مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16، شماره 6، ص‌ص 353-361

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی انتشار امواج توسط پروب آرایه فازی خطی با طراحی بهبودیافته در آزمون‌های بازرسی فراصوتی

شهرام یاره‌یی[1]، سید محمدرضا سید نورانی[2*]، احمد قنبری[3]

1- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2- استادیار، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز
3- استاد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز
* تبریز، صندوق‌پستی 51666-14761، smrs.noorani@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 اردیبهشت 1395
پذیرش: 12 خرداد 1395
ارائه در سایت: 15 تیر 1395

کلید واژگان:
آزمون فراصوت
پروب آرایه فازی خطی
شبیه‌سازی انتشار موج
روش اجزاء محدود

چکیده

از روش‌های نوین آزمون و ارزیابی‌های غیرمخرب فراصوتی، استفاده از پروب‌هایی با چند المان تحریک‌پذیر جهت انتشار امواج در ماده است. از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد این پروب‌ها می‌توان به نحوه چینش المان‌ها در پروب، تعداد المان‌ها، فاصله بین دو المان، طول هر المان و زمان‌بندی تأخیر اعمالی در برانگیزش پروب‌ها اشاره کرد. پروب آرایه فازی خطی، نوعی از پروب‌های آرایه فازی است که چینش المان‌ها در آن به‌طور ردیفی در امتداد یک خط است. در این پژوهش با تحلیل روابط موجود در طراحی و عملکرد پروب‌ها در انتشار امواج فراصوت، مقادیر بهبودیافته‌ای برای پارامترهای هندسی در طراحی پروب و همچنین زمان‌بندی تأخیرها در تحریک المان‌های پروب تعیین می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد طرح بهبودیافته در مقایسه با یک پروب معمولی مشابه، یک آزمون فراصوت آرایه فازی به کمک نرم افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی می‌شود و توسط آن عملکرد پروب معمولی و بهبودیافته در پخش امواج هدایت‌شونده درون یک ورق آلومینومی مربع شکل با ضخامت کم مقایسه می‌شود. در بخش نخست ضریب تضعیف سیگنال‌های دریافتی از پژواک موج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، و در بخش دوم، عملکرد پروب‌ها در پایش شعاعی مقایسه می‌شوند. در هر دو بخش آزمون‌های شبیه‌سازی‌شده، نتایج مربوط به پروب با طراحی بهبودیافته به مراتب بهتر از پروب معمولی مشابه است. پروب با طراحی بهبودیافته ضمن انتشار امواج فراصوت با بیشینه انرژی جبهه موج، دسته پرتو را با دقت بالاتری در راستای موردنظر هدایت می‌کند.

Simulation of Waves Propagation via Linear Phased Array Probe with Improved Design in Ultrasonic Inspection Tests

Shahram Yareiee[1], Mohammad Reza Sayyed Noorani[1*], Ahmad Ghanbari[1]

1- Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
* P.O.B. 51666-14761 Tabriz, Iran, smrs.noorani@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 April 2016
Accepted 01 June 2016
Available Online 05 July 2016

Keywords:
Ultrasonic Test
Linear Phased Array Probe
Simulation of Wave Propagation
Finite Elements Method

ABSTRACT

Ultrasonic Phased Arrays are an emerging technology in nondestructive testing and evaluation. Some important factors affecting on the performance of these probes include, positioning elements in probe, number of elements, and distance between two elements, elements length, and time delays to excite probe elements. The type of linear phased array probe is a prevailing type in which elements are placed side by side and longitudinally. In this paper, based on analyzing the existent laws in design and performance of the phased array probes related to the propagation of ultrasonic waves, an improved dimensional design for ultrasonic linear phased array probes, as well as improvement of the sequence of time delays to excite the probe elements are done. In order to evaluate the performance of the probe with improved design in comparison with a similar ordinary probe, an ultrasonic phased array test is simulated using FEM-based ABAQUS software. By numerical simulations, the performance of the probe with improved design versus the ordinary probe for propagating the guided waves in a thin square aluminum plate is compared. In the first part, the attenuation coefficient of the received signals of reflected wave is evaluated, and in the second part, the performance of the probes for radial scanning is compared. Results of both simulations confirm that the performance of the probe with improved design is much better than the similar ordinary one. Especially, the probe with improved design propagates the ultrasonic waves with the maximum head wave energy, and steers them with higher accuracy towards a determined direction.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Sh. Yareiee, M. R. Sayyed Noorani, A. Ghanbari, Simulation of Waves Propagation via Linear Phased Array Probe with Improved Design in Ultrasonic Inspection Tests, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 353-361, 2016 (in Persian)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

1- مقدمه

به‌کارگیری پروب‌های آرایه فازی فراصوتی برای آزمودن و پایش غیرمخرب مواد و قطعات از روش‌های نوین در آزمون‌های غیرمخرب فراصوتی است. پروب‌های آرایه فازی خطی چیدمان خطی از فرستنده- گیرنده‌های فراصوتی هستند و هر یک از این المان‌ها به‌طور مستقل و با تأخیر زمانی معینی تحریک می‌شود. با زمان‌بندی مناسب تأخیرهای زمانی جهت تحریک المان‌ها می‌توان دسته پرتویی با مسیر تابش دلخواه درون ماده تولید و هدایت نمود. علاوه‌بر انتشار امواج، پروب وظیفه دریافت پاسخ ناشی از پژواک امواج را نیز به عهده دارد که هماهنگی بین ارسال و دریافت توسط پردازش‌گر اصلی صورت می‌گیرد. به سبب آنکه مسیر انتشار موج تولیدشده وابسته به آرایش تأخیرهای زمانی است، این مجموعه «پروب آرایه فازی» نامیده می‌شود. این نوع پروب‌ها علاوه‌بر توانایی هدایت پرتو تولیدی در یک راستای معین، توانایی تمرکز عمقی آن در نقطه‌ای معین را نیز دارند که به موجب این، دو ویژگی روبش الکترونیکی (روبش بدون جابه‌جایی پروب) و پایش قطاعی سوژه امکان‌پذیر می‌شود [1].

در کنار مزیت‌های بیان شده، به سبب پیچیدگی پروب‌های آرایه فازی چالش‌هایی نیز در طراحی و استفاده آن‌ها وجود دارد. از این جمله می‌توان به تنظیم مناسب تأخیرهای زمانی برای رساندن دسته پرتو و بیشنه کردن تمرکز آن در نقطه‌ای مفروض، حجم زیاد حافظه مورد نیاز برای ثبت و ذخیره داده‌های دریافتی از ردیاب‌های جزء و طراحی بهینه پروب از نظر اندازه‌بندی و چیدمان ردیاب‌های جزء و نیز تعداد آن‌ها اشاره کرد [2].

به دلیل مواردی چون هزینه بالای تولید و پیچیدگی تحلیل و تفسیر اطلاعات کسب شده، پروب‌های آرایه فازی معمولا کمتر استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به منظور کاهش چالش‌های فنی موجود و تسهیل و ترویج استفاده از پروب‌های آرایه فازی انجام شده است. در این‌جا به‌طور مختصر به مرور برخی از آن‌ها که با هدف بهینه‌کردن طراحی پروب و یا طراحی آزمون با پروب‌های متعدد انجام گرفته است، می‌پردازیم.

در مراجع [4,3]، با تحلیل توزیع فشار اکوستیکی امواج فراصوت که توسط یک پروب آرایه فازی منتشر می‌شود، تأثیر طول موج ارسالی و زاویه جهت‌گیری دسته پرتو روی کارایی این نوع پروب‌ها بررسی شد. در این مطالعه همچنین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در طراحی پروب‌های آرایه فازی، از قبیل تعداد المان‌ها و فاصله بین آن‌ها، روی هدایت و فرمان‌پذیری دسته پرتو ایجاد شده مورد توجه قرار گرفت. در نهایت به کمک تحلیل الگوی موج هدایت شده، پارامترهای ابعادی مناسب برای طراحی پروب پیشنهاد شد.

از دیگر موضوعات مورد توجه در طراحی پروب‌های آرایه فازی، به‌ویژه در کاربردهای پزشکی امواج فراصوت، یافتن فرکانس کاری بهینه بوده است. برای این منظور از روش‌های تحلیلی و عددی توأم استفاده شده است [5].

در مرجع [6]، از یک روش بهینه‌سازی تکاملی جهت طراحی بهینه یک پروب آرایه فازی که مناسب برای استفاده در کاربردی معین باشد، بهره گرفته شد. این فناوری در یک بسته تجاری طراحی و عرضه شد. الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده، برای حل مسئله تک هدفه و چند هدفه مناسب بود. در بهینه‌سازی تک هدفه ابعاد بهینه و تأخیرهای زمانی مناسب برای یک پروب آرایه فازی شناسایی می‌شد.

