

# مطالعه عددی و آزمایشگاهی اثر جدایش بین لایه‌ای در صفحات کامپوزیتی

## انحنادار بر خواص ارتعاشی

ایرج هرسینی  
استادیار مهندسی مکانیک  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج  
harsini@kiauo.ac.ir

مجید قدیمی  
کارشناس ارشد مکانیک  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
ghadimi\_m2@yahoo.com

رضا آذرآفا\*  
استادیار مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
azarmut@mut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۶

### چکیده

کامپوزیت‌های لایه‌ای، موادی با استحکام و با سفتی ویژه بالا هستند که در صنایع مختلف همانند هوافضا، خودروسازی و کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد در طی فرایند ساخت و تعمیر و نگهداری، ممکن است دچار عیوب سازه‌ای شوند. یکی از مهم‌ترین عیوب سازه‌ای، جدایش بین لایه‌ای<sup>۱</sup> است. ممکن است دامنه عیب مذکور رشد نکند و موجب خرابی کلی سازه نگردد، اما منجر به کاهش خواص استحکامی و سفتی آن خواهند شد و در نتیجه بر روی خواص ارتعاشی آن نیز تأثیر می‌گذارند.

در مقاله حاضر خواص ارتعاشی پوسته انحنادار کامپوزیتی چند لایه کربن/اپوکسی و دارای جدایش بین لایه‌ای با استفاده از دو روش عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. جهت بررسی رفتار واقعی ارتعاشی، در روش آزمایشگاهی از آنالیز مودال و در روش عددی از نرم‌افزارهای تجاری المان محدود، استفاده شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از روش تجربی (تست مودال) و روش عددی، تفاوت فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای صفحه سالم و صفحات دارای عیوب مشخص شده و می‌توان آنها را از یکدیگر تفکیک نمود. در نهایت تأثیر میزان افزایش ناحیه جدایش بین لایه‌ای بر روی فرکانس‌های طبیعی یک صفحه انحنادار چهارگوش بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مساحت جدایش، فرکانس‌های طبیعی کاهش خواهند یافت.

**واژگان کلیدی:** جدایش بین لایه‌ای، آزمایش مودال، صفحات کامپوزیتی، صفحات انحنادار، فرکانس طبیعی

### ۱. مقدمه

این مزایا، پنل‌های چند لایه کامپوزیتی انحنادار به‌طور گسترده در صنایع فضایی جهت ساخت دماغه و بال‌های هواپیما کاربرد دارند. درک عمیق رفتار مکانیکی پوسته‌های کامپوزیتی به دلیل اطمینان از یکپارچگی این سازه‌ها در طی

پنل‌های کامپوزیتی در مهندسی مدرن، به دلیل ایجاد شرایط طراحی بهینه مقاومتی و استحکامی، همچنین ایجاد زیبایی در ساختار طراحی، دارای کاربرد گسترده‌ای هستند. به دلیل

دوره سرویس از اهمیت بالایی برخوردارند. اما به طور مثال جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چند لایه در طی فرایند ساخت به دلیل رطوبت ناکافی، یا محبوس شدن هوا، و یا در طی دوره سرویس به عنوان نمونه در اثر ضربه با سرعت پایین، ایجاد می‌شوند و ممکن است قابل مشاهده نباشند و یا به ندرت بر روی سطوح مشاهده شوند، چراکه در داخل سازه و در بین لایه‌ها به وجود می‌آیند. وجود جدایش بین لایه‌ای به معنای کاهش استحکام و سفتی سازه خواهد بود که بر روی برخی از پارامترهای ارتعاشی سازه همانند فرکانس طبیعی و شکل مودها تأثیر می‌گذارد. وجود جدایش بین لایه‌ای در پوسته‌ها ممکن است موجب تغییرات مهمی در خواص دینامیکی آنها گردد، بنابراین مطالعه اثرات جدایش بر روی پوسته‌های کامپوزیتی ضروری است.

در گذشته در مورد جدایش سازه‌های کامپوزیتی تحقیقاتی انجام شده که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. پاره‌ی همکاری‌اش [۱] ارتعاش آزاد و پاسخ‌گذاری پنل‌های کامپوزیتی دو انحنایی که شامل چندین جدایش بین لایه‌ای بوده را با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول بررسی نمودند. آنها مشاهده نمودند که فرکانس با افزایش میزان رطوبت و دما در هر ناحیه از جدایش بین لایه‌ای، کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که خواص ارتعاشی پوسته‌ها تأثیر زیادی از شعاع انحنای خود می‌پذیرند. کیم و چو [۲] با استفاده از تئوری برشی مرتبه بالا به مطالعه پوسته‌های کامپوزیتی همراه با چندین جدایش بین لایه‌ای پرداختند. آنها اثرات تعداد، شکل، اندازه و موقعیت برای جدایش بین لایه‌ای را بررسی نمودند. یانگ و فو [۳] اثر رشد جدایش بین لایه‌ای در پنل‌های کامپوزیتی را بررسی کردند. همچنین آنها معادلات تحلیل کماتش پنل‌های لایه‌ای تک انحنایی را بر اساس اصول ارتعاشی توسعه دادند. آچاریا و همکاری‌اش [۴] رفتار خمشی پنل لایه‌ای تک انحنایی همراه با جدایش بین لایه‌ای را به وسیله روش المان محدود، تحلیل نمودند. در این مقاله اثرات ناحیه جدایش و همچنین انحنای با شرایط

مرزی مختلف بررسی شده است. لی و چانگ [۵] تحلیل ارتعاشی پنل‌های انحنادار دارای جدایش بین لایه‌ای در محدوده یک برش مرکزی در صفحه را انجام دادند. در این مقاله اثر نسبت انحنای به طول، اندازه ناحیه برش و نیز اندازه ناحیه جدایش بین لایه‌ای، تعداد لایه‌ها و موقعیت جدایش بر ارتعاش لایه بررسی شده است. سلطان و همکاری‌اش [۷] فرکانس‌های طبیعی یک صفحه کامپوزیتی مسطح را با استفاده از روش تئوری و استفاده از اصل دالامبر به دست آوردند و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

اکثر مطالعات انجام شده در زمینه ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی لایه‌ای دارای جدایش بین لایه‌ای، به صورت عددی و یا به صورت حل دقیق صورت گرفته است. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی غیرمخرب در تعیین خرابی‌ها و عیوب سازه‌ای نیز موضوع بسیار مهمی است که جهت تشخیص نوع عیب و همچنین میزان آنها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین روش‌های آزمایشگاهی به دلیل اعتبار نتایج حاصل از آنها جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی سازه به عنوان مبنای اصلی بررسی، قرار گرفته تا به منظور تشخیص دقیق‌تر تغییرات فرکانسی سازه در کاربردهای واقعی و صنعتی مورد استفاده واقع شوند.

