

بررسی حساسیت روش‌های عیب‌یابی بر پایه شکل مود به شدت آسیب

علی حسن‌زاده^۱، جعفر اسکندری‌جم^{۲*}، سعید شکرالهی^۳

* نویسنده مسئول: eskandari@mut.ac.ir

واژه‌های کلیدی

آنالیز مودال، عیب‌یابی، پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی.

چکیده

اهمیت داشتن توانایی برای نظارت بر سلامت سازه و شناسایی آسیب در سریع‌ترین زمان ممکن، یکی از مهمترین دغدغه‌های مهندسان به‌ویژه در رشته‌های مکانیک و هوافضا است. این اهمیت ناشی از آن است که آسیب و تخریب یک سازه در حین خدمت می‌تواند خسارات مالی و جانی بسیار شدید و بعضاً جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. یکی از روش‌های مورد توجه در این عرصه، روش عیب‌یابی با استفاده از تغییرات در خصوصیات ارتعاشی سازه است. هدف از تحقیق حاضر عیب‌یابی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی از طریق انجام آنالیز مودال تجربی و به کمک روش‌های عیب‌یابی بر پایه شکل مود و بررسی حساسیت آن‌ها در برابر شدت‌های مختلف آسیب است. نتایج حاصل بیانگر آن است که تکنیک‌های عیب‌یابی بر پایه شکل مود از آنجا که مستقیماً از داده‌های خام تست مودال استفاده نمی‌کنند، قابلیت اطمینان کمتری نسبت به تکنیک عیب‌یابی دیگر دارند و کارآمدی روش‌های ذکر شده شدیداً به دقت تست و داده‌های مودال استخراج شده وابسته است. به‌طور کلی اکثر روش‌های مورد استفاده به جز در مرحله اول آسیب یعنی حفره‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر، در دیگر مراحل قادر به تشخیص موقعیت آسیب هستند.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران.

۲- دانشیار، دانشکده مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران.

۳- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران.

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای در سازه‌های مهندسی از جمله لوله‌ها، مخازن تحت فشار، بدنه موشک‌ها و... استفاده‌های بسیاری دارند. یک سازه در طول عمر خدمتی خود، تحت نیروهای خارجی مانند فشار، نیروی محوری و نیروهای دینامیکی متفاوتی قرار می‌گیرد. این شرایط بارگذاری در صورت وجود ترک و عیوب کوچک در لایه‌های سازه به مرور باعث گسترش آن‌ها شده و سازه را دچار خطرات جدی و تخریب کامل می‌کند. بنابراین یکی از اصول مهم و اساسی نظارت بر سلامت سازه، یافتن عیوب قبل از گسترش در سازه است. روش‌های متداولی برای تست غیرمخرب سازه مانند تست آلتراسونیک، آکوستیک و رادیوگرافی وجود دارد. اما این روش‌ها مشکلاتی دارند. به‌عنوان مثال در این روش‌ها باید محدوده عیب مشخص باشد، عیب نباید بیش از اندازه زیرسطحی باشد و امکان دسترسی به تمام نقاط سازه در حال تست باید وجود داشته باشد. در این میان، روش‌های عیب‌یابی بر اساس خصوصیات ارتعاشی سازه، توانسته است تا حد بسیار خوبی مشکلات روش‌های دیگر را پوشش دهد. اولین تلاش‌ها در استفاده از فرکانس طبیعی برای مکان‌یابی عیب در سازه‌های کامپوزیت به کاولی و آدامز نسبت داده شده است. روش آن‌ها مبتنی بر این فرض است که نسبت تغییرات فرکانس در جفت مودها، معرف موقعیت آسیب هستند. آن‌ها در تحقیق‌شان از هر دو صفحه گرافیت اپوکسی و پنل لانه‌زنبوری بهره برده و همچنین چند نوع آسیب مانند چاله‌ها، برش اره‌ای، خردگی، گرمایش محلی و ضربه را با موفقیت مکان‌یابی و وسعت آسیب را مورد ارزیابی قرار دادند. این آزمایش از طریق مقایسه بین مقدار اندازه‌گیری شده و فرکانس پیش‌بینی شده در زمان تغییر حالت مود، صورت گرفت [۱].

ولف و ریچاردسون تغییر در خواص مودال را بعد از چند حالت مختلف عیب شبیه‌سازی شده بر روی ورق آلومینیوم با یک تقویت‌کننده مرکزی بررسی کردند. در حالت اول پیچی از مرکز صفحه جدا شد و در حالت دوم پیچ از انتهای صفحه جدا شد. در حالت اول، اثر عیب به‌خوبی در تغییر فرکانس‌های چند مود اول مشاهده شد در حالی که در حالت دوم این امر مشاهده نشد [۲].

