

Effect of Orders of Scattering in Linear Grating of Fibrous Reinforced Composites Using Resonance Ultrasonic Spectroscopy

Ehsan Hossein Zadeh Khezri, Sina Sodagar*

Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

*sodagar@put.ac.ir

Abstract

In this paper, resonance ultrasonic spectroscopy is employed to evaluate a linear grating of fibrous composite materials. The ultrasonic longitudinal wave scattering from the embedded linear grating in an elastic matrix is simulated using finite element method. To involve the frequency effects of the measurement system, the modified short-pulse method of isolation and identification of resonances (MIIR) is employed to calculate the resonance modes and frequencies of the elastic fibers. The conformity conditions of the obtained results from analytical methods and the short pulse MIIR method are then investigated, including various orders of scattering. The FE-based resonance ultrasonic spectroscopy method is employed to investigate the behavior of the backscattered resonance spectrum for a linear grating of two fibers embedded in an epoxy matrix and evaluate the effects of grating structure and measurement system. The obtained results show that, due to the second order of scattering, variation of the transducer position with respect to the linear grating of fibers can shift the detected resonance frequencies.

Keywords: Fibrous composite material, Linear array, Ultrasonic waves, Resonance ultrasonic spectroscopy

بررسی تأثیر مراتب پراکندگی در یک شبکه خطی تقویت شده الیافی با استفاده از طیف سنجی تشدید فراصوتی

احسان حسین زاده خضری، سینا سوداگر*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

*sodagar@put.ac.ir

چکیده

طیف سنجی تشدید فراصوتی یکی از روش‌های تئوری پراکندگی تشدید است که امکان شناسایی و ارزیابی غیرمخرب یک جسم الاستیک تحت تابش امواج فراصوتی با استفاده از مشخصات فرکانسی امواج پراکندگی دریافتی را فراهم می‌کند. در این مقاله، از طیف سنجی تشدید فراصوتی برای بررسی و مطالعه مشخصات یک ماده مرکب تقویت شده الیافی استفاده می‌شود. بدین منظور، پراکندگی امواج فراصوتی از شبکه‌ای خطی از الیاف قرار گرفته در ماتریس اپوکسی تحت تابش امواج فراصوتی طولی با بهره‌گیری از روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود. شناسایی فرکانس‌ها و مدهای تشدید طیف پراکندگی بازگشتی با به‌کارگیری روش تفکیک و شناسایی تشدید پالس کوتاه و با اعمال اثرات فرکانسی سیستم اندازه‌گیری انجام می‌شود. شرایط مطابقت نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی با نتایج حاصل از روش‌های آزمایشگاهی شناسایی و تفکیک مدها در حوزه فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. طیف تشدید مربوط به میدان پراکندگی بازگشتی از شبکه‌ای خطی از الیاف جاسازی شده در ماتریس اپوکسی تحت تابش عمود امواج فراصوتی محاسبه و تغییرات فرکانس‌های تشدید تحت تأثیر ساختار شبکه و سیستم اندازه‌گیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در طیف سنجی تشدید فراصوتی از شبکه‌های خطی از الیاف، برخلاف پراکندگی منفرد، موقعیت فرکانس‌های تشدید علاوه بر مشخصات فیزیکی و مادی الیاف و ماتریس به ساختار شبکه و موقعیت تراگذار در سیستم اندازه‌گیری نیز بستگی دارد.

کلمات کلیدی: مواد مرکب الیافی، شبکه‌های خطی، امواج فراصوتی، طیف سنجی تشدید فراصوتی.

۱- مقدمه

طیف سنجی تشدید فراصوتی^۱ (RUS) یکی از روش‌های ارزیابی غیرمخرب است که با بهره‌گیری از اطلاعات مودها و فرکانسهای تشدید جسم الاستیک در طیف پراکندگی امواج، به شناسایی اطلاعات مربوط به مشخصات فیزیکی و هندسی جسم الاستیک تحت تابش امواج فراصوتی می‌پردازد. با این وجود، پیچیدگی موجود در فیزیک پدیده پراکندگی و رفتار امواج سطحی و زیر سطحی بر روی سطح جسم تحت تابش و مدهای تشدید مربوطه عملاً استفاده از این امواج را برای ارزیابی غیرمخرب و تعیین خصوصیات ماده دشوار می‌سازد.

در سال ۱۹۵۱، مطالعات اولیه بر روی پراکندگی امواج صوتی از اجسام الاستیک توسط فاران [۱] منجر به ارائه

یک پاسخ تحلیلی ریاضی برای پراکندگی امواج از اجسام استوانه‌ای و کروی الاستیک غوطه‌ور شد. یانگ و برتراند [۲] فرمولاسیون ساده‌ای برای پراکندگی میدان فشار ناشی از دو استوانه صلب مجاور ارائه کردند. تئوری پراکندگی چندگانه برای شبکه‌های الاستیک از استوانه‌ها [۳]، شبکه‌های بزرگ [۴]، پوسته‌های استوانه‌ای [۵] و همچنین شبکه‌ای از استوانه‌های جاسازی شده در ماتریس جامد [۶] توسعه پیدا کرد. در سال ۲۰۱۶، طاهری و هنرور [۷] پراکندگی چندگانه از استوانه‌های همسانگرد جاسازی شده در یک ماتریس ویسکوالاستیک را با استفاده از روشی مبتنی بر روش بسط مودهای نرمال مورد مطالعه قرار دادند.

روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری میدان پراکندگی امواج از اجسام الاستیک همزمان با این تحقیقات مورد مطالعه

¹Resonance ultrasonic spectroscopy

یک سیگنال بازگشتی حاصل از تداخل سازنده امواج در استوانه تشکیل می‌شود که شامل اطلاعات فرکانسهای تشدید استوانه بوده و با دامنه زمینه ترکیب می‌شوند [11]. در طیف سنجی تشدید فراصوتی تشدیدهای تولید شده توسط جسم الاستیک تحت تابش امواج فراصوتی شناسایی شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

در این پژوهش برای شناسایی و مطالعه مودها و فرکانسهای تشدید از تکنیک شناسایی و تفکیک تشدید (MIIR) استفاده می‌شود. در این روش از یک تراگذار فراصوتی با پهنای باند فرکانسی مشخص برای ارسال پالس فراصوتی به جسم استفاده می‌شود. پراکندگی امواج فراصوتی از جسم توسط تراگذار گیرنده به صورت یک سیگنال بازگشتی دریافت می‌شود. بر اساس تئوری پراکندگی تشدید طیف فرکانسی این سیگنال ترکیبی از دو بخش اصلی طیف فرکانسی مربوط به تراگذار و سیستم اندازه‌گیری، و طیف فرکانسی امواج پراکندگی بازگشتی تولید شده توسط جسم است. طیف فرکانسی تراگذار و سیستم اندازه‌گیری جهت تفکیک و شناسایی تشدیدهای مربوط به جسم تحت تابش امواج ارسالی از طیف فرکانسی سیگنال دریافتی جداسازی می‌شوند. بدین منظور به جای استفاده از طیف بازگشتی یک استوانه سخت، که در پژوهشهای پیشین مورد استفاده قرار گرفته [9]، از طیف فرکانسی بخش اول سیگنال زمانی دریافت شده، اکوی بازتابش، به عنوان طیف مرجع استفاده می‌شود [11].

با جداسازی پاسخ فرکانسی سیستم اندازه‌گیری از طیف فرکانسی سیگنال دریافتی و ترسیم طیف بدست آمده بر حسب فرکانس طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور⁵، تابع فرم، بدست می‌آید. بدین منظور تابع فرم استوانه با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [11]:

(1)

$$|f_{\infty}| = \left(\frac{S(\omega)}{S'(\omega)} \right) \left| \frac{-2}{\sqrt{\pi i k a}} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{J'_n(Ka)}{H_n^{(1)'}(Ka)} \cos(n\pi) \right|$$

بطوریکه در این رابطه $S(\omega)$ طیف فرکانسی سیگنال دریافتی، $S'(\omega)$ طیف فرکانسی موج بازتابش، $K = \omega/c$ عدد موج، a شعاع استوانه و ε_n تابع نیومن است.

قرار گرفت. ماز و همکارانش [8] با استفاده از روش تفکیک شناسایی تشدید¹ (MIIR) طیف فرکانسی شبه خطی² پراکندگی آزمایشگاهی را بدست آورد. دبیلی [9] با استفاده از این روش و ارسال امواج پالس کوتاه روش جدیدی برای اندازه‌گیری سریع‌تر طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ارائه کرد. بیٹی و همکارانش [10] با استفاده از روش پالس کوتاه MIIR به ارائه نتایج آزمایشگاهی طیف پراکندگی بازگشتی از استوانه‌ای فولادی و مسی جاسازی شده در محیط اپوکسی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از روش تحلیلی پرداختند. در سال 2011 سوداگر و همکارانش [11] با ارائه تکنیک جدیدی برای روش پالس کوتاه MIIR، تاثیر ابعاد استوانه تحت تابش را بر مشخصات فرکانسی اکوی بازتابش موج پراکندگی مورد مطالعه قرار دادند.

