

تست خمش سه نقطه‌ای و مودال تجربی- عددی ورق‌های ساندویچی آلومینیومی و کامپوزیتی با هسته مشبک

رضا آذرآفزا^{۱*}، علی داور^۱، پویا پیر علی^۲، مجید قدیمی^۳

۱. دانشیار، گروه مکانیک و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
 ۲. استادیار، گروه مکانیک و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
 ۳. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
- (دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷)

چکیده

در تحقیق حاضر، سه نمونه کامپوزیتی، با جنس و ضخامت مختلف با روش لایه‌گذاری دستی در قالب سیلیکونی و آغشته سازی با رزین اپوکسی ساخته شده‌اند. همچنین یک نمونه آلومینیومی ساندویچی و یک صفحه یکپارچه آلومینیومی نیز با ابعاد مشابه نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده‌اند. هسته نمونه آلومینیومی با استفاده از فرآیند برش سیم، تولید شده و صفحات بالا و پایین، با استفاده از چسب، به آن متصل شده‌اند. به منظور بررسی رفتار آن‌ها در برابر بارهای شبه‌استاتیکی عرضی، تحت تست خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش تجربی نشان داد که حتی بعد از واماندگی رویه‌ها، هسته مشبک به تحمل بار ادامه می‌دهد و هیچ‌گونه جدایشی بین رویه‌ها و هسته، به دلیل چسبندگی و عمل‌آوری مناسب رزین، مشاهده نشد. همچنین تست مودال تجربی بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. پاسخ فرکانسی، شکل مود و ضرایب میرایی برای نمونه‌ها بدست آمدند. در نهایت شبیه‌سازی عددی آن نیز با نرم‌افزار آباکوس انجام شد. نتایج مودال دو روش، با هم مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: صفحات ساندویچی کامپوزیتی، هسته مشبک تقویت شده، خمش سه نقطه‌ای، تست مودال، حل عددی

Three-Point Bending Test and Experimental and Numerical Modal Testing of Sandwich Plates with Grid Stiffened Core

Reza Azarafza^{*}, Ali Davar, Puya Pirali and Majid Ghadimi

Abstract

In the present study three composite sandwich structures with grid stiffened core (SSGSC) samples made of different materials and thicknesses are fabricated with hand lay-up method using a silicon rubber mold and epoxy resin. Also, two metallic samples of the same dimensions as the composite ones, including a monolithic and a SSGSC samples made of aluminum are fabricated. In order to study their behavior subjected to the quasi-static transverse loads, the samples undergo three-point bending tests. Results of the practical tests on the composite samples showed that beyond the failure of the face sheets, the grid stiffened core will tolerate load, also there are no delamination between the face sheet layers due to good curing process. The experimental modal testing is achieved on all the samples. The frequency response, mode shape as well as damping coefficients are obtained from each experiment. Finally, numerical modal analysis is done and the results are compared with the experiments.

Key words: Composite sandwich plate, Grid stiffened core, Three-point bending, Modal Testing, Numerical simulation

مقدمه

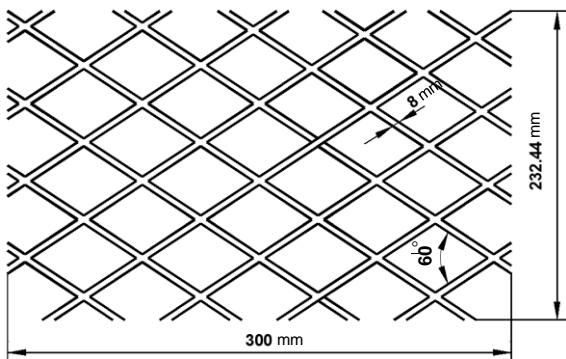
سازه‌های ساندویچی فلزی و کامپوزیتی تقویت‌شده با هسته مشبک، یکی از جدیدترین نوع ساختارهای کاربردی در صنایع پیشرفته می‌باشند که به دلیل مزیت‌هایی مانند استحکام ویژه و سفتی ویژه بالا، در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، صنایع نظامی، کشتی سازی، حمل و نقل ریلی، سکوها نفتی و غیره استفاده می‌شوند. بررسی رفتار این سازه‌ها و آگاهی از خصوصیات دینامیکی آنها، همواره مورد توجه محققین بوده است. سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک^۱، دارای یک ساختار ساندویچی هستند که از رویه‌های کامپوزیتی و یک هسته با ساختار مشبک، تشکیل شده‌اند و بجای یک هسته سبک، یک ساختار مشبک را در مرکز خود دارند. بدلیل مشبک بودن هسته، مزیت توزیع بار و همچنین تحمل به خسارت^۲ را دارا می‌باشند و به علت ساندویچی بودن، دارای مقاومت خمشی بالا می‌باشند. همچنین به علت جنس کامپوزیتی کل سازه، از خواص چندگانه کامپوزیتها، از جمله سبکی وزن و تحمل به خسارت (به این معنا که اگر در قسمتی از هسته مشبک، واماندگی ایجاد شود، انتشار نمی‌یابد) نیز برخوردار هستند. در گذشته، تحقیقات فراوانی در مورد سازه‌های ساندویچی انجام شده است که در ادامه، به بررسی آنها پرداخته شده است. سازه‌های مشبک کامپوزیتی به عنوان شبکه ریبهای^۳ متصل شده صلب، توصیف می‌شوند که این شکل دهی، ذاتاً ساختار مستحکمی را تشکیل می‌دهد و مهمترین فاکتور در شکست آنها، تمایل ریبها به خمش است. بهترین راه حل، تقویت آنها و پوشاندن سطحشان با استفاده از لایه‌ها می‌باشد [۱]. توماس سیلندر کامپوزیتی ایزوگرید^۴ را تولید و تحت فشار محوری قرار داد و به این نتیجه رسید که پوسته نازک سیلندر، ریبها را در برابر کمانش موضعی کمک نمی‌کند. همچنین ایشان در مقاله‌ای دیگر، پانل تقویت شده ایزوگرید را تولید و تحت بار محوری فشاری تست نمود و به این نتیجه رسید که پوسته و سیلندر، هر دو در مقابل آسیبهای ساختاری بدلیل چندگانگی مسیرهای بار، مقاوم می‌باشند [۲،۳]. استیون و همکاران، دو روش را برای ساخت سازه‌های مشبک تقویت شده به وسیله قالبهای توسعه یافته، آماده و ارائه کردند [۴]. پراکاش و همکاران، خواص جذب انرژی ویژه^۵ و ارزیابی آسیب پانلهای کامپوزیتی تقویت شده مشبک ایزوگرید تحت بارگذاری شبه استاتیکی عرضی^۶ را بررسی نمودند.

همچنین آنها بهینه‌سازی هندسی را به منظور بیشینه کردن جذب انرژی این پانلهای، مورد بررسی قرار دادند و پارامترهای مؤثر مانند: پهنای و ضخامت ریبها، فاصله مرکز به مرکزشان و ضخامت پوسته را معرفی کردند، و یک کاربرد جدید برای این صفحات را در دربهای کناری خودرو معرفی نمودند [۵،۶]. هولین و همکاران یک سیلندر تقویت شده مشبک و یک سیلندر دیگر با ابعاد هندسی و جرم مشابه اول ولی با ساختار ساندویچی تولید کردند و با وارد آوردن بار محوری فشاری، به این نتیجه رسیدند که سیلندر ساندویچی، سفت‌تر و از نظر پارامتر بار به جابجایی، چند برابر مقاوم‌تر است [۷]. بورگوهاین و ویل مورگان، در مطالعات خود سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک را به خاطر راندمان بالا، تحت بارهای فشاری معرفی کردند و بهترین روش برای تولید این ساختارها که شبکه ریبهای تقویت کننده، مشخصه اصلی آنها می‌باشد را رشته پیچی^۷ معرفی کردند و نشان دادند که راندمان بالای این ساختارها، به علت خاصیت انتقال بار ریبها می‌باشد [۸]. واسیلیف و همکاران، اطلاعاتی درباره پروسه ساخت، طراحی، روشهای آنالیز و خواص مکانیکی ساختارهای مشبک کامپوزیتی غیرایزوگرید^۸ را برای کاربردهای هوافضایی ارائه دادند [۹]. محررزاده و همکاران، خواص مکانیکی مواد مدرج تابعی پایه پلیمری تقویت شده با نانو لوله کربن را با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای بررسی نمودند [۱۰]. تقی پور و دامغانی، جذب انرژی در تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پر شده از فوم، تحت بارگذاری خمشی شبه استاتیکی را به روش تجربی بررسی نمودند [۱۱]. خسروی و اسلامی، تاثیر افزودن نانوذرات رس بر رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی (خمش سه نقطه‌ای) را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. ازم و لی، پاسخ سازه چند لایه کامپوزیتی تحت بار خمش سه نقطه‌ای با دو چیدمان مختلف را بررسی نمودند [۱۳]. آذرافزا و همکاران، تست خمش سه نقطه‌ای ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک را بررسی نمودند [۱۴]. وانگ و همکاران، تجزیه و تحلیل ارتعاشات آزاد ساندویچ پانل کامپوزیتی با هسته با ساختار سلولی مربعی را بررسی نمودند. ثابتهای الاستیک موثر هسته توسط یک مدل مبتنی بر میکرومکانیک استخراج شده است. مدل معادل ارائه شده آنها می‌تواند پیش‌بینی قابل قبولی برای عملکرد ارتعاش آزاد سازه‌های ساندویچی ارائه دهد [۱۵]. جیانگ و همکاران،

نشان می‌دهد که ساندویچی بودن این سازه‌ها در مقابل پوسته مشبک و همچنین تغییر جنس الیاف از شیشه به کربن در مقابل افزایش ضخامت الیاف شیشه سبب بهبود تحمل بار سازه خواهد شد. نوآوری مقاله حاضر، در ارزیابی مقایسه‌ای مزیت‌های استحکامی خمش استاتیکی و فرکانس ارتعاشی ساختارهای ساندویچی با هسته مشبک ضربدری است که تا کنون در تحقیقات گذشته، مشاهده نشده است.

