



## طراحی و مدلسازی آزمون فراصوت آرایه فازی و شبیه سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی در ورق فلزی به کمک نرم افزار اجزای محدود آباکوس شهرام یاره‌یی<sup>\*۱</sup>

۱- دانش آموخته‌ی مهندسی مکترونیک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد سقز، سقز، ایران  
\* shahramyareiee@yahoo.com، تهران

### چکیده

از روش‌های نوین آزمون و ارزیابی‌های غیرمخرب فراصوتی، استفاده از پروب‌هایی با چند المان تحریک‌پذیر جهت انتشار امواج در ماده می‌باشد. پروب آرایه فازی خطی، نوعی از پروب‌های آرایه فازی است که چینش المان‌ها در آن به‌طور ردیفی در امتداد یک خط می‌باشد. در این پژوهش، ضمن معرفی آزمون‌های غیرمخرب فراصوت آرایه فازی، با ارائه‌ی ملاحظات حل معادله موج به کمک اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس، آزمون فراصوت آرایه فازی با یک پروب ۸ المانی خطی مدلسازی می‌شود. انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی در نمونه به دو صورت مستقیم و مورب شبیه‌سازی خواهد شد که اساس پایش مستقیم و قطاعی هستند. از مهمترین نکاتی که باید در شبیه‌سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوت با المان‌های متعدد لحاظ شود، اعمال تاخیر زمانی تحریک هر المان با توجه به جهت انتشار موج می‌باشد. در این مقاله به نحوه‌ی محاسبه‌ی تاخیرهای زمانی اشاره می‌شود. جهت راستی آزمایشی نتایج آباکوس، بخشی به عنوان صحت سنجی در این مقاله ارائه می‌شود. استفاده از روش اجزا محدود و نتایج آن علاوه بر بهبود درک مفاهیم آزمون فراصوت آرایه فازی، طراحی آزمون با فرض شرایط مختلف که در نتیجه‌ی آزمون تاثیر گذار می‌باشند، با صرف حداقل هزینه و زمان ممکن می‌شود.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷  
پذیرش: ۲۵ خرداد ۱۳۹۷  
ارائه در سایت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۷

### کلیدواژگان

آزمون فراصوت  
پروب آرایه فازی  
آرایش خطی المان‌ها  
تاخیر زمانی  
روش اجزا محدود  
شبیه‌سازی انتشار موج

## Design and Modeling of Ultrasonic Phased Array Testing and Ultrasonic waves propagation Simulation in Metal Plate by Finite Element Software (ABAQUS)

Shahram Yareiee<sup>1\*</sup>

1-Young Researchers Club, Saqqez Branch, Islamic Azad University, Saqqez, Iran.

\* Tehran, shahramyareiee@yahoo.com

### Article Information

Original Research Paper  
Received 9 April 2018  
Accepted 15 June 2018  
Available Online 6 August 2018

### Keywords

Ultrasonic test  
Phased array probe  
Linear arrange elements  
Time delay  
Finite element method  
Wave propagation simulation

### ABSTRACT

Ultrasonic Phased Arrays are an emerging technology in nondestructive testing and evaluation. The type of linear phased array probe is a prevailing type in which elements are placed side by side and longitudinally. In this paper ultrasonic phased array testing (UPAT) is introduced and in order to modeling and design UPAT consideration of wave equation solution by Finite Element is proposed. ABAQUS 6.14 is used as finite element software. Wave propagation in two forms is simulated, straight and inclined. Direct and sectorial scanning is based on these forms of waves propagation. Time delay is the most important issue that should be considered in UPAT modeling. Results of simulation are verified by comparing previous research in UT field. Finally, results in addition to proposed the obvious view of UPAT, it's so useful for properly design probes and defect detection UPAT devices. Using finite element methods in this field is cost and time effective.

