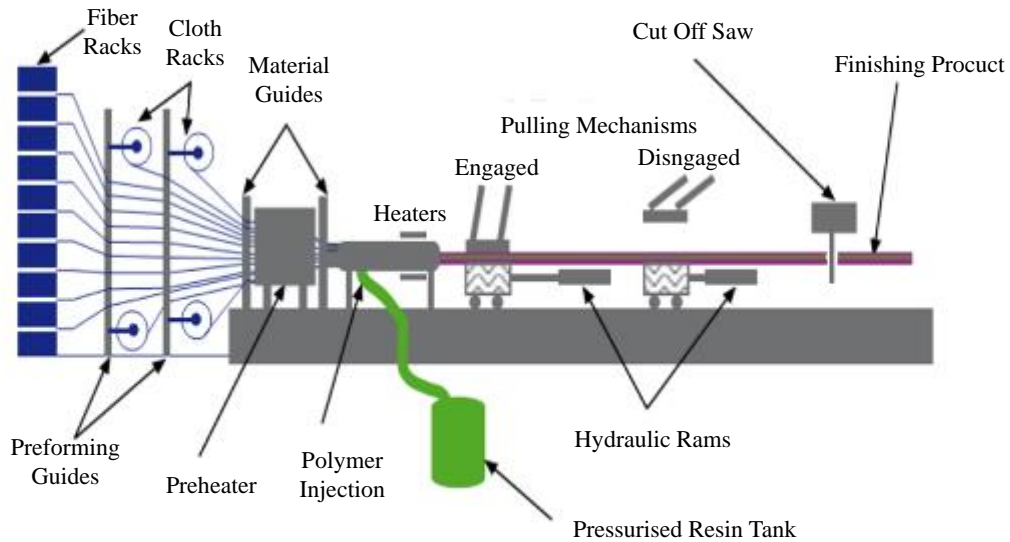


شکل ۲-۴- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش RTM [۵۱]

^۱ Resin Transfer Molding

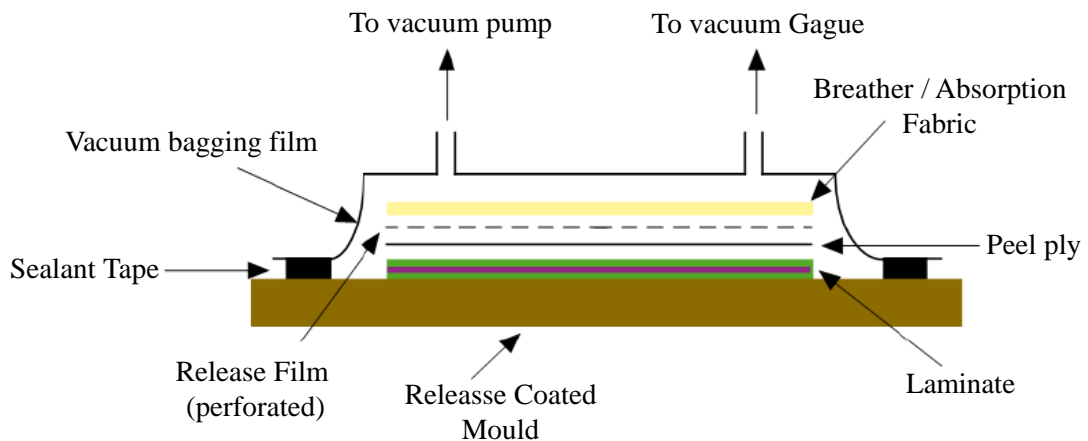
^۲ Pultrusion

در شکل ۲-۵ طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پالتروژن، ارائه شده است. در این روش، الیاف تقویت‌کننده را از یک حمام عبور می‌دهند تا به رزین آغشته و وارد قالب گرم شده و به وسیله‌ی یک دستگاه کشش، نمونه‌ی پخته‌شده خارج می‌شود.



شکل ۲-۵- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش پالتروژن [۵۱]

در شکل ۲-۶ طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش محفظه‌ی خلاء^۱، ارائه شده است. در این روش به وسیله‌ی پمپ خلاء، هوای محبوس بین لایه‌های الیاف خارج می‌شود تا کیفیت لایه‌چینی افزایش داده شود.



شکل ۲-۶- طرح‌واره‌ی ساخت کامپوزیت به روش محفظه‌ی خلاء [۵۱]

^۱ Vacuum bagging

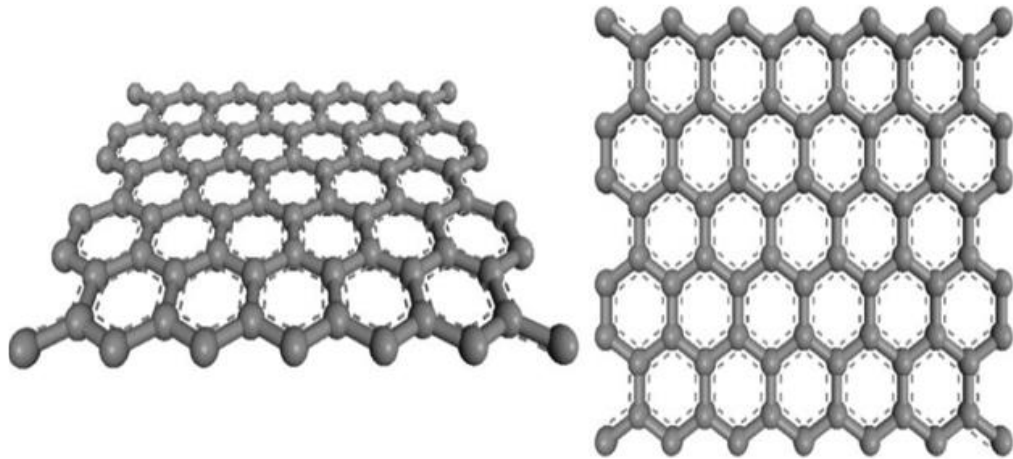
۲-۲- نانوکامپوزیت

نانوکامپوزیت پلیمری به صورت ترکیب یک زمینه پلیمری و افزودنی‌هایی که حداقل یکی از ابعاد فاز پراکنده در آن در مقیاس نانو باشد، گفته می‌شود. در طول دهه‌ی گذشته، نانوکامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، مانند سفتی الاستیک و استحکام، که تنها با افزودن مقدار اندکی از نانوذرات حاصل می‌شوند؛ مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر، نسبت سطح به حجم بالای نانوافزودنی‌ها در مقایسه با میکرو و ماکرو افزودنی‌هاست. همچنین نانوکامپوزیت‌های پلیمری خواص بی‌نظیر نوری، مغناطیسی و الکتریکی نیز نشان داده‌اند. در مقابل خواص منحصربه‌فرد این محصولات، در ساخت نانوکامپوزیت‌ها مشکلات فرآیندی قابل توجهی وجود دارد که می‌تواند خواص نهایی را تحت تاثیر قرار دهد. از اساسی‌ترین مشکلات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم توزیع یکنواخت نانوذرات درون فاز زمینه در نانوکامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی آن‌ها را کاهش می‌دهد.
- استفاده از مواد شیمیایی گران‌قیمت برای توزیع یکنواخت نانوذرات در داخل زمینه و جلوگیری از بهم چسبیدن نانوذرات و ساخت نانوکامپوزیت‌هایی با ریزساختاری همگن و خواص مکانیکی بالا، باعث غیراقتصادی شدن و هم‌چنین پیچیده‌تر شدن فرآیند تولید می‌شود [۵۵].

۲-۲-۱- نانوگرافن

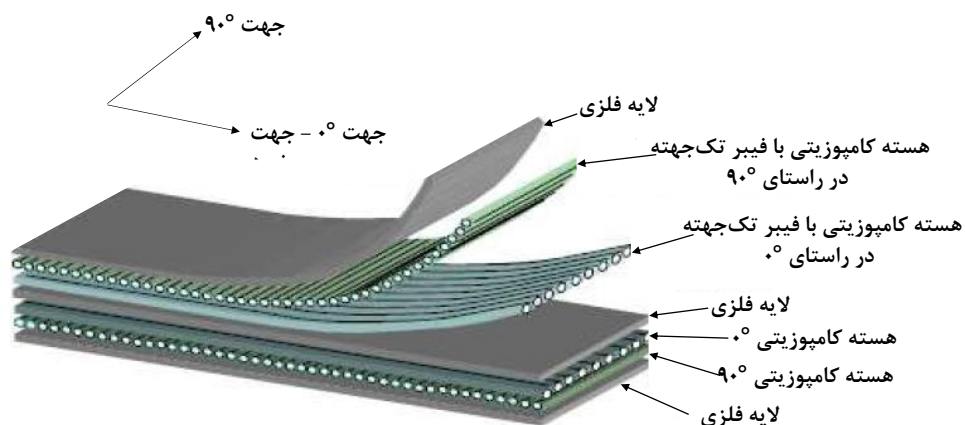
گرافن ورقه‌ای دوبعدی از اتم‌های کربن در یک پیکربندی شش‌ضلعی (لانه‌زنبوری) می‌باشد. گرافن جدیدترین عضو خانواده مواد کربنی گرافیتی چندبعدی می‌باشد. صفحات گرافن با کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن تشکیل می‌شوند. در یک صفحه گرافن، هر اتم کربن با ۳ اتم کربن دیگر پیوند داده است. این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند و زوایای بین آنها با یکدیگر مساوی و برابر 120° است. در این حالت، اتم‌های کربن در وضعیتی قرار می‌گیرند که شبکه‌ای از شش‌ضلعی‌های منتظم را در حالت ایده آل ایجاد می‌کنند. در سال ۲۰۰۴ یک گروه از فیزیک‌دانان از دانشگاه منچستر بریتانیا به رهبری آندره گایم و کنستانتین نووسلف، یک روش متفاوت و در نگاه اول ساده لوحانه برای به‌دست آوردن گرافن ارائه دادند که منجر به تحولی عظیم در این رشته شدند. آنها با استفاده از چسب نواری یک تک‌ورقه‌ی گرافن (یک مونو لایه از اتم‌های کربن) را از گرافیت با روش ورقه ورقه شدن میکرومکانیکی جدا کردند و سپس آن را به یک ویفر سیلیکون که با ورقه‌ی نازکی از SiO_2 پوشیده شده بود منتقل کردند که می‌تواند به این شکل در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. جایزه‌ی نوبل فیزیک ۲۰۱۰ نیز به خاطر ساخت ماده‌ای دوبعدی به این دو دانشمند تعلق گرفت. کشف گرافن به سیل عظیمی از تحقیقاتی بین‌المللی منجر شده است. یک چالش مهم برای گرافن، تولید گرافن خالص با کیفیت و در مقیاس بالا می‌باشد [۵۶]. در شکل ۲-۷ ساختار اتمی صفحه‌ی گرافن، ارائه شده است.



شکل ۲-۷- ساختار اتمی صفحه‌ی گرافن [۴۲]

۲-۳- کامپوزیت الیاف-فلز (FML)

کامپوزیت‌های الیاف-فلز (FMLs) کامپوزیت‌هایی هیبریدی هستند که از یک لایه‌ی نازکی از الیاف فلزی و نیز لایه‌هایی از پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه، کربن و کولار تشکیل شده‌اند. فلز آلومینیوم مهم‌ترین عنصر تشکیل دهنده‌ی کامپوزیت FML است. حدود ۷۰۰۰ نوع الیاف آلومینیوم وجود دارد که الیاف آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ نسبت به دیگر الیاف‌های آلومینیوم، شکل‌پذیرتر و تا حدودی مستحکم‌تر است. از الیاف‌های تیتانیوم و منیزیم هم به عنوان لایه‌ی فلزی کامپوزیت FML استفاده می‌شوند. روش متداول تولید FML، لایه‌چینی دستی است که به دلیل راحتی و سادگی مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی در تولیدات صنعتی و حساس از اتوکلاو^۱ (به کار بردن افزایش فشار و دما به طور هم‌زمان) برای بالا بردن کیفیت تولید، استفاده می‌شود [۵۷]. در شکل ۲-۸ نحوه‌ی لایه‌چینی ورق FML ارائه شده است.



شکل ۲-۸- نحوه‌ی لایه‌چینی ورق FML [۵۸]

^۱ Autoclave

۲-۳-۱- مزایای FML

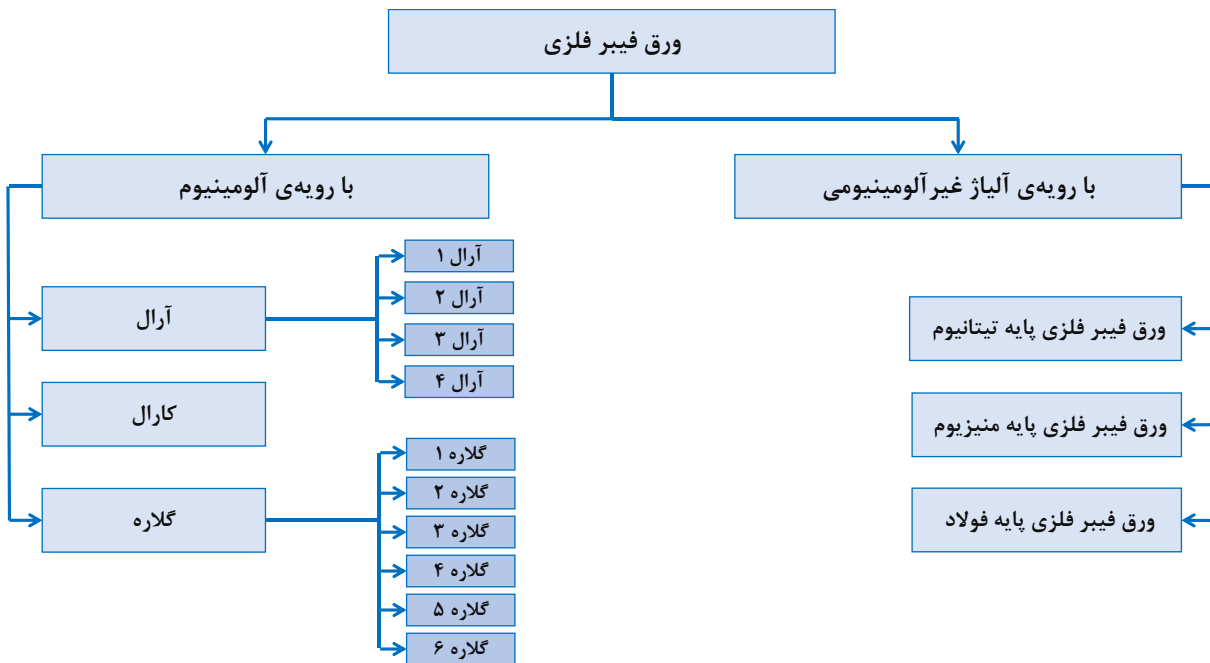
کامپوزیت‌های الیاف-فلز مزایای فلز و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف را داشته همچنین خواص مکانیکی عالی نسبت به کامپوزیت تقویت شده با الیاف معمولی یا آلیاژهای آلومینیوم یک‌پارچه را فراهم می‌سازد. مزایای FML ها را می‌توان به دو بخش ویژگی‌های مکانیکی و ویژگی‌های فیزیکی تقسیم کرد [۵۹].

ویژگی‌های مکانیکی FML: کامپوزیت‌های الیاف-فلز دارای ویژگی‌های مکانیکی بسیار خوبی از جمله مقاومت بالا در برابر خستگی، استحکام بالا، چقرمگی شکست بالا، مقاومت به ضربه‌ی بالا و ظرفیت بالای جذب انرژی می‌باشند.

ویژگی‌های فیزیکی FML: از ویژگی‌های فیزیکی کامپوزیت‌های الیاف-فلز می‌توان به چگالی پایین، مقاومت عالی در برابر رطوبت، مقاومت به خوردگی عالی، کاهش آسیب مواد و مقاومت در برابر آتش اشاره کرد.

۲-۳-۲- انواع FML

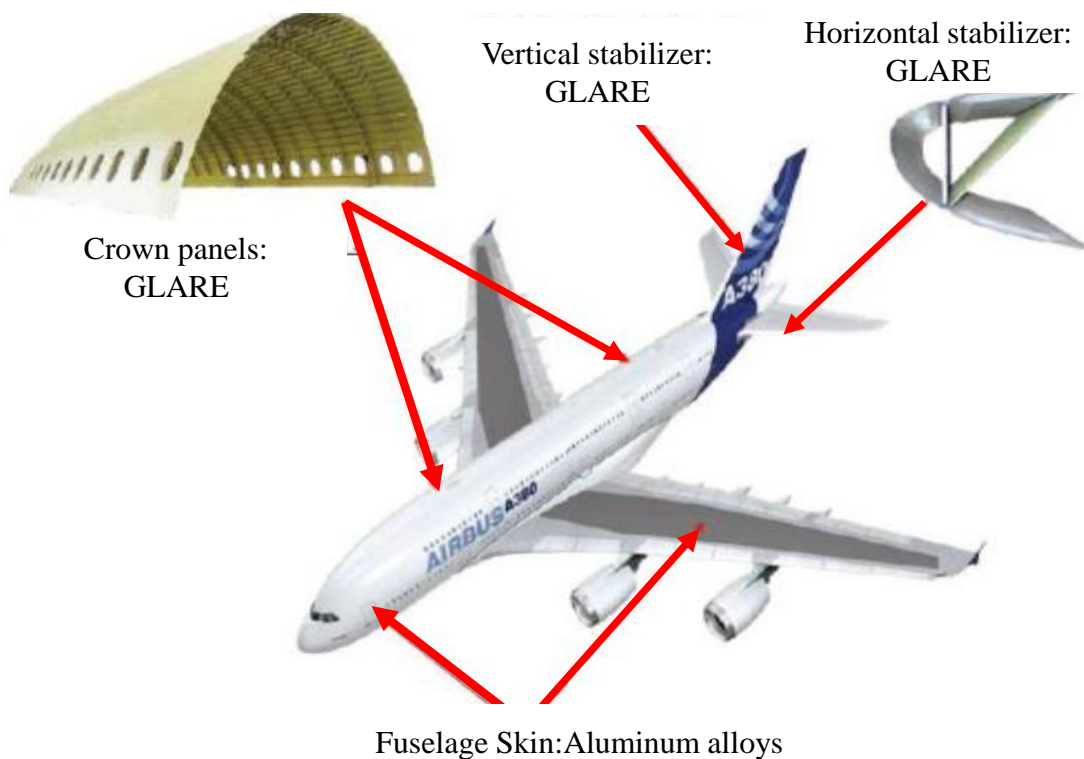
کامپوزیت‌های FML به سه دسته‌ی آرال، گلاره و کارال تقسیم‌بندی می‌شوند که بر اساس فلز پایه آلومینیوم و الیاف آرامید، شیشه و کربن ساخته می‌شوند. در شکل ۲-۹ تقسیم‌بندی FML ارائه شده است.



شکل ۲-۹- تقسیم‌بندی FML [۵۸]

۲-۳-۳- کاربرد FML

کامپوزیت‌های الیاف-فلز به طور رایج در صنایع هوافضا کاربردهایی زیادی دارند. شرکت‌های هوافضایی مانند بویینگ^۱، ایرباس^۲، آیروسپاشیال^۳ و امبرائر^۴، برای کاهش هزینه‌ی تولید و ضمانت محصولات خود از کامپوزیت‌های FML استفاده می‌کنند. از این مواد در سازه‌ی موشک‌ها و فضاپیماها، بدنه‌ی هواپیماها، بالک موشک‌ها، سازه‌های هوایی، لبه‌ی حمله‌ی هواپیمای ایرباس، درب قسمت حمل بار هواپیمای C-17، بدنه‌ی فوقانی و بال تحتانی هواپیمای ایرباس A380، جعبه‌ی حمل چمدان‌ها در هواپیما، پانل‌های پوسته‌ای و محفظه‌های مقاوم در برابر انفجار و سپرهای محافظ ایستگاه‌های فضایی استفاده می‌شود [۵۹]. در شکل ۲-۱۰ نمونه‌هایی از کاربرد FML در هواپیمای ایرباس A380 از جنس گلاره نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰- بخش‌های ساخته شده‌ی هواپیمای ایرباس A380 از جنس FML (GLARE) [۵۹]

^۱ Boeing

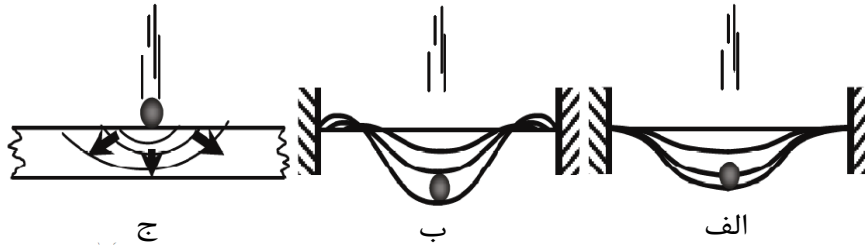
^۲ Airbus

^۳ Aerospatial

^۴ Embraer

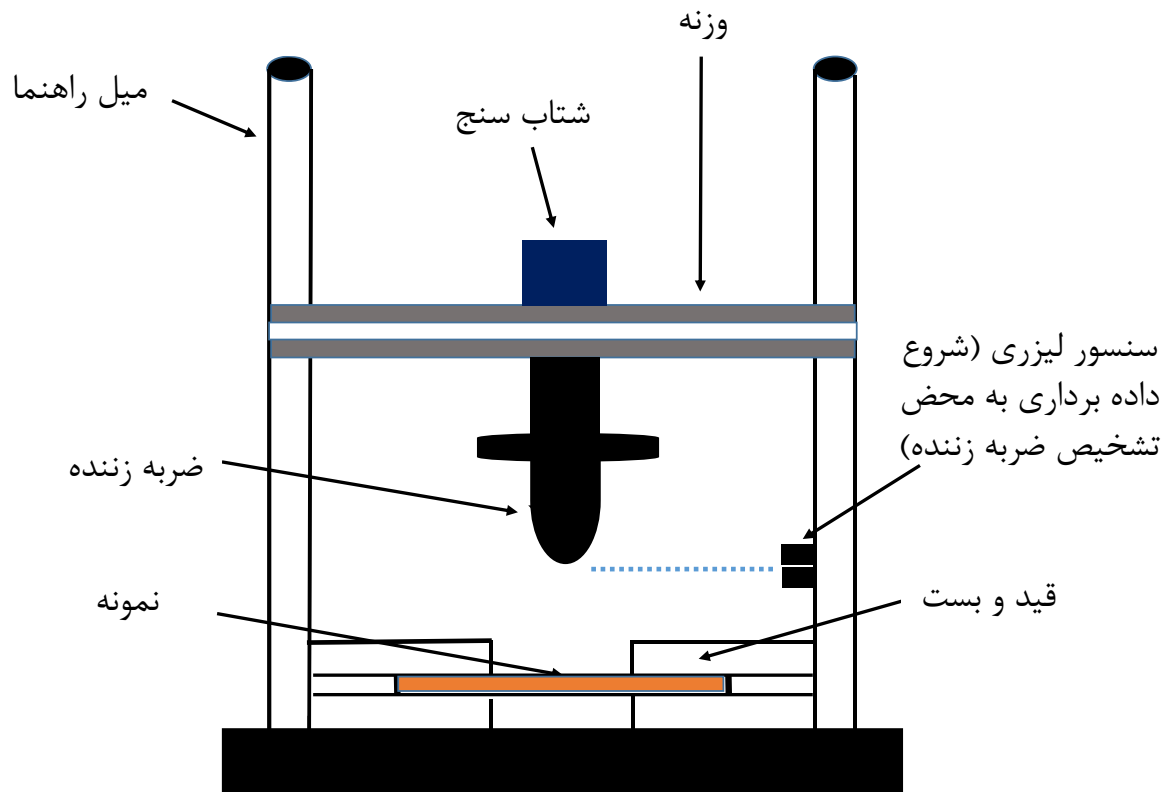
۲-۴- آزمون‌های ضربه بر روی نمونه‌های کامپوزیتی

با وجود مزایای بسیار کامپوزیت‌ها، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های آن‌ها، پاسخ به بارهای ضربه‌ای ناگهانی می‌باشد. مطابق طرح‌واره‌ی شکل ۲-۱۱ پدیده ضربه بر حسب مقدار سرعت به سه دسته‌ی سرعت پایین، سرعت بالا و بیش از حد پرسرعت تقسیم می‌شود.



شکل ۲-۱۱- انواع ضربه از نظر سرعت، الف) ضربه سرعت پایین، ب) ضربه سرعت بالا، ج) ضربه بیش از حد پرسرعت [۵۷]

محدوده‌ی ضربه با سرعت از ۱ تا ۱۰۰ متر بر ثانیه را ضربه‌ی سرعت پایین می‌گویند. از سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه به بالا را ضربه‌ی سرعت بالا و محدوده‌ی سرعتی در حدود ۵۰۰۰ متر بر ثانیه، به‌عنوان ضربه‌ی بیش از حد پرسرعت شناخته می‌شود. ضربه‌ی سرعت پایین در هنگام ساخت، تعمیر، نگهداری، هنگام سقوط اشیاء مختلف مانند ابزار بر روی جسم، برخورد پرندگان، برخورد ذرات معلق و تگرگ به بدنه‌ی هواپیما رخ می‌دهد. از پارامترهای موثر بر رفتار کامپوزیت در مقابل ضربه‌ی سرعت پایین می‌توان جنس، شکل هندسی، ضخامت، نوع لایه چینی کامپوزیت و هم‌چنین جنس، شکل، ابعاد، سرعت و انرژی برخورد ضربه‌زننده می‌باشد [۵۴]. انجام آزمون ضربه‌ی سرعت پایین به وسیله‌ی دستگاه آزمون ضربه‌ی سقوط آزاد (دستگاه وزنه‌ی افتان) انجام می‌شود. در این دستگاه از یک ریل استفاده می‌شود که پرتابه را در طول ارتفاع سقوط آزاد هدایت می‌کند و به‌وسیله‌ی سنسور شتاب‌سنج یا نیروسنج، شتاب و نیرو بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۲-۱۲ طرح‌واره‌ی دستگاه آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ارائه شده است.



شکل ۲-۱۲- طرح‌واره‌ی دستگاه آزمون ضربه‌ی سرعت پایین

فصل ۳ مواد و روش تحقیق: تجربی و عددی

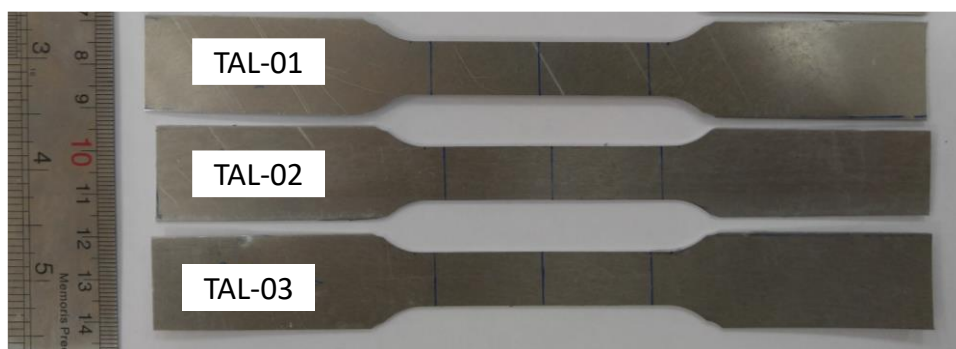
در این فصل به معرفی مواد و آزمون‌های طراحی شده پرداخته می‌شود. آزمون‌های طراحی شده عبارت‌است از:

۱. آزمون کشش از نمونه‌ی رزین اپوکسی بدون نانوذرات گرافن
۲. آزمون کشش از نمونه‌های رزین اپوکسی با انواع مختلف نانوذرات گرافن برای انتخاب نانوگرافن بهینه
۳. آزمون کشش از نمونه‌ی رزین اپوکسی با درصد‌های مختلف نانوذرات گرافن بهینه برای انتخاب درصد بهینه‌ی نانوگرافن
۴. آزمون کشش ورق آلومینیومی برای بدست آوردن خواص مکانیکی
۵. آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی در دو جهت 0° و 45° با و بدون نانوذرات گرافن برای بدست آوردن خواص مکانیکی
۶. آزمون کشش ورق FML با و بدون نانوذرات گرافن
۷. آزمون پوست‌کنی برای بررسی چسبندگی لایه‌ی فلزی به هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون نانوذرات گرافن و به‌دست‌آوردن خواص چسب در حالت‌های با و بدون نانوگرافن برای شبیه‌سازی المان چسب
۸. آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با و بدون نانوذرات گرافن

۳-۱- معرفی مواد لازم در ساخت ورق کامپوزیتی الیاف-فلز

۳-۱-۱- ورق فلزی

در این پژوهش، با توجه به کاربرد فراوان آلومینیوم در صنایع مختلف و ورق‌های کامپوزیتی و همچنین نسبت استحکام به وزن مناسب، از آن به‌عنوان لایه‌ی فلزی در ورق FML مورد استفاده قرار گرفت. با مطالعه و بررسی انجام شده بر روی انواع آلومینیوم، ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت ۰/۶۶ mm شرکت الکوآ به دلیل کاربرد صنعتی و نظامی، برای لایه‌ی فلزی در ورق FML انتخاب شد. برای تعیین خواص مکانیکی آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M به کمک دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ با ظرفیت نامی ۲۵۰ kN انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش ورق آلومینیوم در شکل ۳-۱ ارائه شده است.



شکل ۳-۱- نمونه‌های آزمون کشش ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ [۵۸]

۳-۱-۲- هسته‌ی کامپوزیتی

در این پژوهش، هسته‌ی کامپوزیتی متشکل از رزین اپوکسی و الیاف شیشه می‌باشد. اپوکسی دارای خواص مکانیکی مناسبی از جمله استحکام مناسب با چگالی پایین است. برای ساخت هسته‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه‌ی پارچه‌ای نوع E (۱۰۰ gr/m²) محصول شرکت Interglass آلمان و ضخامت ۰/۰۸ mm و رزین اپوکسی CR122 محصول شرکت آکسون^۱ فرانسه استفاده شد. در شکل ۳-۲ الیاف شیشه‌ی بافته‌شده‌ی دوجهته مورد استفاده، ارائه شده است.



شکل ۳-۲- الیاف شیشه ریزبافت دوجهته

^۱ Axon

۳-۱-۳- نانوذرات گرافن

برای بهبود خواص مکانیکی، استحکام به ضربه و افزایش چسبندگی بین فلز و هسته‌ی کامپوزیتی از نانوذرات گرافن استفاده شد. نانوغرافن دارای دو نوع کلی چندلایه و تک‌لایه موجود است که نانوغرافن تک‌لایه از نظر هزینه بسیار گران‌تر از نانوغرافن‌های چندلایه است. در این پایان‌نامه، از یک نوع نانوغرافن تک‌لایه و سه نوع مختلف نانوغرافن چندلایه برای انتخاب نوع بهینه به‌شرح زیر استفاده شده است:

۱. اکسید نانوذرات گرافن تک‌لایه^۱ محصول شرکت Nanoshel

۲. اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی^۲ شرکت United nanotech innovations

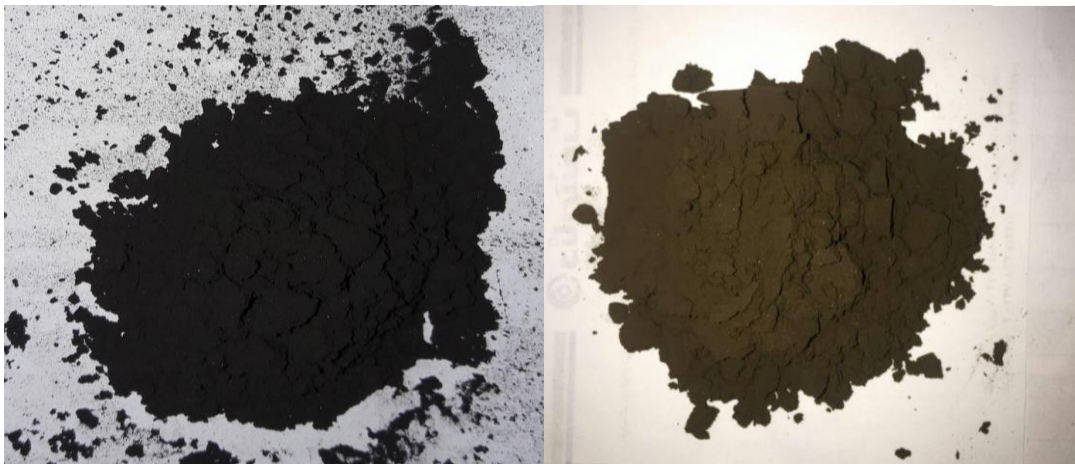
۳. اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی^۳ شرکت United nanotech innovations

۴. نانوذرات گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 شرکت United nanotech innovations

در شکل ۳-۳ اکسید نانوذرات گرافن تک‌لایه و چندلایه ارائه شده است.

(ب)

(الف)



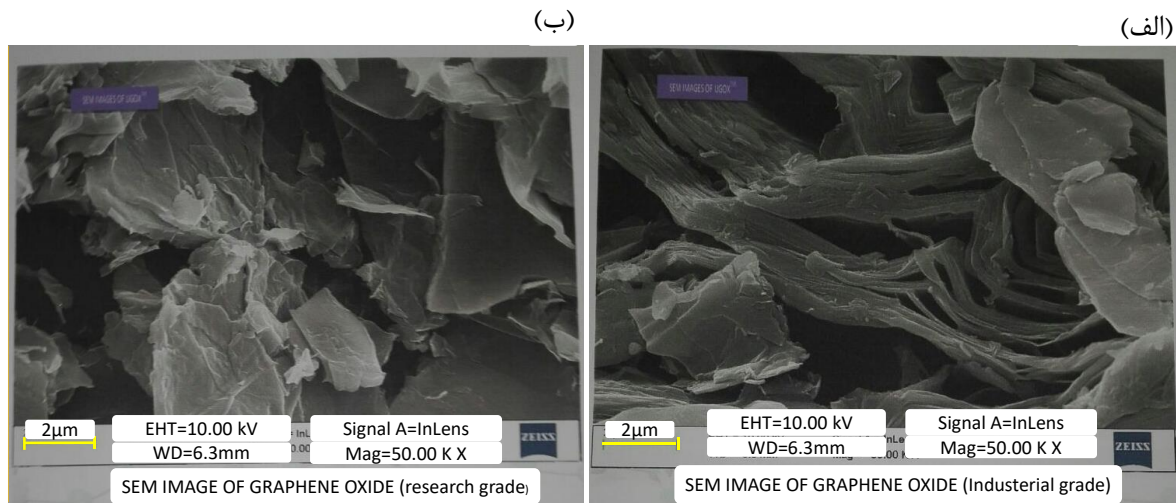
شکل ۳-۳- الف) اکسید نانوذرات گرافن تک‌لایه، ب) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه

^۱ Single layer

^۲ Industrial grade

^۳ Research grade

در شکل ۳-۴ تصاویر SEM اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی و نوع صنعتی ارائه شده است.



شکل ۳-۴- تصاویر SEM نانوذرات گرافن، الف) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی، ب) اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی

و در جدول ۳-۱ مشخصات اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی و نوع صنعتی ارائه شده است.

۳-۱- مشخصات اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی و نوع صنعتی

کد	ضخامت (nm)	درصد خلوص (%)	تعداد لایه‌ها	مساحت سطح (m ² /g)	چگالی (g/cc)	قطر (μm)
Industrial grade	۳-۶	۹۹	۸-۱۰	۱۱۰	۰/۸۶	۵-۱۰
Research grade	۳-۶	۹۹	۸-۱۰	۱۲۰	۰/۴۲	۵-۱۰

۳-۲- مراحل توزیع نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی

برای توزیع نانوذرات در داخل محلول‌ها، روش‌های زیادی وجود دارد که وابسته به نوع نانوذره، نوع محلول و ویسکوزیته‌ی محلول باشد. مراحل توزیع نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی تشریح شده است.

۱. توزین دقیق رزین اپوکسی و نانوغرافن با درصدوزنی مورد نظر،
۲. استفاده از دستگاه هم‌زن مکانیکی در ابتدا برای اختلاط اولیه‌ی نانوغرافن در اپوکسی،
۳. استفاده از دستگاه آلتراسونیک برای پراکنده کردن^۱ نانوذرات از هم‌دیگر با تنظیم دامنه‌ی ارتعاش پراب و زمان توزیع

^۱ Disperse

۴. اضافه کردن هاردنر، پس از اتمام نهایی کار با دستگاه آلتراسونیک و استفاده از همزن مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه

دستگاه آلتراسونیک Sonicator-Q700 و توزیع نانوگرافن با دستگاه آلتراسونیک و همزن مکانیکی در شکل ۳-۵ ارائه شده است.



شکل ۳-۵-الف) دستگاه آلتراسونیک Sonicator-Q700، ب) توزیع نانوگرافن در رزین اپوکسی و داخل محلول آب و یخ با دستگاه آلتراسونیک، ج) همزن مکانیکی

۳-۳- ساخت نمونه‌های آزمون کشش رزین

نمونه‌های آزمون کشش رزین طبق استاندارد ASTM D638 ساخته شد. نمونه‌های آزمون کشش رزین با و بدون نانوذرات گرافن ساخته شد. همچنین نمونه‌های آزمون کشش رزین در درصدهای مختلف وزنی تهیه شدند.

۳-۳-۱- مراحل ساخت نمونه‌های آزمون کشش رزین

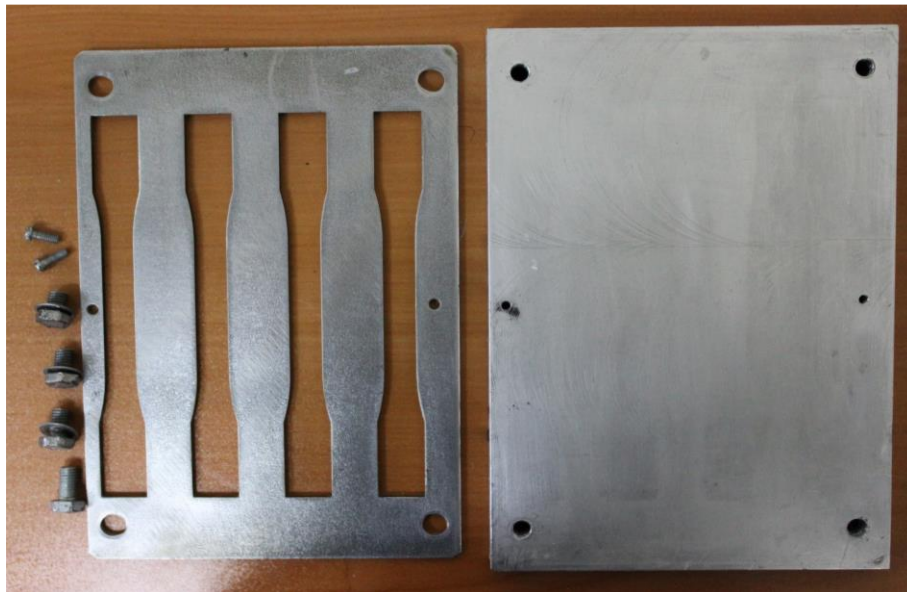
برای ساخت نمونه‌ی آزمون کشش طبق استاندارد ذکر شده، از قالب فلزی دو تکه آلومینیومی به شرح زیر استفاده شد.

۱. پاک کردن سطح هر دو تکه‌ی قالب فلزی با استفاده از تینر،
۲. زدن واکس جداکننده به سطح هر دو تکه‌ی قالب فلزی،
۳. انتخاب سطح کاملاً تراز برای قراردادن قالب فلزی،
۴. توزین دقیق رزین اپوکسی و هاردنر و ترکیب آنها با نسبت هاردنر به اپوکسی ۲۸ به ۱۰۰،
۵. هم‌زدن آرام رزین و هاردنر برای جلوگیری از ایجاد حباب،

۶. در صورت وجود حباب می‌توان با کمی افزایش دمای اطراف بشر یا قراردادن در دستگاه آون، حباب‌ها را از بین برد.

۷. ریختن رزین آماده‌شده در قالب (بهتر است فقط از یک گوشه قالب، رزین به داخل محفظه ریخته شود).

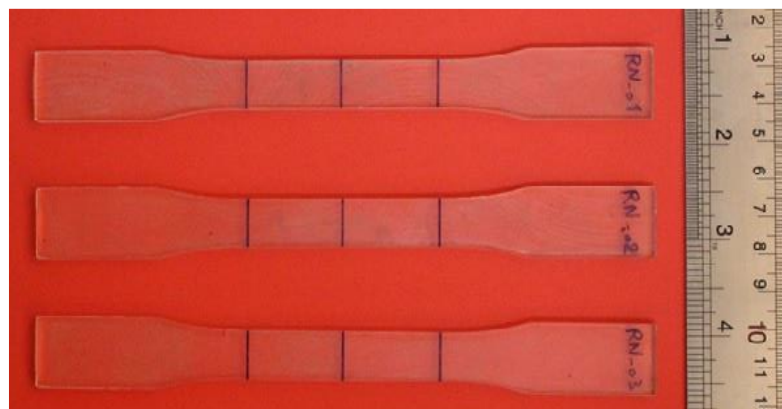
ساخت نمونه‌های آزمون کشش رزین با نانوگرافن مانند مراحل گفته‌شده‌ی بخش ۳-۲ توزیع کرد. در شکل ۳-۶ قالب آلومینیومی دوتکه برای ساخت نمونه‌ی کشش رزین ارائه شده است.



شکل ۳-۶- قالب آلومینیومی برای ساخت نمونه‌ی آزمون کشش رزین

۳-۳-۲- نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوذرات گرافن

در این بخش، سه عدد نمونه‌ی آزمون کشش رزین بدون نانوذرات گرافن، با نسبت رزین به هاردنر ۲۸ به ۱۰۰ طبق مراحل شرح داده‌شده در بخش ۳-۳-۱ ساخته شد. در شکل ۳-۷ نمونه‌های ساخته‌شده نمایش داده شده است.



شکل ۳-۷- نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوگرافن

۳-۳-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب نوع بهینه‌ی نانوگرافن

برای انتخاب نوع بهینه نانوگرافن از میان نانوذرات ذکر شده در بخش ۳-۱-۳ نمونه‌های آزمون کشش رزین با ۰/۵٪ وزنی نانوگرافن ساخته شد که نحوه‌ی توزیع نانوگرافن در جدول ۲-۳ بیان شده است.

۲-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین با ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافن

کد	درصد وزنی نانوگرافن	نوع نانوگرافن	ارتعاش دامنه‌ی آلتراسونیک (μm)	زمان توزیع آلتراسونیک (دقیقه)	زمان هم‌زدن مکانیکی (دقیقه)
RL01	۰/۵٪	Graphene-NH2	۷۲	۵۰	۳۰
RL02	۰/۵٪	Graphene-NH2	۷۲	۵۰	۳۰
RL03	۰/۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RL04	۰/۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RL05	۰/۵٪	Graphene-NH2	۹۶	۵۰	۳۰
RL06	۰/۵٪	Graphene-NH2	۹۶	۵۰	۳۰
RL07	۰/۵٪	Research grade	۷۲	۵۰	۳۰
RL08	۰/۵٪	Research grade	۷۲	۵۰	۳۰
RL09	۰/۵٪	Graphene-NH2	۷۲	۳۰	۳۰
RL10	۰/۵٪	Graphene-NH2	۷۲	۳۰	۳۰

در شکل ۳-۸ نمونه‌های ساخته‌شده با انواع مختلف نانوذرات گرافن، ارائه شده است.



شکل ۳-۸- نمونه‌های ساخته‌شده با انواع مختلف نانوذرات گرافن

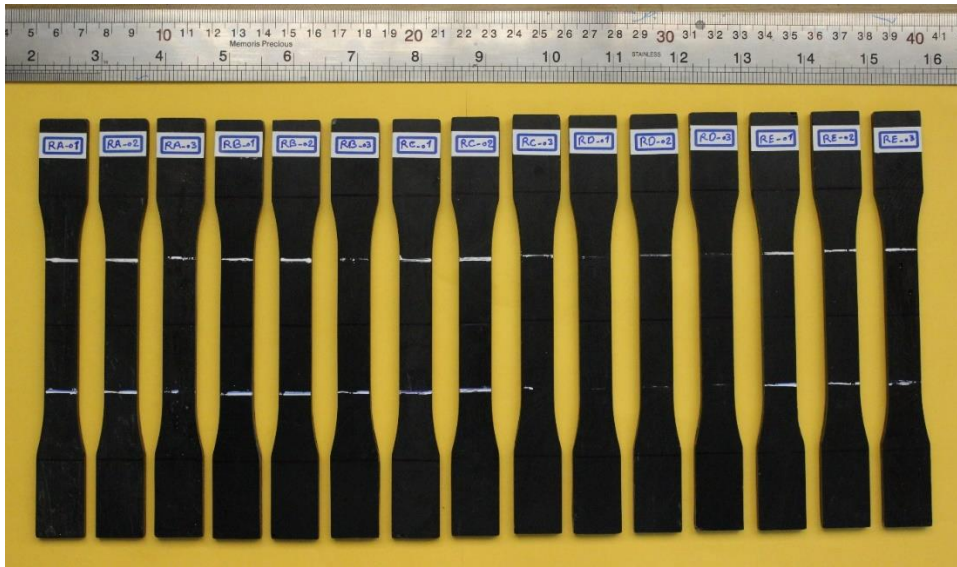
۳-۳-۴- نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب درصد بهینه‌ی نانوگرافن

در این بخش، پس از انتخاب نوع بهینه‌ی نانوذرات گرافن، برای انتخاب درصد وزنی مناسب نانوگرافن نمونه‌های آزمون کشش رزین در درصدهای وزنی مختلف ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۱/۲۵، ۲ می‌پردازیم که نحوه‌ی توزیع نانوگرافن در جدول ۳-۳ تشریح شده است.

جدول ۳-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین با درصدهای وزنی مختلف

کد	درصد وزنی نانوگرافن	نوع نانوگرافن	ارتعاش دامنه‌ی آلتراسونیک (μm)	زمان توزیع آلتراسونیک (دقیقه)	زمان هم‌زدن مکانیکی (دقیقه)
RA01	۰/۰۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RA02	۰/۰۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RA03	۰/۰۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RB01	۰/۰۷۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RB02	۰/۰۷۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RB03	۰/۰۷۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RC01	۱٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RC02	۱٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RC03	۱٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RD01	۱/۰۲۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RD02	۱/۰۲۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RD03	۱/۰۲۵٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RE01	۲٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RE02	۲٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰
RE03	۲٪	Industrial grade	۷۲	۵۰	۳۰

در شکل ۳-۹ نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای مختلف نانوذرات گرافن، ارائه شده است.



شکل ۳-۹- نمونه‌های ساخته‌شده با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات گرافن نوع صنعتی

۳-۳-۵- نمونه‌های آزمون کشش رزین اپوکسی با اکسید نانوذرات تک‌لایه‌ی گرافن در این پایان‌نامه برای بررسی اثر اکسید نانوذرات تک‌لایه‌ی گرافن و مقایسه‌ی آن با اثر نانوذرات چندلایه، سه عدد نمونه آزمون کشش رزین ساخته شد و مشخصات ساخت آن در جدول ۳-۴ و نمونه‌های ساخته‌شده در شکل ۳-۱۰ ارائه شده است.