در مرجع [7] از یک الگوریتم تکاملی برای هر دو منظور طراحی و نصب پروب‌های آرایه فازی در آزمون‌های عیب‌یابی مبتنی بر روش امواج فراصوت استفاده شد. در این مطالعه دو آزمون عملی شبیه‌سازی عددی شد که در آن‌ها طراحی آزمون بر پایه پاسخ‌های به‌دست‌آمده از حل مسائل بهینه‌سازی انجام گرفت. در یک آزمون تابعی تک هدفه به‌عنوان تابع هزینه تعریف شد و در آزمون دیگر یک مسئله چند هدفه بررسی شد. در طراحی آزمون‌ها، تعیین مکان و موقعیت نصب پروب‌ها در محل، و نیز پارامترهای مبین تأخیرهای زمانی خواسته‌های مطلوب بودند که با روش بهینه‌سازی مفروض محاسبه شدند.

روش‌های احتمالی و مدل‌های آماری از دیگر روش‌ها برای بهینه‌سازی آزمون‌های غیرمخرب و پایش سلامت مبتنی‌بر امواج فراصوت هستند. مرجع [8] مسئله مکان‌یابی بهینه برای نصب محرکه و حساسه‌های مفروض در یک آزمون شبیه‌سازی شده از پایش سلامت ساختار را، بر مبنای قانون احتمالاتی بیز تحلیل کرده است. این روش به‌ویژه در مسائل روی خط قابل به‌کارگیری است و در آن براساس کمینه‌کردن پژواک‌های غیرضروری مکان بهینه نصب پروب‌ها تعیین می‌شود. نتیجه استفاده از این روش ساده‌شدن تفسیر سیگنال‌ها و داده‌های دریافتی است.

همچنین در مرجع [9] با استفاده از روش اجزاء محدود احتمالاتی به توسعه یک طرح بهینه برای آرایه پروب‌ها پرداختند. هدف اصلی این کار که روی یک ورق فولادی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی گذرا انجام شد، شناسایی عیوب ساختاری با وجود عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌ها بود، به طوری‌که پیش از بحرانی‌شدن وضعیت قطعه سیستم پایش سلامت عیب مفروض را شناسایی کند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی عددی را با آزمون عملی مقایسه کردند و درستی روش را نشان دادند. مشابه این کار مرجع [10] نیز به بهینه‌یابی مکان نصب حساسه‌های فراصوت برای پایش سلامت ساختاری در یک ورق کامپوزیتی پرداخته است. آن‌ها از یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی دقت تشخیص محل عیب استفاده کردند. تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون عملی صحت روش را تأیید کرد.

در مرجع [11] براساس یک مدل احتمالاتی که عدم قطعیت‌های موجود در بازرسی از جمله نوع عیب و مکان آن و جنس و هندسه ماده را منظور می‌کرد، به بهینه‌سازی یک پروب آرایه فازی خطی با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک پرداختند. مواردی که در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی ملاحظه شد دامنه سیگنال آرایه و نسبت سیگنال به نویز بود. نتایجی که توسط شبیه‌سازی عددی به‌دست آمده نشان داد شناسایی عیوب با آزمون بهینه‌شده نسبت به پایش «بی- اسکن» از قدرت تشخیص بالاتری برخوردار است.

با مرور پژوهش‌های موجود در ادبیات فن، اهمیت موضوع بهینه‌سازی آزمون‌های فراصوت با پروب‌های متعدد و یا طراحی یک پروب آرایه فازی با ساختار ابعادی بهینه، به‌ویژه در سال‌های اخیر مشهود است. بدین منظور پژوهشگران اغلب تلاش کرده‌اند تا انتشار دسته پرتو فراصوت را تقویت کنند و از این‌رو در بیشتر موارد بیشینه کردن انرژی جبهه موج با تعریف یک تابع هدف مطلوب بوده است. چنان‌که ملاحظه شد الگوریتم‌های بهینه‌یابی مبتنی‌بر جستجو و یا تخمین‌های احتمالاتی به طور مکرر برای حل مسئله به‌کار گرفته شده است.

در این مقاله براساس روابط تحلیلی و اصول تجربی حاکم در عملکرد پروب‌های آرایه فازی خطی، به بازطراحی ابعادی یک پروب نمونه به قصد بهبود عملکرد آن در انتشار موج می‌پردازیم. در این بازطراحی ابعادی به دنبال افزایش هدایت‌پذیری پرتو در مسیر مطلوب با کمینه اتلاف انرژی هستیم. این امر با اصلاح ابعاد پروب و نیز تنظیم تأخیرهای زمانی در تحریک

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

هر یک از المان‌ها محقق می‌شود. یک آزمون فراصوتی جهت صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس طراحی می‌شود، که با آن نحوه انتشار امواج توسط یک پروب معمولی رایج و پروب مشابه آن با طراحی بهبودیافته مقایسه می‌شوند. در این شبیه‌سازی عددی، انتشار امواج در یک ورق آلومینیومی مربعی کم ضخامت بررسی می‌شود. در بخش نخست مقایسه نتایج، ضریب تضعیف سیگنال‌های پژواکی دریافتی توسط پروب‌ها بررسی می‌شوند. در بخش دوم، عملکرد دو پروب معمولی و بهبودیافته در پایش شعاعی با یکدیگر مقایسه می‌شود. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که عملکرد پروب با طراحی بهبودیافته به مراتب بهتر از نمونه معمولی مشابه آن است. پروب آرایه فازی خطی با طراحی بهبودیافته، ضمن انتشار امواج با بیشینه انرژی جبهه موج، پرتو موج را با دقت بالاتری در مسیر مطلوب هدایت می‌کند. این نتایج با پویانمایی نرم‌افزاری انتشار امواج مشاهده شد که در آن امواج انتشار یافته از پروب با طراحی بهبودیافته با کمینه افت انرژی عمق ورق مفروض را پایش می‌کنند و پژواک قوی‌تری تولید می‌کنند.

2- پروب آرایه فازی خطی و محدودیت‌های ابعادی در طراحی آن

جهت بازطراحی ابعادی پروب آرایه فازی، ابتدا باید روابط حاکم بر طراحی و عملکرد آن را بررسی و تحلیل کرد تا با تنظیم پارامترهای دخیل در هدایت و تمرکز دسته پرتو، به عملکرد بهتری از پروب آرایه فازی نزدیک شد. از این‌رو با یک مسئله بهینه‌سازی پارامتری روبه‌رو هستیم که پس از یافتن مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای طراحی پروب، پروبی با ابعاد بهینه خواهیم داشت. در شکل 1، پارامترهای ابعادی مؤثر در عملکرد یک پروب آرایه فازی خطی با 8 المان نشان داده شده است. آن‌ها شامل عرض المان، a، طول المان، l، و فاصله بین المان‌ها، d، است. در ادامه به تعریف دو شاخص عملکرد پروب آرایه فازی یعنی هدایت‌پذیری پرتو[1] و تیزی لوب[2] می‌پردازیم که مبنای بازطراحی ابعادی پروب در نظر گرفته می‌شوند.

برای تحلیل میدان فشار آکوستیک پروب آرایه فازی خطی مفروض، المان‌های آن به‌صورت تعدادی نقاط گسسته که با فاصله مشخص d در یک ردیف کنار هم قرار گرفته‌اند مدل می‌شود. فرمان‌گیری دسته پرتو و کیفیت جهت‌گیری آن به کمک تابع هدایت پرتو تحلیل می‌شود. براساس تعریف هدایت پرتو عبارت است از بزرگی فشار آکوستیک در هر زاویه دلخواه θ درون صفحه انتشار که نسبت به مقدار فشار آکوستیک در زاویه فرمان‌دهی (مطلوب) بهنجار می‌شود؛ مطابق با رابطه (1) است [4].

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin\left[\frac{\pi d(\sin\theta_s - \sin\theta)}{\lambda} N\right]}{N \sin\left[\frac{\pi d(\sin\theta_s - \sin\theta)}{\lambda}\right]} \right| \qquad (1)$$

در این رابطه θ_s زاویه فرمان‌دهی پرتو، N تعداد المان‌ها، λ طول موج پرتو، d فاصله بین المان‌ها، و θ زاویه دلخواه در بازه $[-90°; 90°]$ است.

