

ISAV2023

سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲ تهران - ایران



انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

تحلیل عددی و تجربی ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی هیبرید آلومینیوم/کربن - اپوکسی

محمد هروی^۱، محمد مهدی خطیبی^{۲*}، علیرضا آلبویه^۳، محمدحسن ولیخان انارکی^۴

^۱ ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۵۱۳۱۱۹۱۱۱، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک

^۲ ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۵۱۳۱۱۹۱۱۱، دانشیار

^۳ ایران، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۶۷۱۶۴۵۶۶۷، دانشیار

^۴ ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۵۱۳۱۱۹۱۱۱، دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mmkhatibi@semnan.ac.ir

چکیده

در این مقاله، ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی هیبرید آلومینیوم/کربن - اپوکسی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا صفحه هیبریدی با ترکیب کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن با آلومینیوم ساخته شده است. در ادامه آزمون مودال محیطی بر روی نمونه هیبریدی با شرط مرزی یکسر گیردار انجام پذیرفت. سپس، در نرم افزار انسیس صفحه آلومینیوم/کربن-اپوکسی با فرض اتصال کامل لایه آلومینیوم به کربن-اپوکسی مدل سازی گردید. پس از مقایسه و تصدیق نتایج مدل عددی در مش مناسب (۰/۵ میلی متر) با نتایج آزمایشگاهی و اطمینان از صحت مدل عددی، اثرات حجم موثر لایه فلز و زاویه لایه چینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز عددی نمونه نشان داد، کاهش درصد حجمی آلومینیوم باعث افزایش مقادیر فرکانس طبیعی در مودهای اول، سوم و چهارم شد. همچنین، در مودهای دوم و پنجم، فرکانس طبیعی تا ۶۰ درصد حجمی کاهشی و سپس افزایشی شد. علاوه بر این، در شکل مود دوم و پنجم، فرکانس‌های طبیعی در لایه چینی (۴۵ و ۴۵-) نسبت به لایه چینی (۹۰ و ۰) با حجم مؤثر ۱۰ درصد، به ترتیب افزایش ۴۳ و ۹ درصدی را نشان داد.

کلمات کلیدی: آزمون مودال محیطی؛ صفحه هیبریدی فلز/کامپوزیت؛ آنالیز حجمی؛ تحلیل عددی

آنالیز مودال برای تعیین خواصی مانند فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها به کار می‌رود. محاسبه خواص ارتعاشی سازه‌های مکانیکی، به مهندسين در طراحی و ساخت سازه‌های پایدار کمک می‌کند؛ لذا، مطالعات متعددی با محوریت این زمینه صورت گرفته است. بای^۱ و همکاران [۱] با استفاده از روش آنالیز مودال، بخش‌هایی از ماهواره که از نظر ارتعاشی دارای ضعف بوده‌است را مورد بررسی قرار دادند. پولادخان^۲ و همکاران [۲]، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، ۱۶ مود اول صفحه‌ای نازک از جنس استیل با تکیه‌گاه ساده را با حل تحلیلی مقایسه نمودند. کلیمندا^۳ و سوکوپ^۴ [۳]، با استفاده از نرم‌افزار انسیس به آنالیز مودال صفحه آلومینیومی پرداختند. در این پژوهش، ۱۰ مود اول مورد بررسی قرار گرفت. کیشور^۵ و همکاران [۴]، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فرکانس‌های طبیعی مودهای خمشی و پیچشی در یک صفحه با حفره‌ی مرکزی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که صفحه با شرایط مرزی گیردار-گیردار-آزاد-گیردار بیشترین مقدار فرکانس طبیعی خمشی و پیچشی را دارد. در سال‌های اخیر، اهمیت استفاده از مواد جدید برای بهبود خواص مکانیکی سازه‌ها بیش از پیش افزایش یافته است و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره شده است. بیسواس^۶ و ری^۷ [۵]، به بررسی عددی و آزمایشگاهی صفحات چندلایه کامپوزیت الیاف شیشه/پوکسی پرداختند. نتایج حاکی از دقت بالای روش عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بوده است. ینگولکار^۸ و سوره [۶]، با استفاده از نرم‌افزار انسیس به مطالعه خواص ارتعاشی صفحه الیاف کربن تقویت شده در زوایای لایه چینی مختلف، درصدهای حجمی مختلف و جهت‌گیری‌های متفاوت الیاف خارجی‌ترین لایه پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند، تأثیر هیبرید کردن و جهت‌گیری خارجی‌ترین لایه تأثیر بیشتری بر افزایش فرکانس طبیعی دارد. سامیل^۹ و همکاران [۷] در تحقیقی، به پیش‌بینی تأثیر زاویه لایه چینی و شرایط مرزی بر مشخصات ارتعاشی صفحات کامپوزیت پرداختند. نتایج نشان داد، زاویه لایه چینی و شرایط مرزی بر مقادیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها تأثیر داشته است.

