

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-سازه های هوایی

بررسی رفتار ارتعاشی و کمانشی پنل های ساندویچی تقویت شده با نانو ذرات به روش تجربی

نگارنده: پیمان عسجدی

استاد راهنما

دکتر سید مهدی حسینی فراش

مهر ۱۴۰۰

۲۰۲۰/۲۴
۱۷/۹/۱۴

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



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 پیمان عسجدی با شماره دانشجویی ۹۷۱۱۷۴۴ رشته مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی تحت عنوان بررسی رفتار ارتعاشی و گمانشی پل‌های ساندویچی تقویت شده با نانو ذرات به روش تجربی که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مهدی حسینی فراش	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- استاد داور اول	دکتر محمد جعفری	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر سید علی سینا	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی رضا شاطرزاده	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۱۷/۹/۱۴

تقدیم اثر

تقدیم به

پدر و مادر و خانواده مهربانم

که موفقیت‌هایم مرهون محبت‌های بی دریغ ایشان است.

شکر و قدردانی

سپاس اول از آن اوست که هرچه داریم از اوست. سپاس می‌گوییم خداوند تبارک تعالی که به لطف و مرحمتش این پژوهش به انجام رسید. از پدر و مادر عزیزم که همواره در تمامی سختی‌ها یار و یاور همیشگی من بوده و در هیچ‌یک از مشکلات زندگی تنهایی نگذاشتند تشکر می‌نمایم. از استاد عزیز و بزرگوار، جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی فراش که در کمال صبر و آرامش، با خوشرویی و فروتنی، همواره حمایت ایشان در این طرح پژوهشی همراه من بوده و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از اساتید بزرگواری که داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند سپاسگزارم. از اساتید گرامی، جناب دکتر سید علی سینا که اینجانب را جهت مباحث ارتعاشات کمک فراوان نمودند، جناب دکتر مهدی گردویی و جناب دکتر حسین توزنده جانی که همواره ما را در مسیر دانش همراهی کردند کمال تشکر را دارم. همچنین از دوستان عزیز آقای شجاع که کمک فراوانی در زمینه پژوهش‌ها و آزمایش‌های مربوط به این پایان‌نامه کردند صمیمانه سپاسگزارم.

تهدنامه

اینجانب **پیمان عسجدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه‌های هوایی** دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **بررسی رفتار ارتعاشی و کماتشی پنل‌های ساندویچی تقویت شده با نانو ذرات به روش تجربی** تحت راهنمایی استاد راهنما **دکتر سید مهدی حسینی** **فراش** متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این پایان نامه، رفتار کمانشی و ارتعاشی ستون ها و تیرهای کامپوزیتی با ساختار ساندویچی دارای رویه الیاف شیشه/اپوکسی و هسته فومی بررسی می شود. همچنین تأثیر افزودن نانو ذرات رس درون ماده زمینه کامپوزیت بر بار بحرانی کمانش و فرکانس های طبیعی ارتعاشات مطالعه می شود. تغییر هسته پارامتر دیگر مورد توجه در این پژوهش بوده است. تیرهای ساندویچی دارای سطح مقطع مستطیلی بوده و تحت بار فشاری محوری قرار گرفته اند. جنس رویه کامپوزیتی، سه لایه الیاف شیشه/اپوکسی در نظر گرفته شده است. هدف از انجام این آزمایش بررسی بیشینه بار بحرانی کمانش نمونه های ساندویچی، بیشترین جذب انرژی در بین نمونه های ساندویچی و بررسی فرکانس های طبیعی نمونه ها می باشد. مقدار نانو رس در رویه ی کامپوزیتی نمونه های شامل هسته زیگزاگی ۰، ۳، ۵ و ۷ درصدی وزنی در نظر گرفته شده اند. فرآیند اختلاط نانو ذرات رس در ماده زمینه توسط پراب آلتراسونیک انجام شده است. نمونه های ساندویچی و نمونه های تست کشش کامپوزیت به روش لایه گذاری دستی ساخته شده اند. ابعاد نمونه های کامپوزیتی ساندویچی طبق استاندارد ASTM-C393 و ابعاد نمونه های تست کشش کامپوزیت شیشه/اپوکسی طبق استاندارد ASTM-D3039 می باشند. نتایج حاصل از آزمایش بار فشاری محوری در شرایط دو سر گیردار نشان دهنده آن است که افزودن نانو رس باعث بهبود جذب انرژی و همچنین بهبود بار بحرانی کمانش شده است. نتایج نشان می دهد با افزودن ۳ درصد وزنی نانو رس بار بحرانی کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی به میزان ۲۵ درصد افزایش داشته است. همچنین بار بحرانی کمانش نمونه ۷ درصد وزنی نانورس ۲۷ درصد افزایش داشته است. تصاویر مربوط به آزمایش SEM نشان می دهند که در نمونه ۳ درصد وزنی نانو ذرات با توجه به حجم کمتر به خوبی در ماده زمینه پخش شده اند و در نتیجه انباشته شدن نانو ذرات به ندرت اتفاق افتاده است. در میان درصدهای مختلف نانو ذرات در تیر ساندویچی با هسته زیگزاگی نمونه ۳ درصد وزنی نانو رس ۶ درصد کاهش، نمونه ۵ درصد وزنی ۱ درصد کاهش و نمونه ۷ درصد ۴.۵ درصد افزایش داشته است. به جهت راستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی با هسته ساده و رویه اپوکسی الیاف شیشه در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شده است.

کلمات کلیدی: ساندویچ پانل، کمانش، ارتعاشات، نانو ذره

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- کامپوزیت‌ها
۳	۱-۲-۱- مزایای کامپوزیت‌ها
۴	۳-۱- ساختارهای ساندویچی
۵	۱-۳-۱- رویه
۵	۲-۳-۱- هسته
۶	۴-۱- کاربرد پانل‌های ساندویچی
۸	۵-۱- اهمیت کمانش در سازه‌ها
۹	۶-۱- اهمیت ارتعاش در سازه‌ها
۱۱	۷-۱- روش‌های ساخت کامپوزیت
۱۱	۱-۷-۱- روش لایه چینی دستی
۱۲	۲-۷-۱- روش تزریق رزین به کمک خلاء
۱۲	۸-۱- نانو ذرات
۱۴	۹-۱- اپوکسی
۱۵	۱۰-۱- ساختار تحقیق
۱۷	فصل دوم: مروری بر تاریخچه تحقیق
۱۸	۱-۲- مروری بر پژوهش‌های انجام شده
۱۸	۱-۱-۲- پژوهش‌های مرتبط با کمانش
۲۴	۲-۱-۲- پژوهش‌های مرتبط با ارتعاشات ساختارهای ساندویچی

۲۸	۳-۱-۲- پژوهش‌های مرتبط با نانو ذرات در ساختارهای ساندویچی
۳۳	۲-۲- اهداف پژوهش
۳۳	۳-۲- خلاصه مطالب فصل
۳۵	فصل سوم: ساخت و آزمون نمونه ها
۳۶	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- مواد استفاده شده
۳۶	۳-۲-۱- فوم
۳۷	۳-۲-۲- الیاف شیشه
۳۷	۳-۲-۳- ماده زمینه به کار رفته کامپوزیت
۳۸	۳-۲-۴- نانو ذره
۳۹	۳-۲-۵- نمد
۴۰	۳-۲-۶- پارچه آستری
۴۰	۳-۲-۷- اسپری جدا کننده
۴۱	۳-۲-۸- کیسه خلأ
۴۱	۳-۲-۹- نوار سیل و کیوم
۴۲	۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات
۴۲	۳-۳-۱- پمپ خلأ
۴۲	۳-۳-۲- دسیکاتور
۴۳	۳-۳-۳- ترازوی دیجیتالی
۴۳	۳-۳-۴- پراب آلتراسونیک
۴۴	۳-۳-۵- همزن مغناطیسی و مکانیکی
۴۴	۳-۳-۶- دستگاه آرّه برش

۴۵	 ۷-۳-۳- دستگاه شیکر:
۴۶	 ۸-۳-۳- فیکسچر
۴۷	 ۴-۳- روش ساخت نمونه‌ها
۴۷	 ۱-۴-۳- ساخت نمونه‌های آزمون کشش
۴۹	 ۲-۴-۳- ساخت نمونه‌های ساندویچی
۵۱	 ۵-۳- آزمون‌های انجام شده
۵۱	 ۱-۵-۳- آزمون کشش کامپوزیت
۵۲	 ۲-۵-۳- آزمون ارتعاش
۵۳	 ۳-۵-۳- آزمون بار فشاری
۵۴	 ۶-۳- خلاصه فصل

۵۵ فصل چهارم: بررسی نتایج آزمون‌ها

۵۶	 ۱-۴- مقدمه
۵۶	 ۲-۴- بررسی نتایج آزمون کشش
۶۰	 ۳-۴- بررسی نتایج آزمون ارتعاش
۷۲	 ۴-۴- بررسی نتایج آزمون کمانش
۷۷	 ۵-۴- انرژی جذب شده
۷۸	 ۶-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۸۳	 ۷-۴- اعتبار سنجی با استفاده از نرم افزار آباکوس
۸۶	 ۸-۴- خلاصه مطالب فصل

۸۷ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۸۸	 ۱-۵- مقدمه
۸۸	 ۲-۵- نتایج حاصل از آزمون ارتعاش

- ۵-۳- نتایج حاصل از آزمون فشار ۸۹
- ۵-۴- نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ۹۰
- ۵-۵- نتایج شبیه‌سازی المان محدود ۹۰
- ۵-۶- پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۹۱

پیوست الف: مدل‌سازی تیر ساندویچی کامپوزیتی ۹۳

- پیوست الف-۱- مقدمه ۹۴
- پیوست الف-۲- مدل‌سازی پوسته کامپوزیتی و هسته ۹۴
- پیوست الف-۳- خواص مواد ۹۵
- پیوست الف-۴- مونتاژ کردن رویه کامپوزیتی و هسته ۹۷
- پیوست الف-۵- تعیین گام ۹۸
- پیوست الف-۶- تعامل سطوح ۹۹
- پیوست الف-۷- شرایط مرزی و بارگذاری ۱۰۰
- پیوست الف-۸- مش بندی ۱۰۲
- پیوست الف-۹- اجرای پردازش شبیه‌سازی ۱۰۲
- پیوست الف-۱۰- نتیجه‌گیری ۱۰۴

مراجع ۱۰۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) تاثیر شرایط مرزی بر بار بحرانی کمانش ۹
- جدول (۲-۱) فرکانس و ضریب سختی تیر یک سر گیردار ۱۰
- جدول (۱-۳) مشخصات فوم PVC استفاده شده در هسته ۳۶
- جدول (۲-۳) خواص نانو ذره خاک رس استفاده شده ۳۸
- جدول (۳-۳) مشخصات فنی دستگاه شیکر الکترو دینامیکی هوا خنک ASVS ۴۵
- جدول (۱-۴) مدول الاستیک نمونه های آزمون کشش شیشه / اپوکسی ۵۹
- جدول (۲-۴) مقادیر فرکانس های طبیعی مد اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی ۶۸
- جدول (۳-۴) مقادیر فرکانس های طبیعی مد اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته زیگزاگی حاوی درصدهای مختلف نانورس ۶۹
- جدول (۴-۴) مقادیر فرکانس های تشدید مد دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی ۷۰
- جدول (۵-۴) مقادیر فرکانس های تشدید مد دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف نانو ذرات ۷۱
- جدول (۶-۴) مقادیر بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته ساده و زیگزاگی (N) ۷۵
- جدول (۷-۴) مقادیر بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی حاوی درصدهای وزنی مختلف نانو رس (N) ۷۶
- جدول (۸-۴) مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی نمونه های ساندویچی با هسته ساده ۸۳
- جدول (۹-۴) مقایسه نتایج آزمایشگاهی ستون ساندویچی با تغییر در چینش الیاف شیشه ۸۳

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) نمونه‌ای از ساندویچ پنل‌های صنعتی، رویه فلزی و هسته فوم ۲
- شکل (۲-۱) پوسته یک تکه پهباد ۳
- شکل (۳-۱) شماتیک یک ساختار ساندویچی ۵
- شکل (۴-۱) ساختار ساندویچ پانل لانه زنبوری ۶
- شکل (۵-۱) کاربرد ساختارهای ساندویچی در مسافری A-320 ۷
- شکل (۶-۱) کاربرد ساختارهای ساندویچی در صنعتی کشتی سازی و قایق سازی ۷
- شکل (۷-۱) کاربرد ساختار ساندویچی در باله توربین بادی ۸
- شکل (۸-۱) کمانش پوسته بدنه هواپیما Delta-757 ۸
- شکل (۹-۱) پل "تاکوما" ۱۰
- شکل (۱۰-۱) به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی بال هواپیمای تک‌نفره ۱۰
- شکل (۱۱-۱) شماتیک روش لایه‌چینی دستی ۱۱
- شکل (۱۲-۱) شماتیک فرایند VARTM ۱۲
- شکل (۱۳-۱) نانو ذرات رس ۱۳
- شکل (۱۴-۱) نانو لوله کربن ساده و پیچشی ۱۳
- شکل (۱۵-۱) تصویر نانو ذرات گرافن ۱۴
- شکل (۱-۲) تیر ساندویچی با هسته لانه زنبوری ترکیبی موج‌دار ۲۵
- شکل (۱-۳) فوم PVC به کار رفته در نمونه ۳۷
- شکل (۲-۳) الیاف شیشه نوع E-glass تک جهته مورد استفاده در ساخت رویه ساندویچ پانل ۳۷
- شکل (۳-۳) نانو رس مونتمریلونیت ۳۸
- شکل (۴-۳) بسته ۱۰۰ گرمی نانو ذره خاک رس مونتمریلونیت شرکت سیگما آمریکا ۳۹
- شکل (۵-۳) نمد پارچه‌ای جذب کننده رزین ۳۹
- شکل (۶-۳) پارچه آستری جدا کنند ۴۰
- شکل (۷-۳) اسپری سیلیکونی جدا کننده رزین از پارچه آستری ۴۰
- شکل (۸-۳) کیسه خلاء ۴۱
- شکل (۹-۳) نوار سیل وکیوم ۴۱
- شکل (۱۰-۳) پمپ خلاء ۴۲
- شکل (۱۱-۳) ظرف دسیکاتور خلاء ۴۲
- شکل (۱۲-۳) ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ ۴۳
- شکل (۱۳-۳) پراب آلتراسونیک ۴۳
- شکل (۱۴-۳) همزن مغناطیسی در سمت راست و همزن مکانیکی در سمت چپ قرار دارد ۴۴
- شکل (۱۵-۳) دستگاه ارّه برش ۴۴

- شکل (۳-۱۷) تجهیزات پردازش اطلاعات و دستگاه شیکر ۴۶
- شکل (۳-۱۷) فیکسچر متحرک ساخته شده ۴۶
- شکل (۳-۱۸) نمایی از ترتیب چینش لایه‌ها در روش لایه گذاری دستی ۴۷
- شکل (۳-۱۹) تجهیزات مورد استفاده در ساخت نمونه کامپوزیتی ۴۸
- شکل (۳-۲۰) وکیوم نمونه ساندویچی با پمپ خلأ ۴۹
- شکل (۳-۲۱) هسته ساده و هسته زیگزاگی تیر ساندویچی ساخته شده ۵۰
- شکل (۳-۲۲) نمونه‌های پنل ساندویچی ۵۰
- شکل (۳-۲۳) دستگاه سنتام تست کشش پوسته کامپوزیتی شیشه/اپوکسی ۵۱
- شکل (۳-۲۴) محاسبه فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی کامپوزیتی توسط شیکر و سنسور شتاب سنج ۵۲
- شکل (۳-۲۵) ستون ساندویچی کامپوزیتی در حال آزمایش فشار محوری ۵۳
- شکل (۴-۱) نمونه‌های تست کشش شیشه/اپوکسی ۵۶
- شکل (۴-۲) نمودار تنش-کرنش تست کشش الیاف شیشه/اپوکسی در راستای ۰ درجه ۵۷
- شکل (۴-۳) نمودار تست کشش الیاف شیشه/اپوکسی در راستای ۴۵ درجه ۵۷
- شکل (۴-۴) نمودار تست کشش الیاف شیشه/اپوکسی در راستای ۹۰ درجه ۵۸
- شکل (۴-۵) نمونه‌های شکسته شده آزمون کشش، نمونه ۰ درجه، نمونه ۴۵ درجه و نمونه ۹۰ درجه ۵۸
- شکل (۴-۶) نمودار فرکانس‌های طبیعی نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی/الیاف شیشه ۶۰
- شکل (۴-۷) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی/الیاف شیشه ۶۱
- شکل (۴-۸) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد دوم نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی/الیاف شیشه ۶۱
- شکل (۴-۹) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد سوم نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی/الیاف شیشه ۶۲
- شکل (۴-۱۰) نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۶۲
- شکل (۴-۱۱) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۶۳
- شکل (۴-۱۲) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد دوم تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۶۳
- شکل (۴-۱۳) نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانو ذره ۶۴
- شکل (۴-۱۴) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانو ذره ۶۴

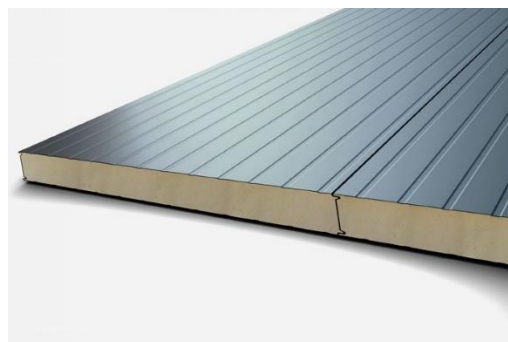
- شکل (۴-۱۵) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی،
۳٪ وزنی نانو ذره ۶۵
- شکل (۴-۱۶) نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪ وزنی
نانو ذره ۶۵
- شکل (۴-۱۷) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪
وزنی نانو ذره ۶۶
- شکل (۴-۱۸) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی،
۵٪ وزنی نانو ذره ۶۶
- شکل (۴-۱۹) نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪ وزنی
نانو ذره ۶۷
- شکل (۴-۲۰) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪
وزنی نانو ذره ۶۷
- شکل (۴-۲۱) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی،
۷٪ وزنی نانو ذره ۶۸
- شکل (۴-۲۲) نمودار فرکانس‌های طبیعی مد اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه با
هسته ساده و هسته زیگزاگی و افزودن نانو خاک رس ۷۰
- شکل (۴-۲۳) نمودار فرکانس‌های مد دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته ساده
و هسته زیگزاگی و افزودن نانو خاک رس ۷۲
- شکل (۴-۲۴) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته فومی ساده،
بدون افزودن نانو ذره ۷۳
- شکل (۴-۲۵) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، بدون
افزودن نانو ذره ۷۳
- شکل (۴-۲۶) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪
وزنی نانو رس ۷۴
- شکل (۴-۲۷) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪
وزنی نانو رس ۷۴
- شکل (۴-۲۸) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪
وزنی نانو رس ۷۵
- شکل (۴-۲۹) نمودار بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته
زیگزاگی و افزودن نانو رس ۷۷
- شکل (۴-۳۰) نمودار انرژی ذخیره شده تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته
زیگزاگی با درصدهای مختلف وزنی نانو رس ۷۷
- شکل (۴-۳۱) شکست الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه / اپوکسی • درصد وزنی نانو رس ۷۹

- شکل (۴-۳۲) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۳ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس. ۸۰
- شکل (۴-۳۳) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۵ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس. ۸۱
- شکل (۴-۳۴) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۷ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس. ۸۲
- شکل (۴-۳۵) کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۰/۰/۰ ۸۴
- شکل (۴-۳۶) کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۴۵/۰/۰+۴۵- ۸۴
- شکل (۴-۳۷) کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۰/۹۰/۰ ۸۵
- شکل (۴-۳۸) کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۹۰/۰/۹۰ ۸۵
- شکل (۴-۳۹) مد اول فرکانس طبیعی تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده ۸۵
- شکل (۴-۴۰) مد دوم فرکانس تشدید تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده ۸۶
- شکل (الف-۱) مدل سازی هسته فومی تیر ساندویچی در فضای ۳ بعدی با هسته ساده در قسمت Part ۹۴..
- شکل (الف-۲) تعیین خواص مواد کامپوزیت شیشه/اپوکسی در قسمت Property ۹۵
- شکل (الف-۳) نسبت دادن خواص مواد و تعریف تعداد لایه‌های کامپوزیت ۹۶
- شکل (الف-۴) مونتاژ قطعه‌های تعریف شده در ماژول Assembly ۹۷
- شکل (الف-۵) الف- تعریف گام برای آزمون ارتعاش ب- تعریف گام برای آزمون کمانش ۹۸
- شکل (الف-۶) الف- تنظیمات گام محاسبه مقادیر کمانشی ب- تنظیمات گام محاسبه مقادیر فرکانسی ۹۹
- شکل (الف-۷) تیر ساندویچی تعریف شده با قید Tie ۱۰۰
- شکل (الف-۸) الف- تعیین شرایط مرزی ب- تعیین نیروی متمرکز محوری ۱۰۱
- شکل (الف-۹) مش بندی خودکار تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده ۱۰۲
- شکل (الف-۱۰) اجرای مراحل پردازش شبیه سازی در ماژول Job ۱۰۳
- شکل (الف-۱۱) نتیجه کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی ۱۰۳
- شکل (الف-۱۲) نتیجه ارتعاشی تیر ساندویچی کامپوزیتی ۱۰۳

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

ساندویچ پانل‌ها^۱ اجزای اصلی در بسیاری از سازه‌ها مانند وسایل نقلیه فضایی، هواپیماها، اتومبیل‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها هستند. ساختارهای ساندویچی از دو صفحه نازک، سفت و مستحکم تشکیل شده‌اند که توسط هسته ضخیم با چگالی کم از هم جدا می‌شوند، شکل (۱-۱) شماتیک ساختار ساندویچی با پوسته مقاوم و هسته فوم را نشان می‌دهد. پانل‌های ساندویچی در مقایسه با ساختارهای یک‌پارچه ضخیم با همان ابعاد، نسبت سفتی و استحکام به وزن بالایی دارند. به همین دلیل از ساختارهای ساندویچی به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا، دریایی و حمل و نقل استفاده می‌شود. به ویژه ساندویچ پانل‌های با هسته فوم، توانایی جذب انرژی بالایی در برابر ضربه را دارند. در ساختار هواپیماها معمولاً از ساندویچ پانل با رویه فلزی و هسته فلزی لانه زنبوری یا هسته‌های فلزی دوزنقه‌ای شکل استفاده می‌شود. یک پانل ساندویچی کامپوزیتی، وزن کمتری نسبت به یک پانل مواد فلزی با همان بارها و شرایط مرزی دارند، همچنین مواد کامپوزیتی در برابر خوردگی مقاومت بیشتری دارند [۱].



شکل (۱-۱): نمونه‌ای از ساندویچ پانل‌های صنعتی، رویه فلزی و هسته فوم [۲].

۱-۲- کامپوزیت‌ها

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی و ساختمان‌سازی به ترکیب کردن مواد نیاز است و امکان استفاده از یک ماده‌ای که همه خواص را به صورت یک‌جا داشته باشد، وجود ندارد؛ به عنوان مثال در صنایع هوافضا به ساخت سازه‌ای نیاز است که در ضمن داشتن مقاومت بالا، تا حد ممکن سبک بوده و

استحکام بالایی داشته باشند و در دماهای زیاد دچار شکست نشوند. بنابراین باید به دنبال روشی برای ترکیب مواد و به دست آوردن خواص مورد نیاز بود. یک راه حل، استفاده از مواد مرکب یا کامپوزیت می باشد. مواد مرکب از ترکیب دو یا چند ماده با یکدیگر به طوری که به صورت شیمیایی مجزا و غیر محلول در یکدیگر باشند و بازده و خواص سازه‌ای این ترکیب نسبت به هریک از اجزاء تشکیل دهنده آن به تنهایی، در موقعیت برتری قرار بگیرد، گفته می شود. کامپوزیت‌ها انواع مختلفی دارند، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، زمینه فلزی و زمینه سرامیکی. کامپوزیت لایه‌ای یک کامپوزیت زمینه پلیمری است که از دو یا چند ماده ساخته می شود. کامپوزیت‌های لایه‌ای از ترکیب الیاف و ماتریس حاصل شده‌اند. در شکل (۱-۲) نمایی از پوسته کامپوزیتی یک پهباد نشان داده شده است که از نوع کامپوزیت لایه‌ای می باشد.



شکل (۱-۲): پوسته یک تکه پهباد [۳].

۱-۲-۱- مزایای کامپوزیت‌ها

برخی از خواص کامپوزیت‌ها را با طراحی مناسب می توان بهبود داد که این خواص عبارتند از:

الف- کامپوزیت‌ها دارای وزن سبک بوده و مقاومت بالایی در برابر تغییر شکل سازه‌ها دارند.

ب- استحکام بالا نسبت به جرم ماده: با توزیع تقویت کننده‌های مناسب در ساختار مواد مرکب می توان مقدار نسبت استحکام قطعات به جرم حجمی آن‌ها را تا ۵ برابر این مقدار در فلزاتی مانند فولاد و آلومینیوم افزایش داد.

پ- مقاومت خستگی: مقاومت خستگی فلزاتی مانند فولاد و آلومینیوم ۵۰ درصد کم‌تر از مقاومت استاتیکی آن‌ها است در صورتی که در برخی از مواد مرکب، مقاومت خستگی را می‌توان تا ۹۰ درصد مقاومت استاتیکی افزایش داد.

ت- مقاومت خوردگی.

ث- انعطاف پذیری در طراحی مواد.

ج- قابلیت طراحی مواد کامپوزیتی مطابق با شرایط تولید و مونتاژ.

چ- قابلیت جذب انرژی: تقویت کننده‌های مانند کولار و شیشه انرژی زیادی برای تغییر شکل نیاز دارند. کامپوزیت‌هایی که با این مواد درست می‌شوند ظرفیت تحمل بالایی در برابر بارهای ضربه‌ای دارند.

ح- جاذب ارتعاش: اغلب مواد کامپوزیتی بهتر از فلزها ارتعاشات ایجاد شده را میرا می‌کنند، به همین دلیل به این مواد در تجهیزات با اجزای متحرک توجه زیادی می‌شود.

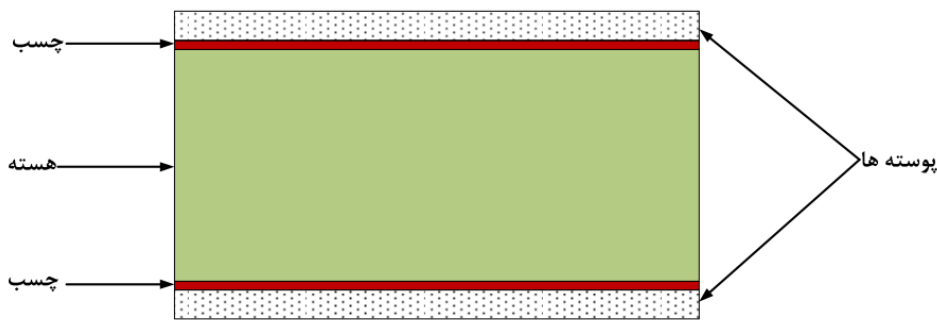
خ- هزینه کم ابزارهای تولید.

د- امکان ساخت قطعه‌ها با هندسه پیچیده.

ذ- ساخت مواد هوشمند [۴].

۳-۱- ساختارهای ساندویچی

ساده‌ترین نوع ساندویچ شامل دو ورق نازک، سفت و محکم از مواد متراکم است که توسط یک لایه ضخیم از ماده با چگالی کم از هم جدا شده اند که ممکن است بسیار سفت و محکم باشد. شکل (۳-۱) این ساختار ساندویچی را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۱): شماتیک یک ساختار ساندویچی [۵].

۱-۳-۱- رویه

رویه‌های لایه ساندویچی از استحکام کششی و فشاری بالایی برخوردار است. همچنین در برابر ضربه، سایش و عوامل محیطی بسیار پایدار می‌باشد. جنس رویه‌ها معمولاً از مواد فلزی یا کامپوزیتی تشکیل شده است که با توجه به نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶].

۱-۳-۲- هسته

لایه میانی در ساختار ساندویچ هسته نام دارد. هسته‌ها دارای وزن سبک، چگالی کم و مقاوم در برابر ضربه هستند. هسته‌ها انواع مختلفی دارند که از نظر همگن یا ناهمگن بودن به دو دسته تقسیم می‌شوند.

۱-۳-۲-۱- هسته همگن

هسته همگن به موادی گفته می‌شود که در هر نقطه خواص یکسانی از خود نشان می‌دهند. هسته‌های فوم PVC و فوم پلی استر از هسته‌های همگن هستند که با چگالی‌های مختلف با توجه به کاربرد مصرف می‌شوند. فوم‌های PVC در مقایسه با مواد فلزی و چوب بالسا ماده‌ای کم هزینه می‌باشند.

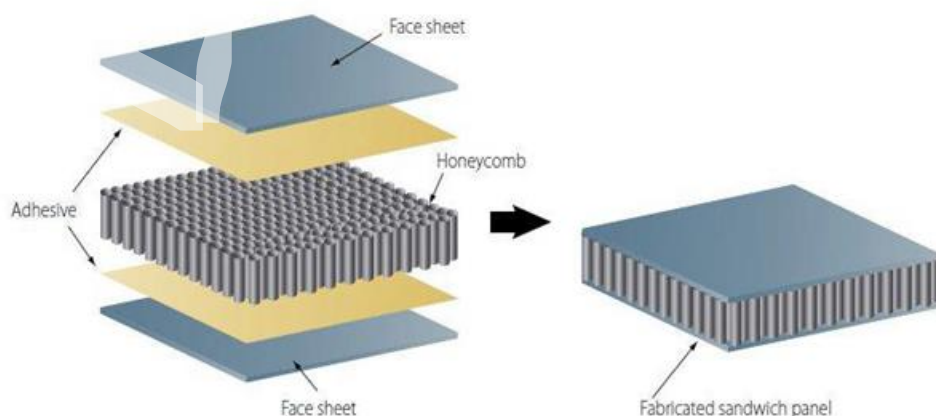
موارد استفاده فوم PCV :

- دریایی: بدنه، عرشه، تیغه‌ها، فضای داخلی.
- جاده و راه آهن: پانل های سقف، فضای داخلی، کف، درها، دیوارهای پارتیشن.
- انرژی باد: تیغه‌های روتور، محفظه های ژنراتور توربین.

- هواپیما و هوافضا: قسمت‌های داخلی، بدنه و بال.
- تفریح: اسکی، استوبرد، تخته موج سواری، قایق رانی، کایت.
- صنعتی: ابزارآلات، مخازن، لوله کشی، ظروف، روکش.

۱-۳-۲-۲- هسته ناهمگن

مواد ناهمگن موادی هستند که در هر نقطه خواص متفاوتی دارند. هسته‌های ناهمگن شکل‌های مختلفی دارند و معمولاً به صورت فلزی هستند و استحکام بسیار بالا و وزن کمی دارند. هسته بالسا، لانه زنبوری و هسته موج‌دار دوزنقه‌ای شکل از نمونه‌های متداول هسته‌های ناهمگن می‌باشد. هسته موج‌دار دوزنقه‌ای شکل به طور متناوب به پوسته بالا و پایین متصل می‌شود. شکل (۴-۱) ساختار ساندویچی لانه زنبوری را نشان می‌دهد.

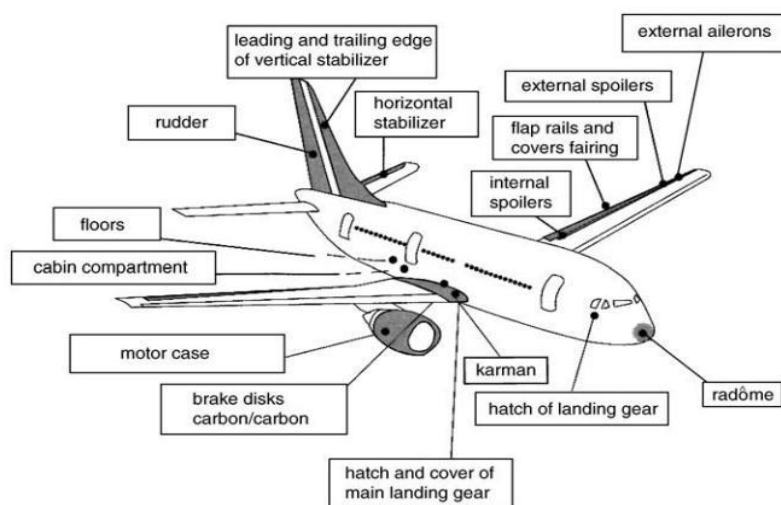


شکل (۴-۱): ساختار ساندویچ پانل لانه زنبوری [۳].

۱-۴- کاربرد پانل‌های ساندویچی

مهمترین دلیل استفاده از پانل‌های ساندویچی سبک بودن وزن سازه نسبت به استحکام و قیمت ارزان آن است. از پانل‌های ساندویچی به عنوان عایق حرارت، عایق صوتی، اجزای داخلی و بال هواپیما، آب بند و... استفاده می‌شود. امروزه در اکثر هواپیماها، بالگردهای تجاری، بسیاری از وسایل هوافضایی، نظامی، بسیاری از اجزاء از قبیل بال‌ها، ملخ‌ها، فلپ‌ها، شهرها، سکان‌های عمودی و افقی از ساختارهای ساندویچی استفاده

شده است. در شکل (۵-۱) کاربرد ساختارهای ساندویچی در هواپیمای مسافربری A-320 مشاهده می‌شود. همچنین پانل‌های ساندویچی در صنعت کشتی سازی کاربرد بسیار زیادی دارد به طوریکه بدنه قایق‌های شخصی و کوچک کاملاً از کامپوزیت می‌باشد. در شکل (۶-۱) نمونه کشتی شخصی ساخته شده از مواد کامپوزیتی نشان داده شده است. همچنین استفاده از ساندویچ پانل‌ها با هسته فوم در صنعت توربین‌های بادی بسیار گسترده می‌باشد به طوری که بسیاری از مراکز دانشگاهی در رابطه با بهبود استحکام و سبک‌تر کردن سازه‌های ساندویچی تحقیق می‌کنند. در شکل (۷-۱) قطعه‌ای از یک پره توربین بادی نشان داده شده است که شامل پوسته کامپوزیتی و هسته فوم می‌باشد.



شکل (۵-۱): کاربرد ساختارهای ساندویچی در مسافربری A-320 [۷].



شکل (۶-۱): کاربرد ساختارهای ساندویچی در صنعتی کشتی سازی و قایق سازی [۸].



