

تحلیل ارتعاش آزاد پوسته استوانه‌ای ترک‌دار به روش عددی و آزمایشگاهی

پویا پیرعلی استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر ppirali@mut.ac.ir	حسین لکزبان استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر Lexian@mut.ac.ir	رضا آذرافزا* دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر azarmut@mut.ac.ir	مطهره عزیزی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر Motahhare.Azizi@gmail.com
---	--	---	--

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷

چکیده

ساختار پوسته‌های استوانه‌ای در معرض انواع مختلفی از نقص‌ها و آسیب‌های مانند ترک‌ها هستند که ممکن است ایمنی ساختاری آنها را از بین ببرد. اثرات ترک در طراحی سازه پوسته استوانه‌ای به دلیل تأثیرگذاری بر خصوصیات ارتعاشی و ایمنی، قابل توجه هستند. در مقاله حاضر تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ترک‌دار با روش عددی (المان محدود) و آزمایشگاهی بررسی شده است. جهت بررسی رفتار ارتعاشی، در روش آزمایشگاهی از آنالیز مودال و در روش عددی از نرم‌افزارهای تجاری المان محدود آباکوس^۱، استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج، با ایجاد ترک در مدل آزمایشگاهی، فرکانس‌های پوسته استوانه‌ای ترک‌دار به دست آمده و با نتایج عددی مقایسه می‌گردند. در ادامه اثر پارامترهای مختلف نظیر طول ترک، زاویه ترک، عمق ترک، محل ترک، ضخامت پوسته، طول پوسته تحت شرایط مرزی دو سر آزاد بر روی فرکانس‌های ارتعاشی بررسی شده است. برای تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر روی فرکانس‌های ارتعاشی، طراحی آزمون با استفاده از RSM-CCD² انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ۶۷ درصدی نسبت طول ترک به قطر، فرکانس طبیعی به مقدار ۳۲/۷ درصد کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش ۵۰ درصدی زاویه ترک، فرکانس به مقدار ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه فرکانس طبیعی ایجادشده توسط ترک در تعداد مشخصی از حالت‌ها، بسته به محل ترک تغییر می‌کند.

واژگان کلیدی: ارتعاشات آزاد، پوسته استوانه‌ای ترک‌دار، روش عددی، فرکانس طبیعی، RSM-CCD

۱. مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای در کاربردهای مختلف مهندسی نقش مهمی را ایفا می‌کنند امروزه استفاده از پوسته‌های استوانه‌ای به‌طور روزافزون در صنایع مختلف از جمله هوافضا، دفاعی، دریایی و سازه‌های ساختمانی گسترش یافته است [۱]. این پوسته‌ها مانند انواع سازه‌ها با توجه به کاربرد در محیط‌های مختلف، مستعد انواع نقص و آسیب‌هایی نظیر ترک‌خوردگی، فرسایش و تجزیه‌ی مواد و ... در طول زمان هستند که این امر ممکن است یکپارچگی ساختاری را مختل کرده و عمر آن را تحت تأثیر قرار دهد [۲]. آسیب ترک در سازه‌ها ممکن است در اثر عوامل مختلفی چون ضربه، پدیده خستگی، بارگذاری دینامیکی، خوردگی، جوشکاری، شوک حرارتی و غیره به‌وجود آید. بنابراین اثر ترک‌ها بایستی در طراحی پوسته‌های استوانه‌ای مدنظر قرار گیرد، زیرا بر ظرفیت حمل و افزایش بار و ایمنی تأثیر می‌گذارد. وجود ترک در سازه به‌واسطه تمرکز انرژی کرنشی آن در مجاورت ترک، سبب افزایش انعطاف‌پذیری موضعی در سازه‌ی تحت بار می‌شود و این انعطاف‌پذیری سازه در محل ترک، سبب تغییر در رفتار دینامیکی آن می‌شود. به همین خاطر، پاسخ ارتعاشی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها یک سازه که به میرایی، توزیع جرم و سفتی سازه وابسته هستند تغییر خواهند کرد [۳]. مطالعات بسیاری در طی دهه‌های گذشته در خصوص ترک و اثر آن بر خواص ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای انجام شده است؛ که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

داس و همکاران [۴] آنالیز ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای چندلایه ساخته شده با کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف همراه با ترک در لایه میانی را بررسی کردند. آنها در این پژوهش، روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی براساس روش المان محدود و مبتنی بر تسهیل آنالیز پاسخ دینامیکی که به‌طور خاص برای این پوسته اختصاص یافته است، را توسعه دادند. وفایی و همکاران [۵] ارتعاش، کماتش و رفتار پارامترهای متغیر یک پوسته استوانه‌ای نازک محور

ترک‌دار با موضوع بارگذاری دوره‌ای محوری را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. نصیرمنش و محمدی [۶] ارتعاشات آزاد ورق‌های مستطیلی و دایروی و پوسته‌های استوانه‌ای، مخروطی و کروی نازک ترک‌دار از جنس مواد مدرج تابعی را براساس تئوری میندین-رایزنر و روش المان محدود توسعه‌یافته مطالعه نمودند. توی و همکاران [۷] ارتعاشات عرضی آزاد پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار را از روش فاصله برشی مجزا هموار شده سلول محور و روش المان محدود توسعه یافته بررسی کردند در این پژوهش از تئوری پوسته میندین- رایزنر استفاده شده و از طریق انجام مثال‌های عددی مختلف در پوسته‌های ترک‌دار با طول و موقعیت مختلف ترک و مقایسه نتایج با نرم‌افزار انسیس^۳، دقت روش مذکور بررسی کردند. جاویدروزی و همکاران [۸] ارتعاشات، کماتش و پایداری دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای نازک ترک‌دار همسانگرد، با شرایط مرزی گیردار تحت یک جفت بار محوری یکنواخت مخالف در دو لبه را به کمک روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس مورد بررسی قرار دادند و تأثیر پارامترهایی مانند بار استاتیکی، اندازه و جهت‌گیری ترک را بر روی ناپایداری دینامیکی تحقیق کردند. ژین و همکاران [۹] ارتعاشات آزاد، کماتش خطی و پایداری دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار با سرعت دورانی متغیر با زمان و با شرایط مرزی CC و SS را بررسی کردند. روش المان محدود برای به‌دست آوردن ماتریس‌های جرم و سفتی به‌کار گرفته شده و روش بولوتین برای به‌دست آوردن مناطق پایداری دینامیکی پوسته استفاده شده است. رحمان و راثو [۱۰] ارتعاشات آزاد، کماتش و آنالیز شکست را در پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار دارای سرعت دورانی متغیر با زمان تحت شرایط مرزی دو سر گیردار را با استفاده از آنالیز المان محدود در نرم‌افزار انسیس مورد بررسی قرار دادند. آذرافزا و همکاران [۱۱]، اثر جنابش بین لایه‌ای بر خواص مکانیکی و ارتعاشی صفحات کامپوزیتی انحنا دار را به روش تجربی و عددی بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش

مساحت جدایش، فرکانس‌های طبیعی کاهش خواهند یافت. تیواری و جوشی [۱۲] تحلیل ارتعاشی پوسته استوانه‌ای ترک‌دار را انجام داده و اثر ترک را بر روی فرکانس طبیعی پوسته استوانه‌ای بررسی کردند. ولایت پرورده و شوشتری [۱۳] اثر ترک بر ویژگی‌های ارتعاشی لوله‌های تقویت‌شده را به روش عددی و تجربی بررسی نمودند و نشان دادند که حضور ترک باعث کاهش سختی شده و در نهایت فرکانس را کاهش می‌دهد. گوگرچین و معزز [۱۴] ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ارتوتروپیک طویل با یک ترک سطحی نیمه بیضوی در جهت طولی را مطالعه نمودند و معادلات مشخصه حاکم بر آن را به روش تحلیلی به دست آوردند. داس و همکاران [۱۵] ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیت ترک‌دار را مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که ترک‌های بین لایه‌ای بر سختی سازه تأثیر می‌گذارند و در نتیجه فرکانس طبیعی پوسته را تا حد زیادی کاهش می‌دهند.

