

تحلیل مودال تجربی و عددی تیرهای ساندویچی پرینت سه بعدی با

هسته های هیبریدی، لانه زنبوری و مثلثی

محمود جعفری ۱

دانشجوی دکتری

دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

هوایی شهید ستاری

mahmood.jafari@ssau.ac.ir

حشمت... محمدخانلو ۲

دانشیار

دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

هوایی شهید ستاری

h_khanloo@ssau.ac.ir

علی نوری*

دانشیار

دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

هوایی شهید ستاری

nouri@ssau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، آنالیز مودال تیرهای ساندویچی چاپ سه بعدی با سه توپولوژی هسته‌ای متفاوت شامل هسته‌ی مثلثی، لانه‌زنبوری و هیبریدی (ترکیبی از مثلثی و لانه‌زنبوری) به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر توپولوژی هسته بر فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی مودال به عنوان شاخص‌های کلیدی عملکرد دینامیکی است. نمونه‌ها با استفاده از روش مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM)^۱ و ماده‌ی پلی لاکتیک اسید (PLA)^۲ ساخته شدند و آزمون مودال ضربه‌ای با چکش جهت استخراج توابع پاسخ فرکانسی انجام گردید. فرکانس‌های طبیعی و میرایی با استفاده از الگوریتم‌های برازش منحنی در حوزه‌ی فرکانس استخراج شدند. برای شبیه‌سازی عددی، مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و نتایج با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شدند (خطای نسبی کمتر از ۵ درصد). یافته‌ها نشان می‌دهد که هسته‌ی هیبریدی علیرغم وزن تقریباً یکسان، بیشترین فرکانس طبیعی را در تمام موده‌های خمشی ارائه می‌دهد. بررسی میرایی مودال نشان داد که اگرچه هسته‌ی لانه‌زنبوری در مود اول رفتار استهلاک انرژی بهتری دارد، اما هسته‌ی هیبریدی در موده‌های بالاتر (چهارم و پنجم) دارای جهش قابل توجهی در میرایی است که ناشی از اثرات ترکیبی اتلاف انرژی در مرز مشترک توپولوژی‌ها می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری هسته‌های هیبریدی راهکاری کارآمد برای مهندسی طیف فرکانسی و کنترل میرایی در سازه‌های ساندویچی سبک وزن است.

واژگان کلیدی: تحلیل مودال تجربی، تابع پاسخ فرکانسی، هسته هیبریدی، فرکانس طبیعی، میرایی، مدل‌سازی

رسوب ذوبی

۱. مقدمه

مشخصه‌هایی نظیر نسبت‌های بالای استحکام به وزن و سفتی به وزن، مقاومت به خستگی، ظرفیت جذب انرژی بالا و عایق آکوستیکی کنترل آلودگی صوتی همواره نقشی اساسی در طراحی سازه‌های پیشرفته در

سازه‌های ساندویچی شامل دو لایه رویی نازک و سخت با یک هسته ضخیم و سبک هستند. آن‌ها با افزایش ممان اینرسی بدون افزایش وزن قابل توجه و دارا بودن

* نویسنده مسئول

صنایع هوافضا، دریایی، خودروسازی و عمران داشته‌اند [۵-۱]. مثلاً در سازه‌های هوافضایی تحت تحریکات آکوستیک، ارتعاشات فرکانس بالا با ایجاد نوسانات سریع تنش، عامل اصلی شروع و رشد ترک‌های خستگی هستند. از آنجا که تغییر سفتی سازه در این شرایط برای کنترل ارتعاشات کارآمد نیست، ارتقای مکانیسم‌های میرایی به ضروری‌ترین راهبرد برای استهلاک انرژی تبدیل می‌شود. مؤثرترین روش عملی برای این منظور، جایگزینی پوسته‌های فلزی رایج با ساختارهای ساندویچی حاوی لایه میانی ویسکوالاستیک است. همچنین، بهره‌گیری از اتصالات غیرصلب در این پانل‌ها مانند اتصال صرفاً لایه داخلی ساندویچ به سازه پشتیبان با ایجاد امکان لغزش بیشتر، ظرفیت میرایی و در نتیجه عمر خستگی سازه را به حداکثر می‌رساند [۶].

در فرآیند ساخت قطعات با استفاده از روش FDM، پارامترهای فرآیندی متعددی نظیر چگالی پرشدگی، دمای نازل، زاویه رستر، الگوی پرشدن و سرعت چاپ وجود دارند که بر روی خواص مکانیکی اثر می‌گذارند [۷-۱۰]. یکی از پژوهش‌ها [۱۱] خواص خمشی و کششی الگوها و نسبت‌های پرشدگی گوناگون را مورد بررسی قرار داده است. نتایج آن‌ها نشان داده که نسبت پرشدگی بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام ویژه ۴۰ درصد است. همچنین از منظر طراحی هندسی، مطالعات مبتنی بر بهینه‌سازی توپولوژی برتری ساختارهای ترکیبی را اثبات کرده‌اند؛ به عنوان مثال، مرجع [۱۲] نشان داده است که تحت قیود وزنی و کماتش، هسته‌های ساندویچی بهینه به‌طور طبیعی به سمت تشکیل هندسه‌های هیبریدی (ترکیبی از

دیواره‌های شبکه‌ای و سلول‌های لانه‌زنبوری با الهام از ساختار رگبرگ‌ها) متمایل می‌شوند.

عملکرد دینامیکی سازه‌های ساندویچی و به ویژه پاسخ ارتعاشی آن‌ها، همواره یکی از چالش‌های اصلی در طراحی مهندسی بوده است، زیرا کاهش جرم در سازه‌های ساندویچی معمولاً با افت عملکرد ارتعاشی همراه است [۱۳]. روش FDM امکان تولید هندسه‌های هسته با الگوهای متنوع مانند لانه‌زنبوری، مثلثی و مشبک را با دقت بالا و هزینه کم فراهم کرده که در نتیجه آن سفتی سازه‌ای و مسیرهای اتلاف انرژی بهبود یافته است [۱۴]. اعمال ارتعاشات فراصوت بر روی پارامترهای فرآیندی در چاپ قطعات اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS)^۳، که با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ انجام پذیرفته نشان داده است که استحکام کششی قطعات کیفیت پیوند بین لایه‌ای بهبود یافته و در نتیجه حفره‌ها کاهش پیدا می‌کنند [۱۵]. از طرفی بررسی تجربی و عددی ریزساختار حاصل از فرآیند ساخت افزایشی، شامل جهت‌گیری الیاف، جهت درون‌لایه‌ای و بین‌لایه‌ای، نشان داده است که این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر فرکانس‌های طبیعی صفحات یکسرگیردار دارند؛ به گونه‌ای که تغییر جهت چاپ می‌تواند تا بیش از ۴۵ درصد فرکانس مود اول را تغییر دهد. همچنین، انجام آزمون‌های کشش شبه‌ایستا و استفاده از روابط تبدیل تنش صفحه‌ای، باعث استخراج ضرایب الاستیک ارتوتروپیک ماده برای سه ضخامت لایه شد و در نتیجه خطای کمتر از ۱۵ درصد بین شبیه‌سازی عددی و آزمایش ارتعاشی گزارش شد [۱۶]. همچنین الگوهای پرشدگی مختلف (شبکه ژئروئید، مثلثی و لانه‌زنبوری) بر خواص مکانیکی و میرایی کامپوزیت‌های تقویت شده

با الیاف کربن تاثیر داشته و الگوی شبکه‌ای بیشترین استحکام کششی، فشاری و خمشی را دارد، در حالی که الگوی ژئروئید به دلیل چگالی کمتر، بهترین نسبت استحکام به وزن را ارائه می‌دهد. از نظر رفتار ارتعاشی، نمونه‌های PA6-CF15 نسبت میرایی بالاتری نسبت به PPS-CF15 داشتند و الگوی شش ضلعی بهترین عملکرد در جذب ارتعاش از خود نشان داد [۱۷].