۳-۴- مشخصات ساخت نمونه آزمون کشش رزین نانوذرات گرافن تک‌لایه

کد	درصد وزنی نانوغرافن	نوع نانوغرافن	ارتفاع دامنه‌ی آلتراسونیک (μm)	زمان توزیع آلتراسونیک (دقیقه)	زمان هم‌زدن مکانیکی (دقیقه)
RLS01	۰/۵٪	Graphene Oxide-Single layer	۷۲	۵۰	۳۰
RLS02	۰/۵٪	Graphene Oxide-Single layer	۷۲	۰+۵	۳۰
RLS03	۰/۵٪	Graphene Oxide-Single layer	۷۲	۵۰	۳۰



شکل ۳-۱۰- نمونه‌های آزمون کشش رزین نانوذرات تک‌لایه‌ی گرافن اکساید

۳-۴- نحوه‌ی ساخت نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی

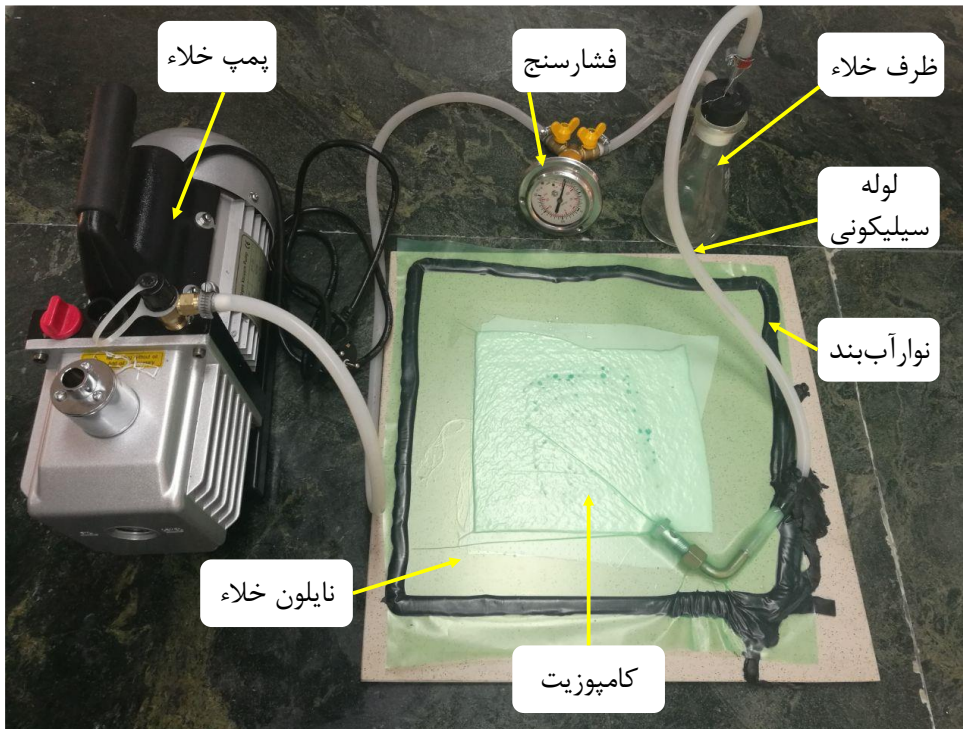
در این بخش، نحوه‌ی ساخت نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون نانوگرافن طبق استاندارد ASTM D3039 برای بدست آوردن خواص مکانیکی بیان می‌شود. برای ساخت هسته‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه‌ی پارچه‌ای نوع E (100 gr/m^2) محصول شرکت Interglass آلمان و ضخامت 0.8 mm و رزین اپوکسی CR122 محصول شرکت Axon فرانسه استفاده شد. هسته‌ی کامپوزیتی از ۱۰ لایه الیاف شیشه در دو زاویه‌ی الیاف صفر و ۴۵ درجه به شرح زیر ساخته شد.

۱. برش الیاف شیشه در اندازه‌ی $100 \times 100 \text{ mm}$ به تعداد لایه‌ها (طبق استاندارد، اندازه‌ی نمونه‌ی آزمون کشش $250 \times 25 \text{ mm}$ است. با توجه به این که سه نمونه مورد نیاز بود، یک نمونه‌ی بزرگتر به ابعاد $300 \times 100 \text{ mm}$ ساخته و سپس نمونه‌های آزمون کشش بریده شد).
۲. برش نمد رزین‌گیر، پارچه‌ی آستری، و کیوم‌بگ و نوار آب‌بند در اندازه‌های مناسب،
۳. سرهم کردن شلنگ‌های سیلیکون و شیر اتصال و سری شلنگ برای وصل کردن به پمپ خلاء،
۴. توزین رزین اپوکسی و هاردنر، سپس ترکیب آنها،
۵. قراردادن شیشه روی میز و زدن واکس جداکننده به سطح شیشه،
۶. قراردادن نمد رزین‌گیر روی سطح شیشه،
۷. قراردادن پارچه‌ی آستری روی نمد برای جداشدن راحت‌تر کامپوزیت،
۸. اضافه کردن کمی رزین اپوکسی با قلم‌مو به سطح پارچه‌ی آستری،
۹. قرار دادن یک لایه الیاف شیشه،
۱۰. زدن رزین اپوکسی با قلم‌مو به سطح الیاف شیشه تا الیاف کاملاً آغشته شود،
۱۱. تکرار مراحل ۱۰ و ۱۱ برای تمامی لایه‌ها،
۱۲. قراردادن پارچه‌ی آستری روی آخرین لایه‌ی الیاف شیشه،
۱۳. قراردادن نمد رزین‌گیر روی سطح پارچه‌ی آستری،
۱۴. چسپاندن نوار آب‌بند در اطراف قطعه کار،
۱۵. قراردادن یک سر لوله‌ی سیلیکونی اطراف قطعه کار برای خلاء
۱۶. قرار دادن دقیق نایلون خلاء روی قطعه کار به طوری که لبه‌های نایلون کمی از نوار آب‌بند عبور کرده باشد و چسباندن کامل آن به نوار آب‌بند
۱۷. روشن کردن پمپ خلاء (استفاده از پمپ خلاء برای خارج کردن هوای محبوس بین الیاف با اعمال فشار خلاء 1 bar - توسط پمپ خلاء)،
۱۸. بستن شیر قطع کن لوله‌ی سیلیکونی پس از خلاء کامل،

۱۹. خاموش کردن پمپ خلاء

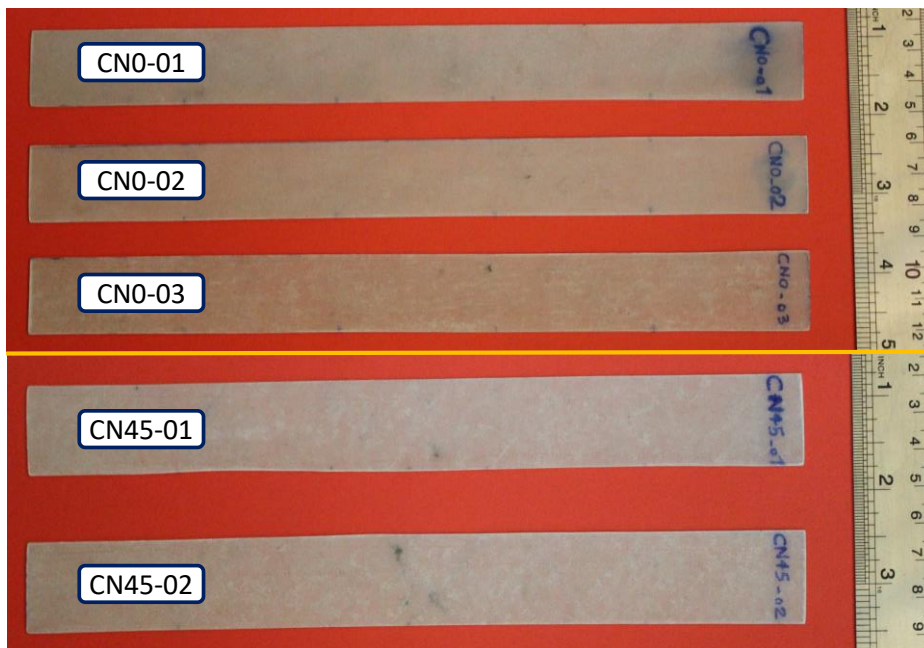
۲۰. جدا کردن قطعه کار پس از ۲۴ ساعت پخت رزین در دمای محیط

در شکل ۳-۱۱ ساخت هسته‌ی کامپوزیتی به روش محفظه‌ی خلاء ارائه شده است.



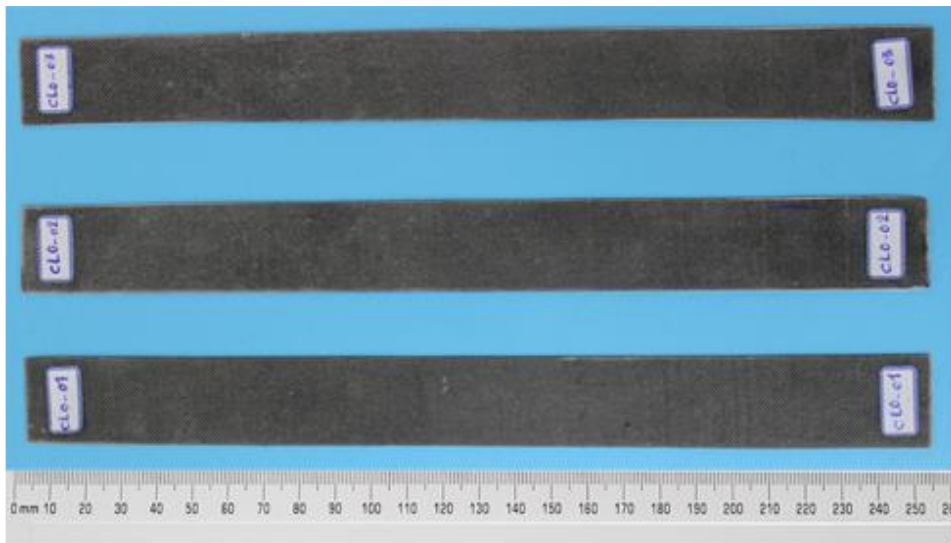
شکل ۳-۱۱- ساخت هسته‌ی کامپوزیتی به روش خلاء

در شکل ۳-۱۲ نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی در دو زاویه‌ی الیاف 0° و 45° ارائه شده است.



شکل ۳-۱۲- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی در دو زاویه‌ی الیاف 0° و 45°

در شکل ۳-۱۳ نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی با زاویه‌ی الیاف 0° ارائه شده است.



شکل ۳-۱۳- نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی تقویت‌شده با اکسید نانوذرات گرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی با زاویه‌ی الیاف 0°

۳-۵- ساخت ورق FML

ورق‌های FML به صورت آلومینیوم/ورق کامپوزیتی/آلومینیوم می‌باشد که در این پژوهش به صورت همزمان ساخته می‌شود.

۳-۵-۱- مواد

در ساخت ورق کامپوزیتی الیاف-فلز، از ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت 0.66 mm ساخت شرکت آلکوا و همچنین برای ساخت هسته‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه‌ی پارچه‌ای نوع E (100 gr/m^2) آلمانی با ضخامت 0.8 mm و رزین اپوکسی CR122 محصول شرکت آکسون فرانسه استفاده شد. هسته‌ی کامپوزیتی به صورت ده‌لایه ساخته شد.

۳-۵-۲- ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با و بدون نانوگرافن برای آزمون ضربه‌ی سرعت پایین و آزمون کشش FML

به‌منظور بررسی اثر نانوذرات گرافن بر نتایج ضربه‌ی سرعت پایین، ورق FML به شرح زیر تولید شد. با توجه به اندازه‌ی فیکسچر دستگاه آزمون ضربه‌ی سقوط آزاد^۱، اندازه‌ی هر نمونه $150 \times 150 \text{ mm}$ می‌باشد.

مراحل آماده‌سازی و ساخت عبارت‌است از:

^۱ Drop hammer

• **برش دقیق ورق آلومینیوم در اندازه‌ی نهایی**

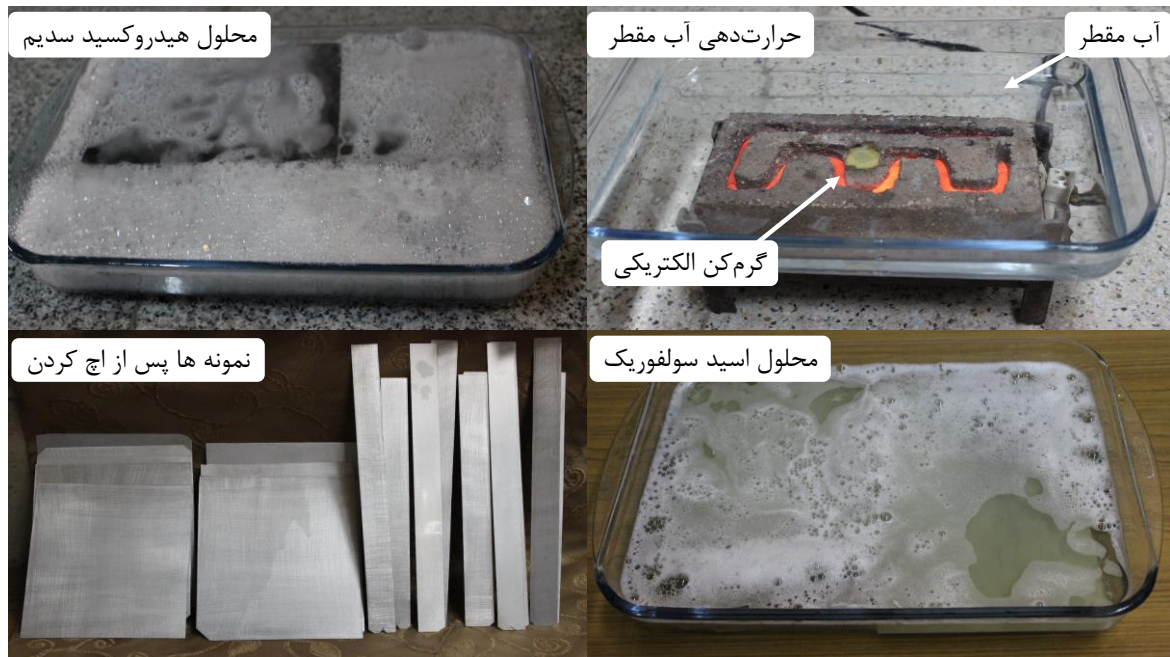
ابتدا سطح ورق آلومینیوم در اندازه‌ی مورد نیاز خط‌کشی و سپس با دستگاه گیوتین برش داده شد. برای جبران خطای دقت دستگاه گیوتین، اندازه‌ها را حدود ۵ میلی‌متر بزرگ‌تر خط‌کشی کرده و پس از برش به وسیله‌ی سوهان و سمباده، به اندازه‌ی موردنظر رسانده شد.

• **آماده‌سازی سطح آلومینیوم (اچ کردن)**

به‌منظور دستیابی به اتصالاتی مناسب بین ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی و جلوگیری از پدیده‌ی جدایش^۱، سطوح تماسی ورق آلومینیوم از هرگونه روغن و چربی پاک شد. مراحل آماده‌سازی سطوح آلومینیوم به‌شرح زیر است:

۱. برش ورق آلومینیوم در اندازه‌ی موردنظر و تمیزکردن سطح با پارچه‌ی تمیز،
۲. قطعات در محلول آب گرم و هیدروکسید سدیم با غلظت ۲٪ به مدت ۳ دقیقه قرار گرفت. دمای محلول ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کنترل شد. باید توجه داشت که از واکنش این محلول و آلومینیوم مقدار زیادی گاز هیدروژن آزاد می‌شود که در صورت عدم وجود تهویه‌ی مناسب و بسته‌بودن محیط، خطر انفجار وجود دارد.
۳. نمونه‌ها که توسط لایه‌ی سیاهی پوشیده شده‌اند، با آب شسته شد تا کاملاً تمیز شوند،
۴. ایجاد خراش بر روی سطح ورق آلومینیوم با پارچه سمباده‌ی ۸۰، برای چسندگی بهتر،
۵. محلولی از اسیدسولفوریک، آب و سولفات فریت با نسبت ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب، ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک و ۱۲۰ گرم سولفات فریت تهیه و قطعات آلومینیومی به مدت ۱۰ تا ۱۲ دقیقه در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار دادند،
۶. خشک کردن قطعات پس از شست‌وشو. در شکل ۳-۱۴ برخی مراحل آماده‌سازی سطح آلومینیوم ارائه شده است.

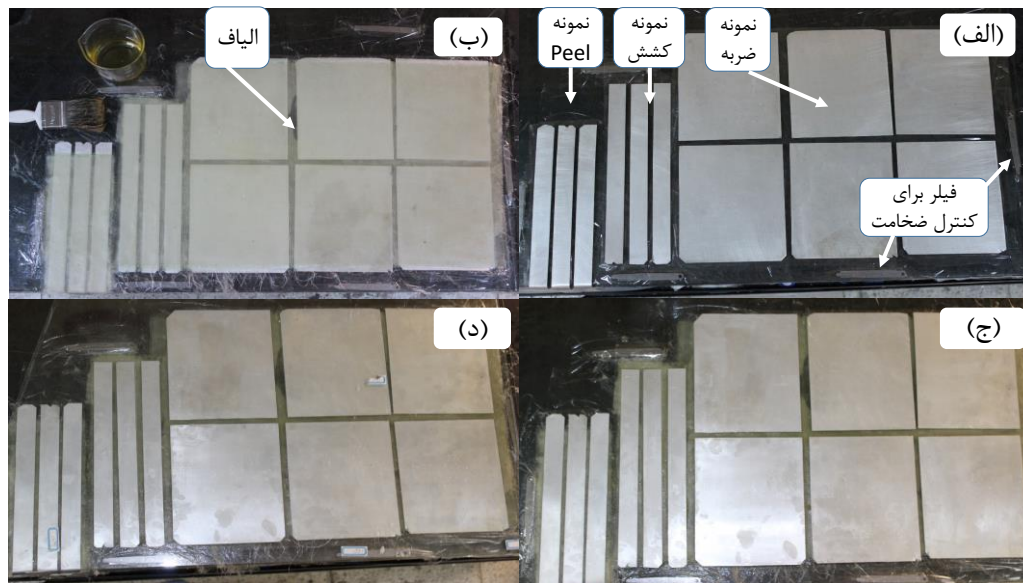
^۱ Delaminaion



شکل ۳-۱۴- برخی مراحل آماده‌سازی سطح آلومینیوم

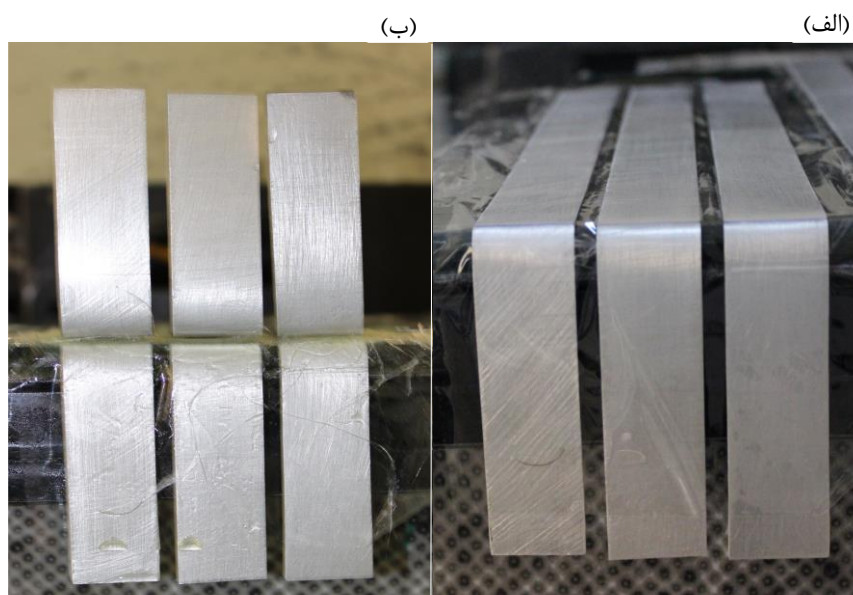
• مراحل ساخت نمونه‌های FML

۱. زدن واکس جداکننده به سطح شیشه یا میزکار،
 ۲. چیدن قطعات ورق آلومینیوم اچ شده با فاصله‌ی ۵ میلی‌متری کنار هم بر روی شیشه،
 ۳. برش الیاف شیشه را به تعداد ۱۰ قطعه و کمی بزرگتر از اندازه‌ی مجموع سطوح و فاصله‌ها،
 ۴. ترکیب رزین و هاردنر پس از توزین و هم‌زدن آن‌ها به مدت چند دقیقه (توجه شود که برای ساخت قطعات کامپوزیتی الیاف-فلز با نانوگرافن، در این مرحله باید رزین را طبق مراحل گفته‌شده‌ی بخش ۳-۳ آماده شود)،
 ۵. انجام لایه‌چینی الیاف و آغشته کردن لایه‌ها به رزین توسط قلم‌مو،
 ۶. قراردادن ورق آلومینیوم روی سطح آخرین لایه الیاف شیشه،
 ۷. چسباندن فیلرها در اطراف نمونه برای کنترل ضخامت قطعات (ضخامت قطعات FML، ۲/۴mm بوده است)،
 ۸. قراردادن شیشه به آرامی روی قطعات ساخته شده به طوری که فیلرها هم درگیر شوند،
 ۹. باز کردن قطعات پس از ۲۴ ساعت و برش نمونه‌ی ساخته‌شده به وسیله‌ی اره مویی و پس از آن، از بین بردن زائده‌های اطراف نمونه‌ها به وسیله‌ی سوهان و سمباده،
- برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش FML طبق استاندارد ASTM-D3039 و همانند مراحل فوق انجام شود. در این پژوهش، نمونه‌های آزمون ضربه، آزمون کشش FML و آزمون پوست‌کنی که همزمان ساخته شده‌اند و مراحل ساخت FML در شکل ۳-۱۵ ارائه شده است.



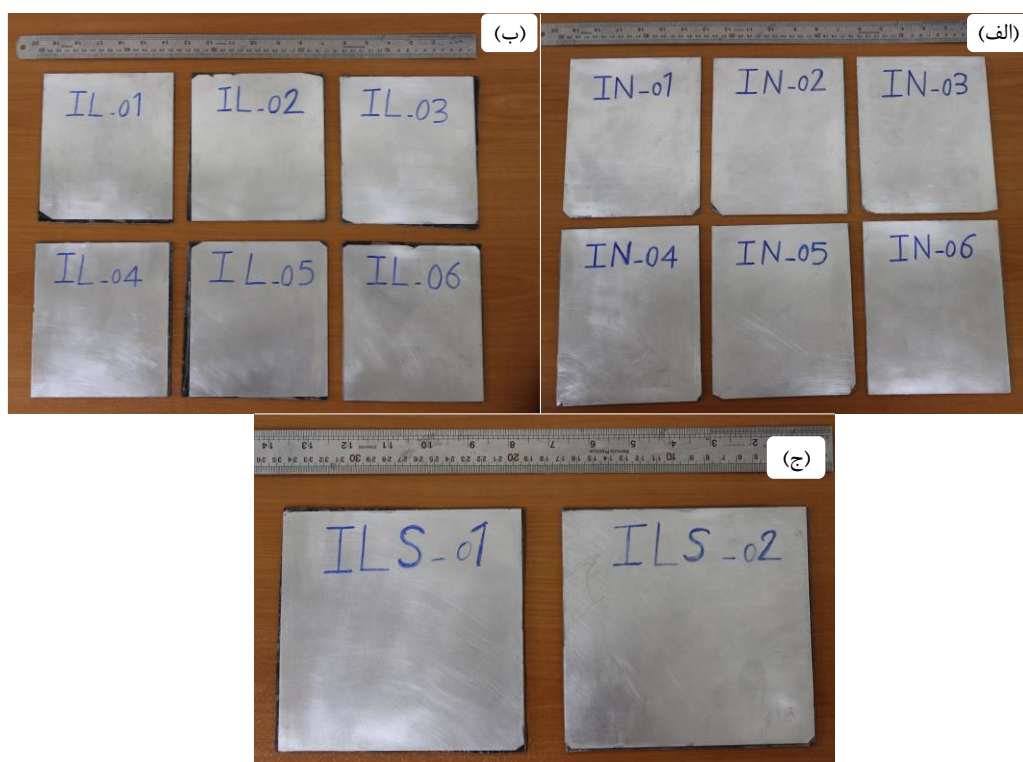
شکل ۳-۱۵- مراحل لایه‌چینی نمونه‌های FML، الف) قراردادن ورق‌های آلومینیومی بر روی شیشه، ب) لایه‌چینی الیاف شیشه، ج) قراردادن ورق‌های آلومینیومی بر روی الیاف لایه‌چینی شده، د) قراردادن شیشه بر روی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمون پوست‌کنی هم‌زمان با نمونه‌های ضربه ساخته شد و ساخت نمونه‌های آزمون پوست‌کنی هم مانند ساخت نمونه‌های FML می‌باشد، با این تفاوت که قبل از ساخت، ورق‌های آلومینیوم طبق استاندارد ASTM D1876 در فاصله‌ی ۷۶ میلی‌متری از لبه‌ی ورق خم شد و ورق‌های آلومینیوم در لبه‌ی میز قرار گرفت و سپس لایه‌چینی را انجام شد. نحوه‌ی ساخت و نمونه‌های نهایی ساخته‌ی شده‌ی آزمون پوست‌کنی، به‌ترتیب در شکل ۳-۱۶ ارائه شده است.



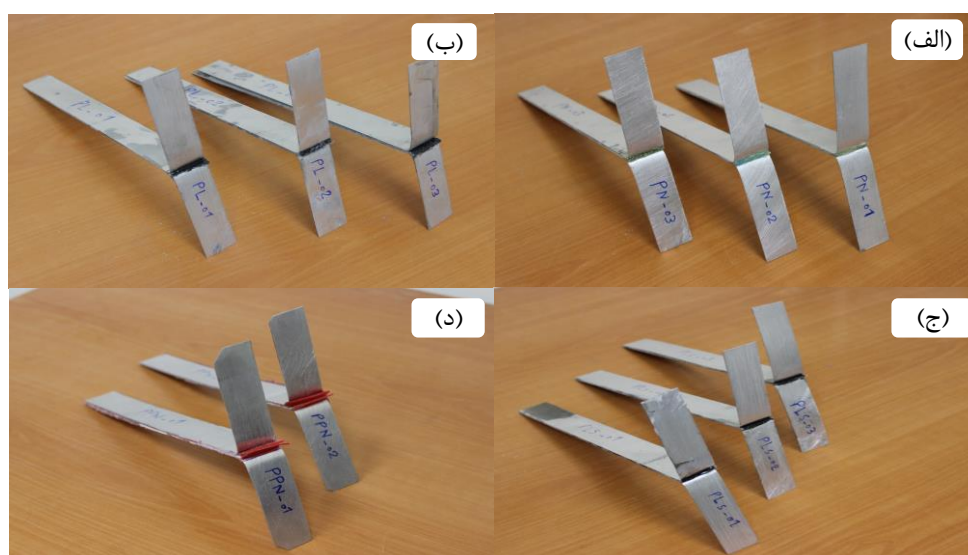
شکل ۳-۱۶- ساخت نمونه‌های آزمون پوست‌کنی، الف) ورق آلومینیوم با خم ۹۰ درجه، ب) قراردادن ورق آلومینیومی فوقانی بعد از لایه‌چینی الیاف

نمونه‌های نهایی ساخته‌ی شده‌ی آزمون ضربه در شکل ۳-۱۷ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۷- نمونه‌های ساخته‌شده‌ی ضربه، الف) FML بدون نانوگرافن، ب) FML با نانوگرافن چندلایه، ج) FML با نانوگرافن تک‌لایه

نمونه‌های نهایی ساخته‌ی شده‌ی آزمون پوست‌کنی، در شکل ۳-۱۸ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۸- نمونه‌های ساخته‌شده‌ی آزمون پوست‌کنی

۳-۵-۳- ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان

برای ساخت ورق FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان به دلیل وجود پلی‌اورتان به‌عنوان یک گرمانرم، از دستگاه پرس گرم استفاده شد. مراحل ساخت این ورق، عبارت‌است از:

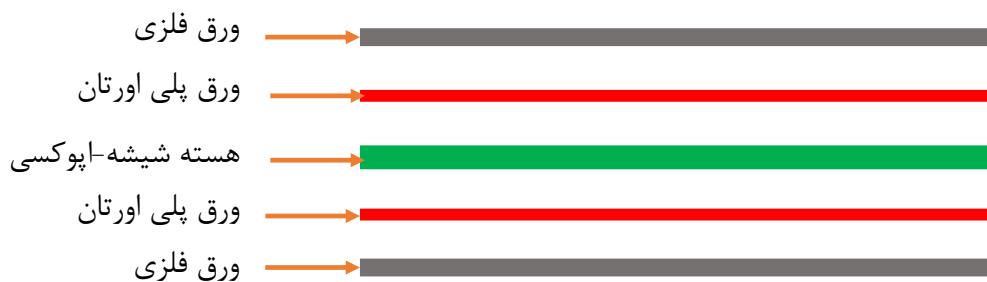
۱. ساخت هسته‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه و رزین اپوکسی (طبق مراحل بخش ۳-۴)،
۲. برش هسته‌ی کامپوزیتی، ورق پلی‌اورتان و پارچه‌ی نسوز در اندازه‌ی لازم،
۳. اچ کردن سطوح ورق آلومینیوم،
۴. آماده کردن فیلرها برای کنترل ضخامت ورق‌ها (ضخامت قطعات، $3/7\text{mm}$ بوده‌است)
۵. روشن کردن دستگاه پرس گرم و تنظیم دما بر روی 150°C ،
۶. قراردادن پارچه‌ی نسوز روی صفحه‌ی پایینی دستگاه پرس گرم،
۷. قراردادن ورق آلومینیوم روی پارچه‌ی نسوز،
۸. لایه‌چینی مطابق شکل ۳-۲۰
۹. اعمال فشار ۲ تا ۴ bar به نمونه به مدت ۴ دقیقه

ورق پلی‌اورتان استفاده شده در این پایان‌نامه در شکل ۳-۱۹ ارائه شده است.



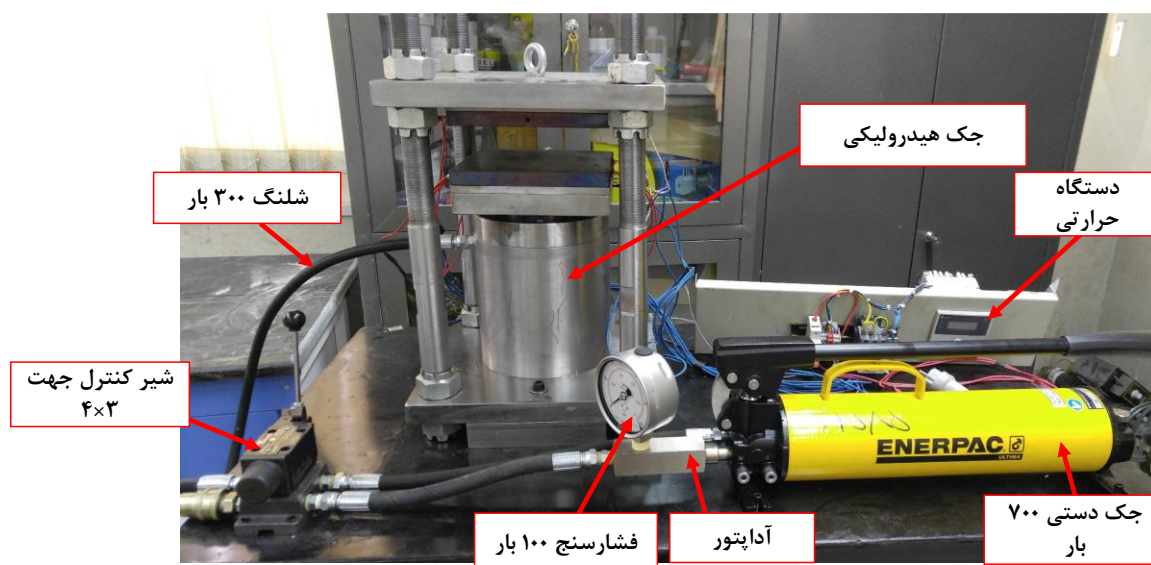
شکل ۳-۱۹- ورق پلی‌اورتان استفاده شده

در شکل ۳-۲۰ نحوه‌ی لایه‌چینی FML ساخته‌شده با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، ارائه شده است.



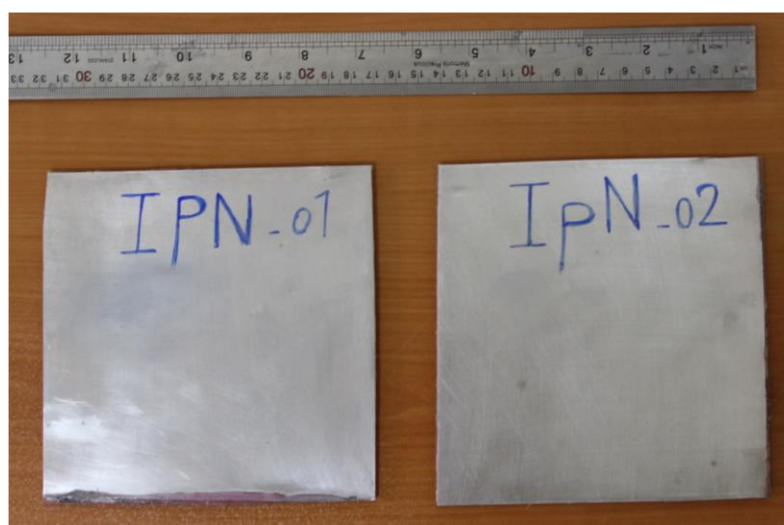
شکل ۳-۲۰- نحوه‌ی لایه چینی FML ساخته‌شده با لایه‌ی چسب پلی اورتان

در شکل ۳-۲۱ دستگاه پرس گرم برای ساخت FML با لایه‌ی چسب پلی اورتان ارائه شده است.



شکل ۳-۲۱- تصویر دستگاه پرس گرم کارگاه شکل‌دهی برای ساخت FML با لایه‌ی چسب پلی اورتان

در شکل ۳-۲۲ نمونه‌های FML ساخته‌شده با پلی اورتان برای آزمون ضربه ارائه شده است.



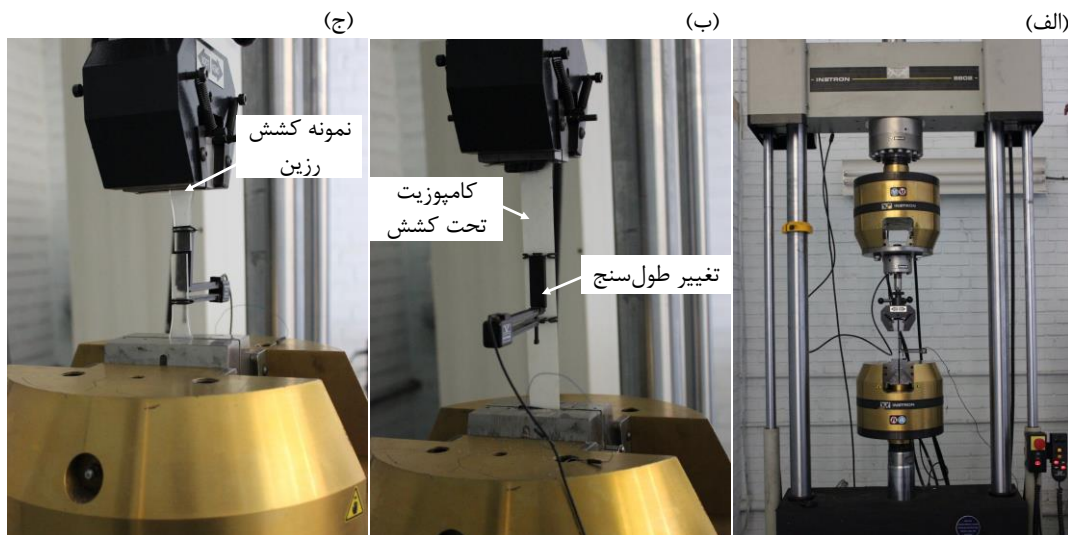
شکل ۳-۲۲- نمونه‌های FML ساخته‌شده با پلی اورتان برای آزمون ضربه

۳-۶- طراحی آزمون‌های تجربی

برای بدست آوردن خواص مکانیکی رزین اپوکسی، الیاف شیشه، هسته‌ی کامپوزتی، FML و چسبندگی هسته‌ی کامپوزیتی به آلومینیوم، آزمون‌های کشش، فشردن استاتیکی، ضربه و پوست‌کنی انجام شد که در ادامه‌ی به معرفی آن‌ها پرداخته شده است.

۳-۶-۱- آزمون کشش

آزمون‌های کشش به وسیله‌ی دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ با نیروسنج‌هایی به ظرفیت نامی ۲۵ kN و ۲۵۰ kN انجام شد. آزمون کشش نمونه‌های ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ طبق استاندارد ASTM-E8M و کشش رزین اپوکسی و هسته‌ی کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D3039، انجام شد. خروجی‌های مدنظر از این آزمون، استحکام تسلیم، ازدیاد طول، مدول کشسان و انرژی شکست هر کدام از نمونه‌ها می‌باشد. در شکل ۳-۲۳ دستگاه کشش اینسترون و آزمون کشش کامپوزیت و رزین بر روی این دستگاه ارائه شده است.



شکل ۳-۲۳- الف) دستگاه کشش اینسترون آزمایشگاه خواص مکانیکی، ب) آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی، ج) نمونه‌ی آزمون کشش رزین اپوکسی

۳-۶-۲- آزمون فشردن استاتیکی با سنبه‌ی نیم‌کروی

آزمون فشار استاتیکی با سنبه‌ی نیم‌کروی توسط دستگاه انیورسال دانشگاه امیرکبیر با ظرفیت نامی ۵۰ kN انجام شد. از این آزمون برای تخمین انرژی شکست ورق‌ها و مقایسه‌ی انرژی شکست ورق FML با و بدون نانوگرافن استفاده شد. خروجی این آزمون، انرژی شکست کل برای ورق FML می‌باشد. در شکل ۳-۲۴ دستگاه مورد استفاده نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۴- دستگاه آزمون کشش/فشار انیورسال آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر

۳-۶-۳- آزمون ضربه

آزمون ضربه با دستگاه آزمون ضربه‌ی سقوط آزاد دانشگاه امیرکبیر که در شکل ۳-۲۵ ارائه شده است، انجام شد. حداقل انرژی دستگاه ۶ ژول، با محدوده‌ی ارتفاع اولیه‌ی ۲۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر و قابلیت تغییر جرم ضربه‌زننده با فواصل ۵ کیلوگرم و تغییر ارتفاع با فواصل ۵ سانتی‌متر است. خروجی‌های دستگاه در این آزمون، مقادیر شتاب و زمان برای هر ۱۳ میکروثانیه است. از نمودار شتاب-زمان با استفاده از روابط، نمودار سرعت-زمان، نیرو-زمان، نیرو-جابه‌جایی، انرژی-زمان و جابه‌جایی-زمان حاصل خواهد شد. می‌توان با ضرب شتاب خروجی دستگاه در جرم ضربه‌زننده، نیروی ضربه‌زننده را محاسبه کرد:

$$F(t) = Ma(t) \quad ۱-۳$$

که M جرم ضربه‌زننده، $a(t)$ شتاب ضربه‌زننده و $F(t)$ نیروی اعمالی بر حسب زمان است. با انتگرال‌گیری از $a(t)$ نسبت به زمان، می‌توان تغییرات سرعت بر حسب زمان را به‌دست آورد.

$$V(t) = V_0 + \int_0^t a(t) dt \quad ۲-۳$$

که $V(t)$ و V_0 به‌ترتیب سرعت لحظه‌ای و سرعت اولیه‌ی ضربه‌زننده می‌باشد. V_0 را می‌توان بر حسب انرژی پتانسیل گرانشی از رابطه‌ی ۳-۳ به‌دست آورد:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2U}{M}} \quad ۳-۳$$

که U انرژی برخورد مجموعه‌ی متحرک است و با لحاظ کردن ۱۵٪ اتلاف انرژی، انرژی برخورد را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$U = 0/85 * Mgh \quad ۴-۳$$

برای محاسبه‌ی تاریخچه‌ی جابه‌جایی، باید از $V(t)$ نسبت به زمان انتگرال‌گیری کرد.

$$X(t) = \int_0^t V(t) dt \quad ۵-۳$$

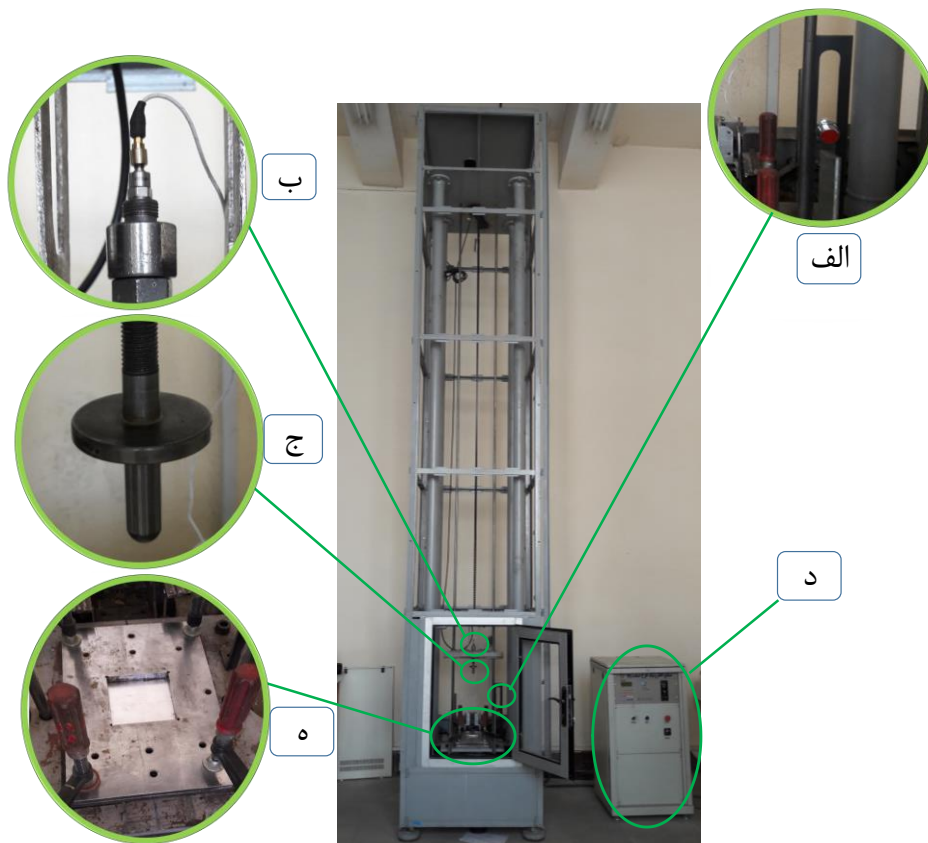
$X(t)$ جابه‌جایی بر حسب زمان می‌باشد. با انتگرال‌گیری از F نسبت به X می‌توان انرژی W را به دست آورد.

$$W = \int_0^x F dx \quad ۶-۳$$

انرژی جذب‌شده E_a توسط نمونه را می‌توان از رابطه‌ی ۳-۷ محاسبه کرد.

$$W_a = \frac{1}{2} M(V_0^2 - V_m^2) \quad ۷-۳$$

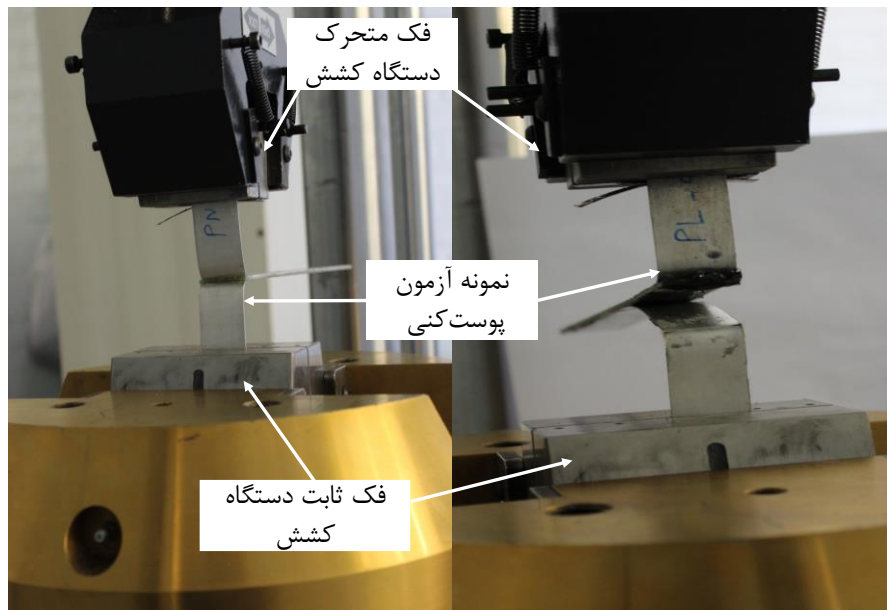
V_m سرعت ضربه‌زننده پس از برخورد در جداشدن از نمونه می‌باشد.



شکل ۳-۲۵- دستگاه آزمون سقوط آزاد سرعت پایین آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر، سنسور تشخیص ضربه‌زننده برای شروع داده‌برداری، (ب) شتاب‌سنج، (ج) ضربه‌زننده، (د) پردازش‌گر اطلاعات و (ه) قید و بست نمونه‌ی ضربه

۳-۶-۴- آزمون پوست کنی

آزمون پوست کنی به وسیله‌ی دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ با نیروسنج به ظرفیت ۲۵ kN استفاده شد. این آزمون برای به دست آوردن خواص چسب برای استفاده در شبیه‌سازی ضربه و مقایسه‌ی میزان چسبندگی هسته‌ی کامپوزیتی به ورق آلومینیوم با و بدون نانوگرافن طبق استاندارد ASTM-D1876 انجام خواهد شد. خروجی این آزمون نیروی جداشدن ورق آلومینیوم از هسته (از هم‌گسیختگی چسب) نسبت به عرض نمونه با توجه به جابه‌جایی فک دستگاه می‌باشد که از این جابه‌جایی فک، به طور تقریبی موقعیت مکانی در راستای طولی نمونه حاصل خواهد شد. در شکل ۳-۲۶ نمونه‌ی آزمون پوست کنی در حین اجرای آزمون با دستگاه کشش اینسترون، ارائه شده است.



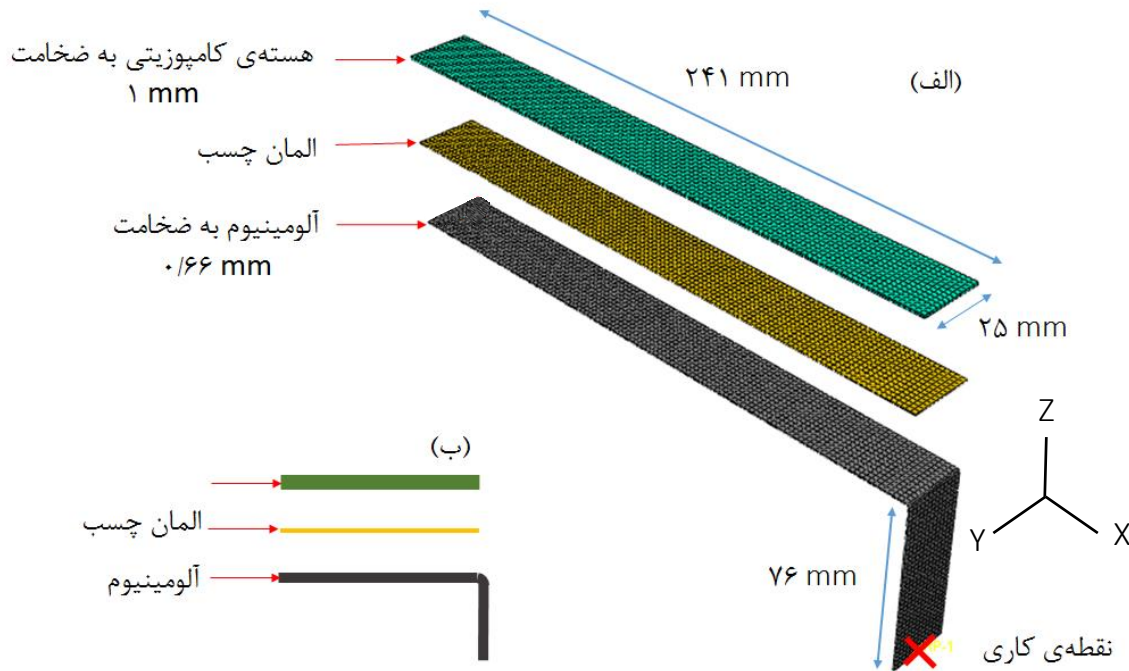
شکل ۳-۲۶- آزمون پوست کنی بر روی نمونه‌ی FML

۳-۷- شبیه‌سازی عددی

ابتدا برای یافتن خواص چسب، فرآیند پوست کنی به کمک نرم‌افزار Abaqus 6.14 شبیه‌سازی شد و پس از مشخص شدن خواص چسب، به مدل‌سازی صفحه‌ی کامپوزیتی الیاف-فلز تحت ضربه‌ی سرعت پایین پرداخته شد. خروجی این بخش نمودارهای شتاب-زمان، نیرو-زمان، سرعت-زمان، انرژی-زمان، جابجایی-زمان و نیرو-جابجایی برای آزمون ضربه و نمودار نیرو-جابجایی برای آزمون پوست کنی می‌باشد.

۳-۷-۱- مدل‌سازی هندسی آزمون پوست کنی

برای بدست آوردن خواص چسب در حالت‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه، مدل‌سازی آزمون پوست کنی انجام شد. برای مدل‌سازی این نمونه فقط یک ورق آلومینیوم متصل به هسته‌ی کامپوزیتی استفاده شد. برای مش‌بندی این نمونه از المان جامد هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شد. در این شکل هندسی نمونه‌ی آزمون پوست کنی و اندازه‌های هسته‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیوم بر طبق استاندارد ASTM-D1876، در شکل ۳-۲۷ آورده شده است.



شکل ۳-۲۷-الف) شکل هندسی نمونه‌ی آزمون پوست‌کنی و اندازه‌های هسته‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیوم برطبق استاندارد ASTM-D1876، ب) نحوه‌ی لایه‌چینی نمونه آزمون پوست‌کنی از نمای جانبی

برای ورق کامپوزیتی به‌استثنای جهت طولی (X) همه‌ی درجات بسته شد و جابجایی سطح عمودی ورق آلومینیوم در جهت (Z) کنترل شد.