شکل (۷-۱): کاربرد ساختار ساندویچی در باله توربین بادی [۹].

۵-۱- اهمیت کمانش در سازه‌ها

کمانش رفتاری است که اعضای تحت فشار ممکن است از خود نشان دهند که به صورت تغییر شکل جانبی ناگهانی در اعضای سازه‌ای رخ می‌دهد. رفتار کمانشی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که هنگام طراحی اعضای سازه‌ها مانند ستون‌ها و پوسته‌ها باید مورد توجه قرار بگیرد. بحث کمانش در کامپوزیت‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به عنوان مثال کمانش سازه‌های ساندویچی در ساختمان‌های آماده و کمانش بدنه هواپیما از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. میزان بار فشاری که باعث ناپایدار شدن تیر یا صفحه شود بار بحرانی کمانش نام دارد. در جدول (۱-۱) زیر بار بحرانی ستون با شرایط مرزی مختلف ذکر شده است. در شکل (۸-۱) کمانش پوسته بدنه هواپیمای Delta-757 در اثر فرود ایجاد شده نشان داده شده است.



شکل (۸-۱): کمانش پوسته بدنه هواپیما Delta-757 [۱۰].

جدول (۱-۱): تاثیر شرایط مرزی بر بار بحرانی کمانش [۱۱].

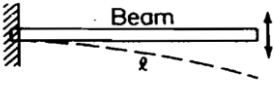
شرایط مرزی	بار بحرانی کمانش	شکل مود	طول موثر (KL)
ساده-ساده	$\frac{\pi^2 EI}{L^2}$		L
گیردار-گیردار	$\frac{4\pi^2 EI}{L^2}$		$L \frac{1}{2}$
ساده-گیردار	$\frac{2/04\pi^2 EI}{L^2}$		0/7L

۱-۶- اهمیت ارتعاش در سازه‌ها

ارتعاشات به چهار دسته آزاد، اجباری، میرا و نامیرا تقسیم می‌شوند [۱۲]. ارتعاش آزاد زمانی اتفاق می‌افتد که یک سیستم مکانیکی با یک ورودی ابتدایی به نوسان در می‌آید و سپس اجازه داده می‌شود تا آزادانه نوسان کند مانند عقب کشیدن یک تاب و رها کردن آن تا آزادانه نوسان کند. ارتعاش اجباری به ارتعاشی گفته می‌شود که در آن سیستم، تحت یک نیروی متغیر خارجی مانند طوفان یا زلزله نوسان می‌کند. ارتعاش بال هواپیما نمونه‌ای از ارتعاش اجباری تیر یک‌سر گیردار می‌باشد. ارتعاش میرا بعد از مدتی متوقف شده و ارتعاش نامیرا بدون وقفه به نوسان خود ادامه می‌دهد. با توجه به استفاده گسترده کامپوزیت‌ها و ساختارهای ساندویچی در ساختار هواپیماها، ماشین‌ها و ساختمان‌ها لازم است که رفتار ارتعاشی آن‌ها مورد بررسی قرار بگیرد. جدول زیر ضریب سختی و فرکانس تیر یک‌سر گیردار را تحت ارتعاش عرضی نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۱-۹) پل تاکوما نشان داده شده است که در سال ۱۹۴۰ توسط بادی با سرعت ۶۴ کیلومتر در ساعت به ارتعاش درآمد [۱۲]. در واقع یکی بودن فرکانس باد و فرکانس طبیعی پل، پدیده تشدید را به وجود آورد و با افزایش دامنه نوسان پل، تخریب آن را در پی داشته است. زمانی که فرکانس‌های طبیعی با فرکانس‌های تحریک یکی شوند پدیده تشدید رخ می‌دهد که باعث خرابی سازه می‌شود. در شکل (۱-۱۰) به جهت جلوگیری از خرابی‌های ناشی از ارتعاش بال در شرایط پرواز، فرکانس‌های طبیعی بال در آزمایشگاه توسط دستگاه شیکر و سنسور شتاب سنج به دست می‌آیند. در جدول (۱-۲) با

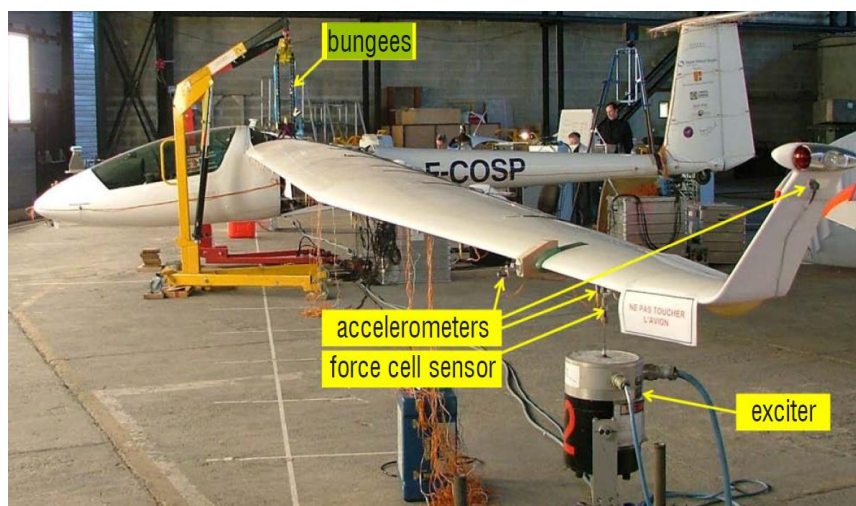
توجه به شرایط مرزی تیر یک سر گیردار ، رابطه‌ی فرکانس مود اول و ضریب سختی تیر به همراه شکل مود اول نشان داده شده است.

جدول (۲-۱): فرکانس و ضریب سختی تیر یک سر گیردار [۱۲].

شرایط مرزی	فرکانس	ضریب سختی	شکل مود
گیردار-آزاد	$W_1 = 3.52 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	$K = \frac{3EI}{L^3}$	



شکل (۹-۱): پل تاکوما که در سال ۱۹۴۰ توسط بادی با سرعت ۶۴ کیلومتر در ساعت به ارتعاش درآمد [۱۲].



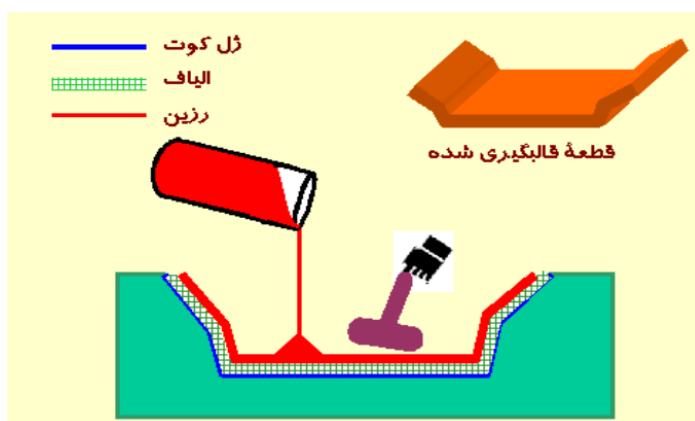
شکل (۱۰-۱): به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی بال هواپیمای تک نفره [۱۳].

۷-۱- روش‌های ساخت کامپوزیت

۱-۷-۱- روش لایه چینی دستی^۱

قالب‌گیری به روش دستی متداول‌ترین روش تولید قطعه‌های کامپوزیتی می‌باشد. از این روش تولید برای ساخت قطعات مواد مرکب چند لایه استفاده می‌شود، شکل (۱-۱۱) فرآیند قالب‌گیری به روش دستی نشان داده شده است. ماده اولیه به صورت تک لایه‌هایی از الیاف است که با رزین آغشته شده و با حرارت کم و گذشت چند ساعت، اتصال بین رزین و الیاف برقرار می‌شود. این روش هنوز هم به دلایل زیر در ساخت قطعه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- داشتن قواعد ساده برای آموختن
- عدم نیاز به ابزارهای گران‌قیمت
- کنترل بهتر بر فرایند ساخت
- جلوگیری راحت‌تر از هدررفت رزین [۱۴].

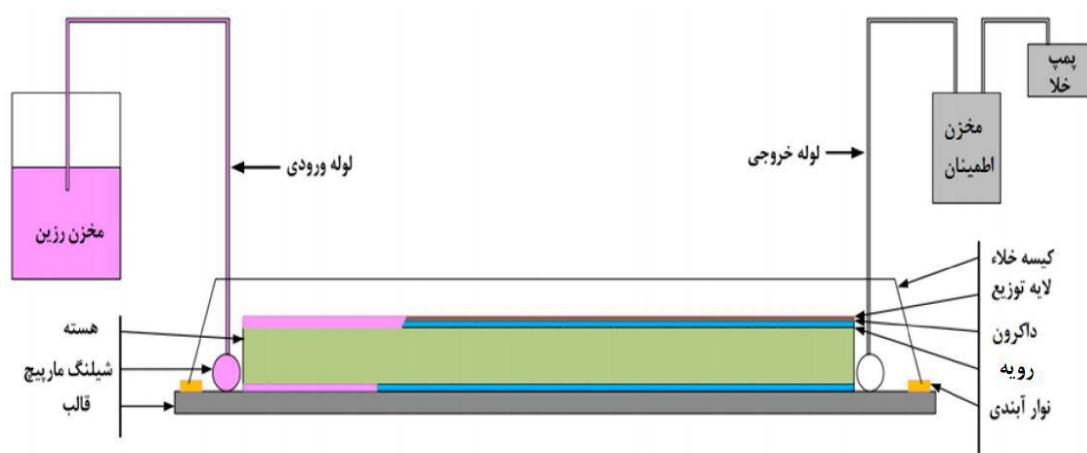


شکل (۱-۱۱): شماتیک روش لایه‌چینی دستی [۱۴].

۱-۷-۲- روش تزریق رزین به کمک خلاء^۱

در این روش پارچه الیاف در قالب مورد نظر قرار داده می‌شود و با بسته شدن قالب شکل مورد نظر در الیاف ایجاد می‌شود. سپس ماده زمینه با فشار از یک یا چند کانال به داخل قالب و در بین پارچه الیاف شکل داده شده تزریق می‌شود. مورد مهم در ساخت قطعه با این روش نحوه جریان رزین در بین رشته‌های الیاف می‌باشد. قطعه‌ای که با این روش درست می‌شود سطوح داخلی و خارجی آن پرداخت مناسبی دارد [۱۵].

شکل (۱-۱۲) فرآیند تزریق رزین به کمک خلاء را نشان می‌دهد.



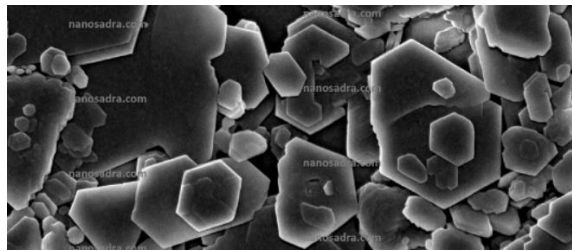
شکل (۱-۱۲): شماتیک فرآیند تزریق رزین به کمک خلاء [۱۵].

۱-۸- نانوذرات

امروزه نانو فناوری به منظور افزایش ظرفیت‌ها و قابلیت‌ها در بسیاری از علوم استفاده می‌شود. علم نانو نیز در حوزه‌های مختلف مکانیک از جمله، تغییرات خواص مکانیکی، حرارتی، آنالیز ارتعاشی، مکانیک سیالات و غیره بررسی می‌شود. نانو ذرات انواع مختلفی دارند و به عنوان تقویت کننده در مایع زمینه ماتریس مخلوط می‌شوند. انواع نانو ذرات در صنعت وجود دارد که با توجه به قیمت و کارایی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در ادامه چند نمونه از نانو ذرات و خواص آن‌ها ذکر شده‌اند [۱۶]:

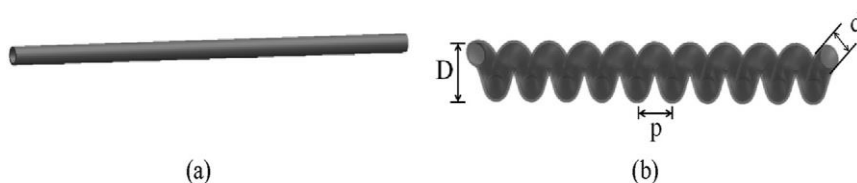
1. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

- نانو رس^۱: نانو رس به صورت صفحه‌های شکسته شده رس می‌باشد و رنگی مانند خاک رس دارد. دلیل استفاده از آن در صنایع مختلف قیمت به صرفه، در دسترس بودن و همچنین چقرمگی بالا نیز می‌باشد. این نانو رس‌ها دارای صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند که حدوداً یک نانومتر ضخامت و ۱۰۰ نانومتر قطر دارند. در شکل (۱-۱۳) نانو ذرات رس مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۱۳): نانو ذرات رس [۱۷].

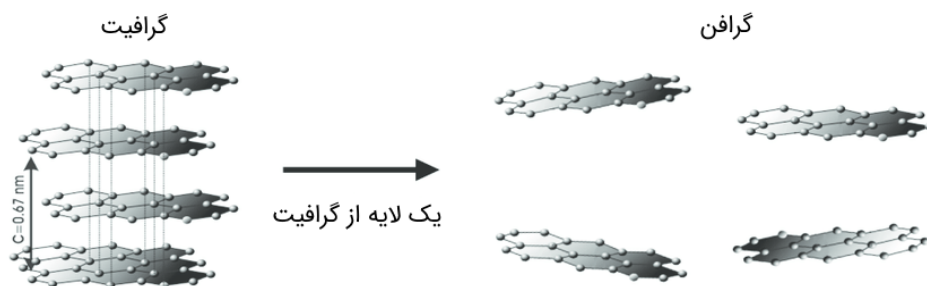
- نانو لوله کربنی^۲ (CNTs): نانو لوله کربنی به شکل لوله‌های تو پر صاف و پیچشی می‌باشند که خواص چسبندگی بین ماتریس و الیاف را بهبود می‌دهند، با توجه به قیمت گران فقط در صنایع حساس مانند صنعت هوافضا کاربرد دارد. همچنین استحکام ماتریس ترکیب شده با نانو لوله به دلیل رشته‌ای بودن ذرات نسبت به سایر نانو ذرات بیشتر می‌باشد. شکل (۱-۱۴) تصویر نانو لوله کربنی صاف و پیچشی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱۴): نانو لوله کربن ساده و پیچشی [۵۸].

- نانو ذره گرافن^۳: گرافن ورقه‌ای دو بعدی از اتم‌های کربن است که در یک پیکربندی شش ضلعی می‌باشد. گرافن جدیدترین عضو خانواده مواد کربنی گرافیتی چند بعدی است. صفحات گرافن با کنار هم قرار گرفتن گرافیت را تشکیل می‌دهند. شکل (۱-۱۵) نانو ذرات گرافن را نشان می‌دهد.

1. Nano Clay
2. Carbon nanotube
3. Graphene nanoparticles



شکل (۱-۱۵): تصویر نانو ذرات گرافن [۱۷].

۹-۱- اپوکسی

مواد پلیمری مورد استفاده در زمینه مواد مرکب به دو دسته مواد گرمانرم^۱ و گرماسخت^۲ تقسیم می‌شوند. در مواد گرماسخت پس از حرارت دهی و اجرای عملیات پخت، پیوند شیمیایی برگشت ناپذیری ایجاد می‌شود به طوری که این مواد با حرارت دهی مجدد ذوب نمی‌شوند. مواد گرمانرم موادی هستند که با حرارت دهی ذوب می‌شوند و خاصیت برگشت پذیر نیز دارند. یعنی با سرد کردن مجدد دوباره به فاز جامد تبدیل می‌شوند. رزین‌های اپوکسی^۳، پلی استر^۴ و وینیل استر^۵ از مواد گرماسخت هستند. رزین‌ها انواع مختلفی دارند و به صورت دو جزئی و سه جزئی موجود می‌باشند. در قسمت پایین چند مورد از خواص رزین اپوکسی ذکر شده است:

- مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی و خورنده
- ویسکوزیته کم مواد اولیه و آغشته سازی آسان الیاف به این مواد
- قیمت کم در مقایسه با مواد گرمانرم
- دمای کم اجرای عملیات پخت مواد [۱۴].

-
1. Thermo Plastic
 2. Thermoset
 3. Epoxy
 4. Polyester
 5. Vinyl Ester

۱-۱۰- ساختار تحقیق

در این پژوهش مطالب موجود به ترتیب زیر سازماندهی شده اند:

در فصل اول به تعریف کامپوزیت‌ها، ساندویچ پانل‌ها، ساختار این نوع از کامپوزیت‌ها و اهمیت کمانش و ارتعاش در سازه‌های ساندویچی پرداخته شده است. در فصل دوم به بررسی تاریخیچه تحقیق پرداخته و نتایج مقالات مطالعه شده مورد بحث قرار گرفته است. در فصل سوم مواد اولیه به کار رفته در ساخت، روش‌های ساخت، تجهیزات مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش‌های ارتعاش و کمانش به طور کامل شرح داده شده است. در فصل چهارم نتایج و نمودارهای بدست آمده از آزمایش‌ها بررسی و نتایج با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مقایسه شده است. همچنین تصاویر الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم نتایج نهایی حاصل از پژوهش و پیشنهادهایی برای ادامه کار بیان شده است.

فصل دوم: مروری بر تاریخچه تحقیق

۲-۱- مروری بر پژوهش‌های انجام شده

در این قسمت پژوهش‌های مرتبط با ستون‌ها و تیرهای ساندویچی، بررسی رفتار ارتعاشی و کمانشی آن‌ها و تأثیر افزودن نانو ذرات به ماده زمینه مطالعه شده است.

۲-۱-۱- پژوهش‌های مرتبط با کمانش

ده‌آبادی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۵، رفتار ساختارهای ساندویچی را با رویه‌هایی از جنس کامپوزیت الیاف شیشه و هسته PVC تشکیل شده از فوم و چند لایه‌های کامپوزیتی موج‌دار، تحت فشار محوری به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها سه شکل موج مربعی، مثلثی و دوزنقه‌ای را برای چند لایه کامپوزیتی وسط هسته در نظر گرفتند و نتایج را با هسته ساده مقایسه کردند. بیشترین استحکام فشاری در هسته مربعی با ۳۶۲/۳۷٪ نسبت به هسته ساده اتفاق افتاد.

بهابادی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۸، جدایش بین رویه و هسته سازه ساندویچی تحت بارگذاری خمشی استاتیکی با رویه کامپوزیتی و هسته ترکیبی از جنس فوم PVC و یک چند لایه کامپوزیتی موج‌دار با هندسه مربعی را مورد پژوهش قرار دادند. آن‌ها با ایجاد ترک اولیه در هر یک از نمونه‌ها، مقادیر جدایش را با نمونه هسته ساده مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های مربعی با رویه سه و شش لایه، لایه رویه‌ی بالایی هسته قبل از جدا شدن از هسته شکسته شد و نمونه‌ی مربعی با رویه‌ی هشت لایه تا قبل از جدایش بیشترین فشار را تحمل کرد که نسبت به نمونه با هسته ساده ۲۶۹/۲۶٪ افزایش داشته است.

باغجقاز و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۵، رفتار کمانشی صفحات الیاف-فلز^۱ با هسته کامپوزیتی هشت لایه الیاف شیشه و جوت^۲ را با ترتیب چینش مختلف مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که نمونه هیبریدی با ترتیب چینش شیشه/جوت/شیشه/جوت/شیشه بیشترین استحکام فشاری (MPa ۱۰۲/۱) و انرژی جذب

1. Fiber method laminate (FML)

2. Jute

شده ویژه ($1123/6 \text{ KJ/KG}$) را در آزمون فشار لبه‌ای دارد. از طرفی آن‌ها نتیجه گرفتند چسبندگی شیشه به آلومینیوم بیشتر از جوت می‌باشد.

آزادی و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۵، در مطالعه‌ی خود تاثیر سه متغیر (زاویه چینش الیاف، درصد نانورس و درصد نانو لوله کربنی) را از روش تاگوچی^۱، برای بدست آوردن بار بحرانی کمانشی نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن با هم مقایسه کردند. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون، بیشترین بار بحرانی کمانش در چینش الیاف صفر درجه و ترکیب ۱ درصد وزنی نانو لوله کربنی و ۰/۵ درصد وزنی نانورس بود. کمترین استحکام بار کمانشی هم در ۱/۵ درصد وزنی نانو لوله کربنی و ۳/۵ درصد وزنی نانورس در زاویه ۳۰ درجه اتفاق افتاد. نتایج بدست آمده نشان دادند که زاویه چینش الیاف کربن به عنوان اولین پارامتر تأثیرگذار و بعد از آن نانو لوله کربنی و نانورس به ترتیب تأثیرگذار می‌باشند.

رستمیان و آزادی [۲۲] در سال ۲۰۱۶، به بررسی رفتار کمانشی صفحه‌های نانو کامپوزیتی هیبریدی تقویت شده با نانو ذرات رس و سیلیکا پرداخته‌اند. نمونه‌ها با ۱۶ لایه الیاف کربن در جهت‌های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ساخته شدند. آنها از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و بهینه سازی سه عامل ورودی (نانو سیلیکا، نانورس و جهت الیاف فیبر کربن) استفاده کردند. از نتایج مشخص شد که بیشترین مقاومت کمانشی مربوط به نمونه‌هایی با جهت الیاف ۰ درجه و حداقل مقاومت متعلق به ورقه‌های کامپوزیتی با جهت گیری ۹۰ درجه الیاف کربن است. استفاده از دو تقویت کننده نانو سیلیکا با ۳ درصد وزنی و نانورس با ۱ درصد وزنی در ورقه‌های کامپوزیتی باعث افزایش مقاومت کمانش ورقه‌ها به ترتیب ۴۵/۵٪ و ۲۲/۵٪ در مقایسه با ورقه‌های بدون نانو ذره شده است.

محمدی مهر و شاهی [۲۳] در سال ۲۰۱۶، رفتار کمانشی و ارتعاشی دو نوع تیر ساندویچی با هسته‌های فوم آلومینیوم و فوم PVC انعطاف‌پذیر تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها خواص مکانیکی وابسته به دما را نیز به صورت تئوری مورد مطالعه قرار دادند.

1. Taguchi method

رستمیان و امراهی [۲۴] در سال ۲۰۱۶، اثر جهت گیری الیاف کربن و درصد وزنی نانورس بر ویژگی های کمانش صفحه کامپوزیتی اپوکسی/الیاف کربن/نانورس را مورد بررسی قرار دادند. ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانورس و ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه جهت گیری الیاف به عنوان پارامترهای ورودی برای تهیه نمونه ها انتخاب شدند. نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی نانورس به اپوکسی خالص در زاویه های مختلف الیاف، بار بحرانی کمانش کاهش یافته است. همچنین افزایش درجه زاویه الیاف به طور کلی ویژگی های بار کمانشی را کاهش می دهد. حداکثر تنش شروع فرایند کمانش و بار بحرانی کمانش در ۳ درصد وزنی نانورس به ترتیب $68/16 \text{ MPa}$ و $3/697 \text{ KN}$ نشان داده شد.

راجش و پیچامانی [۲۵] در سال ۲۰۱۷، رفتار کمانشی و ارتعاشی کامپوزیت بافته شده با الیاف طبیعی را نشان دادند. مشخص شد که مقاومت کمانشی با افزایش تعداد لایه های الیاف طبیعی در کامپوزیت افزایش می یابد. همچنین مشاهده شد که الگوی بافت پارچه بر مقاومت کمانش کامپوزیت تأثیرگذار است. کامپوزیت های ساندویچی با لایه ی رویی الیاف شیشه و پارچه الیاف طبیعی به عنوان لایه وسط (هسته) دارای مقاومت کمانش بالاتر بودند. فرکانس ارتعاش آزاد با افزایش بار فشاری محوری کاهش یافته در حالی که ضریب میرایی در ناحیه پیش کمانش افزایش یافته است.

احمدی و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۸، در پژوهش خود خواص کششی و خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف خرما را نشان دادند. نمونه های کامپوزیتی با استفاده از الیاف برش داده شده به طولهای ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر و با سه سطح از درصد حجمی الیاف تحت آزمون کشش و خمش سه نقطه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند طول الیاف تأثیری بر خواص کششی و خمشی نداشته است. به طور کلی افزودن الیاف خرما سبب بهبود مقاومت کششی کامپوزیت نسبت به ماتریس خالص نگردید، که علت این مسأله می تواند چسبندگی ضعیف الیاف و ماتریس و وجود عیوب ساختاری در نمونه ها باشد. از طرفی نتایج آزمون خمش نشان داد که افزودن $7/5\%$ حجمی الیاف خرما سبب بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت گردیده است.

پیلا و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۸، تاثیر زاویه‌ی لایه چینی برای یک کامپوزیت هشت لایه با زاویه های $[۹۰/۴۵/-۴۵/۰]s$ ، $[۴۵/۰/-۴۵/۹۰]s$ ، $[۹۰/۰/-۹۰/۰]s$ ، $[۰/۴۵/-۴۵/۹۰]s$ ، $[۰/۹۰/۰/۹۰]s$ و $[۰/-۴۵/-۴۵/۰]s$ را تحت بار کمانشی با دو شرایط اولیه دو سر ساده و دو سر گیردار مورد بررسی قرار دادند. سپس نتیجه گرفتند که چینش $[۰/۹۰/۰/۹۰]s$ و $[۴۵/-۴۵/۴۵/-۴۵]s$ هم برای شرایط دوسر گیر دار و هم برای دوسر ساده به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام را دارند.

آببندانک و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۸، اثر اصلاح سطحی نانو صفحه‌های گرافن بر رفتار کششی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف بازالت را بررسی کرده‌اند. نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای وزنی $(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵)$ ساخته شده‌اند. نمونه‌های حاوی گرافن اصلاح شده نسبت به نمونه بدون گرافن افزایش خواص در استحکام کششی و استحکام ضربه داشته‌اند در صورتی که گرافن اصلاح نشده با کاهش استحکام کششی و استحکام ضربه مواجه شده است. در نتیجه اصلاح سطحی گرافن سبب برهم‌کنش بیشتر گرافن با ماتریس می‌شود.

بوژکورت و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۸، در مطالعه خود ویژگی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی با افزودن ۱، ۱/۵، ۲، ۳ درصد وزنی نانورس و تغییر زاویه الیاف $(۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵)$ درجه را تحت بار کمانشی محوری و عرضی بررسی کردند، نتایج نشان داد که بیشترین بار کششی محوری و عرضی با زاویه های $[۹۰/۰]$ و بیشترین بار کمانشی محوری و عرضی با زاویه های $[۷۵/۱۵-]$ اتفاق افتاده است. در اثر افزودن نانورس هم فقط در ۱ درصد وزنی شاهد ۸/۶٪ بهبود در کمانش محوری بودند، در درصد وزنی‌های دیگر با افت خواص مواجه شدند به طوری که در ۲ درصد وزنی استحکام کمانشی ۳۸٪ کاهش داشته است.

قادری و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۹، تأثیر افزودن ذرات نانو گرافن به رزین و استفاده از الیاف بازالت و هسته فوم از جنس پلی‌اورتان^۱ در ساخت پانل ساندویچی کامپوزیتی، برای بدست آوردن پاسخ استاتیکی و میزان جذب انرژی، مورد بررسی قرار داده‌اند. نمونه‌ها با درصدهای وزنی ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱/۱ ساخته شده‌اند.

1. Polyortan

نتایج نشان می‌دهند که بهترین جذب انرژی و مقاومت در برابر نفوذ شبه استاتیکی، مربوط به نمونه‌ی حاوی ۰/۷ درصد وزنی نانو گرافن می‌باشد.

وادار و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۹، رفتار کمانشی و ارتعاشی یک تیر ساندویچی کامپوزیتی متشکل از یک نوع فوم شامل آمینو پروپیل اپوکسی^۱ و پرکننده سنوسفر^۲ که ترکیبی از SiO_2 ، AL_2O_3 و Fe_2O_3 می‌باشد به همراه الیاف طبیعی سیسال^۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش ذرات پرکننده استحکام کمانش تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین فرکانس‌های طبیعی را تحت فشار محوری اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند با افزایش فشار فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد.

انباساگار در [۳۲] در سال ۲۰۱۹، بر روی رفتار ارتعاشی صفحه‌های ساندویچی هیبریدی متشکل از الیاف جوت و شیشه به همراه نانورس به عنوان تقویت‌کننده با درصدهای وزنی ۲، ۴ و ۶ تحقیق کرد. نتایج حاصل نشان داد در ۶ درصد وزنی فرکانس طبیعی و ضریب میرایی به ترتیب ۸۱٪ و ۶۲٪ بهبود داشتند. از دیگر عوامل تأثیرگذار در این آزمایش می‌توان به ضخامت، جنس و چگالی هسته فوم اشاره کرد.

خان و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۲۰، استحکام کمانشی، استحکام فشاری، ضریب میرایی و همچنین فرکانس‌های طبیعی پنل ساندویچی ساخته شده با الیاف کربن و هسته فوم پلی‌اورتان تقویت شده با نانو پودر سرامیک AL_2O_3 و درصدهای مختلف وزنی ۱، ۲، ۳، ۵ و ۱۰ را باهم مقایسه کردند. نتایج آزمون تأثیر منفی در اثر افزودن نانو ذرات را در فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها نشان داد، از طرفی ضریب میرایی را در ۲ درصد وزنی تا حدودی افزایش داد. در مورد استحکام کمانشی می‌توان گفت بیشترین افزایش در ۵ درصد و بیشترین کاهش در ۲ درصد اتفاق افتاد و استحکام فشاری هم با کاهش استحکام در نتایج روبه‌رو شد. می‌توان گفت در ۱۰ درصدی وزنی با کلوخه شدن نانو ذرات و عدم پراکندگی، بیشتر تأثیر منفی در سازه مشاهده شد.

1. Propyl Epoxy
2. Cenospheres
3. Sisal

گوگرچین و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۲۰، به پیش‌بینی تجربی بار کمانش ورق کامپوزیتی مستطیلی چندلایه دارای تورق درعرض با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی^۱ (آزمون غیر مخرب) و تفاوت آن با آزمون مخرب کمانش پرداختند. روش همبستگی ارتعاشی یک روش غیرمخرب مبتنی بر تحلیل مودال است که با اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه تحت بارهای مختلف محوری به پیش‌بینی بار کمانش سازه می‌پردازد. هریک از نمونه‌ها تحت آزمون کمانش مخرب قرار گرفتند، همچنین آزمون مودال تجربی به منظور تعیین فرکانس طبیعی سازه در بارهای فشاری مختلف انجام گرفت. نتایج نشانگر آن بود که روش همبستگی ارتعاشی دقت بسیار خوبی در تعیین بار کمانش ورق کامپوزیتی دارای تورق داشته و درصد اختلاف کمتر از ۸٪ میان نتایج آزمون مخرب و روش غیرمخرب همبستگی ارتعاشی بود.

ریسی و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۲۰، اثر افزودن نانولوله کربنی با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درون رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمانش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی به روش تجربی را بررسی کردند. تقویت کننده‌های کامپوزیتی به صورت سه لایه، و زاویه الیاف در تمامی لایه‌ها هم‌جهت با راستای محور ستون در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها در شرایط دو سر گیردار زیر بار فشاری محوری قرار گرفتند. نتایج نشان دادند با افزودن ۱ درصد وزنی نانو لوله کربنی بار بحرانی کمانش ستون آلومینیومی تقویت شده ۴۵٪ افزایش داشته است.

یعقوبی و همکاران [۳۶] در سال ۲۰۲۱، در پژوهش خود به بررسی اثرات نانو پلاکت‌های گرافنی^۲ بر روی پاسخ کمانشی مجموعه‌ای از ورقه‌های فلزی سه بعدی جدید^۳ تحت بار فشاری محوری پرداختند. ورقه‌های فلزی سه بعدی شامل الیاف شیشه و بازالت و درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی می‌باشد. نتایج آن‌ها بالاترین مقدار کمانش را در ۰/۲۵ درصد وزنی نانو گرافن نشان داد.

1. Vibration correlation technique
2. GNPs
3. 3D-FMLs

۲-۱-۲- پژوهش‌های مرتبط با ارتعاشات ساختارهای ساندویچی

اوکاتان بابا و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۰۹، بر روی استحکام خمشی و رفتار ارتعاشی آزاد تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته فوم پلی‌اورتان، به صورت صاف و خمیده با ایجاد گسیختگی^۱ در دو طرف هسته فومی تحقیقی انجام دادند. نمونه‌ها با ۴ انحنای مختلف و ایجاد گسیختگی در آن‌ها با نمونه ساده تحت خمش چهار نقطه بررسی و مقایسه شد. همچنین فرکانس‌های طبیعی مدهای اول تا پنجم تحت ارتعاشات آزاد با تست چکش بدست آمد. فرکانس‌های طبیعی تیرها و سفتی آن‌ها به دلیل وجود گسیختگی‌ها در نمونه‌های دارای انحنا نسبت به نمونه‌های بدون گسیختگی کاهش یافت. همچنین بهترین نتیجه را نمونه دارای ۱۵ درجه انحنا نشان داد.

شاه‌دین و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۰۹، خواص میرایی و استحکام تیرهای ساندویچی کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه/اپوکسی با هسته‌های لانه زنبوری، فوم و الیاف شیشه در هم پیچیده شده با طول‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر را بررسی کرده‌اند. نتایج آزمون فشرده سازی و خمش نشان داد که نمونه‌های ساندویچی با هسته شیشه در مقایسه با نمونه‌های ساندویچی لانه زنبوری و فوم، مدول فشاری و برشی نسبتاً کمی دارند. علاوه بر این، نمونه‌های ساندویچی با هسته الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری و فوم، ۱۵۰٪ نسبت میرایی بالاتر و ۲۰dB سطح لرزش کمتری دارند.

اسرار و همکاران [۳۹] در سال ۲۰۱۲، رفتار میرایی فوم‌های PVC را تحت ارتعاشات خمشی تیرهای یک‌سر گیردار مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از تست ضربه چکش نشان دادند چگالی فوم بر خواص میرایی تیر ساندویچی تاثیر گذار می‌باشد.