### Please cite this article using:

Shahram Yareiee, Design and Modeling of Ultrasonic Phased Array Testing and Ultrasonic waves propagation Simulation in Metal Plate by Finite Element Software (ABAQUS), *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 26-33, 2017 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امواج فراصوت توسعه دادند [۱۰]. ماهوت و همکاران به منظور ارائه‌ی روش‌های جدید بازرسی با استفاده از آرایه‌ی فازی، این نوع آزمون را شبیه‌سازی نمودند [۱۱]. ساتیاناریان و همکاران با شبیه‌سازی امواج طولی آرایه فازی فراصوت عیوب احتمالی در سوژه را شناسایی نمودند به گونه‌ای که قادر به تصویرسازی عیوب و همچنین محاسبه‌ی اندازه‌ی آن بودند [۶]. یه و همکاران، شبیه‌سازی تمرکز دسته پرتو میدان‌های پروب آرایه فازی فراصوت را در سوژه‌های مشخص، جوش فلزات غیرهمجنس، با شبیه سازی بر مبنای مدل انجام دادند [۱۲]. مایک و پنس با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی دخیل در عملکرد پروب‌های فراصوت آرایه فازی، این پروب‌ها را به صورت عددی تحلیل کردند و نحوه‌ی انتشار موج را به صورت قطبی نمایش دادند و بدین صورت موانع مفروض را مکانیابی نمودند [۱۳].

با مرور ادبیات فن و بررسی پژوهش‌های پیشین و ارائه مباحث مربوط به آزمون‌های فراصوت آرایه فازی و اهمیت این آزمون‌ها در زمینه‌های صنعتی و غیر صنعتی، در ادامه ضمن طراحی آزمون فراصوت آرایه فازی برای پایش ورق به کمک نرم افزار اجزا محدود آباکوس به منظور درک بهتر از آزمون، به نحوه‌ی انتشار امواج به کمک پروب‌های آرایه فازی و چگونگی ثبت داده‌ها اشاره خواهد شد و نتایج حاصل از شبیه سازی ارائه می‌گردد.

## ۲- طراحی آزمون فراصوت آرایه فازی

هدف از آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی پایش وضعیت و سلامت قطعات است و با توجه به سوژه‌ی موردنظر سامانه‌ی آزمون به نحوی طراحی می‌شود که تجهیزات موردنیاز برای آزمون و شناسایی قطعه به طور مناسب انتخاب گردد. در طراحی آزمون مواردی شامل نوع و تعداد پروب‌ها، مکان و نحوه‌ی قرارگیری آنها روی قطعه، نوع موج مورد استفاده برای تحریک و شکل آن، تعیین می‌شود. روش‌های المان محدود به دلیل تسریع در فرآیند شبیه‌سازی و حصول نتایج و هزینه‌ی پایین جهت مدلسازی‌هایی از این قبیل استفاده می‌شود. برای شبیه سازی آزمون در نرم افزار تحلیل اجزای محدود می‌بایست

بکارگیری آرایشی از المان‌های فراصوتی برای آزمون و پایش غیرمخرب مواد و قطعات از روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد. استفاده از چند المان به دلیل افزایش انعطاف پذیری، سرعت آزمون‌های غیرمخرب را بالا می‌برد و همچنین نتایج را به صورت تصویری ارائه می‌کند که تفسیر آن‌ها و تصمیم‌گیری درباره‌ی وضعیت ماده به مراتب ساده می‌شود. پروب‌های آرایه فازی شبکه‌ای از المان‌های فراصوتی می‌باشد که بر پایه‌ی تاخیر فازی المان‌های پروب را به طور مستقل کنترل و تحریک می‌کند. عملکرد هر یک از المان‌ها و فاز تحریک آن‌ها نسبت به سایر المان‌های شبکه فازی توسط یک پردازشگر اصلی کنترل می‌شود که برنامه‌ریزی و کنترل انتشار امواج فراصوت را برای هر المان پروب آرایه فازی فراهم می‌کند. از قابلیت‌های این پروب‌ها می‌توان به تولید امواج فراصوت با زوایای مختلف، روبش الکترونیکی، تمرکز عمقی دینامیکی آن اشاره نمود [۱]. از جمله مزیت‌های این پروب‌ها می‌توان به کنترل پویای دسته پرتو برای هدایت و انتقال بهتر به سوژه‌ی تحت آزمون، کاهش زمان پایش سوژه، افزایش قابلیت اطمینان در اندازه‌گیری عیوب با پایش قطاعی ۱، تنظیم پارامترهای پروب به منظور رسیدن به بهینه‌ی هدایت و تمرکز دسته پرتو اشاره کرد. همچنین به دلیل استفاده از چندین پروب، مدت زمان دریافت و ذخیره سازی داده و سیگنال نسبت به پروب‌های معمولی بسیار افزایش پیدا می‌کند [۲ - ۸]. پیچیدگی رفتار امواج تولید شده توسط شبکه المان‌ها و تاثیر متقابل این امواج بر روی یکدیگر، باعث بروز مسائلی در تفسیر و ارزیابی در استفاده از آرایه فازی فراصوت می‌شود. استفاده از روش‌های عددی در مدلسازی آزمون فراصوت و شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوت آرایه فازی از روش‌های پیش بینی رفتار امواج، تفسیر نتایج حاصل شده و همچنین طراحی آزمون است. پیدایش و ایده آزمون‌های غیرمخرب برای استفاده در صنعت از علوم پزشکی بود. ویتینگتن و کوکس این آزمون را برای بازرسی خطوط لوله استفاده کردند [۹]. لودیک و لرد روش المان محدود را برای مدل‌سازی انتشار

