مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1396، دوره 17، شماره 11، ص‌ص 239-246

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی استوانه‌های مجاور جاسازی شده در ماتریس الاستیک با استفاده از روش MIIR پالس کوتاه

احسان حسین زاده[1]، سینا سوداگر[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، اهواز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان

* آبادان، صندوق پستی 619، sodagar@put.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 مرداد 1396

پذیرش: 02 مهر 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

امواج فراصوتی

استوانه‌های جاسازی شده در محیط الاستیک

طیف‌سنجی تشدید فراصوتی

چکیده

در این تحقیق به بررسی و مطالعه استفاده از تئوری پراکندگی تشدید (RST) در ارزیابی استوانه‌های الاستیک جاسازی شده در یک محیط جامد الاستیک پرداخته شده است. بدین منظور از طیف‌سنجی تشدید فراصوتی بر روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود پراکندگی امواج فراصوتی از استوانه‌های الاستیک جاسازی شده در ماتریس جامد تحت تابش امواج صفحه‌ای استفاده می‌گردد. تعیین مودها و فرکانس‌های تشدید در طیف پراکندگی بازگشتی با استفاده از تکنیک تفکیک و شناسایی تشدید پالس کوتاه اصلاح شده برروی امواج پراکندگی بازگشتی شبیه‌سازی شده در روش المان محدود با درنظر گرفتن اثرات فرکانسی سیستم اندازه‌گیری انجام می‌شود. مقایسه نتایج بدست آمده از این روش، در فرکانس‌ها و مودهای تشدید، با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل ریاضی نشان دهنده صحت مدل ارائه شده است. با استفاده از این روش طیف تشدید پراکندگی بازگشتی از دو استوانه مجاور جاسازی شده در محیط الاستیک تحت تابش موج صفحه‌ای فراصوتی محاسبه و ترسیم گردیده است. سپس چگونگی تأثیر فاصله استوانه‌های مجاور و موقعیت قرارگیری تراگذار گیرنده بر فرکانس‌ها و مودهای تشدید بدست آمده از امواج مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده از طیف پراکندگی تشدید دو استوانه فولادی مجاور نشان می‌دهد تغییر فاصله دو استوانه موجب تغییر فرکانس تشدید مود $n = 4$ و تغییر موقعیت تراگذار گیرنده موجب تغییر فرکانس تشدید در مودهای $n = 3$ و $n = 4$ می‌گردد.

Evaluation of embedded adjacent cylinders in elastic matrix using short-pulse MIIR technique

Ehsan Hosseinzadeh[1], Sina Sodagar[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Ahvaz, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
* P.O.B. 619, Abadan, Iran, sodagar@put.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 August 2017
Accepted 24 September 2017
Available Online 18 November 2017

Keywords:
Ultrasonic wave
Embedded elastic cylinders
Resonance ultrasonic spectroscopy

ABSTRACT

In this paper, evaluation of cylindrical targets embedded in an elastic matrix is studied using resonance scattering theory (RST). For this purpose, the finite element simulation of ultrasonic wave scattering from the embedded cylinders propagated in elastic matrix is used for resonance ultrasonic spectroscopy (RUS). To involve the frequency effects of 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 target. To examine the validity of the proposed method the backscattered resonance spectrum for an embedded steel cylinder in an epoxy matrix is calculated and the numerical results are compared with the experimental and mathematical results. The FE-based resonance ultrasonic spectroscopy method is employed to investigate the behavior of far field backscattered resonance frequency spectrum for two embedded adjacent elastic cylinders. Using the proposed method to calculate the backscattered resonance spectrum from two embedded adjacent cylinders, it was shown that changing the center-to-center distance of adjacent cylindrical targets shifts the $n = 4$ resonance frequency and changing the receiver position affect the $n = 3$ and $n = 4$ resonant mode frequencies.

1- مقدمه

میدان پراکندگی امواج صوتی منتشر شده توسط یک جسم الاستیک حاوی اطلاعات ارزشمندی از خصوصیات فیزیکی و هندسی جسم تحت تابش امواج است بطوری‌که با مطالعه این میدان پراکندگی و تأثیر خصوصیات فیزیکی و هندسی جسم الاستیک بر روی آن، می‌توان از این اطلاعات در ارزیابی غیرمخرب جسم الاستیک تحت تابش استفاده نمود. تئوری پراکندگی تشدید (RST)[1] و طیف‌سنجی تشدید آکوستیک (RAS)[1] به عنوان یکی از روش‌های

[1] Resonance Scattering Theory

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Hosseinzadeh, S. Sodagar, Evaluation of embedded adjacent cylinders in elastic matrix using short-pulse MIIR technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 239-246, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