کورنول و همکاران روش نسبت انرژی کرنشی مودال را برای عیب‌یابی، از سازه‌های تیر مانند یک بعدی، به سازه‌های ورق مانند دو بعدی ارتقا دادند. نتایج حاصل از استفاده این روش برای یک ورق که عیب در آن به صورت کاهش ۱۰٪ سفتی مدل شده و از چهارشکل مود استفاده کرده است، محل عیب را نشان می‌دهد [۳].

کیم و همکارانش به بررسی عیب‌یابی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی به کمک داده‌های خروجی از نرم‌افزار اجزای محدود و تکنیک تغییرات فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها پرداختند. موقعیت محوری عیب با مقایسه میزان اندازه‌گیری شده و تغییرات فرکانسی پیش‌بینی شده سازه تعیین شد. برای این منظور از اطلاعات به‌دست آمده از سازه به کمک معیار حساسیت فرکانسی استفاده شده است. مزیت این روش این است که مدل آسیب دیده پوسته مورد نیاز نیست، چون حساسیت‌های فرکانسی به راحتی از مدل اجزای محدود به‌دست می‌آیند. در این بررسی شرایط مرزی آزاد-آزاد را برای سازه در نظر گرفته بودند. نتایج بررسی‌ها در این تحقیق نشان داد که معیار مورد استفاده، به راحتی قادر به تشخیص عیوب پوسته، با شرایط تکیه‌گاه آزاد-آزاد می‌باشد [۴].

هو و همکارانش به بررسی روشی برای تشخیص وجود ترک در سطح یک صفحه کامپوزیتی پرداختند. جنس صفحه آن‌ها از کامپوزیت کربن-اپوکسی و با لایه‌چینی‌های [۰/۵]، [۰/۹۰] ساخته شده است. آن‌ها آسیب ترک را به کمک دستگاه برش لیزر بر روی سطح نمونه‌شان ایجاد کردند. سپس به کمک هر دو روش آنالیز تجربی و المان محدود شکل مودهای سازه را استخراج کردند و شکل مودهای به‌دست آمده را برای محاسبه انرژی کرنشی به روش DQM مورد استفاده قرار دادند. در نهایت آنها به کمک انرژی کرنشی سازه در حالت سالم و معیوب، موفق به ارائه تکنیکی شدند که توانست محل عیب را در سازه مورد نظرشان تشخیص دهد [۵].

یانگ و همکارانش به تعیین و تشخیص ترک سطحی در یک سازه‌ی کامپوزیتی به کمک انرژی کرنشی مودال پرداختند. برای این منظور از سه مدل با ساختارهای متفاوت که خصوصیات مکانیکی آنها نیز محاسبه شده بود، استفاده

به شدت آسیب، پرداخته شود. از این رو برای انجام این پژوهش، یک نمونه پوسته استوانه‌ای از جنس کامپوزیت شیشه/پوکسی به کمک روش رشته‌پیچی تهیه شد. سپس با انجام تست مودال تجربی و داده‌برداری از سازه سالم و معیوب، اطلاعات مودال استوانه در هر یک حالت‌های ذکر شده استخراج شد. لازم به ذکر است سطح آسیب طی سه مرحله و به کمک مته افزایش یافته و نتایج حاصل از تست نمونه سالم جهت ارزیابی و صحت‌گذاری با نتایج حاصله از نرم‌افزار ABAQUS مقایسه گردیده است. به کمک تکنیک‌های موجود برپایه شکل مود، داده‌های مودال استخراج شده از سازه سالم و معیوب مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج تشخیص آسیب این معادلات استخراج شده‌اند. در نهایت نیز به بررسی حساسیت هر یک از روش‌های مورد استفاده در مقابل شدت آسیب پرداخته خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در ادامه روش‌های مورد مطالعه شرح داده شده است.

۲-۱- روش انحنای شکل مود (MSC)

اولین بار این روش توسط پاندی و همکارانش ارائه شد، و در آن محل عیب توسط بیشینه تفاضل مطلق بین انحنای شکل مودهای حالت سالم و معیوب به صورت زیر به دست می‌آید [۹]:

$$\Delta \psi_{ij}'' = |\psi_{ij}''^* - \psi_{ij}''| \quad (1)$$

که اگر بیش از یک شکل مود استفاده شود، اندیس عیب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MSC_i = \sum_j \Delta \psi_{ij}'' \quad (2)$$

۲-۲- روش مجذور انحنای شکل مود (MSCS)