در این مقاله ابتدا به بررسی شرایط مطابقت نتایج حاصل از تحلیل‌های ریاضی پراکندگی چندگانه از شبکه‌های خطی الیاف در مواد مرکب تقویت شده الیافی و نتایج آزمایشگاهی حاصل از روش MIIR، پرداخته می‌شود. سپس از طیف‌سنجی تشدید فراصوتی برای مطالعه میدان پراکندگی ناشی از الیاف استوانه‌ای در ماتریس جامد استفاده می‌شود. بدین منظور با شبیه‌سازی المان محدود امواج تابیده شده توسط یک تراگذار فراصوتی به الیاف استوانه‌ای الاستیک، میدان پراکندگی امواج منتشر شده از الیاف جاسازی شده در ماتریس الاستیک به صورت عددی محاسبه و تعیین می‌گردد. سپس با به‌کارگیری روش پالس کوتاه MIIR و طیف سنجی تشدید فراصوتی، تاثیر پارامترهای ساختاری شبکه خطی و سیستم اندازه‌گیری بر روی تغییرات فرکانسهای تشدید اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- طیف سنجی تشدید فراصوتی

بر اساس تئوری پراکندگی تشدید³ طیف فرکانسی سیگنال بازگشتی حاصل از پراکندگی امواج صوتی از یک استوانه از یک "دامنه زمینه"⁴ مربوط به موج بازتابش و

¹Method of identification and isolation of resonances

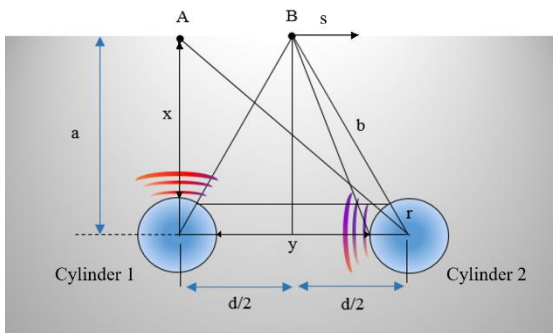
²Quasi-linear

³Resonance scattering theory

⁴Background amplitude

⁵Far-field backscattered frequency spectrum

در موقعیت B قرار گرفته باشد، ابتدا میدان‌های پراکندگی طولی ناشی از مرتبه اول پراکندگی از هر استوانه به نقطه B می‌رسد. سپس مرتبه دوم پراکندگی حاصل از هر استوانه با اختلاف زمانی که تابعی از فاصله دو استوانه و سرعت موج طولی در ماتریس است تولید شده و با اختلاف زمانی معینی توسط تراگذار دریافت خواهد شد. بررسی شرایط و مشخصات هندسی قرارگیری استوانه‌های مجاور در ماتریس نشان می‌دهد وجود پدیده تبدیل مود در تابش امواج طولی به استوانه‌ها و پراکندگی امواج عرضی به همراه امواج طولی در اثر این پدیده، موجب می‌شود در صورتیکه فاصله دو استوانه از یکدیگر نسبت به فاصله استوانه از محل قرارگیری تراگذار از اندازه معینی بیشتر باشد، پیش از رسیدن امواج مرتبه دوم پراکندگی به تراگذار، امواج عرضی ناشی از پراکندگی مرتبه اول به محل تراگذار خواهد رسید و توسط تراگذار دریافت خواهند شد. در این حالت عملاً نتایج حاصل از روش پالس کوتاه MIIR با نتایج حاصل از تحلیل‌های ریاضی مطابقت خواهند داشت.



شکل ۲- نمای شماتیک دو فیبر جاسازی شده در ماتریس و مشخصات هندسی

اگر سرعت امواج طولی و عرضی در محیط ماتریس به ترتیب با C_L و C_T نشان داده شوند، نسبت سرعت موج عرضی به سرعت موج طولی برابر است با:

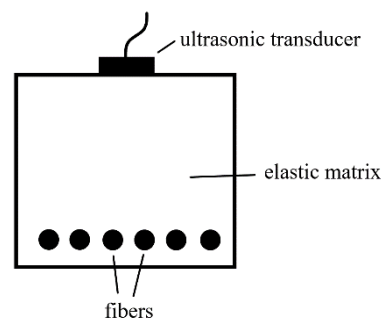
$$n = \frac{C_T}{C_L} \quad (2)$$

همانگونه که بیان شد، برای وجود امکان بررسی اثر امواج پراکندگی هر استوانه بر استوانه مجاور (پراکندگی مرتبه دوم) در روش پالس کوتاه MIIR، زمان پرواز موج طولی از استوانه ۱ تا تراگذار گیرنده، t_1 ، باید بیشتر از زمان پرواز موج عرضی ناشی از تابش موج پراکندگی استوانه ۲ بر

۳- مدل‌سازی پراکندگی چندگانه امواج فراصوتی از دو فیبر مجاور

در آزمون فراصوتی از مواد مرکب تقویت شده الیافی، با تابش امواج به شبکه‌ای از الیاف مجاور، علاوه بر بازتابش امواج فراصوتی از الیاف، پراکندگی امواج از هر یک از الیاف رخ می‌دهد. در شکل ۱ نمای شماتیکی از ساختار آزمون فراصوتی و چگونگی قرارگیری تراگذار بر روی قطعه برای ارسال امواج فراصوتی به الیاف استوانه‌ای در ماتریس نشان داده شده است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های ریاضی و همچنین نتایج تجربی نشان می‌دهد تابش امواج طولی به یک استوانه الاستیک جاسازی شده در یک ماتریس، موجب پراکندگی هر دو مود امواج طولی و عرضی از استوانه می‌شود. تابش این امواج پراکندگی به استوانه‌های مجاور موجب پراکندگی امواجی از استوانه تحت تابش می‌شود که با نام امواج پراکندگی مرتبه دوم^۱ شناخته می‌شوند. در شکل ۲ نمای شماتیک ساختار هندسی دو فیبر مجاور جاسازی شده در یک ماتریس الاستیک و مشخصات هندسی آنها نشان داده شده است.