مطالعاتی در این تئوری، با استفاده از تشخیص اطلاعات مربوط به مودها و فرکانس‌های تشدید جسم الاستیک در طیف پراکندگی امواج و مطالعه مشخصات این مودهای تشدید به شناسایی رفتار و مشخصات فیزیکی و هندسی جسم الاستیک تحت تابش امواج صوتی می‌پردازد. با این وجود پیچیدگی موجود در فیزیک پدیده پراکندگی و رفتار امواج سطحی و زیر سطحی بر روی سطح جسم تحت تابش و مودهای تشدید مربوطه عملا استفاده از این امواج را برای ارزیابی غیرمخرب[2] و تعیین خصوصیات ماده[3] دشوار می‌سازد. در سال 1951، مطالعات اولیه بر روی پراکندگی امواج صوتی از اجسام الاستیک توسط فاران [1] منجر به ارائه پاسخ تحلیلی ریاضی برای پراکندگی امواج از اجسام استوانه‌ای و کروی الاستیک غوطه‌ور گردید. فیزیک انتشار امواج سطحی و زیر سطحی و رفتار این امواج در جسم الاستیک و محیط اطراف آن، پدیده تداخل سازنده امواج سطحی و تشکیل امواج ایستا بر روی جسم الاستیک، در تحقیقاتی که توسط محققان بسیاری نظیر فلکس و همکارانش [2] و اوبرال و همکارانش [3] انجام گردید، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. این تحقیقات همچنین شامل پراکندگی امواج از اجسام الاستیک جاسازی شده در محیط جامد نیز می‌گردید [4, 5]. فلکس و همکارانش [6] با استفاده از تئوری پراکندگی تشدید فرمولاسیون ریاضی برای پراکندگی از استوانه‌های با طول بینهایت تحت تابش امواج صفحه‌ای مایل ارائه دادند. همچنین پراکندگی امواج الاستیک از استوانه الاستیک جاسازی شده در محیط جامد توسط وایت مورد مطالعه قرار گرفت [7]. با توجه به اهمیت و جایگاه پراکندگی امواج از استوانه‌های جاسازی شده در محیط جامد به دلیل قابلیت مناسبی که برای ارزیابی مواد مرکب تقویت شده فیبری دارد، مطالعات بسیاری در این زمینه انجام گرفت [8-10]. تئوری پراکندگی چندگانه امواج از شبکه‌ای با ساختار صفحه‌ای و یا دایره‌ای از اجسام توسط تورسکی [11] و دومری [12] مورد مطالعه قرار گرفت. یانگ و برتراند [13] فرمولاسیون ساده‌ای برای پراکندگی میدان فشار ناشی از دو استوانه صلب مجاور ارائه نمود. تئوری پراکندگی چندگانه برای شبکه‌های الاستیک از استوانه‌ها [14]، شبکه‌های بزرگ [15]، پوسته‌های استوانه‌ای [16] و همچنین شبکه‌ای از استوانه‌های جاسازی شده در ماتریس جامد [17] توسعه پیدا نمود. در سال 2016، طاهری و هنرور [18] 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 قرار گرفت. ماز [19] با استفاده از روش تفکیک و شناسایی تشدید[4] (MIIR) اولین طیف فرکانسی شبه خطی[5] پراکندگی آزمایشگاهی را بدست آورد. دبیلی [20] با استفاده از این روش و ارسال امواج پالس کوتاه روش جدیدی اندازه‌گیری سریع‌تر طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ارائه نمود. با توسعه روش‌های آزمایشگاهی تئوری پراکندگی تشدید (RST) پژوهشگران متعددی از این روش برای کاربردهای مختلفی نظیر شناسایی خصوصیات مواد، ارزیابی غیرمخرب استفاده نمودند. ادیسون و همکارانش [21] پاسخ فرکانسی پراکندگی بازگشتی از یک فیبر سیلیکون کاربید (SiC) جاسازی شده در ماتریس تیتانیوم را مورد مطالعه قرار دادند. محاسبات تئوری آنها بر اساس روش فاران و وایت بنا نهاده شده بود. اندازه‌گیری‌های آنها در بازه فرکانسی $0 < ka < 7.5$ انجام گردید که مطابقت مناسبی برای برخی از قسمت‌های فیبر در بازه $2.5 < ka < 6.5$ میان نتایج تئوری و آزمایشگاهی گزارش گردید. در سایر بخش‌های فیبر مطابقت کمتر و یا عدم مطابقت به معنی اثر وجود آسیب در سطح تماس فیبر و ماتریس تفسیر گردید. بیتی و همکارانش [22]، 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 تئوری پرداختند. سوداگر و همکارانش [23] با ارائه تکنیک جدیدی برای روش پالس کوتاه MIIR، تأثیر ابعاد استوانه تحت تابش را بر مشخصات فرکانسی اکوی بازتابش موج پراکندگی مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین با استفاده از این روش اصلاح شده، به محاسبه طیف پراکندگی چندگانه از شبکه‌ای خطی از استوانه‌های غوطه‌ور در آب و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری پرداختند. در سال 2014، کاری و هنرور [24] با ارائه یک روش مبتنی بر اعمال الگوریتم ژنتیک بر روی طیف فرکانسی پراکندگی تشدید به تعیین ثابتهای الاستیک یک میله استوانه‌ای پرداختند.

در این پژوهش با استفاده از روش اصلاح شده MIIR، از طیف‌سنجی تشدید صوتی RAS در محدوده امواج فرکانس بالا، فراصوتی، (RUS)[6] جهت مطالعه میدان پراکندگی از استوانه‌های قرار گرفته در ماتریس جامد استفاده می‌شود. بدین منظور با شبیه‌سازی المان محدود امواج تابیده شده توسط یک تراگذار[7] فراصوتی به استوانه‌های الاستیک، میدان پراکندگی امواج الاستیک منتشر شده از استوانه جاسازی شده در ماتریس الاستیک بصورت عددی محاسبه و تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از روش پالس کوتاه MIIR و طیف‌سنجی تشدید فراصوتی، اثرات فرکانسی تراگذار فراصوتی شبیه‌سازی شده حذف و طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور استوانه الاستیک محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از این مدل، اثرات قرارگیری دو استوانه مجاور بر روی یکدیگر و تشدیدهای دریافتی از این دو جسم و همچنین موقعیت قرارگیری تراگذار فراصوتی در فرکانس‌ها و مودهای تشدید اندازه‌گیری شده مورد مطالعه و تحقیق قرار می‌گیرد.

2- طیف‌سنجی تشدید فراصوتی

تئوری پراکندگی تشدید[8] (RST) که اولین بار در سال 1978 توسط فلکس و همکارانش [25,3] ارائه شد نشان می‌دهد که طیف سیگنال بازگشتی از یک استوانه غوطه‌ور در سیال شامل دو قسمت است. قسمت اول مربوط به "دامنه زمینه"[9] است که توسط موج منعکس شده[10] و موج فرنز[11] و شولت-استونلی[12] درون سیال تشکیل می‌شود. "دامنه زمینه" با فرکانس تغییر می‌کند و حتی درصورتیکه هدف یک جسم صلب صوتی[13] باشد این قسمت وجود خواهد داشت. قسمت دوم سیگنال بازگشتی شامل مجموعه‌ای از فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های تیز[14] است که منطبق بر فرکانس‌های تشدید استوانه بوده و با دامنه زمینه ترکیب[15] می‌شوند. طیف‌سنجی تشدید فراصوتی به تشخیص تشدیدهای تولید شده توسط یک جسم کشسان غوطه‌ور تحت تابش امواج فراصوتی از یک تراگذار فراصوتی می‌پردازد. در این روش، که به

[1] Resonance Acoustic Spectroscopy
[2] Nondestructive evaluation
[3] Material characterization
[4] Method of identification and isolation of resonances
[5] Quasi-linear
[6] Resonance ultrasonic spectroscopy
[7] Transducer
[8] Resonance scattering theory (RST)
[9] Background amplitude
[10] Reflection wave
[11] Franz wave
[12] Scholte-Stoneley
[13] Sound-hard
[14] Pick and dip
[15] Superimpose