طرح هسته مشبک

شکل ۱، نقشه دوبعدی هسته مشبک را که دارای هندسه آنگل‌گرید و متقارن می‌باشد، نشان می‌دهد. اندازه هسته مشبک برای هر چهار نمونه یکسان و ارتفاع آن برابر ۱۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۱- نقشه دوبعدی هسته

خواص مواد

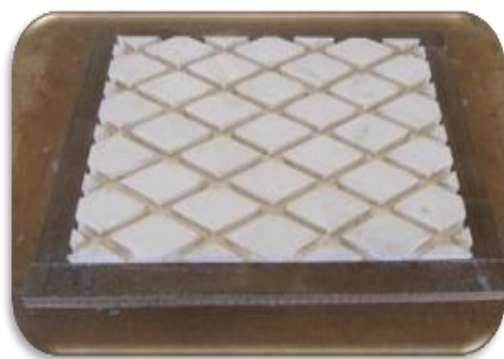
برای ساخت رویه نمونه‌های کامپوزیتی از پارچه شیشه بافته شده و کربن بافته شده و هر دو با بافت حصیری ۳۰۰ گرمی و همچنین برای هسته مشبک از الیاف یک جهته پیوسته^{۱۳} شیشه و برای فاز زمینه از رزین اپوکسی استفاده شده است. جنس نمونه‌های آلومینیومی از آلومینیوم استاندارد ۱۰۵۰ می‌باشند. مشخصات هندسی هر پنج نمونه، در جدول ۱ ذکر شده‌اند. همچنین خواص مکانیکی رزین اپوکسی (CY219) با نسبت وزنی ۵٪ سخت کننده (hy5160)، الیاف شیشه، الیاف کربن و آلومینیوم در دمای محیط در جدول ۲ نشان داده شده است.

عملکردهای خمشی ورق‌های با ساختارهای کامپوزیتی ساندویچی رویه/هسته موجدار تقویت شده را برای اولین بار با اثر تقویت کننده‌های افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان که بین هسته خالص و سفت کننده، مکانیسم‌های تقویتی پیچیده و تغییر شکل کوپل وجود دارد. همچنین ثابت نمودند که تقویت کننده، نه تنها جذب انرژی هسته خالص، بلکه جذب انرژی رویه‌ها را بهبود می‌بخشد و جذب انرژی ناشی از اتصال آن با هسته را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۶]. حیدری شاهملکی و زین الدینی، کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/اپوکسی را برای ساخت ساندویچ پنل‌ها با هسته موجی کسینوسی یکطرفه و دو طرفه استفاده نمودند. آنها هسته موجی دو طرفه برای ساخت ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف طبیعی را پیشنهاد دادند. به علاوه، برای ارزیابی اثر نوع راستا، انواع مختلفی از هسته‌های موجی یک طرفه، شامل عرضی یا طولی، با کمان رو به بالا یا پایین را در نظر گرفتند [۱۷].

همانطور که گفته شد، موضوع اصلی مطالعات پیشین، شامل آنالیز کشش با استفاده از روش‌های تحلیلی عددی و تجربی بوده است. بیشتر آنها بر روی سیلندرهای کامپوزیتی تقویت شده با ساختارهای مشبک متمرکز شده‌اند. همچنین بیشتر تحقیقات در زمینه اثبات بهینه بودن ترکیب پوسته و ساختارهای مشبک و تغییر ضخامت‌ها و هندسه هسته ایزوگرید انجام گرفته است. در این تحقیق، با ساخت نمونه‌های صفحه ساندویچی کامپوزیتی با هندسه هسته آنگل‌گرید^۹ به روش رشته پیچی دستی در قالب سیلیکون رابر^{۱۰}، به بررسی اثر افزایش ضخامت در مقابل تغییر جنس رویه‌ها بر روی پارامتر استحکام به وزن پرداخته شده است. همچنین به بررسی اثر ساندویچی بودن این صفحات، بر روی مشخصه جذب انرژی ویژه پرداخته شده، برای مقایسه هرچه بهتر، یک نمونه ساندویچی آلومینیومی از این سازه‌ها، به روش برش سیم^{۱۱} و یک صفحه ساده آلومینیومی نیز ساخته شده است. سپس، همه نمونه‌ها در یک ابعاد مشابه طولی و عرضی، اما بعضی با ضخامت‌های مختلف، مورد تست خمش سه نقطه‌ای^{۱۲} تحت بار-گذاری شبه استاتیک عرضی قرار گرفته‌اند. در نهایت، تست مودال تجربی بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شده، شبیه‌سازی عددی آن‌ها نیز با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. پاسخ فرکانسی، شکل مود و ضرایب میرایی برای نمونه‌ها بدست آمده‌اند و نتایج مودال دو روش، با هم مقایسه شده‌اند. نتایج

جدول ۱- مشخصات هندسی هر پنج نمونه ساخته شده

شماره نمونه	ضخامت رویه‌ها (mm)	ضخامت هسته (mm)	ابعاد خارجی (mm ³)	جنس رویه‌ها (پارچه بافته شده)	تعداد لایه در رویه	جنس هسته (الیاف تک جهت)
۱	۴	۱۰	۳۰۰×۲۰۰×۱۸	شیشه/اپوکسی	۵	شیشه/اپوکسی
۲	۲	۱۰	۳۰۰×۲۰۰×۱۴	شیشه/اپوکسی	۲	شیشه/اپوکسی
۳	۲	۱۰	۳۰۰×۲۰۰×۱۴	کربن/اپوکسی	۲	کربن/اپوکسی
۴	۲	۱۰	۳۰۰×۲۰۰×۱۴	آلومینیوم ۱۰۵۰	-	آلومینیوم ۱۰۵۰
۵	-	-	۳۰۰×۲۰۰×۱۴	آلومینیوم ۱۰۵۰	-	-



شکل ۳- قالب سیلیکونی بعد از پخت و جدا سازی

جدول ۲ خواص مکانیکی رزین اپوکسی، الیاف شیشه (E-Glass) و الیاف کربن در دمای محیط [۱۴].

جنس	دانسیته (kg/m ³)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت الاستیسیته طولی (GPa)
رزین اپوکسی	۱۱۰۰	۸۰	۱۵۰	۲
الیاف کربن	۱۷۵۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰
الیاف شیشه (E-Glass)	۲۵۴۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۷۳
آلومینیوم ۱۰۵۰	۲۷۴۰	۱۷۵	۱۶۵	۷۰

ساخت نمونه‌های کامپوزیتی ساخت نمونه اول

نمونه اول دارای ابعاد کلی (۳۰۰×۲۰۰×۱۸) میلی‌متر مکعب می‌باشد. ضخامت رویه‌ها هر کدام ۴ میلی‌متر و جنس آنها از پارچه حصیری شیشه ۳۰۰ گرمی و ضخامت هسته ۱۰ میلی‌متر و از جنس روینگ می‌باشد. برای ساخت این نمونه، الیاف در داخل قالب سیلیکونی، خوابانده شده و توسط رزین اپوکسی آغشته می‌شود. این کار تا زمانی که شیار کاملاً با رشته های آغشته به رزین پر شود، ادامه می‌یابد. سپس رویه بالا شامل ۵ لایه پارچه بافته شده و آغشته به رزین، روی آن قرار داده شده است. بعد از ژله‌ای شدن، آنرا از قالب جدا کرده، و بلافاصله، رویه پایین (که روش ساخت آن نیز مانند رویه بالایی است) روی آن چسبانده می‌شود. بعد از پخت نمونه در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت، هسته و رویه‌ها کاملاً به هم چسبیده و سخت می‌شوند و اتصالی کاملی بین آنها ایجاد می‌شود. با برش قسمت‌های اضافه با اره، نمونه شماره ۱ آماده شده است. شکل ۴، اتصال پارچه آغشته به رزین رویه بالایی و پایینی بر روی هسته و شکل ۵، نمونه را پس از برش قسمتهای اضافی

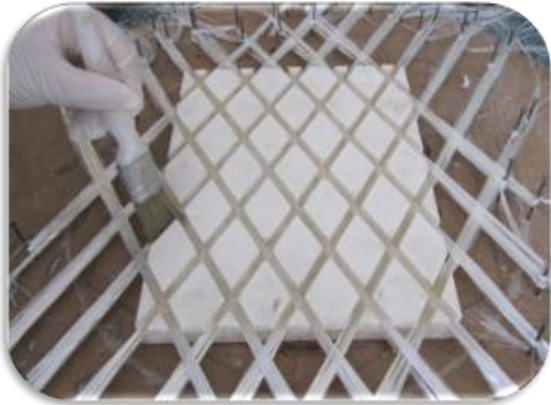
ساخت قالب لاستیک سیلیکونی

برای ساخت قالب لاستیک سیلیکونی، ابتدا یک مدل چوبی با ابعاد هسته مشبک و ارتفاع ریب‌های ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است، سپس سیلیکون مخلوط شده با ۵٪ وزنی سخت کننده^{۱۴} به داخل آن ریخته شد و بعد از شکل‌گیری و پخت سیلیکون، آن را از مدل چوبی جدا کرده و قالب آماده شده است. شکل‌های ۲ و ۳، مراحل ساخت را نشان می‌دهند.



شکل ۲- ریخته‌گری سیلیکون در مدل چوبی

نشان می‌دهد. جرم نمونه شماره ۱، برابر $1/071$ کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۶- اعمال کشش اولیه به الیاف در قالب و آغشته سازی الیاف با رزین



شکل ۴- اتصال پارچه آغشته به رزین رویه بالایی بر روی هسته (در حالت ژله‌ای)



شکل ۷- نمونه شماره ۲ نهایی (پس از برش زوائد اضافی)



شکل ۵- نمونه شماره ۱ ساخته شده پس از برش زوائد اضافی

ساخت نمونه سوم

نمونه سوم، دقیقاً دارای ابعاد و فرآیند ساخت نمونه دوم بوده، با این تفاوت که جنس رویه‌ها از پارچه کربن حصیری می‌باشد. شکل ۸ این نمونه را نشان می‌دهند. جرم قطعه شماره ۳، برابر $0/756$ کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۸- نمونه شماره ۳ با رویه‌های الیاف کربن (پس از برش زوائد اضافی)

ساخت نمونه دوم

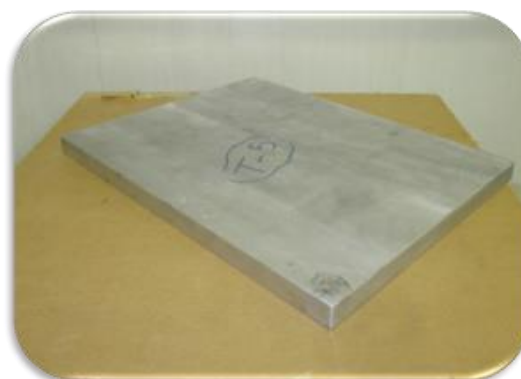
این نمونه دارای ابعاد $(300 \times 200 \times 14)$ میلیمتر مکعب و مراحل ساخت آن، مشابه نمونه اول می‌باشد. با این تفاوت که ضخامت رویه‌های بالا و پایین آن، هر کدام ۲ میلی‌متر می‌باشند و برای ساخت هسته، از ایجاد پیش کشش اولیه (۱) کیلوگرم نیرو) در الیاف استفاده شده است. شکل ۶، ساخت هسته با اعمال پیش تنش اولیه به صورت دستی و شکل ۷، نمونه آماده شده را نشان می‌دهد. جرم قطعه شماره ۲ برابر $0/745$ کیلوگرم می‌باشد.