در تحقیق حاضر به مطالعه عددی و آزمایشگاهی یک صفحه کامپوزیتی کربن/ اپوکسی انحنادار پرداخته شده است. بدین منظور یک صفحه سالم و سه صفحه کامپوزیتی که دارای جدایش بین لایه‌ای در لایه میانی و در مرکز صفحه با مساحت‌های مختلف هستند، ساخته شدند. با استفاده از روش آنالیز مودال فرکانس‌های طبیعی آنها به دست آمده است. همچنین یک مدل المان محدود سه بعدی جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثر افزایش ناحیه دارای جدایش بین لایه‌ای بر روی فرکانس‌های طبیعی به صورت عددی و آزمایشگاهی تعیین خواهد شد. سپس نتایج هر دو روش مقایسه، و اثر خرابی بر روی فرکانس‌های طبیعی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲. پارامترهای مؤثر در انتخاب هندسه نمونه‌ها

پارامترهایی همچون شرایط مرزی، تعداد لایه‌ها، ضخامت پوسته، شعاع انحنا و نسبت منظری بر روی نتایج فرکانس طبیعی مؤثر خواهد بود [۷]. شرایط مرزی مختلف، باعث کاهش و یا افزایش مقادیر فرکانس‌های طبیعی صفحه می‌گردند. در این مطالعه شرایط مرزی مورد نظر، به‌طور کاملاً آزاد در نظر گرفته می‌شود، چرا که ایجاد شرایط مرزی ساده یا گیردار نیاز به دقت بالایی دارد. همچنین از سوی دیگر وجود تکیه‌گاه، بر روی فرکانس طبیعی سازه تأثیر می‌گذارد، بنابراین با در نظر گرفتن شرایط مرزی آزاد، سازه از تأثیر تکیه‌گاه فارغ می‌گردد.

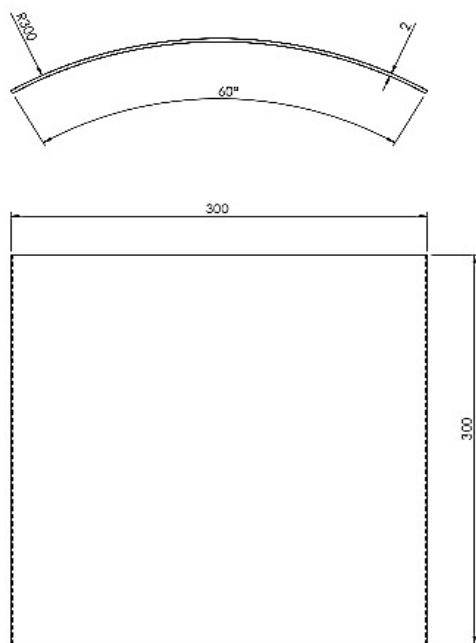
با افزایش شعاع انحنا، مقادیر فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد، بنابراین در میان صفحات با ابعاد برابر و شعاع انحناهای متفاوت، صفحه مسطح با شعاع انحنا بی‌نهایت کمترین مقادیر فرکانس‌های طبیعی را دارد. افزایش ضخامت صفحه همراه با افزایش تعداد لایه‌ها هر دو باعث افزایش مقادیر فرکانس طبیعی خواهند شد. یک پارامتر مهم در بررسی فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای، نسبت منظری یا همان نسبت طول کمان به قطر آن است. با افزایش نسبت منظری، فرکانس طبیعی پوسته نیز افزایش خواهد یافت [۸].

از پارامترهای مهم دیگر در انتخاب نمونه، شرایط انجام آزمایش است. به عبارت دیگر می‌بایست نمونه‌های تحت آزمایش مودال به گونه‌ای انتخاب گردند تا در محدوده فرکانسی پایین‌تری، تعداد مودهای فرکانسی بیشتری قابل استخراج باشند. علت این انتخاب مشکل تحریک نمودن سازه‌های کامپوزیتی در فرکانس‌های بالاتر و عدم دستیابی به تابع همبستگی مطلوب‌تر در آزمایش مودال است. مؤلفه مهم دیگر، روش ساخت نمونه‌هاست، که به صورت روش لایه‌گذاری دستی است. انتخاب ابعاد کوچک‌تر به دلیل ساخت قالب با ابعاد کوچک‌تر، کوره پخت کوچک‌تر و دقت بالاتر در ساخت، از عوامل انتخاب ابعاد مناسب و مقرون به صرفه است. بنابراین با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای

هندسی مؤثر و شرایط ساخت، مشخصات هندسی نمونه مطابق جدول ۱ است. در شکل ۱ ابعاد هندسی نمونه سالم ارائه شده است. ابعاد کلی نمونه‌های معیوب نیز مطابق با نمونه سالم خواهد بود. در این نمونه‌ها، ابعاد ناحیه دارای جدایش طبق جدول ۲ است.

جدول ۱. مشخصات ابعادی صفحه انحنا دار

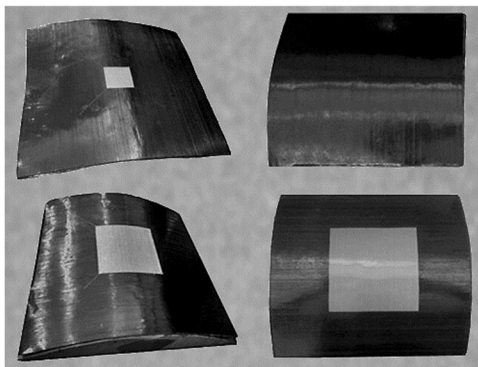
مقدار	مشخصه
۸ لایه با ضخامت یکسان	تعداد لایه‌ها
۲	ضخامت کل [mm]
$[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	لایه‌چینی
$300 \times 300$	ابعاد صفحه $[mm^2]$
۳۰۰	شعاع [mm]
۶۰	مقطع کمان [deg]
۰٪ - ۱۵٪ - ۳۰٪ - ۴۵٪	ابعاد جدایش بر حسب مساحت
در مرکز صفحه	محل جدایش در سطح صفحه
بین لایه چهارم و پنجم	محل جدایش در لایه‌ها



شکل ۱. ابعاد هندسی نمونه

جدول ۲. ابعاد جدایش در نمونه‌های دارای جدایش بین لایه‌ای

شماره نمونه	درصد جدایش از کل سطح	ابعاد جدایش [mm <sup>2</sup> ]
دوم	۱۵	۴۷ × ۴۵
سوم	۳۰	۱۰۴ × ۱۰۰
چهارم	۴۵	۱۴۰ × ۱۳۵



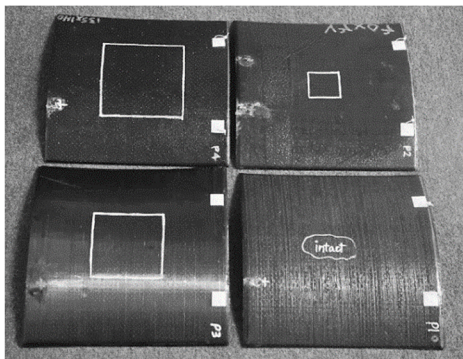
شکل ۲. مرحله ساخت نمونه‌ها

خواص مکانیکی الیاف کربن تک جهته به همراه رزین، که در قطعات مورد استفاده قرار گرفته، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. خواص مکانیکی صفحه انحنا دار

مقدار	مشخصه	
۱۰۰	$E_1$	مدول الاستیسیته [GPa]
۱۰	$E_2 = E_3$	
۸	$G_{12} = G_{13}$	مدول برشی [GPa]
۵	$G_{23}$	
۰/۳	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ضریب پواسون
۰/۳	$\nu_{23}$	
۱۴۵۰	$\rho$	چگالی [kg/m <sup>3</sup> ]

در شکل ۳ قطعات پس از لایه‌گذاری نهایی نشان داده شده است. مرز ناحیه دارای جدایش، توسط رنگ سفید مشخص شده‌اند.