مطالعه تجربی و عددی ارتعاشات آزاد تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های چندلایه شامل لایه‌های الاستومری و فومی نشان داده که تیرهای دارای هسته‌های چندگانه، به دلیل افزایش سختی سازه‌ای، فرکانس‌های طبیعی به مراتب بالاتری نسبت به تیرهای تک‌هسته‌ای دارند. از یافته‌های کلیدی این پژوهش می‌توان به تاثیر مستقیم جایگزینی هسته لاستیکی با هسته فومی (به دلیل کاهش جرم و افزایش مدول برشی) در افزایش فرکانس‌های طبیعی، و نیز تاثیر قابل توجه شرایط مرزی (به‌ویژه شرایط گیردار-گیردار) و ضخامت هسته بر پاسخ ارتعاشی اشاره کرد [۱۸].

استفاده از هسته‌های الاستومر مگنتورئولوژیک چندگانه^۴ برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی کامپوزیتی با استفاده از تقویت‌کننده نانو لوله‌های کربنی نشان داده است که پوسته‌های ساندویچی با هسته چندگانه دارای فرکانس‌های طبیعی بالاتری نسبت به پوسته‌های ساندویچی با هسته منفرد هستند [۱۹]. در پژوهشی در زمینه ارتعاشات آزاد پل‌های ساندویچی با هسته‌ی لانه‌زنبوری سلسله مراتبی^۵، یک مدل معادل دوبعدی مبتنی بر روابط ساختاری ارتوتروپیک برای هسته ارائه شده است. صحت این مدل با آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی المان محدود تحت

شرایط مرزی گیردار-آزاد تأیید شده و خطای آن کمتر از ۵ درصد گزارش گردیده است [۲۰]. با هدف بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش ارتعاشات، پژوهش‌های تجربی و عددی دیگری با بهره‌گیری از فناوری چاپ سه‌بعدی برای ساخت هسته‌های نوآورانه انجام شده است. در این راستا، مرجع [۲۱] با الهام از ساختار پوسته پسته و استفاده از هسته‌های دوگانه لاملار^۶، نشان داد که این هسته‌ها با وزن یکسان، فرکانس‌های طبیعی را تا ۴۷/۴۷ درصد نسبت به نمونه‌های تک‌هسته افزایش می‌دهند. در ادامه، مرجع [۱۳] با طراحی تشدیدگرهای با سفتی شبه‌صفر^۷ (QZS) و بهره‌گیری همزمان از غیرخطی‌سازی سازه‌ای و میرایی ماده، موفق به کاهش مؤثر ارتعاش در باند فرکانسی ۱۳۲ تا ۵۰۰ هرتز با نسبت جرم افزوده تنها ۴/۳۸ درصد شدند. مرجع [۲۲] برای نخست‌بار به مدلسازی اتصالات دارای لقی در تیرهای ساندویچی پرداخته و نشان دادند که وجود لقی علاوه بر ایجاد رفتارهای غیرخطی همچون حرکت آشوبی، در بازه‌های فرکانسی خاص می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتقال ارتعاش ایفا کند. همچنین بررسی تیرهای ساندویچی دارای هسته مشبک مربعی چاپ‌شده سه‌بعدی، نشان داده است که تغییر نوع پرکننده هسته، چگالی معادل را تغییر داده و سختی تقریباً ثابت می‌ماند که این موضوع امکان کنترل ویژگی‌های ارتعاشی را فراهم می‌کند [۲۳].

ادبیات مرور نشان دهنده مطالعات ارزشمند در زمینه بررسی خواص مکانیکی و دینامیکی سازه‌های ساندویچی است. نوآوری پژوهش حاضر در استفاده از یک رویکرد جدید که سلول‌های مثلثی و لانه‌زنبوری را

به صورت متوالی در راستای ضخامت ترکیب می کند و تیر ساندویچی یکپارچه با هسته هیبریدی را معرفی و ارزیابی می کند نهفته است. این معماری نوین، برخلاف ساختارهای چندلایه ای مرسوم [۲۱] (نظیر پنل های ساندویچی با هسته دوگانه که مستلزم مونتاژ پیچیده بوده و تحت بارهای دینامیکی مستعد پدیده لایه لایه شدگی هستند)، سادگی ساختار سه لایه ای را حفظ کرده و همزمان سفتی خمشی مؤثر سازه را بدون افزایش محسوس جرم ارتقا می دهد. افزون بر این معماری نوین، اثبات رفتار میرایی وابسته به مود ناشی از ناهمگونی ساختاری، نوآوری دیگر این پژوهش در تحلیل نتایج است. بررسی ها نشان می دهد که وجود یک فصل مشترک فیزیکی و ناپیوستگی هندسی بین شبکه های مثلثی و لانه زنبوری در بطن این هسته، باعث ایجاد میدان های کرنش پیچیده و پراکندگی امواج تنش در محل اتصال سلول ها می شود. این پدیده مکانیسم های اصطکاک داخلی را به شدت فعال کرده و منجر به جهش چشمگیر میرایی در مودهای بالاتر (مودهای چهارم و پنجم) می گردد که قابلیت نوین برای کنترل ارتعاشات فرکانس بالا محسوب می شود. در ادامه، یک تحلیل مقایسه ای کمی از فرکانس های طبیعی و ضرایب میرایی مودال برای سه توپولوژی با وزن و ابعاد یکسان صورت گرفته است تا انتخاب آگاهانه ی هسته بر اساس کاربری ارتعاشی میسر شود. همچنین یک شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد و نتایج آن با استفاده از تست های مودال اعتبار سنجی شد.