اولین بار این روش توسط هو و یوینز به صورت زیر ارائه شد [۷]:

$$\Delta \psi_{ij}''^2 = |\psi_{ij}''^2 - \psi_{ij}''|^2 \quad (3)$$

و اگر بیش از یک شکل مود استفاده شود، اندیس عیب به صورت زیر خواهد شد:

$$MSCS_i = \sum_j \Delta \psi_{ij}''^2 \quad (4)$$

کردند. آنها ترک سطحی بسیار کوچکی در نمونه‌های خود ایجاد نمودند که به دلیل کوچک بودن آن آسیب، اثری بر سختی قطعه نداشته است. پس از انجام تست مودال قبل و بعد از آسیب، اطلاعات جابه‌جایی سازه در این حالت‌ها به دست آورده شد و این جابه‌جایی در استخراج انرژی کرنش مودال نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت آنها به کمک انرژی کرنشی سازه در حالت سالم و معیوب، موفق به ارائه تکنیکی بر پایه انرژی کرنشی مودال شدند که به کمک آن محل ترک را در سازه به خوبی تشخیص دهد [۶].

هو و همکاران نسبت انرژی کرنشی مودال در حالت سالم و معیوب را برای استوانه معرفی کردند. آنها برای بررسی این روش از مدل اجزا محدود و تجربی یک استوانه استفاده کردند. مدل مورد استفاده استوانه آلومینیومی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۵ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر بود و عیب در سطح استوانه به ابعاد ۳۰×۱ میلی‌متر با ضخامت ۲/۵ میلیمتر ایجاد شد. در مدل تجربی، این استوانه برای شبیه‌سازی شرایط آزاد توسط چهار نخ آویزان شده بود. همچنین عیب در آن با ابعاد مشابه با حالت تئوری ایجاد شد. در به کارگیری این روش در مدل تجربی بر خلاف مدل اجزا محدود با افزایش تعداد مودها از شکل مود پنجم به بعد، این روش نمی‌تواند محل صحیح عیب را شناسایی کند [۷].

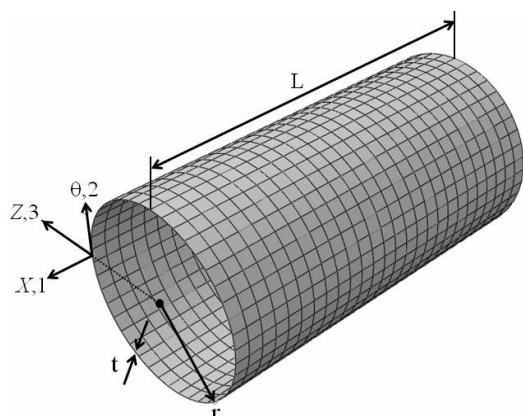
هوون و همکارانش در تحقیقی به بررسی و تشخیص آسیب ترک سطحی در یک پوسته استوانه‌ای پرداخته‌اند. آنها برای استخراج جابه‌جایی مودال سازه از تست مودال تجربی استفاده نموده‌اند و برای تمامی شکل مودهای اندازه‌گیری شده یک شاخص خصارت با استفاده از نسبت انرژی کرنش مودال استوانه قبل و بعد از آسیب، تعریف کردند. آن‌ها این شاخص را با حرکت دادن محل آسیب در موقعیت‌های مختلف سازه توسعه دادند [۸].

در مقاله حاضر که حاصل کار پژوهشی نویسنده در ارتباط با عیب‌یابی پوسته کامپوزیتی است؛ سعی شده به کمک معیار عیب‌یابی بر پایه شکل مود، به بررسی حساسیت آن تکنیک‌ها

۱- مقاله حاصل مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است که به راهنمایی آقای دکتر اسکندری‌جم و مشاوره آقای دکتر شکرالهی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام پذیرفته است.

جدول (۱) خصوصیات مکانیکی کامپوزیت^۲ مورد استفاده در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای.

خواص مکانیکی	شیشه	اپوکسی	شیشه/اپوکسی
E_1 (GPa)	۵۱/۷	۲/۷۴۴	۳۷/۰۲
E_2 (GPa)	۹/۴	۲/۷۴۴	۶/۵
E_3 (GPa)	۹/۴	۲/۷۴۴	۶/۵
G_{12} (GPa)	۳/۰۲	۱/۱۴۸	۲/۵۸
G_{13} (GPa)	۳/۰۲	۱/۱۴۸	۲/۵۸
G_{23} (GPa)	-	۱/۱۴۸	۲/۵
ν_{12}	۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۲۶
ν_{13}	۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۲۶
ν_{23}	-	۰/۳۵	۰/۳
ρ (kg/m ^۳)	۲۹۱۵	۱۲۰۰	۲۱۹۰/۵
ضخامت قطعه (mm)	-	-	۰/۷۳
کسر حجمی فیبر	-	-	۷۰٪



شکل (۱) مدل المان محدود پوسته استوانه‌ای.