Sectorial Scanning<sup>1</sup>

دقیق می‌یستس به دو متغیر مهم در طراحی آزمون های فراصوتی یعنی اندازه‌ی گام‌های زمانی و اندازه‌ی اجزا توجه داشت [۱۷].

#### ۲-۱-۱- اندازه اجزاء

وضوح امواج منتشر شده به اندازه‌ی اجزاء بستگی دارد و به منظور رسیدن به وضوح بالا باید اندازه‌ی اجزاء به دقت تعیین شود. در تحقیقات موجود ۱۰ تا ۲۰ گره در هر طول موج پیشنهاد شده است [۱۸]. برای حل مسئله‌ی حاضر که با اجزای مکعبی شبکه‌بندی می‌شود، طول اجزاء به صورت رابطه (۱) محاسبه شده است.

که در آن  $\Delta t$  گام زمانی پالس ورودی و  $\lambda_{\min}$  کوتاه‌ترین طول موج موردنظر است. جهت محافظه کاری در تعیین کوتاه‌ترین طول موج، از سرعت موج عرضی (که دارای سرعتی نصف سرعت موج طولی است) و حداکثر فرکانس استفاده شده است. در این مقاله نوع المان در تمامی شبیه سازی‌ها، آجری ۳C3D8R در نظر گرفته می‌شود. انتخاب نوع المان تابع مدل‌های موردنظر سوژه و عیوب مفروض می‌باشد. با توجه به اینکه مدل دارای هندسه‌ی مشخص و معین است، پس نوع المان مذکور برای گسسته سازی مدل، با توجه به زمان و حجم محاسبات لازم برای حل مسئله از دیگر المان‌ها بهتر می‌باشد.

#### ۲-۱-۲ اندازه گام زمانی

در روش انتگرال‌گیری صریح برای حل مسئله‌ی موج، بازه‌ی زمانی به تعدادی گام‌های خیلی کوچک جهت تقریب انتگرال زمانی تقسیم می‌شود. برای اجتناب از ناپایداری حل عددی بیان شده می‌بایستی اندازه‌ی گام زمانی با زمان لازم برای عبور موج از کوچک‌ترین ابعاد اجزا برابر باشد [۱۹]. رابطه (۲) بیانگر این موضوع است.

$$\Delta t = \frac{L_m}{c_L} \quad (2)$$

که در آن  $L_m$  طول کوچک‌ترین جزء در شبکه‌بندی ورق و  $c_L$  سرعت موج طولی درون ماده موردنظر است. معیارهای دیگری

ملاحظات مربوط به انتخاب نوع و اندازه‌ی اجزای هندسی و گام زمانی، که برای حل عددی صحیح مسئله کلیدی هستند، منظور شود تا به نتایج قابل قبول رسید. برای شبیه‌سازی اجزا محدود آزمون فراصوت آرایه فازی از نرم افزار ABAQUS 6.14 استفاده می‌شود. تفاوت در طراحی آزمون‌های فراصوت معمولی و آرایه فازی به کمک اجزای محدود در طراحی و نوع پروب مورد استفاده می‌باشد. در این مقاله پس از تعیین ابعاد قطعه‌ی

$$L_m = c_L \Delta t = \frac{c_L}{20 f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{20} \quad (1)$$

موردنظر و طراحی آن، آزمون فراصوت آرایه فازی با پروب ۸ المانی خطی مدل و انتشار دسته پرتو فراصوتی به داخل ورق به دو صورت مستقیم و شعاعی شبیه سازی می‌شود.

