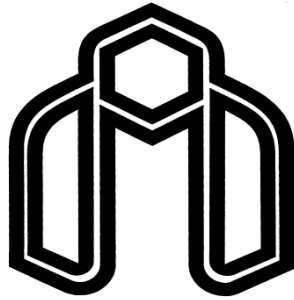


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکترونیک

عیب‌یابی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده

مشبک با استفاده از روش انرژی کرنشی

دانشجو:

محسن تاجیک

اساتید راهنما:

دکتر امیر جلالی

دکتر مهدی قناد کهتویی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

ب

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محسن تاجیک

تحت عنوان:

عیب یابی پوسته های استوانه ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک با استفاده از روش انرژی کرنشی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر امیر جلالی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی قناد کهتویی

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر رضا طاهریان		نام و نام خانوادگی : دکتر اردشیر کرمی محمدی
			نام و نام خانوادگی : دکتر محمد جعفری

تقدیم به

پدرم، به استواری کوه

مادرم، به صمیمیت باران

و همسر آینده ام!

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس بیکران خداوند، لازم می‌دانم از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به‌ویژه اساتید محترم آقای دکتر مهدی قناد کهنوی و آقای دکتر امیر جلالی که با راهنمایی‌های مدبرانه، نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، همچنین، از اساتید محترم، آقای دکتر نوازی از اساتید دانشکده هوا-فضا دانشگاه صنعتی شریف و آقای دکتر غلام حسین رحیمی از اساتید دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس که با حمایت‌های دلسوزانه خود، زمینه را برای انجام آزمایشات این رساله فراهم کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب محسن تاجیک دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - گرایش مکاترونیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "عیب-یابی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک با استفاده از روش انرژی کرنشی" تحت راهنمایی دکتر امیر جلالی و دکتر مهدی قناده کهنهتویی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده‌است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده‌است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

اهمیت داشتن توانایی برای نظارت بر سلامت ساختاری سازه و شناسایی آسیب در کمترین زمان ممکن، یکی از مهمترین دغدغه‌های مهندسين خصوصاً در رشته‌های مکانیک و هوافضا می‌باشد. این اهمیت، ناشی از آن است که آسیب و تخریب یک سازه در حین کار می‌تواند خسارات مالی و جانی بسیار شدید و بعضاً جبران ناپذیری را به دنبال داشته باشد. یکی از روش‌های مورد توجه در این عرصه، روش شاخص عیب انرژی کرنشی با استفاده از تغییرات در خصوصیات ارتعاشی سازه است. اساس این روش بر این اصل استوار است که پارامترهای مودال سازه (مانند فرکانس، شکل مد و میرایی مودال) تابع خواص فیزیکی (مانند جرم، سختی و دمپینگ) آن سازه هستند که تغییر این خواص باعث تغییر انرژی کرنشی سازه می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان از مقایسه انرژی کرنشی سازه در دو حالت سالم و معیوب، محل عیب را شناسایی نمود.

هدف از تحقیق حاضر، عیب‌یابی پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک با استفاده از روش انرژی کرنشی است. در ابتدا، به معرفی اجمالی سازه‌های کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مشبک و مزایا و کاربردهای آنها نسبت به دیگر سازه‌ها پرداخته می‌شود. سپس، برخی از عیوب متداول در سازه‌های کامپوزیتی توضیح داده شده است. در ادامه، ضمن مروری اجمالی بر فرآیند آنالیز مودال سازه‌ها، فرآیند عیب‌یابی به کمک آنالیز مودال و پیشینه‌ای از کارهای انجام شده، شرح داده شده است. سپس تئوری و روابط مورد نیاز برای استخراج روش انرژی کرنشی مودال پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک شش ضلعی به همراه شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده و از آن به شکل عددی و تجربی برای تشخیص عیب استفاده می‌شود. نتایج حاصل از بررسی شاخص عیب بر روی مدل المان محدود و تجربی نشان می‌دهد، این شاخص با وجود نویزهای بوجود آمده در اثر تست، به خوبی قادر به شناسایی ترک ایجاد شده در آن می‌باشد.

فهرست مطالب

چکیده

.....خ

.....د فهرست مطالب

.....ز فهرست اشکال

فهرست

.....ط جداول

.....۱۷ فصل ۱. مقدمه

.....۲ ۱-۱- تعریف مسئله و ضرورت انجام تحقیق

.....۷ ۱-۲- نوآوری و روش انجام تحقیق

.....۹ ۱-۳- اهداف مورد انتظار تحقیق

.....۹ ۱-۴- ساختار کلی پایان نامه

.....۱۱ فصل ۲. ادبیات تحقیق

.....۱۲ ۱-۲- سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک

.....۱۶ ۱-۱-۲- مزایا و کاربردهای سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک

.....۱۷ ۲-۲- مروری بر آنالیز مودال

.....۲۰ ۱-۲-۲- آماده سازی سازه برای تست

.....۲۳ ۲-۲-۲- مکانیزم تحریک سازه

.....۲۷ ۲-۲-۳- اندازه‌گیری پاسخ

.....۳۰ ۲-۲-۴- اکتساب داده و پردازش آنها

۳۲	۳-۲- ارزیابی اولیه داده‌های FRF اندازه‌گیری شده.....
۳۵	۴-۲- معیار اطمینان مودال.....
۳۶	۵-۲- عیب‌یابی مودال سازه‌ها.....
۳۸	۶-۲- سابقه تحقیق.....
۴۸	فصل ۳. روش تحقیق.....
۴۹	۱-۳- استخراج معادلات.....
۵۱	۳-۱-۱- معادلات نیروهای تقویت‌کننده‌ها.....
۵۴	۳-۱-۲- معادلات گشتاورهای تقویت‌کننده‌ها.....
۵۷	۳-۱-۳- سختی تقویت‌کننده‌ها در سلول واحد نمونه.....
۵۸	۳-۱-۴- سختی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی در سلول واحد نمونه.....
۶۱	۳-۱-۵- سختی کلی سازه.....
۶۱	۳-۱-۶- انرژی کرنشی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک.....
۶۵	۳-۱-۷- شاخص عیب انرژی کرنشی.....
۶۸	۳-۱-۸- روش مشتق‌گیری عددی DQM.....
۷۱	فصل ۴. تحلیل عددی، نتایج و بحث.....
۷۲	۴-۱- مدل‌سازی المان محدود پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک.....
۷۴	۴-۱-۱- مش‌بندی سازه.....
۷۵	۴-۱-۲- شرایط مرزی.....
۷۵	۴-۱-۳- شبیه‌سازی سازه معیوب.....
۷۶	۴-۱-۴- تحلیل المان محدود سازه.....
۷۹	۴-۲- پیاده‌سازی روش شاخص عیب انرژی کرنشی مودال.....

۷۹.....	۳-۴- نتایج بدست آمده از آنالیز المان محدود.....		
۸۵.....	فصل ۵. تحلیل تجربی، نتایج و بحث.....		
۸۶.....	۱-۵- انواع روش‌های ساخت پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده.....		
۸۶.....	۱-۱-۵- پیچش نیمه‌ماشینی الیاف برای ساخت پوسته‌های تقویت شده.....		
۸۷.....	۲-۱-۵- پیچش ماشینی الیاف با ماشین‌های معمولی برای ساخت پوسته‌های تقویت شده.....		
۸۸.....	۳-۱-۵- دستگاه جاگذاری الیاف برای ساخت پوسته تقویت شده مورد آزمایش.....		
۹۵.....	۴-۱-۵- مندرل.....		
مورد	نمونه	ساخت	۲-۵-
	۹۵.....	آزمایش.....	
۹۸.....	۳-۵- تست مودال نمونه مورد آزمایش.....		
۹۸.....	۱-۳-۵- نحوه اجرای تست مودال نمونه مورد آزمایش.....		
۱۰۶.....	۲-۳-۵- ایجاد عیب در سازه.....		
۱۰۷.....	۳-۳-۵- نتایج حاصل از تست مودال نمونه مورد آزمایش.....		
۱۰۹.....	۴-۳-۵- بررسی صحت نتایج حاصل از تست مودال نمونه مورد آزمایش.....		
۱۱۳.....	۵-۳-۵- نتایج حاصل از روش انرژی کرنشی مودال بر روی مدل تجربی.....		
۱۱۷.....	فصل ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....		
۱۱۸.....	۱-۶- نتیجه‌گیری.....		
۱۲۰.....	۲-۶- ارائه پیشنهادها.....		
۱۲۱.....	۳-۶- مراجع.....		

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) تصویری از حادثه بوئینگ ۷۳۷ به خاطر وجود چند ترک جزئی در بدنه آن [۱]. ۲
- شکل (۲-۱) سانحه هوایی پرواز ۵۸۷ به خاطر وجود عیب در پوسته بال هواپیما [۱]. ۳
- شکل (۱-۲) تقویت کننده‌هایی با شکل مثلث متساوی‌الاضلاع [۶]. ۱۵
- شکل (۲-۲) تقویت کننده‌هایی با شکل مربع [۶]. ۱۵
- شکل (۳-۲) دماغه موشک سبک از جنش کامپوزیت تقویت شده [۷]. ۱۷
- شکل (۴-۲) آنالیز مودال تئوری و تجربی [۸]. ۱۹
- شکل (۵-۲) نگهداری آزاد دماغه یک موشک برای انجام آنالیز مودال. ۲۱
- شکل (۶-۲) نگهداری بدنه یک هواپیما روی زمین جهت انجام آنالیز مودال. ۲۳
- شکل (۷-۲) الف) چکش و ب) لرزشگر الکترو دینامیکی. ۲۴
- شکل (۸-۲) محتوای فرکانسی ضربه با جنسهای مختلف سر چکش [۹]. ۲۵
- شکل (۹-۲) الف) شتاب سنج پیزو الکترونیک و ب) نیرو سنج پیزو الکترونیک ۲۷
- شکل (۱۰-۲) نمونه‌های دیگری از شتاب‌سنج‌ها و نیرو سنج‌های پیزو الکترونیک. ۲۸
- شکل (۱۱-۲) یک نمونه شتاب سنج لیزری. ۲۸
- شکل (۱۲-۲) پاسخ‌های فرکانسی مربوط به نصب ترانس‌دیوسرها با استفاده از میخ یا پیچ. ۲۹

- شکل (۲-۱۳) پاسخ‌های فرکانسی مربوط به نصب ترانس‌دیوسرها با استفاده از موم. ۳۰
- شکل (۲-۱۴) پاسخ‌های فرکانسی مربوط به نصب ترانس‌دیوسرها با استفاده از آهنربا. ۳۰
- شکل (۲-۱۵) یک آنالایزر ۳۴ کاناله به همراه تجهیزات نصب آن به کامپیوتر. ۳۱
- شکل (۲-۱۶) مجموعه آماده برای تست مودال با تحریک چکش [۱۱]. ۳۲
- شکل (۲-۱۷) مجموعه آماده برای تست مودال با تحریک لرزشگر [۱۱]. ۳۲
- شکل (۲-۱۸) یک نمونه پوسته مخروطی با شبکه تقویت‌های شش ضلعی [۱۴]. ۳۹
- شکل (۲-۱۹) یک نمونه پوسته استوانه‌ای با شبکه تقویت‌های شش ضلعی [۱۴]. ۳۹
- شکل (۲-۲۰) نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده توسط شرکت *CRISMB* [۱۸]. ۴۱
- شکل (۳-۱) مدل یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه دستگاه مختصات استوانه‌ای. ۵۰
- شکل (۳-۲) دستگاه مختصات کارت‌زین یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک. ۵۰
- شکل (۳-۳) دیاگرام آزاد نیروهای تقویت کننده‌ها. ۵۳
- شکل (۳-۴) گشتاورهای اعمالی در کل پوسته و تقویت کننده‌ها. ۵۵
- شکل (۳-۵) گشتاور اعمالی در کل پوسته. ۵۵
- شکل (۳-۶) گشتاور اعمالی در کل تقویت کننده‌ها. ۵۶
- شکل (۳-۷) دیاگرام آزاد گشتاورهای تقویت کننده‌ها. ۵۶
- شکل (۳-۸) لایه‌چینی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی [۷۸]. ۵۹
- شکل (۳-۹) دستگاه مختصات عمومی و اصلی در یک پوسته تک لایه [۷۸]. ۶۰
- شکل (۳-۱۰) مدل یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه دستگاه مختصات استوانه‌ای. ۶۳

- شکل (۳-۱۱) دستگاه مختصات کارتزین یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه
المان بندی و سلول واحد نمونه آن..... ۶۴
- شکل (۴-۱) الف) پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای و ب) تقویت کننده‌های مشبک شش ضلعی..... ۷۲
- شکل (۴-۲) مدل نهایی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی..... ۷۳
- شکل (۴-۳) مش بندی پوسته استوانه‌ای تقویت شده..... ۷۵
- شکل (۴-۴) مدل المان محدود سازه معیوب..... ۷۶
- شکل (۴-۵) شکل مدهای اول و دوم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک..... ۷۷
- شکل (۴-۶) شکل مدهای سوم و چهارم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک..... ۷۷
- شکل (۴-۷) شکل مدهای پنجم و ششم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک..... ۷۸
- شکل (۴-۸) شکل مدهای هفتم و هشتم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک..... ۷۸
- شکل (۴-۹) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مد اول سازه (FEM)..... ۸۰
- شکل (۴-۱۰) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۲ مد اول سازه (FEM)..... ۸۰
- شکل (۴-۱۱) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۳ مد اول سازه (FEM)..... ۸۱
- شکل (۴-۱۲) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۴ مد اول سازه (FEM)..... ۸۱
- شکل (۴-۱۳) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۵ مد اول سازه (FEM)..... ۸۲
- شکل (۴-۱۴) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۶ مد اول سازه (FEM)..... ۸۲
- شکل (۴-۱۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۷ مد اول سازه (FEM)..... ۸۳
- شکل (۴-۱۶) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۸ مد اول سازه (FEM)..... ۸۳
- شکل (۵-۱) شماتیکی از دستگاه پیچش الیاف ماشینی [۷]..... ۸۷
- شکل (۵-۲) ماشین پیچش الیاف اتوماتیک [۷]..... ۸۸
- شکل (۵-۳) دستگاه طراحی و ساخته شده موجود در آزمایشگاه [۸۱]..... ۸۹

- شکل (۴-۵) قفسه بوبین ها و مجموعه کشش دهنده‌ها [۸۱] ۹۰
- شکل (۵-۵) سیستم حرکت دورانی [۸۱] ۹۰
- شکل (۶-۵) میز لغزنده [۸۱] ۹۱
- شکل (۷-۵) سیستم هدایت و تغذیه کننده ریب‌های مارپیچ [۸۱] ۹۲
- شکل (۸-۵) سیستم هدایت کننده و تغذیه کننده الیاف در رینگ‌های محیطی [۸۱] ۹۲
- شکل (۹-۵) سیستم هدایت کننده و تغذیه کننده الیاف بر روی پوسته خارجی [۸۱] ۹۳
- شکل (۱۰-۵) سیستم کنترل و اینورترهای استفاده شده در دستگاه [۸۱] ۹۳
- شکل (۱۱-۵) استوانه جبران کننده کمبود رزین [۸۱] ۹۴
- شکل (۱۲-۵) مکانیزم دورانی هرزگرد برای حفظ یکنواختی نمونه‌ها [۸۱] ۹۴
- شکل (۱۳-۵) نمونه مندرل‌هایی با شبکه‌های لوزی، مثلث و شش ضلعی ۹۵
- شکل (۱۴-۵) نمونه ساخته شده استوانه کامپوزیتی تقویت شده با شبکه شش ضلعی ۹۷
- شکل (۱۵-۵) نمایی از سازه تحت آزمایش، شرایط تکیه‌گاهی آن، شتاب‌سنج نصب شده بر روی آن و نقاط مشخص شده برای اعمال ضربه ۱۰۱
- شکل (۱۶-۵) نمایی از نرم‌افزار Modal view ۱۰۲
- شکل (۱۷-۵) تجهیزات مورد استفاده برای تست ۱۰۲
- شکل (۱۸-۵) نمای شماتیکی از سازه استوانه‌ای تقویت شده مشبک، مدل شده در نرم‌افزار Modal view ۱۰۳
- شکل (۱۹-۵) نمایی از پنجره مربوط به تنظیمات پارامترهای تجهیزات تست در نرم‌افزار Modal view ۱۰۴
- شکل (۲۰-۵) نمایی از Set-Up آزمایش ۱۰۵
- شکل (۲۱-۵) موقعیت عیب ایجاد شده در سازه مورد آزمایش ۱۰۶
- شکل (۲۲-۵) الف) اندازه و ب) فاز پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده از تست یک نقطه نمونه از سازه ۱۰۸

- شکل (۲۳-۵) نمونه‌هایی از منحنیهای FRF بدست آمده از تست (رنگ ابی) و منحنی FRF برازش شده
برای استخراج پارامترهای مودال سازه (رنگ قرمز). ۱۰۸
- شکل (۲۴-۵) تشابه مدهای اول بدست آمده از EMA و FEM. ۱۱۰
- شکل (۲۵-۵) تشابه مدهای دوم بدست آمده از EMA و FEM. ۱۱۱
- شکل (۲۶-۵) تشابه مدهای سوم بدست آمده از EMA و FEM. ۱۱۱
- شکل (۲۷-۵) تشابه مدهای چهارم بدست آمده از EMA و FEM. ۱۱۱
- شکل (۲۸-۵) نمودار MAC بدست آمده از بررسی مدهای سازه سالم. ۱۱۲
- شکل (۲۹-۵) نمودار MAC بدست آمده از بررسی مدهای سازه معیوب. ۱۱۳
- شکل (۳۰-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مد اول سازه (EMA). ۱۱۴
- شکل (۳۱-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۲ مد اول سازه (EMA). ۱۱۴
- شکل (۳۲-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۳ مد اول سازه (EMA). ۱۱۵
- شکل (۳۳-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۴ مد اول سازه (EMA). ۱۱۵

فهرست جداول

جدول (۱-۱) روش‌های مودال قابل استفاده در عیب‌یابی سازه‌ها. ۳۸

جدول (۱-۴) خواص هندسی پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی. ۷۴

جدول (۲-۴) خواص مواد پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی. ۷۴

جدول (۱-۵) مشخصات تجهیزات استفاده شده برای تست مودال پوسته کامپوزیتی تقویت شده

مشبک شش ضلعی. ۱۰۷

جدول (۲-۵) فرکانس‌های مستخرج از نتایج مدل‌سازی عددی و تجربی. ۱۱۰

فصل ۱. مقدمه

۱-۱- تعریف مسئله و ضرورت انجام تحقیق

پیشرفت و ارتقای صنایع مختلف، نیازمند تولید قطعات، ماشین‌آلات و تجهیزات مناسب و مدرن می‌باشد و یکی از اهدافی که همواره صنایع مرتبط با ساخت و تولید به دنبال آن بوده‌اند، اطمینان از سلامت و کیفیت محصولات تولید شده می‌باشد. سازه‌ها و ماشین‌آلات مختلف حین کارکرد در معرض خسارت‌هایی هستند که از ضربه و خستگی و محیط خورنده ناشی می‌شوند. کارکرد هر قطعه می‌تواند بر اثر وجود عیوب مختلف تحت تأثیر قرار گیرد و این عیوب ممکن است در هر زمانی در حین فرآیند ساخت و یا در طول عمر کاری قطعه بوجود آیند. از طرفی، وجود عیوب مختلف در برخی از قطعات ممکن است به شکست فاجعه بار قطعه همراه با زیان‌های اقتصادی و خطرات جانی منجر شود. به عنوان مثال، اکثر پروازهای نظامی و غیر نظامی فراتر از عمر آنها انجام می‌شود. برخی از شاتل‌های فضایی ناسا بالغ بر ۲۰ سال قدمت داشته و هزینه‌های تحمیل شده در نگهداری آنها را می‌توان از طریق سیستم‌های تعمیرات و نگهداری برآورد کرد که از این طریق می‌توان خسارات پیش بینی نشده را جلوگیری کرد. شکل (۱-۱) هواپیمای مسافری بوئینگ ۷۳۷ را نشان می‌دهد که در سال ۱۹۸۸ دچار سانحه بسیار وحشتناکی شد که به خاطر ایجاد چند ترک ریز در بدنه آن بود.



شکل (۱-۱) تصویری از حادثه بوئینگ ۷۳۷ به خاطر وجود چند ترک جزئی در بدنه آن [۱].

یا اینکه پس از آن در نوامبر ۲۰۰۱ نیز سانحه هوایی پرواز ۵۸۷، دومین حادثه در تاریخ آمریکا بود که به خاطر وجود عیب در بال آن اتفاق افتاد (شکل (۲-۱)).



شکل (۲-۱) سانحه هوایی پرواز ۵۸۷ به خاطر وجود عیب در پوسته بال هواپیما [۱].
به این ترتیب، وجود عیوب می‌تواند روی عملکرد سیستم تأثیر بسزایی ایجاد کند. حوزه‌ای که در آن به بررسی و شناسایی این عیوب پرداخته می‌شود، حوزه سلامت ساختاری سازه‌ای^۱ می‌باشد. این حوزه در علمی نظیر مهندسی عمران، مهندسی مکانیک و مهندسی هوا-فضا کاربرد دارد.
مناسب‌ترین روش برای بررسی سلامت ساختاری سازه‌ای استفاده از آزمون‌های غیر مخرب^۲ است. برای انجام این آزمایشات، نیازی به تخریب قطعه و نمونه برداری سازه نیست. با استفاده از آزمون‌های غیر مخرب، می‌توان عیوب موجود در قطعات از قبیل تخلخل و حفره‌های داخلی، ترک و ناپیوستگی‌های سطحی و داخلی و لایه‌لایه شدن، ناخالصی‌ها و انواع عیوبی که در حین فرآیند تولید یا در حین کار تحت شرایط ویژه محیط کار ایجاد و شکل می‌گیرند را شناسایی نمود.
امروزه آزمون‌های غیر مخرب به دلیل پیشرفت محسوس دانش پردازش سیگنال، در تعیین مشخصه‌های دینامیکی سیستم‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. به طوری که در اغلب کدها و

1 Structural Health Monitoring (SHM)

2 Non-destructive testing

دستورالعمل‌های ساخت یا نگهداری تجهیزات و قطعات، اجرای یک یا چند آزمون غیر مخرب در روال بازرسی و کنترل کیفی به صورت الزام آورده شده است.

به طور کلی، هر یک از عیوب موجود در سازه، ارتعاش یا ارتعاشاتی را با فرکانس‌های خاص در بر دارد که وقتی با هم جمع می‌شوند، خود را به صورت یک طیف زمانی تناوبی نشان می‌دهند. افزایش غیر عادی ارتعاشات سازه‌ها و تجهیزات از ایجاد عیب در آنها خبر می‌دهد. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در ماشین‌ها و سازه‌ها شامل تعداد زیادی امواج با فرکانس‌های خاص هستند که با هم ترکیب شده و سیگنال پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند که برای شناسایی عیوب لازم است این سیگنال‌ها از یکدیگر جدا شده و مورد بررسی قرار گیرند. بر این مبنا، دانشمندان همواره با استفاده از پردازش سیگنال‌های ارتعاشاتی، آکوستیکی و آلتراسونیکی بدست آمده از سازه‌ها در صدد تشخیص عیوب این سازه‌ها بوده‌اند.

البته باید توجه داشت که تشخیص عیوب سازه‌ها به خاطر متفاوت بودن خواص عیوب آنها از قبیل ابعاد عیب و نوع سازه‌ای که عیب در آن قرار دارد، همواره تنها با یک روش پردازش سیگنال موفقیت آمیز نبوده و آنچه که امروزه بیشتر به آن پرداخته می‌شود، بررسی و تشخیص عیوبی است که بسیار ریز بوده‌اند و در ساختارهای پیچیده‌ای قرار دارند که به راحتی تشخیص داده نمی‌شوند؛ انتخاب بهترین روش جهت تشخیص این عیوب نیز یکی دیگر از حوزه‌هایی است که امروزه مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌هایی که در بخش عیب‌یابی و حوزه سلامت ساختاری یک سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیار فراوان بوده و اساس همه آنها پردازش سیگنال‌های وارد شده به جسم و سیگنال خروجی از آن

با استفاده از تبدیل فوریه^۱، تحلیل زمانی، تحلیل فرکانسی و تبدیل موجک^۲ می‌باشد. از جمله این روش‌ها عبارتند از:

- (۱) روش مایع نافذ^۳
- (۲) روش ذرات مغناطیسی^۴
- (۳) روش جریان گردابی^۵
- (۴) ارتعاشات و آنالیز مودال^۶
- (۵) روش نشر صوت^۷
- (۶) روش ماوراء صوت یا آلتراسونیک^۸
- (۷) روش پرتونگاری یا رادیوگرافی^۹
- (۸) روش حرارتی^{۱۰}

اکثر این تکنیک‌های تجربی نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های ساختاری سازه در اطراف محل عیب هستند. در این روش‌ها، شناسایی عیب بر مبنای تغییر نسبی خواص دینامیکی یا پاسخ سیستم‌ها بوقوع می‌پیوندد. در طی چند سال اخیر، بحث تشخیص عیب بر مبنای روش‌های مذکور، حوزه گسترده‌ای را در جایگاه‌های علمی و عملی به خود اختصاص داده است، تا جایی که تلاش‌های

1 Fourier transform

2 Wavelet transform

3 Liquid penetrate method

4 Magnet field method

5 Eddy-current method

6 Vibration and modal analysis

7 Acoustic emission method

8 Ultrasonic method

9 X-ray method

10 Thermal method

مستمری برای بهبود روش‌های یاد شده و حتی ارائه روش‌های جدیدتر به ثبت رسیده است. یکی از این روشها، روش آنالیز مودال می‌باشد که اساس آن، اندازه‌گیری پارامترهای مودال از قبیل فرکانس طبیعی، شکل مد و میرایی مودال می‌باشد. این پارامترها همگی تابعی از خواص فیزیکی سازه از قبیل جرم، میرایی و سختی می‌باشند. هرگونه تغییر در این خواص فیزیکی از قبیل کاهش سختی ناشی از وجود عیب، باعث شناسایی تغییرات قابل شناسایی در پارامترهای مودال خواهد شد.

سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده به جهت سبکی و استحکام بالا نسبت به سازه‌های فلزی متناظر خود، در صنایع مختلفی از جمله صنایع خودرو سازی، هوا-فضا در ساخت بدنه هواپیماها، موشک‌ها، عمران و نفت در مخازن تحت فشار و لوله‌های انتقال گاز و نفت به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که چنین عضوی در یک سازه مهندسی تحت بارهای داخلی و خارجی مختلف از جمله فشار داخلی، نیروی محوری و نیروهای دینامیکی قرار می‌گیرد، ممکن است دچار کمانش، ارتعاش شدید و یا پدیده شکست ناشی از خستگی به دلیل رشد سریع ترک گردد [۲]. با توجه به هزینه‌های بالایی که صرف طراحی و ساخت این نوع سازه‌ها می‌گردد، مساله تشخیص عیوب بوجود آمده در هنگام ساخت و همچنین در حین ارائه سرویس این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

تشخیص عیوب این سازه‌ها با استفاده از آزمون‌های غیر مخرب انجام می‌شود که در بین آنها، روش عیب‌یابی بر اساس ارتعاشات سازه بنا به دلایل مختلف، در صنایع هوافضا با اقبال بیشتری مواجه شده است، به طوری که سازمان فضایی ناسا در ۲۰ الی ۳۰ سال اخیر اقدامات زیادی مانند پروژه^۱ ADS و یا سیستم بازرسی مودال سازه‌های فضایی ناسا^۲ را انجام داده است [۳].

1 Advanced Diagnostic System (Real time subsystem monitoring)

2 NASA's space shuttle modal inspection system

بر اساس نتایج تحقیقات مرکز تحقیقات نظامی آمریکا، ۸۵٪ عیوب حاصل در کامپوزیت‌ها بر اثر لایه لایه شدن است که این عیوب با چشم قابل رویت نیستند و یکی از بهترین روش‌های تشخیص آنها، تست‌های ارتعاشاتی و مودال می‌باشد [۴] در این رابطه می‌توان به تست پوسته موشک‌های S-2 در سازمان هوایی آمریکا اشاره کرد [۵].

۱-۲- نوآوری و روش انجام تحقیق

با توجه به تحقیقات بعمل آمده، مشخص شده است، تا کنون عیب‌یابی در سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده بر اساس روش مودال صورت نگرفته است. لذا، در این تحقیق و به خاطر اهمیت عملی بالای آن در صنایع مختلف، سعی بر آن است که با استفاده از یکی از روش‌های ارتعاشاتی یعنی روش انرژی کرنشی مودال، بتوان عیوب موجود در سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک را به روش عددی و تجربی تشخیص داد. آغاز استفاده از روش انرژی کرنشی مربوط به سه دهه قبل می‌باشد. از آن زمان به بعد محققان روشهای تشخیص عیوب بر این مبنا را در سازه‌های مختلفی مانند تیرها، ورق‌ها، پوسته‌هایی با اشکال هندسی گوناگون و ... مورد بررسی قرار داده‌اند.

تحقیق حاضر، شامل مطالعه و استخراج معادلات انرژی حاکم بر پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک جهت شناسایی عیوب موجود در این پوسته‌ها به کمک انرژی کرنشی مودال می‌باشد. مبنای کلی در روش انرژی کرنشی مودال، مقایسه انرژی کرنشی دو سازه سالم و معیوب متناظر می‌باشد. ابتدا معادلات نیرو و گشتاورهای وارد بر یک استوانه کامپوزیتی تقویت شده مشبک با شبکه شش ضلعی را استخراج کرده تا از طریق آن بتوان معادله انرژی این سازه را بدست آورده و با استفاده از آنها، انرژی کرنشی هر دو سازه را در هر شکل مد بدست آوریم. در این تحقیق، ابتدا دو مدل المان محدود از پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده اورتوتروپیک^۱ از جنس Glass/Epoxy

¹ Orthotropic

را با تمام شرایط یکسان (یکی سالم و دیگری معیوب) به کمک نرم افزار ABAQUS آماده کرده و با شرایط مرزی دو سر آزاد و شبیه سازی تست مودال در نرم افزار مذکور، شکل مدهای آنها را وقتی تحت ارتعاشات آزاد قرار می گیرد، استخراج می کنیم.

سپس با مقایسه انرژی های بدست آمده در هر المان متناظر از سازه سالم و معیوب، توسط شاخص عیبی که به صورت کسر انرژی کرنشی سازه معیوب به انرژی کرنشی سازه سالم است، می توان به وجود عیب در آن نواحی پی برد.

در بخش بعد، برای بررسی صحت و قابلیت روش انرژی کرنشی مودال، یک پوسته استوانه ای تقویت شده از جنس کامپوزیت Glass/Epoxy را با همان مشخصات هندسی و مکانیکی مدل شده در محیط نرم افزار، به کمک روش رشته پیچی¹ یا الیاف پیچشی ساخته و تحت تست مودال قرار داده می شود. برای انجام آنالیز مودال آن، از روش تست چکش و شرایط مرزی آزاد-آزاد² با آویختن سازه به کمک دو نوار لاستیکی نرم استفاده می شود. ابتدا با انجام آنالیز مودال سازه سالم، پارامترهای ارتعاشی و شکل مدهای آن را استخراج کرده و سپس با ایجاد عیبی در نزدیکی لبه بالایی استوانه، پارامترهای مذکور را مجدداً استخراج کرده و به کمک آنها شاخص عیب انرژی کرنشی به منظور شناسایی عیب مذکور بدست آورده می شود.

لازم به ذکر است، به جهت وجود مشتقات جزئی مرتبه دوم در معادله انرژی، از روش عددی مربعات تفاضلی (DQM³) جهت محاسبه این مشتقات استفاده شده که در نهایت، کلیه معادلات بدست آمده به همراه روش DQM در نرم افزار MATLAB کدنویسی شده اند.

1 Filament Winding

2 Free-free boundry conditions

3 Differential Quadrature method

۱-۳- اهداف مورد انتظار تحقیق

در پایان نیز با توجه به تحقیقات به عمل آمده و اجرای روش عیب‌یابی منتخب، می‌بایست به موارد زیر دست یافت:

۱) بررسی و تعیین وجود آسیب در سازه استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به صورت عددی و تجربی؛

۲) تعیین موقعیت هندسی و خرابی بر روی سازه مذکور به صورت عددی و تجربی؛

۱-۴- ساختار کلی پایان نامه

ساختار کلی این پایان‌نامه مشتمل بر ۶ فصل طبقه‌بندی شده است که به شرح زیر می‌باشد.

فصل دوم این پایان‌نامه شامل ۳ بخش می‌باشد؛ بخش اول به ترتیب به معرفی اجمالی سازه‌های کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مشبک و مزایا و کاربردهای آنها نسبت به دیگر سازه‌ها می‌پردازد. بخش دوم، به مروری اجمالی بر فرآیند آنالیز مودال سازه‌ها به همراه نکات عملی و بکارگیری تجهیزات مورد نیاز برای یک تست مودال می‌پردازد. پس از آن، فرآیند عیب‌یابی به کمک آنالیز مودال شرح داده شده است. در نهایت در بخش آخر، اقداماتی که تا بدین جا روی سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک انجام شده و تاریخچه‌ای از روش‌های مودال در عیب‌یابی سازه‌ها بخصوص روش انرژی کرنشی مودال به طور مفصل به نگارش در آمده است.

فصل سوم تئوری و روابط مورد نیاز برای استخراج روش انرژی کرنشی مودال پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک شش ضلعی به همراه شاخص عیب انرژی کرنشی مودال و نیز روش DQM برای محاسبه مشتقات مرتبه دوم شکل مدهای موجود در رابطه انرژی کرنشی مودال پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک شش ضلعی آورده شده است.

فصل چهارم و پنجم به ترتیب به پیاده‌سازی روش عیب‌یابی شاخص انرژی کرنشی مودال به شکل عددی و تجربی می‌پردازد. این کار در محیط عددی، با مدل‌سازی سازه سالم و معیوب در نرم‌افزار ABAQUS و استخراج جابجایی‌های مودال سایر نقاط آنها، و سپس پیاده‌سازی روش شاخص عیب بدست آمده در فصل سوم، انجام می‌شود. این کار در محیط تجربی نیز ابتدا با ساخت سازه و فراهم کردن تجهیزات و مقدمات تست مودال، انجام می‌شود. سپس داده‌های استخراج شده از تست مودال، توسط معیارهای مختلف از جمله معیار MAC مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفته و در پایان با پیاده‌سازی روش شاخص عیب بدست آمده در فصل سوم، اقدام به شناسایی موقعیت عیب ایجاد شده روی سازه می‌شود.

فصل ششم به بیان نتایج بدست آمده از اجرای روش عیب‌یابی شاخص انرژی کرنشی مودال به شکل عددی و تجربی و همچنین ارائه پیشنهادات لازم برای تقویت این روش و تکمیل جنبه‌های گوناگون عیب‌یابی در پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک شش ضلعی می‌پردازد. سرانجام در انتها، فهرستی از کلیه مراجع که در پیشبرد این تحقیق، کمک شایانی کرده‌اند، به طور کامل ذکر شده است.

فصل ۲. ادبیات تحقیق

۲-۱- سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک

در طی دهه‌های گذشته، مواد کامپوزیتی از حوزه آزمایشگاه و کاربردهای خاص به حوزه‌های گوناگون صنعت به صورت تجاری راه یافته‌اند. مواد مرکب بعد از موفقیت در صنایع هوافضا، ورزش و چند صنعت ویژه، اکنون به عنوان یکی از مواد مورد اعتماد و قابل انتخاب در صنایع مختلف تبدیل گشته‌اند. برخی از قابلیت‌های شناخته شده و منحصر به فرد مواد مرکب عبارتند از مقاومت و سفتی مخصوص بالا، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و خستگی و عایق بودن در مقابل الکترومغناطیس.

مواد مرکب شامل دو یا چند ماده می‌باشند که یکی از آنها مانند الیاف در مواد زمینه قرار گرفته و ترکیب آن دو می‌تواند خواص مطلوبی را برای کاربردهای مورد نظر از خود بروز دهد. معمولاً، الیاف به عنوان تحمل‌کننده اصلی بار می‌باشند و مواد زمینه به عنوان نگهدارنده الیاف در کنار هم عمل می‌کنند و از طرف دیگر انتقال دهنده بار مابین الیاف می‌باشند و از الیاف در برابر آسیب‌های محیطی نظیر رطوبت و خوردگی محافظت به عمل می‌آورند.

الیاف‌های شیشه و کربن به عنوان تقویت‌کننده مواد مرکب، بیشترین کاربرد را در صنعت به خود اختصاص داده‌اند. الیاف شیشه اصولاً از سیلیکا (اکسید سیلیسیم) بعلاوه اکسیدهای فلزی بدست می‌آیند. این الیاف معمولاً به روش کشش مذاب شیشه از سوراخ‌های ریز^۱ ساخته می‌شوند. شیشه نوع E^۲ پرکاربردترین استحکام دهنده در مواد مرکب به شمار می‌رود. الیاف‌های کربن در مکان‌هایی که نیاز به مدول بیشتری نسبت به شیشه است، کاربردهای بسیاری دارد؛ این الیاف معمولاً با تغییر مواد آلی تحت فشار و دمای بالا ساخته می‌شوند. مواد مرکب ساخته شده از الیاف‌های شیشه و کربن به

1 orifice

2 E-glass

صورت گسترده در ابزارهای ورزشی، اجزاء اتومبیل و هواپیما، سازه‌های دریایی و هوافضا مورد استفاده واقع می‌گردند.

مواد زمینه^۱ در مواد مرکب وابسته به نوع کاربرد ماده مرکب، می‌توانند از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک در نظر گرفته شوند. رتبه اول استفاده مواد در زمینه مواد مرکب بدون شک به پلیمرها اختصاص دارد. پلیمرها به دو گروه عمده پلیمرهای گرماسخت^۲ و گرمانرم^۳ تقسیم می‌گردند. پلیمرهای گرماسخت مانند اپوکسی‌ها^۴ و پلی‌استرها^۵ به عنوان پلیمرهای عمده برای استفاده در زمینه، برای مقاصد مختلفی به حساب می‌آیند، اما پلیمرهای گرمانرم پیشرفته‌ای نظیر پیک^۶ و پلی پروپیلن^۷ نیز اکنون به بهترین قابلیت‌های خود برای تحمل گرما، سادگی مراحل تولید و مقاومت در برابر ضربه رسیده‌اند.

برخلاف مواد فلزی معمولی که اطلاعات طراحی و روش استفاده از آنها به صورت مشخص در اختیار کاربران قرار دارند و طراحان سازه‌های فلزی، فقط سازه را طراحی می‌کنند، در مورد مواد مرکب، طراحان ملزم به طراحی ماده مرکب مورد نظر در حین طراحی سازه می‌باشند. روش تولید نیز برای طراحان مواد مرکب از اهمیت بالایی برخوردار است. از انواع روش‌های ساخت مواد مرکب می‌توان به قالب‌گیری گرم^۸، پیچش الیاف^۹، قالب‌گیری ترموپلاستیک^{۱۰} و قالب‌گیری با روش انتقال رزین^۱ اشاره کرد.

1 matrix

2 thermoset

3 thermoplastic

4 epoxy

5 polyesters

6 PEEK (polyether etherketone)

7 PP (polypropylene)

8 autoclave molding

9 filament winding

10 thermoplastic molding

به لطف توسعه روش‌های تولید نوار که شامل الیاف‌های از پیش پوشش داده شده با رزین‌های پلیمری است، تولید قطعات مختلف از جنس مواد مرکب بسیار آسان گردیده است. معنی این نوآوری این است که تولید کننده نگران درصد صحیح اختلاط رزین با الیاف در حین پروسه تولید نمی‌باشد. نوارهای شامل رزین‌های گرماسخت باید در محیط با دمای پایین نگهداری گردند تا مانع از ایجاد زنجیره‌های پلیمری در رزین تا قبل از استفاده نهایی از آنها شود. برای رزین‌های گرمانرم، نوارها باید در دمای محیط نگهداری شوند. این نوع از نوارها قابلیت استفاده و ذوب شدن مجدد رزین را دارند. استفاده از نوارها باعث شده است که در عمل، تولید قطعات با مواد کامپوزیتی، مرحله دوم تولید را شامل شود و مرحله اول شامل تولید نوارها است که در واحدی مجزا انجام می‌گیرد. به عنوان مثال، برای ساخت یک صفحه شبکه‌ای^۲ از مواد مرکب گرمانرم، ابتدا ریب‌ها^۳ فرم داده می‌شوند و در نهایت مجموعه تقویت کننده‌ها با پارچه بافته شده، دوباره طی یک پروسه مجزا به هم متصل می‌گردند.

