ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

احسان حسين زاده¹، سينا سوداگر^{2*}

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

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
$\sqrt{2}$ 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 طیف سنجی تشدید فراصوتی بر روی نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود پراکندگی امواج فراصوتی از استوانههای الاستیک جاسازی شده در ماتریس جامد تحت تابش امواج صفحهای استفاده می گردد. تعیین مودها و فرکانس های تشدید در طیف پراکندگی بازگشتی با استفاده از تکنیک تفکیک و شناسایی تشدید پالس کوتاه اصلاح شده برروی امواج پراکندگی بازگشتی شبیه سازی شده در روش المان محدود با درنظر گرفتن اثرات فرکانسی سیستم اندازه گیری انجام می شود. مقایسه نتایج بدست آمده از این روش، شبیه سازی شده در روش المان محدود با درنظر گرفتن اثرات فرکانسی سیستم اندازه گیری انجام می شود. مقایسه نتایج بدست آمده از این روش، در فرکانس ها 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 صفحه ای فراصوتی محاسبه و ترمیم گردیده مندید پراکندگی بازگشتی از دو استوانه های مجاور و موقیت قرارگیری تراکذار گیرنده بر فرکانس ها 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 می دهد تغییر مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده از طیف پراکندگی تشدید دو استوانه فولادی مجاور نشان می دهد تغییر فاصله دو استوانه موجب تغییر فرکانس تشدید مود 4 = n و تغییر موقیت تراگذار گیرنده موجب تغییر فرکانس تشدید در مودهای گذان می دود 4 = n و تغییر موقیت تراگذار گیرنده موجب تغییر فرکانس تشدید در مودهای گرد.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 مرداد 1396 پذیرش: 20 مهر 1396 ارائه در سایت: 27 آبان 1396 امواج فراصوتی استوانههای جاسازی شده در محیط الاستیک طیفسنجی تشدید فراصوتی
r = r	

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

Ehsan Hosseinzadeh¹, 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

هندسی جسم الاستیک بر روی آن، میتوان از این اطلاعات در ارزیابی

غيرمخرب جسم الاستيك تحت تابش استفاده نمود. تئوري پراكندگي تشديد

(RST) و طیفسنجی تشدید آکوستیک (RAS) به عنوان یکی از روشهای

* P.O.B. 619, Abadan, Iran, sodagar@put.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT	
Original Research Paper Received 18 August 2017 Accepted 24 September 2017 Available Online 18 November 2017	In this paper, evaluation of cylindrical targets embedded in an elastic matrix is studied using reson scattering theory (RST). For this purpose, the finite element simulation of ultrasonic wave scatter from the embedded cylinders propagated in elastic matrix is used for resonance ultrasonic spectros (RUS). To involve the frequency effects of measurement system, the modified short-pulse method	
<i>Keywords:</i> Ultrasonic wave Embedded elastic cylinders Resonance ultrasonic spectroscopy	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

ميدان پراكندگى امواج صوتى منتشر شده توسط يك جسم الاستيك حاوى اطلاعات ارزشمندی از خصوصیات فیزیکی و هندسی جسم تحت تابش امواج است بطوری که با مطالعه این میدان براکندگی و تأثیر خصوصیات فیزیکی و

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)

¹ Resonance Scattering Theory

مطالعاتی در این تئوری، با استفاده از تشخیص اطلاعات مربوط به مودها و فرکانس های 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 می پردازد. 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 ٔ و تعیین خصوصیات ماده ٔ 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 محيط اطراف آن، پديده تداخل سازنده امواج سطحي و تشكيل امواج ايستا بر روى جسم الاستيك، در تحقيقاتي كه توسط محققان بسياري نظير فلكس 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 می گردید [5, 4]. 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 محيط جامد توسط وايت مورد مطالعه قرار گرفت [7]. با توجه به اهميت 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 [10-8]. 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]، شبكههای 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 استوانه های همسانگرد جاسازی شده در یک ماتریس ویسکوالاستیک را با استفاده از روشی مبتنی بر روش بسط مودهای نرمال مورد مطالعه قرار دادند.