از حل‌گر استاندارد برای تحلیل استفاده شد. نمودار نیرو-جابجایی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. برای تعریف نحوه‌ی تماس بین ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی از المان چسب^۱ استفاده شد. برای تعریف چسب، باید سفتی چسب در راستای عمودی، برشی و مماسی (K_{tt} ، K_{ss} ، K_{nn})، استحکام نهایی چسب در راستای عمودی و برشی ۱ و ۲، و جابجایی پلاستیک چسب را وارد کرد. هر سه پارامتر سفتی چسب در راستای عمودی، برشی و مماسی و هر سه پارامتر استحکام نهایی چسب در راستای عمودی و برشی ۱ و ۲ را یکسان فرض شد. از مقایسه‌ی نمودار نیرو-جابجایی شبیه‌سازی با آزمون تجربی پارامترهای ذکرشده با سعی و خطا تعیین شد.

• خواص مکانیکی

در این مدل‌سازی، ورق آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و هسته‌ی کامپوزیتی شیشه-اپوکسی استفاده شده است. مشخصات مکانیکی ورق آلومینیوم در جدول ۳-۵ آورده شده است. مدل‌سازی هسته‌ی کامپوزیتی به صورت کلی و با استفاده از خواص به‌دست‌آمده از خواص کشش کامپوزیت‌ها انجام شده است. هسته‌ی کامپوزیتی به‌صورت Lamina در نرم‌افزار آباکوس مدل شده است.

^۱ Cohesive Element

جدول ۳-۵- مشخصات مکانیکی ورق آلومینیوم [۵۸]

نمونه	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν
آلومینیوم	۲۷	۷۵۰۰۰	۰/۳۳

در جدول ۳-۶ اطلاعات تنش- کرنش پلاستیک آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ برای استفاده در شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول ۳-۶- اطلاعات تنش- کرنش پلاستیک آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ [۵۸]

کرنش پلاستیک	تنش جریان (MPa)
۰	۳۲۴
۰/۰۲۱	۳۹۳/۳
۰/۰۲۸	۴۱۳/۵
۰/۰۴	۴۳۹/۹
۰/۰۴۸	۴۵۳/۵
۰/۰۶۱	۴۷۲/۴
۰/۲	۵۷۷

برای شبیه‌سازی هسته‌ی کامپوزیتی، به‌علت دوجهته بودن الیاف شیشه‌ی هسته‌ی کامپوزیتی، مدول کشسان در راستای صفر و ۹۰ درجه (E_1 و E_2) برابر هستند. E_{45} مدول کشسان هسته‌ی کامپوزیتی در جهت ۴۵ درجه است. ν_{12} برابر با ۰/۰۴۶ فرض شده است [۵۲]. از رابطه‌ی ۳-۸ برای محاسبه‌ی مدول برشی استفاده شد و هم‌چنین فرض شد مدول برشی در جهات مختلف یکسان است [۵۳].

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

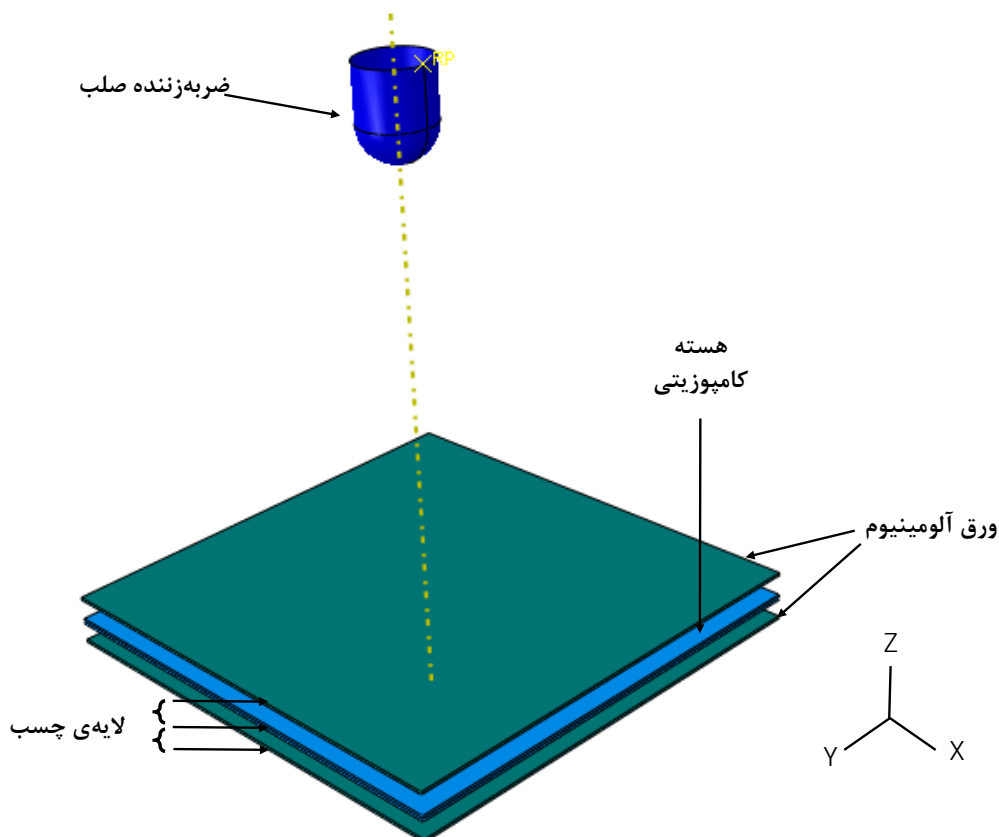
هسته‌ی کامپوزیتی اورتوتروپ مدل‌سازی شد. لذا ثوابت E_1, E_2, ν_{12} و G_{12} مطابق جدول ۳-۷ مشخص شد.

جدول ۳-۷- مشخصات مکانیکی هسته‌ی کامپوزیتی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

نمونه	ρ (kg/m ³)	E_1 و E_2 (MPa)	G_{12}, G_{23}, G_{13} (MPa)	ν_{12}
بدون نانوگرافن	۱/۴۷	۱۲۲۹۷	۳۴۵۸	۰/۰۴۶
با نانوگرافن چندلایه	۱/۴۷	۱۳۱۰۰	۳۵۷۴	۰/۰۴۶
با نانوگرافن تک‌لایه	۱/۴۷	۱۲۸۴۱	۳۵۰۱	۰/۰۴۶

۳-۷-۲- مدل‌سازی هندسی ضربه‌ی سرعت پایین

برای مدل‌سازی صفحات FML، ابعاد 100×100 mm مربعی با ضخامت 0.63 mm برای هر لایه‌ی آلومینیوم و ضخامت 1 mm برای هسته‌ی کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت. بین ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی، المان چسب تعریف شد. ضربه‌زننده یک جسم صلب نیم‌کروی صلب با قطر 16 mm است. در این شبیه‌سازی با مشخص کردن جرم و سرعت اولیه‌ی به‌دست‌آمده از آزمون تجربی، انرژی ضربه تعیین شد. در شکل ۳-۲۸ هندسه و نحوه‌ی لایه‌چینی FML ارائه شده است.



شکل ۳-۲۸- هندسه و نحوه‌ی لایه‌چینی ورق FML

• معرفی روش حل و مشخصات برخورد

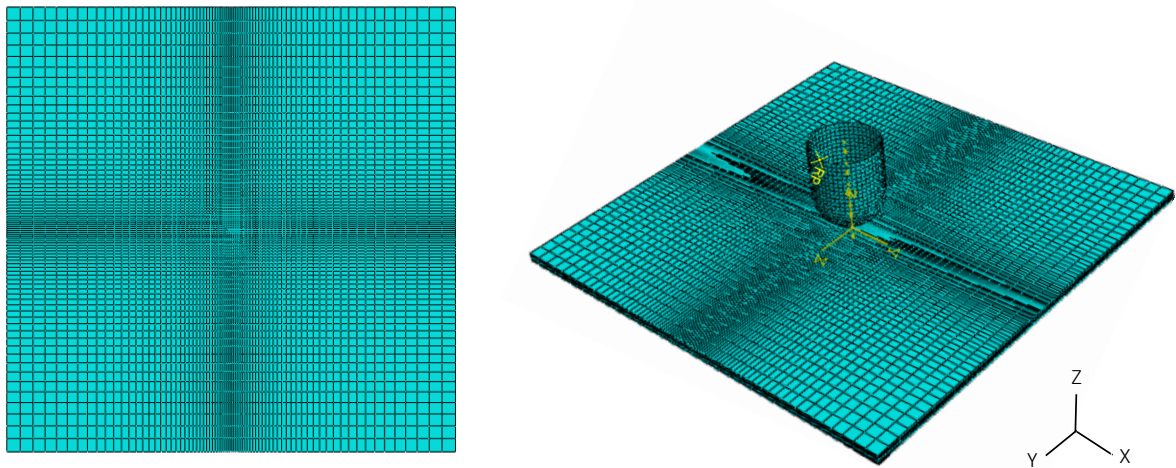
در این مدل‌سازی از حل گر صریح^۱ استفاده شده است. به علت صلب بودن ضربه‌زننده، باید یک نقطه‌ی مرجع^۲ به‌عنوان نماینده‌ی جسم ضربه‌زننده معرفی شود که جرم، سرعت اولیه، شرایط مرزی و غیره به آن اختصاص داده می‌شود. سطح خارجی ضربه‌زننده به عنوان سطح اصلی^۳ و سطح رویی صفحه کامپوزیتی به‌عنوان سطح پیرو^۴ تعریف شده است.

• بارگذاری و شرایط مرزی

در آزمون تجربی ضربه، شرایط مرزی به این صورت است که نمونه‌ی FML، ابتدا به‌روی صفحه‌ی فلزی به شکل مستطیلی که مرکز آن دارای سوراخ مربعی است، قرار می‌گیرد. سپس صفحه‌ی فلزی مشابه آن بر روی نمونه نصب می‌شود و با چهار عدد گیره کاملاً محکم شد. برای مدل‌سازی شرایط تکیه‌گاهی، چهار وجه خارجی نمونه به صورت گیردار در نظر گرفته‌شد. برای نقطه‌ی مرجع ضربه‌زننده، همه‌ی درجات آزادی به غیر از جهت عمود بر صفحه کامپوزیت (راستای Z) بسته شد. سرعت اولیه ضربه‌زننده در راستای Z مشخص شد.

• الگوی مش

در مدل‌سازی صفحه‌ی هدف، از المان جامد هشت گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته (C3D8R) استفاده شد. به‌علت نیاز به دقت بالا در مرکز ورق، مجبور به مش‌بندی این ناحیه ریزتر بود. در شکل ۳-۲۹ نحوه‌ی مش‌بندی ارائه شده است.



شکل ۳-۲۹- نحوه‌ی مش‌بندی ورق FML

^۱ Explicit

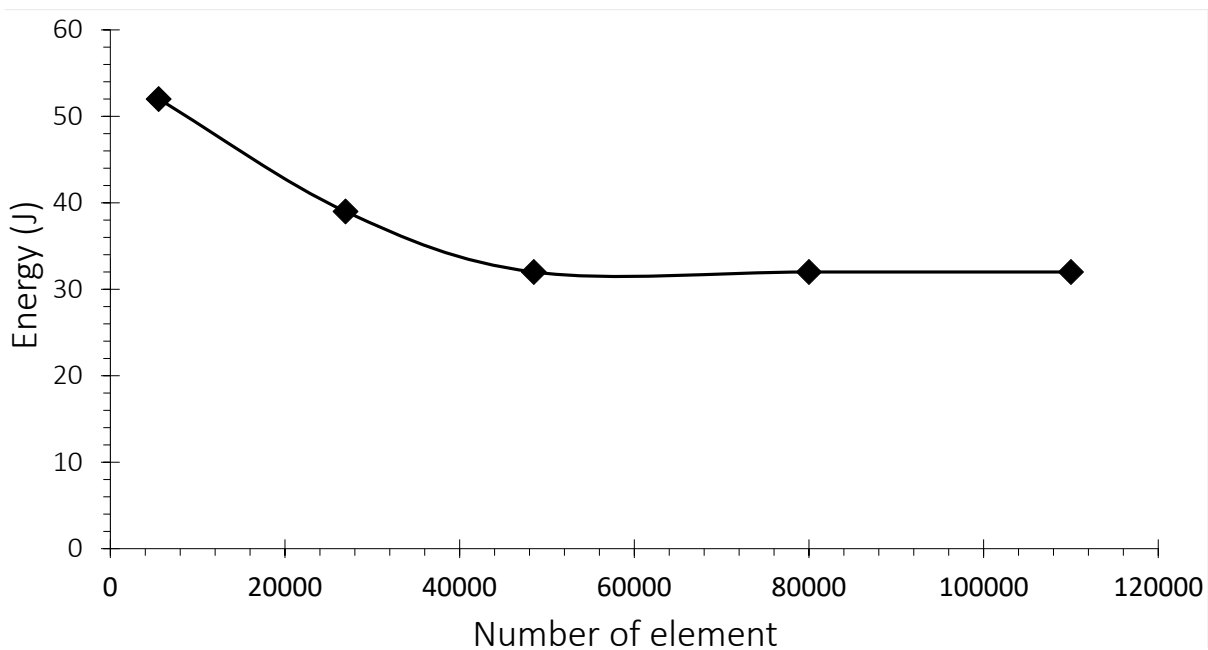
^۲ Reference point

^۳ Master

^۴ Slave

• استقلال نتایج از اندازه‌ی المان

یکی از موضوعات مهم در تحلیل عددی، استقلال نتایج از اندازه‌ی المان است. به صورتی که با افزایش المان‌ها، نتایج باید به یک مقدار ثابت همگرا شوند. برای بررسی استقلال نتایج از اندازه‌ی المان ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML بدون نانوگرافن تحت انرژی ۴۰ ژول مدل‌سازی شد. این مسئله برای تعداد المان‌های مختلفی حل، و مقدار انرژی جذب‌شده آن‌ها استخراج شده است. شکل ۳-۳۰ انرژی جذب‌شده بر حسب تعداد المان‌ها ارائه شده است. با افزایش تعداد المان‌ها از ۴۷۰۰۰، انرژی جذب‌شده ثابت ماند، که نشان‌دهنده‌ی استقلال نتایج از اندازه‌ی المان است.



شکل ۳-۳۰- نمودار همگرایی نتایج، انرژی جذب‌شده بر حسب تعداد المان‌ها

۳-۷-۳- معیار آسیب^۱

• معیار آسیب هشین

به طور کلی معیارهای آسیب در کامپوزیت‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول معیارهایی که فقط شروع آسیب را پیش‌بینی می‌کنند و اطلاعاتی در مورد مد آسیب نمی‌دهند (مانند معیار تسای-وو^۲ و معیار تسای-هیل^۳) و دسته دوم معیارهایی هستند که علاوه بر پیش‌بینی شروع آسیب، مد آسیب را نیز پیش‌بینی می‌کنند

^۱ Damage criterion

^۲ Tsai-Wu

^۳ Tsai-Hill

(مانند معیارهای ماکزیمم تنش^۱، چانگ- چانگ^۲، هشین^۳ و غیره). معیار هشین بصورت معادلات ۳-۹، ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۲ بیان می‌شود. مد کششی و فشاری آسیب در الیاف، طبق رابطه‌ی ۳-۹ و ۳-۱۰ تعریف می‌شود.

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad \text{if } (\sigma_{11} > 0) \quad 9-3$$

$$\frac{|\sigma_{11}|}{X_C} \geq 1 \quad \text{if } (\sigma_{11} < 0) \quad 10-3$$

پارامترهای σ_{11} و σ_{12} بیان کننده‌ی تنش در الیاف، X_t و X_c استحکام کششی و فشاری و S استحکام برشی صفحه‌ای ماده می‌باشد.

مد کششی و فشاری آسیب ماتریس، طبق رابطه‌ی ۳-۱۱ و ۳-۱۲ تعریف می‌شود.

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad \text{if } (\sigma_{22} > 0) \quad 11-3$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad \text{if } (\sigma_{22} < 0) \quad 12-3$$

پارامترهای σ_{11} و σ_{12} تنش در جهت‌های مختلف الیاف، X_t و X_c استحکام کششی و فشاری طولی، S استحکام برشی صفحه‌ای ماده، S_T استحکام برشی طولی، Y_t و Y_c استحکام کششی و فشاری عرضی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی خرابی هشین هسته‌ی کامپوزیتی ساخته‌شده در جدول ۳-۸ ارائه شده است.

جدول ۳-۸- اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی آسیب هشین هسته‌ی کامپوزیتی

کد	بدون نانوگرافن	با نانوگرافن چندلایه	با نانوگرافن تک‌لایه
استحکام کششی طولی	۲۹۱	۳۱۹	۲۶۰
استحکام فشاری طولی	۲۹۱	۳۱۹	۲۶۰
استحکام کششی عرضی	۲۹۱	۳۱۹	۲۶۰
استحکام فشاری عرضی	۲۹۱	۳۱۹	۲۶۰
استحکام برشی طولی	۱۲۰	۱۳۰	۱۱۰
استحکام برشی عرضی	۱۲۰	۱۳۰	۱۱۰

^۱ Maximums Stress

^۲ Chang- Chang

^۳ Hashin

• معیار آسیب جانسون-کوک در فلز

معیار پلاستیسیته‌ی جانسون-کوک، قانون کاملی برای تغییرشکل پلاستیک مواد است که تاثیر نرخ کرنش، دما و کرنش پلاستیک را بر روی تنش موثر به صورت ۳-۱۳ و ۳-۱۴ ارائه می‌دهد.

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] (1 - T^{*m}) \quad ۱۳-۳$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

در این فرمول σ تنش جریان، ε_p کرنش مومسان، $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک موثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، $\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}$ نرخ کرنش مومسان نرمالیزه، T دمای کاری، T_m دمای ذوب ماده و T_r دمای محیط است. ضرایب A, B, C, m و n ثوابت ماده می‌باشند.

مدل شکست جانسون-کوک برای پیش‌بینی شروع آسیب در فلزاتی که تحت بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا و تغییرات دما قرار می‌گیرند، مناسب است. ω به عنوان پارامتر آسیب به صورت رابطه ۳-۱۴ تعریف می‌شود. شکست زمانی که مقدار ω از یک بیشتر باشد رخ می‌دهد.

$$\omega = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad ۱۴-۳$$

در رابطه بالا $\Delta\varepsilon_p$ تغییرات کرنش پلاستیک مومسان از نقطه شروع کرنش پلاستیک مومسان تا کرنش شکست و ε_f کرنش شکست می‌باشد که از رابطه‌ی ۳-۱۵ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] (1 - d_5 T^*) \quad ۱۵-۳$$

p فشار یا تنش میانگین، q تنش میزز، d_1 تا d_5 ضرایب ثابت بوده که مربوط به معیار آسیب ماده می‌باشد. مدل آسیب برشی جانسون-کوک بر پایه‌ی معادله ۳-۱۵ می‌باشد.

در جدول ۳-۹ ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ که به هنگام مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس باید وارد شود، ارائه شده است.

جدول ۳-۹- ضرایب و ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴

پارامتر	مقدار
A (Ksi)	۵۳/۵۱۷
B (Ksi)	۹۹/۲۰
C	۰/۰۰۸۳
M	۰/۷۳
N	۱/۷
d_1	۰/۱۱۲
d_2	۰/۱۲۳
d_3	۱/۵
d_4	۰/۰۰۷
d_5	۰
دمای ذوب (درجه‌ی سانتی‌گراد)	۵۰۰
دمای انتقال (درجه‌ی سانتی‌گراد)	۱۹۰
نرخ کرنش مرجع $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})	۱

فصل ۴ نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

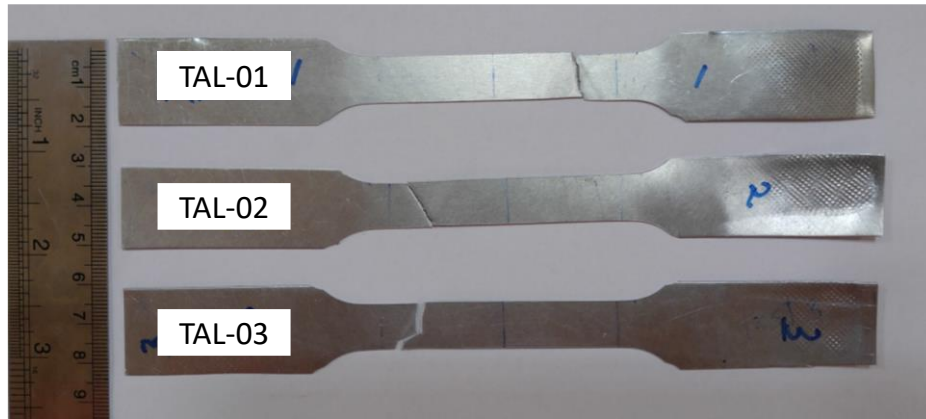
در این بخش، نتایج تجربی آزمون کشش، از جمله؛ نتایج کشش آلومینیوم T۳-۲۰۲۴، رزین اپوکسی بدون نانوذرات گرافن، آزمون کشش رزین با انواع مختلف گرافن، آزمون کشش رزین درصدهای وزنی مختلف، آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون نانوذرات گرافن و نتایج آزمون کشش FML، ارائه خواهد شد. سپس نتایج آزمون ضربه در نمونه‌های مختلف با و بدون نانوذرات گرافن و نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان و در آخر نتایج آزمون پوست‌کنی، ارائه خواهد شد.

۴-۲- نتایج تجربی آزمون کشش

در این پایان‌نامه، آزمون کشش رزین اپوکسی بدون نانوگرافن و با نانوگرافن برای انتخاب بهینه‌ترین نوع و درصد بهینه، آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون نانوگرافن، آزمون کشش ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با و بدون نانوگرافن با استفاده از دستگاه اینسترون انجام شد که نتایج این آزمون‌ها در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نتایج آزمون‌های کشش، پارامترهای استحکام تسلیم (UTS)، ازدیاد طول (ϵ_f)، مدول کشسان (E) و انرژی شکست (W) ارائه خواهد شد.

۴-۲-۱- نتایج آزمون کشش آلومینیوم T۳-۲۰۲۴

خواص مکانیکی آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ در جدول ۳-۵ ارائه شده بود [۵۸]. نمونه‌های آزمون کشش پس از انجام آزمون در شکل ۴-۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۱- نمونه‌های آزمون کشش آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ پس از انجام آزمون [۵۸]

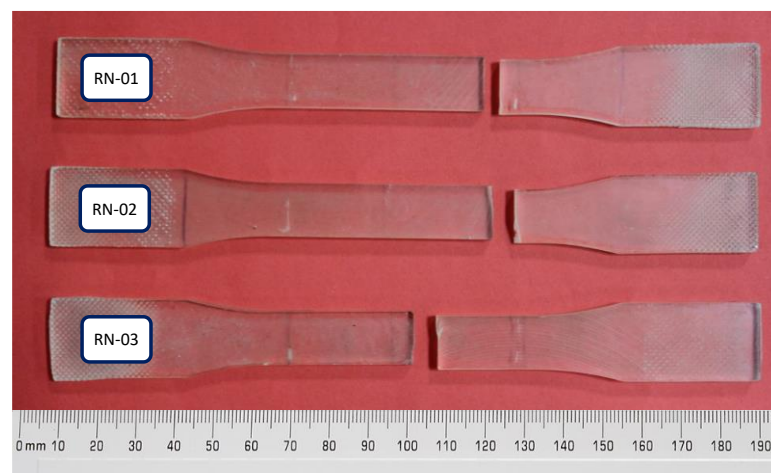
۴-۲-۲-۲-۴ نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی بدون نانوگرافن

در این مرحله، از سه نمونه‌ی رزین اپوکسی بدون نانوگرافن با زاویه‌ی الیاف صفر درجه، آزمون کشش گرفته شد که نتایج آن در جدول ۴-۱ گزارش شده است.

جدول ۴-۱- نتایج آزمون کشش رزین بدون نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RN01	۴۱/۹۴۴	۱/۳۴۲	۳۱۲۵/۸	۰/۲۹۲
RN02	۴۰/۸۲۶	۱/۴۰۲	۲۹۱۵/۴	۰/۲۹۵
RN03	۳۹/۱۹۴	۱/۲۸۶	۳۱۴۵/۳	۰/۲۶۲
میانگین	۴۰/۶۷۱	۱/۳۴۳	۳۰۶۲	۰/۲۸۳

نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوگرافن، در شکل ۴-۲ ارائه شده است. سطح مقطع نمونه‌های رزین بدون نانوگرافن، کاملاً تخت و عمود بر راستای طولی کشش می‌باشد که از شکست ترد مقطع حکایت دارد.



شکل ۴-۲- نمونه‌های آزمون کشش رزین بدون نانوگرافن پس از انجام آزمون

۴-۲-۳- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب نوع بهینه نانوگرافن

در این مرحله نتایج آزمون کشش نمونه‌های رزین اپوکسی برای انتخاب نوع بهینه نانوگرافن، از بین چهار نوع نانوگرافن ذکر شده در بخش ۳-۱-۳، ارائه شده است. نمونه‌های آزمون کشش رزین با ۰/۵٪ وزنی انواع مختلف نانوذرات گرافن پس از انجام آزمون، در شکل ۴-۳ ارائه شده است.



شکل ۴-۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین برای انتخاب نوع بهینه نانوگرافن پس از انجام آزمون کشش

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 در دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک $72 \mu m$ و زمان توزیع، 50 دقیقه در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۲- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با 50 دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $72 \mu m$

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	$W(Nmm/mm^3)$
RL01	۶۳/۰۲۵	۲/۴۵۰	۲۵۸۰	۰/۸۶۹
RL02	۶۴/۲۲۴	۲/۵۳۹	۲۵۹۱	۰/۹۰۱
میانگین	۶۳/۶۲۴	۲/۴۹۴	۲۵۸۵	۰/۸۸۵

- برای مقایسه‌ی اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک، نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 در دامنه‌ی ارتعاش $96 \mu m$ در جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با ۳۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $96 \text{ m}\mu$

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	$W(\text{Nmm}/\text{mm}^3)$
RL05	۵۵/۷	۲/۳۹	۲۴۰۶	۰/۵۴۳
RL06	۵۷/۱	۲/۳۸۷	۲۴۵۲	۰/۷۵۴
میانگین	۵۶/۴	۲/۳۸۸	۲۴۲۹	۰/۶۴۸

- برای مقایسه‌ی اثر زمان توزیع نانوذرات در رزین اپوکسی با روش آلتراسونیک، نتایج نمونه‌های ساخته شده با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 در دامنه‌ی ارتعاش $72 \text{ m}\mu$ و زمان توزیع ۳۰ دقیقه، در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH_2 با ۳۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $72 \text{ m}\mu$

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	$W(\text{Nmm}/\text{mm}^3)$
RL09	۵۰/۸۶	۲/۰۴۹	۲۵۶۰	۰/۴۷۹
RL10	۵۳/۷۱	۲/۳۰۵	۲۳۸۵	۰/۶۸۴
میانگین	۵۲/۲۸	۲/۱۷۷	۲۴۷۲	۰/۵۸۱

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی در جدول ۴-۵ ارائه شده است.
- جدول ۴-۵- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش $72 \text{ m}\mu$

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	$W(\text{Nmm}/\text{mm}^3)$
RL03	۶۲/۵۸۳	۲/۲۷۸	۲۶۹۲/۳	۰/۸۶۳
RL04	۶۳/۱۲۴	۲/۵۱۱	۲۶۲۳/۴	۰/۹۱۳
میانگین	۶۲/۸۵۴	۲/۳۹۵	۲۶۵۷/۸	۰/۸۸۸

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۶- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش ۷۲ μm

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RL07	۵۶/۶۱۱	۲/۰۴۷	۲۸۰۱/۴	۰/۶۱۱
RL08	۵۵/۱۱۹	۲/۰۷۸	۲۶۳۹/۳	۰/۶۲۱
میانگین	۵۵/۸۶۵	۲/۰۶۲	۲۷۲۰/۳	۰/۶۱۶

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن تک‌لایه در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۷- نتایج آزمون کشش رزین با نانوگرافن تک‌لایه با ۵۰ دقیقه توزیع آلتراسونیک و دامنه‌ی ارتعاش ۷۲ μm

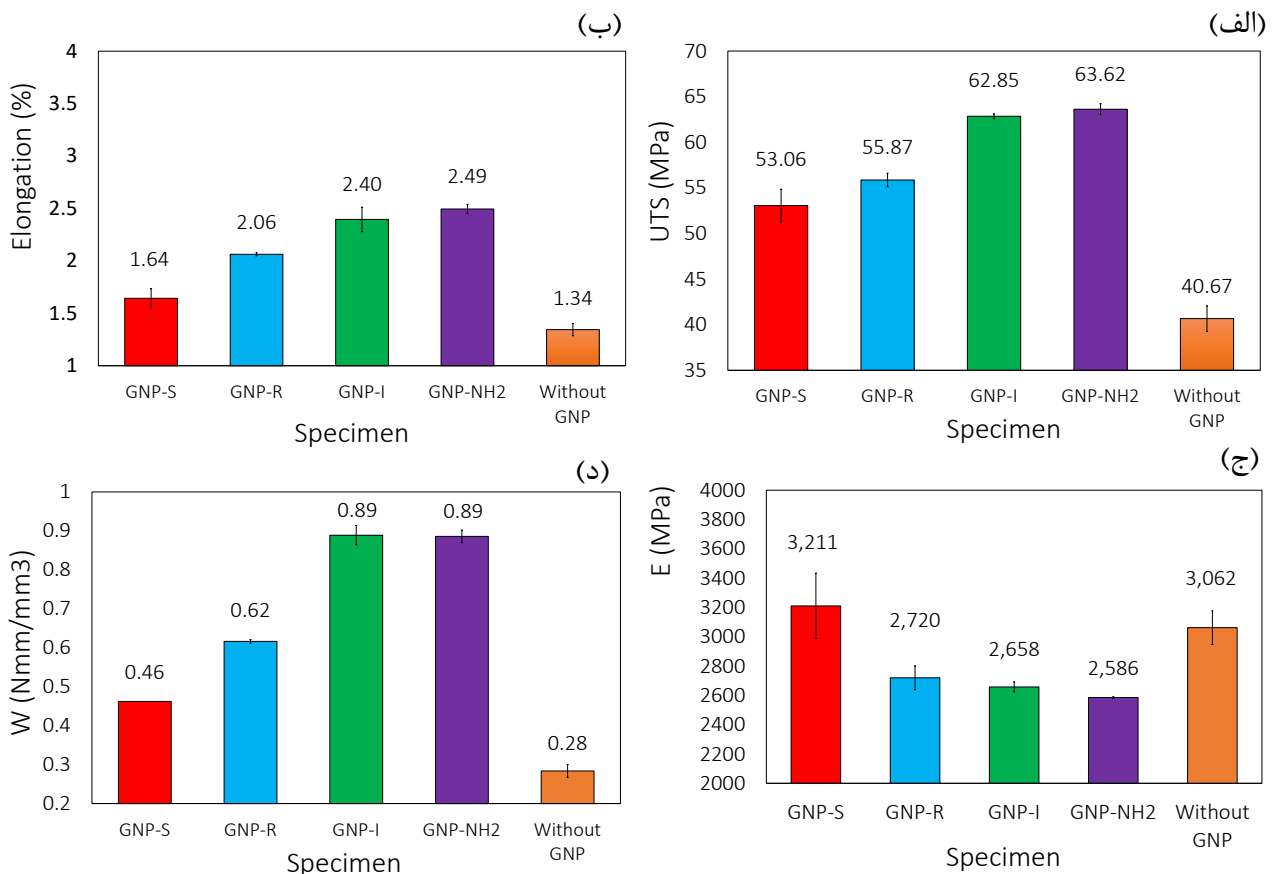
کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RLS02	۵۱/۲۶۰	۱/۷۳۵	۲۹۸۷	۰/۴۶۵
RLS03	۵۴/۸۵۹	۱/۹۴۳	۳۰۵۴/۵	۰/۴۵۸
میانگین	۵۳/۰۵۹	۱/۶۴۲	۳۲۱۰/۷	۰/۴۶۲

۴-۲-۴- اثر نوع نانوگرافن و انتخاب نوع بهینه

با مقایسه‌ی استحکام تسلیم، مدول کشسان، ازدیاد طول نمونه و انرژی شکست، می‌توان بهترین نوع نانوگرافن را انتخاب کرد. نتایج میانگین آزمون کشش رزین با انواع مختلف نانوذرات گرافن و درصد تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه‌ی رزین بدون نانوگرافن در جدول ۴-۸ و نمودارهای ستونی همین نتایج میانگین در شکل ۴-۴ ارائه شده است. در معرفی نمودارهای ستونی، Without GNP معرف نمونه‌ی بدون نانوگرافن، GNP-NH₂ معرف نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار با عامل NH₂، GNP-I معرف اکسید نانوگرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی، GNP-R معرف اکسید نانوگرافن چندلایه‌ی نوع تحقیقاتی، GNP-S معرف نانوگرافن تک‌لایه است.

جدول ۴-۸- نتایج میانگین آزمون کشش رزین با انواع مختلف نانوگرافن و میزان تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه‌ی رزین بدون نانوگرافن

نمونه	UTS (MPa)	Δ UTS (%)	e_f (%)	Δe_f (%)	E (MPa)	ΔE (%)	W (Nmm/mm ³)	ΔW (%)
Without GNP	۴۰/۶	۰	۱/۳۴	۰	۳۰۶۲	۰	۰/۲۸۳	۰
GNP-NH2	۶۳/۶	۵۶/۶	۲/۵۳	۸۸/۸	۲۵۹۱	-۱۵/۳	۰/۹۰۱	۲۱۸
GNP-I	۶۲/۸	۵۴/۶	۲/۳۹	۷۸/۳	۲۶۵۷	-۱۳/۲	۰/۸۸۸	۲۱۳
GNP-R	۵۵/۸۶۵	۳۷/۵	۲/۰۶	۵۳/۷	۲۷۲۰	-۱۱/۱	۰/۶۱۶	۱۱۷
GNP-S	۵۳/۰۵۹	۳۰/۶	۱/۶۴	۲۲/۳	۳۲۱۰	۴/۸	۰/۴۶۲	۶۳/۲



شکل ۴-۴- نتایج آزمون کشش رزین با استفاده از نانوذرات گرافن مختلف، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست

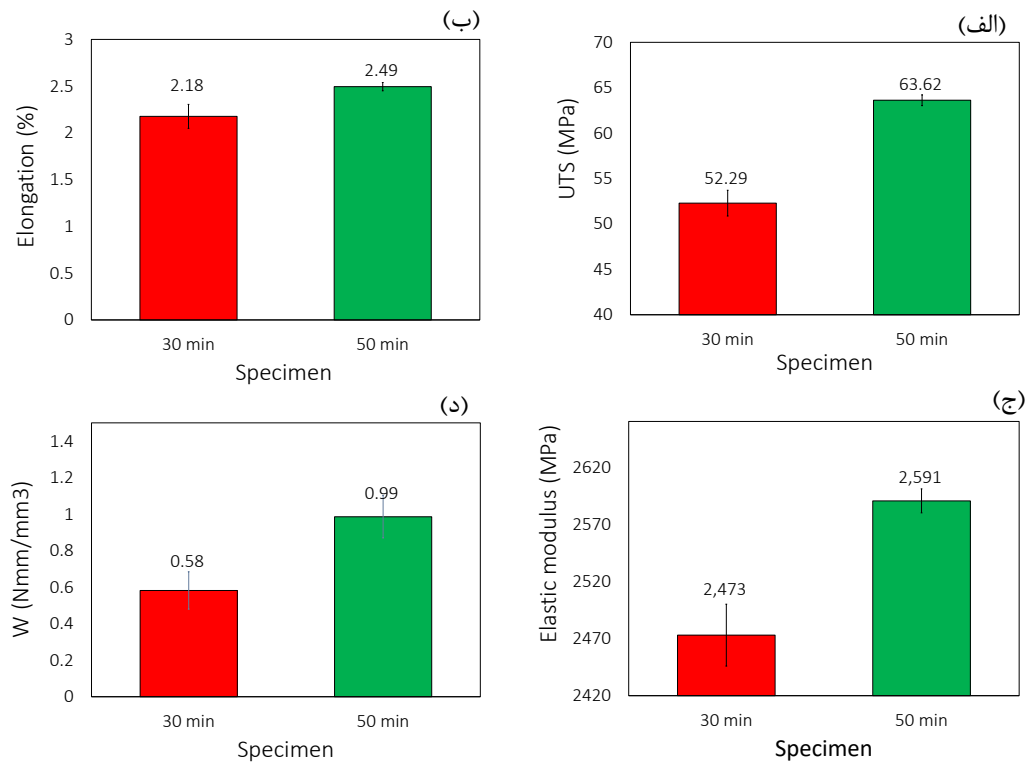
باتوجه به جدول ۴-۸ نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار GNP-NH₂ نسبت به نمونه‌ی بدون نانوغرافن، در استحکام تسلیم ۵۶/۶٪، ازدیاد طول ۸۸/۸٪، انرژی شکست ۲۱۸٪ درصد افزایش و مدول کشسان ۱۵/۳٪ کاهش داشته است. نانوغرافن چندلایه نوع صنعتی (GNP-I) نسبت به نمونه‌ی بدون نانوغرافن، در استحکام تسلیم ۵۴/۶٪، ازدیاد طول ۷۸/۳٪، انرژی شکست ۲۱۳٪ درصد افزایش و مدول کشسان ۱۳/۲٪ کاهش داشته است. نمونه‌ی با نانوغرافن تک‌لایه (GNP-S) نسبت به نانوغرافن‌های چندلایه در پارامترهای استحکام تسلیم، ازدیاد طول و انرژی شکست اثر مثبت کم‌تری داشت ولی در مدول کشسان برخلاف نانوغرافن‌های چندلایه که کاهش داشته‌اند، ۴/۸٪ افزایش داشته است. نتایج نشان داد از میان نانوغرافن‌های مختلف، نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH₂ بیشترین اثر مثبت و نانوغرافن نوع نوع تحقیقاتی و اکسید نانوغرافن تک‌لایه، کم‌ترین اثر مثبت داشته است. در این پایان‌نامه، به‌علت قیمت بالای گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH₂ نسبت به گرافن نوع صنعتی (چهار برابر گران‌تر) و اختلاف کم آنها در تاثیر بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی، نانوغرافن نوع نوع صنعتی به‌عنوان نانوغرافن بهینه انتخاب شد و در ادامه، ساخت نمونه‌ها با استفاده از این نوع نانوغرافن خواهد بود.

۴-۲-۵- اثر زمان توزیع نانوذرات گرافن در روش آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین

برای توزیع نانوغرافن در رزین اپوکسی، از دستگاه پراب آلتراسونیک استفاده شد. در این بخش به بررسی اثر مدت‌زمان توزیع نانوذرات به‌کمک دستگاه آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی پرداخته شد. برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج میانگین نمونه‌های کشش رزین با نانوذرات گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار GP-NH₂ و درصد تغییرات آنها در دو زمان ۳۰ و ۵۰ دقیقه در جدول ۴-۹ و نمودار ستونی این نتایج در شکل ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۹- مقایسه‌ی اثر زمان توزیع نانوذرات گرافن در روش آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین

نمونه	UTS (MPa)	Δ UTS (%)	e_f (%)	Δe_f (%)	E (MPa)	ΔE (%)	W (Nmm/mm ³)	ΔW (%)
30min	۵۲/۲	۰	۲/۱۷۷	۰	۲۴۷۲	۰	۰/۵۸۱	۰
50min	۶۳/۶	۲۱/۸۳	۲/۴۹۴	۱۴/۵	۲۵۸۵	۴/۵	۰/۸۸۵	۵۲/۳



شکل ۴-۵- اثر زمان توزیع نانوذرات به روش آلتراسونیک بر روی (الف) استحکام تسلیم، (ب) ازدیاد طول، (ج) مدول کشسان و (د) انرژی شکست

باتوجه به جدول ۴-۹ و شکل ۴-۵ خواص مکانیکی در توزیع نانوذرات گرافن با زمان ۵۰ دقیقه نتیجه‌ی بهتری نسبت به زمان توزیع ۳۰ دقیقه‌ای دارد. نمونه‌ی ساخته‌شده با زمان توزیع ۵۰ دقیقه، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با زمان توزیع ۳۰ دقیقه، در استحکام تسلیم $21/83\%$ ، ازدیاد طول $14/5\%$ ، مدول کشسان $4/5\%$ و انرژی شکست $52/3\%$ افزایش داشته است.

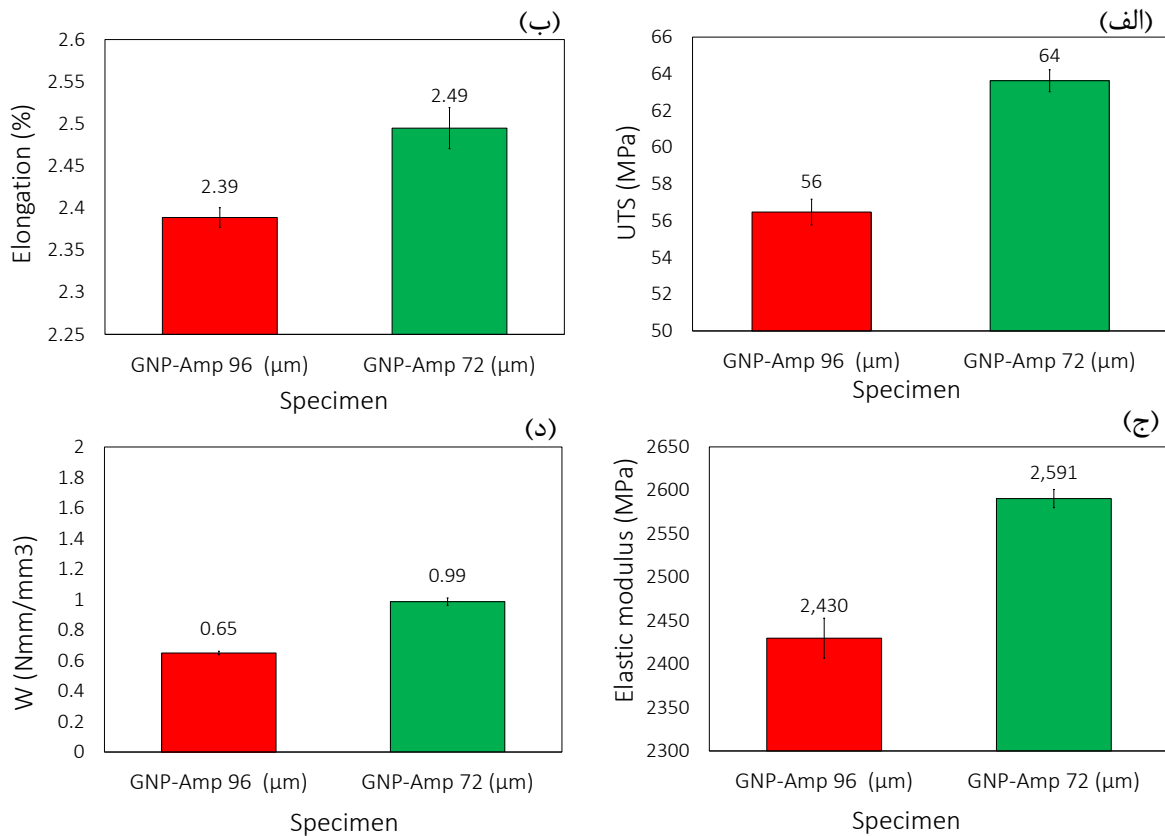
۴-۲-۶- اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین

در این بخش اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرحله، نمونه‌های رزین اپوکسی ساخته‌شده از نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار GP-NH₂ در دو دامنه‌ی ۷۲ μm و ۹۶ μm مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج میانگین نمونه‌های کشش رزین با نانوذرات گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار GP-NH₂ و درصد تغییرات آن‌ها در دو دامنه‌ی ارتعاش ۷۲ μm و ۹۶ μm در جدول ۴-۱۰ و نمودار ستونی این نتایج در شکل ۴-۶ ارائه شده است. با توجه به جدول ۴-۱۰ و شکل ۴-۶ نمونه‌های آزمون کشش رزین در دامنه‌ی ارتعاش ۷۲ μm خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های آزمون کشش رزین در دامنه‌ی ارتعاش ۹۶ μm داشته‌اند که ممکن است در دامنه‌های بالا (۹۶ μm) به علت افزایش دمای رزین، خواص رزین تغییر کند که در این پژوهش، برای اطمینان، ظرف حاوی رزین، داخل محلول آب و یخ قرار گرفت. نمونه‌ی ساخته‌شده در دامنه‌ی ارتعاش ۷۲ μm ، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده در دامنه‌ی ارتعاش ۹۶ μm ، در استحکام تسلیم 8% ، ازدیاد طول $9/3\%$ و انرژی شکست $11/5\%$ افزایش، و در مدول

کشسان ۱٪ درصد کاهش داشته است. در نتیجه، نمونه‌ی رزین ساخته شده به وسیله‌ی نانوگرافن بهینه در دامنه‌ی ارتعاش $72 \mu\text{m}$ ، نتیجه‌ی مطلوبی داشت.

جدول ۴-۱۰- مقایسه‌ی اثر دامنه‌ی ارتعاش پراب آلتراسونیک بر خواص مکانیکی رزین

نمونه	UTS (MPa)	ΔUTS (%)	e_f (%)	Δe_f (%)	E (MPa)	ΔE (%)	W (Nmm/mm ³)	ΔW (%)
Amp 96 $m\mu$	۵۲/۲	۰	۲/۱۷۷	۰	۲۴۷۲	۰	۰/۵۸۱	۰
Amp 72 $m\mu$	۵۶/۴	۸	۲/۳۸	۹/۳	۲۴۲۹	-۱	۰/۶۴۸	۱۱/۵



شکل ۴-۶- اثر دامنه‌ی پراب آلتراسونیک بر روی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست

۴-۲-۷- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب درصد بهینه‌ی اکسید نانوگرافن نوع صنعتی

پس از بررسی نتایج و انتخاب نانوگرافن نوع صنعتی به عنوان نانوگرافن بهینه، نمونه‌های کشش رزین در درصد‌های وزنی ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪، ۱/۲۵٪، ۲٪ ساخته شدند.

- نتایج نمونه‌های ساخته شده با ۰/۵٪ وزنی نانوگرافن در جدول ۴-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۱- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۰/۵٪ وزنی نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RA01	۶۲/۱۴۹	۲/۳۹۸	۲۶۶۶/۳	۰/۸۷۴
RA02	۶۳/۱۲۴	۲/۵۱۱	۲۶۲۳/۴	۰/۹۱۳
RA03	۶۲/۵۸۳	۲/۵۴۱	۲۶۹۲/۳	۰/۸۶۳
میانگین	۶۲/۶۱۹	۲/۴۸۳	۲۶۶۰/۶	۰/۸۷۴

• نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با ۰/۷۵٪ وزنی نانوگرافن در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۲- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۰/۷۵٪ وزنی نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RB01	۵۶/۹۸۲	۲/۲۹۹	۲۵۲۴/۱	۰/۷۶۶۰
RB02	۵۷/۹۷۲	۲/۳۲۷	۲۵۳۹/۵	۰/۷۸۹۵
RB03	۵۵/۳۵	۲/۰۹۱	۲۷۱۵	۰/۶۵۶۰
میانگین	۵۶/۷۵۱	۲/۳۱۳	۲۵۹۲/۸	۰/۷۳۷

• نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با ۱٪ وزنی نانوگرافن در جدول ۴-۱۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۳- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۱٪ وزنی نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RC01	۵۴/۶۲۴	۱/۷۲۷	۳۱۹۴/۶	۰/۴۵۹۲
RC02	۵۵/۱۲۵	۱/۶۰۴	۳۴۰۱/۵	۰/۴۳۴
RC03	۵۶/۲۷۶	۱/۶۸۰	۳۴۴۶/۵	۰/۵۱۸
میانگین	۵۵/۳۴۲	۱/۶۷۱	۳۳۴۷/۵	۰/۴۷۰

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با ۱/۲۵٪ وزنی نانوگرافن در جدول ۴-۱۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۴- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۱/۲۵٪ وزنی نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RD01	۵۰/۲۷۹	۱/۷۸۳	۲۷۹۴/۶	۰/۵۱۶
RD02	۵۲/۷۹۳	۱/۹۴۹	۲۶۸۷/۸	۰/۵۹۱
RD03	۵۲/۸۲۴	۲/۰۶۱	۲۶۰۰/۵	۰/۶۲۴
میانگین	۵۱/۹۶۶	۱/۹۳۱	۲۶۹۴/۳	۰/۵۷۷

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با ۲٪ وزنی نانوگرافن در جدول ۴-۱۵ ارائه شده است.