شکل ۳. نمونه‌های نهایی شده

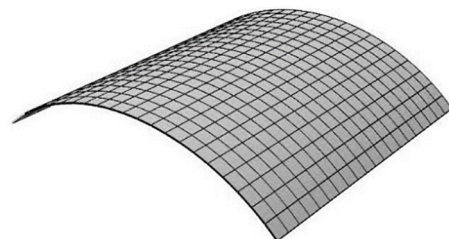
### ۳. روش ساخت

نمونه‌های کامپوزیتی به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. در این روش الیاف کربن توسط رزین مایع آغشته شده و با قرار دادن آن بر روی قالب باز، سطحی صاف خواهد داشت. نسبت ترکیب وزنی الیاف به ماتریس ۶۰ به ۴۰ است، که خود ماتریس از رزین اپوکسی و هاردنر تشکیل شده است. معمولاً درصد پایینی از ماتریس را هاردنر تشکیل می‌دهد. در ساخت نمونه‌های حاضر در حدود ۴ درصد از حجم ماتریس را هاردنر تشکیل داده است.

پس از انجام لایه‌گذاری، یک لایه نازک پلاستیکی بر سطح بالایی و پایینی قطعه به منظور صاف شدن سطوح و همچنین به جهت محافظت از آنها، قرار داده می‌شود. به منظور جداسازی لایه پلاستیکی محافظ، پیش از قرار دادن آن بر روی سطوح قطعه‌ها، از واکس‌های جداکننده استفاده می‌گردد. قطعات در کوره به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت دو ساعت نیز در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد پخت می‌گردند، پس از انجام مرحله پخت در کوره، قطعه به تدریج سرد می‌شود. به منظور ساخت قطعات دارای جدایش بین لایه‌ای، در مرحله لایه‌گذاری در بین لایه‌های مد نظر یعنی لایه ۴ و لایه ۵، از یک ورقه نازک لاستیک با ابعاد مطلوب استفاده می‌شود. مراحل قالب‌گیری و همچنین پخت همانند نمونه سالم صورت می‌گیرد. در شکل ۲ تمامی نمونه‌ها، در مرحله ساخت نشان داده شده‌اند.

## ۴. مدل المان محدود

گام اول در ایجاد مدل المان محدود، ایجاد هندسه صحیح و مش‌بندی مناسب است. هر دو نوع المان صفحه‌ای و سه بعدی در ایجاد مدل، جهت انجام شبیه‌سازی قابلیت استفاده دارند. المان‌های صفحه‌ای جهت مدل‌سازی رفتار خمشی مناسب هستند و برای صرفه‌جویی در مدت زمان حل کاربرد دارند. المان‌های سه‌بعدی علاوه بر بررسی تنش خمشی، جهت تخمین بهتر تنش‌های درون لایه‌ای مناسب هستند و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهند. اگر المان صفحه‌ای انتخاب گردد، خواص همگن اورتوتروپیک زمانی استفاده می‌شوند که در راستای ضخامت صفحه تنها یک المان پوسته‌ای یا صفحه‌ای به کار رود. جهت استفاده از خواص مختص هر لایه لازم است که در راستای ضخامت هر لایه تنها یک المان پوسته‌ای یا صفحه‌ای به کار رود. معمولاً دو نوع المان صفحه‌ای وجود دارد که یکی از آنها دارای چهار گره، از مرتبه اول<sup>۲</sup> و نوع دوم، هشت گره‌ای و از مرتبه دوم<sup>۳</sup> است که استفاده از آن منجر به نتایج دقیق‌تر خواهد شد. همچنین المان‌های سه بعدی قابل کاربرد، دو نوع هستند که یکی مرتبه اول شش وجهی با هشت گره و دومی مرتبه دوم و با بیست گره، که هر دو دارای سه درجه آزادی در هر گره هستند. در مطالعه حاضر از المان سه بعدی مرتبه دوم، جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر استفاده شده است، که در نرم افزار آباکوس<sup>۴</sup> این المان با مشخصه C3D20R نام‌گذاری می‌شود. در شکل ۴ مدل المان محدود صفحه مش‌بندی شده نمایش داده شده است.

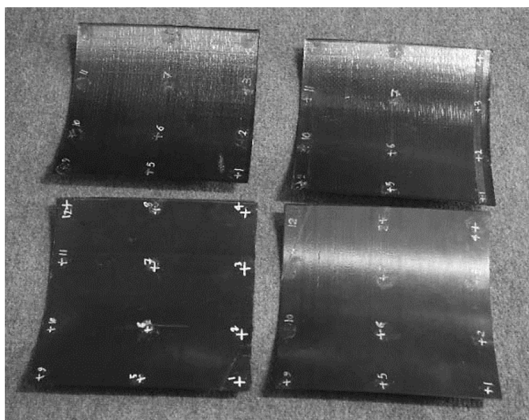


شکل ۴. مدل المان محدود صفحه مش‌بندی شده انحنا دار

شرایط مرزی در انجام تحلیل به صورت آزاد - آزاد<sup>۵</sup> خواهد بود که در واقع به معنای عدم وجود تکیه‌گاه، جهت مقید کردن صفحه است. این حالت تکیه‌گاهی، به علت اختلاف کم نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش مودال، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین ایجاد آن در حالت عملی آسان‌تر است [۹]. در این نوع شرط مرزی، شش مود اول حاصل از شبیه‌سازی عددی، موده‌های صلب سازه هستند.

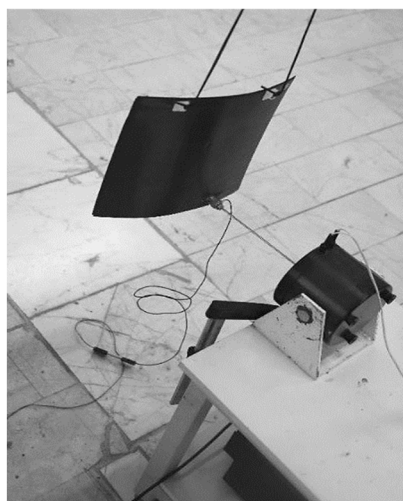
## ۵. انجام آزمایش مودال

جهت انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها، ابتدا ۱۲ نقطه را بر روی آنها به عنوان نقاط اندازه‌گیری<sup>۶</sup>، علامت‌گذاری نموده که فواصل آنها با هم برابرند. تعداد ۳ ردیف ۴ تایی تعداد نقاط علامت‌گذاری است که تشکیل یک شبکه همانند مش‌بندی در نرم‌افزار المان محدود را می‌دهند. به منظور مقایسه نتایج آزمایش هر چهار نمونه، تا حد امکان شرایط کلی آزمایش مانند شرایط تکیه‌گاهی، نقطه تحریک و نقاط اندازه‌گیری برای تمامی نمونه‌ها یکسان است. تحریک تصادفی توسط لرزاننده به دلیل کنترل بهتر بر تحریک اعمالی، مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۵ نحوه علامت‌گذاری برای کلیه قطعات را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نحوه علامت‌گذاری نمونه‌ها

جهت انجام آزمایش، ابتدا توسط دو کش لاستیکی نرم که مقدار سفتی آنها پایین است، صفحه انحنادار کامپوزیتی را آویزان نموده، سپس در نقطه تعیین شده، لرزاننده همراه با یک حسگر نیروسنج توسط چسب مخصوص به صفحه متصل می‌گردد. پس از تحریک، پاسخ‌ها در نقاط علامت‌گذاری شده، توسط شتاب‌سنج ثبت و در رایانه ذخیره می‌گردند. شکل ۶ این چیدمان را نشان می‌دهد.