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

عنوان شاخه‌ای از زمینه تئوری پراکندگی تشدید[1] شناخته می‌شود، با استفاده از مشخصات این تشدیدها و رفتار آنها به مطالعه خصوصیات فیزیکی و هندسی جسم کشسان تحت تابش امواج پرداخته می‌شود. تکنیک شناسایی و تفکیک تشدید (MIIR) یکی از روش‌های تجربی طیف‌سنجی تشدید فراصوتی است. در این روش با استفاده از یک تراگذار فراصوتی جسم الاستیک تحت تابش یک موج پالسی با پهنای باند فرکانسی بزرگ قرار می‌گیرد. موج بازگشتی ناشی از تابش موج فراصوتی به جسم، توسط تراگذار گیرنده فراصوتی دریافت می‌گردد. طیف فرکانسی این سیگنال ترکیبی از دو بخش اصلی است: طیف فرکانسی مربوط به تراگذار و سیستم اندازه‌گیری، و طیف فرکانسی امواج پراکندگی بازگشتی تولید شده توسط جسم الاستیک. به منظور تفکیک و شناسایی تشدیدهای ناشی از جسم هدف طیف فرکانسی تراگذار و سیستم اندازه‌گیری، که عمدتا به صورت یک منحنی یکنواخت می‌باشد، را باید با استفاده از تکنیک دکانولوشن از طیف فرکانسی سیگنال حذف نمود. بدین منظور در روش اصلاح شده MIIR، به جای استفاده از طیف بازگشتی از یک استوانه با سختی بالا (صلب) و قطر کوچک [26]، از طیف فرکانسی بخش اول سیگنال زمانی دریافت شده پراکندگی بازگشتی، اکوی بازتابی، به عنوان طیف مرجع استفاده می‌شود [23]. در اندازه‌گیری پراکندگی بازگشتی اولین اکو مربوط به امواج بازتابش از سطح جسم هدف است. اکوهایی که به دنبال این بخش از سیگنال زمانی ظاهر می‌شوند توسط برهم‌کنش امواج سطحی و زیر سطحی منتشر شده بر روی محیط جسم استوانه‌ای که منجر به تشکیل امواج ایستا بر روی جسم می‌شوند، تولید می‌گردند (شکل 1).

با حذف پاسخ فرکانسی سیستم اندازه‌گیری از طیف فرکانسی سیگنال دریافتی و ترسیم طیف بدست آمده بر حسب فرکانس بی بعد، Ka، طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور[2]، تابع فرم، بدست می‌آید. تابع فرم استوانه الاستیک با استفاده از رابطه‌ی (1) محاسبه می‌شود [23]:

$$|f_\infty| = \left(\frac{S(\omega)}{S'(\omega)}\right)\left|\frac{-2}{\sqrt{\pi i K a}}\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon_n \frac{J_n'(Ka)}{H_n^{(1)\prime}(Ka)}\cos(n\phi)\right| \quad (1)$$

بطوریکه $S(\omega)$ طیف فرکانسی سیگنال دریافتی، $S'(\omega)$ بیانگر طیف فرکانسی موج بازتابش، ϕ زاویه دریافت، $K=\omega/c$ عدد موج، a شعاع استوانه و ε_n تابع نیومن است که به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود.

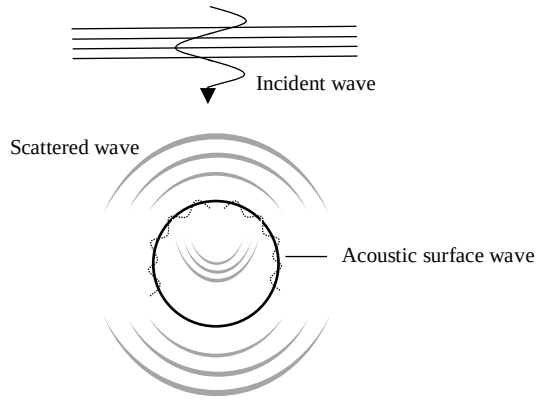

Fig. 1 Insonification of an elastic cylinder by a normally incident plane wave

شکل 1 تابش موج صفحه‌ای و پراکندگی امواج از یک استوانه الاستیک

[1] Resonance scattering theory
[2] Far-field backscattered frequency spectrum

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 2 & n=1 \end{cases} \quad (2)$$

3- المان محدود

به منظور مطالعه رفتار امواج در قطعه، از روش صریح[3] المان محدود در محیط نرم افزار اباکوس[4] جهت شبیه‌سازی انتشار امواج الاستیک تابیده شده از تراگذار فراصوتی استفاده شده است. ساختار قطعه به صورت یک استوانه همسانگرد الاستیک با سطح مقطع دایره‌ای و یک ماتریس مستطیلی شکل مدلسازی گردیده است. بدین منظور قطعه مورد آزمون، برای اعمال فرض طول بینهایت استوانه، با استفاده از المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای CPE4R بصورت یک استوانه با قطر 5 mm، جاسازی شده در ماتریس مستطیلی از جنس اپوکسی با ابعاد 30×60 mm المان‌بندی شده است. در جدول 1 مشخصات و ثوابت الاستیک و صوتی مواد ارائه شده است. تحریک ناشی از المان فعال پیزوالکتریک تراگذار نرمال[5] بصورت فشار اعمالی بر سطح قطعه (ماتریس) در محل قرارگیری تراگذار و با استفاده از تابع هنینگ[6] بصورت معادله زیر در فاصله زمانی اعمال پالس تحریک به صفحه پیزوالکتریک شبیه‌سازی شده است [27]. در شکل 2 شماتیک هندسه قطعه مورد آزمون و چگونگی قرارگیری تراگذار فراصوتی بر روی قطعه نشان داده شده است. همچنین به منظور حذف تاثیر نویزهای ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج در قطعه از المان‌های نامحدود CINPE4R در دیواره‌های مرزی ماتریس استفاده شده است. چگونگی استفاده از المان‌های محدود و المان‌های نامحدود در سیستم اندازه‌گیری در شکل 3 نشان داده شده است.

در روش صریح المان محدود برای اطمینان از پایداری نتایج تحلیل، حد پایداری گام زمانی انتگرال‌گیری به صورت رابطه (3) بیان می‌گردد [28]:

$$\Delta t \le \Delta t_{\mathrm{cr}} = \frac{\Delta l}{C_{\mathrm{L}}} \quad (3)$$

بطوریکه Δl بیانگر کوچک‌ترین اندازه‌ی المان‌ها و C_{L} معرف سرعت موج طولی است.