تحلیل الگوهای هدایتی (با استفاده از رابطه (1)) با هدف تعیین پارامترهای ابعادی بهینه برای یک پروب آرایه فازی خطی حائز اهمیت است. یکی از ویژگی‌های مهمی که با ترسیم تابع هدایت پرتو برحسب زاویه θ آشکار می‌شود قله‌های متعدد با ارتفاع متفاوت است که به هر یک «لوب» گفته می‌شود. برحسب ارتفاع، لوب‌های آشکار شده توسط تابع هدایت پرتو، مطابق شکل 2، به سه نوع لوب اصلی[3]، لوب‌های جانبی[4] و لوب‌های خاج[5] دسته‌بندی می‌شوند، که در یک پروب با هدایت‌پذیری پرتو بالا انتظار می‌رود تنها لوب اصلی در مقایسه با دیگر لوب‌ها ارتفاع بلند داشته باشد.

کیفیت فرمان‌پذیری پرتو در امتداد راستایی با زاویه معین توسط معیاری به نام «تیزی لوب اصلی» و مقدار انرژی نشتی جانبی تعیین می‌شود؛ بنابراین یک هدف مطلوب در بهبوددادن طراحی پروب آرایه فازی خطی، رسیدن به تیزترین لوب اصلی است، در حالی که لوب‌های جانبی و خاج حذف شوند. تیزی لوب پارامتری مهم در طراحی یک پروب آرایه فازی است. به‌عنوان معیاری برای سنجش تیزی لوب (جایی که تابع هدایت پرتو بهنجار شده باشد) می‌توان پهنای لوب اصلی ایجادشده در یک زاویه مفروض را ارزیابی کرد. بدین ترتیب می‌توان هدایت‌پذیری پرتو جهت تمرکز در امتداد یک راستای داده شده را کیفیت‌سنجی کند. پهنای لوب اصلی با رابطه (2) قابل محاسبه است [4].

$$q = \frac{1}{\pi}\left[\sin^{-1}\left(\sin\theta_s + \frac{\lambda}{N\,d}\right) - \sin^{-1}\left(\sin\theta_s - \frac{\lambda}{N\,d}\right)\right] \qquad (2)$$

هر چه مقدار q کوچک‌تر باشد نماینده تیزی بیشتر لوب اصلی و هدایت‌پذیری بهتر پرتو در امتداد یک راستای مفروض با زاویه θ_s است. چنان‌چه در رابطه بالا جمله $\lambda/(N\,d)$ به صفر نزدیک شود، آن‌گاه مقدار q نیز به صفر نزدیک می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد هدایت‌پذیری پرتو با

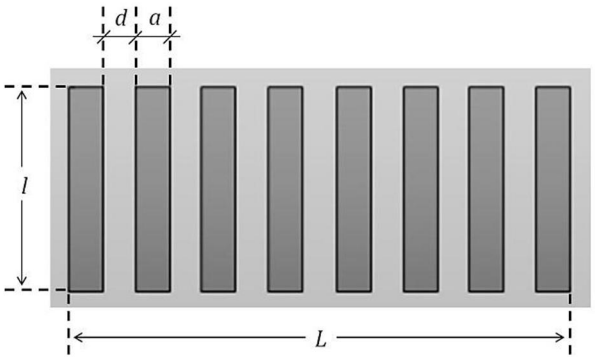

Fig. 1 Dimensional parameters of a linear phased array probe

شکل 1 پارامترهای ابعادی یک پروب آرایه فازی خطی

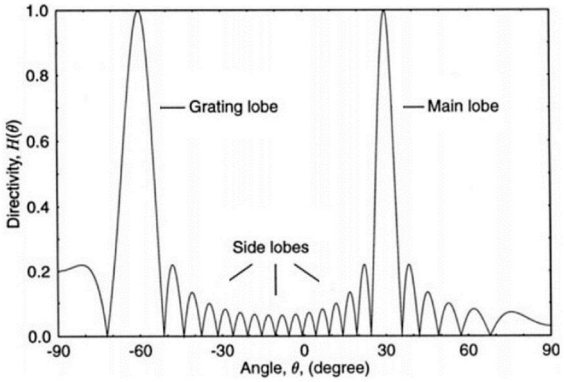

Fig. 2 Changes of a beam directivity function over a semicircle area where focused on the angle of 30° (source: Ref. [3])

شکل 2 تغییرات یک تابع هدایت پرتو در ناحیه‌ای نیم دایره‌ای با هدف‌گیری روی زاویه 30°، (برگرفته از: مرجع [3])

[1] Beam directivity
[2] Lobe sharpness
[3] Main Lobe
[4] Side Lobes
[5] Grating Lobes

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

افزایش تعداد المان‌ها و نیز افزایش فاصله بین آن‌ها بهبود می‌یابد، و البته با کاهش طول موج، که یک پارامتر ابعادی در طراحی پروب محسوب نمی‌شود، همچنین می‌توان دید که به ازای طول محدود پروب، q تابعی از زاویه فرمان‌دهی پرتو است. این بدین معنی است که پروب در متمرکزکردن پرتو تابش شده روی برخی زوایا بهتر از برخی دیگر عمل می‌کند.

اگرچه افزایش تعداد و فاصله بین المان‌ها در یک پروب آرایه فازی موجب افزایش تیزی لوب اصلی خواهد شد، ولی در عمل محدودیتی برای آن وجود دارد. افزایش دادن تعداد المان‌ها به دلیل پیچیدگی کنترل الکترونیکی، هزینه و همچنین طول محدود پروب گزینه مطلوبی نیست. تعداد المان‌ها باید به‌گونه‌ای مناسب انتخاب شود تا در عملکرد سیستم مشکل ایجاد نشود. در ادبیات فن بیان شده است که برای تعداد المان کمتر از 8 تیزی لوب بسیار سریع کاهش می‌یابد و برای تعداد المان بیشتر از 32 تقریبا تیزی لوب یکنواختی خواهیم داشت. از این‌رو با ارزیابی عملکرد پروب آرایه فازی نسبت به هزینه‌ها، تعداد 16 المان به‌عنوان گزینه مناسب پیشنهاد شده است [4].

راه دیگر برای افزایش دادن تیزی لوب و به تبع آن هدایت دقیق‌تر پرتو، ایجاد فاصله بیشتر بین المان‌های پروب است. در طول موج ثابت، هر چه فاصله بین المان‌ها بیشتر شود، پهنای لوب اصلی کاهش می‌یابد و در نتیجه هدایت‌پذیری پرتو بهبود می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش فاصله بین المان‌های پروب لوب‌های خاج بیشتری ایجاد می‌شود. از این‌رو باید یک فاصله بهینه برای چینش المان‌ها کنار هم محاسبه کرد. این فاصله به نام «فاصله بحرانی» معرفی می‌شود. برای محاسبه فاصله بحرانی با استفاده از رابطه (1)، فرض می‌کنیم تابع هدایت پرتو به ازای یک زاویه فرمان‌دهی مفروض، تنها یک لوب با ارتفاع واحد درون بازه زاویه‌ای $[-90°;90°]$ تشکیل می‌دهد و لوب تیز دومی با اندازه واحد تنها در کران پایین بازه امکان تحقق دارد. به عبارت دیگر محل نخستین لوب خاج با فاصله بحرانی تنظیم می‌شود. بدین شکل مقدار تابع هدایت را در کران پایین (زاویه قائمه در جهت ساعت‌گرد) برابر واحد قرار می‌دهیم و از رابطه (1) فاصله بحرانی برای چینش المان‌های یک پروب آرایه فازی خطی را به صورت رابطه (3) محاسبه می‌کنیم.

$$d_{\mathrm{cr}} = \frac{\lambda}{1+\sin\theta_{\mathrm{s}}} \tag{3}$$

بدیهی است مقدار بالا بیشترین فاصله‌ای است که می‌توانیم بین المان‌ها داشته باشیم، بدون آن‌که برای یک زاویه فرمان‌دهی مفروض، دو لوب با ارتفاع واحد درون بازه $[-90°;90°]$ تشکیل شده باشد. درستی این نتیجه را می‌توان با جای‌گذاری مستقیم رابطه (3) در رابطه (1) و میل دادن زاویه به مقدار $\theta = -\pi/2$ تحقیق کرد.

در رابطه بالا می‌توان انتظار داشت با افزایش طول موج امکان افزایش فاصله بحرانی بین المان‌ها فراهم شود. با این حال محدودیت دیگری در افزایش طول موج وجود دارد؛ زیرا که بیشترین افت شدت میدان آکوستیک ایجاد شده توسط پروب آرایه فازی در پایش ناحیه آزمون 6- دسی‌بل توصیه شده است [12]. این حد کمینه با پارامترهای عرض المان‌های پروب و طول موج استفاده شده در آزمون به‌صورت رابطه (4) رابطه دارد [13].

$$\beta_{-6\mathrm{dB}} = 2\sin^{-1}\left(\frac{0.6\,\lambda}{a}\right) \tag{4}$$

اگر لازم باشد در سراسر یک ناحیه آزمون نیم صفحه افت انرژی بیش از 6- دسی‌بل نشود، باید $0.6\,\lambda/a \geq 1$. آن‌گاه پرتو صوتی توانایی تمرکز با شدت قابل قبول در بازه زاویه‌ای $[-90°;90°]$ را خواهد داشت؛ بنابراین برای پروب آرایه فازی خطی باید شرط $a \leq 0.6\,\lambda$ برقرار باشد. بدین ترتیب این محدودیت روی بیشنه عرض المان‌ها نیز باید در مسئله طراحی ابعادی پروب آرایه فازی خطی مفروض لحاظ شود.