شکل ۶. چیدمان آزمایش مودال

در جدول ۴ تنظیمات کلی آزمایش ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات تجهیزات و تنظیمات آزمایش

مقدار	مشخصه
Random 10 ~ 1000	سیگنال تحریک
2560 Hz	فرکانس نمونه‌برداری

## ۶. تحلیل نتایج

### ۶-۱. صحت‌سنجی مدل المان محدود

به منظور صحت‌سنجی روش مدل‌سازی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای در نرم‌افزار المان محدود، مدل المان محدود صفحه

مسطح با خواص مکانیکی جدول ۵ و خواص هندسی جدول ۶ با نتایج لین و همکاران [۱۰] که هر دو روش عددی و تجربی را جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی این نمونه به کار برده‌اند، مقایسه می‌گردد. با این روش، انتخاب صحیح پارامترهایی همانند لایه‌چینی، مش‌بندی، نوع المان مورد استفاده برای مدل‌سازی صحیح صفحات کامپوزیتی لایه‌ای تأیید و در طول تحقیق قابل استناد خواهد بود و جهت مدل‌سازی نمونه اصلی در تحقیق نیز کاربرد خواهد داشت.

جدول ۵. خواص مکانیکی صفحه مسطح [۱۰]

مقدار	مشخصه
۱۷۲/۷	$E_1$
۷/۲	$E_1 = E_2$
۳/۷۶	$G_{12} = G_{13}$
۲/۷۱	$G_{23}$
۰/۳	$\nu_{12} = \nu_{13}$
۰/۳۳	$\nu_{23}$
۱۵۶۶	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]

جدول ۶. مشخصات ابعادی صفحه مسطح [۱۰]

مقدار	مشخصه
۸ لایه با ضخامت یکسان	تعداد لایه‌ها
۱/۵۸	ضخامت کل [mm]
[0°/90°/0°/90°]s	لایه‌چینی
۲۲۵/۵ × ۲۲۵/۵	ابعاد صفحه [mm <sup>2</sup> ]

در جدول ۷، شش فرکانس اول بر حسب هرتز، حاصل از نتایج لین و مدل مطالعه حاضر به همراه درصد خطاها ارائه شده است. مطابق جدول ۷ خطای شبیه‌سازی مدل حاضر در حد قابل قبولی قرار دارد. بنابراین این روش مدل‌سازی، جهت ایجاد مدل المان محدود نمونه‌های مورد نظر قابل استفاده خواهد بود.

جدول ۷. مقایسه فرکانس‌های [Hz] مطالعه حاضر و مرجع

شماره مود	تست تجربی [۱۰]	المان محدود [۱۰]	المان محدود مطالعه حاضر	درصد خطا %
۱	۸۱/۵	۸۳/۵۷	۸۱/۴۲	۰/۰۹۸
۲	۱۰۷/۴	۱۱۸/۴۲	۱۰۹/۸۶	۲/۲۹
۳	۱۹۶/۶	۲۰۷/۷۹	۱۹۹/۳۸	۱/۴۱
۴	۲۸۵/۵	۳۲۹/۴۱	۳۰۲/۶	۵/۹۹
۵	۳۸۲/۵	۴۱۹/۸۳	۳۹۱/۵۵	۲/۳۷
۶	۵۳۱	۵۴۶/۹۳	۵۳۷/۱۶	۱/۱۶

به خوبی مشخص است که با افزایش مساحت ناحیه جدایش، درصد کاهش مقادیر فرکانس‌های طبیعی رو به افزایش بوده، که این موضوع در برخی از مودها کاملاً مشهود است.

## ۶-۲. نتایج تحلیل المان محدود نمونه‌ها

نتایج فرکانس‌های طبیعی بر حسب هرتز حاصل از تحلیل المان محدود برای هر چهار نمونه بر حسب هرتز در جدول ۸ ارائه شده است. در جدول ۹ نیز درصد تغییر فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های دارای عیب نسبت به نمونه سالم محاسبه شده است.

جدول ۸. مقایسه فرکانس‌های حاصل از المان محدود نمونه‌ها [Hz]

شماره مود	نمونه اول (سالم)	نمونه دوم (۱۵٪)	نمونه سوم (۳۰٪)	نمونه چهارم (۴۵٪)
۱	۶۱/۱۸۸	۶۱/۱۸۸	۶۱/۱۸۶	۶۱/۱۷۷
۲	۱۰۵/۳۴	۱۰۴/۸۱	۹۸/۲۱	۹۲/۵۱۵
۳	۱۵۸/۴۴	۱۵۸/۴۲	۱۵۷/۳۹	۱۵۶/۶
۴	۲۹۵/۴۷	۲۹۴/۷۳	۲۸۳/۰۲	۲۶۵/۴۲
۵	۳۴۵/۲۱	۳۴۵/۲	۳۴۴/۲۱	۳۴۰/۵۷
۶	۴۲۴/۵۹	۴۲۴/۵۸	۴۲۳/۵۶	۴۲۰/۶۳

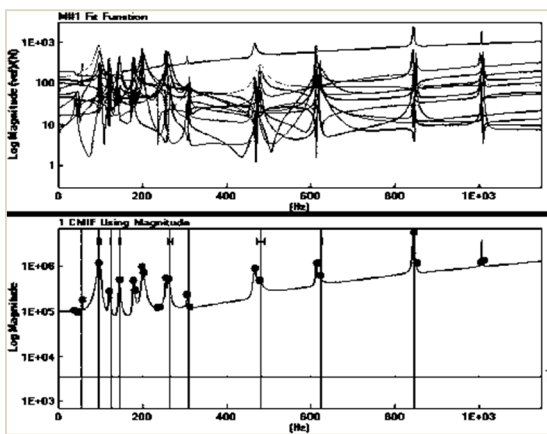
جدول ۹. درصد تغییر فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های معیوب به سالم

شماره مود	نمونه دوم (۱۵٪)	نمونه سوم (۳۰٪)	نمونه چهارم (۴۵٪)
۱	۰	۰/۰۰۳	۰/۰۱۸
۲	۰/۵	۶/۷۷	۱۲/۱۷
۳	۰/۰۱	۰/۳۴۷	۱/۱۶
۴	۰/۲۵	۴/۲۱	۱۰/۱۷
۵	۰/۰۰۳	۰/۲۸	۱/۳۴
۶	۰/۰۰۲	۰/۲۴	۰/۹۳

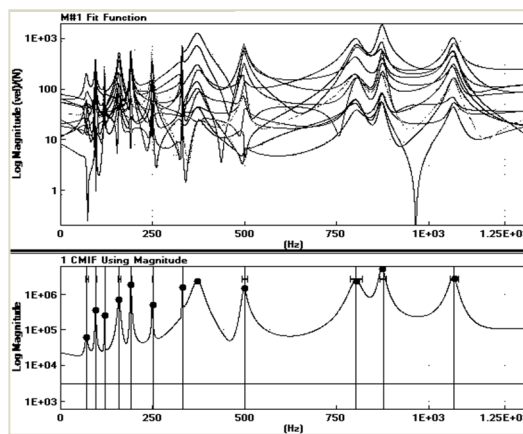
### ۳-۶. نتایج آزمایش مودال

پس از انجام اندازه‌گیری‌ها ۱۲ تابع پاسخ فرکانسی مجزا حاصل خواهد شد که ماتریس تابع پاسخ فرکانسی را تشکیل داده و با انجام برازش منحنی توسط روش CMIF بر روی