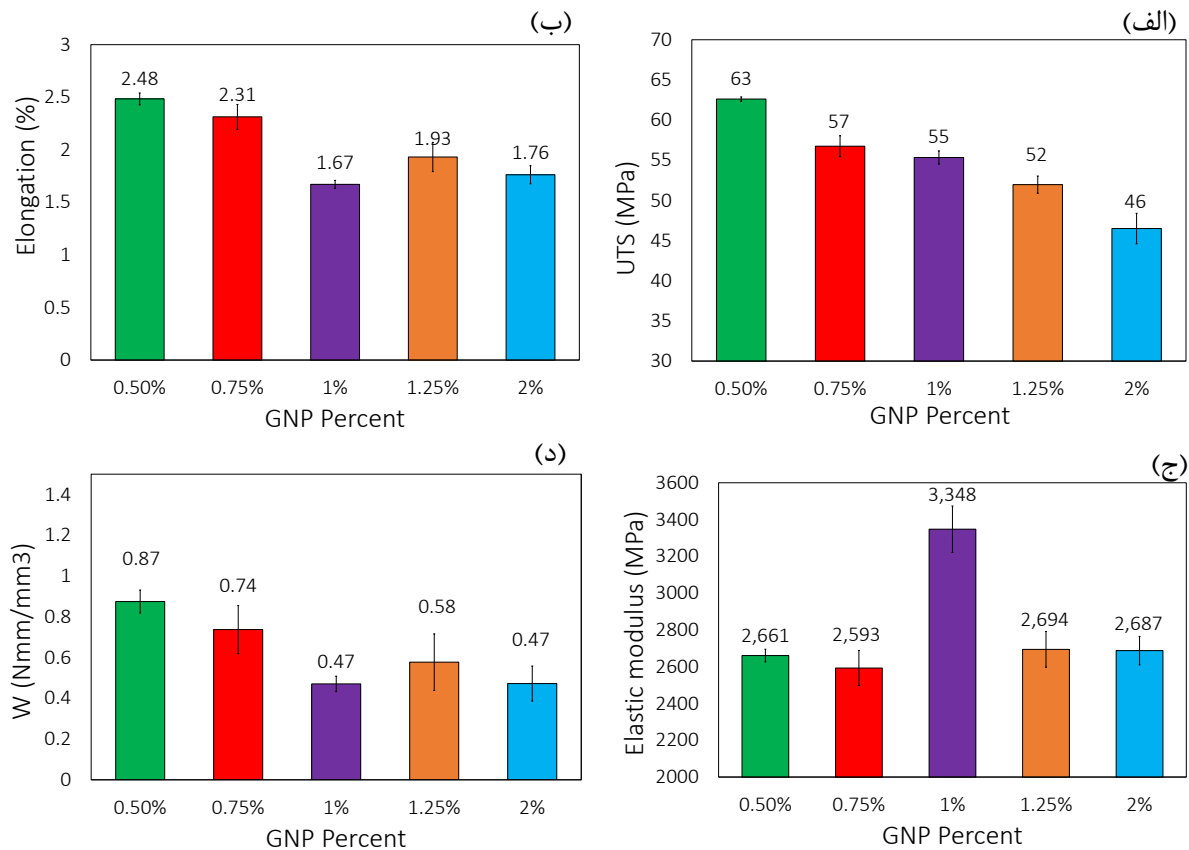
جدول ۴-۱۵- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با ۲٪ وزنی نانوگرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
RE01	۴۷/۹۹۳	۱/۷۴۶	۲۷۸۰/۵	۰/۴۶۵
RE02	۴۴/۲۰۳	۱/۶۸۴	۲۶۵۵/۵	۰/۴۸۵
RE03	۴۷/۲۹۶	۱/۸۵۶	۲۶۲۶	۰/۴۷۰
میانگین	۴۶/۴۹۷	۱/۷۶۲	۲۶۸۷/۴	۰/۴۷۳

در جدول ۴-۱۶ نتایج میانگین درصد‌های وزنی مختلف و درصد تغییرات آن‌ها نسبت به نتایج نمونه‌های بدون نانوگرافن و در شکل ۴-۷ نمودارهای میله‌ای این نتایج میانگین، ارائه شده است.

جدول ۴-۱۶- مقایسه‌ی نتایج درصد‌های وزنی مختلف نانوگرافن بر خواص مکانیکی

نمونه	UTS (MPa)	Δ UTS (%)	e_f (%)	Δe_f (%)	E (MPa)	ΔE (%)	W (Nmm/mm ³)	ΔW (%)
٪۰	۴۰/۶	۰	۱/۳۴	۰	۳۰۶۲	۰	۰/۲۸۳	۰
۰/۱۵٪	۶۲/۶	۵۴/۱	۲/۴۸	۸۵	۲۶۶۰	-۱۳/۱	۰/۸۷۴	۲۰۸
۰/۷۵٪	۵۶/۷	۳۹/۶	۲/۳۱	۷۲/۳	۲۵۹۲	-۱۵/۳	۰/۷۳۷	۱۶۰
٪۱	۵۵/۳	۳۶/۲	۱/۶۷	۲۴/۶	۳۳۴۷	۹/۳	۰/۴۷۰	۶۶
۱/۲۵٪	۵۱/۹	۲۷/۸	۱/۹۳	۴۴	۲۶۹۴	-۱۲	۰/۵۷۷	۱۰۳
٪۲	۴۶/۴	۱۴/۲	۱/۷۶	۳۱/۳	۲۶۸۷	-۱۲/۲	۰/۴۷۳	۶۷



شکل ۴-۷- نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی برای انتخاب درصد بهینه‌ی اکسید نانوغرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست

با توجه به جدول ۴-۱۶ و شکل ۴-۷ افزودن ۰/۵٪ وزنی نانوذرات گرافن به رزین اپوکسی، به‌عنوان درصد بهینه انتخاب شد. با اضافه کردن ۰/۵٪ وزنی نانوذرات گرافن به رزین اپوکسی، استحکام تسلیم ۵۴/۱٪، ازدیاد طول ۸۵٪ و انرژی شکست ۲۰۸٪ افزایش، و در مدول کشسان ۱۳/۱٪ کاهش داشته است. با افزودن ۱٪ وزنی نانوغرافن به رزین اپوکسی، استحکام تسلیم ۳۶/۲٪، ازدیاد طول ۲۴/۶٪ و انرژی شکست ۶۶٪ و در مدول کشسان ۹/۲٪ افزایش داشته است. در تمامی درصدهای وزنی نانوغرافن برای مدول کشسان کاهش وجود داشت ولی در ۱٪ وزنی ۹/۲٪ افزایش دیده شد که می‌تواند حائز اهمیت باشد.

۴-۲-۸- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با و بدون اکسید نانوغرافن نوع صنعتی

برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی هسته‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی با و بدون نانوغرافن چندلایه و تک‌لایه و بررسی اثر نانوغرافن بر خواص مکانیکی این کامپوزیت، آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 انجام شد.

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده‌ی بدون نانوغرافن با زاویه الیاف 45° در جدول ۴-۱۷ و نمونه‌های کامپوزیتی بدون نانوذرات گرافن با زاویه الیاف 45° پس از انجام آزمون کشش در شکل ۴-۸ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۷- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده‌ی بدون نانوغرافن با زاویه الیاف 45°

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
CN45-01	۱۲۳	۹/۷۳۹	۹۱۵۰	۷/۶۵۸
CN45-02	۱۱۹/۷	۱۰/۴۸	۸۹۰۰	۹/۱۵
میانگین	۱۲۱	۱۰/۱۰	۹۰۲۵	۸/۴۰۴

شکل ۴-۸- نمونه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف 45° بدون نانوذرات گرافن پس از کشش

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده‌ی بدون نانوغرافن با زاویه الیاف صفر درجه در جدول ۴-۱۸ و نمونه‌های کامپوزیتی بدون نانوذرات گرافن پس از انجام آزمون کشش در شکل ۴-۹ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۸- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوغرافن

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
CN01	۲۹۰/۶۳	۲/۴۰۷	۱۲۲۵۶	۳/۸۴۳
CN02	۲۹۶/۸۹	۲/۲۹۲	۱۲۵۱۷	۳/۹۴۹
CN03	۲۹۱/۴۶	۲/۴۳۷	۱۱۷۶۹	۳/۹۳۷
میانگین	۲۹۲/۹۹	۲/۳۷۹	۱۲۱۸۰	۳/۹۱۰

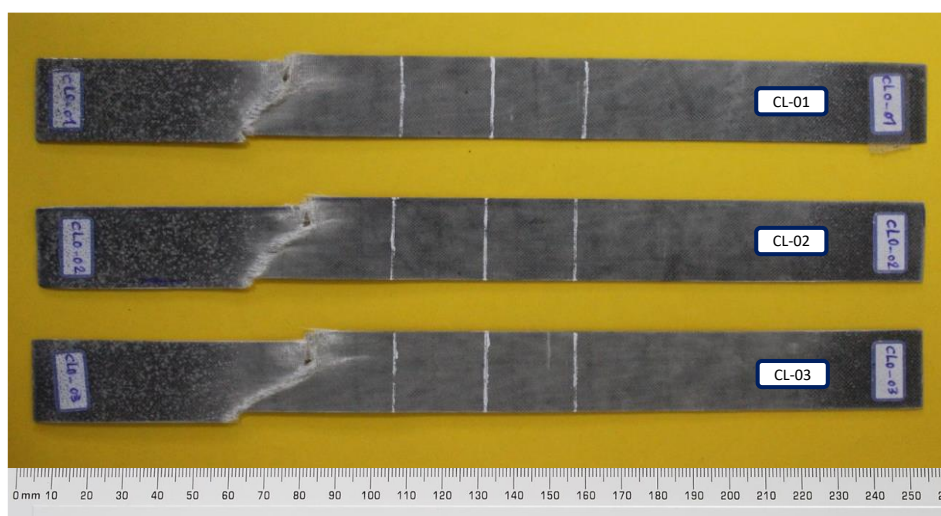


شکل ۴-۹- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه بدون نانوذرات گرافن پس از انجام آزمون کشش

- نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با اکسید نانوغرافن چندلایه نوع صنعتی با زاویه الیاف صفر درجه در جدول ۴-۱۹ و تصاویر نمونه‌های کامپوزیتی با نانوذرات گرافن چندلایه، پس از انجام آزمون کشش در شکل ۴-۱۰ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۹- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی با نانوغرافن نوع صنعتی

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
CL01	۳۱۲/۴۶	۲/۲۸۵	۱۳۱۲۷	۳/۹۸۸
CL02	۳۲۳/۴۹	۲/۴۰۳	۱۳۴۷۵	۴/۲۶۲
CL03	۳۱۶/۰۳	۲/۴۲۱	۱۲۹۶۲	۴/۲۶۰
میانگین	۳۱۹/۷۶	۲/۳۷۰	۱۳۱۸۸	۴/۱۷۰



شکل ۴-۱۰- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با نانوغرافن چندلایه نوع صنعتی پس از انجام آزمون کشش

- نتایج نمونه‌های ساخته شده با اکسید نانوگرافن تک لایه‌نوع صنعتی با زاویه الیاف صفر درجه در جدول ۲۰-۴ و تصاویر نمونه‌های کامپوزیتی با نانوذرات گرافن چندلایه، پس از انجام آزمون کشش در شکل ۱۱-۴ ارائه شده است.

جدول ۲۰-۴- نتایج آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن تک لایه

کد	UTS(MPa)	e_f (%)	E (MPa)	W (Nmm/mm ³)
CLS01	۲۷۰/۸۰	۲/۰۶۳	۱۲۲۸۹	۳/۲۶۰
CLS02	۲۴۹/۸۱	۱/۸۴۵	۱۲۵۱۴	۲/۷۱۱
CLS03	۲۴۹/۲۰	۱/۸۳۵	۱۳۱۶۸	۲/۶۴۰
میانگین	۲۴۹/۵۱	۱/۹۱۴	۱۲۶۵۷	۲/۸۵۸



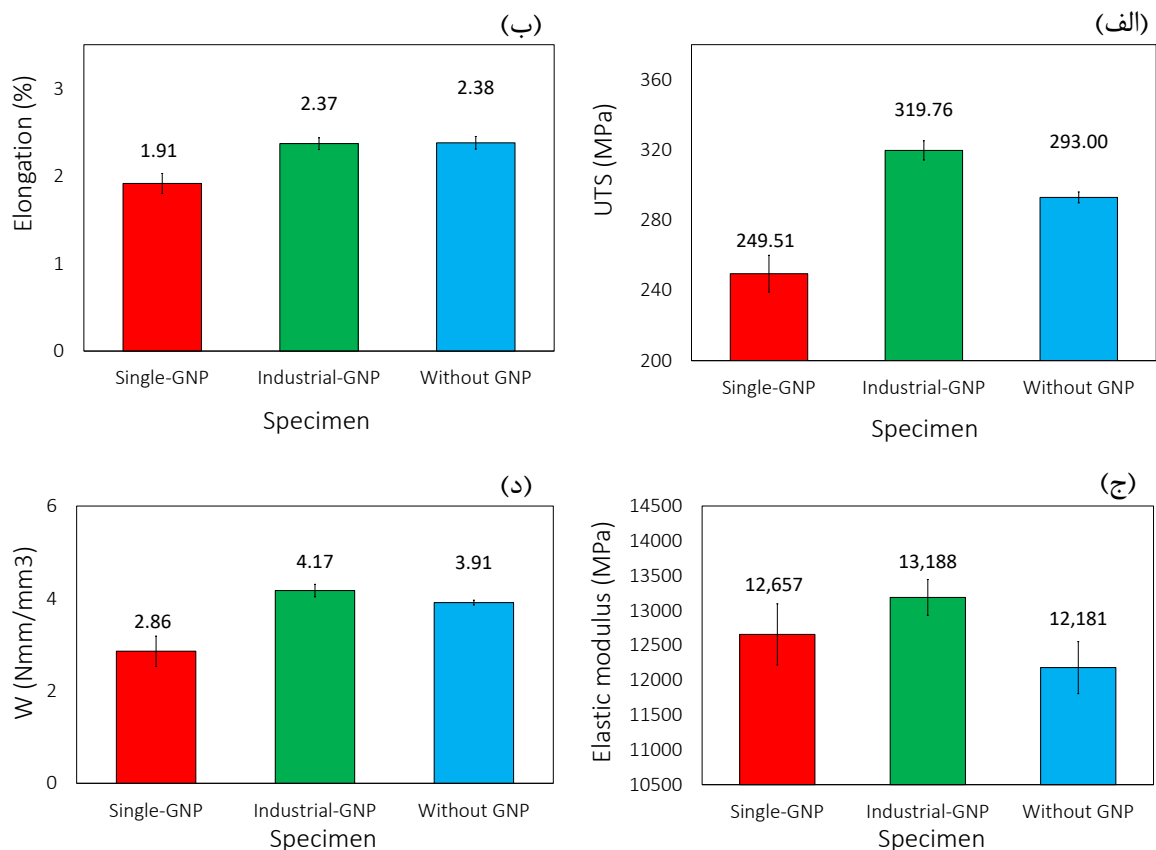
شکل ۱۱-۴- نمونه‌های هسته‌ی کامپوزیتی با نانوگرافن تک لایه پس از انجام آزمون کشش

در جدول ۲۱-۴ مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن و با نانوگرافن چندلایه و تک لایه و درصد تغییرات این نتایج ارائه شده است.

جدول ۲۱-۴- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های کشش کامپوزیت بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک لایه

نمونه	UTS (MPa)	Δ UTS (%)	e_f (%)	Δe_f (%)	E (MPa)	ΔE (%)	W (Nmm/mm ³)	ΔW (%)
Without GNP	۲۹۲/۹	۰	۲/۳۷۹	۰	۱۲۱۸۰	۰	۳/۹۱۰	۰
GNP-I	۳۱۹/۷	۹,۱	۲/۳۷۰	-۰/۳	۱۳۱۸۸	۸/۲	۴/۱۷۰	۶/۶
GNP-S	۲۴۹/۵	-۱۴/۸	۱/۹۱۴	-۱۹/۵	۱۲۶۵۷	۳/۹	۲/۸۵۸	-۲۶/۹

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴-۲۱ هسته‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه-پوکسی ساخته‌ی شده با اکسید نانوگرافن چندلایه نسبت به هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن در پارامترهای استحکام تسلیم، انرژی جذب شده و مدول الاستیسیته به ترتیب ۹٪، ۶۶٪، ۸۲٪ افزایش و در ازدیاد طول ۳٪ کاهش داشته است. همچنین هسته‌ی کامپوزیتی ساخته شده با نانوگرافن تک لایه نسبت به هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن در پارامترهای استحکام تسلیم، ازدیاد طول و انرژی جذب شده به ترتیب ۱۴/۸٪، ۱۹/۵٪، ۲۶/۹٪ کاهش و در مدول کشسان ۳/۹٪ افزایش داشته است. در شکل ۴-۱۲ نمودارهای ستونی نتایج میانگین حالت‌های مذکور، در استحکام تسلیم، ازدیاد طول، مدول کشسان و انرژی شکست، ارائه شده است.



شکل ۴-۱۲- بررسی اثر نانوگرافن چندلایه و تک لایه بر خواص مکانیکی هسته‌ی کامپوزیتی، الف) استحکام تسلیم، ب) ازدیاد طول، ج) مدول کشسان و د) انرژی شکست

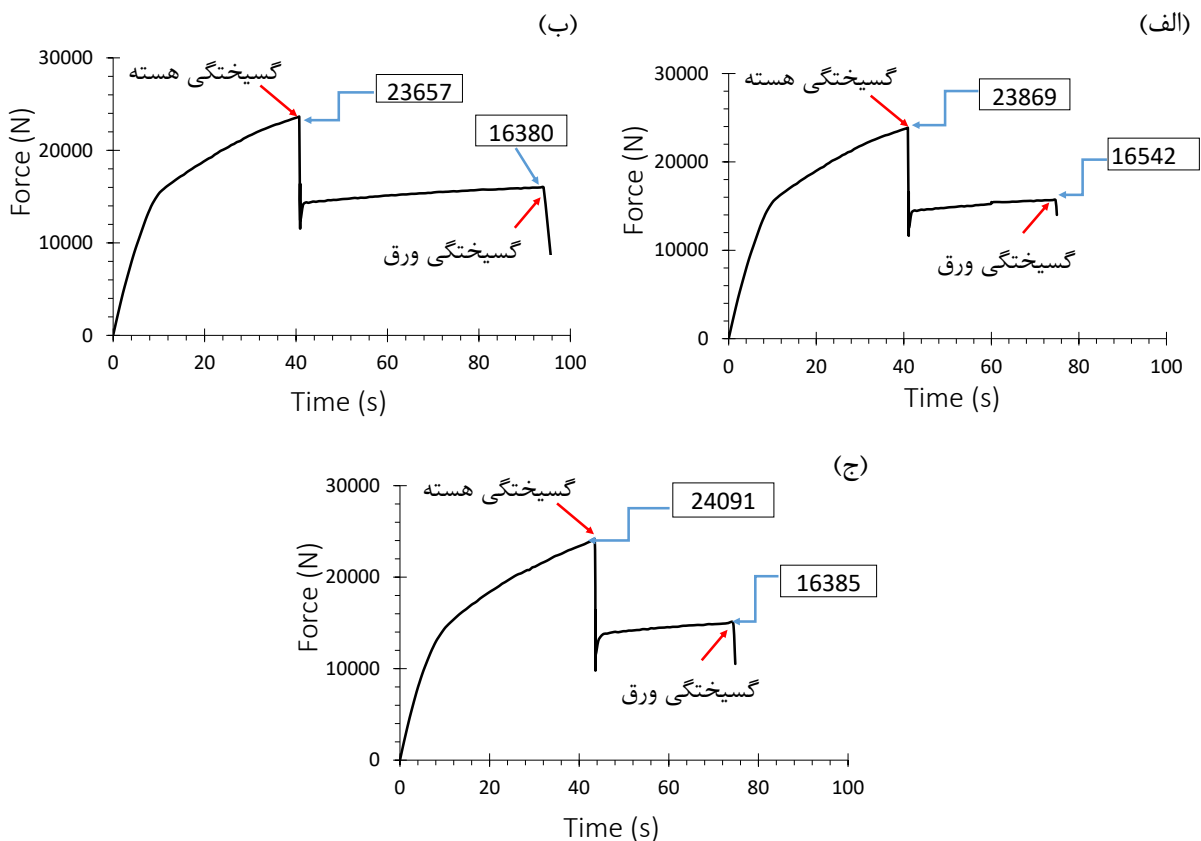
۴-۲-۹- نتایج آزمون کشش ورق FML با و بدون اکسید نانوگرافن نوع صنعتی

در این مرحله، نتایج آزمون کشش ورق FML، ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این آزمون به دست آوردن مقدار نیروی پاره شدن ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی و ترتیب پاره شدن این اجزا در نمونه‌های بدون نانوگرافن و با اکسید نانوگرافن چندلایه است.

نتایج نمونه‌های ساخته شده بدون نانوگرافن، در جدول ۴-۲۲ ارائه شده است. در شکل ۴-۱۳ نمودارهای نیرو-زمان برای نمونه‌های بدون نانوگرافن ارائه شده است.

جدول ۴-۲۲- نتایج آزمون کشش FML بدون نانوگرافن

کد	شکست اول	نیروی شکست اول (N)	شکست دوم	نیروی شکست دوم (N)
TN01	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۳۸۶۹	آلومینیوم	۱۶۵۴۲
TN02	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۳۶۵۷	آلومینیوم	۱۶۳۸۰
TN03	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۴۰۹۱	آلومینیوم	۱۶۳۸۵
میانگین		۲۳۸۷۲		۱۶۴۳۵

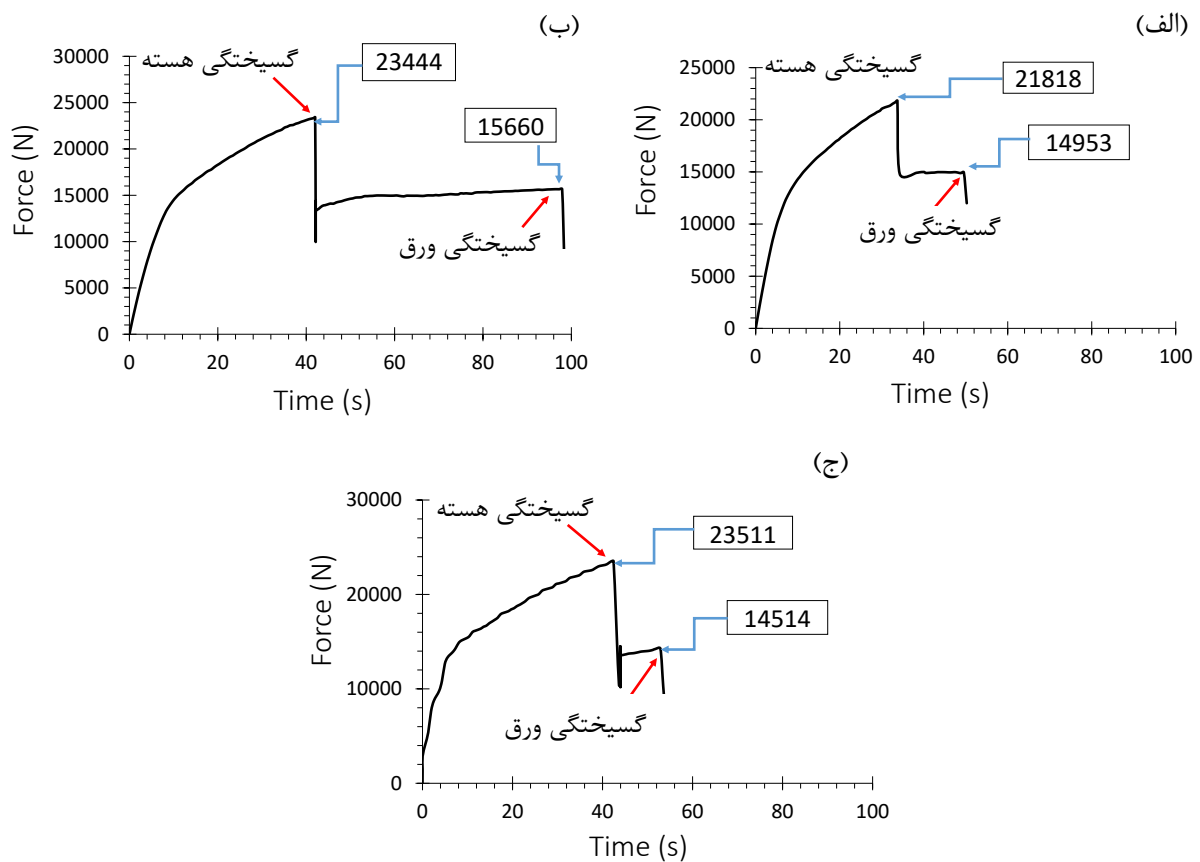


شکل ۴-۱۳- نمودارهای نیرو-زمان آزمون کشش FML بدون نانوگرافن، (الف) نمونه‌ی TN01، (ب) نمونه‌ی TN02 و (ج) نمونه‌ی TN03

در شکل ۴-۱۳ محل گسیختگی هسته‌ی کامپوزیتی و گسیختگی ورق نشان داده شده‌اند. نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با اکسید نانوگرافن تک‌لایه نوع صنعتی نتایج نمونه‌های ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه در جدول ۴-۲۳ ارائه شده است. در شکل ۴-۱۴ نمودارهای نیرو-زمان برای نمونه‌های بدون نانوگرافن ارائه شده است.

جدول ۴-۲۳- نتایج آزمون کشش FML با نانوگرافن نوع صنعتی

کد	شکست اول	نیروی شکست اول (N)	شکست دوم	نیروی شکست دوم (N)
TL01	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۱۸۱۸	آلومینیوم	۱۴۹۵۳
TL02	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۳۴۴۴	آلومینیوم	۱۵۶۶۰
TL03	هسته‌ی کامپوزیتی	۲۳۵۱۱	آلومینیوم	۱۴۵۱۴
میانگین		۲۲۹۲۴		۱۵۰۸۷



شکل ۴-۱۴- نمودارهای نیرو-زمان آزمون کشش FML با نانوگرافن نوع صنعتی، الف) نمونه‌ی TL01، ب) نمونه‌ی TL02 و ج) نمونه‌ی TL03

در شکل ۴-۱۴ منحنی نیرو-زمان محل گسیختگی هسته‌ی کامپوزیتی و گسیختگی ورق نشان داده شده است. در جدول ۴-۲۴ نتایج میانگین و درصد اختلاف نمونه‌ی FML با نانوگرافن چندلایه آزمون کشش، نسبت به نمونه‌ی FML بدون نانوگرافن ارائه شده است.

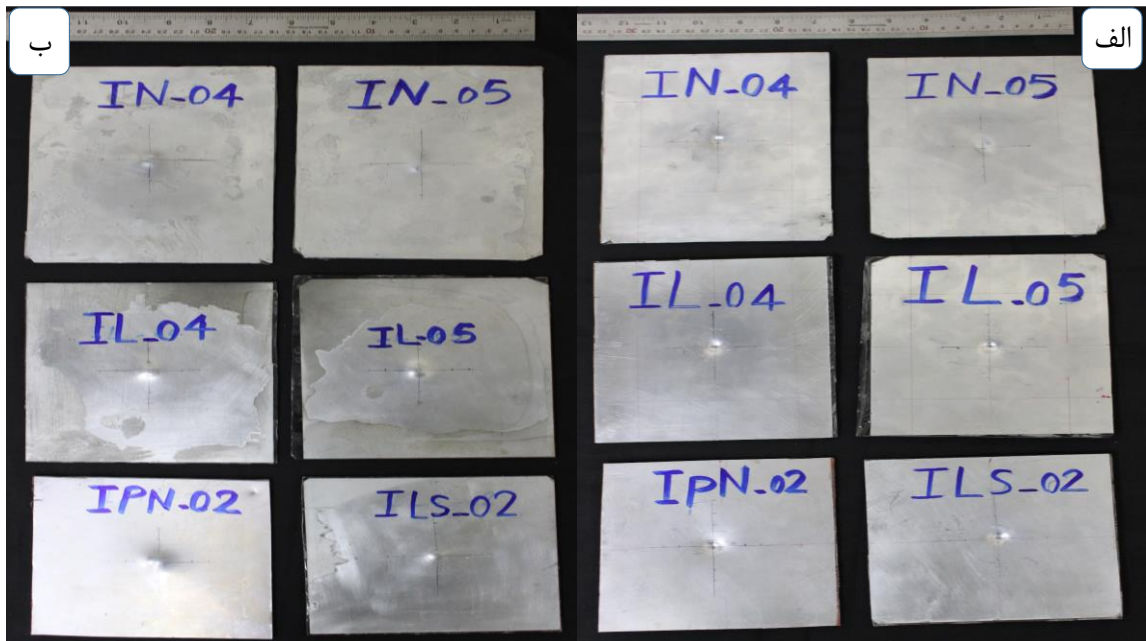
جدول ۴-۲۴- نتایج میانگین و درصد اختلاف بین FML بدون نانوگرافن و FML با نانوگرافن چندلایه

کد	نیروی شکست اول (N)	درصد اختلاف نیروی شکست اول (%)	نیروی شکست دوم (N)	درصد اختلاف نیروی شکست دوم (%)
FML بدون نانوگرافن	۲۳۸۷۲	۰	۱۶۴۳۵	۰
FML با نانوگرافن چندلایه	۲۲۹۲۴	-۳/۹	۱۵۰۸۷	-۸/۲

با توجه به جدول ۴-۲۴ نمونه‌ی آزمون کشش FML با نانوگرافن چندلایه، نسبت به نمونه‌ی FML بدون نانوگرافن، در نیروی شکست اول ۳/۹٪ و نیروی شکست دوم ۸/۲٪ کاهش داشته است.

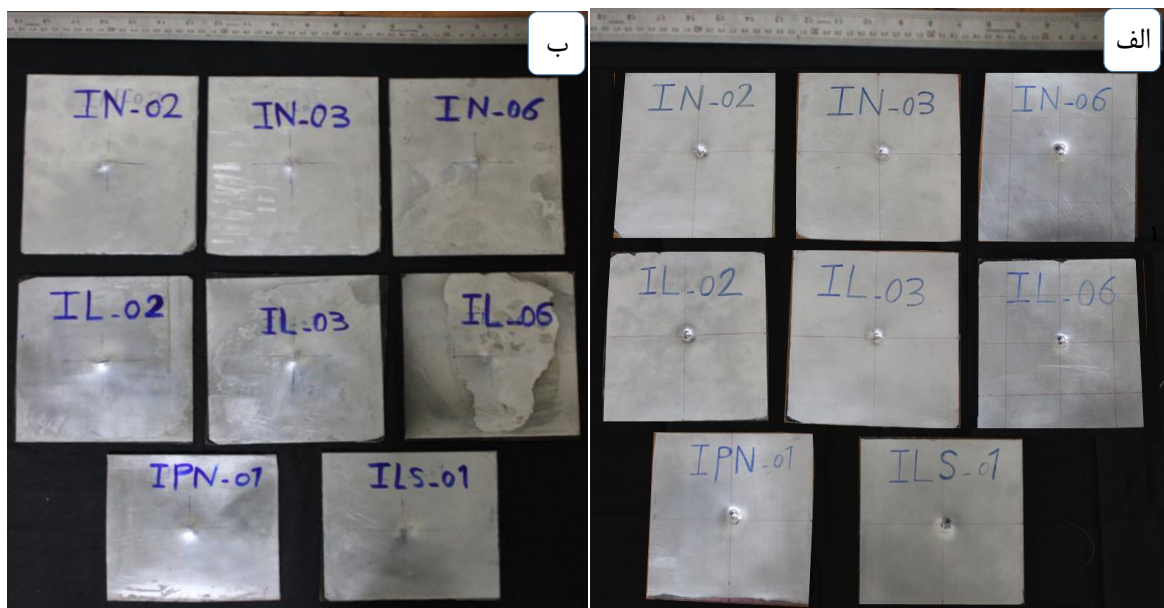
۴-۳- نتایج تجربی آزمون ضربه‌ی سرعت پایین

در این مرحله، نتایج تجربی آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق کامپوزیتی الیاف-فلز با و بدون نانوگرافن و نتایج تجربی آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق کامپوزیتی الیاف-فلز بدون نانوگرافن با لایه‌ی چسب پلی اورتان مورد بررسی قرار گرفت. برای بدست آوردن انرژی تقریبی شکست ورق FML، ابتدا آزمون استاتیکی با دستگاه انیورسال دانشگاه امیرکبیر انجام شد و با مشخص شدن انرژی شکست، آزمون‌های ضربه‌ی سرعت پایین در دو انرژی مختلف، یک انرژی پایین‌تر از انرژی شکست و یک انرژی کمی بالاتر از انرژی شکست انجام شد. آزمون‌های ضربه در دو انرژی J ۲۵ و J ۴۰ انجام شد که ورق‌های FML بدون نانو و با نانوچندلایه در انرژی J ۲۵ با دو مرتبه تکرار و در انرژی J ۴۰ با سه مرتبه تکرار و ورق‌های FML با نانو تک‌لایه و با پلی‌اورتان فاقد نانو در هر دو انرژی، بدون تکرار تحت انرژی ضربه‌ی سرعت پایین قرار گرفتند. فاکتورهای بررسی شده در نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن شامل نیروی بیشینه (F_{max})، بیشترین مقدار انحنای ایجادشده در اثر ضربه و انرژی جذب شده توسط ورق FML $E(J)$ می‌باشد. در شکل ۴-۱۵ نمونه‌های بعد انجام آزمون ضربه تحت انرژی J ۲۵، ارائه شده است.



شکل ۴-۱۵- نمونه‌ها پس از اعمال ضربه در انرژی J ۲۵، الف) سطح برخورد، ب) سطح پشت

در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ضربه‌ی مربوط به شکل ۴-۱۵ ارائه و بحث خواهد شد. در شکل ۴-۱۶ نمونه‌ها بعد انجام آزمون ضربه تحت انرژی J ۴۰ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۶- نمونه‌ها پس از اعمال ضربه در انرژی J ۴۰، الف) سطح اصلی برخورد، ب) سطح پشت

در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون ضربه‌ی مربوط به شکل ۴-۱۶ ارائه و بحث خواهد شد.

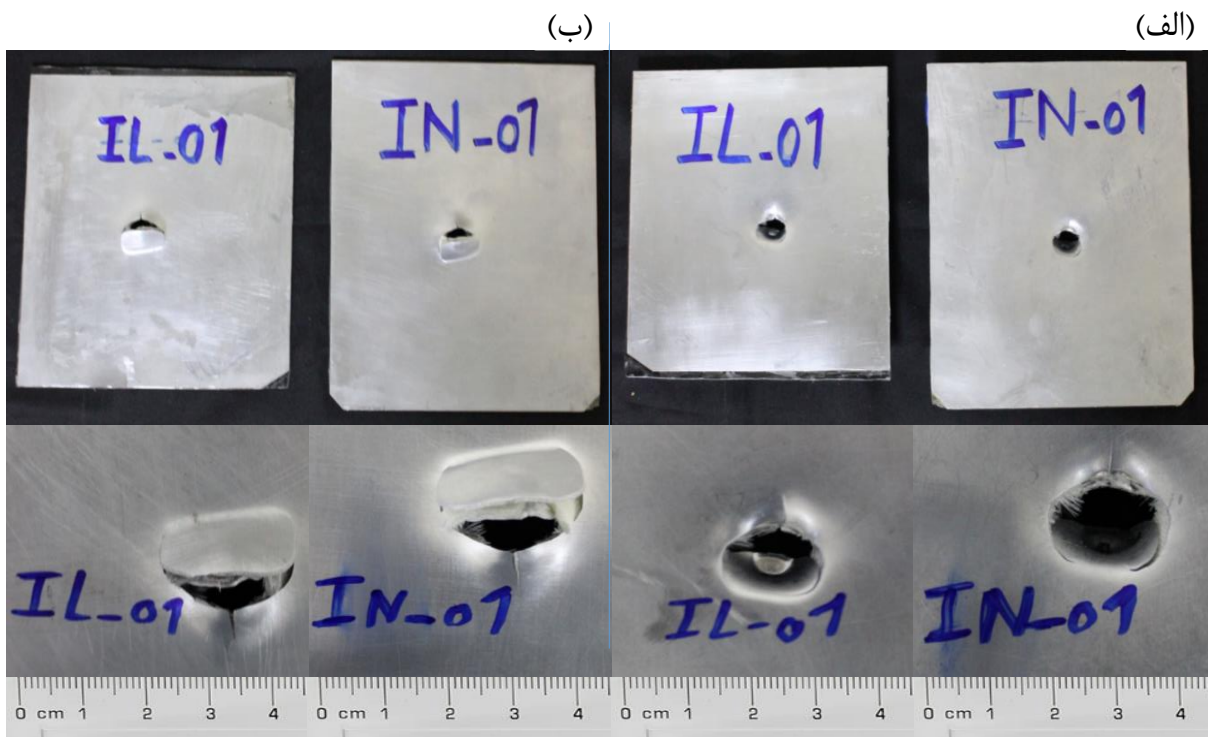
۴-۳-۱- نتایج آزمون استاتیکی ورق FML

آزمون استاتیکی ورق FML، برای مشخص شدن تقریبی انرژی شکست فقط روی دو نمونه‌ی ورق FML بدون نانو و با نانوجندلایه انجام شد که در جدول ۴-۲۵، نتایج این آزمون ارائه شده است.

جدول ۴-۲۵- نتایج آزمون استاتیکی

کد	$F_{max}(kN)$	$\Delta F_{max}(\%)$	$E (J)$	$\Delta E (\%)$
FML بدون نانوگرافن (IN01)	۷/۲۸۵	۰	۲۸/۸۰۴	۰
FML با نانوگرافن چندلایه (IL01)	۷/۹۸۸	۹/۶	۳۱/۵۵۱	۹/۵

با توجه به جدول ۴-۲۵ نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL01)، برای آسیب شدن به ۹/۶٪ نیرو و ۹/۵٪ انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، نیاز داشت. در شکل ۴-۱۷ نمونه‌ها بعد از آزمون استاتیکی ارائه شده است.



شکل ۴-۱۷- نمونه‌ها پس از انجام آزمون استاتیکی، (الف) سطح برخورد در نمای دور و نزدیک (ب) سطح پشت در نمای دور و نزدیک

بعد از مشخص شدن انرژی مورد نیاز برای تخریب نمونه، دو انرژی مختلف، یکی کوچک‌تر از انرژی استاتیکی (۲۵ J) و یکی بزرگتر از انرژی استاتیکی (۴۰ J)، برای آزمون ضربه انتخاب شد.

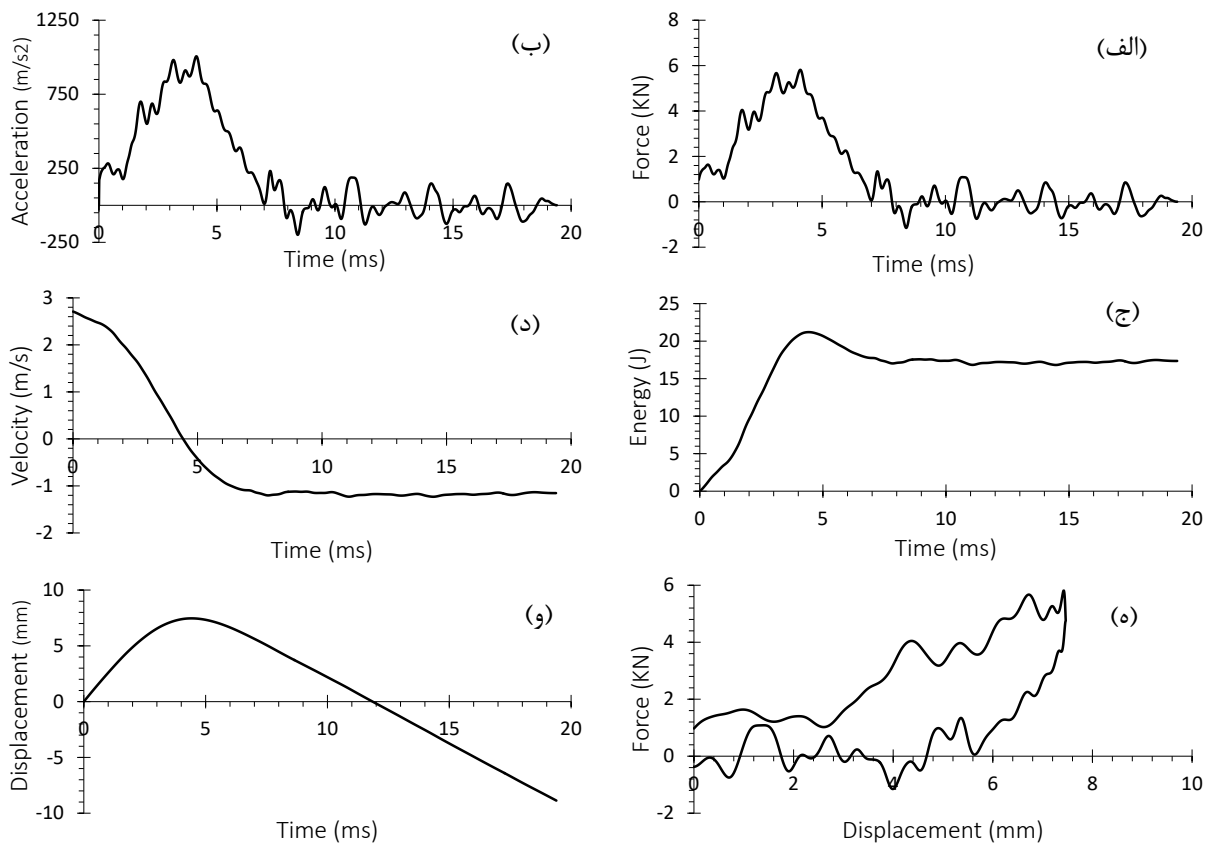
۴-۳-۲- نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML بدون نانوگرافن

• نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی ۲۵ J در جدول ۴-۲۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۲۶- نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی ۲۵ J

کد	$F_{max}(kN)$	$E (J)$
IN04	۵/۵۸۸	۱۶/۸۸۶
IN05	۵/۸۱۲	۱۶/۸۵۲
میانگین	۵/۷۰۰	۱۶/۸۶۲

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌های بدون نانوگرافن IN05 به ترتیب در شکل ۴-۱۸ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۸- نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN05) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ J، نیرو-زمان،

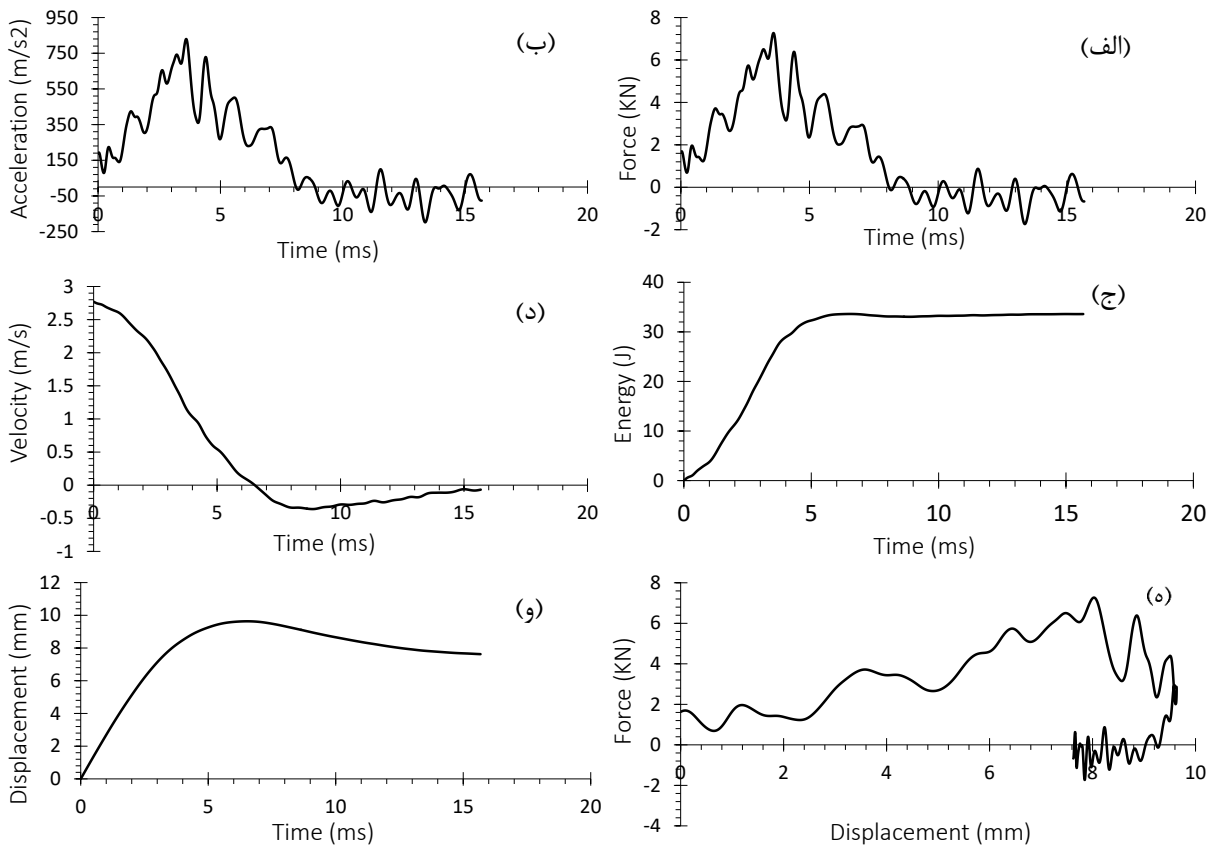
(ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

• نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰ در جدول ۴-۲۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۲۷- نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰

کد	$F_{max}(kN)$	$E (J)$
IN02	۷/۲۶۸	۳۳/۰۴۱
IN03	۷/۳۷۱	۲۹/۹۳۸
IN06	۷/۳۰۳	۳۰/۲۰۴
میانگین	۷/۳۳۷	۳۰/۰۷۱

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن IN06 در انرژی J ۴۰، در شکل ۴-۱۹ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۹- نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN06) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی J ۴۰، (الف)

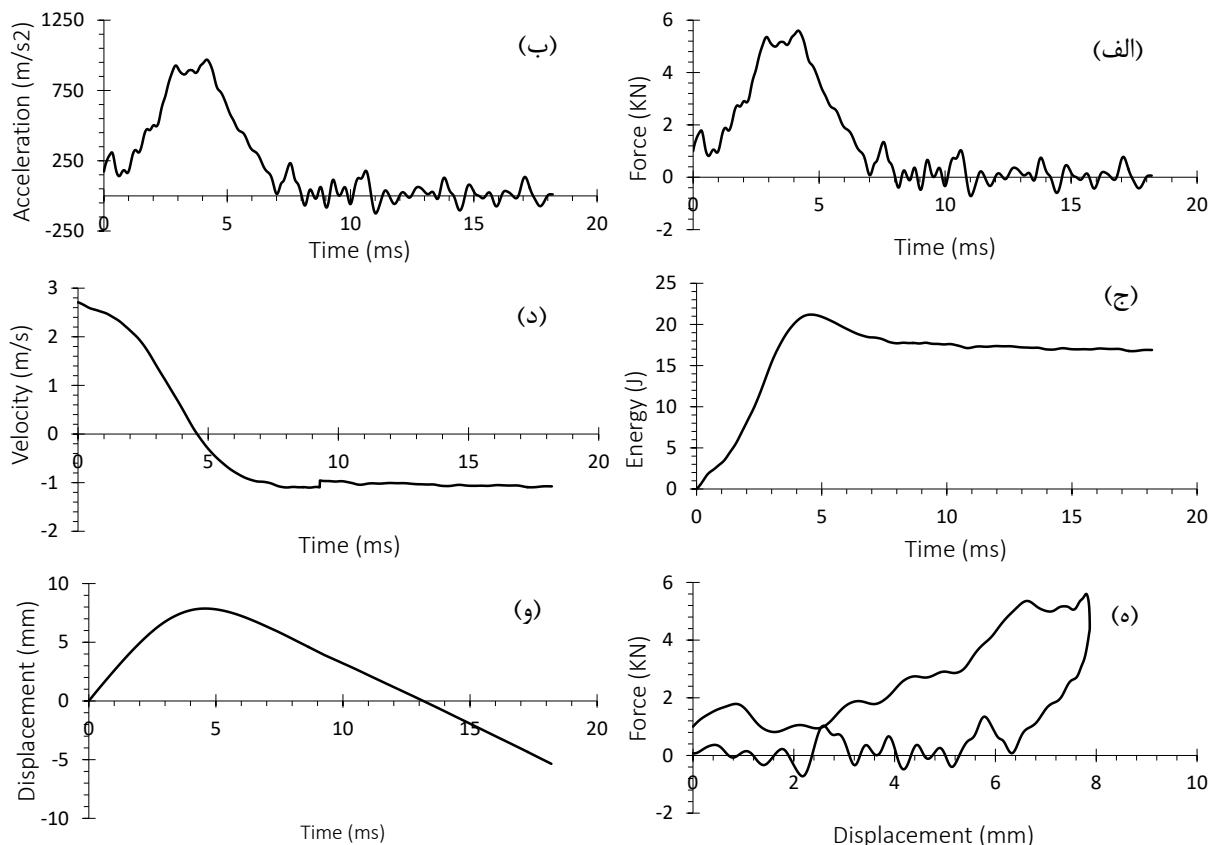
نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

۴-۳-۳- نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با اکسید نانوگرافن نوع صنعتی
نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی ۲۵ J در جدول ۴-۲۸، ارائه شده است.