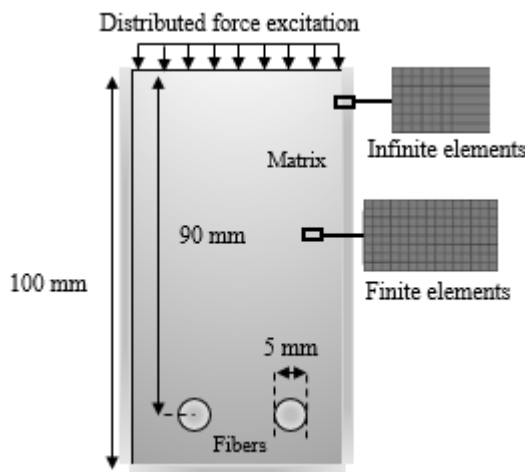


شکل ۱- نمای شماتیک آزمون فراصوتی یک ماده مرکب تقویت شده فیبری

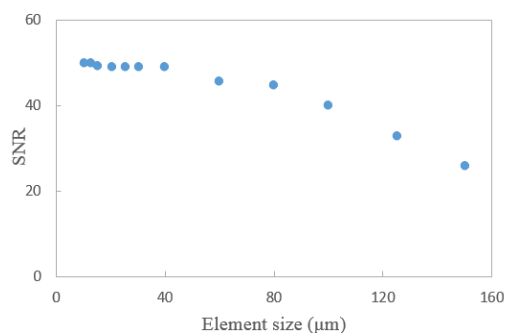
همانگونه که بیان شد میدان پراکندگی مرتبه اول ایجاد شده از هر استوانه می‌تواند بصورت موج تابشی به استوانه‌های مجاور بتابد و پراکندگی مرتبه دوم تولید نماید. در روش‌های تحلیلی عموماً مرتبه‌های مختلف پراکندگی از استوانه‌های مختلف برای بررسی طیف پراکندگی بازگشتی از شبکه استوانه‌ای، به منظور مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاصل از طیف سنجی تشدید فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالتی که تراگذار گیرنده بر روی سطح قطعه

¹Second-order scattering

بصورت یک تابع فشار هنینگ^۳ در محل قرارگیری تراگذار بر روی سطح قطعه مدل سازی شده است [۱۱]. در شکل ۳ ساختار شماتیک مدل المان محدود و سیستم اندازه گیری نشان داده شده است. به منظور حذف تاثیر تداخل ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج در قطعه و تاثیرگذاری بر امواج دریافتی، از المانهای نامحدود CINPE4R در دیواره های مرزی ماتریس استفاده شده است. به منظور بررسی همگرایی نتایج حاصل از مدل ارائه شده، شبیه سازی المان محدود با استفاده از یک تراگذار فراصوتی با فرکانس میانی 1 MHz و تعداد سیکل $N = 2$ در تابع هنینگ بر روی سطح قطعه مورد آزمون انجام شده است. در شکل ۴ نمودار همگرایی نسبت سیگنال به نویز^۴ (SNR) بر حسب اندازه المانها نشان داده شده است. بررسی تغییرات SNR نشان می دهد، با استفاده از المانهایی با اندازه های کوچکتر از 40 μm نتایج بدست آمده از مدل المان محدود همگرا می شود.



شکل ۳- نمای شماتیک هندسی مسئله پراکندگی از دو فیبر استوانه ای مجاور و ساختار المانهای محدود و نامحدود



شکل ۴- نمودار همگرایی SNR با تغییر اندازه المانها

استوانه ۱، t_2 ، باشد. در صورتیکه تراگذار بر روی سطح قطعه در موقعیت B قرار گرفته باشد، فاصله مرکز به مرکز استوانه ها برای دریافت پراکندگی مرتبه دوم به استوانه مجاور با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود:

$$\frac{x+y}{C_L} \leq \frac{x}{nC_L} \quad (۳)$$

$$y \leq \frac{1-n}{n}x \quad (۴)$$

بطوریکه x ، فاصله ی سطح بالایی استوانه از سطح قطعه و y ، نزدیکترین فاصله سطح های دو استوانه مجاور از یکدیگر و n مرتبه پراکندگی است. در صورتیکه شعاع دو استوانه برابر r در نظر گرفته شود، خواهیم داشت.