جویگ و همکاران [۱۶] اثر ترک بر روی فرکانس طبیعی صفحات کامپوزیتی را به روش تجربی و عددی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که افزایش زاویه ترک باعث کاهش سختی صفحه کامپوزیت می‌شود و نهایتاً منجر به کاهش فرکانس طبیعی صفحه می‌گردد.

جدول ۱. خواص مکانیکی

خواص مکانیکی	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Gpa)	چگالی (kg/m ³)
مقدار	۰/۳۵	۶۸/۹	۲۷۰۰

اکثر مطالعات انجام شده در زمینه ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار، به صورت عددی و یا به صورت حل دقیق بوده و بررسی تأثیر تمام پارامترهای مختلف پوسته و ترک بر روی فرکانس ارتعاشی به طور کامل صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق با استفاده از طراحی آزمون و روش عددی به بررسی این موارد پرداخته شده است. در پژوهش حاضر ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای همسانگرد ترک‌دار به روش تجربی (آنالیز مودال) و عددی (با نرم‌افزار آباکوس) انجام شده و نتایج دو روش با هم مقایسه شده‌اند که با هم تطابق خوبی دارند. برای تست تجربی، ۴ نمونه پوسته استوانه‌ای، شامل یک نمونه سالم و ۳ نمونه ترک‌دار ساخته شده و تست مودال آنها به صورت تجربی انجام شده است. در نهایت تأثیر پارامترهای طول و ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول، زاویه و موقعیت ترک در پنج سطح مختلف با استفاده از روش RSM-CCD بررسی شده است.

۲. مدل المان محدود

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی و تحلیل مودال پوسته استوانه‌ای، به کمک این نرم‌افزار انجام شده است. جنس پوسته آلومینیومی بوده و خواص مکانیکی و هندسی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ داده شده‌اند.

جدول ۲. خواص هندسی

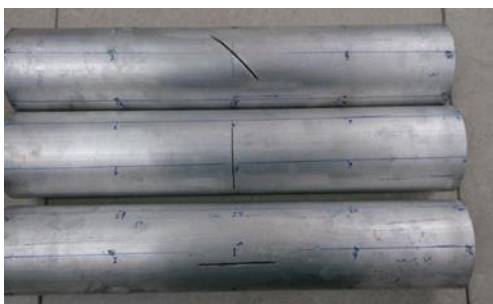
خواص هندسی	طول (mm)	ضخامت (mm)	طول ترک (mm)	زوایای ترک
مقدار	۵۰۰	۲/۵	۸۰	۰، ۴۵، ۹۰

C3D20R با تعداد ۸۱۴۸ المان (که همگرا شده است) استفاده شده و شرایط مرزی به صورت دو سر آزاد در نظر گرفته شده است.

زیرا ایجاد شرط مرزی دو سر آزاد در حالت عملی آسان‌تر است [۱۷] و در این حالت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، با نتایج حاصل از آزمایش مودال تجربی، اختلاف کمی دارد.

با استفاده از ابعاد هندسی جدول ۲ مدل‌سازی پوسته انجام شده است. برای ایجاد ترک، مدل توسط صفحه ترک به دو قسمت تقسیم شده، و با استفاده از ابزار کوپل، قسمت‌هایی را که ترک ندارد به یکدیگر متصل می‌شوند. عمق ترک در راستای ضخامت پوسته، پهنای ترک ۱ میلی‌متر و موقعیت ترک در وسط پوسته است. در شبیه‌سازی از المان

بیرونی مدل مشخص گردید. باید توجه داشت که میزان دقت شکل مودهای خروجی سازه، تابعی از تعداد همین شبکه‌بندی‌ها است. به منظور مقایسه نتایج آزمایش هر چهار نمونه، تا حد امکان شرایط کلی آزمایش مانند شرایط تکیه‌گاهی، نقطه تحریک و نقاط اندازه‌گیری برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نمونه‌های ترک‌دار ساخته شده و نقاط علامت‌گذاری شده برای کلیه قطعات را نشان می‌دهد.

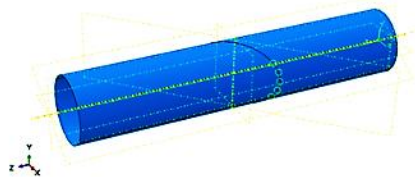


شکل ۳. استوانه‌های ترک داده شده با زوایای صفر، ۴۵ و ۹۰

درجه

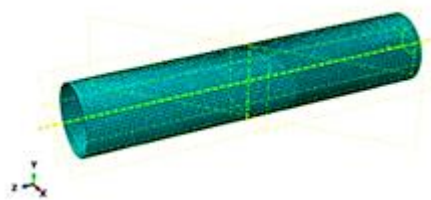
با توجه به شرایط مرزی دو سر آزاد، جهت انجام آزمایش و اعمال شرایط مرزی، پوسته استوانه‌ای توسط دو کش لاستیکی نرم که سفتی پایینی دارند و وزن آنها در مقابل وزن پوسته ناچیز است، آویزان شده است. سپس در یک نقطه معین لرزاننده توسط استینگر^۴ همراه با یک حسگر نیروسنج توسط چسب مخصوص به پوسته متصل شده است. باید دقت نمود که راستای آویزان کردن سازه عمود بر جهت ارتعاش باشد. همچنین در سه نقطه شتاب‌سنج متصل می‌گردد. یعنی تحریک در یک نقطه انجام و پاسخ در چند نقطه اندازه‌گیری شده است. به این ترتیب، آزمایش مودال ۱۰ بار، و هر بار با قرار دادن سه شتاب‌سنج بر روی سطح بیرونی مدل به صورت محیطی، انجام گرفت. تحریک مدل با استفاده از لرزش‌گر نصب شده در یک نقطه صورت پذیرفت. در مجموع ۱۰ مرتبه برای به دست آوردن سی تابع مجزا، آزمون انجام گردید. خروجی لرزاننده و سنسورهای اندازه‌گیری شتاب به تحلیل‌گر وارد شده و در کامپیوتر ذخیره می‌گردند.

در این نوع شرط مرزی، شش مود اول حاصل از شبیه‌سازی عددی، مودهای صلب سازه هستند. شکل ۱، مدل‌سازی هندسی در مرحله متصل کردن دو قسمت برای ایجاد ترک و شکل ۲ مدل مش‌بندی شده پوسته را نشان می‌دهند.