جدول (۲) ابعاد هندسی پوسته‌های استوانه‌ای.

طول L (mm)	شعاع r (mm)	ضخامت t (mm)	L/r	r/t
۳۹۵	۱۰۵	۲/۹۲	۳/۸	۳۶

۳-۲- تحلیل اجزای محدود پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی

قبل از انجام آزمایش‌های تجربی برای صحت‌گذاری بر روند انجام آزمایش، پوسته استوانه‌ای در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل شده است. انتخاب تعداد المان‌ها براساس همگرایی مش‌بندی و در نظر گرفتن خطای کمتر از ۵٪ انتخاب شده و گره‌های هر المان دارای ۳ درجه آزادی جابه‌جایی و ۳ درجه آزادی دوران هستند. در جدول (۳) مشخصات کامل مدل اجزای محدود پوسته مورد نظر آورده شده است.

۳-۲- روش اندیس عیب (DI)^۱

روش اندیس عیب توسط کیم و استابس توسعه یافت و همچنان از تغییر در انحنا شکل مود استفاده می‌نماید. این اندیس به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$\beta_{ij} = \frac{\left(\int_a^b [\psi_j^{**}(x)]^2 dx + \int_0^L [\psi_j^{**}(x)]^2 dx \right) \int_0^L [\psi_j^{**}(x)]^2 dx}{\left(\int_a^b [\psi_j^{**}(x)]^2 dx + \int_0^L [\psi_j^{**}(x)]^2 dx \right) \int_0^L [\psi_j^{**}(x)]^2 dx} \quad (5)$$

که a و b حدود المان j ام از نمونه است که عیب در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و L طول کل نمونه مورد بررسی است. به منظور استفاده از این روش می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\beta_{ij} = \frac{(\psi_j^{**2} + \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{**2}) \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{**2}}{(\psi_j^{**2} + \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{**2}) \sum_{i=1}^N \psi_{ij}^{**2}} \quad (6)$$

و اگر بیش از یک شکل مود استفاده شود، اندیس عیب به صورت زیر خواهد شد:

$$DI_i = \sum_j \beta_{ij} \quad (7)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات مواد و هندسه نمونه

جنس کامپوزیت مورد استفاده در پوسته‌ی مدور استوانه‌ای، از الیاف شیشه به همراه رزین اپوکسی است، که مشخصات مکانیکی این مواد در جدول (۱) آورده شده است. مدل هندسی اجزا محدود این پوسته به همراه ابعاد هندسی آن نیز در شکل (۱) و جدول (۲) نشان داده شده است. در این هندسه مختصات (Z, θ, X) به ترتیب مختصات در جهت‌های محوری، محیطی و شعاعی هستند. جهات لایه‌چینی کامپوزیت در مدل به صورت ۱، ۲، ۳ نام‌گذاری شده، که ۱ جهت محوری (X) ، ۲ جهت پیرامونی (θ) و ۳ جهت شعاعی (Z) نامیده می‌شوند. لایه‌گذاری پوسته به صورت ۴ لایه $\pm 45^\circ$ و با درصد الیاف ۷۰٪ انجام پذیرفته، که مشخصات مکانیکی کامپوزیت نهایی نیز در جدول (۱) بیان شده است.

۳-۴- فرایند انجام تست مودال

برای انجام تست آنالیز مودال نمونه موردی، روش‌های تست مختلفی بررسی و امتحان شد که در نهایت روش MRIT^۱ انتخاب، و از ابزار چکش و سیگنال ضربه‌ای اعمالی توسط آن، استفاده شد. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر این است که با استفاده از چند ورودی/چند خروجی^۲ برای انجام تست، در سازه‌هایی که مودهای نزدیک به هم و یا مودهای تکراری جفت دارند، می‌تواند بهترین نتایج را در فاز تعیین مشخصات مودال ارائه کند.

اصول اجرایی تست مذکور بر پایه روش تست با حرکت چکش^۳ صورت پذیرفته است. در این نحوه تست یک یا چند شتاب‌سنج در نقاطی خاص از سازه ثابت شده‌اند و به‌طور منظم در نقاط مطلوب و مشخص شده روی سازه (از جمله نقاطی که شتاب‌سنج در آن‌ها نصب است) ضرباتی توسط چکش اعمال شود تا شکل مودهای متناسب با این نقاط حاصل شوند. لازم به ذکر است، تست مودال به کمک چکش بهترین حالت برای کاهش اثر اضافه شدن جرم شتاب‌سنج به سازه است.