ساخت نمونه‌های آلومینیومی

ابعاد نمونه چهارم، مشابه نمونه‌های دوم و سوم است. جنس رویه‌ها و هسته، آلومینیوم ۱۰۵۰ می‌باشد. در این نمونه، هسته مشبک نمونه ساندویچی آلومینیومی، ابتدا با فرآیند برش سیم ساخته شده است. سپس دو رویه آلومینیومی، گروه ۱۰۵۰ (مشابه جنس هسته) از بالا و پایین، با چسب اپوکسی به هسته چسبانده شده و بعد از قراردادن زیر پرس، در دمای محیط خشک و آماده شده است. شکل ۹، نمونه آلومینیومی ساندویچی با هسته مشبک را نشان می‌دهد. صفحه یکپارچه آلومینیومی از گروه ۱۰۵۰، از بلوک ماده خام با فرز عمودی، اندازه و آماده شده است. شکل ۱۰، نمونه شماره ۵ را نشان می‌دهد. جرم نمونه شماره ۴، برابر $1/37$ کیلوگرم و جرم نمونه شماره ۵، برابر $2/572$ کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۹- نمونه شماره ۴ سازه ساندویچی با هسته مشبک- آلومینیومی و رویه‌های آلومینیومی



شکل ۱۰- نمونه شماره ۵ (صفحه یکپارچه آلومینیومی)

چیدمان تست خمش سه نقطه‌ای

در مرور پیشینه تحقیق، این نتیجه حاصل شد که ریب‌های سازه‌های مشبک، تمایل به خمش دارند و این مورد، سبب واماندگی آنها می‌شود [۱]. در بیشتر تحقیقات، از آزمایش خمش استفاده شده است. در این تحقیق، نمونه‌های ساخته شده، تحت بارگذاری شبه استاتیک عرضی از نوع خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند و با شرایط برابر، برای هر پنج نمونه، به بررسی و مقایسه رفتار آنها پرداخته شده است. تنظیمات پیش فرض برای تست نمونه‌ها به صورت پیش‌بار اولیه ۵ نیوتن، سرعت اعمال جابجایی عمودی رو به پایین ۲ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله تکیه‌گاهی پایه‌های زیرین ۲۵۰ میلی‌متر و همچنین حداکثر جابجایی اهرم اعمال بار دستگاه، ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. همه نمونه‌ها با دستگاه Zwick /Materials Testing Z50 تست شده‌اند. حداکثر نیروی دستگاه ۵۰ کیلونیوتن، ارتفاع کارگیر ۱ متر و طول کارگیر ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، همه نمونه به این ترتیب، تحت تست خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند.



شکل ۱۱- قرار گیری نمونه اول بر روی تکیه‌گاه‌های خمش سه نقطه‌ای و بارگذاری در مرکز نمونه

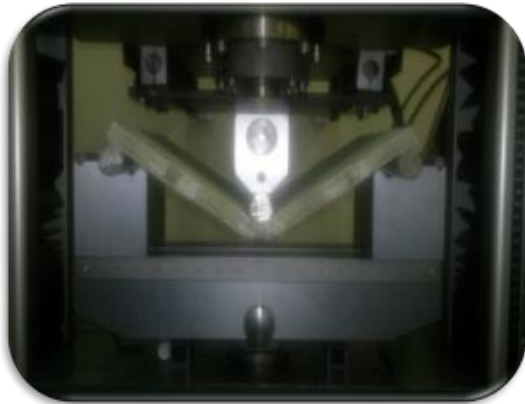
نتایج تست خمش سه نقطه‌ای

نتایج تست خمش سه نقطه‌ای برای قطعه شماره ۱

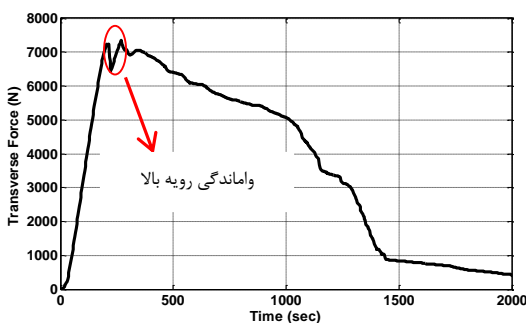
شکل ۱۲، نمونه شماره ۱ را پس از شکست در پایان تست خمش سه نقطه‌ای و شکل ۱۳، نتایج نهایی بار بر حسب زمان تست برای آن را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۱، بیشترین باری که تحمل کرده، برابر $16773/1$ نیوتن و در ثانیه ۲۵۷ (جابجایی عمودی

نتایج تست خمش سه نقطه‌ای برای قطعه شماره ۲

شکل ۱۴، نمونه شماره ۲ را پس از شکست، در پایان تست خمش سه نقطه‌ای و شکل ۱۵، نتایج نهایی بار بر حسب زمان تست را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- شکست کامل نمونه شماره ۲ در لحظه پایان تست همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۲، بیشترین باری که تحمل کرده، برابر $7356/1$ نیوتن و در ثانیه ۲۶۹ (جابجایی عمودی در این لحظه ۹ میلی‌متر) بوده است. در این نمونه، برخلاف نمونه اول، پس از اولین شکست، بار تحمل شده توسط سازه، بطور تدریجی کاهش یافت و شکست ترد و ناگهانی اتفاق نیفتاد. ابتدا رویه بالا و سپس هسته و بعد از آن، رویه پایین دچار واماندگی شدند. نمونه تا ثانیه ۲۰۹۹ (انتهای تست) تا جابجایی ۷۰ میلی‌متر، به تحمل بار، ادامه داد. هیچگونه تورقی در بین لایه‌ها و جدایش بین رویه‌ها و هسته، مشاهده نشد. در این نمونه، نکته قابل توجه، نحوه ترک برداشتن رویه زیرین بود. به این ترتیب که ابتدا ترک در رویه پایین، از محل تقاطع ریب‌ها شروع شد (جوانه‌زنی ترک) و به صورت تدریجی، به فضای بین ریب‌ها تسری پیدا کرد. شکل ۱۶، نحوه شکست قطعه را نشان می‌دهد.



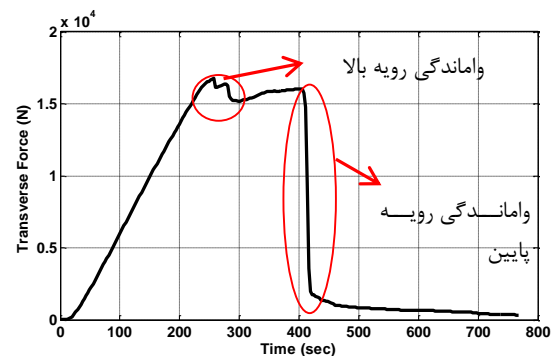
شکل ۱۵- منحنی بار- زمان برای نمونه شماره ۲

در این لحظه $8/5$ میلی‌متر) بوده است. در این لحظه (ثانیه ۲۵۷)، رویه بالایی بعلت چروکیدگی، دچار واماندگی شده و بار تحمل شده توسط آن، کاهش پیدا کرد و سپس کمی افزایش یافت. بعد از ۱۴۷ ثانیه، رویه پایینی در ثانیه ۴۰۴ و جابجایی عمودی $13/5$ میلی‌متر دچار واماندگی گردید. نتایج، حاکی از آن است که بیشتر بار خمشی، توسط رویه‌ها، تحمل شده است. زیرا بعد از شکست رویه‌ها تا انتهای تست، افت شدیدی (کاهش حدود $88/$) در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده شده است. به طوری که نیروی قابل تحمل در لحظه شکست رویه‌ها، به حدود ۱۰۰۰ نیوتن تنزل کرده و در مدت حدود ۲۰۰ ثانیه، این نیرو به حدود صفر رسیده است.

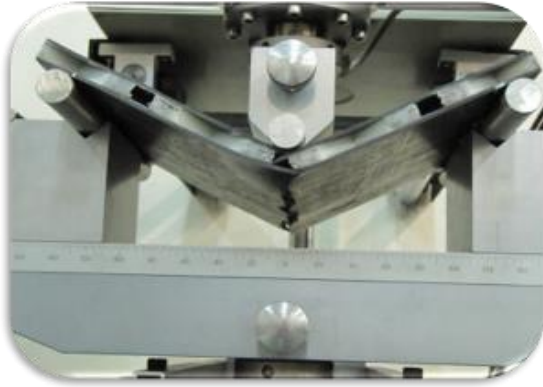
در این مدت، بار برشی توسط هسته تحمل شده است. بعد از ۷۶۷ ثانیه از شروع تست، با رسیدن به جابجایی عمودی ۲۵ میلی‌متر، قطعه دچار شکست کامل گردیده و بارگذاری متوقف شده است. نکته قابل توجه، اینکه هیچگونه تورق^{۱۵} در رویه‌ها و جدایش^{۱۶} مابین رویه‌ها و هسته، مشاهده نشد.