سازه‌های مشبک به لحاظ ظاهری مشابه سازه‌های شبکه‌بندی شده با تیرها یا قاب‌ها می‌باشند. این سازه‌ها، دارای تقویت کننده‌های مشبک طولی و مورب در درون، بیرون یا هر دو طرف پوسته هستند. با داشتن این تقویت کننده‌ها، استحکام سازه بدون افزایش چندانی در وزن سازه، به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد. تاریخچه این نوع سازه‌ها به تقویت کننده‌های توری شکل و فلزی بمب افکن و یکرز ولنگتون^۴ در سال‌های جنگ جهانی دوم برمی‌گردد [۶] که قابلیت بالایی در تحمل تخریب‌های موضعی از خود نشان می‌داد. سازه‌های مشبک کامپوزیتی ترکیب‌بندی هندسی مشخصی دارند. به عنوان مثال، سازه‌های ایزوگرید^۵ شامل ریب‌های کامپوزیتی تک جهت‌ای می‌باشند که می‌توانند

1 RTM (resin transfer molding)

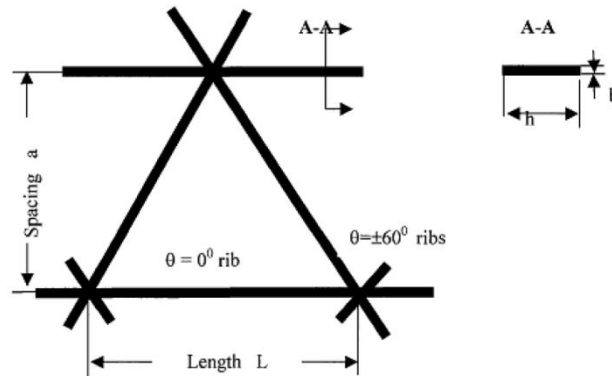
2 grid-stiffened

3 ribs

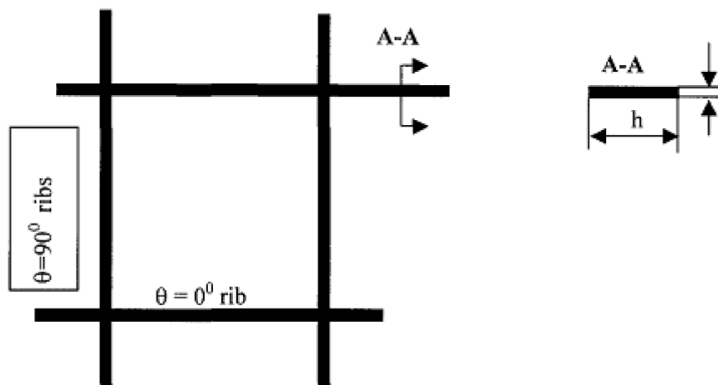
4 Vickers Wellington

5 isogrid

زوایای $\pm 60^\circ$ و صفر درجه برای ایجاد یک ترکیب تکرارپذیر از مثلث‌های متساوی‌الاضلاع بر روی یک صفحه داشته باشند (شکل (۱-۲)). سازه‌های مشبک مربعی نیز شامل ریب‌هایی با الیاف تک جهته با زوایای $\pm 90^\circ$ و صفر درجه می‌باشند (شکل (۲-۲)).



شکل (۱-۲) تقویت کننده‌هایی با شکل مثلث متساوی‌الاضلاع [۶].



شکل (۲-۲) تقویت کننده‌هایی با شکل مربع [۶].

ریب‌ها می‌توانند با استفاده از مقداری رزین اضافه به صفحات صاف یا انحنا دار متصل گردند تا در نهایت یک سازه مشبک کامپوزیتی را ایجاد کنند. پارامترهای عمومی ریب‌ها عبارتند از زاویه قرارگیری ریب‌ها θ ، طول L ، عرض مقطع b و ارتفاع مقطع h . از آنجاییکه طول ریب در مقایسه با سایر ابعاد آن بزرگ است، ریب‌ها رفتاری شبیه به تیر از خود بروز می‌دهند.

۲-۱-۱- مزایا و کاربردهای سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک

سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک به عنوان کاراترین نوع سازه‌ها پیشنهاد شده‌اند. این سازه‌ها قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده و همچنین سازه‌های تقویت کننده را با هم دارند. علاوه بر آن

خصوصیات شبکه تعبیه شده در آنها باعث می‌شود که مسیر بارهای تخریبی در اطراف نقاط آسیب دیده تغییر یابد که این قدرت تحمل آسیب، ویژگی سازه‌های شبکه‌ای می‌باشد. با استفاده از ریب‌های تک جهته کامپوزیتی، تمام الیاف به صورت متحد در راستای ریب قرار گرفته و به بیشترین میزان از درصد حجمی الیاف می‌توان دسترسی پیدا کرد. در این روش تولید کامپوزیت‌ها، مقاومت ماده به صورت مؤثرتر می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. از طرف دیگر، سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک برتری دیگری نیز در قیاس با سازه‌های فلزی یا کامپوزیتی ساده و یا سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی دارند که این برتری مقاومت در برابر پدیده تورق یا لایه‌لایه شدن^۱ است. هنگامیکه تمام ریب‌ها از الیاف تک جهته ساخته می‌شوند، هیچ عدم تطابقی در خواص مواد بروز نمی‌کند. بنابراین احتمال بروز پدیده تورق در آنها بسیار ناچیز است و مقاومت بالایی در برابر ضربه و خستگی نسبت به سازه‌های با لایه چینی ساده از خود بروز می‌دهند. علاوه بر این، با داشتن ریب‌های مجزا، ترک‌ها نمی‌توانند از یک ریب به ریب مجاور آن سرایت کنند و بنابراین قدرت تحمل آسیب‌دیدگی سازه افزایش می‌یابد. به دلیل ساختار باز این سازه، رطوبت کمترین تأثیر را در قیاس با سازه‌های ساندویچی^۲ با هسته خلل و فرج دار، دارد.

به دلیل باز بودن سازه و قابل تعمیر بودن آن، نظارت، بازرسی و تعمیرات به راحتی در سازه انجام می‌شود. از این گذشته، برای مقدار مشخصی از ماده (به لحاظ وزنی)، سازه مشبک کامپوزیتی ضخیم‌تر از سازه با لایه‌چینی ساده است و دارای استحکام خمشی بالاتری نسبت به آن و همچنین سازه‌های ساندویچی است. در ابعاد مساوی، سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک دارای کمترین وزن در قیاس با سازه‌های جایگزین است.

1 Delamination

2 Sandwich panel

با توجه به تمام مشخصه‌های ذکر شده، پیش‌بینی می‌گردد که سازه‌های مشبک کامپوزیتی کاربردهای فراوانی در صنایع خواهند داشت. ولی دشواری تولید و قیمت تمام شده آنها باعث تحت تأثیر قرار گرفتن موارد استفاده از آنها شده است، به نحوی که هم اینک استفاده از این سازه‌ها محدود به سازه‌های خاص هوافضایی نظیر سازه‌های پرتابه‌های فضایی، تلسکوپ‌های فضایی، دماغه موشک‌ها (شکل (۲-۳)) صفحات خورشیدی و بازتابنده‌های فضاپیماها شده است.



شکل (۲-۳) دماغه موشک سبک از جنس کامپوزیت تقویت شده [۷].

۲-۲- مروری بر آنالیز مودال

امروزه ارتعاشات در هر گوشه‌ای از زندگی روزمره بشر نقش بسزایی را ایفا می‌کند. اما، این پدیده اغلب منجر به بروز تأثیرات ناخوشایندی از قبیل توزیع نویز و در برخی از موارد منجر به نابودی سازه می‌شود. در سه دهه اخیر، درک بهتر رفتار دینامیکی سازه‌ها و شناسایی پارامترهای مودال از جمله فرکانس‌های طبیعی، ضریب میرایی و شکل مدها به عنوان یک مسئله مهم در بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ای تبدیل شده است. این زمینه از تحقیق تحت عنوان آنالیز مودال^۱ در علم مکانیک شناخته شده است. در حقیقت، آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مدها و بکارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی

1 Modal analysis

سیستم می‌باشد. این مدل ریاضی، به مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده های مودال نامیده می‌شوند.

دینامیک یک سازه، از دو بخش فرکانس و موقعیت تشکیل می‌شود. در آنالیز مودال، اصل بر آن است که پاسخ ارتعاشی یک سیستم دینامیکی خطی و نامتغیر با زمان را می‌توان به صورت ترکیب خطی مجموعه‌ای از حرکات هارمونیک ساده، که به شکل مدهای ارتعاشی موسومند، در نظر گرفت. شکل مد، می‌تواند حقیقی یا موهومی باشد و هر مد متناظر با یک فرکانس طبیعی می‌باشد. میزان مشارکت هر مد در ارتعاش کلی سیستم، به مشخصات منبع تحریک و همچنین به شکل مد مربوطه بستگی دارد.

همانطور که در شکل (۲-۱۶) نیز نشان داده شده است، در محاسبه پارامترهای مودال یک سیستم دو روش وجود دارد. روش اول همان آنالیز مودال نظری نام دارد که هدف آن تهیه ماتریس‌های سازه ای یعنی، ماتریس سختی^۱ K ، ماتریس جرم^۲ M و ماتریس میرایی^۳ C است. در این حالت، مسئله به یک مسئله مقادیر ویژه^۴ تبدیل می‌شود. برای مثال، در حالت نامیرای یک سیستم، فرکانس های طبیعی ω_i و شکل مدهای $x_{(i)}$ در رابطه (۲-۱) خلاصه می‌شوند:

$$(K - \omega_i^2 M)x_{(i)} = 0 \quad (1-2)$$

اگر ω_i^2 ریشه این معادله جبری باشد:

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (2-2)$$

روش دوم، آنالیز مودال تجربی نامیده شده و هدف آن، بدست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی نامتغیر با زمان است. از آنجا که گاهی اوقات یک مدل ریاضی از سازه موجود نیست، این روش

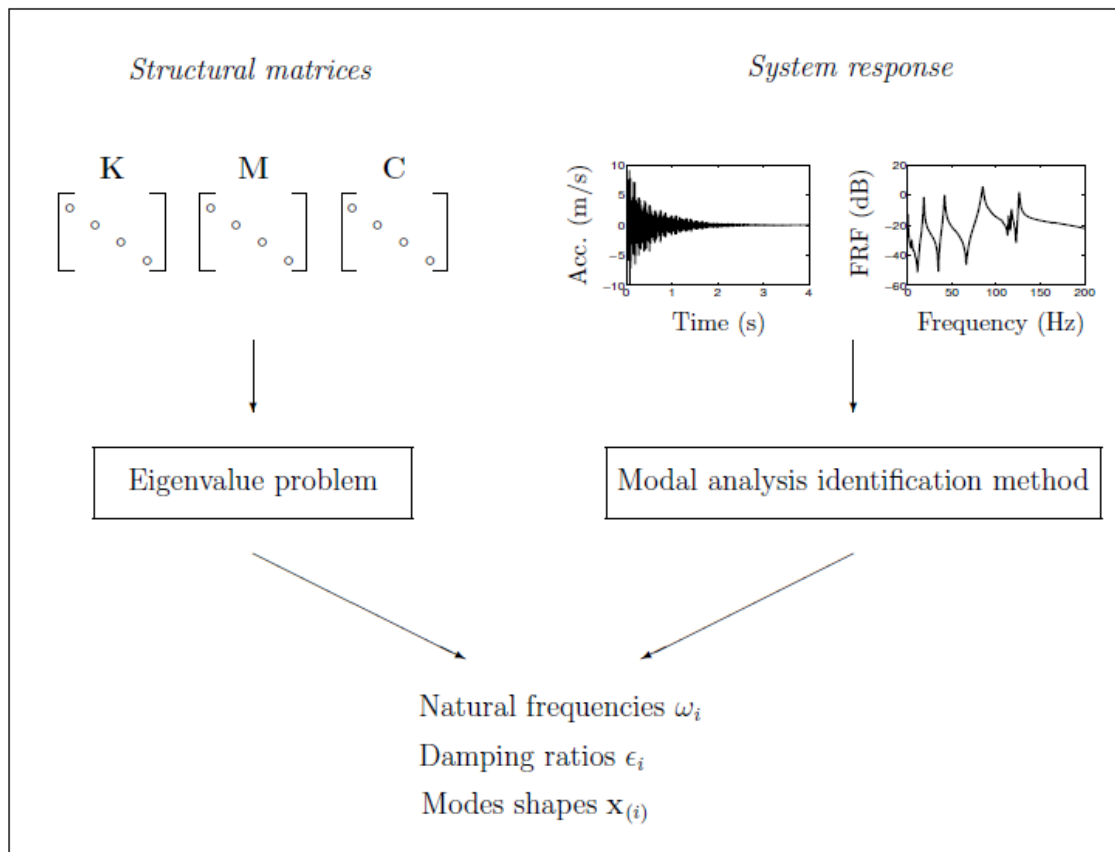
1 Stiffness Matrix

2 Mass Matrix

3 Damping Matrix

4 Eigenvalue problem

جایگزین، در سال‌های اخیر، نقش بسزایی در شناسایی سیستم‌ها^۱ ایفا کرده است. مبنای تئوری این تکنیک بر اساس رابطه بین پاسخ ارتعاشی در یک نقطه از سازه با تحریک در همان نقطه یا نقطه دیگر به صورت تابعی از فرکانس تحریک، می‌باشد. این رابطه که اغلب به صورت یک تابع ریاضی مختلط است، تابع پاسخ فرکانسی یا به طور خلاصه FRF^۲ نامیده می‌شود.



شکل (۲-۴) آنالیز مودال تئوری و تجربی [۸].

با در نظر گرفتن ترکیبات مختلف از نقاط تحریک و پاسخ روی سازه، مجموعه‌ای کامل از FRFها تشکیل می‌شود که می‌توان آنها را در قالب ماتریس FRF سیستم بیان کرد. انجام تست مودال، شامل اندازه‌گیری FRFها یا پاسخ ضربه سازه است. اندازه‌گیری FRFها، می‌تواند به سادگی با اعمال یک نیرو در یک نقطه از سازه در غیاب سایر نیروهای تحریک و اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی در یک یا چند

1 System Identification

2 Frquency Response Function

نقطه از سازه انجام شود. در نهایت، هر دو روش آنالیز مودال تئوری و تجربی، به تعیین مدل مودال سیستم دینامیکی و استخراج پارامترهای مودال ختم می‌شود. بنابراین، کاربردهای آنالیز مودال عمدتاً در ارتباط با استفاده از مدل بدست آمده در طراحی، حل مسائل و تحلیل آنها می‌باشد. در حالت کلی، یک تست مودال تجربی شامل چهار مرحله است که عبارتند از، آماده سازی سازه برای تست، تحریک سازه، استخراج پارامترها و اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و پردازش داده‌های بدست آمده از تست. در ادامه این بخش‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

۲-۱-۲- آماده سازی سازه برای تست

اولین مرحله در انجام یک تست مودال، آماده سازی سازه جهت انجام تست است. منظور از این مرحله، انتخاب نوع تکیه‌گاه سازه که می‌تواند به صورت آزاد (معلق) یا متصل به زمین باشد، انتخاب نوع تحریک، نقاط تحریک، سخت‌افزارهای اندازه‌گیری نیرو و پاسخ، تعیین هندسه مدل که تحریک و اندازه‌گیری در آن نقاط صورت می‌گیرد و تعیین عواملی که باعث عدم دقت در اندازه‌گیری می‌شود، می‌باشد.

همانطور که ذکر شد، در آنالیز مودال، سازه به دو شکل آزاد یا متصل به زمین می‌تواند قرار گیرد. این دو حالت به اختصار در زیر آورده شده است.

الف) نگهداری آزاد

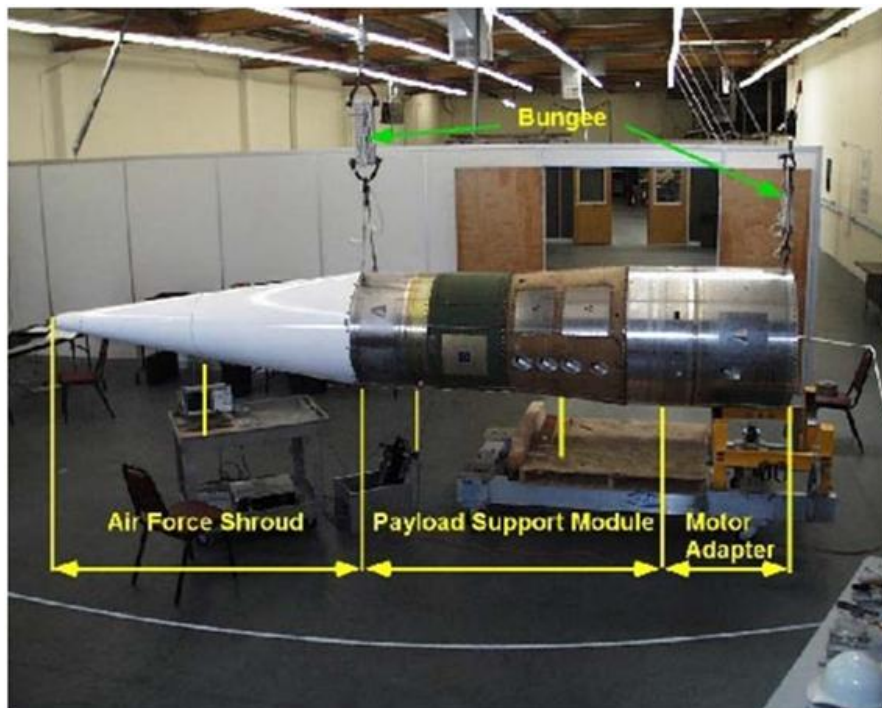
در این روش، سازه به شکل معلق نگه داشته می‌شود، بگونه‌ای که از حرکت آن در هیچ یک از نقاط و جهات ممانعت به عمل نمی‌آید (شکل (۲-۱۷)). با توجه به اینکه این امر در عمل ممکن نیست، نگهداری آزاد از طریق معلق کردن سازه به کمک تارهای نازک با سختی بسیار پایین همانند تارهای لاستیکی یا فنر صورت می‌پذیرد. در این حالت، اگرچه سیستم بر خلاف شرایط آزاد مطلق، دارای حرکت صلب نیست، اما در صورت سختی پایین تارهای استفاده شده، فرکانس‌های مربوط به مدهای

صلب حرکت سازه مورد بررسی، بسیار پایین‌تر از فرکانس‌های مربوط به مدهای الاستیک سازه مورد آزمایش خواهند بود. در انتخاب طول این نوار و نقاط اتصال آن به سازه باید توجه داشت که:

۱- فرکانس‌های مربوط به مدهای صلب سازه باید به مقدار ۱۰ تا ۲۰ درصد از اولین فرکانس مد الاستیک آن، کمتر باشد.

۲- نقاط اتصال نوارها به سازه، حتی‌الامکان نزدیک به نقاط گرهی مد مورد نظر باشند.

۳- تارهای کشسان مورد استفاده، باید کاملاً در راستای عمود بر راستای ارتعاش مورد بررسی سازه باشند [۹].



شکل (۲-۵) نگهداری آزاد دماغه یک موشک برای انجام آنالیز مودال.

ب) اتصال به زمین

در این روش، سازه از طریق نقاطی به زمین ثابت شده و از حرکت نقاط متصل شده به طور کامل جلوگیری می‌شود. باید توجه داشت که چنین شرایطی در عمل مشکل بوده، زیرا پایه‌ای که سازه مورد نظر به آن متصل شده، هیچگاه به طور کامل صلب نبوده و امکان حرکت آن وجود خواهد داشت.

ایجاد چنین شرایطی از نگهداری آزاد سازه مشکل تر است. به همین دلیل، روش نگهداری آزاد سازه به روش متصل به زمین ترجیح داده می شود. دلیل دیگر برای این امر آنست که در صورت کسب نتایج حاصل از نگهداری آزاد، می توان با استفاده از روش های نظری و حذف درجات آزادی مورد نظر، خواص مربوط به سازه با شرایط مرزی متصل به زمین را بدست آورد و این در حالیست که عکس این عملیات به علت حذف تعدادی از درجات آزادی در روش اتصال به زمین ممکن نیست. از طرفی، ضرورت تعیین خواص مودال در شرایط اتصال به زمین، ناشی از ضرورت تعیین خواص مودال سازه در شرایط نزدیک به شرایط کارکردی سازه همانند تیغه توربین و یا به علت عدم امکان ایجاد شرایط نگهداری آزاد است که در مورد سازه های بسیار بزرگ، نظیر سازه های عمرانی مطرح می شود. در شکل (۲-۱۸)، بدنه یک فضاپیما روی زمین متصل شده و تحت تست قرار می گیرد.



شکل (۲-۶) نگهداری بدنه یک هواپیما روی زمین جهت انجام آنالیز مودال.

۲-۲-۲- مکانیزم تحریک^۱ سازه

گام دوم در راستای اجرای تست مودال، تحریک سازه است. در این مبحث، مواردی از قبیل انتخاب نوع تحریک، تجهیزات لازم برای تحریک، نقاط تحریک و نحوه اتصال وسیله تحریک به سازه مورد توجه قرار می‌گیرند.

برای تحریک سازه‌ها در آزمایش‌های مودال، وسایل مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از بین آنها چکش^۲ به علت سادگی و لرزشگرهای الکترو دینامیکی^۳ به علت محدوده فرکانسی و ظرفیت اعمال بار مناسب در بخش وسیعی از کاربردهای مهندسی، رایج‌ترین محرک‌ها بشمار می‌روند. در شکل (۲-۱۹) یک نمونه چکش و لرزشگر الکترو دینامیکی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل (۲-۷) الف) چکش و ب) لرزشگر الکترو دینامیکی.

همانطور که در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است، یک چکش مودال، از سه قسمت نوک چکش^۴، ترانسدیوسر^۵ اندازه‌گیری نیرو و وزنه چکش تشکیل شده است که به جز ترانسدیوسر که مجزا از

1 Excitation mechanism

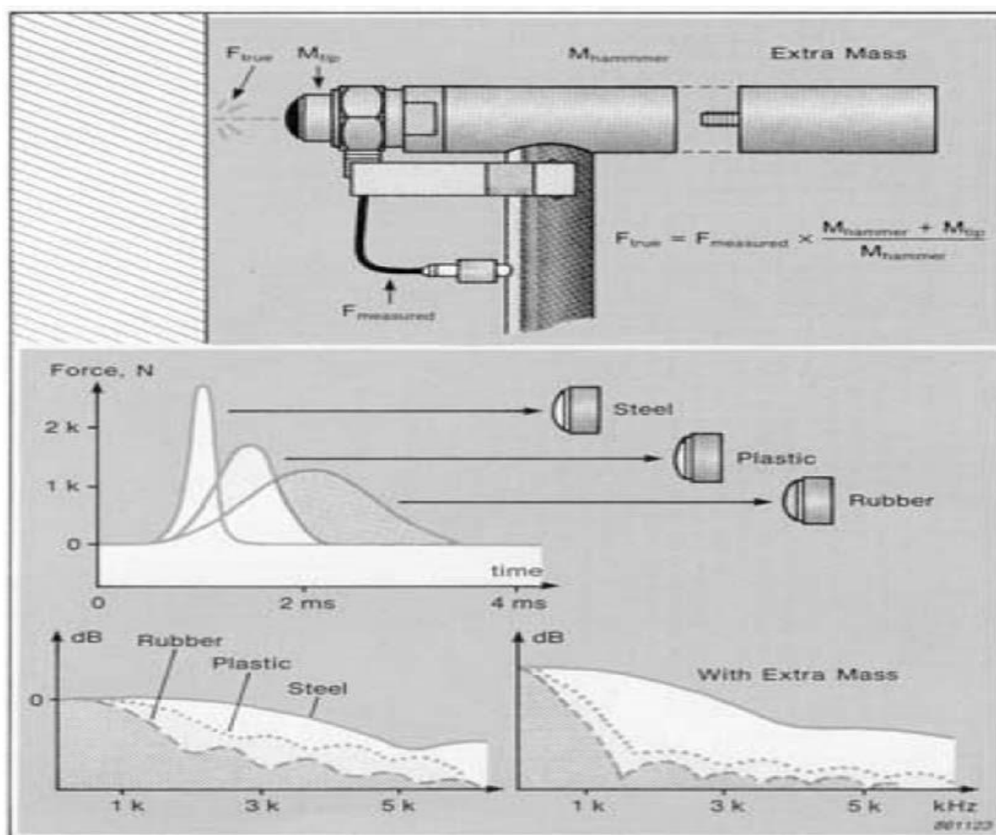
2 hammer

3 Electro-dynamical shaker

4 Tip

5 Transducer

چکش بوده و تنها حین انجام آزمایش بدان متصل می‌شود، دو قطعه دیگر، از اجزای اصلی چکش بوده که مقادیر بزرگی از نیروی اعمالی و همچنین محتوای فرکانسی نیرو به کمک این دو کنترل می‌شوند. در واقع، با در نظر گرفتن این مطلب که با افزایش سختی نوک چکش، زمان اعمال ضربه، کاهش و در نتیجه محتوای فرکانسی ضربه وارده، افزایش می‌یابد، می‌توان با تغییر جنس قطعه نوک چکش، محتوای فرکانسی ضربه اعمالی را افزایش داد شکل (۲-۲۰) نمودار میزان نیرو و محتوای فرکانسی چکش را با سه جنس متفاوت فلز، پلاستیک سخت و پلاستیک نرم برای سر چکش نشان می‌دهد.



شکل (۲-۸) محتوای فرکانسی ضربه با جنس‌های مختلف سر چکش [۹].

لرزشگر الکترودینامیک، رایج‌ترین لرزشگر مورد استفاده در تست مودال است. این وسیله، از یک آهنربا، یک عضو متحرک و یک سیم‌پیچ واقع در آهنربا تشکیل شده است. هنگامی که یک جریان الکتریکی از یک مولد سیگنال از سیم‌پیچ درون لرزشگر عبور می‌کند، نیروی متناسب با جریان و چگالی شار مغناطیسی ایجاد می‌شود که عضو متحرک را حرکت می‌دهد. لرزشگر الکترودینامیک،

دارای محدوده فرکانسی، دامنه و بازه دینامیکی وسیعتری نسبت به چکش می‌باشد. برای تحریک با فرکانس پایین‌تر و دامنه نیروی زیاد، می‌توان از لرزشگرهای الکتروهیدرولیک استفاده کرد.

به طور کلی، تست با لرزشگر (که شامل اعمال ضربه در یک نقطه و دریافت پاسخ از تمامی نقاط دیگر است) در نتیجه اندازه‌گیری‌ها بر روی ستون‌های ماتریس پاسخ فرکانسی بوده و تست با چکش (که شامل اعمال ضربه از تمامی نقاط و دریافت پاسخ از یک نقطه است) در نتیجه اندازه‌گیری‌ها بر روی سطوح ماتریس تابع پاسخ فرکانسی است.

یکی از نکاتی که باید در انتخاب وسیله تحریک سازه به آن توجه داشت، این است که در حین تست، جرم، سختی و میرایی سازه تغییر نکند. به طور معمول، در مورد سازه‌های سبکی که جرم نسبتاً کمی دارند، اگر از لرزشگر استفاده شود، به جهت جرم بالای لرزشگر نسبت به چکش و همچنین اتصال دائم آن به سازه، این امر سبب تغییر جرم، سختی و میرایی کلی سازه شده و در هنگام تست، نتایج نامناسبی را با خود به همراه دارد.

در استفاده از چکش به عنوان تحریک کننده نیز باید به خاطر داشت که استفاده از آن اگرچه به علت سادگی و اضافه نکردن جرم، سختی و میرایی به سازه مورد بررسی، روشی مناسب و متداول است، اما مشکلاتی نظیر عدم امکان کنترل دقیق جهت و نقطه اعمال نیرو، احتمال اعمال نیروهای بسیار بزرگ که منجر به خروج سازه از محدوده خطی یا کشسان می‌شوند، احتمال بروز ضربات چندگانه^۱ و در نهایت مشکلات مربوط به پردازش سیگنال به علت شکل ضربه‌ای تابع تحریک، استفاده از این وسیله را با محدودیت مواجهه می‌کند.

• انتخاب نیروی تحریک

¹ Double hit

انتخاب نیروی تحریک در اجرای دقیق تست مودال اهمیت فراوانی دارد. با وجود آنکه از نظر تئوری، اطلاعات FRF نباید به تحریک و پاسخ وابسته باشند، اما در عمل دقت و کیفیت داده‌های FRF علاوه بر عوامل دیگر، به انتخاب نوع تحریک نیز بستگی خواهند داشت. تصمیم در مورد نوع تحریک در مرحله اول، به دقت مورد نیاز در اندازه‌گیری و نوع سازه وابسته است. بنابراین، برای اینکه بتوان مناسب‌ترین تحریک را از بین روش‌های مختلف انتخاب کرد، لازم است تمام روش‌های تحریک موجود شناسایی و بررسی شوند. توابع تحریک به طور کلی شامل چهار دسته پایا، تصادفی، متناوب و گذرا هستند [۱۰].

۲-۲-۳ - اندازه‌گیری پاسخ

به طور کلی برای اندازه‌گیری پاسخ‌ها در آنالیز مودال یک سازه از ترانسدیوسرها استفاده می‌شود که از این بین، ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک به دلیل مزایایی از جمله ابعاد کوچک، وزن کم و محدوده فرکانسی و دمایی وسیع، بیش از سایر انواع آن، بکار می‌روند. این ترانسدیوسرها، خود دارای انواع مختلفی برای اندازه‌گیری نیرو و شتاب هستند که نمونه‌ای از آنها در شکل‌های (۲-۲۱) و (۲-۲۲) نشان داده شده‌اند. نمونه‌ای دیگر از تجهیزات اندازه‌گیری، ترانسدیوسرهای لیزری (LVD) است که در شکل (۲-۲۳) نشان داده شده است. ترانسدیوسرها دارای مجموعه‌ای از اطلاعات در رابطه با عملکرد خود هستند که توسط سازنده ارائه می‌شوند. این مجموعه اطلاعات با نام دیتاشیت^۱ برای هر سنسوری موجود هستند. از بین اطلاعاتی که در دیتاشیت‌های شتاب سنج‌ها ارائه می‌شود، توجه به حساسیت، محدوده فرکانسی و شتاب بیشینه، بیش از سایر موارد، مورد توجه هستند. حساسیت که اغلب بر حسب mV/g معرفی می‌شود، به همراه پارامترهای دیگر مانند جرم، محدوده دمایی، حساسیت‌های

¹ Data sheet

جانبی و غیره، قبل از شروع هر آزمایشی، در نرم‌افزاری که با آنالایزر در ارتباط است، تعریف می‌شود[۹].



(ب)

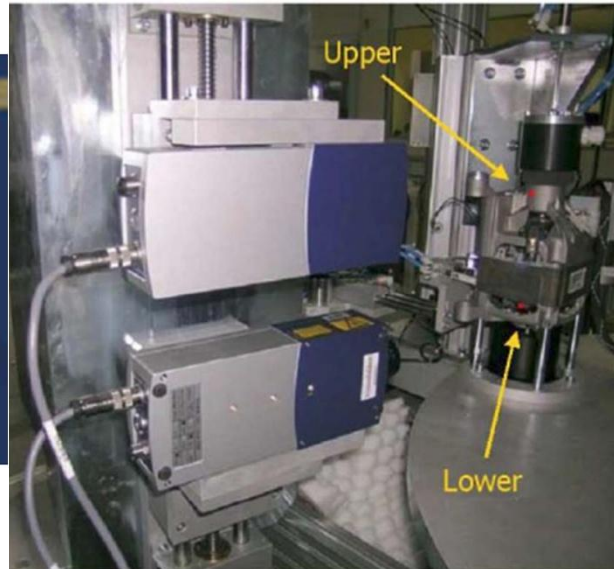
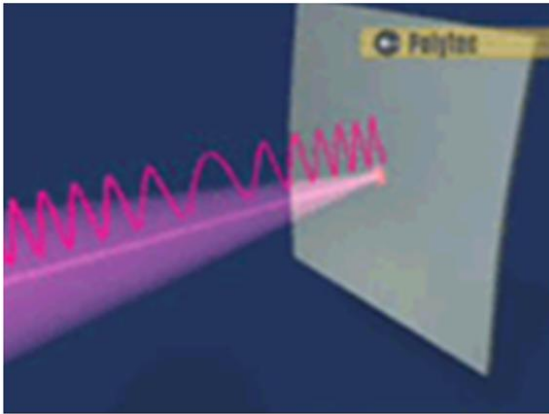


(الف)

شکل (۹-۲) (الف) شتاب سنج پیزو الکتریک و (ب) نیرو سنج پیزو الکتریک



شکل (۱۰-۲) نمونه‌های دیگری از شتاب‌سنج‌ها و نیرو سنج‌های پیزو الکتریک.

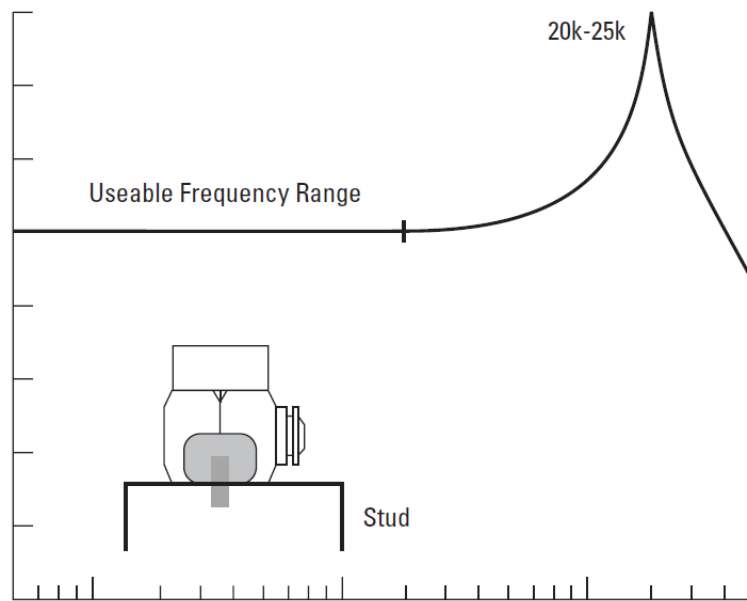


شکل (۲-۱۱) یک نمونه شتاب سنج لیزری.

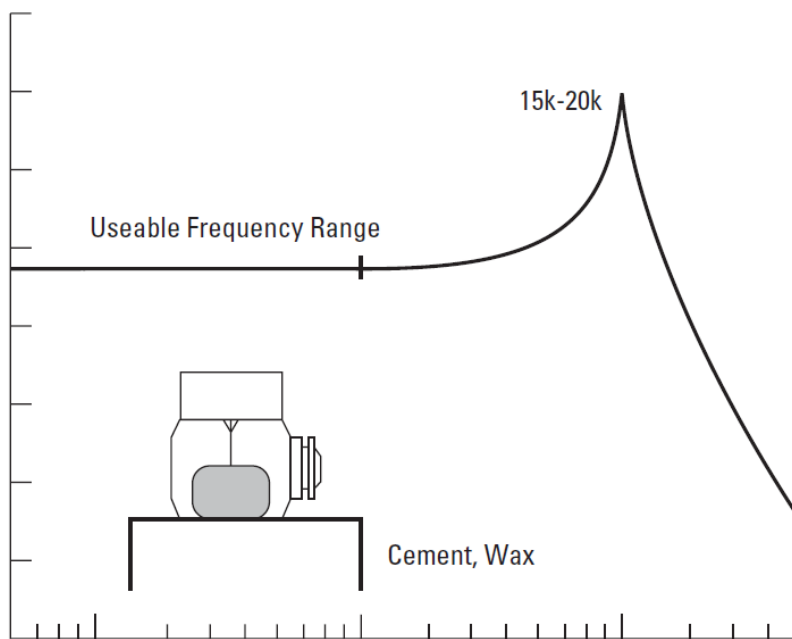
نکته دیگری که در مورد ترانسدیوسرها باید رعایت شود، نحوه نصب آن به سازه مورد آزمایش یا به عبارت دیگر، توجه به صلبیت آن است. بدین معنی که افزایش سختی اتصال به هر مقدار ممکن، شرایط مطلوبتری را فراهم می‌آورد. زیرا، مقادیر پایین سختی اتصال، موجب کاهش محدوده فرکانسی قابل اندازه‌گیری توسط ترانسدیوسر ارائه شده در دیتاشیت آن می‌شود. روش‌های مختلفی مانند استفاده از چسب، موم^۱، آهنربا و یا پیچ‌های اتصال برای تثبیت کامل ترانسدیوسرها در شکل‌های (۲-۲۴) تا (۲-۲۶) نشان داده شده است.

در این شکل، تأثیر روش‌های نصب مختلف بر روی محدوده فرکانس تشدید نیز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سختی اتصال شتاب‌سنج با پیچ به سطح سازه (شکل (۲-۲۴))، نسبت به استفاده از موم و آهنربا بیشتر است و چون فرکانس طبیعی با سختی رابطه مستقیم دارد، لذا، فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده و محدوده فرکانسی آن نسبت به دو حالت دیگر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد [۹].

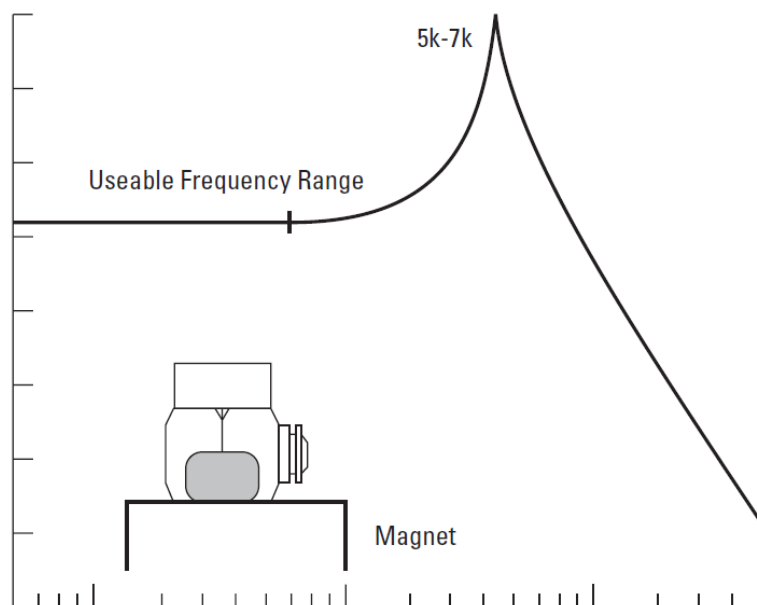
¹ Wax



شکل (۱۲-۲) پاسخ‌های فرکانسی مربوط به نصب ترانسدیوسرها با استفاده از میخ یا پیچ.



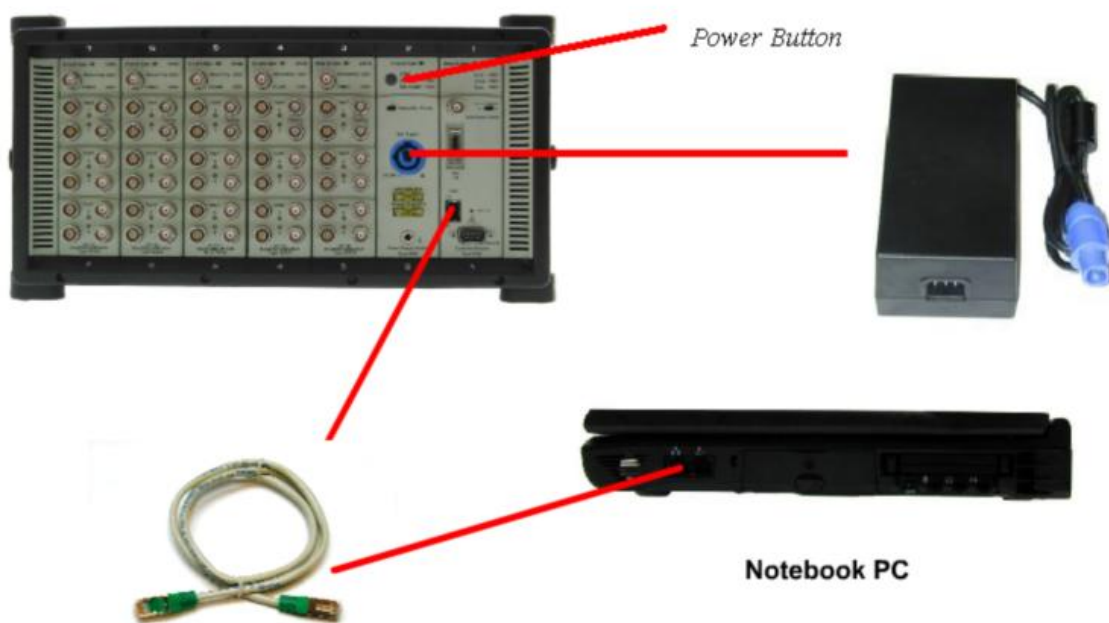
شکل (۱۳-۲) پاسخ‌های فرکانسی مربوط به نصب ترانسدیوسرها با استفاده از موم.