جدول ۴-۲۸- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی ۲۵ J

کد	$F_{max}(kN)$	$E (J)$
IL04	۵/۴۹۹	۱۸/۳۱۱
IL05	۵/۶۰۰	۱۷/۷۱۹
میانگین	۵/۵۴۹	۱۸/۰۱۵

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌های با اکسید نانوگرافن چندلایه IL05 در شکل ۴-۲۰ ارائه شده است.

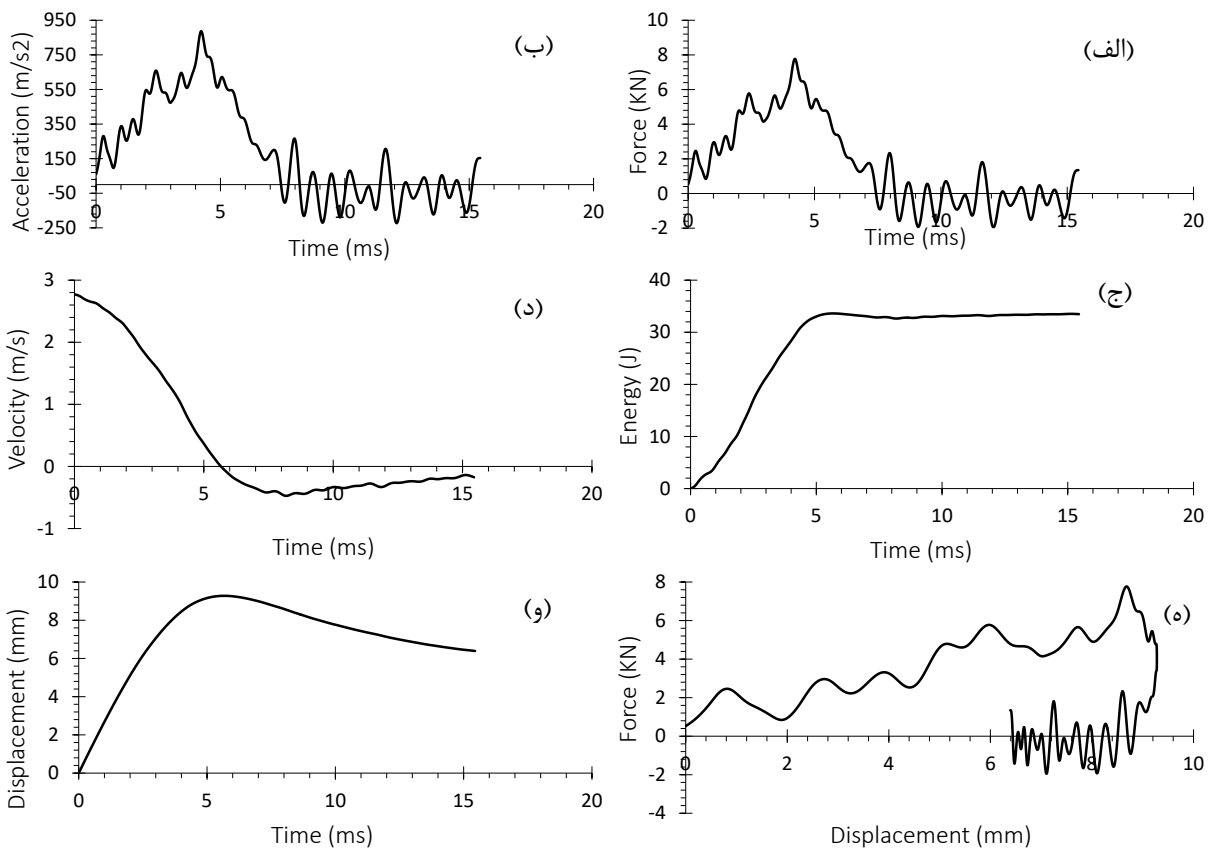


شکل ۴-۲۰- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL05) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ J، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان
نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی ۴۰ J در جدول ۴-۲۹، ارائه شده است.

جدول ۴-۲۹- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن چندلایه در انرژی ۴۰ ژول

کد	$F_{max}(kN)$	$E (J)$
IL02	۶/۰۸۵	۳۳/۳۱۶
IL03	۷/۴۷۹	۳۰/۷۱۴
IL06	۷/۷۶۹	۳۲/۶۲۹
میانگین	۷/۶۲۴	۳۲/۲۲۰

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌های با اکسید نانوگرافن چندلایه IL06 در شکل ۴-۲۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۱- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL06) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ J، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

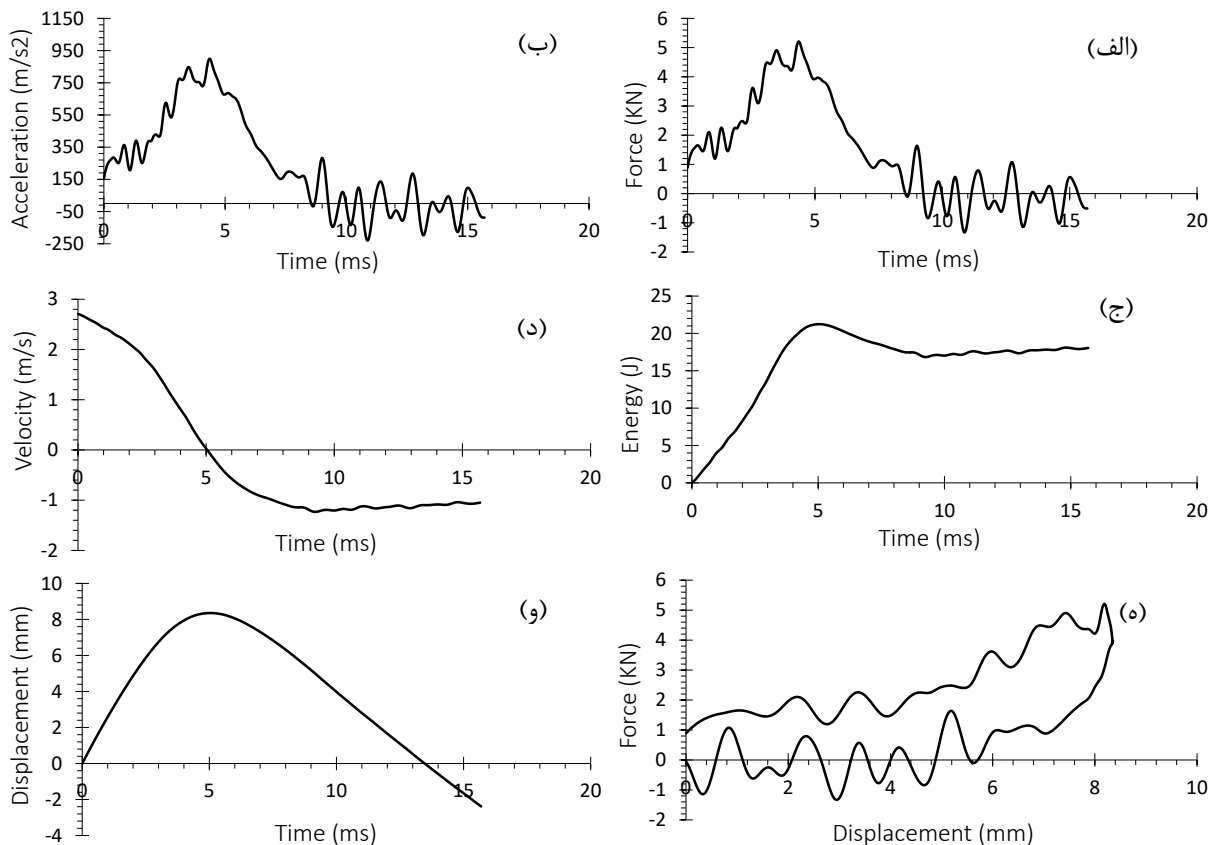
۴-۳-۴- نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با اکسید نانوگرافن تک‌لایه

نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML با نانوگرافن تک‌لایه در دو انرژی ۲۵ J و ۴۰ J در جدول ۴-۳۰ ارائه شده است.

جدول ۴-۳۰- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌ی FML با نانوگرافن تک‌لایه در انرژی ۲۵ J

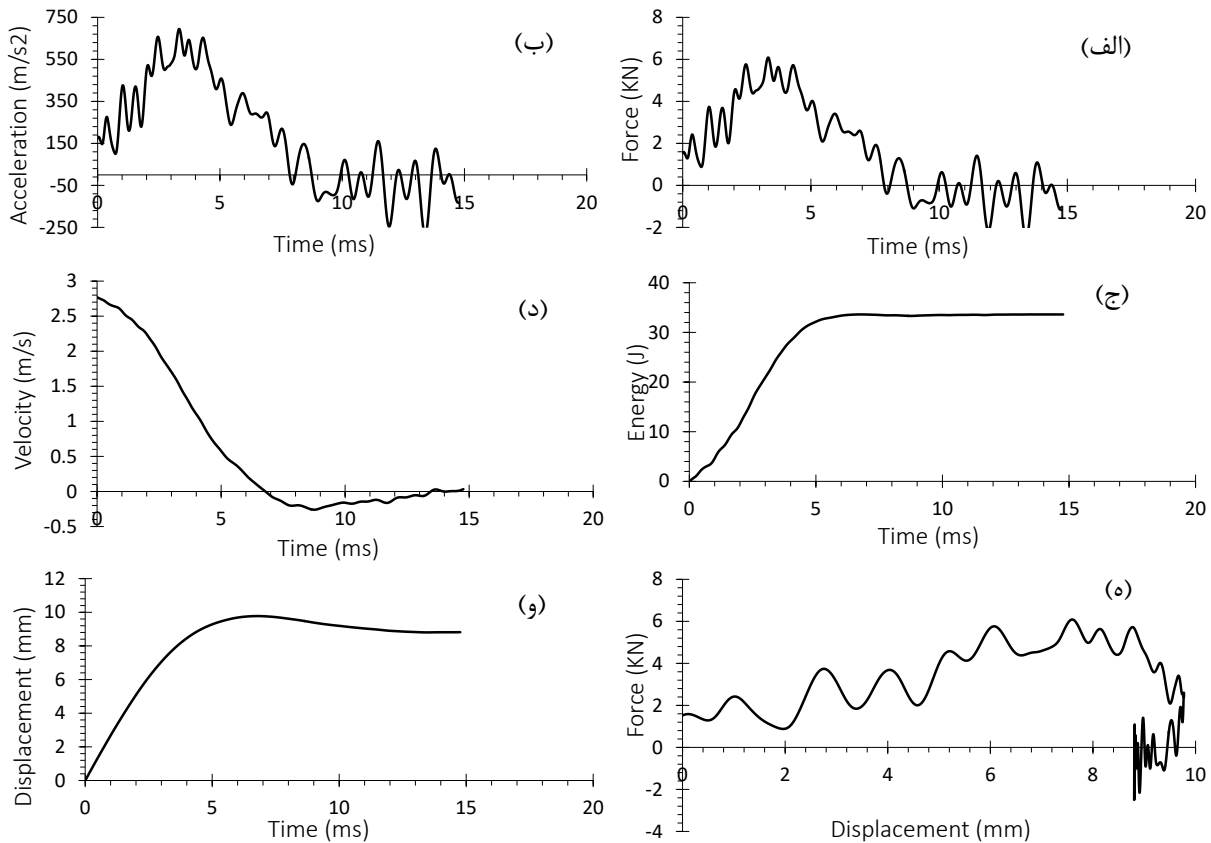
E (J)	F_{max} (kN)	کد
۱۶/۸۳۶	۵/۱۹۷	ILS02(۲۵J)
۳۳/۳۱۶	۶/۰۸۵	ILS01(۴۰J)

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌ی (ILS02) با نانوگرافن تک‌لایه تحت انرژی ۲۵ J در شکل ۴-۲۲ و برای نمونه‌ی (ILS01) با نانوگرافن تک‌لایه تحت انرژی ۴۰ J در شکل ۴-۲۳ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۲- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (ILS02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ J،

(الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان



شکل ۴-۲۳- نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (ILS01) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ J، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

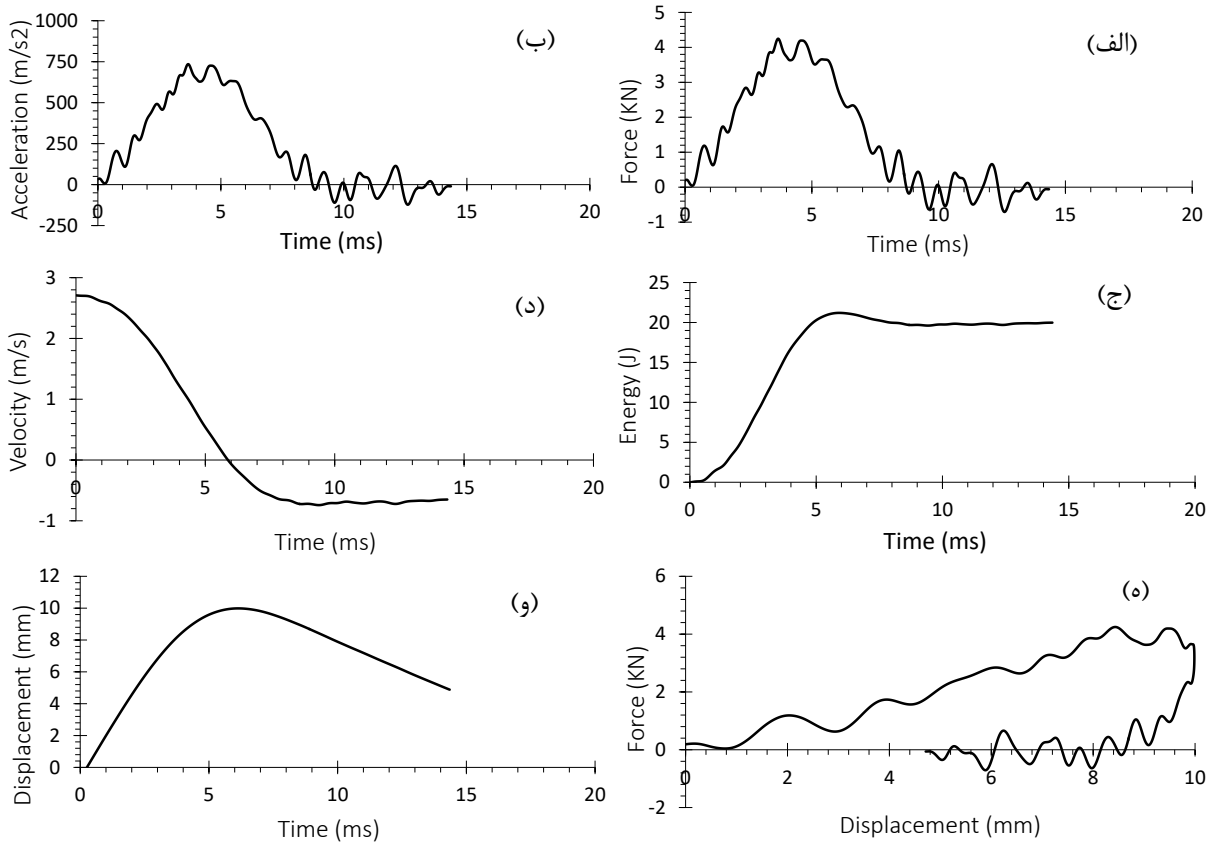
۴-۳-۵- نتایج آزمون ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان

- نتایج ضربه بر روی نمونه‌های FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان در دو انرژی ۲۵ J و ۴۰ J در جدول ۴-۳۱، ارائه شده است.

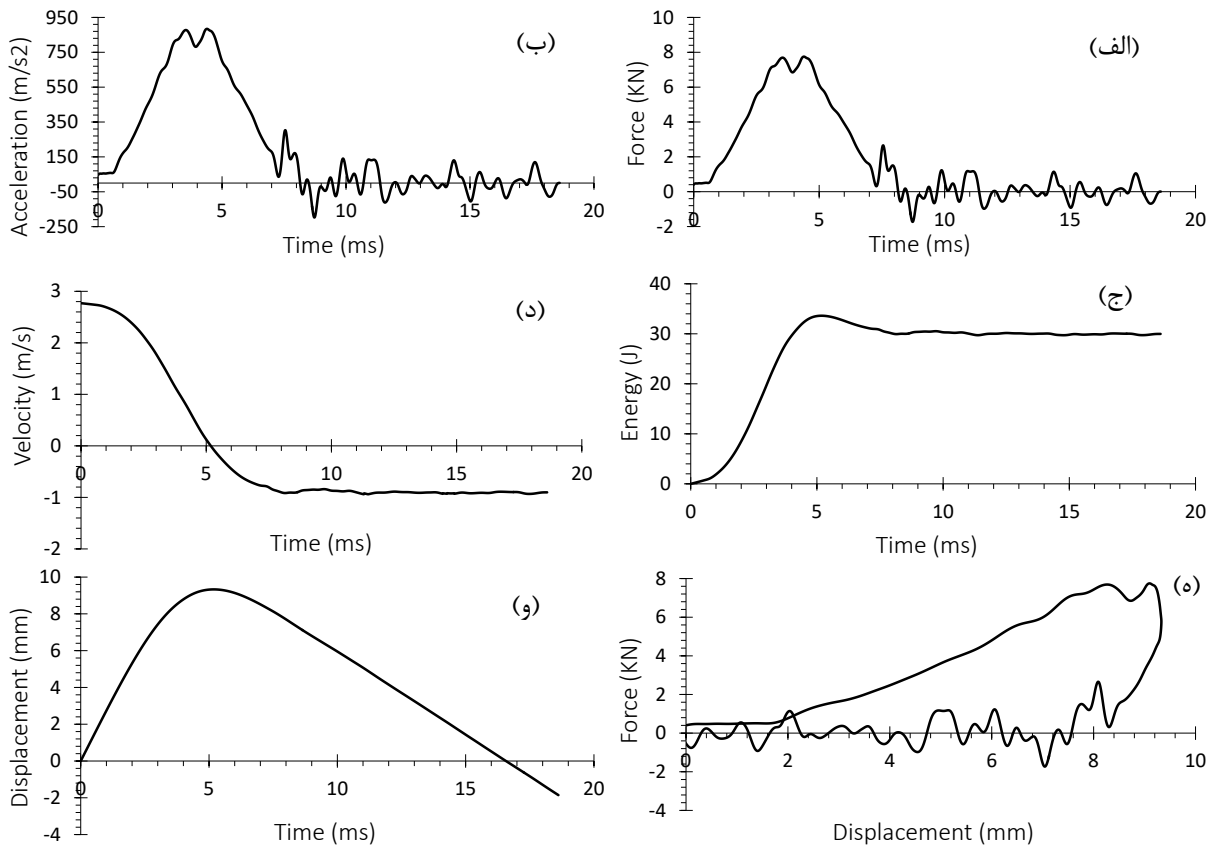
جدول ۴-۳۱- نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌ی FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان در انرژی ۲۵ J و ۴۰ J

E (J)	F_{max} (kN)	کد
۱۹/۶۴۲	۴/۲۴۶	IPN02(۲۵J)
۲۹/۷۱۵	۷/۷۴۸	IPN01(۴۰J)

نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان آزمون تجربی ضربه برای نمونه‌ی (IPN01) با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن تحت انرژی ۲۵ J در شکل ۴-۲۴ و برای نمونه‌ی (IPN02) با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن تحت انرژی ۴۰ J در شکل ۴-۲۵ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۴- نمودارهای نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن (IPN01) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ J (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان



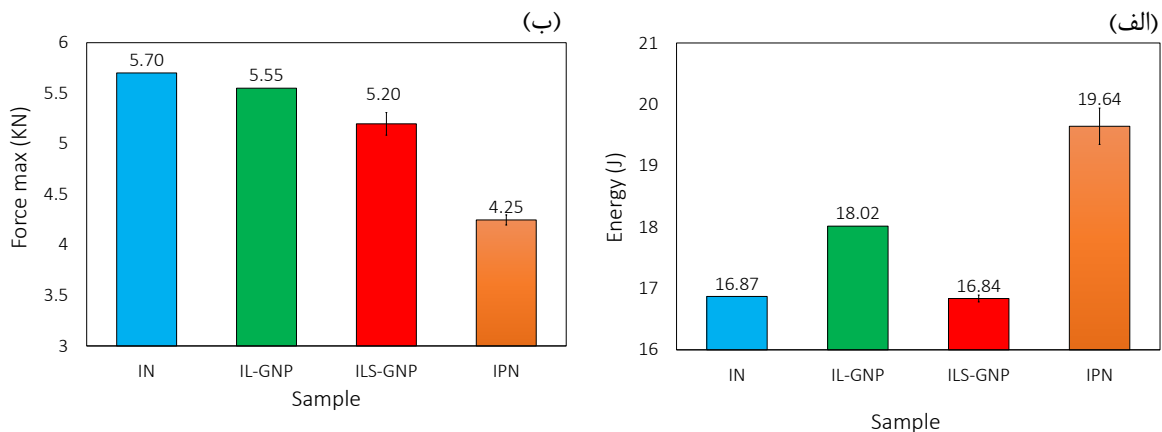
شکل ۴-۲۵- نمودارهای نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن (IPN02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ J، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

• بررسی نتایج نمونه‌های تحت انرژی ضربه‌ی ۲۵ J

در این بخش به مقایسه‌ی نمونه‌هایی که تحت انرژی ۲۵ J قرار گرفته‌اند، پرداخته شد. در جدول ۴-۳۲ مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی ۲۵ J ارائه شده است. در شکل ۴-۲۶ نمودار میله‌ای به‌دست آمده از میانگین نتایج در حالت‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه، با نانوگرافن تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان ارائه شده است.

۴-۳۲- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی ۲۵ J

نمونه	Force _{max} (kN)	ΔForce _{max} (%)	Energy (J)	ΔEnergy (%)
بدون نانوگرافن	۵/۷۰	۰	۱۶/۸۶	۰
با نانوگرافن چندلایه	۵/۵۴	-۲/۸	۱۸/۰۱	۶/۷
با نانوگرافن تک‌لایه	۵/۱۹	-۸/۹	۱۶/۸۳	-۰/۲
با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان	۴/۲۴	-۲۵/۶	۱۹/۶۴	۱۶/۴



شکل ۴-۲۶- نمودارهای میله‌ای نمونه‌های تحت انرژی ۲۵ J، (الف) پارامتر انرژی جذب‌شده، (ب) پارامتر نیروی بیشینه

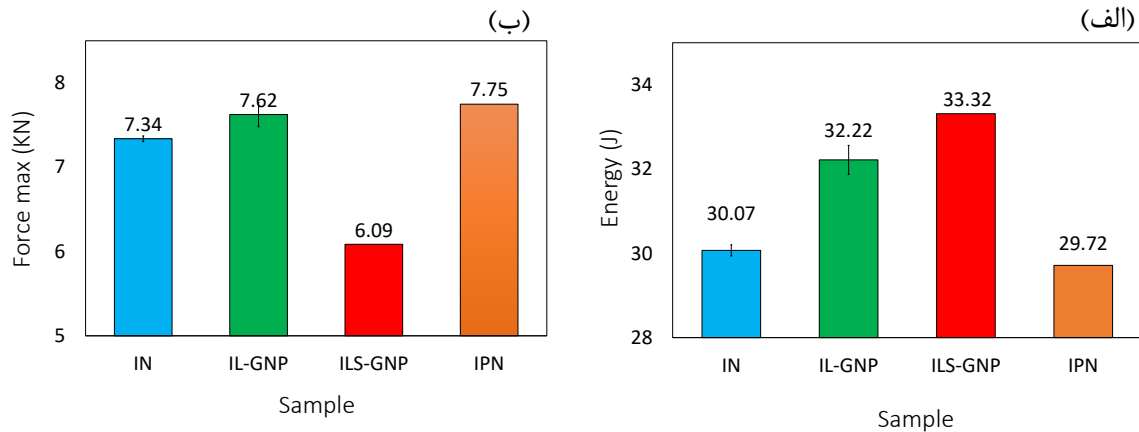
با توجه به شکل ۴-۲۶ بیشترین انرژی جذب‌شده در اثر انرژی ضربه‌ی ۲۵ J، در نمونه‌ی با پلی‌اورتان مشاهده شد و کمترین انرژی جذب‌شده مربوط به نمونه‌ی بدون نانو و با نانوگرافن تک‌لایه بوده است. انرژی جذب‌شده‌ی نمونه‌ی نانوگرافن چندلایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ۶/۷٪ افزایش داشته است. نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۰/۲٪ کاهش انرژی جذب‌شده داشته است. نمونه‌ی با پلی‌اورتان نسبت به نمونه‌ی بدون نانو، دارای ۱۶٪ افزایش انرژی جذب‌شده بوده است. همچنین برای پارامتر نیروی بیشینه، نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه، با نانوگرافن تک‌لایه و نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، به ترتیب، ۲/۸٪، ۸/۹٪ و ۲۵/۶٪ کاهش نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن کاهش داشته است.

• بررسی نتایج نمونه‌های تحت انرژی ضربه‌ی ۴۰ J

در این بخش به مقایسه‌ی نمونه‌هایی که تحت انرژی ۴۰ J قرار گرفته‌اند، پرداخته شد. در جدول ۴-۳۳ مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی ۲۵ ژول ارائه شده است. در شکل ۴-۲۷ نمودار میله‌ای به دست آمده از میانگین نتایج در حالت‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه، با نانوگرافن تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان ارائه شده است.

۴-۳۳- مقایسه‌ی نتایج میانگین نمونه‌های آزمون ضربه با انرژی ۴۰ J

نمونه	Force _{max} (kN)	ΔForce _{max} (%)	Energy (J)	ΔEnergy (%)
بدون نانوگرافن	۷/۳۳	۰	۳۰/۰	۰
با نانوگرافن چندلایه	۷/۶۲	۳/۹	۳۲/۲۲	۷/۱
با نانوگرافن تک‌لایه	۶/۰۸	-۱۷	۳۳/۳۱	۱۰/۷
با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان	۷/۷۴	۵/۵	۲۹/۷۱	-۱/۱



شکل ۴-۲۷- نمودارهای میله‌ای نمونه‌های تحت انرژی ۴۰ J، (الف) پارامتر انرژی جذب‌شده، (ب) پارامتر نیروی بیشینه

با توجه به شکل ۴-۲۷ بیشترین انرژی جذب‌شده در اثر انرژی ضربه‌ی ۴۰ J، در نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه، مشاهده شد و کم‌ترین انرژی جذب‌شده مربوط به نمونه‌ی بدون نانو و با پلی‌اورتان بوده است. نمونه‌ی نانوگرافن چندلایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ۷٪ افزایش انرژی جذب‌شده و نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۰٪ افزایش جذب انرژی داشته‌است. نمونه‌ی با پلی‌اورتان نسبت به نمونه‌ی بدون نانو، دارای ۱/۲٪ کاهش جذب انرژی بوده است. در انرژی ۴۰ J رفتار نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان در جذب انرژی با شکل ظاهری آن پس از ضربه به طور کامل عکس هم بودند، به طوری که جذب انرژی خیلی پایین ولی شکل ظاهری و انحنا ایجاد شده‌ی بسیار خوبی داشتند. پایین بودن انرژی جذب شده در انرژی ضربه‌ی ۴۰ J و در عین حال، سالم بودن نمونه، به علت خاصیت الاستیکی لایه‌ی چسب پلی‌اورتان است که در هنگام ضربه، اجازه‌ی حرکت به لایه‌ی آلومینیومی که در سطح برخورد قرار داشته، داده ولی انرژی کم‌تری را به هسته‌ی کامپوزیتی منتقل کرده است. همچنین برای پارامتر نیروی بیشینه، نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه و نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، به ترتیب، ۳/۹٪ و ۵/۵٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، و نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۷٪ کاهش داشته است.

۴-۳-۶- بررسی میزان انحنا ایجادشده و نحوه‌ی تغییرشکل در اثر ضربه

در اثر انرژی ضربه، انحنا در محل برخورد ضربه‌زننده به نمونه‌ی هدف، بر روی نمونه‌ی هدف رخ می‌دهد که میزان این انحنا ایجادشده یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم در پدیده‌ی ضربه می‌باشد.

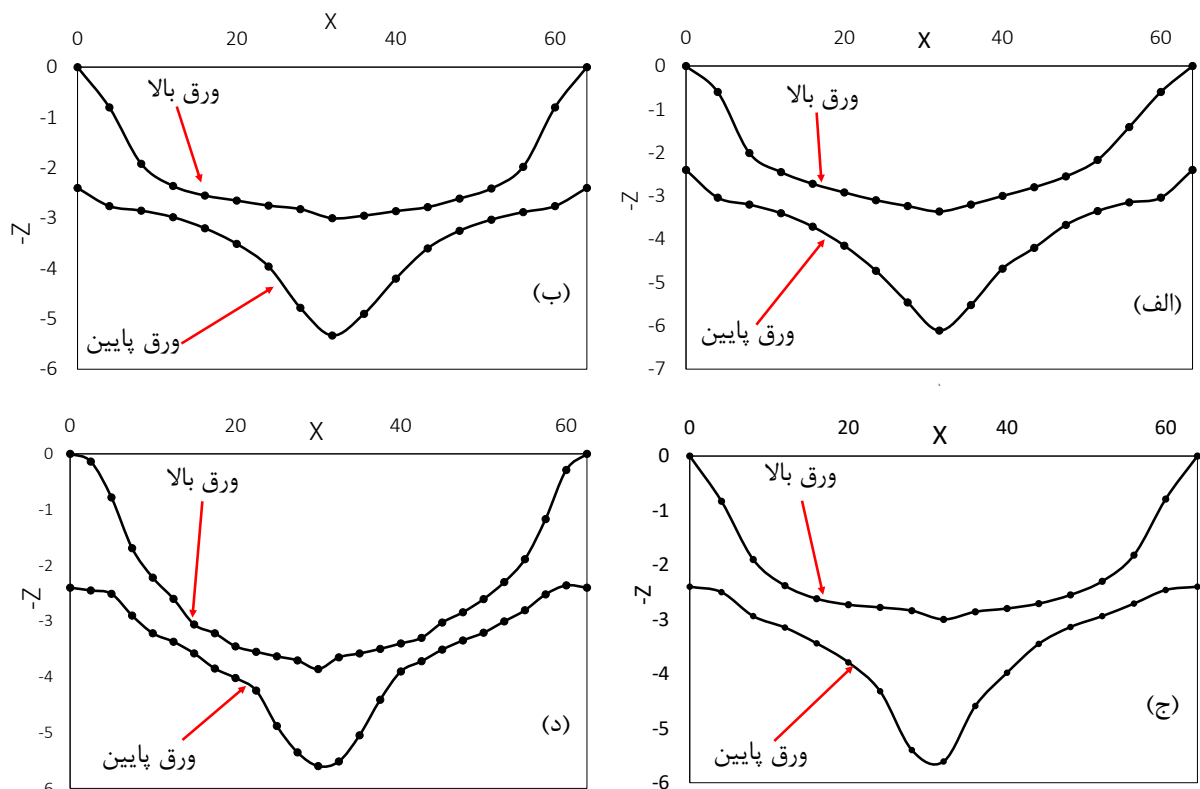
• بررسی میزان انحنا ایجادشده و نحوه‌ی تغییرشکل در انرژی ضربه‌ی ۲۵ J

در جدول ۴-۳۴ میزان انحنا ایجادشده در نمونه‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه، و درصد تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ذکر شده است.

۴-۳۴- نتایج و مقایسه نتایج میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۲۵

نوع نمونه	بیشترین عمق صفحه‌ی بالایی	درصد تغییرات صفحه‌ی بالا	بیشترین عمق صفحه‌ی پایینی	درصد تغییرات صفحه‌ی پایین
بدون نانوگرافن	-۳/۳۶	۰	-۶/۱۱	۰
با نانوگرافن چندلایه	-۳	۱۰/۷	-۵/۳۳	۱۲/۷۶
با نانوگرافن تک‌لایه	-۲/۸۶	۱۴/۸	-۵/۶۱	۸/۱
با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان	-۲/۸	۱۶/۶	-۵/۶	۸/۳

با توجه به نتایج جدول ۴-۳۴ بیشترین میزان انحنای ایجاد شده در اثر ضربه با انرژی J ۲۵، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد و کم‌ترین انحنای مربوط به نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان و نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه است. در صفحه‌ی برخورد (صفحه‌ی بالایی)، نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، به ترتیب، ۱۰/۷٪، ۱۴/۸٪، ۱۶/۶٪ و در صفحه‌ی پشتی (صفحه‌ی پایینی)، به ترتیب، ۱۲/۷۶٪، ۸/۱٪، ۸/۳٪، بهبود (کاهش انحنای) داشته‌اند. میزان انحنای نمونه‌ها به وسیله‌ی ساعت اندازه‌گیری به آمده است. به طوری که قطعات روی دستگاه فرز بسته شده و پایه‌ی مغناطیسی ساعت اندازه‌گیری به کله‌گی دستگاه فرز بسته شد و با مقدار مشخص جابجایی میز دستگاه فرز، اندازه‌ها خوانده و ثبت شد. با استفاده از نقاط به‌دست‌آمده، نمودار صفحات بالا و پایین رسم شد که در شکل ۴-۲۸ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۲۸- مسیر انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی ۲۵ ژول تجربی، الف) نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ب) نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه، ج) نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه و د) نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن

همان‌طور که گفته‌شد، بیشترین انحنای ایجادشده در اثرضربه‌ی J ۴۰، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد که در شکل ۴-۲۸ هم قابل مشاهده است. کم‌ترین انحنای ایجادشده مربوط به نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و با پلی‌اورتان است.

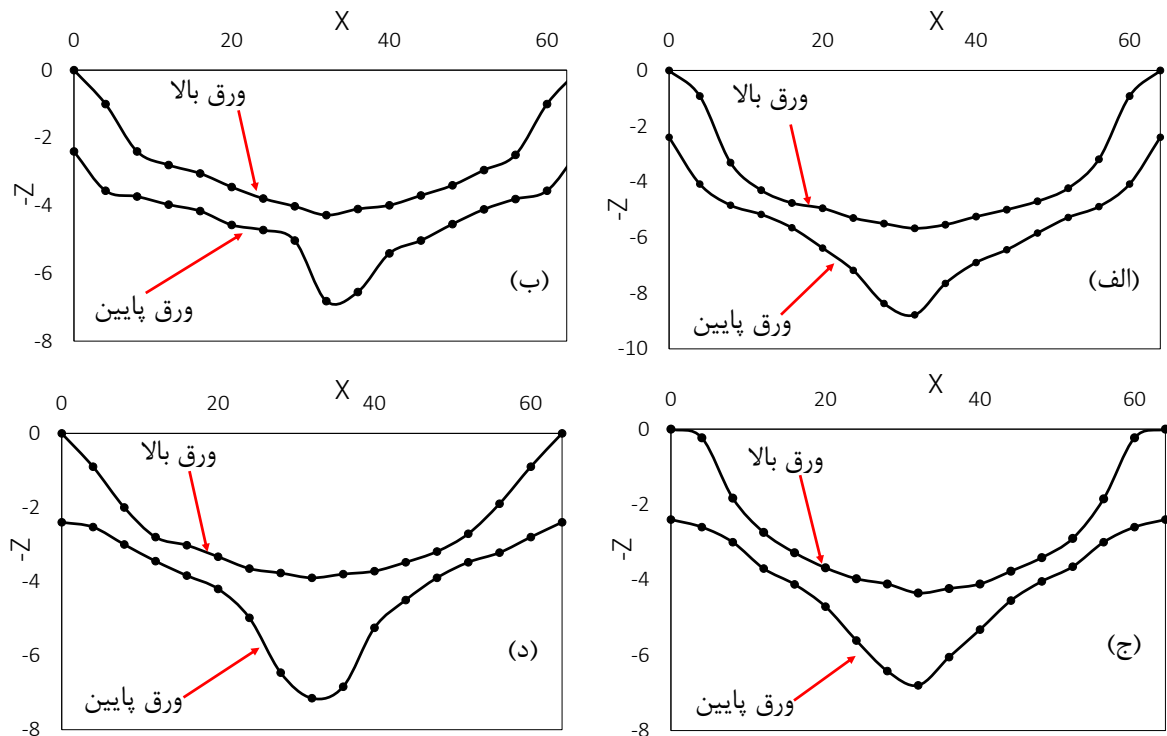
• بررسی میزان فرورفتگی و نحوه‌ی تغییرشکل در انرژی ضربه‌ی J ۴۰

درجدول ۴-۳۵ میزان انحنای ایجاد شده در اثر ضربه‌ای با انرژی J ۴۰، در نمونه‌های بدون نانوگرافن و با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه ذکر شده است.

۴-۳۵- نتایج و مقایسه نتایج میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۴۰

نوع نمونه	بیشترین عمق صفحه‌ی بالایی	درصد تغییرات صفحه‌ی بالا	بیشترین عمق صفحه‌ی پایینی	درصد تغییرات صفحه‌ی پایینی
بدون نانوگرافن	-۵/۶۷	۰	-۸/۷۸	۰
با نانوگرافن چندلایه	-۴/۲۸	۲۴/۵	-۶/۸۲	۲۲/۳۲
با نانوگرافن تک‌لایه	-۴/۳۵	۲۳/۲	-۶/۸	۲۲/۵۵
با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان	-۳/۹	۳۱/۲	-۷/۱۵	۱۸/۵

با توجه به نتایج جدول ۴-۳۵ بیشترین میزان انحنای ایجاد شده در اثر ضربه در انرژی J ۴۰، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد و کم‌ترین انحنای مربوط به نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان می‌باشد. در صفحه‌ی برخورد (صفحه‌ی بالایی)، نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و پلی‌اورتان، به ترتیب، ۲۴/۵٪، ۲۳/۵٪، ۳۱/۲٪ و در صفحه‌ی پشتی (صفحه‌ی پایینی)، به ترتیب، ۲۲/۳۲٪، ۲۲/۵۵٪، ۱۸/۵٪، بهبود (کاهش انحنای) داشته‌اند. با استفاده از نقاط به‌دست‌آمده، نمودار صفحات بالا و پایین رسم شد که در شکل ۴-۲۹ قابل مشاهده است.

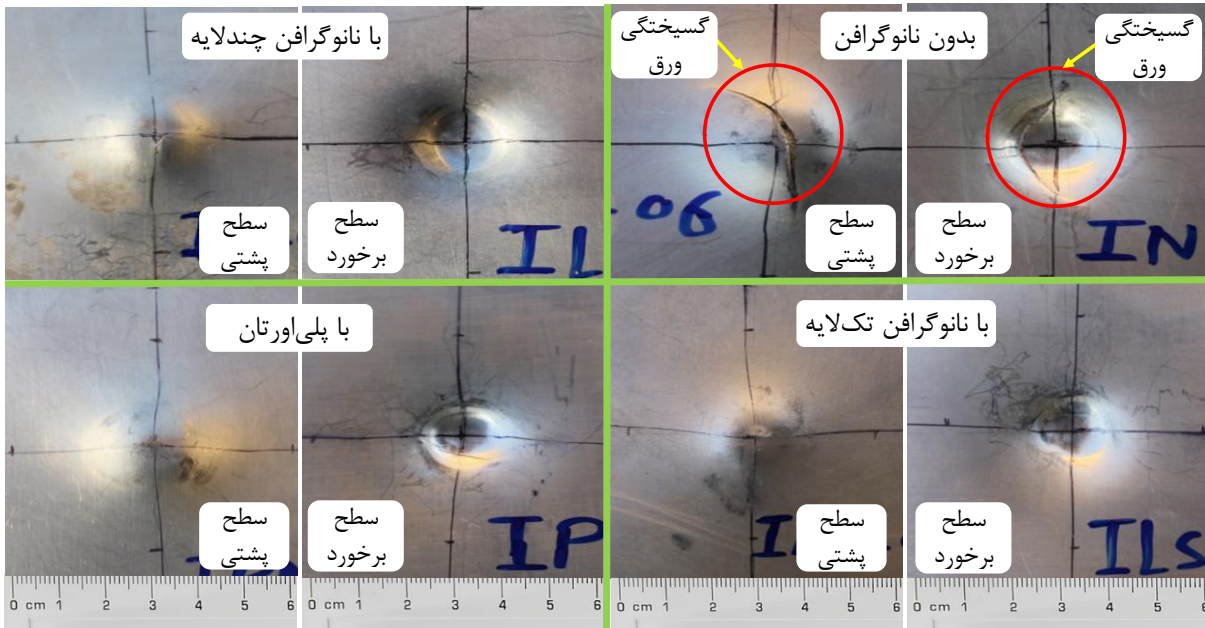


شکل ۴-۲۹- نمودار مسیر انحنای ایجادشده در اثر ضربه با انرژی J ۴۰ تجربی، الف) نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ب) نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه، ج) نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه و د) نمونه‌ی با پلی‌اورتان بدون نانوگرافن

همان‌طور که گفته‌شد، بیشترین انحنای ایجادشده در اثر ضربه‌ی J ۴۰، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد که در شکل ۴-۲۹ هم قابل مشاهده است. با مقایسه بر حسب انحنای صفحه‌ی بالایی، کم‌ترین انحنای ایجادشده مربوط به نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان است. هر چند از مقایسه‌ی صفحه‌ی پایینی هم قابل مشاهده است که بیشترین انحنای متعلق به نمونه‌ی بدون نانوگرافن است و افزایش انحنای صفحه‌ی پایینی نمونه‌ی با پلی‌اورتان، به‌علت بیشتر بودن ضخامت ورق پلی‌اورتان نسبت به دیگر نمونه‌ها است.

در شکل ۴-۳۰ تصاویری از محل برخورد ضربه‌زننده و صفحه پشت که متأثر از ضربه بود، ارائه شده و این تصاویر مربوط به انرژی برخورد J ۴۰ است.

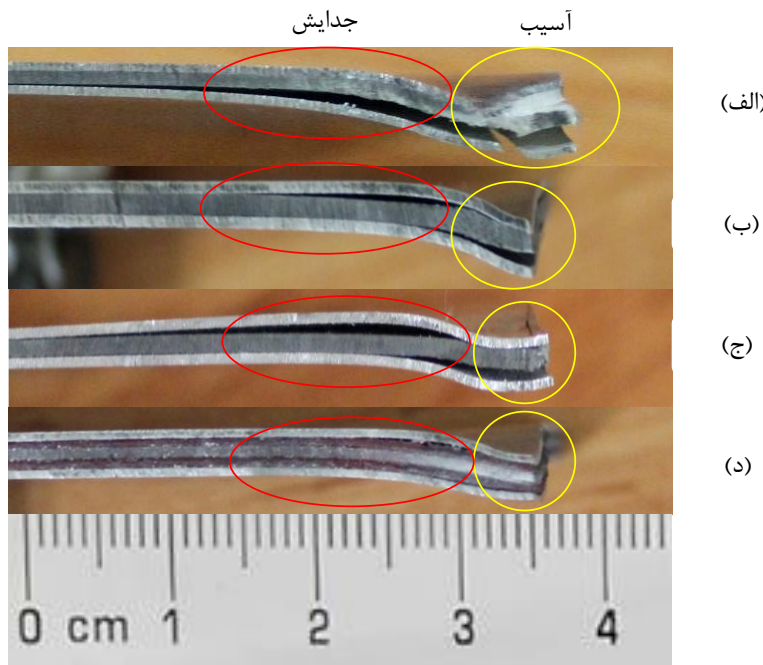
در نمونه‌ی بدون نانوگرافن، سطح اصلی برخورد ضربه‌زننده و سطح پشتی آن، دچار پاره‌گی در فلز آلومینیوم شده‌اند. در دیگر نمونه‌ها، همان‌طور که از تصاویر مشخص است، ترک و پاره‌گی دیده نشد ولی فلز آلومینیوم مربوط به سطح اصلی برخورد در همه‌ی نمونه‌ها، دچار له‌شدگی و به تبع آن دچار کاهش ضخامت شده است.



شکل ۴-۳۰- سطح برخورد و صفحه‌ی پشت در اثر برخورد ضربه با انرژی J ۴۰، الف) نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ب) نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه، ج) نمونه‌ی با نانوگرافن تک لایه و د) نمونه‌ی با پلی اورتان

۴-۳-۷- بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها بعد از برش

برای بررسی جدایش آلومینیوم از هسته‌ی کامپوزیتی و بررسی میزان خرابی کامپوزیت، ربع نمونه‌هایی که در انرژی J ۴۰ آزمون شدند، برش داده شد. در شکل ۴-۳۱ نمونه‌های بریده شده، ارائه شده‌اند.



شکل ۴-۳۱- سطح مقطع برش خورده نمونه‌ی، الف) بدون نانوگرافن، ب) با نانوگرافن چندلایه، ج) با نانوگرافن تک لایه و د) با پلی اورتان بدون نانوگرافن

در شکل ۴-۳۱ نواحی مشخص شده با دایره‌ی زرد رنگ، برای مقایسه‌ی خرابی کامپوزیت و خرابی آلومینیوم و نواحی مشخص شده با بیضی قرمز رنگ برای بررسی جدایش بین ورق آلومینیوم و هسته کامپوزیتی است. در بررسی نواحی مشخص شده با دایره‌ی زرد رنگ، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن، خرابی هسته‌ی کامپوزیتی و خرابی ورق آلومینیوم دیده شد. در نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، هیچ‌گونه خرابی در هسته‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیوم دیده نشد. در بررسی نواحی مشخص شده با بیضی قرمز رنگ، در هر سه نمونه‌ی بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه، جدایش ورق آلومینیوم از هسته‌ی کامپوزیتی، رخ داده است. میزان جدایش در نمونه‌ی بدون نانوگرافن از دیگر نمونه‌ها بیشتر است و کم‌ترین میزان جدایش در بین سه نمونه‌ی ذکر شده متعلق به نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه است. در نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان و بدون نانوگرافن، جدایش خیلی کمی دیده شد که ممکن است به دلیل وجود نقصی (ذوب نامناسب) در زمان ساخت نمونه با دستگاه پرس گرم باشد.

۴-۴-۴ نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی

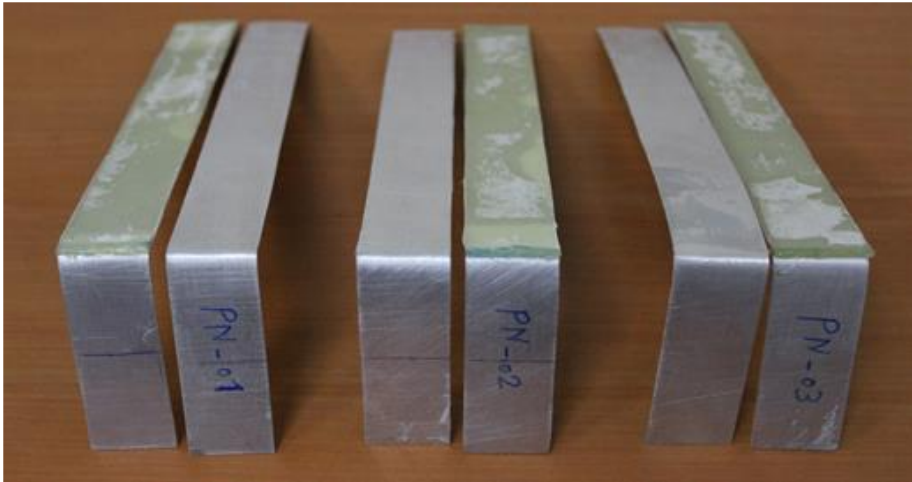
در این مرحله، برای بررسی اثر نانوگرافن بر چسبندگی فلز آلومینیوم به هسته‌ی کامپوزیتی و جلوگیری از جدایش، و به‌دست‌آوردن خواص چسب برای شبیه‌سازی مدل ضربه در نرم‌افزار آباکوس، آزمون پوست‌کنی طبق استاندارد ASTM D1876 انجام شد. این آزمون بر روی چهار گروه نمونه که عبارت‌است از؛ نمونه‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه، با نانوگرافن تک‌لایه و با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان انجام شد. فاکتورهای بررسی شده در این آزمون شامل؛ حداکثر نیروی جدایش (از هم‌گسیختگی چسب) نسبت به عرض نمونه T_{max} (N/mm)، حداقل نیروی جدایش نسبت به عرض نمونه T_{min} (N/mm) و نیروی میانگین جدایش نسبت به عرض نمونه T_{av} (N/mm) می‌باشد.