شکل ۱۶- شکست کامل نمونه شماره ۱ در لحظه پایان تست



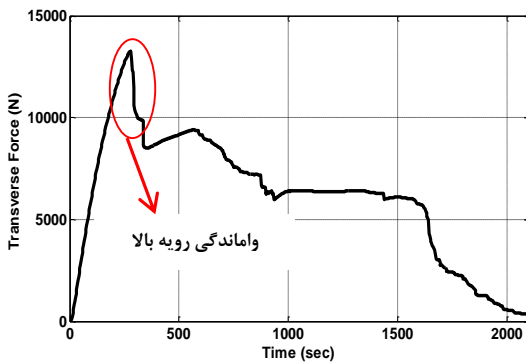
شکل ۱۷- منحنی بار- زمان برای نمونه شماره ۱



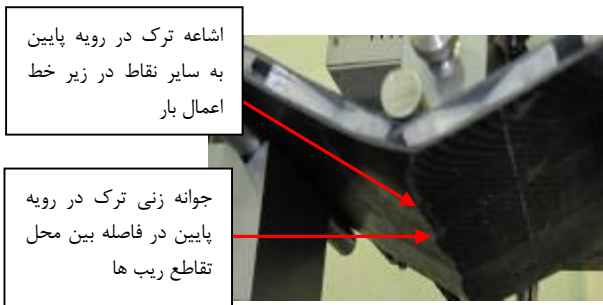
شکل ۱۷- شکست رویه‌های بالا و پایین نمونه و ادامه تحمل بار توسط هسته مشبک شماره ۳



شکل ۱۶- جوانه زنی و اشاعه ترک در رویه زیرین نمونه شماره ۲



شکل ۱۸- منحنی بار- زمان برای نمونه شماره ۳



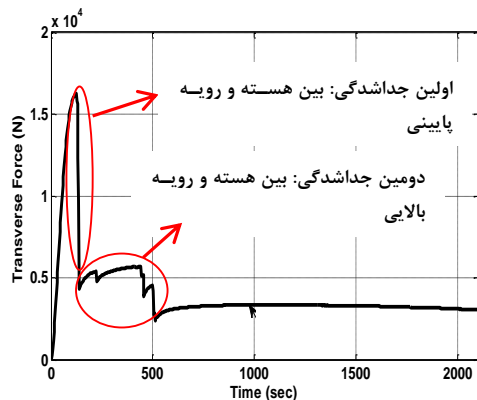
شکل ۱۹- اشاعه ترک در رویه زیرین نمونه شماره ۳

نتایج تست خمش سه نقطه ای برای قطعه شماره ۴

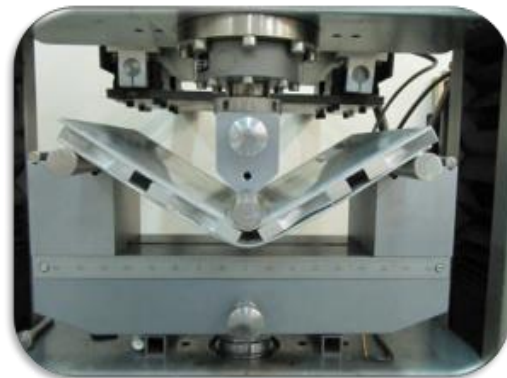
شکل ۲۰، نمونه شماره ۴ را پس از شکست در پایان تست خمش سه نقطه ای و شکل ۲۱، نمودار نتایج نیرو بر حسب زمان اعمال بار را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۴، بیشترین باری که تحمل کرده، برابر $16270/4$ نیوتن و در ثانیه ۱۲۴ (جابجایی عمودی در این لحظه $4/16$ میلی‌متر) بوده است.

نتایج تست خمش سه نقطه‌ای برای قطعه شماره ۳

شکل ۱۷، نمونه شماره ۳ را پس از شکست در پایان تست خمش سه نقطه و شکل ۱۸، نمودار نتایج نیرو بر حسب زمان اعمال بار را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۱۸ نشان می‌دهد، نمونه سوم، بیشترین باری که تحمل کرده، برابر $13268/1$ نیوتن در ثانیه ۲۸۰ (جابجایی عمودی در این لحظه $9/26$ میلی‌متر) بوده است. در نمونه شماره ۳، ابتدا بار توسط کل سازه، تا بالاترین حد ($13268/1$ نیوتن) تحمل شد. سپس ترک‌هایی در رویه بالا در محل اعمال بار، به تدریج ایجاد گردید. و بعد از گذشت مدت زمان ۹۴۰ ثانیه از شروع تست و جابجایی ۳۰ میلی‌متر، ترک در رویه زیرین نیز ایجاد شد. مابقی بار، تا لحظه ۲۱۰۰ ثانیه در جابجایی ۷۰ میلی‌متر، توسط هسته مشبک تحمل گردید. در این نمونه نیز هیچ علامتی از تورق ما بین لایه‌ها در رویه‌های دو طرف هسته و همچنین جدایی بین رویه‌ها و هسته، مشاهده نشد. نکته قابل توجه اینکه در این نمونه، بر خلاف نمونه شماره ۲، ترک‌های لایه زیرین، در فاصله بین محل تقاطع ریب‌ها شروع و سپس به صورت تدریجی به فضای بین ریب‌ها منتشر شد. شکل ۱۹، نحوه شکست قطعه را نشان می‌دهد.



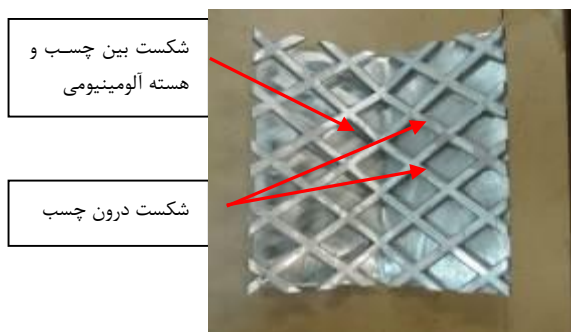
شکل ۲۱ - منحنی بار- زمان برای نمونه شماره ۴



شکل ۲۰ - واماندگی نمونه شماره ۴ در لحظه پایان تست



شکل ۲۲ - جدایش هسته از رویه‌ها پس از باربرداری (پایان تست نمونه شماره ۴)



شکل ۲۳ - مودهای شکست چسب بین هسته و رویه‌ها (نمونه شماره ۴)

در این نمونه آلومینیومی، بر خلاف سه نمونه کامپوزیتی قبل، پس از رسیدن نیرو به مقدار حداکثر ۱۶۲۷۰/۴ نیوتن، پس از ۱۲۴ ثانیه از شروع تست (در جابجایی عمودی ۴/۱۶ میلی‌متر)، در اثر برش بین رویه‌ها و هسته، اتصال چسبی بین آنها دچار شکست شده است. بنابراین نیروی قابل تحمل کل صفحه ساندویچی، به حدود یک چهارم کاهش یافته است. از این لحظه به بعد، تا جابجایی ۱۷ میلی‌متر، در اثر ادامه شکست اتصال چسبی بین رویه‌ها و هسته، افت و خیزهایی در نمودار بار- جابجایی رخ داده است و از آن به بعد تا انتهای تست، قطعه تقریباً یک بار ثابت را تحمل نموده است. جدایش رویه پایین از هسته، پس از ۶۸۲ ثانیه از شروع تست، در جابجایی ۲۲ میلی‌متر به صورت چشمی مشاهده شد. سپس، رویه بالایی در اواخر تست، شروع به جدایش از هسته نمود، (شکل ۲۲). دلیل این اختلاف، رفتار منحنی بار-جابجایی نمونه شماره ۴، با نمونه‌های کامپوزیتی شماره ۱ تا ۳، بخاطر رفتار تنش-کرنش ماده نرم این نمونه (فلز آلومینیوم)، طبیعی است. در ابتدای تست، صداهایی به گوش می‌رسید که تصور می‌شد که ریب‌ها در حال شکست هستند. اما بعد از اتمام عملیات و بازبینی نمونه، مشاهده شد که هیچ گونه ترکی در ریب‌ها اتفاق نیفتاده و صداهای شنیده شده، مربوط به شکست اتصال چسبی بین رویه‌ها و هسته بوده است (شکل ۲۳).

نتایج تست خمش سه نقطه‌ای برای قطعه شماره ۵

شکل ۲۴، نمونه شماره ۵ را پس از شکست در پایان تست خمش سه نقطه‌ای و شکل ۲۵، نمودار نتایج بار-زمان اعمال بار را نشان می‌دهد.

نمونه‌های آلومینیومی (نمونه‌های شماره ۴ و ۵) رفتار کاملاً متفاوت با نمونه‌های کامپوزیتی (نمونه‌های شماره ۱ تا ۳) دارند، بطوری که منحنی‌های مربوط به کامپوزیت‌ها در مراحل آخر بارگذاری، همگی به سمت صفر میل می‌کنند، اما منحنی‌های مربوط به نمونه‌های آلومینیومی اینطور نیستند و قطعه در پایان تست، هنوز ظرفیت تحمل بار دارد.

تست مودال

تست مودال تجربی

آزمون مودال به منظور اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی سازه تعریف شده است. بر این اساس، فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی مربوطه، بدست می‌آیند. این آزمایش، در واقع یک فرآیند شناسایی دینامیک سیستم می‌باشد. نمونه‌های مورد آزمایش، با استفاده از یک کش منعطف که وزن آن در مقایسه با وزن صفحه قابل چشم پوشی است، از یک گوشه آویزان شده‌اند. شرایط مرزی در تمامی لبه‌ها، آزاد است. برای این تست تجربی، دو روش وجود دارد. ابتدا تحریک ورودی در یک نقطه اعمال می‌شود و پاسخ در نقاط مختلف از طریق شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. در روش دوم تحریک ورودی در چندین نقطه اعمال می‌شود و پاسخ در یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود. در این تست، از روش اول استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات تجهیزات در آزمایش تست مودال تجربی ارائه شده است (آزمایشگاه تست مودال دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی).

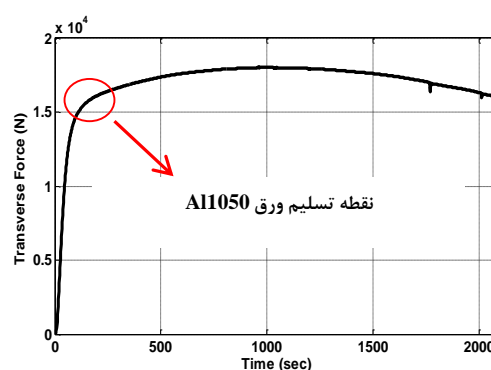
جدول ۳- مشخصات تجهیزات آزمایش تست مودال تجربی

مشخصه آزمایش	ملاحظات
نوع شتاب سنج	PCB-(sensitivity:100mv.g)
نوع لرزاننده	B&K
سیگنال تحریک	تصادفی- در محدوده صفر تا ۸۰۰ هرتز
فرکانس نمونه برداری	۲۵۶۰ هرتز
سیگنال آنالایزر	B&k
نرم افزار داده برداری	Pulse
نرم افزار تحلیل	ME Scope

به منظور تعیین نقاط نصب شتاب‌سنج‌ها، بر روی نمونه‌ی ساخته شده، برای اندازه‌گیری خروجی، سطح بالایی یا پایینی مدل در ۱۶ نقطه، با فاصله مساوی از یکدیگر، واقع در تمام



شکل ۲۴- نمونه شماره ۵ در لحظات آخر تست بارگذاری



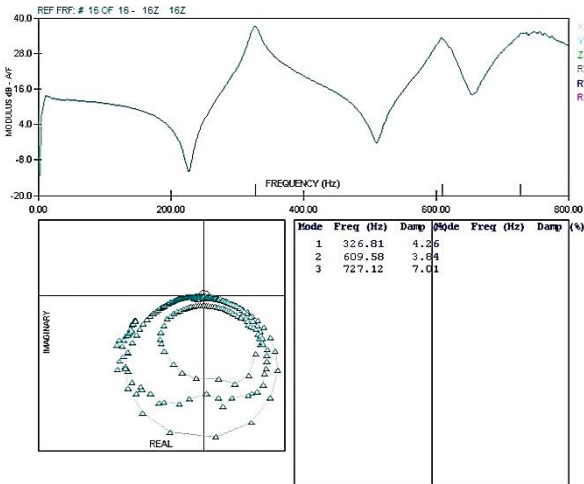
شکل ۲۵- منحنی بار-زمان برای نمونه شماره ۵

همانطور که از شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، نمونه پنجم، بیشترین باری که تحمل کرده، برابر ۱۸۰۰۶ نیوتن و در ثانیه ۱۰۰۰ (جابجایی عمودی در این لحظه ۳۳ میلی‌متر) بوده است. در نمونه شماره ۵، شکست ناگهانی یا ترک مشهودی رخ نداده است تا دستگاه قادر به ثبت آن باشد. نمودار نیرو-زمان نمونه پنجم، مانند نمونه‌های دیگر، دچار افت ناگهانی نشده است. رفتار منحنی بار-زمان نمونه شماره ۵، پس از گذر از ناحیه الاستیک و ورود به ناحیه پلاستیک، ابتدا با افزایش و سپس با کاهش بار مواجه شده است. نمونه، تا جابجایی ۷۰ میلی‌متر، بدون شکست، مقاومت کرده، نهایتاً بارگذاری در ثانیه ۲۰۹۹ متوقف شد.