علی‌رغم بسیاری از خواص مطلوب کامپوزیت‌ها، صفحات کامپوزیتی دارای معایبی نیز هستند. به عنوان نمونه، این مواد شکننده‌تر از فلزاتی مانند آهن و آلومینیوم می‌باشند. این مشکلات اهمیت استفاده از هیبرید فلز و کامپوزیت را افزایش داده است. با هیبرید کردن فلزاتی مانند آلومینیوم با کامپوزیت علاوه بر حل مشکلات مذکور، خواص مکانیکی و ارتعاشی مطلوب حاصل می‌شود. لذا، اخیراً، محققین در مطالعاتی به بررسی خواص ارتعاشی هیبرید فلز-کامپوزیت پرداخته‌اند. مهندس و همکاران [۸]، آنالیز مودال صفحه هیبرید پوسته‌ی استوانه‌ای الیاف کربن و فلز را برای مواد مختلف با درصدهای حجمی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد، درصد حجمی از مهم‌ترین عوامل در افزایش فرکانس طبیعی است. مرزوکي^{۱۰} و همکاران [۹]، آنالیز مودال صفحه کنسول ساخته شده از هیبرید آلومینیوم تقویت‌شده با پلیمر/کامپوزیت الیاف شیشه را بررسی کردند. در این آزمایش از آزمون چکش برای تعیین خواص ارتعاشی صفحه کنسول استفاده شد. نتایج نشان داد، با افزایش ضخامت نمونه‌ها، فرکانس طبیعی افزایش یافته است. کورمانیکوا^{۱۱} [۱۰]، آنالیز مودال صفحات چندلایه کامپوزیتی را انجام داد و تأثیر عواملی مانند طول، ضخامت و زاویه لایه چینی را بر فرکانس‌های طبیعی بررسی کرد. نتایج نشان داد، هر یک از زوایای لایه چینی ۰، ۹۰ و ۴۵، ۴۵، ۰ و ۹۰ در برخی از مودها عملکرد بهتری دارند. همچنین با افزایش طول، فرکانس طبیعی کاهش یافته است. کالاناور^{۱۲} و کاتیمانی^{۱۳} [۱۱]، با استفاده از نرم‌افزار انسیس آنالیز

1 Bai

2 Pouladkhan

3 Klimenda

4 Soukup

5 Kishore

6 Biswas

7 Ray

8 Pingulkar

9 Samyal

10 Merzuki

11 Kormanikova

12 Kallannavar

مودال صفحات کامپوزیت و ساندویچی را انجام دادند. شرایط مرزی چهار سر گیردار در موده‌های مختلف فرکانس طبیعی بیشتری نسبت به سایر شرایط مرزی داشت. مرزوکمی و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از روش اجزاء محدود، در نرم‌افزار آباکوس، به بررسی خواص ارتعاشی صفحات کامپوزیت الیاف کربن و الیاف شیشه پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر بهبود خواص ارتعاشی با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیوم بود.

با توجه به مرور منابع، مطالعات متعددی به‌منظور بررسی ارتعاشات آزاد صفحات کامپوزیتی و هیبرید فلز/کامپوزیت انجام شده است؛ اما مطالعه بر روی صفحات هیبریدی فلز/کامپوزیت با استفاده از آزمون مودال محیطی و مقایسه و صحنه سنجی نتایج با مدل عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا، در پژوهش حاضر، ابتدا قطعات آزمون بر اساس استاندارد ساخته شده‌اند. در ادامه با استفاده از روش آزمون مودال محیطی، فرکانس‌های سازه در شرایط مرزی CFFF بدست آمده است. به‌منظور اعتبار سنجی مدل عددی در نرم‌افزار انسیس، طراحی و همگرایی مش مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج تجربی مقایسه شد. سپس، اثر درصد حجمی فلز و کامپوزیت، زاویه لایه چینی و همچنین شرایط مرزی بر خواص ارتعاشی صفحه هیبریدی آلومینیوم/الیاف کربن - اپوکسی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲ مراحل ساخت صفحه هیبرید آلومینیوم/کربن - اپوکسی