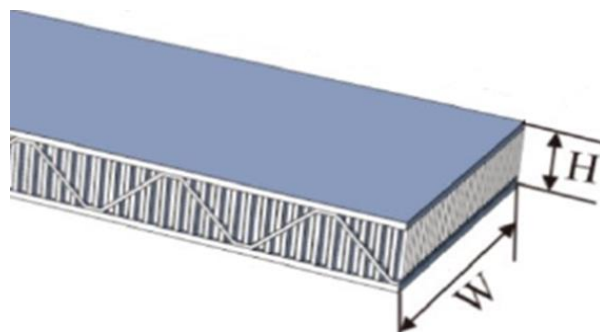
ژانگ و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۱۳، استحکام، سفتی و جذب انرژی پل‌های ساندویچی کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش ضخامت و زاویه موج هسته استحکام خمشی را

1. debonding

افزایش می‌دهد. همچنین نشان داد مقاومت خمشی پنل ساندویچی ساخته شده از ترکیب الیاف شیشه و کربن به اندازه پنل ساخته شده از الیاف کربن به تنهایی، است. افزایش طول پیوند بین هسته و پوسته منجر به کاهش مقاومت خمشی شد.

یان و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۱۳، پنل‌های ساندویچی با هسته موج‌دار و پرشده با فوم آلومینیوم را که تحت بار فشاری و جهت خارج از صفحه به پانل وارد می‌شد را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که پانل‌های پرشده با فوم آلومینیوم استحکام و جذب انرژی بیشتری نسبت به پانل‌های موج‌دار بدون فوم دارند. همچنین فوم، سازه‌ها را در مقابل جابه‌جایی تقویت می‌کند.

ژانگ و همکارانش [۴۲] در سال ۲۰۱۷، ارتعاشات آزاد تیرهای ساندویچی به طول ۳۰۰، عرض ۶۰ و ضخامت ۱۴ میلی‌متر با هسته‌های ترکیبی لانه‌زنبوری- موج‌دار بررسی و فرکانس مدهای اول تا سوم را به دست آورده‌اند. آن‌ها نتایج را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی کرده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده و شاهد اختلاف اندکی در نتیجه‌ها بودند. نتایج آزمون عملی توسط ضربه چکش و سنسور شتاب‌سنج در شرایط یک‌سر گیردار به دست آمد. تیرهای ساندویچی با هسته موج‌دار- لانه زنبوری، در مقایسه با تیرهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری نه تنها استحکام آنها افزایش یافته بلکه فرکانس طبیعی آن‌ها به نسبت بالایی بهبود یافته است. شکل (۱-۲) تیر ساندویچی با هسته موج‌دار- لانه زنبوری، را نشان می‌دهد. هسته موج‌دار از نوع مثلثی می‌باشد.



شکل (۱-۲): تیر ساندویچی با هسته لانه زنبوری ترکیبی موج‌دار [۴۲].

یورداسکال و همکاران [۴۳] در سال ۲۰۱۷، در مطالعه خود تأثیر متغیرهای خمیدگی و خواص هسته فومی را بر فرکانس‌های طبیعی ساندویچ پانل‌ها انجام دادند. ساندویچ پانل‌ها از صفحه‌های کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه با زاویه‌های $[+45/-45/90/0]$ و هسته فوم پی-وی-سی^۱ با چگالی‌های متفاوت ساخته شده‌اند. همچنین شعاع انحنای ساندویچ پانل‌های خمیده از ۹۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر متغیر بوده است. بیشترین افزایش در فرکانس طبیعی به دلیل افزایش خواص فوم در صفحه‌های تخت دیده شد. همچنین، مشخص شد که در نمونه‌های دارای انحنای زیاد، افزایش خواص فوم باعث کاهش فرکانس‌های طبیعی شده است. هنگامی که خواص فوم ثابت باشد، افزایش شعاع انحنای فرکانس‌های طبیعی را برای همه شکل‌ها افزایش می‌دهد.

بهابادی و همکاران [۴۴] در سال ۲۰۱۸، نشان دادند ابعاد جدایش بین رویه و هسته در رفتار ارتعاشی آزاد تیرهای ساندویچی به شدت روی فرکانس‌های طبیعی سازه تأثیر می‌گذارد، به طوری که با کاهش در سفتی که به علت وجود جدایش در ناحیه‌ی بین رویه بالایی و هسته اتفاق می‌افتد فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد. سوزا لوی و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۱۸، بر روی ارتعاشات پانل‌های ساندویچی با پوسته کربن / اپوکسی و هسته لانه زنبوری الاستومر مغناطیسی پژوهشی انجام دادند. نمونه‌ها در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی و بدون حضور میدان مغناطیسی خارجی در وسط و انتهای سر آزاد تیر، تحت ارتعاشات آزاد و اجباری قرار گرفتند. با اعمال میدان مغناطیسی در انتهای آزاد تیر فرکانس طبیعی مد اول $37/45\%$ کاهش یافته بود. از نتایج عددی و آزمایشی مشخص شد که ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری الاستومر مغناطیسی، فرکانس‌های طبیعی را به دلیل افزایش میدان مغناطیسی القا شده، به ویژه در مد اول کاهش می‌دهد.

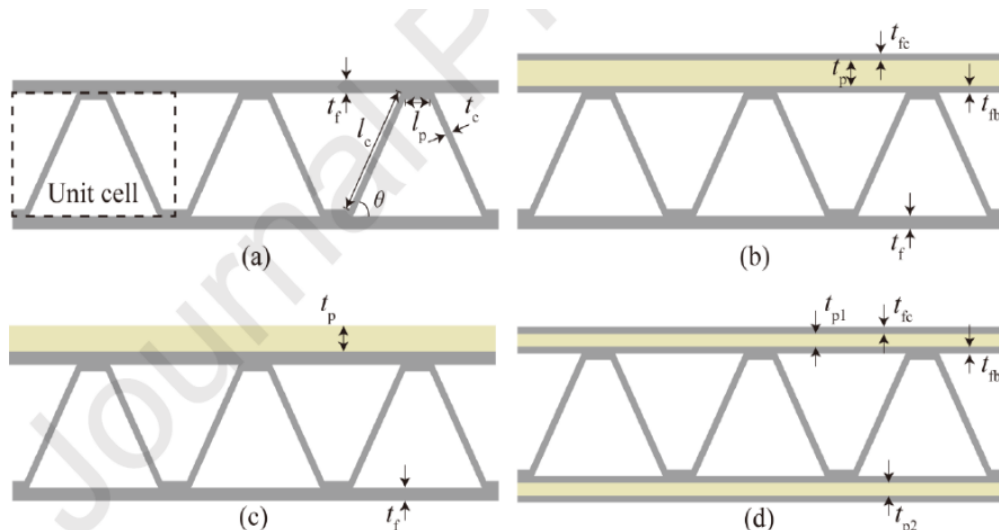
جوبانه و همکاران [۴۶] در سال ۲۰۱۸، رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی با جرمی در انتهای سر آزاد تیر را بررسی کرده‌اند. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی مدهای اول تا پنجم را با جرم و بدون جرم در انتهای سر آزاد

1. Polyvinyl chloride

تیر و تغییر در ساختار هندسی تیر، مانند تغییر عرض تیر و ضخامت هسته، به دست آورده و با نتایج شبیه سازی مقایسه کردند. فرکانس‌های طبیعی با افزایش ضخامت هسته و افزایش عرض تیر ساندویچی افزایش می‌یابد.

پیولت و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۹، ارتعاشات آزاد و اجباری، ضریب میرایی و استحکام دو نمونه تیر ساندویچی با هسته‌های الیاف کربن و هیبریدی را با هسته لانه زنبوری به ابعاد $24 \times 40 \times 293$ میلی‌متر مقایسه کردند. نتایج نشان داد تیرها با هسته الیاف میرایی بهتری دارند اما فرکانس طبیعی مد اول کمتری از تیر با هسته لانه زنبوری دارند.

وانگ و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۲۰، بر روی ویژگی‌های میرایی و فرکانس‌های طبیعی ساندویچ پنل موج‌دار تمام فلزی مطالعه کردند و نتایج آن را با ساندویچ پنلی که رویه‌های فلزی آن با پلی‌اورتان پوشیده شده بود مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند ساندویچ پنل‌های کاملاً فلزی با هسته خربایی مشبک به‌طور معمول سبک، سفت و محکم هستند، اما از نظر میرایی ضعیف هستند. به همین دلیل، به جای آن که هسته را از پلی‌اورتان پرکنند، رویه‌ها را تقویت کردند. نتایج عملکرد خوبی را از ساختار ساندویچی شکل (۲-۲-d) در ویژگی‌های میرایی نشان داد. شکل a سازه ساندویچی با رویه بدون فوم، شکل b سازه ساندویچی با یک رویه فوم-فلز در بالا، شکل d سازه ساندویچی با رویه فوم-فلز در بالا و پایین، و شکل c سازه ساندویچی با رویه فوم در بالا را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۲): ساندویچ پانل موج دار تمام فلزی با رویه پوشیده شده از فوم پلی اورتان [۴۸].

سابرامانی و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۲۰، در تحقیق خود نشان دادند افزودن نانولوله کربنی به زمینه پلیمری تیرهای ساندویچی با هسته فوم جامد، فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی را افزایش می‌دهد. فرکانس طبیعی و نسبت میرایی نمونه‌ها با نانولوله کربنی و بدون نانولوله کربنی به طول ۳۶۰ و عرض ۳۰ میلی‌متر تحت شرایط دوسر گیردار و یک‌سر گیردار توسط چکش و سنسور شتاب‌سنج به دست آمد.

۳-۱-۲- پژوهش‌های مرتبط با نانو ذرات در ساختارهای ساندویچی

پل و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۱، همچنین تأثیر افزودن نانو رس را روی خواص ضربه کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی با درصدهای وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ بررسی کردند. بیشترین جذب انرژی در نمونه ۵ درصد وزنی نانو رس مشاهده شد.

پل و همکاران [۵۱] در سال ۲۰۱۴، در تحقیق خود بر روی خواص مکانیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی نتیجه گرفتند که افزودن نانو رس در درصدهای پایین تأثیر منفی بر خواص مکانیکی ماده مرکب دارد،

درحالی که افزودن نانو سیلیکا به ماده مرکب بر خلاف نانو رس خواص را در درصدهای پایین بهبود می‌دهد. در میان نسبت‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی نانو رس، ماده مرکب با ۵ درصد وزنی بهترین خواص مکانیکی را دارا بود. در این حالت چقرمگی ماده ۱۰٪ و استحکام کششی ۷ درصد افزایش را نشان داد. ماده مرکب در ۳ درصد وزنی بیشترین افت خواص را نتیجه داد.

مسعودی و همکاران [۵۲] در سال ۲۰۱۴، خواص کامپوزیت شیشه اپوکسی با دو لایه آلومینیوم را تحت ضربه با سرعت ۲۰۴ متر بر ثانیه بررسی کردند. آنها در ۷ و ۱۰ درصد وزنی نانو رس، افزایش میزان جذب انرژی مخصوص در آزمایش ضربه سرعت بالا را نشان دادند، میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص در ۴ درصد وزنی ناچیز بوده است.

زمانی و همکاران [۵۳] در سال ۲۰۱۵، تأثیر افزودن نانوذرات رس با درصد وزنی‌های ۱/۵، ۳ و ۵ به ماتریس پلیمری را بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبک نانوکامپوزیتی تشکیل شده از الیاف شیشه/اپوکسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند افزودن نانوذرات به ماتریس باعث افزایش مدول کششی می‌شود. بیشترین افزایش مدول کششی و بار کمانش در نمونه ۵ درصد وزنی نانو رس به ترتیب ۱۳/۴٪ و ۱۰/۵۱٪ نشان داده شد. بیشترین جذب انرژی هم در ۱/۵ درصد وزنی اتفاق افتاد که ۷۲/۹٪ نسبت به اپوکسی خالص افزایش داشت.

پایگانه و همکاران [۵۴] در سال ۲۰۱۵، خواص کششی نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن/گرافن/نانو رس را با استفاده از روش طراحی آزمایش^۱ به دست آوردند. تحلیل‌های آماری آنها نشان داد که با افزایش درصد نانوذرات استحکام کششی نانو کامپوزیت مقدار کمی کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند در درصدهای ثابت وزنی نانو ذرات با افزایش نسبت گرافن به رس استحکام کششی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

1. Design Of Experiment (DOE)

خلیلی و همکاران [۵۵] در سال ۲۰۱۵، خواص مکانیکی اتصال‌های چسب اپوکسی تقویت شده با نانورس با درصد وزنی‌های ۱، ۳ و ۵ را مورد بررسی قرار دادند. بیشترین استحکام کششی در ۱ درصد وزنی و بیشترین استحکام ضربه در ۳ درصد وزنی مشاهده شد. در این حالت میزان حداکثر بار خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی صفحه‌های مشبک کامپوزیتی به ترتیب به میزان ۲۴٪، ۳۵٪ و ۲۵٪ نسبت به نمونه فاقد نانو لوله‌های کربنی افزایش داشت.

خسروی و همکاران [۵۶] در سال ۲۰۱۶، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح سطحی‌شده با درصد‌های وزنی ۰، ۱/۰، ۳/۰ و ۵/۰ بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری کشش و خمش را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین بهبود در خواص استحکام کششی و استحکام خمشی، همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه حاوی ۳/۰ درصد وزنی نانو لوله کربنی به میزان ۱۹٪، ۲۸٪ و ۳۵٪ بود. همچنین مدول کششی و خمشی با افزودن نانولوله‌ها روند افزایشی داشتند.

نجفی و همکاران [۵۷] در سال ۲۰۱۷، نشان دادند که روش اختلاط نانو رس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چند لایه بسیار تأثیرگذار است. ترکیب ۵ درصد وزنی و استفاده از همزن مکانیکی و حمام مافوق صوت جهت اختلاط نانو رس درون رزین اپوکسی در تعیین خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه/نانو رس، نتیجه خوبی به همراه داشت.

فارسانی و همکاران [۵۸] در سال ۲۰۱۷، در پژوهش خود تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در درصد‌های وزنی ۱/۰، ۲۵/۰ و ۴/۰ بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مشبک زمینه پلیمری را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. از نتیجه آزمون خمش سه نقطه پارامترهایی نظیر حداکثر بار خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفتند و مشاهده شد بهترین رفتار خمشی به ازای افزودن ۴/۰ درصد وزنی نانولوله کربنی حاصل شد.

حسینی فراش و همکاران [۵۹] در سال ۲۰۱۷، یک مطالعه تجربی در مورد فرکانس‌های طبیعی و خواص میرایی تیرها و صفحه‌های کامپوزیتی ارائه دادند. در این تحقیق چهار نمونه اپوکسی/الیاف شیشه، اپوکسی/

الیاف شیشه/ نانولوله کربنی، اپوکسی/ الیاف کربن و اپوکسی/ الیاف کربن/ نانولوله کربنی بررسی و مقایسه شده است. فرکانس طبیعی و ضریب میرایی تیر اپوکسی/ الیاف شیشه/ نانو لوله کربنی نسبت به نمونه فاقد نانولوله به ترتیب ۹/۴٪ افزایش و ۱۲/۳٪ کاهش داشته است. همچنین نمونه اپوکسی/ الیاف کربن/ نانولوله کربنی، نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی فرکانس طبیعی ۱۳/۹٪ کاهش و ضریب میرایی ۳۱/۵٪ افزایش داشته است.

ما و همکاران [۶۰] در سال ۲۰۱۷، به منظور بالا بردن استحکام مکانیکی چسب اپوکسی برای اتصال دو صفحه کامپوزیتی با افزودن نانو لوله کربنی در محیط با دمای پایین تحقیقی انجام دادند. سختی، کشش و رفتار برشی سه نمونه، بدون افزودن نانو لوله کربنی، با افزودن نانو لوله کربنی چند جداره صاف و نانو لوله کربنی چند جداره فنری در دمای اتاق و دمای پایین تر مقایسه شده است. نتایج تجربی نشان داد که تمام چسبها از سختی، مدول یانگ و مقاومت کششی بیشتری در دمای پایین برخوردار هستند. نانو لوله‌های کربنی پیچشی با توجه به سطح وسیع تر در دمای پایین از مقاومت مکانیکی بهتری برخوردار بودند.

آب‌بندانک و همکاران [۶۱] در سال ۲۰۱۸، به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی گرافن عامل‌دار بهترین رفتار خمشی را در کامپوزیت اپوکسی/ الیاف بازالت به دست آورد. استحکام خمشی، مدول خمشی و انرژی شکست هر کدام به ترتیب ۹۸/۶٪، ۲۵۲/۶٪ و ۴۴/۶٪ افزایش داشته‌اند.

شهبخش و همکاران [۶۲] در سال ۲۰۱۹، استحکام برشی بین لایه‌ای و خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف کربن را از طریق افزودن نانوذرات کربنات کلسیم اصلاح سطحی شده^۱ بهبود دادند. از بین مقادیر ۰/۵، ۱، ۳، ۵ درصد وزنی، افزودن ۳ درصد وزنی نانوذره باعث بهبود به ترتیب ۲۵٪، ۳۶٪ و ۲۷٪ استحکام برش بین لایه‌ای، استحکام خمشی و مدول خمشی شده است.

1. Modified surface

باقری تیرتاش و همکاران [۶۳] در سال ۲۰۱۹، از نتایج آزمون خمش نشان دادند که در درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵ بیشترین افزایش در خواص خمش به ازای توزیع ۵ درصد وزنی نانو رس درون زمینه پلیمری کامپوزیت بدست آمد. در این درصد وزنی استحکام خمش، مدول خمش، کرنش شکست و انرژی جذب شده به ترتیب به میزان ۳۰٪، ۳۸٪، ۱۵٪ و ۴۰٪ افزایش داشت. می‌توان گفت افزودن نانو رس اصلاح سطحی شده منجر به بهبود انتقال تنش بین الیاف بازالیت و زمینه اپوکسی می‌گردد.

معلم‌زاده و همکاران [۶۴] در سال ۲۰۱۹، تأثیر افزودن ۱/۵ درصد نانو رس به کامپوزیت اپوکسی/ شیشه را تحت آزمون کشش و ضربه سرعت بالا نشان دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در اثر افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانو رس عملکرد جذب انرژی به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

حسینی فراش و همکاران [۶۵] در سال ۲۰۱۸، در پژوهش خود اثر افزودن نانولوله کربنی به زمینه پلیمری بر سرعت بحرانی فلاتر صفحات لایه‌ای در حالتی که صفحات دارای الیاف شیشه یا کربن باشند، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش نسبت طول به عرض صفحه، افزودن نانولوله کربنی تأثیر بیشتری بر افزایش مرز پایداری ایروالاستیک این صفحات دارد. درصد این افزایش برای صفحات تقویت‌شده با الیاف شیشه بیشتر از صفحات تقویت‌شده با الیاف کربن بود. همچنین می‌توان گفت که با افزایش دمای صفحه، افزودن نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی تأثیر کمتری بر گسترش ناحیه پایداری صفحات دارد.

۲-۲- اهداف پژوهش

با توجه به پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که سازه‌های ساندویچی:

- با توجه به وزن کم و استحکام بسیار زیاد در برابر بار فشاری نسبت به سایر سازه‌ها مقاومت بیشتری دارند.

- فرکانس‌های طبیعی و ضریب میرایی بالاتری نسبت به سازه‌های غیر ساندویچی دارند.

همچنین افزودن نانو ذرات در ماده زمینه یکی از راه‌هایی است که می‌توان، خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی را افزایش داد. در این پژوهش نانو ذره رس به عنوان تقویت کننده به ماده زمینه‌ی رویه کامپوزیتی سازه‌های ساندویچی افزوده شده است. اختلاط صحیح نانو ذره در ماده زمینه باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. زاویه چینش الیاف، نوع الیاف، چگالی فوم و ضخامت فوم از دیگر عوامل تأثیر گذار در بار بحرانی کمانش و فرکانس‌های طبیعی می‌باشند. مرور مقالات نشان می‌دهد که تا کنون در مورد رفتار کمانشی و ارتعاشی ستون‌ها و تیرهای ساندویچی با افزودن نانو رس پژوهش‌های کمی به صورت آزمایشگاهی انجام شده است.

۲-۳- خلاصه مطالب فصل

در این فصل نتایج پژوهش‌ها و مقالات در طی چند سال گذشته به‌طور مختصر در رابطه با موضوع کمانش ستون‌های کامپوزیتی و ساندویچی ارتعاشات تیرهای ساندویچی و همچنین تأثیر افزودن نانو ذرات به ماده زمینه کامپوزیت بررسی شد.

فصل سوم: ساخت و آزمون نمونه ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل مواد مورد استفاده در ساخت ساندویچ پانل توضیح داده شده، سپس دستگاه‌ها و تجهیزات معرفی و پس از آن روش ساخت به‌طور کامل بررسی شده است.

۳-۲- مواد استفاده شده

مواد مصرف شده برای ساخت نمونه‌های پنل ساندویچی در ادامه آورده شده است.

۳-۲-۱- فوم

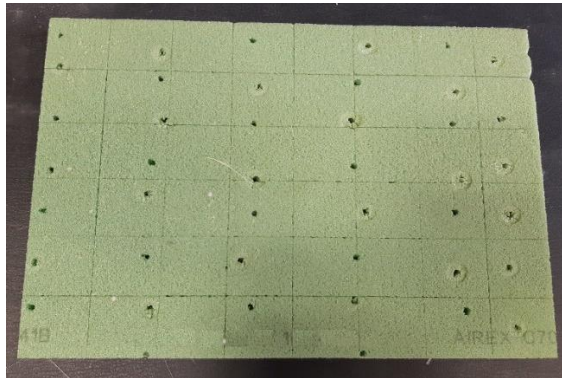
از فوم پی-وی-سی سبز رنگ شرکت آیرکس^۱ با کد C70.250، دارای چگالی 250 kg/m^3 و ضخامت ۱۵mm به عنوان هسته پنل ساندویچی استفاده شده است. در شکل (۳-۱) فوم پی-وی-سی برش خورده نمایش داده شده است، همچنین خواص فوم C70.250 مطابق جدول (۳-۱) می‌باشد. مزایای فوم C70.250 به شرح زیر می‌باشد:

- استحکام و سفتی فوق العاده نسبت وزن
- استحکام ضربه پذیری بالا
- جذب رزین بسیار کم
- مقاومت بالا در برابر خستگی
- عملکرد خوب در برابر دفع آتش (خود خاموش شونده)
- عایق صدا و حرارت بالا [۶۶].

جدول (۳-۱): مشخصات فوم PVC استفاده شده در هسته [۶۶].

۲۵۰	چگالی (kg/m^3)
۶/۶	استحکام فشاری (MPa)
۳۵۰	مدول فشاری (MPa)
۴/۷	استحکام برشی (MPa)
۹۵	مدول برشی (MPa)
۷/۵	استحکام کششی (MPa)
۲۳۰	مدول کششی (MPa)

1. Airex



شکل (۳-۱): فوم PVC به کار رفته در نمونه.

۳-۲-۲- الیاف شیشه

مطابق شکل (۳-۲) برای ساخته رویه کامپوزیتی ساندویچ پانل از پارچه شیشه تک جهته نوع E-glass با چگالی سطحی 400 gr/m^2 استفاده شده است. الیاف شیشه دارای مقاومت بالایی بوده و قیمت مناسب‌تری نسبت به الیاف کربن دارد.



شکل (۳-۲): الیاف شیشه نوع E-glass تک جهته مورد استفاده در ساخت رویه ساندویچ پانل.

۳-۲-۳- ماده زمینه به کار رفته کامپوزیت

ماتریس‌ها معمولاً دارای دوجزء هستند. برای زمینه ماتریس کامپوزیت از رزین اپوکسی KER 828 شرکت کومهو کره، با چگالی $1/16 \text{ kg/L}$ و ویسکوزیته $14-12 \text{ Pa.s}$ در 25°C سانتیگراد، به همراه سفت کننده PC205 شفاف استفاده شده است. نسبت هاردنر به رزین 50% وزنی می‌باشد.

۳-۲-۴- نانو ذره

جهت تقویت زمینه ماتریس از نانورس^۱ مونتمریلونیت k 10 ساخت شرکت سیگما^۲ آمریکا، با مشخصات جدول (۲-۳) استفاده شده است. شکل (۳-۳) پودر نانورس را نشان می‌دهد که رنگی همانند خاک رس ولی کمرنگ‌تر دارد و شکل (۴-۳) بسته بندی ۱۰۰ گرمی نانورس شرکت سیگما را نشان می‌دهد.

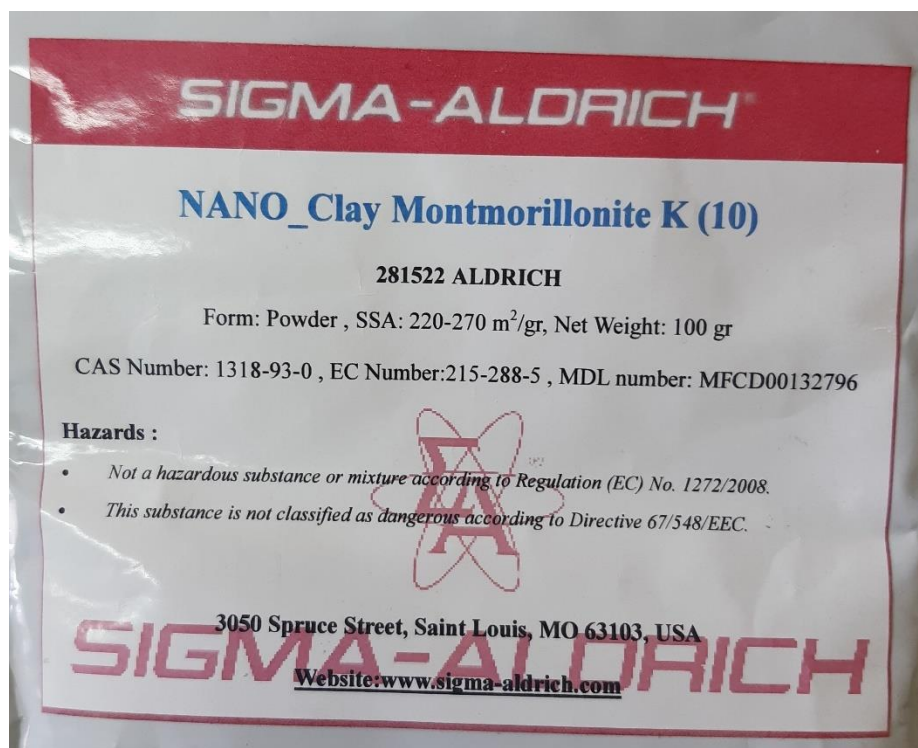
جدول (۲-۳): خواص نانو ذره خاک رس استفاده شده [۶۷].

چگالی	$0.5 - 0.7 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$
اندازه ذرات	۱-۲ nm
مساحت سطح ویژه	$220 - 270 \text{ (m}^2\text{/gr)}$
مقدار هدایت الکتریکی	-۲۵ MV
ضریب تبادل یونی	۴۸ (meg/100gr)
فاصله خالی بین ذرات	۶۰ Å
رنگ	زرد کمرنگ
رطوبت	۱-۲ %



شکل (۳-۳): نانو رس مونتمریلونیت.

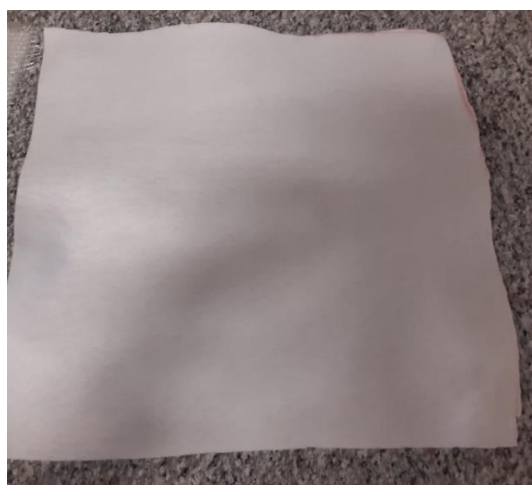
-
1. Nano Clay
 2. Sigma



شکل (۳-۴): بسته ۱۰۰ گرمی نانو ذره خاک رس مونتمریلونیت شرکت سیگما آمریکا.

۳-۲-۵- نمد

به جهت جذب رزین اضافی در فرآیند وکیوم از پارچه نمد استفاده می شود. پارچه نمد دارای ضخامت زیاد و تراکم حجمی کمی است، به همین جهت می تواند رزین اضافی ناشی از فشار وکیوم را جذب خود کند و سطح یکنواختی در نمونه ایجاد کند. در شکل (۳-۵) نمونه ای از نمد نشان داده شده است.



شکل (۳-۵): نمد پارچه ای جذب کننده رزین.

۳-۲-۶- پارچه آستری

پارچه آستری یک نوع پارچه مقاوم و سبک و دارای سوراخ‌های ریز مطابق شکل (۳-۶) می‌باشد. با توجه به جذب شدن رزین به نمد، پارچه آستری بین نمونه و نمد قرار می‌گیرد تا بعد از مرحله پخت مشکلی در جدا کردن نمد ایجاد نشود.



شکل (۳-۶): پارچه آستری.

۳-۲-۷- اسپری جدا کننده

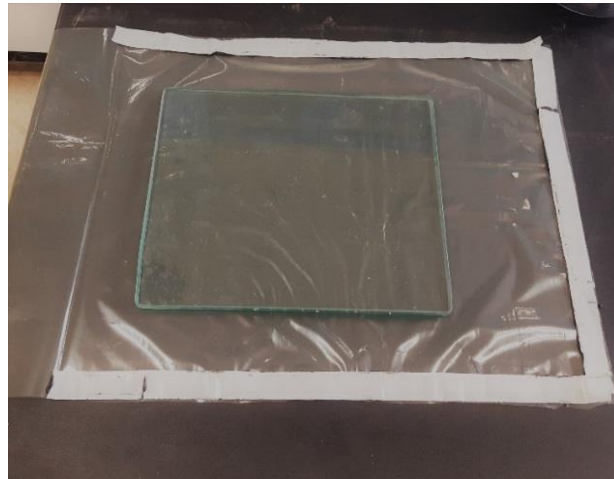
برای راحت و تمیز جدا شدن قطعه از کیسه و کیوم یا قالب، از اسپری سیلیکونی یا واکس جامد استفاده می‌کنند. اسپری سیلیکونی یک لایه نازک بین قطعه کامپوزیتی مورد نظر و پلاستیک و کیوم یا پارچه آستری ایجاد می‌کند. در شکل (۳-۷) اسپری سیلیکونی مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۳-۷): اسپری سیلیکونی جدا کننده رزین از پارچه آستری.

۳-۲-۸- کیسه خلأ

کیسه خلأ در فرآیند وکیوم به جهت مکیده شدن هوا توسط پمپ خلأ، از بین برنده حباب‌ها و همچنین ایجاد فشار بر نمونه استفاده می‌شود. در نتیجه توسط فشار ناشی از پمپ خلأ رزین اضافی جذب نم‌د می‌شود. در شکل (۳-۸) کیسه خلأ به اندازه قالب مورد نظر برش خورده و کناره‌های کیسه نوار آب‌بند چسبانده شده است.



شکل (۳-۸): کیسه خلأ.

۳-۲-۹- نوار سیل وکیوم

نوار سیل وکیوم^۱ نوعی چسب عایق می‌باشد با عرض ۱۰ میلی‌متر که دور تا دور کیسه خلأ را به جهت آب‌بندی می‌پوشاند. نوار سیل وکیوم تحمل فشار و حرارت بالا تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد دارد. شکل (۳-۹) نوار سیل وکیوم غیر حرارتی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۹): نوار سیل وکیوم.

1. vacuum sealant tape

۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات

در این قسمت تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده به جهت ساخت و آزمایش تشریح شده‌اند.

۳-۳-۱- پمپ خلاء

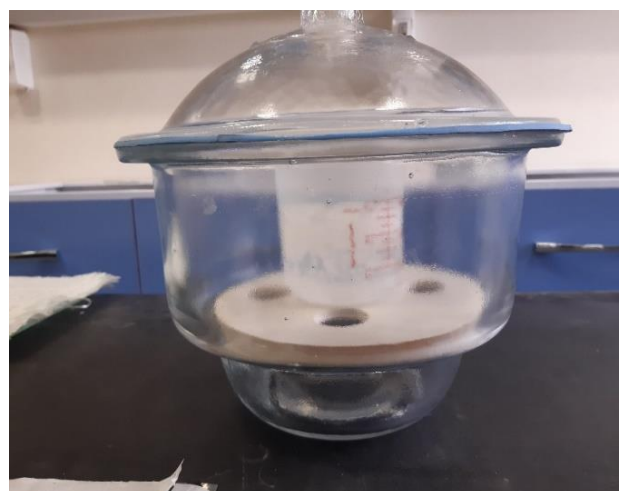
پمپ خلاء مدل 2FY-2B با قدرت $\frac{1}{3}$ اسب بخار جهت مکش هوای داخل وکیوم و ایجاد فشار و یکنواختی در قطعه استفاده شده است.



شکل (۳-۱۰): پمپ خلاء.

۳-۳-۲- دسیکاتور

دسیکاتور یک ظرف شیشه‌ای می‌باشد که برای ایجاد خلاء و حباب‌گیری مواد مایع مانند رزین کاربرد دارد. پمپ خلاء با استفاده از شیلنگ پلاستیکی به شیر دسیکاتور متصل شده و هوای داخل آن را تخلیه می‌کند. شکل (۳-۱۱) ظرف ۲ لیتری دسیکاتور خلأ با درپوش را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۱): ظرف دسیکاتور خلأ.

۳-۳-۳- ترازوی دیجیتالی

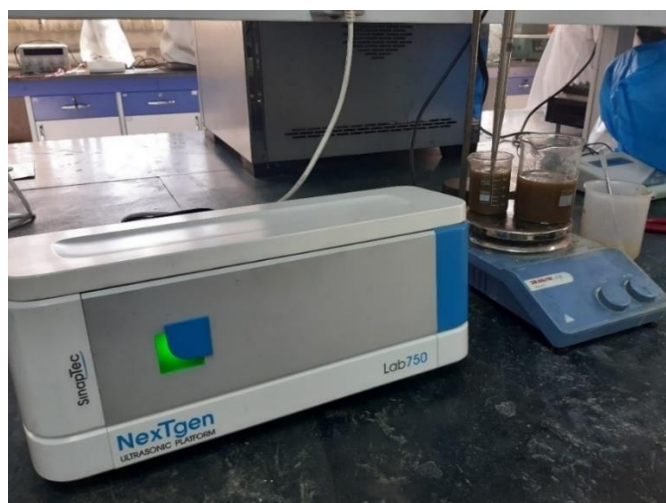
از ترازوی دیجیتالی با دقت $0/001$ گرم و $0/01$ برای وزن نانو ذرات رس و رزین اپوکسی استفاده شده است. در شکل (۱۲-۳) ترازوی دیجیتالی با دقت $0/01$ نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۳): ترازوی دیجیتالی با دقت $0/01$.