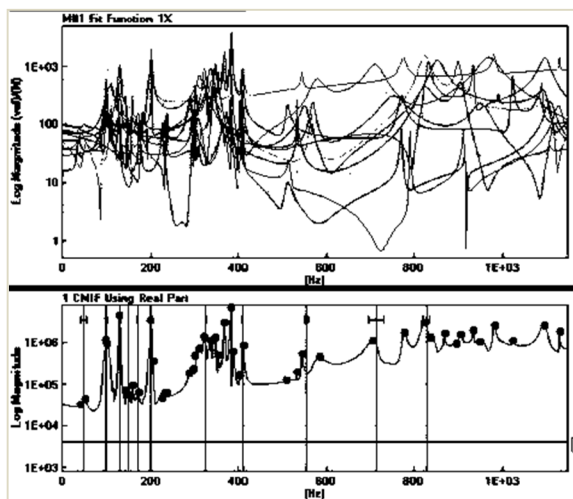
آنها، تابع پاسخ فرکانسی کل، برای سازه به دست می‌آید. فرکانس‌های طبیعی توسط نرم‌افزار تحلیل داده‌های مودال ME Scope، قابل استخراج هستند. در شکل ۷ FRF و برازش منحنی مربوط به نمونه‌ها ارائه شده است.



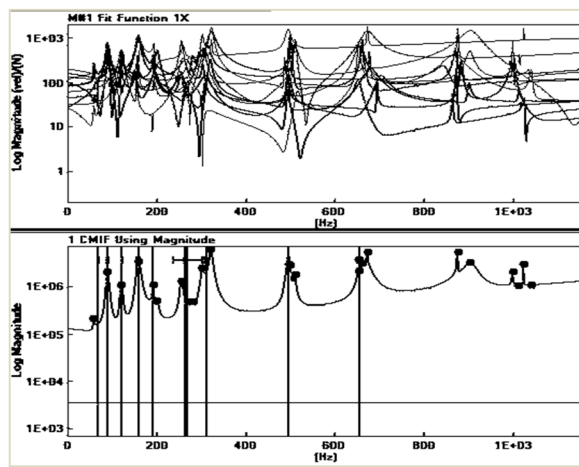
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

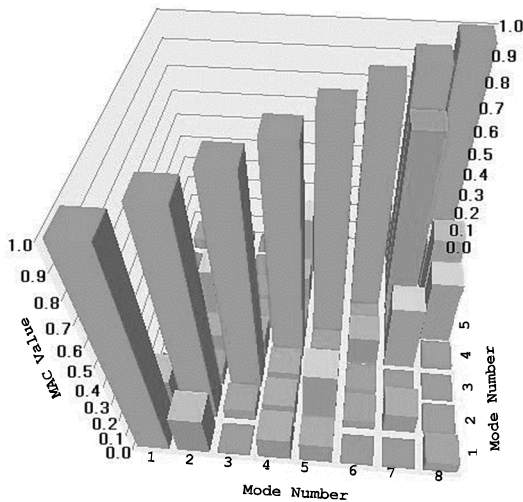
شکل ۷. FRF و برازش منحنی مربوط به: الف) نمونه اول، ب) نمونه دوم، ج) نمونه سوم، د) نمونه چهارم

است، این موضوع ناشی از شرایط تعامد بین مدهای متفاوت است.

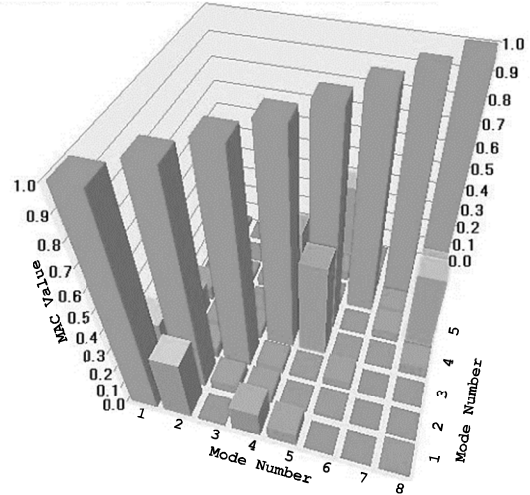
در شکل ۸ نمودار MAC مربوط به ۴ نمونه برای هشت مود اول استخراج شده قابل مشاهده است.

جهت صحت‌سنجی نتایج آزمایش مودال، از نمودار  $MAC^y$  استفاده می‌گردد، در این نمودار مقدار یک، نشان‌دهنده یکسان بودن دو شکل مود است. این درحالی است که در دو مود متفاوت، مقادیر حاصل شده برای آنها نزدیک به صفر

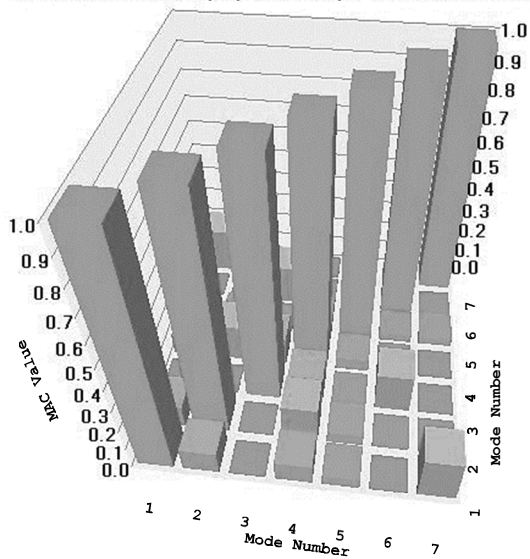




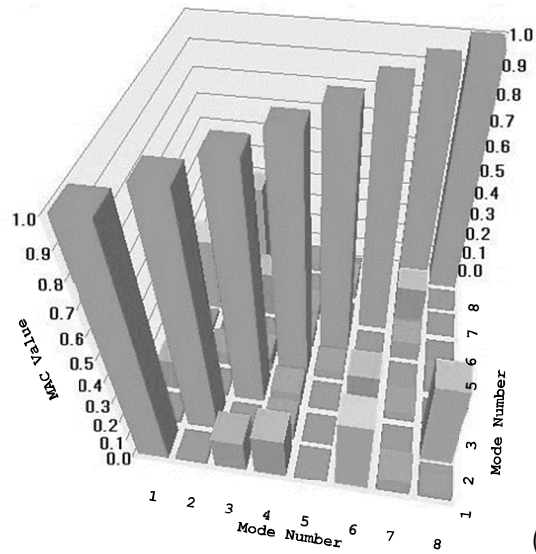
(الف)



(ب)



(ج)

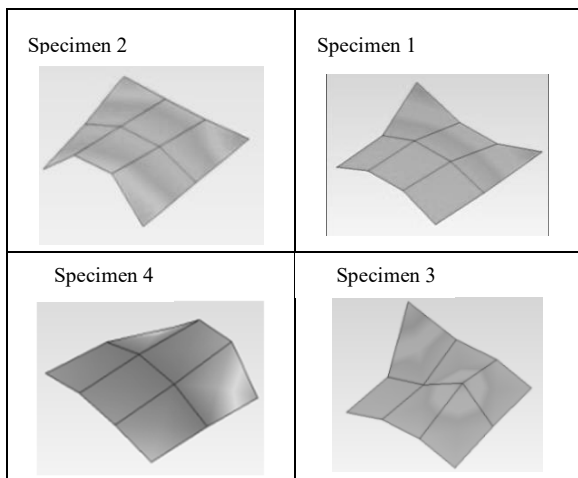


(د)