۴-۴-۴-۱ نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML بدون نانوگرافن

آزمون پوست‌کنی برای ورق FML بدون نانوگرافن، با سه مرتبه تکرار انجام شد که نتایج آن، در جدول ۴-۳۶ ارائه شده است. تصاویر نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون پوست‌کنی، پس انجام آزمون در شکل ۴-۳۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۳۶- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن

کد	T_{max} (N/mm)	T_{min} (N/mm)	T_{av} (N/mm)
PN01	۰/۸۹۳	۰/۲۷۹	۰/۵۶۰
PN02	۰/۶۹۳	۰/۱۷۰	۰/۴۱۹
PN03	۰/۵۷۰	۰/۱۴۱	۰/۳۹۴
میانگین	۰/۷۳۷	۰/۲۹۹	۰/۴۵۹

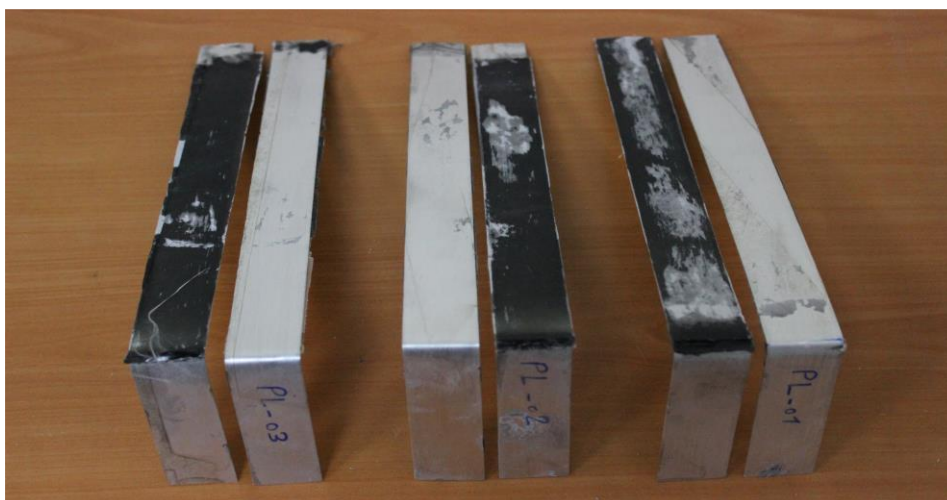


شکل ۴-۳۲- نمونه‌های بدون نانوگرافن پس از انجام آزمون پوست کنی

۴-۴-۲- نتایج تجربی آزمون پوست کنی ورق FML با اکسید نانوگرافن نوع صنعتی آزمون پوست کنی برای ورق FML با نانوگرافن چندلایه، با سه مرتبه تکرار انجام شد که نتایج آن، در جدول ۴-۳۷ ارائه شده است. تصاویر نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه آزمون پوست کنی، پس از انجام آزمون در شکل ۴-۳۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳۷- نتایج آزمون تجربی پوست کنی برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه

کد	$T_{max}(N/mm)$	$T_{min}(N/mm)$	$T_{av}(N/mm)$
PL01	۱/۸۶۱	۰/۹۷۴	۱/۲۹۴
PL02	۱/۸۳۶	۱/۳۰۸	۱/۵۴۷
PL03	۱/۷۷۴	۱/۱۱۸	۱/۳۸۱
میانگین	۱/۶۴۸	۱/۲۴۰	۱/۴۰۹



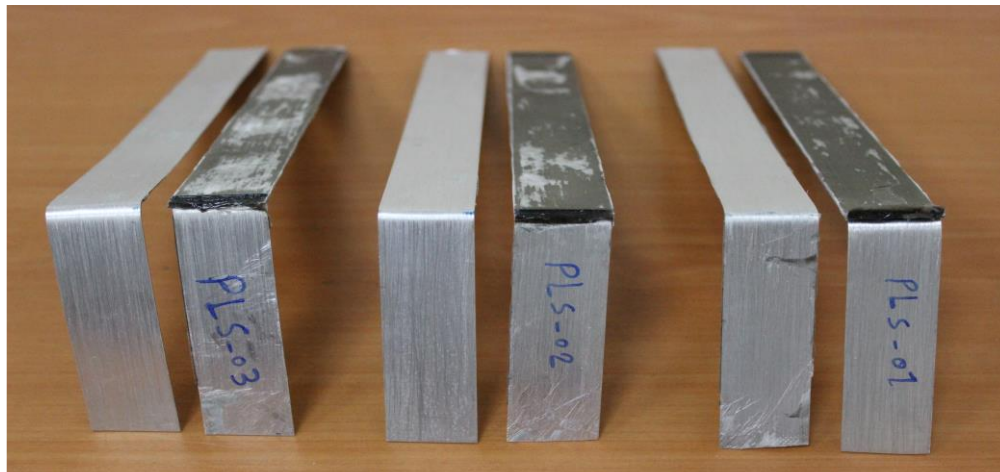
شکل ۴-۳۳- نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه پس از انجام آزمون پوست کنی

۴-۴-۳- نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML با اکسید نانوگرافن تک‌لایه

آزمون پوست‌کنی برای ورق FML با نانوگرافن تک‌لایه، با سه مرتبه تکرار انجام شد که نتایج آن، در جدول ۴-۳۸ ارائه شده است. تصاویر نمونه‌های با نانوگرافن تک‌لایه آزمون پوست‌کنی، پس انجام آزمون در شکل ۴-۳۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۳۸- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه

کد	$T_{max}(N/mm)$	$T_{min}(N/mm)$	$T_{av}(N/mm)$
PLS01	۱/۱۶۹	۰/۹۱۴	۰/۵۶۰
PLS02	۰/۷۸۲	۰/۴۴۴	۰/۴۱۹
PLS03	۱/۰۲۴	۰/۱۳۳	۰/۵۶۵
میانگین	۰/۸۳۹	۰/۴۵۸	۰/۶۴۰



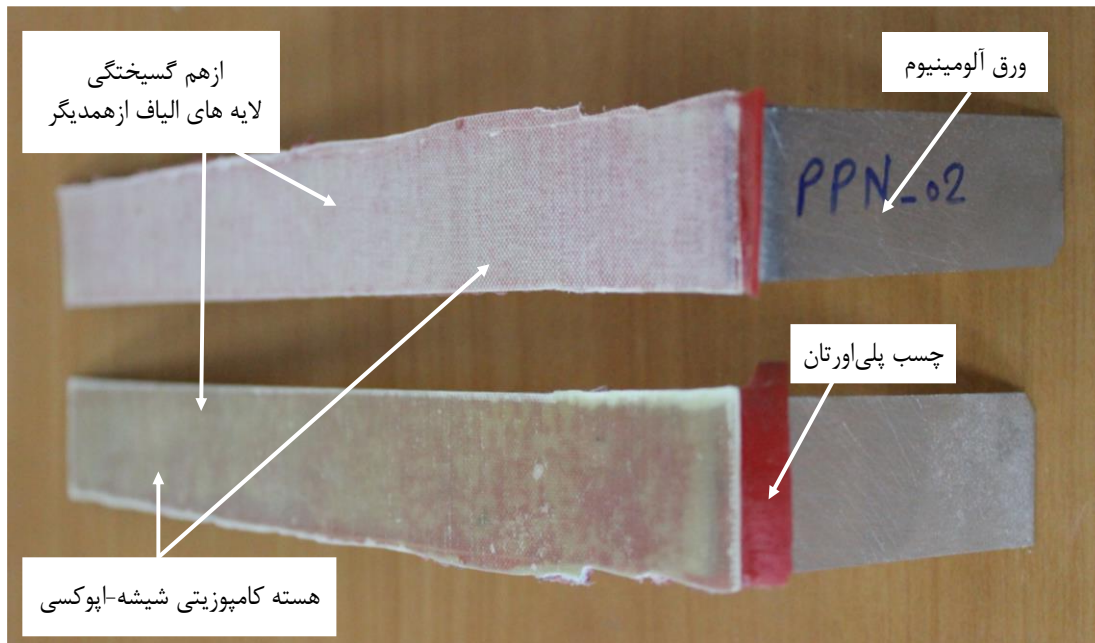
شکل ۴-۳۴- نمونه‌های با نانوگرافن تک‌لایه پس از انجام آزمون پوست‌کنی

۴-۴-۴- نتایج تجربی آزمون پوست‌کنی ورق FML با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان

آزمون پوست‌کنی برای ورق FML با پلی‌اورتان، بدون تکرار انجام شد که نتیجه‌ی آن، در جدول ۴-۳۹ ارائه شده است. نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان بدون نانوگرافن آزمون پوست‌کنی، پس انجام آزمون در شکل ۴-۳۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۳۹- نتایج آزمون تجربی پوست‌کنی برای نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان بدون نانوگرافن

کد	$T_{max}(N/mm)$	$T_{min}(N/mm)$	$T_{av}(N/mm)$
PPN01	۲/۴۵۰	۱/۴۸۰	۱/۸۸۲



شکل ۴-۳۵- نمونه‌ی با پلی‌اورتان پس از انجام آزمون پوست‌کنی

نمونه با پلی‌اورتان، همانطور که در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است، از محل اتصال هسته‌ی کامپوزیتی به پلی‌اورتان جدا نشده، بلکه لایه‌های الیاف شیشه از یکدیگر جدا شده‌اند. می‌توان از این اتفاق اینطور نتیجه گرفت که:

۱. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده، نتیجه‌ی قدرت چسبندگی الیاف شیشه به‌وسیله‌ی چسب اپوکسی باشد که شاید به‌توان از این نوع آزمون برای بررسی قدرت چسبندگی الیاف استفاده کرد.

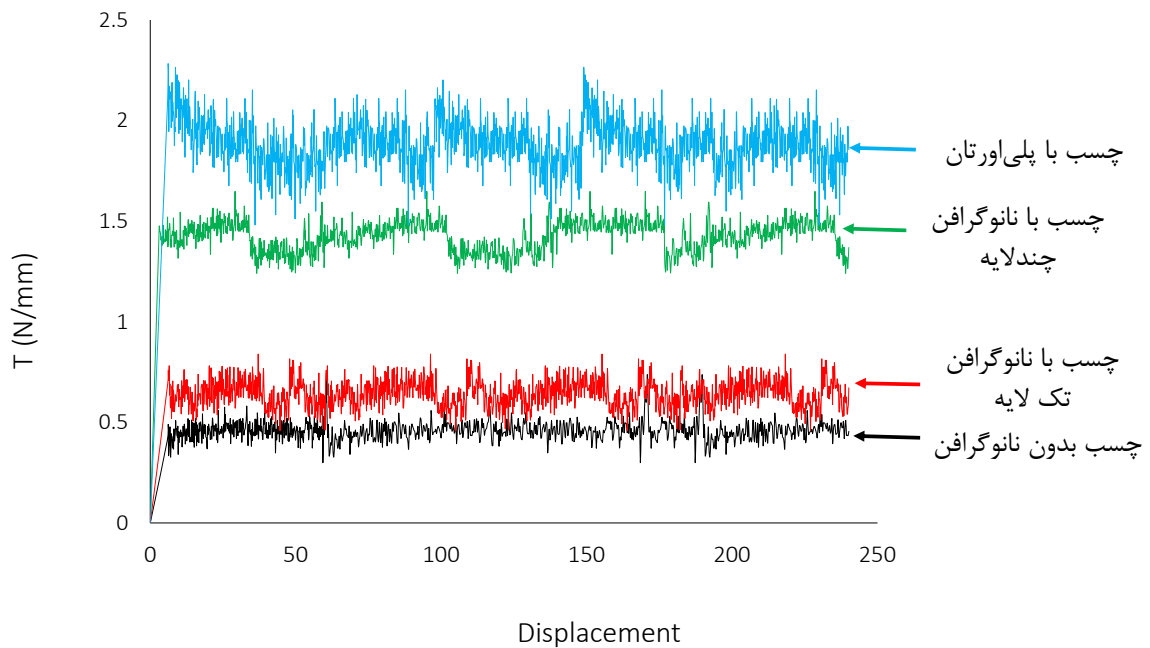
۲. نشان‌دهنده‌ی قدرت بالای اتصال هسته‌ی کامپوزیتی به پلی‌اورتان است و قدرت این اتصال بیشتر از نتیجه‌ی به‌دست‌آمده، است.

درصد تغییرات نتایج میانگین آزمون پوست‌کنی برای نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه، نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

۴-۴- مقایسه‌ی نتایج میانگین آزمون تجربی پوست‌کنی

نمونه	T_{av} (kN)	T_{av} (%)
بدون نانوگرافن	۰/۴۵۹	۰
با نانوگرافن چندلایه	۱/۴۰۹	۲۰۶
با نانوگرافن تک‌لایه	۰/۶۴۰	۳۹/۴
با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان	۱/۸۸۲	۳۱۰

در شکل ۴-۳۶ نمودارهای به دست آمده از آزمون پوست کنی آورده شده است.



شکل ۴-۳۶- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمون تجربی پوست کنی

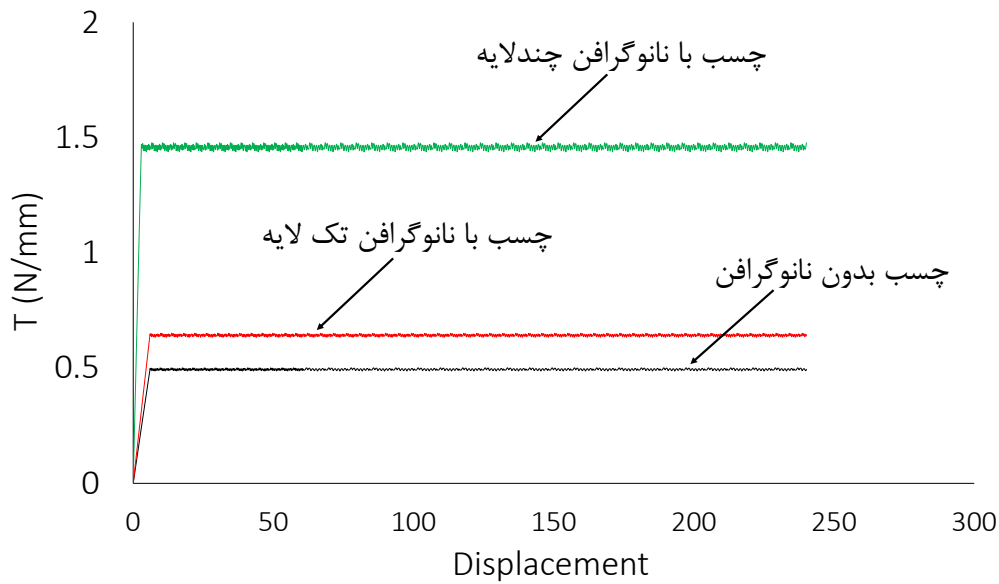
در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است که چسب بدون نانوگرافن پایین ترین و چسب با پلی اورتان بالاترین قدرت چسبندگی را دارد. با توجه به جدول ۴-۴۰ چسب با نانوگرافن چندلایه نسبت به چسب بدون نانوگرافن، ۲۰۶٪ افزایش قدرت چسبندگی و نسبت به چسب با نانوگرافن تک لایه، ۱۲۰٪ افزایش قدرت چسبندگی داشته است. چسب با نانوگرافن تک لایه نسبت به چسب بدون نانوگرافن، ۳۹٪ افزایش چسبندگی و قدرت چسبندگی پلی اورتان نسبت به چسب بدون نانوگرافن ۳۱۰٪ و نسبت به چسب با نانوگرافن چندلایه، ۳۳/۵٪ افزایش داشته است.

۴-۵- نتایج شبیه سازی عددی

در این بخش، به ارائه نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی پرداخته شده است. با استفاده از ضرایب به دست آمده از آزمون پوست کنی در حالت های مختلف، شبیه سازی نمونه های ضربه انجام شد. در این بخش، به علت نزدیکی زیاد نتایج به یکدیگر در حالت های مشابه، از ارائه تصاویر مشابه، صرف نظر شده است.

۴-۵-۱- نتایج شبیه سازی عددی آزمون پوست کنی

نتایج حاصل شده از شبیه سازی آزمون پوست کنی در شکل ۴-۳۷ ارائه شده است. در این شبیه سازی، سعی بر این بوده است که با سعی و خطا، نتایجی به طور کامل، مشابه نتایج آزمون تجربی پوست کنی به دست آید، تا به کمک این شبیه سازی به توان ضرایب مربوط به المان چسب را به دست آورد.



شکل ۴-۳۷- نمودارهای آزمون عددی پوست‌کنی

ضرایب به‌دست‌آمده از نتایج آزمون پوست‌کنی برای المان چسب در حالت‌های چسب بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه، در جدول ۴-۴ آورده شده است.

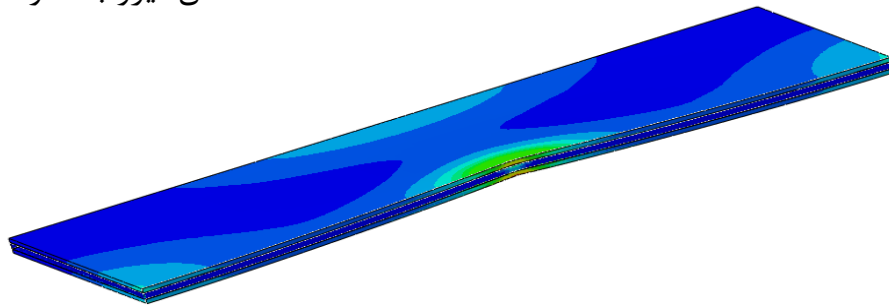
۴-۴- ضرایب به‌دست‌آمده برای المان چسب در آزمون عددی پوست‌کنی

کد	سفتی چسب در راستای عمودی، برشی و مماسی K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}	استحکام نهایی چسب در راستای عمودی و برشی ۱ و ۲	جابجایی پلاستیک
چسب بدون نانوگرافن	۰/۶	۰/۳	۲
چسب با نانوگرافن چندلایه	۰/۸۵	۰/۶	۲
چسب با نانوگرافن تک‌لایه	۰/۶۵	۰/۳۵	۲

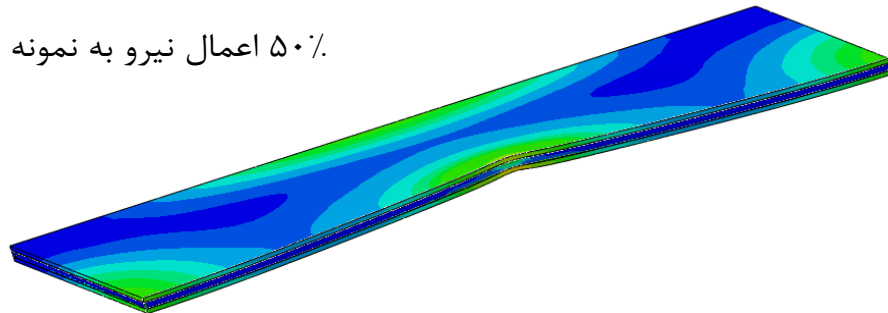
۴-۵-۲- نتایج عددی آزمون ضربه بر روی کامپوزیت الیاف-فلز بدون نانوگرافن

اصلی‌ترین پارامتر مورد بررسی در نتایج آزمون ضربه، به‌دست آوردن انرژی جذب شده و میزان عمق انحنای ایجادشده در اثر ضربه می‌باشد که در ادامه ارائه خواهد شد. شکل ۴-۳۸ مراحل تغییرشکل نمونه بر اثر ضربه‌ی سرعت پایین را نشان می‌دهد.

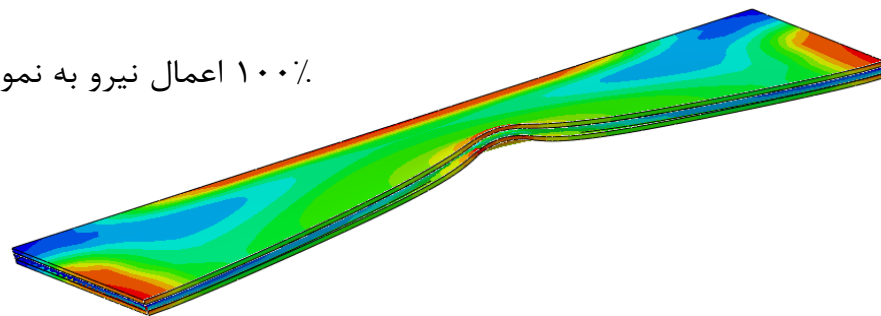
۲۰٪ اعمال نیرو به نمونه



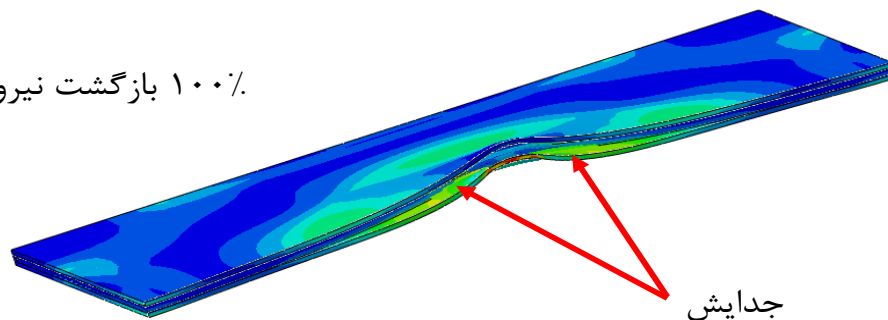
۵۰٪ اعمال نیرو به نمونه



۱۰۰٪ اعمال نیرو به نمونه



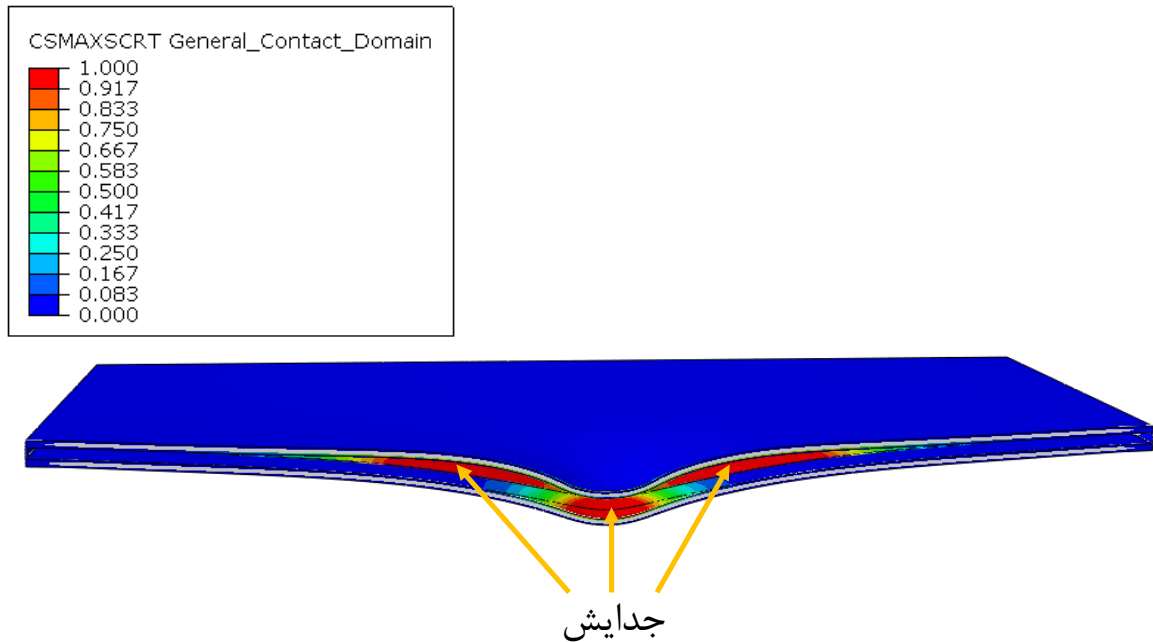
۱۰۰٪ بازگشت نیرو



شکل ۴-۳۸- مراحل اعمال ضربه‌ی سرعت پایین بر روی نمونه، از نمای جانبی و برش خورده، الف) اوایل برخورد، ب) افزایش انرژی ضربه‌زننده، ج) حداکثر میزان انرژی ضربه‌زننده، د) برگشت ضربه‌زننده و مقداری بازگشت کشسان ورق

در شکل ۴-۳۸ ابتدا نمونه تحت اثر ضربه تغییر شکل می‌دهد و با رسیدن انرژی ضربه‌زننده به بیشترین مقدار خود، تغییر شکل بیشتر شده و سپس با کاهش انرژی و برگشت ضربه‌زننده، نمونه کمی تغییر شکل الاستیکی دارد که این تغییر شکل الاستیکی، باعث نمایان شدن پدیده‌ی جدایش بین ورق فلزی و هسته‌ی کامپوزیتی

می‌شود که در ادامه، ارائه خواهد شد. در شکل ۴-۳۹ محل جدایش ورق آلومینیوم از هسته‌ی کامپوزیتی نشان داده شده است.



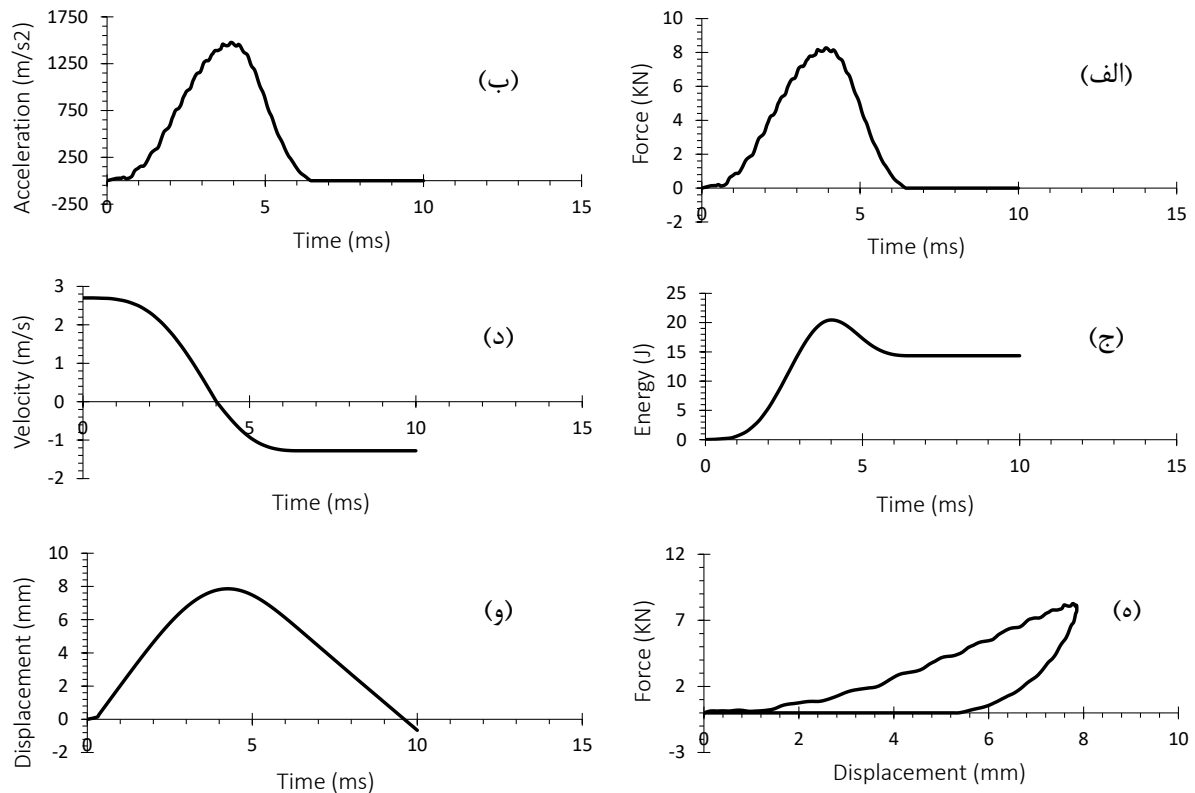
شکل ۴-۳۹- جدایش بین ورق آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی در اثر ضربه

• نتایج عددی نمونه‌های کامپوزیت الیاف-فلز تحت انرژی ۲۵ ژول

در جدول ۴-۴۲ میزان انرژی جذب شده و در شکل ۴-۴۰ نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابجایی-زمان، در ورق کامپوزیت الیاف-فلز بدون نانوگرافن در اثر برخورد ضربه‌ای با انرژی ۲۵ J ارائه شده است.

۴-۴۲- نتایج انرژی جذب شده در آزمون عددی نمونه‌ی بدون نانوگرافن تحت انرژی ۲۵ J

کد	W_a (J)
بدون نانوگرافن	۱۶/۳۵
با نانوگرافن چندلایه	۱۶/۷۶
با نانوگرافن تک‌لایه	۱۶/۵۴



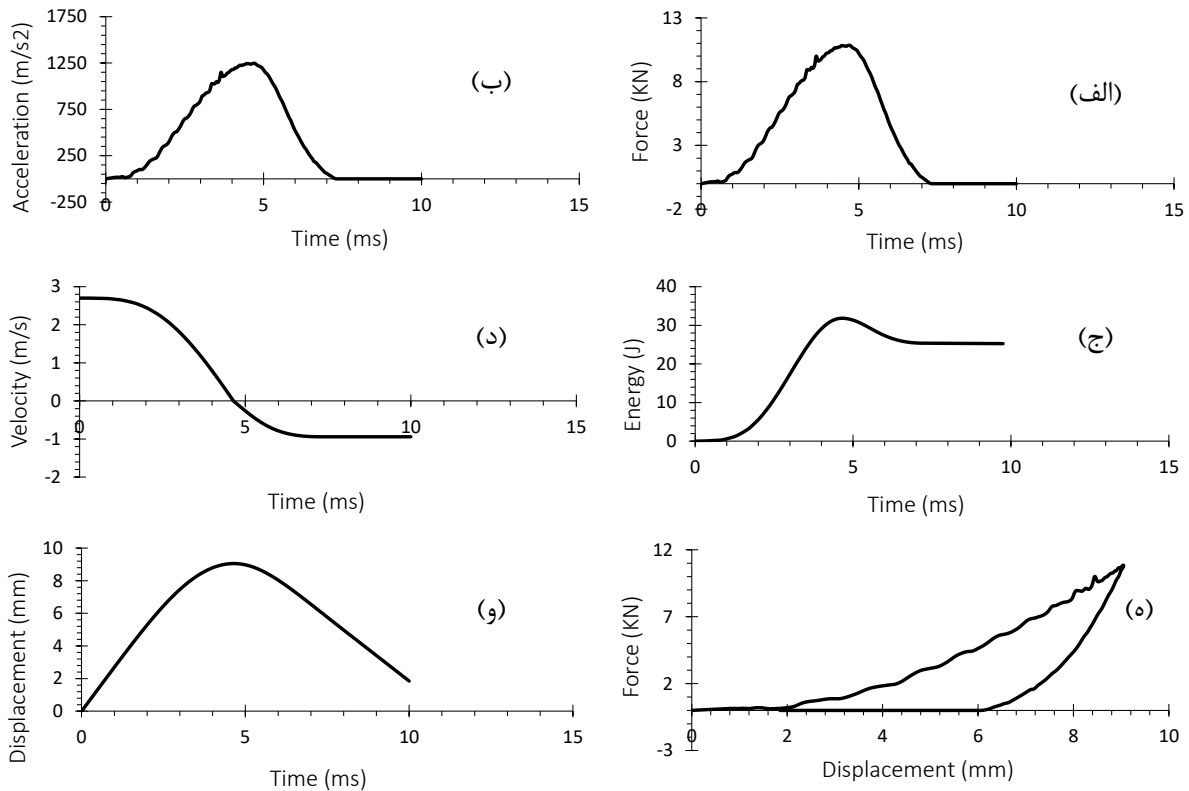
شکل ۴-۴- نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN25) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی J ۲۵، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

• نتایج عددی نمونه‌های کامپوزیت الیاف-فلز تحت انرژی J ۴۰

در جدول ۴-۴ میزان انرژی جذب‌شده و در شکل ۴-۴۱ نمودارهای نیرو-زمان، شتاب-زمان، انرژی-زمان، سرعت-زمان، نیرو-جابجایی و جابه‌جایی-زمان، در ورق کامپوزیت الیاف-فلز بدون نانوگرافن در اثر برخورد ضربه‌ای با انرژی J ۴۰، ارائه شده‌است.

۴-۴۳- نتایج انرژی جذب‌شده در آزمون عددی نمونه‌ی بدون نانوگرافن تحت انرژی J ۴۰

W_a (J)	کد
۲۸/۰۷	بدون نانوگرافن
۲۸/۳۳	با نانوگرافن چندلایه
۲۸/۱۵	با نانوگرافن تک‌لایه



شکل ۴-۴۱-نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN40) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی J ۴۰، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیرو-جابجایی و (و) جابجایی-زمان

۴-۵-۳- بررسی میزان فرورفتگی و نحوه‌ی تغییرشکل در آزمون عددی

برای بررسی نحوه‌ی تغییر شکل ورق‌های FML، با استفاده از دستور Path، نقاط مسیری در جهت محور x، از مرکز نمونه، که بیشترین انحنای ایجادشده در اثر ضربه را دارا بود، طی شد.

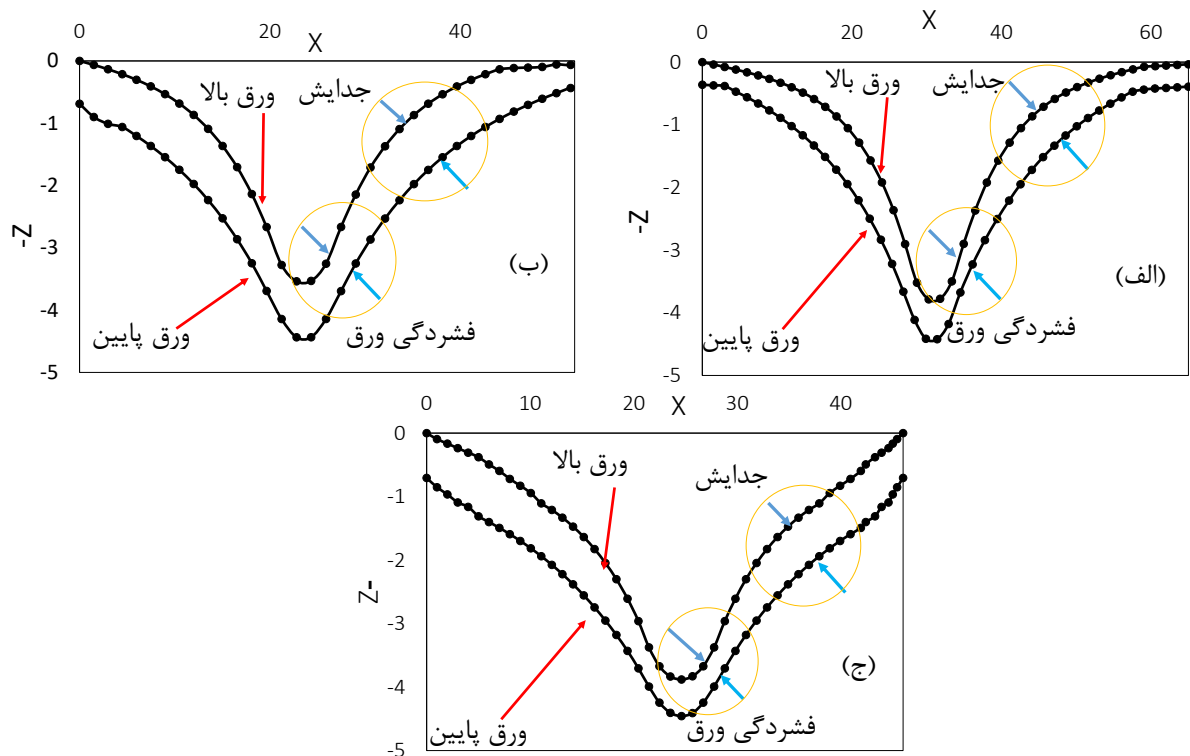
• بررسی میزان بیشترین انحنای ایجادشده و نحوه‌ی تغییرشکل در انرژی ضربه‌ی J ۲۵

در جدول ۴-۴۴ میزان بیشترین انحنای ایجادشده در نمونه‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه، در انرژی J ۲۵، ارائه شده است.

۴-۴۴- نتایج و مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون عددی با انرژی J ۲۵

نوع نمونه	بیشترین عمق صفحه‌ی بالایی (mm)	درصد تغییرات صفحه‌ی بالا (%)	بیشترین عمق صفحه‌ی پایینی (mm)	درصد تغییرات صفحه‌ی پایینی (%)
نمونه‌ی بدون نانو	-۳/۷۸	۰	-۴/۴۲	۰
با نانوگرافن چندلایه	-۳/۶۳	۳/۹	-۴/۳۹	۰/۶
با نانوگرافن تک‌لایه	-۳/۷۷	۰/۲	-۴/۴۰	۰/۴

با توجه به جدول ۴-۴۴ نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه کم‌ترین و نمونه‌ی بدون نانو بیشترین، عمق فرورفتگی را دارا می‌باشند. در شکل ۴-۴۲ نحوه‌ی تغییر شکل نمونه‌ها در اثر ضربه، نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۲- نمودارهای مسیر انحنای ایجاد شده در آزمون عددی ضربه با انرژی J ۲۵، (الف) نمونه‌ی بدون نانوگرافن، (ب) نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه و (ج) نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه در شکل ۴-۴۲، محل‌های جدایش ورق فلزی از هسته‌ی کامپوزیتی و فشرده‌گی FML نشان داده شده است. فشرده‌گی می‌تواند در اثر له‌شدگی آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی (ماتریس) در اثر ضربه باشد.

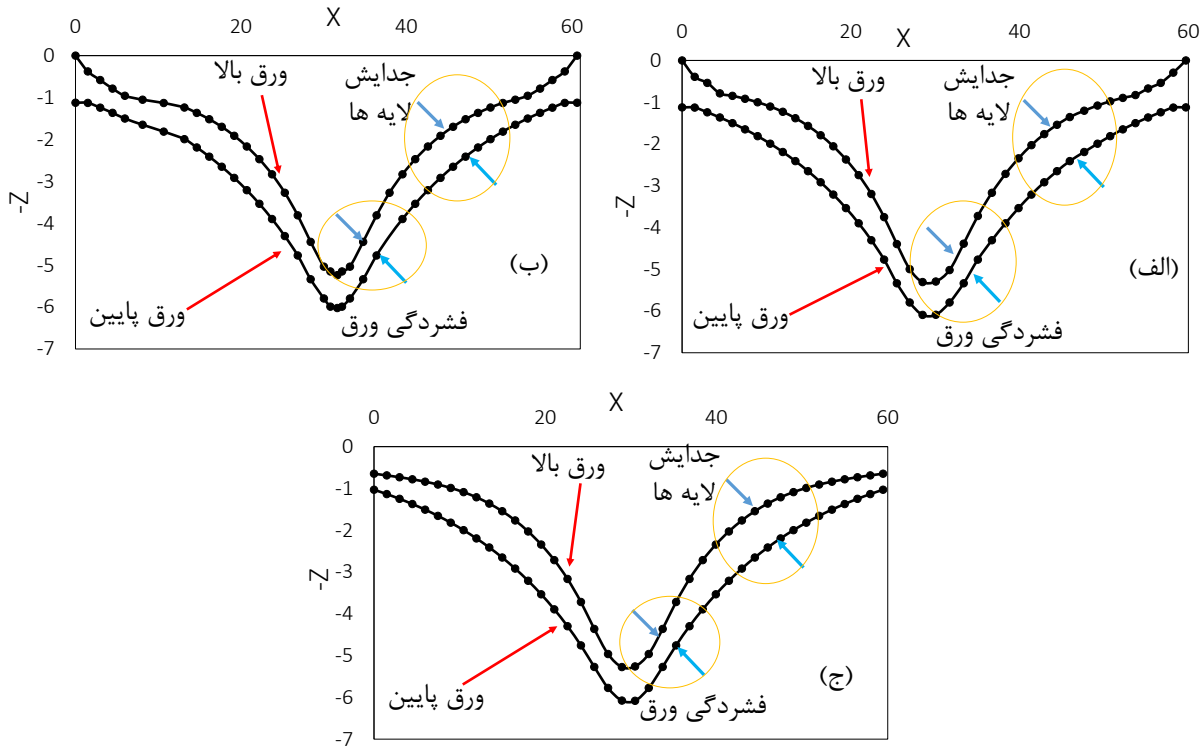
• بررسی میزان بیشترین انحنای ایجاد شده و نحوه‌ی تغییر شکل در انرژی ضربه‌ی J ۴۰

در جدول ۴-۴۵ میزان بیشترین انحنای ایجاد شده در نمونه‌های بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه، در انرژی J ۴۰، ارائه شده است.

۴-۴۵- نتایج و مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجاد شده در آزمون عددی با انرژی J ۴۰

نوع نمونه	بیشترین عمق صفحه‌ی بالایی (mm)	درصد تغییرات صفحه‌ی بالا (%)	بیشترین عمق صفحه‌ی پایینی (mm)	درصد تغییرات صفحه‌ی پایینی (%)
نمونه‌ی بدون نانو	-۵/۳۰	۰	-۶/۱۹	۰
با نانوگرافن چندلایه	-۵/۲۳	۱/۳	-۶/۰۲	۲/۷
با نانوگرافن تک‌لایه	-۵/۲۷	۰/۵	-۶/۰۸	۱/۷

با توجه به جدول ۴-۴۵ نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه کم‌ترین و نمونه‌ی بدون نانو بیشترین، عمق فرورفتگی را دارا می‌باشند. در شکل ۴-۴۳ نحوه‌ی تغییر شکل نمونه‌ها در اثر ضربه، نشان داده شده است.

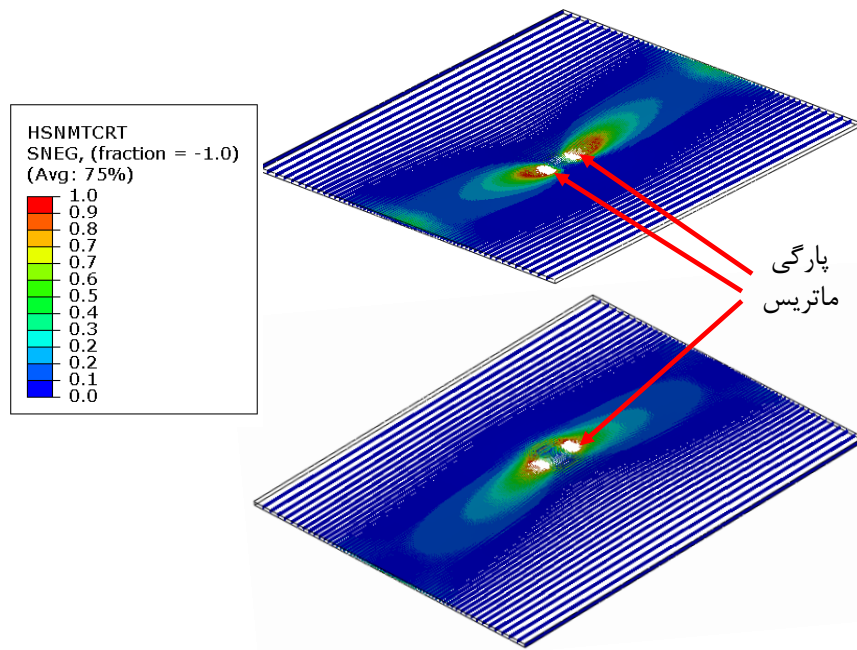


شکل ۴-۴۳- نمودارهای مسیر انحنای ایجاد شده در آزمون عددی ضربه با انرژی J ۴۰، (الف) نمونه‌ی بدون نانوگرافن، (ب) نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه و (ج) نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه

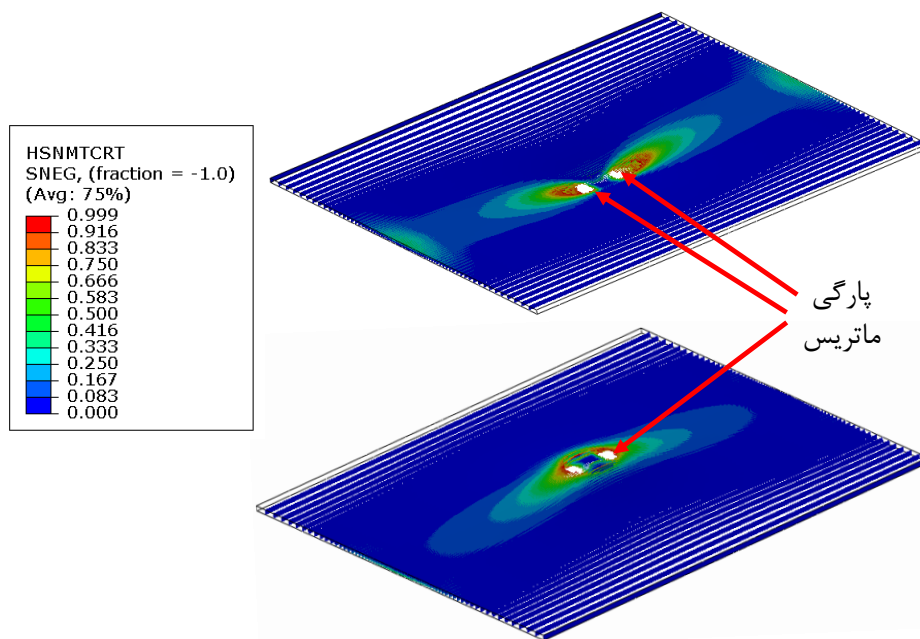
در شکل ۴-۴۳ محل‌های جدایش ورق فلزی از هسته‌ی کامپوزیتی و فشردگی FML نشان داده شده است. فشردگی می‌تواند در اثر له‌شدگی آلومینیوم و هسته‌ی کامپوزیتی (ماتریس) در اثر ضربه، باشد.

۴-۵-۴- بررسی خرابی در هسته‌ی کامپوزیتی با معیار خرابی هاشین

خرابی در هسته‌ی کامپوزیتی (شیشه-اپوکسی)، با معیار خرابی هاشین مدل‌سازی شده است. در معیار خرابی هاشین برای کامپوزیت، چهار حالت خرابی الیاف در کشش، خرابی الیاف در فشار، خرابی ماتریس در کشش و خرابی ماتریس در فشار بررسی شد که فقط در حالت خرابی ماتریس در کشش، پارگی در کامپوزیت رخ داده است. خرابی ماتریس در کشش برای حالت بدون نانوگرافن در اثر انرژی J ۴۰ در شکل ۴-۴۴، و خرابی ماتریس در کشش برای حالت با نانوگرافن چندلایه در اثر انرژی J ۴۰ در شکل ۴-۴۵، نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴۴- گسیختگی ماتریس در نمونه‌ی بدون نانوگرافن در انرژی J ۴۰

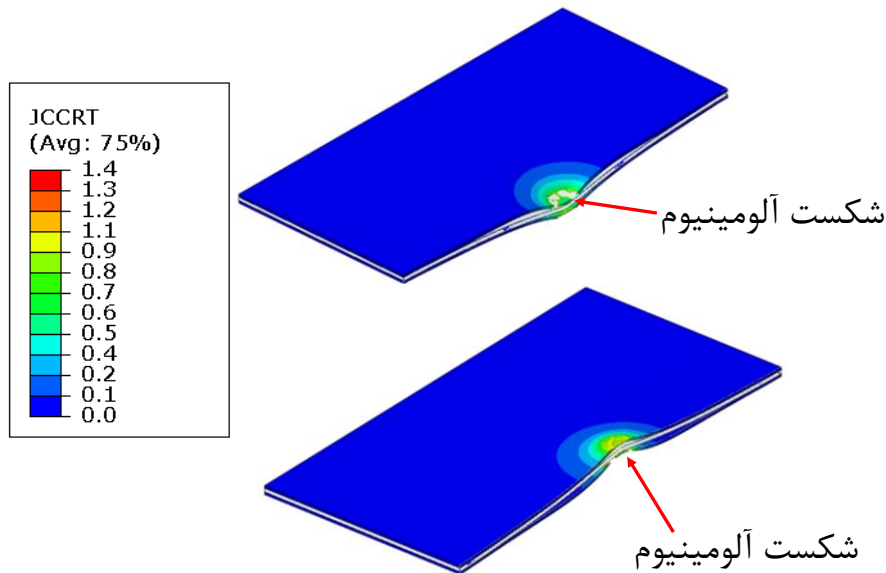


شکل ۴-۴۵- گسیختگی ماتریس در نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه در انرژی J ۴۰

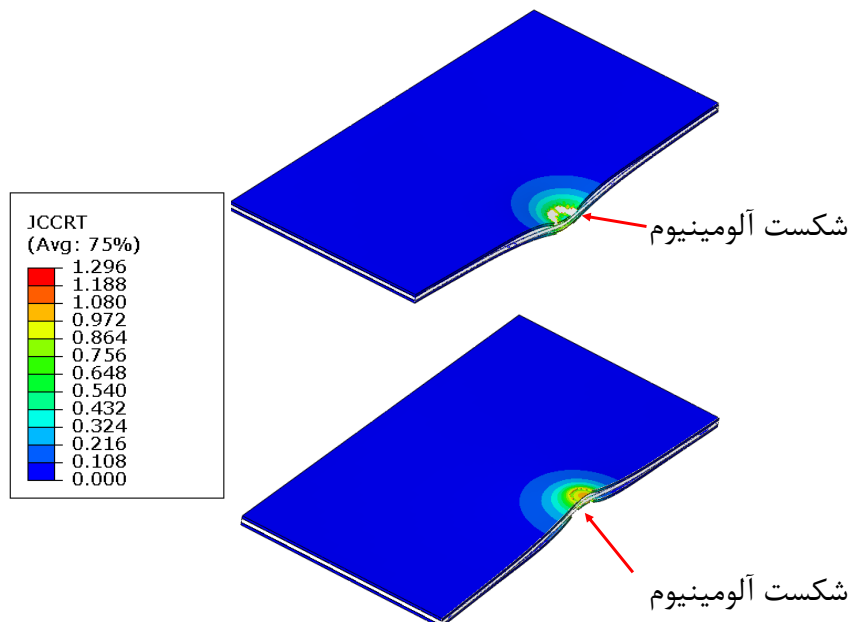
در شکل ۴۴-۴ و شکل ۴۵-۴ در نواحی سفید رنگ مشخص شده با علامت پیکان، پارگی در ماتریس رخ داده است.