۳-۳-۴- پراب آلتراسونیک

پراب آلتراسونیک ساخت شرکت سیناپتک^۱ کشور فرانسه مدل ۷۵۰ وات برای همگن کردن ذرات نانو رس در ترکیب رزین اپوکسی/ نانو رس استفاده شده است. شکل (۱۳-۳) همگن کردن نانو ذرات رس توسط پراب آلتراسونیک را نشان می‌دهد. در این روش بر خلاف حمام آلتراسونیک که ماده را در داخل آب میگذاریم، یک میله نوک تیز فلزی داخل مایع قرار گرفته و با امواج مافوق صوت ماده را همگن می‌کند.



شکل (۱۳-۳): پراب آلتراسونیک.

1. Sinaptec

۳-۳-۵- همزن مغناطیسی و مکانیکی

همزن مکانیکی به منظور مخلوط کردن اولیه ذرات رس با رزین اپوکسی مورد استفاده قرار گرفته است. همزن مغناطیسی هم با توجه به این که دارای گرم کن می باشد ماده را رقیق تر کرده و باعث بهتر همگن شدن ترکیب رزین اپوکسی/ نانو ذره می شود. شکل (۳-۱۴) همزن مغناطیسی و مکانیکی را به ترتیب در سمت راست و چپ نشان می دهد.



(ب)

(الف)

شکل (۳-۱۴): الف- همزن مغناطیسی ب- همزن مکانیکی.

۳-۳-۶- دستگاه ارّه برش

برای برش یکسان و دقیق نمونه های ساندویچی از دستگاه ارّه برش استفاده شده است. دستگاه برش دارای تکیه گاه قابل تنظیم بوده و توسط صفحه مدرج به ابعاد نمونه مورد نظر تنظیم می شود. در شکل (۳-۱۵) دستگاه ارّه برش نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۵): دستگاه ارّه برش.

۳-۳-۷- دستگاه شیکر^۱

دستگاه شیکر به جهت اندازه گیری فرکانس‌های طبیعی سازه‌های مهندسی به کار می‌رود. همچنین قابلیت تنظیم ورودی و خروجی را دارا می‌باشد. اکثر سازه‌ها در طول عمر خود با تنش‌های ارتعاشی مواجه می‌شوند، بنابراین لازم است تا سازه‌ها در یک محیط شبیه سازی شده تست شوند و قابلیت کار آن‌ها در محیط‌های ارتعاشی قبل از استفاده بررسی و تأیید گردند. دستگاه شیکر هوا خنک مورد استفاده در دانشگاه صنعتی شاهرود، قابلیت ارتعاش در محور عمودی (Z) و محورهای افقی (x,y) توسط لرزاننده دارد. دستگاه شیکر قابلیت انجام آزمون لرزش سینوسی تک فرکانس، سینوسی با جاروب خطی و لگاریتمی فرکانس، تصادفی، شوک دندانه اری، نیم سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای، جست‌وجوی رزونانس و تست در فرکانس رزونانس، شبیه سازی جاده و را دارا می‌باشد. در جدول زیر مشخصات فنی دستگاه شیکر ASVS نمایش داده شده است. جدول (۳-۳) مشخصات دستگاه شیکر موجود در آزمایشگاه ارتعاشات دانشگاه صنعتی شاهرود و شکل (۳-۱۶) دستگاه شیکر و سیستم پردازش اطلاعات را نمایش می‌دهد.

جدول (۳-۳): مشخصات فنی دستگاه شیکر الکترو دینامیکی هوا خنک ASVS.

مشخصات فنی		مشخصات فنی	
۲۵	حداکثر جابه‌جایی (mm)	۵-۴۵۰۰	محدوده فرکانس (HZ)
۷۰	حداکثر بار استاتیک (kg)	۰/۹۸	حداکثر نیروی سینوسی (KN)
۲	وزن آرمیچر (kg)	۴۹۰	حداکثر شتاب (m/s^2)
۱۱۰	قطر آرمیچر (mm)	۲	حداکثر سرعت (m/s)



شکل (۳-۱۶): تجهیزات پردازش اطلاعات و دستگاه شیکر.

۳-۳-۸- فیکسچر

با توجه به این که نمونه‌ها در گیره‌های فک دستگاه سن‌تام قرار نگرفتند. برای تست فشار محوری نمونه‌ها فیکسچری طراحی و ساخته شده که اندازه فک‌های آن قابل تنظیم بوده، نمونه را محکم بگیرد و از شکستن نمونه در لبه‌ی گیره فک جلوگیری کند. فیکسچر طراحی شده دارای دو فک متحرک بوده که به‌صورت گیردار و پین استفاده می‌شود. در شکل (۳-۱۷) فیکسچر ساخته شده با لبه‌های قابل تنظیم مشاهده می‌شود. برای استفاده از حالت گیردار باید از قسمت پایین فک استفاده گردد و برای حالت پین از قسمت V شکل فیکسچر استفاده شود.



شکل (۳-۱۷): فیکسچر متحرک.

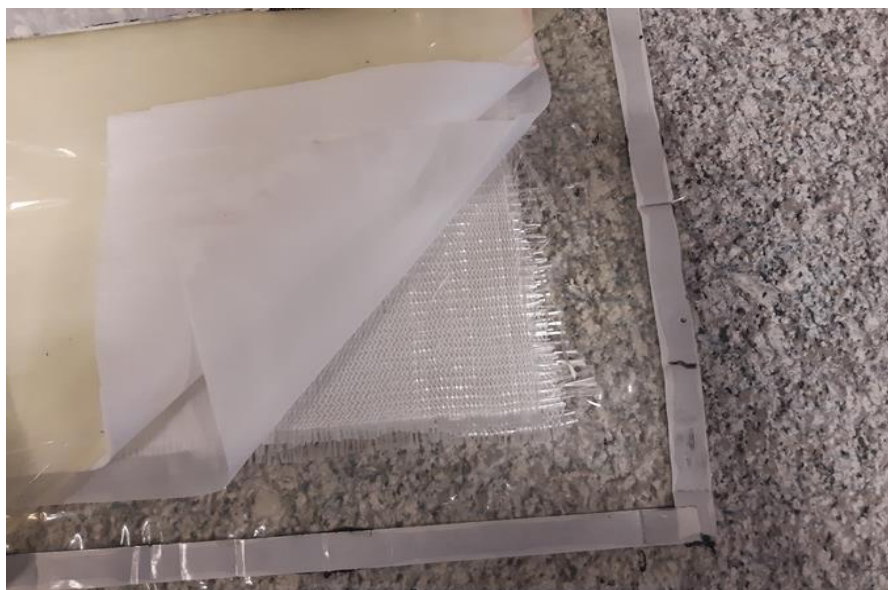
۳-۴- روش ساخت نمونه‌ها

در این قسمت ساخته نمونه‌های تست کشش و ساخت پانل ساندویچی شرح داده می‌شود.

۳-۴-۱- ساخت نمونه‌های آزمون کشش

نمونه‌های آزمون کشش برای تعیین خواص الاستیک رویه کامپوزیتی پنل ساندویچی ساخته می‌شوند. از این خواص جهت شبیه سازی پنل ساندویچی در نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. مراحل ساخت نمونه‌های تست کشش به شرح زیر می‌باشد :

- برای ساخت نمونه‌های تست کشش از روش لایه گذاری دستی استفاده شده است. در شکل (۳-۱۸) ترتیب چینش لایه‌ها در روش لایه گذاری دستی نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۸): نمایی از ترتیب چینش لایه‌ها در روش لایه گذاری دستی.

- رزین و هاردنر به نسبت ۵۰ درصد وزنی با یکدیگر ترکیب شده و به مدت ۵ دقیقه در بشر پلاستیکی هم زده می‌شود، بعد از یک‌دست شدن مخلوط رزین و هاردنر، به مدت ۱۵ دقیقه در دسیکاتور قرار گرفته تا به طور کامل توسط پمپ خلاء حباب‌گیری شود.

- لایه زیرین کیسه پلاستیکی خلاء را پهن کرده، دور تا دور کیسه پلاستیکی خلاء را با نوار آب‌بند پوشانده سپس کف آن را با استفاده از اسپری جدا کننده چرب کرده تا نمونه راحت و صیقلی از کیسه پلاستیکی جدا شود.
- تعداد ۳ لایه الیاف شیشه نوع E-glass با چگالی سطحی 400 gr/m^2 و ابعاد $30 \times 30 \text{ cm}$ را به صورت لایه‌ای با کمک چرتکه به رزین آغشته و روی آن‌ها یک لایه پارچه آستری قرار داده، پارچه آستری را هم با اسپری جدا کننده چرب کرده تا بعد از پخت رزین به راحتی از نمونه جدا شود.
- در نهایت روی پارچه آستری یک لایه نمد به جهت جذب رزین اضافه قرار داده و پلاستیک وکیوم را با نوار چسب سیل وکیوم دور تا دور نمونه بسته تا عملیات وکیوم تکمیل گردد.
- نمونه به مدت ۲ ساعت توسط پمپ خلاء گاز زدایی شده و بعد از گذشت زمان ژل شدن رزین، شیر خروجی هوای پمپ خلاء را بسته و پمپ خاموش می‌گردد تا فشار داخل وکیوم ثابت بماند. شکل (۱۹-۳) فرایند و تجهیزات ساخت نمونه‌های تست کشش را نشان می‌دهد.



شکل (۱۹-۳): تجهیزات مورد استفاده در ساخت نمونه کامپوزیتی.

- بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه از وکیوم خارج گردیده و به جهت اطمینان از پخت، نمونه به مدت دو روز دیگر در دمای اتاق قرار می‌گیرد.

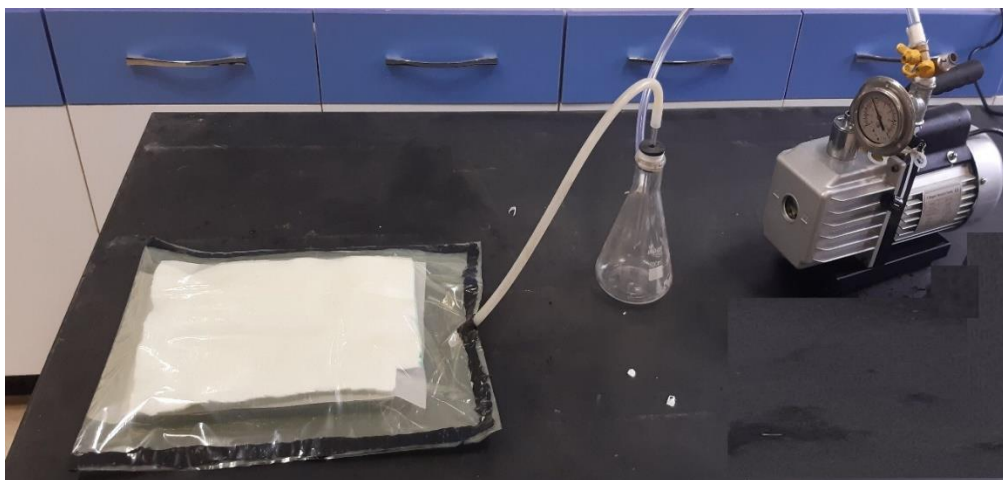
- ورق کامپوزیتی اپوکسی / الیاف شیشه طبق استاندارد ASTM-D 3039 با زاویه‌های الیاف (۰ ، ۹۰ و ۴۵) به ابعاد تعیین شده برش خورده‌اند [۶۸].

- ابعاد نمونه برش خورده تست کشش با زاویه الیاف ۰ درجه 250×15 میلی‌متر ، ابعاد نمونه ۴۵ درجه 250×25 میلی‌متر و نمونه ۹۰ درجه 175×25 میلی‌متر می‌باشد.

۳-۴-۲- ساخت نمونه‌های ساندویچی

مراحل ساخت نمونه ساده ساندویچی تا حدودی همانند نمونه‌های تست کشش انجام می‌شود.

- در نمونه‌ی ساده ابتدا رزین و هاردنر را باهم به میزان ۵۰ درصد ترکیب کرده و ۳ لایه الیاف شیشه را به رزین آغشته، سپس فوم را روی الیاف شیشه گذاشته و ۳ لایه دیگر از الیاف شیشه برش خورده را روی فوم قرار داده و به رزین آغشته کرده سپس فرایند وکیوم اجرا شده است. شکل (۳-۲۰) فرایند وکیوم خلأ را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۰): وکیوم نمونه ساندویچی با پمپ خلأ.

- در نمونه با هسته زیگزاگی بعد از چیدن ۳ لایه الیاف شیشه فوم‌ها را با ابعاد ۳ سانتی‌متر چیده و یک لایه الیاف شیشه با زاویه ۹۰ درجه از لایه‌لای فوم‌ها رد کرده و تا انتها این کار تکرار می‌شود. سپس ۳ لایه الیاف شیشه گذاشته و به رزین آغشته می‌شود. شکل (۳-۲۱) نمونه با هسته ساده و نمونه با هسته زیگزاگی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۱): هسته ساده و هسته زیگزاگی تیر ساندویچی ساخته شده.

پانل‌های ساخته شده دارای ۱۵ سانتی‌متر عرض، ۲ سانتی‌متر ضخامت و ۴۰ سانتی‌متر طول دارند که هر کدام با اره برش به ۳ نمونه تیر ساندویچی همانند شکل (۳-۲۲) تقسیم شده‌اند. برش پنل‌ها با دستگاه برش انجام شده است. ابعاد تیرها طبق استاندارد ASTM-C393 $400 \times 30 \times 20$ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۳-۲۲): نمونه‌های پنل ساندویچی، از سمت چپ: هسته ساده، هسته زیگزاگی، هسته زیگزاگی حاوی ۳٪ نانو ذره خاک رس، هسته زیگزاگی حاوی ۵٪ نانو ذره خاک رس، هسته زیگزاگی حاوی ۷٪ نانو ذره خاک رس.

۳-۵- آزمونهاى انجام شده

در اين قسمت آزمون كشش نمونه‌هاى شيشه/اپوكسى، آزمون ارتعاشى نمونه تيرهاى ساندويچى كامپوزيتى و آزمون فشار محورى نمونه ستون‌هاى ساندويچى شرح داده شده است.

۳-۵-۱- آزمون كشش كامپوزيت

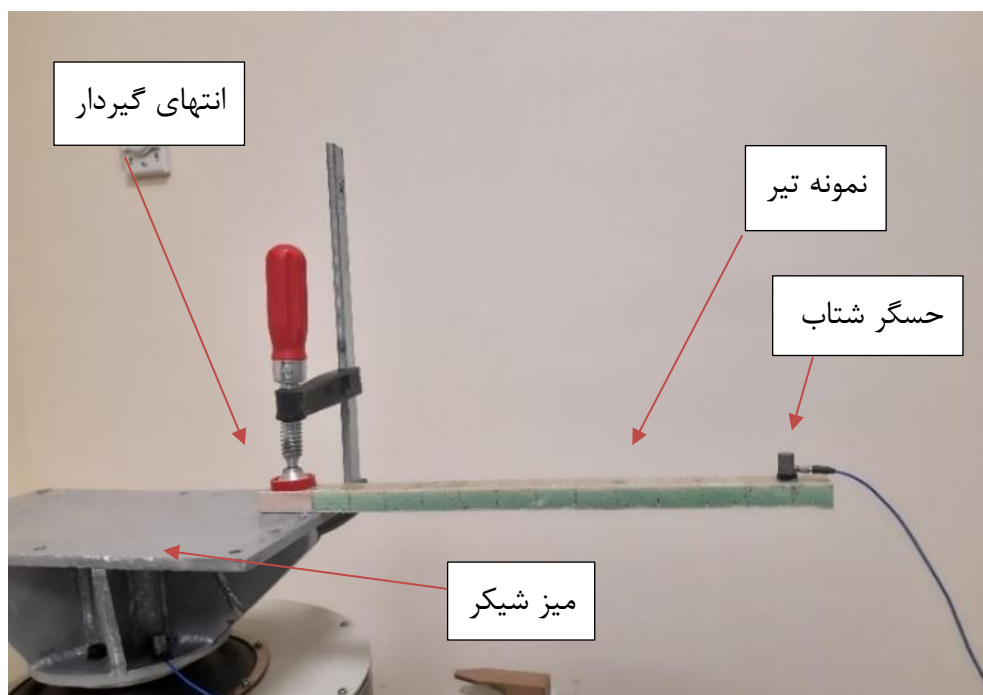
نمونه‌هاى آزمون كشش از جنس كامپوزيت شيشه/اپوكسى مى‌باشند. آزمون نمونه‌ها با دستگاه آزمون كشش و فشار يونيورسال انجام شده است. مدل دستگاه STM-150 ساخت ايران با قابليت اعمال نيروى ۱۵۰ KN مى‌باشد. همچنين دستگاه قابليت تست طيف وسيعى از مواد را دارا است. اطلاعات خروجى به صورت نمودار تنش-كرنش داده مى‌شود. در شكل (۳-۲۲) آزمون كشش كامپوزيت شيشه/اپوكسى توسط دستگاه سنتام مشاهده مى‌شود. سرعت حركت فك دستگاه براى بار كششى طبق استاندارد-ASTEM E2954 بر روى 2 mm/min تنظيم گرديده است [۶۹].



شكل (۳-۲۲): دستگاه سنتام آزمون كشش پوسته كامپوزيتى شيشه/اپوكسى.

۳-۵-۲- آزمون ارتعاش

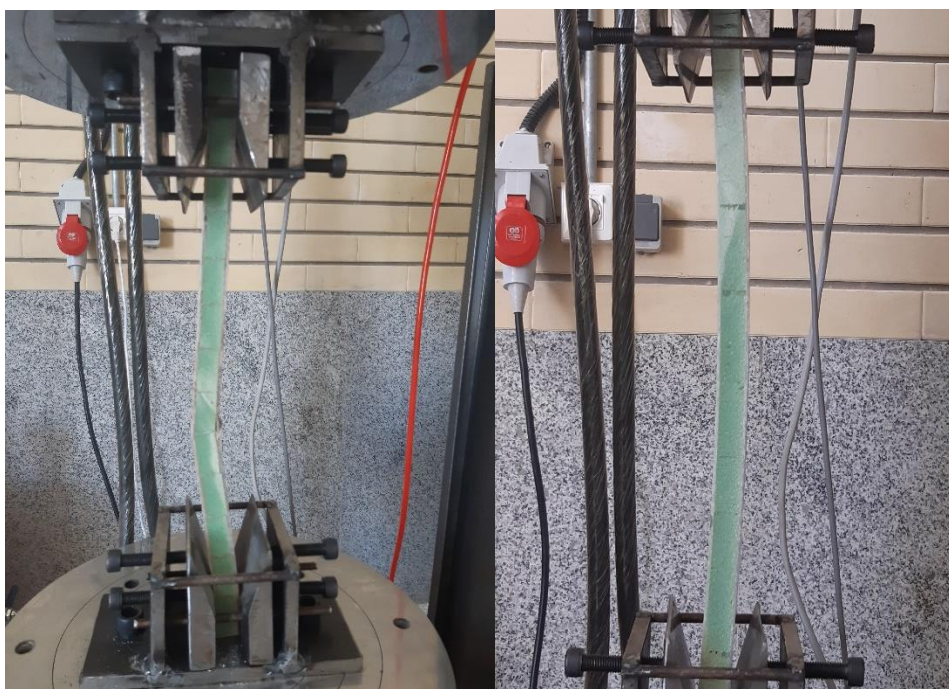
به منظور به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی نمونه‌ها از دستگاه شیکر استفاده شده است و فرکانس کاری از ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز و خروجی به صورت سینوسی تنظیم گردیده است. همانطور که در شکل (۳-۲۴) نشان داده شده است، آزمون ارتعاش در شرایط یک‌سر گیردار انجام و توسط یک گیره قابل تنظیم به سطح شیکر متصل شده است. با روشن شدن سیستم، میز شیکر در راستای عمود به لرزش درآمده و باعث لرزش تیر می‌شود. حسگر شتاب که به نوک تیر متصل است اطلاعات سرعت بر حسب جابه‌جایی، فرکانس وارد شده و زمان را به دستگاه پردازشگر ارسال می‌کند. دستگاه پردازشگر بعد از پردازش اطلاعات دریافت شده، این اطلاعات را روی صفحه نمایش بر حسب فرکانس و تغییر دامنه نوسان نشان می‌دهد. این نمودار فرکانس‌های تشدید را به صورت قله‌های بزرگ نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۴): محاسبه فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی کامپوزیتی توسط شیکر و سنسور شتاب سنج.

۳-۵-۳- آزمون بار فشاری

به جهت استفاده از دستگاه سنتام کششی-فشاری اول فیکسچرهای ساخته شده روی فک دستگاه قرار گرفته سپس برای به دست آوردن بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته ساده و زیگزاگی، نمونه‌ها به صورت دوسر گیردار به حالت عمودی در فیکسچر ساخته شده قرار داده و بازوهای فیکسچر را با پیچ آلن محکم کرده تا از سر خوردن نمونه در هنگام اعمال فشار جلوگیری شود. مطابق شکل (۳-۲۵) فیکسچرها به صورت دوسر گیردار تنظیم شده‌اند. سرعت حرکت فک دستگاه برای بار فشاری طبق استاندارد ASTM-E2954 بر روی 2 mm/min تنظیم گردیده است [۶۹]. شکل (۳-۲۵) نمونه را در لحظه کمانش و شکست نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

شکل (۳-۲۵): ستون ساندویچی در حال آزمایش فشار محوری. الف- در لحظه کمانش. ب- شکست.

۳-۶- خلاصه فصل

در این فصل مواد اولیه مورد استفاده در ساخت کامپوزیت، تیرها و ستون‌های ساندویچی شرح داده شد. تجهیزات آزمایشگاهی معرفی گردید و طرز کار با آن‌ها توضیح داده شد. روش ساخت نمونه‌های تست کشش کامپوزیت و نمونه‌های ساندویچی شرح داده شد. همچنین روش آزمون‌های کشش کامپوزیت، کمانش ستون ساندویچی و ارتعاشات تیر ساندیچی شرح داده شد.

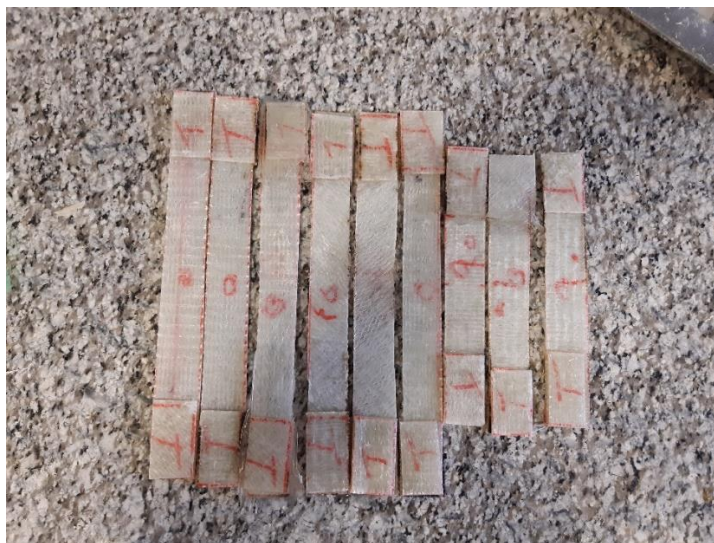
فصل چهارم: بررسی نتایج آزمون‌ها

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج آزمون کشش پوسته‌های کامپوزیتی، آزمون ارتعاش تیرهای ساندویچی، آزمون بار فشاری ستون‌های ساندویچی و همچنین به بررسی تفاوت تأثیر افزودن درصد‌های مختلف نانوذره خاک رس و تغییر شکل هسته، بررسی تصاویر الکترونی روبشی و نتایج حاصل از نرم افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است.

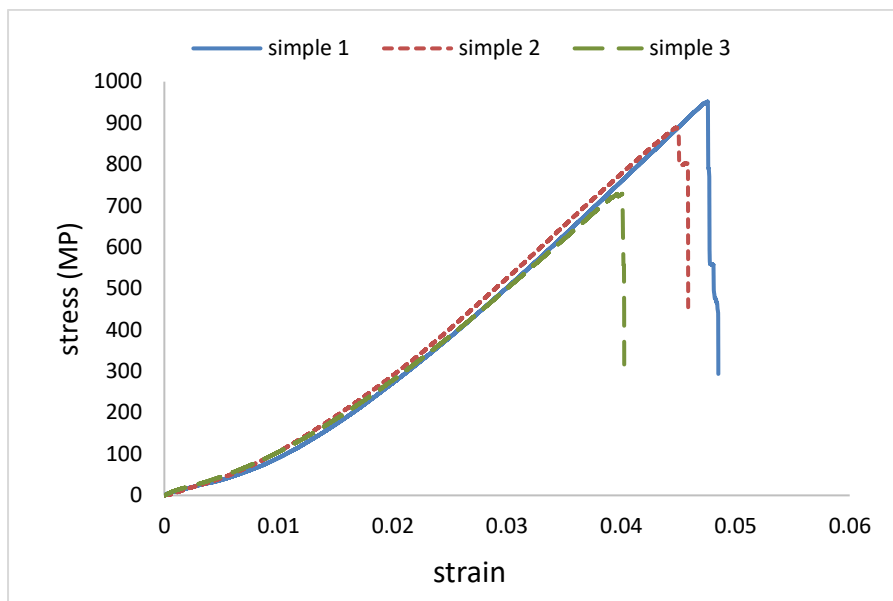
۴-۲- بررسی نتایج آزمون کشش

برای شبیه سازی تیر و ستون ساندویچی در نرم افزار المان محدود آباکوس، مدول الاستیک پوسته‌های ساندویچی مورد نیاز می‌باشد که توسط آزمون کشش در زاویه‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه گرفته شده است. در شکل (۴-۱) نمونه‌های ساخته شده پوسته کامپوزیتی نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از تست کشش الیاف شیشه/ اپوکسی به صورت نیرو-جابجایی داده شده که با استفاده از نرم افزار اکسل به نمودار تنش- کرنش تبدیل گردیده است.

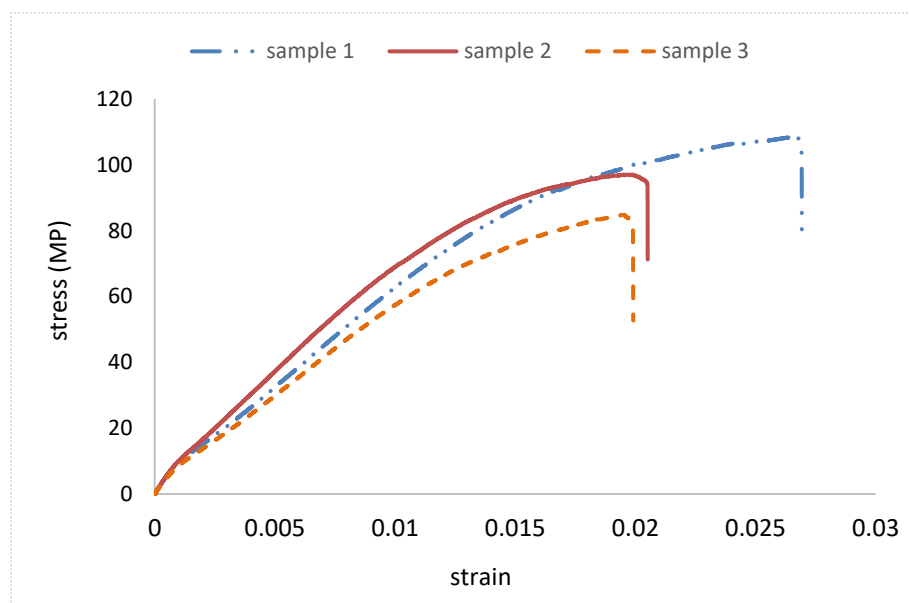


شکل (۴-۱): نمونه‌های تست کشش شیشه/ اپوکسی.

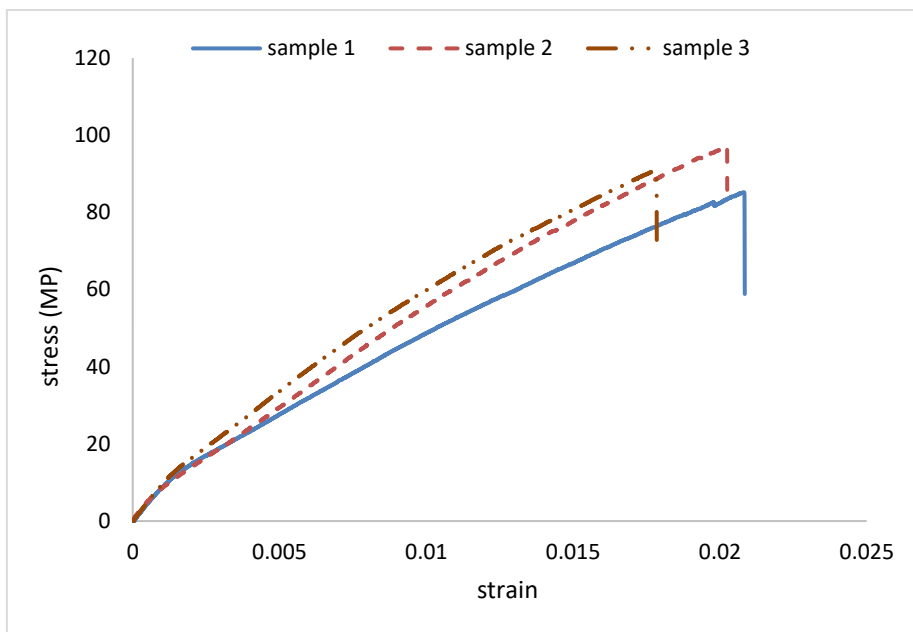
شکل‌های (۴-۲)، (۴-۳) و (۴-۴) نمودارهای تنش- کرنش کامپوزیت شیشه/ اپوکسی را به ترتیب در نمونه‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): نمودار تنش- کرنش تست کشش الیاف شیشه / اپوکسی در راستای ۰ درجه.

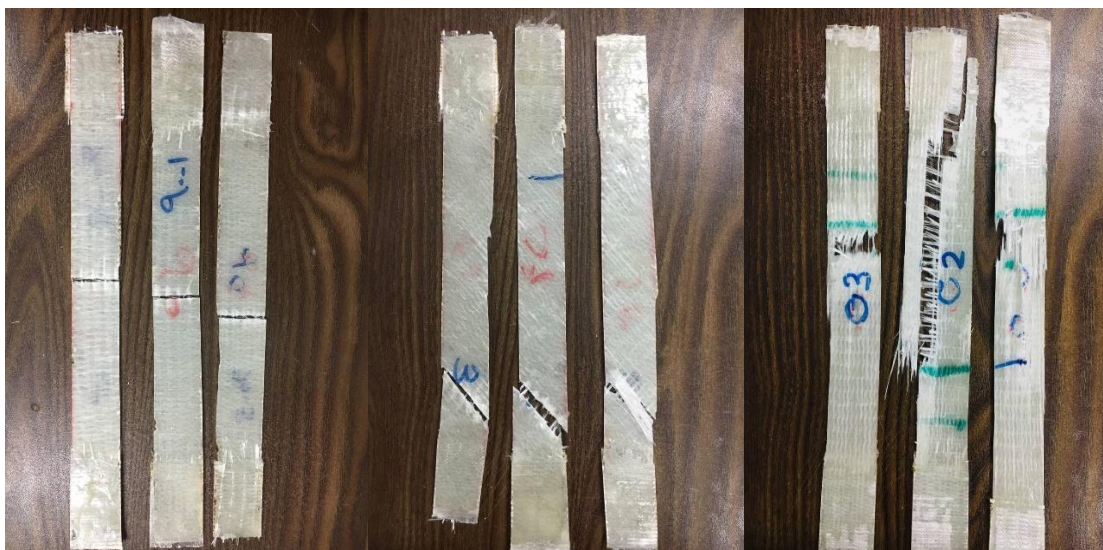


شکل (۴-۳): نمودار تست کشش الیاف شیشه / اپوکسی در راستای ۴۵ درجه.



شکل (۴-۴): نمودار تست کشش الیاف شیشه / اپوکسی در راستای ۹۰ درجه.

همان‌طور که نمودارهای تنش-کرنش نشان می‌دهند کشش در راستای ۰ درجه دارای استحکام ۱۰ برابری نسبت به زاویه الیاف ۴۵ و ۹۰ درجه می‌باشد. از طرفی نمونه‌های ۰ و ۹۰ درجه دارای اختلاف کمتری می‌باشند. در شکل (۵-۴) تصویر محل شکست نمونه‌های تست کشش نشان داده شده است.



شکل (۵-۴): نمونه‌های شکسته شده آزمون کشش، نمونه ۰ درجه، نمونه ۴۵ درجه و نمونه ۹۰ درجه.

مقادیر به دست آمده و میانگین مدول الاستیسیته کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی در جدول (۱-۴) نشان داده شده است.

جدول (۱-۴): مدول الاستیک نمونه‌های آزمون کشش شیشه/اپوکسی.

مدول الاستیسیته	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین
E_1 (GPa)	۱۸/۳۹	۱۹/۸۷	۲۰/۰۶	$۱۹/۴۴ \pm ۰/۹$
E_2 (GPa)	۴/۰۸	۴/۷۹	۵/۰۹	$۴/۶۵ \pm ۰/۴$
E_x (GPa)	۴/۰۲	۴/۷۲	۴/۲۵	$۴/۳۳ \pm ۰/۳۳$

جهت صحت درستی اعداد به دست آمده با توجه به خواص مربوط به کامپوزیت شیشه اپوکسی، نسبت مدول الاستیک E_1/E_2 برابر با عدد ۴/۶ می‌باشد [۷۰] که در نتایج آزمایشگاهی این نسبت ۴/۱۸ به دست آمده است.