3- تأخیر زمانی بهینه جهت هدایت و تمرکز امواج فراصوت

در بخش پیشین شاخص‌ها و محدودیت‌های عملکردی در طراحی و کاربرد پروب‌های آرایه فازی خطی به‌طور مختصر اشاره شدند و محدوده‌های مجاز توصیه شده در طراحی ابعادی آن‌ها نیز بیان شدند. در این بخش به تعیین زمان‌بندی درست جهت اعمال تأخیر زمانی در تحریک المان‌های مجاور می‌پردازیم و نتیجه آن را در کیفیت پایش شعاعی پروب آرایه فازی خطی در بخش بعد بررسی می‌کنیم.

پایش الکترونیکی (بدون حرکت‌دادن پروب روی قطعه آزمون) و هدایت پرتو موج فراصوتی روی ناحیه‌ای خاص جهت پایش سلامت سوژه از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از پروب‌های آرایه فازی محسوب می‌شود. اساس پایش الکترونیکی زمان‌بندی تأخیرها در تحریک المان‌های پروب است. تأخیرهای زمانی با توجه به ملاحظاتی از جمله نوع پایش و فاصله کانونی لازم برای متمرکز شدن پرتو انتشار یافته به داخل ماده محاسبه می‌شود. زمان‌بندی درست در اعمال تأخیرها در تحریک المان‌ها برای فرمان‌دهی پرتو و داشتن بیشینه انرژی در جبهه موج الزامی است [12].

در مرجع [12] درباره چگونگی زمان‌بندی تأخیرها در تحریک المان‌ها و عوامل دخیل در آن جهت هدایت کردن پرتو و تمرکز آن در محل مطلوب به طور تحلیلی بحث شده است. در روابط ارائه‌شده تنظیم تأخیرهای زمانی علاوه‌بر سرعت موج صوتی و زاویه فرمان‌گیری وابسته به تعداد المان‌ها و فاصله کانونی تمرکز پرتو نیز است. هدف ما در تنظیم تأخیرهای زمانی تولید پرتو صوتی با بیشترین انرژی جبهه موج است به طوری‌که محدودیت‌های بیان‌شده در بخش پیشین نیز در طراحی پروب آرایه فازی خطی رعایت شده باشد.

هدف مطلوب هدایت پرتو صوتی درون یک ناحیه نیم صفحه‌ای است. برای این منظور، مطابق شکل 3، نیم صفحه آزمون به دو ربع صفحه تقسیم شده و تأخیر زمانی بین المان‌های مجاور پروب برای مواردی که نقطه هدف درون هر یک از آن ربع صفحه‌ها قرار گیرد، به طور جداگانه محاسبه می‌شود. مطابق شکل فرض شده است در ربع صفحه اول $\Phi \geq 0$ و در ربع صفحه دوم $\Phi < 0$ باشد. مختصات نقطه هدف نیز با (x,z) نشان داده شده است. در این شکل s نماینده اندازه گام المان‌هاست که برابر با جمع اندازه عرض و فاصله بین المان‌هاست. به علاوه با فرض بزرگی ناحیه آزمون در مقایسه با ابعاد پروب، زاویه فرمان‌گیری Φ زاویه بین محور z و پرتوی است که از وسط المان میانی تا نقطه هدف رسم می‌شود. فاصله کانونی F نیز به همین ترتیب سنجش می‌شود [12].

با محاسبه مدت زمان لازم برای رسیدن موج تابش‌شده از هر المان به نقطه هدف، که دور از منبع فرض می‌شود و سپس تفریق دو به دوی آن‌ها، تأخیر زمانی محاسبه می‌شود؛ اگر نقطه هدف در ربع صفحه اول باشد به‌صورت رابطه (5) است.

$$\Delta t = \frac{1}{c}\left[\frac{(m-1)(M-m)\,s^2\cos^2\phi}{2F} + s(m-1)\sin\phi\right] \tag{5}$$

و اگر نقطه هدف در ربع صفحه دوم به‌صورت رابطه (6) است.

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

$$\Delta t = \frac{1}{c}\left[\frac{(m-1)(M-m)\, s^2 \cos^2\phi}{2F} + s(M-m)\sin|\phi|\right] \quad (6)$$

که در این‌جا، c سرعت انتشار موج و M تعداد المان‌هاست. اثبات کامل روابط بالا در صفحه 99-100 مرجع [12] موجود است.

4- شبیه‌سازی آزمون فراصوتی با پروب‌های معمولی و بهبودیافته

در دو بخش پیشین شاخص‌های ابعادی در طراحی پروب آرایه فازی خطی و تأخیرهای زمانی درست در تحریک المان‌ها جهت افزایش هدایت‌پذیری و تمرکز حداکثری پرتوی صوتی روی هدف مورد نظر درون ناحیه آزمون بررسی شدند. اکنون در این بخش با شبیه‌سازی آزمون فراصوت با دو نوع پروب معمولی و بهبودیافته، نشان خواهیم داد که عملکرد پروب بهبودیافته به مراتب بهتر از یک پروب آرایه فازی معمولی مشابه آن است.

دو آزمون برای هر یک از پروب‌ها توسط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی می‌شود. آزمون‌ها جهت پایش درون یک ورق آلومینیومی مربعی طراحی می‌شوند. در آزمون اول زاویه تابش پرتو صوتی مستقیم (عمود بر لبه ورق) خواهد بود و در آزمون دوم پرتو تحت زاویه مایل تابیده می‌شود. در طراحی آزمون باید به مواردی چون شکل موج و طول موج کاری، شکل تابع تحریک و محل قرارگیری پروب توجه شود. در شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود نیز باید مواردی چون نوع جزء انتخابی، اندازه شبکه‌بندی و گام زمانی، برای حل مسئله به روش عددی، به درستی انتخاب شوند.

طول موج پرتو صوتی منتشرشده درون ورق تابعی از بسامد تحریک، f، و سرعت انتشار موج درون ماده، c، است؛ این سرعت به نوبه خود تابعی از چگالی و خواص کشسانی ماده است. به علاوه سرعت انتشار امواج به شکل موج نیز بستگی دارد. موج طولی بیشترین سرعت انتشار در ماده را دارد و موج عرضی سرعتی نصف آن دارد. برای انجام آزمون‌های فراصوت در ورق‌ها و پوسته‌های جداره نازک در اغلب موارد از شکل موج ورقی استفاده می‌شود. سرعت انتشار موج ورقی تابعی از بسامد موج و نیز جنس و ضخامت ورق است و معمولا با استفاده از منحنی‌های پراکنش محاسبه می‌شود [14-16]. در این مقاله نیز با توجه به نازک بودن ورق آلومینیومی مفروض، موج ورقی جهت شبیه‌سازی انتشار امواج درون ورق استفاده می‌شود. از این‌رو ابتدا منحنی های پراکنش متناظر با جنس و ضخامت ورق مفروض، با استفاده از نرم‌افزار والن[1]، مطابق شکل 4، استخراج شده‌اند. همچنان‌که مشاهده می‌شود، در بسامدهای بالاتر از 1.5 MHz مودهای مختلفی با سرعت‌های گروه متفاوت وابسته به بسامد (در ضخامت 1 mm) منتشر می‌شود. در بازه بسامدی 1 تا 1.5 MHz، شکل نامتقارن مود صفرم موج ورقی که با A_0 مشخص شده است، تغییراتی چندانی از خود نشان نمی‌دهد. از این‌رو این شکل مود در بسامد 1 MHz به‌عنوان موج ورقی مطلوب در شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. در بسامد انتخاب شده، سرعت گروه موج در مود A_0 برابر با 3120 m/s خواهد بود (نگاه به منحنی پخش شکل 4). بدین ترتیب طول موج منتشر شده که برای محاسبه ابعاد بهینه و سپس تعیین تأخیرهای زمانی لازم می‌شود، برابر خواهد بود با $\lambda = c/f = 3.12$ mm.