برای ساخت صفحه هیبریدی آلومینیوم/کربن - اپوکسی از پارچه کربن دو جهته ۴۰۰ گرمی به تعداد ۱۰ لایه، آلومینیوم ۳۱۰۵، اپوکسی PC105 با نسبت هاردنر ۱۵ استفاده شد؛ برای ساخت کامپوزیت اپوکسی الیاف کربن از روش لایه چینی دستی استفاده شد و صفحاتی با ابعاد 100×100 میلی‌متر و ضخامت $2/8$ میلی‌متر ایجاد گردید. همچنین، برای نفوذ رزین به صفحات آلومینیومی به کمک سنباده خط و خش‌هایی بر روی صفحات ایجاد شد. در نهایت با استفاده از یک وزنه، اتصال کامل صفحه آلومینیوم به لایه‌های کامپوزیتی صورت پذیرفت. قسمتی از مراحل ساخت نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



(د)



(ج)



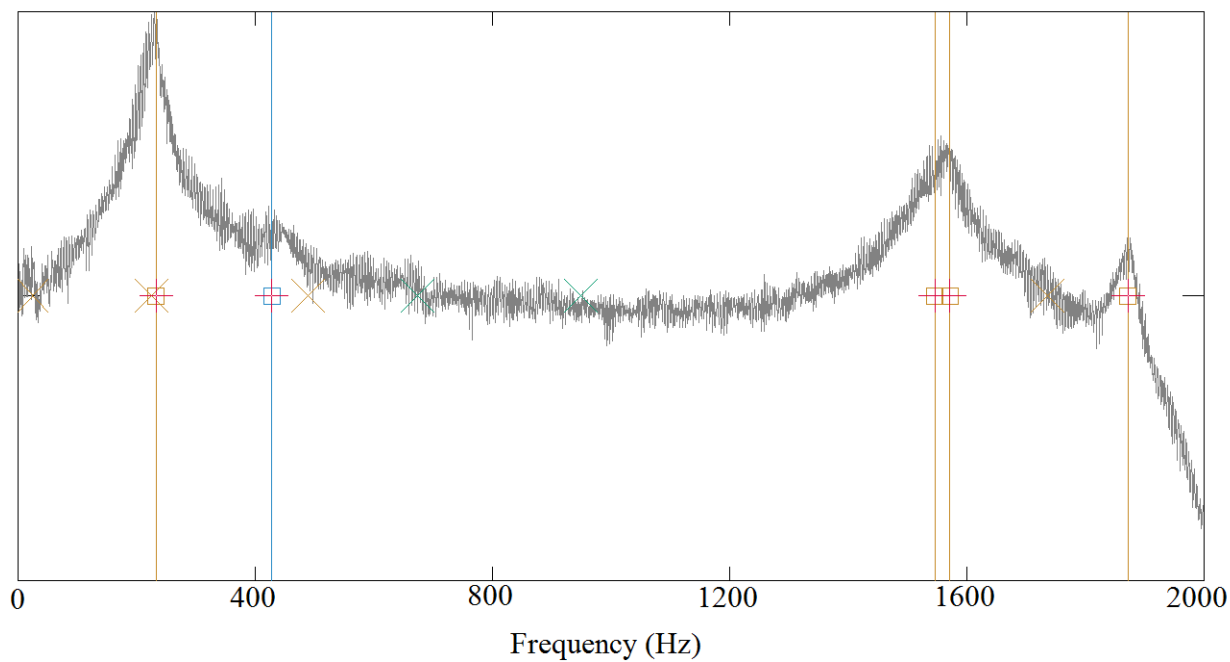
(ب)



(الف)

شکل ۱. مراحل ساخت نمونه آزمایشگاهی (الف) برش صفحه آلومینیومی (ب) ترکیب اپوکسی / الیاف کربن (ج) صفحه هیبریدی (د) وزنه‌های قرار داده شده بر روی صفحه هیبریدی