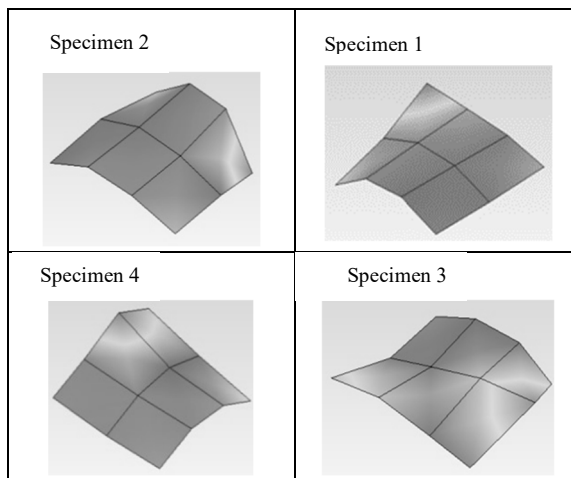
شکل ۸. نمودار MAC برای نمونه‌ها، الف) نمونه اول، ب) نمونه دوم، ج) نمونه سوم، د) نمونه چهارم

نیز افزایش می‌یابد. همچنین در مودهایی که از خرابی تأثیر یافته‌اند، تغییر شکل مود در محدوده خرابی نمایان بوده و شکل موده‌های جدیدی حاصل شده‌اند.

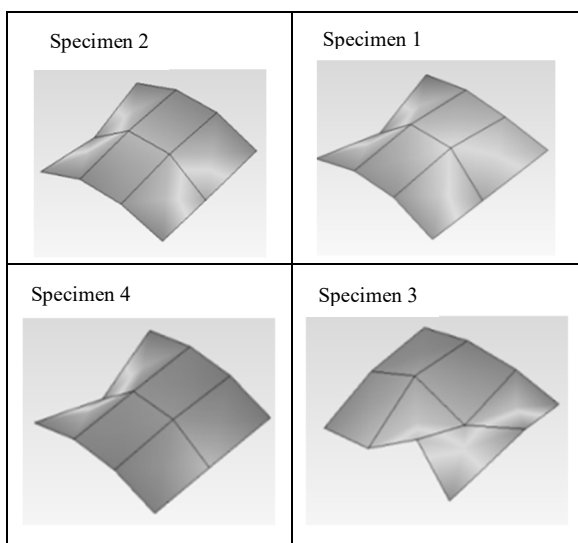
شکل ۹، چهار شکل مود به‌دست آمده از تست را برای ۴ نمونه نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل مودها مشاهده می‌شود با افزایش درصد عیب در نمونه‌ها، تغییر در شکل مود



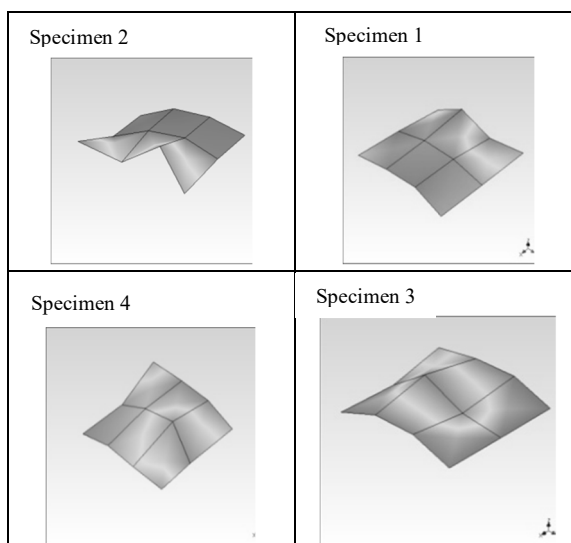
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹. چهار شکل مود اول برای نمونه‌ها، (الف) شکل مود اول، (ب) شکل مود دوم، (ج) شکل مود سوم، (د) شکل مود چهارم

سالم کاهش چشمگیری می‌یابند، همچنین این تغییرات توسط تست مودال نسبت به روش المان محدود، بیشتر قابل لمس هستند.  
۲- برخی از فرکانس‌های طبیعی دچار تغییر نشده و یا مقدار تغییرشان بسیار ناچیز است. علت این موضوع می‌تواند به محل قرارگیری عیب و نوع شکل مود، مرتبط باشد.

در جدول ۱۰ فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمایش مودال ارائه شده است.

در جدول ۱۱ نیز درصد تغییر فرکانس‌های طبیعی نمونه‌های معیوب نسبت به نمونه سالم که از آزمایش به‌دست آمده‌اند، ارائه شده است.

از نتایج آزمایش مودال می‌توان نکات زیر را بیان نمود:

۱- با افزایش مساحت ناحیه دارای جدایش در نمونه‌های معیوب مقادیر برخی از فرکانس‌های طبیعی، نسبت به نمونه

جدول ۱۰. مقایسه فرکانس‌های حاصل از آزمایش مودال [Hz]

شماره مود	نمونه اول (سالم)	نمونه دوم (%۱۵)	نمونه سوم (%۳۰)	نمونه چهارم (%۴۵)
۱	۵۹/۵	۵۸/۲	۵۶/۸	۵۵
۲	۹۶/۵	۹۲/۳	۸۹/۴	۸۱/۷
۳	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۲	۱۲۳/۳
۴	۱۶۰	۱۵۶	۱۴۶	۱۵۱
۵	۱۹۲/۶	۱۹۰/۴	۱۸۸/۴	۱۸۱/۳
۶	۲۷۱/۸	۲۵۸/۵	۲۴۲	۲۲۲/۲
۷	۳۳۲	۳۱۲	۳۰۸	۳۰۰
۸	۴۷۸	۴۵۳	۴۱۹/۵	۳۷۷/۳

جدول ۱۱. درصد تغییر بین نمونه‌های معیوب و سالم حاصل از تست مودال

شماره مود	نمونه دوم (%۱۵)	نمونه سوم (%۳۰)	نمونه چهارم (%۴۵)
۱	۲/۱۸	۴/۵۴	۷/۵۶
۲	۴/۳۵	۷/۳۶	۱۵/۳۴
۳	۰	۱/۶۶	۲/۷۵
۴	۲/۵	۸/۷۵	۵/۶۳
۵	۱/۱۴	۲/۱۸	۵/۷۳
۶	۴/۸۹	۱۰/۹۶	۱۸/۲۵
۷	۶/۰۲	۷/۲۳	۹/۶۳
۸	۵/۲۳	۱۲/۲۴	۲۱/۰۷

## ۷. مقایسه نتایج آزمایش مودال و المان محدود

با توجه به اهمیت نتایج آزمایشگاهی، شماره مودها بر اساس نتایج آن، مبنا در نظر گرفته شده و درصد اختلاف نتایج المان