شکل ۱. مدل‌سازی هندسی در مرحله متصل کردن دو قسمت

برای ایجاد ترک



شکل ۲. مدل مش‌بندی شده پوسته استوانه‌ای ترک‌دار

۳. آزمایش مودال

برای صحت‌سنجی روش عددی، تست مودال تجربی نیز انجام گردید. بدین منظور برای انجام تست مودال، ۴ نمونه پوسته استوانه‌ای آلومینیومی شامل یک نمونه پوسته سالم و سه نمونه‌های پوسته ترک‌دار در ۳ زاویه‌ی مختلف صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، با خواص هندسی جدول ۲ ساخته شدند. ترک‌های روی پوسته با مقادیر داده در قسمت قبلی توسط فرز بر روی نمونه‌ها ایجاد شده است.

برای انجام آزمایش مودال بر روی نمونه‌ها، به منظور تعیین نقاط نصب شتاب‌سنج‌ها بر روی نمونه‌ی ساخته شده برای اندازه‌گیری، سطح بیرونی مدل در ۵ نقطه با فاصله مساوی از یکدیگر، واقع در تمام طول آن، از ابتدا تا انتها علامت‌گذاری شد. سپس سطح مزبور در هر یک از این نقاط پنج‌گانه به صورت محیطی و در شش نقطه با فواصل یکسان تقسیم‌بندی گردید یعنی در مجموع ۳۰ نقطه روی سطح

قرارگیری ترک (Teta) جهت بررسی تأثیر هر پارامتر و ۵ سطح بودن هر پارامتر، محدوده تغییرات هر پارامتر به همراه سطوح کُبدندی شده که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند برای بی‌بعدسازی، قطر پوسته استوانه‌ای ۱۰۰ میلی‌متر فرض شده است. فرکانس‌های درخواستی برای طراحی آزمون نیز ۵ فرکانس اول است. براساس تعداد پارامترها و سطوح انتخابی RSM-CCD، ۴۱ طرح را جهت انجام آزمایش پیشنهاد گردید درحالی‌که به روش سنتی باید ۳۱۲۵ آزمایش صورت می‌گرفت. در جدول ۴ این ۴۱ طرح و پاسخ به‌دست آمده از روش عددی آمده‌اند.

جدول ۳. خواص هندسی

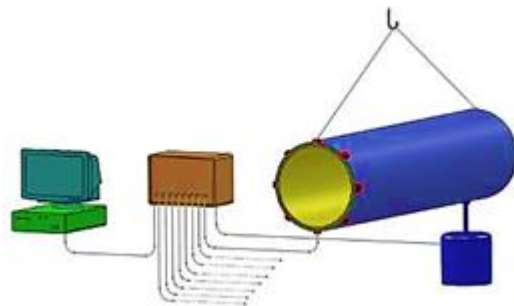
نام	واحد	سطوح در نظر گرفته شده				
		-۲	-۱	۰	۱	۲
L/D	-	۲	۴/۵	۷	۹/۵	۱۲
t/D	-	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵
Teta Degree		۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
Lc/D	-	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶
Lp/D	-	۰	۱/۵	۳	۴/۵	۶

۵. تحلیل نتایج

۵-۱. نتایج آزمایش مودال

پس از تست مودال تجربی و اندازه‌گیری شتاب‌ها، ۳۰ تابع پاسخ فرکانسی مجزا حاصل شد که ماتریس تابع پاسخ فرکانسی را تشکیل داده و با انجام برازش منحنی، تابع پاسخ فرکانسی^۶ (FRF)، برای سازه به‌دست آمد. فرکانس‌های طبیعی توسط نرم‌افزار تحلیل داده‌های مودال ME Scope، قابل استخراج هستند. در جدول ۵ فرکانس‌های پنج مود اول به‌دست آمده از روش تجربی، برای یک نمونه سالم و سه نمونه معیوب با ترک در زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نشان داده شده‌اند. به‌طور نمونه شکل‌های ۶-الف و ۶-ب به‌ترتیب تابع پاسخ فرکانسی و برازش منحنی را برای نمونه بدون ترک (سالم)، و شکل‌های ۶-ج و ۶-د، به‌ترتیب FRF و برازش منحنی را برای نمونه با ترک صفر درجه نشان می‌دهند.

برای آزمون تجربی، نوع تحریک تصادفی، نوع شتاب‌سنج (sensitivity: 100 mv/g) - PCB، نوع لرزاننده B&K، ترانسیدوسر^۵ نیرو Type 8230 B&K، Transducer Force، نرم‌افزار ثبت پاسخ‌های فرکانسی Pulse و نرم‌افزار تحلیل داده‌های مودال ME Scope هستند. بازه فرکانسی اندازه‌گیری شده ۲۵۰۰ هرتز است. شکل ۴، نمایی شماتیک و شکل ۵ نمای واقعی چیدمان آزمون مودال را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمایی شماتیک از آزمون آنالیز مودال



شکل ۵. نمای واقعی از آزمون آنالیز مودال

۴. طراحی آزمایش مبتنی بر RSM^۲

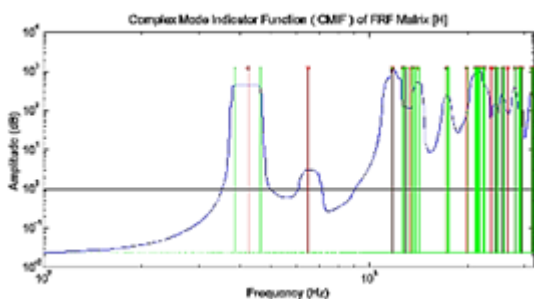
طراحی آزمایش یک اصل اساسی در انجام تحقیقات آزمایشگاهی و صنعتی محسوب می‌شود. این طراحی‌ها باعث دستیابی به نتایج مطمئن‌تر، صرفه‌جویی در زمان، کاهش قابل ملاحظه در تعداد آزمایش‌ها می‌شود. در این پژوهش از RSM (روش سطح پاسخ) و از نرم‌افزار Design-expert جهت بررسی تأثیر پارامترها استفاده شده است. با توجه به تعیین ۵ پارامتر هندسی شامل طول استوانه (L)، ضخامت استوانه (t)، موقعیت ترک (Lp)، طول ترک (Lc) و زاویه