۲. مواد و روش ها

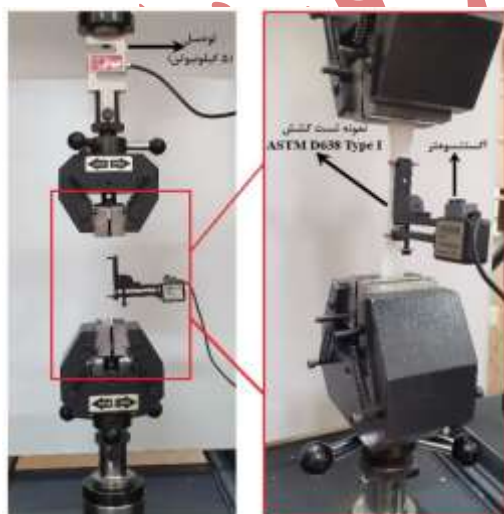
در این بخش، فرآیند ساخت افزایشی FDM و همچنین چگونگی مدلسازی و ساخت نمونه های استاندارد آزمون کشش محوری و تیرهای ساندویچی هیبریدی، لانه زنبوری و مثلثی مورد بحث قرار گرفته است. به دنبال آن فرآیند ارزیابی خواص مکانیکی ماده پایه و خواص دینامیکی تیرهای ساندویچی با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس و آزمون مودال با استفاده از ضربه چکش برای تعیین توابع پاسخ فرکانسی تشریح می شود.

۱.۲. فرآیند پرینت سه بعدی FDM

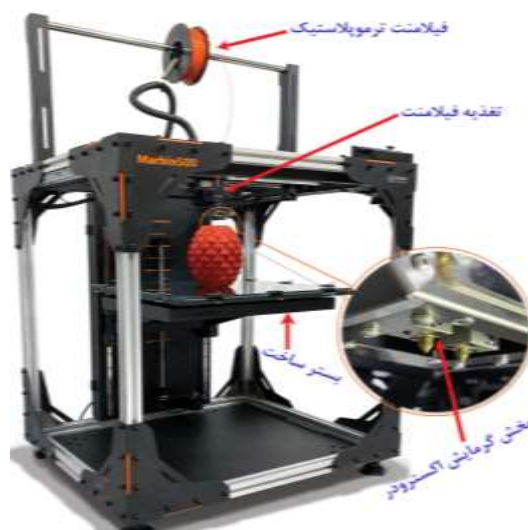
نمونه ها به روش FDM و با فیلامنت PLA ساخته شدند. پرینتر سه بعدی مورد استفاده، دستگاه ماربین ۵۰۰ (شکل ۱) بود. پارامترهای ساخت (جدول ۱) ثابت و نسبت پرشدگی در تمام نمونه ها ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. مدلسازی در نرم افزار کتیا انجام گرفت و ابعاد نمونه های کشش بر اساس استاندارد ASTM D638 نوع اول تعیین گردید (شکل ۲-الف). تیرهای ساندویچی با ابعاد $6 \times 35 \times 310$ میلیمتر مدلسازی و به فرمت STL تبدیل شدند (شکل ۲-ب). ضخامت رویه و هسته برای همه تیرها به ترتیب ۱ و ۴ میلی متر بود. سپس نرم افزار Simplify 3D برای برش مدل ها به کار رفت (شکل ۲-پ-ث). همچنین وزن تیرهای ساندویچی هیبریدی، مثلثی و لانه زنبوری به ترتیب ۴۱.۱۶، ۴۱.۴۷ و ۴۰.۸۶ گرم اندازه گیری شد. پیش از هر بررسی دیگر، تعیین خواص مکانیکی پایه ماده PLA برای استفاده در شبیه سازی عددی ضروری است؛ از این رو در بخش بعدی، نحوه اجرای آزمون کشش محوری تشریح می شود.

۲.۲. آزمون کشش

در این پژوهش، نمونه‌های استاندارد نوع اول، مطابق با استاندارد ASTM D638-14 برای انجام آزمون کشش آماده‌سازی شدند. این نمونه‌ها دارای ضخامت اسمی ۳ میلی‌متر بودند و توسط دستگاه کشش سنتام با ظرفیت ۱۵ تن تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. سرعت تست نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D638-14 معادل ۵ میلیمتر بر دقیقه تعیین شد و برای اندازه‌گیری دقیق میزان تغییر طول نمونه در جهت اعمال بار، از اکستنسومتر استفاده شد (شکل ۳). خروجی آزمون به صورت نمودار تنش-کرنش برای هر نمونه ثبت شد و پارامترهای مکانیکی نظیر مدول الاستیسیته و استحکام کششی از روی این نمودارها تعیین گردید. با تعیین خواص مکانیکی ماده اولیه، بستر لازم برای ارزیابی فرکانسی سازه‌های ساندویچی فراهم شد. در ادامه، جزئیات مربوط به چیدمان آزمایشگاهی و نحوه پیاده‌سازی آزمون مودال ضربه چکش بر روی تیرها به همراه شبیه‌سازی عددی آن‌ها تشریح می‌گردد.



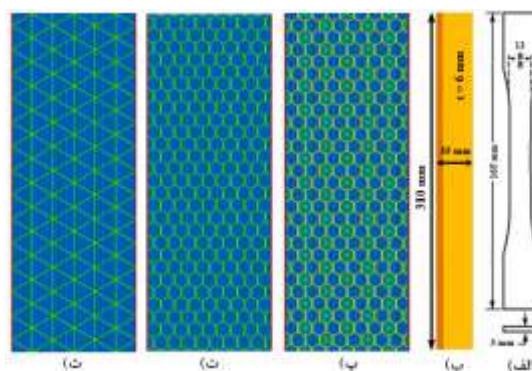
شکل ۳. پیکربندی آزمون کشش محوری



شکل ۴. ماشین ساخت افزایشی مارپین ۵۰۰

جدول ۱. پارامترهای FDM برای ساخت نمونه‌ها

پارامتر	مقدار
قطر نازل	۰.۴ میلی‌متر
ضخامت لایه	۰.۱ میلی‌متر
دمای بستر ساخت	۶۰ درجه سانتیگراد
دمای نازل	۲۱۰ درجه سانتیگراد
سرعت چاپ	۶۵ میلی‌متر بر ثانیه
تراکم پرشدگی	۲۰ درصد
الگوی پرشدگی	هیبریدی- لانه‌زنبوری- مثلثی
چگالی	۱۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب
قطر فیلامنت	۱.۷۵ میلی‌متر



شکل ۵. ابعاد نمونه آزمون کشش محوری، (ب) ابعاد

تیر ساندویچی، (پ) تیر ساندویچی با هسته هیبریدی، (ت) هسته لانه‌زنبوری و (ث) هسته مثلثی

۳.۲. آزمون مودال ضربه چکش

جهت ارزیابی مشخصه‌های دینامیکی تیرهای ساندویچی، آزمون مودال ضربه چکش با به‌کارگیری تجهیزات آزمایشگاهی دارای مشخصات ارائه شده در جدول ۲ و همچنین قابل مشاهده در شکل ۴ انجام شد.