همچنین به منظور اطمینان از همگرایی نتایج المان محدود، اندازه المان‌ها بر حسب کوچکترین طول موج منتشر شده در ماده بصورت رابطه (4) پیشنهاد می‌شود [28]:

$$\Delta d \le \frac{\lambda_{\min}}{20} \quad (4)$$

برای بررسی همگرایی با استفاده از مشخصاتی که پیش‌تر برای مدل‌سازی المان محدود مسئله بیان شد، تحریکی با فرکانس میانی 1 MHz و تعداد سیکل $N=2$ به سطح قطعه مورد آزمون اعمال گردیده است. تغییرات پارامتر نسبت سیگنال به نویز[7] بر حسب اندازه المان در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود تغییرات نسبت دامنه به نویز در المان‌هایی با اندازه‌های کوچکتر از 40 μm نتایج بدست آمده همگرا شده است.

جدول 1 مشخصات و ثوابت الاستیک مواد.

Table 1 Elastic and acoustic properties

ماده	چگالی (kg/m³)	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

[3] Explicit method
[4] ABAQUS/Explicit
[5] Normal transducer
[6] Hanning function
[7] Signal-to-Noise ratio

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

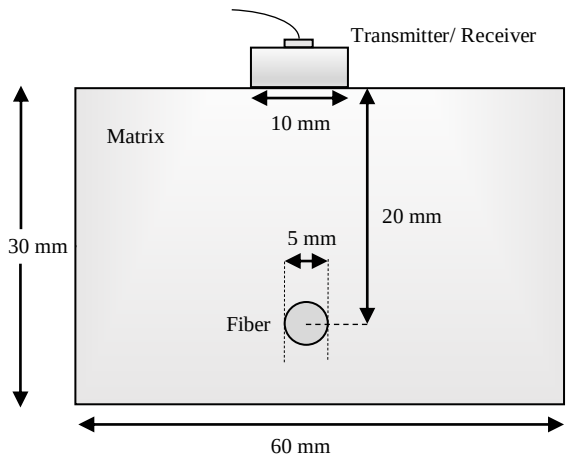

Fig. 2 Schematic configuration of the embedded cylindrical fiber and measurement system

شکل 2 شماتیک ساختار هندسی فیبر جاسازی شده در ماتریس الاستیک و سیستم اندازه‌گیری

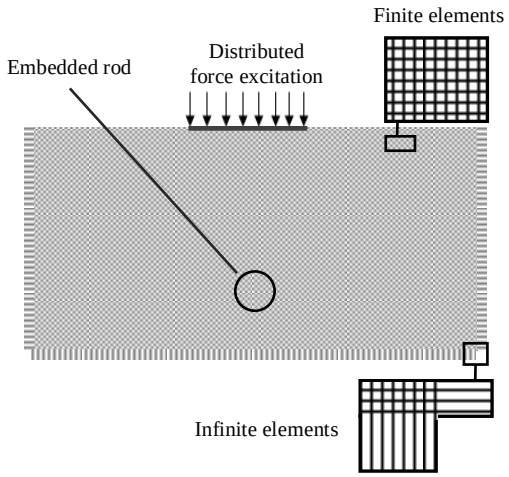

Fig. 3 Configuration of the finite element modeling

شکل 3 ساختار مدل‌سازی المان محدود

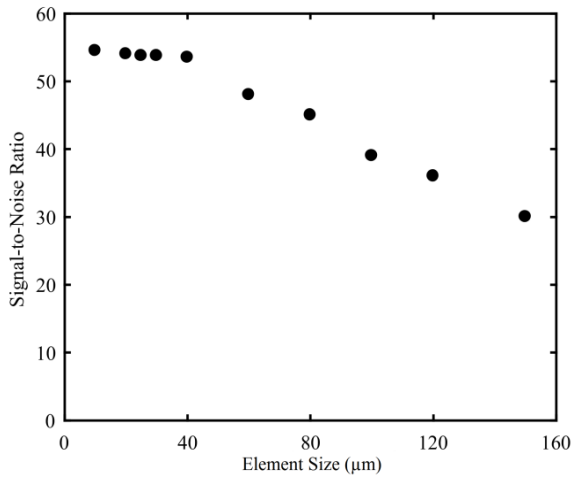

Fig. 4 Convergence of the Signal-to-Noise ratio

شکل 4 همگرایی نسبت دامنه به نویز با تغییر اندازه المان‌ها

4- ارائه نتایج و بحث

به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده قطعه‌ای مستطیلی شکل با ابعاد 60 mm×30 از جنس اپوکسی که یک استوانه فولادی با قطر 5 mm و در فاصله 20 mm از سطح قطعه در آن جاسازی شده است، مدل‌سازی شده است (شکل 2). تراگذار فرستنده بصورت یک تحریک فشاری با استفاده از معادله 3، با فرکانس میانی 1 MHz به طول 10 mm بر روی سطح قطعه شبیه سازی شده است. در شکل 5 طیف فرکانسی موج تابش ارسالی از تراگذار فرستنده نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود باند فرکانسی تراگذار فرستنده دارای توزیعی زنگوله‌ای شکل با فرکانس میانی 1 MHz و پهنای باند فرکانسی برابر 0.5 – 1.5 MHz می‌باشد.

در شکل 6 مودهای مختلف امواج الاستیک منتشر شده در قطعه پس از برخورد موج تابش طولی به استوانه فولادی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود پس از برخورد موج طولی تابیده شده از تراگذار به استوانه دو دسته موج استوانه‌ای پراکندگی که سرعت آنها بر سرعت امواج طولی و عرضی در قطعه منطبق است در همه جهات در قطعه منتشر می‌شوند. چنین پدیده‌ای در پراکندگی[1] امواج، تبدیل مود طولی به مودهای طولی و عرضی پس از برخورد به سطح مشترک دو محیط استوانه و ماتریس، بصورت مشابهی در بازتابش[2] و شکست امواج[3] در برخورد با سطح