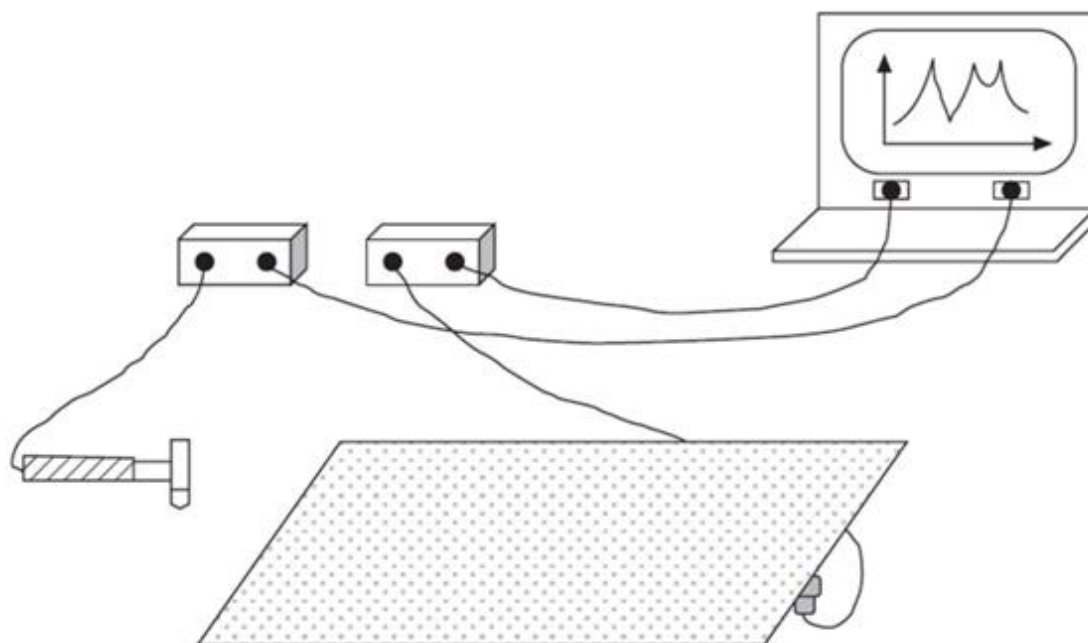
شکل (۲-۱۴) پاسخ‌های فرکانسی مربوط نصب ترانس‌دیوسرها با استفاده از آهنربا.

۲-۲-۴ - اکتساب داده و پردازش آنها

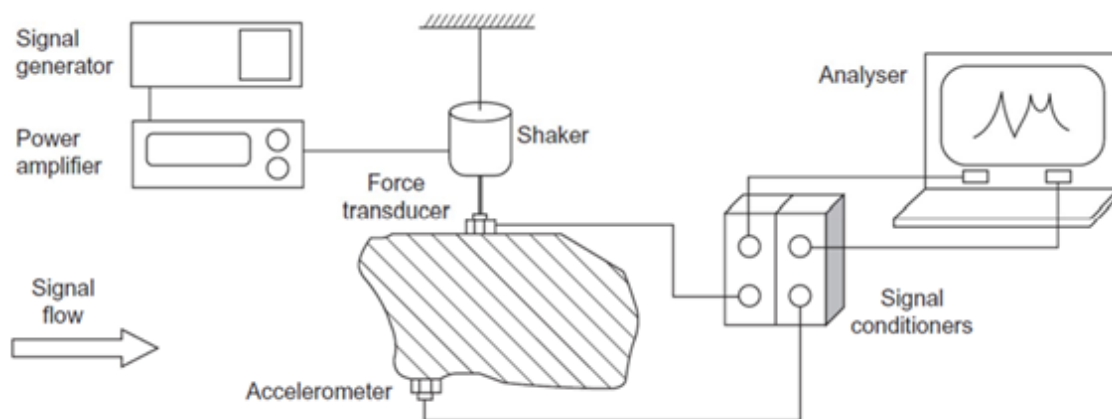
اطلاعاتی که در طول اجرای آزمایش از وسایل اندازه‌گیری پاسخ و تحریک بدست می‌آیند، بوسیله دستگاه آنالایزر ثبت و مورد پردازش قرار می‌گیرند. وظیفه اصلی این دستگاه، دریافت ولتاژ خروجی از دستگاه‌های اندازه‌گیری، تقویت داده‌ها، فیلتر کردن آنها، تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال و در نهایت ذخیره سازی آنها در کامپیوتر است. آنالایزرها بسته به نوع کاربرد مورد استفاده طبق یک دسته‌بندی بر اساس تعداد کانالهای آن تقسیم‌بندی می‌شوند. هر چه تعداد کانالهای ورودی-خروجی آنها بیشتر باشد، تعداد تجهیزات تحریک و اندازه‌گیری بیشتری را می‌توان به آن متصل کرد. برای اتصال کامپیوتر به آنالایزر، از کابل‌های رابط استفاده می‌شود. شکل (۲-۲۷) نمونه‌ای از آنالایزرهای ۳۴ کاناله را به همراه کامپیوتر شخصی و کابل‌های متصل‌کننده آن دو به یکدیگر نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۵) یک آنالایزر ۳۴ کاناله به همراه تجهیزات نصب آن به کامپیوتر. در پایان، با سرهم کردن تجهیزات مذکور، شرایط برای انجام یک تست مودال فراهم می‌شود. شکل های (۲-۲۸) و (۲-۲۹) نحوه اتصال تجهیزات مربوط به یک تست مودال را با دو نوع تحریک کننده متفاوت (یکی چکش و دیگری لرزشگر) را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۶) مجموعه آماده برای تست مودال با تحریک چکش [۱۱].



شکل (۲-۱۷) مجموعه آماده برای تست مودال با تحریک لرزشگر [۱۱].

۲-۳- ارزیابی اولیه داده‌های FRF اندازه‌گیری شده

کیفیت یک تست آنالیز مودال بستگی زیادی به کیفیت داده‌های FRF یا پاسخ ضربه دارد. با وجود آنکه در روش‌های آنالیز مودال سعی بر آن است تا اثر خطاهای اندازه‌گیری تا حد امکان کاسته شود، اما هیچ روشی در آنالیز مودال قادر به تصحیح خطاهای اساسی یا اشتباهات اندازه‌گیری نمی‌باشد. خواص مودال بدست آمده از FRF دارای خطا، ممکن است خطاهای غیر قابل قبولی در خواص مودال محاسبه شده ایجاد کند. در چنین شرایطی، معمولاً ابزارهای عددی موثری برای تشخیص خطا در مدل محاسبه شده وجود ندارد. بنابراین، ارزیابی کیفی داده‌های FRF اندازه‌گیری شده در آنالیز مودال تجربی بسیار حیاتی است.

ارزیابی داده‌های FRF اندازه‌گیری شده، عمدتاً برای حصول اطمینان از دو عامل است: (۱) فرضیات لازم برای آنالیز مودال در سازه برقرار است. (۲) خطاهای انسانی و تجهیزات به حداقل رسیده و یا حذف شده‌اند. اساساً در آنالیز مودال، سازه باید دارای خواص جابجایی، ثابت زمانی و رفتار خطی باشد تا خواص مودال موجود در داده‌های FRF سازگار باشند. چنانچه این فرضیات تأیید نشوند، صحت خواص مودال بدست آمده، مورد اطمینان نخواهد بود. بعلاوه، این ارزیابی اولیه از عدم وجود خطاهای انسانی مانند اشتباه در ثبت و نگهداری اطلاعات و حداقل بودن خطاهای ناشی از پردازش سیگنال، اطمینان می‌دهد.

در ادامه برخی از روش‌های ارزیابی داده‌های FRF حاصل از یک تست مودال، به طور اجمالی توضیح داده شده است.

۱) کنترل تکرارپذیری داده‌های FRF اندازه‌گیری شده

ساده‌ترین - نه کم ارزش‌ترین - روش ارزیابی داده‌های اندازه‌گیری شده، اطمینان از تکرارپذیر بودن آنها می‌باشد. با این کار، از رفتار دینامیکی سازه و سیستم اندازه‌گیری در طول زمان، اطمینان حاصل می‌شود. در یک سازه خطی، به ازای نقاط اعمال تحریک و اندازه‌گیری پاسخ انتخاب شده معین، منحنی‌های یکسانی در هر اندازه‌گیری بدست می‌آیند. با انتخاب دو نقطه معین برای تحریک و اندازه‌گیری در شرایط تست، می‌توان چندین اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف انجام داد. اندازه‌گیری FRFهای انتخاب شده را می‌توان قبل و بعد از تست کل سازه تکرار کرد. این کار به ظاهر ساده، می‌تواند برای اطمینان از ثابت بودن رفتار سازه و همچنین شرایط اندازه‌گیری در طول زمان انجام تست بسیار مفید باشد.

۲) کنترل جابجایی داده‌های FRF اندازه‌گیری شده

یک سازه خطی از خاصیت جابجایی پیروی می‌کند. برای یک ورودی منفرد، این خاصیت به معنای آن است که FRF حاصل از یک اندازه‌گیری در صورت جابجا کردن محل تحریک و اندازه‌گیری، تغییر نخواهد کرد. از نظر تئوری، این خاصیت، از تقارن ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی ناشی می‌شود. از خاصیت جابجایی FRF می‌توان برای قابلیت اطمینان و دقت داده‌های FRF اندازه‌گیری شده استفاده کرد.

در عمل، این خاصیت را نمی‌توان در برخی از نقاط سازه اعمال کرد. به عنوان مثال، در تست با لرزشگر، برخی از درجات آزادی به دلیل محدودیت‌های فیزیکی قابل تحریک نمی‌باشند. این موضوع، مانع کنترل جابجایی در برخی FRFها می‌شود. بازسازی دقیق شرایط تست، با توجه به مسائلی مانند شرایط نیرو و دقت در محل دو نقطه تحریک و اندازه‌گیری، جای بحث می‌باشد. از طرفی، تفاوت در

محل آنتی رزونانس در FRF های ناشی از تعویض نقاط تحریک و اندازه‌گیری، موضوع عجیبی نخواهد بود.

۳) کنترل خطی بودن داده‌های FRF اندازه‌گیری شده

شاید بیشترین فرض آنالیز مودال این باشد که سازه تحت تست دارای رفتار خطی است. بدون در نظر گرفتن این فرض، نتایج آنالیز مودال، بی معنا می باشد. برای کنترل خطی بودن، لازم است از عدم وابستگی داده‌های FRF به دامنه‌های تحریک مختلف اطمینان حاصل شود. این موضوع را می‌توان به صورت کیفی یا کمی بررسی کرد. برای کنترل کیفی، می‌توان داده‌های FRF را در نقاط یکسان، مجدداً با ایجاد تغییرات متفاوت، اما کنترل شده در دامنه تحریک، اندازه‌گیری نمود. داده‌های اندازه‌گیری شده را می‌توان به منظور تأیید یکسان بودن منحنی‌های حاصل، در یک شکل روی هم بررسی نمود. به عنوان مثال، اندازه‌گیری FRF با دامنه پاسخ ثابت می‌تواند خواص غیر خطی سیستم را خطی نماید.

۴) مشخصات خاص یک FRF

با توجه به تئوری آنالیز مودال، می‌توان برخی از مشخصات یک FRF را بدست آورده و از آن برای اندازه‌گیری FRF های اندازه‌گیری شده در تست مودال استفاده کرد. به کمک این ارزیابی می‌توان خطاهای اندازه‌گیری یا اشتباهات انجام شده در تست مودال را آشکار نمود. اولین مشخصه آن است که در FRF نقطه‌ای، بین هر دو رزونانس متوالی، یک آنتی رزونانس واقع شده باشد. بنابراین، اگر چنین مشخصه‌ای در FRF نقطه‌ای حاصل از اندازه‌گیری مشاهده نشود، احتمالاً ترانسدیوسرهای پاسخ و نیرو، عملاً در مختصاتی که باید باشند، قرار ندارند. هر انحراف کوچکی در این دو موقعیت، باعث می‌شود آنتی رزونانس از بین برود.

۴-۲- معیار اطمینان مودال^۱

یکی دیگر از روش‌هایی که به ما در بررسی صحت نتایج حاصل از تست مودال یک سازه کمک می‌کند، معیاری به نام "معیار اطمینان مودال" یا (MAC) است. در این رساله، برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از تست، از این روش استفاده کرده و با جداسازی اثر شکل مدها می‌توان همبستگی بین دو شکل مد را بررسی کرد. رابطه‌ای که بتوان بر اساس آن این همبستگی را بدست آورد، عبارتست از [۹]

$$MAC(\{\psi_{Ai}\}, \{\psi_{Bj}\}) = \frac{|\{\psi_{Ai}^T\}\{\psi_{Bj}\}|^2}{(\{\psi_{Ai}^T\}\{\psi_{Ai}\})(\{\psi_{Bj}^T\}\{\psi_{Bj}\})} \quad (۳-۲)$$

که $\{\psi_{Ai}\}$ و $\{\psi_{Bj}\}$ به ترتیب دو شکل مد بدست آمده از آزمایش مودال سازه هستند. برای بررسی معیار MAC، آن را در قالب یک ماتریس که سطرها و ستونهای آن نشان دهنده مدهای سازه هستند، نشان می‌دهند. با توجه به این معیار، هرچه مقدار $MAC(\{\psi_{Ai}\}, \{\psi_{Bi}\})$ به عددیک نزدیکتر باشد، همبستگی بین دو شکل مد بیشتر خواهد بود و در صورتی که برابر با یک باشد، دو شکل مد کاملاً یکسان هستند و نتایج بدست آمده معتبر نیستند. برای اینکه نتایج بدست آمده از تست کاملاً معتبر باشند، می‌بایست هیچ از شکل مدهای بدست آمده از آزمایش مودال سازه، یکسان نباشند یا به عبارت دیگر، همبستگی یا MAC مربوط به هر دو شکل مد دلخواه بدست آمده، به عدد صفر نزدیکتر باشد. از اینرو، می‌توان گفت، عناصر روی قطر اصلی ماتریس نشان‌دهنده MAC، همواره برابر با یک و عناصر غیر واقع بر قطر اصلی مقداری بین صفر و یک دارند. ماکزیمم مقداری که عناصر غیر قطری می‌توانند با وجود اطمینان از مستقل بودن مدها داشته باشند، در منابع مختلف متفاوت است. بگونه‌ای که این

¹ Modal assurance criterion

مقدار در کتاب اوینز^۱ ۰/۲۵ و در استاندارد ECSS برابر با ۰/۱ و در هندبوک DTA حدود ۰/۶ ذکر شده است [۹].

در سال ۱۹۸۴ وست^۲ و همکاران از تئوری این روش نیز، برای تعیین عیوب یک سازه با استفاده از همبستگی بین مدهای بدست آمده از آزمایش بدنه یک سازه فضایی در معرض بارگذاری صوتی، قبل و بعد از وقوع عیب، استفاده کردند [۱۲].

۲-۵- عیب‌یابی مودال سازه‌ها

یکی از روش‌هایی که از آن می‌توان جهت تشخیص عیوب یک سازه (تیر، ورق و ...) استفاده کرد، روش ارتعاشات و آنالیز مودال می‌باشد. امروزه روش‌های آنالیز مودال تنوع گسترده‌ای پیدا کرده‌اند که همگی به دو نوع کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از،

۱- روش‌های که بر مبنای اندازه‌گیری شکل مد یا انحنای شکل مد هستند [۱۳].

۲- روش‌هایی که بر مبنای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی هستند [۱۳]. برخی از این

روش‌های مودال که در عیب‌یابی سازه‌ها استفاده می‌شود، در جدول (۱-۱) آورده شده

است.

جدول (۱-۱) روش‌های مودال قابل استفاده در عیب‌یابی سازه‌ها.

1 Ewins

2 West

اندازه‌گیری شکل مد	اندازه‌گیری فرکانس طبیعی
فاکتور مقیاس مودال (MSF)	فرکانسهای طبیعی و مارکوپارامترها
معیار اطمینان مودال (MAC)	شاخص انحنای پاسخ فرکانسی (CFR)
معیار اطمینان مودال هم‌مختصات (COMAC)	شاخص عیب بر مبنای تغییر فرکانس طبیعی (FDI)
انحنای شکل مد (MSC)	شکل مود پاسخ فرکانسی (FRF_MS)
شاخص عیب (DIM)	شیب شکل مود پاسخ فرکانسی (FRF_MSS)
هیبرید (HDD)	مجذور انحنای شکل مود پاسخ فرکانسی (FRF_MSCS)
شاخص ممان مودال (MMI)	
شاخص تطابق مودال (MCI)	
تغییر عملگر لاپلاسی (MLO)	
شاخص انرژی کرنشی (SEM)	
شاخص انرژی کرنشی طیفی یا متوسط (SSE)	

ایده اصلی در پیاده‌سازی روش‌های مودال که می‌توان از آن به عنوان یک روش پردازش سیگنال برای تشخیص عیوب سازه‌ای نام برد، اندازه‌گیری پارامترهای مودال از قبیل فرکانس طبیعی، شکل مد و میرایی مودال سازه، قبل و بعد از وقوع عیب می‌باشد. این پارامترها همگی تابعی از خواص فیزیکی سازه از قبیل جرم، میرایی و سختی می‌باشند. خرابی در سازه‌ها بواسطه تغییر در ساختار آنها مانند تغییر خواص رفتاری و تغییر در خواص هندسی نواحی از سازه که دارای ساختار هندسی همگن می‌باشند، بوجود می‌آید و این خرابی‌ها باعث کاهش سختی در یک یا چند المان از سازه شده و پارامترهای دینامیکی سازه را تغییر می‌دهند. از اینرو، تغییر در این خواص فیزیکی به خاطر وجود عیب، منجر به شناسایی تغییرات قابل شناسایی در پارامترهای مودال خواهد شد.

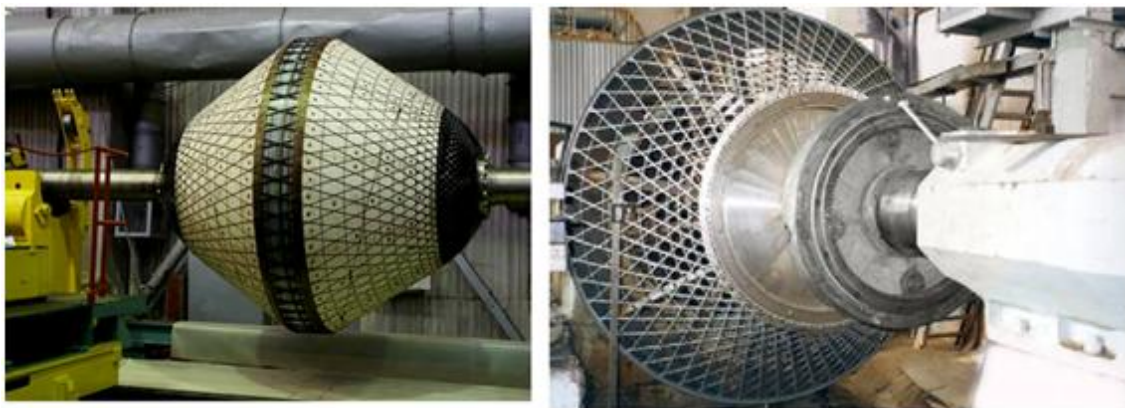
عیب، یک پدیده موضعی بوده و پاسخ‌های موضعی در مدهای فرکانسی بالاتر بدست می‌آیند، در صورتی که مدهای فرکانسی پایین‌تر برای پاسخ‌های کلی سازه مناسب بوده و نسبت به تغییرات

موضعی در سازه حساسیت کمتری نشان می‌دهند. در نتیجه، باید توجه داشت که در عمل و برای شناسایی عیوب، باید سازه در فرکانس‌های بالاتری تحریک شود تا بتوان عیوب بسیار کوچک آن را نیز اندازه گرفت.

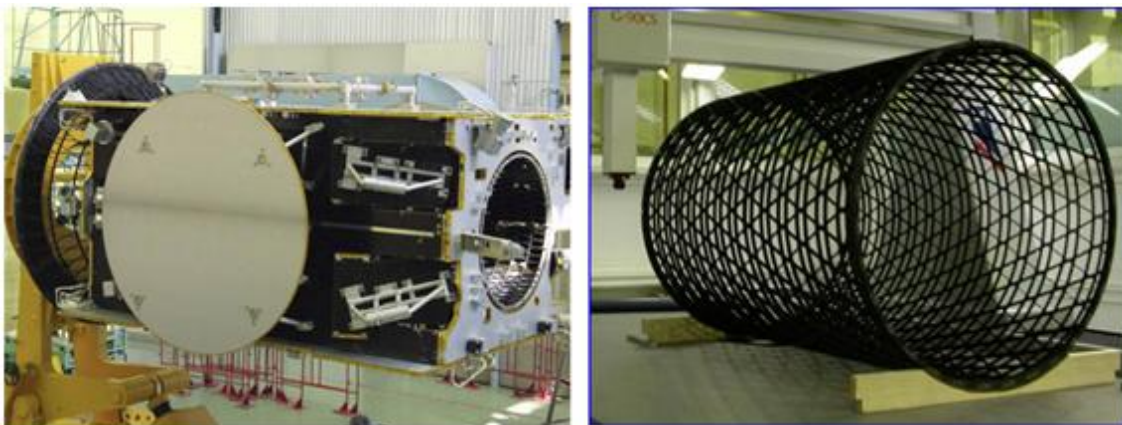
در برخی از روش‌های تشخیص عیب بر مبنای آنالیز مودال، اطلاعاتی از هر دو سازه سالم و معیوب مورد نیاز می‌باشد، به طوریکه با مقایسه اطلاعات مودال بدست آمده از آن دو، می‌توان به وجود، موقعیت و شدت عیوب ایجاد شده در سازه‌ها پی برد. اما با پیشرفت‌های اخیر، تنها داشتن اطلاعاتی پیرامون خواص مودال سازه معیوب جهت شناسایی عیوب سازه کافی است.

۲-۶- سابقه تحقیق

امروزه یکی از حوزه‌هایی که در پیشرفت جامعه بشری نقش بسزایی را ایفا می‌کند، سازه‌های فضایی هستند. از گذشته تا امروز، سازه‌های هندسی مختلفی در ساخت بدنه ادوات فضایی استفاده شده است. اما، به جهت وزن بالای این نوع سازه‌ها، رفته‌رفته جای خود را به سازه‌های کامپوزیتی داده به طوری که امروزه برای بالا بردن خواص مکانیکی و حداکثر نسبت استحکام به وزن مطلوب، سازه کامپوزیتی با تقویت کننده‌های مشبک در اشکال مختلف روی کار آمده‌اند. شکل‌های (۲-۳۰) و (۲-۳۱) نمونه‌هایی از این نوع سازه‌ها را نشان می‌دهد که در بدنه فضاپیماها یا هواپیما استفاده شده است.



شکل (۲-۱۸) یک نمونه پوسته مخروطی با شبکه تقویت‌های شش ضلعی [۱۴].



شکل (۲-۱۹) یک نمونه پوسته استوانه‌ای با شبکه تقویت‌های شش ضلعی [۱۴].

تاریخچه سازه‌های شبکه‌ای روسی (تقریباً شبیه پوسته‌های تقویت شده) از برج رادیویی مسکو که در سال ۱۹۲۱ ساخته شده است، آغاز گردید. این سازه که توسط شوخوف^۱ به ارتفاع ۱۴۸/۳ متر ساخته شده است، بسیار شبیه به سازه‌های شبکه‌ای کامپوزیتی مدرن است [۱۵].

تاریخچه سازه‌های شبکه‌ای آمریکایی نیز از شبکه‌بندی همگن صفحه آلومینیومی توسط شرکت مک دانلد داگلاس^۲ شروع شد و در سیستم پرتابه دلتا استفاده گردید. در این پروژه، صفحات آلومینیومی به صورت صفحات شبکه‌بندی شده همگن که شامل ریب‌هایی است که مثلث‌های متساوی‌الاضلاعی را تشکیل می‌دهند و علاوه بر آن شامل یک جلد ضخیم نیز می‌باشند، ماشینکاری گردیدند [۱۶].

توسعه سازه‌های مرکب با چارچوب‌های کروی و شبه کروی به کار رفته در هواپیماها آغاز شد. این توسعه به ویژه در جنگ جهانی دوم باعث روی کار آمدن بمب‌افکن‌های انگلیسی با چارچوب‌های شبه کروی فلزی شد [۱۶].

استفاده از سازه‌های شبکه‌ای در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ برای اولین بار در اسکلت هواپیماها و بال‌های آنها توسط طراح انگلیسی، بارنز ویلیامز^۳ استفاده گردید [۶]. این طراحی متعاقباً در هواپیمای

1 Shokhov

2 Mc Donnell – Douglas

3 Barnes Wallis

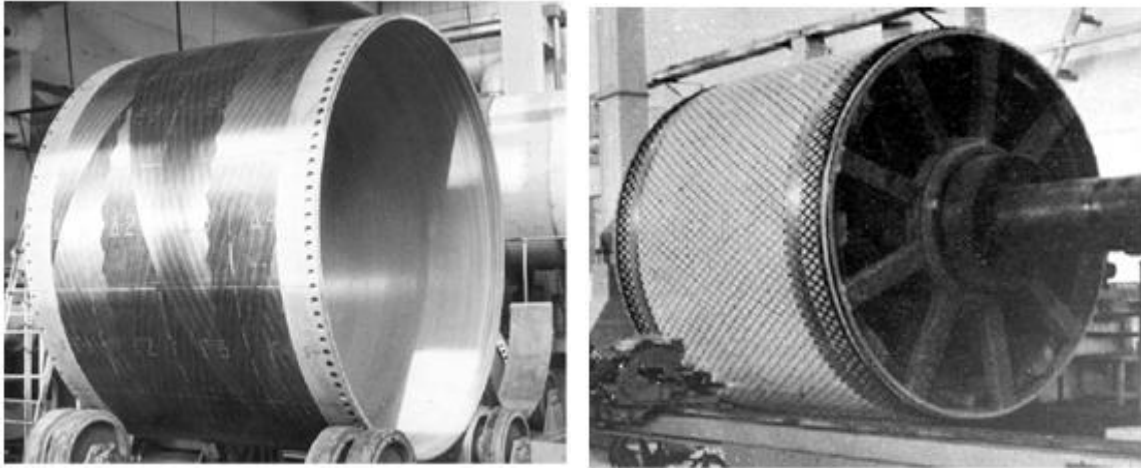
بمب افکن ولینگتون^۱ مورد بهره‌برداری عملی واقع شد. شبکه‌بندی از مواد فلزی بود و مقاومت بالایی در تحمل آسیب‌دیدگی از خود بروز می‌داد؛ هرچند که مراحل ساخت نیازمند تجهیزات وسیعی برای شکل‌دهی بود تا اطمینان لازم برای دقت و صحت ساخت و مونتاژ بدست می‌آمد و به این دلیل نمونه‌های ساخته شده به لحاظ اقتصادی هزینه سنگینی در برداشتند. این عامل باعث گردید که اولین استفاده از سازه‌های شبکه‌ای در زمینه‌های بسیار محدودی صورت پذیرد [۶].

ناسا در گزارش ۱۱۹۵ برای صفحات تقویت‌شده شبکه‌ای فلزی با شکل شبکه متفاوت، فرمول‌بندی با پانزده ثابت مهندسی را ارائه نمود که در آنها خمش، برش و پیچش بروز می‌کردند. در این فرمول‌بندی، صفحات به صورت یک صفحه اورتوتروپ رفتار می‌کردند [۱۷].

اولین آزمایش‌ها در روسیه بر روی کامپوزیت‌های مشبک در سال ۱۹۸۱ در شرکت *CRISMB* انجام گردید [۱۸ و ۱۹]. سیلندر ساخته شده دارای ۱/۳ متر قطر و ۱/۴ متر طول بود. این سیلندر تحت بار فشاری محوری بسیار بیشتری از بار تخریب پوسته‌های معمولی آسیب دید. مد تخریب، قابل پیش‌بینی نبود؛ زیرا مد شکست از نوع کمانش سیلندر نبود و ناشی از شکست ریب‌های مارپیچی بود.

یک تحقیق ویژه در شرکت *CRISMB* به منظور دستیابی به روش‌های طراحی، آنالیز، ساخت، بازرسی و مراحل انجام آزمایش سازه‌های مشبک کامپوزیتی انجام گردید. نتایج رضایت‌بخش این تحقیق در سال ۱۹۸۵ منجر به ساخت نمونه‌های موفق که در شکل (۲-۳۲) نشان داده شده است، گردید.

1 Wellington Bomber



شکل (۲-۲۰) نمونه های استوانه ای ساخته شده توسط شرکت *CRISMB* [۱۸].

هر دو سازه مشبک با پیچاندن الیاف کربن بر روی شیارهای ایجاد شده بر روی مندرل ماشین گردان ساخته می‌شوند و هر دو دارای پوسته آرامید-اپوکسی می‌باشند. سازه اول به قطر $2/3$ متر و طول $1/8$ متر و قابلیت تحمل بار فشاری $2/15$ مگا نیوتن دارای پوسته دو طرفه است و فوم داخلی از آن خارج نشده است. سازه دوم با قطر $2/4$ متر و طول $2/6$ متر و قابلیت تحمل بار فشاری محوری $3/2$ مگانیوتن است و فقط دارای پوسته خارجی بوده و فوم داخلی آن خارج شده است.

در سالهای اخیر، محققان بسیاری روی ساخت، بررسی کمانش و بررسی رفتار ارتعاشی این نوع سازه ها کار کرده‌اند [۲۰-۳۸]. به عنوان مثال، باروخ و سینگر^۱ تأثیر خروج از مرکزیت تقویت‌کننده‌ها را روی پایداری کلی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت فشار بررسی کردند [۲۰]. ژو^۲ نیز رفتار ارتعاشی این نوع پوسته‌ها را با تقویت‌کننده‌های طولی با سطح مقطع‌های غیر دایره‌ای تحت فشارهای هارمونیک مورد مطالعه و بررسی قرار داد [۲۵]. نجفی زاده کمانش الاستیک پوسته‌های استوانه‌ای با تقویت‌کننده‌های مشبک از جنس FGM را تحت بارهای محوری مورد بررسی قرار داد [۲۶]. شانگ و

1 Baruch and Singer

2 zhi

و^۱ از روش المان محدود برای بررسی تأثیر انواع مش‌های نامتقارن روی بارهای ثانویه کمانشی استفاده کردند [۳۴].

واسلیف^۲ برخی از آزمایشات انجام گرفته توسط کشور روسیه را در توسعه و کاربردهای این نوع سازه‌ها در سال ۲۰۱۲ ارائه داد [۱۴]. از دیگر اقداماتی که اخیراً پیرامون مطالعه این نوع سازه‌ها صورت گرفته است، ارائه راه‌حلی برای مشخص کردن حداقل جرم و متغیرهای طراحی بهینه متناظر برای بررسی مدل کمانش این نوع سازه‌ها است که توسط تاتارو^۳ در سال ۲۰۱۲ صورت گرفته است [۳۸].

همانطور که پیش از این نیز گفته شد، به خاطر اهمیت بالایی که این نوع سازه‌ها در صنایع مختلف دارند، بحث عیب‌یابی و نظارت بر سلامتی آنها نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بر این مبنا، تا امروز روش‌های مختلفی جهت عیب‌یابی سازه‌ها به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به روش مودال اشاره کرد. برخی از انواع روش‌هایی که بر اساس آنالیز مودال و ارتعاشاتی روی سازه‌ها اجرا می‌شود، در جدول (۱-۱) فهرست شده‌اند.

همانطور که در بخش ۲-۵- نیز توضیح داده شد، در همه این روش‌های مودال، با تعریف یک شاخص عیب بر مبنای یکی از دو حالت مذکور، جهت عیب‌یابی سازه‌ها اقدام می‌شود. یکی از معیارهایی که در آن از تغییر شکل مدهای سازه معیوب به منظور عیب‌یابی سازه‌ها استفاده شده، معیار فاکتور مقیاس (MSF) مودال بود که در دهه ۸۰ ابداع و بکار گرفته شد. این معیار بسیار ساده از مقایسه و همبستگی دو شکل مد در سازه سالم و معیوب متناظر استفاده می‌کرد [۳۹ و ۴۰]. بعدها، انواع دیگری از این روش تحت عناوین معیار اطمینان مودال (MAC) [۴۱ و ۴۲] و معیار اطمینان مودال هم

1 Zhang and Wi

2 Vesiliev

3 Totaro

مختصات (COMAC) ابداع شد که همگی نیز به نوعی بر اساس مقایسه شکل مدهای دو سازه سالم و معیوب عمل می‌کردند [۴۲-۴۴]. فاکتور مقیاس مودال و فاکتور اطمینان مودال، هر دو می‌توانند فقط وجود عیب را در سازه پیش‌بینی کنند. البته با توجه به وجود خطا در هر بار انجام تست و اندازه‌گیری، این معیارها در تشخیص عیب چندان مطمئن عمل نمی‌کنند. روش انحنای شکل مد (MSC) نیز پس از این روش‌ها، روش کاملتری بود که از رابطه بین انحنای یک سازه و کرنش‌های خمشی آن نتیجه می‌گیرد [۴۵]. این شاخص به خوبی می‌تواند محل عیب را در ورقه‌ها و تیرها شناسایی کند [۴۶-۵۰]؛ اما به خاطر پیچیدگی پیاده‌سازی آن در سازه‌های خمیده مثل استوانه یا کره، کمتر از آن استفاده شده است.

با این وجود، از بین روش‌هایی که بر مبنای داده‌های مودال عمل می‌کنند، روش انرژی کرنشی، به خاطر استفاده از مشتقات درجه دوم جابجایی‌های مودال، روش قوی‌تری است که به سه دسته شاخص انرژی کرنشی (SEM) [۵۱-۷۴] و شاخص انرژی کرنشی طیفی [83] (SSE) و شاخص انرژی کرنشی متوسط [۷۶] تقسیم‌بندی می‌شود. در مقایسه این شاخص‌ها، شاخص انرژی کرنشی (SEM) بیشترین ثبات و پایداری را در برابر سیگنال‌هایی که با نویز همراه هستند، از خود نشان می‌دهد.

این شاخص، بر مبنای انرژی کرنشی تغییر شکل‌های الاستیک در یک مد مشخص بوده و نسبت به تغییر فرکانس و شکل مدهای سازه بسیار حساس است. مفهوم انرژی کرنشی در ابتدا توسط استابس^۱ و همکاران [۵۱] و فارر^۲ [۵۲] ارائه شد. آنها در کار خود، روشی را بر مبنای کاهش انرژی کرنشی مودال بوسیله انحنای شکل مدهای اندازه‌گیری شده ارائه کردند و از آن در عیب‌یابی یک پل فولادی استفاده کردند. محققان دیگری کارهای خود را بر اساس روش انرژی کرنشی بر روی سازه‌های تیری

1 Stubbs

2 Farrar

شکل بنا نهادند [۵۵-۶۰]. انعطاف‌پذیری این شاخص عیب برای سازه‌های تیرگونه و بزرگ توسط پارک^۱ و همکارانش ارزیابی شد. آنها نشان دادند که این روش می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی، عیوب موجود در این سازه‌های یک بعدی را نشان دهد [۵۳]. کیم^۲ و همکارانش نیز از روشهای بر مبنای فرکانس و شکل مد برای تشخیص اندازه و شدت عیوب سازه‌های تیری شکل استفاده کردند [۵۴]. اما، رفته‌رفته محققان به فکر پیاده‌سازی روش انرژی کرنشی برای عیب‌یابی ورق‌ها افتادند. آنها در کارهای خود از انحنای دو بعدی شکل مد استفاده کردند.

در سال ۱۹۹۷ کورنویل^۳ [۶۱] از شکل مدها برای محاسبه انرژی کرنشی یک ورق فولادی استفاده کرد. در این روش از نسبت انرژی کرنشی ورق قبل و بعد از وقوع عیب برای تعریف شاخص عیب استفاده شده است. در واقع از این شاخص برای تعیین مکان عیب استفاده گردیده است. اما مشکل این روش در دقت مدهای اندازه‌گیری شده می‌باشد که برای حل این مشکل و تعیین مکان دقیق‌تر عیب، نیاز است که تعداد سنسورها را افزایش داده و پاسخ موقعیت‌های بیشتری از سازه را بدست آورد. شاخص تطابق مودال (MCI) توزیع یافته نیز در سال ۲۰۰۵ به منظور تشخیص عیوب سازه‌های ورق شکل توسط چوی^۴ و همکارانش ارائه شد. آنها با استفاده از داده‌های مودال بدست آمده موفق شدند دو ترک را در این نوع سازه‌ها شناسایی کنند. اما به نظر می‌رسید که آزمایشات آنها هنوز هم محدودیت‌هایی را در تشخیص عیوبی با اندازه و شدت بزرگ دارا می‌باشد [۶۳].

در سال ۲۰۰۴ هیوون^۵ و همکاران با بهره‌گیری از روش DQM برای بدست آوردن جواب دقیقی از انرژی کرنشی یک ورق کامپوزیت و عیب‌یابی آن اقدام کردند. این روش می‌توانست سریعاً جواب‌های

1 Park

2 Kim

3 Cornwell

4 Choi

5 Huiwen

دقیق یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی را تنها با استفاده از تعداد نقاط اندکی در محدوده جواب‌های مربوطه محاسبه کند [۶۴].

در مطالعه‌ای دیگر، یک روش جامع‌تری برای بررسی و تعیین عیوب در پل‌های تسمه‌ای تحت شرایط دمایی نامشخص ارائه شد. این روش بر مبنای ترکیب شاخص انرژی کرنشی مودال و شاخص تطابق مودال بود [۶۵].

در سال ۲۰۰۶ مجدداً هیوون و همکاران با استفاده از آنالیز مودال و روش انرژی کرنشی، ترک‌های سطحی در ورق‌های کامپوزیتی را شناسایی کرده‌اند. آنها برای انجام این کار از کامپوزیت کربن/اپوکسی AS4/PEEK استفاده کرده و روش آنالیز مودال را برای بدست آوردن شکل مدها بکار گرفتند. سپس برای محاسبه انرژی کرنشی، مجدداً مشتق شکل مدها را با استفاده از روش DQM بدست آوردند. در اینجا نیز مانند حالت‌های قبل که در آنها از روش انرژی کرنشی استفاده می‌شد، انرژی کرنشی سازه قبل و بعد از وقوع عیب بدست آمده و شاخص عیب که مجدداً به صورت کسر انرژی کرنشی سازه معیوب به انرژی کرنشی سازه سالم تعریف می‌شود، به طور موفقیت آمیزی موقعیت ترک سطحی را شناسایی کرد [۷۳]. مجدداً در سال ۲۰۰۹ هیوون این کار را با استفاده از اسکن کردن تکه به تکه قطعه^۱ (SDI) به منظور بررسی تمام نواحی قطعه برای یافتن کلیه ترک‌های سطحی با استفاده از حداقل داده‌های اندازه‌گیری شده بهبود دادند [۷۴]. در این مطالعه، شاخص عیب تمام نواحی سازه با جمع‌آوری شاخص‌های عیب بدست آمده از تک‌تک نواحی اسکن شده آن بدست آمد. در آزمایشات آنها اندازه ترک قابل شناسایی-که کمتر از ۵۰ درصد ضخامت و ۷ درصد طول در ورق می‌باشد-بسیار کوچکتر از موارد مشابه در آزمایشات قبلی بوده است.

1 Scanning damage index

اما، پیاده‌سازی روش انرژی کرنشی تنها محدود به تیرها و ورق‌ها نشد؛ بلکه سازه‌هایی با شکل‌های مختلف و حتی با تغییراتی در شاخص انرژی کرنشی را با خود به همراه داشت [۷۱-۷۵]. در سال ۱۹۹۸ ساریوانسن^۱ و همکاران اقدام به شناسایی عیوب موجود در پوسته‌های استوانه‌ای فلزی ساده کردند [۷۱]. ایده‌ای که آنها برای بدست آوردن شاخص عیب جهت تعیین مکان عیب در یک پوسته استوانه‌ای به کار گرفتند، اساساً بر مبنای روش انرژی کرنشی بوده با این تفاوت که شاخص عیب در تئوری آنها، تنها به مؤلفه شعاعی ارتعاش پوسته احتیاج دارد.

کیم و پینگ^۲ مطالعاتی را بر روی تشخیص عیوب پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی بر مبنای فرکانسهای طبیعی و شکل مدهای سازه انجام دادند. در این تحقیق، موقعیت محوری عیوب با مقایسه تغییرات فرکانسی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ناشی از وجود عیب بررسی شد [۷۲].

در نهایت بر اساس مطالعات صورت گرفته، در سال ۲۰۱۱ هیوون آزمایشاتی را روی پوسته‌ها انجام داد. او و همکارانش این بار به طور موفقیت آمیز، به بررسی عیوب در پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ساده به کمک همان روش انرژی کرنشی مودال پرداختند. مانند آزمایشات دیگر، او ابتدا با انجام آزمایشات آنالیز مودال روی استوانه‌های توخالی، جابجایی‌های مودال را به منظور محاسبه انرژی کرنشی مودال بدست می‌آورد. سپس با توجه به کلیه شکل مدهای اندازه‌گیری شده و با استفاده از نسبت انرژی کرنشی استوانه قبل و بعد از ایجاد عیب، شاخص عیب را تعریف می‌کند [۲].