جدول ۴. فرکانس های استخراج شده متناسب با طراحی آزمون

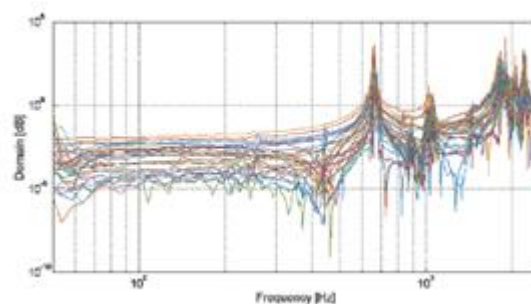
Std	Run	I					II				
		Factors					Extracted frequencies				
		L/D	t/D	θ	Lc/D	Lp/D	First	Second	Third	Fourth	Fifth
F	۱	۹/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۵	۱/۵	۲۸۴/۶۱	۵۱۷/۷۷	۵۳۳	۵۸۶/۳۴	۷۳۰/۳۳
۱۷	۲	۴/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۳	۴/۵	۳۵۶/۹۲	۵۴۳/۶۸	۵۷۷/۶۶	۱۱۳۲/۸	۱۴۳۵/۹
۱۹	۳	۴/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۳	۴/۵	۶۶۱/۷۹	۱۰۶۳/۴	۱۱۱۵/۴	۱۵۱۸/۲	۲۴۸۳/۵
۱۵	۴	۴/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۵	۱/۵	۷۷۳/۱۴	۱۰۵۶/۴	۱۰۷۷/۵	۱۲۹۸/۲	۱۹۷۸
۲۶	۵	۹/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۵	۴/۵	۲۵۳/۸۳	۴۹۸/۰۶	۵۳۴/۰۴	۵۳۵/۳۶	۵۹۲/۸۱
۳۱	۶	۴/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۵	۴/۵	۵۴۲	۱۰۵۶/۱	۱۰۷۴/۲	۱۴۹۲/۳	۲۴۸۳/۴
۲۲	۷	۹/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۳	۴/۵	۴۰۴/۹۵	۵۳۳/۱۷	۵۳۴/۹۱	۵۸۹/۹۸	۶۶۵/۱۷
۱۲	۸	۹/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۵	۱/۵	۴۲۳/۳۴	۸۰۱/۶۹	۱۰۱۸/۴	۱۰۶۰/۸	۱۱۰۱/۸
۲۰	۹	۹/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۳	۴/۵	۴۳۶/۵۲	۸۵۹/۷۱	۱۰۵۷/۵	۱۰۶۴/۲	۱۰۸۵/۴
۳۷	۱۰	۷	-۱/۳	۶۰	-۱/۲	۳	۷۸۴/۶۹	۷۹۶/۱۵	۸۰۳/۵۳	۹۶۰/۷۳	۱۲۸۱/۵
۳۰	۱۱	۹/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۵	۴/۵	۳۷۷/۹۳	۵۱۲/۲۳	۵۳۳/۰۴	۵۳۴/۵۵	۶۰۲/۹۹
۳۴	۱۲	۷	-۱/۱	۶۰	-۱/۴	۳	۲۶۰/۶۲	۲۶۸/۸	۲۶۹/۲۷	۳۸۶/۷۱	۷۳۴/۲
۱۳	۱۳	۴/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۵	۱/۵	۴۴۲/۰۸	۵۳۱/۲۱	۵۴۱/۹	۸۰۶/۰۸	۱۴۱۴/۹
۱۸	۱۴	۹/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۳	۴/۵	۳۸۰/۱۳۳	۵۲۸/۵۳	۵۳۴/۶۵	۵۶۴/۲	۶۴۱/۲۸
۱۴	۱۵	۹/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۵	۱/۵	۳۵۴/۵۴	۵۳۱/۵۹	۵۳۳/۷۲	۵۸۶/۲۵	۷۴۰/۵
۴	۱۶	۹/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۳	۱/۵	۵۶۹/۷۸	۹۴۹/۲۳	۱۰۳۹/۱	۱۰۶۱/۱	۱۱۰۳/۲
۳۸	۱۷	۷	-۱/۳	۶۰	-۱/۶	۳	۳۵۲/۱	۷۵۸/۲۲	۷۹۶/۵۲	۸۰۳/۰۴	۹۵۹/۰۱
۳۹	۱۸	۷	-۱/۳	۶۰	-۱/۴	۰	۵۷۷/۶۶	۷۹۷/۲	۸۲۸/۶۵	۹۴۰/۶۱	۱۱۶۷/۷
۳	۱۹	۴/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۳	۱/۵	۹۰۷/۶۴	۱۰۳۶/۷	۱۰۷۵/۵	۱۴۳/۱	۲۰۷۶/۶
۴۰	۲۰	۷	-۱/۳	۶۰	-۱/۴	۶	۶۵۰/۱۱۳	۷۹۳/۰۴	۸۰۱	۹۲۶/۲۱	۱۲۶۲/۹
۳۵	۲۱	۷	-۱/۵	۶۰	-۱/۴	۳	۶۲۸/۵۳	۱۱۱۶/۶	۱۳۳۲/۷	۱۳۳۹/۱	۱۴۱۵
۳۲	۲۲	۹/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۵	۴/۵	۳۲۲/۰۹	۵۹۹/۳۴	۱۰۵۸/۷	۱۰۶۳/۷	۱۰۹۵/۸
۲۸	۲۳	۹/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۵	۴/۵	۳۰۲/۶۵	۵۷۳	۱۰۵۰/۴	۱۰۶۴	۱۰۸۲/۳
۲۵	۲۴	۴/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۵	۴/۵	۳۴۸/۳۳	۵۳۰/۹۷	۵۴۰/۸۳	۱۰۶۰/۶	۱۱۸۴/۲
۲۷	۲۵	۴/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۵	۴/۵	۴۶۳/۵۴	۱۰۴۰/۱	۱۰۶۸/۸	۱۴۹۱/۲	۲۰۷۴/۴
۲	۲۶	۹/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۳	۱/۵	۴۴۷/۸۴	۵۲۶/۱۸	۵۳۳/۲۹	۵۸۸/۳۵	۷۵۴/۶۰
۱۶	۲۷	۹/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۵	۱/۵	۵۲۲/۷۷	۸۸۳/۴۹	۱۰۵۷/۴	۱۰۶۱/۸	۱۱۰۲/۲
۸	۲۸	۹/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۳	۱/۵	۶۲۱/۱۲	۱۰۵۷/۱	۱۰۶۲	۱۰۹۸/۹	۱۱۳۶/۵
۱	۲۹	۴/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۳	۱/۵	۵۰۴/۹۵	۵۴۰/۱۱	۵۹۶/۲۲	۱۰۱۲/۹	۱۴۷۲/۲
۳۶	۳۰	۷	-۱/۳	۲۰	-۱/۴	۳	۳۳۵/۸۷	۶۹۳/۲۶	۷۹۷/۹۸	۸۲۷/۵	۹۷۱/۷
۵	۳۱	۴/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۳	۱/۵	۵۳۱/۴۱	۵۴۲/۱۲	۷۰۴/۵۲	۱۰۸۹/۴	۱۵۳۳/۳
۲۹	۳۲	۴/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۵	۴/۵	۴۱۱/۰۵	۵۳۱/۰۶	۵۴۰/۳۳	۱۱۱۰/۱	۱۵۰۳
۲۳	۳۳	۴/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۳	۴/۵	۱۰۴۷/۶	۱۰۶۸/۸	۱۰۸۵	۱۴۹۴/۸	۲۴۸۸/۶
۳۳	۳۴	۱۲	-۱/۳	۶۰	-۱/۴	۳	۳۳۴/۴	۶۷۸/۶۴	۷۹۴/۲۸	۷۹۷/۲۹	۸۱۷/۲۲
۷	۳۵	۴/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۳	۱/۵	۱۰۵۶/۹	۱۰۷۷/۹	۱۱۳۸/۷	۱۵۹۴/۴	۲۳۹۶/۹
۹	۳۶	۴/۵	-۱/۲	۴۰	-۱/۵	۱/۵	۳۴۴/۸۷	۵۱۶/۹۳	۵۴۰/۶۸	۷۷۴/۸۷	۱۲۹۱/۳
۴۱	۳۷	۷	-۱/۳	۶۰	-۱/۴	۳	۵۶۷/۴۵	۷۹۳/۴۲	۸۰۲/۲۴	۸۶۲/۸۶	۱۰۵۷/۸
۶	۳۸	۹/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۳	۱/۵	۵۳۱/۲۸	۵۳۳/۷۷	۵۵۲/۴۳	۵۹۲/۶۲	۷۵۳/۱۵
۱۱	۳۹	۴/۵	-۱/۴	۴۰	-۱/۵	۱/۵	۵۷۱/۷۴	۱۰۱۷/۴	۱۰۷۴/۴	۱۲۵۳/۶	۱۷۰۷/۴
۲۱	۴۰	۴/۵	-۱/۲	۸۰	-۱/۳	۴/۵	۵۳۷/۳۹	۵۳۷/۵۸	۸۴۹/۷۳	۱۱۱۱/۵	۱۵۲۸/۹
۲۴	۴۱	۹/۵	-۱/۴	۸۰	-۱/۳	۴/۵	۴۵۷/۴۷	۱۰۴۳	۱۰۶۱/۸	۱۰۶۵/۲	۱۰۹۸/۵