با تعیین طول موج کاری، مقادیر بهینه عرض و فاصله بین المان‌ها براساس مقادیر حدی یادشده در بخش 2 محاسبه می‌شوند. در این محاسبات زاویه فرمان‌دهی (بیشینه) 37.5° درنظر گرفته شده است. بدین ترتیب ناحیه آزمون، قطاعی به زاویه 75° خواهد بود. انتخاب ناحیه آزمون اختیاری بوده است و می‌توانستیم تمام نیم صفحه را به‌عنوان ناحیه آزمون انتخاب کنیم که البته سبب کاهش بیشتر در فاصله بین المان‌ها می‌شد، ولی برای آزمون‌های عملی زاویه قطاع پایش در حدود مقدار انتخاب‌شده مناسب است؛ بنابراین در محاسبه ابعاد $\lambda = 3.12$ mm، $\theta_s = 37.5°$ و $\beta_{-6dB} = 75°$ منظور می‌شود، و با دقت یک رقم اعشار $\sin(37.5°) = 0.6$ می‌گیریم. آن‌گاه فاصله بین المان‌ها و عرض المان‌ها برای طراحی بهبودیافته به‌ترتیب از روابط 3 و 4 محاسبه می‌شود. نتایج حاصل در مقایسه با نمونه پروب معمولی مشابه (براساس داده‌های فنی تطبیق‌شده در بسامد 1 MHz برای نمونه سری 020 از پروب‌های ویژه تشخیص خوردگی مرجع [17]) در جدول 1 فهرست شده‌اند. همچنین مقادیر مشخصه‌های فیزیکی- مکانیکی آلومینیوم که در شبیه‌سازی استفاده می‌شود در جدول 2 داده شده است.

جهت شبیه‌سازی پایش شعاعی، زاویه مطلوب تابش پرتو 35°- یعنی در نزدیکی مرز ناحیه آزمون در ربع‌صفحه دوم، درنظر گرفته خواهد شد، تا نامناسب‌ترین شرایط برای هدایت شعاعی پرتو بررسی شده باشد. همچنین تعداد المان‌ها در هر دو پروب مورد مقایسه 8 عـدد گرفته می‌شود. این تعداد کمترین تعداد المانی است که در پروب‌های آرایه فازی تجاری ممکن است وجود داشته باشد و با آن بدترین شرایط در تمرکز لوب اصلی ایجاد می‌شود. فاصله کانونی نقطه هدف $F = 100$ mm لحاظ می‌شود. گام $s = a + d$ برای هر پروب با داده‌های جدول 1 محاسبه می‌شود. سرعت انتشار موج نیز $c = 3120$ m/s بیان شد. بدین‌ترتیب با استفاده از رابطه 6 برای محاسبه تأخیرهای زمانی تحریک المان‌ها، که نسبت به دورترین آن‌ها یعنی المان 8 سنجیده می‌شود، نتایج مطابق جدول 3 به‌دست می‌آیند.

طراحی آزمون فراصوتی با پروب آرایه فازی مشابه آزمون‌هایی است که با پروب‌های ساده انجام می‌شود. تنها در این‌جا تعداد بیشتری فرستنده- گیرنده

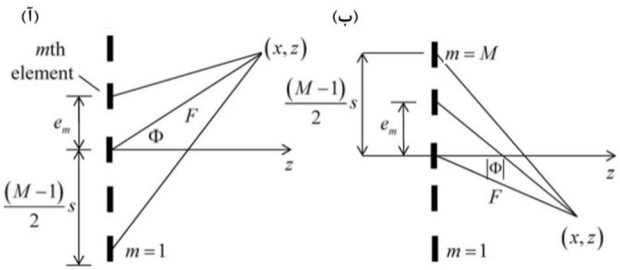

Fig. 3 Geometrical parameters in steering and focusing an array beam, a) for a positive steering angle, b) for a negative one (source: Ref. [12])

شکل 3 پارامترهای هندسی در فرمان‌گیری و تمرکز پرتو حاصل از آرایه، الف) برای یک زوایه فرمان‌گیری مثبت، ب) زاویه فرمان‌گیری منفی، (برگرفته از مرجع [12])

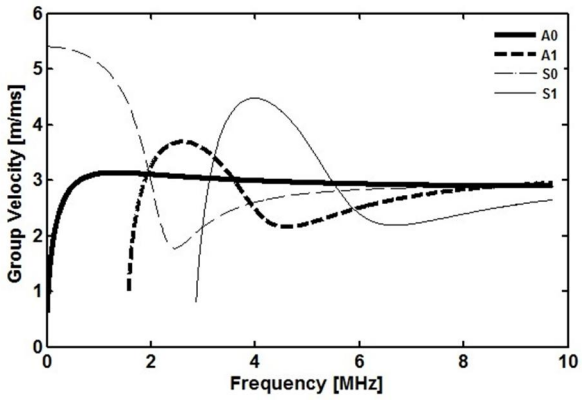

Fig. 4 Dispersion curve of the 1 mm thickness aluminum plate

شکل 4 منحنی پخش ورق آلومینیومی با ضخامت 1 میلی‌متر

[1] Vallen AE-Suite Software

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

جدول 1 مقادیر بهینه در طراحی ابعاد یک پروب آرایه فازی خطی در مقایسه با یک پروب معمولی

Table 1 The optimized values for dimensional design of a linear phased array probe vs. an ordinary one

پارامتر	پروب معمولی*	پروب بهبودیافته
a	4.75 mm	3.12 mm
d	2.75 mm	1.95 mm

* نمونه سری 020 پروب آرایه فازی مخصوص تشخیص خوردگی [17]؛ ابعاد تطبیقی برای بسامد کاری 1 MHz با فرض ثابت بودن انتشار موج در مود A_0.

جدول 2 مشخصات فیزیکی– مکانیکی آلومینیوم

Table 2 Physical and mechanical characterizations of Aluminum

مدول کشسانی (GPa)	نسبت پواسون	چگالی (kg/m³)	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج عرضی (m/s)
72	0.33	2700	6320	3130

جدول 3 تأخیرهای زمانی در تحریک المان‌ها نسبت به المان 8 (میکروثانیه)

Table 3 Time delays with respect to the 8th element (μs)

شماره المان‌ها	m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7
تأخیر (پروب معمولی)	10.2	9.1	7.9	6.5	5.1	3.5	1.8
تأخیر (پروب بهبودیافته)	6.9	6.1	5.2	4.3	3.3	2.2	1.1

وجود دارد و براساس پردازش اطلاعات کسب‌شده از تمام آن‌ها به ارزیابی سوژه پرداخته می‌شود. مطابق شکل 5 در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، برای تابش پرتو نخستین به داخل ورق آلومینیومی، پروب در مرکز یکی از اضلاع سطح بالایی ورق قرار داده می‌شود. این مکان از این جهت انتخاب شد که سبب کمینه‌شدن نوفه‌های احتمالی و پژواک‌های غیر ضروری می‌شود.

در عمل تولید موج ورقی با پروب فراصوتی به واسطه یک موج‌بر انجام می‌پذیرد. براساس قانون اسنل موج طولی که توسط پروب منتشر می‌شود، در عبور از موج‌بر شکسته شده و به این صورت دسته پرتوی جدیدی از نوع موج عرضی نیز درون ورق ایجاد می‌شود [19,18,12].

در محیط شبیه‌سازی تحریک ورودی به شکل جابه‌جایی و روی گره‌های متناظر با محل نشست المان‌های پروب اعمال می‌شود. از این‌رو خروجی اندازه‌گیری‌شده نیز جابه‌جایی‌های عمودی روی سطح بالایی ورق خواهد بود. حرکت ذرات در مود نامتقارن (یا مود خمشی) موج ورقی عمود بر مسیر انتشار موج (یعنی عمود بر سطح ورق) است، به طوری که جابه‌جایی ذرات متناظر روی صفحات بالایی و زیرین هم‌فاز بوده و از این‌رو نسبت به صفحه میانی تغییر شکل متقارن ایجاد نمی‌شود [20,19].

شکل تابع تحریک المان‌های پروب موضوع دیگری است که در طراحی آزمون‌های فراصوتی باید به آن توجه کنیم. مودولاسیون دامنه سینوسی جهت طراحی تابع تحریک در آزمون‌های فراصوتی روشی مرسوم است [16]. مطابق شکل 6، تابع تحریک المان‌ها در هر دو پروب براساس همین روش تولید می‌شود که به‌صورت تابع (7) خواهد بود.

$$F(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f t)\sin\left(\dfrac{2\pi f t}{5}\right) & t < \dfrac{2.5}{f} \\ 0 & t > \dfrac{2.5}{f} \end{cases} \tag{7}$$

در تابع تحریک بالا طول پنجره2.5 برابر دوره تناوب موج سینوسی در بسامد مرکزی f = 1 MHz درنظر گرفته شده است. این بازه زمانی برای تحریک و تولید موج نخستین مناسب است، زیرا مدت زمان کمتر موجب پهن‌شدن نوار بسامدی و در نتیجه افزایش احتمال ایجاد مودهای بالا خواهد شد، که به این پدیده پراکنش موج ورقی می‌گویند. از سوی دیگر گسترش بازه زمانی تحریک سبب تداخل موج تحریک با امواج بازگشتی ناشی از پژواک در لبه‌های ورق می‌شود، که در این صورت نیز شناسایی موج به‌ویژه در کاربردهای عیب‌یابی مشکل می‌شود [16,15].