روشهای آزمایشگاهی اندازه گیری میدان پراکندگی امواج از اجسام الاستیک همزمان با این تحقیقات مورد مطالعه قرار گرفت. ماز [19] با استفاده از روش تفکیک و شناسایی تشدید^{[†] (MIIR) اولین طیف فرکانسی} شبه خطی⁶ پراکندگی آزمایشگاهی را بدست آورد. دبیلی [20] با استفاده از این روش و ارسال امواج پالس کوتاه روش جدیدی اندازه گیری 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. اندازه گیری های آنها در بازه فرکانسی

انجام گردید که مطابقت مناسبی برای برخی از قسمتهای 0 < ka < 7.5فيبر در بازه 6.5 < ka حاد ميان نتايج تئوري و آزمايشگاهي 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 همكارانش [23] با ارائه تكنيك جديدي براي روش پالس كوتاه MIIR، تأثير ابعاد استوانه تحت تابش را بر مشخصات فركانسى اكوى 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، كارى و هنرور [24] با ارائه يك روش مبتنى بر اعمال الگوريتم ژنتيك بر روى طيف فركانسى پراكندگى تشديد به تعيين ثابتهاى الاستيك يك ميله استوانهای پرداختند.

در این پژوهش با استفاده از روش اصلاح شده MIIR، از طیفسنجی تشديد صوتي RAS در محدوده امواج فركانس بالا، فراصوتي، ³(RUS) جهت مطالعه میدان پراکندگی از استوانههای قرار گرفته در ماتریس جامد استفاده می شود. بدین منظور با شبیه سازی المان محدود امواج تابیده شده توسط یک تراگذار^۲ فراصوتی به استوانههای الاستیک، میدان پراکندگی امواج الاستیک منتشر شده از استوانه جاسازی شده در ماتریس الاستیک بصورت عددی محاسبه و تعیین می گردد. سپس با استفاده از روش پالس کوتاه MIIR و طيفسنجى تشديد فراصوتى، اثرات فركانسى تراگذار فراصوتى شبيهسازى شده حذف و طيف فركانسی پراكندگی بازگشتی ناحیه دور استوانه الاستیک محاسبه می گردد. همچنین با استفاده از این مدل، اثرات قرار گیری دو استوانه مجاور بر روی یکدیگر و تشدیدهای دریافتی از این دو جسم و همچنین موقعیت قرارگیری تراگذار فراصوتی در فرکانسها و مودهای تشدید اندازه گیری شده مورد مطالعه و تحقیق قرار می گیرد.

2- طيف سنجى تشديد فراصوتي

تئوري پراكندگي تشديد^ (RST) كه اولين بار در سال 1978 توسط فلكس و همکارانش [25,3] ارائه شد نشان میدهد که طیف سیگنال بازگشتی از یک استوانه غوطهور در سيال شامل دو قسمت است. قسمت اول مربوط به "دامنه زمينه" است كه توسط موج منعكس شده (و موج فرنز (و شولت-استونلی^{۱۲} درون سیال تشکیل می شود. "دامنه زمینه" با فرکانس تغییر می *ک*ند و حتی درصورتیکه هدف یک جسم صلب صوتی^{۱۳} باشد این قسمت وجود خواهد داشت. قسمت دوم سیگنال بازگشتی شامل مجموعهای از فرورفتگیها و برآمدگیهای تیز^{۱۴}است که منطبق بر فرکانسهای تشدید استوانه بوده و با دامنه زمینه ترکیب^{۱۵} می شوند. طیف سنجی تشدید فراصوتی به تشخيص تشديدهاى توليد شده توسط يک جسم كشسان غوطهور تحت تابش امواج فراصوتی از یک تراگذار فراصوتی می پردازد. در این روش، که به

Resonance Acoustic Spectroscopy

Nondestructive evaluation Material characterization

Method of identification and isolation of resonances

⁵ Ouasi-linea

⁶ Resonance ultrasonic spectroscopy

⁷ Transducer ⁸ Resonance scattering theory (RST)

⁹ Background amplitude

¹⁰ Reflection way 11 Franz wave

¹² Scholte-Stoneley

¹³ Sound-hard

¹⁴ Pick and dip ¹⁵ Superimpose

عنوان شاخهای از زمینه تئوری پراکندگی تشدید ٔ شناخته میشود، با استفاده از مشخصات این تشدیدها و رفتار آنها به مطالعه خصوصیات فیزیکی و هندسی جسم کشسان تحت تابش امواج پرداخته می شود. 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 می گیرد. موج بازگشتی ناشی از تابش موج فراصوتی به جسم، توسط تراگذار گیرنده فراصوتی دریافت می گردد. طیف فرکانسی این سیگنال ترکیبی از دو بخش اصلی است: طیف فرکانسی مربوط به تراگذار و سیستم اندازه گیری، و طيف فركانسى امواج پراكندگى بازگشتى توليد شده توسط جسم الاستيك. به منظور تفکیک و شناسایی تشدیدهای ناشی از جسم هدف طیف فرکانسی تراگذار و سیستم اندازه گیری، 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 طيف بازگشتی از يک 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 می شود [23]. در اندازه گیری 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 برهم کنش امواج سطحی و زیر سطحی منتشر شده بر روی محیط جسم استوانهای که منجر به تشکیل امواج ایستا بر روی جسم می شوند، تولید می گردند (شکل 1).