$$x = a - ar(a^2 + \frac{d^2}{4})^{-1/2} \quad (۵)$$

بطوریکه $x = a - r$ و $y = d - 2r$ در این حالت شرط تطابق نتایج حاصل از تحلیل ریاضی با نتایج حاصل از روش MIIR پالس کوتاه را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$d \leq \left(\frac{1-n}{n}\right) \left(a - ar(a^2 + \frac{d^2}{4})^{-1/2}\right) + 2r \quad (۶)$$

۴- مدل سازی المان محدود

به منظور بررسی رفتار امواج در پراکندگی چندگانه، شبیه سازی رفتار پراکندگی چندگانه امواج فراصوتی از شبکه ای از الیاف جاسازی شده در یک ماتریس اپوکسی، با استفاده از روش المان محدود صریح^۱ در محیط نرم افزار اباکوس^۲ انجام شده است. ساختار ماده مرکب به صورت دو فیبر استوانه ای با مقطع دایره ای با قطر 5 mm که در یک ماتریس از جنس اپوکسی با ابعاد 30×100 mm جاسازی شده، مدلسازی شده است. جنس استوانه ها از فولاد در نظر گرفته شده است. برای المان بندی استوانه ها و ماتریس از المان های کرنش صفحه ای چهار گره ای CPE4R استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات الاستیک و صوتی مواد داده شده است. پالس تحریک ناشی از تراگذار پیزوالکتریک

^۳Hanning function

^۴Signal-to-noise ratio

^۱Explicit method

^۲ABAQUS/explicit

جدول ۱- مشخصات و ثوابت الاستیک مواد

ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	سرعت موج طولی	سرعت موج عرضی
فولاد	7800	208	0.28	5890	3230
اپوکسی	1129	5.32	0.33	2654	1331

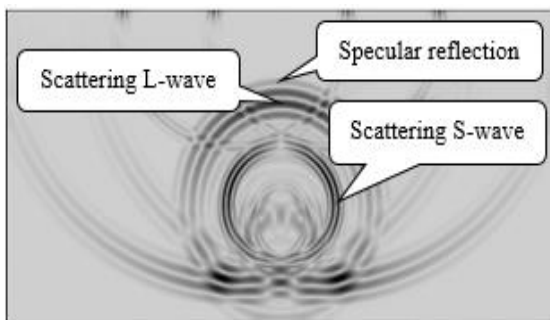
۵- ارائه نتایج و بحث

ابتدا صحت نتایج حاصل از مدل المان محدود ارائه شده برای پراکندگی امواج فراصوتی از یک استوانه فولادی با شعاع 2.5 mm که در یک ماتریس اپوکسی با ابعاد $30 \times 100 \text{ mm}$ و به فاصله 25 mm از سطح قطعه جاسازی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. ارسال امواج با استفاده از یک تراگذار فرستنده با قطر 10 mm بر روی سطح قطعه شبیه سازی شده است. پهنای باند فرکانسی تراگذار فرستنده 0.5 – 1.5 MHz و فرکانس میانی آن 1 MHz است.

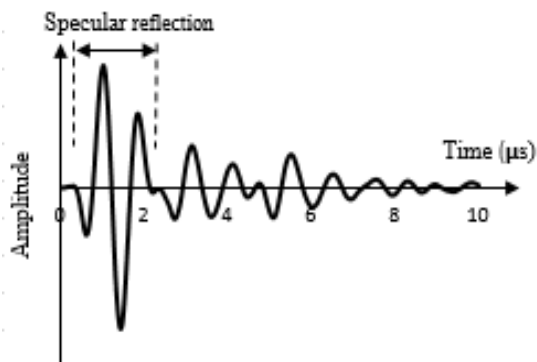
در شکل ۵، مودهای مختلف امواج فراصوتی منتشر شده در قطعه پس از برخورد موج تابش طولی به استوانه جاسازی شده در ماتریس نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود پس از برخورد موج ارسالی با استوانه جاسازی شده در ماتریس اپوکسی دو دسته موج بصورت استوانه ای در ماتریس پراکنده می شود. بررسی سرعت انتشار این امواج در محیط اپوکسی نشان می دهد سرعت این امواج با سرعت امواج طولی و عرضی در قطعه منطبق است. همانگونه که مشاهده می شود مشابه پدیده تبدیل مود در برخورد امواج صوتی به مرز مشترک دو محیط، در پراکندگی^۱ نیز رفتار تبدیل مود مشابهی مشاهده می شود. در این حالت پس از تابش امواج طولی به استوانه دو دسته امواج طولی و عرضی از استوانه در محیط ماتریس پراکنده می شود.