در آخر باید به ملاحظاتی که برای حل به روش اجزاء محدود لازم است بپردازیم. با توسعه بسته‌های نرم‌افزاری که از عهده انجام حجم عظیم محاسبات عددی در روش اجزاء محدود برمی‌آیند، بسیاری از پژوهش‌گران این روش را برای شبیه‌سازی آزمون‌های فراصوت و انتشار امواج به‌کار می‌برند [21-24]. در این پژوهش از بسته نرم‌افزاری آباکوس صریح نسخه 14.6 برای شبیه‌سازی آزمون‌های فراصوت طراحی شده، به روش اجزاء محدود استفاده می‌شود.

وضوح امواج منتشرشده به اندازه اجزاء بستگی دارد. پیشنهاد می‌شود که اندازه اجزاء طوری انتخاب شود که یک طول موج درون 10 تا 20 جزء جای گیرد [25,24]. در نرم‌افزار آباکوس روش انتگرال‌گیری صریح برای حل مسئله موج مناسب است. در این روش جهت تقریب انتگرال زمانی، بازه زمانی کل به تعدادی گام‌های بسیار کوچک تقسیم می‌شود. اندازه این گام زمانی برابر با زمان لازم برای عبور موج از کوچک‌ترین بعد اجزاء انتخاب می‌شود تا از ناپایداری حل عددی اجتناب شود.

پس از مدل‌سازی و تعریف مشخصات مکانیکی ورق در نرم‌افزار آباکوس، براساس ملاحظات بحث‌شده در مقالات پیشین [27,26]، از شبکه‌بندی با

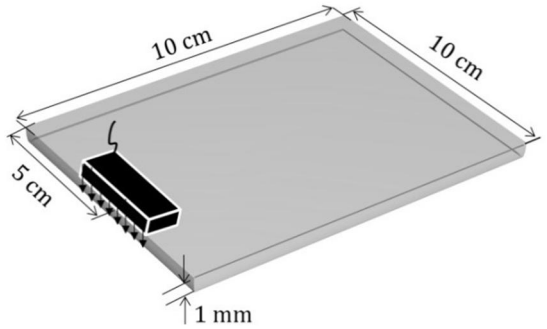

Fig. 5 Location of the probe on the plate in UT set up

شکل 5 محل قرارگیری پروب روی ورق در آماده‌سازی آزمون فراصوت

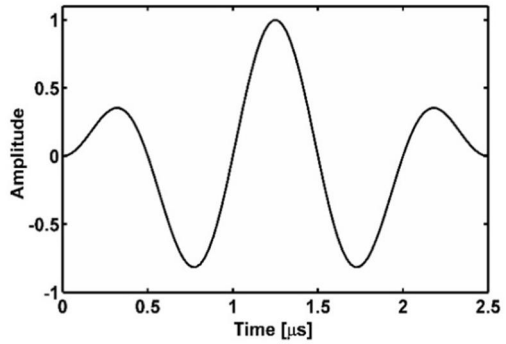

Fig. 6 Probe's exciting signal with the central frequency of 1MHz, without regarding the time delay

شکل 6 سیگنال برانگیزش پروب، با بسامد مرکزی 1 MHz، بدون در نظرگیری تأخیر زمانی

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

اجزاء 3 بعدی صلب 8 گره دارای 24 درجه آزادی (C3D8R[1]) استفاده کردیم. بر آن اساس اندازه مناسب اجزاء 0.2 mm درنظر گرفته شد. به علاوه اندازه تعیین‌شده برای اجزاء در تمام حوزه مربعی شکل ورق ثابت است. تغییر اندازه اجزاء ممکن است به‌عنوان ناپیوستگی‌هایی ریز تعبیر شود که این موضوع می‌تواند در شبیه‌سازی انتشار موج خطا ایجاد کند.

5- نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

در شبیه‌سازی آزمون اول، پرتو فراصوت با زاویه صفر درجه طوری که راستای آن عمود بر لبه ورق است توسط هر یک از پروب‌های آرایه فازی معمولی و بهینه شده تولید می‌شود. این آزمون را پایش مستقیم نام می‌دهیم. این آزمون به منظور مقایسه عملکرد دو پروب بر مبنای ضریب تضعیف[2] هر یک از پروب‌ها شبیه‌سازی می‌شود.

پس از تابش موج فراصوتی به داخل ناحیه آزمون پژواک پرتو صوتی توسط تک‌تک المان‌های پروب ثبت می‌شود. آن‌گاه با پردازش‌های اولیه روی سیگنال‌های ثبت‌شده توسط المان‌ها، مطابق اصول یادشده در مرجع [12]، سیگنال برآیند موج پژواکی تشکیل می‌شود. در شکل 7 سیگنال برآیند دریافتی توسط هر یک از پروب‌های معمولی و بهینه نشان داده شده است. به‌طور مشخص دو رشته قله مجزا در شکل هر یک از سیگنال‌های دریافتی دیده می‌شود، که اولی مربوط به لحظه ارسال پرتو و دومی مربوط به لحظه رسیدن و ثبت نخستین پژواک است. بدیهی است هر چه اتلاف انرژی در طی مسیر کمتر رخ داده باشد، رشته دوم دارای دامنه بزرگ‌تری خواهد بود. بر این مبنا ضریب تضعیف به‌صورت رابطه (8) تعریف می‌شود.

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \frac{10}{L}\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \left[\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{mm}}\right] \tag{8}$$

در این‌جا $L = 20\ \mathrm{cm}$ مسافتی است که پرتو داخل ناحیه آزمون پیش می‌رود، و A_1 و A_2 به ترتیب مقادیر انرژی قله‌های اول و دوم سیگنال برآیند است. نتایج برای هر یک از پروب‌ها در جدول 4 داده شده که دیده می‌شود ضریب تضعیف برای پروب بهبودیافته که در آن المان‌ها با تأخیر زمانی درست تحریک شده‌اند به اندازه 43.75% کاهش یافته است.

همچنین در این آزمون می‌توان سرعت متوسط انتشار موج درون ورق را محاسبه کرد. با توجه به شکل 7 می‌توان مشاهده کرد نخستین پژواک دریافتی در مدت زمان بین 70 تا 75 میکروثانیه به گیرنده می‌رسد. در پروب معمولی این زمان کمی بیشتر است، و این به دلیل تضعیف بیشتر موج منتشر شده توسط آن است. با مبنا قرار دادن پروب بهبودیافته، سرعت متوسط موج در حدود 2860 m/s محاسبه می‌شود، که نزدیک به سرعت مود نامتقارن در بسامد 1 MHz است. بدین صورت اطمینان داریم موج منتشرشده در ورق مود نامتقارن بوده است.

در شبیه‌سازی دوم، آزمون فراصوت برای ارسال یک پرتو موج در زاویه 35- درجه نسبت به محور افقی طراحی شده است. ورق آلومینیومی مربعی به ضلع 10 سانتی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر، مشابه با آزمون اول، به‌عنوان نمونه آزمایش انتخاب شد. در هر یک از مدل‌های معمولی و بهبودیافته، مشخصات پروب‌ها و نیز تأخیر زمانی برای تحریک پروب‌ها مطابق با آن‌چه در بخش 4 عنوان و تنظیم شد. اعمال تأخیر زمانی غیر صفر سبب انتشار پرتو موج در یک راستا مایل می‌شود. از این‌رو این آزمون را پایش شعاعی نامیدیم. هدف اصلی این آزمون مقایسه هدایت‌پذیری و کیفیت پخش موجی است که توسط