جدول ۵. فرکانس‌های حاصل از تست مودال [Hz]

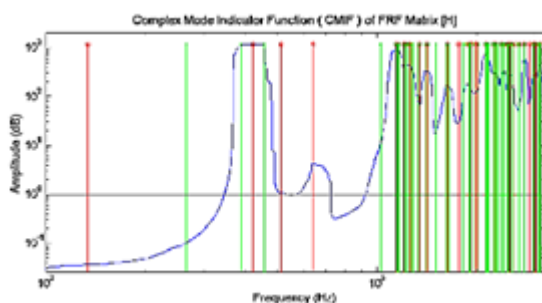
شماره مود	نمونه سالم	نمونه با ترک ۹۰ درجه	نمونه با ترک ۴۵ درجه	نمونه با ترک صفر درجه
۱	۶۸۹	۶۷۹/۶۲	۶۷۹/۸۲	۶۷۴/۵
۲	۶۹۵/۲	۶۹۶/۹	۶۹۷/۱	۶۹۰/۳
۳	۱۰۴۲/۵	۱۰۲۱/۰۷	۹۶۶/۲	۱۰۱۱
۴	۱۸۹۰/۷	۱۶۶۰/۲۸	۱۵۴۴/۸۵	۱۸۷۲/۱
۵	۱۹۱۵/۵	۱۹۰۶/۸۱	۱۸۷۶/۸۳	۱۹۴۸



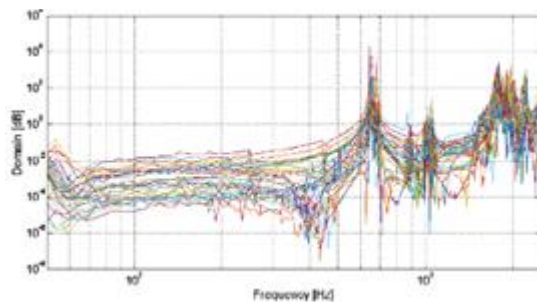
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶. FRF و برازش منحنی: الف) FRF نمونه بدون ترک، ب) برازش منحنی نمونه بدون ترک، ج) FRF نمونه با ترک صفر درجه، د) برازش منحنی نمونه با ترک صفر درجه

جدول ۶. فرکانس‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی [Hz]

شماره مود	نمونه سالم	نمونه با ترک ۹۰ درجه	نمونه با ترک ۴۵ درجه	نمونه با ترک صفر درجه
۱	۶۹۶/۲۹	۶۹۶	۶۹۱/۷۲	۶۸۱/۹۹
۲	۷۰۴/۷۴	۷۰۴/۷۱	۷۰۴/۶۴	۷۰۴/۵۵
۳	۱۰۵۴/۶	۱۰۳۳/۵	۹۸۱/۶۸	۱۰۳۸/۷
۴	۱۹۶۲/۷	۱۶۷۷/۶	۱۶۰۴/۶	۱۸۹۸/۵
۵	۱۹۷۲/۶	۱۹۶۲/۲	۱۹۳۴	۱۹۷۲/۱

۲-۵. نتایج تحلیل المان محدود

نتایج فرکانس‌های طبیعی به‌دست آمده از روش المان محدود برای پنج مود اول، برای یک نمونه سالم و سه نمونه معیوب با ترک در زاویه صفر، ۴۵، و ۹۰ درجه در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول های ۵ و ۶، مشاهده می شود وجود ترک بیشترین تأثیر را بر نمونه با ترک ۴۵ درجه می گذارد و باعث کاهش فرکانس می شود، که این موضوع در برخی از شکل مودها کاملاً مشهود است. با مقایسه جدول ۵ و ۶ می توان دریافت که:

- ۱- با تغییر زاویه ی ترک در نمونه های معیوب مقادیر برخی از فرکانس های طبیعی، نسبت به نمونه سالم کاهش چشم گیری می یابند. همچنین این تغییرات توسط تست مودال نسبت به روش المان محدود، مشهودتر است.
- ۲- برخی از فرکانس های طبیعی دچار تغییر چندانی نشده و یا مقدار تغییرشان بسیار ناچیز است. علت این موضوع می تواند به محل قرارگیری عیب و نوع شکل مود، مرتبط باشد.

۳-۵. مقایسه نتایج آزمایش مودال تجربی و شبیه سازی عددی

در جدول ۷ نتایج به دست آمده از دو روش تجربی و عددی با هم مقایسه شده اند. با توجه به اهمیت نتایج تجربی، فرکانس های تجربی مبنا در نظر گرفته شده و درصد خطا عددی نسبت به آنها به دست آمده اند.

همان طور که مشاهده می شود، نتایج تطابق خوبی داشته و در صد خطا کم بوده که نشان دهنده درستی نتایج شبیه سازی نسبت به تجربی است. بیشتر بودن نتایج فرکانس های طبیعی در تحلیل عددی نسبت به تجربی به علت سفتی بیشتر سازه، امری طبیعی است. همان طوری که مشاهده می شود برای مود پنجم مقدار فرکانس تجربی پوسته با ترک صفر درجه بیشتر از پوسته سالم است که این امر به علت خطای تجربی (خطای کاربر، خطای تجهیزات یا کافی نبودن مودهای ارتعاشی) است.

پس از اطمینان از صحت نتایج عددی، شکل مودهای به دست آمده از روش عددی بررسی می شوند. جدول ۸، پنج شکل مود به دست آمده از حل عددی را برای پوسته سالم و پوسته ترک دار با زاویه صفر درجه و جدول ۹، پنج شکل مود به دست آمده از حل عددی را برای پوسته ترک دار با زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه را نشان می دهد. همان طوری که مشاهده می شود با افزایش درصد عیب در نمونه ها، تغییر در شکل مود نیز افزایش می یابد. همچنین در مودهایی که از خرابی تأثیر یافته اند تغییر شکل مود در محدوده خرابی نمایان بوده و شکل مودهای جدیدی حاصل شده اند.