سیگنال زمانی موج پراکندگی بازگشتی^۲ دریافتی توسط تراگذار گیرنده در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل اکوی مربوط به بازتابش از سطح استوانه^۳ در بخش اول سیگنال مشاهده می شود. پس از این اکوی بازتابش اولیه، اکوهای مربوط به امواج پراکندگی طولی از استوانه دریافت می شوند. با جایگزین کردن طیف فرکانسی

سیگنال بازگشتی و اکوی بازتابش در معادله ۱، طیف پراکندگی بازگشتی ناحیه دور، تابع فرم^۴، برای استوانه جاسازی شده در ماتریس اپوکسی محاسبه می شود. در شکل ۷ نتایج بدست آمده از این روش با نتایج حاصل از فرمولاسیون ریاضی بیان شده در مرجع [۱۲] برای پهنای باند فرکانسی موثر تراگذار، فرکانس بی بعد Ka ، نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان دهنده مطابقت مناسب نتایج بدست آمده با نتایج تحلیلی در فرکانسهای تشدید و همچنین در شکل کلی منحنی تابع فرم است.



شکل ۵- پراکندگی امواج فراصوتی پس از برخورد موج تابشی با فیبر استوانه ای جاسازی شده در ماتریس اپوکسی



شکل ۶- سیگنال زمانی دریافتی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور از استوانه

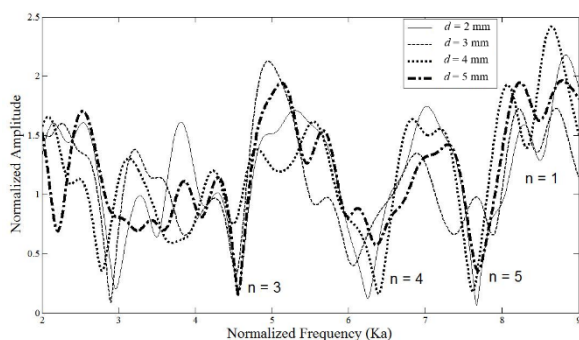
¹Wave scattering

²Backscattered echoes

³Specular reflection

⁴Form function

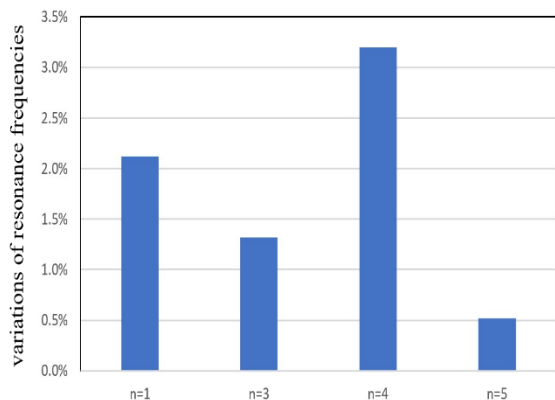
مربوط به موده‌های مختلف تشدید در اثر افزایش فاصله دو استوانه نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله استوانه‌ها از 2mm تا 5mm، فرکانس تشدید مود سوم تا حدود 3% نسبت به فاصله 2mm افزایش نشان می‌دهد. همچنین تغییرات فرکانسهای تشدید در سایر موده‌ها در این شکل نشان دهنده تغییر حدود 2% فرکانس تشدید مود اول و حدود 1% تغییر در فرکانس تشدید مربوط به مود سوم است.



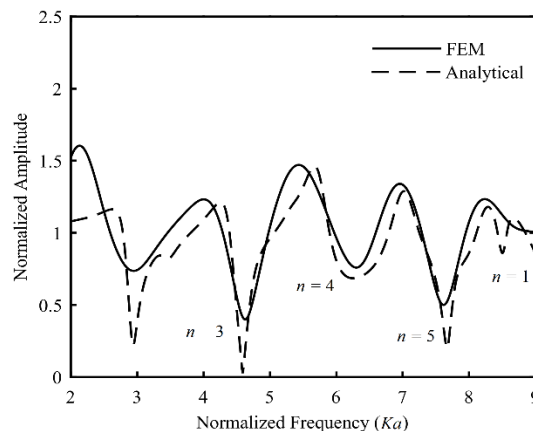
شکل ۸- تغییرات طیف تشدید پراکندگی بازگشتی، تابع فرم، از دو فیبر استوانه‌ای

جدول ۲- فرکانسهای تشدید (بی بعد شده) شبکه خطی متشکل از دو استوانه فولادی برای موده‌های مختلف

distance (mm)				
5	4	3	2	
8.49	8.32	8.46	8.50	n = 1
4.56	4.50	4.53	4.56	n = 3
6.35	6.39	6.05	6.25	n = 4
7.69	7.62	7.67	7.66	n = 5



شکل ۹- بیشترین تغییرات فرکانسهای تشدید در موده‌های مختلف



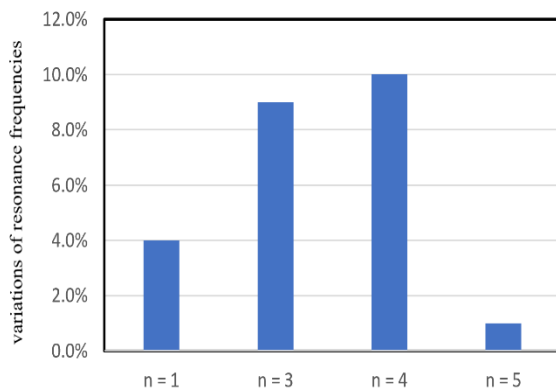
شکل ۷- تابع فرم استوانه فولادی جاسازی شده در ماتریس اپوکسی