#### ۲-۱-۲ ملاحظات حل به روش اجزا محدود

در این مقاله مسئله‌ی انتشار موج فراصوتی به کمک نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس (نسخه آباکوس صریح ۱) حل می‌شود. به دلیل آنکه در حل مسئله‌ی موج، نیروها (ضربه‌های ارتعاشی) در بازه‌های فرکانسی بالا و تقریباً به صورت لحظه‌ای اعمال می‌شوند، به حل دینامیکی مسئله نیاز است. مسائل دینامیکی به دو دسته‌ی کلی قابل تقسیم‌بندی هستند [۱۵]:

مسائل با بارگذاری‌های سریع (فرکانس بالا) مانند مسائل مربوط به انتشار موج

مسائل با بارگذاری‌های آهسته (فرکانس پایین) مانند مسائل مربوط به زمین‌لرزه

روش‌های مختلفی برای تحلیل هر یک از مسائل فوق ارائه شده است. از جمله‌ی این روش‌ها جهت تحلیل انتشار امواج، روش انتگرال‌گیری صریح ۲ می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به هزینه‌ی محاسباتی کم‌تر و کارایی بالاتر نسبت به سایر روش‌های موجود اشاره نمود [۱۶]. در شبیه‌سازی حاضر از همین روش برای حل مسئله‌ی موج استفاده می‌شود. به منظور کسب نتایج

<sup>1</sup> ABAQUS/Explicit

<sup>2</sup> Explicit Direct Integration

<sup>3</sup> Continuum, 3D, 8node, Reduced integration

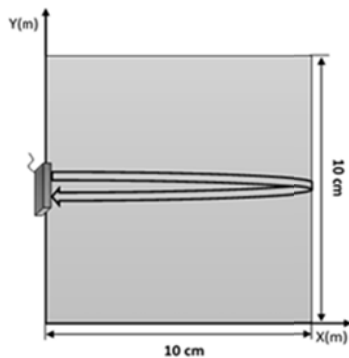
جدول ۱ خصوصیات فیزیکی - مکانیکی ورق فلزی

مدول کشسانی (Gpa)	نسبت پواسون	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج عرضی (m/s)
۷۲	۰/۳۳	۲۵۸۰	۶۳۲۰	۳۱۳۰

محل قرارگیری پروب مطابق شکل ۱ است که در وسط ورق و در جهت عرضی آن قرار می‌گیرد. محل پروب بستگی به نوع آزمون دارد و با توجه به قسمت‌هایی از سوژه که برای بازرسی موردنظر است متغیر می‌باشد. در این مقاله هدف اصلی نحوه‌ی

$$f_{\max} = \frac{1}{20\Delta t} \quad (3)$$

انتشار دسته پرتو فراصوتی به دو صورت مستقیم و شعاعی می‌باشد و محل انتخابی پروب نتایج را با حداکثر وضوح ارائه می‌کند.



شکل ۱ مشخصات ورق، نحوه‌ی قرارگیری پروب و انتشار دسته پرتو فراصوتی

### ۲-۳- تابع برانگیزش و تحریک المان‌های پروب

به منظور شبیه سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی و به طور کلی حل مسئله‌ی انتشار موج با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس از نسخه آباکوس صریح استفاده می‌شود. برای برانگیزش پروب فرستنده به طور معمول از یک تابع زمانی مطابق رابطه (۴) استفاده می‌شود. مودولاسیون دامنه سینوسی جهت طراحی تابع برانگیزش در آزمون‌های فراصوتی روشی مرسوم است [۲۱]. در تابع برانگیزش موردنظر طول پنجره ۵ برابر دوره‌ی تناوب موج سینوسی در بسامد مرکزی  $f = 1$  MHz در نظر گرفته شده است. این بازه‌ی زمانی برای تحریک