برای شبیه سازی در نرم افزار آباکوس مدول برشی G_{12} پوسته کامپوزیتی مورد نیاز می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۷۰]:

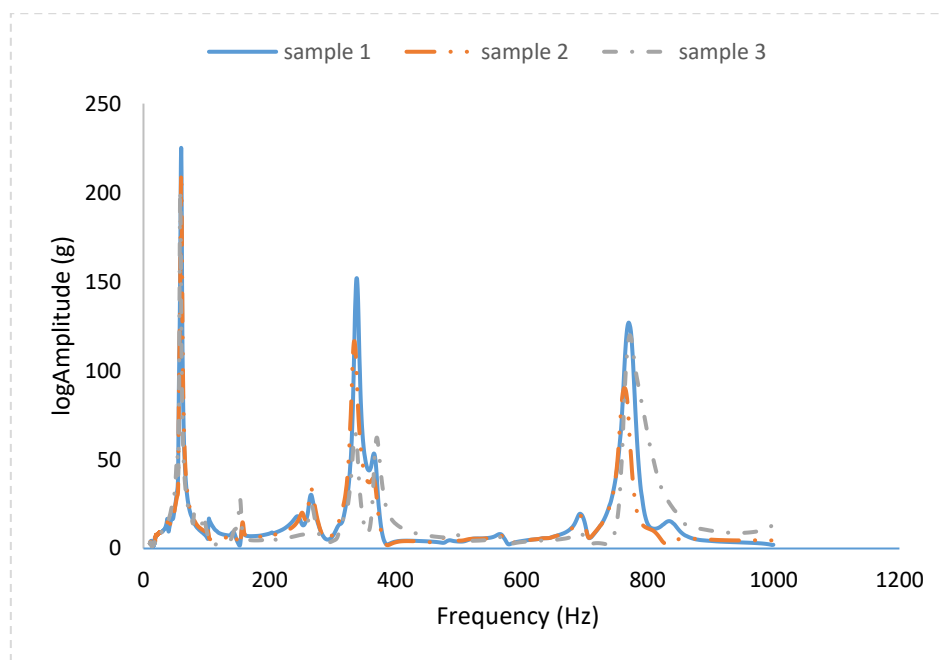
$$E_x = \frac{E_1}{m^4 + m^2 n^2 (-2v_{12} + \frac{E_1}{G_{12}}) + n^4 \frac{E_1}{E_2}} \quad (۱-۴)$$

در این رابطه مدول الاستیک E_1 ، E_2 و E_x مشخص می‌باشد. $n = \sin \theta$ و $m = \cos \theta$ است، θ در اینجا ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است زیرا E_x مدول الاستیسیته برای کامپوزیت با الیاف ۴۵ درجه می‌باشد. مقدار v_{12} برابر با ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است [۷۰]. با محاسبه رابطه (۱-۴) مقدار G_{12} برابر با ۱۰۴۶ GPa به دست آمده است.

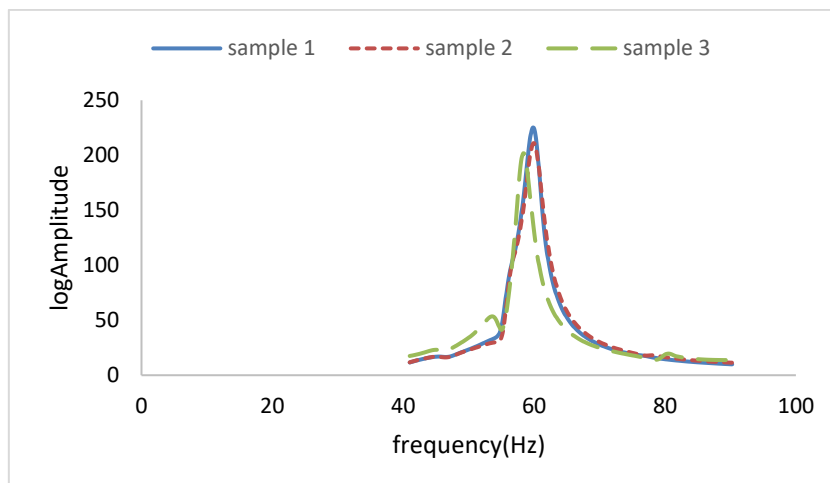
۴-۳- بررسی نتایج آزمون ارتعاش

آزمون ارتعاش بر روی ۱۵ نمونه از تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم و پوسته الیاف شیشه انجام شده است. فرکانس شیکر از ۱۰ Hz تا ۱۰۰۰ Hz و شتاب $10 \frac{m}{s^2}$ تنظیم گردید. برای آزمون ارتعاش از هر حالت ۳ نمونه یکسان ساخته شده تا تکرار پذیری نتایج نیز بهتر شود. در این آزمون اول نتایج مربوط به هسته فومی ساده بررسی شده است. سپس نمونه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره با نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانو ذره مورد مطالعه قرار گرفته است. نمودارهای نتایج آزمون ارتعاش به صورت لگاریتم دامنه حرکت نوک تیر بر حسب فرکانس تحریک داده شده است که در ادامه به بررسی نمودارهای حاصل از آزمون ارتعاش پرداخته شده است.

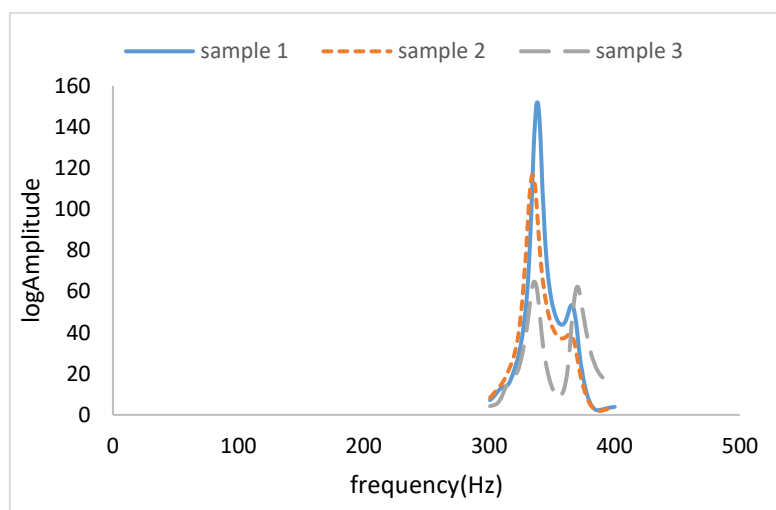
نمودار شکل (۴-۶) رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته ساده فوم بدون افزودن نانو ذره را تحت فرکانس اجباری ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۷)، (۴-۸) و (۴-۹) نمودارهای مود اول، دوم و سوم فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهند.



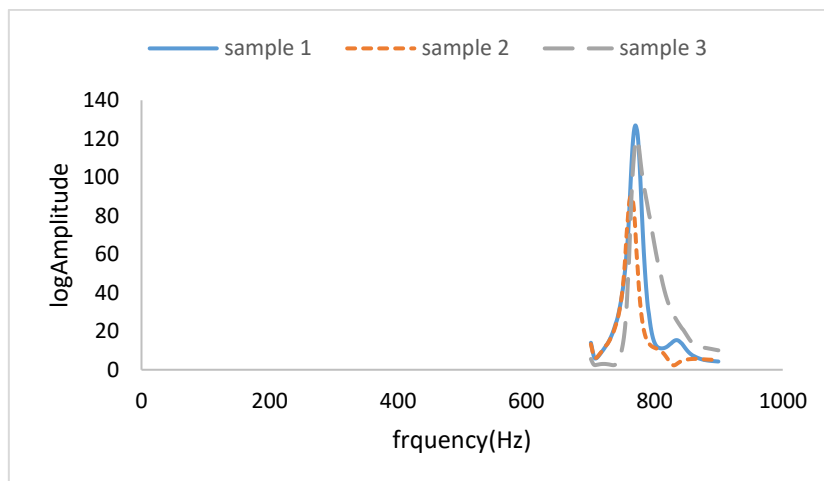
شکل (۴-۶): نمودار فرکانس‌های طبیعی نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی/الیاف شیشه.



شکل (۴-۷): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی / الیاف شیشه.

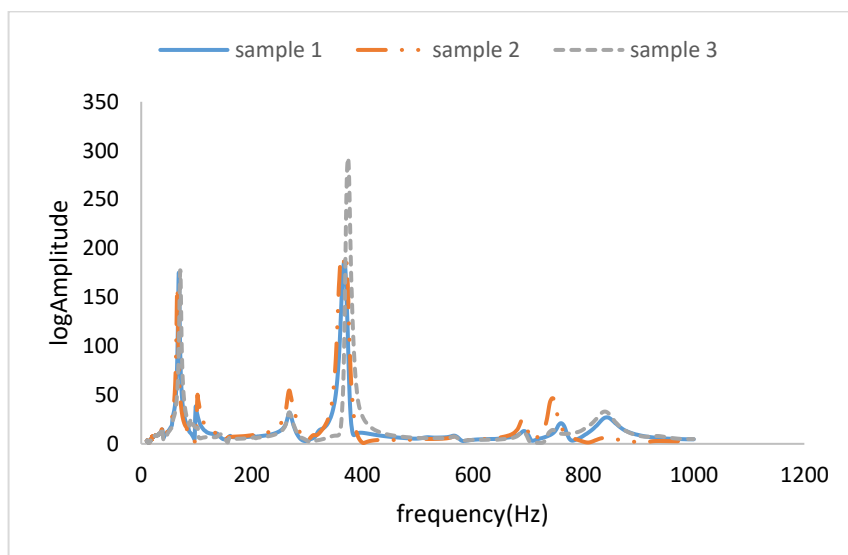


شکل (۴-۸): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود دوم نمونه ساندویچی با هسته ساده و رویه اپوکسی / الیاف شیشه.

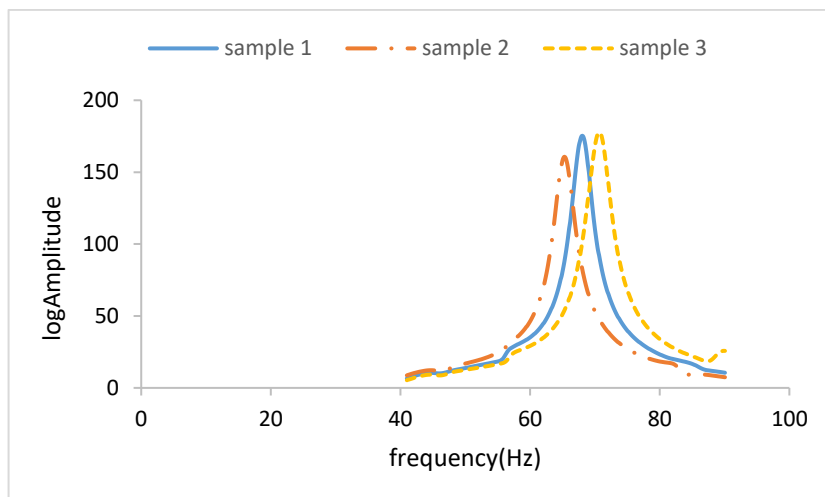


شکل (۴-۹): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود سوم نمونه ساندویچی با هسته ساده و روبه اپوکسی / الیاف شیشه.

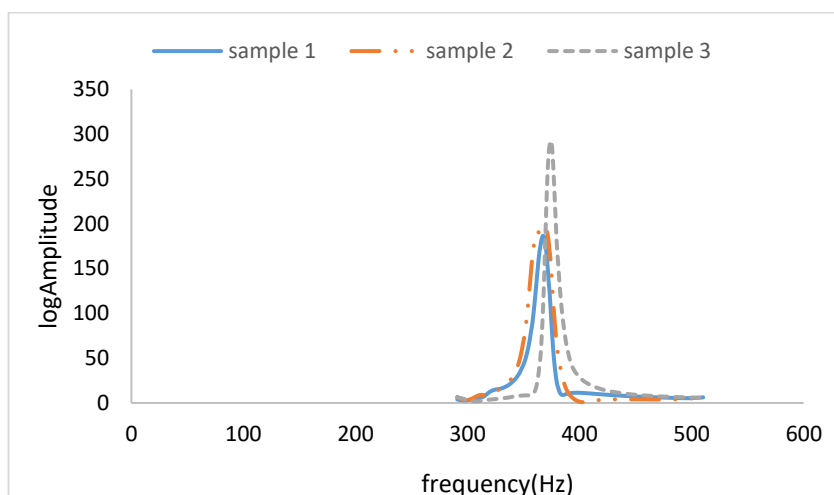
نمودار شکل (۴-۱۰) رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی فوم بدون افزودن نانو ذره را تحت فرکانس اجباری ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نمودارهای مود اول و دوم فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۰): نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی فوم بدون افزودن نانو ذره.

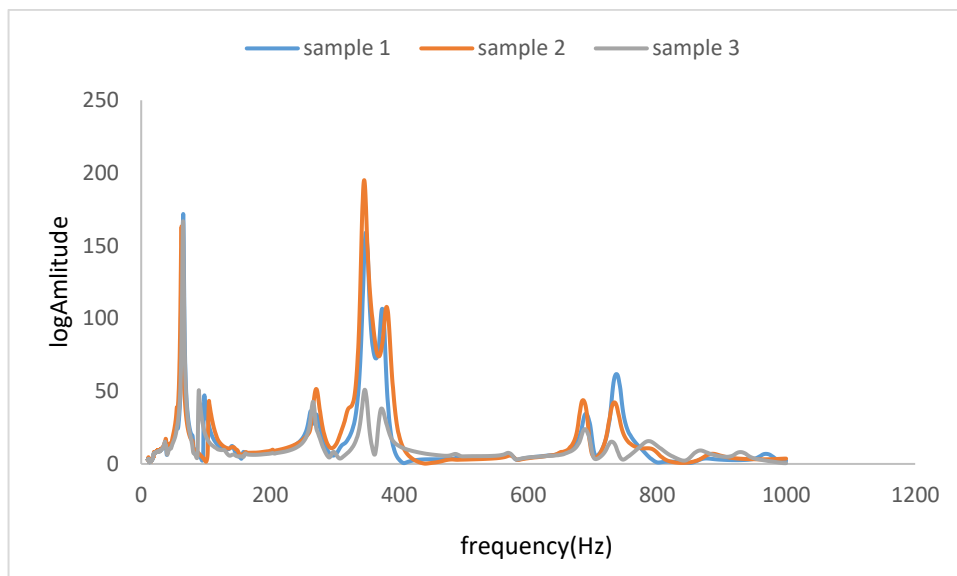


شکل (۴-۱۱): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره.

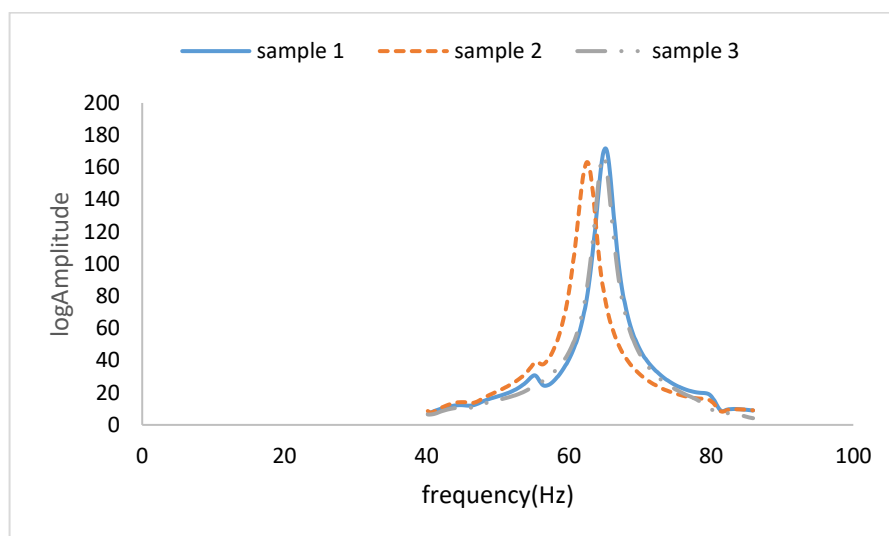


شکل (۴-۱۲): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره.

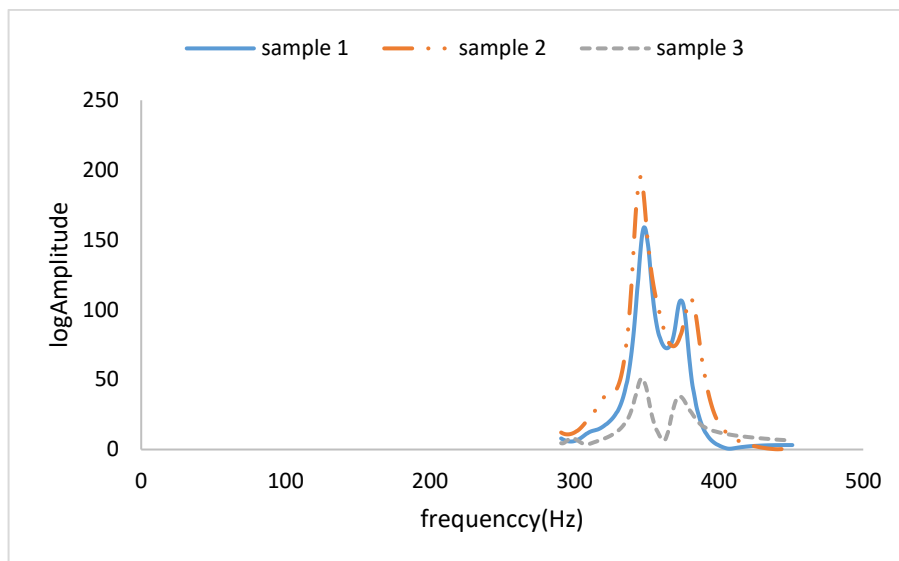
نمودار شکل (۴-۱۳) رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی حاوی ۳ درصد وزنی نانو ذره را تحت فرکانس اجباری ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نمودارهای مود اول و دوم فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۳): نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانو ذره.

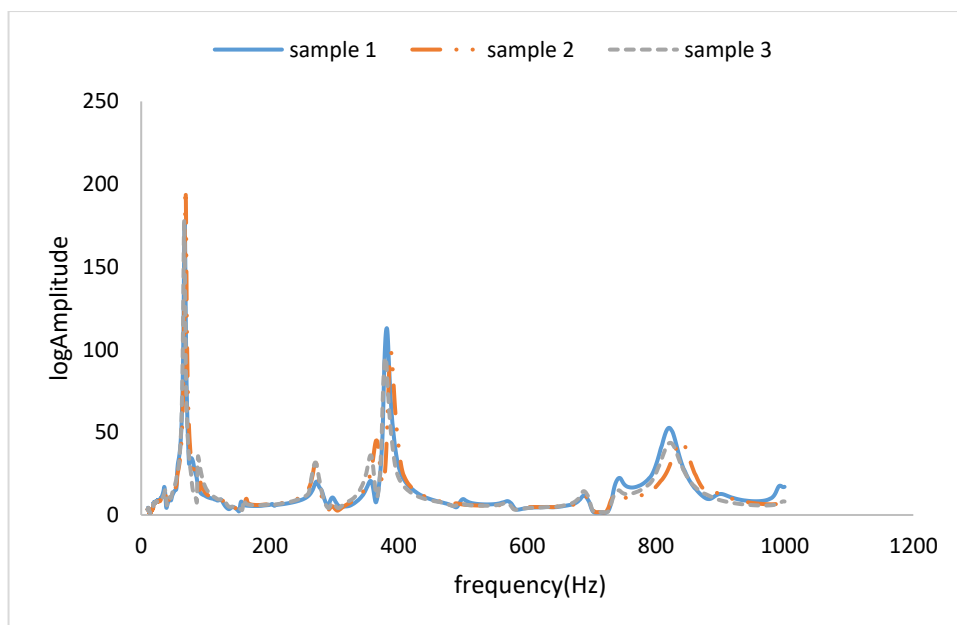


شکل (۴-۱۴): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانو ذره.

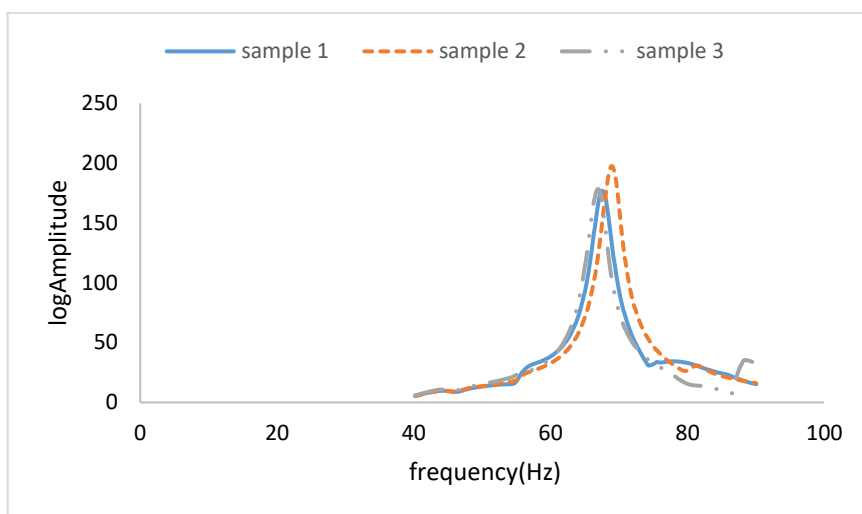


شکل (۴-۱۵): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانو ذره.

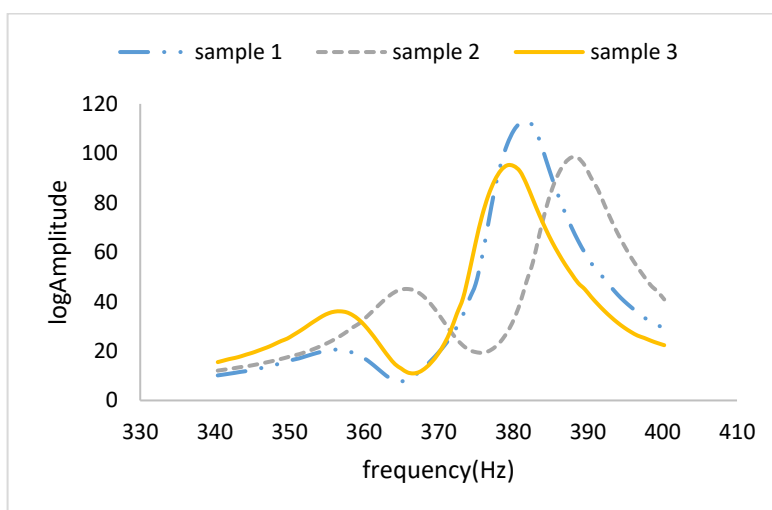
نمودار شکل (۴-۱۶) رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی حاوی ۵ درصد وزنی نانو ذره را تحت فرکانس اجباری ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) نمودارهای مود اول و دوم فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۶): نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪ وزنی نانو ذره.

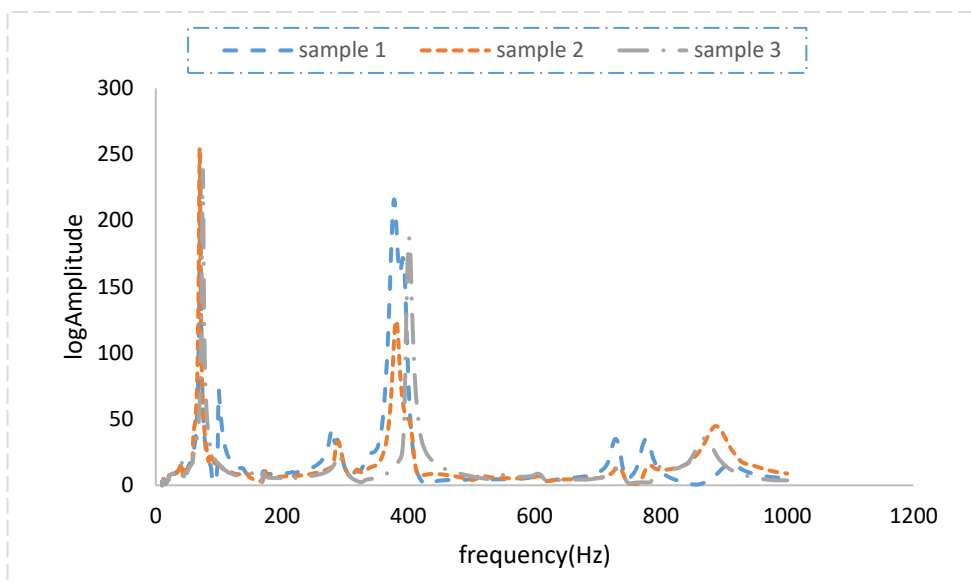


شکل (۴-۱۷): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪ وزنی نانو ذره.

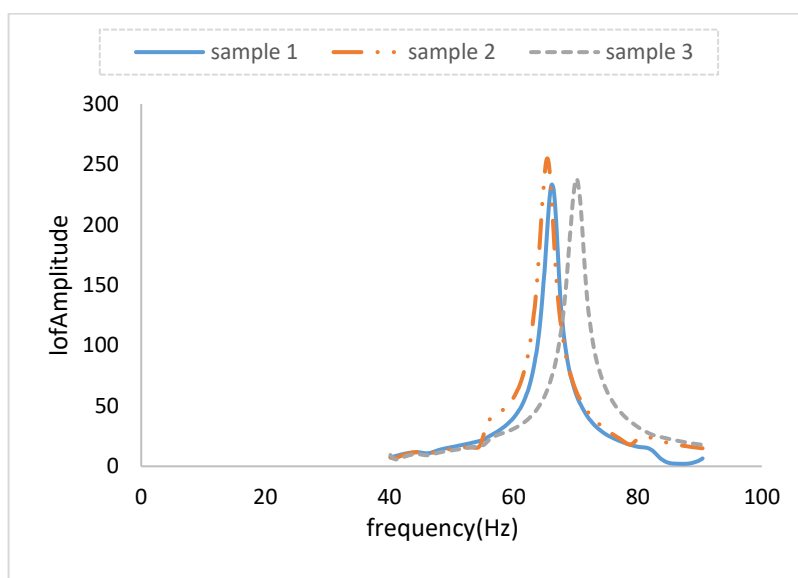


شکل (۴-۱۸): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪ وزنی نانو ذره.

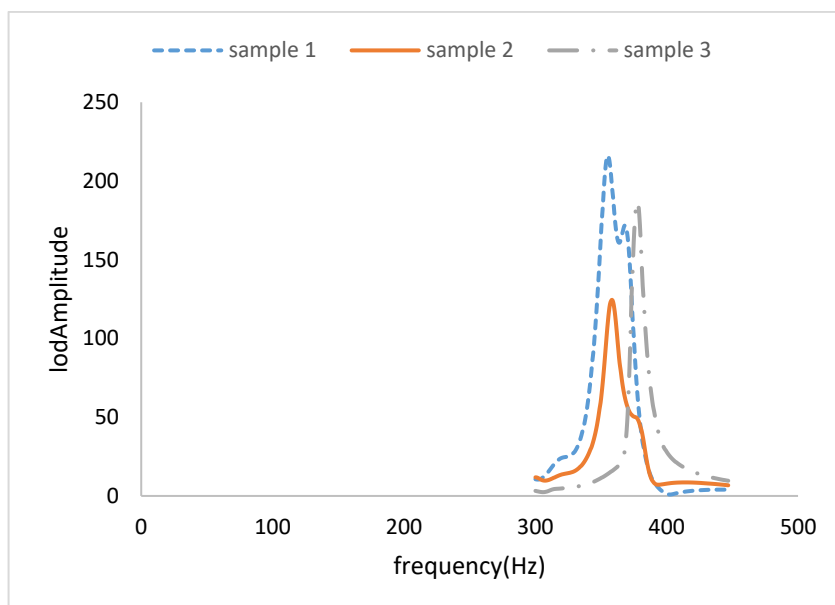
نمودار شکل (۴-۱۹) رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی حاوی ۷ درصد وزنی نانو ذره را تحت فرکانس اجباری ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) نمودارهای مود اول و دوم فرکانس‌های طبیعی را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۹): نمودار فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪ وزنی نانو ذره.



شکل (۴-۲۰): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪ وزنی نانو ذره.



شکل (۴-۲۱): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود دوم تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪ وزنی نانو ذره.

جدول (۴-۲): مقادیر فرکانس‌های طبیعی مود اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی.

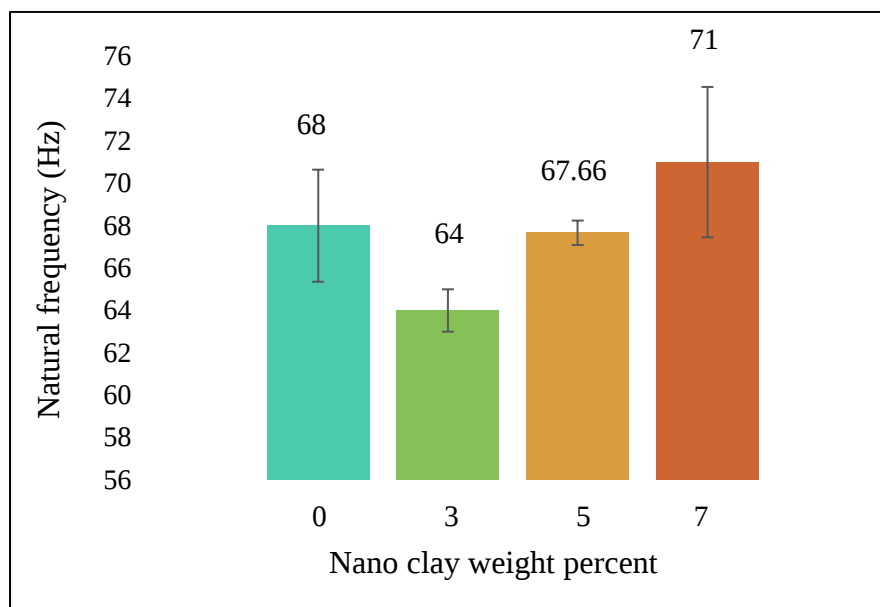
درصد تغییر	میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	فرکانس طبیعی مود اول
					نوع هسته
۰٪	58.66 ± 0.5	۵۸	۵۹	۵۹	هسته ساده
۱۶٪	68 ± 2.5	۷۰	۶۵	۶۹	هسته زیگزاگی

همانطور که از جدول (۴-۲) مشاهده می‌شود با تغییر در هسته، تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه / اپوکسی با هسته زیگزاگی نسبت به تیر ساندویچی با هسته ساده بدون افزودن نانو ذره ۱۶٪ افزایش در فرکانس طبیعی مود اول داشته است. علت این افزایش می‌تواند به دلیل چسبندگی بهتر پوسته به هسته در تیر زیگزاگی باشد.

جدول (۳-۴): مقادیر فرکانس‌های طبیعی مود اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته زیگزاگی حاوی درصد‌های مختلف نانورس.

درصد تغییر	میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	فرکانس طبیعی مود اول / درصد نانو ذرات رس
۰٪	۶۸±۲/۵	۷۰	۶۵	۶۹	۰٪
-۰/۶٪	۶۴±۰/۵	۶۳	۶۴	۶۵	۳٪
-۰/۱٪	۶۷/۶۶±۰/۵	۶۷	۶۸	۶۸	۵٪
۰/۴/۵٪	۷۱±۴/۵	۶۷	۷۶	۷۰	۷٪

با توجه با جدول (۳-۴) با افزودن درصد‌های وزنی مختلف نانو رس در تیر ساندویچی با هسته زیگزاگی نتایج بررسی گردید. تیر ساندویچی با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره نمونه مرجع بوده و تمام نمونه ها با تیر هسته زیگزاگی بدون نانو ذره مقایسه شده است. با افزودن ۳ درصد وزنی نانو رس در نمونه با هسته زیگزاگی فرکانس مود اول ۰/۶٪ کاهش داشته است. فرکانس طبیعی مود اول نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس ۰/۱٪ کاهش و فرکانس طبیعی مود اول نمونه ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس ۰/۴/۵٪ افزایش داشته است. بیشترین کاهش در فرکانس طبیعی مود اول متعلق به تیر ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس به میزان ۰/۶٪- و بیشترین افزایش مربوط به نمونه ۰/۷٪ وزنی به میزان ۰/۴/۵٪ بوده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود افزودن نانو ذره در درصد‌های وزنی پایین باعث کاهش فرکانس‌های طبیعی می‌شود و به مراتب در درصد‌های بالاتر نتایج بهتری نشان می‌دهند. شکل (۴-۲۲) نمودار افزایش فرکانس‌های طبیعی با افزودن نانو رس را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۲): نمودار فرکانس‌های طبیعی مود اول تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با افزودن نانو رس.

جدول (۴-۴): مقادیر فرکانس‌های تشدید مود دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی.

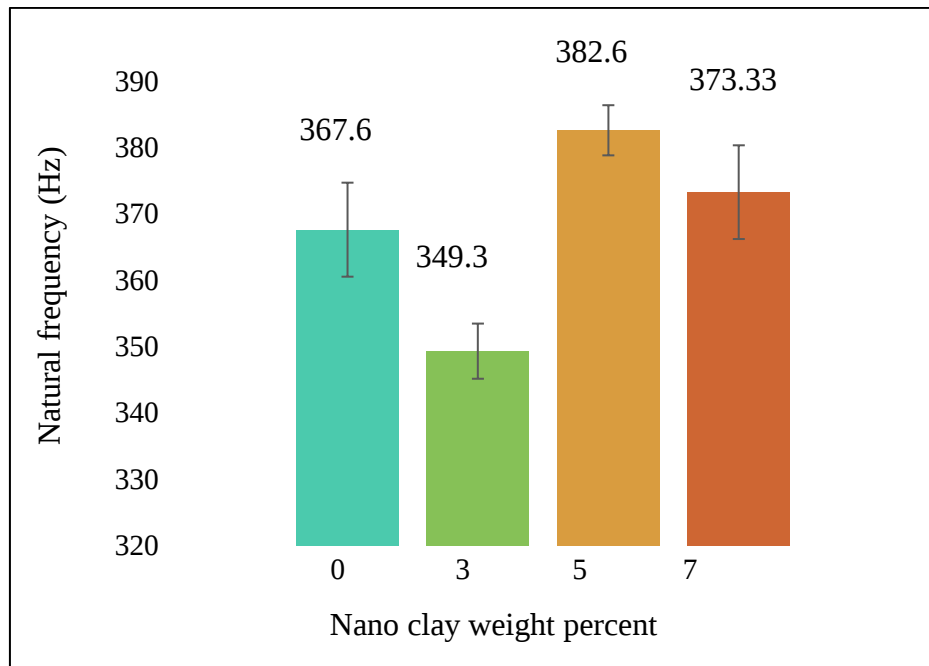
درصد تغییر	میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	فرکانس طبیعی مود دوم
					نوع هسته
٪۰	$335/66 \pm 2$	۳۳۵	۳۳۴	۳۳۸	هسته ساده
٪۹/۵	$367/66 \pm 7$	۳۷۴	۳۶۹	۳۶۰	هسته زیگزاگی

با توجه به جدول (۴-۴) همانند فرکانس‌های طبیعی مود اول فرکانس‌های طبیعی مود دوم هم مورد بررسی قرار گرفته است. فرکانس طبیعی مود دوم نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره نسبت به نمونه با هسته ساده ۹/۵٪ افزایش داشته است.

جدول (۴-۵): مقادیر فرکانس‌های طبیعی مود دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف نانو ذرات.