در سال ۲۰۱۲ ژانگ^۳ و همکاران اقدام به شناسایی ترک‌های سطحی یک پوسته مخروطی ساده با استفاده از داده‌های مودال و روش تبدیل موجک کردند. آنها در این روش، از جابجایی‌های مودال در راستای عمود بر سطح مخروط استفاده کردند. زیرا فرض کردند که در عمل، اندازه‌گیری جابجایی‌ها

1 Srinivasan

2 Kim and Ping

3 Zhang

در دو راستای دیگر مشکل است. در این روش نیز با اندازه‌گیری داده‌های مودال سازه سالم و معیوب متناظر، انحناهای شکل مدها بدست آمده و سپس با تفاضل این دو مجموعه داده و پردازش آنها توسط تبدیل موجک، موقعیت و شدت عیب به درستی تشخیص داده شد [۷۷].

فصل ۰۳ روش تحقیق

۳-۱- استخراج معادلات

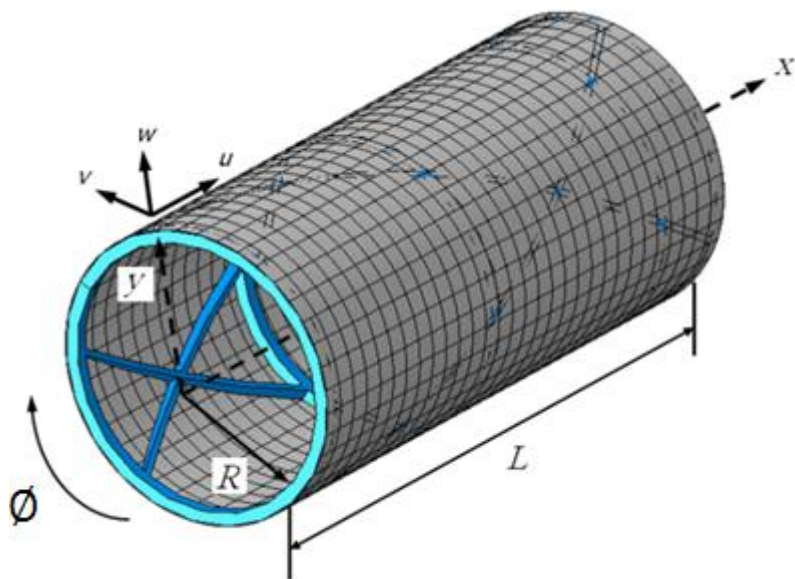
به منظور پیاده‌سازی روش انرژی کرنشی مودال برای تشخیص عیوب سازه استوانه‌ای کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مشبک^۱، ابتدا می‌بایست رابطه‌ای را برای انرژی کرنشی آن استخراج کرده تا بر اساس آن بتوان شاخص عیب انرژی کرنشی را این سازه را بدست آورد. از اینرو، به منظور تعیین معادلات حاکم بر یک پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک، در ابتدا می‌بایست ماتریس‌های سختی کشش^۲، پیچش^۳ و خمش^۴ معادل (A, B و D) این سازه را تعیین کرد. برای انجام این کار، می‌بایست سهم سختی تقویت‌کننده‌های مشبک و پوسته کامپوزیتی را به طور جداگانه تعیین کرد. هدف از انجام این کار، بدست آوردن یک ماتریس سختی معادل برای کل سازه و معادل سازی آن با یک پوسته استوانه‌ای معادل بدون تقویت‌کننده با سختی کلی A, B و D است. برای شروع کار، یک سلول واحد از سازه تقویت شده مشبک شش ضلعی شکل (۳-۱) را مانند آنچه در شکل (۳-۲) نشان داده شده است را که شامل پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی و تقویت‌کننده‌های مشبک است، در نظر می‌گیریم. با در نظر گرفتن این سلول واحد و بدست آوردن سختی کل آن، می‌توان آن را به کل سازه تقویت شده تعمیم داد.

1 Grid stiffened composite cylindrical shell

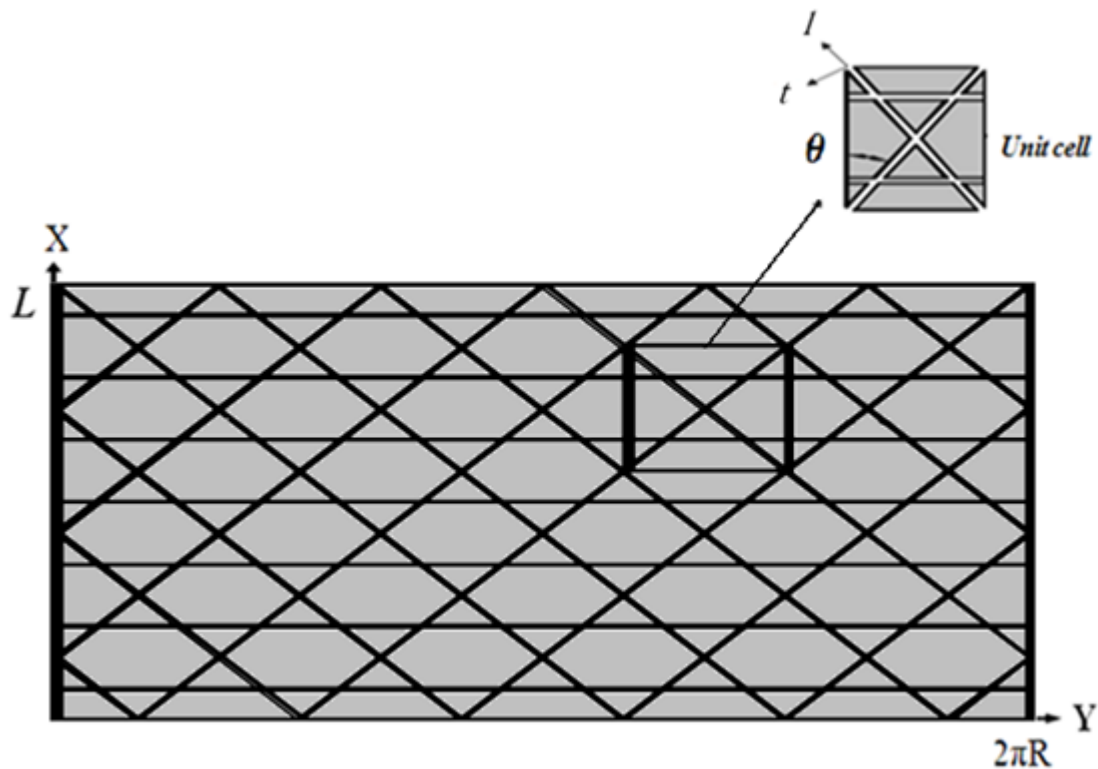
2 Tensile stiffness

3 Torsion stiffness

4 Bending stiffness



شکل (۱-۳) مدل یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه دستگاه مختصات استوانه‌ای.



شکل (۲-۳) دستگاه مختصات کارترین یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک. برای تعیین سهم سختی تقویت‌کننده‌ها در سازه کلی، باید نیروها و گشتاورهای عکس‌العمل تقویت‌کننده‌ها و پوسته محاسبه شوند. سپس، سختی کلی سازه با جمع سختی تقویت‌کننده‌ها و پوسته در هر حجمی از سازه محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است، از آنجا که سختی پوسته استوانه‌ای

کامپوزیتی، تابع کرنش‌ها و انحنای صفحه میانی^۱ پوسته است، لذا پارامترهای سختی مربوط به تقویت‌کننده‌ها نیز می‌بایست برحسب کرنش‌ها و انحنای صفحه میانی پوسته بدست آیند تا بتوان عمل معادل‌سازی را به درستی انجام داد. در این مطالعه برای شروع، فرض‌های زیر که منطبق بر روش کلاسیک^۲ است [۷۸] در نظر گرفته شده است:

(۱) کرنش‌ها در کل سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها یکنواخت فرض شده است. بنابراین، توزیع تنش نیز یکنواخت فرض می‌شود.

(۲) مدول‌های عرضی تقویت‌کننده‌های مورب بسیار کمتر از مدول طولی آنها بوده و سطح مقطع آنها نسبت به طولشان کوچک هستند. از اینرو، فرض می‌شود که تقویت‌کننده‌ها تنها بارهای محوری را تحمل می‌کنند.

(۳) بار از طریق نیروهای برشی بین تقویت‌کننده‌ها و پوسته منتقل می‌شود.

(۴) پس از استخراج معادلات، تنها جابجایی را در راستای محور W در نظر می‌گیریم. زیرا در شرایط عملی، معمولاً جابجایی‌ها در راستای U و V خیلی کم بوده و همچنین، اندازه گیری آنها مشکل است [۷۹].

۳-۱-۱- معادلات نیروهای تقویت‌کننده‌ها

از آنجا که تقویت‌کننده‌ها به پوسته چسبیده‌اند، کرنش‌ها و انحنای بر حسب کرنش و انحنای لایه میانی پوسته برابرند با [۳۲]

1 Mid-plane curvature

2 CLST (classical lamination shell theory)

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z\kappa_x$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^0 + z\kappa_y \quad (1-3)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy}$$

که $z = \frac{t}{2}$ ، ضخامت پوسته می باشد.

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v}{\partial y}, \kappa_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2-3)$$

$$\kappa_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \kappa_{xy} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

در روابط بالا، ε_x ، ε_y و γ_{xy} ، کرنش‌های کلی، ε_x^0 ، ε_y^0 و γ_{xy}^0 کرنش‌های صفحه میانی، κ_x ، κ_y و κ_{xy} انحنای صفحه میانی و u ، v و w مولفه‌های جابجایی‌های هر نقطه از پوسته هستند. با توجه به شکل (1-3)، توجه شود که γ برابر است با $2\pi R$ و φ ، جهت محیطی در مختصات قطبی را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن کرنش‌ها در راستای تقویت‌کننده‌ها، لازم است تا کرنش‌های بدست آمده در معادله (1-3) را در راستای تقویت‌کننده‌ها (دستگاه $l-t$) تجزیه کرد. برای انجام این کار، از ماتریس دوران معادله (3-3) [78] استفاده می‌شود. به این ترتیب، کرنش‌ها در راستای تقویت‌کننده، ε_l ، عمود بر راستای تقویت‌کننده‌ها، ε_t و کرنش برشی متناظر، ε_{lt} برابرند با،

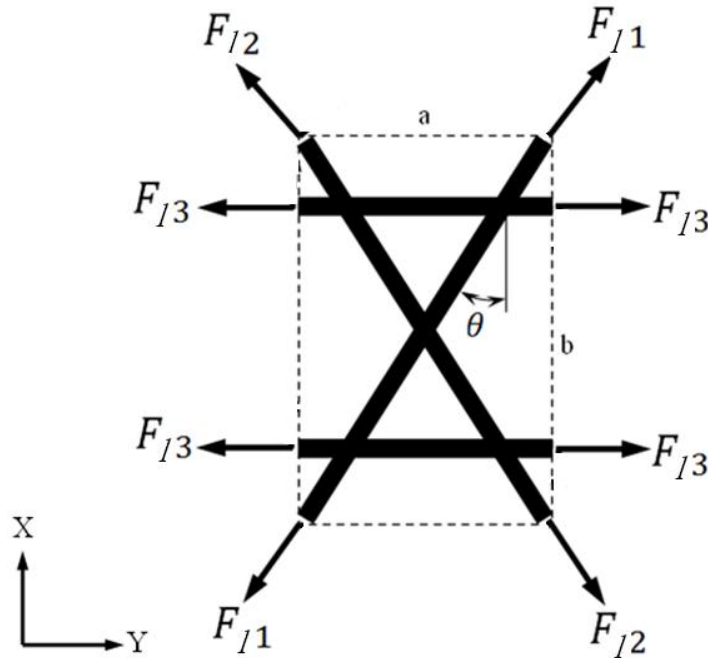
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_{lt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & sc \\ s^2 & c^2 & -sc \\ -2sc & 2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

با توجه به فرضیاتی که قبلاً بیان شد، می‌توان از کرنش عرضی، ε_t و کرنش برشی متناظر، ε_{lt} صرف نظر کرد. بنابراین، کرنش‌های طولی، ε_l ، برابرند با،

$$\varepsilon_l = c^2\varepsilon_x + s^2\varepsilon_y + sc\gamma_{xy} \quad (4-3)$$

که $c = \cos(\theta)$ و $s = \sin(\theta)$. زاویه θ ، راستای تقویت‌کننده‌ها بوده که در اینجا برابر است با 0° ، $+30^\circ$ و -30° .

اکنون با در نظر گرفتن دیاگرام آزاد تقویت‌کننده‌ها در یک سلول از سازه مطابق با شکل (۳-۳)، داریم،



شکل (۳-۳) دیاگرام آزاد نیروهای تقویت‌کننده‌ها.

با بدست آوردن کرنش‌های محوری در راستای تقویت‌کننده‌ها، می‌توان نیروهای محوری تقویت‌کننده‌ها را بر حسب سطح مقطع (A) و مدول طولی آنها (E_l) با توجه به شکل (۳-۳) به صورت زیر نوشت،

$$\begin{aligned} F_{l1} &= AE_l \varepsilon_{l1} = AE_l [c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + sc \gamma_{xy}] \\ F_{l2} &= AE_l \varepsilon_{l2} = AE_l [c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y - sc \gamma_{xy}] \\ F_{l3} &= AE_l \varepsilon_{l3} = AE_l \varepsilon_y \end{aligned} \quad (۵-۳)$$

با توجه به شکل (۳-۳)، نیروهای برآیند محوری در راستای x با در نظر گرفتن مولفه‌های نیرو در این راستا در وجه بالایی یا پایینی سلول برابرند با،

$$F_x = (F_{l1} + F_{l2}) \cos(\theta) \quad (۶-۳)$$

به طور مشابه، نیروهای برآیند در راستای y با برآیندگیری نیروهای سمت راست یا چپ سلول در جهت y، به صورت زیر بدست می‌آیند،

$$F_y = (F_{l1} + F_{l2})\sin(\theta) + 2F_{l3} \quad (7-3)$$

و نیروی برشی برآیند نیز با در نظر گرفتن وجه بالا یا پایین سلول، برابرند با،

$$F_{xy} = (F_{l2} - F_{l1}) \cos(\theta) \quad (8-3)$$

با جایگذاری معادله (5-3) در (6-3)، (7-3) و (8-3) داریم،

$$\begin{aligned} F_x &= AE_l c (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + sc \gamma_{xy}) + AE_l c (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y - sc \gamma_{xy}) \\ &= AE_l (2c^3 \varepsilon_x + 2s^2 c \varepsilon_y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_y &= AE_l s (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + sc \gamma_{xy}) + AE_l s (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y - sc \gamma_{xy}) \\ &\quad + 2AE_l (\varepsilon_y) \end{aligned} \quad (9-3)$$

$$= AE_l (sc^2 \varepsilon_x + (2s^3 + 2) \varepsilon_y)$$

$$\begin{aligned} F_{xy} &= AE_l c (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + sc \gamma_{xy}) - AE_l c (c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y - sc \gamma_{xy}) \\ &= AE_l (2sc^2 \gamma_{xy}) \end{aligned}$$

در نهایت، برای بدست آوردن ماتریس‌های سختی، می‌بایست نیروها بر واحد طول سلول را بدست

آورد. به عبارت دیگر، با تقسیم نیروهای رابطه (9-3) بر طول لبه‌های فعال سلول، این نیروها برابرند

با [32]

$$N_x^s = \frac{AE_l}{a} \left[2c^3 \varepsilon_x^0 + 2c^3 \kappa_x \left(\frac{t}{2} \right) + 2s^2 c \varepsilon_y^0 + 2s^2 c \kappa_y \left(\frac{t}{2} \right) \right]$$

$$N_y^s = \frac{AE_l}{b} \left[2sc^2 \varepsilon_x^0 + 2sc^2 \kappa_x \left(\frac{t}{2} \right) + (2s^3 + 2) \varepsilon_y^0 + (2s^3 + 2) \kappa_y \left(\frac{t}{2} \right) \right] \quad (10-3)$$

$$N_{xy}^s = \frac{AE_l}{b} \left[2sc^2 \gamma_{xy}^0 + 2sc^2 \kappa_{xy} \left(\frac{t}{2} \right) \right]$$

۳-۱-۲- معادلات گشتاورهای تقویت‌کننده‌ها

برای بدست آوردن گشتاورها، نیز باید توجه داشت که گشتاور ناشی از تقویت‌کننده‌ها به خاطر وجود

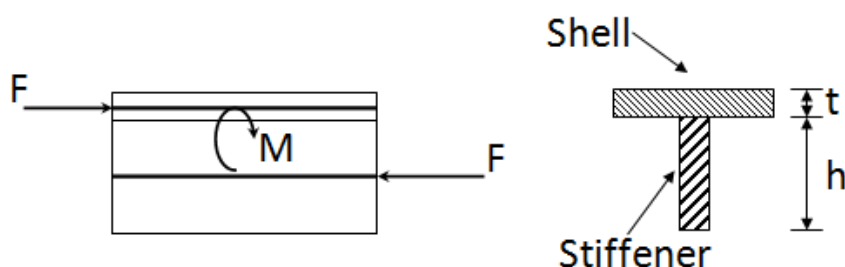
نیروهای برشی بین تقویت‌کننده و پوسته است که پیش از این نیز بدست آمد. اگر گشتاور کل روی

مجموعه پوسته و تقویت‌کننده M باشد، داریم،

$$M = M^{sh} + M^s \quad (11-3)$$

که M^s و M^{sh} به ترتیب گشتاور ناشی از نیروهای برشی روی تقویت کننده‌ها و پوسته هستند. از طرفی، گشتاور ناشی از این نیروها روی صفحه میانی پوسته برابر است با حاصلضرب این نیروها در نصف ضخامت پوسته. اگر گشتاور کل نیروی F که در محل تماس پوسته و تقویت کننده وجود دارد، برابر با M باشد، با توجه به دیاگرام آزاد شکل (۳-۴)، این گشتاور برابر است با،

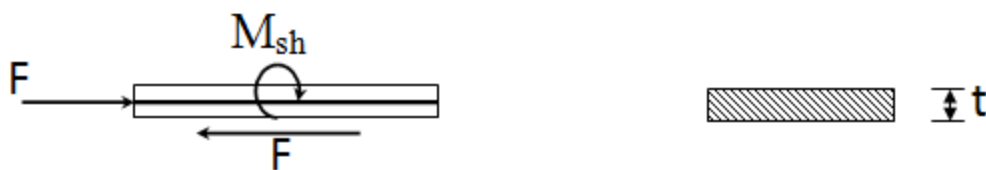
$$M = F\left(\frac{h+t}{2}\right) \quad (12-3)$$



شکل (۳-۴) گشتاورهای اعمالی در کل پوسته و تقویت کننده‌ها.

که t و h به ترتیب ضخامت پوسته و تقویت کننده‌ها هستند. حال اگر بخواهیم سهم گشتاور ایجاد شده ناشی از نیروی F را در تقویت کننده و پوسته به صورت جداگانه داشته باشیم، برای پوسته با توجه به دیاگرام آزاد شکل (۳-۵) داریم،

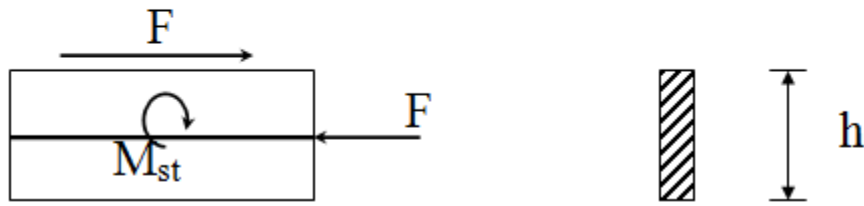
$$M = F\left(\frac{t}{2}\right) \quad (13-3)$$



شکل (۳-۵) گشتاور اعمالی در کل پوسته.

و برای تقویت کننده‌ها با توجه به شکل (۳-۶) داریم،

$$M = F\left(\frac{h}{2}\right) \quad (14-3)$$

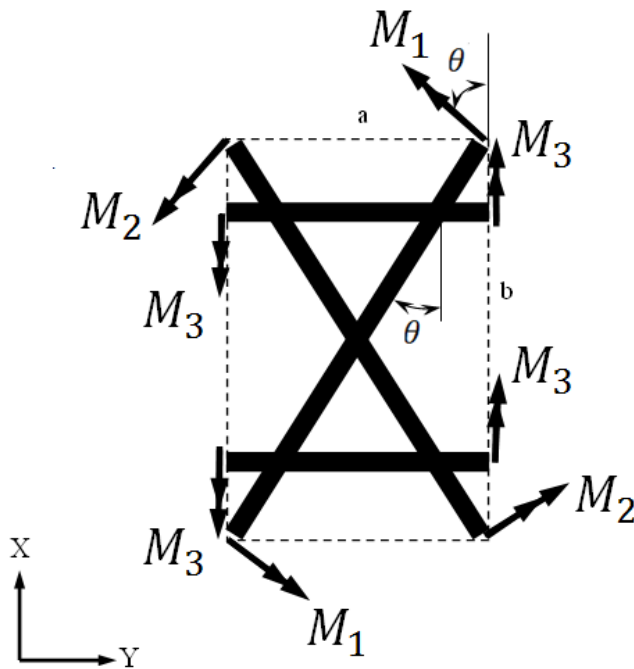


شکل (۳-۶) گشتاور اعمالی در کل تقویت کننده‌ها.

به این ترتیب، با توجه به آنچه گفته شد و با توجه به دیاگرام آزاد گشتاورهای ناشی از تقویت کننده‌ها

که در شکل (۳-۷) نشان داده شده، گشتاورهای ناشی از نیروهای F_1, F_2, F_3 در یک سلول فرضی از

سازه به ترتیب، برابرند با M_1, M_2, M_3 .



شکل (۳-۷) دیاگرام آزاد گشتاورهای تقویت کننده‌ها.

حال، مانند آنچه که برای نیروها پیاده‌سازی شد، با تجزیه این گشتاورها در دستگاه $x-y$ داریم،

$$M_x = (M_1 + M_2) \cos(\theta)$$

$$M_y = (M_1 + M_2) \sin(\theta) + 2M_3 \quad (۳-۱۵)$$

$$M_{xy} = M_2 \cos(\theta) - M_1 \sin(\theta)$$

همانطور که گفته شد، گشتاورهای M_1, M_2 و M_3 با حاصلضرب نیروهای F_1, F_2 و F_3 در بازوی گشتاورگیری خود که برابر است با نصف ضخامت پوسته، محاسبه می‌شوند. حال، با جایگذاری معادلات (۳-۵) در معادلات (۳-۱۵) و نیز همانطور که برای نیروها نیز ذکر شد- با تقسیم روابط بدست آمده بر طول لبه‌های متناظر سلول، گشتاورهای برآیند ناشی از تقویت‌کننده‌ها روی این سلول نمونه برابر است با [۳۲]

$$M_x^s = \frac{AE_l t}{2a} \left[2c^3 \varepsilon_x^0 + 2c^3 \kappa_x \left(\frac{t}{2} \right) + 2s^2 c \varepsilon_y^0 + 2s^2 c \kappa_y \left(\frac{t}{2} \right) \right]$$

$$M_y^s = \frac{AE_l t}{2b} \left[2sc^2 \varepsilon_x^0 + 2sc^2 \kappa_x \left(\frac{t}{2} \right) + (2s^3 + 2) \varepsilon_y^0 + (2s^3 + 2) \kappa_y \left(\frac{t}{2} \right) \right] \quad (۳-۱۶)$$

$$M_{xy}^s = \frac{AE_l t}{2b} \left[2sc^2 \gamma_{xy}^0 + 2sc^2 \kappa_{xy} \left(\frac{t}{2} \right) \right]$$

۳-۱-۳ - سختی تقویت‌کننده‌ها در سلول واحد نمونه

همانطور که مشاهده شد، معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۶) به ترتیب، سهم نیروها و گشتاورهای ناشی از تقویت‌کننده‌ها هستند که به همین جهت آنها را با بالانویس "s" نشان می‌دهیم. اگر این معادلات را در یک ماتریس جداگانه بیاوریم، می‌توان ماتریس سختی تقویت‌کننده‌ها (A^s, B^s و D^s) را به سادگی از رابطه زیر بدست آورد،

$$\begin{bmatrix} N_x^s \\ N_y^s \\ N_{xy}^s \\ M_x^s \\ M_y^s \\ M_{xy}^s \end{bmatrix} = AE_t \begin{bmatrix} \overbrace{\begin{matrix} \frac{2c^3}{a} & \frac{2s^2c}{a} & 0 \\ 2sc^2 & (2s^3+2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2sc^2}{b} \end{matrix}}^{A^s} & \overbrace{\begin{matrix} \frac{c^3t}{a} & \frac{s^2ct}{a} & 0 \\ \frac{sc^2t}{b} & \frac{(2s^3+2)t}{2b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sc^2t}{b} \end{matrix}}^{B^s} \\ \overbrace{\begin{matrix} \frac{c^3t}{a} & \frac{s^2ct}{a} & 0 \\ sc^2t & \frac{(2s^3+2)t}{2b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sc^2t}{b} \end{matrix}}^{B^s} & \overbrace{\begin{matrix} \frac{c^3t^2}{2a} & \frac{s^2ct^2}{2a} & 0 \\ \frac{sc^2t^2}{2b} & \frac{(2s^3+2)t^2}{4b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sc^2t^2}{2b} \end{matrix}}^{D^s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (17-3)$$

معادله (۱۷-۳) تابعی از کرنش‌ها و انحناهای صفحه میانی پوسته استوانه‌ای است.

۳-۱-۴ - سختی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی در سلول واحد نمونه

همانطور که می‌دانیم، نیروها و گشتاورها در یک پوسته کامپوزیتی نیز برابرند با [۷۸]

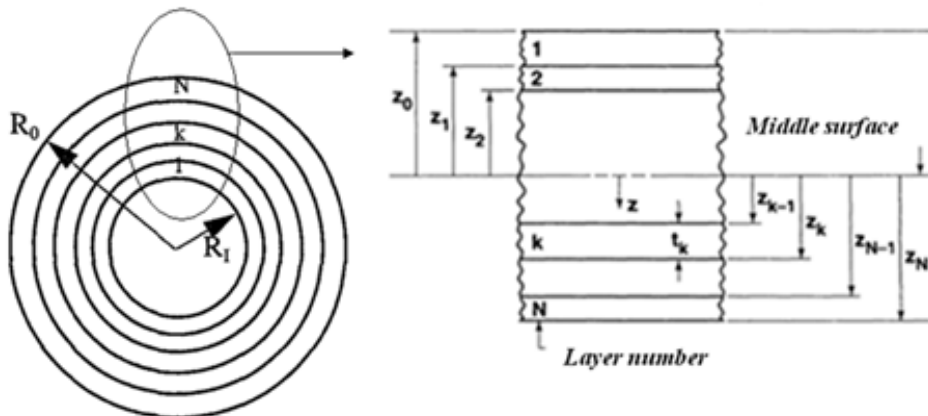
$$\begin{bmatrix} N_x^{sh} \\ N_y^{sh} \\ N_{xy}^{sh} \\ M_x^{sh} \\ M_y^{sh} \\ M_{xy}^{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{sh} & B^{sh} \\ B^{sh} & D^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (18-3)$$

که A_{ij}^{sh} ، B_{ij}^{sh} و D_{ij}^{sh} به ترتیب ماتریس‌های سختی کشش، پیچش و خمش و N^{sh} و M^{sh} نیروها و گشتاورهای پوسته کامپوزیتی اورتوتروپیک^۱ هستند. این پارامترهای سختی برای یک پوسته کامپوزیتی مانند آنچه در شکل (۸-۳) نشان داده شده است، برابرند با،

$$A_{ij}^{sh} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$B_{ij}^{sh} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (۱۹-۳)$$

$$D_{ij}^{sh} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$



شکل (۸-۳) لایه‌چینی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی [۷۸].

که N ، تعداد کل لایه‌های پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای، z_{k-1} و z_k فاصله صفحه میانی تا سطح خارجی و داخلی لایه k ام و $(\bar{Q}_{ij})_k$ درایه‌های ماتریس تبدیل کاهش یافته لایه k ام هستند که برابر است با،

$$\bar{Q}_k = P^{-1} Q_k P \quad (۲۰-۳)$$

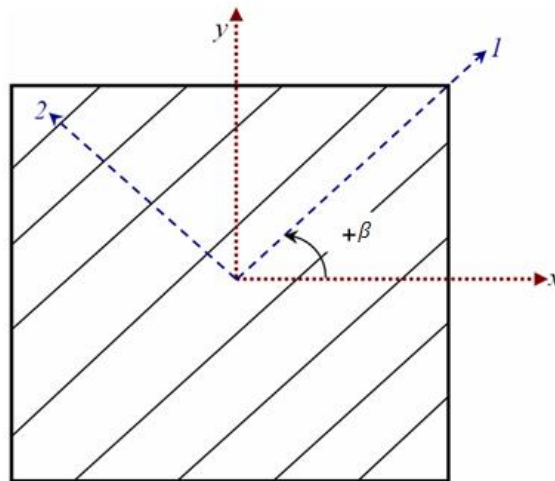
از آنجا که چند لایه‌ها متشکل از چندین لایه هستند که در جهت‌های مختلف برای بدست آوردن خواص مورد نظر چیده شده‌اند، لازم است که روابط تنش-کرنش برای تک لایه اورتوتروپیک در

¹ Orthotropic

محورهای مختصات عمومی^۱ نظیر x و y نشان داده شده در شکل (۹-۳) بدست آیند. از اینرو، [P]

ماتریس تبدیل از محورهای اصلی ۱ و ۲ به محورهای عمومی X و Y است که برابر است با،

$$[P] = \begin{bmatrix} \cos^2\beta & \sin^2\beta & 2\cos\beta\sin\beta \\ \sin^2\beta & \cos^2\beta & -2\cos\beta\sin\beta \\ -\cos\beta\sin\beta & \cos\beta\sin\beta & \cos^2\beta - \sin^2\beta \end{bmatrix} \quad (۲۱-۳)$$



شکل (۹-۳) دستگاه مختصات عمومی و اصلی در یک پوسته تک لایه [۷۸].

β راستای الیاف و [Q] ماتریس سختی کاهش یافته^۲ است که برابر است با،

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (۲۲-۳)$$

عناصر این ماتریس برابرند با،

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (۲۳-۳)$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

که E_{11} و E_{22} ، مدولهای الاستیک^۳، G_{12} ، مدول برشی^۱ و ν_{12} و ν_{21} نسبت‌های پواسون^۲ در

محورهای اصلی پوسته هستند.

1 Off-axis

2 Reduced stiffness matrix

3 Elastic modules

۳-۱-۵ - سختی کلی سازه

اکنون، همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، با در نظر گرفتن یک سلول واحد از استوانه کامپوزیتی تقویت شده مشبک، نیروها و گشتاورهای کلی این سلول به ترتیب برابرند با مجموع سهم جداگانه نیروها و گشتاورهای پوسته و تقویت کننده‌ها. یعنی،

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N^s + N^{sh} \\ M^s + M^{sh} \end{bmatrix} \quad (۲۴-۳)$$

که N^s و M^s به ترتیب سهم نیروها و گشتاورهای تقویت کننده‌ها و N^{sh} و M^{sh} به ترتیب سهم نیروها و گشتاورهای پوسته استوانه‌ای هستند.

با جایگذاری معادلات (۳-۱۷) و (۳-۱۸) در معادله (۳-۲۴) می‌توان رابطه‌ای برای نیروها و گشتاورهای کلی یک پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک بر حسب کرنش‌ها و انحنای صفحه میانی پوسته کامپوزیتی به صورت زیر بدست آورد،

$$\begin{bmatrix} N_t \\ M_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^s + A^{sh} & B^s + B^{sh} \\ B^s + B^{sh} & D^s + D^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (۲۵-۳)$$

بنابراین، با توجه به رابطه (۳-۲۵)، می‌توان سختی کلی یک سلول نمونه از پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت شده (A, B و D) را به صورت زیر نوشت،

$$\begin{aligned} A &= [A^s + A^{sh}] \\ B &= [B^s + B^{sh}] \\ D &= [D^s + D^{sh}] \end{aligned} \quad (۲۶-۳)$$

۳-۱-۶ - انرژی کرنشی^۳ پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک

همانطور که قبلاً نیز گفته شد و با توجه به آنچه در بخش قبل بدست آمد، می‌توان یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک را با یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساده (بدون

1 Shear module

2 Poisson's ratios

3 Strain Energy

تقویت کننده) اما با سختی‌های A، B و D که در رابطه (۳-۲۵) بدست آمد، معادل کرد. از اینرو، می‌توان از معادله انرژی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساده (بدون تقویت کننده) ولی با سختی‌های A، B و D برای پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک استفاده کرد [۳۲]. به این ترتیب داریم،

$$\begin{aligned}
 U = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \{ & A_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{r} \right) \\
 & + A_{22} \left[\frac{\partial v}{\partial \theta} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) + \left(\frac{w}{R} \right)^2 \right] \\
 & + 2 \left[A_{13} \frac{\partial u}{\partial \theta} + A_{23} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) \right] \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
 & + A_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - B_{11} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
 & - 2B_{12} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \\
 & - B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \\
 & - 2B_{13} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \right] \\
 & - 2B_{23} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \right] \\
 & - 4B_{33} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + D_{11} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \\
 & + 2D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right)^2 + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right. \\
 & \left. + D_{23} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} + 4D_{33} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \right)^2 \} dx d\theta
 \end{aligned} \tag{۳-۲۷}$$

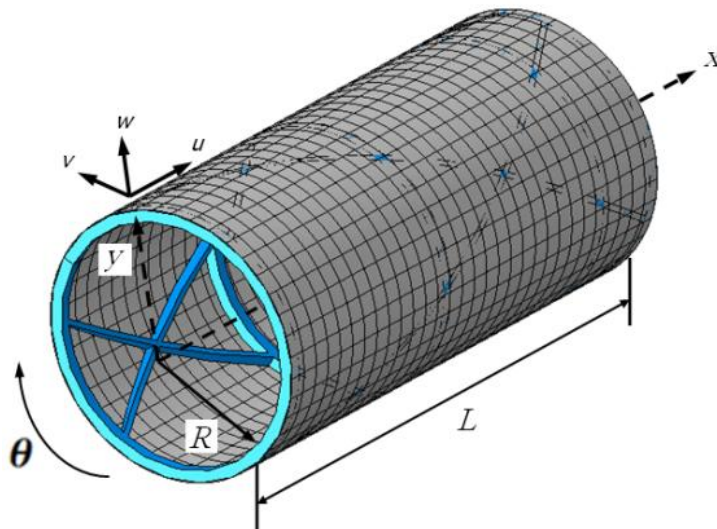
با فرض اینکه مقادیر انتقال و دوران در راستای محورهای u و v صفر هستند (با توجه به فرضیاتی که در ابتدای بخش ۳-۱ ذکر شد)، معادله (۳-۲۷) به شکل ساده‌تر زیر در می‌آید،

$$\begin{aligned}
U = & \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \right. \\
& - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \\
& + 2 \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \right)^2 + \\
& 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right)^2 \\
& + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \\
& \left. + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right\} dx d\theta
\end{aligned}$$

(۳-۲۸)

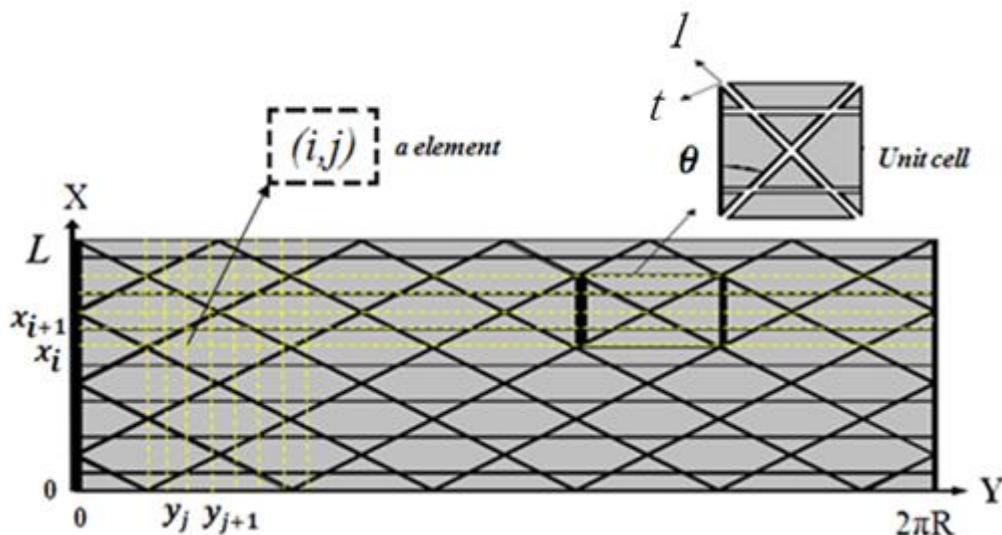
که w جابجایی شعاعی پوسته است.

جابجایی‌های مودال در یک استوانه کامپوزیتی تقویت شده می‌توانند در دستگاه مختصات استوانه‌ای که مجدداً در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، بررسی شوند.



شکل (۳-۱۰) مدل یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه دستگاه مختصات استوانه‌ای.

اما برای بررسی انرژی کرنشی این سازه، به صورت فرضی آن را از نقطه مشخصی در راستای ارتفاع استوانه برش زده و مانند یک ورق با ابعاد $N_x \times N_y$ در دستگاه $x-y$ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۱۱)).



شکل (۳-۱۱) دستگاه مختصات کارتزین یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک به همراه المان بندی و سلول واحد نمونه آن.

بنابراین، با در نظر گرفتن محیط استوانه با $y = 2\pi R$ ، می‌توان رابطه (۳-۲۸) را به صورت زیر نوشت،

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{1}{2R} \int_0^{2\pi R} \int_0^L \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \right. \\
 & - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \\
 & + 2 \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \right)^2 + \\
 & 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right)^2 \\
 & + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \\
 & \left. + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \right.
 \end{aligned} \tag{۳-۲۹}$$

۳-۱-۷- شاخص عیب انرژی کرنشی^۱

همانطور که قبلاً ذکر شد، انرژی کرنشی، نوعی انرژی پتانسیل است که بر اثر تغییر شکل الاستیک در یک مد خاص در سازه ذخیره می‌شود و منجر به حساسیت بالا نسبت به تغییر در فرکانس و شکل مد^۲ آن می‌شود. در واقع، در اثر وجود عیب در یک سازه، سختی آن تغییر کرده و به دنبال آن انرژی کرنشی آن نیز دچار تغییر شده و همین امر در جهت تشخیص عیب سازه‌ها موثر واقع شده است. از طرفی، انرژی کرنشی بر حسب مشتقات مرتبه دوم از جابجایی‌های مودال بوده و به همین خاطر نسبت به تغییرات بسیار کوچک در جابجایی‌های مودال بسیار حساس است. به همین خاطر، این روش جزء قویترین روش‌ها در شناسایی عیوب سازه‌ای می‌باشد.

حال، اگر در یک المان از سازه عیبی بوجود آید، از تغییر سختی این المان که منجر به تغییر انرژی کرنشی آن می‌شود، می‌توان برای تعیین مکان عیب استفاده کرد. برای این منظور، با توجه به رابطه (۳-۲۹)، انرژی کل (U_k) و انرژی مربوط به المان (i, j) در مد k ام ($U_{k,ij}$) در یک استوانه کامپوزیتی تقویت شده سالم، به ترتیب برابرند با،

$$\begin{aligned}
 U_k = & \frac{1}{2R} \int_0^{2\pi R} \int_0^L \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \right. \\
 & - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \\
 & + 2 \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \right)^2 + \\
 & 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right)^2 \\
 & \left. + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy
 \end{aligned} \tag{۳-۳۰}$$

1 Strain Energy Damage Index (SDI)

2 Mode Shape

$$\begin{aligned}
U_{k,ij} = & \frac{1}{2R} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \right. \\
& - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \\
& + 2 \left(\frac{\varphi_k}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \right)^2 + \\
& 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right)^2 \\
& \left. + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right\}_{ij} dx dy
\end{aligned} \tag{۳۱-۳}$$

φ_k ، جابجایی شکل مد کلام از سازه سالم است.

و به طور مشابه U_k^* و $U_{k,ij}^*$ ، انرژی کرنشی کل و انرژی کرنشی همان المان مشخص در استوانه

معیوب را نشان می‌دهند، که به ترتیب برابرند با،

$$\begin{aligned}
U_k = & \frac{1}{2R} \int_0^{2\pi R} \int_0^L \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \right. \\
& - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \\
& + 2 \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} \right)^2 + \\
& 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \right)^2 \\
& \left. + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} \right. \\
& \left. + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right\} dx dy
\end{aligned} \tag{۳۲-۳}$$

$$\begin{aligned}
U_{k,ij} = & \frac{1}{2R} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left\{ A_{22} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right)^2 + 2A_{23} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \right. \\
& - 2B_{12} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} - B_{22} \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \\
& + 2 \left(\frac{\varphi_k^*}{R} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} + D_{11} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} \right)^2 + \\
& 2D_{12} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} + D_{22} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \right)^2 \\
& + 4 \left(D_{13} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2} + D_{23} \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} \\
& \left. + 4 \left(D_{33} \left(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right\}_{ij} dx dy
\end{aligned} \tag{۳۳-۳}$$

φ_k^* ، جابجایی شکل مد k ام از سازه معیوب است.