به‌منظور اجرای آزمون ارتعاشی از روش آزمون مودال محیطی، ابتدا صفحه هیبریدی با استفاده از گیره به‌صورت شرایط مرزی CFFF مهار شده است. در ادامه، نمونه به روش محیطی و با استفاده از یک ضربه زننده کوچک تحریک و مقادیر سرعت با استفاده از حس‌گر غیر تماسی لیزری، استخراج و به سیستم پردازش ارسال شدند. در انتها نمودار طیف پاسخ فرکانسی مربوط به گوشه سمت چپ بالای ورق، به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۲) و فرکانس‌های موده‌های مختلف محاسبه شده اند. در شکل ۳ برخی از تجهیزات استفاده شده در آزمایشگاه مودال دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان جهت آزمون ارتعاشی نمونه‌ها، نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار طیف پاسخ فرکانسی مربوط به نقطه گوشه سمت چپ بالای ورق در روش SSI



(ب)



(الف)

شکل ۳. تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمون مودال محیطی الف) ارتعاش سنج غیرتماسی لیزری ب) دستگاه تحلیل گر ارتعاشات

۲-۲ ایجاد مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار انسیس

به منظور ایجاد مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار انسیس، یک صفحه مربعی با طول ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲/۸ میلی‌متر با استفاده از مدل shell ایجاد گردید. سپس در قسمت مدل، نوع مواد و اندازه مش تعیین و در قسمت setup مربوط به سیستم ACP، مشخصات لایه چینی و ایجاد ورق هیبریدی تعیین شد. در نهایت فرکانس‌های طبیعی با استفاده از مدل اجزاء محدود محاسبه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا فرکانس طبیعی بدست آمده از مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار انسیس با نتایج آزمایشگاهی صفحه هیبریدی آلومینیوم/کربن مقایسه می‌شود. سپس تأثیر کسر حجمی لایه آلومینیوم، زوایا و شرایط مرزی برای صفحه هیبرید فلز/کامپوزیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۳ صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی طراحی شده در نرم‌افزار انسیس یک صفحه هیبریدی با یک‌لایه آلومینیوم و بیست لایه متعامد (۰/۹۰) تحت شرط مرزی CFFF در نظر گرفته شد. همچنین مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است [۱۳].

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده [۱۳]

AI	Carbon/Epoxy	مشخصات
۷۲/۴	۱۸۱	E1 (Gpa)
۷۲/۴	۱۰/۳	E2=E3 (Gpa)
۲۸	۳/۷۸	G23 (Gpa)
۲۸	۷/۱۷	G13=G12 (Gpa)
۰/۳۳	۰/۴۹	ν_{23}
۰/۳۳	۰/۲۷	$\nu_{13} = \nu_{12}$
۲۷۰۰	۱۶۲۷	ρ (kg/m ³)

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی مورد اشاره، ابتدا فرکانس‌های طبیعی در مش‌های ۲ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر استخراج و با نتایج آزمایشگاهی از آزمون مودال مقایسه شد. همچنین میزان خطا به کمک روابط (۱) و (۲) محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود میانگین درصد خطا مدل عددی در مش‌های ۲ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۱۲/۴۹، ۹/۶۳ و ۸/۲۹ است.

$$Error\% = \left| \frac{Freq_{exp} - Freq_{model}}{Freq_{exp}} \right| \times 100 \quad (1)$$

$$Average\% = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Error_i)}{N} \right) \times 100 \quad (2)$$

که $Error\%$ ، $Average\%$ ، $Freq_{exp}$ ، $Freq_{model}$ و N به ترتیب درصد خطا، میانگین درصد خطا، فرکانس طبیعی آزمایشگاهی، فرکانس طبیعی مدل‌سازی و تعداد مودها هستند.