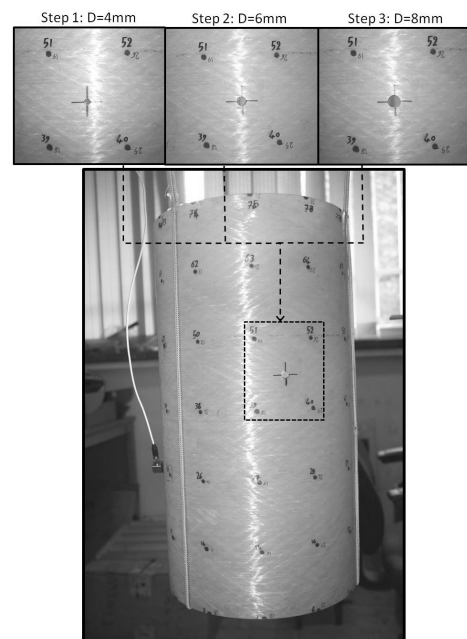
به‌منظور فراهم کردن شرایط تکیه‌گاهی آزاد-آزاد برای انجام آزمایش مودال، پوسته استوانه‌ای موردنظر با کمک سه عدد نوار لاستیکی بسیار نرم، به فیکسچر آویزان شد. به‌طورکلی ۸۴ نقطه بر روی سازه به عنوان نقاط تحریک انتخاب شد، که تعداد این نقاط در راستای شعاعی ۱۲ و در راستای طولی ۷ عدد بودند. نقاط تحریک طوری انتخاب شده‌اند که بتوان بهترین و مؤثرترین تحریک را در محدوده‌ی فرکانس مدنظر روی سازه اعمال نمود. انتخاب این نقاط بر اساس بینش کسب شده از رفتار سازه در اثر تست‌های مختلف صورت گرفت. در شکل (۳)، نقشه دو بعدی شبکه‌بندی در نمونه موردنظر، به همراه محل نصب شتاب‌سنج و محدوده ایجاد عیب نشان داده شده است.

جدول (۳) مشخصات مدل اجزای محدود پوسته استوانه‌ای.

خانواده	کتابخانه المان	تکنیک	شکل المان
Shell	Standard	sweep	Quad
تعداد المان	تعداد گره	ترتیب هندسی	
۱۱۴۴	۳۵۲۰	Quadratic	

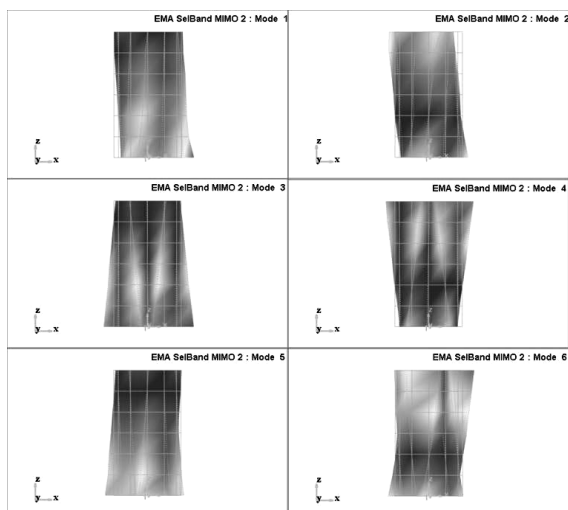
۳-۳- ایجاد عیب در استوانه

برای ایجاد عیب در استوانه مورد نظر، از روش مته‌کاری استفاده شده است، به این ترتیب که در نمونه مورد نظر پس از انجام مراحل تست مودال و داده‌برداری‌های مورد نیاز از سازه سالم، در مکانی نزدیک به وسط، یعنی در فاصله‌ی ۳/۵ سانتیمتری از وسط استوانه (مابین گره شماره ۳۹، ۴۰، ۵۱، ۵۲) توسط مته، سوراخی به قطر ۴ میلی‌متر ایجاد گردید. این سوراخ معادل ۰/۰۲٪ از مساحت کل نمونه می‌باشد. در ادامه‌ی مراحل تست بر روی نمونه اول، عیب‌هایی با قطر ۶ و ۸ میلی‌متر نیز در همان مکان ایجاد شده، و مطالعات مورد نظر بر روی آن عیوب نیز انجام پذیرفته است. لازم به ذکر است مساحت این عیوب نیز به ترتیب برابر ۰/۰۴۳٪ و ۰/۰۷۷٪ از مساحت کل نمونه است. در شکل (۲) مراحل ایجاد آسیب در سازه موردنظر و موقعیت قرارگیری آسیب نشان‌دهنده شده است.



شکل (۲) حفره ایجاد شده در استوانه کامپوزیتی، مرحله ۳، ۲، ۱.