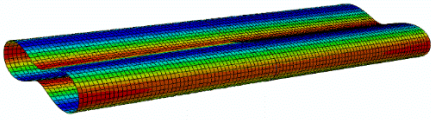
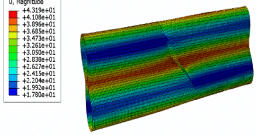
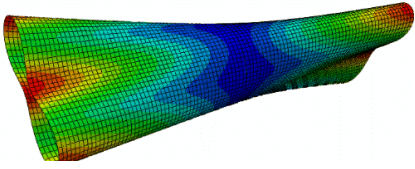
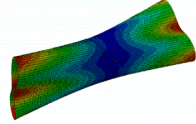
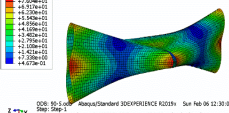
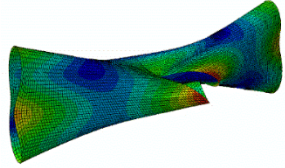
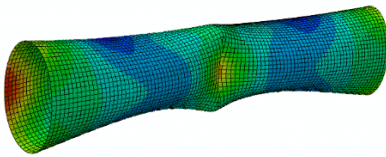
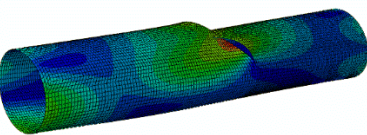
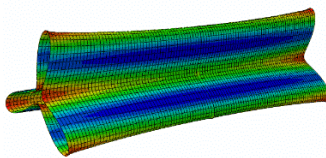
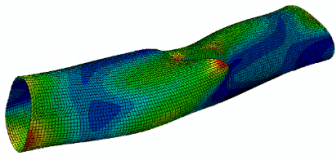
جدول ۷. مقایسه فرکانس های طبیعی [Hz] به دست آمده از روش تجربی و روش عددی و درصد خطای بین آنها

شماره مود	فرکانس نمونه سالم			نمونه با ترک صفر درجه			نمونه با ترک 45 درجه			نمونه با ترک 90 درجه		
	تجربی	عددی	خطا %	تجربی	عددی	خطا %	تجربی	عددی	خطا %	تجربی	عددی	خطا %
۱	۶۸۹	۶۹۶/۲۹	۱/۰۵	۶۷۴/۵	۶۸۱/۹۹	۱/۱۰	۶۷۹/۸۲	۶۹۱/۷۲	۱/۷۲	۶۷۹/۶۲	۶۹۶	۲/۳۵
۲	۶۹۵/۲	۷۰۴/۷۴	۱/۳۵	۶۹۰/۳	۷۰۴/۵۵	۲/۰۲	۶۹۷/۱	۷۰۴/۶۴	۱/۰۴	۶۹۶/۹	۷۰۴/۷۱	۱/۱۱
۳	۱۰۴۲/۵	۱۰۵۴/۶	۱/۱۵	۱۰۱۱	۱۰۳۸/۷	۲/۶۷	۹۶۶/۲	۹۸۱/۶۸	۱/۵۸	۱۰۲۱/۰۷	۱۰۳۳/۵	۱/۲۰
۴	۱۸۹۰/۷	۱۹۶۲/۷	۳/۶۷	۱۸۷۲/۱	۱۸۹۸/۵	۱/۳۹	۱۵۴۴/۸۵	۱۶۰۴/۶	۳/۷۲	۱۶۶۰/۲۸	۱۶۷۷/۶	۱/۰۳
۵	۱۹۱۵/۵	۱۹۷۲/۶	۲/۸۹	۱۹۸۴	۱۹۷۲/۱	۱/۲۲	۱۸۷۶/۸۳	۱۹۲۴	۲/۹۶	۱۹۰۶/۸۱	۱۹۶۲/۲	۲/۸۲

جدول ۸. پنج مود اول آنالیز مودال برای پوسته سالم و پوسته با ترک صفر درجه

مود	مدل سالم	مدل با ترک صفر درجه
اول		
دوم		
سوم		
چهارم		
پنجم		

جدول ۹. پنج مدل اول آنالیز مودال برای پوسته با ترک ۴۵ و ۹۰ درجه

مدل با ترک ۹۰ درجه	مدل با ترک ۴۵ درجه	مود
		اول
		دوم
		سوم
		چهارم
		پنجم

۶. آنالیز واریانس (ANOVA) استخراج معادله

رگرسیون

پیشنهادی آورده شده است به طوری که هرچه مقدار مجموع مربعات بیشتر باشد میزان تأثیرگذاری آن بیشتر است. F-value دارای مقدار ۱۶/۲۶ است، که نشان دهنده درستی مدل بوده و تنها ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که مقدار F-value به این بزرگی به دلیل نوفه ایجاد شود. همچنین اگر مقدار P-values کمتر از ۰/۰۵ باشد پارامتر ارزش بیشتری دارد. بنابراین در این مدل A, B, C, D, E و AB پارامترهای با اهمیت تری هستند در جدول ۱۱، پارامترهای معادله ۱، معادله کدگذاری شده برای فرکانس اول را نشان

روش RSM-CCD پس از پردازش نتایج جدول ۳، یک مدل ریاضی را پیشنهاد می کند. این مدل، برهم کنش میان پارامترها برای فرکانس اول است. تحلیل واریانس مدل پیشنهاد شده برای فرکانس اول در جدول ۱۰ ارائه شده است. پیش بینی مربع واریانس مقدار ۰/۷۶۳۹ و معدل مربع واریانس مقدار ۰/۸۴۵۸ را نشان می دهد که با یکدیگر اختلاف چندانی ندارند یعنی تفاوت کمتر از ۰/۲ است. بنابراین مدل پیشنهاد شده مدل مناسبی برای تحلیل است. در جدول ۱۱، میزان تأثیرگذاری پارامترها بر روی مدل

می‌دهد که مسئله براساس آن حل شده و از این معادله استفاده شود. معادله کدگذاری شده برای شناسایی تأثیر می‌توان برای پیش‌بینی پاسخ به سطوح معین هر عامل نسبی عوامل با مقایسه ضرایب مفید است.

جدول ۱۰ تحلیل واریانس مدل پیشنهاد شده برای فرکانس اول

مدل	پیوستگی p-value	معدل مربع واریانس	پیش‌بینی مربع واریانس	نتیجه
خطی	<۰/۰۰۰۱	۰/۷۵۶۰	۰/۷۰۸۱	-----
برهم‌کش	۰/۰۰۹۰	۰/۸۴۵۰	۰/۷۶۹۴	قابل قبول
درجه دو	۰/۱۲۲۰	۰/۸۶۸۷	۰/۷۲۹۸	-----
مکعبی	۰/۰۹۷۰	۰/۹۳۸۶	۰/۵۴۱۹	نشدنی

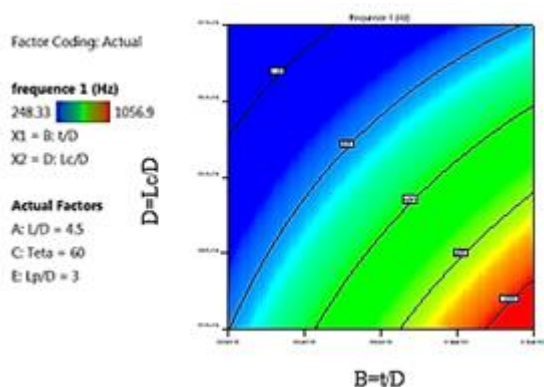
جدول ۱۱. میزان تأثیرگذاری و اهمیت هر پارامتر در مدل انتخاب شده برای فرکانس اول