جدول ۲. فرکانس های طبیعی (Hz) حاصل از آزمایش و مدل سازی برای ورق هیبریدی

مُد	نتایج آزمایشگاهی	نتایج حاصل از مدل سازی با انسیس			
		مش ۲ میلی متر	درصد خطا	مش ۱ میلی متر	درصد خطا
مُد اول	۲۳۰/۶۵	۲۰۰/۱	۱۳/۲۵	۲۱۵/۶۸	۶/۴۹
مُد دوم	۴۳۰/۴۵	۳۴۳/۶۲	۲۰/۲۸	۳۷۳/۹۸	۱۳/۱۲
مُد سوم	۱۵۵۸	۱۲۸۸/۳	۱۷/۳۱	۱۴۰/۱۵	۱۰/۰۴
مُد چهارم	۱۵۹۹/۵	۱۵۰۰/۹	۶/۱۶	۱۶۳۵/۹	۲/۲۸
مُد پنجم	۱۸۷۱/۵	۱۹۷۵/۲	۵/۵۴	۲۱۷۵/۴	۱۶/۲۴
میانگین درصد خطا			۱۲/۴۹		۹/۶۳

۲-۳ آنالیز حجمی

به منظور آنالیز حجمی، ابتدا ورق هیبریدی با حجم مؤثر ۹۰ درصد کامپوزیت طراحی شد. در ادامه از ضخامت کامپوزیت کم و به ضخامت آلومینیوم افزوده شد و این مرحله تا زمانی که ضخامت آلومینیوم برابر با ۹۰ درصد ضخامت کل شود ادامه یافت. در طول انجام این مراحل ضخامت کل ثابت و زاویه لایه چینی (۹۰ و ۰) در نظر گرفته شد.

در جدول ۳ نتایج درصد حجمی مؤثر ۱۰ الی ۹۰ درصدی لایه آلومینیوم در صفحه هیبریدی ارائه شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد، با افزایش درصد حجمی آلومینیوم، فرکانس طبیعی در مُد اول، سوم و چهارم با توجه به شکل مُد خمشی کاهش می‌یابد؛ اما در مُد دوم و پنجم که مودهای پیچشی سازه می‌باشند، با افزایش درصد حجمی آلومینیوم تا ۶۰ درصد، فرکانس طبیعی کاهش و سپس افزایشی شده است.

جدول ۳. فرکانس های طبیعی (Hz) حاصل از آنالیز حجمی برای ورق هیبریدی با زاویه (۰ و ۹۰)

درصد حجمی آلومینیوم	مُد اول	مُد دوم	مُد سوم	مُد چهارم	مُد پنجم
۱۰	۳۳۶/۲۳	۵۳۵/۰۴	۱۹۴۶/۴	۲۰۸۵/۷	۲۳۴۳/۵
۲۰	۳۲۰/۴۹	۵۳۰/۸۴	۱۸۸۲/۸	۲۰۱۹/۱	۲۲۷۱/۱
۳۰	۳۰۷/۶۷	۵۱۶/۰۹	۱۸۱۶/۹	۱۹۶۳/۶	۲۱۹۴/۷
۴۰	۲۹۷/۳۵	۵۰۱/۸۹	۱۷۶۱/۷	۱۹۱۲/۸	۲۱۳۱/۳
۵۰	۲۸۹/۱۶	۴۹۳/۶۸	۱۷۱۸/۱	۱۸۶۸/۲	۲۰۸۸/۵
۶۰	۲۸۲/۵۹	۴۹۴/۰۹	۱۶۸۳	۱۸۳۱/۳	۲۰۶۸/۲
۷۰	۲۷۷/۱۳	۵۰۳/۹۸	۱۶۵۲/۶	۱۸۰۳/۲	۲۰۶۹/۸
۸۰	۲۷۲/۳۸	۵۲۲/۹۵	۱۶۲۲/۵	۱۷۸۴/۸	۲۰۹۱/۴
۹۰	۲۶۷/۵۵	۵۴۹/۳۲	۱۵۸۶/۸	۱۷۷۵/۶	۲۱۲۸/۱

۳-۳ ارزیابی زاویه لایه چینی

در این قسمت برای ارزیابی اثر زوایای لایه چینی (۰ و ۹۰) و (۴۵ و -۴۵) بر فرکانس طبیعی صفحه هیبریدی، ابتدا درصد حجمی به‌عنوان یک پارامتر مهم ۱۰، ۵۰ و ۹۰ در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج جدول ۴، مقادیر فرکانس طبیعی در درصد حجمی ۱۰ درصد در مودهای اول، سوم و چهارم به علت خمشی بودن شکل مُد در زاویه (۰ و ۹۰) نسبت به (۴۵ و -۴۵) به ترتیب افزایش ۲۶، ۲۹ و ۲ درصدی را نشان داده است؛ اما در فرکانس‌های دوم و پنجم با توجه به شکل مودهای پیچشی صفحه هیبریدی، زاویه (۴۵ و -۴۵) نسبت به زاویه (۰ و ۹۰) به ترتیب ۴۳ و ۹ درصد بیشتر می‌باشد. در درصد‌های حجمی ۵۰ و ۹۰ درصد هم این اختلاف با توجه به شکل مُد وجود داشته اما با کاهش حجم مؤثر کامپوزیت اختلاف بین فرکانس‌ها در زوایای مختلف کاهش می‌یابد.