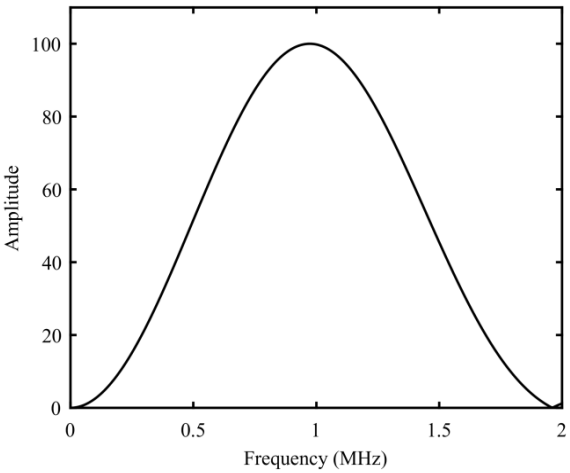

Fig. 5 Frequency spectrum of the incident wave

شکل 5 طیف فرکانسی موج تابش

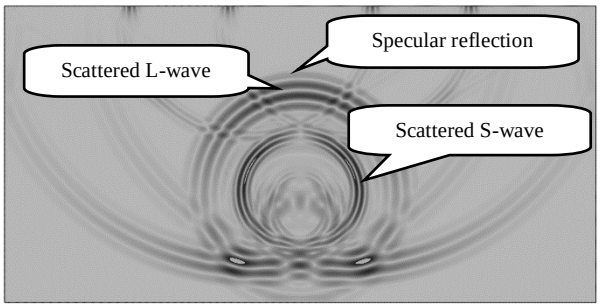

Fig. 6 Ultrasonic wave scattering from steel cylinder embedded in epoxy matrix

شکل 6 پراکندگی امواج فراصوتی پس از برخورد موج تابشی با استوانه فولادی جاسازی شده در ماتریس اپوکسی

[1] Wave scattering
[2] Reflection
[3] Refraction

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

مشترک دو محیط رخ می‌دهد.

در شکل 7 سیگنال زمانی موج بازگشتی[1] از استوانه فولادی دریافت شده توسط تراگذار گیرنده نشان داده شده است. در این شکل اکوی مربوط به بازتابش از سطح استوانه[2] در بخش اول سیگنال مشاهده می‌شود. اکوهای دریافتی پس از این اکوی بازتابش مربوط به امواج پراکندگی طولی از استوانه است.

طیف فرکانسی سیگنال پراکندگی بازگشتی و طیف فرکانسی اکوی بازتابش در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرکانس میانی و پهنای باند فرکانسی دو سیگنال بصورت کامل با یکدیگر مطابقت دارد [23]. با جایگزین کردن طیف فرکانسی سیگنال بازگشتی و اکوی بازتابش در معادله (1)، طیف پراکندگی بازگشتی ناحیه دور، تابع فرم[3]، برای استوانه فولادی جاسازی شده در ماتریس اپوکسی محاسبه می‌گردد.

در شکل 9 نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از فرمولاسیون ریاضی و آزمایشگاهی بیان شده در شکل 4 مرجع [22] در پهنای باند فرکانسی مؤثر

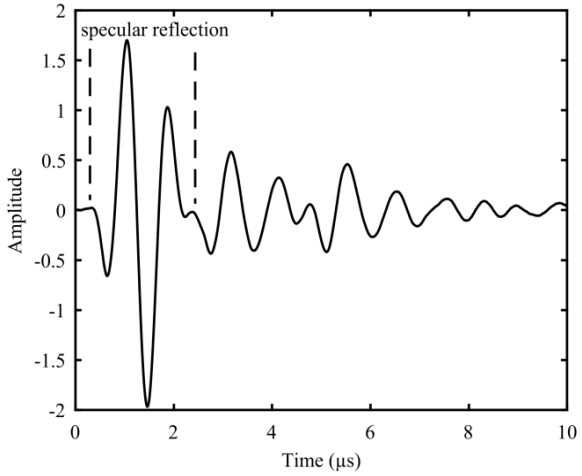

Fig. 7 The backscattered signal

شکل 7 سیگنال زمانی پراکندگی بازگشتی

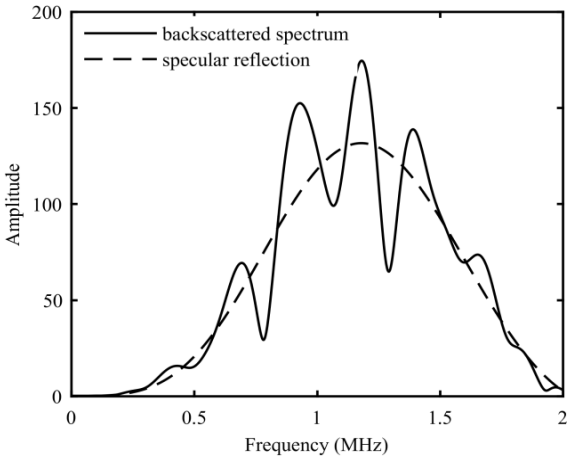

Fig. 8 Frequency spectra of the backscattered signal and the corresponding specular reflection

شکل 8 طیف فرکانسی سیگنال زمانی پراکندگی بازگشتی و اکوی بازتابش

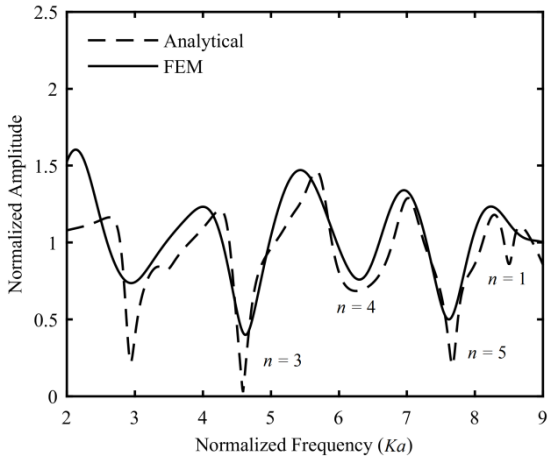

Fig. 9 The normalized backscattered spectrum of the embedded steel cylinder in epoxy matrix