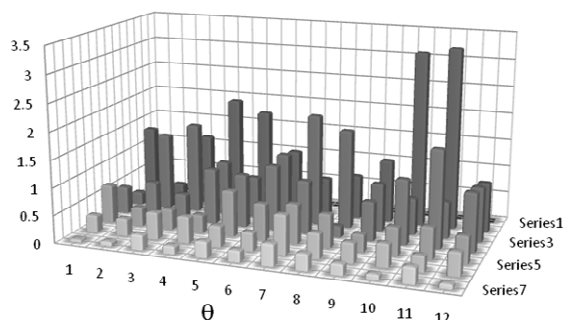
- 1- Multi Reference Impact Test
- 2- Multiple Input/Multiple Output (MIMO)
- 3- Roving Hammer Test



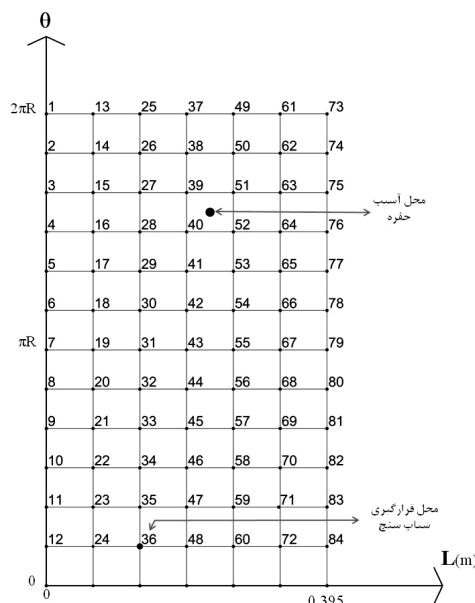
شکل (۵) مدل المان محدود پوسته استوانه‌ای.

لازم به ذکر است، به منظور پرهیز از خطاهای ایجاد شده که در زمان استخراج داده‌های شکل مود سازه صورت می‌گیرد، در محاسبه این معیارها تنها از ۳ شکل مودی که شدیدترین پیک را در میان نمودارهای FRF داشته‌اند، استفاده شده است. این شکل‌ها شامل مود اول، سوم و پنجم از سازه‌های مورد نظر هستند. در مجموع باید به این نکته توجه نمود که کارآمدی روش‌های ذکر شده شدیداً به دقت تست و داده‌های مودال استخراج شده وابسته است. در ادامه نتایج این بررسی‌ها که بر اساس نتایج تست و بر روی نمونه مذکور طی سه مرحله شامل؛ مرحله اول (آسیب با قطر ۴ میلی‌متر)، مرحله دوم (آسیب با قطر ۶ میلی‌متر) و مرحله سوم (آسیب با قطر ۸ میلی‌متر) است، در شکل‌های (۶) تا (۱۴) آورده شده است.

MSC(R) [S1/D=4mm]



شکل (۶) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله اول، معیار انحنای شکل مود.



شکل (۳) نقشه دویعدی شبکه‌بندی نمونه استوانه‌ای.

پس از تحلیل نمودارهای FRF حاصل از تست به‌وسیله الگوریتم برازش منحنی و به‌کارگیری توابع چند جمله‌ای از مرتبه ۳۰ و در بازه ۰ تا ۵۰۰ هرتز، خواص مودال مربوط به سازه استوانه‌ای کامپوزیتی قبل از آسیب و بعد از آن مطابق جدول (۴)، به‌دست آورده شد. همچنین شش شکل مود حاصل از نتایج تست آنالیز مودال تجربی بر روی سازه نیز در شکل (۵) نمایش داده شده است.

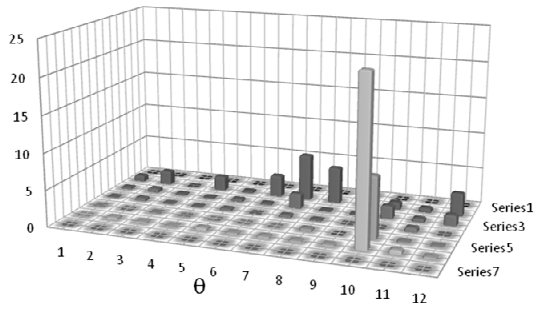
۳-۵- تشخیص عیب به کمک تکنیک عیب‌یابی بر پایه شکل مود

در این قسمت به کمک نتایج به‌دست آمده از تست مودال پوسته استوانه‌ای، و با استفاده از تکنیک‌های موجود که شرح آن‌ها در بخش‌های قبل آورده شده، به بررسی و تعیین محل عیب پرداخته می‌شود.

جدول (۴) فرکانس‌های طبیعی نمونه استوانه‌ای.