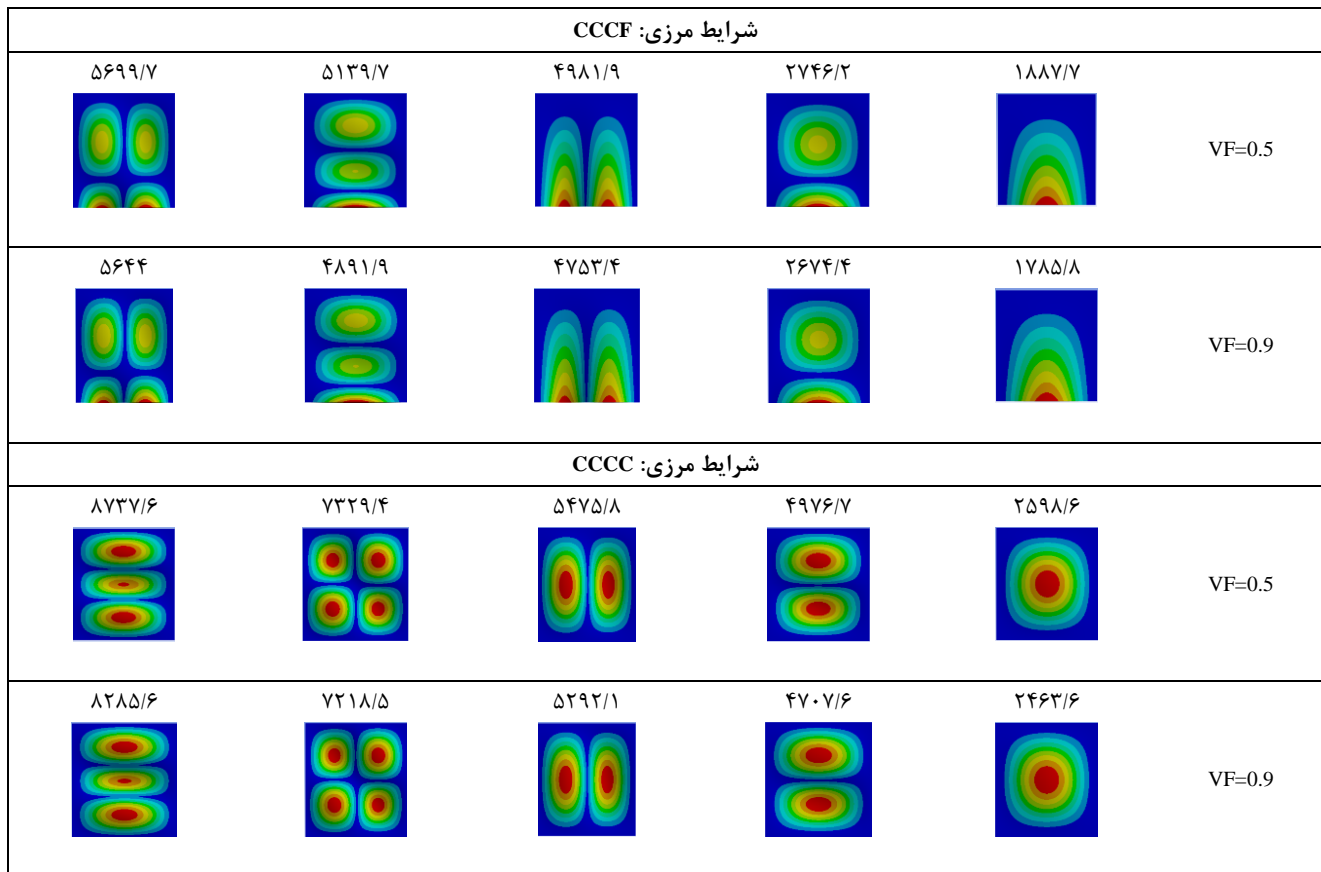
جدول ۴. ارزیابی اثر زوایای لایه چینی بر فرکانس‌های طبیعی (Hz)