شکل 9 طیف پراکندگی بازگشتی بی بعد شده استوانه فولادی جاسازی شده در ماتریس اپوکسی

تراگذار، فرکانس بی‌بعد Ka، نشان داده 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.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، در حالتی‌که چند استوانه الاستیک در مجاورت یکدیگر در یک ماتریس جامد جاسازی شده باشند، علاوه بر میدان امواج تابیده شده از تراگذار فرستنده، میدان‌های تولید شده از استوانه‌ها نیز بر استوانه‌های مجاور تأثیر نموده و موجب پراکندگی امواج ثانویه از استوانه‌ها می‌گردد. در این حالت اکوهای دریافتی از پراکندگی امواج علاوه بر امواج پراکندگی اولیه شامل تأثیر متقابل میدان‌های پراکندگی استوانه‌های مجاور بر روی یکدیگر نیز می‌شود. برای مطالعه تأثیر استوانه‌های مجاور بر میدان پراکندگی دریافتی از شبکه‌ای از استوانه‌های جاسازی شده در یک ماتریس جامد، از روش معرفی شده استفاده می‌گردد. بدین منظور دو استوانه مشابه فولادی با قطر 5 mm و فاصله مرکز تا مرکز 10 mm در ماتریس اپوکسی به فاصله 90 mm از سطح قطعه جاسازی شده است. در شکل 10 شماتیکی از هندسه و ابعاد قطعه مورد آزمون نشان داده شده است. برای حذف نویزهای ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج در قطعه و کاهش حجم محاسبات ناشی از بزرگتر شدن ابعاد قطعه، دیواره‌های مرزی ماتریس با استفاده از المان‌های نامحدود CINPE4R المان‌بندی شده است. به منظور مطالعه تأثیر فاصله دو استوانه مجاور بر مودها و فرکانس‌های تشدید، با استفاده از مدل فوق، طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور برای چهار فاصله مرکز تا مرکز دو استوانه به صورت d = 8, 8.5, 9, 10 mm محاسبه شده است.

در شکل 11 طیف پراکندگی بازگشتی برای این چهار فاصله محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله دو استوانه، در بازه فرکانسی مؤثر تراگذار فرستنده، مود تشدید $n = 4$ به صورت آشکاری تغییر فرکانسی می‌نماید، درحالی‌که مود تشدید $n = 3$ تقریباً بدون تغییر و ثابت بوده و تغییر فرکانسی با افزایش فاصله استوانه‌ها از خود نشان نمی‌دهد. همچنین بررسی رفتار مود $n = 5$ نیز نشان می‌دهد که تغییر فاصله استوانه‌ها موجب تغییرات بسیار جزئی در این مود می‌گردد.

در شکل 12 تغییرات فرکانسی مودهای فوق بر حسب تغییرات فاصله دو استوانه نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل نیز مشاهده می‌شود میزان تغییر فرکانسی مود تشدید $n = 4$ در

[1] Backscattered echoes
[2] Specular reflection
[3] Form function

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

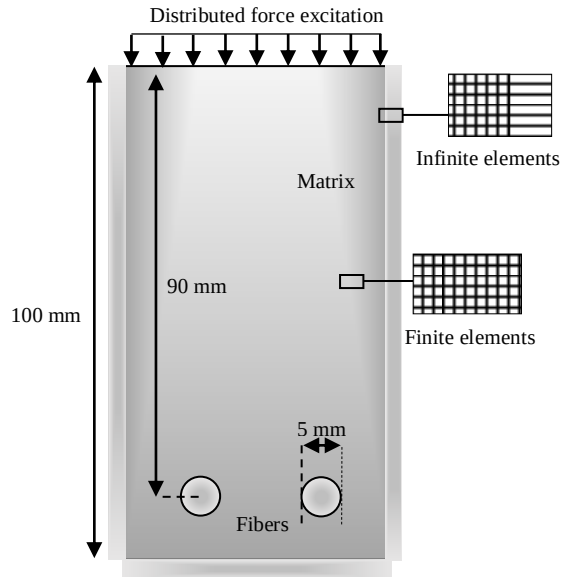

Fig. 10 Schematic configuration of the wave scattering problem from two adjacent cylinders

شکل 10 نمای شماتیک هندسی مسئله پراکندگی از دو استوانه فولادی مجاور و ساختار المان‌های نامحدود

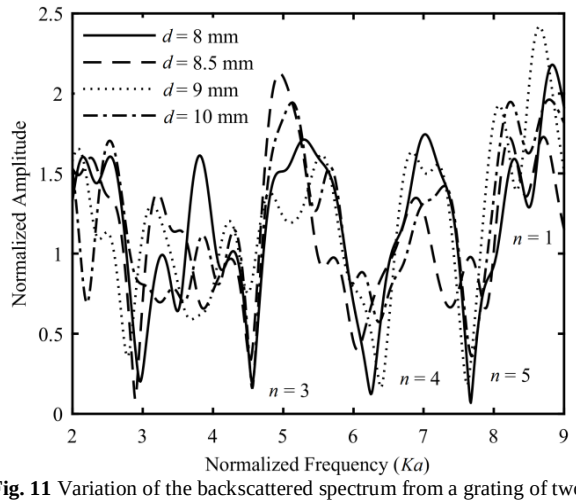

Fig. 11 Variation of the backscattered spectrum from a grating of two adjacent cylindrical fibers with change of center-to-center distance of fibers

شکل 11 تغییرات طیف تشدید پراکندگی بازگشتی، تابع فرم، از دو استوانه قولادی مجاور جاسازی شده در ماتریس اپوکسی با افزایش فاصله مرکز به مرکز دو استوانه

مقایسه با سایر مودهای تشدید با تغییر فاصله دو استوانه قابل ملاحظه بوده و این مود حساسیت بیشتری نسبت به تغییر فاصله دو استوانه از خود نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه تأثیر موقعیت تراگذار گیرنده بر میدان پراکندگی دریافتی، سیگنال بازگشتی در پنج موقعیت مختلف به فاصله 1 mm بر روی سطح قطعه نسبت به محل قرارگیری استوانه‌ها، نقاط A تا E در شکل 13، اندازه‌گیری شده است. دو استوانه به فاصله مرکز به مرکز 10 mm نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند.

در شکل 14 طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی اندازه‌گیری شده در

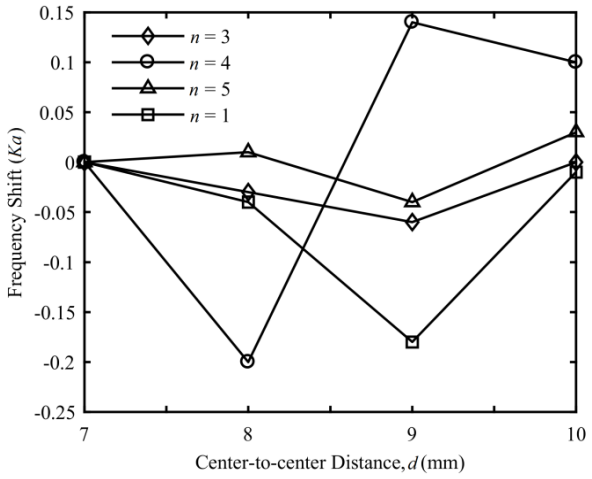

Fig. 12 Variation of resonance frequencies versus the center-to-center distance of fibers