درصد افزایش	میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	فرکانس طبیعی مود دوم درصد نانو ذرات رس
%۰	$367/66 \pm 7$	۳۷۴	۳۶۹	۳۶۰	%۰
-%۵	$349/33 \pm 4$	۳۵۴	۳۴۶	۳۴۸	%۳
%۴	$382/66 \pm 3/5$	۳۸۰	۳۸۷	۳۸۱	%۵
%۱/۵	$373/33 \pm 5$	-	۳۶۸	۳۷۸	%۷

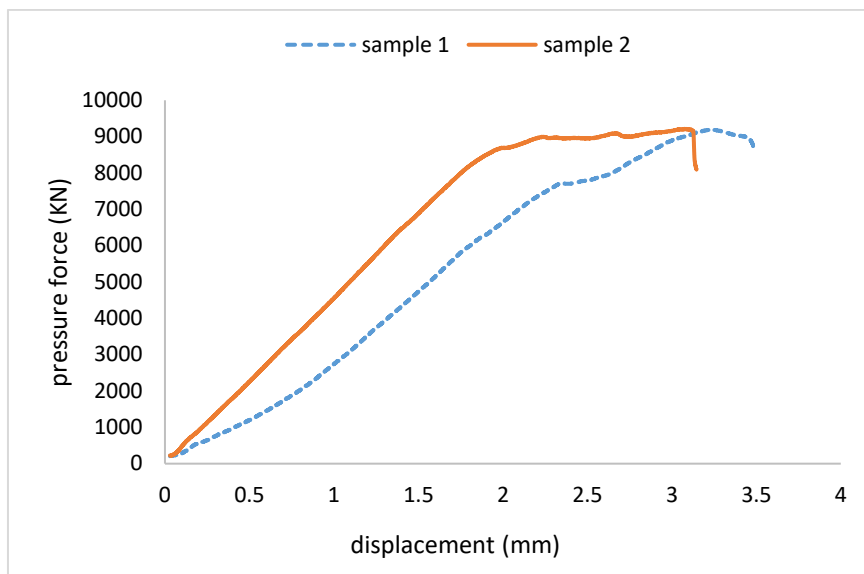
در جدول (۴-۵) فرکانس‌ها تشدید مود دوم تیرهای ساندویچی با هسته زیگزاگی و درصدهای مختلف وزنی نانو رس مورد بررسی قرار گرفته است. تیر ساندویچی با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره به عنوان مرجع انتخاب شده است. فرکانس تشدید مود دوم نمونه ۳ درصد وزنی با هسته زیگزاگی نسبت به نمونه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۵٪ درصد کاهش، فرکانس تشدید نمونه ۵ درصد وزنی با هسته زیگزاگی نسبت به نمونه مرجع ۴٪ افزایش و نمونه ۷ درصد وزنی با هسته زیگزاگی نسبت به نمونه مرجع ۴٪/۸ افزایش داشته است. همانطور که مشخص شده نمونه ۳ درصد وزنی باعث کاهش فرکانس تشدید مود دوم گردیده و نمونه‌های زیگزاگی ۵ و ۷ درصد وزنی باعث افزایش فرکانس‌های تشدید شده‌اند. بیشترین افزایش هم مربوط به نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس می‌باشد که به میزان ۴٪/۸ افزایش در فرکانس تشدید مود دوم داشته است. شکل (۴-۲۳) روند افزایش فرکانس‌های تشدید مود دوم را با افزایش نانو رس نشان می‌دهد.



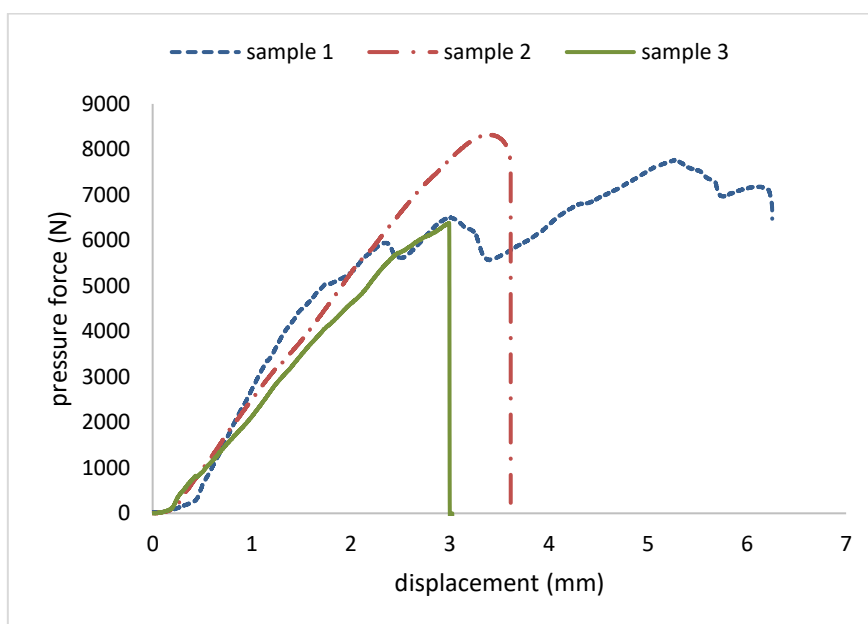
شکل (۴-۲۳): نمودار فرکانس‌های مود دوم تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته ساده و هسته زیگزاکی و افزودن نانو خاک رس.

۴-۴- بررسی نتایج آزمون کمانش

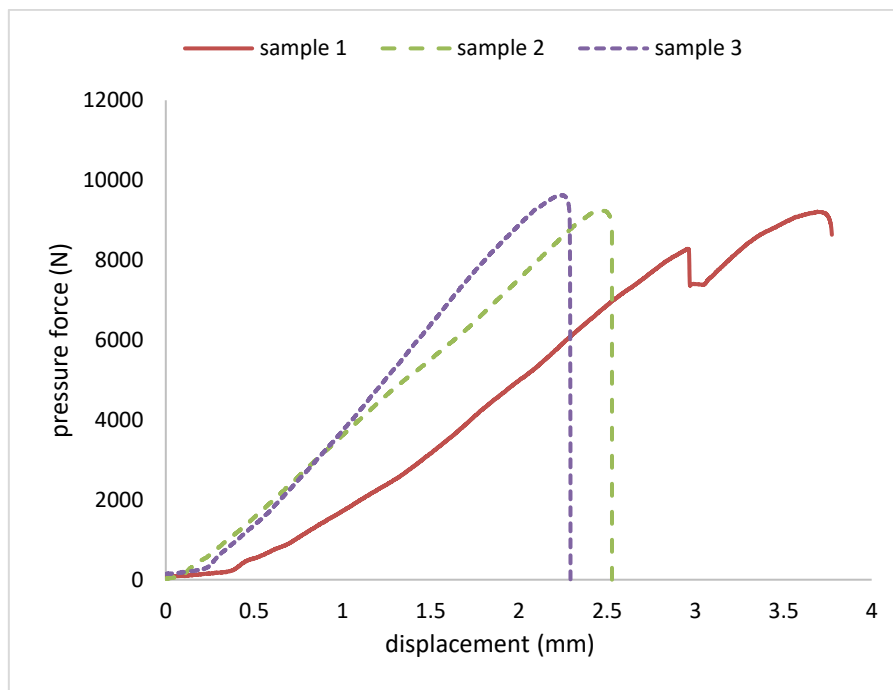
آزمون کمانش برای تمام نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته فومی ساده و زیگزاکی انجام گردیده است. نمودارهای زیر توسط دستگاه سنّام اندازه‌گیری و پردازش شده و به شکل نمودار نیرو-جاب‌جایی نمایش داده شده است. شکل (۴-۲۴) نمودار بار بحرانی کمانش ستون ساندویچی با هسته ساده را نمایش می‌دهد. شکل‌های (۴-۲۵)، (۴-۲۶)، (۴-۲۷) و (۴-۲۸) نمودارهای بار بحرانی کمانش ستون‌های ساندویچی با هسته زیگزاکی و درصد‌های وزنی ۰، ۳، ۵ و ۷ را نشان می‌دهد.



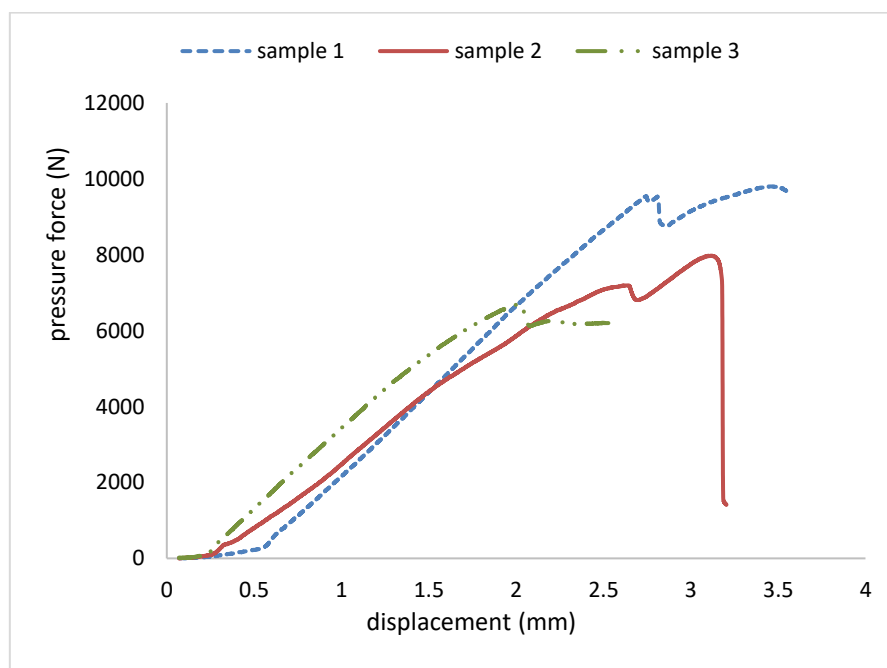
شکل (۴-۲۴): نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته فومی ساده، بدون افزودن نانو ذره.



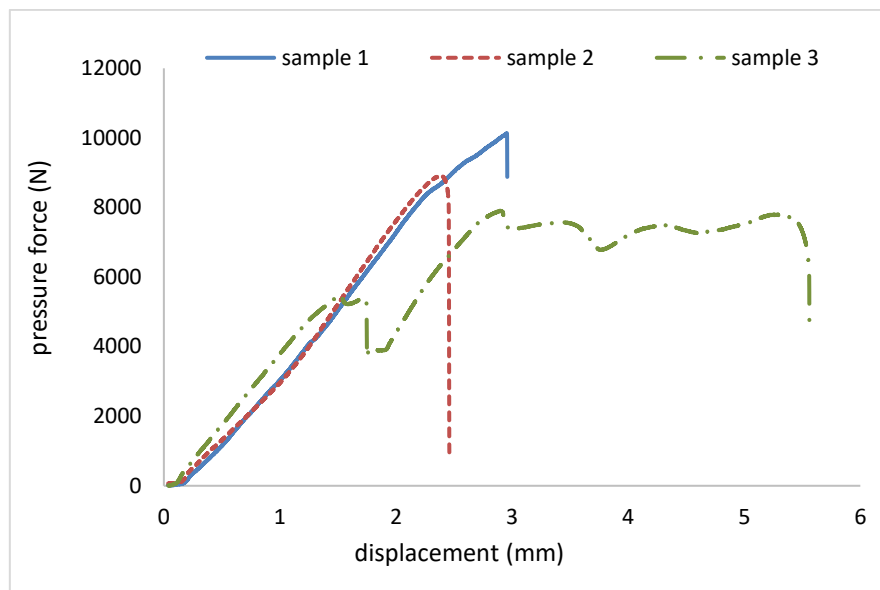
شکل (۴-۲۵): نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، بدون افزودن نانو ذره.



شکل (۴-۲۶): نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۳٪ وزنی نانورس.



شکل (۴-۲۷): نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۵٪ وزنی نانورس.



شکل (۴-۲۸): نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تیر ساندویچی اپوکسی / الیاف شیشه با هسته زیگزاگی، ۷٪ وزنی نانورس.

جدول (۴-۶): مقادیر بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته ساده و زیگزاگی (N).

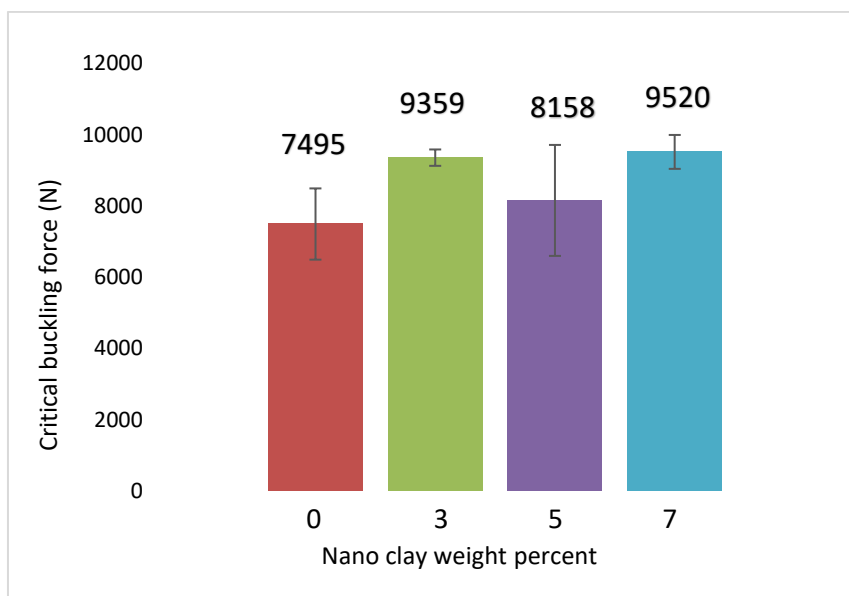
نوع هسته	بار بحرانی کمانش P_{cr} (N)				درصد
	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین	تغییرات
هسته ساده	۹۲۱۲	۹۱۹۲	—	۹۲۰۲ ± ۱۴	۰
هسته زیگزاگی	۷۷۷۰	۸۳۲۹	۶۳۸۶	۷۴۹۵ ± ۱۰۰۰	-۲۲

با توجه با جدول (۴-۶) استحکام بار بحرانی کمانشی نمونه با هسته زیگزاگی ۲۲ درصد نسبت به نمونه با هسته ساده کاهش پیدا کرده است. این کاهش به دلیل خطا در روش ساخت ممکن است اتفاق افتاده باشد.

جدول (۴-۷): مقادیر بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی حاوی درصدهای وزنی نانو رس (N).

درصد ذرات رس	بار بحرانی کمانش Pcr (N)				درصد تغییرات
	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین	
٪۰	۷۷۷۰	۸۳۲۹	۶۳۸۶	7495 ± 1000	۰
٪۳	۹۲۱۲	۹۲۴۱	۹۶۲۴	9359 ± 229	+۲۵
٪۵	۹۸۰۰	۷۹۷۶	۶۷۰۰	8158 ± 1558	+۸
٪۷	۱۰۱۳۴	۸۹۰۷	-	9520 ± 613	+۲۷

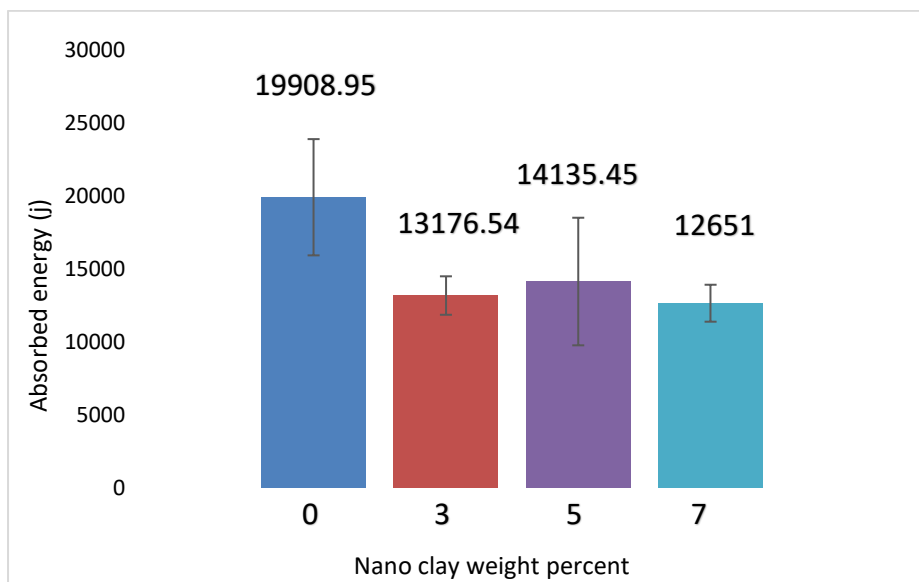
به کمک نتایج حاصل از نمودارها نتایج بار بحرانی کمانش در جدول (۴-۷) آمده است. نمونه مرجع تیر ساندویچی کامپوزیتی با هسته زیگزاگی در نظر گرفته شده است. با افزودن ۳ درصد وزنی نانو ذره خاک رس ۲۵ درصد افزایش در بار بحرانی کمانش نتیجه گرفته شده است. افزودن ۵ درصد وزنی نانو رس ۸ درصد افزایش در بار بحرانی کمانش ایجاد کرده است. همچنین با افزودن ۷ درصد وزنی نانو رس مقدار بار بحرانی کمانش به ۲۷ درصد افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل (۴-۲۸) نمودار نیرو جابه‌جایی تیر با هسته زیگزاگی و افزودن ۷ درصد وزنی نانو رس، یکی از نمونه‌ها اختلاف زیادی با دو نمونه دیگر دارد لذا نمونه‌ای که خطا داشته حذف شده و میانگین دو نمونه دیگر مورد بررسی قرار گرفته اند. در نمونه ۷ درصد وزنی بیشترین افزایش در بار بحرانی کمانش مشاهده گردید و کمترین میزان افزایش مربوط به نمونه ۵ درصد وزنی بوده است. نتایج ستون ساندویچی ۳ درصد وزنی با توجه به این که هر ۳ نمونه در یک محدوده بوده‌اند، از نمونه‌های دیگر قابل اطمینان‌تر است. در شکل (۴-۲۹) نتایج کمانش به صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۹): نمودار بار بحرانی کمانش تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی و افزودن نانو رس.

۴-۵- انرژی جذب شده

میزان انرژی جذب شده از مساحت سطح زیر هر نمودار محاسبه شده است و انحراف از معیار خطا هم به صورت خط‌های عمودی بالای نمودارها نشان دهنده اختلاف مقادیر انرژی جذب شده در هر نمونه است.



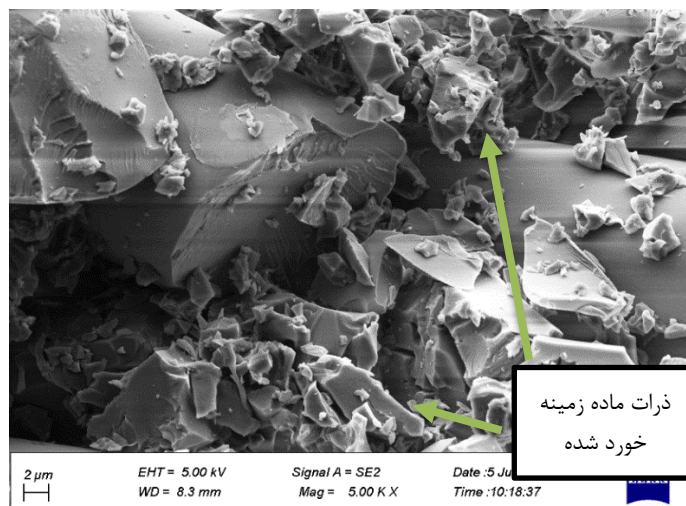
شکل (۴-۳۰): نمودار انرژی ذخیره شده تیرهای ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگزاگی با درصدهای مختلف وزنی نانو رس.

با توجه به نمودار شکل (۴-۳۰) انرژی ذخیره شده در نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگراگی بدون افزودن نانو ذره به عنوان نمونه مرجع $19908/95 \text{ KJ}$ می باشد که بیشترین مقدار را دارد. انرژی جذب شده نمونه ساندویچی کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته زیگراگی با افزودن ۳ درصد وزنی نانو رس با کاهش ۳۴٪ به مقدار 12651 KJ رسیده است. نمونه های ۵ درصد وزنی نانو رس و ۳ درصدی وزنی به ترتیب ۲۹٪ و ۳۴٪ کاهش داشته اند. با توجه به این که نمونه ۷ درصد وزنی از نمونه ۳ درصد وزنی انرژی ذخیره شده کمتری دارد می توان نتیجه گرفت با افزودن نانو ذرات در مقادیر بالا انرژی ذخیره شده کاهش می یابد.

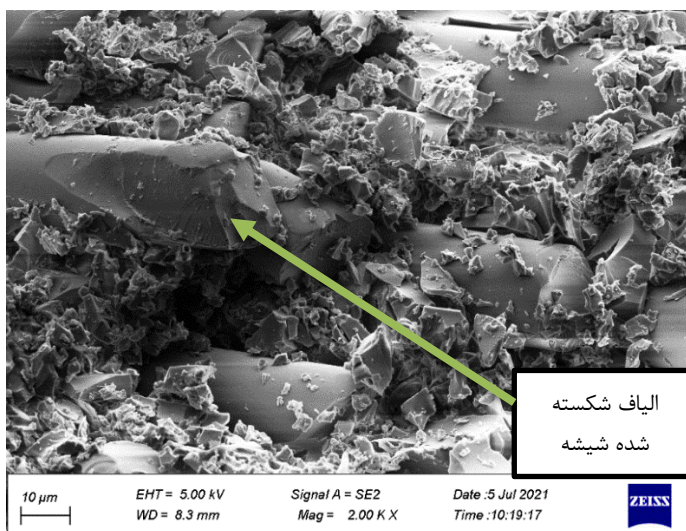
۴-۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

نمونه ها به جهت بررسی سطحی و پیوند ایجاد شده بین نانو ذرات رس و ماده زمینه رزین به ابعاد یک سانتی متر برش خورده و یک لایه روکش طلا روی نمونه برش خورده قرار داده شده است. تصاویر زیر نحوه توزیع نانو رس در نمونه های ۰، ۳، ۵، و ۷ درصد وزنی را نشان می دهند. همانطور که تصاویر نمایش داده شده است، در شکل (۴-۳۱-الف) نمونه بدون نانو ذره فقط ذرات شکسته شده رزین قابل مشاهده است که در اطراف رشته الیاف شیشه قابل مشاهده می باشد. ذرات شکسته شده ناشی از مواد پراکنده اطراف محل برش خورده می باشد. در شکل (۴-۳۱-ب) و (۴-۳۱-ج) نمای کلی از محل برش خورده را نشان می دهند. ذرات نانورس در نمونه ۳ درصد وزنی همانطور که در شکل (۴-۳۲-الف) مشاهده می شود از پراکندگی خوبی برخوردار بوده و کاملاً رشته های الیاف شیشه را احاطه کرده است. همچنین در شکل (۴-۳۲-ب) و (۴-۳۲-ج) رشته های شکسته شده الیاف شیشه شکسته شده در دو جهت ۰ و ۹۰ درجه قابل مشاهده می باشد. با توجه به شکل (۴-۳۳) نمونه ۵ درصد وزنی ذرات نانو رس دچار پدیده انباشتگی شده اند. با توجه به وقفه در فرایند ساخت و ته نشین شدن نانو رس در رزین امکان این وجود داشته که باعث انباشته شدن نانورس در ترکیب رزین شده باشد. در شکل (۴-۳۴-الف) نمونه ۷ درصد وزنی مشاهده می شود که ذرات نانو رس همچون نمونه ۳ درصد وزنی رشته های الیاف را به خوبی احاطه کردند. شکل (۴-۳۴-ب) و (۴-۳۴-ج) شکسته شدن الیاف شیشه و پراکندگی نانو ذرات رس را نشان می دهند. نتایج نشانگر این است که هرچه عملیات اختلاط نانو رس با ماده زمینه بهتر و با دقت و زمان بندی دقیق تری انجام شود ماده همگن تر و نتایج بهتر می شود. از طرفی افزایش بیشتر نانو رس باعث ترد شدن ماده زمینه می شود.

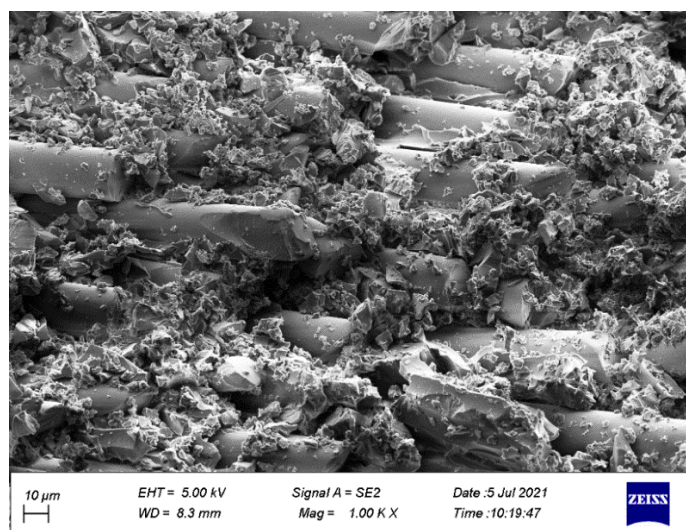
1 Scanning Electron Microscope



(الف)

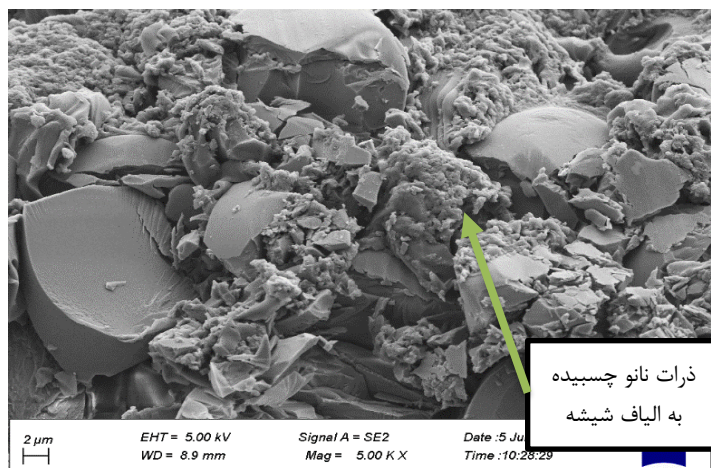


(ب)

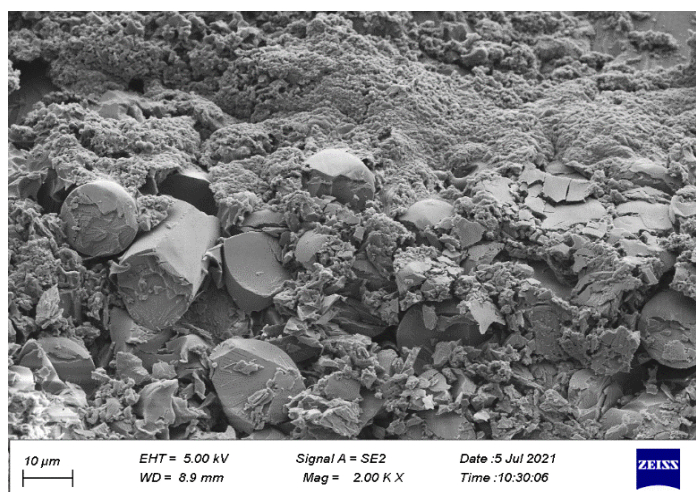


(ج)

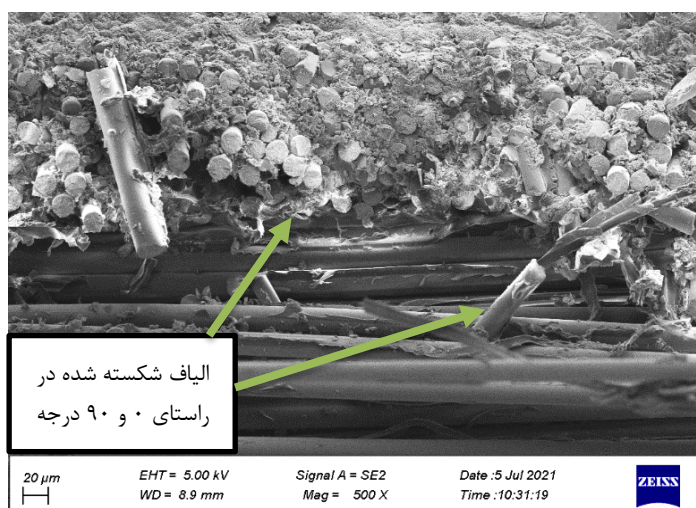
شکل (۴-۳۱): شکست الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی ۰ درصد وزنی نانورس.



(الف)

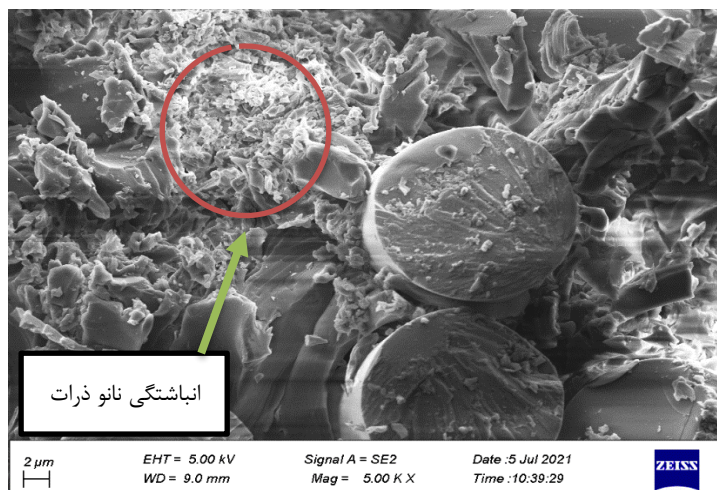


(ب)

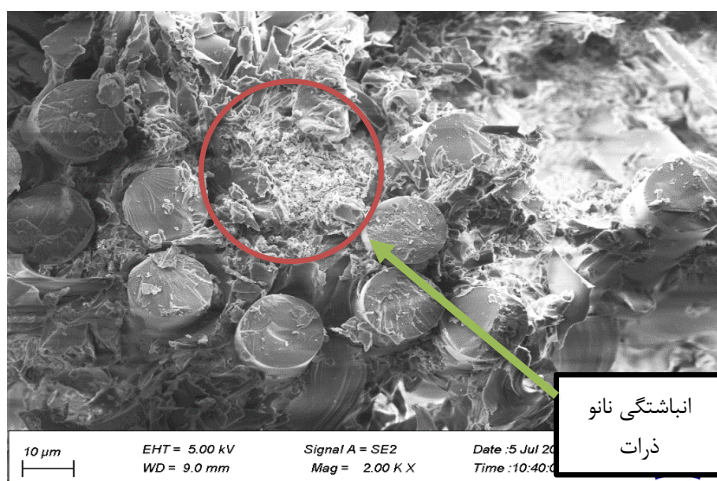


(ج)

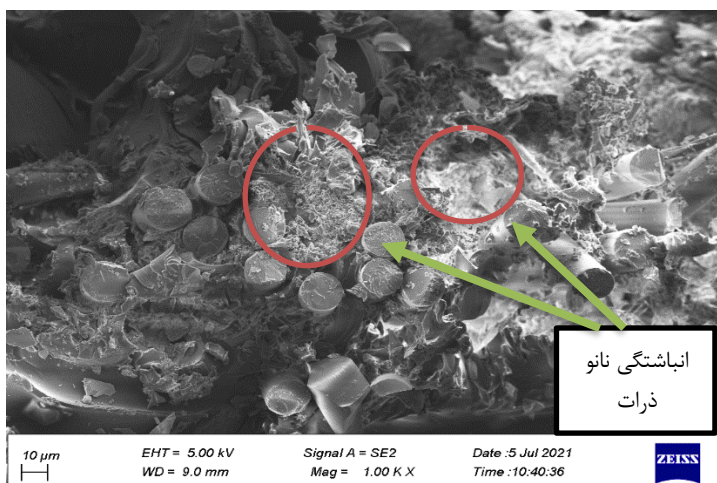
شکل (۴-۳۲) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۳ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس.



(الف)

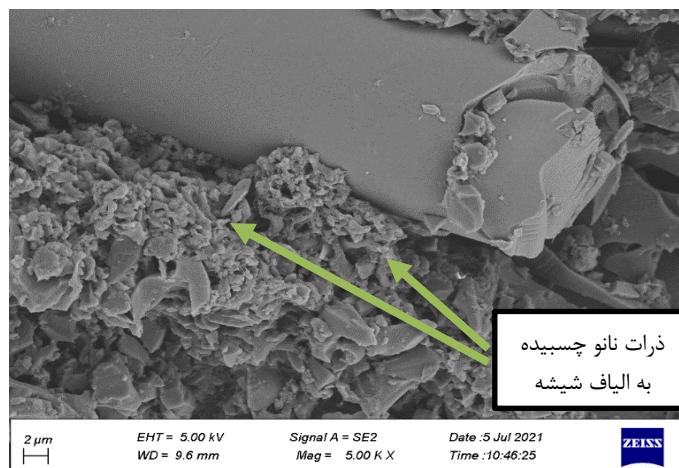


(ب)

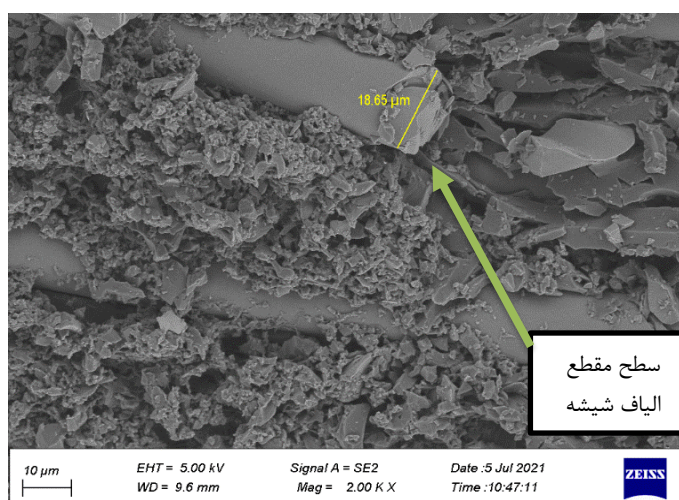


(ج)

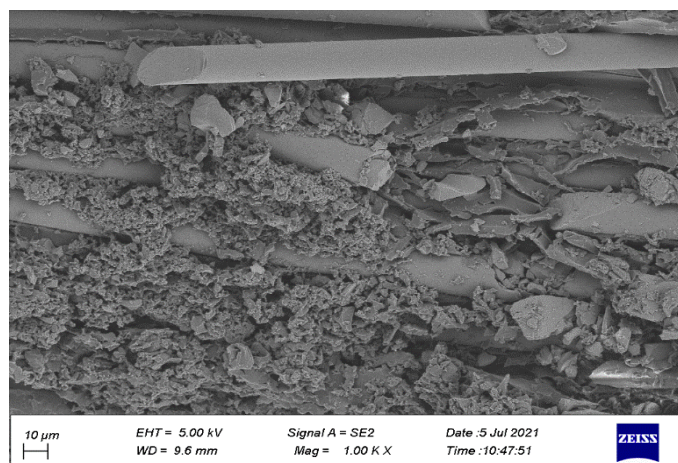
شکل (۴-۳۳) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۵ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴-۳۴) الف: چسبندگی ذرات نانو به الیاف شیشه در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۷ درصد وزنی نانو رس، ب: پراکندگی ذرات نانو در ماده زمینه حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس، ج: نمایی از قطعه برش خورده کامپوزیت شیشه/اپوکسی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس.