مقایسه پارامتر استحکام به وزن به صورت نمودارهای

ستونی

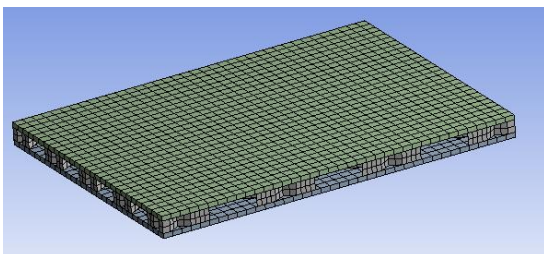
شکل ۲۶، بار عرضی تحمل شده توسط پانل‌ها را بر حسب جابجایی مرکزی در جهت عمودی را برای پنج نمونه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در این شکل نیز



شکل ۲۷- فرکانس‌های طبیعی استخراج شده، ضرایب میرایی و پاسخ فرکانسی نمونه شماره ۱ با استفاده از نرم‌افزار آزمایش مودال

آنالیز مودال عددی

مدل هندسی سازه مشبک، در نرم‌افزار عددی تجاری آباکوس، مدل‌سازی گردید. خواص مواد، مطابق جدول ۲ و از نوع الاستیک خطی می‌باشند. تعداد المان استفاده شده برای مدل هسته و رویه‌ها، به ترتیب برابر ۱۵۷۲ و ۲۲۰۴ می‌باشند. المان‌های استفاده شده برای هسته و رویه‌ها، المان ۸ وجهی C3D8R می‌باشد. شکل ۲۸، مدل هندسی و مش‌بندی شده در المان محدود برای سازه مشبک و نمونه آلومینیوم ۱۰۵۰ را نشان می‌دهد. تماس بین رویه‌ها و هسته از نوع قید گره^{۱۹} می‌باشد.

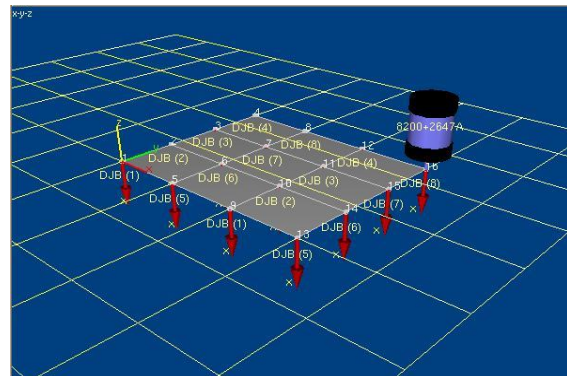


شکل ۲۸- مدل المان محدود نمونه‌های تقویت شده

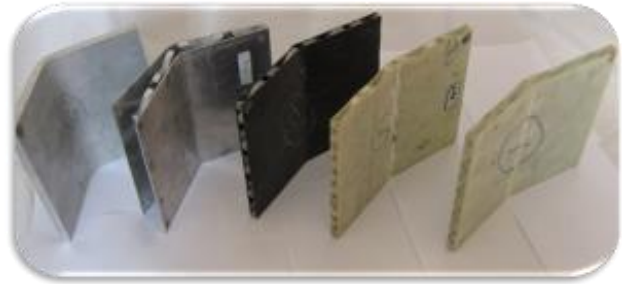
نتایج و بحث

در شکل ۲۹، هر پنج نمونه، پس از انجام تست، جهت مقایسه تغییر شکل‌های صورت گرفته، به صورت یکجا در کنار هم آورده شده‌اند.

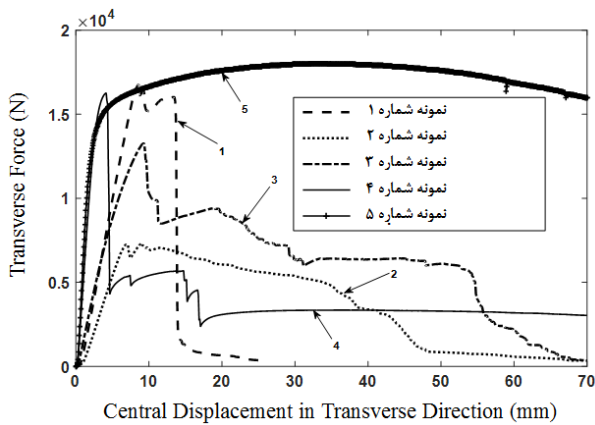
صفحه به صورت شبکه‌ای مطابق شکل ۲۶ علامت‌گذاری شده‌اند. پاسخ شتاب‌های خروجی که در این نقاط اندازه‌گیری شده، وارد یک تقویت کننده سینگال شده و آنالیز شده است. تحریک نمونه‌ها با استفاده از لرزش‌گر^{۱۷} سینوسی نصب شده در یک گوشه صفحه، مطابق شکل ۲۶ انجام پذیرفت. این شکل شماتیک مدل تست را در محیط نرم‌افزار آیکتس^{۱۸} نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان نیروی تحریک (ورودی)، از یک نیروسنج استفاده شده است. تحریک، در بازه فرکانسی صفر تا ۸۰۰ هرتز صورت پذیرفته است. داده‌های خروجی اندازه‌گیری شده توسط شتابسنج، با روش تنظیم یک ورودی و چند خروجی، در یک رایانه صنعتی جمع‌آوری شده و پس از پردازش و جمع‌بندی پاسخ‌های شتاب، با استفاده از نرم‌افزار آیکتس، نمودار پاسخ فرکانسی برای نقاط شبکه، رسم شده است. بر این اساس، شکل مدهای ارتعاشی مربوطه به هر فرکانس، اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار مربوطه، رسم شده‌اند. فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و نمودار پاسخ فرکانسی متناسب با آنها، برای اولین نمونه، در شکل ۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲۶- چیدمان نقاط نصب شتابسنج‌ها و لرزش‌گر روی مدل در محیط نرم‌افزار آزمایش مودال



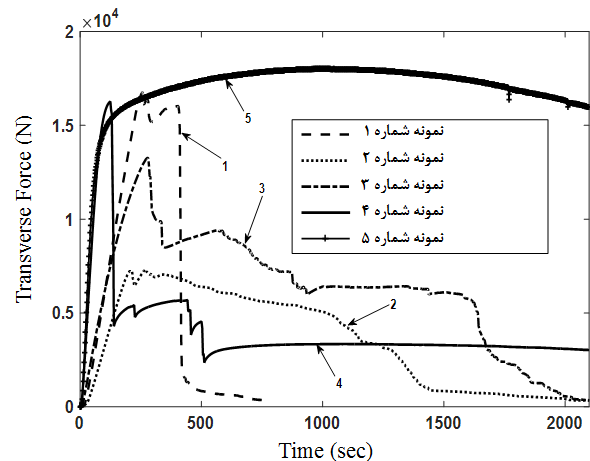
شکل ۲۹- تغییر شکل دائمی و شکست پنج نمونه پس از انجام تست خمش سه نقطه‌ای



شکل ۳۱- منحنی‌های بار-جابجایی برای پنج نمونه مورد آزمایش خمش سه نقطه‌ای

مقایسه نمودار بار-زمان نمونه‌های تست شده

نتایج بار-زمان و بار-جابجایی (بار عمودی تحمل شده توسط صفحات) که از تست نمونه‌ها به دست آمده است، در نرم افزار متلب ۲۰ رسم شده و به ترتیب، در شکل‌های ۳۰ و ۳۱، با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل ۳۰ مشخص است، در بین نمونه‌های کامپوزیتی، از نقطه نظر بیشترین بار تحمل شده در اولین نقطه واماندگی، نمونه با رویه‌های ۴ میلی‌متری الیاف شیشه (نمونه شماره ۱) تحمل بالاتری را از خود نشان داده است. بعد از آن، نمونه با رویه‌های ۲ میلی‌متری کربنی (نمونه شماره ۳) قوی‌تر بوده است. نهایتاً، نمونه با رویه‌های ۲ میلی-متری الیاف شیشه (نمونه شماره ۲) در رده آخر قرار گرفته است. یکی دیگر از مشاهدات مهم در نمونه‌های آزمایشی کامپوزیتی، این است که هیچ‌گونه جدایشی بین رویه‌ها و هسته رخ نداد. این نشان از اتصال چسبی کامل بین هسته و رویه‌های نمونه‌های سازه مشبک کامپوزیتی می‌باشد.