با حذف پاسخ فرکانسی سیستم اندازه گیری از طیف فرکانسی سیگنال دریافتی و ترسیم طیف بدست آمده بر حسب فرکانس بی بعد، *Ka*، طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی ناحیه دور^۲، تابع فرم، بدست میآید. تابع فرم استوانه الاستیک با استفاده از رابطهی (1) محاسبه می شود [23]:

$$|f_{\infty}| = \left(\frac{S(\omega)}{S'(\omega)}\right) \left| \frac{-2}{\sqrt{\pi i K a}} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{J'_n(Ka)}{H_n^{(1)'}(Ka)} \cos(n\phi) \right|$$
(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 تابع نيومن است که به صورت رابطه (2) تعريف می شود. \mathcal{E}_n



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

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

1 Resonance scattering theory

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

3- المان محدود

(2)

به منظور مطالعه رفتار امواج در قطعه، از روش صریح^۳ المان محدود در محيط نرم افزار اباكوس[†] جهت شبيهسازي انتشار امواج الاستيك تابيده 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 mm 5، جاسازی شده در ماتریس مستطیلی از جنس اپوکسی با ابعاد mm 60×00 المانبندی شده است. در جدول 1 مشخصات و ثوابت الاستیک و صوتی مواد ارائه شده است. تحریک ناشی از المان فعال پیزوالکتریک تراگذار نرمال^۵ بصورت فشار اعمالی بر سطح قطعه (ماتریس) در محل قرارگیری تراگذار و با استفاده از تابع هنینگ 2 بصورت معادله زیر در فاصله زمانی اعمال پالس تحریک به صفحه ييزوالكتريك شبيهسازي شده است [27]. در شكل 2 شماتيك 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 المان های نامحدود CINPE4R در دیواره های مرزی ماتریس استفاده شده است. چگونگی استفاده از المانهای محدود و المانهای نامحدود در سیستم اندازه گیری در شکل 3 نشان داده شده است.

در روش صريح المان محدود براى اطمينان از پايدارى نتايج تحليل، حد پایداری گام زمانی انتگرال گیری به صورت رابطه (3) بیان می گردد [28]:

$$\Delta t \le \Delta t_{\rm cr} = \frac{\Delta l}{C_{\rm L}} \tag{3}$$

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

همچنین به منظور اطمینان از همگرایی نتایج المان محدود، اندازه المان ها بر حسب كوچكترين طول موج منتشر شده در ماده بصورت رابطه (4) ييشنهاد مي شود [28]:

$$\Delta d \le \frac{\lambda_{\min}}{20} \tag{4}$$

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^۷ بر حسب اندازه المان در شکل 4 نشان داده شده است. همان طور که در شکل 4 مشاهده می شود 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 T Elastic and acoustic properties						
مادہ	چگالی	مدول يانگ	ضريب	سرعت موج	سرعت موج		
	(kg/m^3)	(GPa)	پواسون	طولى	عرضى		
فولاد	7800	208	0.28	5890	3230		
اپوكسى	1129	5.32	0.33	2654	1331		

Explicit method

ABAQUS/Explicit

Normal transducer

⁶ Hanning function
⁷ Signal-to-Noise ratio

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.36.6

² Far-field backscattered frequency spectrum



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



4- ارائه نتايج و بحث

به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده قطعهای مستطیلی شکل با ابعاد

60 mm 50 از جنس اپوکسی که یک استوانه فولادی با قطر 5 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 از روی سطح قطعه شبیه سازی شده است. در شکل 5 طیف فرکانسی موج تابش ارسالی از تراگذار فرستنده نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود باند فرکانسی تراگذار فرستنده دارای توزیعی زنگولهای شکل با فرکانس میانی MHz و پهنای باند فرکانسی برابر MHz – 5.5 می باشد.

در شکل 6 مودهای مختلف امواج الاستیک منتشر شده در قطعه پس از برخورد موج تابش طولی به استوانه فولادی نشان داده شده است. همان گونه 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^۱ امواج، تبدیل مود طولی به مودهای طولی و عرضی پس از برخورد به سطح مشترک دو محیط استوانه و ماتریس، بصورت مشابهی در بازتابش^۲ و شکست امواج^۲ در برخورد با سطح



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

مشترک دو محیط رخ میدهد.

در شکل 7 سیگنال زمانی موج بازگشتی ^۱ از استوانه فولادی دریافت شده توسط تراگذار گیرنده نشان داده شده است. در این شکل اکوی مربوط به بازتابش از سطح استوانه^۲ 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. همان گونه که مشاهده می شود 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 فرم⁷, برای استوانه فولادی جاسازی شده در ماتریس اپوکسی محاسبه می گردد.