جدول ۲. مشخصات تجهیزات آزمون مودال

تجهیزات	مدل	مشخصات
چکش	B&K 8206	محدوده نیرو: ۲۲۲۴ N
		حساسیت: ۲.۲ mV/N وزن: ۱۰۰ g محدوده فرکانسی: ۲۰ KHz
شتاب‌سنج	B&K 4393	نوع: پیزوالکتریک
		وزن: ۲.۴ g حساسیت: ۰.۳۱۶ pC/ms ⁻² محدوده فرکانسی: ۱-۱۶.۵ KHz
آنالایزر	B&K 3560C	نوع سیستم: قابل حمل
		تعداد کانال: ۱۷ رزولوشن مبدل: ۲۴ بیت نرم افزار کاربری: پالس لب‌شاپ



شکل ۴. پیکربندی آزمون مودال ضربه چکش

برای ایجاد شرایط مرزی دو سر آزاد در تیرها، از کش‌های با سختی کم استفاده گردید. میزان سختی این کش‌ها طوری انتخاب گردید که شرایط تست مودال تیر دوسر آزاد را ایجاد کند. به منظور انجام این

آزمایش، ۹ نقطه بر روی تیرها مشخص گردید و شتاب‌سنج در مرکز تیر یعنی نقطه ۵ نصب شد (شکل ۵). داده‌ها در نرم‌افزار پالس^۸ اندازه‌گیری شدند و سپس به منظور تحلیل و استخراج خواص دینامیکی به نرم‌افزار استار مودال منتقل گردیدند. در این نرم‌افزار، با به‌کارگیری تکنیک‌های برازش منحنی، پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی برای هر تیر استخراج شد. در بخش بعدی یک مدل عددی برای شبیه‌سازی تیرهای ساندویچی پرینت سه‌بعدی ارائه شده است که بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون مودال ضربه چکش اعتبارسنجی گردید.

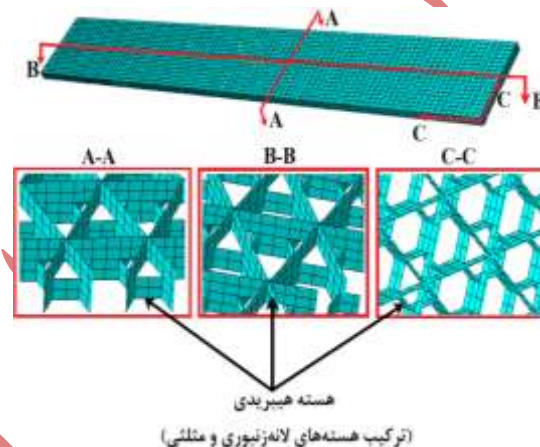


شکل ۵. آماده‌سازی تیرهای ساندویچی برای آزمون مودال

۴.۲. شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تیرهای ساندویچی پرینت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. به منظور ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی مناسب برای تیرهای ساندویچی پرینت شده، تعیین پارامترهای دقیق، نظیر ابعاد هندسی و خواص مکانیکی ضروری است. ابعاد هندسی سلول‌های هسته برای هر تیر بر اساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی فرآیند ساخت لایه به لایه آن‌ها در نرم‌افزار Simplify 3D استخراج گردید. سپس این اطلاعات در نرم‌افزار طراحی مکانیکی کتیا، ابتدا به صورت دو بعدی ترسیم شد و در ادامه به سطوح پوسته‌ای سه‌بعدی متناسب با نرم‌افزار آباکوس تبدیل گردید. در مدل‌سازی عددی از مقادیر بدست آمده در جداول ۱ و ۵ استفاده شده است.

به منظور مدل‌سازی دقیق تیر ساندویچی با رویه‌های نازک (ضخامت ۱ میلی‌متر) و هسته ضخیم (ضخامت ۴ میلی‌متر)، هر یک از اجزاء (رویه فوقانی، هسته و رویه تحتانی) به صورت جداگانه با استفاده از المان پوسته همگن خطی نوع S4R در نرم‌افزار آباکوس مش‌بندی شده (شکل ۶) و با قید تماس تای^۹ در سطوح مشترک به یکدیگر متصل گردیدند.



شکل ۶. مدل المان محدود تیر ساندویچی هیبریدی

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، آنالیز حساسیت مش برای ابعاد مختلف المان در رویه‌ها و هسته انجام شد. هدف از این آنالیز، یافتن اندازه‌ای از مش بود که ضمن تأمین همگرایی مناسب فرکانس‌های طبیعی، زمان محاسبات را نیز در سطح مطلوبی نگه دارد. با کاهش اندازه مش از حالت درشت (رویه ۳ میلی‌متر، هسته ۱ میلی‌متر) به حالت متوسط (رویه ۲ میلی‌متر، هسته ۰.۷ میلی‌متر)، مقادیر فرکانس‌های مود اول، دوم و سوم دارای تغییر نسبی کمتر از ۵.۰ درصد هستند. در ادامه، ریزتر کردن مش تا (رویه ۱ میلی‌متر، هسته ۰.۵ میلی‌متر) تغییرات بسیار جزئی را در فرکانس‌ها ایجاد کرد، در حالی که هزینه محاسباتی به طور قابل توجهی افزایش می‌یافت. بنابراین، اندازه‌های ۲ میلی‌متر برای رویه و ۰.۷ میلی‌متر برای هسته به عنوان

اندازه بهینه انتخاب گردید تا ضمن دستیابی به دقت کافی (همگرایی مناسب فرکانس‌ها) از افزایش بی‌مورد حجم و زمان محاسبات جلوگیری شود. با اعمال این ابعاد بهینه، شبکه المان محدود ایجاد شده برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از المان S4R مشخص شد. با توجه به تفاوت در تراکم دیواره‌های داخلی و طول کل مسیرهای چاپ در سه توپولوژی مختلف، تعداد کل المان‌های تولید شده برای هر مدل متفاوت است که جزئیات آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. اعتبارسنجی همگرایی نتایج شبیه‌سازی

اندازه المان (mm) فرکانس طبیعی مودها (Hz)				
رویه	هسته	اول	دوم	سوم
۳	۱	۱۲۶.۲۴	۳۴۱.۱۱	۶۴۹.۰۵
	۰.۷	۱۲۶.۰۹	۳۳۹.۴۸	۶۴۲.۱۲
	۰.۵	۱۲۵.۹۲	۳۳۷.۹۴	۶۳۶.۲۴
۲	۱	۱۲۶.۶۱	۳۴۴.۳۰	۶۶۰.۵۴
	۰.۷	۱۲۶.۵۷	۳۴۳.۶۸	۶۵۸.۱۹
	۰.۵	۱۲۶.۴۶	۳۴۲.۶۴	۶۵۴.۲۳
۱	۱	۱۲۶.۸۶	۳۴۵.۸۶	۶۶۶.۳۰
	۰.۷	۱۲۶.۷۶	۳۴۵.۰۴	۶۶۳.۲۲
	۰.۵	۱۲۶.۵۳	۳۴۳.۲۴	۶۵۶.۵۰

جدول ۴. جزئیات شبکه المان محدود تیرهای ساندویچی

نوع تیر ساندویچی	نوع المان	تعداد کل المان
هسته هیبریدی	S4R	۵۶۶۶۰
هسته لانه‌زنبوری	S4R	۵۵۱۴۹
هسته مثلثی	S4R	۵۴۰۰۲

همچنین جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای، از تحلیل Linear Perturbation - Frequency استفاده شد و فرآیند حل مسئله مقادیر

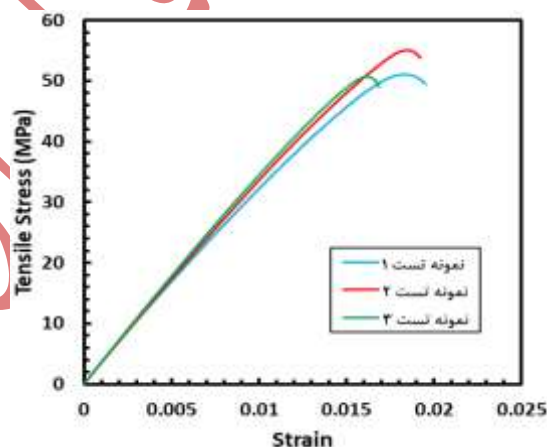
ویژه با استفاده از الگوریتم حلگر Block Lanczos انجام پذیرفت.