به منظور بررسی تاثیر ساختار شبکه در پراکندگی امواج فراصوتی از مواد مرکب تقویت شده الیافی، یک ساختار خطی از الیاف استوانه‌ای شکل جاسازی شده در ماتریس اپوکسی شبیه سازی شده است. شکل ۱ را ببینید. همانگونه که در بخش قبل بیان شد، در پراکندگی امواج فراصوتی از یک شبکه خطی متشکل از دو استوانه مجاور علاوه بر امواج ارسالی از تراگذار فرستنده، میدان‌های پراکندگی طولی و عرضی تولید شده از هر یک از استوانه‌ها به صورت موج تابش بر استوانه مجاور تابیده شده و موجب تولید امواج مرتبه دوم پراکندگی می‌شود. به منظور مطالعه تاثیر این میدان‌های پراکندگی ثانویه بر رفتار طیف تشدید دریافتی از شبکه، یک شبکه خطی متشکل از دو فیبر استوانه‌ای شکل از جنس فولاد با شعاع 2.5 mm و فاصله 2 mm از یکدیگر در ماتریس اپوکسی در فاصله 90 mm از سطح قطعه مدل‌سازی شده است. در شکل ۳ نمای شماتیک هندسی قطعه و ساختار المان‌ها برای مدل‌سازی مسئله نشان داده شده است.

به منظور بررسی تاثیر تراکم الیاف در ماده مرکب بر طیف فرکانسی، با بهره‌گیری از مدل ارائه شده، طیف فرکانسی تشدید برای چهار فاصله مختلف استوانه‌ها 3mm، 2mm، 4mm و 5mm محاسبه و تابع فرم مربوطه ترسیم شده است. در شکل ۸ تابع فرم مربوطه برای این چهار فاصله محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در جدول ۲ فرکانسهای تشدید، بی بعد شده، برای فاصله‌های مختلف استوانه‌ها و به تفکیک موده‌های مربوط به هر تشدید نشان داده شده است. در شکل ۹ بیشترین میزان تغییرات

جدول ۳- فرکانسهای تشدید (بی بعد شده) شبکه خطی متشکل از دو استوانه فولادی با تغییر موقعیت تراگذار

positions (mm)		4	3	2	1	0	
8.46	8.46	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	n = 1
4.65	4.63	4.59	4.52	4.56	4.56	4.56	n = 3
6.35	6.35	6.29	6.17	6.25	6.25	6.25	n = 4
7.66	7.66	7.65	7.65	7.67	7.67	7.67	n = 5



شکل ۱۰- بیشترین تغییرات فرکانسهای تشدید با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از طیف سنجی تشدید فراصوتی برای بررسی و مطالعه مشخصات مواد مرکب تقویت شده الیافی استفاده می‌شود. شناسایی فرکانسها و مودهای تشدید طیف پراکندگی بازگشتی با به‌کارگیری روش تفکیک و شناسایی تشدید پالس کوتاه و با اعمال اثرات فرکانسی سیستم اندازه‌گیری انجام می‌شود. ابتدا با بررسی مراتب مختلف پراکندگی حاصل از الیاف مختلف جاسازی شده در ماتریس برای یک شبکه خطی، شرایط مطابقت نتایج حاصل روشهای تحلیلی با نتایج حاصل از روشهای آزمایشگاهی شناسایی و تفکیک مودها در حوزه فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با بهره‌گیری از شبیه‌سازی المان محدود و به‌کارگیری روش طیف تشدید پراکندگی بازگشتی از شبکه‌ای خطی از الیاف جاسازی شده در ماتریس اپوکسی تحت تابش عمود امواج فراصوتی محاسبه و ترسیم شده است. بررسی رفتار فرکانسی مودهای تشدید نشان می‌دهد که تغییر فاصله الیاف در یک شبکه خطی و افزایش تراکم شبکه، تا حدود 3% و