۴-۵-۵- بررسی خرابی در ورق آلومینیوم با معیار خرابی جانسون کوک

معیار خرابی جانسون کوک برای بررسی خرابی در ورق آلومینیوم، در انرژی ضربه‌ی 40 J ، استفاده شده است. در شکل ۴-۴۶ خرابی ورق آلومینیوم در حالت بدون نانوگرافن و انرژی 40 J و در شکل ۴-۴۷ خرابی ورق آلومینیوم در حالت با نانوگرافن چندلایه و انرژی 40 J ، نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۶- خرابی آلومینیوم در نمونه‌ی بدون نانوگرافن در انرژی 40 J



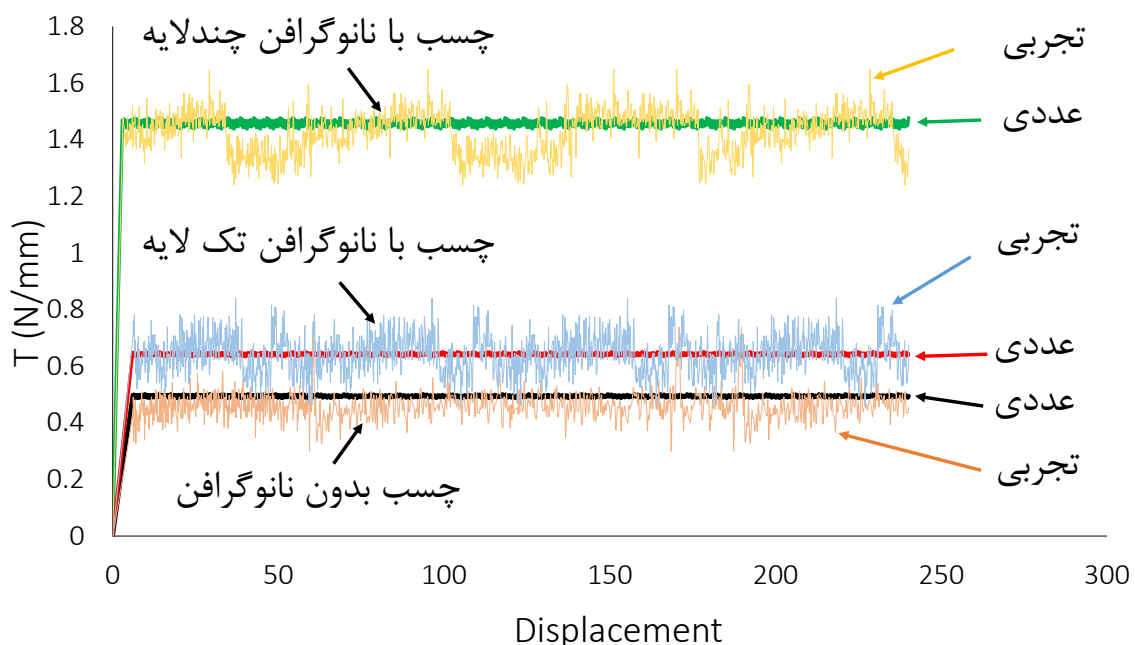
شکل ۴-۴۷- خرابی آلومینیوم در نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه در انرژی 40 J

در شکل ۴-۴۶ و شکل ۴-۴۷ در مناطق مشخص شده با پیکان، شکست در ورق آلومینیوم رخ داده است ولی در سطح پشتی نمونه، خرابی کمتری مشاهده شد.

۴-۶-۱- مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج تجربی

۴-۶-۱-۱- مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی در آزمون پوست‌کنی

در شکل ۴-۴۸ نمودار نیرو (نیرو بر واحد عرض نمونه)-جابجایی در حالت‌های چسب بدون نانوگرافن، چسب با نانوگرافن چندلایه و چسب با نانوگرافن تک‌لایه برای دو نوع آزمون تجربی و عددی پوست‌کنی ارائه شده است.



شکل ۴-۴۸- مقایسه‌ی نمودارهای آزمون پوست‌کنی در روش‌های تجربی و عددی

با توجه به شکل ۴-۴۸ نزدیکی نتایج تجربی و عددی در آزمون پوست‌کنی برای به‌دست‌آوردن ضرایب المان چسب، مشهود است.

۴-۶-۲- مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی در آزمون ضربه

در مقایسه‌ی نتایج عددی آزمون ضربه، انرژی جذب‌شده و میزان انحنای ایجاد شده در آزمون‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی میزان انحنای ایجاد شده ملاک، انحنا در سطح اصلی برخورد است.

- مقایسه‌ی نتایج عددی آزمون ضربه در انرژی ضربه‌ی ۲۵ ژول، در جدول ۴-۴۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۴۶- مقایسه‌ی نتایج آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۲۵

درصد خطا	انرژی جذب‌شده‌ی آزمون تجربی ضربه	انرژی جذب‌شده‌ی آزمون عددی ضربه	نوع نمونه
۳/۱٪	۱۶/۸۶۲	۱۶/۳۵	نمونه‌ی بدون نانو
۷/۴٪	۱۸/۰۱۵	۱۶/۷۶	نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه
۱/۷٪	۱۶/۸۳۶	۱۶/۵۴	نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه

بررسی نتایج جدول ۴-۴۶ درصد خطای نتایج تجربی و عددی در انرژی جذب شده‌ی ضربه‌ی با انرژی J ۲۵، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۳/۱٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۷/۴٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۱/۷٪ است.

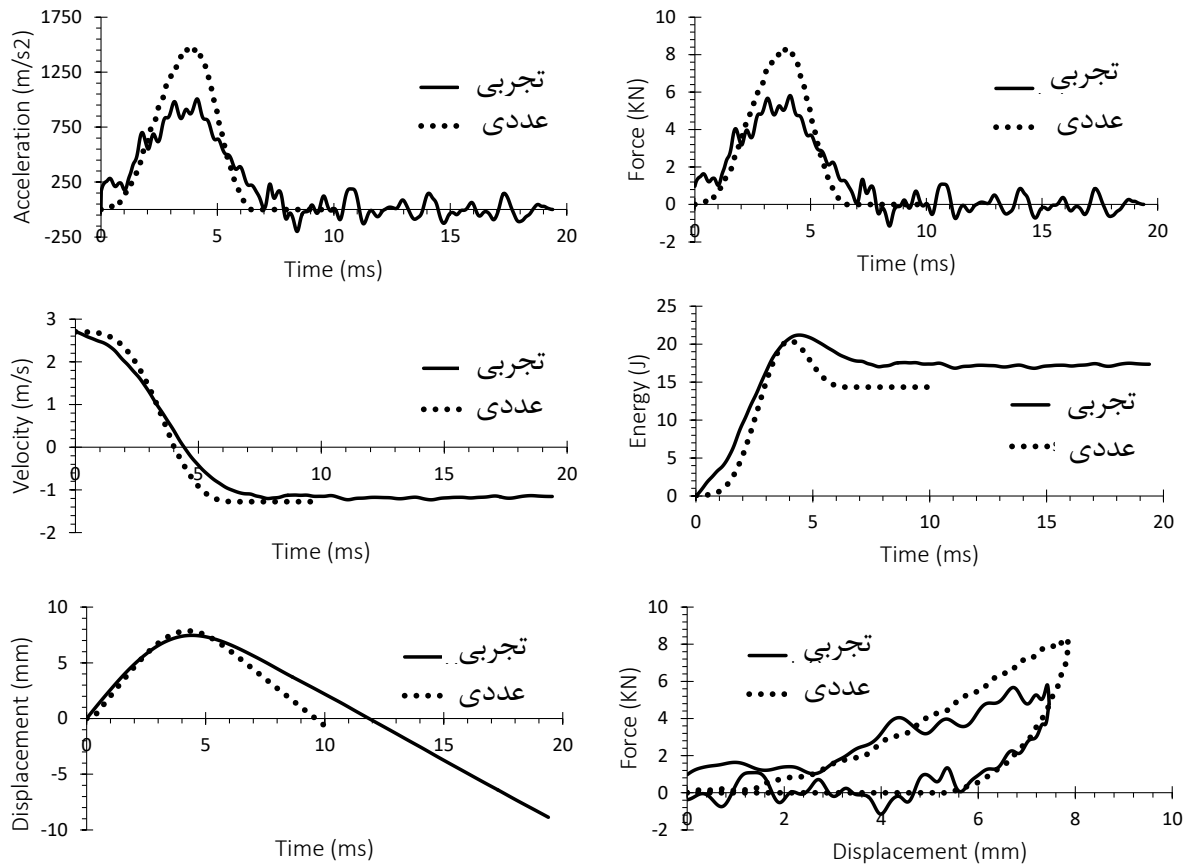
در جدول ۴-۴۷ میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه در آزمون‌های عددی و تجربی و درصد خطای آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۴-۴۷- مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون تجربی و عددی ضربه، با انرژی J ۲۵

نوع نمونه	بیشترین عمق تجربی (mm)	بیشترین عمق عددی (mm)	درصد خطا
نمونه‌ی بدون نانو	-۳/۳۶	-۳/۷۸	۱۲/۵٪
نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه	-۳	-۳/۶۳	۲۱٪
نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه	-۲/۸۶	-۳/۷۷	۳۱٪

با توجه به جدول ۴-۴۷ درصد خطای نتایج تجربی و عددی در میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه‌ی با انرژی J ۲۵، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۲/۵٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۲۱٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۳۱٪ است.

با توجه به جدول ۴-۴۷ نمونه‌ی بدون نانو دارای کم‌ترین خطا است. در شکل ۴-۴۹ مقایسه‌ی نمودارهای نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۲۵، ارائه شده است.



شکل ۴-۴۹- مقایسه‌ی نمودارهای نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه در انرژی J ۲۵، الف) نیرو-زمان، ب) شتاب-زمان، ج) انرژی-زمان، د) سرعت-زمان، ه) نیروجابجایی و و) جابجایی-زمان مقایسه‌ی نتایج عددی آزمون ضربه در انرژی ضربه‌ی J ۴۰، در جدول ۴-۴۸ ارائه شده است.

جدول ۴-۴۸- مقایسه‌ی نتایج آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۴۰

درصد خطا	انرژی جذب شده آزمون تجربی ضربه	انرژی جذب شده آزمون عددی ضربه	نوع نمونه
۷/۱٪	۳۰/۰۷۱	۲۸/۰۷	نمونه‌ی بدون نانو
۱۳/۷٪	۳۲/۲۲۰	۲۸/۳۳	نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه
۱۸٪	۳۳/۳۱۶	۲۸/۱۵	نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه

با توجه به جدول ۴-۴۸ درصد خطای نتایج تجربی و عددی در انرژی جذب شده‌ی ضربه‌ی با انرژی J ۴۰، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۷/۱٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۱۳/۷٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۱۸٪ است.

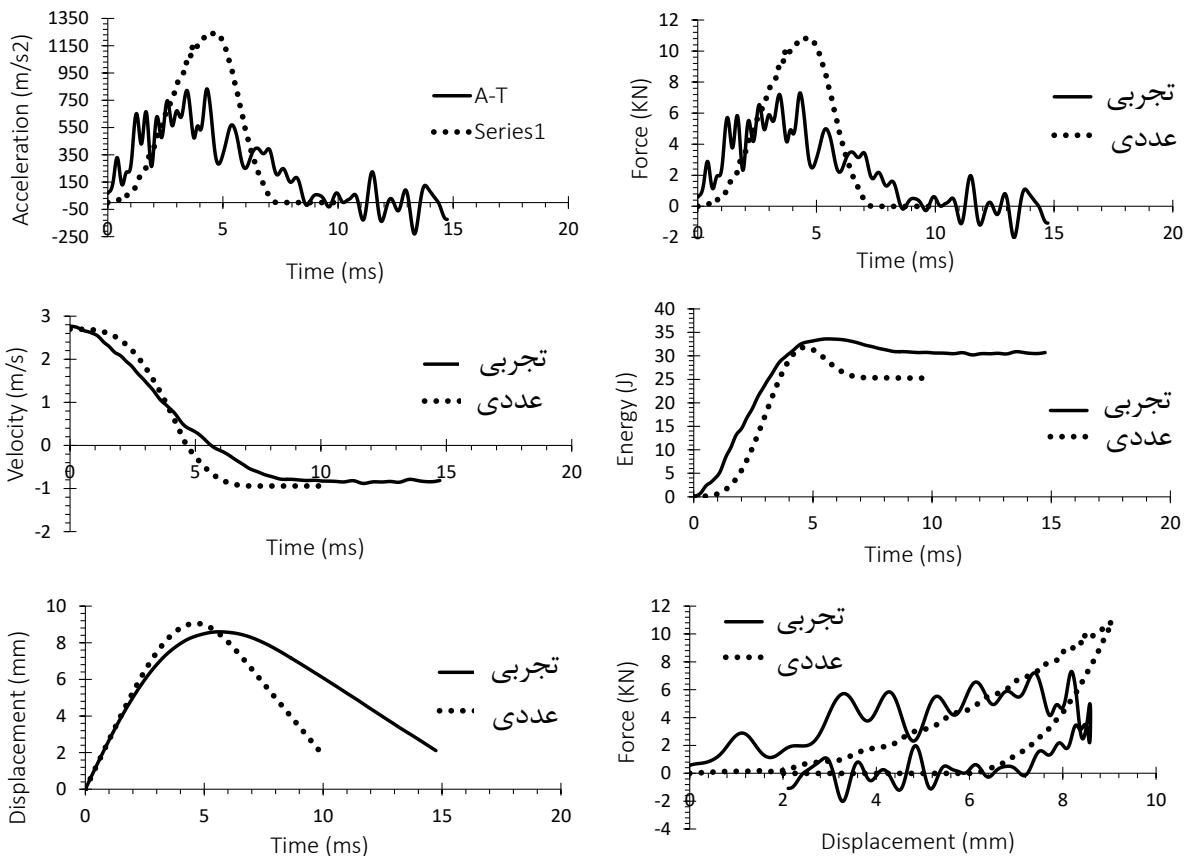
در جدول ۴-۴۹ میزان انحنای ایجاد شده در اثر ضربه در آزمون‌های عددی و تجربی و درصد خطای آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۴-۴۹- مقایسه‌ی نتایج میزان انحنای ایجادشده در آزمون تجربی و عددی ضربه، با انرژی J ۴۰

نوع نمونه	بیشترین عمق تجربی (mm)	بیشترین عمق عددی (mm)	درصد خطا
نمونه‌ی بدون نانو	-۵/۶۷	-۵/۳۰	۶/۹٪
نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه	-۴/۲۸	-۵/۲۳	۲۲٪
نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه	-۴/۳۵	-۵/۲۷	۲۱٪

با توجه به جدول ۴-۴۹ درصد خطای نتایج تجربی و عددی در میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه‌ی با انرژی J ۴۰، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۶/۹٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۲۲٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۲۱٪ است.

در شکل ۴-۵۰ مقایسه‌ی نمودارهای نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه با انرژی J ۴۰، ارائه شده است.



شکل ۴-۵۰-مقایسه‌ی نمودارهای نمونه‌های بدون نانوگرافن آزمون تجربی و عددی ضربه در انرژی J ۴۰، (الف) نیرو-زمان، (ب) شتاب-زمان، (ج) انرژی-زمان، (د) سرعت-زمان، (ه) نیروجابجایی و (و) جابجایی-زمان

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی تاثیر نانوذرات گرافن بر استحکام ورق‌های FML تحت ضربه‌ی سرعت پایین و بدست آوردن درصدوزنی بهینه‌ی نانوذرات گرافن پرداخته شد. در روش تجربی برای ساخت FML از ورق نازک آلومینیومی AA2024-T3 به ضخامت ۰/۶۶mm شرکت آکوا، از رزین اپوکسی CR122 شرکت آکسون فرانسه، الیاف شیشه‌ی بافته‌شده‌ی دوجهته 100 gr/m^2 آلمانی از نوع E-glass و چهار نوع نانوغرافن که شامل اکسید نانوغرافن‌های چندلایه‌ی نوع صنعتی، نوع تحقیقاتی، نانوغرافن چندلایه‌ی عامل‌دار شده با عامل NH_2 و اکسید نانوغرافن تک‌لایه استفاده شد. از بین چهار نوع نانوغرافن ذکر شده، با انجام آزمون کشش رزین، نانوغرافن بهینه انتخاب و سپس درصد وزنی بهینه انتخاب شد. نمونه‌های آزمون کشش کامپوزیت با و بدون نانوغرافن به روش محافظه‌ی خلاء ساخته شد. نمونه‌های FML برای آزمون ضربه و کشش با و بدون نانوغرافن تک‌لایه و چندلایه به روش لایه‌چینی دستی ساخته شد. برای به‌دست‌آوردن خواص چسبندگی ورق آلومینیوم به هسته‌ی کامپوزیتی جهت شبیه‌سازی المان چسب در نرم‌افزار آباکوس و مقایسه‌ی اثر نانوذرات گرافن بر چسبندگی، برای نمونه‌های با و بدون نانوغرافن تک‌لایه و چندلایه آزمون پوست‌کنی انجام شد. نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های ذکر شده به شرح زیر است.

۱- نانوغرافن آمین‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون نانوغرافن، در استحکام تسلیم $56/6\%$ ، ازدیاد طول $88/8\%$ ، انرژی شکست 218% درصد افزایش و مدول کشسان $15/3\%$ کاهش داشته است. اکسید نانوغرافن چندلایه‌ی نوع صنعتی نسبت به نمونه‌ی بدون نانوغرافن، در استحکام تسلیم $54/6\%$ ، ازدیاد طول $78/3\%$ ، انرژی شکست 213% درصد افزایش و مدول کشسان $13/2\%$ کاهش داشته است. نمونه‌ی با اکسید نانوغرافن تک‌لایه نسبت به اکسید نانوغرافن‌های چندلایه در پارامترهای استحکام تسلیم، ازدیاد طول و انرژی شکست اثر مثبت کم‌تری

داشت ولی در مدول کشسان برخلاف اکسید نانوگرافن‌های چندلایه که کاهش داشته‌اند، ۴/۸٪ افزایش داشته است. نتایج نشان داد، از میان نانوگرافن‌های مختلف، نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH_2 بیشترین اثر مثبت و اکسید نانوگرافن نوع تحقیقاتی و اکسید نانوگرافن تک‌لایه، کم‌ترین اثر مثبت داشته است. در این پایان‌نامه، به‌علت قیمت بالای گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH_2 نسبت به اکسید نانوگرافن نوع صنعتی (چهار برابر گران‌تر) و اختلاف کم آنها در تاثیر بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی، اکسید نانوگرافن نوع صنعتی به‌عنوان نانوگرافن بهینه انتخاب شد.

۲- خواص مکانیکی در نانوذرات گرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH_2 ، با زمان توزیع ۵۰ دقیقه، نتیجه‌ی بهتری نسبت به زمان توزیع ۳۰ دقیقه‌ای داشت. نمونه‌ی ساخته‌شده با زمان توزیع ۵۰ دقیقه، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با زمان توزیع ۳۰ دقیقه، در استحکام تسلیم ۲۱/۸۳٪، ازدیاد طول ۱۴/۵٪، مدول کشسان ۴/۵٪ و انرژی شکست ۵۲/۳٪ افزایش داشته است.

۳- نمونه‌های آزمون کشش رزین در دامنه‌ی ارتعاش $72 \mu\text{m}$ ، خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های آزمون کشش رزین در دامنه‌ی ارتعاش $96 \mu\text{m}$ داشته‌اند، که ممکن است در دامنه‌های بالا ($72 \mu\text{m}$) به‌علت افزایش دمای رزین، خواص رزین تغییر کند که در این پژوهش، برای اطمینان، ظرف حاوی رزین، داخل محلول آب و یخ قرار گرفت. نمونه‌ی ساخته‌شده در دامنه‌ی ارتعاش $72 \mu\text{m}$ ، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده در دامنه‌ی ارتعاش $96 \mu\text{m}$ ، در استحکام تسلیم ۸٪، ازدیاد طول ۹/۳٪ و انرژی شکست ۵۲/۳٪ افزایش، و در مدول کشسان ۱٪ درصد کاهش داشته‌است. در نتیجه، نمونه‌ی رزین ساخته شده به‌وسیله‌ی نانوگرافن چندلایه‌ی عامل‌دار NH_2 با دامنه‌ی ارتعاش $72 \mu\text{m}$ ، نتیجه‌ی مطلوبی داشت.

۴- افزودن ۰/۵٪ وزنی نانوذرات گرافن به رزین اپوکسی، به‌عنوان درصد بهینه انتخاب شد. با اضافه کردن ۰/۵٪ وزنی نانوذرات گرافن به رزین اپوکسی، استحکام تسلیم ۵۴/۱٪، ازدیاد طول ۸۵٪ و انرژی شکست ۲۰۸٪ افزایش، و در مدول کشسان ۱۳/۱٪ کاهش داشته است. با افزودن ۱٪ وزنی نانوگرافن به رزین اپوکسی، استحکام تسلیم ۳۶/۲٪، ازدیاد طول ۲۴/۶٪ و انرژی شکست ۶۶٪ و در مدول کشسان ۹/۲٪ افزایش داشته است. در همه‌ی درصدهای وزنی نانوگرافن برای مدول کشسان کاهش وجود داشت ولی در ۱٪ وزنی ۹/۲٪ افزایش دیده شد که می‌تواند حائز اهمیت باشد.

۵- هسته‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی ساخته‌ی شده با اکسید نانوگرافن چندلایه نسبت به هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن در پارامترهای استحکام تسلیم، انرژی جذب‌شده و مدول الاستیسیته به ترتیب ۹٪، ۶/۶٪، ۸/۲٪ افزایش و در ازدیاد طول ۰/۳٪ کاهش داشته است. هم‌چنین هسته‌ی کامپوزیتی ساخته‌شده با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به هسته‌ی کامپوزیتی بدون نانوگرافن در پارامترهای استحکام تسلیم، ازدیاد طول و انرژی جذب شده به ترتیب ۱۴/۸٪، ۱۹/۵٪، ۲۶/۹٪ کاهش و در مدول کشسان ۳/۹٪ افزایش داشته است.

۶- نمونه‌ی آزمون کشش FML با نانوگرافن چندلایه، نسبت به نمونه‌ی FML بدون نانوگرافن، در نیروی شکست اول ۲/۳٪ افزایش ولی در نیروی شکست دوم، ۸/۲٪ کاهش داشته است.

۷- در آزمون استاتیکی ورق FML، نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه برای تخریب شدن به ۹/۶٪ نیرو و ۹/۵٪ انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، نیاز داشت.

۸- بیشترین انرژی جذب‌شده در اثر انرژی ضربه‌ی J ۲۵، در نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان مشاهده شد و کم‌ترین انرژی جذب‌شده مربوط به نمونه‌ی بدون نانو و با نانوگرافن تک‌لایه بوده است. انرژی جذب‌شده‌ی نمونه‌ی نانوگرافن چندلایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ۶/۷٪ افزایش داشته است. نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ۰/۲٪ کاهش انرژی جذب‌شده داشته است. نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان نسبت به نمونه‌ی بدون نانو، دارای ۱۶٪ افزایش انرژی جذب‌شده بوده است. همچنین برای پارامتر نیروی بیشینه، نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه، با نانوگرافن تک‌لایه و نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان، به ترتیب، ۲/۸٪، ۸/۹٪ و ۲۵/۶٪ کاهش نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن کاهش داشته است.

۹- بیشترین انرژی جذب‌شده در اثر انرژی ضربه‌ی J ۴۰، در نمونه‌ی با اکسید نانوگرافن تک‌لایه، مشاهده شد و کم‌ترین انرژی جذب‌شده مربوط به نمونه‌ی بدون نانو و با پلی‌اورتان بوده است. نمونه‌ی با اکسید نانوگرافن چندلایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، ۰/۷٪ افزایش انرژی جذب‌شده و نمونه‌ی با اکسید نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۰٪ افزایش جذب انرژی داشته است. نمونه‌ی با پلی‌اورتان نسبت به نمونه‌ی بدون نانو، دارای ۱/۲٪ کاهش جذب انرژی بوده است. همچنین برای پارامتر نیروی بیشینه، نمونه‌ی با اکسید نانوگرافن چندلایه و نمونه‌ی با پلی‌اورتان، به ترتیب، ۳/۹٪ و ۵/۵٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن، و نمونه‌ی با اکسید نانوگرافن تک‌لایه نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۷٪ کاهش داشته است.

۱۰- در انرژی J ۴۰ رفتار نمونه‌ی با لایه‌ی چسب پلی‌اورتان در جذب انرژی با شکل ظاهری نمونه پس از ضربه به طور کامل عکس هم بودند، به طوری که جذب انرژی خیلی پایین ولی شکل ظاهری و انحنا ایجاد شده‌ی بسیار خوبی داشتند. پایین بودن انرژی جذب شده در انرژی ضربه‌ی J ۴۰ و در عین حال، سالم بودن نمونه، به علت خاصیت الاستیکی لایه‌ی پلی‌اورتان است که در هنگام ضربه، اجازه‌ی حرکت به لایه‌ی آلومینیومی که در سطح برخورد قرار داشته، داده ولی انرژی کم‌تری را به هسته‌ی کامپوزیتی منتقل کرده است.

۱۱- نمونه‌ی ضربه‌ی ساخته شده با نانوذرات گرافن تک‌لایه مقاومت خوبی در برابر ضربه از خود نشان داد، در حالی که در آزمون کشش رزین به‌جز پارامتر مدول کشسان که دارای ۴/۸٪ افزایش بود، در دیگر پارامترها نتایج ضعیف‌تری نسبت به نمونه‌ی ضربه‌ی ساخته‌شده با نانوگرافن چندلایه داشت و در آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی به‌جز پارامتر مدول کشسان که دارای ۳/۹٪ افزایش بود، در دیگر پارامترها نتایج ضعیف‌تری نسبت به نمونه‌ی ضربه‌ی ساخته‌شده بدون نانوگرافن دارا بود. می‌توان احتمال داد که افزایش مدول کشسان تاثیر بیشتری بر مقاومت به‌ضربه‌ی نمونه دارد.

۱۲- بیشترین میزان انحنا ایجاد شده در اثر ضربه با انرژی J ۲۵، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد و کم‌ترین انحنا مربوط به نمونه‌ی با پلی‌اورتان و نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه است. در صفحه‌ی برخورد (صفحه‌ی بالایی)، نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و پلی‌اورتان، به ترتیب، ۱۰/۷٪، ۱۴/۸٪، ۱۶/۶٪ و در صفحه‌ی پشتی (صفحه‌ی پایینی)، به ترتیب، ۱۲/۷۶٪، ۸/۱٪، ۸/۳٪، بهبود (کاهش انحنا) داشته‌اند.

۱۳- بیشترین میزان انحنای ایجاد شده‌ی در اثر ضربه با انرژی J ۲۵، مربوط به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌باشد و کم‌ترین انحنا مربوط به نمونه‌ی با پلی‌اورتان می‌باشد. در صفحه‌ی برخورد (صفحه‌ی بالایی)، نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و تک‌لایه و پلی‌اورتان، به ترتیب، ۲۴/۵٪، ۲۳/۵٪، ۳۱/۲٪ و در صفحه‌ی پشتی (صفحه‌ی پایینی)، به ترتیب، ۲۲/۳۲٪، ۲۲/۵۵٪، ۱۸/۵٪، بهبود (کاهش انحنا) داشته‌اند. در صفحه‌ی پایین، بیشترین انحنا متعلق به نمونه‌ی بدون نانوگرافن است و افزایش انحنای صفحه‌ی پایینی نمونه‌ی با پلی‌اورتان، به علت بیشتر بودن ضخامت ورق پلی‌اورتان نسبت به دیگر نمونه‌ها است.

۱۴- در نمونه‌ی بدون نانوگرافن آزمون ضربه، سطح برخورد ضربه زننده و سطح پشتی آن، دچار پاره‌گی در فلز آلومینیوم شده‌اند. در ورق آلومینیومی دیگر نمونه‌ها ترک و پاره‌گی دیده نشد ولی فلز آلومینیوم مربوط به سطح اصلی برخورد در همه‌ی نمونه‌ها، دچار له‌شدگی شده است.

۱۵- برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن، خرابی هسته‌ی کامپوزیتی دیده شد. در نمونه‌های با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه و با پلی‌اورتان، هیچ‌گونه خرابی در هسته‌ی کامپوزیتی دیده نشد.

۱۶- در هر سه نمونه‌ی بدون نانوگرافن، با نانوگرافن چندلایه و با نانوگرافن تک‌لایه، جدایش ورق آلومینیوم از هسته‌ی کامپوزیتی، رخ داده است. میزان جدایش در نمونه‌ی بدون نانوگرافن از دیگر نمونه‌ها بیشتر است و کم‌ترین میزان جدایش در بین سه نمونه‌ی ذکر شده متعلق به نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه است. در نمونه‌ی با پلی‌اورتان و بدون نانوگرافن، جدایش خیلی کمی دیده شد که ممکن است به دلیل وجود نقصی (ذوب نامناسب) در زمان ساخت نمونه با دستگاه پرس گرم باشد.

۱۷- با توجه به آزمون تجربی پوست‌کنی مشخص شد، چسب با نانوگرافن چندلایه نسبت به چسب بدون نانوگرافن، ۲۰۶٪ افزایش قدرت چسبندگی و نسبت به چسب با نانوگرافن تک‌لایه، ۱۲۰٪ افزایش قدرت چسبندگی داشته‌است. چسب با نانوگرافن تک‌لایه نسبت به چسب بدون نانوگرافن، ۳۹٪ افزایش چسبندگی و قدرت چسبندگی پلی‌اورتان نسبت به چسب بدون نانوگرافن ۳۱۰٪ و نسبت به چسب با نانوگرافن چندلایه، ۳۳/۵٪ افزایش داشته است.

۱۸- نمونه با پلی‌اورتان از محل اتصال هسته‌ی کامپوزیتی به پلی‌اورتان جدا نشد، بلکه لایه‌های الیاف شیشه از یک‌دیگر جدا شده‌اند. می‌توان از این اتفاق اینطور نتیجه گرفت که:

- نتیجه‌ی به‌دست‌آمده، نتیجه‌ی قدرت چسبندگی الیاف شیشه به‌وسیله‌ی چسب اپوکسی باشد که شاید به‌توان از این نوع آزمون برای بررسی قدرت چسبندگی الیاف استفاده کرد.
- نشان‌دهنده‌ی قدرت بالای اتصال هسته‌ی کامپوزیتی به پلی‌اورتان است و قدرت این اتصال بیشتر از نتیجه‌ی به‌دست‌آمده، است.

۱۸- درصد خطای نتایج تجربی و عددی در انرژی جذب شده‌ی ضربه‌ی با انرژی ۲۵ ژول، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۳/۱٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۷/۴٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۱/۷٪ است.

۱۹- درصد خطای نتایج تجربی و عددی در انرژی جذب شده‌ی ضربه‌ی با انرژی ۲۵ ژول، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۷/۱٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۱۳/۷٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۱۸٪ است.

۲۰- درصد خطای نتایج تجربی و عددی در میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه‌ی با انرژی ۲۵ ژول، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۱۲/۵٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۲۱٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۳۱٪ است.

۲۱- درصد خطای نتایج تجربی و عددی در میزان انحنای ایجادشده در اثر ضربه‌ی با انرژی ۴۰ ژول، برای نمونه‌ی بدون نانوگرافن ۶/۹٪، برای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه ۲۲٪ و برای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه ۲۱٪ است.

۵-۲- پیشنهادها

- برای بهبود خواص چسبندگی و مقاومت به ضربه‌ی FML پیشنهادهایی ارائه شده است.
- ۱- بررسی اثر درصدهای وزنی پایین‌تر از ۰/۵٪ وزنی نانوگرافن بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی،
 - ۲- بررسی جامع نحوه‌ی توزیع نانوگرافن در رزین اپوکسی،
 - ۳- بررسی اثر دما بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی در حین ساخت و توزیع نانوگرافن،
 - ۴- بررسی جامع اثر عملیات تمیزکاری سطح آلومینیوم بر چسبندگی آلومینیوم به هسته‌ی کامپوزیتی و مقایسه‌ی آن با عملیات سندبلاست و در نهایت، یافتن بهترین حالت،
 - ۵- بررسی دقیق‌تر اثر مدول کشسان رزین بر مقاومت به ضربه‌ی کامپوزیت و ساخت نمونه‌ی FML با ۱٪ درصد وزنی نانوگرافن که در آزمون کشش رزین دارای افزایش مدول کشسان بوده‌است،
 - ۷- ساخت ورق آلومینیومی با افزودن نانوذرات گرافن و سپس ساخت FML
 - ۶- بررسی اثر استفاده‌ی هم‌زمان از نانوذرات گرافن، نانولوله‌های کربنی و نانوذرات سیلیکا بر مقاومت به ضربه‌ی سرعت پایین ورق FML.

منبعها

- [1] Vlot A. and Gunnink J.W, Fibre Metal Laminates, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 3-31, 2001.
- [2] Voegesang L.B, Vlot, A; Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures, Journal of Materials Processing Technology, No. 103, pp. 1-5, 2000.
- [3] Van Rooijen R, Sinke J, De Vries T.J, and Van Der Zwaag S, Property Optimization in Fibre Metal Laminates, Applied Composite Materials, no. 11, pp. 63-76, 2004.
- [4] Abdullah M.R , Cantwell W.J; The impact resistance of polypropylene-based fiber–metal laminates. International Journal of Composites Science and Technology, No. 66, pp. 1682–1693, 2006.
- [5] Carrillo J.G, Cantwell W.J; Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite. International Journal of Mechanics of Materials, 2009.
- [6] Voegesang L.B, Vlot, A; Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures, Journal of Materials Processing Technology, No. 103, pp. 1-5, 2000.
- [7] Voegesang L.B, Schijve J, and Fredell R; Fibre metal laminates: damage tolerant aerospace materials, in Demaid, Case Studies in Manufacturing with Advanced Materials, Vol. 2, 1995.
- [8] Vlot, A.; Low velocity impact loading on fibre reinforced aluminium laminates, dissertation, TU Delft, 1991.
- [9] Vlot, A., E. Kroon, and G. La Rocca. Impact response of fiber metal laminates, In Key Engineering Materials, vol. 141, pp. 235-276, 1998.
- [10] Foo, C.C., Seah, L.K., Chai, G.B.; Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels, International Journal of Composite Structures, No. 85, pp. 20–28, 2008.
- [11] Meo, M., Vignjevic, R., Marengo, G.; The response of honeycombsandwich panels under low-velocity impact loading. International Journal of Mechanical Sciences, No. 47, pp. 1301–1325, 2005.
- [12] Guocai, W., Yang, J.M.; The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates. Journal of Materials Science, No. 42, pp. 948–957, 2007.
- [13] Feng D, Aymerich F; Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, No. 52, PP. 12-22, 2013
- [14] Tooski MY, Alderliesten R, Ghajar R, Khalili S; Experimental investigation on distance effects in repeated low velocity impact on fiber metal laminates. Composite Structures. No. 99, pp. 31-40, 2013
- [15] Morinière F, Alderliesten R, Sadighi M, Benedictus R; An integrated study on the low-velocity impact response of the GLARE fibre-metal laminate, Composite Structures, No. 100, pp. 89-103, 2013
- [16] Feng D, Aymerich F; Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates, Composite Structures, No. 108, pp. 161-71, 2014
- [17] Payeganeh G, Ghasemi FA, Malekzadeh K; Dynamic response of fiber–metal laminates (FMLs) subjected to low-velocity impact, Thin-Walled Structures, No. 48(1), pp. 62-70, 2010
- [18] Zhou J, Hassan MZ, Guan Z, Cantwell WJ; The low velocity impact response of foam-based sandwich panels. Composites science and Technology, No.72(14), pp. 81-90, 2012

- [19] Tan C, Akil HM; Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*, No. 43(3), pp. 1433-8, 2012
- [20] Sadighi M, Pärnänen T, Alderliesten R, Sayeafabi M, Benedictus R; Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates. *Applied Composite Materials*, No. 19(3-4), pp. 545-59, 2012
- [21] Tsartsaris N, Meo M, Dolce F, Polimeno U, Guida M, Marulo F; Low-velocity impact behavior of fiber metal laminates. *Journal of Composite Materials*, 2011
- [22] Fan J, Cantwell W, Guan Z. The low-velocity impact response of fiber-metal laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, No.30(1), pp. 26-35, 2011
- [23] Yaghoubi AS, Liu Y, Liaw B; Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) fiber–metal laminates, *Journal of thermoplastic composite materials*, No. 25(2), pp.223-47, 2012
- [24] Zhu S, Chai G; Low-velocity impact response of fiber-metal laminates–A theoretical approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, No. 1464420713489616, 2013
- [25] Vlot A, Alderliesten R, Hooijmeijer P, Kanter Jd, Sinke J, Ypma M; Fibre metal laminates: a state of the art, *International Journal of Materials and Product Technology*, No. 17(1-2), pp. 79-98,2002
- [26] Morinière F, Alderliesten R, Benedictus R; Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates–a review, *International Journal of Impact Engineering*, No. 67, pp. 27-38, 2014
- [27] Starikov R; Assessment of impact response of fiber metal laminates. *International Journal of Impact Engineering*, No. 59, pp. 38-45, 2013
- [28] Taraghi I, Fereidoon A, Taheri-Behrooz F; Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures. *Materials & Design*, No. 53, pp. 152-8, 2014
- [29] Avila AF, Soares MI, Neto AS; A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings, *International journal of impact engineering*, No. 34(1), pp.28-41, 2007
- [30] Balaganesan G, Velmurugan R, Kanny K; Dynamic Response of Nanocomposite Laminates During Low, Medium and High Velocity Impact Loading. *Frontiers in Aerospace Engineering*, 2015
- [31] Haq M, Umer R, Khomenko A, Loos A, Drzal L; Manufacturing and impact behavior of sandwich composites with embedded rapheme platelets, *The 19th International Conference on Composite Materials*, Montreal, Canada July 28-August 2013.
- [32] Hosur MV, Chowdhury F, Jeelani S. Low-velocity impact response and ultrasonic NDE of woven carbon/epoxy-Nanoclay nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, No. 41(18), pp.2195-212, 2007
- [33] Ulus H, Üstün T, Şahin ÖS, Karabulut SE, Eskizeybek V, Avcı A; Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *Journal of Composite Materials*, No.0021998315580835, 2015

- [34] Ávila AF, Carvalho MGR, Dias EC, da Cruz DTL; Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact. *Composite Structures*, No 92(3), pp.745-51, 2010
- [35] Soliman EM, Sheyka MP, Taha MR. Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, No 47, pp. 39-47, 2012
- [36] K.S. Navoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov; Electric field effect in atomically thin carbon film, *Science*, Vol. 306, pp. 666-9, 2004.
- [37] Shokrieh, M. Mehrdad, and V. Ahmadi Joneidi; Manufacturing and experimental characterization of Graphene/Polypropylene nanocomposites, No. 55-63, 2014
- [38] M. A. Rafiee, J. Rafiee, Z. Wang, H. Song, Z. Yu, N. Koratkar; Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *ACS NANO*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [39] J. Liang, Y. Huang, L. Zhang, Y. Wang, Y. Ma, T. Guo, Y. Chen; Molecular-Level Dispersion of Graphene into Poly(vinyl alcohol) and Effective Reinforcement of their Nanocomposites, *Advanced Functional Materials*, Vol. 19, pp. 2297-2302, 2009.
- [40] Shokrieh, Mahmood Mehrdad, Masood Esmkhani, and Amir Reza Haghghatkhah. "Mechanical properties of rapheme/epoxy nanocomposites under static and flexural fatigue loadings." *Mechanics of Advanced Composite Structures* 1, no. 1, pp. 1-7, 2014.
- [41] Asaee Z, Mohamed M, Soumik S, Taheri F; Experimental and numerical characterization of delamination buckling behavior of a new class of GNP-reinforced 3D fiber-metal laminates, *Thin-Walled Structures*, No. 112, pp.208-16, 2017
- [42] Asaee, Zohreh, Mbarka Mohamed, Davide De Cicco, and Farid Taheri; Low velocity impact response and damage mechanism of 3D fiber-metal laminates reinforced with amino-functionalized rapheme nanoplatelets, *International Journal of Composite Materials* 7, no. 1, pp. 20-36, 2017.
- [43] Kausar, Ayesha, Zanib Anwar, and Bakhtiar Muhammad, Recent developments in epoxy/graphite, epoxy/rapheme, and epoxy/rapheme nanoplatelet composites: a comparative review, *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 55, no. 11, pp. 1192-1210, 2016.
- [44] Kamar, Nicholas T., Mohammad Mynul Hossain, Anton Khomenko, Mahmood Haq, Lawrence T. Drzal, and Alfred Loos, Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with rapheme nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 70, pp. 82-92, 2015.
- [45] Ahmadi-Moghadam, B., Sharafimasooleh, M., Shadlou, S., & Taheri, F. (2015). Effect of functionalization of graphene nanoplatelets on the mechanical response of graphene/epoxy composites. *Materials & Design* (1980-2015), 66, 142-149.
- [46] Heydari-Meybodi, M., Saber-Samandari, S., & Sadighi, M. (2016). An experimental study on low-velocity impact response of nanocomposite beams reinforced with nanoclay. *Composites Science and Technology*, 133, 70-78.
- [47] Amooyi Dizaji, R., Yazdani, M., Aligholizadeh, E., & Rashed, A. (2018). Effect of 3D-woven glass fabric and nanoparticles incorporation on impact energy absorption of GLARE composites. *Polymer Composites*, 39(10), 3528-3536.
- [48] Ahmadi, H., Ekrami, M., Sabouri, H., & Bayat, M. (2018). Experimental and numerical investigation on the effect of projectile nose shape in low-velocity impact loading on fiber

metal laminate panels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 0954410018804384.

[۴۹] قاسمی، رحمانی، امید، "بررسی آزمایشگاهی و مدلسازی اجزا محدود جذب انرژی در چندلایه های فلز-الیاف شیشه تقویت شده با نانولوله های کربنی تحت ضربه سرعت پایین"، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۸، ۵، ۱۱۵-۲۰۱۸، ۱۲۵

[۵۰] حسینی آب بندانک و همکاران، "اثر نانوصفحات گرافن عامل دار بر رفتار خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت" علوم و فناوری کامپوزیت، ۲۰۱۸

[۵۱] س. شریف‌نژاد، م. فروزان، "بررسی مقاومت پسماند خمشی پس از ضربه در صفحه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش لایه‌چینی دستی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۰۱۷

[۵۲] الف. رصاف، ر. قاجار، "بررسی برخی عوامل موثر بر روی رفتار ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده الیافی در مقابل ضربه‌ی سرعت کم به روش وزنه‌ی افتان"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۰۱۰

[۵۳] س. خدادادیان، س. فعلی، "تحلیل صفحات ساندویچی کامپوزیت-هانی کمب مدور تحت بار ضربه‌ای سرعت پایین"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، ۲۰۱۶

[۵۴] ن. جمالزاده، ر. قاجار، "اثر کسر حجمی و ضخامت کامپوزیت‌های هیبریدی روی جذب انرژی وزنه‌ی افتان"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۰۱۲

[۵۵] ش. ال‌آقایی، ع. فریدون، "بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت گرافن- TiO_2 "، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۲۰۱۴

[۵۶] ف. فاطمی، ف. آشنای قاسمی، ج. بهشتیان، "ارتقای خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی/کولارا/گرافن اصلاح شده"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۲۰۱۶

[۵۷] ح. اکبری، س. فعلی، "تحلیل لمینت‌های الیاف-فلز-کربن نانوتیوب تحت بار ضربه‌ای سرعت پایین"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، ۲۰۱۴

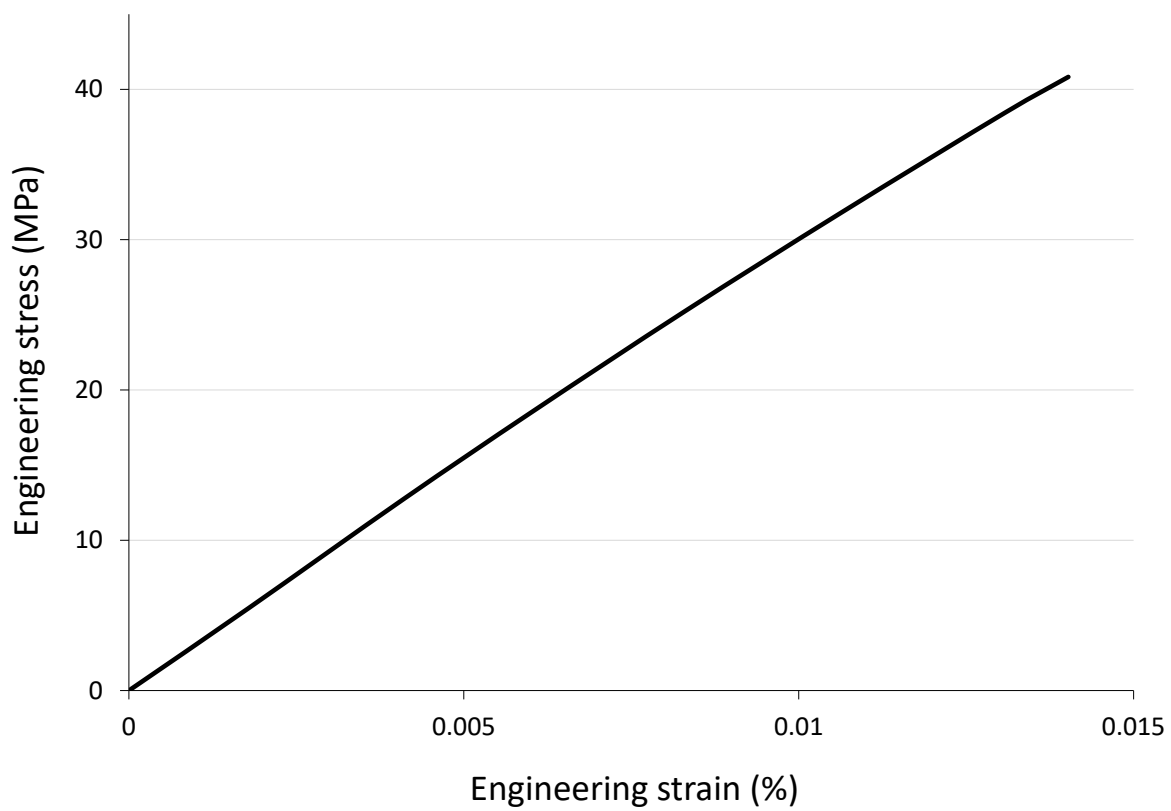
[۵۸] س. کی‌پور، م. گردویی، "بررسی میزان برگشت فنری در شکل‌دهی مقاطع ناودانی شکل از ورق‌های فیبر فلزی" پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۰۱۶

[۵۹] ح. جلالی، ر. فارسانی، ح. خرسند، "تولید و بررسی خواص مکانیکی چندلایه مرکب الیاف با لایه‌های فلزی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۰۱۳

- [60] Hyer, M. W., Herakovich, C. T., Milkovich, S. M., & Short Jr, J. S. (1983). Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy. *Composites*, 14(3), 276-280.
- [۶۱] حصاری ر، احمدی بروغنی ی، "مدل‌سازی فوم‌های آلومینیومی جهت جذب ضربه در ساختارهای چندلایه" مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۷، ۲، صص ۳۵۳-۳۵۸، ۲۰۱۷
- [62] KAY, G. Failure modeling of titanium-61-4V and 2024-T3 aluminum with the Johnson-Cook material model. Technical Rep., Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2002.
- [63] Heydari-Meybodi, Mahdi, Saeed Saber-Samandari, and Mojtaba Sadighi. "An experimental study on low-velocity impact response of nanocomposite beams reinforced with nanoclay." *Composites Science and Technology* 133 (2016): 70-78.