شکل ۳۰- منحنی‌های بار-زمان برای پنج نمونه مورد آزمایش خمش سه نقطه‌ای

مطابق شکل‌های ۳۰ و ۳۱، همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های آلومینیومی شماره ۴ و ۵ در مرحله نهایی آزمایش (۷۰ میلی‌متر جابجایی و ثانیه ۲۰۹۹)، رفتار کاملاً متفاوتی با نمونه‌های کامپوزیتی شماره ۱، ۲ و ۳ دارند. به طوری که منحنی‌های مربوط به کامپوزیت‌ها، در مراحل آخر بارگذاری، همگی به سمت صفر میل می‌کنند. اما منحنی‌های مربوط به نمونه‌های آلومینیومی، اینطور نیستند و قطعه در پایان تست، هنوز ظرفیت تحمل بار دارد. این ظرفیت، برای نمونه ۴ در حدود ۱۸٪ و برای نمونه شماره ۵ در حدود ۹۰٪ می‌باشد. در حقیقت، این موضوع به دلیل شکل‌پذیری آلومینیوم ۱۰۵۰ مقایسه با رفتار شکننده کامپوزیت‌های تقویت شده می‌باشد. منحنی‌های مربوط به نمونه‌های آلومینیومی شماره ۴ و ۵، در حالت خطی، دارای شیب تقریباً یکسان هستند و این مشاهده، اتصال چسبی کامل بین هسته و رویه‌های نمونه سازه مشبک ساندویچی آلومینیومی (نمونه شماره ۴) را تا نزدیک نقطه تسلیم آلومینیوم، نشان می‌دهد. به طوری که تا قبل از رسیدن به اولین واماندگی، رفتاری مشابه با صفحه آلومینیومی یکپارچه را نشان داده است. اما، هنگام ورود به منطقه پلاستیک، پس از نقطه تسلیم آلومینیوم ۱۰۵۰، کرنش‌های پلاستیک نرمال صفحه‌ای در رویه زیرین صفحه ایجاد شده است. این باعث تغییر شکل بزرگ رویه پایین شده و بر این اساس، تنش برشی بیشتری در محل اتصال هسته به رویه زیرین ایجاد شده است. بنابراین، از اولین نقطه واماندگی در جابجایی ۴،۱۶ میلی‌متر برای نمونه شماره ۴، اتصال چسبی بین هسته و رویه، به دلیل تنش برشی ذکر شده، از بین رفته و کاهش ناگهانی بار تحمل

حداکثر جابجایی ($J/kg/mm$) محاسبه و ذکر شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۵، بیشترین بار و نمونه شماره ۲، کمترین بار را تحمل نموده است. در طراحی مهندسی، بخصوص سازه‌های هوایی، معیار وزن، یکی از پارامترهای مهم می‌باشد. همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۵ در مقایسه با سایر نمونه‌ها، نسبت تحمل بار به وزن کمتری دارد. همچنین، این جدول نشان می‌دهد که از نظر پارامتر استحکام به وزن، سازه ساندویچی مشبک کامپوزیتی با رویه‌های کربن (نمونه شماره ۳) از همه نمونه‌ها نسبت استحکام به وزن بالاتری دارد، و بعد از آن نمونه‌های ۱، ۴، ۲ و ۵، به ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

شده، اتفاق افتاده، جدا شدن هسته از رویه ادامه می‌یابد. افزایش و کاهش رفتار نمودار بار-جابجایی، تا ۲۲ میلی‌متر ادامه یافته و در شکل ۳۱ نشان داده شده است. در جدول ۴، مقادیر جرم، حداکثر بار تحمل شده، زمان رویداد حداکثر بار تحمل شده و ماکزیمم جابجایی عمودی در حداکثر بار تحمل شده، برای پنج نمونه مورد آزمایش، نشان داده شده است. همچنین در جدول ۴، خواص مکانیکی نمونه‌های آزمایش، شامل حداکثر نسبت بار به وزن (N/N)، نسبت حداکثر بار به وزن به جابجایی ($N/N/mm$)، کل انرژی جذب شده (J)، کل انرژی جذب شده ویژه (J/kg)، انرژی جذب شده تا اولین نقطه شکست (J)، انرژی جذب شده ویژه تا اولین نقطه شکست (J/kg) و انرژی جذب شده ویژه تا اولین نقطه شکست به

جدول ۴- مقایسه کمی بین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آزمایش

شماره پارامتر	نام پارامتر	واحد	شماره نمونه‌ها				
			۱	۲	۳	۴	۵
۱	جرم	kg	1.071	0.745	0.756	1.37	2.572
۲	ماکزیمم بار تحمل شده	N	16773.1	7356.1	13268.1	16270.4	18006
۳	زمان ماکزیمم بار تحمل شده	sec	257	269	280	124	1000
۴	جابجایی در ماکزیمم بار تحمل شده	mm	8.5	9	9.26	4.16	33
۵	نسبت ماکزیمم بار تحمل شده به وزن	N/N	1596.45	1006.52	1789.03	1210.62	713.64
۶	نسبت ماکزیمم بار تحمل شده به وزن به ماکزیمم جابجایی	N/N/mm	187.82	111.84	193.20	291.01	21.63
۷	کل انرژی جذب شده	J	162.79	239.15	423.36	287.7	1183.12
۸	کل انرژی جذب شده ویژه	J/kg	152	321	560	210	460
۹	انرژی جذب شده در اولین نقطه شکست	J	71	26	70	42.5	41
۱۰	انرژی جذب شده ویژه در اولین نقطه شکست	J/kg	66.29	34.90	92.59	31.02	15.94
۱۱	نسبت انرژی جذب شده ویژه در اولین نقطه شکست به ماکزیمم جابجایی	J/kg/mm	7.80	3.88	10.00	7.46	0.48

می‌باشد. در ردیف ۶، جابجایی نمونه شماره ۴ در اولین نقطه خرابی، کوچکترین مقدار بین همه نمونه‌ها است. به طور کلی، در طول آزمایش خمش سه نقطه‌ای یک صفحه ساندویچی، تنش نرمال صفحه‌ای در رویه‌ها و هسته بوجود می‌آید. همچنین بخش عمده‌ای از انرژی کشسانی جذب شده توسط صفحه ساندویچی، به دلیل تنش‌های نرمال در رویه‌ها است [۱۸]. از آنجا که شیب نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه شماره ۴، بیشتر از نمونه شماره ۳ است، پس سفتی نرمال رویه آلومینیومی ۱۰۵۰ نمونه شماره ۴، بیشتر از

در مقایسه بار تحمل شده به وزن، بین نمونه‌های شماره ۳ و ۱، مشاهده می‌شود که نمونه شماره ۳ با رویه‌های الیاف کربن با ضخامت ۲ میلی‌متر، بهتر از نمونه شماره ۱ با رویه الیاف شیشه با ضخامت ۴ میلی‌متر بوده است. این بخاطر استحکام ویژه و سفتی ویژه بیشتر رویه با الیاف کربن نسبت به رویه با الیاف شیشه می‌باشد. نمونه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ دارای ابعاد یکسانی هستند. مطابق ردیف‌های شماره ۵ تا ۱۱ جدول ۴، (به جز ردیف شماره ۶ که نسبت حداکثر بار به وزن به حداکثر جابجایی است)، نمونه شماره ۳ دارای بهترین خواص مکانیکی

رویه‌های کربنی نمونه شماره ۳ است. همچنین، سفتی برشی هسته آلومینیومی ۱۰۵۰، در نمونه شماره ۴، حدوداً ۲۲ برابر، بزرگتر از هسته شیشه‌ای در نمونه شماره ۳ است. بر این اساس، کوچکترین جابجایی در اولین نقطه خرابی، مربوط به نمونه شماره ۴ است.

تست مودال

جدول ۵، فرکانس‌های طبیعی (به دست آمده از دو روش تجربی و عددی) و نسبت‌های میرایی (به دست آمده از روش تجربی) را برای هر پنج نمونه تست شده، نشان می‌دهد. با توجه به این که بازه اندازه‌گیری تست مودال تجربی، صفر تا ۸۰۰ هرتز بوده، فرکانس‌های فراتر از این حد، با " $800 >$ " در این جدول نشان داده شده‌اند. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، در مقایسه بین نمونه‌های شماره ۱ و ۲، با افزایش ضخامت رویه‌ها، فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. در واقع جرم و سفتی نمونه شماره ۱ نسبت به نمونه شماره ۲ بیشتر است. لیکن با توجه به رابطه فرکانس طبیعی که در آن پارامتر سفتی در صورت کسر و جرم در مخرج است، اثر افزایش سفتی نسبت به جرم، در حد قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. مقایسه بین نمونه شماره ۳ (با رویه‌های کربنی) و نمونه شماره ۲ (با رویه‌های شیشه‌ای)، نشان می‌دهد که نسبت میرایی کربن/اپوکسی کمتر از شیشه/اپوکسی است. همچنین، فرکانس‌های طبیعی نمونه شماره ۳ بیشتر از نمونه‌های نمونه شماره ۲ است. دلیل این امر مربوط به تفاوت ریزساختار الیاف کربن و الیاف شیشه می‌باشد. همچنین، سفتی پارچه بافته شده از جنس کربن بیشتر از پارچه‌های بافته شده از جنس شیشه است. در واقع با وجود جرم تقریباً یکسان دو نمونه شماره ۲ و ۳، سفتی نمونه شماره ۳ به دلیل استفاده از جنس کربن، افزایش یافته است. با توجه به رابطه فرکانس طبیعی که در آن پارامتر سفتی در صورت کسر و جرم در مخرج است، افزایش فرکانس نمونه شماره ۳ نسبت به نمونه شماره ۲، توجیه می‌شود.

در مورد فرکانس طبیعی دوم، مقایسه بین نمونه‌های شماره ۳ و ۱، نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی نمونه شماره ۳ (رویه‌های کربنی با ضخامت ۲ میلی‌متر)، بیشتر از فرکانس

طبیعی نمونه شماره ۱ است (رویه‌های شیشه‌ای به ضخامت ۴ میلی‌متر). اما نسبت میرایی نمونه شماره ۳، کمتر از نسبت میرایی نمونه شماره ۱ است. به همین خاطر، تأثیر سفتی رویه‌های کربنی با پارچه بافته شده در افزایش فرکانس‌ها در مقایسه با تأثیر ضخامت رویه شیشه‌ای با پارچه بافته شده، غالب است. در بین نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده، کوچکترین نسبت میرایی مربوط به نمونه شماره ۳ می‌باشد که از رویه‌های کربنی ساخته شده است. همچنین، به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت رویه‌ها، به طور کلی نسبت میرایی افزایش می‌یابد.

در مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی اول نمونه‌های شماره ۴ و ۵، انتظار می‌رود که فرکانس طبیعی نمونه شماره ۴، بیشتر از نمونه شماره ۵ باشد. اما به دلایلی مانند نقص در اتصال چسبی بین هسته و رویه‌ها در حین ساخت، فرکانس طبیعی کاهش یافته است. در حالی که، برای شماره موده‌های بالاتر، فرکانس‌های طبیعی نمونه شماره ۴ بزرگتر از نمونه شماره ۵ هستند. نسبت میرایی صفحه آلومینیومی یکپارچه (نمونه شماره ۵) بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه آلومینیومی تقویت شده (نمونه شماره ۴) می‌باشد. در حالی که ابعاد بیرونی آنها یکسان است. به طور کلی نسبت میرایی نمونه‌های آلومینیومی نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده (نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳) کمتر است.