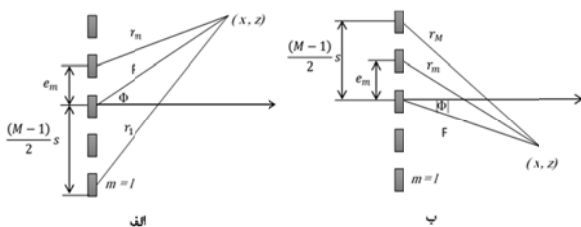
نیز برای محاسبه‌ی گام زمانی مطمئن ارائه شده است. برای نمونه برای ارزیابی محافظه‌کارانه در برخی مطالعات روی مدلسازی‌های دو بعدی ضریب ۰/۷ نیز در معادله‌ی (۲) لحاظ گشته است [۱۷]. در این مقاله بازه‌ی زمانی بدون اعمال ضریب محاسبه می‌شود. همچنین پیشنهاد شده است جهت تفکیک مناسب زمانی، بیشینه فرکانس موج  $f_{\max}$  طوری طراحی شود که یک دوره‌ی کامل موج دست‌کم حاوی ۲۰ گام زمانی باشد. بنابراین خواهیم داشت [۱۹]:

لازم به ذکر است که با افزایش اندازه‌ی گام زمانی، ارتعاشات با فرکانس بالا قابل تشخیص نخواهند بود و امکان ناپایداری در عملیات حل عددی وجود دارد. از سوی دیگر در صورتی که این اندازه بیش از حد کوچک انتخاب شود، موجب انجام محاسبات بی‌تاثیر زیاد و در نتیجه اتلاف زمان خواهد شد [۲۰].

### ۲-۲ مشخصات نمونه و پروب آرایه فازی

برای طراحی آزمون ابتدا باید نمونه‌ی موردنظر طراحی شود. بدین منظور ورق آلومینیومی با ابعاد  $10 \times 10$  سانتی‌متر مربع با مشخصات فیزیکی مکانیکی مطابق جدول ۱ طراحی می‌شود. پس از مدل سازی ورق و تعیین مشخصات مکانیکی آن، از اجزای سه بعدی صلب ۸ گره دارای ۲۴ درجه آزادی که در نرم افزار آباکوس با  $C3D8R$  شناخته می‌شود، برای شبکه‌بندی ورق استفاده شده است. اندازه‌ی اجزا نیز ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. اندازه‌ی تعیین شده برای اجزا در تمام حوزه‌ی مربعی شکل ورق ثابت می‌باشد. تغییر اندازه‌ی اجزا در ورق ممکن است به عنوان ناپیوستگی‌هایی ریز منظور شود که این موضوع در شبیه سازی رفتار موج تاثیرگذار خواهد بود. پس از طراحی نمونه برای مدل‌سازی آزمون فراصوت آرایه فازی، پروب المانی با آرایش خطی طراحی می‌شود. مدل پروب به ازای تعداد المان‌های پروب، به صورت تعدادی از گره‌ها جهت بارگذاری انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که فاصله‌ی بین المان‌های مجاور به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اندازه‌ی نهایی پروب بیش از اندازه‌ی های رایج آن نگردد.

شکل ۳ اگر نقطه هدف در نیم صفحه بالایی باشد، تاخیر زمانی مطابق رابطه‌ی (۵) بدست می آید.



شکل ۳ پارامترهای هندسی پروب آرایه فازی، قرار گیری نقطه هدف

(الف) در نیم صفحه‌ی بالایی (ب) در نیم صفحه پایینی [۲۲]

$$\Delta t_d = \frac{1}{c} \left[ \frac{(m-1)(M-m)s^2 \cos^2 \Phi}{2F} + (m-1)s \sin \Phi \right] \quad (5)$$

در صورتی که قرار گرفتن نقطه هدف در ربع صفحه دوم، تاخیر زمانی مطابق رابطه‌ی (۶) بدست می آید.

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

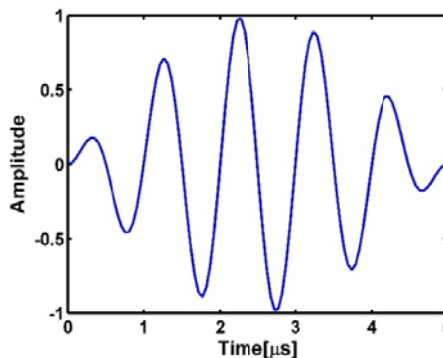
عملکرد پروب‌های آرایه فازی بر مبنای کنترل و القای تاخیر زمانی می‌باشد. در این مقاله برای پایش ورق با جبهه‌ی مستقیم موج، همه‌ی المان‌های پروب به صورت همزمان و بدون تاخیر فعال می‌شوند و برای انتشار امواج با جبهه‌ی مورب که از اصول پایش قطاعی می‌باشد، از تاخیرهای زمانی مطابق جدول ۲ استفاده می‌شود. با توجه به نحوه‌ی قرارگیری پروب، مطابق شکل ۳ شماره‌ی پایین ترین المان یک است. تاخیرها با توجه به روابط حاکم به هندسه‌ی پروب‌های آرایه فازی محاسبه شده است. شکل ۴ نمودار تاخیرهای زمانی را بر حسب شماره المان نشان می‌دهد.