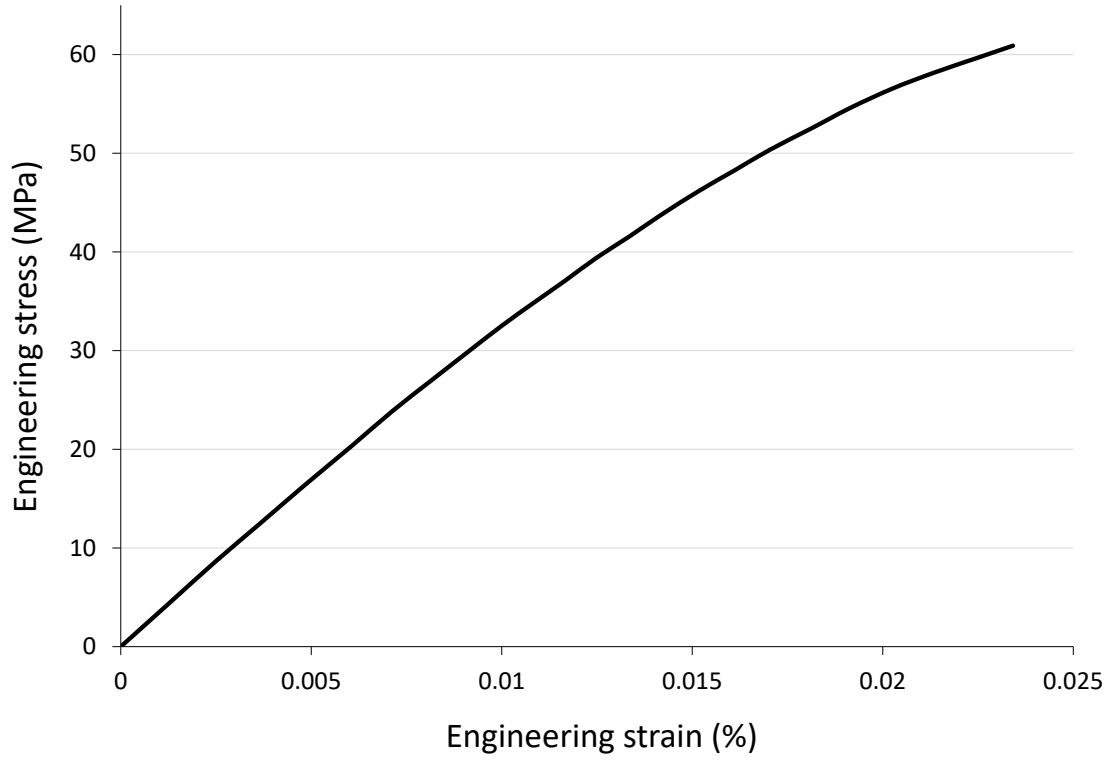
پیوست ۱

نمودار تنش- کرنش آزمون کشش رزین اپوکسی بدون نانوگرافن



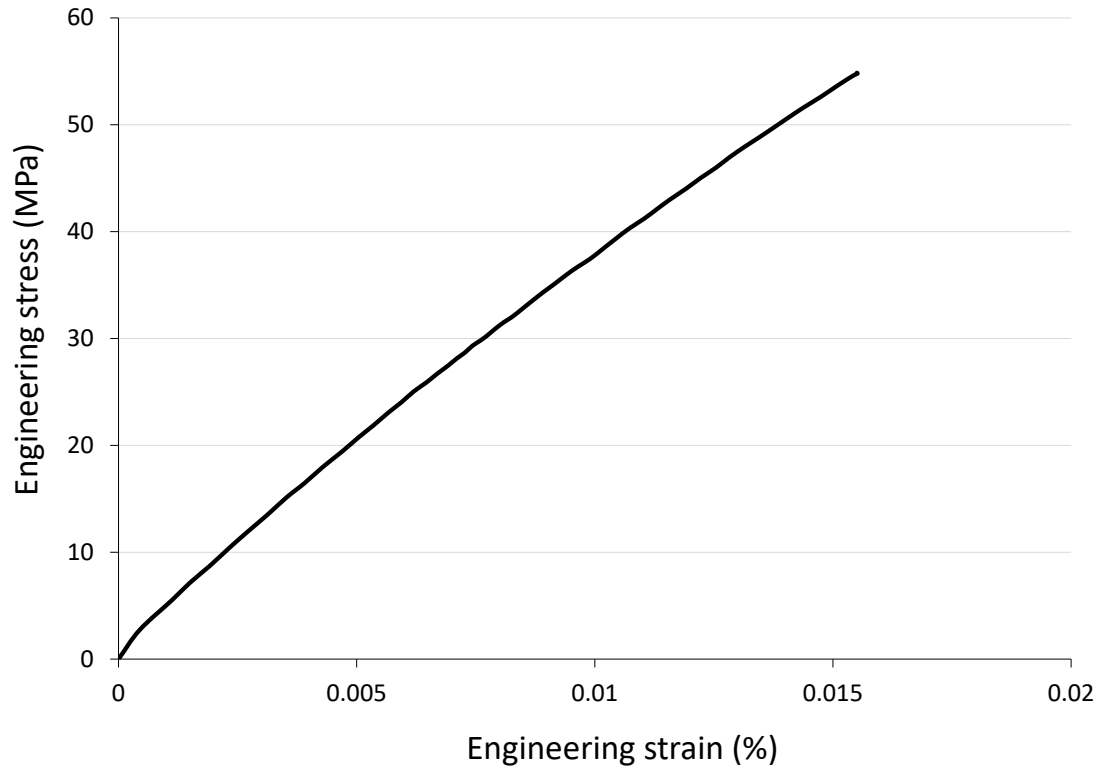
پیوست ۲

نمودار تنش- کرنش آزمون کشش رزین اپوکسی با نانوگرافن چندلایه



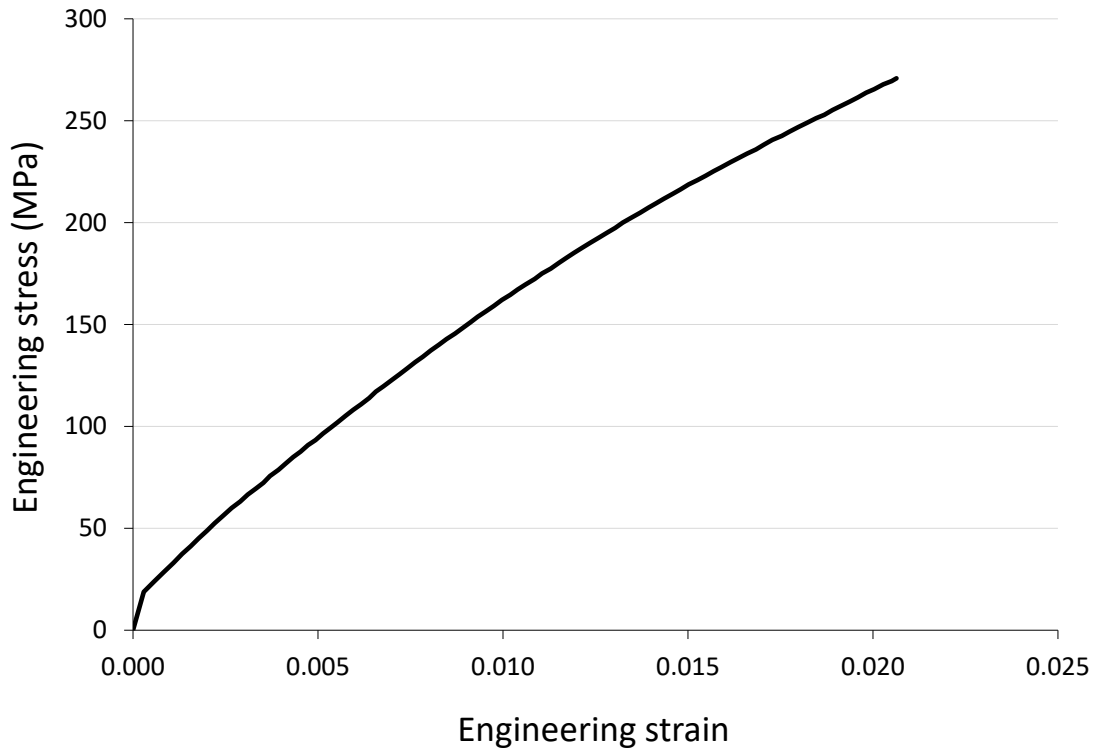
پیوست ۳

نمودار تنش- کرنش آزمون کشش رزین اپوکسی با نانوگرافن تک لایه



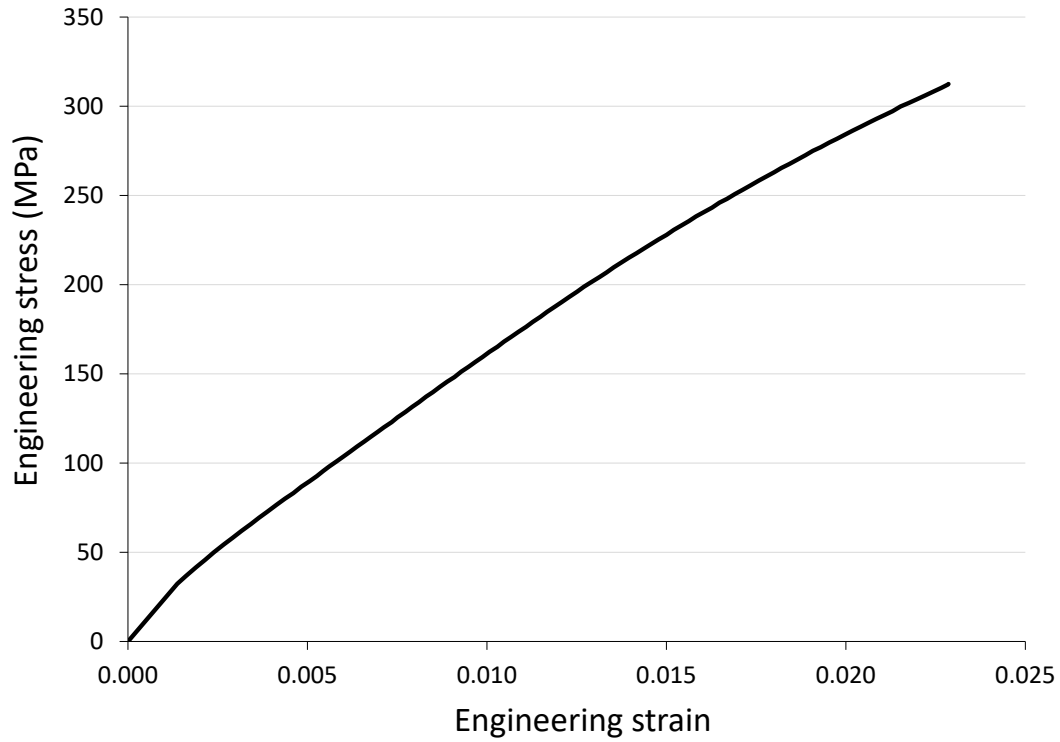
پیوست ۴

نمودار تنش-کرنش آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی شیشه-اپوکسی بدون نانوگرافن



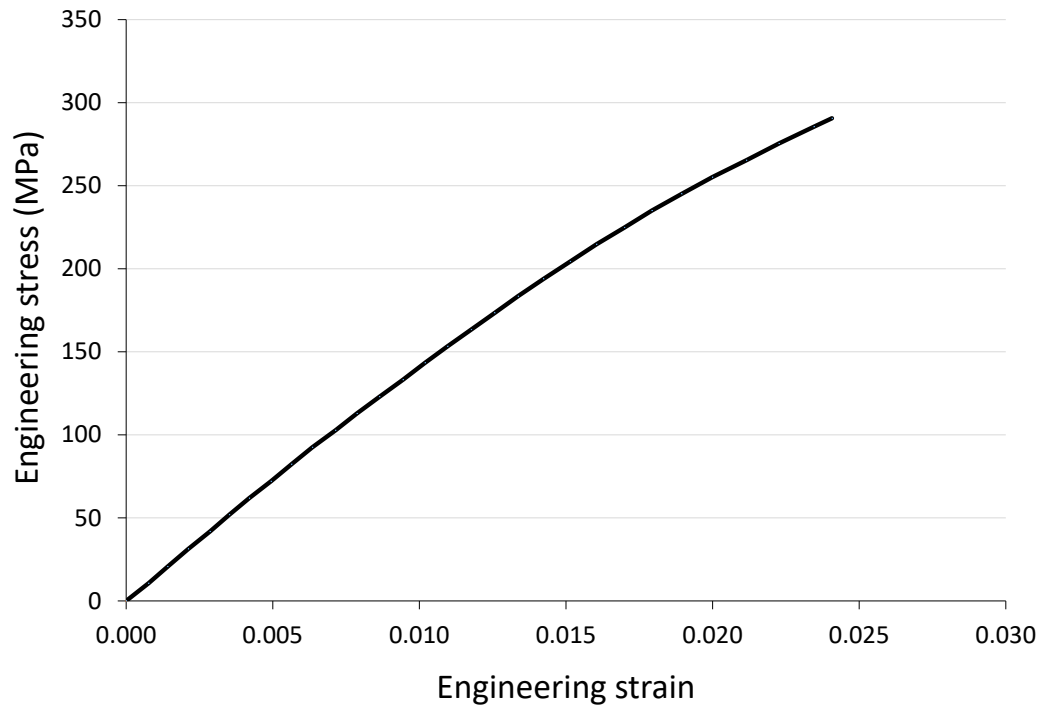
پیوست ۵

نمودار تنش- کرنش آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با نانوگرافن چندلایه



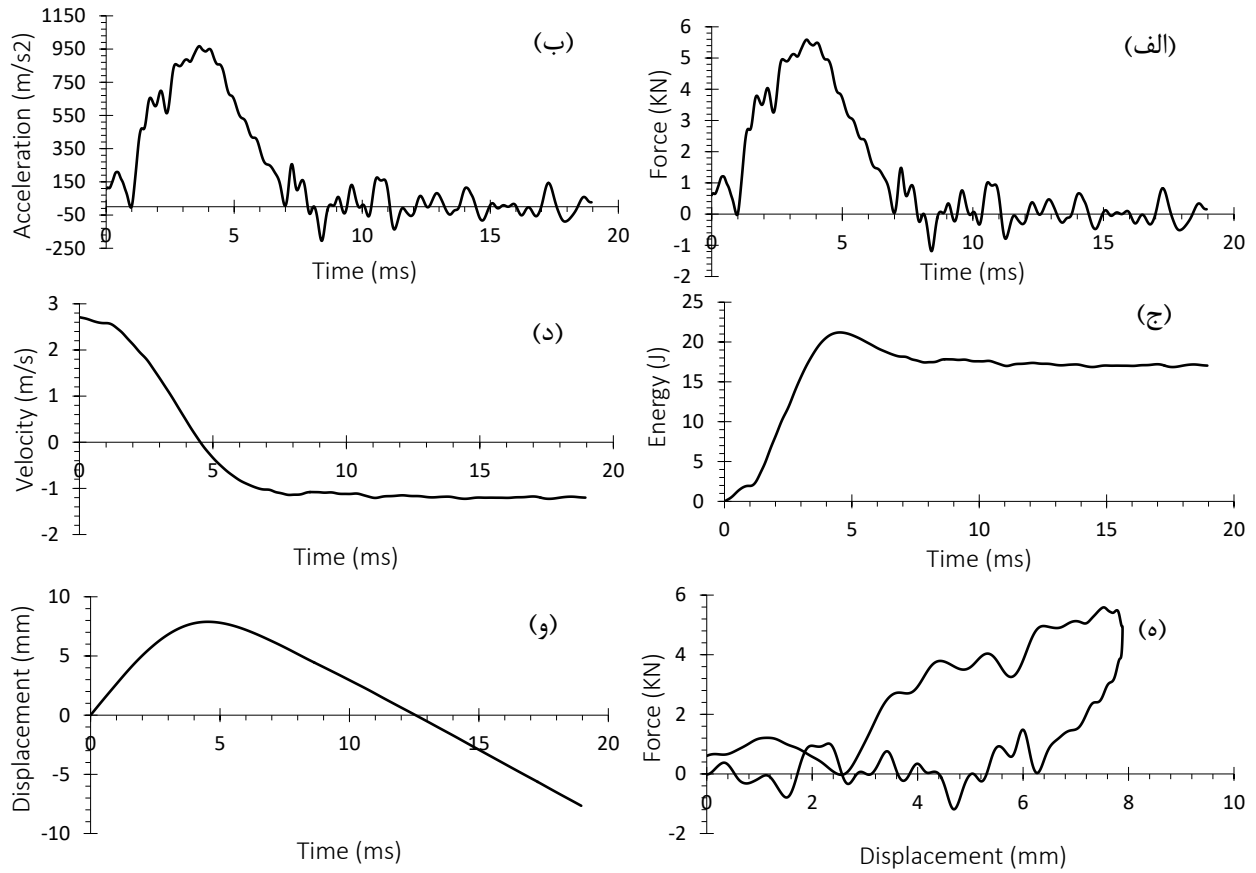
پیوست ۶

نمودار تنش-کرنش آزمون کشش هسته‌ی کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با نانوگرافن تک‌لایه



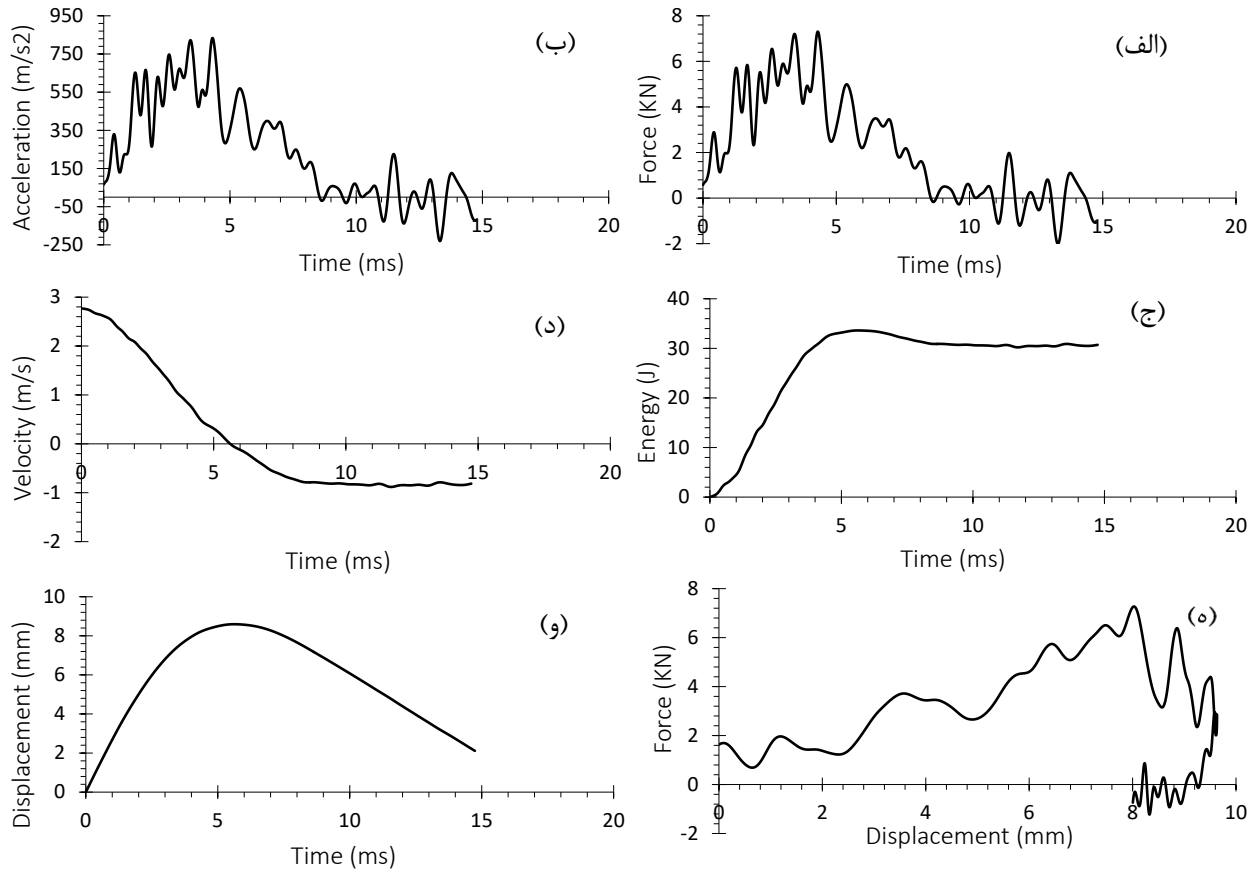
پیوست ۷

نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN04) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ ژول



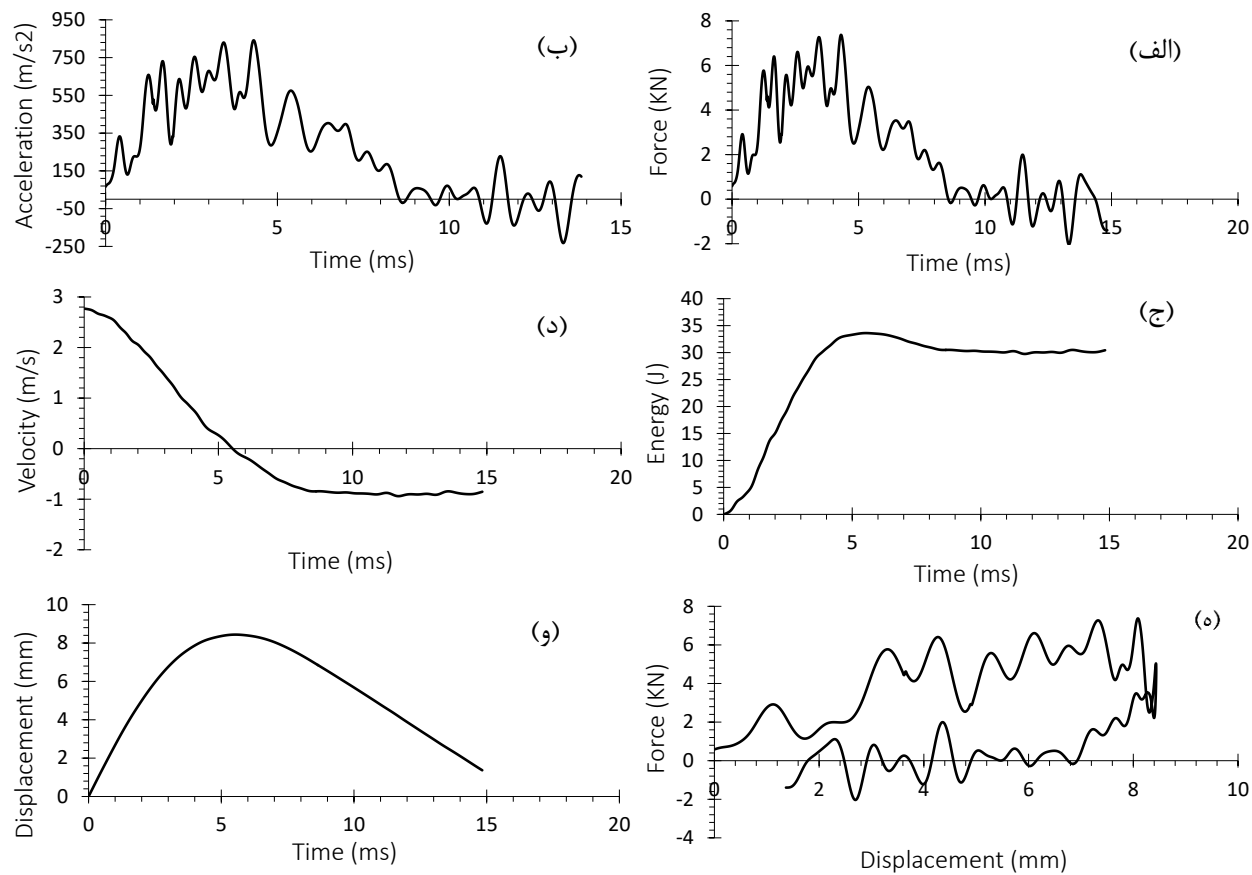
پیوست ۸

نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ ژول



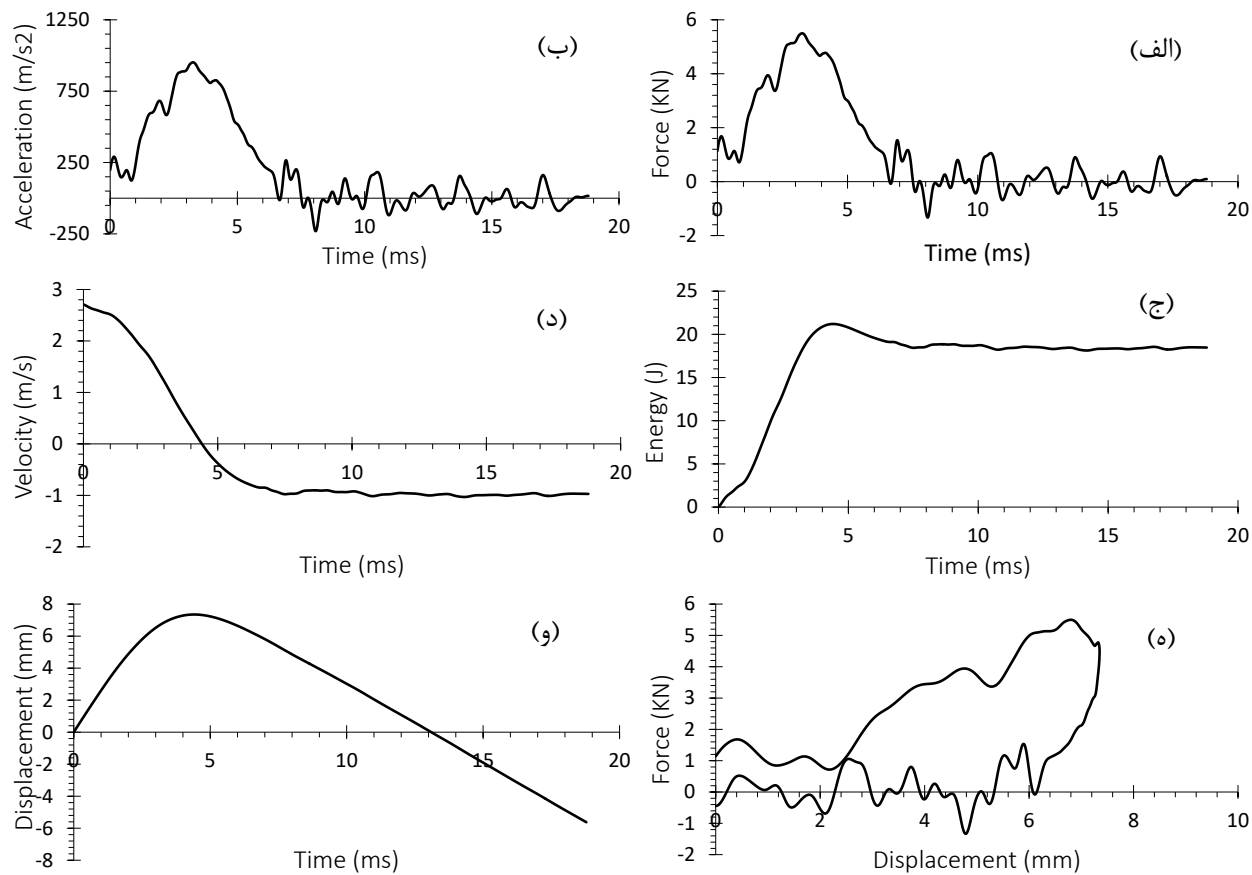
پیوست ۹

نمودارهای نمونه‌ی بدون نانوگرافن (IN03) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ ژول



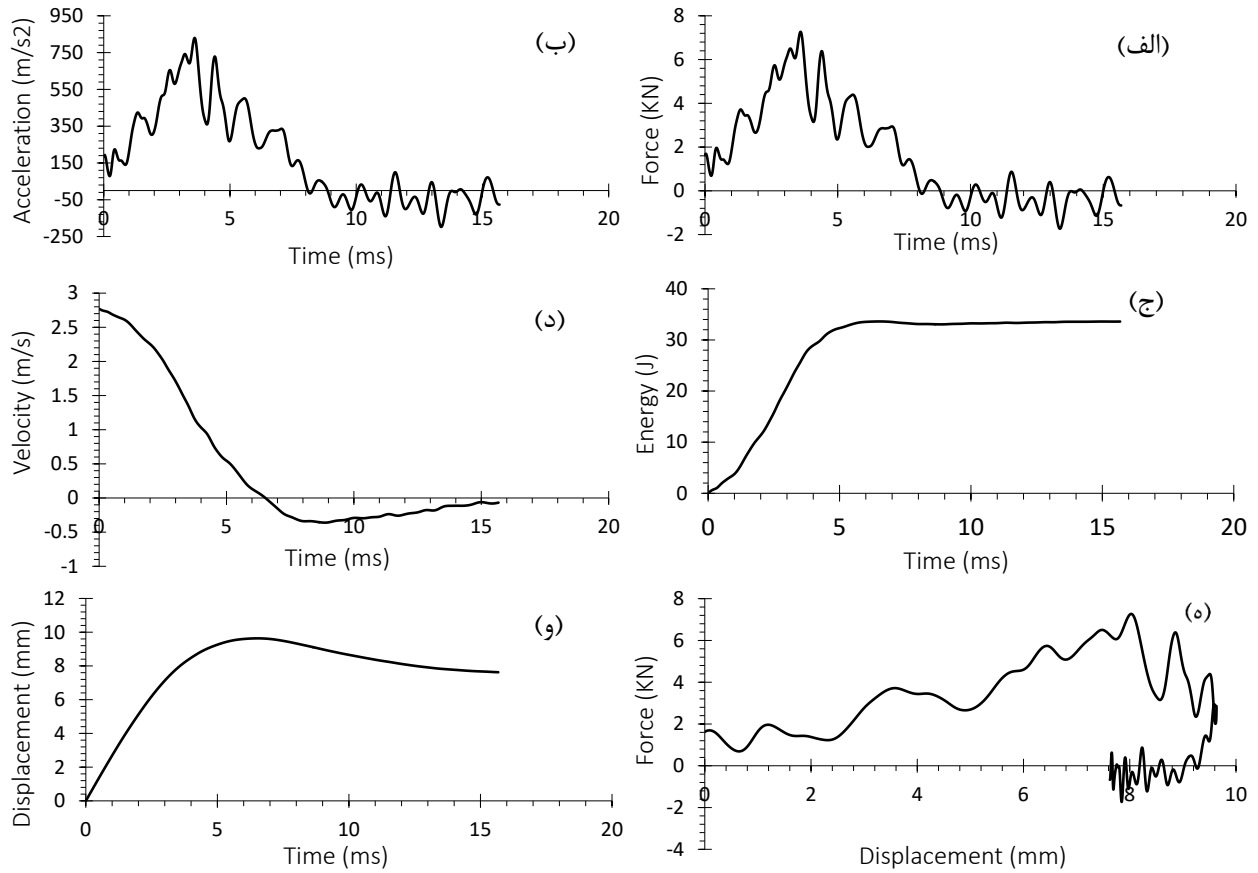
پیوست ۱۰

نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL04) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۲۵ ژول



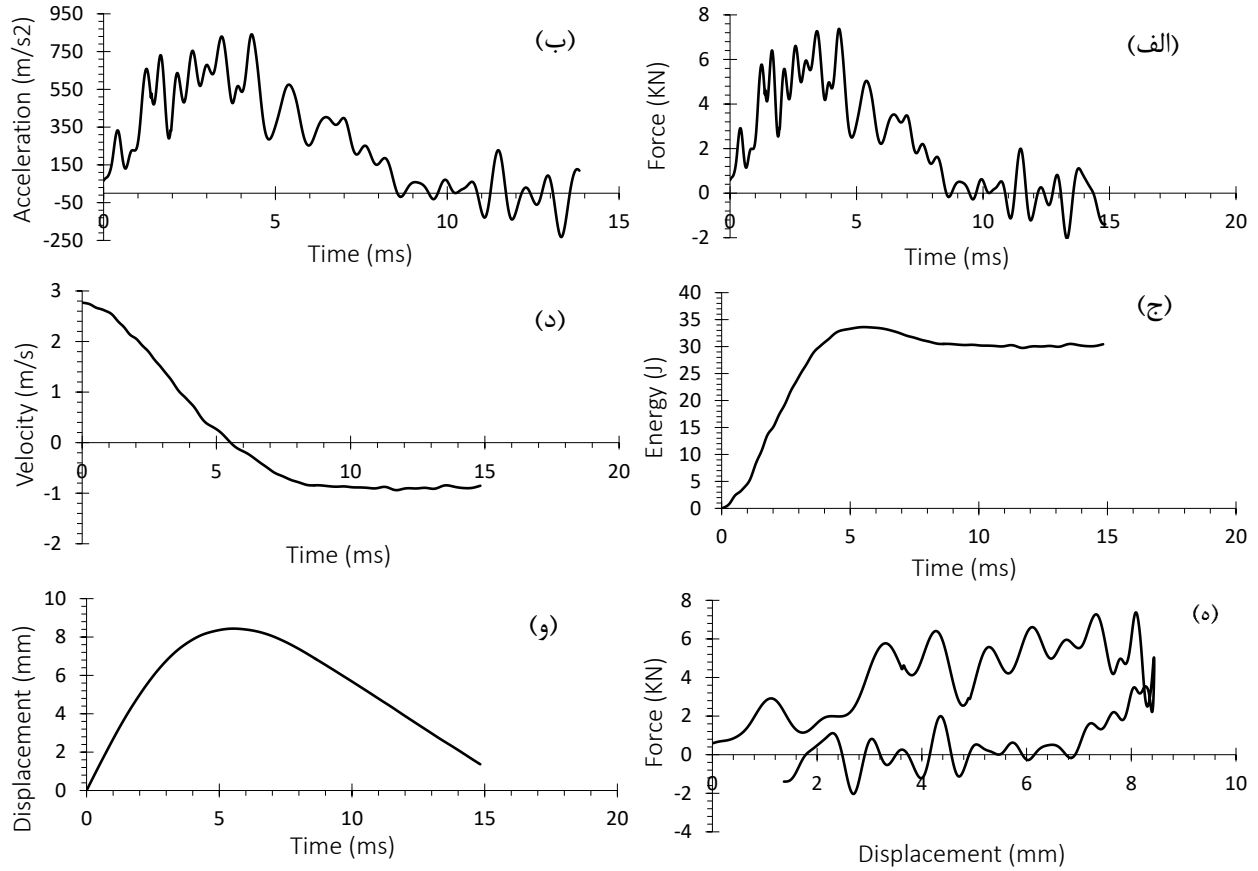
پیوست ۱۱

نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL02) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ ژول



پیوست ۱۲

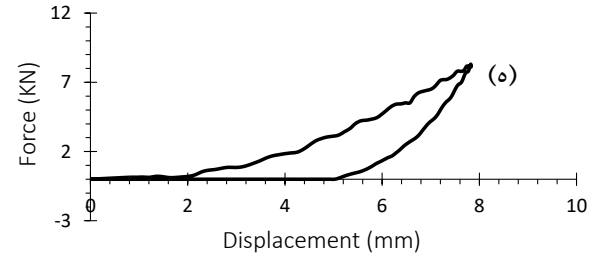
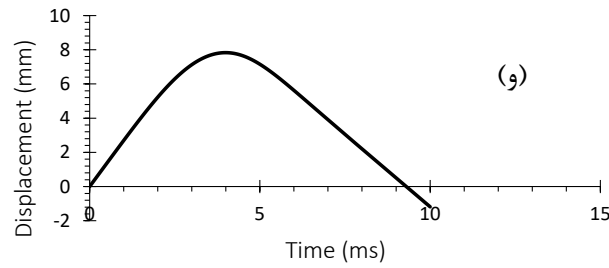
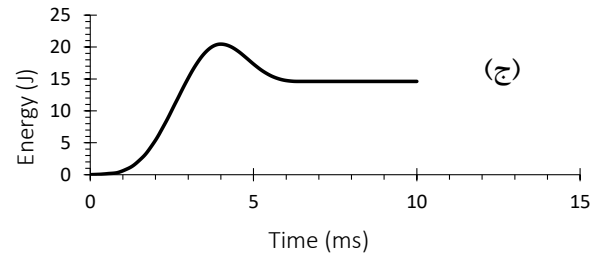
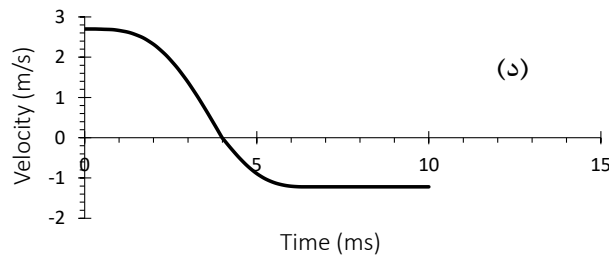
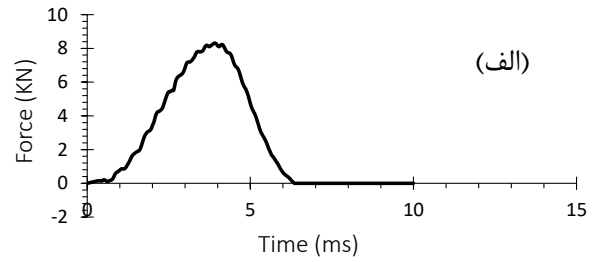
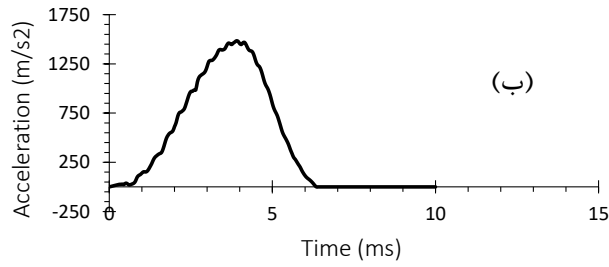
نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL03) پس از آزمون تجربی ضربه در انرژی ۴۰ ژول



پیوست ۱۳

نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL25) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی ۲۵ ژول

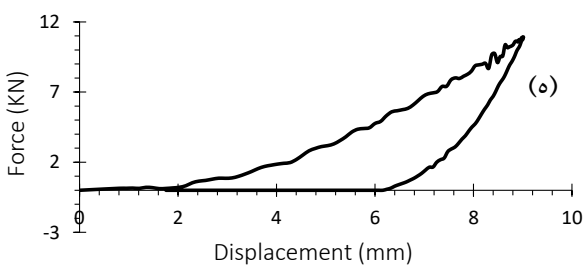
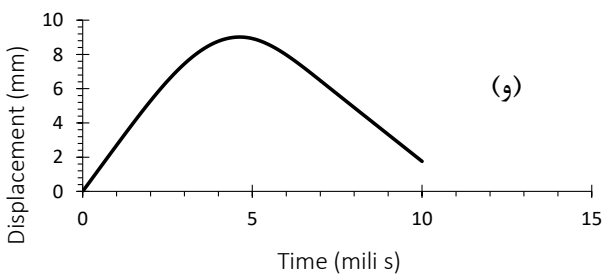
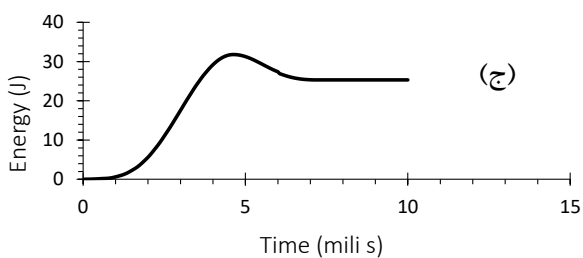
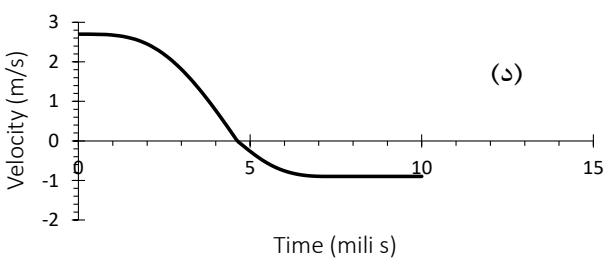
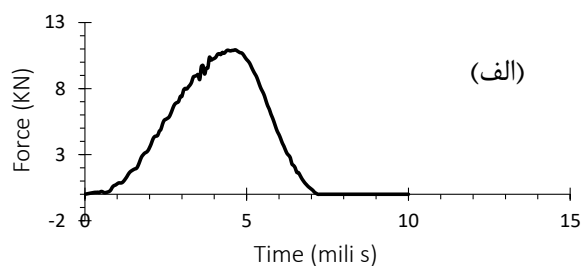
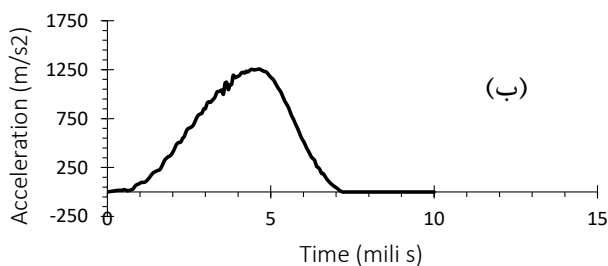
۵



پیوست ۱۴

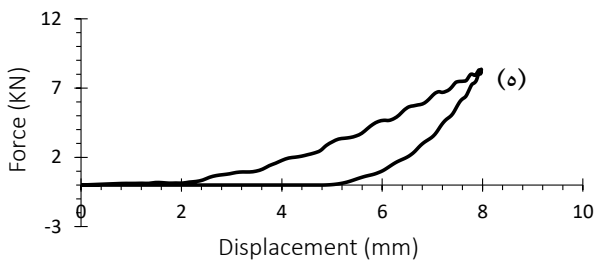
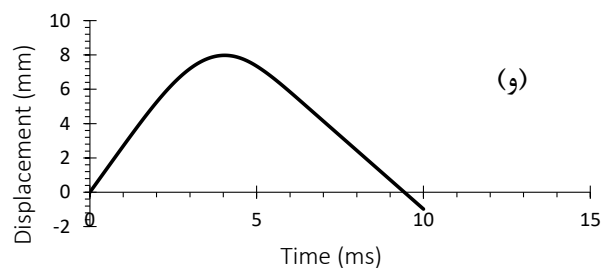
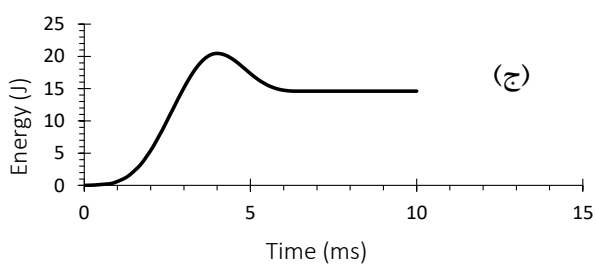
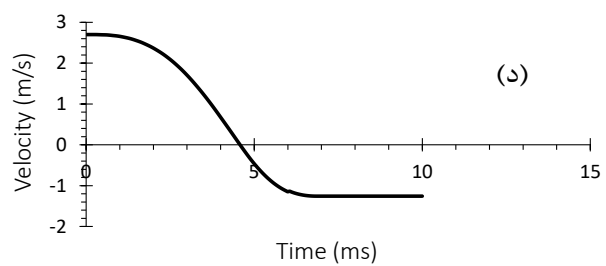
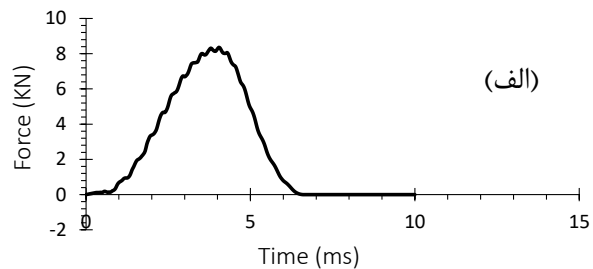
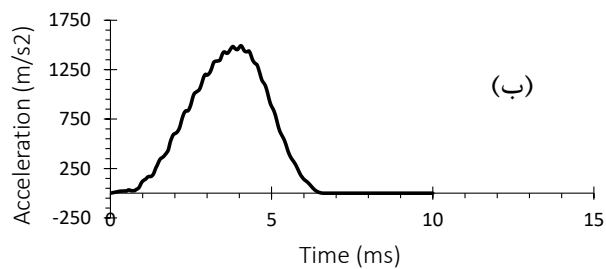
نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن چندلایه (IL40) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی ۴۰ ژول

۵



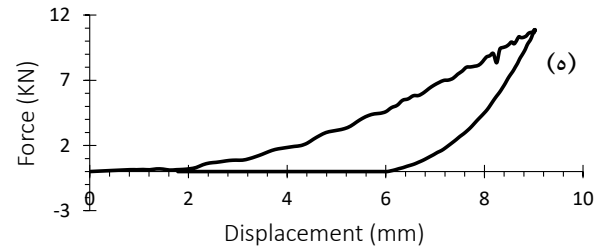
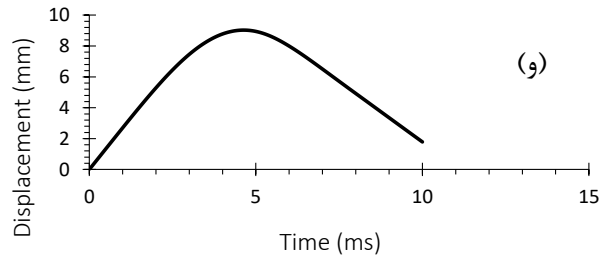
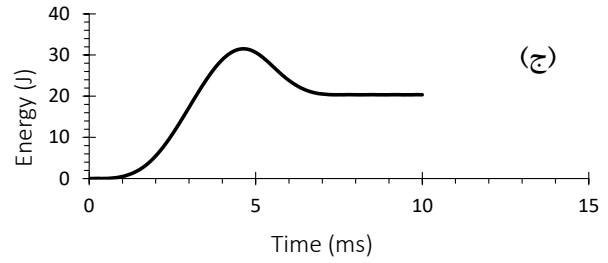
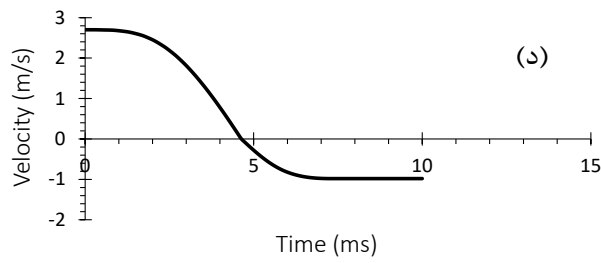
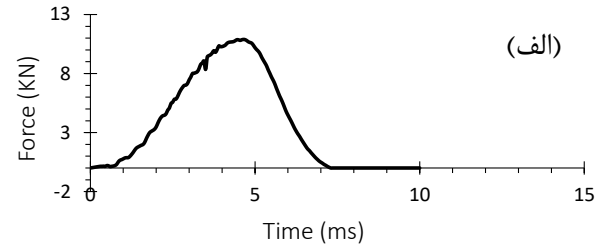
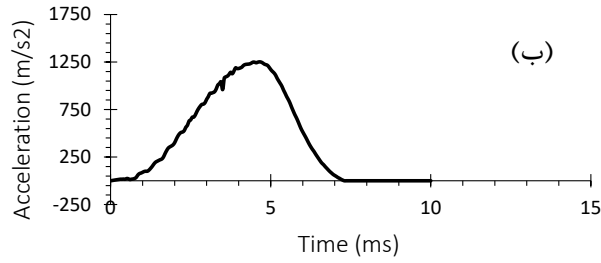
پیوست ۱۵

نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه (ILS25) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی ۲۵ ژول



پیوست ۱۶

نمودارهای نمونه‌ی با نانوگرافن تک‌لایه (ILS40) پس از آزمون عددی ضربه در انرژی ۴۰ ژول

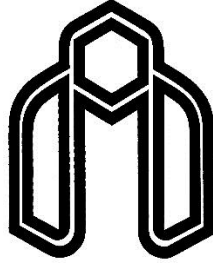


Abstract

Fiber Metal Laminate (FML) composite is a compound sheet which constituted of polymeric composite and metal sheets, and they have found numerous application in aerospace and defense structures. Subsequently, the analysis of impact load on this type of structures had attracted the attention of researchers within recent years.

In this study, the behavior of fiber-metal composite reinforced by nanographene particles under low velocity impact with both experimental and numerical approaches was investigated. Utilizing the tensile test of resin, the multilayer industrial grade oxidized nanographene was selected as an optimum nanographene type. As well, after examining different weight percentages of nanoparticles including 0.5, 0.75, 1, 1.25 and 2%, it was indicated that adding 0.5% weight nanoparticle had a better mechanical property. Moreover, FMLs were made in different states including with and without nanographene and single and multiple oxidized nanographene, as well as blending of epoxy resin and urthan cohesive. Three distinct tests including unidirectional tensile, peeling and low velocity impact tests have been performed. The results showed that in all cases adding the nanoparticle create a better impact response on the FML specimens. Also, the peeling tests demonstrated that adding the single and multi-nanographene to epoxy resin will increase the cohesive property about 39.4% and 206%, respective. In this study, the cohesive element was simulated in Abaqus software base on the peeling test result. The numerical and experimental results were in a good agreement.

Keywords: Fiber Metal Laminates (FML), Glass Fiber, Epoxy, Low Velocity Impact, Graphene



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

**Thesis for Master of Science in Aerospace
Engineering**

Title

Experimental and numerical investigation of low velocity impact response of fiber metal laminates reinforced with graphene nanoparticles

Written by

Ali Hamidi Jaldehbakhani

Supervisor

Dr. Mahdi Gerdooei
Dr. Mohammad Bagher Nazari

Advisor

Dr. Hossein Toozandehjani

January 2019