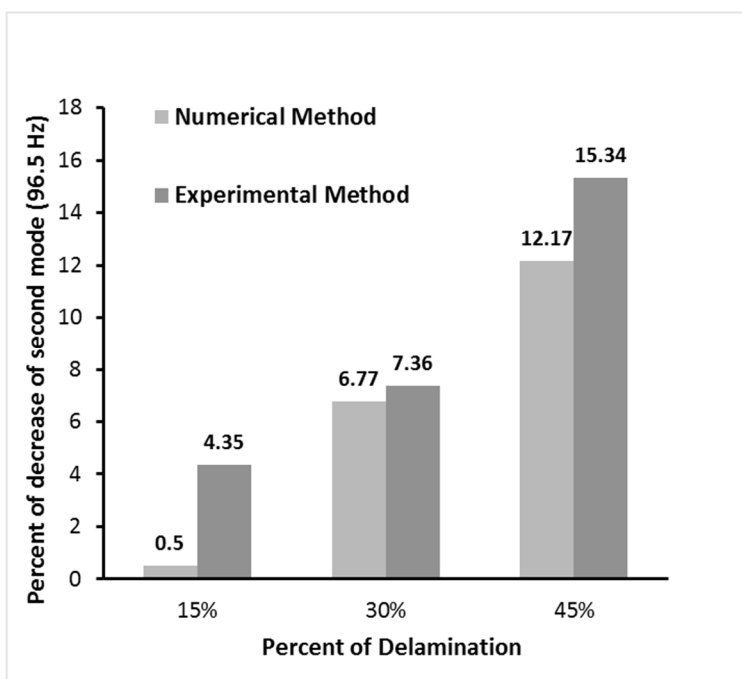
محدود، با آن مقایسه می‌گردد. در جدول ۱۲، درصد اختلاف نتایج هر دو روش با هم مقایسه شده است.

جدول ۱۲. مقایسه درصد اختلاف بین روش عددی با روش تجربی

شماره مود	نمونه اول (سالم)	نمونه دوم (%۱۵)	نمونه سوم (%۳۰)	نمونه چهارم (%۴۵)
۱	۲/۸۴	۵/۱۳	۷/۷۲	۱۱/۲۳
۲	۸/۶۱	۱۳/۵	۹/۸۵	۱۳/۲۳
۳	-	-	-	-
۴	۰/۹۹	۱/۵۵	۷/۸	۳/۷۲
۵	-	-	-	-
۶	۸/۴۳	۱۲/۲۹	۱۶/۹۵	۱۹/۴۵
۷	۳/۹۱	۱۰/۶۴	۱۱/۷۶	۱۳/۵۲
۸	۱۱/۱۷	۷/۸۱	۰/۹۷	۱۱/۴۸

جهت دستیابی به یک الگوی مناسب جهت تشخیص اثر عیب، مودهایی که از هر دو روش به طور نسبی یک روند کاهش مقدار مشابهی را دنبال می‌کنند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. به طور مثال مود دوم در روش عددی با افزایش ناحیه دارای جدایش، مقدار فرکانس آن رو به کاهش است. همین روند برای مود دوم توسط روش آزمایشگاهی قابل مشاهده است. شکل ۱۰ نتایج درصد تغییر مود دوم را برای نمونه‌های دارای عیب نسبت به نمونه سالم توسط هر دو روش با یکدیگر مقایسه نموده است. مبنای انتخاب مقدار پایه برای مود دوم، از نتایج آزمایشگاهی برای نمونه سالم است، که برابر ۹۶/۵ هرتز است.

با مقایسه نتایج دو روش مشاهده می‌گردد که دو فرکانس طبیعی سوم و پنجم حاصل از آزمایش مودال مطابق با جدول ۱۰، توسط روش المان محدود حاصل نشده‌اند. در واقع برخی از فرکانس‌های طبیعی توسط روش المان محدود شناسایی نشده‌اند، که یک علت مهم می‌تواند مدل بسیار ایده‌آل در اتصال لایه‌ها به یکدیگر باشد. می‌توان گفت علت دیگر تفاوت‌های ساختی بین نمونه واقعی و مدل المان محدود است. اکنون با مقایسه مودهای هم مقدار از دو روش، می‌توان تغییرات فرکانسی نمونه‌های معیوب را نسبت به نمونه سالم بررسی نمود و اثر وجود عیب را ردیابی نمود.



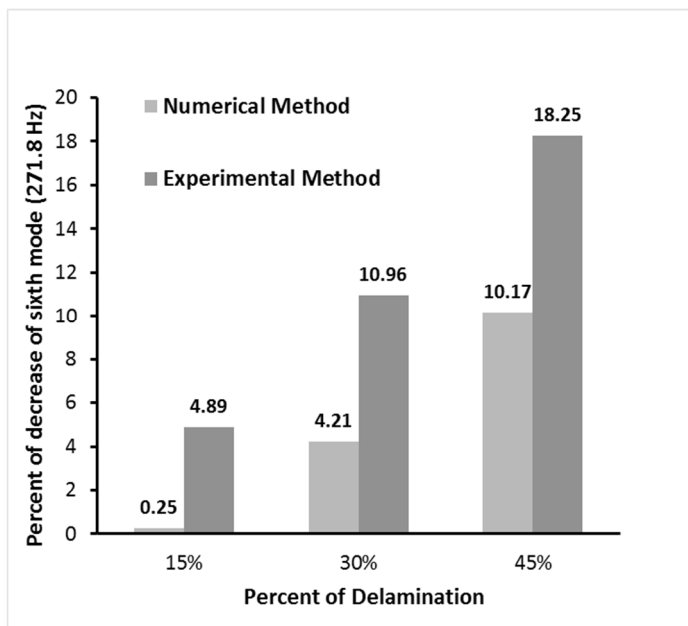
شکل ۱۰. مقایسه روند کاهش مود دوم توسط هر دو روش

دو روش بر تغییر مقدار آنها، مطابقت دارند، توسط روش آزمایشگاهی مودهای دیگری نیز مشاهده می‌گردند که درصد کاهش در مقدار آنها، ناشی از وجود عیب است. به طور مثال مود هشتم با مقدار ۴۷۸ هرتز نیز تغییر چشمگیری را نشان داده است.

بررسی روند کاهش برای مود ششم با مقدار مبنای ۲۷۱/۸ هرتز نیز نتایج مشابهی مانند مود دوم خواهد داشت. نمودار شکل ۱۱ این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. از هر دو روش برای این مود، روند کاهشی یکسانی حاصل شده که بر اساس آن، مقادیر این مود با افزایش ناحیه جدایش در نمونه‌ها رو به کاهش هستند. علاوه بر مودهایی که نتایج هر

شدن نتایج مود اول برای انجام تحلیل می‌گردد. به همین علت جهت انجام مقایسه نتایج روش‌ها و بررسی وجود عیب از مودهای بالاتر از مود اول استفاده شده است [۱۱].

اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و روش عددی در مود اول، به دلیل عدم ایجاد کامل شرایط تکیه‌گاهی کاملاً آزاد برای نمونه‌ها در عمل است، این موضوع اغلب موجب غیر کاربردی



شکل ۱۱. مقایسه روند کاهش مود ششم توسط هر دو روش

## ۸. نتایج

در تحقیق حاضر به مطالعه ارتعاش آزاد یک صفحه کامپوزیتی کربن/ اپوکسی انحنادار که دارای جدایش بین لایه‌ای است، پرداخته شد. جهت بررسی رفتار ارتعاشی و استخراج خواص دینامیکی از روش‌های عددی و آزمایشگاهی استفاده گردید.