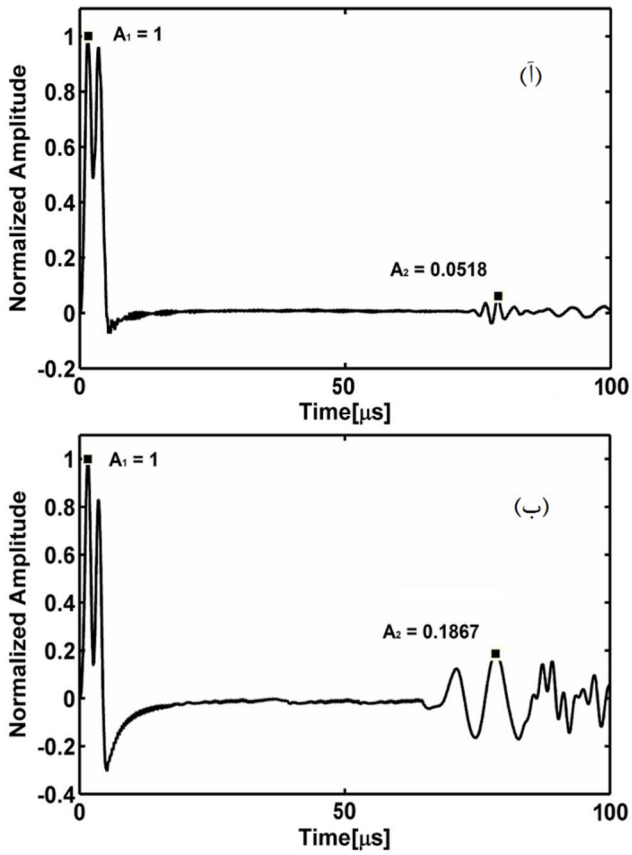

Fig. 7 Aquired signals by probes, a) ordinary, b) optimized

شکل 7 سیگنال‌های دریافتی از پروب‌ها، الف) معمولی، ب) بهبودیافته

جدول 4 ضریب تضعیف سیگنال دریافتی از پروب‌های معمولی و بهبودیافته

Table 4 Attenuation coefficient of the signal acquired by probes, ordinary vs. optimized

نوع پروب	دامنه قله اول	دامنه قله دوم	ضریب تضعیف
معمولی	1	0.0518	0.064
بهبودیافته	1	0.1867	0.036

هر یک از پروب‌های معمولی و بهبودیافته تولید شود.

پس از شبیه‌سازی آزمون توسط نرم‌افزار آباکوس، جهت مقایسه نتایج، ابتدا تابع هدایت‌پذیری برای هر پروب در یک ناحیه نیم‌صفحه و در شعاعی به فاصله 10 سانتی‌متر از محل پروب به‌طور عددی محاسبه شد، که در شکل 8 ارائه شده‌اند. لازم به توضیح است که به جای محاسبه نسبت فشار آکوستیک از نسبت جابه‌جایی قائم استفاده شد، که به‌عنوان خروجی‌های نرم‌افزار آباکوس در اختیار بود.

همچنین با استفاده از محیط پویانمایی نرم‌افزار آباکوس، مطابق شکل 9، در لحظات زمانی برابر، چند نما از نمایش پویای پخش موج در راستای °35- متناظر با عملکرد هر یک از پروب‌ها استخراج شد.

در شکل 8، تابع هدایت‌پذیری حاصل از موجی که توسط پروب معمولی تولید شده است دارای دو قله، یکی در زاویه هدف‌گیری مطلوب و دیگری در حدود زاویه °19.5- است (زاویه در نیم‌ربع پایینی باید منفی درنظر گرفته شود). واضح است که قله دوم نماینده لوب خاج است که ایجاد آن مطلوب نیست. در مقابل تابع هدایت‌پذیری متناظر با پروب بهبودیافته فاقد هرگونه لوب خاج است، و تنها قله آن که لوب اصلی را شکل می‌دهد درست در زاویه فرمان‌دهی تشکیل شده است.

[1] Continuum, 3D, 8node, Reduced integration
[2] Attenuation coefficient

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

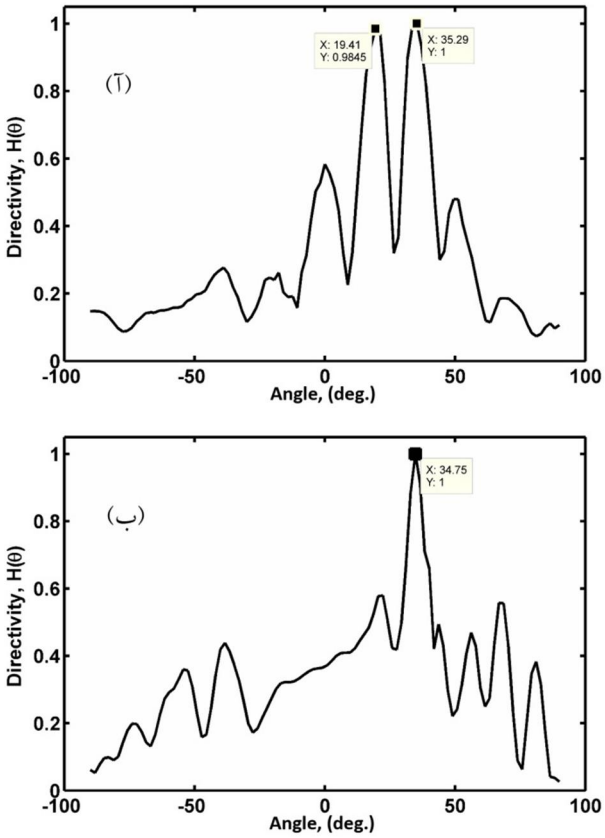

Fig. 8 The beam directivity function of the simulated wave propagation, focused on the angle of 35°, a) ordinary probe, b) optimized probe

شکل 8 تابع هدایت پرتو در شبیه‌سازی پخش موج، با هدف‌گیری روی زاویه °35، الف) پروب معمولی، ب) پروب بهبودیافته

در شکل 9 نیز دیده می‌شود که موج منتشرشده توسط پروب بهبودیافته به نسبت پروب معمولی منتظم‌تر بوده و شکل منظم موج تا پیش از برخورد به دیواره روبه‌رویی به خوبی حفظ شده است. به عبارت دیگر پیشانی موج با تضعیف کمتری طی مسیر می‌کند و در نتیجه با قدرت بیشتری به لبه ورق (و یا هر نوع مانع دیگری که در مقابل خود ببیند) برخورد می‌کند. در نتیجه قدرت پژواک حاصل از آن که توسط گیرنده دریافت می‌شود نیز بیشتر است. این موضوع با نتایج آزمون اول هم‌خوانی دارد و علاوه‌بر تأثیر تنظیم خوب تأخیرهای زمانی، اهمیت طراحی ابعادی مناسب برای پروب آرایه فازی خطی را نشان می‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بهبود طراحی ابعادی پروب آرایه فازی خطی پرداختیم. بدین منظور از تحلیل‌های موجود در ادبیات فن استفاده شد و بر آن اساس عرض و فاصله بین المان‌های پروب با درنظر گرفتن محدودیت‌های عملی بهینه شد. برای بررسی پایش شعاعی توسط این پروب آرایه فازی، براساس ابعاد بهینه شده و تحلیل موجود در نحوه تمرکز پرتو صوتی روی راستای مایل مطلوب، تأخیر زمانی درست برای پروب مفروض محاسبه شد. به منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده دو آزمون فراصوت برای مقایسه عملکرد یک پروب معمولی و پروب بهبودیافته طراحی شد. هر دو آزمون به روش اجزاء محدود و توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند. در آزمون اول به مقایسه ضریب تضعیف دو پروب در انتشار مستقیم موج صوتی پرداختیم و در آزمون دوم