ANOVA for 2FI model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	۱۵۰۲۰۰۰	۱۵	۱۰۰۱۰۰	۱۶/۲۶	<۰/۰۰۰۱	significant
A-L/D	۳۵۰۳۰۰	۱	۳۵۰۳۰۰	۵۶/۸۹	<۰/۰۰۰۱	significant
B-t/D	۴۲۳۱۰۰	۱	۴۲۳۱۰۰	۶۸/۷۱	<۰/۰۰۰۱	significant
C-Teta	۱۱۲۷۰۰	۱	۱۱۲۷۰۰	۱۸/۳۱	۰/۰۰۰۲	significant
D-Lc/D	۳۵۵۴۰۰	۱	۳۵۵۴۰۰	۵۷/۷۲	<۰/۰۰۰۱	significant
E-Lp/D	۶۷۹۶۱/۸۹	۱	۶۷۹۶۱/۸۹	۱۱/۰۴	۰/۰۰۲۶	significant
AB- L/D ,t/D	۱۱۷۲۰۰	۱	۱۱۷۲۰۰	۱۹/۰۴	۰/۰۰۰۲	significant
AC- L/D Teta	۲۴۱۱۴/۲۸	۱	۲۴۱۱۴/۲۸	۳/۹۲	۰/۰۵۸۱	-----
AD- L/D, Lc/D	۱۴۸۹۶/۲۴	۱	۱۴۸۹۶/۲۴	۲/۴۲	۰/۱۳۱۵	-----
AE- L/D Lp/D	۶۴/۷۰	۱	۶۴/۷۰	-/۰۱۰۵	۰/۹۱۹۱	-----
BC- t/D Teta	۳۷۶۳/۶۵	۱	۳۷۶۳/۶۵	-/۶۱۱۲	۰/۴۴۱۱	-----
BD- t/D Lc/D	۱۸۵۱۹/۴۶	۱	۱۸۵۱۹/۴۶	۳/۰۱	۰/۰۹۴۳	-----
BE- t/D Lp/D	۱۲۴۷۴/۸۹	۱	۱۲۴۷۴/۸۹	۲/۰۳	۰/۱۶۶۱	-----
CD- Teta Lc/D	۷۹۷/۶۰	۱	۷۹۷/۶۰	-/۱۲۹۵	۰/۷۳۱۷	-----
CE- Teta Lp/D	۳۶۵/۸۵	۱	۳۶۵/۸۵	-/۰۵۹۴	۰/۸۰۹۳	-----
DE- Lc/D, Lp/D	-/۱۷۷۰	۱	-/۱۷۷۰	-/۰۰۰۰	۰/۹۹۵۸	-----
Residual	۱۶۶۲۰۰	۲۷	۶۱۵۷/۳۵			
Cor Total	۱۶۶۸۰۰۰	۴۲				

معادله فرکانس‌ها مطابق رابطه ۱ تا ۵ برای آنها استخراج شد. در این روابط هرچه ضریب بزرگ‌تر باشد تأثیر آن بیشتر است.

پس از استخراج نتایج از نرم‌افزار آباکوس برای هر آزمایش مطابق جدول ۳، تحلیلی بر روی آن توسط ANOVA انجام شد.

ترتیب ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول ترک، طول پوسته استوانه‌ای، زاویه ترک و موقعیت ترک است. همچنین نشان می‌دهد که تأثیرگذاری موقعیت ترک بسیار کمتر از بقیه پارامترها است. بیشترین تأثیر هر پارامتر برای فرکانس دوم به ترتیب ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول پوسته استوانه‌ای، طول ترک، زاویه ترک و موقعیت ترک و بیشترین تأثیر هر پارامتر برای فرکانس سوم به ترتیب ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول پوسته استوانه‌ای، طول ترک، زاویه ترک و موقعیت ترک است. بیشترین تأثیر هر پارامتر برای فرکانس چهارم به ترتیب ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول پوسته استوانه‌ای، طول ترک، زاویه ترک و موقعیت ترک است. همچنین بیشترین تأثیر هر پارامتر برای فرکانس پنجم به ترتیب طول پوسته استوانه‌ای، ضخامت پوسته استوانه‌ای، طول ترک، زاویه ترک و موقعیت ترک است. در ادامه برای نمونه نمودار ۲ بعدی دو تا از تأثیرگذارترین پارامترها (ضخامت پوسته و طول ترک) با این شرایط که پارامتر طول پوسته استوانه‌ای حداقل، زاویه و موقعیت ترک مقدار متوسط باشند نمایش داده شده است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. نمودار دوبعدی تأثیر دو پارامتر ضخامت پوسته و طول

ترک در فرکانس اول

۸. نتیجه گیری

در مقاله حاضر تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ترک‌دار با روش شبیه‌سازی عددی (المان محدود) و آزمایشگاهی بررسی شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، با

$$F_1 = +505.63 - 87.86 A + 102.84 B + 55.69 C - 94.26 D - 41.22 E - 60.53 AB - 27.45 AC + 21.58 AD - 1.42 AE + 10.85 BC - 24.06 BD - 19.74 BE - 4.99 CD + 3.38 CE + 0.0744 DE \quad (1)$$

$$F_2 = +743.24 - 52.02 A + 210.63 B + 18.07 C - 32.96 D - 15.25 E - 48.65 AB + 10.21 AC - 30.70 AD - 22.12 AE + 14.11 BC - 31.69 BD - 17.22 BE - 4.36 CD - 2.02 CE - 13.42 DE \quad (2)$$

$$F_3 = +819.39 - 26.62 A + 251.04 B + 15.50 C - 18.90 D + 2.05 E \quad (3)$$

$$F_4 = +818.98 - 207.80 A + 233.23 B + 14.72 C - 38.81 D + 24.00 E + 14.98 AB - 7.68 AC + 30.42 AD - 40.59 AE + 1.66 BC + 4.32 BD - 6.74 BE - 4.09 CD - 10.00 CE + 26.84 DE + 109.44 A^2 + 15.22 B^2 + 20.46 C^2 + 21.21 D^2 + 34.09 E^2 \quad (4)$$

$$F_5 = +1010.82 - 461.21 A + 272.81 B + 53.04 C - 62.81 D + 26.12 E - 90.67 AB - 43.67 AC + 46.53 AD - 61.57 AE + 10.22 BC - 13.13 BD + 60.13 BE + 22.16 CD + 5.30 CE + 7.83 DE + 193.97 A^2 + 21.82 B^2 + 28.49 C^2 + 33.23 D^2 + 56.99 E^2 \quad (5)$$

۷. بحث بروی نتایج

در این قسمت با توجه به مراحل قبل به بررسی نمودارهای حاصل از تحلیل برای مطالعه بر روی تأثیر پارامترها پرداخته شده است. بر طبق معادله فرکانسی و ضرایب هر پارامتر به ترتیب برای فرکانس اول، بیشترین تأثیر هر پارامتر به