در بخش بعدی تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی کشش محوری، مودال ضربه چکش و شبیه‌سازی عددی شرح داده می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج آزمون کشش محوری

خواص مکانیکی ماده پایه، با آزمایش سه نمونه کششی تعیین شد. نمودارهای تنش-کرنش مطابق شکل ۷ ترسیم شدند. همچنین مقادیر استحکام کششی و مدول الاستیک محاسبه و در جدول ۵ ارائه گردید.



شکل ۷. نمودارهای تنش-کرنش آزمون کشش محوری جدول ۵. خواص مکانیکی نمونه‌های آزمون کشش محوری

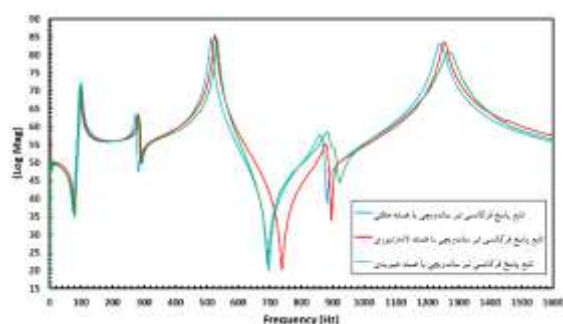
شماره نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)
۱	۳.۴۸۶	۵۱.۰۵۵
۲	۳.۵۱۱	۵۵.۰۶۴
۳	۳.۵۶۱	۵۰.۶۵۹
میانگین	۳.۵۱۹	۵۲.۲۵۹
انحراف معیار	۰.۰۳۱	۱.۹۸۹

نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که استحکام کششی و مدول الاستیک نمونه‌های PLA، با بازه مقادیر

ارائه‌شده در مرجع [۲۴] برای فرایند FDM و این ماده همخوانی داشته و در محدوده آن قرار می‌گیرند.

۲.۳. نتایج آزمون مودال

نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی تیرهای ساندویچی در شکل ۸ نشان داده شده است. استخراج فرکانس‌های طبیعی و میرایی بر مبنای تحلیل توابع پاسخ فرکانسی در نرم‌افزار استار مودال، انجام شد. رویکرد رایج، استفاده از الگوریتم‌های برازش منحنی در حوزه فرکانس مانند روش چنددرجه‌آزادی کمترین مربعات است. در این فرآیند، ابتدا با گزینش قله‌های مودال در توابع پاسخ فرکانسی، محدوده هر مود تعیین شده و سپس با استفاده از تکنیک‌های تخمین پارامتر، فرکانس طبیعی و میرایی هر شکل مود محاسبه شد.



شکل ۸. نمودار توابع پاسخ فرکانسی تیرهای ساندویچی مشخصه‌های دینامیکی قابل استخراج از این توابع (فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی) به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶. فرکانس طبیعی تیرهای ساندویچی

مود	هیبریدی (Hz)	لانه‌زنبوری (Hz)	مثلثی (Hz)
۱	۱۲۵.۴۸	۱۲۳.۳۹	۱۱۸.۵۸
۲	۳۶۰.۲۸	۳۵۵.۱۰	۳۴۳.۵۱
۳	۶۶۶.۰۴	۶۵۷.۲۶	۶۴۱.۹۴
۴	۱۱۰۹.۷۰	۱۰۹۷.۹۷	۱۰۸۸.۱۲
۵	۱۵۸۹.۵۱	۱۵۶۸.۴۷	۱۵۵۱.۴۴

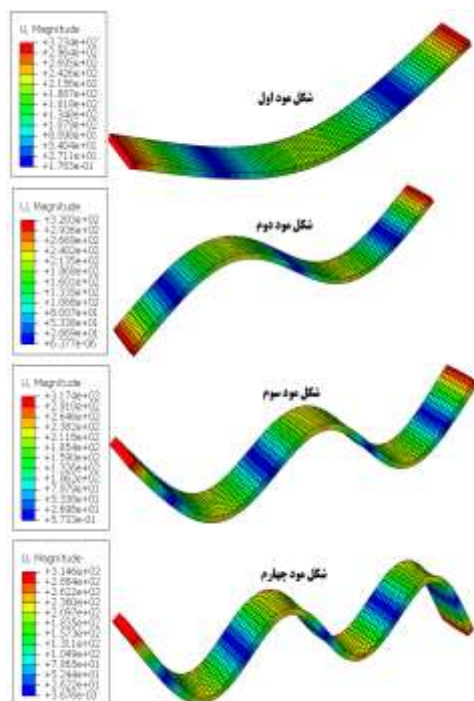
جدول ۷. میرایی مودال تیرهای ساندویچی

مود	هیبریدی (%)	لانه‌زنبوری (%)	مثلثی (%)
۱	۲.۵۵	۲.۷۵	۲.۶۷
۲	۱.۰۱	۱.۰۴	۱.۰۷
۳	۰.۸۴	۰.۸۹	۰.۸۹
۴	۱.۹۱	۰.۹۶	۱.۴۴
۵	۱.۵۶	۱.۰۵	۱.۲۱