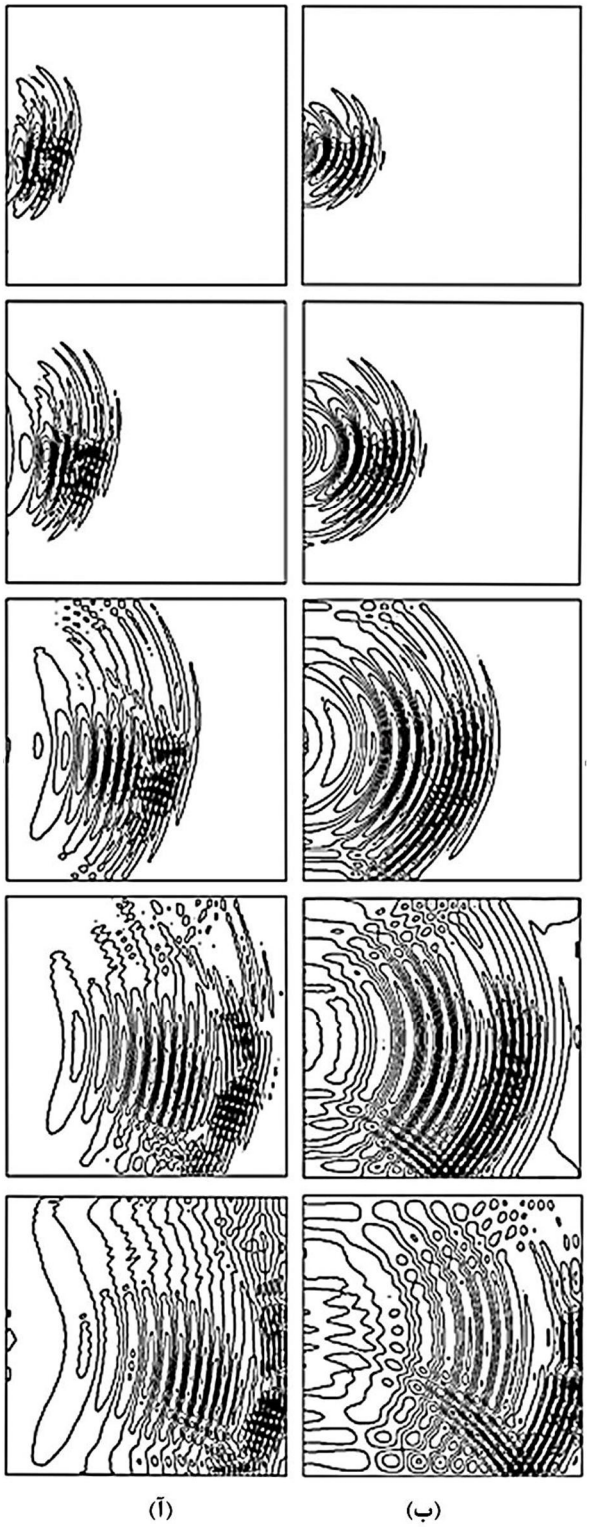

Fig. 9 Snapshots of wave propagation in the radial direction at -35° by, a) the ordinary probe, b) the optimized probe

شکل 9 چند نما از نحوه انتشار موج در راستای شعاعی با زاویه °35- توسط، الف) پروب معمولی، ب) پروب بهبودیافته

هدایت‌پذیری و کیفیت انتشار موج در پایش شعاعی را بررسی کردیم. با مقایسه ضریب تضعیف دریافتیم که در انتشار موج توسط پروب با طراحی بهبودیافته به مقداری نزدیک به نصف پروب معمولی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه تابع هدایت‌پذیری مشاهده شد با بهبود طراحی ابعادی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]

پروب می‌توان از ایجاد لوب خاج در گستره وسیعی از ناحیه آزمون جلوگیری کرد. با ارائه پویانمایی پخش امواج نشان داده شد با طراحی ابعادی بهینه پروب و نیز تنظیم درست تأخیرهای زمانی می‌توان موج را در راستای شعاعی مطلوب به طور منظم‌تری منتشر کرد و بدین‌گونه از تضعیف انرژی جبهه موج تا حد قابل توجهی جلوگیری کرد. این امر سبب می‌شود پیشانی موج با قدرت بیشتری به لبه مقابل ورق برسد و پژواک قوی‌تری تولید کند.

7- تقدیر و تشکر

مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از دکتر اکبر اللهوردی‌زاده، مشاور این پایان‌نامه، به دلیل ارائه پیشنهادات ارزنده و همکاری صمیمانه در مراحل انجام کار کمال تشکر را ابراز دارند.

8- منابع

[1] M. D. C. Mole, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Québec, First Edition, R/D Tech, pp. 30 – 35, 2004.

[2] J. Poguet, A. Garcia, J. Vazquez, J. Marguet, F. Pichonnat, Phased array technology: Concepts, probes and applications, *8th European Congress on Nondestructive Testing*, Barcelona, Spain, 2002.

[3] Sh. Ch. Wooh, Y. Shi, Optimization of ultrasonic phased arrays, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Vol. 17, pp. 883–890, 1998.

[4] Sh. Ch. Wooh, Sh. Yijun, Optimum beam steering of linear phased arrays, *Wave motion*, Vol. 29, No. 3, pp. 245–265, 1999.

[5] A. S. Ergün, Analytical and numerical calculations of optimum design frequency for focused ultrasound therapy and acoustic radiation force, *Ultrasonics*, Vol. 51, No. 7, pp. 786 – 794, 2011.

[6] S. Chen, S. Razzaqi, V. Lupien, An evolution strategy for improving the design of phased array transducers, in *Congress on Evolutionary Computation*, *IEEE*, CEC, Canada, pp. 2859–2863, 2006.

[7] B. Puel, D. Lesselier, S. Chatillon, P. Calmon, Optimization of ultrasonic arrays design and setting using a differential evolution, *NDT & E Measurment*, Vol. 44, No. 8, pp. 797–803, 2011.

[8] E. B. Flynn, M. D. Todd, A Bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 891–903, 2010.

[9] R. F. Guratzsch, S. Mahadevan, Structural health monitoring sensor placement optimization under uncertainty, *Aiaa*, Vol. 48, No. 7, pp. 1281–1289, 2010.

[10] C. Fendzi, J. Morel, M. Rébillat, M. Guskov, N. Mechbal, G. Coffignal, Optimal Sensors Placement to Enhance Damage Detection in Composite Plates, in *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1–8, 2014.

[11] Y. Humeida, P. D. Wilcox, M. D. Todd, B. W. Drinkwater, A probabilistic approach for the optimization of ultrasonic array inspection techniques, *NDT & E International*, Vol. 68, pp. 43–52, 2014.

[12] W. Lester, Jr. Schmerr, *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*, pp. 535–542, Switzerland: Springer, 2015.

[13] L. Li, X. Yu, F. Li, B. Chen, Parameter optimization of linear phased array transducer for defect detection, *Open Automation and Control Systems*, Vol. 6, pp. 488–492, 2014.

[14] B. Ghodrati, A. Yaghootian, A. Ghanbar Zadeh, H. Mohammad Sedighi, Extraction of dispersion curves for Lamb waves in an aluminium nitride (AlN) micro plate using consistent couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 248 –256, 2016. (in Persian فارسی)

[15] P. Taghipour Birgani, Kh. Naderan Tahan, S. Sodagar, M. Shishesaz, Suitable parameters determination of lamb wave generation source with low-attenuation for three-layer adhesive joints inspection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 63–74, 2015. (in Persian فارسی)

[16] S. A. Atashipour, H. R. Mirdamadi, R. Amirfattahi, S. Ziaei-Rad, Application of wavelet transform in damage identification in a thick steel beam based on ultrasonic guided wave propagation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 154–164, 2013. (in Persian فارسی)

[17] *Inspection Technologies: Standard Phased Array Probes and Accessories*, Accessed 1 March 2016; http://www.UTprobes.com.

[18] M. Ayani, F. Honarvar, R. Shabani, Study of the variations of longitudinal and transverse ultrasonic wave velocities with changes in temperature, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 199–205, 2016. (in Persian فارسی)

[19] Zh. Su, Lin Ye, *Identification of Damage Using Lamb Waves–From Fundamentals to Application (1st Edittion)*, pp. 64–66, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.

[20] J.H. Nieuwenhuis, J.J. Neumann, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, Simulation and testing of transducers for lamb wave generation, in *IMACXXIII Conference on Structural Dynamics*, Orlando, USA, 2005.

[21] H. Gravenkamp, C. Birk, Ch. Song, Simulation of elastic guided waves interacting with defects in arbitrarily long structures using the Scaled Boundary Finite Element Method, *Computational Physics*, Vol. 295, pp. 438–455, 2015.

[22] Y. Shen, V. Giurgiutiu, Effective non-reflective boundary for Lamb waves: Theory, finite element implementation, and applications, *Wave Motion*, Vol. 58, pp. 22 – 41, 2015.

[23] M. H. Hojjati, F. Honarvar, An Investigation of the Relationship between Subsurface and Head waves by Finite Element Modeling, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016.

[24] P. Daryabor, M. Farzin, F. Honarvar, Calculating the Lamb wave modes in an aluminum sheet bonded to a composite layer with FEM and experiment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 95 – 106, 2013. (in Persian فارسی)

[25] Hibbitt, Karlsson, Sorensen, *ABAQUS, Finite Element Computer Program*, Version6.7, Vol. 1, United States: Rising Sun Mills 2007.

[26] Sh. Yareiee, M.R. S. Noorani, A. Allahverdizadeh, A. Ghanbari, Simulation of ultrasonic waves emission for detection of pitting corrosion, *The 2nd National Conference on Applied Research in Electrics, Mechanics, and Mechatronics*, Tehran, Iran, 2015. (in Persian فارسی)

[27] Sh. Yareiee, M.R. S. Noorani, A. Allahverdizadeh, Design and simulation of ultrasonic testing with lamb wave for fault detection by ABAQUS, *5th International Conference on Acoustics and Vibration*, Tehran, Iran, 2015. (in Persian فارسی)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.7.0]