- فرکانس طبیعی به مقدار $32/7$ درصد کاهش می‌یابد.
۴. با کاهش زاویه ترک مقدار فرکانس کاهش می‌یابد. کاهش زاویه ترک در فرکانس اول محسوس‌تر از فرکانس‌های دیگر است.
۵. با کاهش 50 درصدی زاویه ترک، فرکانس به مقدار $24/5$ درصد کاهش می‌یابد.
۶. در بین پارامترها، در پنجمین پارامتر موقعیت ترک کمترین اثر را بر فرکانس‌ها دارد. البته در فرکانس چهارم جزو چهارمین پارامتر تأثیرگذار است. در فرکانس چهارم کم‌اثرترین پارامتر زاویه ترک است.
۷. هرچه ترک به‌وسط لوله نزدیک‌تر باشد فرکانس کمتر می‌شود، بنابراین وقتی ترک در مرکز و در جهت طولی پوسته باشد، فرکانس طبیعی بیشتر کاهش می‌یابد.
۸. فرکانس طبیعی در تعداد مشخصی از حالت‌ها، بسته به محل ترک تغییر می‌کند. این حالت‌ها را می‌توان به‌عنوان الگویی در نظر گرفت که به‌طور مداوم کنترل می‌شود تا ترک پوسته‌های استوانه‌ای تشخیص داده شود.

ایجاد ترک در مدل آزمایشگاهی، فرکانس‌های پوسته استوانه‌ای ترک‌دار اندازه‌گیری شده و با حل عددی مقایسه می‌گردند. اثر پارامترهای مختلف نظیر طول ترک، زاویه ترک، عمق ترک، محل ترک، ضخامت پوسته، طول پوسته تحت شرایط مرزی دو سر آزاد بر روی فرکانس‌های ارتعاشی بررسی شده است. برای تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر روی فرکانس‌های ارتعاشی، طراحی آزمونی با استفاده از RSM-CCD انجام شده است. پس از تحلیل نتایج زیر حاصل شده است.

۱. اثر ترک بر ارتعاش آزاد پوسته‌های کوتاه‌تر و نازک‌تر بیشتر است.
۲. براساس نتایج به‌دست آمده بین پارامترهای ترک، طول ترک بیشترین تأثیر را بر کاهش فرکانس دارد. همچنین طول ترک بیشترین تأثیر را بر فرکانس اول می‌گذارد. محدوده تغییر فرکانس در فرکانس اول 200 هرتز و در فرکانس پنجم 100 هرتز در فرکانس‌های دیگر تأثیر کمتر از 100 هرتز دارد.
۳. با افزایش 67 درصدی نسبت طول ترک به قطر $(\frac{L_c}{D})$ ،

۹. مآخذ

- [1] Lee, Usik, and Jinho Shin, "A frequency response function-based structural damage identification method", *Computers & Structures*, 2002, Vol.80, no.2, pp.117-132.
- [2] Naeimi_Abkenari, Arash, and Mahdi Karimi, "Experimental and numerical investigation of interlayer crack effects on the Free-vibration of corrugated-face sheet composite sandwich plates", *Modares Mechanical Engineering*, 2016, Vol.16, no.5, pp.39-50.
- [۳] حسن نژاد، رضا، "توسعه تحلیل ارتعاشات عرضی سازه‌های ترک‌دار با مدل غیرخطی ترک"، ۱۳۸۹، پایان نامه دکترای تخصصی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز.
- [4] Das, R. R., A. Chakraborty, A. Guchhait, and A. Singla, "Free vibration Analyses of cracked Laminate Cylindrical Shells made with FRP Composites", *International Journal of Current Engineering and technology*, 2014, pp. 615-619.
- [5] Vafai, A., M. Javidruzvi, J. F. Chen, and J. C. Chilton, "Effect of cracks on vibration, buckling and parametric instability of cylindrical shells", In *Advances in Steel Structures (ICASS'02)*, Elsevier, 2002, pp.755-762.
- [6] Nasirmanesh, Amir, and Soheil Mohammad, "An extended finite element framework for vibration analysis of cracked FGM shells", *Composite Structures*, 2017, Vol.180, p.298-315.

- [7] Nguyen-Thoi, M. H., L. Le-Anh, V. Ho-Huu, H. Dang-Trung, and T. Nguyen-Thoi, "An extended cell-based smoothed discrete shear gap method (XCS-FEM-DSG3) for free vibration analysis of cracked Reissner-Mindlin shells", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2015, Vol.9, pp.341-358.
- [8] Javidruzi, M., A. Vafai, Jian Fei Chen, and J. C. Chilton, "Vibration, buckling and dynamic stability of cracked cylindrical shells", *Thin-walled structures*, 2004, Vol.42, no.1, pp.79-99.
- [9] Xin, Jianqiang, Jianjun Wang, Jianyao Yao, and Qinkai Han, "Vibration, buckling and dynamic stability of a cracked cylindrical shell with time-varying rotating speed", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2011, Vol.39, no.4, pp.461-490.
- [10] Rehman, Shaik Mujeebur, and Chalamalasetti Srinivasa Rao, "Vibration buckling and fracture analysis of a cracked cylindrical shell", *International Journal of Design Engineering*, 2017, Vol.7, no.1, p.33-53.
- [۱۱] آذرافزا، ر.، قدیمی، م.، هرسینی، ا.، "مطالعه عددی و آزمایشگاهی اثر جدایش بین لایه‌ای در صفحات کامپوزیتی انحنادار بر خواص مکانیکی و ارتعاشی"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش، ۱۳۹۸، سال هشتم، شماره ۱۵، صفحه ۳-۱۷.
- [12] Tiwari, Prakash, and P. V. Joshi, "Analytical modeling for vibration analysis of partially cracked Cylindrical Shell", 2018.
- [13] Velayatparvardeh, M. H., and A. Shooshtari, "Numerical and Experimental Analysis of the Effects of Crack on Vibration Characteristics of GFRP-stiffened Pipes", *Journal of Stress Analysis*, 2019, Vol.4, no.1, pp.99-112.
- [14] Googarchin, Hamed Saeidi, and Kasra Moazzez, "Analytical solution for free vibration of cracked orthotropic cylindrical shells", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, Vol.153, pp.254-270.
- [15] Das, R. R., A. Chakraborty, A. Guchhait, and A. Singla, "Free vibration Analyses of cracked Laminate Cylindrical Shells made with FRP Composites", *International Journal of Current Engineering and technology*, 2014, pp.615-619.
- [16] Jweeg, Muhsin J., Ali S. Hammood, and Muhannad Al-Waily, "Experimental and numerical study of oblique crack effect on natural frequency of different composite plate structure types", *Asian Transactions on Engineering (ATE ISSN: 2221-4267) Volume 2*, 2012.
- [17] Mishra, Itishree, and Shishir Kumar Sahu, "Modal analysis of woven fiber composite plates with different boundary conditions" *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2015, Vol.15, no.01, p.1540001.

پی‌نوشت:

1. Abaqus
2. Response Surface Methodology Central composite design (RSM-CCD)
3. ANSYS Software
4. Stinger
5. Transducer
6. Frequency Response Function (FRF)