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



شکل 7 سیگنال زمانی پراکندگی بازگشتی



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



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 بی بعد Ka، نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان دهنده مطابقت مناسب نتایج بدست آمده با نتایج تحلیلی در فرکانس های تشدید و همچنین در شکل کلی منحنی تابع فرم است.

همان گونه که پیشتر بیان گردید، در حالتی که 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 استوانه های مجاور تأثیر نموده و موجب پراکندگی امواج ثانویه از استوانه ها می گردد. در این حالت اکوهای دریافتی از پراکندگی امواج علاوه بر امواج پراکندگی اولیه شامل تأثیر متقابل میدانهای پراکندگی استوانههای مجاور بر روی یکدیگر نیز می شود. برای مطالعه تأثیر استوانه های مجاور بر میدان پراکندگی دریافتی از شبکهای از استوانههای جاسازی شده در یک ماتریس جامد، از روش معرفی شده استفاده می گردد. بدین منظور دو استوانه مشابه فولادی با قطر mm 5 و فاصله مرکز تا مرکز mm 10 در ماتریس اپوکسی به فاصله mm 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 المانبندى شده است. به منظور مطالعه تأثير 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. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش فاصله دو استوانه، در بازه فرکانسی مؤثر تراگذار فرستنده، مود تشدید 4 = n به صورت آشکاری تغییر فرکانسی می تماید، در حالی که مود تشدید 5 = n تقریباً بدون تغییر و ثابت بوده و تغییر فرکانسی با افزایش فاصله استوانه از خود نشان نمی دهد. همچنین بررسی رفتار مود 5 = n نیز نشان می دهد که تغییر فاصله استوانه ام وجب تغییرات بسیار جزئی در این مود می گردد.

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

¹ Backscattered echoe

² Specular reflection

³ Form function

Distributed force excitation

 $\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$



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





Fig. 13 Different positions of receiver

شکل 13 موقعیتهای تراگذار گیرنده

نقاط A تا E نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود با تغییر موقعیت تراگذار گیرنده مود تشدید n = 5 ثابت بوده و فرکانس تشدید آن تغییر نمی کند. همچنین مودهای n = 3 و n = 4 با تغییر موقعیت تراگذار به سمت فرکانس های بالاتر منتقل می شوند.

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 = 1 و 4 = n در مقایسه با مودهای 1 = n و 5 = n 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



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 ا بر روی سطح قطعه نسبت به محل قرارگیری استوانهها، نقاط A تا E در شکل 13، اندازه گیری شده است. دو استوانه به فاصله مرکز به مرکز mm 10 mm یکدیگر قرار گرفتهاند.

در شکل 14 طیف فرکانسی پراکندگی بازگشتی اندازه گیری شده در

محاسبه می گردد. همچنین با استفاده از این مدل، اثرات قرار گیری دو استوانه مجاور بر روی یکدیگر و تشدیدهای دریافتی از این دو جسم و همچنین موقعیت قرارگیری تراگذار فراصوتی در فرکانسها و مودهای تشدید اندازه گیری شده مورد مطالعه و تحقیق قرار می گیرد. 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 شده در محیط اپوکسی بیانگر مطابقت بسیار خوب نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این مقاله در محدوده بازه فرکانسی مؤثر تراگذار با نتایج تعلیلی ریاضی است. بررسی تأثیر فاصله دو استوانه مجاور نشان داد که با افزایش فاصله، مود تشدید 4 = n 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 براگذار گیرنده مودهای تشدید 8 = n و ساسیت بیشتری نسبت به تغییر فاصله براگذار گیرنده مودهای تشدید 8 = n و ساسیت میدهد با تغییر موقعیت براگذار گیرنده مودهای تشدید 8 = n و ساسیت بیشتری نسبت به تغییر موقعیت براگذار مودهای تشدید از خود نشان داده /و تغییرات فرکانسی بیشتری به ست می فرکانسی بالاتر در این مودها در می دو ار می دهد.

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 می گردد.

6- مراجع

- 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 fibermatrix 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*
- [15] J. W. Foung, 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.



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 اندازه گیری نظیر موقعیت تراگذار گیرنده بر فرکانسهای تشدید اندازه گیری شده اثر گذار خواهد بود.

5- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش اصلاح شده MIIR، از طیفسنجی تشدید صوتی RAS در محدوده امواج فرکانس بالا، فراصوتی، ⁽(RUS)) 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 می گردد. 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

¹ Resonance ultrasonic spectroscopy

- [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
- [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.

- [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.