لازم به ذکر است که هر المان از سازه باید به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شود تا بتوان از انحنای آن صرف نظر کرد و آن را مانند یک المان مسطح در نظر گرفت [۲].

سهم انرژی المان سالم و معیوب به انرژی کل آنها در مد k ام به ترتیب برابر است با،

$$F_{k,ij} = \frac{U_{k,ij}}{U_k} \quad \text{که} \quad \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1 \tag{۳۴-۳}$$

و

$$F_{k,ij}^* = \frac{U_{k,ij}^*}{U_k^*} \quad \text{که} \quad \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_y} F_{k,ij}^* = 1 \tag{۳۵-۳}$$

نماد (*) به سازه معیوب اشاره دارد.

اگر آنالیز مودال سازه سالم و معیوب تا m مد انجام گرفته باشد، با در نظر گرفتن همه m مد اندازه گیری شده، می توان شاخص عیب انرژی کرنشی مودال را در المان (i,j) به شکل زیر تعریف می شود،

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \tag{۳۶-۳}$$

با فرض اینکه همه شاخص‌های عیب، β_{ij} ، دارای توزیع پراکنده‌ای هستند، می‌توان یک شاخص عیب نرمالیزه شده به شکل زیر تعریف کرد،

$$Z_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (37-3)$$

که $\bar{\beta}_{ij}$ و σ_{ij} به ترتیب، متوسط^۱ و انحراف معیار^۲ شاخص‌های عیب هستند. در نهایت، به کمک این شاخص، می‌توان از وجود عیب در هر ناحیه‌ای از سازه اطمینان حاصل کرد. لازم به ذکر است، جهت محاسبه مشتقات موجود در معادلات فوق، از روش مشتق‌گیری عددی DQM استفاده شده است که جزئیات آن در بخش بعدی آورده شده است.

۳-۱-۸- روش مشتق‌گیری عددی DQM

DQM یک روش عددی دقیق می‌باشد و به طور گسترده از آن برای حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی استفاده می‌شود. ویژگی اصلی این روش این است که مشتقات تابع مورد نظر را می‌توان به شکل عددی با ضرب ضرایب وزنی^۳ در آن بدست آورد [۸۰].

بر این مبنا اگر تابع $f(x_i, y_j)$ معلوم باشد، مشتقات آن نسبت به یک متغیر خاص در هر نقطه، به صورت زیر بیان می‌شود

$$f_x^{(n)}(x_i, y_j) = \sum_{r=1}^{N_x} C_{ir}^{(n)} f(x_r, y_j) \quad (38-3)$$

1 Mean

2 Standard deviation

3 weighting function

$$f_y^{(m)}(x_i, y_j) = \sum_{s=1}^{N_y} \bar{C}_{js}^{(m)} f(x_i, y_s)$$

$$f_{xy}^{(n+m)}(x_i, y_j) = \sum_{r=1}^{N_x} C_{ir}^{(n)} \sum_{s=1}^{N_y} \bar{C}_{js}^{(m)} f(x_r, y_s)$$

که $N_x \times N_y$ شده $N_x \times N_y$ محدود حل $j=1,2,\dots,N_y$ و $i=1,2,\dots,N_x$ می باشد. $C_{ir}^{(n)}$ و $\bar{C}_{js}^{(m)}$ ضرایب وزنی مرتبط با مشتقات مرتبه n ام و m ام $f(x_i, y_j)$ نسبت به x و y در نقاط (x_i, y_j) ، $n=1,2,\dots,N_x-1$ و $m=1,2,\dots,N_y-1$ می باشند. ضرایب وزنی می توانند به کمک فرمول برگشتی زیر محاسبه شوند،

$$C_{ir}^{(n)} = n(C_{ii}^{(n-1)} C_{ir}^{(1)} - \frac{C_{ir}^{(n-1)}}{x_i - x_r}) \quad (39-3)$$

$$\bar{C}_{js}^{(m)} = n(\bar{C}_{jj}^{(m-1)} \bar{C}_{js}^{(1)} - \frac{\bar{C}_{js}^{(n-1)}}{y_j - y_s})$$

که $i, r=1,2,\dots,N_x$ اما $r \neq i$ و $n=2,3,\dots,N_x-1$ همچنین $j, s=1,2,\dots,N_y$ اما $j \neq s$ و $m=2,3,\dots,N_y$ وقتی $r=i$ و $s=j$ ضرایب وزنی برابرند با

$$C_{ii}^{(n)} = \sum_{r=1, r \neq i}^{N_x} C_{ir}^{(n)}, \quad i = 1, 2, \dots, N_x, \quad n = 1, 2, \dots, N_x - 1$$

$$\bar{C}_{jj}^{(m)} = \sum_{s=1, s \neq j}^{N_y} \bar{C}_{js}^{(m)}, \quad j = 1, 2, \dots, N_y, \quad m = 1, 2, \dots, N_y - 1 \quad (40-3)$$

$$C_{ir}^{(1)} = \frac{M^{(1)}(x_i)}{(x_i - x_r)M^{(1)}(x_r)}, \quad i, r = 1, 2, \dots, N_x, \quad r \neq i$$

$$\bar{C}_{js}^{(1)} = \frac{p^{(1)}(y_i)}{(y_j - y_s)p^{(1)}(y_s)}, \quad j, s = 1, 2, \dots, N_y, \quad j \neq s$$

که

$$M^{(1)}(x_i) = \prod_{r=1, r \neq i}^{N_x} (x_i - x_r) \quad (41-3)$$

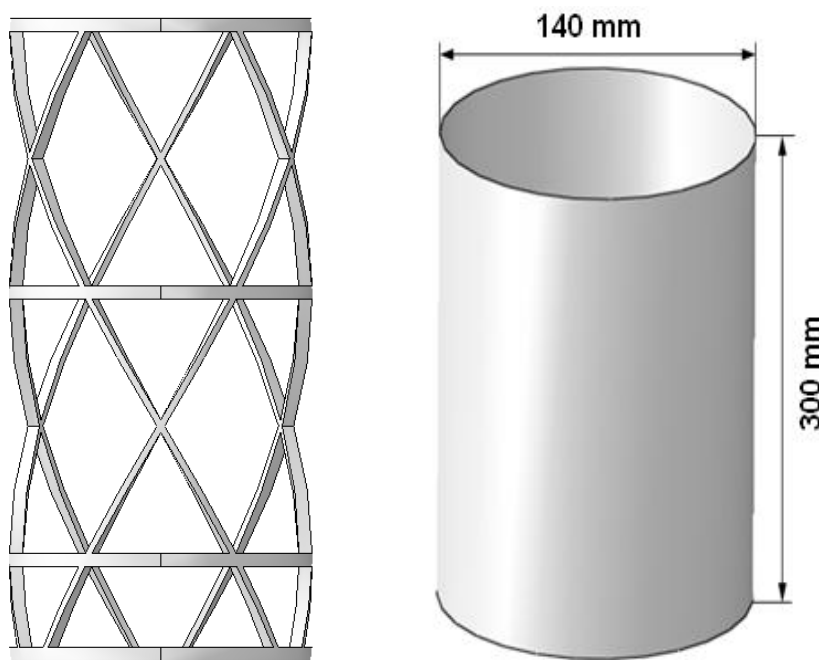
$$p^{(1)}(y_j) = \prod_{s=1, s \neq j}^{N_y} (y_j - y_s)$$

نحوه اعمال روش DQM برای بدست آوردن مشتقات φ_k نسبت به سایر متغیرها به این ترتیب است که بعد از اینکه جابجایی مودال $\varphi_{k,ij}$ مودال k صفحه یا استوانه بدست آمد، جهت محاسبه انرژی کرنشی مودال، $\varphi_{k,ij} = f_k(x_i, y_j)$ قرار داده و با توجه به معادلات (۳۸-۳) تا (۴۱-۳) مشتقات مورد نیاز φ_k را نسبت به متغیرهایی موجود بدست آورده و آنها را به معادلات انرژی اعمال کرده و بدین ترتیب انرژی کل یا انرژی المان مربوطه بدست می آید.

فصل ۴. تحلیل عددی، نتایج و بحث

۱-۴- مدل سازی المان محدود پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مشبک

در این تحقیق، به منظور بررسی و مقایسه روش انرژی کرنشی مودال جهت عیب‌یابی با مدل آزمایشی آن، پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک به روش المان محدود و در نرم‌افزار *ABAQUS* شبیه‌سازی شده است. مدل پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مشبک از دو قسمت پوسته (شکل (۱-۴-الف)) و تقویت‌کننده‌های مشبک شش ضلعی (شکل (۱-۴-ب)) تشکیل شده است. با توجه به این مطلب که پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده در مطالعه تجربی، به روش پیچش الیاف با زاویه پیچش الیاف ۷۲ درجه برای پوسته خارجی ساخته شده است، در این مدل‌سازی نیز پوسته خارجی با قطر ۱۴۰ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر به صورت پوسته‌ای و تغییر شکل‌پذیر از جنس Glass/Epoxy با ۴ لایه تحت زوایای الیاف $[±72]_s$ مطابق با جدول (۱-۴) شبیه‌سازی شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۱-۴-الف) پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای و (ب) تقویت‌کننده‌های مشبک شش ضلعی.

در جدول‌های (۱-۴) و (۲-۴) به ترتیب مشخصات هندسی و خواص مواد بکار رفته در ساخت مدل المان محدود و مدل تجربی آمده است.

جدول (۱-۴) خواص هندسی پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی.

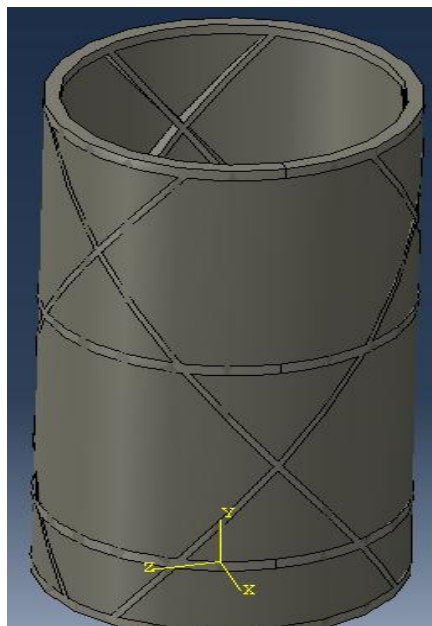
تقویت کننده‌ها	پوسته
شکل شبکه (Grid) = شش ضلعی	قطر خارجی پوسته = ۱۴۰ mm
مساحت سطح مقطع تقویت کننده‌ها = $6 \times 6 \text{ mm}$	ارتفاع پوسته = ۳۰۰ mm
زاویه ریب‌های مارپیچ = ۳۰ درجه	ضخامت متوسط پوسته خارجی = ۰.۴ mm
تعداد ریب‌های مارپیچ = ۳ جفت	زاویه پیچش الیاف در پوسته خارجی = ۷۲ درجه
تعداد رینگ‌های محیطی = ۳ عدد	

جدول (۲-۴) خواص مواد پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی.

تقویت کننده‌ها	پوسته
$E_{11} = 25.35 \text{ (GPa)}$ $E_{22} = 6.22 \text{ (GPa)}$ $E_{33} = 6.22 \text{ (GPa)}$	$E_{11} = 34.27 \text{ (GPa)}$ $E_{22} = 8.16 \text{ (GPa)}$ $E_{33} = 8.16 \text{ (GPa)}$
$G_{12} = 2.19 \text{ (GPa)}$ $G_{23} = 2.87 \text{ (GPa)}$ $G_{13} = 2.19 \text{ (GPa)}$	$G_{12} = 2.81 \text{ (GPa)}$ $G_{23} = 3.69 \text{ (GPa)}$ $G_{13} = 2.81 \text{ (GPa)}$
$\nu_{12} = 0.268$ $\nu_{23} = 0.082$ $\nu_{13} = 0.268$	$\nu_{12} = 0.255$ $\nu_{23} = 0.104$ $\nu_{13} = 0.255$
$\rho = 1423 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho = 1553 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

مدل مونتاژ شده پوسته کامپوزیتی به همراه تقویت کننده‌های مشبک نیز در شکل (۲-۴) نشان داده

شده است.



شکل (۲-۴) مدل نهایی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی.

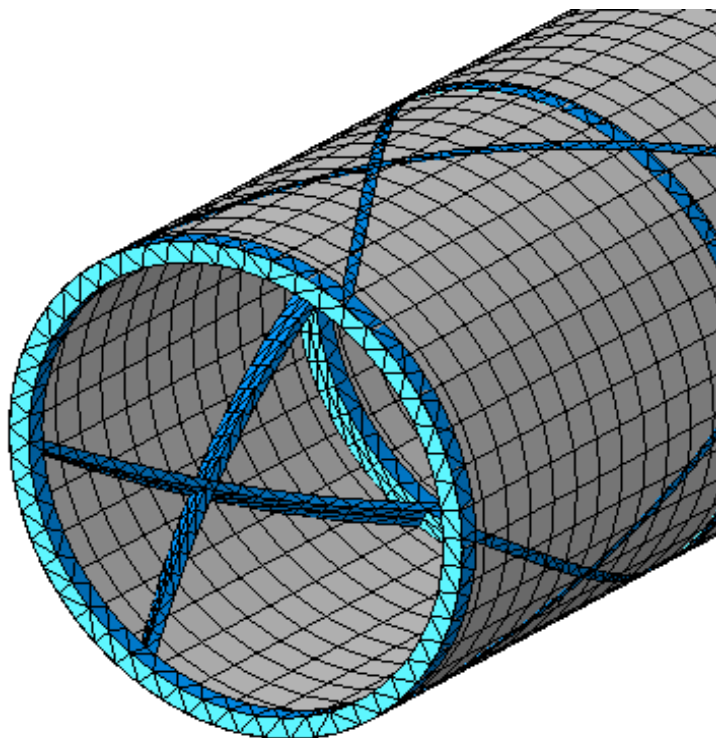
۴-۱-۱- مش بندی سازه

مهمترین بخش در نرم افزارهای تحلیلی، المان بندی و تنظیمات آن می باشد. از آنجا که برای محاسبه انرژی کرنشی با توجه به رابطه (۳-۳۰) به داده های مودال (جابجایی شکل مدها) گره هایی روی سازه احتیاج داریم که در فواصل مساوی کنار یکدیگر قرار گرفته اند، لذا برای المان بندی و مش زدن پوسته و استخراج این داده ها از المان S4R استفاده شده است. از این المان چهار ضلعی برای پوسته های جدار نازک و ضخیم استفاده می شود که در آن، هر المان از چهار گره تشکیل شده و در دسته المانهای استاندارد خطی قرار می گیرد. از روش انتگرال کاهش یافته^۱ برای افزایش سرعت حل و از روش موسوم به ساعت شنی برای افزایش دقت المان های خطی استفاده شده است. بدین ترتیب، پوسته از 30×39 المان S4R به صورت منظم تشکیل شده است و اندازه هر المان مربعی 9.6×10 میلی متر می باشد.

برای المان بندی تقویت کننده ها نیز به علت شکل نامنظم آن، از المان های C3D10 استفاده شده است. این المان هرمی شکل از ۱۰ گره تشکیل شده و در دسته المان های استاندارد چهار وجهی قرار می گیرد. اندازه اضلاع المان تقویت کننده ها نیز ۳ میلی متر بوده و به این ترتیب، ۲۶۳۷ المان هرمی برای تقویت کننده ها حاصل می شود. برای اتصال ریب های مارپیچ و محیطی با پوسته خارجی، از اتصال های صلب بین دو گره روی هم استفاده شده است.

پس از انجام آنالیز مودال سازه، جابجایی های مودال گره هایی را که به صورت منظم روی پوسته ایجاد شده و تشکیل المان های مستطیلی یکسان می دهند، در نظر گرفته می شوند. شکل (۳-۴) مدل المان محدود شبیه سازی شده در نرم افزار ABAQUS را نشان می دهد.

1 Reduced integration



شکل (۳-۴) مش بندی پوسته استوانه‌ای تقویت شده.

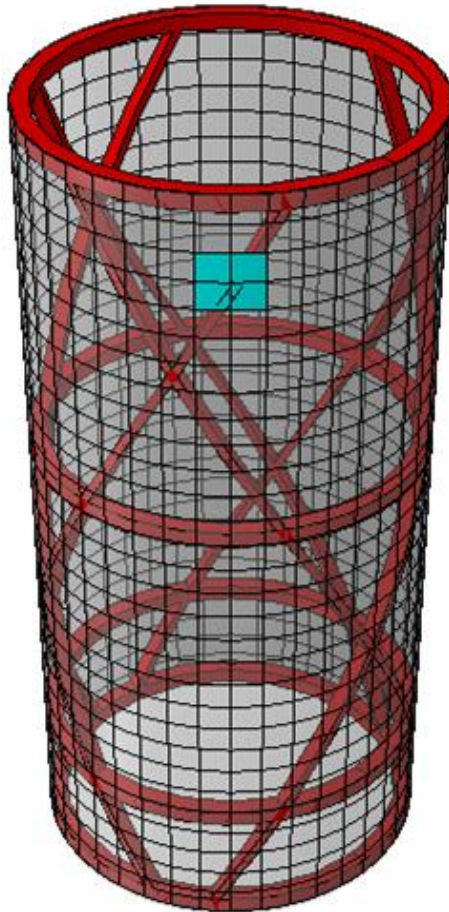
۴-۱-۲- شرایط مرزی

سیستم مختصات عمومی برای استوانه شبیه‌سازی شده به صورتی انتخاب می‌گردد که سطح پایینی استوانه در صفحه $X-Z$ قرار گرفته و جهت مثبت محور Y در راستای محور استوانه است. از آنجا که قرار است سازه تحت آزمایش مودال قرار گیرد، لذا از شرایط مرزی دو سر آزاد برای آزمایش سازه استفاده شده است.

۴-۱-۳- شبیه‌سازی سازه معیوب

در این تحقیق، به منظور بررسی و پیاده‌سازی فرآیند عیب‌یابی در پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مشبک، هدف، تشخیص وجود و موقعیت عیب در سازه است که این عیب می‌تواند به صورت یک عیب سطحی روی پوسته، یک عیب داخلی در تقویت‌کننده‌ها یا پوسته (مثلاً وجود حفره در ماتریس کامپوزیت یا لایه‌لایه شدن و ...)، یا اینکه عیب، ناشی از چسبیده نشدن صحیح تقویت‌کننده‌ها به پوسته کامپوزیتی باشد. با این وجود، عیب به هر صورتی باشد، تأثیر خود را به صورت

کاهش سختی در محل عیب نشان می‌دهد. از اینرو، در این سناریو، یک عیب سطحی در نزدیکی لبه بالایی سازه به صورت کاهش سختی ۲۰ درصدی در ماتریس کامپوزیت ایجاد می‌شود. شکل (۴-۴) مدل المان محدود سازه معیوب را با وجود یک عیب حفره در لبه بالایی سازه نشان می‌دهد.

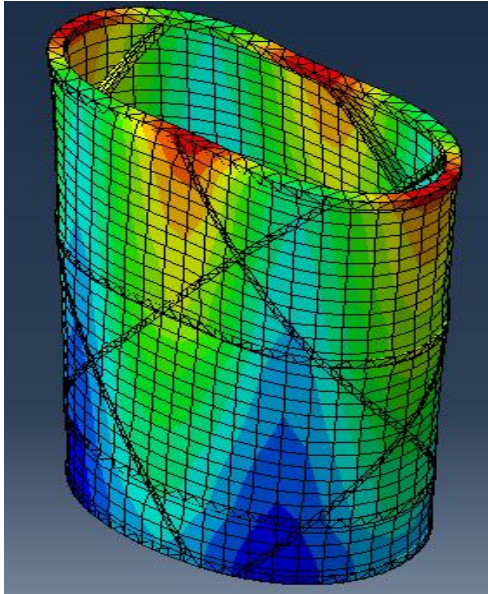


شکل (۴-۴) مدل المان محدود سازه معیوب.

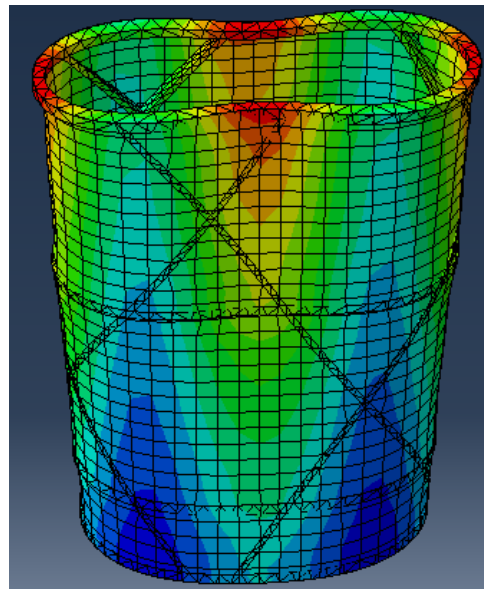
۴-۱-۴ - تحلیل المان محدود سازه

پس از اینکه پوسته استوانه‌ای سالم و معیوب توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شد، هر دو سازه سالم و معیوب در محیط نرم‌افزار، تحت آنالیز مودال قرار می‌گیرند. با انجام آنالیز مودال این دو سازه، ۱۳ مد اول غیر صلب از سازه استخراج شد و مشخص گردید که سازه در ۵ مد اول، دارای مدل صلب بوده، اما از مد ششم به بالا، سازه وارد مدهای غیر صلب می‌شود. بنابراین، با توجه به

این مشاهده، ۸ شکل مد اول غیر صلب سازه، یعنی، مدهای ششم تا سیزدهم آن به عنوان مدهای قابل بررسی در شناسایی عیوب آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۸) این ۸ شکل مد اول غیر صلب پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک سالم را نشان می‌دهد.

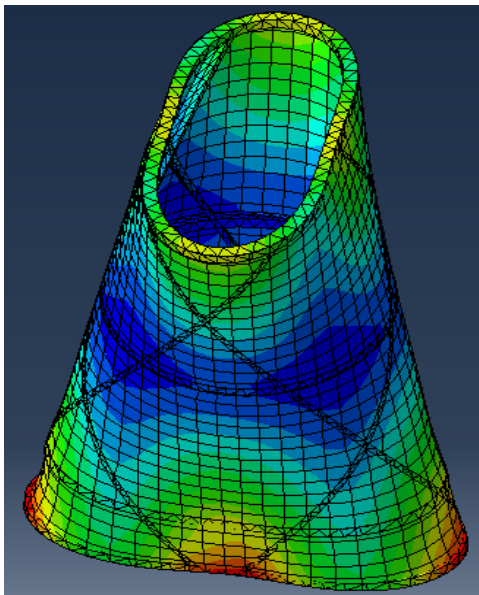


شکل مد دوم

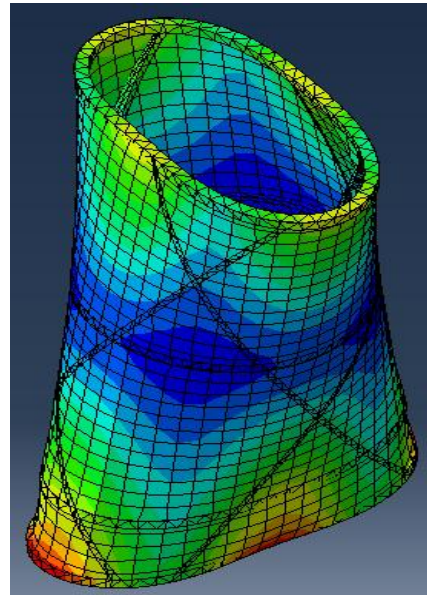


شکل مد اول

شکل (۴-۵) شکل مدهای اول و دوم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک.

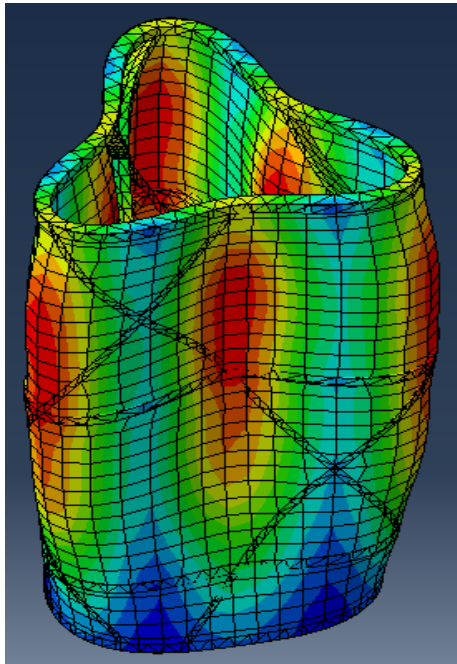


شکل مد چهارم

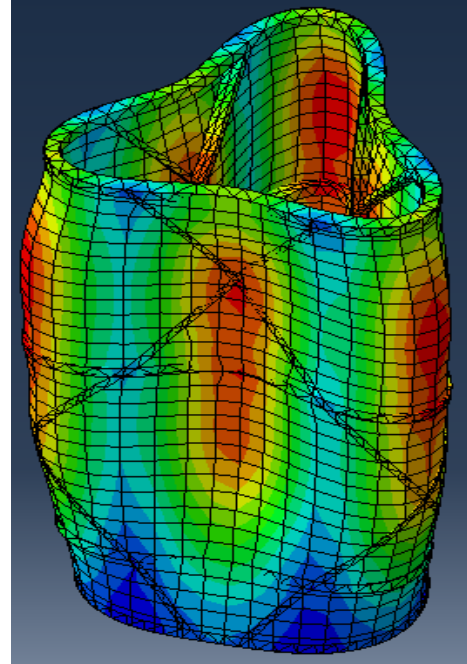


شکل مد سوم

شکل (۴-۶) شکل مدهای سوم و چهارم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک.

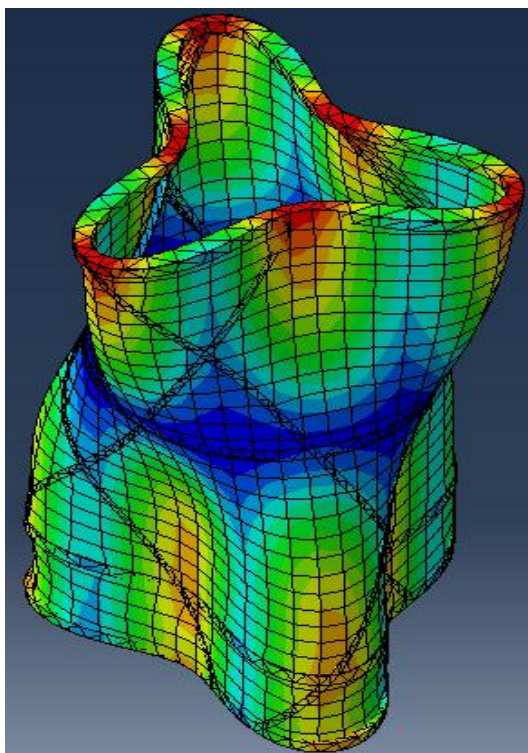


شکل مد ششم

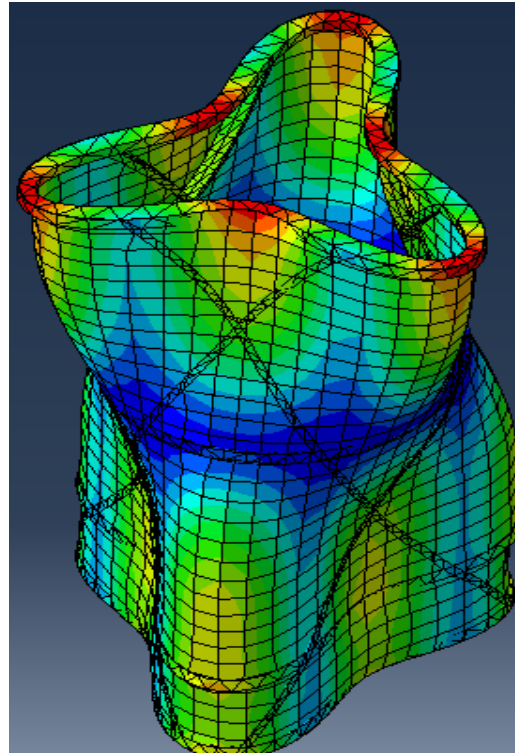


شکل مد پنجم

شکل (۷-۴) شکل مدهای پنجم و ششم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک.



شکل مد هشتم



شکل مد هفتم

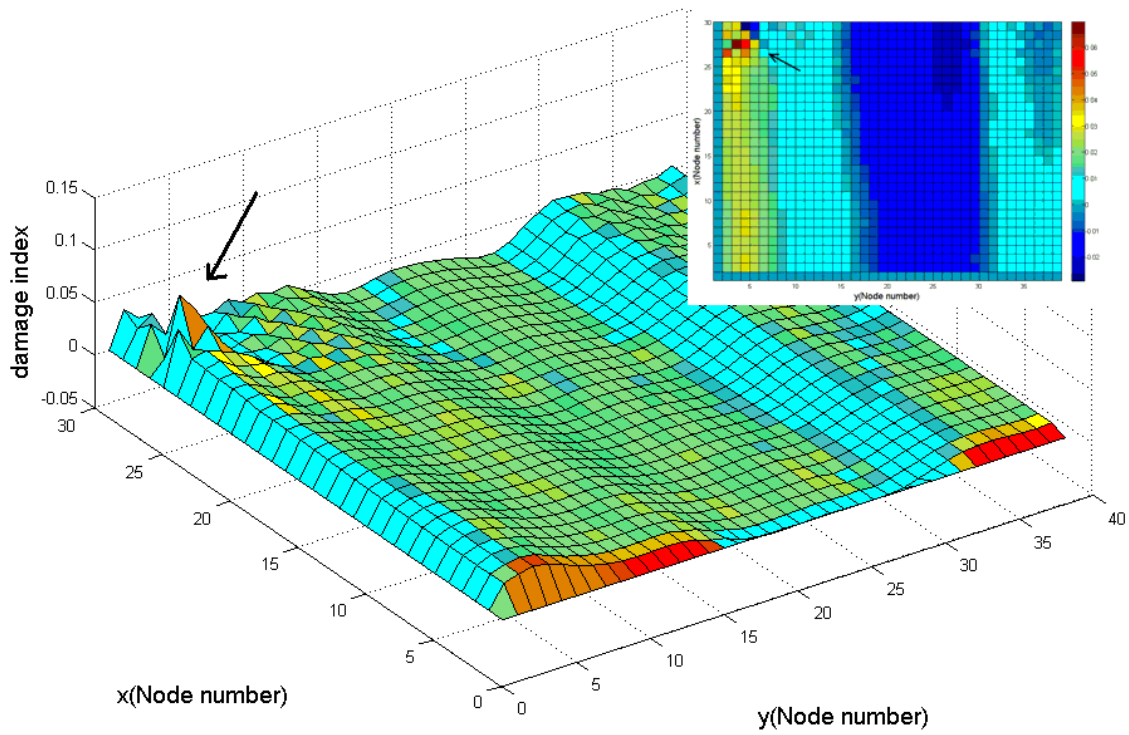
شکل (۸-۴) شکل مدهای هفتم و هشتم پوسته استوانه‌ای تقویت شده مشبک.

۲-۴- پیاده‌سازی روش شاخص عیب انرژی کرنشی مودال

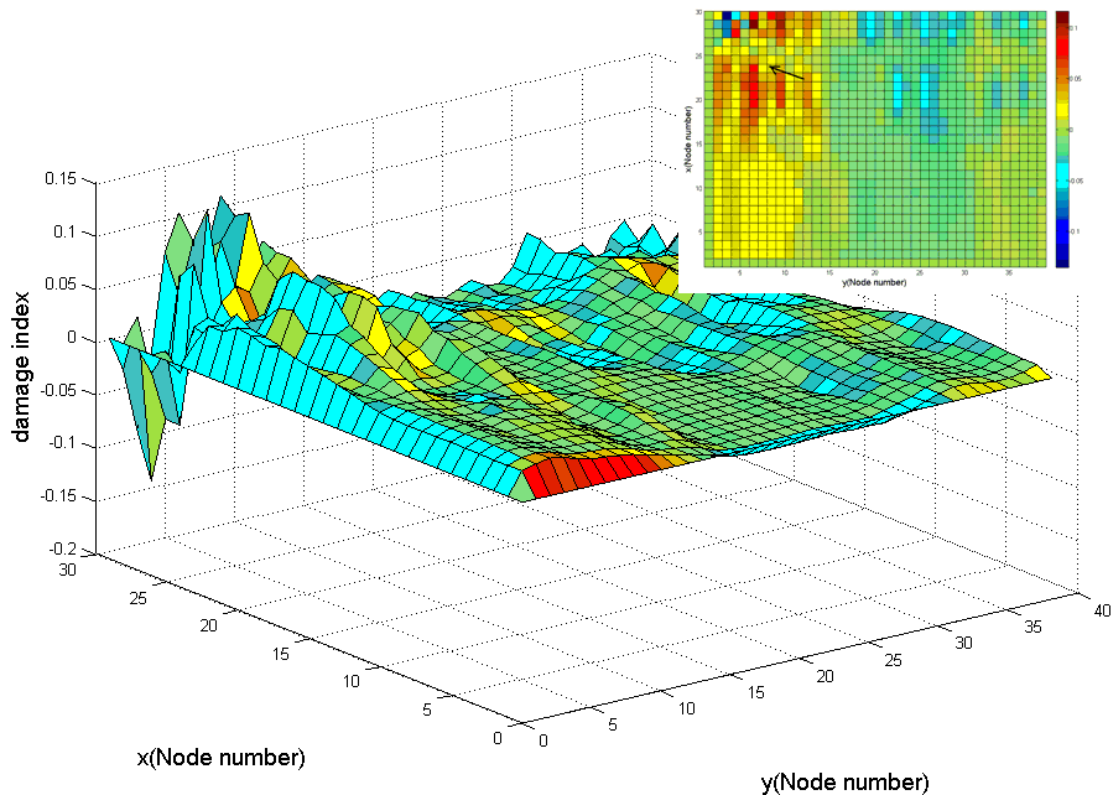
پس از ایجاد یک عیب به صورت کاهش سختی المان‌های موجود در نزدیکی لبه بالایی سازه، نوبت به پیاده‌سازی روش شاخص عیب انرژی کرنشی مودال روی آن جهت شناسایی این عیب می‌رسد. برای این منظور، پس از اجرای آنالیز مودال سازه، جابجایی‌های شعاعی تمام گره‌هایی را که به صورت منظم روی سطح پوسته انتخاب شده‌اند را در کل ۸ شکل مد اول غیر صلب سازه سالم و معیوب استخراج می‌کنیم. همانطور که انتظار می‌رفت، در هر مد، تفاوت‌هایی در مقدار فرکانس‌های آن مشاهده می‌شود که می‌توان گفت، این تفاوت ناشی از وجود عیب در سازه معیوب می‌باشد. حال، با اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، کلیه مشتقات جابجایی‌های شکل مد موجود در انرژی کرنشی مودال هر دو سازه سالم $(\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2})$ و معیوب $(\frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 \varphi_k^*}{\partial x^2})$ را با استفاده از روش DQM مشروح، بدست می‌آوریم. به منظور بررسی این مشتقات، همانطور که در بخش ۳-۱-۸ آمده است، از آنجا که سطح پوسته به 31×40 گره تقسیم شده است، لذا، در روابط $(38-3)$ تا $(41-3)$ با انتخاب $N_x = 31$ ، $N_y = 40$ کلیه مشتقات جابجایی شکل مدهای فوق را برای تمام گره‌ها در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی کرده و آنها را بدست می‌آوریم.

۳-۴- نتایج بدست آمده از آنالیز المان محدود

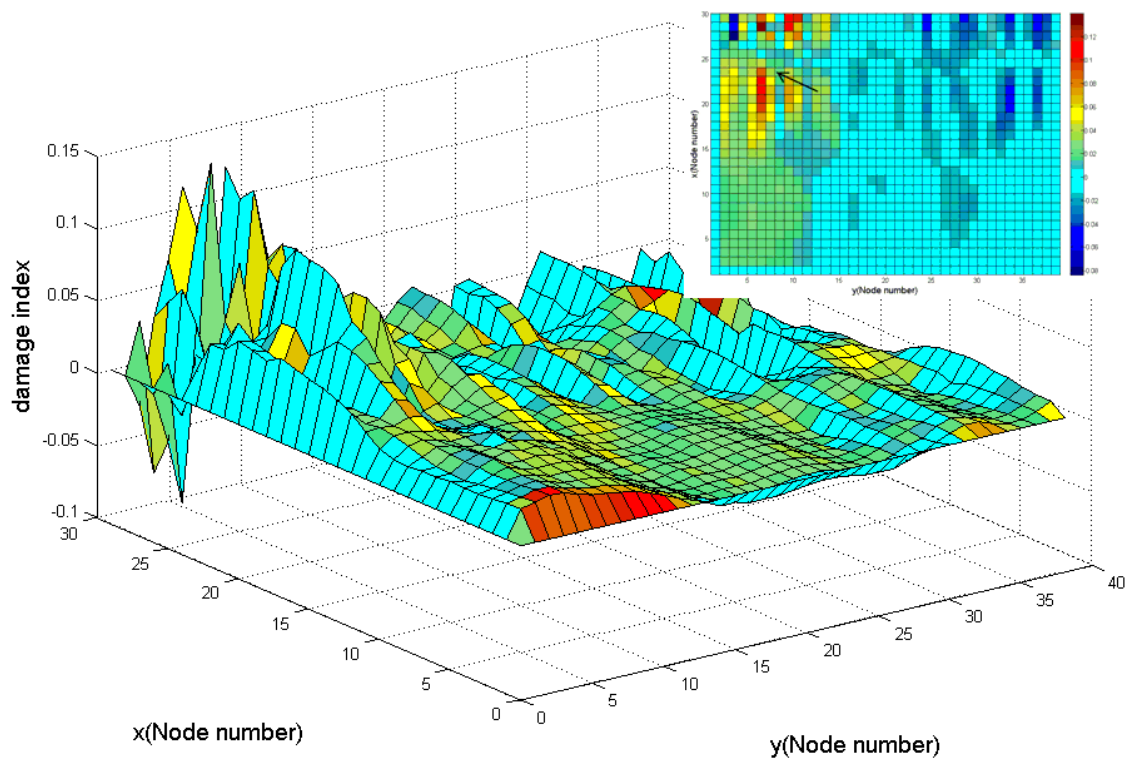
اکنون، کلیه مشتقات جابجایی‌های مودال بدست آمده و روابط مربوط به انرژی کرنشی و شاخص عیب سازه سالم و معیوب را در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی کرده و شاخص‌های عیب کلیه المان‌های سطحی سازه بدست می‌آید. برای این منظور و جهت بررسی حساسیت شکل مدهای اندازه‌گیری شده در تشخیص عیب، شاخص‌های عیب را به ترتیب در ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ مد اول غیر صلب سازه استخراج می‌کنیم. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل‌های $(4-9)$ تا $(4-16)$ نشان داده شده است.



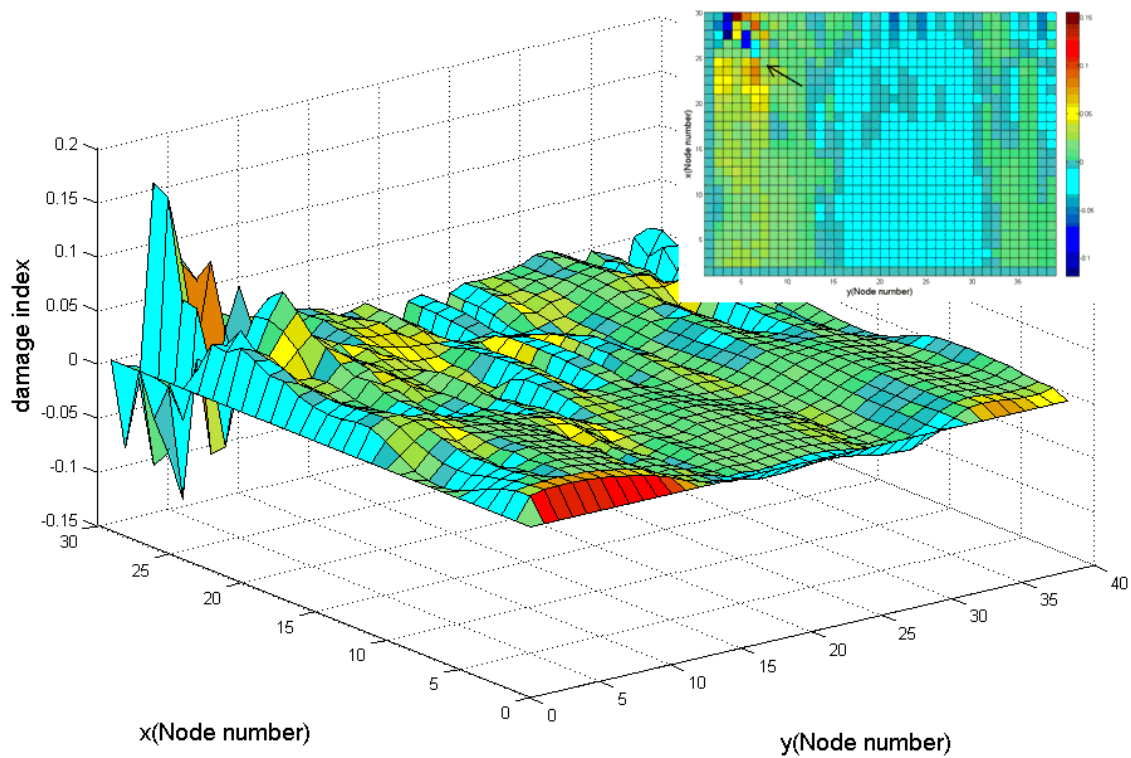
شکل (۴-۹) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مدل اول سازه (FEM).