پارامتر دیگری که در ارسال امواج فراصوتی به ماده مرکب تقویت شده الیافی مورد مطالعه قرار گرفته است، موقعیت قرارگیری تراگذار فراصوتی بر روی سطح قطعه نسبت به ساختار شبکه خطی است. به منظور بررسی تاثیر موقعیت تراگذار بر شناسایی فرکانسهای تشدید، سیگنالهای مربوط به امواج پراکندگی از شبکه در پنج موقعیت مختلف تراگذار بر روی سطح قطعه نسبت به ساختار شبکه خطی، از موقعیت متقارن نسبت به ساختار شبکه در فاصله بین دو فیبر استوانه‌ای، $s = 0$ ، تا قرارگیری در بالای یکی از الیاف بر روی سطح قطعه در $s = 4\text{mm}$ ، دریافت شده و فرکانسهای تشدید مودهای مختلف با ترسیم تابع فرم مربوط به هر موقعیت محاسبه و تفکیک شده است. در جدول ۳ فرکانسهای تشدید، به صورت بی بعد شده، مربوط به مودهای مختلف در موقعیت‌های مختلف تراگذار گیرنده بر روی سطح قطعه نشان داده شده است. در شکل ۱۰ بیشترین میزان تغییرات فرکانسهای تشدید با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با تغییر موقعیت تراگذار و سیگنال دریافتی بر روی سطح قطعه فرکانسهای تشدید تغییراتی تا حدود 10% برای مود چهارم نسبت به موقعیتی که تراگذار به صورت متقارن نسبت به ساختار شبکه خطی قرار گرفته باشد، از خود نشان می‌دهد. همچنین در مود سوم، تغییر موقعیت تراگذار گیرنده تا حدود 9% تغییر در فرکانسهای تشدید ایجاد خواهد کرد. این تغییرات برای مود اول تاثیر پایین‌تری داشته و حدود 4% بر فرکانس تشدید در این مود تاثیر نشان می‌دهد. نتایج فوق نشان می‌دهد اگر چه در تئوری پراکندگی تشدید از استوانه‌های منفرد، بیان می‌شود که طیف تشدید حاصل از پراکندگی امواج صوتی از استوانه به مشخصات فیزیکی و مادی استوانه کشسان هدف و ماتریس بستگی دارد، با این وجود در مواد مرکب تقویت شده برای شبکه‌های خطی، به دلیل تاثیر میدان‌های ناشی از الیاف مجاور یکدیگر بر میدان پراکندگی کل شبکه، موقعیت قرارگیری تراگذار نسبت به ساختار شبکه بر موقعیت فرکانسهای تشدید تاثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. لذا برای استفاده از طیف سنجی تشدید فراصوتی در ارزیابی غیرمخرب مواد مرکب تقویت شده الیافی علاوه بر مشخصات مادی و فیزیکی الیاف و ماتریس، تاثیر ساختار شبکه و موقعیت تراگذار نیز باید در فرکانسهای تشدید مورد توجه قرار گیرد.

- [6] Heckl M., "Oblique sound transmission through tube bundles and tube gratings", *Ultrasonics*, 32(4), 275, 1994.
- [7] Taheri, A., Honarvar, F., "Multiple scattering of an acoustic wave from a network of cylindrical rods encased in a solid viscoelastic medium", *Ultrasonics*, 64, 69, 2016.
- [8] Maze, G., Taconet, B., and Ripoché, "Influence des ondes de "galerie a echo" sur la diffusion d'une onde ultrasonore plane par un cylinder", *J. Phys. Lett.*, 84, 309, 1981.
- [9] de Billy, M., "Determination of the resonance spectrum of elastic bodies via the use of short pulses and Fourier transform theory", *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, 219, 1986.
- [10] Beattie, P., Chivers, RC, Anson, LW., "Ultrasonic backscattering from solid cylindrical inclusions in solid in solid elastic matrixes: A comparison of theory and experiment", *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(6), 3421, 1993.
- [11] Sodagar, S., Honarvar, F., Yaghoobian, "An alternative approach for measuring the scattered acoustic pressure field of immersed single and multiple cylinders", *Acoust. Phys.*, 57, 411, 2011.
- [12] Sodagar, S., Pourshab, "Evaluation of interfacial disbonding using finite element-based resonance ultrasonic spectroscopy", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(2), 675, 2019.

تغییر موقعیت تراگذار نسبت به ساختار شبکه تا حدود 10% بر فرکانسهای تشدید مودهای مختلف مسئله تاثیرگذار خواهد بود. لذا برای استفاده از طیف سنجی تشدید فراصوتی در ارزیابی غیرمخرب مواد مرکب تقویت شده فیبری علاوه بر مشخصات مادی و فیزیکی الیاف و ماتریس تاثیر ساختار شبکه و موقعیت تراگذار نیز باید در فرکانسهای تشدید اندازه گیری شده مورد توجه قرار گیرد.

۷- منابع

- [1] Faran Jr, "Sound scattering by solid cylinders and spheres", *J. Acoust. Soc. Am.*, 23, 405, 1951.
- [2] Young JW, Bertrand JC, "Multiple scattering by two cylinders", *J. Acoust. Soc. Am.*, 58, 1190, 1975.
- [3] Twersky V., "On the scattering of waves by an infinite grating.", *IRE Trans AP*, 4:330, 1956.
- [4] Twersky V., "Multiple scattering of sound by a periodic line of obstacles", *J. Acoust. Soc. Am.*, 53, 96, 1973.
- [5] Kheddioui EK, Pareige P, Izbicki JL., "Experimental resonant scattering by two elastic cylindrical shells in an eclipsed configuration", *Acoust. Lett.*, 16, 157, 1993.