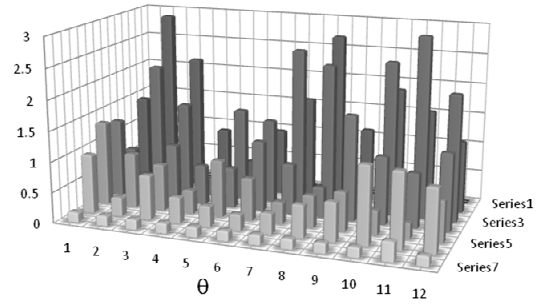
Mode	بعد از آسیب			قبل از آسیب	
	D = ۸ (mm)	D = ۶ (mm)	D = ۴ (mm)	FEM (HZ)	EMA (HZ)
۱	۷۷/۴۹۹	۷۷/۴۹۶	۷۷/۴۶۸	۷۹/۳۸۴	۷۷/۴۳۹
۲	۹۴/۹۸۷	۹۴/۷۶۷	۹۴/۵۳۴	۹۷/۱۶۹	۹۴/۳۷۲
۳	۲۱۸/۲۲۲	۲۱۸/۲۱۸	۲۱۸/۱۲۵	۲۲۴/۱۵	۲۱۷/۹۹۶
۴	۲۴۰/۸۶۴	۲۴۰/۳۵۶	۲۴۰/۲۲۱	۲۴۷/۸۶	۲۳۹/۹۲۳
۵	۴۱۵/۷۷۵	۴۱۵/۷۶۵	۴۱۵/۶۱۵	۴۲۸/۴۵	۴۱۵/۳۶۱
۶	۴۳۷/۵۲۳	۴۳۷/۱۲۳	۴۳۶/۹۸۳	۴۵۳/۵۸	۴۳۶/۷۶۵

MSCS(L) [S1/D=8mm]



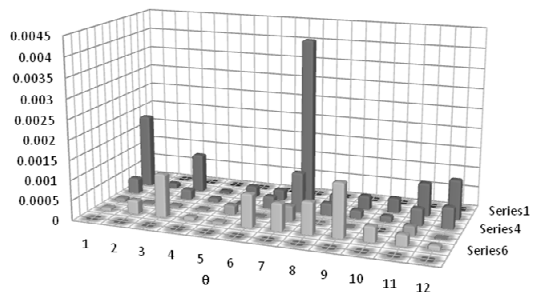
شکل (۱۱) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله سوم، معیار مجذور انحنای شکل مود.

MSC(R) [S1/D=6mm]



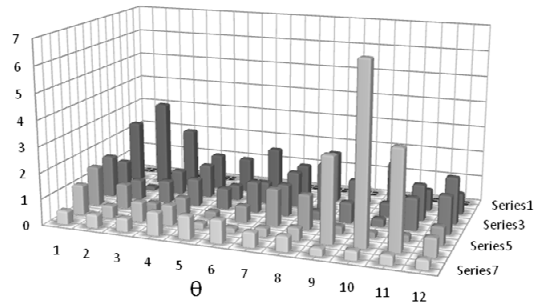
شکل (۷) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله دوم، معیار انحنای شکل مود.

DI(L) [S1/D=4mm]



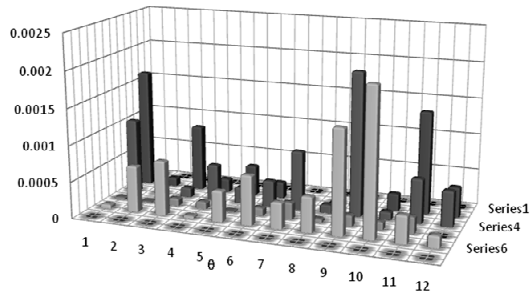
شکل (۱۲) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله اول، معیار اندیس عیب.

MSC(R) [S1/D=8mm]



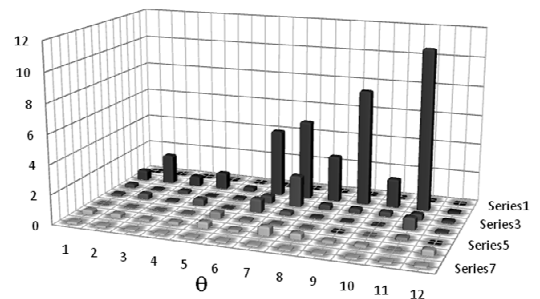
شکل (۸) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله سوم، معیار انحنای شکل مود.

DI(L) [S1/D=6mm]



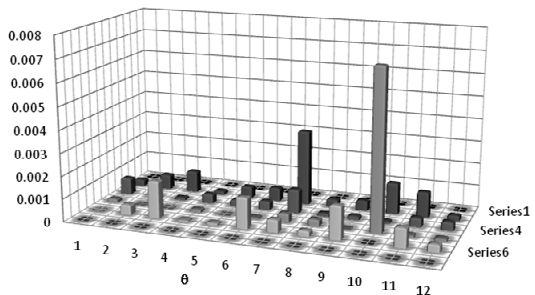
شکل (۱۳) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله دوم، معیار اندیس عیب.