جدول ۲ تاخیرهای زمانی المان‌ها جهت پایش شعاعی (میکروثانیه)

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره المان
۱۰/۲	۹/۱	۷/۹	۶/۵	۵/۱	۳/۵	۱/۸	-	مدت زمان تاخیر

و تولید موج نخستین مناسب است. تابع برانگیزش مذکور برای همه‌ی المان‌های پروب یکسان است.

$$F(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) \sin\left(\frac{2\pi ft}{10}\right) & t < 5/f \\ 0 & t > 5/f \end{cases} \quad (4)$$

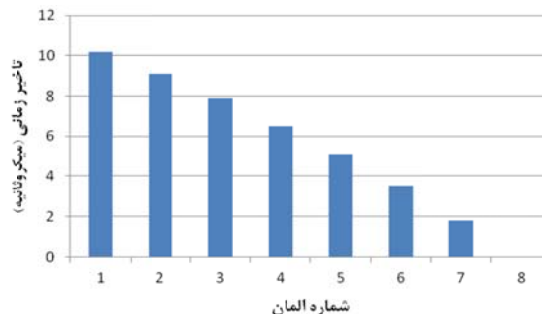


شکل ۲ سیگنال برانگیزش پروب با فرکانس مرکزی ۱ مگاهرتز، بدون در نظر گرفتن تاخیر زمانی

### ۲-۳- محاسبه‌ی تاخیر زمانی

پایش الکترونیکی (بدون حرکت دادن پروب روی قطعه آزمون) و هدایت پرتو موج فراصوتی روی ناحیه‌ی خاص جهت پایش سلامت قطعه از مهم ترین مزیت‌های استفاده از پروب‌های آرایه فازی محسوب می‌شود. اساس پایش الکترونیکی زمان بندی تاخیرها در تحریک المان‌های پروب است. تاخیرهای زمانی با توجه به ملاحظاتی از جمله نوع پایش و فاصله کانونی لازم برای متمرکز شدن پرتو انتشار یافته به داخل ماده محاسبه می‌شود. زمان بندی درست در اعمال تاخیرها در تحریک المان‌ها برای فرمان دهی پرتو و داشتن بیشینه انرژی در جبهه‌ی موج الزامی است. چگونگی زمان بندی تاخیرها در تحریک المان‌ها و عوامل دخیل جهت هدایت پرتو و تمرکز آن در محل مطلوب به طور تحلیلی اشاره شده است [۲۲]. در روابط ارائه شده تنظیم تاخیرهای زمانی علاوه بر سرعت موج صوتی و زاویه فرمان‌گیری وابسته به تعداد المان‌ها و فاصله کانونی تمرکز پرتو نیز می‌باشد. با محاسبه‌ی مدت زمان لازم برای رسیدن موج تابش شده از هر المان به نقطه هدف، که دور از منبع فرض می‌شود و سپس تفریق دو به دوی آن‌ها، تاخیر زمانی محاسبه می‌شود. مطابق

همگن و لایه کامپوزیت غیر همگن می باشد. لایه چسب ضخامتی حدود  $0/25$  خواهد داشت. پس از مدل سازی نمونه در نرم افزار آباکوس و شبیه سازی انتشار موج در ورق مورد نظر برای مقایسه نتایج از درصد افزایش دامنه به دلیل وجود عیب در شبیه سازی ها و آزمایش استفاده می شود. در جدول (۳) درصد افزایش دامنه مربوط به سه دسته موج برگشتی به پروب، حاصل از شبیه سازی ارائه شده در مقاله و شبیه سازی صورت گرفته در این مقاله و آزمایش مقایسه شده است. هر یک از این دسته موج ها به ترتیب مربوط به امواج برگشتی از لحظه ورود امواج به داخل سوژه، برخورد با عیب و انتهای سوژه می باشد. با مقایسه نتایج مشاهده می شود که نتایج شبیه سازی مطابقت قابل قبول و خوبی با نتایج حاصل از آزمایش تجربی مرجع [۲۳] دارد. عواملی مانند عدم فرض خواص میرایی برای ماده شبیه سازی شده، اتلاف انرژی حین انتقال موج از پروب در آزمون تجربی و خطاهای اپراتوری؛ تغییر فشار دست در طول آزمایش و انتخاب اشتباه محل پروب در اختلاف نتایج شبیه سازی ها با آزمون تجربی تاثیر گذارند.