مطابق جدول ۵، مقایسه بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که حداکثر درصد خطا ۱۹٫۸۲ است که در اولین فرکانس طبیعی، برای نمونه شماره ۳ با رویه کربنی با ضخامت ۲ میلی‌متر رخ داده است. حداقل درصد خطا ۰٫۰۵ است که در سومین فرکانس طبیعی، برای نمونه شماره ۱ با رویه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر رخ داده است. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش شماره مود، درصد خطا برای همه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۵، نتایج عددی و تجربی با هم تطابق خوبی دارند.

جدول ۵- مقایسه بین فرکانسهای طبیعی و ضرایب میرایی بدست آمده از روش تجربی (با استفاده از آیکتس) و روش عددی برای پنج نمونه

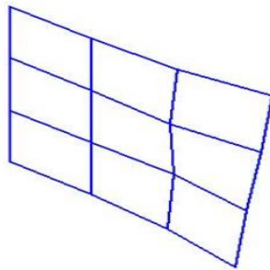
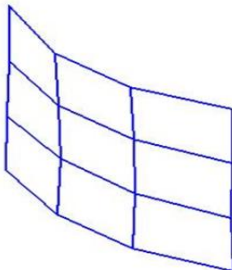
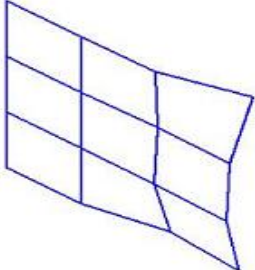
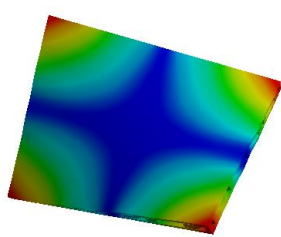
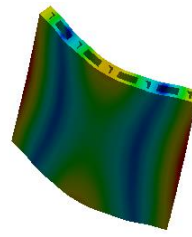
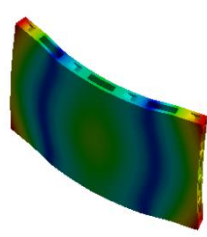
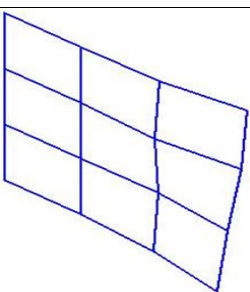
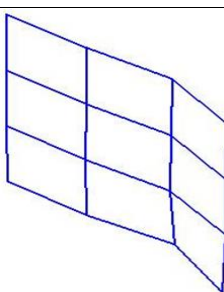
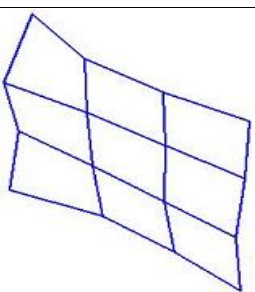
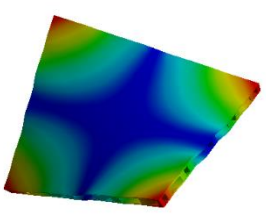
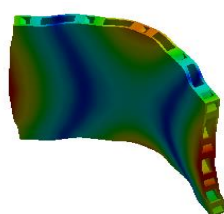
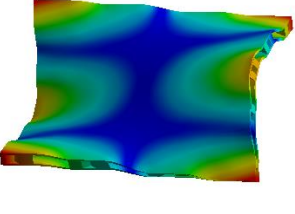
شماره نمونه	روش	اولین فرکانس طبیعی (Hz)	دومین فرکانس طبیعی (Hz)	سومین فرکانس طبیعی (Hz)	اولین ضریب	دومین ضریب	سومین ضریب
۱	تجربی	۳۲۶,۸۱	۶۰۹,۵۸	۷۲۷,۱۲	۰,۰۴۲۶	۰,۰۳۸۴	۰,۰۷
	عددی	۳۸۴,۹۹	۵۸۴,۰۶	۷۲۶,۷۸	-----	-----	-----
	درصد خطا	۱۸,۸	۴,۱۸	۰,۰۵	-----	-----	-----
۲	تجربی	۲۶۷,۲۶	۴۹۵,۴۹	۶۲۴,۷۵	۰,۰۴۰۷	۰,۰۳۱	۰,۰۴۰۸
	عددی	۳۱۵,۴۴	۴۹۴,۸۳	۷۲۶,۳۷	-----	-----	-----
	درصد خطا	۱۸,۰۳	۰,۱۳	۱۶,۲۷	-----	-----	-----
۳	تجربی	۲۹۴,۶	۷۱۴,۱۸	>۸۰۰	۰,۰۳۵۱	۰,۰۲۱	NM*
	عددی	۳۵۲,۹۸	۶۸۹,۸۲	۷۹۷,۶۲	-----	-----	-----
	درصد خطا	۱۹,۸۲	۳,۴۱	-----	-----	-----	-----
۴	تجربی	۵۶۷,۶۷	>۸۰۰	>۸۰۰	۰,۰۲۰۲	NM	NM
	عددی	۶۵۵,۹	۹۰۷,۹۸	۱۴۴۶,۴	-----	-----	-----
	درصد خطا	۱۵,۵۴	-----	-----	-----	-----	-----
۵	تجربی	۵۷۹,۹	۷۶۹,۳۱	>۸۰۰	۰,۰۰۹	۰,۰۰۵۵	NM
	عددی	۶۳۴,۰۴	۸۰۰,۱۸	۱۴۰۴	-----	-----	-----
	درصد خطا	۹,۳۴	۴,۰۱	-----	-----	-----	-----

* : Not Measured

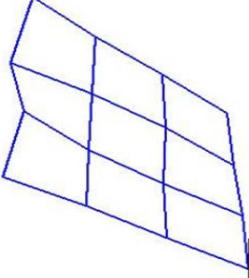
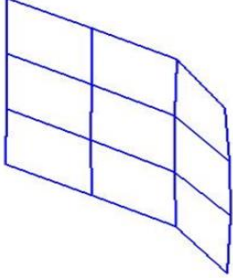
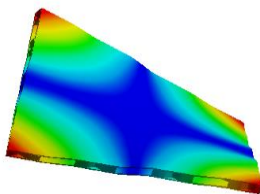
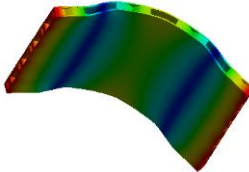
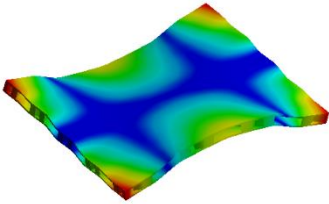
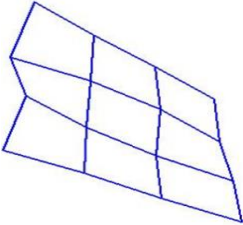
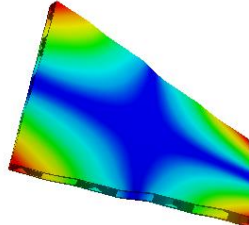
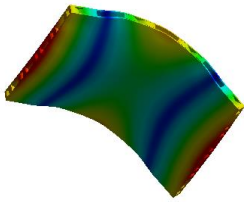
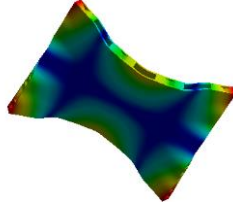
مطابق جدول ۶، شکل مودهای متناسب با فرکانس‌های طبیعی اول و دوم همه نمونه‌ها، به ترتیب با شکل پیچشی (مود اول) و خمشی (مود زینی) مطابقت دارند. اما، در مورد سومین فرکانس طبیعی، شکل مود متناسب با همه نمونه‌ها، یکسان نیست. برای نمونه‌های شماره ۱ و ۵، شکل مود، خمشی است (نوع زنگوله‌ای) و برای نمونه‌های شماره ۲، ۳ و ۴، شکل مود، پیچشی است (مود دوم). این به آن علت است که شکل مود سوم نمونه‌های شماره ۱ و ۵، مشابه هستند و سفتی کلی آنها در مقایسه با فرکانس سوم نمونه‌های شماره ۲، ۳ و ۴، بیشتر است.

مقایسه بین شکل مودهای بدست آمده با استفاده از روش‌های تجربی (با استفاده از آیکتس) و روش‌های عددی برای هر پنج نمونه در جدول ۶ نشان داده شده است. برای همه فرکانس‌های کوچکتر از ۸۰۰ هرتز، تمام شکل مودهای استخراج شده با استفاده از روش تجربی، شامل پیچشی (مود ۱ و ۲) و همچنین خمشی (نوع زینی و زنگوله‌ای)، مشابه شکل مودهایی است که با استفاده از روش عددی به دست آمده‌اند. بر این اساس، در جدول ۶، برای همه شکل مودهای متناسب با فرکانس‌های کوچکتر از ۸۰۰ هرتز، توضیحات در زیر هر شکل مود، در روش تجربی ذکر شده است. برای همه شکل مودهای بیشتر از ۸۰۰ هرتز، توضیحات در زیر هر شکل مود، در روش عددی ذکر شده است.