MSCS(L) [S1/D=4mm]



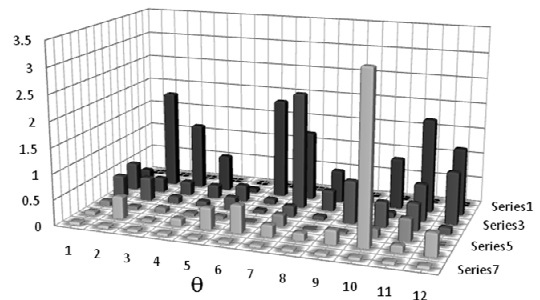
شکل (۹) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله اول، معیار مجذور انحنای شکل مود.

DI(L) [S1/D=8mm]



شکل (۱۴) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله سوم، معیار اندیس عیب.

MSCS(L) [S1/D=6mm]



شکل (۱۰) نتایج عیب‌یابی سازه مرحله دوم، معیار مجذور انحنای شکل مود.

- [3] Cornwell P., Doebling S.W., Farrar C.R., Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures, Vol. 224, 1999, pp. 359–374.
- [4] Kim-Ho Ip, Ping-Cheung Tse, Locating damage in circular cylindrical composite shells based on frequency sensitivities and mode shapes, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 21, 2002, pp. 615–628.
- [5] Hu H. , Wang B., Lee C., Damage detection of surface cracks in composite laminates using modal analysis and strain energy method, *Composite Structures*, Vol. 74, 2006, pp. 399–405.
- [6] Huiwen Hu, Jieming Wang, Damage detection of a woven fabric composite laminate using a modal strain energy method, *Engineering Structures*, 2009.
- [7] Hu H., Wu C., Lu W., Damage Detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index method, *computers and structure*, 2010.
- [8] Huiwen Hu, Chengbo Wu, Damage detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index methods, *Computers & Structures*, 2011.
- [9] Maia N.M.M., Suna J.M.M., Almas E.A.M., Damage Detection in Structures: From Mode Shaping to Frequency Response Function Methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر عیب‌یابی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی از طریق انجام آنالیز مودال تجربی و به کمک روش‌های عیب‌یابی بر پایه شکل مود و بررسی حساسیت آن‌ها در برابر شدت‌های مختلف آسیب بوده است. نتایج حاصل بیانگر آن است که تکنیک‌های عیب‌یابی بر پایه شکل مود از آن‌جا که مستقیماً از داده‌های خام تست مودال استفاده نمی‌کنند، قابلیت اطمینان کمتری نسبت به تکنیک عیب‌یابی دیگر دارند. نکته مهم و قابل تامل آن است که در برخی از روش‌های مورد استفاده محل عیب در همسایگی محل واقعی آن مشاهده می‌شود. این پدیده به آن دلیل است که گره مجاور محل عیب در مودها و پاسخ‌های فرکانسی به کار برده شده در روش‌های مذکور، دارای انرژی بیشتری بوده و به همین دلیل اثرات تغییرات سازه‌ای در آن نسبت به گره محل عیب بیشتر خواهد بود. در مجموع کارآمدی روش‌های ذکر شده شدیداً به دقت تست و داده‌های مودال استخراج شده وابسته است. در ادامه سعی شد خلاصه‌ای از نتایج حاصل، از کارآمدی روش‌های مورد نظر در ارتباط با سازه‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی، ارائه شود. براساس نتایج حاصل، روش انحنا‌ی شکل مود فقط در مرحله سوم ایجاد آسیب یعنی آسیب‌هایی با مساحت بیشتر از 0.08% کل سازه در پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مورد نظر، قادر به شناسایی آسیب خواهد بود. روش مجذور انحنا‌ی شکل مود که در مراحل دوم و سوم قادر به شناسایی آسیب بوده، می‌تواند در پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مورد نظر عیوبی با مساحت بیشتر از 0.04% کل سازه را شناسایی نماید. روش اندیس عیب توانایی شناسایی آسیب‌های بسیار ریز، در حدود 0.02% مساحت سازه در پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مورد نظر را دارا می‌باشد.

۷- مراجع

- [1] Cawley P., Adams R.D., A Vibration Technique for Non-Destructive Testing of Fibre Composite Structures, *Journal of Composite Materials*, Vol. 13, 1979, pp.161–175.
- [2] Wolff T., Richardson M., *Fault Detection in Structures From Changes in Their Modal Parameters*, in Proc. of the 7th International Modal Analysis Conference, 1989, pp. 87–94.