زاویه ۴۵ و ۴۵-			زاویه ۹۰ و ۰			درصد حجمی
۹۰	۵۰	۱۰	۹۰	۵۰	۱۰	
۲۵۲/۵۹	۲۴۸/۴	۲۶۵/۱۹	۲۶۷/۵۵	۲۸۹/۱۶	۳۳۶/۲۳	مود اول
۶۰۷/۸۸	۶۶۲/۸۹	۷۶۶/۵۹	۵۴۹/۳۲	۴۹۳/۶۸	۵۳۵/۰۴	مود دوم
۱۴۷۸/۲	۱۴۰۲/۹	۱۴۹۸/۹	۱۵۸۶/۸	۱۷۱۸/۱	۱۹۴۶/۴	مود سوم
۱۷۷۳/۷	۱۸۵۳/۳	۲۰۳۸/۲	۱۷۷۵/۶	۱۸۶۸/۲	۲۰۸۵/۷	مود چهارم
۲۱۹۹/۶	۲۲۷۴/۴	۲۵۵۸	۲۱۲۸/۱	۲۰۸۸/۵	۲۳۴۳/۵	مود پنجم

۴-۳ ارزیابی شرایط مرزی

به منظور ارزیابی اثر شرایط مرزی، آنالیز مودال صفحه هیبریدی در شرایط مرزی یک سر گیردار (CFFF)، دو سر گیردار (CFFC)، سه سر گیردار (CCCF) و چهار سر گیردار (CCCC) در درصدهای حجمی ۵۰ و ۹۰ انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بیشترین تا کمترین فرکانس طبیعی به ترتیب مربوط به شرایط مرزی تکیه‌گاه چهار سر گیردار، سه سر گیردار، دوسرگیردار و یکسر گیردار می‌باشد.

درصد حجمی	مود اول (Hz)	مود دوم (Hz)	مود سوم (Hz)	مود چهارم (Hz)	مود پنجم (Hz)
شرایط مرزی: CFFF					
VF=0.5					
	۲۸۹/۱۶	۴۹۳/۶۸	۱۷۱۸/۱	۱۸۶۸/۲	۲۰۸۸/۵
VF=0.9					
	۲۶۷/۵۵	۵۴۹/۳۲	۱۵۸۶/۸	۱۷۷۵/۶	۲۱۲۸/۱
شرایط مرزی: CFFC					
VF=0.5					
	۱۸۱۸/۲	۱۹۳۹/۴	۲۹۱۲	۴۹۱۴/۸	۵۰۷۰/۶
VF=0.9					
	۱۷۰۰	۱۹۰۳/۵	۲۸۶۹/۲	۴۶۵۶/۱	۴۹۳۴/۵



شکل ۴. فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای صفحه هیبریدی با زاویه (۹۰ و ۰) تحت شرایط مرزی مختلف با درصد حجمی ۰/۵ و ۰/۹.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارتعاشات آزاد صفحه هیبرید فلز/کامپوزیت (FML) با استفاده از روش آزمون مودال محیطی و حل عددی به کمک نرم‌افزار انسیس برای کامپوزیت کربن-اپوکسی تقویت‌شده با آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. قطعات ساخته شده با استفاده از یک گیره به صورت شرایط مرزی یک سر گیردار (CFFF) مقید و از طریق لیزر (حسگر سرعت‌سنج) و با نواختن ضربات دلخواه، فرکانس‌های سازه محاسبه گردید. در ادامه، صفحه در نرم‌افزار طراحی گردید و صحت سنجی نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرفت. همچنین اثر درصد حجمی فلز و کامپوزیت، زاویه لایه چینی و شرایط مرزی بر خواص ارتعاشی صفحه هیبریدی آلومینیوم/الیاف کربن - اپوکسی بر ارتعاشات سیستم بررسی و نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- بیشترین میزان فرکانس طبیعی در آنالیز حجمی در مودهای اول، سوم و چهارم در ۱۰ درصد حجمی آلومینیوم مشاهده شد.
- ۲- با رشد حجم مؤثر آلومینیوم در شکل مودهای دوم و پنجم (مودهای پیچشی) تا حجم مؤثر ۶۰ درصد، فرکانس کاهش و سپس با بالا رفتن حجم مؤثر آلومینیوم فرکانس افزایشی شده است.
- ۳- مقدار فرکانس طبیعی صفحه هیبریدی در زاویه (۹۰ و ۰) نسبت به (۴۵ و -۴۵) در مودهای خمشی اول، سوم و چهارم در درصد حجمی ۱۰ درصد، افزایشی به ترتیب ۲۶، ۲۹ و ۲ درصد داشته است.
- ۴- مقدار فرکانس مودهای دوم و پنجم صفحه هیبریدی (مودهای پیچشی) در زاویه (۴۵ و -۴۵) نسبت به (۹۰ و ۰) در درصد حجمی ۱۰ درصد به ترتیب ۴۳ و ۹ درصد افزایش داشته است.
- ۵- فرکانس طبیعی صفحه هیبریدی در شرایط مرزی چهار سر درگیر (CCCC) نسبت به سایر شرایط مرزی مقدار بیشتری را داشته است.