۴-۷- اعتبار سنجی با استفاده از نرم افزار آباکوس

نتایج تحلیل بار فشاری ستون ساندویچی کامپوزیتی و تیر ساندویچی کامپوزیتی با هسته ساده در نرم افزار المان محدود آباکوس به دست آمده است. با توجه به این که نتایج آزمایشگاهی وابسته به مراحل ساخت و زمان سپری شده می باشد لذا کوچکترین تغییرات در آماده سازی نمونه ها باعث ایجاد اختلاف بین نتایج به دست آمده از آزمون های تجربی و شبیه سازی می شود؛ لذا اختلاف بین این دو نتیجه تا حدی قابل توجیه است. با توجه به جدول (۴-۸) نتیجه آزمایشگاهی بار بحرانی کمانش ستون ساندویچی با هسته ساده در مقایسه با نتیجه حل عددی ۱۱٪ اختلاف دارد. همچنین نتایج آزمایشگاهی فرکانس طبیعی مود اول و دوم به ترتیب ۱۷٪ و ۸٪ با نتایج حل عددی اختلاف دارند. در جدول (۴-۹) چینش الیاف رویه کامپوزیتی در جهت های ۰، ۹۰ و ۴۵ بررسی شده، نتایج شبیه سازی نشان می دهد در بار فشاری محوری چینش [۰/۰/۰] عملکرد بهتری دارد.

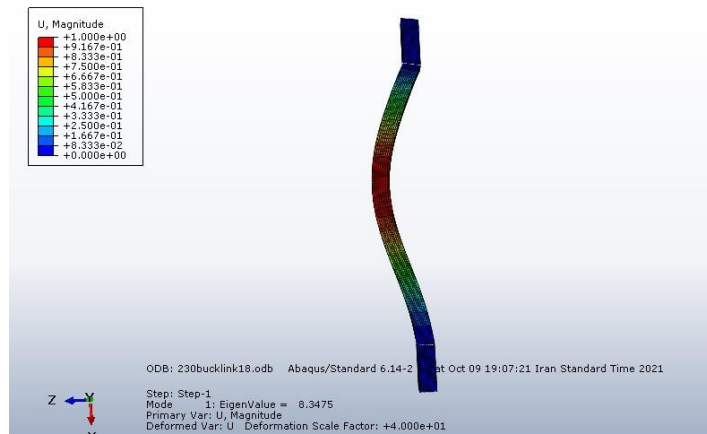
جدول (۴-۸): مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی نمونه های ساندویچی با هسته ساده.

نتایج شبیه سازی ستون و تیر ساندویچی با هسته ساده	نتایج حل عددی	نتایج آزمایشگاهی	درصد خطا با نتایج آزمایشگاهی
بار بحرانی کمانش (kN)	۸/۳۴۷	۹/۲	۱۱٪
فرکانس طبیعی مود اول (Hz)	۶۴/۳۴	۵۸/۶۶	۹٪
فرکانس طبیعی مود دوم (Hz)	۲۹۸/۲۷	۳۳۵/۶۶	۱۲/۵٪

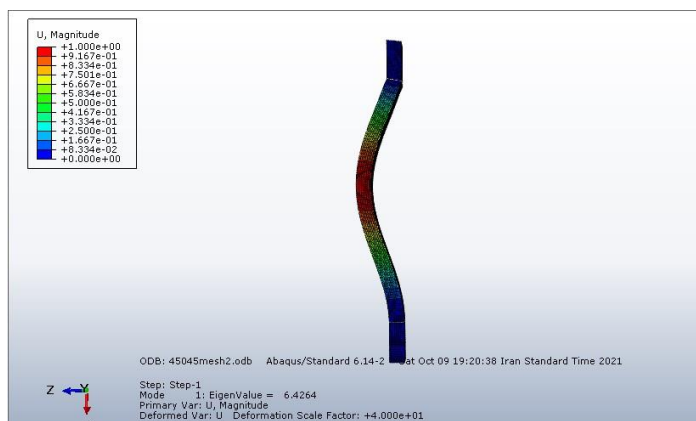
جدول (۴-۹): مقایسه بار بحرانی کمانش حاصل از نتایج حل عددی برای ستون ساندویچی با تغییر در زاویه چینش الیاف شیشه مربوط به رویه های کامپوزیتی.

چینش الیاف با جهت های مختلف	بار بحرانی کمانش (kN)
۰/۰/۰	۸/۳۴۷
۰/۹۰/۰	۷/۵۸۶
+۴۵/۰/-۴۵	۶/۴۲۶
۹۰/۰/۹۰	۶/۳۳۹

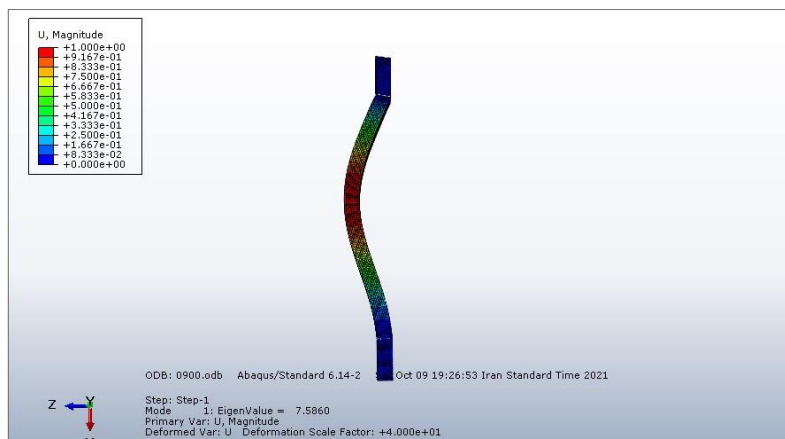
در شکل‌های (۳۵-۴)، (۳۶-۴)، (۳۷-۴) و (۳۸-۴) کمانش ستون‌های ساندویچی در شرایط دو سر گیردار، با چیدمان الیاف شیشه در جهت‌های ۰/۰/۰، ۴۵/۰/۰، ۰/۹۰/۰ و ۹۰/۰/۰ نشان داده شده است. در شکل‌های (۳۹-۴) و (۴۰-۴) فرکانس طبیعی مود اول و فرکانس تشدید دوم تیر ساندویچی نشان داده شده است.



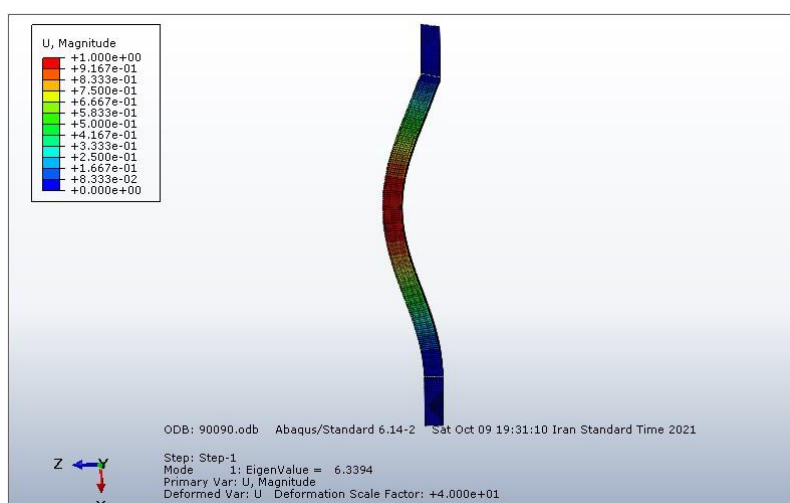
شکل (۳۵-۴): کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۰/۰/۰



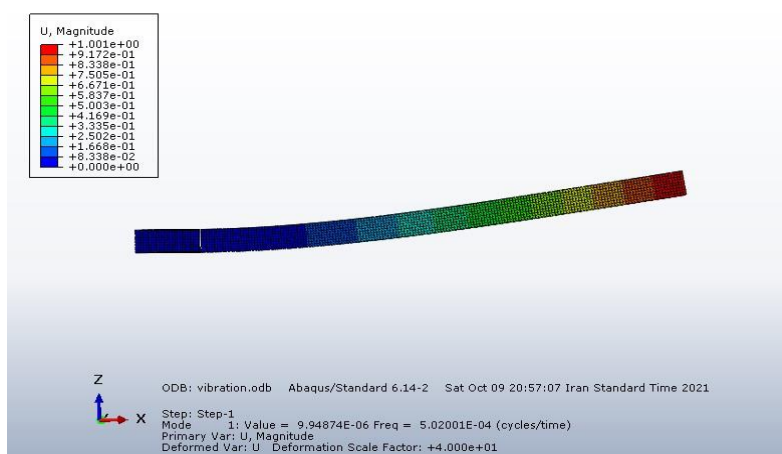
شکل (۳۶-۴): کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۴۵/۰/۰



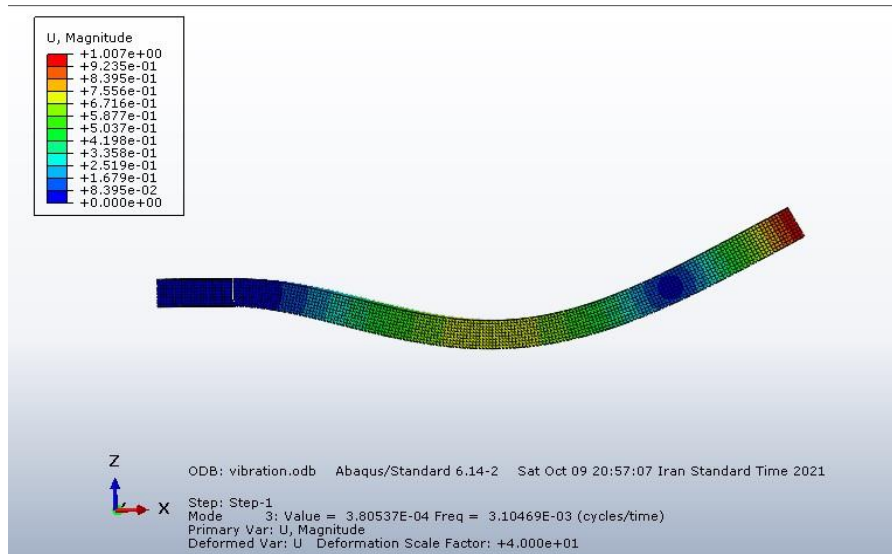
شکل (۴-۳۷): کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۰/۹۰/۰



شکل (۴-۳۸): کمانش ستون ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت فشار محوری با چینش الیاف ۹۰/۰/۹۰



شکل (۴-۳۹): مود اول فرکانس طبیعی تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده .



شکل (۴-۴): مود دوم فرکانس تشدید تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده.

۴-۸- خلاصه مطالب فصل

در این فصل نتایج آزمون کشش کامپوزیت، نتایج آزمون ارتعاش تیرهای ساندویچی، بررسی شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی اول، نتایج آزمون بار فشاری و بدست آوردن بار بحرانی کماتش ستون‌های ساندویچی، انرژی جذب شده ستون‌های ساندویچی، تصاویر الکترونی روبشی و حل عددی تیر و ستون ساندویچی در نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شد.

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

استفاده از سازه‌های ساندویچی به دلیل قیمت ارزان و نسبت خواص مکانیکی به وزن بالا به سرعت در حال افزایش است. در این پژوهش امکان افزایش خواص ارتعاشی و کمانشی کامپوزیت ساندویچی با هسته زیگزاگی فوم/الیاف شیشه در مقایسه با هسته فومی ساده بررسی شد. افزایش این نسبت به معنی جلوگیری از افزایش وزن علاوه بر حفظ خواص مکانیکی مورد نیاز می‌باشد و این ویژگی در صنایع مختلف به خصوص در صنعت هوافضا مورد توجه می‌باشد. چراکه باعث کاهش مصرف سوخت وسایل پرنده هوایی یا فضایی می‌شود. برای این منظور در ساخت ساندویچ پانل‌ها از یک هسته پیچشی الیاف شیشه/ فوم پی‌وی‌سی و یک هسته ساده فوم پی‌وی‌سی استفاده شده است. لایه رویی و زیرین از کامپوزیت شیشه اپوکسی با درصد‌های وزنی مختلف وزنی نانو رس ساخته شده‌اند. خواص ارتعاشی و کمانشی تیرهای برش خورده ساندویچی کامپوزیتی بررسی شده است. در نهایت با بررسی دقیق نتایج زیر بدست آمده است.

۵-۲- نتایج حاصل از آزمون ارتعاش

در آزمون ارتعاش تأثیر تغییر هسته بر روی فرکانس‌های طبیعی تیرهای ساندویچی کامپوزیتی بررسی شده است. همچنین تأثیر افزودن نانو رس بر روی تیرهای ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تغییرات در ساختار هسته و درصد‌های مختلف نانو ذرات به شرح زیر می‌باشد:

۱- با تغییر در هسته تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی از هسته ساده به هسته زیگزاگی، ۱۶٪ افزایش در فرکانس طبیعی مود اول داشته‌ایم.

۲- با افزودن ۳ درصد وزنی نانو رس فرکانس طبیعی مود اول نسبت به نمونه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۶٪ کاهش داشته است.

۳- با افزودن ۵ درصد وزنی نانو رس فرکانس طبیعی مود اول نسبت به نمونه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۱٪ کاهش داشته است.

۴- با افزودن ۷ درصد وزنی نانو رس فرکانس طبیعی مود اول نسبت به نمونه با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره ۴/۵٪ افزایش داشته است.

۵- بیشترین کاهش در فرکانس طبیعی مود اول مربوط به نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس به میزان ۶٪- می‌باشد و بیشترین افزایش مربوط به نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی

حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس به میزان ۴/۵٪ می‌باشد.

۶- فرکانس تشدید مود دوم نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی با هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره، نسبت به نمونه ساده بدون افزودن نانو ذره ۹/۵٪ افزایش داشته است.

۷- فرکانس تشدید مود دوم نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۳ درصد وزنی نانو رس، نسبت به نمونه بدون نانو ذره ۵٪ درصد کاهش داشته است.

۸- فرکانس تشدید مود دوم نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس، نسبت به نمونه بدون نانو ذره ۴٪ درصد افزایش داشته است.

۹- فرکانس تشدید مود دوم نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس، نسبت به نمونه بدون نانو ذره ۴/۸٪ درصد افزایش داشته است.

۱۰- بیشترین کاهش مربوط به نمونه ساندویچی کامپوزیتی ۳ درصد وزنی می‌باشد، که به میزان ۵٪ - کاهش داشته و بیشترین افزایش مربوط به نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی حاوی ۷ درصد وزنی نانو رس می‌باشد که به میزان ۴/۸٪ افزایش در فرکانس طبیعی مود دوم داشته است.

۵-۳- نتایج حاصل از آزمون فشار محوری

در این پژوهش تأثیر تغییر هسته بر بار بحرانی کمانش و همچنین تأثیر افزودن نانو رس بر بار بحرانی کمانشی تیر ساندویچی اپوکسی/الیاف شیشه با هسته‌ای از جنس فوم PVC انجام گردید. همچنین تأثیر افزودن درصدهای مختلف نانو رس به ماده زمینه در تیر ساندویچی با هسته زیگزاگی بررسی شده است. نتایج نهایی به شرح زیر می‌باشد:

۱- بیشترین تأثیر افزودن نانو ذرات در ۷ درصد وزنی با افزایش ۲۷ درصدی بار بحرانی کمانش مشاهده شد و کمترین افزایش مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانو رس بوده است.

۲- با تغییر هسته از هسته ساده به هسته زیگزاگی بدون افزودن نانو ذره نیز نیروی بحرانی کمانش ۲۲ درصد کاهش پیدا کرده است.

۳- با افزودن ۵ درصد وزنی نانو رس ۸ درصد افزایش در بار بحرانی کمانش مشاهده گردید.

۴- می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نانو ذرات در نمونه ۷ درصد وزنی بیشترین افزایش در بار بحرانی کمانش بدست آمده است. از طرفی کمترین میزان افزایش مربوط به نمونه ۵ درصد وزنی بوده است که نتیجه انباشتگی نانو ذرات می‌باشد.

۵- اختلاط بهتر نانو رس در ماده زمینه باعث چسبندگی بهتر الیاف به ماده زمینه و همچنین چسبندگی بهتر ما بین پوسته کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی و فوم می‌شود و جدایش کمتر اتفاق می‌افتد.

۵-۴- نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

ذرات نانورس در نمونه ۳ و ۷ درصد وزنی از پراکندگی خوبی برخوردار بوده و کاملاً رشته‌های الیاف شیشه را احاطه کرده است. در نمونه ۵ درصد وزنی نانو رس، ذره‌های نانو رس دچار کلوخگی شده‌اند. با توجه به وقفه در فرایند ساخت و ته نشین شدن نانو رس در رزین این امکان وجود داشته که باعث کلوخه شدن نانورس و ایجاد انباشتگی در ترکیب رزین شده باشد. هرچه عملیات اختلاط نانو رس با ماده زمینه بهتر و با دقت و زمان‌بندی دقیق‌تری انجام شود ماده همگن‌تر و نتایج بهتر می‌شود.

۵-۵- نتایج شبیه‌سازی المان محدود

نتایج شبیه‌سازی به جهت اعتبار سنجی آزمون بار فشاری و آزمون ارتعاشی برای هسته ساده انجام شده است. نتایج تحلیل بار فشاری ستون ساندویچی کامپوزیتی و تیر ساندویچی با هسته ساده در نرم افزار المان محدود آباکوس به‌دست آمده است. اختلاف نتایج شبیه‌سازی در بار بحرانی کمانش ستون ساندویچی در مقایسه با نتایج حل عددی ۱۱٪ می‌باشد. همچنین نتایج آزمایشگاهی فرکانس طبیعی مود اول و دوم تیر ساندویچی به ترتیب ۱۷٪ و ۸٪ با نتایج حل عددی اختلاف دارند.

۵-۶- پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

- ۱- بررسی رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی ساخته شده در این پژوهش.
- ۲- مقایسه نتایج حاصل از افزودن نانو رس در نمونه ساخته شده در این پایان‌نامه با نانو ذرات دیگر، مانند کربن و گرافن و بررسی بهبود در چسبندگی بین رویه و هسته.
- ۳- استفاده از الیاف کربن در هسته یا رویه و مقایسه آن با نتایج این پژوهش.
- ۴- تغییر زاویه الیاف شیشه استفاده شده در هسته از ۹۰ درجه به ۰ درجه و بررسی استحکام فشاری تیر ساندویچی کامپوزیتی.
- ۵- بررسی رفتار کمانشی تیر ساندویچی الیاف شیشه/اپوکسی با هسته فوم پی‌وی‌سی و هسته چوب بالسا.
- ۶- استفاده از روش همبستگی ارتعاشی در تعیین بار بحرانی ستون‌ها.
- ۷- استفاده از الیاف به کمک فرآیند اصلاح سطحی و ساخت نمونه‌های پانل ساندویچی.
- ۸- بررسی اثر انحنای اولیه بر رفتار ارتعاشی و کمانشی پنل‌های ساندویچی.
- ۹- بررسی اثر شکل موج هسته بر رفتار ارتعاشی و کمانشی پنل‌های ساندویچی.

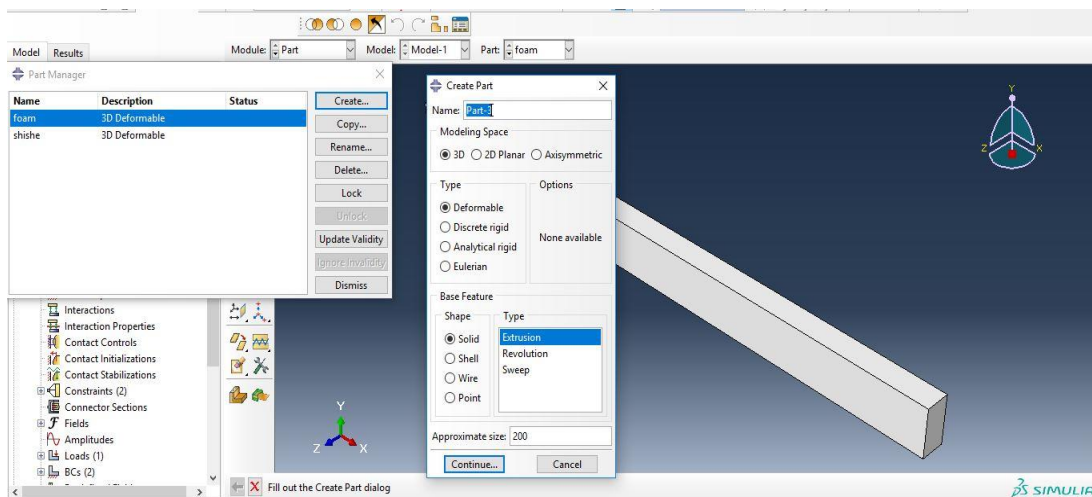
پوست الف: مدلسازی تیرساندویچی کامپوزیتی

پیوست الف-۱- مقدمه

در این بخش مدل سازی نمونه ساخته شده توسط نرم افزار المان محدود انجام شده است. برای مدل کردن نمونه ها از نرم افزار ABAQUS 6.14.2 استفاده شده است. مراحل مدل سازی به ترتیب شرح داده شده است.

پیوست الف-۲-مدلسازی پوسته کامپوزیتی و هسته

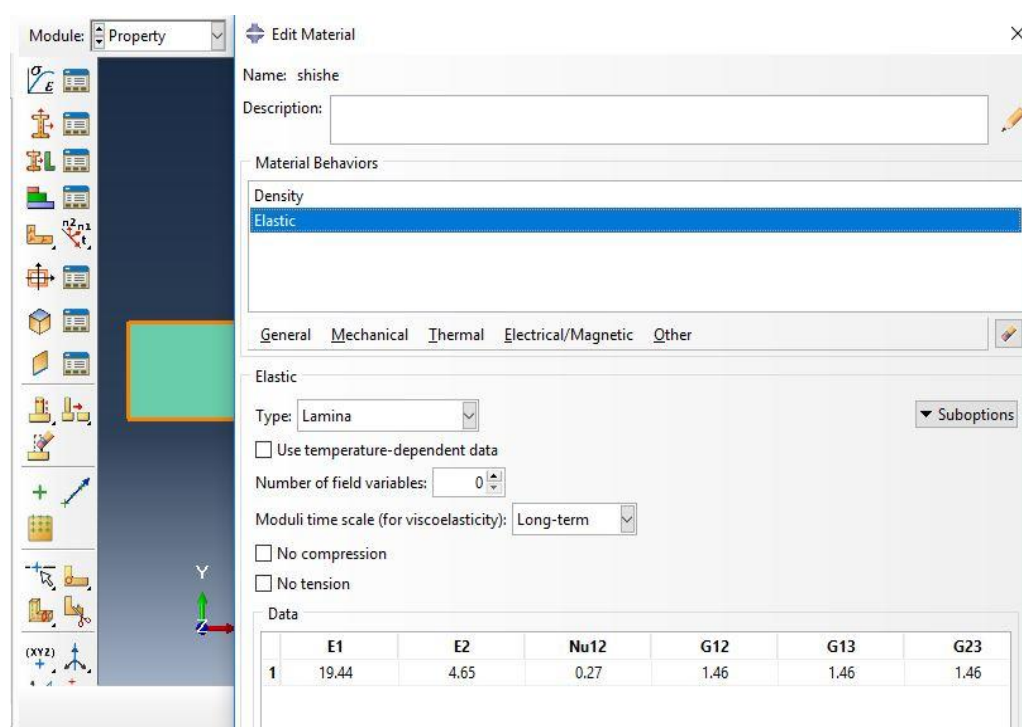
به منظور مدل کردن نمونه در نرم افزار المان محدود، در ماژول Part برای نمونه تیر ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم دو نوع Part تعریف شده است. یکی برای رویه کامپوزیتی بالا و پایین و یکی برای هسته فوم. رویه بالا و پایین تیر یکی در نظر گرفته شده زیرا خواص یکسانی دارند. برای هسته فومی از قسمت Part manager روی گزینه create part کلیک کرده و در فضای سه بعدی، نوع Deformation انتخاب شده و در قسمت Base Feature حالت solid و ویژگی Extrusion انتخاب می شود. برای رویه کامپوزیتی هم در فضای سه بعدی و نوع Deformable اما به جای Solid حالت Shell را انتخاب کرده و ویژگی آن هم Planar می باشد. ابعاد پوسته کامپوزیتی 30×400 و ابعاد هسته فوم $15 \times 30 \times 400$ می باشد. شکل (الف-۱) محیط Part را نمایش می دهد.



شکل (الف-۱): مدل سازی هسته فومی تیر ساندویچی در فضای ۳ بعدی با هسته ساده در قسمت Part.

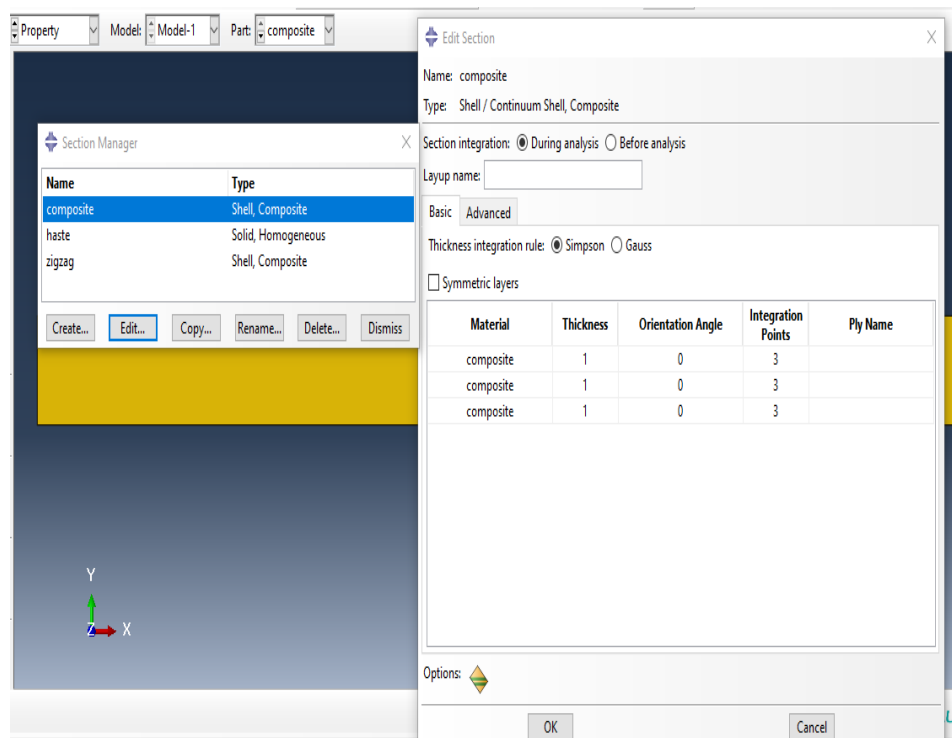
پیوست الف-۳- خواص مواد

برای تعیین خواص مکانیکی مواد استفاده شده در هسته PVC و رویه کامپوزیتی وارد ماژول Property شده و از قسمت Material Manager گزینه Create Material را کلیک کرده و خواص مواد را در کادری که باز شده انتخاب و وارد می‌کنیم. برای هسته PVC در کادر Edit Material در پایین کادر از قسمت General گزینه Density را و چگالی ماده فوم PVC را وارد و تأیید کرده. حال در قسمت Mechanical خواص الاستیک فوم را وارد می‌کنیم، از قسمت Mechanical، گزینه Elasticity و سپس Elastic را انتخاب کرده. در جدول باز شده از کادر نوع ماده گزینه الاستیک را انتخاب، مدول یانگ فوم PVC و ضریب پواسون را وارد و تأیید کرده. برای تعیین خواص رویه کامپوزیتی شیشه اپوکسی و خواص لایه کامپوزیتی وسط هسته همانند فوم Material جدیدی درست کرده و چگالی کامپوزیت از قسمت General وارد شده است. برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت نیز از قسمت mechanical و در قسمت Type نوع Lamina انتخاب شده است. در شکل (الف-۲) با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون کشش کامپوزیت شیشه/اپوکسی مدول E_1 , E_2 , V_{12} , G_{12} , G_{13} و G_{23} وارد شده‌اند. در جدول (۴-۱) مقادیر به دست آمده از آزمون کشش آورده شده است.



شکل (الف-۲): تعیین خواص مواد کامپوزیت شیشه/اپوکسی در قسمت Property.

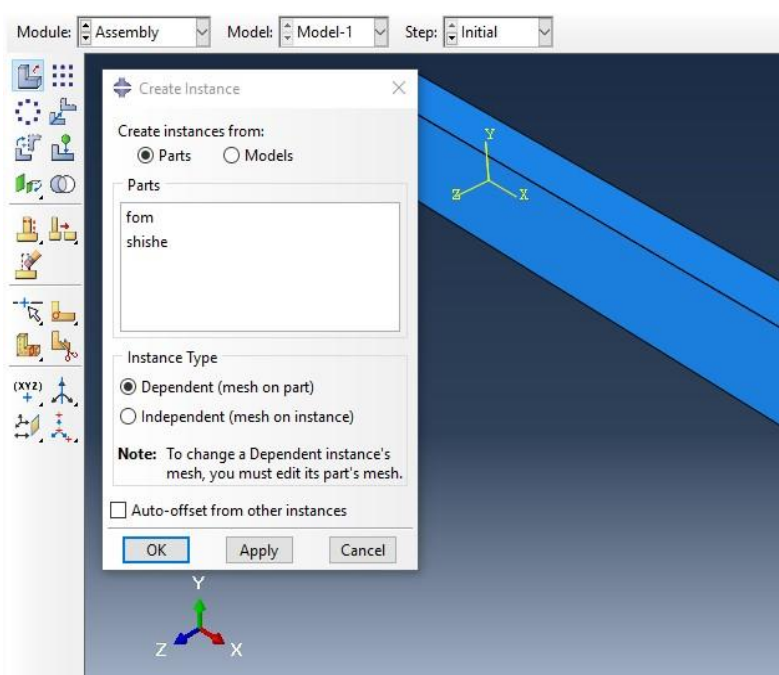
در قسمت Section خواص مواد تعریف شده به هر قطعه از نمونه اختصاص داده می‌شود. برای فوم از قسمت Category, type گزینه Solid, Homogeneous و برای کامپوزیت شیشه اپوکسی گزینه Shell, composite را انتخاب شده‌اند. بعد از تعریف مواد توسط گزینه Assignment Section خواص مواد به هر قطعه مربوط می‌شود. در شکل (الف-۳) برای تعیین تعداد لایه‌های کامپوزیت ساخته شده از همین قسمت تعداد لایه و ضخامت هر لایه تعریف می‌شود. همچنین جهت چینش لایه‌ها نیز از همین پنجره قابل تغییر می‌باشد.



شکل (الف-۳): نسبت دادن خواص مواد و تعریف تعداد لایه‌های کامپوزیت.

پیوست الف-۴- مونتاژ کردن رویه کامپوزیتی و هسته

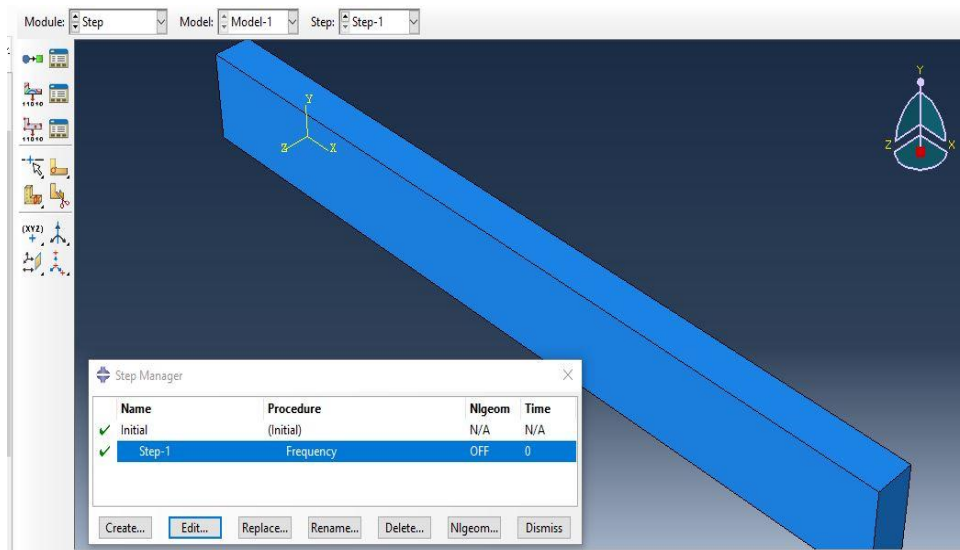
در بخش Assembly پوسته، هسته و همچنین لایه کامپوزیتی وسط به هم متصل می‌شوند. در ابتدا از قسمت Create instance یک هسته و دو رویه کامپوزیتی وارد شده، سپس با گزینه Translate instance نقطه به نقطه پوسته‌های کامپوزیتی به هسته متصل می‌شوند. شکل (الف-۴) پنجره Create instances را نشان می‌دهد. با انتخاب گزینه Auto-offset from other instances نمونه‌ها به ترتیب کنار یکدیگر با فاصله وارد محیط Assembly می‌شوند.