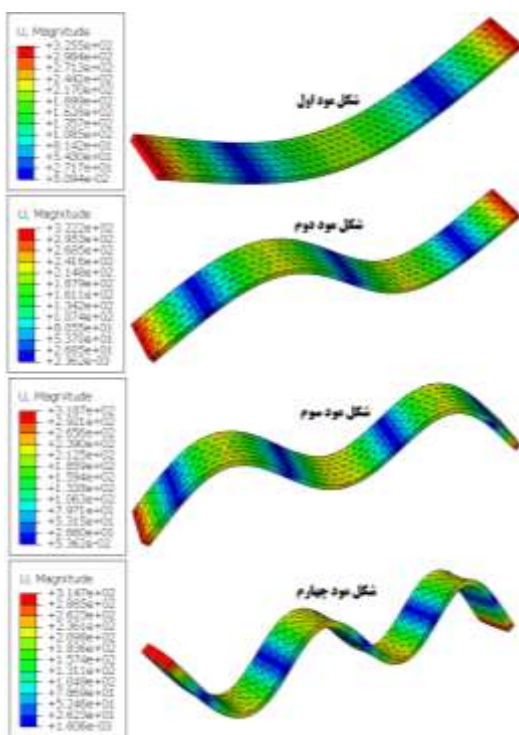
بررسی جدول ۶ نشان می‌دهد که در تمامی مودهای خمشی، تیر ساندویچی هیبریدی بیشترین فرکانس طبیعی و تیر مثلثی کمترین فرکانس را دارد. به عنوان نمونه، در مود اول فرکانس هیبریدی حدود ۱.۷ درصد بیشتر از لانه‌زنبوری و ۵.۵ درصد بیشتر از مثلثی است. این روند در مودهای بالاتر نیز با اختلافاتی مشابه ادامه می‌یابد. با توجه به اینکه هر سه تیر ساندویچی دارای وزنی در محدوده ۴۰.۸۶ تا ۴۱.۴۷ گرم دارند، اختلاف وزن میان آن‌ها کمتر از ۱ گرم است. از این رو، افزایش فرکانس در هسته هیبریدی نمی‌تواند ناشی از کاهش جرم باشد. دلیل اصلی این پدیده، افزایش سفتی خمشی مؤثر سازه در اثر ترکیب ساختار هندسی مثلثی و لانه‌زنبوری است. این موضوع با یافته‌های اخیر در ادبیات مرور نیز هم‌خوانی دارد؛ به عنوان مثال، مرجع [۲۱] در بررسی هسته‌های ساندویچی نوین نشان داده که تغییرات ساختار هندسی باعث افزایش مدول صلبیت و توزیع بهتر نیروی برشی می‌شود که نتیجه مستقیم آن افزایش فرکانس‌های طبیعی است. بنابراین، در سازه هیبریدی این پژوهش نیز، افزایش فرکانس به دلیل ارتقای مدول برشی و افزایش سفتی معادل ناشی از تلفیق دو هندسه رخ داده است و با وجود وزن میانی (۴۱.۱۶ گرم) بالاترین فرکانس‌های طبیعی را در تمام

مودهای خمشی از خود نشان می‌دهد. این بدان معناست که ترکیب هندسه مثلثی و لانه‌زنبوری در یک هسته، سفتی خمشی مؤثر را افزایش می‌دهد بدون اینکه افزایش جرم چندانی داشته باشد. در مقابل، هسته مثلثی با ۰.۳ گرم وزن بیشتر، کمترین فرکانس‌ها را دارد که نشان می‌دهد هندسه صرفاً مثلثی به تنهایی نمی‌تواند سفتی لازم را داشته باشد.

تجزیه و تحلیل مقادیر میرایی گزارش شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که در مود اول تیر ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری بیشترین میرایی و هسته هیبریدی کمترین میرایی را نشان می‌دهد. این امر حاکی از اتلاف انرژی مؤثرتر در هسته لانه‌زنبوری در پاسخ به ارتعاشات فرکانس پایین است. در مود دوم، هر سه هسته میرایی نزدیکی دارند، اما هسته مثلثی اندکی بالاتر است. این نشان می‌دهد که در این مود، تأثیر هندسه هسته بر میرایی کاهش می‌یابد. هر سه تیر ساندویچی در مود سوم میرایی تقریباً یکسان و پایینی دارند. این می‌تواند به این دلیل باشد که در این مود، نوع تغییر شکل تیر ساندویچی به نحوی است که هندسه سلول‌ها تأثیر کمتری بر اتلاف انرژی دارد. در نهایت، تیر ساندویچی با هسته هیبریدی در مودهای چهارم و پنجم جهش چشمگیری در میرایی دارد که به مراتب بیشتر از دو هسته دیگر است. در این خصوص می‌توان گفت؛ افزایش پیچیدگی هندسی و اتصالات متقابل باعث توزیع بهتر بار و دفع مؤثرتر انرژی ارتعاشی می‌شود. وجود "فصل مشترک" بین دو هندسه مختلف مثلثی و لانه‌زنبوری در راستای ضخامت، نقش اتصالات متقابل و هندسه پیچیده را ایفا کرده که مرجع [۱۴] نیز این موضوع را تأیید کرده و آن را باعث فعال شدن مکانیزم‌های جدید اتلاف انرژی (افزایش میرایی) به



شکل ۱۰. شکل مودهای تیر ساندویچی با هسته لانه زنبوری



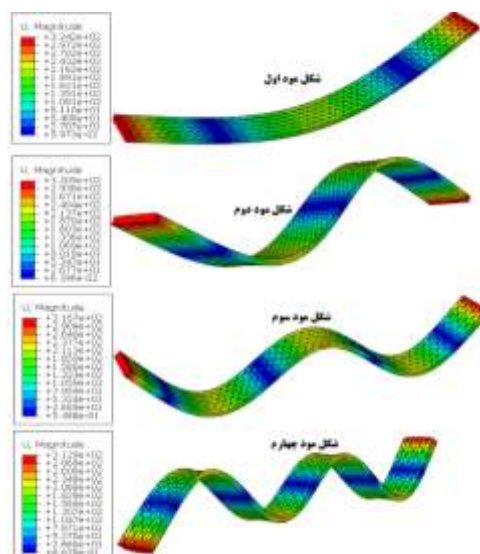
شکل ۱۱. شکل مودهای تیر ساندویچی با هسته مثلثی

نتایج عددی بدست آمده در نرم افزار آباکوس با نتایج تجربی حاصل از آزمون مودال در جدول ۸ مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

شمار آورده است. بنابراین افزایش چشمگیر میرایی در مودهای بالا ناشی از وجود یک فصل مشترک فیزیکی و ناپیوستگی هندسی بین شبکه‌های مثلثی و لانه زنبوری در بطن هسته هیبریدی است. در این مودها به دلیل کوتاه تر شدن طول موج‌ها، تغییر شکل‌های موضعی در مرز مشترک این دو هندسه تشدید می‌شود. این ناهمگونی ساختاری باعث ایجاد میدان‌های کرنش پیچیده و پراکندگی امواج تنش در محل اتصال سلول‌ها شده و در نتیجه، مکانیزم‌های اتلاف انرژی و اصطکاک داخلی سازه را به شدت فعال می‌کند. در مقابل، هسته لانه زنبوری در مود چهارم دچار افت شدید میرایی می‌شود و هسته مثلثی نیز در مود سوم کمترین مقدار میرایی را دارد. این نشان می‌دهد که هر هندسه در بازه فرکانسی خاصی عملکرد بهتری دارد.

۳.۳. نتایج شبیه‌سازی عددی

شکل مودها برای هر سه نوع تیر ساندویچی پرینت سه‌بعدی با شرایط مرزی دو سر آزاد در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نمایش داده شده است. الگوی کلی مودها در هر سه نوع هسته یکسان است.