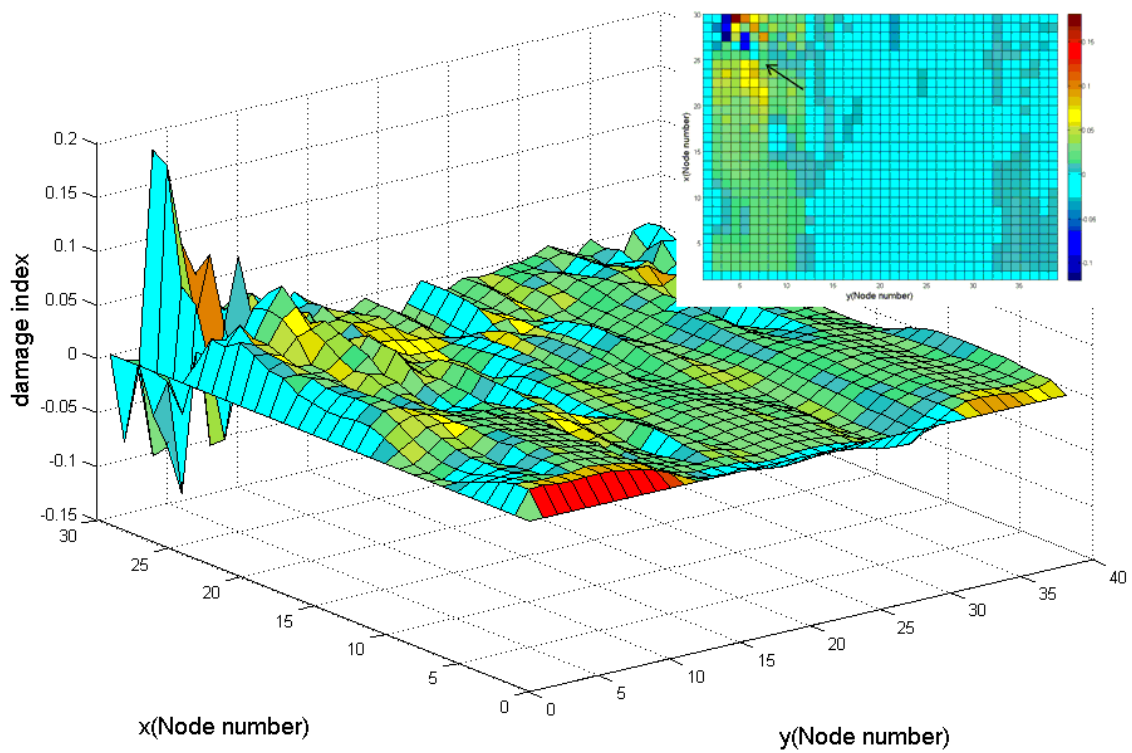
شکل (۴-۱۰) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مدل اول سازه (FEM).



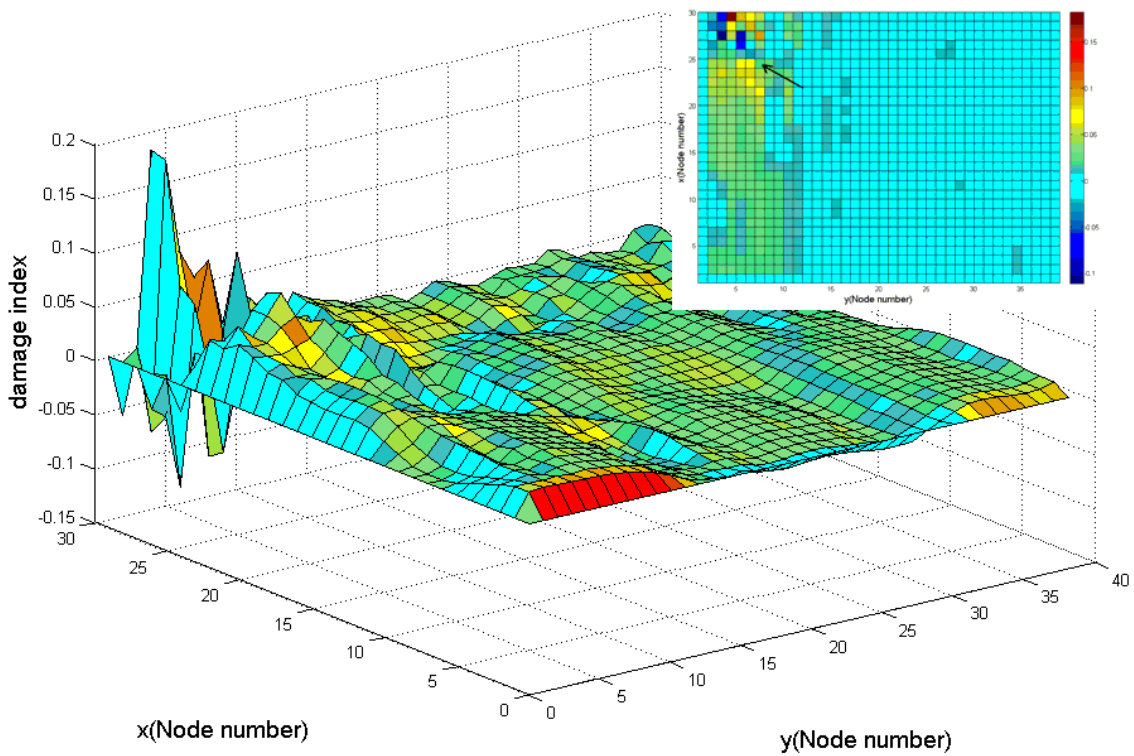
شکل (۴-۱۱) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۳ مد اول سازه (FEM).



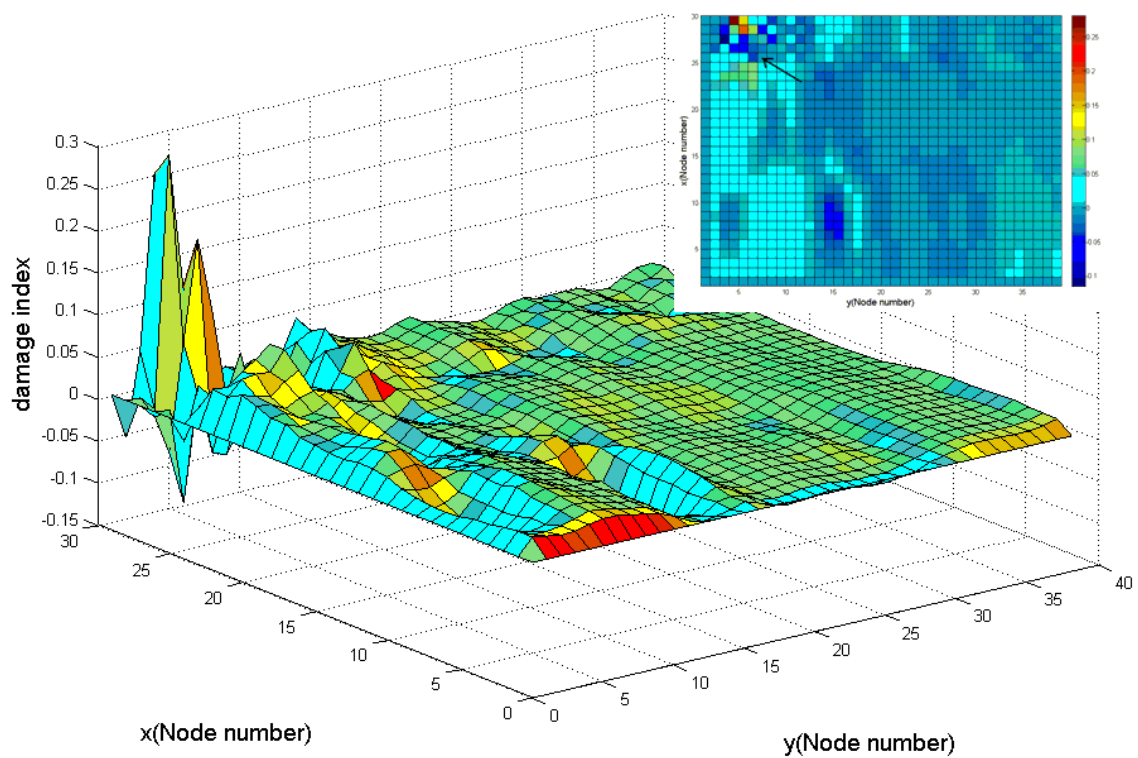
شکل (۴-۱۲) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۴ مد اول سازه (FEM).



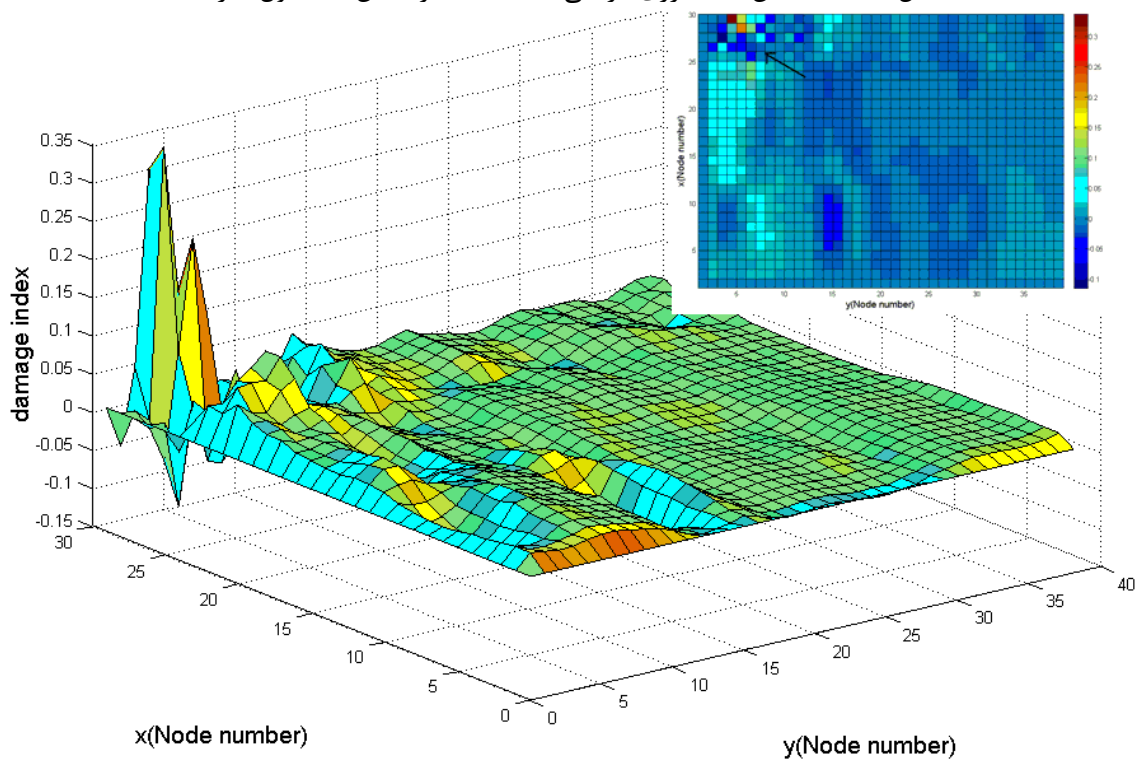
شکل (۴-۱۳) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۵ مد اول سازه (FEM).



شکل (۴-۱۴) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۶ مد اول سازه (FEM).



شکل (۴-۱۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۷ مد اول سازه (FEM).



شکل (۴-۱۶) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۸ مد اول سازه (FEM).

همانطور که از نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۴-۹) تا (۴-۱۶) مشخص است، شاخص عیب انرژی کرنشی بر اساس مدل بدست آمده از محیط المان محدود و بر مبنای اندازه‌گیری مجموعه شکل مدهای شماره ۱ تا ۸، به درستی توانسته است موقعیت عیب شبیه‌سازی شده در سازه را با وجود نویزهای موجود در نمودار شاخص عیب، تشخیص دهد. همانطور که در این نمودارها نشان داده شده است، موقعیت پیک در زیر نمودار سمت چپ و محل نشان داده شده در کانتور آن در سمت راست، نشان دهنده موقعیت صحیح عیب هستند.

فصل ۵. تحلیل تجربی، نتایج و بحث

در این رساله، به منظور صحت گذاری نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود، یک پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک با شبکه شش ضلعی، ساخته شد و مورد تحلیل آزمایشی قرار گرفت. مطالعه تجربی صورت گرفته در این قسمت از تحقیق به سه بخش مجزا تقسیم می‌گردد که عبارتند از:

۱- تولید نمونه به روش الیاف پیچشی

۲- تست مودال نمونه

۳- تحلیل و اعتبارسنجی و نتیجه‌گیری

۵-۱- انواع روشهای ساخت پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده

برای ساخت پوسته‌های استوانه‌ای، اگر هدف استفاده از الیاف بلند باشد، بهترین روش ساخت، پیچش الیاف است^۱. پیچش الیاف به سه صورت قابلیت اجرا دارد:

۱- پیچش الیاف نیمه ماشینی (دخالت دست انسان در الیاف گذاری)

۲- پیچش الیاف ماشینی (غالب ماشین‌های در دسترس)

۳- پیچش الیاف به روش جاگذاری^۲

که در ادامه، برخی از آنها به صورت تفصیلی بررسی می‌گردد.

۵-۱-۱- پیچش نیمه‌ماشینی الیاف برای ساخت پوسته‌های تقویت شده

در پیچش الیاف نیمه‌ماشینی به دلیل برخی از محدودیت‌ها، قسمت‌هایی از عملکرد دستگاه‌های پیچشی معمولی توسط انسان انجام می‌گیرد. در پیچش نیمه ماشینی استوانه‌های شبکه‌بندی شده کامپوزیتی، دستگاه متشکل است از یک محور چرخان که مندرل^۳ شبکه‌بندی شده سازه بر روی آن نصب گردیده است و فقط حرکت دورانی سیستم را تأمین می‌کند و برای ایجاد حرکت خطی پیچش، از

1 Filament winding

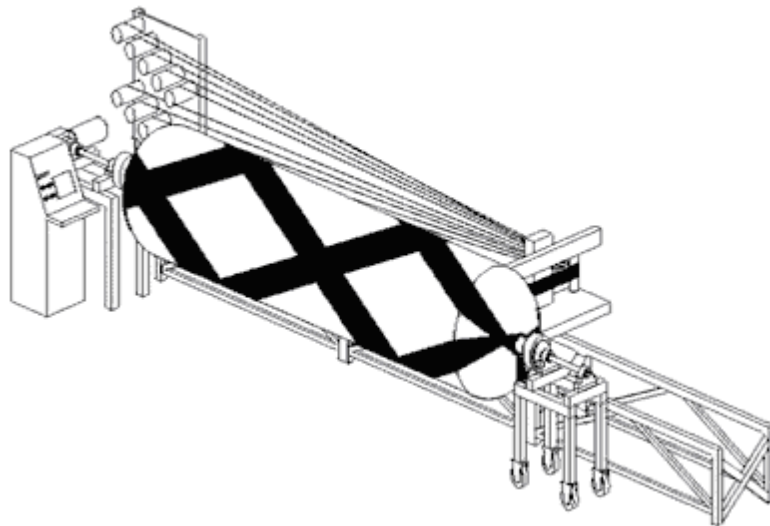
2 Fiber placement

3 Mandrel

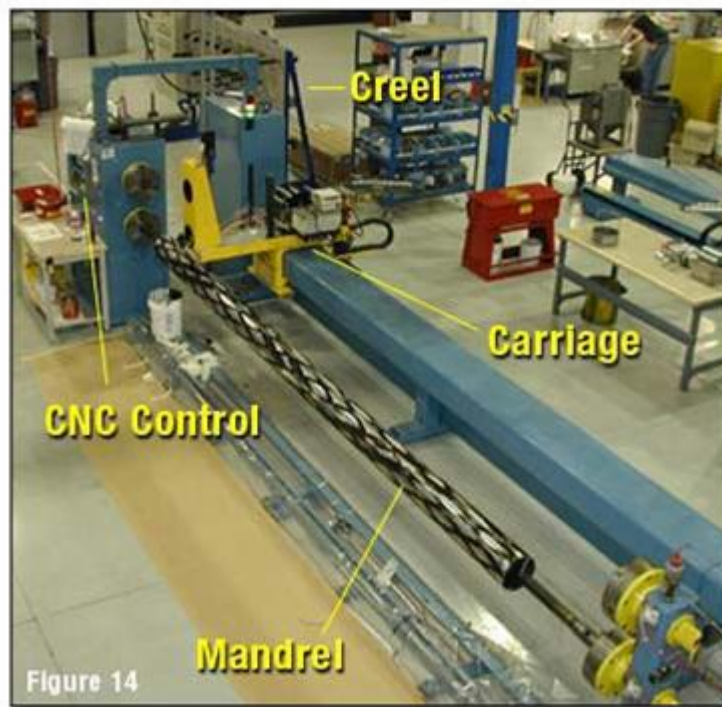
فردی که مسئولیت هدایت الیاف را با دست بر عهده دارد استفاده می‌گردد. این روش ابتدائی‌ترین روش ساخت پوسته‌ها است.

۲-۱-۵- پیچش ماشینی الیاف با ماشین‌های معمولی برای ساخت پوسته‌های تقویت شده

در پیچش ماشینی الیاف با بهره‌گیری از ماشین‌های موجود، تمام مراحل به صورت تمام اتوماتیک انجام می‌شود. در پیچش تمام ماشینی استوانه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک، دستگاه متشکل است از یک محور چرخان که مندرل شبکه‌بندی شده سازه نیز بر روی آن نصب گردیده است و حرکت دورانی سیستم را تأمین می‌کند و از طرف دیگر یک سیستم با حرکت خطی که بر روی دستگاه تعبیه شده است، مسئولیت هدایت الیاف را در راستاهای معین بر عهده دارد. این روش، متداول‌ترین روش ساخت پوسته‌ها است که کاربردهای بسیاری برای تولید انواع قطعات نظیر مخازن، پوسته موشک و غیره دارا می‌باشد. شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) نمونه‌ای از دستگاه پیچش الیاف تمام اتوماتیک را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۵) شماتیکی از دستگاه پیچش الیاف ماشینی [۷].

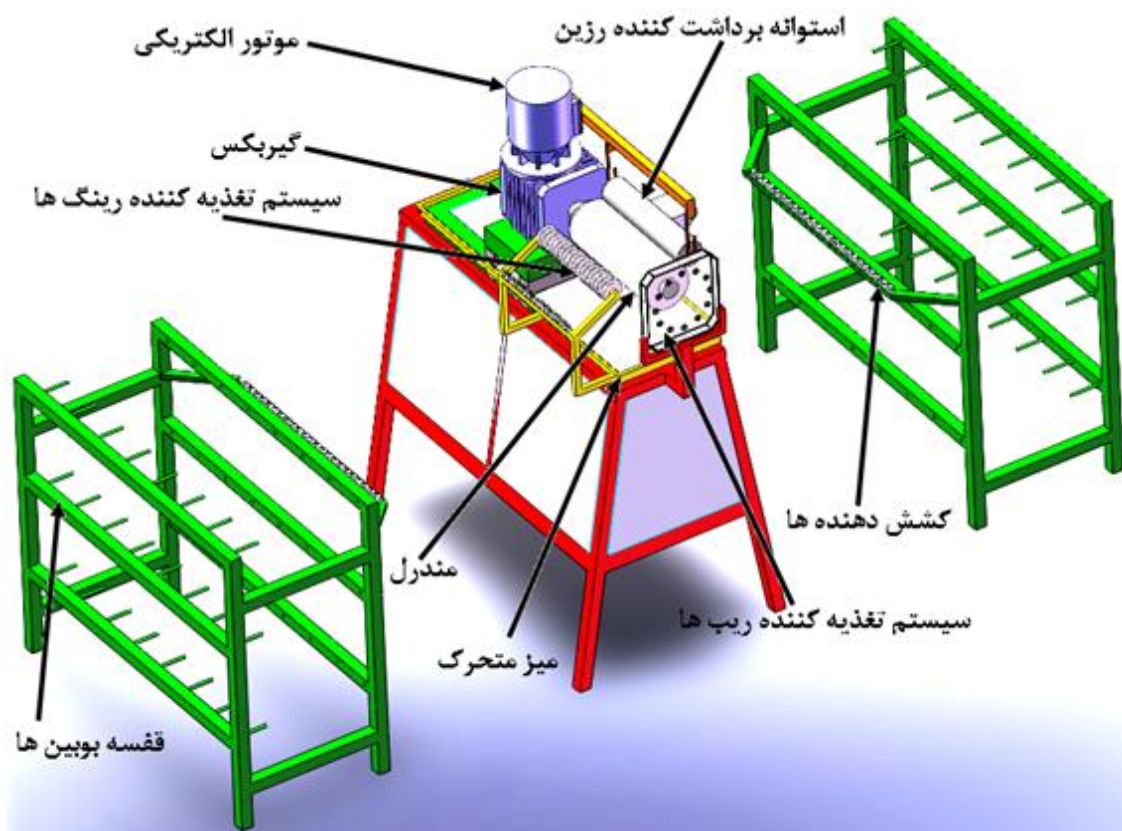


شکل (۵-۲) ماشین پیچش الیاف اتوماتیک [۷].

۵-۱-۳ - دستگاه جاگذاری الیاف برای ساخت پوسته تقویت شده مورد آزمایش

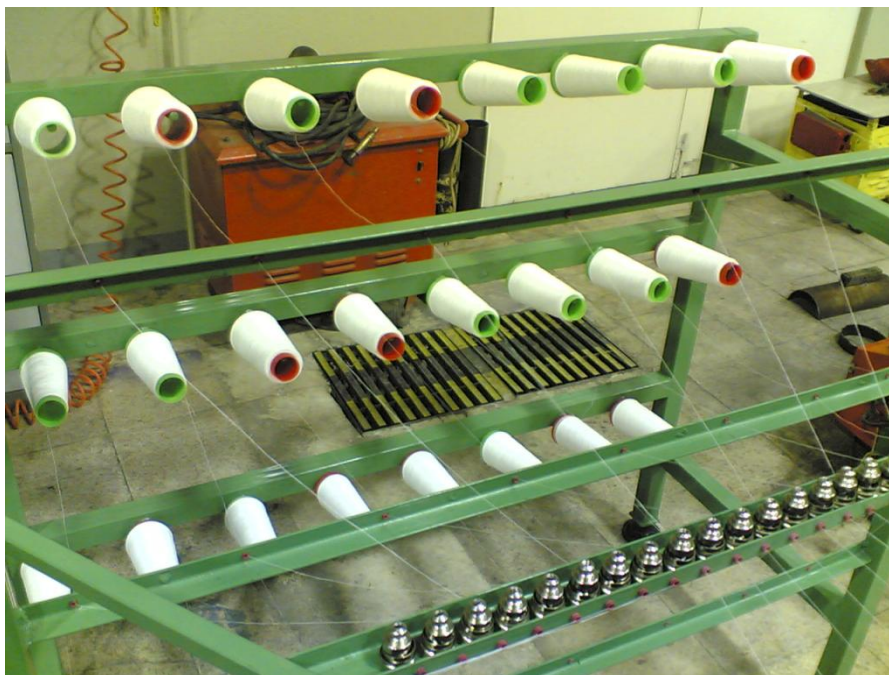
پیچش الیاف با استفاده از دستگاه جاگذاری الیاف، بسیار شبیه به روش متداول پیچش الیاف با ماشینهای پیچش معمولی است. در این دستگاهها نیز، تمام مراحل به صورت تمام ماشینی انجام می گیرد. این دستگاه، متشکل است از یک محور چرخان که مندرل شبکه بندی شده سازه نیز بر روی آن نصب گردیده است و حرکت دورانی سیستم را تأمین می کند و از طرف دیگر یک سیستم با حرکت خطی که دارای چندین هدایت کننده الیاف است و بر روی دستگاه تعبیه شده است، مسؤلیت هدایت الیاف را در راستاهای معین بر عهده دارد. برخلاف ماشینهای پیچش الیاف که سیستم حرکت خطی متحرک است و مندرل فقط حرکت پیچشی دارد، در این روش، مندرل علاوه بر حرکت پیچشی می تواند دارای حرکت خطی نیز باشد و سیستم متحرک ماشینهای پیچش الیاف در این سیستم می تواند صلب باشد. در پیچش الیاف با استفاده از دستگاه جاگذاری، به تعداد مورد نیاز برای تمام شیارهای ریبهای مارپیچ و رینگهای محیطی، سیستم تغذیه کننده مستقل الیاف تعبیه شده است.

در این پژوهش، از روش پیچش الیاف با استفاده از دستگاه جاگذاری، برای ساخت استوانه کامپوزیتی تقویت شده مشبک استفاده شده است. شماتیکی از دستگاه استفاده شده، در شکل (۳-۵) نشان داده شده است.



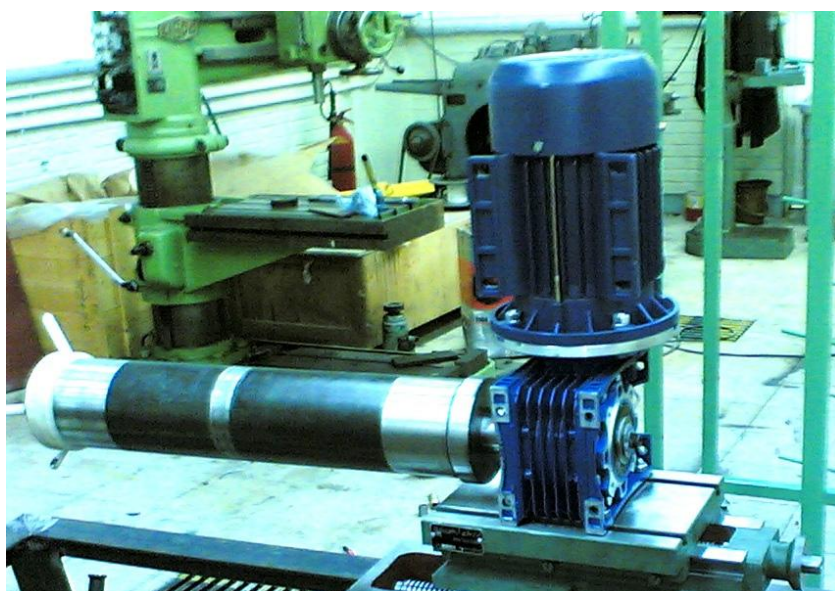
شکل (۳-۵) دستگاه طراحی و ساخته شده موجود در آزمایشگاه [۸۱].

همانگونه که در شکل (۳-۵) مشاهده می‌شود، دستگاه از چهار قسمت مجزاء، دو عدد قفسه برای بوبین‌های الیاف، یک عدد حمام رزین و سازه اصلی دستگاه تشکیل شده است. هر یک از قفسه‌ها ظرفیت ۲۴ عدد بوبین را برای الیاف دارد. یکی از قفسه‌ها اختصاص به تقویت‌کننده‌ها دارد و دیگری مختص پیچش پوسته بیرونی است. مطابق شکل (۴-۵)، بر روی هر قفسه به ازای هر بوبین یک گشش‌دهنده قرار داشته که گشش اولیه مورد نظر را برای الیاف‌ها ایجاد می‌کند.



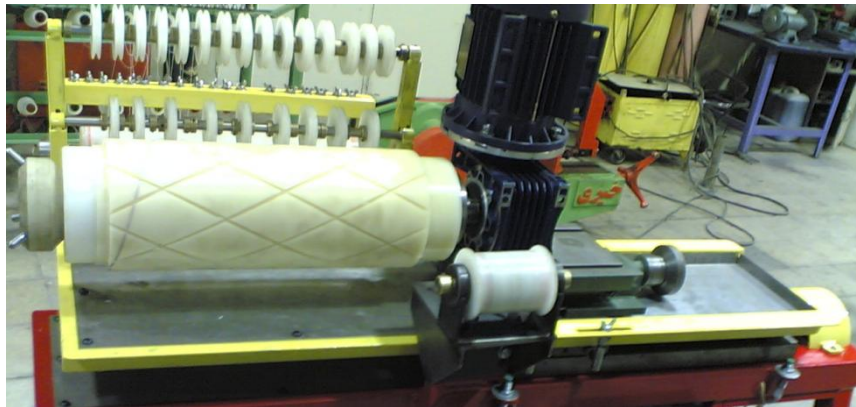
شکل (۴-۵) قفسه بوبین ها و مجموعه کشش دهنده‌ها [۸۱].

سازه اصلی دستگاه علاوه بر شاسی آن دارای سیستم متحرکی است که از دو موتور الکتریکی جریان متناوب برای حرکت‌های دورانی و خطی استفاده می‌کند. سیستم حرکت دورانی، عبارت است از یک موتور ۰/۵ اسب بخار بعلاوه یک گیربکس کاهنده حلزونی با نسبت ۱/۷۱ که به شفت دورانی که مندرل‌ها بر روی آن نصب می‌گردند، متصل شده‌اند (شکل (۵-۵)).



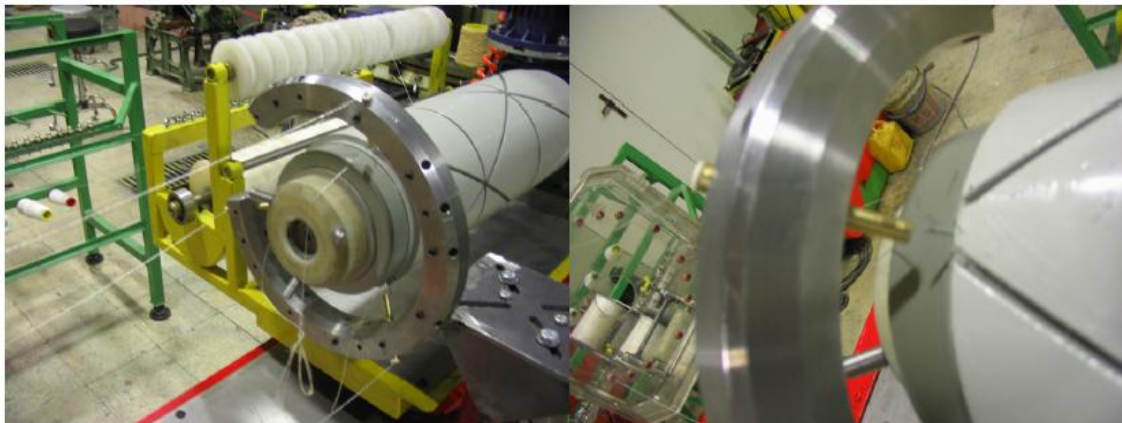
شکل (۵-۵) سیستم حرکت دورانی [۸۱].

برای حرکت خطی نیز از یک موتور الکتریکی جریان متناوب سه فاز با قدرت ۰/۵ اسب بخار که به صورت متوالی به یک گیربکس حلزونی کاهنده با نسبت ۱/۱، سیستم دنده تایم افزایشده با نسبت ۳ و پیچ انتقال قدرت با گام ۵ میلی‌متر که میز لغزنده‌ای که سیستم دورانی بر روی آن سوار شده است را به حرکت در می‌آورد، متصل است (شکل (۵-۶)).



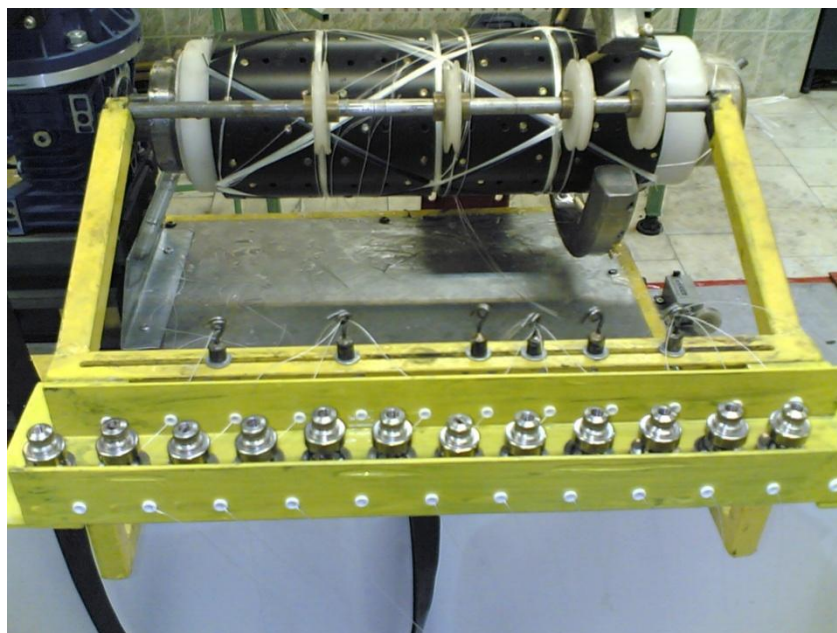
شکل (۵-۶) میز لغزنده [۸۱].

سیستم تغذیه الیاف تقویت‌کننده‌ها از دو بخش مجزا تشکیل شده است که اولی مختص ریب‌های مارپیچ است و دومی متعلق است به رینگ‌های محیطی. با توجه به حرکت خطی اعمال شده بر روی سیستم دورانی که عملاً باعث حرکت خطی مندرل می‌گردد، سیستم تغذیه ریب‌های مارپیچ به صورت صلب بر روی دستگاه نصب می‌شود. از مزایای این نوع سیستم تغذیه این است که میزان کشش الیاف در طول حرکت رفت و برگشتی میز متحرک ثابت می‌ماند. زیرا سیستم متحرک هیچ حرکتی نسبت به کشش دهنده‌ها ندارد. این سیستم به ازای هر جفت ریب مارپیچ ساعتگرد و پادساعتگرد، از یک تغذیه‌کننده استفاده می‌کند و با توجه به نیاز می‌توان از ۱ تا ۱۲ تغذیه‌کننده را بر روی آن نصب نمود که به ترتیب توانایی تولید یک جفت تا دوازده جفت ریب مارپیچ ساعتگرد و پادساعتگرد را دارند (شکل (۵-۷)).



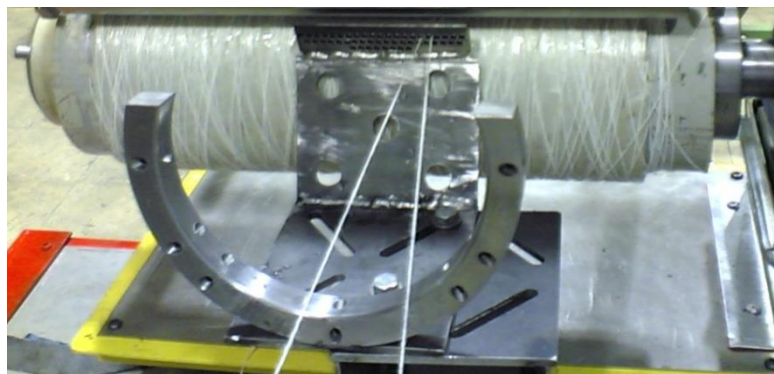
شکل (۷-۵) سیستم هدایت و تغذیه کننده ریبهای مارپیچ [۸۱].

در سمت مقابل، دستگاه، سیستم تغذیه کننده های ویژه رینگ های محیطی بر روی دستگاه نصب شده است. به ازای هر رینگ، یک غلتک و کشش دهنده وجود دارد. بر خلاف تغذیه کننده ریب های مارپیچ، به دلیل متحرک بودن تغذیه کننده های رینگ های محیطی، بالاجبار کشش دهنده ها نیز بر روی میز لغزنده نصب گردیده اند تا از افت کشش اولیه الیاف جلوگیری شود (شکل (۷-۵)).



شکل (۸-۵) سیستم هدایت کننده و تغذیه کننده الیاف در رینگ های محیطی [۸۱].

برای ایجاد پوسته خارجی سازه از یک تغذیه کننده ویژه استفاده شده است که در جای تغذیه کننده ریب های مارپیچ نصب شده و هدایت الیاف بر روی پوسته را به عهده می گیرد (شکل (۸-۵)).



شکل (۹-۵) سیستم هدایت‌کننده و تغذیه‌کننده الیاف بر روی پوسته خارجی [۸۱].

سیستم کنترل دستگاه بر مبنای کنترل حلقه باز استوار است و غیر از مدارها و اجزای کنترلی از دو اینورتر تک فاز به سه فاز، برای کنترل دور خروجی موتورهای سه فاز سیستم متحرک بر مبنای تغییر فرکانس جریان الکتریسیته استفاده گردیده است. به دلیل حلقه باز بودن این سیستم برای تصحیحات احتمالی، در حین مراحل ساخت، از ابزاری که توانایی ایجاد شوک در دور موتور مختص حرکت دورانی را دارد استفاده شده است (شکل (۵-۱۰)).



شکل (۵-۱۰) سیستم کنترل و اینورترهای استفاده شده در دستگاه [۸۱].

برای ایجاد یکنواختی در توزیع رزین و جبران کمبود آن در فضاهای خالی ریبها و رینگها یا برداشت اضافی رزین از روی سازه، از یک استوانه هرزگرد استفاده شده است که در طی مرحله ایجاد پوسته خارجی بر روی دستگاه نصب می‌گردد (شکل (۵-۱۱)).



شکل (۵-۱۱) استوانه جبران کننده کمبود رزین [۸۱].

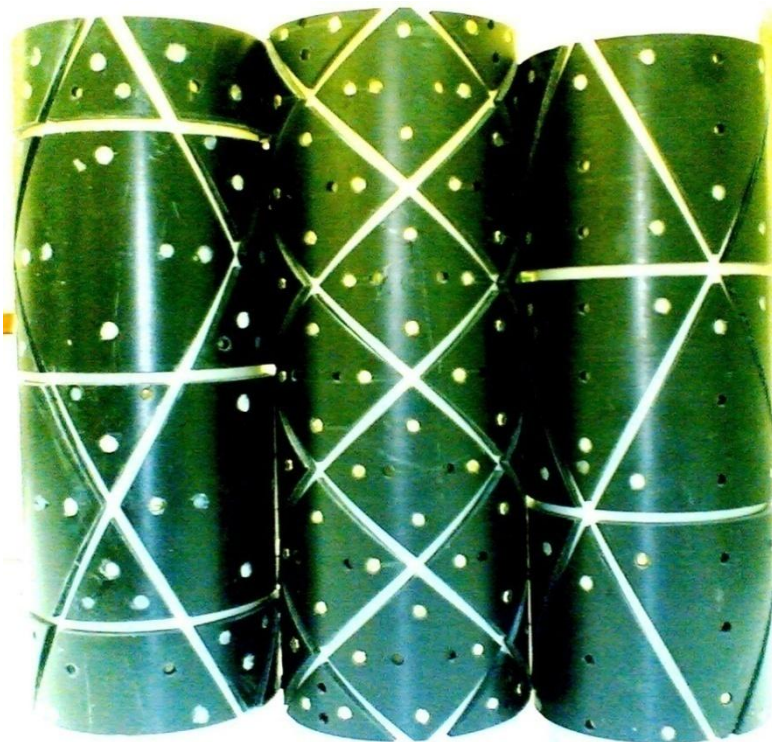
برای یکنواخت شدن قطعات بعد از مرحله پیچش، نیاز است که سیستم دورانی دستگاه به فعالیت خود ادامه دهد تا از جابجایی رزین از نقاط فوقانی قطعه به نقاط تحتانی و انباشت در آنجا و عدم یکنواختی قطعه جلوگیری شود. به همین منظور، به جای استفاده از سیستم دورانی خود دستگاه، از سیستم هرزگردی که به این منظور طراحی و ساخته شده است، استفاده شده که به طور همزمان توانایی چرخش چهار قطعه را دارد (شکل (۵-۱۲)).



شکل (۵-۱۲) مکانیزم دورانی هرزگرد برای حفظ یکنواختی نمونه‌ها [۸۱].

۵-۱-۴- مندرل

برای هدایت صحیح الیاف به منظور ایجاد ریب‌های مارپیچ و رینگ‌های محیطی، از استوانه‌هایی که شیارهایی بر روی آنها به تعداد مورد نظر تعبیه شده‌اند، استفاده شد. این استوانه‌ها از دو بخش عمده تشکیل شده‌اند که بخش اول، استوانه یکپارچه داخلی است که نشیمنگاه قطعات قسمت دوم که شکل دهنده نوع شبکه هستند، می‌باشد. بسته به نوع شبکه و تعداد ریب‌ها و رینگ‌های مورد نظر، شکل قطعات قسمت دوم به سه صورت لوزی، مثلث و شش ضلعی می‌باشند (شکل (۵-۱۳)).



شکل (۵-۱۳) نمونه مندرل‌هایی با شبکه‌های لوزی، مثلث و شش ضلعی.