شکل 12 تغییرات فرکانس‌های تشدید بر حسب فاصله مرکز به مرکز فیبرهای استوانه‌ای

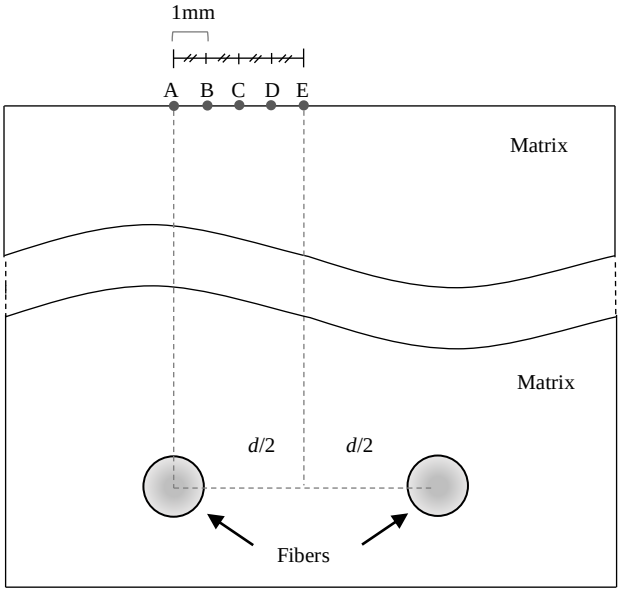

Fig. 13 Different positions of receiver

شکل 13 موقعیت‌های تراگذار گیرنده

نقاط A تا E نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده مود تشدید $n = 5$ ثابت بوده و فرکانس تشدید آن تغییر نمی‌کند. همچنین مودهای $n = 3$ و $n = 4$ با تغییر موقعیت تراگذار به سمت فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شوند.

در شکل 15 تغییرات فرکانسی مودهای تشدید با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود تغییرات فرکانسی در مودهای تشدید $n = 3$ و $n = 4$ در مقایسه با مودهای $n = 1$ و $n = 5$ نسبت به تغییر موقعیت تراگذار قابل ملاحظه بوده و حساسیت بیشتری نسبت به موقعیت تراگذار از خود نشان می‌دهند. رفتار فرکانسی مودهای تشدید فوق نشان می‌دهد که فرکانس‌های تشدید در طیف پراکندگی بازگشتی از شبکه‌هایی از استوانه‌های مجاور نه تنها تابعی از مشخصات الاستیک و هندسی اهداف استوانه‌ای است بلکه مشخصات و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

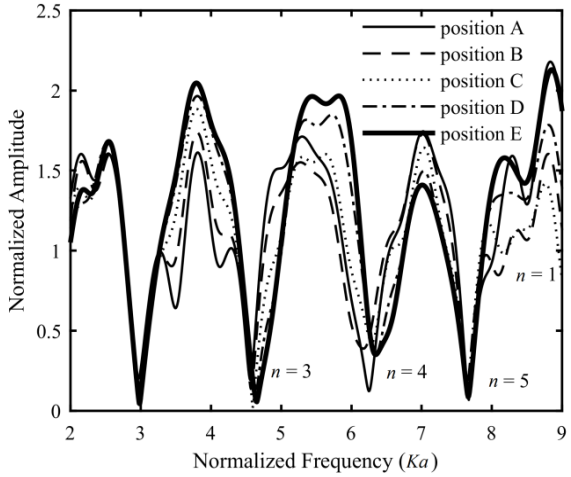

Fig. 14 Variation of the backscattered spectrum from with change of position of the receiver

شکل 14 تغییرات طیف تشدید پراکندگی بازگشتی، تابع فرم، از دو استوانه قولادی مجاور جاسازی شده در ماتریس اپوکسی با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده

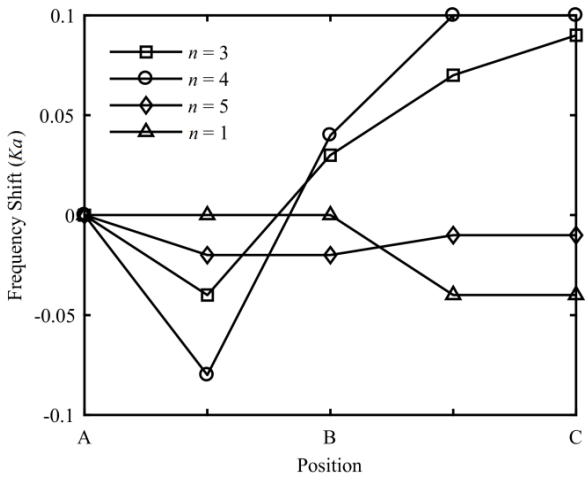

Fig. 15 Variation of resonance frequencies versus position of the receiver

شکل 15 تغییرات فرکانس‌های تشدید بر حسب تغییر موقعیت تراگذار گیرنده

ساختار هندسی شبکه نظیر فاصله استوانه‌ها و همچنین مشخصات سیستم اندازه‌گیری نظیر موقعیت تراگذار گیرنده بر فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده اثرگذار خواهد بود.

5- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش اصلاح شده MIIR، از طیف‌سنجی تشدید صوتی RAS در محدوده امواج فرکانس بالا، فراصوتی، (RUS)[1] جهت مطالعه میدان پراکندگی از استوانه‌های قرار گرفته در ماتریس جامد استفاده می‌شود. بدین منظور با شبیه‌سازی المان محدود امواج تابیده شده توسط یک تراگذار فراصوتی به استوانه‌های الاستیک، میدان پراکندگی امواج الاستیک منتشر شده از استوانه جاسازی شده در ماتریس الاستیک بصورت عددی محاسبه و تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از روش پالس کوتاه MIIR و طیف‌سنجی تشدید فراصوتی، اثرات فرکانسی تراگذار فراصوتی شبیه‌سازی شده حذف و طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور استوانه الاستیک محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از این مدل، اثرات قرارگیری دو استوانه مجاور بر روی یکدیگر و تشدیدهای دریافتی از این دو جسم و همچنین موقعیت قرارگیری تراگذار فراصوتی در فرکانس‌ها و مودهای تشدید اندازه‌گیری شده مورد مطالعه و تحقیق قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده برای طیف فرکانسی پراکندگی طولی بازگشتی از یک استوانه فولادی جاسازی شده در محیط اپوکسی بیانگر مطابقت بسیار خوب نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این مقاله در محدوده بازه فرکانسی مؤثر تراگذار با نتایج تحلیلی ریاضی است. بررسی تأثیر فاصله دو استوانه مجاور نشان داد که با افزایش فاصله، مود تشدید $n = 4$ حساسیت بیشتری نسبت به تغییر فاصله دو استوانه در مقایسه با سایر مودهای تشدید از خود نشان می‌دهد. همچنین بررسی طیف تشدید پراکندگی بازگشتی نشان می‌دهد با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده مودهای تشدید $n = 3$ و $n = 4$ حساسیت بیشتری نسبت به سایر مودهای تشدید از خود نشان داده /و تغییرات فرکانسی بیشتری به سمت فرکانس‌های بالاتر در این مودها رخ می‌دهد.