شکل ۹. شکل مودهای تیر ساندویچی با هسته هیبریدی

جدول ۸. مقایسه نتایج فرکانس طبیعی تجربی و عددی

تیر	مود	فرکانس طبیعی		خطا (%)
		تجربی (Hz)	عددی (Hz)	
هیبریدی	۱	۱۲۵.۴۸	۱۲۵.۲۳	۰.۲۰
	۲	۳۶۰.۲۸	۳۵۰.۷۹	۲.۷۰
	۳	۶۶۶.۰۴	۶۴۵.۶۹	۳.۱۵
	۴	۱۱۰۹.۷۰	۱۰۷۴.۸	۳.۲۴
لانه زنبوری	۱	۱۲۳.۳۹	۱۲۲.۵۱	۰.۷۱
	۲	۳۵۵.۱۰	۳۴۵.۴۱	۲.۸۰
	۳	۶۵۷.۲۶	۶۴۲.۷۴	۲.۲۵
	۴	۱۰۹۷.۹۷	۱۰۸۲.۱۰	۱.۴۶
مثلی	۱	۱۱۸.۵۸	۱۲۳.۷۲	۴.۱۵
	۲	۳۴۳.۵۱	۳۴۷.۸۲	۱.۲۳
	۳	۶۴۱.۹۴	۶۴۲.۰۱	۰.۰۱
	۴	۱۰۸۸.۱۲	۱۰۷۴.۲	۱.۲۹

با توجه به نتایج مقایسه‌ای که در جدول ۸ ارائه شده است میتوان گفت؛ خطای نسبی بین نتایج تجربی و عددی برای تمامی مودها و انواع هسته کمتر از ۵ درصد است که مقادیر قابل قبولی برای تحلیل‌های مهندسی است. افزون بر این، در این پژوهش تشخیص مودهای ارتعاشی تجربی مستقیماً از طریق شناسایی قله‌های تشدید روی توابع پاسخ فرکانسی صورت گرفت. با توجه به رفتار خمشی کلاسیک تیرهای ساندویچی مورد مطالعه، فرکانس‌های طبیعی دارای فواصل معناداری از یکدیگر بوده و پدیده درهم‌تنیدگی مودها در محدوده فرکانسی مدنظر مشاهده نشد؛ لذا استقلال مودها به روشنی قابل تشخیص بود. صحت این رویکرد تشخیصی نیز علاوه بر خطای نسبی بسیار پایین گزارش شده در جدول ۶، با انطباق بصری الگوهای تغییر شکل (شکل‌های ۹ تا ۱۱) تایید گردید که کفایت همبستگی مودال را نشان داده و نیاز به ارزیابی‌های ثانویه نظیر

معیار اطمینان مودال را برطرف می‌سازد. بر همین اساس در بخش پایانی جمع بندی جامع دستاوردها و توصیه های کاربردی حاصل از این تحقیق ارائه می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های حاصل از آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های عددی در این پژوهش، موارد زیر قابل نتیجه‌گیری است:

- افزایش فرکانس‌های طبیعی در هسته هیبریدی: تیر ساندویچی با هسته هیبریدی در تمامی مودهای خمشی (اول تا پنجم) بیشترین فرکانس طبیعی را در میان سه نوع هسته مورد مطالعه دارد. این افزایش در مود اول نسبت به هسته مثلی حدود ۵.۵ درصد و نسبت به هسته لانه‌زنبوری حدود ۲ درصد است که با وجود اختلاف وزن ناچیز (کمتر از ۱ گرم)، نشان‌دهنده سفتی خمشی مؤثرتر ساختار ترکیبی است.
- رفتار میرایی وابسته به مود و هندسه: هسته لانه‌زنبوری در مود اول بیشترین میرایی (۲.۷۵ درصد) و هسته هیبریدی در این مود کمترین میرایی (۲.۵۵ درصد) را دارد. اما در مودهای چهارم و پنجم، میرایی هسته هیبریدی به‌طور قابل توجهی (به‌طور میانگین و به ترتیب ۳۸ و ۶۵ درصد) از دو هسته دیگر بیشتر می‌شود. این پدیده ناشی از مکانیزم‌های اتلاف انرژی در فصل مشترک هندسه‌های متفاوت در هسته هیبریدی است.

- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی: مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از تحلیل اجزاء محدود تیرهای ساندویچی پرینت سه‌بعدی با داده‌های آزمون مودال، خطای نسبی کمتر از ۵ درصد را نشان داد. بنابراین مدل المان محدود مبتنی بر پوسته‌های همگن S4R با قید تای بین رویه‌ها و هسته با دقت مناسبی رفتار ارتعاشی تیرهای ساندویچی چاپ سه‌بعدی را پیش بینی می‌کند.
- توصیه کاربردی برای طراحی سازه‌های ساندویچی: با توجه به برتری همزمان هسته هیبریدی در فرکانس‌های طبیعی (به ویژه در مودهای خمشی) و میرایی در مودهای بالاتر، این توپولوژی برای کاربردهایی که نیاز به سفتی دینامیکی بالا و کنترل ارتعاش در گستره فرکانسی وسیع دارند (مانند سازه‌های هوافضا و خودروهای سبک) توصیه می‌شود.
- لازم به ذکر است که ساختار هیبریدی معرفی‌شده در این پژوهش، یک نمونه مفهومی جهت بررسی خواص مودال است. اگرچه ایده اولیه این طراحی بر پایه دستاوردهای پیشین در حوزه بهینه‌سازی توپولوژی استوار است (به‌عنوان مثال، مرجع [۱۲] نشان داد که ساختارهای ساندویچی بهینه تحت قیود وزنی و کمانش، تمایل به شکل‌گیری هسته‌های هیبریدی متشکل از دیواره‌های شبکه‌ای ضخیم و سلول‌های لانه‌زنبوری را دارند)، اما ابعاد و نسبت‌های هندسی در مدل حاضر بهینه‌سازی نشده‌اند.

از آنجا که انجام یک تحلیل حساسیت جامع (شامل ارزیابی اثر ضخامت رویه و هسته، درصد پرشدگی قطعات، چگالی نسبی، و یافتن نسبت کسر حجمی بهینه سلول‌های مثلثی به لانه‌زنبوری) نیازمند توسعه یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه است و از گستره این پژوهش تجربی و عددی خارج می‌باشد، توسعه پارامتریک این مدل و بهینه‌سازی توزیع فضایی هندسه‌ها به عنوان مسیر اصلی تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد. همچنین، با توجه به اینکه ابعاد سلول‌های شبکه هسته و ضخامت لایه‌های چاپ سه‌بعدی در مقیاس میلیمتر قرار دارند، توسعه مدل‌های تحلیلی مبتنی بر تئوری‌های الاستیسیته وابسته به اندازه نظیر تئوری تنش کوپل اصلاح‌شده یا گرادیان کرنش جهت در نظر گرفتن اثرات اندازه در مقیاس کوچک و بررسی تاثیر آن بر فرکانس‌های رزونانس، از دیگر مسیرهای ارزشمند و ضروری برای تحقیقات آتی در این حوزه به شمار می‌رود.