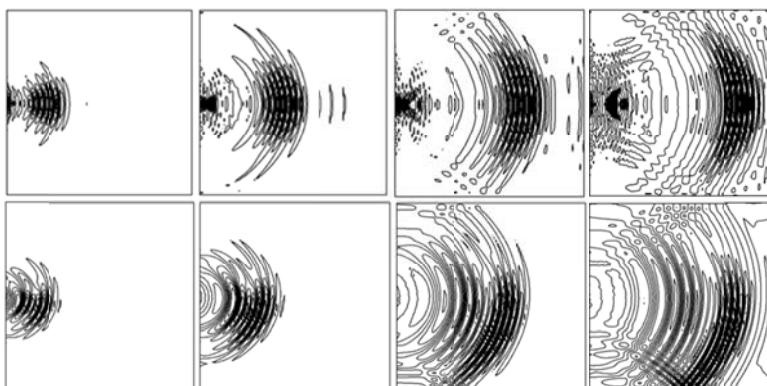
شکل ۴ نمودار تاخیر زمانی (میکروثانیه) - شماره المان

### ۳- صحت سنجی نتایج اجزا محدود

برای اطمینان از صحت شبیه سازی آزمون فراصوتی صورت گرفته با نرم افزار آباکوس مدل ارائه شده برای این آزمون [۲۳]، در نرم افزار اجزا محدود شبیه سازی می شود و نتایج حاصل از این شبیه سازی با نتایج ارائه شده در مقاله تطبیق داده می شود. نمونه با آزمون فراصوت پالس - اکو بازرسی می شود. این نمونه متشکل از یک ورق آلومینیومی به ضخامت ۲ میلی متر می باشد که توسط یک لایه چسب به یک ورق کامپوزیت با ضخامت حدود  $1/65$  میلی متر متصل است. لایه آلومینیوم و لایه چسب

جدول ۳ مقایسه میزان افزایش دامنه پیک های برگشتی در شبیه سازی و آزمایش مرجع [۲۳] با شبیه سازی انجام شده در این مقاله

	اندازه دامنه نتایج شبیه سازی		اندازه دامنه نتایج شبیه سازی مرجع [۲۳]		اندازه دامنه نتایج آزمایش		درصد افزایش دامنه		
	نمونه سالم	نمونه معیوب	نمونه سالم	نمونه معیوب	نمونه سالم	نمونه معیوب	شبیه سازی مرجع [۲۳]	شبیه سازی	آزمایش
دسته موج اول	۰/۰۴۸۳	۰/۰۶۸۱	۱/۲	۱/۳۱	۰/۷۷	۰/۹۹	۲۹	۸	۲۲
دسته موج دوم	۰/۰۲۴۹۳	۰/۰۴۷۰۲	۱/۰۱	۱/۱۷	۰/۵۱	۰/۹	۴۷	۱۴	۴۳
دسته موج سوم	۰/۰۰۹۸۰	۰/۰۰۵۸۶	۰/۹۷	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/۶	۳۹/۸	۱۳	۳۸



شکل ۳ انتشار امواج به داخل ورق در پایش مستقیم (ردیف بالا) و پایش شعاعی (ردیف پایین)



## ۴ - نتایج شبیه سازی به روش اجزا محدود

فازی عملی سودمند خواهد بود. در ادامه می توان برای تفسیر دقیق تر نتایج و داده های بدست آمده مراحل پردازش از جمله پیش پردازش، پردازش و پس پردازش را بر روی نتایج انجام داد و تفسیر دقیق تری از این نتایج ارائه داد.