این تغییرات نشان می‌دهد که فرکانس‌های تشدید پراکندگی بازگشتی از شبکه‌هایی از استوانه‌های مجاور نه تنها تابعی از مشخصات الاستیک و هندسی اهداف استوانه‌ای است بلکه مشخصات و ساختار هندسی شبکه نظیر فاصله استوانه‌ها و همچنین مشخصات سیستم اندازه‌گیری نظیر موقعیت تراگذار گیرنده بر فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده اثرگذار بوده و موجب تغییر موقعیت این فرکانس‌ها در برخی مودهای تشدید می‌گردد.

6- مراجع

[1] J. J. Faran Jr, Sound scattering by solid cylinders and spheres, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 23, No. 4, pp. 405-418, 1951.

[2] L. Flax, L. Dragonette, H. Überall, Theory of elastic resonance excitation by sound scattering, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 3, pp. 723-731, 1978.

[3] H. Uberal, *Acoustic resonance scattering*, pp. 49-58, Amsterdam: Gordon and Breach Science Punblishers, 1992.

[4] W. L. Ko, Scattering of stress waves by a circular elastic cylinder embedded in an elastic medium, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp. 345-355, 1970.

[5] J. H. Griffin, J. Miklowitz, Wave front analysis of a plane compressional pulse scattered by a cylindrical elastic inclusion, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 10, No. 12, pp. 1333-1356, 1974.

[6] L. Flax, V. K. Varadan, V. V. Varadan, Scattering of an obliquely incident acoustic wave by an infinite cylinder, *Journal of the Acoustical Society of America*,Vol.68, No. 6, pp. 1832-1834, 1980.

[7] R. White, Elastic wave scattering at a cylindrical discontinuity in a solid, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 30, No. 8, pp. 771-785, 1958.

[8] W. Huang, S. Brisuda, S. Rokhlin, Ultrasonic wave scattering from fiber–matrix interphases, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 807-817, 1995.

[9] W. Huang, Y. Wang, S. Rokhlin, Oblique scattering of an elastic wave from a multilayered cylinder in a solid. Transfer matrix approach, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 2742-2754, 1996.

[10] W. Huang, S. Rokhlin, Y. Wang, Effect of fibre—matrix interphase on wave propagation along, and scattering from, multilayered fibres in composites, Transfer matrix approach, *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 5, pp. 365-375, 1995.

[11] V. Twersky, Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 24, No. 1, pp. 42-46, 1952.

[12] G. Dumery, Sur la diffraction des ondes sonores par des grilles ou des reseaux d'obstacles, *Acustica*, Vol. 18, pp. 334-341, 1967.

[13] J. W. Young, J. C. Bertrand, Multiple scattering by two cylinders, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 58, No. 6, pp. 1190-1195, 1975.

[14] L. Foldy, The multiple scattering of waves, generally theory of isotropic scattering randomly distributed scatterers, *Physics Review*, Vol. 67, pp. 107-119, 1945.

[15] L. W. Cai, J. H. Williams, Large-scale multiple scattering problems, *Ultrasonics*, Vol. 37, No. 7, pp. 453-462, 1999.

[16] E. K. Kheddioui, P. Pareige, J. L. Izbicki, Experimental resonant scattering by two elastic cylindrical shells in an eclipsed configuration, *Acoustical Letter*, Vol. 16, pp. 157–62, 1993.

[17] S. K. Bose, A. K. Mal, Longitudinal shear waves in a fiber-reinforced composite, *International Journal of Solids and Structure*, Vol. 9, No. 9, pp. 1075–1085, 1973.

[1] Resonance ultrasonic spectroscopy

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]

[18] A. Taheri, F. Honarvar, Multiple scattering of an acoustic wave from a network of cylindrical rods encased in a solid viscoelastic medium, *Ultrasonics*, Vol. 64, pp. 69-76, 2016.
[19] G. Maze, Acoustic scattering from submerged cylinders, MIIR Im/Re: Experimental and theoretical study, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 6, pp. 2559-2566, 1991.
[20] M. de Billy, Determination of the resonance spectrum of elastic bodies via the use of short pulses and Fourier transform theory, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79, pp. 219-221, 1986.
[21] A. Sinclair, R. Addison Jr, Acoustic diffraction spectrum of a SiC fiber in a solid elastic medium, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, No. 2, pp. 1126-1135, 1993.
[22] P. Beattie, R. C. Chivers, L. W. Anson, Ultrasonic backscattering from solid cylindrical inclusions in solid in solid elastic matrixes: A comparison of theory and experiment, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 3421-3427, 1993.
[23] S. Sodagar, F. Honarvar, A. Yaghootian, A. N. Sinclair, An alternative approach for measuring the scattered acoustic pressure field of immersed single and multiple cylinders, *Acoustical Physics*, Vol. 57, pp. 411-419, 2011.
[24] M. Kari, F. Honarvar, Characterization of a cylindrical rod by inversion of acoustics scattering data, *Ultrasonics*, Vol. 54, pp. 1559-1567, 2014.
[25] L. Flax, L. R. Dragonette, H. Uberall, Theory of elastic resonance excitation by sound scattering, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 3, pp. 723-731, 1978.
[26] T. B. Li, M. Ueda, Sound scattering of a plane wave obliquely incident on a cylinder, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 86, No. 6, pp. 2363-2368, 1989.
[27] F. Moser, L. J. Jacobs, J. Qu, Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method, *NDT&E International*, Vol. 32, No. 4, pp. 225-234, 1999.
[28] D. Alleyne, P. Cawley, A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, pp. 1159-1168, 1991.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6]