- [۱] Burchardt, Claus. 1997. "Fatigue of Sandwich Structures with Inserts." *Composite Structures* 40 (3-4):201–11. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00156-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00156-1).
- [۲] Gibson, I. J., and Michael Farries Ashby. 1982. "The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials." *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 382 (1782):43–59. <https://doi.org/10.1098/rspa.1982.0088>.
- [۳] Soleimani, Seyed Soroush, and Okan Ozdemir. 2024. "Experimental and Numerical Studies on Quasi-Static Behavior of Sandwich Composites with Nano Clay Modified Kevlar Facesheets and Aluminum Honeycomb Core." *Polymer Composites* 45 (14):13196–211. <https://doi.org/10.1002/pc.28696>.
- [۴] T.C. Triantafillou, L.J. Gibson. 1987. "Failure Mode Maps for Foam Core Sandwich Beams." *Materials Science and Engineering* 95:37–53. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90496-4](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90496-4).
- [۵] اسماعیلی، ریچانه. ۲۰۲۱. "بهینه‌سازی عملکرد آکوستیکی در ورق‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری." *مجله علمی صوت* ۹ (۱۸): ۱۰۶–۱۴. https://jvs.isav.ir/article_244179.html
- [۶] Clarkson, B. L., and D. J. Mead. 1973. "High Frequency Vibration of Aircraft Structures." *Journal of Sound and Vibration* 28 (3):487–504. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80036-7](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80036-7).
- [۷] Gajjar, Tusharbhaj, Richard Yang, Lin Ye, and Y. X. Zhang. 2024. "Effects of Key Process Parameters on Tensile Properties and Interlayer Bonding Behavior of 3d Printed Pla Using Fused Filament Fabrication." *Progress in Additive Manufacturing* 10 (2):1261–80. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00704-y>.
- [۸] Kamaal, M., M. Anas, H. Rastogi, N. Bhardwaj, and A. Rahaman. 2020. "Effect of Fdm Process Parameters on Mechanical Properties of 3d-Printed Carbon Fibre–Pla Composite." *Progress in Additive Manufacturing* 6 (1):63–69. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00145-3>.
- [۹] Wang, Peng, Bin Zou, Hongchuan Xiao, Shouling Ding, and Chuanzhen Huang. 2019. "Effects of Printing Parameters of Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties, Surface Quality, and Microstructure of Peek." *Journal of Materials Processing Technology* 271:62–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>.
- [۱۰] Wang, Shuheng, Yongbin Ma, Zichen Deng, Sen Zhang, and Jiaxin Cai. 2020. "Effects of Fused Deposition Modeling Process Parameters on Tensile, Dynamic Mechanical Properties of 3d Printed Polylactic Acid Materials." *Polymer Testing* 86 <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106483>.
- [۱۱] Dobos, József, Muammel Hanon, and István Oldal. 2021. "Effect of Infill Density and Pattern on the Specific Load Capacity of Fdm 3d-Printed Pla Multi-Layer Sandwich." *Journal of Polymer Engineering* 42 <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0223>.
- [۱۲] Sun, Zhi, Dong Li, Weisheng Zhang, Shanshan Shi, and Xu Guo. 2017. "Topological Optimization of Biomimetic Sandwich Structures with Hybrid Core and Cfrp Face Sheets." *Composites Science and Technology* 142:79–90. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.029>.
- [۱۳] Xiao, Lei, Xiang Sun, Li Cheng, and Xiang Yu. 2025. "Broadband and Robust Vibration Reduction in Lattice-Core Sandwich Beam with 3d-Printed Qzs Resonators." *Composite Structures* 352 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118626>.
- [۱۴] Vasumathi, M., S. Rashia Begum, N. Balaji et al. 2025. "Assessing the Mechanical and Vibrational Response of Hybrid Metal-Fibre Sandwich Panels Fabricated with Additively Manufactured Core Structures." *Progress in Additive Manufacturing* 10 (8):5317–27. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00908-2>.
- عبدالواحد کمی. ۲۰۲۳. "پس پردازش قطعات اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن چاپ and [۱۵] باقری، عباسعلی، وحید فرتاش وند، سبهدی با استفاده از ارتعاشات فراصوت." *مجله علمی صوت و ارتعاش* ۱۱ (۲۲): ۷۹–۹۰. https://jvs.isav.ir/article_704408.html

- [۱۶] Yao, Tianyun, Huajiang Ouyang, Shi Dai, Zichen Deng, and Kai Zhang. 2021. "Effects of Manufacturing Micro-Structure on Vibration of Fff 3d Printing Plates: Material Characterisation, Numerical Analysis and Experimental Study." *Composite Structures* 268 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113970>.
- [۱۷] Papageorgiou, Vasileios, Konstantinos Tsongas, Michel T. Mansour, Dimitrios Tzetzis, and Gabriel Mansour. 2025. "Mechanical Properties and Vibrational Behavior of 3d-Printed Carbon Fiber-Reinforced Polyphenylene Sulfide and Polyamide-6 Composites with Different Infill Types." *Journal of Composites Science* 9 (2):59. <https://doi.org/10.3390/jcs9020059>.
- [۱۸] Selvaraj, Rajeshkumar, Kamesh Gupta, Shubham Kumar Singh, Ankur Patel, and Manoharan Ramamoorthy. 2021. "Free Vibration Characteristics of Multi-Core Sandwich Composite Beams: Experimental and Numerical Investigation." *Polymers and Polymer Composites* 29 (9_suppl):S1414–S23. <https://doi.org/10.1177/09673911211057679>.
- [۱۹] Shankar, A. N., S. M. Murali Krishna, Rohinikumar Chebolu, Ajay K. S. Singholi, Rasmeet Singh, and S. Rajeshkumar. 2022. "Effect of Carbon Nanotubes Reinforcement on Eigenmodes of Multi-Smart Core Sandwich Composite Cylindrical Shell Panels." *Polymer Composites* 43 (2):1078–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.26435>.
- [۲۰] Wang, Yong-jing, Zhi-jia Zhang, Xiao-min Xue, and Ling Zhang. 2019. "Free Vibration Analysis of Composite Sandwich Panels with Hierarchical Honeycomb Sandwich Core." *Thin-Walled Structures* 145 <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106425>.
- [۲۱] Thanikasalam, Narayanan, and Manoharan Ramamoorthy. 2023. "Vibrational Behavior of a 3d Printed Biomimetic Dual-Core Composite Sandwich Beam: An Experimental and Numerical Study." *Polymer Composites* 45:1178–94. <https://doi.org/10.1002/pc.27844>.
- [۲۲] Guo, Zhenkun, Shuai Jiang, Yongjun Shen *et al.* 2025. "Nonlinear Dynamic Analysis and Vibration Reduction of Two Sandwich Beams Connected by a Joint with Clearance." *Mechanical Systems and Signal Processing* 223:111828. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111828>.
- [۲۳] Wu, Yi-Chuang, Yun-Jhen Lai, Jhen-Hao Syu, and Ming Ji. 2025. "Dynamic Analysis of 3d Printed Lattice Sandwich Beam with Square Grid Core." *Journal of Mechanics* 41:103–28. <https://doi.org/10.1093/jom/ufaf009>.
- [۲۴] Chacón, J. M., M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez. ۲۰۱۷. "Additive Manufacturing of Pla Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties And their Optimal Selection." *Materials & Design* 124:143–57. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

پی نوشت

-
1. Fused Deposition Modelling (FDM)
 2. Polylactic Acid (PLA)
 3. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
 4. Multi-Magnetorheological Elastomer
 5. Hierarchical Cross-Honeycomb Core
 6. Dual Lamellar Core
 7. Quasi-Zero-Stiffness (QZS)
 8. Pulse LabShop
 9. Tie Contact