مراجع

- [1] Zhengfeng Bai, Yang Zhao, Wenlai Ma, and Hao Tian, "Modal analysis for small satellite system with finite element method," in *2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pp. 1–5, (2008), doi: 10.1109/ISSCAA.2008.4776403.
- [2] A. R. Pouladkhan, J. Emadi, M. Safamehr, and H. Habibolahiyani, "The vibration of thin plates by using modal analysis," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 59, pp. 2880–2885, (2011).
- [3] F. Klimenda and J. Soukup, "Modal analysis of thin aluminium plate," *Procedia Eng.*, vol. 177, pp. 11–16, (2017).
- [4] M. L. P. Kishore, S. Bezawada, and B. C. R. K. Reddy, "Modal Analysis of Rectangular Plate with Central Hole Subjected to Various End Conditions," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 1653–1661, (2017), doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.004.
- [5] D. Biswas and C. Ray, "Experimental and Numerical Modal Analysis of Laminated Composite Plates with GFRP," in *Advances in Structural Engineering*, New Delhi: Springer India, pp. 55–66, (2015).
- [6] P. Pingulkar and B. Suresha, "Free Vibration Analysis of Laminated Composite Plates Using Finite Element Method," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 24, no. 7, pp. 529–538, (2016), doi: 10.1177/096739111602400712.
- [7] R. Samyal, A. K. Bagha, R. Bedi, S. Bahl, K. K. Saxena, and S. Sehgal, "Predicting the effect of fiber orientations and boundary conditions on the optimal placement of PZT sensor on the composite structures," *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 7, p. 075302, (2021), doi: 10.1088/2053-1591/ac0de9.
- [8] M. Mohandes, A. R. Ghasemi, M. Irani-Rahagi, K. Torabi, and F. Taheri-Behrooz, "Development of beam modal function for free vibration analysis of FML circular cylindrical shells," *J. Vib. Control*, vol. 24, no. 14, pp. 3026–3035, (2018), doi: 10.1177/1077546317698619.
- [9] M. N. M. Merzuki, M. R. M. Rejab, M. S. M. Sani, B. Zhang, M. Qianjin, and W. Rafizi, "Investigation of modal analysis on glass fiber laminate aluminium reinforced polymer: An experimental study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 469, p. 012065, (2019), doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012065.
- [10] E. Kormanikova, "Modal analysis of sandwich panel with composite laminated faces," *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 23, pp. 105–109, (2019), doi: 10.21595/vp.2019.20658.
- [11] V. Kallannavar and S. Kattimani, "Modal analysis of laminated composite and sandwich plates using finite element method," (2020), p. 020011, doi: 10.1063/5.0004159.
- [12] M. N. M. Merzuki, Q. Ma, M. R. M. Rejab, M. S. M. Sani, and B. Zhang, "Experimental and numerical investigation of fibre-metal-laminates (FMLs) under free vibration analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 854–860, (2022), doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.409.

[۱۳] م. هروی، م. م. خطیبی و ع. آلبویه، "تحلیل ارتعاشات آزاد صفحه ساندویچ پانل با رویه هیبرید فلز/کامپوزیت و هسته انعطاف‌پذیر با استفاده از تئوری مرتبه سوم برشی"، *مجله علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک*، دوره ۳۴، شماره ۴، صفحه ۱-۱۸، (۱۴۰۱).