از هر دو روش، نتایج نسبتاً خوب و قابل قبولی در بررسی اثر تغییر ابعاد ناحیه دارای جدایش بین لایه‌ای در مقادیر فرکانس‌های طبیعی حاصل گردید. نتایج حاصل از مطالعه حاضر به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

۱- نتایج هر دو روش عددی و آزمایشگاهی در نمونه سالم و در مودهای با مقادیر فرکانسی پایین‌تر تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر داشته اما در فرکانس‌های بالاتر خطا افزایش یافته است. می‌توان از نتایج تست مودال و به‌کارگیری روش‌های

خطای بین نتایج المان محدود و روش آزمایشگاهی در محدوده قابل قبولی قرار دارد. نکته جالب توجه در نتایج نمونه سالم هر دو روش است که در فرکانس طبیعی با مقادیر پایین‌تر از مطابقت خوبی برخوردارند و در فرکانس‌های بالایی این اختلاف افزایش می‌یابد که به‌طور منطقی این موضوع صحیح است. اما با افزایش مساحت ناحیه دارای جدایش اختلاف بین نتایج دو روش افزایش می‌یابد. در نمونه‌های دارای جدایش تطابق مودهای با فرکانس بالاتر قابل مشاهده است که البته این موضوع به دلیل تشخیص ضعیف‌تر روش المان محدود در شناسایی اثر ناحیه دارای عیب بر روی فرکانس‌های طبیعی و همچنین تغییرات به وجود آمده در میرایی سازه است. با توجه به نتایج می‌توان چنین تفسیر نمود که با افزایش ناحیه جدایش، خطای روش المان محدود در تشخیص تغییرات حاصل از عیوب بیشتر خواهد شد.

به روزرسانی مدل به منظور بهبود نتایج مدل المان محدود، جهت همگرایی هر دو روش استفاده گردد.

۲- با افزایش درصد ناحیه دارای جدایش بین لایه‌های، فرکانس‌های طبیعی پوسته کامپوزیتی کاهش خواهند یافت. بنابراین وجود عیب و رشد آن تأثیر بیشتری بر کاهش مقادیر فرکانس طبیعی دارد.

۳- با افزایش مساحت ناحیه دارای عیب برخی از مودهای فرکانسی دستخوش تغییر بیشتری در مقادیرشان خواهند شد که علت آن، موقعیت عیب است. همچنین برخی از مودها به علت فاصله از ناحیه عیب کمتر دچار تغییر در مقادیرشان خواهند شد.

۴- استخراج مودهای بالاتر با استفاده از هر دو روش، مودهای تأثیرپذیر بیشتری را نمایان خواهد ساخت. به دلیل نزدیک شدن به مقدار فرکانس طبیعی مود موضعی حاصل از عیب، درصد تأثیرپذیری با افزایش مساحت ناحیه دارای جدایش بین لایه‌ای، افزایش خواهد یافت و مودهای متأثر از عیب دچار کاهش بیشتری در مقادیر خود خواهند شد. بنابراین یافتن مودهای بالاتر در تشخیص دقیق‌تر عیب، مؤثر است.

۵- با استفاده از شکل مودهای طبیعی، می‌توان موقعیت عیب را شناسایی نمود. بدین ترتیب که در اثر وجود عیب،

## ۹. مأخذ

تغییر شکل مودهای تأثیرپذیر و تأثیرناپذیر را بررسی و موقعیت عیب را شناسایی نمود.

۶- نتایج روش آزمایشگاهی به دلیل، انجام آزمایش بر روی سازه در شرایط فیزیکی واقعی خود از اعتبار و برتری بالاتری نسبت به روش‌های المان محدود برخوردار است. به همین دلیل مبنای نتایج، آزمایش مودال سازه است.

۷- انحراف نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی ممکن است، ناشی از غیریکسان بودن نمونه‌ها و تفاوت‌های ناشی از روش ساخت، مانند وجود حباب، حفره، تغییر ضخامت، صافی سطح نامناسب و ... باشد. همچنین وجود بعضی از خطاهای اندازه‌گیری در هنگام انجام آزمایش که از جمله آنها می‌توان به نوفه‌های اندازه‌گیری، تفاوت در موقعیت نصب شتاب‌سنج‌ها و موقعیت تحریک هر چند ناچیز، جرم سنسورها، اشاره نمود. اما در مدل‌های المان محدود که به‌طور معمول دارای خواص مکانیکی کامل‌تری بوده و به صورت ایده‌آل مدل می‌شوند، موارد فوق لحاظ نمی‌گردد، از این‌رو به علت عدم حس فیزیکی از شرایط واقعی سازه، نتایج حاصل از روش عددی دارای تفاوت‌هایی با نتایج آزمایشگاهی است.

۸- با افزایش ناحیه جدایش، خطای روش المان محدود در تشخیص تغییرات حاصل از عیوب افزایش خواهد یافت.

- [1] Parhi, P. K., SK and Bhattacharyya, and P. K. Sinha, "Hygrothermal effects on the dynamic behavior of multiple delaminated composite plates and shells", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.248, no.2, 2001, pp.195-214.
- [2] Kim, Jun-Sik, and Maenghyo Cho, "Efficient higher-order shell theory for laminated composites with multiple delaminations", *AIAA journal*, Vol.41, no.5, 2003, pp.941-950.
- [3] Yang, J. H., and Y. M. Fu, "Delamination growth of laminated composite cylindrical shells", *Theoretical and applied fracture mechanics*, Vol.45, no.3, 2006, pp.192-203.
- [4] Achryya, Anjan Kumar, Dipankar Chakravorty, and Amit Karmakar, "Bending characteristics of delaminated composite cylindrical shells—a finite element approach", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.28, no.8, 2009, p.965-978.

- [5] Lee, Sang-Youl, and Dae-Seouk Chung, "Finite element delamination model for vibrating composite spherical shell panels with central cutouts", *Finite elements in analysis and design*, Vol.46, no.3, 2010, pp.247-256.
- [6] Sultan R., Guirguis S., Younes M., El-Soaly E. (2012) " Delamination detection of composite laminates using natural frequency vibration method ", *International Journal of Mechanical engineering and Robotics Research*, 2012, vol.1, pp.286-296.
- [7] Sahu, S. K., and P. K. Datta, "Parametric resonance characteristics of laminated composite doubly curved shells subjected to non-uniform loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.20, no.18, 2001, pp.1556-1576.
- [8] Ratnaparkhi, Sharayu U., and S. S. Sarnobat, "Vibration analysis of composite plate", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.3, no.1, 2013, pp.377-380.
- [9] Mishra, Itishree, and Shishir Kumar Sahu, "Modal analysis of woven fiber composite plates with different boundary conditions", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol.15, no.01, 2015, p.1540001.
- [10] Lin, D. X<sup>††</sup>, R. G<sup>††</sup> Ni, and R. D. Adams, "Prediction and measurement of the vibrational damping parameters of carbon and glass fibre-reinforced plastics plates", *Journal of composite materials*, Vol.18, no.2, 1984, pp.132-152.
- [11] Ullah, Israr, and Jyoti K. Sinha, "A novel method for delamination detection in composites", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2, no.1, 2013): 34-42.

پی نوشت:

- 
1. Delamination
  2. Linear order
  3. Quadratic order
  4. ABAQUS
  5. Free-free
  6. Measurement points
  7. Modal Assurance Criterion