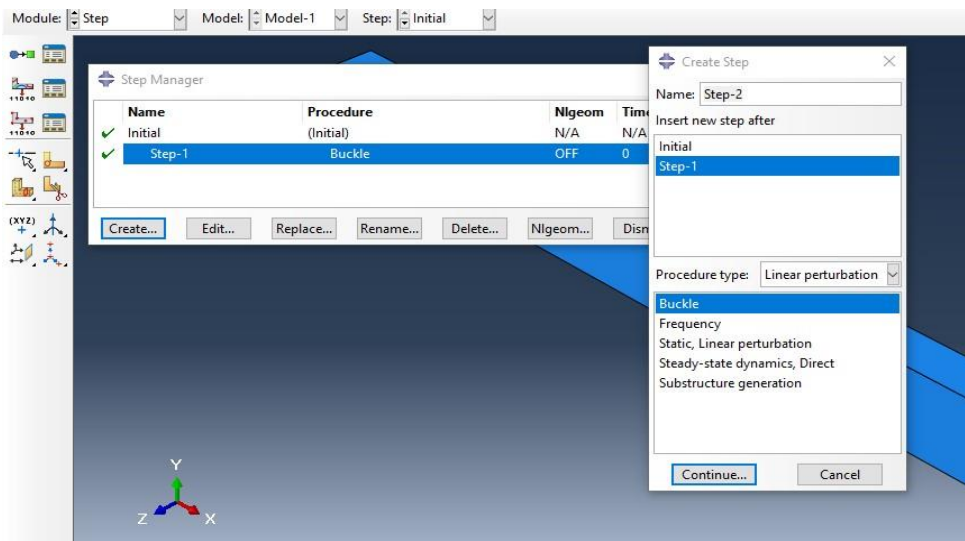
شکل (الف-۴): مونتاژ قطعه‌های تعریف شده در ماژول Assembly.

پیوست الف-۵- تعیین گام^۱

برای تعریف گام تحلیل وارد بخش Step شده و از قسمت Procedure Type نوع آشفتگی خطی را برای آزمون کمانش Buckle انتخاب می‌شود. همچنین برای بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی تیر ساندویچی کامپوزیتی از گام frequency استفاده شده است.



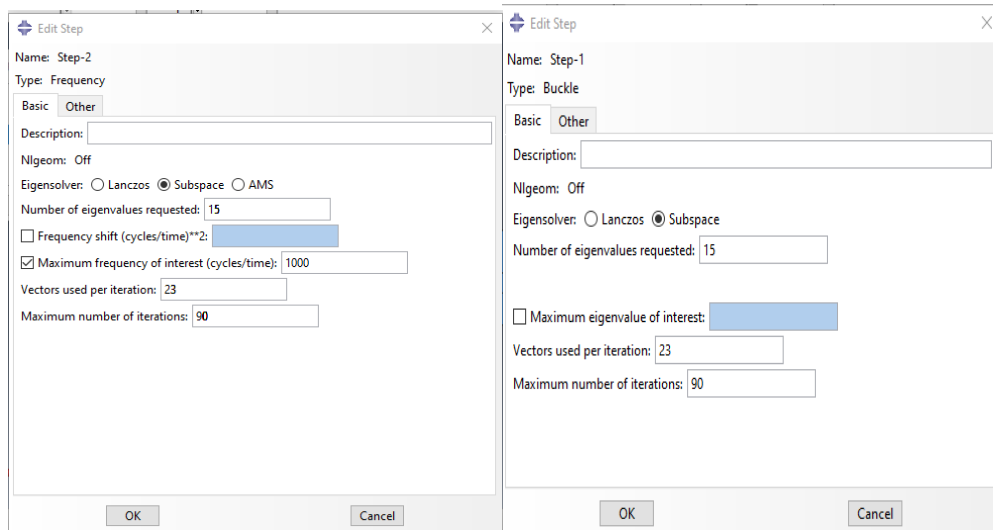
(الف)



(ب)

شکل (الف-۵): الف - تعریف گام برای آزمون ارتعاش ب - تعریف گام برای آزمون کمانش.

بعد از انتخاب گزینه Buckle برای به دست آوردن مقادیر بار بحرانی کمانش در شکل (الف-۷)، تعداد مقادیر ویژه و تعداد انتگرال گیری وارده شده‌اند. برای گزینه frequency هم باید تعداد مقادیر ویژه، حداکثر فرکانس اعمالی و تعداد انتگرال گیری وارد شده‌اند.



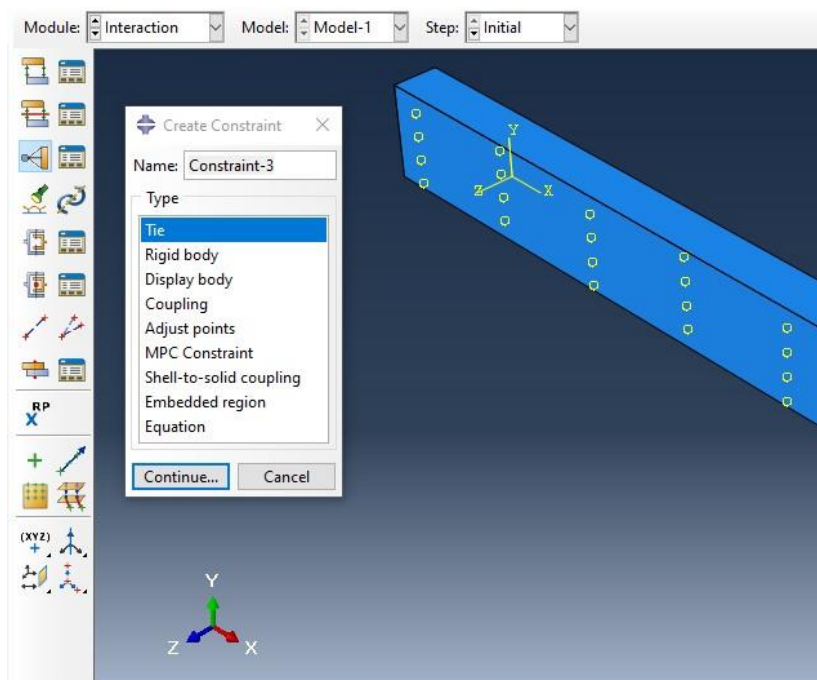
(ب)

(الف)

شکل (الف-۶): الف - تنظیمات گام محاسبه مقادیر کمانشی ب - تنظیمات گام محاسبه مقادیر فرکانسی.

پیوست الف-۶- تعامل سطوح

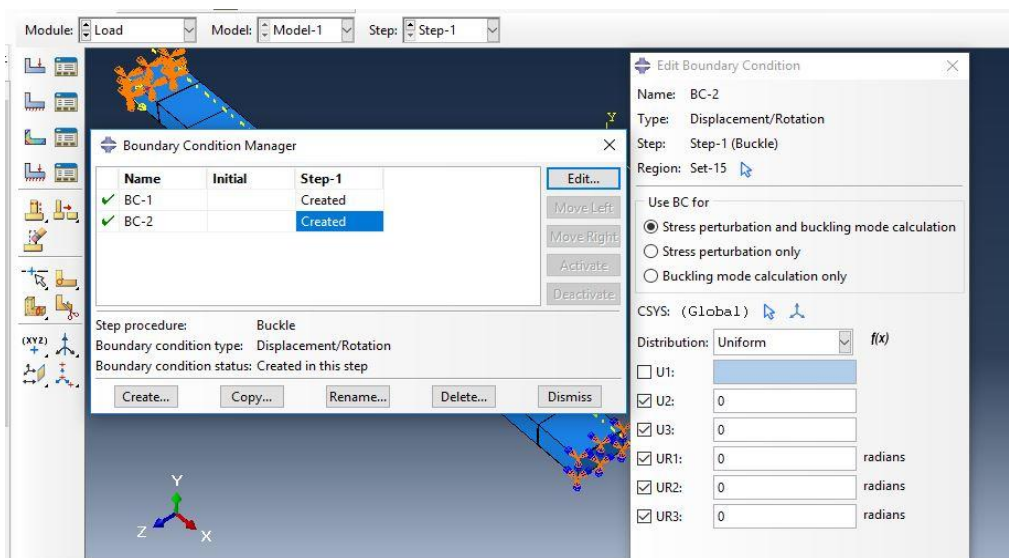
برای تعریف این که قطعه‌ها چگونه به هم متصل شده‌اند از بخش Intraction قیدها تعریف می‌شوند. به منظور برقراری اتصال بین رویه و هسته و همچنین اتصال پوسته زیگزاگی به هسته از قید Tie در قسمت Create Constrsin استفاده شده است. این قید مانند اتصال جوش بوده، با اعمال این قید جابه‌جایی Part‌های مختلف به یک اندازه خواهد بود. در تیر ساندویچی با هسته ساده ۳ قید از نوع Tie تعریف شده است.



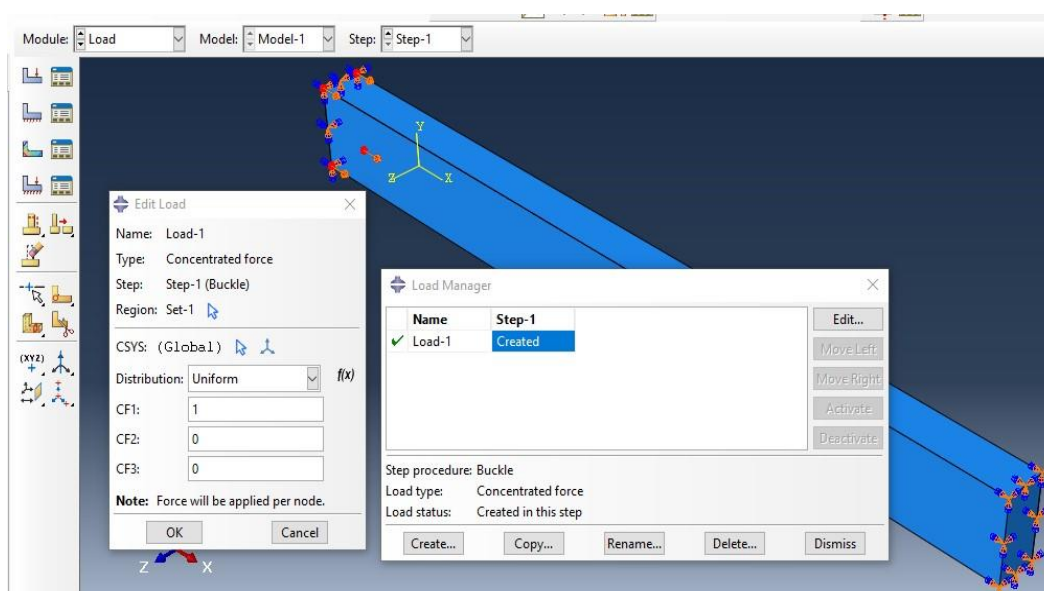
شکل (الف-۷): تیر ساندویچی تعریف شده با قید Tie.

پیوست الف-۷- شرایط مرزی و بارگذاری

برای تعریف شرایط مرزی تیر دو سرگیردار از قسمت Create Boundary Condition دو شرط مرزی تعریف شده است. یک شرط مرزی برای سرگیردار ثابت تیر که در فک پایین دستگاه قرار گرفته و شرط مرزی دیگر قسمت گیردار که در فک متحرک بالا قرار گرفته است. برای این منظور از قسمت Category گزینه Mechanical و از کادر مقابل گزینه Displacement/Rotation انتخاب شده است. در کادر باز شده گزینه Uniform توزیع شرایط مرزی را یکنواخت کرده، سپس برای شرط مرزی فک پایین گزینه‌های U1 تا UR3 صفر شده‌اند به منظور این که در هیچ جهتی جابه‌جایی نداشته باشد. برای فک بالا به جهت این که نیروی فشاری در راستای تیر وارد می‌شود U1 مخالف صفر و U2 تا UR3 برابر صفر می‌باشند. برای وارد کردن نیروی فشاری از قسمت Create Load بار متمرکز Concentrate force انتخاب شده و روی ۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم می‌شود.



(الف)

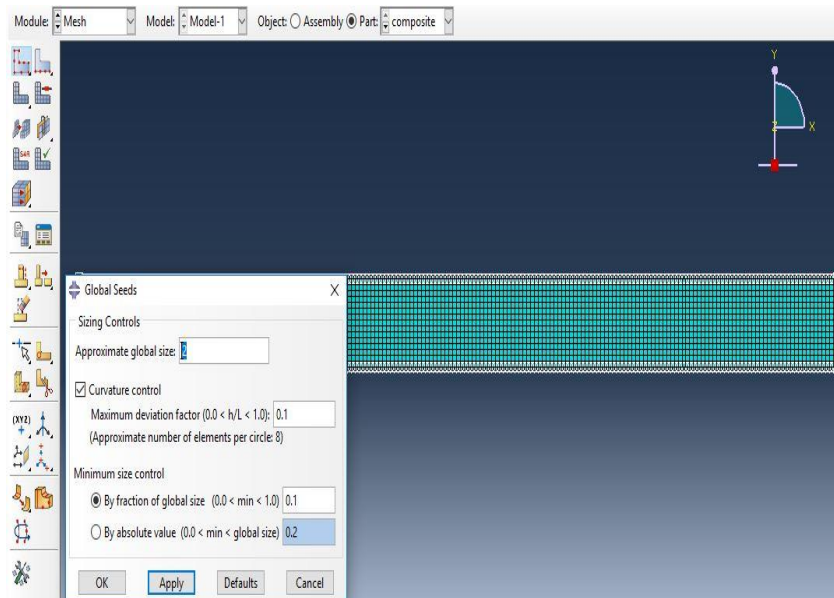


(ب)

شکل (الف-۸): الف - تعیین شرایط مرزی ب - تعیین نیروی متمرکز محوری.

پیوست الف-۸- مش بندی

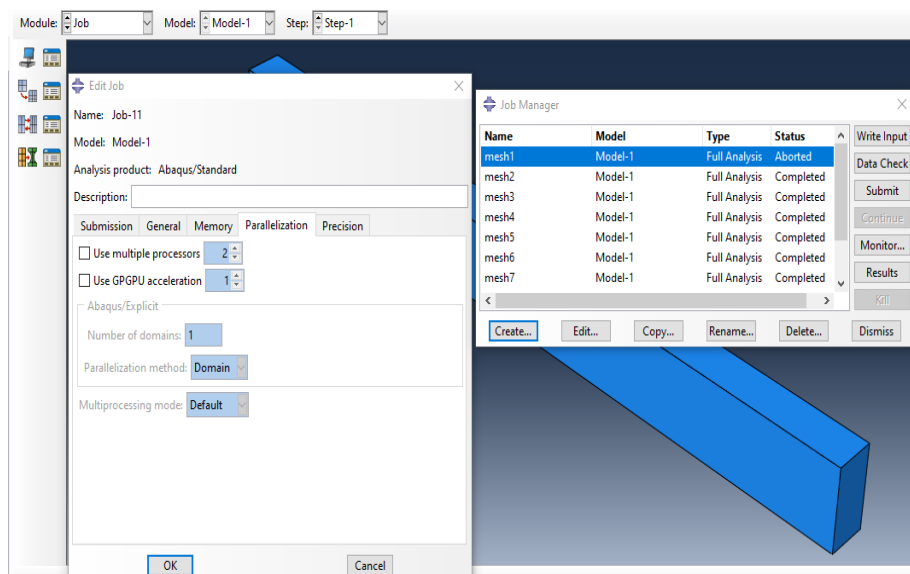
برای مش بندی قطعه مورد نظر وارد ماژول mesh شده. با توجه به این که تیر ساندویچی دارای ابعاد مستطیلی می باشد، با استفاده از مش بندی خودکار و کوچک تر کردن مش جواب شبیه سازی با دقت بیشتری به دست می آید.



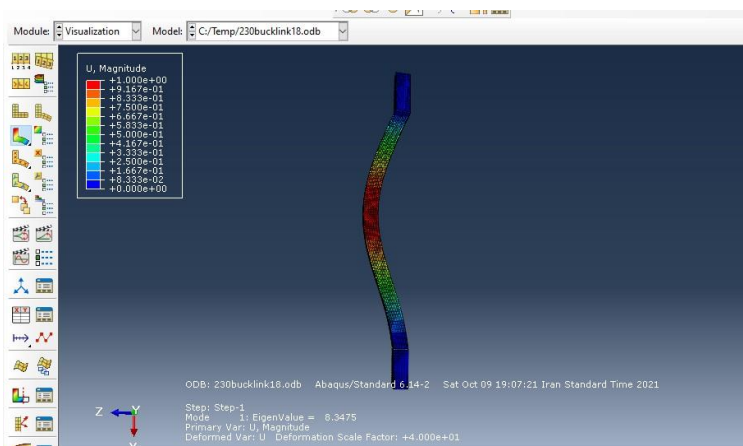
شکل (الف-۹): مش بندی خودکار تیر ساندویچی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با هسته ساده.

پیوست الف-۹- اجرای پردازش شبیه سازی

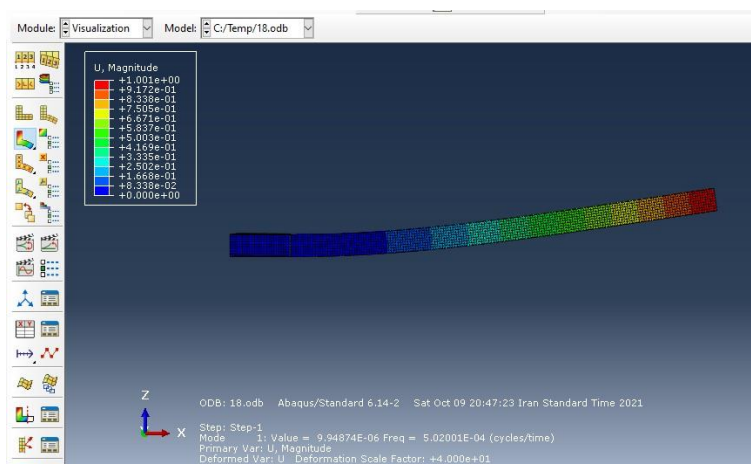
در پارت Job نمونه شبیه سازی شده توسط نرم افزار اجرا شده و نتایج نهایی داده می شود. برای اجرای شبیه سازی از قسمت Job Manager با کلیک بر روی گزینه create پنجره Edite Job باز می شود، از این پنجره تنظیمات حداکثر ظرفیت پردازنده سیستم وارد شده و تایید می شود. سپس با کلیک بر روی گزینه Submite نمونه پردازش می شود و نتایج بعد از دقایقی در صورت عدم بروز خطا نشان داده می شود. شکل (الف-۱۰) مراحل اجرای پردازش را نشان می دهد. شکل (الف-۱۱) و (الف-۱۲) نتیجه حل عددی ستون و تیر ساندویچی در بار فشاری و ارتعاشی را نشان می دهند.



شکل (الف-۱۰): اجرای مراحل پردازش شبیه سازی در ماژول Job.



شکل (الف-۱۱): نتیجه کمناش ستون ساندویچی کامپوزیتی.



شکل (الف-۱۲): نتیجه ارتعاشی تیر ساندویچی کامپوزیتی.

پیوست الف - ۱۰ - نتیجه گیری

در این فصل مراحل مدلسازی تیر ساندویچی و پوسته کامپوزیتی، نحوه وارد کردن خواص فوم و کامپوزیت شیشه/اپوکسی و نحوه نسبت دادن خواص به فوم و کامپوزیت، وارد کردن جهت و ضخامت لایه‌ها، مونتاژ کردن و چسباندن هسته به رویه‌ها در محیط مونتاژ و تعامل سطوح، تعریف نوع آزمون کمانشی و ارتعاشی، بار گذاری و شرایط مرزی تیر و ستون، مش بندی نمونه و نحوه اجرای پردازش شرح داده شد.

مراجع

[۱] علم و مهندسی مواد مرکب/ تألیف اف. ال ماتیوس، آر. دی. راولینگز؛ ترجمه علی شکوه‌فر، محسن حداد سبزواری، علی حایریان اردکانی. مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.

[2] www.moderntejarat.com

[۳] نجات بخش. ح. قارائی. آ. ربیعیان نجف آبادی. ح. طراحی بهینه ساندویچ‌های کامپوزیتی در ساخت پنل‌های پوسته بدنه هواپیمایی سبک، همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دوره ۲۷، ۱۳۹۸.

[۴] رفتار مکانیکی مواد مرکب/ تألیف محمد طاهای ابدی. تهران: پژوهشگاه هوا فضا، ۱۳۸۸.

[5] Engin Muratreis, "Characteristic of innovative 3-D FRP Sandwich Panel" Dissertation for the PhD, North Carolina State University, 2005.

[6] Thomas H.Evans, " Design of composite sandwich panel for light weight application in heavy vehicle system" M.S, West Virginia University, 2005.

[7] D. Gay, S. uong, V. Hoa, W. Stephen, W. Tsai , "Composite Materials Design and Applications" ,CRC press LLC , 2003.

[8] Elisa. Dale, Water blast loading of composite sandwich structures with pvc foam cores, A Thesis presented to the gradoate faculty of the univesiti of akron, 2019.

[9] Cihan. Kaboghlu, composite material for wind energy applications, thises submitted for the degree of doctor of philosophy (phd), department of mechanical enginnerin college landan, 2017.

[10] www.Aircraftsystemstech.com/p/wings-wing-configurations-wings-are.html.

[11] W. F. Chen, E. M. Lui, Structural stability.theory and impiementkfion, 1987.

[12] William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, Theory of vibration with applications, 1998.

[13] S. Giclais, P. Lubrina, C. Stephan, Aircraft ground vibration testing at onera, Journal Aerospace Lab, Vol. 12, No. 5, pp. 2016.

[۱۴] رحمت الله رحمانی ، بررسی رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته ترکیبی کامپوزیت موج‌دار و فوم، پایان‌نامه‌ی دوره کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا طراحی سازه‌های هوایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۱.

[۱۵] حلیمی. ف، گلزار. م، بهشتی. م، اثر لایه توزیع در پر شدن قالب و کیفیت محصول نهایی در سازه ساندویچی تولید شده با روش نفوذ رزین، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۰.

[۱۶] کاظم کریمی، ساخت بهینه صفهات نانو کامپوزیتی گرافن/اپوکسی، تعیین خواص مکانیکی و تحلیل تجربی رفتار ارتعاشی آن‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، ۱۳۹۷.

[17] <https://maktabkhooneh.org>.

[18] A. Mohammadi Dehabadi, Gh. H. Rahimi, R. Rahmani, "Experimental investigation on core shape effect on compressive properties of sandwich structures with composite skins, corrugated composite core and foam", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 51-57, 2015.

[19] H. Malekinejad Bahabadi, A. Farrokhhabadi, M. Khatibi, R. Rahmani, "Numerical and experimental investigation of skin/core debonding in composite sandwich structures with corrugated core under bending loading", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No.6, pp.52-62, 2016.

[۲۰] باغجقاز. م، اسلامی فارسانی. ر، ابراهیم نژاد خالجیری. ح، بررسی رفتار کمانشی صفحات لایه‌ای الیاف- فلز ساخته شده از الیاف جوت-شیشه، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۸، شماره ۴، صفحه ۱۵۳-۱۶۴، ۱۳۹۷.

[21] R. Azadi, Y. Rostamiyan, "Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization", *Construction and Building Materials*, Vol. 88, No. , pp .212-224, 2015.

[22] Y. Rostamiyan, R. Azadi, The buckling strength of the new hybrid nanocomposite laminates using combination of layered and particulate nano fillers, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 1-16. 2016.

[23] M. Mohammadimehr, S. Shahedi, High-order buckling and free vibration analysis of two types sandwich beam including AL or PVC-foam flexible core and CNTs reinforced nanocomposite face sheets using GDQM, *Composites Part B*, vol. 108, pp. 91-107, 2016.

[24] Y. Rostamiyan, R. Emrahi, Investigation of buckling analysis of epoxy/ nanoclay/ carbon fiber hybrid laminated nanocomposite: using VARTM technique for preparation, *mechanics of advanced composite structures*, No. 3, pp. 63-71, 2016.

[25] M. Rajesh, J. Pitchaimani, Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression, *Composite Structures*, No. 163, pp. 302-311, 2017.

[26] M. S. Ahmadi, M. Gholami, M. A. Tavanaie, M. Khajeh Mehrizi, "Tensile and flexural properties of epoxy-date palm fiber composites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78, 2018.

[27] P. K. Peyyala, M. Baddepudi, V. V. Subba Rao, “An analytical study of buckling behavior of nanocomposite eams”, SAE Technical Paper, pp. 28-50, 2018.

[28] S. N. Hosseini Abbandanak, S.M.H. Siadati, R. Eslami-Farsani, Graphene surface treatment effects on mechanical behavior of basalt fibers\ epoxy composites., Iran. J. Polym. Sci. Technol, vol. 31, pp. 155-170, 2018.

[29] O. Bozkurt Yavuz, M. Bulut, A. Erklığ, WA. Faydh, “Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clay particles”, Composites Part B, vol. 158, 2018.

[30] A. M. Ghaderi, A. Ghasemi, M. Yarmohmmadi-Toski, “An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using nano-graphene”, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 109-118, 2019.

[31] S. Waddar, J. Pitchaimani, M. Doddamani, E. Barbero, “Buckling and vibration behaviour of syntactic foam core sandwich beam with natural fiber composite facings under axial compressive loads”, Composites Part B, Vol. 175, No.107133, 2019.

[32] N. Anbusagar, Fabrication and vibration studies on OMT nano polymer hybrid sandwich laminates, Materials Today: Proceedings, No. 16, pp. 268–276, 2019.

[33] T. Khana, A. Ahmet Aydin, A. Volkan, A. Muhammet Raci, H. Burak, B. Hatice, M. O. Seydibeyoğlu, H. Akbulut, “Experimental investigation of mechanical and modal properties of Al₂O₃ nanoparticle reinforced polyurethane core sandwich structures”, Materials Today Communications, Vol. 24, No. 101233, 2020.

[34] P. Azami-Googarchin, G.H. Rahimi, M.S. Gazor, “Experimental prediction of buckling load of rectangular composite plate with through-the-width delamination using nondestructive vibration correlation technique”, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No.2, pp. 822-813, 1399.

[35] M. Raeisi, A. Shaterzadeh, S.M. Hosseini Farrash, “Effect of carbon nanotubes on the critical buckling load of composite reinforced aluminum columns: an experimental approach”, Modares Mechanical Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 2679-2688, 2020.

[36] H. Yaghoobi, F. Mottaghian, F. Taheri, Enhancement of buckling response of stainless steel-based 3D-fiber metal laminates reinforced with graphene nanoplatelets: Experimental and numerical assessments, Thin-Walled Structures, Vol. 165, No 107977, 2021.

[37] B.O. Baba, S. Thoppul, Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond, Composite Structures, No. 91, pp. 110–119, 2009.

[38] A. Shahdin, L. Mezeix, C. Bouvet, J. Morlier, Y. Gourinat, Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams, *Composite Structures*, No. 90, pp. 404–412, 2009.

[39] M. Assarar, A. El Mahi, J. Berthelot, Evaluation of the dynamic properties of PVC foams under flexural vibrations, *Composite Structures*, No. 94, pp. 1919–1931, 2012.

[40] J. Zhang, P. Supernak, S. Mueller-Alander, C. H. Wang, Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure, *Materials and Design*, No. 52, pp. 767–773, 2013.

[41] L.L. Yan, B. Yua, B. Han, C.Q. Chen, Q.C. Zhang, T.J. Lu, Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores, *Composites Science and Technology*, No. 86, pp. 142–148, 2013.

[42] Z.J. Zhang, B. Han, Q.C. Zhang, F. Jin, Free vibration analysis of sandwich beams with honeycomb-corrugation hybrid cores, *Composite Structures*, vol. 171, pp. 335–344, 2017.

[43] Yurddaskal, M., Ozmen, U., Kir, M., Baba, B.O., The Effect of Foam Properties on Vibration Response of Curved Sandwich Composite Panels, *Composite Structures*, vol. 183, pp. 125–134, 2017.

[44] H. Malekinejad Bahabadi, A. Farrokhbabadi, M.M. Khatibi, and R. Rahmani, “The influence of skin/core debonding effects on the natural frequencies of composite sandwich structures using experimental and numerical modal analysis”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 91–98, 2018.

[45] F. de Souza Eloy, G. Ferreira Gomes, A.J. Carlos Ancelotti, S.J. Simões da Cunha, A. José Faria Bombard, D. Morais Junqueira, A numerical-experimental dynamic analysis of composite sandwich beam with magnetorheological elastomer honeycomb core, *Composite Structures*, vol. 209, pp. 242–257, 2018.

[46] E.F. Joubaneh, O. Barry, D.C.D. Oguamanam, Vibrations of sandwich beams with tip mass: numerical and experimental investigations, *Composite Structures*, vol. 210, pp. 628–640, 2018.

[47] E. Piollet, E.R. Fotsing, A. Ross, G. Michon, High damping and nonlinear vibration of sandwich beams with entangled cross-linked fibres as core material, *Composites Part B*, vol. 168, pp. 353–366, 2019.

[48] X. Wang, X. Li, R.P. Yu, Y.W. Ren, Q.C. Zhang, Z.Y. Zhao, C.Y. Ni, B. Han, T. Jian Lu, Enhanced vibration and damping characteristics of novel corrugated sandwich panels with polyurea metal laminate face sheets, *Composite Structures*, vol. 251, No. 112591, 2020

[49] M. Subramania, R. Subramania and M. Ramamoorthya, Free vibration analysis of the MWCNT reinforced hybrid laminated composite sandwich beam, *Materials Today: Proceedings* 22, pp. 3220–3225, 2020.

[50] M.H. Pol, G.H. Liaghat, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012.

[51] M.H. Pol, Gh.H. Liaghat, E. Mehrabani Yeganeh, A. Afrouzian, Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015.

[52] A. Masoudi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation of effects of nano clay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014.

[53] R. Zamani, Gh.H. Rahimi, M.H. Pol, M. Hedayatian, Reinforcing effect of nano clay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: experimental investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015.

[۵۴] پایگانه. ق، قاسمی. ا، کاظم نژاد. ا، بررسی خواص کششی نانوکامپوزیتهای بر پایه پلیپروپیلن/نانو صفحات گرافن/نانو رس با استفاده از روش رویه پاسخ، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۲، ۱۳۹۵.

[55] S. M. R. Khalili, M. Tavakolian, A. Sarabi, Mechanical properties of nanoclay reinforced epoxy adhesive bonded joints made with composite materials, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 1917-1928, 2010.

[56] H. Khosravi. R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, “An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.

[۵۷] نجفی. م، انصاری. ر، درویشه. ا، بررسی تجربی تاثیر روش اختلاط نانو رس بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای پلیمری و چند لایه‌های الیاف فلزی، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۷، شماره ۲، صفحه ۸۰-۶۳، ۱۳۹۶.

[58] R. Eslami-Farsani, A. Shahrabi-Farahani, H. Khosravi, M.R. and Zamani, “A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 101-108, 2017.

[59] S.M. Hosseini Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand. The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach, *Composites Part B*, vol. 122, pp. 1-8, 2018.

[60] Ma, H. Jia, Z. Lau, K. Li, X. Hui, D. Shi, S. “Enhancement on mechanical strength of adhesively-bonded composite lap joints at cryogenic environment using coiled carbon nanotubes”, *Composites Part B*, vol. 110, pp. 396-401, 2017.

[61] S.N. Hosseini Abbandanak, M.H. Siadati, R. Eslami-Farsani, “Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 315-324, 2018.

[62] S. Shahbakhsh, H. Khosravi, E. Tohidlou, Improvement in interlaminar shear strength and flexural properties of carbon fiber/epoxy composite using surface-modified carbonate calcium, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 343-350, 2019.

[63] A. Bagheri-Tirtash, A. Montazeri, R. Eslami-Farsani, A.R. Shahrabi-Farahani, A.R., “An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles”, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 525-532, 1398.

[64] A.R. Moallemzadeh, S.A.R. Sabet, H. Abedin, H. Saghafi, Investigation into high velocity impact response of pre-loaded hybrid nanocomposite structure, *Thin-Walled Structures*, No. 142, pp. 405–413, 2019.

[65] S.M. Hosseini Farrash, J. Rezaeepazhand, M. Shariati, S.M.A. Amin, “Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the aero-thermo-elastic stability region of fibrous laminates”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 787-796, 2020.

[66] Data Sheet C70 airex fome PVC. www.3ACcorematerials.com.

[67] www.sigma-oldrich.com

[68] American society for testing and materials, Standard test method for tensile properties of polymer ASTM D3039/DM, matrix composite materials, 2008.

[69] American society for testing and materials., Standard test method for axial compression test of reinforced plastic and polymer matrix composite vertical members ASTM E2954, 2015.

[70] Carl T. Herakovich, *Mechanics of Fibrous Composites*, university of virgina, 1997.

Abstract

In this thesis, the effect of dispersion nano clays in to the matrix material and the use of glass fibers in the fabrication of composite sandwich panels on buckling and vibration behavior as well as changes in the type of core have been investigated. Sandwich beams have a rectangular cross section and are subjected to axial compressive load. samples of composite sandwiches are made of foam core and composite surfaces. Also, the composite surface material is composed of three layers of glass/epoxy fibers. The purpose of this experiment is to investigate the maximum critical buckling load, maximum energy absorption and the study of natural frequencies in composite sandwich beam samples. Samples are made with simple core and zigzag core and 0, 3, 5 and 7 weight percentages of nano clays. The results of the axial compressive load in fixed-fixed conditions show that the addition of nano clay improves energy absorption and also improves the critical buckling load. The results show that by adding 3 percent by weight of nano clay, the critical buckling load of composite sandwich column has increased by 25%. Also, the critical buckling load containing 7 percent by weight of nano clay has increased by 27%. The images from the SEM show that in the sample 3 percent and 7 percent by weight, the nanoparticles are well dispersed in the matrix, and as a result, the accumulation of nanoparticles has rarely occurred. The results of forced vibrations of sandwich composite beams in fixed-free conditions showed that the natural frequency of the first mode of the sample with zigzag core increased by 16% compared to the sample with simple mode core. it can be concluded that this increase in the zigzag core occurred due to the greater adhesion between the core and the surface. Among the different percentages of nanoparticles in the zigzag sandwich beam, the 3 percent by weight nano clay sample decreased by 6%, the 5 percent by weight sample decreased by 1% and the 7 percent sample increased by 4.5%. Also, for verification of laboratory results, a sample of composite sandwich beam with simple core and epoxy glass fiber surface has been simulated in Abaqus finite element software.

Keywords: Sandwich panel, Buckling, Vibrations, Nanoparticles



Shahrood University of Technology

Department of Mechanic and Mechatronic Engineering

Master Thesis in Aerospace Engineering - Aeronautical Structures

**An experimental investigation of
buckling and vibrational behavior of
composite sandwich panels reinforced
with nanoparticles**

By:
Peyman Asjady

Supervisor:
Dr. Seyyed Mahdi Hosseini Farrash

October 2021