۵-۲- ساخت نمونه مورد آزمایش

در ساخت استوانه تقویت شده مشبک با شبکه‌های شش ضلعی مورد آزمایش، موارد زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- زاویه ریب‌های مارپیچ نسبت به محور مندرل در نمونه‌های تقویت‌شده، همواره ۳۰ درجه است.

- ۲- زاویه پیچش الیاف در پوسته خارجی همواره ۷۲ درجه می‌باشد.
- ۳- درصد حجمی الیاف در تقویت کننده‌ها همواره ۳۰ درصد است.
- ۴- درصد حجمی الیاف در پوسته خارجی همواره ۴۵ درصد است.
- کشش اولیه تمام الیاف ۱۸۰ گرم است که با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شده است. این کشش اولیه، به نحوی انتخاب شده است که در حین مراحل پیچش، الیاف دچار شکست نگردند و از طرف دیگر حداقل کشش برای جلوگیری از انباشت الیاف در مواضع خاص ایجاد شود.
- ۵- جنس تمام قسمت‌های نمونه‌ها از الیاف شیشه E و زمینه از پلیمر اپوکسی هواسخت CY219 است.
- ۶- مشخصات ابعاد هندسی و مواد بکار گرفته شده در ساخت سازه دقیقاً با مدل المان محدود آن که در جداول (۱-۴) و (۲-۴) آمده است، یکسان است.
- اکنون برای ساخت نمونه با توجه به موارد فوق‌الذکر، بعد از مونتاژ کردن قطعات شبکه بر روی استوانه مندرل، قالب بر روی دستگاه قرار می‌گیرد. برای یکنواخت شدن قطعه نهایی، پیش از آغاز مرحله پیچش، تنظیمات زیر انجام می‌گردد.
- ۱- تنظیم دور موتورها با استفاده از اینورترها؛
 - ۲- تنظیم کشش اولیه الیاف؛
 - ۳- هدایت الیاف به محل تغذیه‌کننده‌ها و شیارها (نخ کشی).
- در صورت آماده بودن دستگاه و انجام تنظیمات مقدماتی، مرحله پیچش ریبها و رینگها آغاز می‌گردد. در حین پیچش، الیاف آغشته به رزین نیز می‌گردند. پیچش الیاف در شیارها تا زمانی ادامه می‌یابد که در نقاط تقاطع الیاف در شیارها، سطح الیاف با سطح مندرل برابر گردد. بعد از اتمام مرحله پیچش تقویت‌کننده‌ها، دستگاه متوقف شده، تغذیه‌کننده‌های ریبها و رینگها جدا می‌گردند و به جای آنها تغذیه‌کننده پوسته خارجی بر روی دستگاه نصب می‌گردد. برای ایجاد پوسته خارجی با زاویه

پیچش دلخواه، دور موتورها دوباره تنظیم می‌گردند. پیش از آغاز پیچش پوسته خارجی، غلتک تنظیم کننده بر روی مندرل قرار می‌گیرد تا کمبود رزین در مناطقی غیر از منطقه تلاقی الیاف جبران گردد و تمام فضای خالی با رزین پر گردد. بعد از این مرحله، پیچش پوسته خارجی با زاویه دلخواه الیاف انجام می‌گیرد. هنگامی که ضخامت پوسته خارجی به مقدار مورد نظر رسید، دستگاه متوقف شده و مندرل بر روی دستگاه هرزگرد (شکل (۵-۱۲)) قرار می‌گیرد تا به مدت هشت ساعت قطعه و مندرل بچرخند.

بعد از سفت شدن رزین، پیچ‌های اتصال دهنده شکل شبکه‌های مندرل باز شده و استوانه پایه خارج شده و تک‌تک قطعات شبکه‌ای از داخل قطعه خارج می‌گردند. سپس در اندازه مورد نظر توسط دستگاه ماشین تراش برش می‌خورند. به این ترتیب، نمونه مورد آزمایش همانند آنچه در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است، ساخته شده و به آزمایشگاه مودال منتقل می‌شود.



شکل (۵-۱۴) نمونه ساخته شده استوانه کامپوزیتی تقویت شده با شبکه شش ضلعی.

۵-۳- تست مودال نمونه مورد آزمایش

پس از آنکه مدل استوانه کامپوزیتی تقویت شده مشبک ساخته شد، به آنالیز مودال سازه پرداخته می شود. در راستای اجرای فرآیند آنالیز مودال در این تحقیق، از آنجا که برای تشخیص عیب، به جابجایی‌های شکل مد هر دو سازه سالم و معیوب، احتیاج است، لذا به جهت یکسان بودن تمام شرایط آزمایش سازه سالم و معیوب، تنها یک نمونه از سازه استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک با شبکه شش ضلعی را ساخته و در ابتدا آن را طی چندین مرحله مورد تست مودال قرار می‌دهیم. سپس، عیبی در سازه ایجاد کرده و مجدداً آن را مورد تست قرار داده و بر اساس شاخص عیب انرژی کرنشی که در بخش ۳-۱-۷- بدست آمد، این دو نتیجه را با یکدیگر مقایسه کرده و اقدام به شناسایی موقعیت عیب موجود می‌شود.

۵-۳-۱- نحوه اجرای تست مودال نمونه مورد آزمایش

برای شروع آنالیز مودال سازه سالم، ابتدا می‌بایست شرایط تکیه‌گاهی آن را ایجاد کرد. به منظور فراهم آوردن شرایط تکیه‌گاهی مناسب برای انجام آنالیز مودال، از شرایط تکیه‌گاهی آزاد- آزاد با رعایت نکات مشروح در بخش ۲-۲-۱- استفاده شده است. به این ترتیب، سازه به شکل معلق نگه داشته شده، بگونه‌ای که از حرکت سازه در هیچ یک از نقاط و جهات جلوگیری نشود. توجه داشته باشید، از آنجا که در این آزمایش، ارتعاشات شعاعی مد نظر است، لذا راستای نوارهای کششی که سازه بوسیله آنها آویزان می شود، باید موازی با سطح استوانه باشد.

در گام بعدی، برای بدست آوردن پاسخ‌های سازه، ابتدا ۶۳ گره به طور منظم روی سطح سازه سالم انتخاب گردید، که تعداد این نقاط در راستای محیطی ۹ و در راستای طولی استوانه ۷ عدد می‌باشند. با توجه به این آرایش، فاصله بین هر دو گره متوالی، ۵ cm می‌باشد. انتخاب این نقاط بر اساس بینش کسب شده از رفتار سازه مدل شده در محیط نرم‌افزار و ساختار هندسی آن می‌باشد. از طرفی، از آنجا که در سازه‌های تقویت شده، تقویت کننده‌ها نقش بسزایی را در انتقال انرژی به سایر بخش‌های آن

دارند، لذا تا حد امکان سعی شده است نقاط مذکور، نزدیک تقویت‌کننده‌ها انتخاب شوند تا با تحریک آنها، بتوان بهترین و مؤثرترین تحریک را در محدوده فرکانسی مد نظر روی سازه اعمال نمود.

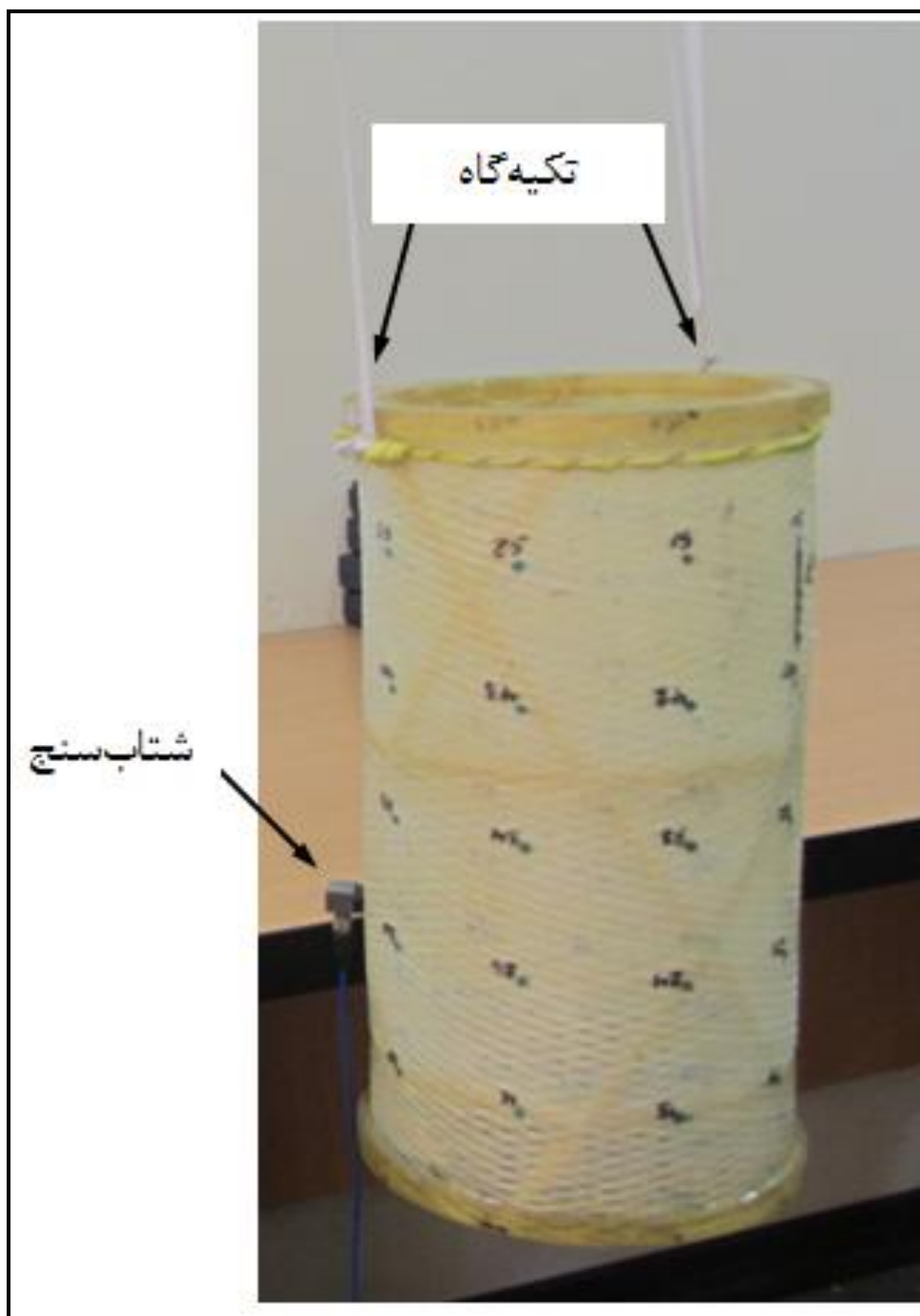
پس از این مرحله، سنسورهای شتاب‌سنج روی سازه نصب می‌شوند. همانطور که پیش از این نیز ذکر شد، یکی از نکاتی که می‌بایست در آنالیز مودال سازه‌های سبک مانند سازه مورد آزمایش به آن توجه داشت، جلوگیری از اضافه شدن جرم اضافی به سازه است. در مورد سنسورهای شتاب‌سنج نیز این امر مستثنی نیست. از آنجا که با نصب هر شتاب‌سنج، جرمی به سازه تحمیل می‌شود و این جرم باعث تغییر خصوصیات مودال بدست آمده خواهد شد، از اینرو در این آزمایش، تنها از یک شتاب‌سنج PCB که بالاترین دقت و کمترین وزن را دارد، استفاده شده که تا حد امکان تأثیر اضافه شدن جرم شتاب‌سنج به سازه، به حداقل مقدار خود برسد.

همچنین، با توجه به نقش تقویت‌کننده‌ها در انتقال انرژی به سایر بخش‌های این سازه، سعی بر آن شد تا این سنسور در نزدیکترین محل به تقویت‌کننده‌ها نصب شود. با توجه به این توضیح، شتاب‌سنج در گره ۲۷ که دقیقاً روی تقویت‌کننده قرار داشته، از داخل به سازه نصب گردید. دلیل نصب سنسور از داخل، این بود که وقتی چکش برای تحریک گره ۲۷ اقدام می‌کند، مزاحمتی برای آن ایجاد نکند. در این آزمایش، برای اتصال کامل شتاب‌سنج به سازه به منظور بالا بردن سختی اتصال، از موم استفاده شده است.

همانطور که پیش از این نیز ذکر شد، اصول اجرایی تست مذکور، بر پایه حرکت چکش است. بر این مبنا، همانطور که می‌دانیم، برای اجرای آنالیز مودال یکی سازه، دو سناریو وجود دارد. در سناریوی اول، در کل مراحل تست مودال سازه، موقعیت تحریک‌کننده یا چکش ثابت بوده و شتاب‌سنج در هر بار تست، در نقاط مختلف علامت‌گذاری شده در سازه قرار گرفته و پاسخ آنها استخراج می‌شود.

اما در سناریوی دوم، به خاطر فراوانی تعداد نقاط اندازه‌گیری، جابجا کردن شتاب‌سنج‌ها وقت‌گیر است. در این حالت، موقعیت شتاب‌سنج در یک نقطه ثابت شده و توسط چکش، ضرباتی منظم در

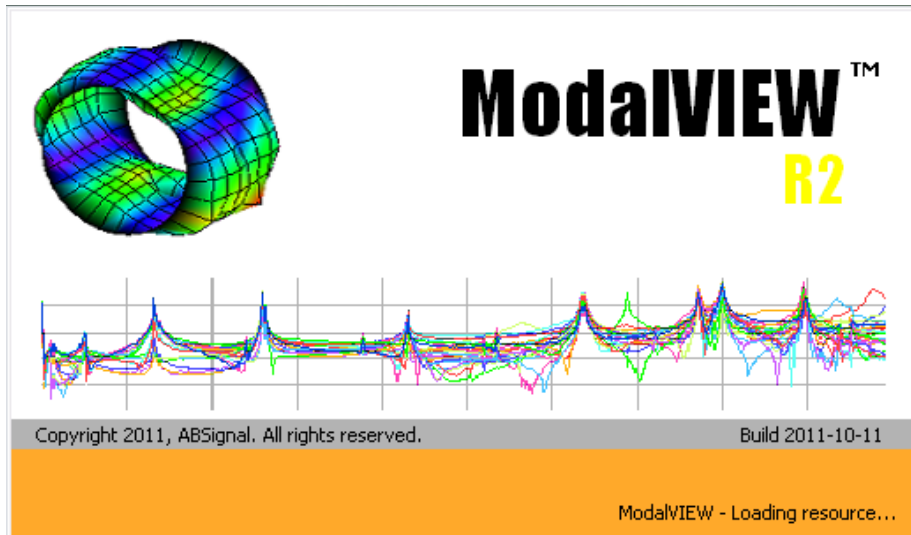
نقاط مطلوب و مشخص شده (از جمله نقاطی که شتاب سنج نصب شده) اعمال می‌گردد تا پاسخ تمام گره‌ها و شکل مدهای متناسب با این نقاط استخراج گردند. لازم به ذکر است، تست مودال به کمک چکش بهترین حالت برای کاهش اثر اضافه شدن جرم شتاب سنج و تحریک کننده به سازه می‌باشد. همچنین، با توجه به آنچه در مورد نوع سر چکش در بخش ۲-۲-۲- گفته شد، در این آزمایش، جنس سر چکش، از جنس پلاستیک سخت (medium tip) استفاده شده است. شکل (۵-۱۵) نمایی از سازه مذکور، شرایط تکیه گاهی آن، شتابسنج نصب شده بر روی آن و نقاط مشخص شده برای اعمال ضربه را نشان می‌دهد.



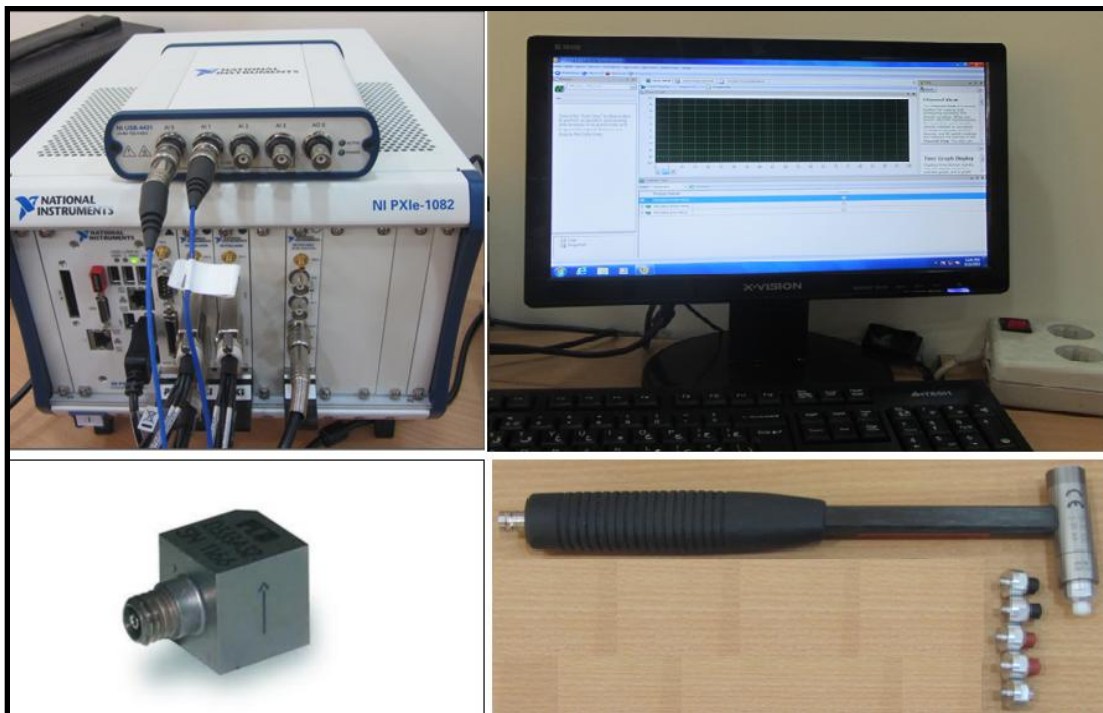
شکل (۵-۱۵) نمایی از سازه تحت آزمایش، شرایط تکیه‌گاهی آن، شتاب‌سنج نصب شده بر روی آن و نقاط مشخص شده برای اعمال ضربه.

در گام بعدی، مدل استوانه تقویت شده، معرفی و تنظیم پارامترهای آنالایزر، چکش و شتاب‌سنج در نرم‌افزار تست مودال پیاده‌سازی می‌شوند. اطلاعاتی که در طول اجرای آزمایش از وسایل اندازه‌گیری پاسخ و تحریک بدست می‌آیند، بوسیله دستگاه آنالایزر ثبت و مورد پردازش قرار می‌گیرند. در این

آزمایش، برای پردازش اطلاعات بدست آمده، از آنالایزر NI¹ و نرم افزار Modal View (شکل (۵-۱۶)) برای ارتباط با دستگاه، فیلتر کردن و پردازش داده‌ها استفاده شده است. شکل (۵-۱۷) نمایی از این آنالایزر را به همراه سایر تجهیزات نظیر شتاب‌سنج و چکش نشان می‌دهد.

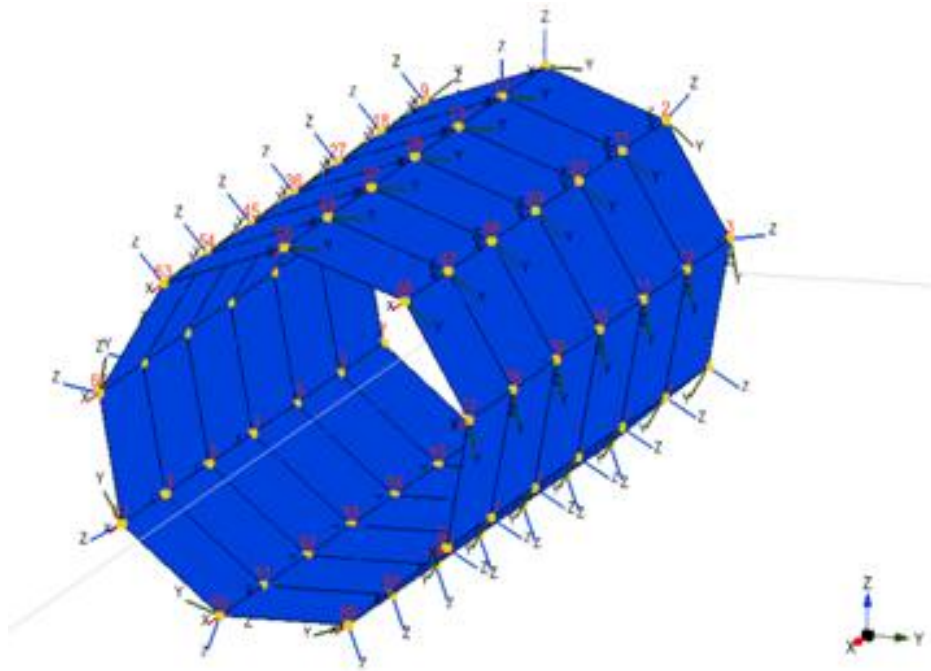


شکل (۵-۱۶) نمایی از نرم افزار Modal view.

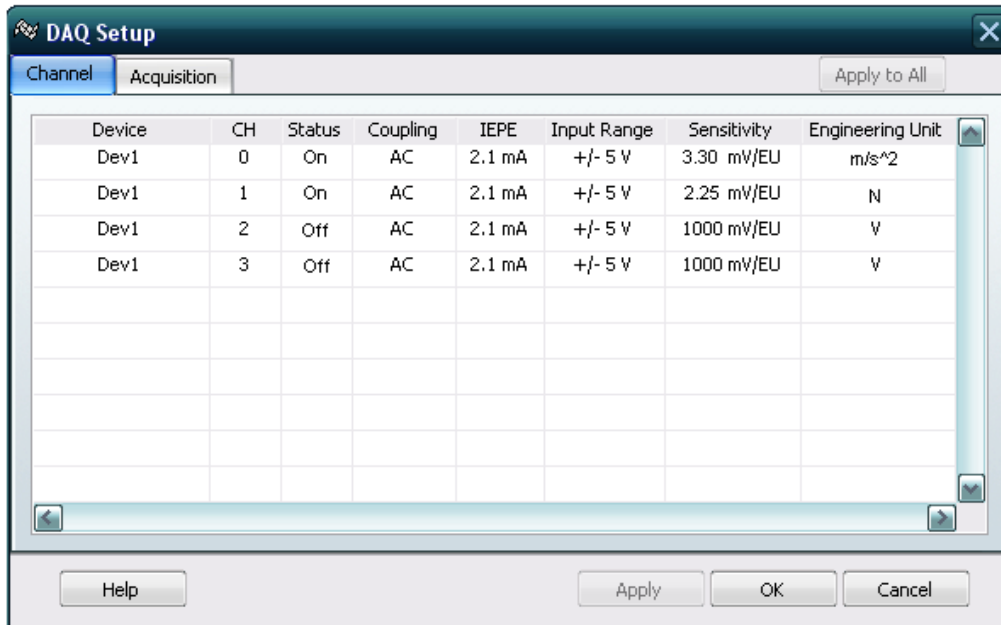


شکل (۵-۱۷) تجهیزات مورد استفاده برای تست.

برای مدل‌سازی سازه، در منوی Drawing 3D structure model از نرم‌افزار، نمای شماتیکی از یک استوانه با ۶۳ گره روی آن ایجاد شد و راستای محور Z در هر گره در جهت شعاعی قرار داده شد تا بتواند جهت ضربه و جابجایی‌هایی که شتاب‌سنج در راستای شعاعی اندازه می‌گیرد را (که در مدل اصلی در این راستا تعریف شده) در نرم‌افزار اعمال کند (شکل (۵-۱۸)).



شکل (۵-۱۸) نمای شماتیکی از سازه استوانه‌ای تقویت شده مشبک، مدل شده در نرم‌افزار Modal view. سپس، برای معرفی پارمترهای سخت‌افزاری Set-Up آزمایش، به منوی Performance Measurement رفته و حساسیت و واحد پارامتر اندازه‌گیری شده توسط چکش و شتاب‌سنج، نوع تست که همان تحریک با جابجایی چکش^۱ است و ... در آن قسمت وارد می‌شود (شکل (۵-۱۹)).



شکل (۱۹-۵) نمایشی از پنجره مربوط به تنظیمات پارامترهای تجهیزات تست در نرم‌افزار Modal view.

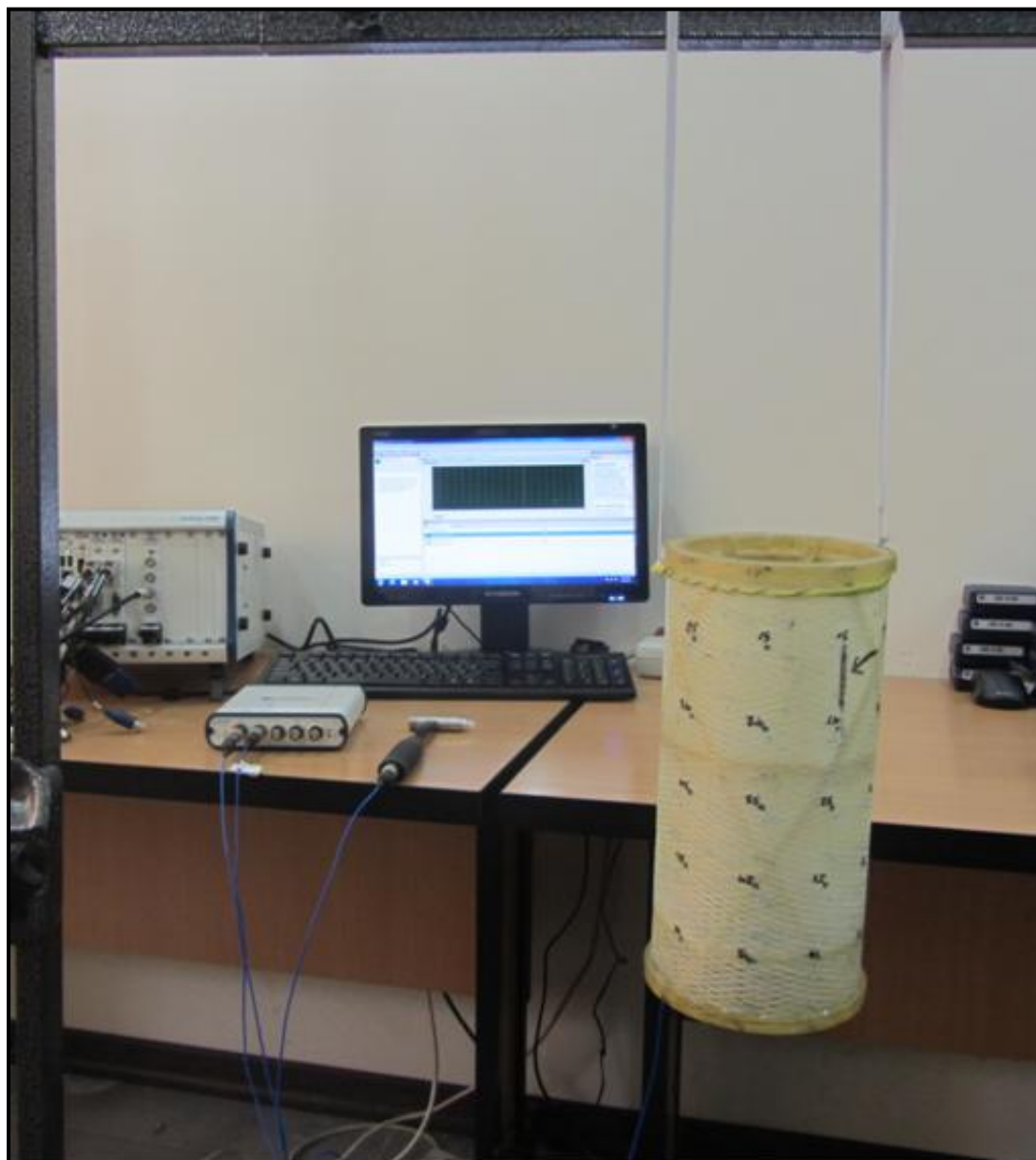
در هر یک از گره‌های مشخص شده روی سازه، ۵ ضربه با استفاده از چکش اعمال می‌شود. دلیل این امر آن است که نرم افزار بتواند از این ضربات، یک مقدار متوسط در نظر گرفته تا سیگنال اعمالی، یکنواخت‌تر شده و خطای کمتری داشته باشد. این تعداد متوسط‌گیری نیز در نرم افزار وارد شده و روش میانگین مربعات (RMS)^۱ برای متوسط‌گیری انتخاب شده است.

در پایان، با توجه به موارد، نکات عملی و محدودیت‌های مذکور در انتخاب تجهیزات تست، جزئیات مربوط به تجهیزات مورد استفاده در آزمایش مودال سازه مورد نظر، در جدول (۱-۵) شرح داده شده است. همچنین، کلیه تجهیزات در حالت آماده برای آزمایش، در شکل (۲۰-۵) نشان داده شده است. اکنون همه شرایط برای شروع آزمایش مودال سازه سالم آماده است.

¹ Root means-square

جدول (۵-۱) مشخصات تجهیزات استفاده شده برای تست مودال پوسته کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی.

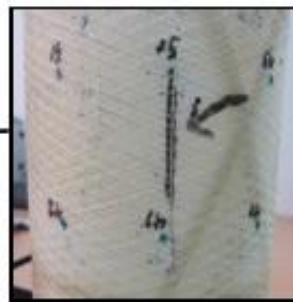
نوع وسیله	مشخصات
PCB hammer	Sensitivity: 2.25 mV/N Mass of head: 6.6 gr Tip: hard plastic
PCB accelerometers	Number: 1 Sensitivity: 3.30 mV/N Mass: 4.5 gr
National Instruments analyser	USB4431&5-channel 24-bit A/D



شکل (۵-۲۰) نمایی از Set-Up آزمایش.

۵-۳-۲- ایجاد عیب در سازه

در این آزمایش، به منظور ایجاد عیب در سازه، از روش اره کاری استفاده شده، به این ترتیب که همانند محیط المان محدود، عیبی مانند یک ترک عمودی در نزدیک لبه بالایی استوانه و مابین گره های ۴۱ و ۵۰ به طول ترک ۴ سانتیمتر ایجاد گردید. شکل (۵-۲۱) موقعیت عیب در سازه معیوب را نشان می‌دهد. پس از اجرای آزمایش مودال سازه سالم و استخراج پارمترهای مورد نیاز آن، عیب مذکور در سازه ایجاد شده و تمام مراحل مذکور برای سازه معیوب نیز به دقت اجرا می‌شود.



شکل (۵-۲۱) موقعیت عیب ایجاد شده در سازه مورد آزمایش.

۵-۳-۳- نتایج حاصل از تست مودال نمونه مورد آزمایش

هنگامی که سازه‌ای تحریک می‌شود، معادله حرکت سیستم منجر به بروز پاسخ فرکانسی آن می‌شود. پاسخ فرکانسی یک کمیت مختلط است و به شکل‌های مختلفی از جمله نسبت جابجایی پاسخ به نیروی تحریک، نسبت سرعت پاسخ به نیروی تحریک و نسبت شتاب پاسخ به نیروی تحریک تعریف می‌شود که معمولترین حالت آن، همان نسبت شتاب پاسخ به نیروی تحریک است و در رابطه (۵-۱) نشان داده شده است [۹].

$$H_{jk} = \frac{\ddot{x}}{F_k} = \sum_{r=1}^N \frac{A_{jk}^r}{\lambda_r^2 - \omega^2} \quad (۵-۱)$$

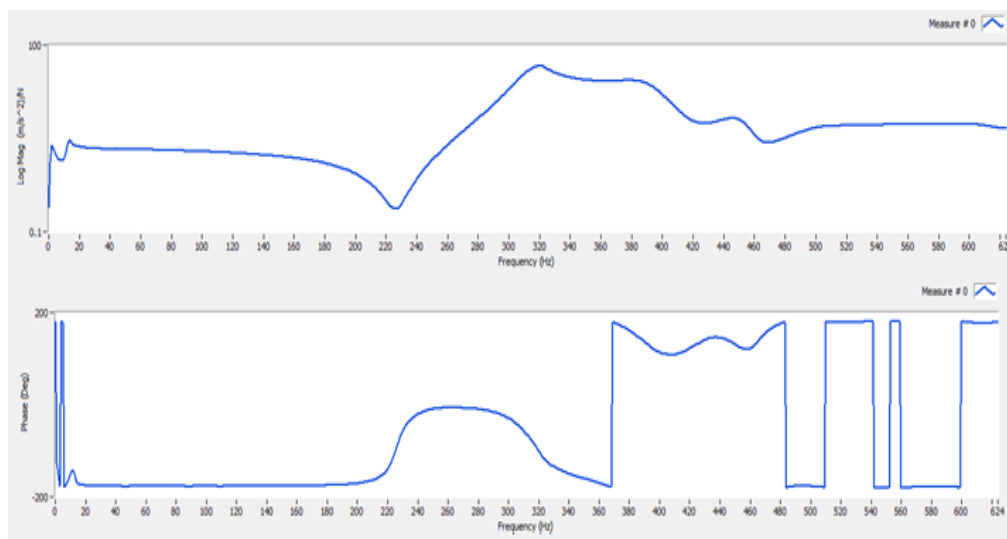
λ_r^2 مقدار ویژه مد r ام، A_{jk}^r (ثابت مودال) از بردار شکل مد $\{\phi\}_r$ بدست می‌آید و ϕ_{jr} نیز جابجایی نسبی گره j ام در مد r ام است. N نیز تعداد درجات آزادی سیستم یا تعداد مدهای آن می‌باشد. این رابطه، اساس آنالیز مودال را تشکیل می‌دهد. با تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده از تست مودال، می‌بایست به دنبال مدل تئوری گشت که بیشترین شباهت را به مدل واقعی نمونه آزمایش شده داشته باشد. برای این منظور، پارامترهای مودال سازه می‌بایست انتخاب شوند که این کار، اساس کار تحلیل را شامل می‌شود. با انجام تست، بدست آوردن داده‌های اندازه‌گیری شده و عبور دادن بهترین منحنی از بین این داده‌ها به روش برازش منحنی^۱، می‌توان منحنی پاسخ فرکانسی مطلوب مشابه با رابطه (۵-۱) را برای سازه تحت تست استخراج کرده و بوسیله آن، پارامترهای مودال مناسب سازه را بدست آورد. منحنی‌های FRF هر یک شامل دو بخش اندازه^۲ و فاز^۳ شتاب اندازه‌گیری هستند که نمونه‌ای از آن که از آزمایش سازه مورد نظر بدست آمده، در شکل (۵-۲۲) نشان داده شده است.

1 Curve Fitting

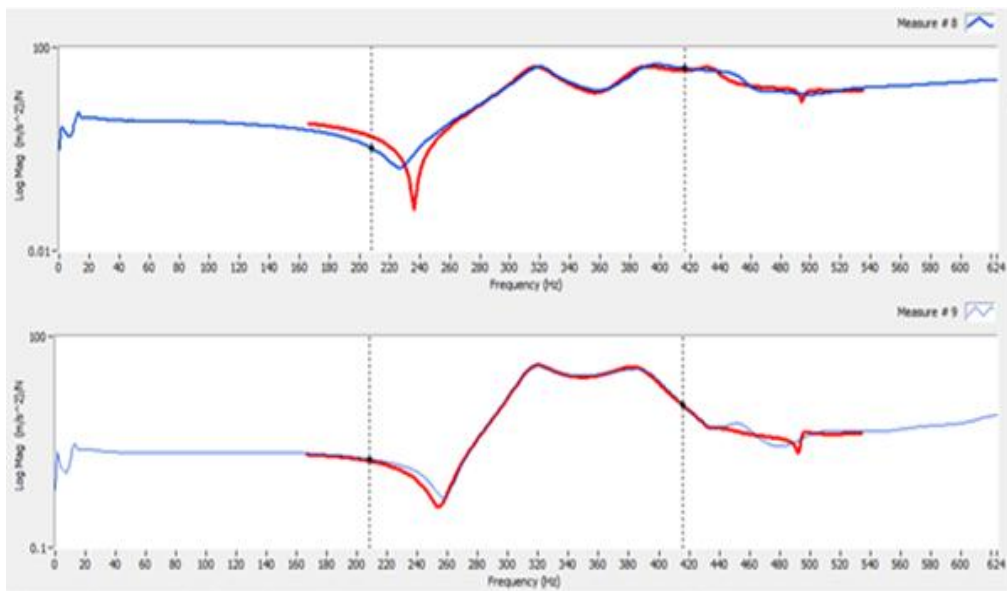
2 Amplitude

3 Phase

همچنین، نمونه‌ای از منحنی‌های FRF اندازه‌گیری شده در برخی از نقاط پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک و منحنی برازش شده را می‌توان در شکل (۵-۲۳) مشاهده کرد. در این شکل، منحنی نازک نشان داده شده با رنگ آبی، منحنی بدست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده بوده که با عبور بهترین منحنی از آن به روش Curve Fitting در بازه فرکانسی مشخص شده، منحنی FRF مربوط به آن بدست می‌آید.



شکل (۵-۲۲) الف) اندازه و ب) فاز پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده از تست یک نقطه نمونه از سازه.



شکل (۵-۲۳) نمونه‌هایی از منحنی‌های FRF بدست آمده از تست (رنگ آبی) و منحنی FRF برازش شده برای استخراج پارامترهای مودال سازه (رنگ قرمز).

۵-۳-۴- بررسی صحت نتایج حاصل از تست مودال نمونه مورد آزمایش

(۱) خاصیت خطی بودن سازه

همانطور که در بخش ۲-۳ نیز ذکر شد، قبل از انجام هرگونه پردازشی بر روی داده‌های بدست آمده از تست مودال سازه، می‌بایست به شکل‌های مختلفی که صحبت شد، از صحت نتایج اطمینان حاصل کرد. یکی از فرضیات مورد بررسی، فرض خطی بودن سیستم بود؛ برای اینکه بتوان سیستم را خطی فرض کرد، لازم است این موضوع بررسی شود که آیا با تغییر نیرو، پاسخ نیز طوری تغییر می‌کند که نسبت پاسخ به نیرو همواره خطی باشد. این موضوع به این معناست که FRFهای یک سیستم کاملاً خطی، نباید به سطح تحریک بستگی داشته باشند. برای بررسی خاصیت خطی بودن سازه، ضربات مختلفی در نقاط مشخص شده به آن زده شد. در هر مرحله، شدت ضربات وارده را افزایش داده و مشاهده شد که پاسخ نیز طوری افزایش می‌یابد که نسبت پاسخ به نیرو همواره عددی ثابت است.

(۲) بررسی تشابه نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود و تجربی

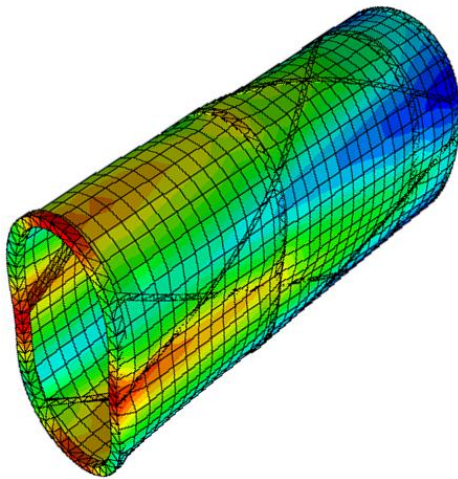
گام دیگر در جهت اطمینان از صحت نتایج، خاصیت تشابه چشمی شکل مدهای بدست آمده از تست مدل تجربی و عددی و تشابه میزان فرکانس‌های طبیعی مدهای بدست آمده از آن دو است. پس از تحلیل نمودارهای FRF بدست آمده از تست، به کمک روش برازش منحنی و بکارگیری یک تابع چند جمله‌ای مرتبه ۴ در بازه ۲۰۰ تا ۵۵۰ هرتز، منحنی‌های FRF طوری به داده‌های پاسخ فرکانسی حاصل از تست برازش شدند که حداقل خطا بین آنها وجود داشته باشد. با انجام این کار، مشاهده شد، تنها ۴ مد سازه در اثر تحریک، بدست آمده که با بدست آمدن منحنی FRF برازش شده، خواص مودال مربوط به این ۴ مد بدست آمد. جدول (۵-۲) خواص مودال مربوط به هر دو سازه سالم و معیوب را در محیط FEM^۱ و EMA^۱ نشان می‌دهد. همچنین، چهار شکل مد اول حاصل از

¹ Finite Element Method

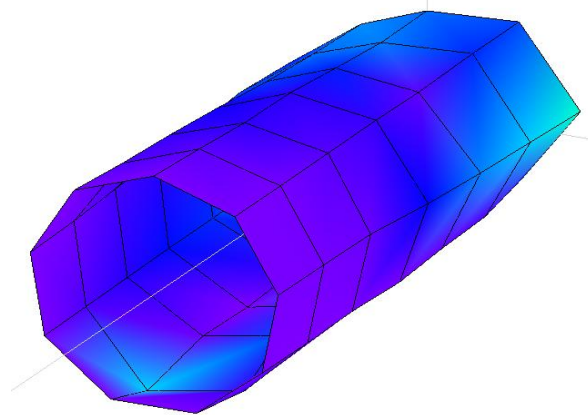
تست، به همراه شکل مدهای متناظر بدست آمده در محیط نرم افزار ABAQUS در اشکال (۲۴-۵) تا (۲۷-۵) به تصویر کشیده شده است. همانطور که از جدول (۲-۵) و اشکال (۲۴-۵) تا (۲۷-۵) مشاهده می شود، می توان به وجود تشابه بین نتایج بدست آمده از FEM و EMA دست یافت.