جدول ۶- مقایسه بین شکل مدهای بدست آمده از روش تجربی (استفاده از ICATS®) و روش عددی برای ۵ نمونه

شماره نمونه	روش	اولین شکل مود طبیعی	دومین شکل مود طبیعی	سومین شکل مود طبیعی
۱	تجربی	 ۳۲۶,۸۱ (Hz) (پیچشی : مود اول)	 ۶۰۹,۵۸ (Hz) (خمشی : نوع زینی)	 ۷۲۷,۱۲ (Hz) (خمشی : نوع زنگوله‌ای)
	عددی	 ۳۸۴,۹۹ (Hz)	 ۵۸۴,۰۶ (Hz)	 ۸۲۶,۷۸ (Hz)
۲	تجربی	 ۲۶۷,۲۶ (Hz) (پیچشی : مود اول)	 ۴۹۵,۴۹ (Hz) (خمشی : نوع زینی)	 ۶۲۴,۷۵ (Hz) (پیچشی : مود دوم)
	عددی	 ۳۱۵,۴۴ (Hz)	 ۴۹۴,۸۲ (Hz)	 ۷۲۶,۳۷ (Hz)

ادامه جدول ۶

۳	تجربی			>۸۰۰ (Hz)
	عددی			
۴	تجربی		(Hz)>۸۰۰	(Hz)>۸۰۰
	عددی			

۲۹۴,۶ (Hz)
(پیچشی : مود اول)

۷۱۴,۱۸ (Hz)
(خمشی: نوع زینی)

۳۵۲,۹۸ (Hz)

۶۸۹,۸۲ (Hz)

۸۷۸,۹۶(Hz)
(پیچشی : مود دوم)

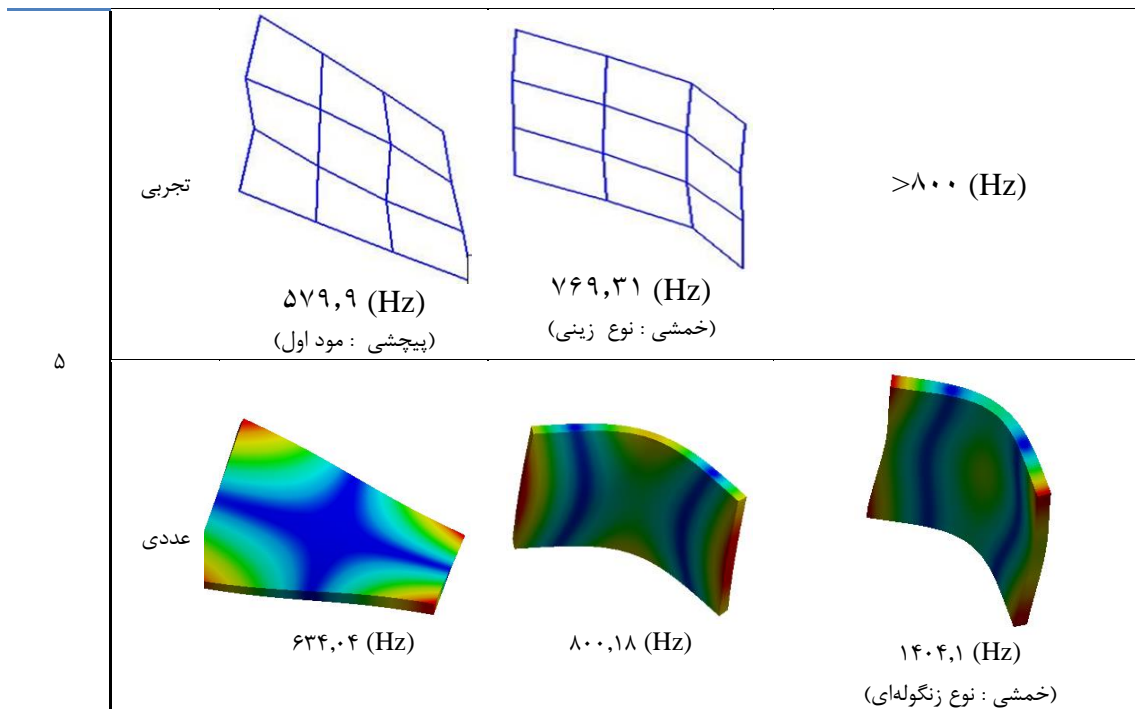
(Hz)۵۶۷,۶۷
(پیچشی : مود اول)

(Hz) ۶۵۵,۹

(Hz) ۹۰۷,۹۸
(خمشی: نوع زینی)

(Hz)۱۴۴۶,۴
(پیچشی : مود دوم)

ادامه جدول ۶



بین نتایج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها به دست آمده است. نتایج اصلی مطالعه حاضر، به شرح زیر است:

۱- افزایش ۲ برابری ضخامت پوسته سازه‌های ساندویچی مشبک کامپوزیتی، نسبت استحکام به وزن را بیشتر از ۱/۵ برابر افزایش می‌دهد.

۲- تغییر جنس رویه‌ها از پارچه با الیاف شیشه به کربن، به جای افزایش ضخامت رویه‌های الیاف شیشه، در سازه‌های ساندویچی، نتیجه بهتری دارد. بطور مثال، در سازه‌های ساندویچی مشبک کامپوزیتی، نسبت استحکام به وزن را تا حدود ۲ برابر افزایش می‌دهد.

۳- سازه‌های ساندویچی مشبک آلومینیومی، از صفحات آلومینیومی یکپارچه، بسیار مستحکم‌تر و سبک‌ترند.

۴- استفاده از رزین اپوکسی برای چسباندن رویه‌ها به هسته در نمونه آلومینیومی، موفقیت‌آمیز بوده است. همچنین افزودن ۵٪ سخت‌کننده به رزین اپوکسی و عمل‌آوری در دمای اتاق، برای نمونه‌های کامپوزیتی مناسب است. چون حتی بعد از واماندگی، تورق در بین لایه‌های رویه‌ها و جدایش بین رویه و هسته، اتفاق نیفتاده است.

با توجه به ثابت بودن شکل مودهای اول (پیچشی) و دوم (خمشی)، در صورتی که گرانت‌تر بودن پارچه از جنس کربن نسبت به پارچه از جنس شیشه اهمیت نداشته باشد، در بین نمونه‌های کامپوزیتی، نمونه شماره ۳، از نظر فرکانسی ارجحیت دارد، چون فرکانس بالاتری دارد. از نظر استحکام خمشی ویژه نیز نمونه شماره ۳ نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی ارجحیت دارد. در بین دو نمونه آلومینیومی شماره ۴ و ۵، ساختار ساندویچی نمونه شماره ۴، با توجه به کاهش وزن حدود ۴۷ درصدی نسبت به ورق آلومینیوم یکپارچه نمونه شماره ۵، از نظر خمش استاتیکی و مودال، ارجحیت دارد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، سه نمونه سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک با استفاده از روش قرار دادن الیاف و چیدمان دستی و یک نمونه سازه ساندویچی آلومینیومی با هسته مشبک و یک نمونه آلومینیوم یکپارچه با فرآیندهای ماشینکاری ساخته شدند. تست خمش سه نقطه‌ای و آنالیز مودال تجربی و عددی برای آنها انجام شده است و تطابق خوبی

منابع و مراجع

- ۵- افزایش ضخامت رویه‌ها برای نمونه سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک شیشه/ اپوکسی، باعث می‌شود که فرکانس‌های اول، دوم و سوم، به ترتیب ۲۲،۲۸٪، ۲۳،۰۳٪ و ۱۶،۳۹٪ افزایش یافته و ضریب میرایی به ترتیب ۴،۲۷٪، ۲۳،۸۷٪ و ۷۱،۵۷٪ افزایش یابند.
- ۶- تغییر جنس رویه با ضخامت اندازه ۲ میلی‌متر از شیشه/اپوکسی به کربن/ اپوکسی، باعث می‌شود که فرکانس‌های اول و دوم نمونه سازه ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک، به ترتیب ۱۰،۲۳٪ و ۴۴،۱۴٪ افزایش یابد و ضریب میرایی به ترتیب ۱۳،۷۶٪ و ۳۲،۲۶٪ کاهش یابد.
- ۷- ضریب میرایی نمونه یکپارچه آلومینیوم، کمتر از نمونه آلومینیوم با هسته مشبک می‌باشد و همچنین ضریب میرایی نمونه آلومینیوم با هسته مشبک، به میزان قابل توجهی، کمتر از نمونه‌های سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک است.
- ۸- به طور کلی، شکل مودهای متناسب با فرکانس‌های اول، پیچشی (مود اول) و شکل مودهای متناسب با فرکانس‌های دوم، خمشی هستند (مود نوع زینی).
- ۹- با افزایش فرکانس، شکل مود از حالت خمشی (نوع زنگ) به حالت پیچشی (مود دوم) تغییر می‌کند. این به دلیل افزایش سفتی کلی در فرکانس مشخص می‌باشد.
- پی‌نوشت‌ها**
- ۱ Composite sandwich panel structures with grid
 - ۲ Damage tolerance
 - ۳ Rib
 - ۴ Isogrid
 - ۵ Specific energy absorption
 - ۶ Transverse quasi-static loading
 - ۷ Filament winding
 - ۸ Anisogrid
 - ۹ Anglegrid
 - ۱۰ Silicon rubber
 - ۱۱ Wire cut
 - ۱۲ Three-point-bending
 - ۱۳ Roving
 - ۱۴ Hardene
 - ۱۵ Delamination
 - ۱۶ Debonding
 - ۱۷ Shaker
 - ۱۸ ICATS®
 - ۱۹ Tie
 - ۲۰ MATLAB
- [۱۰]. محررزاده کرد، کرد، شهریار، آیدا، سپهر افغان، اشکان، "بررسی خواص مکانیکی مواد مدرج پله ای پایه پلیمری تقویت شده با نانو لوله کربن با استفاده از آزمون خمشی سه نقطه ای"، نشریه علمی دانش و فناوری هوافضا، سال ۸، شماره ۲، صفحات ۶۷-۷۶، ۱۳۹۸.

- [۱۱]. تقی پور، حسین، دامغانی نوری، محمد، " بررسی تجربی جذب انرژی در تیرهای ساندویچی با هسته ی مشبک پر شده از فوم، تحت بارگذاری خمشی شبه استاتیک"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۸، شماره ۳، صفحات ۱۲۶-۱۳۴، ۱۳۹۷.
- [۱۲]. خسروی، حامد، اسلامی فارسانی، رضا، " رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی چندمقیاسی اپوکسی-الیاف شیشه-نانوذرات رس تحت آزمون خمش سه نقطه ای"، مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۵، جلد ۴۸، شماره ۴، صفحات ۱۱۷-۱۲۵، ۱۳۹۷.
- [13]. A. Azzam and W. Li, "An experimental investigation on the three-point bending behavior of composite laminate", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 62, pp. 1-8, 2014.
- [۱۴]. آذرافزا، رضا، داور، علی، محمودی، ادیب، " تست خمش سه نقطه‌ای ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک"، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، جلد ۳، شماره ۴، صفحات ۳۷۷-۳۸۸، ۱۳۹۵.
- [15]. Y. J. Wang, Z. J. Zhang, X. M. Xue and L. Zhang, "Free vibration analysis of composite sandwich panels with hierarchical honeycomb sandwich core", Thin-Walled Structures, Vol. 145, pp. 106425, 2019.
- [16]. H. Jiang, Y. Ren, Q. Jin, G. Zhu and Z. Liu, "Flexural performances of fiber face-sheets/corrugated core sandwich composite structures reinforced by horizontal stiffeners", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 168, pp. 105307, 2020.
- [۱۷]. حیدری شاهملکی، احسان، زین الدینی، افشین، " استفاده از کامپوزیت‌های لایه‌ای پنبه/اپوکسی برای ساخت ساندویچ پنل‌ها با هسته موجی کسینوسی یکطرفه و دو طرفه"، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، جلد ۷، شماره ۲، صفحات ۸۶۳-۸۷۲، ۱۳۹۹.
- [18]. F. P. Beer, J. Dewolf, "Mechanics of Materials", 6 Edition, McGraw-Hill, 2012.