جدول (۲-۵) فرکانس های مستخرج از نتایج مدل سازی عددی و تجربی.

مد	سالم		معیوب
	FEM(Hz)	EMA(Hz)	EMA(Hz)
۱	319.74	316.00	316.83
۲	388.21	384.09	388.56
۳	419.54	418.88	444.67
۴	474.11	472.84	496.59

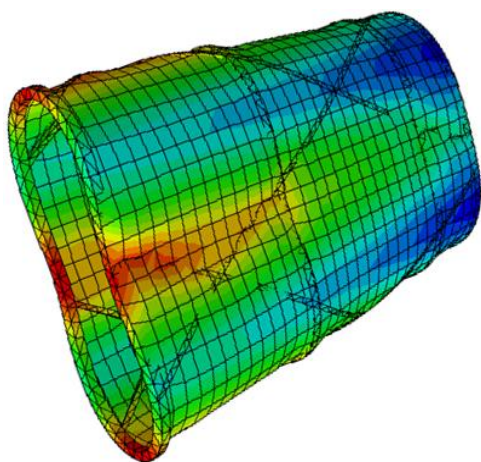


مد اول از FEM

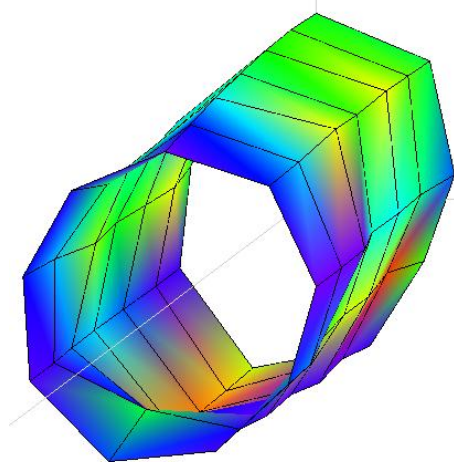


مد اول از EMA

شکل (۲۴-۵) تشابه مدهای اول بدست آمده از FEM و EMA.

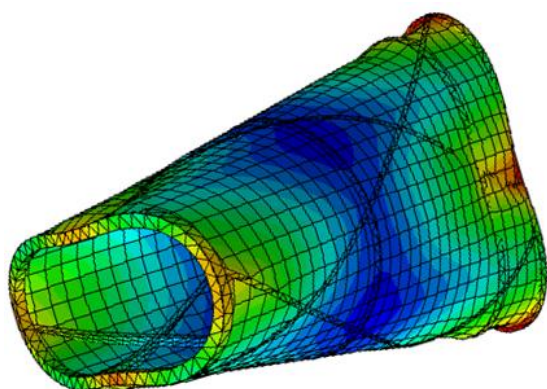


مد دوم از FEM

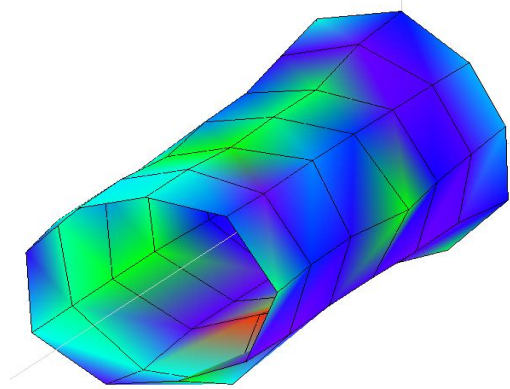


مد دوم از EMA

شکل (۲۵-۵) تشابه مدهای دوم بدست آمده از FEM و EMA.

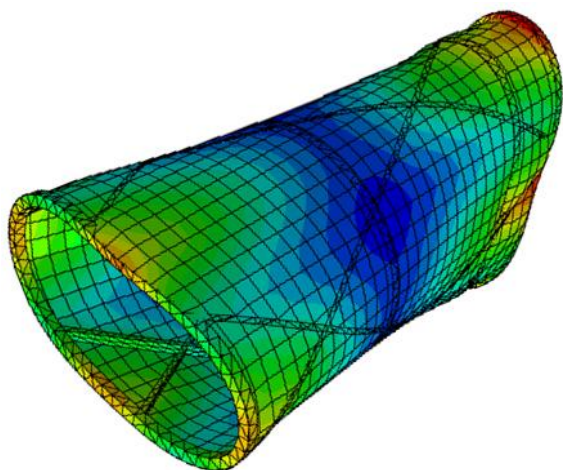


مد سوم از FEM

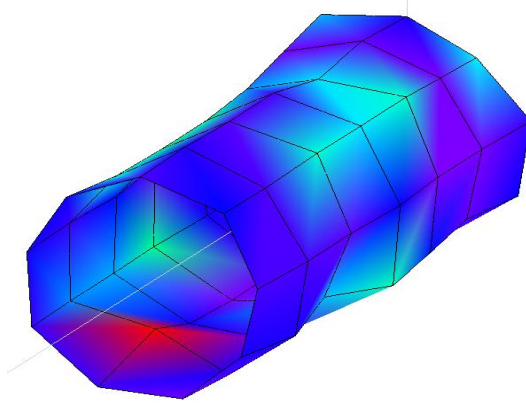


مد سوم از EMA

شکل (۲۶-۵) تشابه مدهای سوم بدست آمده از FEM و EMA.



مد چهارم از FEM

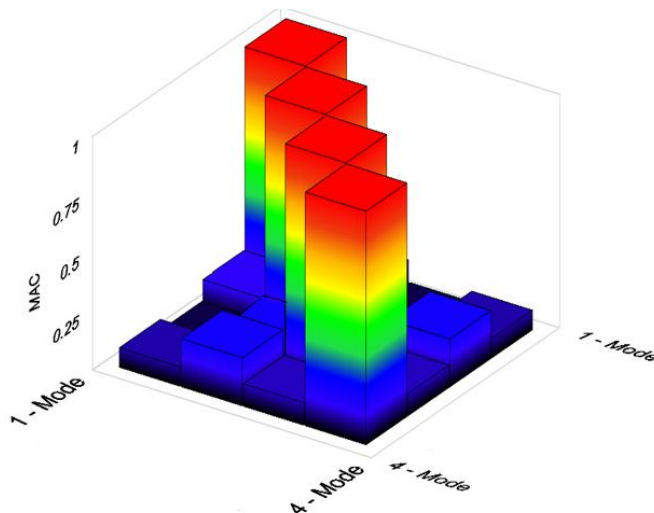


مد چهارم از EMA

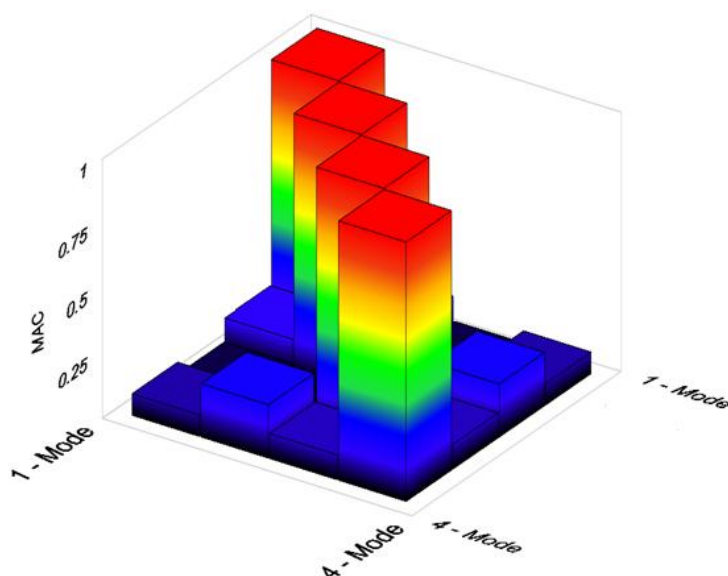
شکل (۲۷-۵) تشابه مدهای چهارم بدست آمده از FEM و EMA.

۳) ارزیابی نتایج با معیار MAC

روش مهم دیگری که از طریق آن می‌بایست صحت نتایج را بررسی کرد، معیار اطمینان مودال (MAC) است (این روش در بخش ۲-۴- توضیح داده شده است). به منظور بررسی نتایج به کمک این معیار، ماتریس MAC مربوط به نتایج بدست آمده از تست مودال پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی در هر دو حالت سالم و معیوب به کمک رابطه (۲-۳) بدست آمده و نتایج در نمودارهای (۵-۲۸) و (۵-۲۹) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ضرایب روی قطر اصلی، مربوط به محاسبه همبستگی هر مد با خودش است؛ از اینرو، طبیعی است که مقدار MAC محاسبه شده برای ضرایب روی قطر اصلی برابر با ۱ باشد. همچنین، برای اینکه نتایج دیگر نیز صحیح باشند، می‌بایست طبق گفته اوینز^۹ [۹] میزان همبستگی یا MAC هر مد با مد غیر همسان دیگر، یا عناصر غیر واقع بر قطر اصلی، کمتر از ۰/۲۵ باشد. از اینرو، همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود، شرایط اینگونه بوده و می‌توان گفت، مدهای بدست آمده از هر دو آزمایش سازه سالم و معیوب، معتبر هستند.



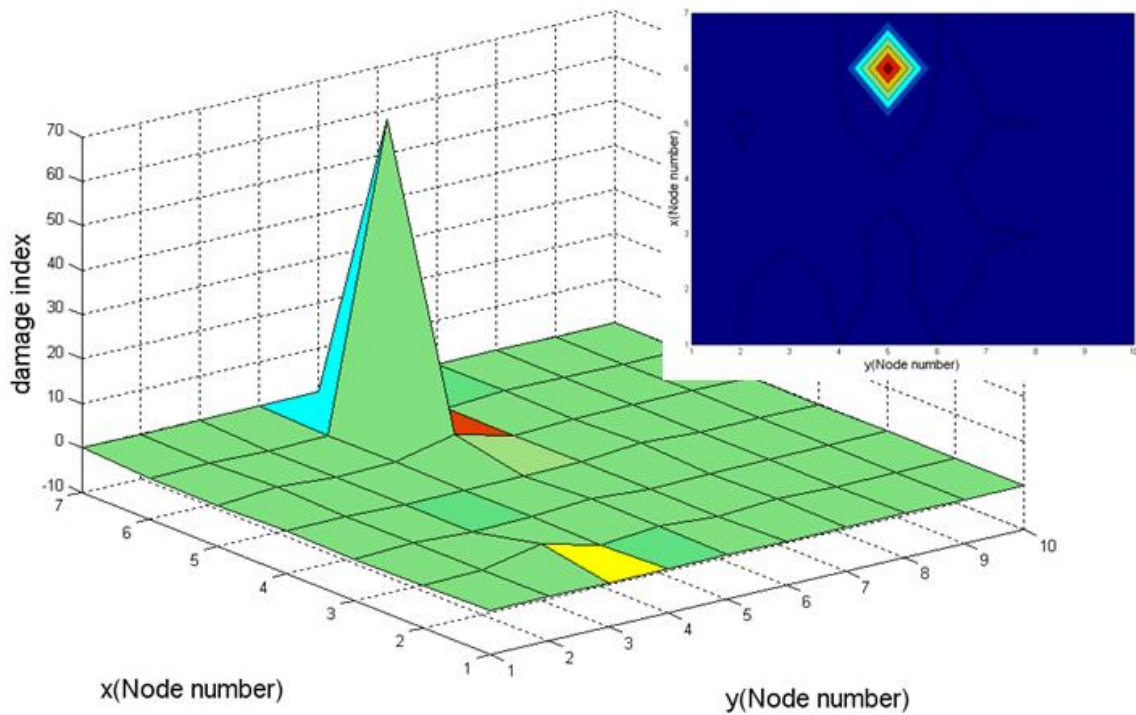
شکل (۵-۲۸) نمودار MAC بدست آمده از بررسی مدهای سازه سالم.



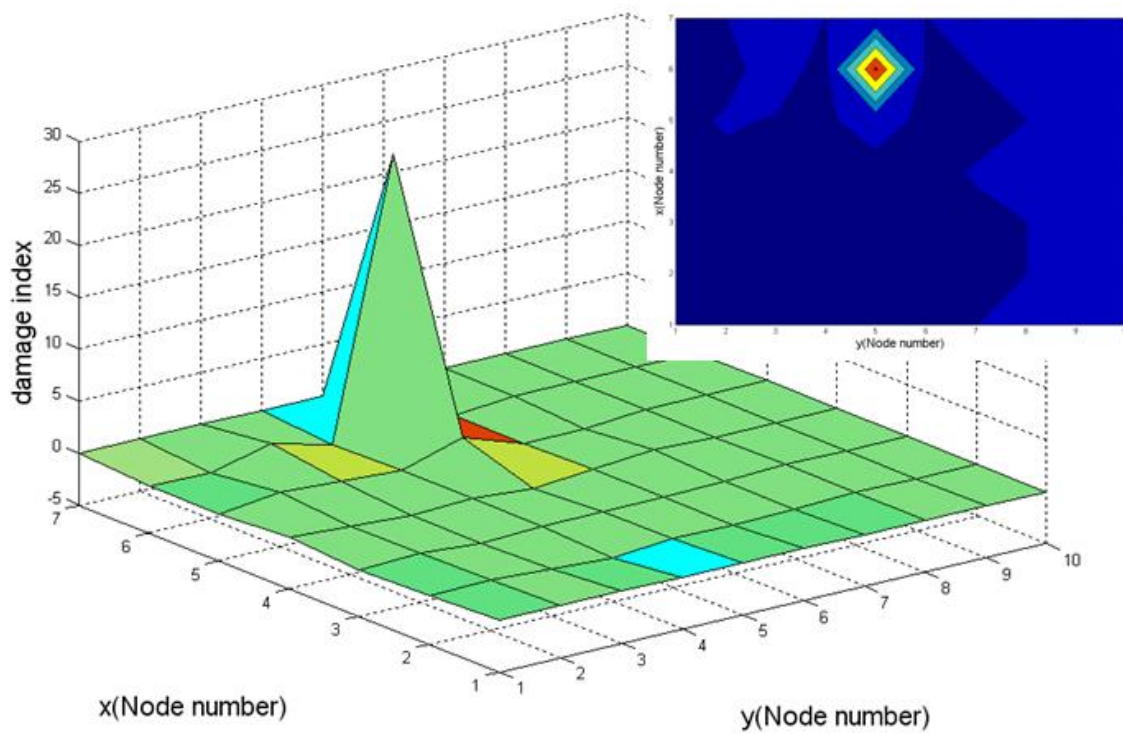
شکل (۵-۲۹) نمودار MAC بدست آمده از بررسی مدهای سازه معیوب.

۵-۳-۵- نتایج حاصل از روش انرژی کرنشی مودال بر روی مدل تجربی

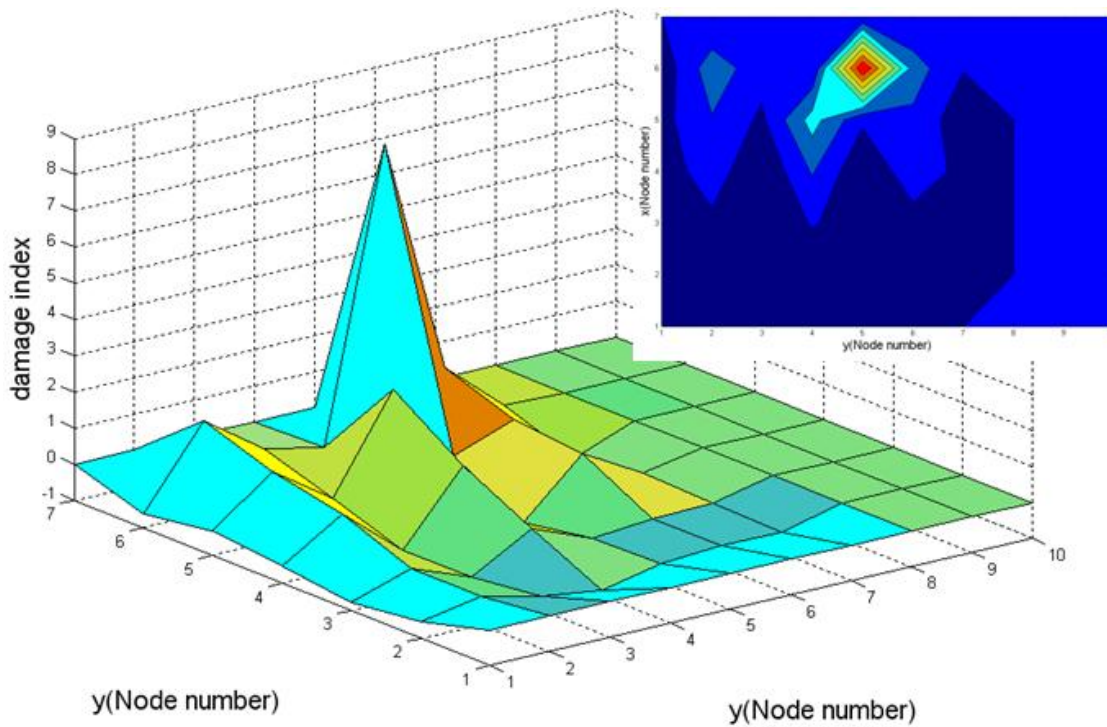
در مدل تجربی نیز همانند مدل عددی، پس از تست مودال سازه سالم و معیوب و استخراج شکل مدهای آنها، شاخص عیب انرژی کرنشی برای تمام ۶۳ المان تشکیل شده در آن بدست آمد. لازم به ذکر است توجه داشته باشید، از آنجا که در آنالیز مودال تجربی سازه مورد آزمایش، تنها ۴ مد آن استخراج شد، لذا، شاخص‌های عیب به ترتیب بر مبنای ۱، ۲، ۳ و ۴ مد اول سازه بدست آمده است. شکل‌های (۵-۳۰) تا (۵-۳۳) نمودارهای شاخص عیب را بر اساس تعداد مدهای مذکور نشان می‌دهد.



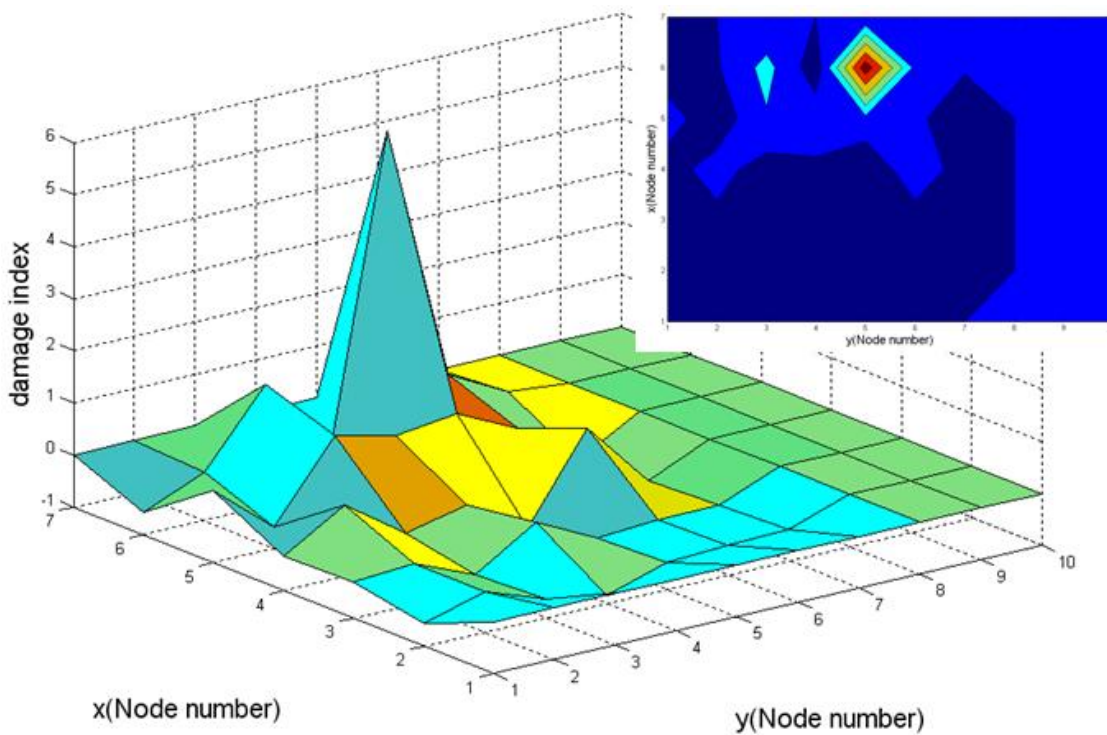
شکل (۵-۳۰) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مدل اول سازه (EMA).



شکل (۵-۳۱) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس مدل اول سازه (EMA).



شکل (۳۲-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۳ مد اول سازه (EMA).



شکل (۳۳-۵) شاخص عیب انرژی کرنشی بدست آمده بر اساس ۴ مد اول سازه (EMA).

نمودارهای سمت راست، موقعیت عیب را به شکل پیک، نشان داده و نمودارهای سمت چپ آن نیز موقعیت همین عیب را در کانتور عیب نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص عیب انرژی

کرنشی نیز توانسته است موقعیت عیب مذکور را در هر یک از چهار مرحله محاسبه آن بر اساس شکل مدهای بدست آمده، به درستی شناسایی کند. در برخی از نمودارها، برآمدگی‌هایی در بخش‌های دیگر آن وجود دارد که این امر به خاطر وجود نویز در داده‌های مودال بدست آمده از آزمایش است. به این ترتیب، می‌توان گفت روش شاخص عیب انرژی کرنشی در شناسایی عیوب موجود در پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک، روش مؤثری می‌باشد.

فصل ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضمن بررسی معادلات انرژی کرنشی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک شش ضلعی، شاخص عیب انرژی کرنشی مودال برای تشخیص موقعیت عیوب سطحی ایجاد شده روی پوسته بر اساس جابجایی شکل مدهای سازه سالم و معیوب مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام اول، برای ارزیابی معادلات بدست آمده، یک مدل المان محدود از سازه مذکور را در حالت سالم و معیوب توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی کرده و ضمن شبیه‌سازی آنالیز مودال سازه، شکل مدهای آن در ۸ مد استخراج و بر مبنای آنها شاخص عیب انرژی کرنشی بررسی شد.

• همانطور که از نتایج برآمد، این شاخص در تشخیص عیب ایجاد شده در محیط المان محدود که مش‌بندی ریز و همه شرایط تقریباً ایده‌آل است، موفق عمل کرده است.

اما، بررسی فوق به خاطر وجود شرایط ایده‌آل در مدل‌سازی سازه و کوچک بودن المان‌های آن و همچنین، نسبت استحکام به وزن بالای سازه، بررسی قابل اطمینانی در محیط المان محدود محسوب نمی‌شد. لذا، برای اطمینان از نتایج بدست آمده، سازه با همان شرایط مرزی، ابعادی و مواد بکار رفته در آزمایشگاه کامپوزیت با روش الیاف پیچشی ساخته شد. در ساخت این مدل سعی بر آن شد تا تمام شرایط فوق، منطبق با شرایط ایده‌آل المان محدود باشد. سپس، با انجام تست مودال سازه مذکور در دو حالت سالم و معیوب، جابجایی‌های مودال نقاط مشخص شده روی سازه استخراج شده و شاخص عیب انرژی کرنشی در حالت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که قبل از بررسی شاخص عیب، داده‌های بدست آمده از نظر خطی بودن، تشابه شکل مدها با شکل مدهای متناظر آن در محیط المان محدود و همبستگی شکل مدها (MAC) مورد صحت سنجی قرار گرفت که در این بررسی، کلیه موارد مذکور در حد قابل قبولی قرار داشتند.

- با پیاده سازی شاخص عیب انرژی کرنشی مودال بر اساس چهار مد مستخرج از تست، مشخص شد که این شاخص در حالت تجربی نیز در تشخیص عیب موفقیت آمیز بوده است.
- البته باید توجه داشت که با توجه به شرایط آزمایشگاهی و دقت تجهیزات تست، داده‌های بدست آمده، آمیخته با نویز بودند که وجود این نویزها در نمودارهای بدست آمده از شاخص عیب، به صورت پیک‌های موضعی در برخی نواحی کاملاً مشخص است.
- می‌توان گفت، یکی از دلایل موفقیت آمیز بودن این روش در شناسایی عیب سازه، وجود مشتقات مرتبه دوم جابجایی مودال در معادلات انرژی است که از این طریق، هرگونه تغییر در جابجایی‌های مودال ناشی از تغییر سختی سازه، قابل شناسایی هستند.

۶-۲- ارائه پیشنهادها

در انتها، با توجه به تجربیات بدست آمده در زمینه عیب‌یابی سازه‌ها، برای ارزیابی قدرت روش شاخص عیب انرژی کرنشی مودال و دیگر روش‌ها در زمینه عیب‌یابی سازه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت شده مشبک، لازم دیده می‌شود، پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه شود.

- بررسی روش عیب‌یابی انرژی کرنشی مودال سازه مذکور برای شناسایی چندین عیب در سازه.
- بررسی روش عیب‌یابی انرژی کرنشی مودال سازه مذکور برای شناسایی عیب‌هایی با اشکال گوناگون در سازه.
- ارزیابی روش عیب‌یابی انرژی کرنشی مودال سازه مذکور در حضور عیب(هایی) با شدت‌های مختلف.
- پیاده سازی روشهای دیگر عیب‌یابی مودال در شناسایی عیوب سازه مذکور.
- بررسی عیوب داخلی ایجاد شده در کامپوزیت با روش‌های دیگر
- ارزیابی توانایی شاخص عیب مذکور برای شناسایی عیوب در موقعیت‌های مختلف سازه.

- [1] Giurgiutiu, V. (2004) "Fundamental Studies in Embedded Ultrasonic NDE: Lamb Waves Interaction between Piezoelectric Wafer Active Sensors and Host Structure", Air Force Office of Scientific Research Contractors' Meeting on Structural Mechanics, Wintergreen, Virginia, 18-20, August 2004, CD-ROM
- [2] Hu H., Chengbo W., Wei-Jun L. (2011) "Damage detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index methods", Comput Struct., 89, pp 149-160.
- [3] Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. (1998) "A summary review of vibration-based damage identification methods", Shock Vib Digest., 30, 2, pp 91-105.
- [4] Mark J.S. (1997) "Health monitoring of composite material structures using a vibrometry technique", NASA-CR-205070. P.E.
- [5] Kess H.R., Sundararaman S., Shah C.D. (2007) "Identification of impact damage in S-2 glass composite missile casings using complementary vibration", Exp Mech., 47, pp 497-509
- [6] Rehfield L. W. (1999) "A brief history of analysis methodology for grid-stiffened geodesic composite structures", Proc. 44th International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, California.
- [7] composite.about.com/library/weekly/aa980525.htm
- [8] Gaetan K. and Jean C.G. "Experimental modal analysis".
- [9] Ewins D. J. (2000) "Modal Testing: Theory, Practice and Application", 2nd edition, Vol. 1, Research Studies Press LTD.
- [10] "Shaker Excitation Tutorial, Considerations and Problems", Structural Dynamics Research Laboratory, University of Cincinnati (2001).
- [11] Jimin H. and Zhi F. F. (2001) "Modal analysis", Butterworth-Heinemann.
- [12] West W. M. (1984) "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen", Proc. Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity., pp 1-6.

- [13]Fan W. and Qiao P.(2011)“Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study”, *Struct Health Monit.*, 10, pp83–111.
- [14]VasilievV.V., BaryninV.A., RazinA.F. (2012)“Anisogrid composite lattice structures–Development and aerospace applications”, *Compos Struct.*, 94, pp1117–1127.
- [15]Black S.(2002) “A Grid-Stiffened alternative to cored laminates”, *High-Perform Compos.*, March, pp48-51.
- [16]FluggeW.(1952) “Stress problem in pressurized cabi”, NACA, Technical note 2612.
- [17]Norris F. D., Charls L. and Ralph E. B.(1964)“Formolas for the elastic constants of plates with integral waffle-like stiffeninig” NACA report.
- [18]VasilievV.V., BaryninV. A., RazinA.F.(2001)“Anisogrid lattice structures-survey of development and application”, *Compos Struct.*, 54, pp361-370.
- [19]VasilievV.V., RazinA.F.(2006)“Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications”, *Compos Struct.*, 76, pp182–189.
- [20]Baruch M. and Singer J.(1963)“Effect of eccentricity of stiffeners on the general instability of stiffened cylindrical shells under hydrostatic pressure”, *J Mech Eng.*, 5, 1, pp23-27.
- [21]Rosen A., Singer J.(1974) “Vibration of axially loaded stiffened cylindrical shells”, *J Sound Vib.*, 34,3, pp 357-378.
- [22]Lee Y.S., Kim Y.W. (1998)“Vibration analysis of rotating composite cylindrical shells with orthogonal stiffeners”, *Comput Struct.*, 69, pp271-281.
- [23]Gunay E.(1999)“Finiteelement analysis of laminated stiffened cylindrical shallow shell”, *Appl ComposMater.*, 6, pp381–395.
- [24]Wang R.T., Lin Z.X.(2006)“Vibration analysis of ring-stiffened cross-ply laminated cylindrical shells”, *J Sound Vib.*, 295, pp964–987.
- [25]Zhao X., Liew K.M., NgT.Y.(2002)“Vibration of rotating cross-ply laminated circular composite cylindrical shells with Stringer and Ring stiffeners”, *Int JSolids Struct.*, 39, pp529-545.

- [26]Zou S., Huang Y., He Z., Xiang Y.(2007)“New matrix method for response analysis of circumferentially stiffened non-circular cylindrical shells under harmonic pressure”, *Appl Math Mech-Engl.*, 28, 10, pp1397–1405.
- [27]Najafizadeh M.M, Hasani A., Khazaeinejad P.(2009)“Mechanical stability of functionally graded stiffened cylindrical shells”, *Appl Math Model.*, 33, pp1151–1157.
- [28]Torkamani S., Navazi H.M., Jafari A.A., Bagheri M.(2009)“Structural similitude in free vibration of orthogonally stiffened cylindrical shells”, *ThinWall Struct.*, 47, pp1316–1330.
- [29]Malekzadeh K., Khalili S.M.R., Davar A., Mahajan P.(2010)“Transient dynamic response of clamped-free hybrid composite circular cylindrical shells”, *Appl Compos Mater.*, 17, pp243–257.
- [30]Hemmatnezhad M., Ansari R., Darvizeh M.(2010)“Prediction of vibrational behavior of composite cylindrical shells under various boundary conditions”, *Appl Compos Mater.*, 17, pp 225–241.
- [31]Jones R. M.(1967) “Buckling of circular cylindrical shells with multiple orthotropic layers and eccentric stiffeners”, *Aerospace Report*.
- [32]Kidane S., Li G., Helms J., Pang S., Woldesenbet E.(2003)“Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders”, *Compos Part B-Eng.*, 34, pp 1-9.
- [33]Andrianov I.V., Verbonol V.M., Awrejcewicz J.(2006)“Buckling analysis of discretely stringer-stiffened cylindrical shells”, *Int J Mech Sci.*, 48, pp1505–1515.
- [34]Zhang T., Gu W.(2012)“The Secondary buckling and design criterion of composite laminated cylindrical shells”, *Appl Compos Mater.*, 19,pp 203-217
- [35]Jingxuan H., Mingfa R., Shiyong S., Qizhong H., Xiannian S.(2011)“Failure prediction on advanced grid stiffened composite cylinder under axial compression”, *Compos Struct.*, 93, pp1939–1946.
- [36]Sadeghifar M., Bagheri M., Jafari A.A.(2011)“Buckling analysis of stringer-stiffened laminated cylindrical shells with nonuniform eccentricity”, *Arch Appl Mech.*, 81, pp875–886.

- [37]Morozov E.V., Lopatin A.V., Nesterov V.A.(2011)“Finiteelement modeling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells”, *Compos Struct.*, 93, pp308–323.
- [38]Totaro G. (2012)“Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells”, *Compos Struct.*, 94, pp446–452.
- [39]Ewins D.J. (1984) “Modal testing: theory and practice”, Wiley, New York.
- [40]PereraR., HuertaC., OrquJ.M.(2008)“Identification of damage in RC beams using indexes based on local modal stiffness”, *Constr Build Mater.*, pp1656–1667.
- [41]Fox C. H. J.(1992) “The location of defects in structures: a comparison of the use of natural frequency and mode shape data”, *Proc. 10th International Modal Analysis Conference.*, pp522–528.
- [42]Mayes R. L.(1992) “Error localization using mode shapes—anapplication to a two link robot arm”, *Proc. 10th International Modal Analysis Conference.*, pp886–891.
- [43]Yuen M. M. F.(1985) “A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever”, *J Sound Vib.*, 103, pp301–310.
- [44]Rizos P. F., AspragathosN., DimarogonasA. D.(1990) “Identification of crack location and magnitude in a cantileverfrom the vibration modes”, *J Sound Vib.*,138,3, pp381–388.
- [45]Osegueda R. A., DsouzaP. D., QiangY.(1992) “Damage evaluation of offshore structures using resonant frequencyshifts”, *ASME PVP239/MPC33*, pp31–37.
- [46]NdambiJ.M., VantommeJ., HarriK.(2002)“Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives”, *Eng Struct.*, 24, pp501–515.
- [47]ParlooE., GuillaumeP., OvermeireM. V.(2003)“Damage assessment using mode shape sensitivities”, *Mech Syst Signal Pr.*, 17,3, pp499–518.
- [48]PalaczM., KrawczukM.(2002)“Vibration parameters for damage detection in structure”, *J Sound Vib.*, 249, 5, pp999–1010.
- [49]Kam T. Y. and LeeT. Y.(1992) “Detection of cracks in structuresusing modal test data”,*Eng Fract Mech.*, 42, 2, pp381–387.

- [50]Kim J.H., JeonH. S., LeeC. W.(1992) “Application of the modal assurance criteria for detecting and locating structural faults”, Proc. 10th International Modal Analysis Conference., pp536–540.
- [51]Stubbs N., Kim J., Topole K.(1992)“An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms”, Proc. ASCE 10th Structures Congress.,pp543–546.
- [52]Farrar C. and Jauregui D.(1996)“Damage detection algorithms applied to experimental and numerical modal data from the I-40 bridge”, Las Alamos National Laboratory., LA-13074-MS.
- [53]Park S., Kim B. Y., Stubbs N.(2002)“Nondestructive damage detection in large structures via vibration monitoring, Electron”, J struct eng., 2,pp59–75.
- [54]Kim J., Ryu Y., Chp H., Stubbs N.(2003)“Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method”, Eng struct., 25, pp57–67.
- [55]Nandwana B., Maiti S.(1997)“Detection of the location and size of a crack in stepped cantilever beams based on measurements of natural frequencies”, J Sound Vib., 203, pp435–46.
- [56]Lele S., Maiti S.(2002) “Modeling of transverse vibration of short beams for crack detection and measurement of crack extension”, J Sound Vib., 257, pp559–83.
- [57]Maiti S., Patil D.(2004)“A method of analysis for detection of multiple cracks in beams based on vibration”, Adv Vib Eng., 3, pp348–69.
- [58]Patil D., Maiti S.(2005) “Experimental verification of a method of detection of multiple cracks in beams based on frequency measurements”, J Sound Vib., 281, pp439–51.
- [59]Nahvi H., Jabbari M.(2005)“Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model”, Int J Mech Sci., 47, pp1477–97.
- [60]Khaji N., Shafiei M., Jalalpour M.(2009)“Closed-form solutions for crack detection problem of Timoshenko beams with various boundary conditions”, Int J Mech Sci., 51, pp667–81.

- [61]Cornwell P.J., Doebling S.W., Farrar C. R.(1997)“Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures”, Proc. 15th International Modal Analysis Conference., pp1312–1318.
- [62]Cornwell P. J., Doebling S. W., and Farrar C.R.(1999)“Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures”, J Sound Vib., 224,2, pp359–374.
- [63]Choi S., Park P.,Yoon S., Stubbs N.(2005)“Nondestructive damage identification in plate structures using changes in modal compliance”, NDT&E Int.,38, pp529–540.
- [64]Hu H., Wang B., Su J.(2004) “Application of modal analysis to damage detection in composite laminates”, 7th ASME conference on engineering system design and analysis, no.58296.
- [65]Kim J., Park J., Lee B.(2007)“Vibration-based damage monitoring in model plategirder bridges under uncertain temperature conditions”, Eng Struct., 29, pp1354–65.
- [66]Hu S.L.J., Wang S.Q., Li H.J.(2006)“Cross-modal strain energy method for estimating damageseverity”, J Eng Mech-ASCE.,132, pp429-437.
- [67]Hu T.Y., Loh C.H.(2008)“Damage diagnosis of frame structures using modified modal strain energy change method”, J Eng Mech-ASCE., 134, pp1000-1012.
- [68]Shi Z.Y., Law S.S., Zhang L.M.(2002)“Improved damage quantification from elemental modal strain energy change”, J Eng Mech-ASCE., 128, pp521–529.
- [69]Li H.J., Yang H.Z., Hu S.J.(2006)“Modal strain energy decomposition method for damage localization in 3D frame structures”, J Eng Mech-ASCE., 132, pp941–951.
- [70]Guan H., Karbhari V.M.(2008)“Improved damage detection method based on element modal strain damage index using sparse measurement”, J Sound Vib., 309, pp465–494.
- [71]Srinivasan M.G. and Kot C.A.(1992)“Effects of damage on the modal parameters of a cylindrical shell”, Proc. 10th International Modal Analysis Conference., pp529–535.

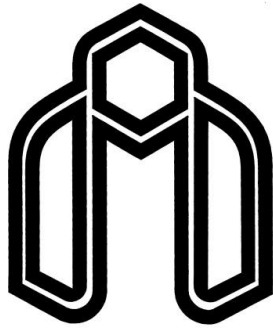
- [72]Kim H. I., Ping C.T.(2002) "Locating damage in circular cylindrical composite shells based on frequency sensitivities and mode shapes", *Eur J MechA-Solids*, 21, pp615–628.
- [73]Hu H., Wang B., Lee C., Su J.(2006)"Damage detection of surface cracks in composite laminates using modal analysis and strain energy method", *Compos Struct.*, 74, pp399–405.
- [74]Hu H., Wu C.(2009) "Development of scanning damage index for the damage detection of plate structures using modal strain energy method", *MechSyst Signal Pr.*, 23, pp274–287.
- [75]BayissaW.L., HaritosN.(2007)"Structural damage identification in plates using spectral strain energy analysis", *J Sound Vib.*, 307, pp226–249.
- [76]ChoiS., StubbsN.(2004)"Damage identification in structures using the time-domain response", *J Sound Vib.*, 275, pp577–590.
- [77]Xiang J., Wang Y., Jiang Z., Matsumoto T.(2011)"A hybrid of interval wavelets and wavelet finite element model for damage detection in structures", *CMES- Comp Model Eng.*, 81, pp269–94.
- [78]Gibson, Ronald F. (1994), "Principles of Composite Material Mechanics", McGraw-Hill, Inc.
- [79]Pandey A.K., Biswas M., Samman M.M. (1991)"Damage detection from changes in curvature mode shapes", *J Sound Vib.*, 145, pp321–32.
- [80]Bellman R.E, Kashef B.G, Casti J.(1972)"Differential quadrature: a technique for the rapid solution of nonlinear partial differential equation", *J Comput Phys.*, 10, pp40–52.
- [۸۱] یزدانی م، (۱۳۸۸)، رساله دکتری: "آنالیز تحلیلی و تجربی مقاومت کمانشی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری"، دانشکده فنی مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.

Abstract

Being able to monitoring structural health and identifying damage at least time is important problem for the engineers especially in mechanics and aerospace.

Here, one of the attractive methods for structural health monitoring is strain energy damage index method based on the frequent vibration properties of structures. This method is based on the fact that modal parameters of structure (such as frequency, mode shape and modal damping) are function of its physical properties (such as mass, stiffness and damping). The properties Changed are caused that the strain energy of structures changes. Hence, it can be used strain energy of damaged and undamaged structures for identifying fault position.

Aim of present research is damage detection of grid stiffened composite cylindrical shells using strain energy method. First, a brief introduction of composite structures with grid stiffeners, their advantages and applications than other structures is discussed. Then, some of the common defects in these structures are discussed. In the following, an overview of the modal analysis of structures, fault detection using modal analysis and history of works done, are explained. So, the needed equations for the modal strain energy of hexagonal grid stiffened composite cylindrical shells and the strain energy damage index are extracted and used to identify damage in numerical and experimental methods. The results of damage index on the finite element and experimental models demonstrate that, despite the noise generated by the test, it can identify cracks successfully.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Damage detection of grid stiffened composite cylindrical shells using strain energy method (SEM)

*A Thesis Presented for the Degree of
Master of Science (M.Sc) in Mechatronic department*

By:

Mohsen Tajik

Supervisors:

Dr. A. Jalali

Dr. M. Ghanad

September 2013