## ۵ - 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. Poguét, 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, J. Wang, *Nondestructive characterization of defects using a novel hybrid ultrasonic array sensor, Journal of NDT & E International*, Vol. 35, P.P. 155 - 163, 2002.
- [4] B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, *Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, Journal of NDT & E International*, Vol. 39, P.P. 525 - 541, 2006.
- [5] L. Vincent, *Principles of Phased Array Ultrasound for Nondestructive Testing*, Materials Evaluation, 24-32, 2007.
- [6] L. Satyanarayan, C. Sridhar, C. V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam, *Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves, International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, PP. 716 - 729, 2007.
- [7] D.J. Roth, R.P. Tokars, R.E. Martin, R.W. Rauser, J.C. Aldrin, E.J. Schumacher, *Ultrasonic Phased Array Inspection for an Isogrid Structural Element With Cracks, Journal of NASA(National Aeronautics and Space Administration)*, 2010.
- [8] J. Zhang, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, *Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance, Journal of NDT & E International*, Vol. 44, P.P. 361 - 368.
- [9] K.R. Whittington, B.D. Cox, *Electronic Steering and Focusing of Ultrasonic Beams in Tube Inspection, Journal of the Ultrasonics*, Vol. 7, 20-24, 1969.
- [10] R. Ludwig and W. Lord, *Developments in the Finite Element Modeling of Ultrasonic NDT Phenomena, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 5A, American Institute of Physics*, 73-81, 1986.
- [11] S. Mahaut, S. Chatillon, E. Kerbrat, J. Porré, P. Calmon, O. Roy, *New features for phased array techniques inspections: simulation and experiments, 16th World Conf on Non Destructive Testing, Montréal*, 2004.
- [12] J. Ye, H.J. Kim, S.J. Song, S.S. Kang, K. Kim, M.H. Song, *Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds, Journal of NDT & E International*, Vol. 44, P.P. 290 - 296, 2011.

پس از طراحی و مدل سازی نمونه و آزمون فراصوت آرایه فازی و شبیه سازی انتشار دسته پرتو فراصوتی به داخل ورق، امواج منتشر شده پس از پایش ورق در اثر برخورد با مرز نمونه به سمت پروب بازگشت داده می شود. هر یک از المان های پروب داده هایی را به شکل سیگنال ثبت و ذخیره می نماید. برای حصول سیگنال نهایی پروب آرایه فازی، سیگنال های ثبت شده - ی هر المان مطابق با تاخیر زمانی های اعمال شده به آن ها با یک دیگر جمع می شوند و در نهایت سیگنال نهایی بدست می آید. البته در پایش مستقیم ورق توسط امواج همانطور که المان ها به صورت همزمان تحریک شدند، میانگین سیگنال های ثبت شده - ی المان ها، بدون اعمال تاخیر به عنوان سیگنال خروجی در نظر گرفته می شود. در شکل ۵ نحوه ی انتشار موج در ورق برای پایش مستقیم و مورب نشان داده شده است. تصاویر از پویا نمایی نرم افزار آباکوس در مدت زمان های متوالی و مشخص استخراج شده است.

## ۴ - نتیجه گیری

در این مقاله به منظور معرفی آزمون فراصوت آرایه فازی و چگونگی تحریک پروب ها و حصول سیگنال نهایی، ابتدا با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس به طراحی نمونه و آزمون فراصوت آرایه فازی پرداخته شد. پس از مدل سازی آزمون با شبیه سازی انتشار دسته پرتو فراصوتی به داخل نمونه، رفتار و نحوه ی انتشار امواج در دو مورد تحریک پروب به صورت همزمان و با تاخیر بررسی شد. تحریک همزمان المان های پروب، پایش مستقیم و تحریک با اعمال مدت زمان تاخیر پایش مورب که اساس پایش قطاعی است را نتیجه می دهد. در استخراج سیگنال از این پروب ها باید این نکته را در نظر داشت که مدت زمان تاخیر اعمالی به المان های پروب همچنانکه برای تحریک المان - های پروب در پایش مورب الزامی می باشد در ثبت سیگنال نهایی این روش باید در نظر گرفته شود. این شبیه سازی علاوه بر معرفی اصول و مبنای آزمون های فراصوت آرایه فازی توانست درک بهتری از نحوه ی انتشار امواج فراصوتی را ارائه دهد، همچنین در طراحی بهتر و بهینه ی آزمون های فراصوت آرایه

- [13] A. Naik, M.S. Panse, Mathematical Modeling of Ultrasonic Phased Array for Obstacle Location for Visually Impaired, *Journal of VLSI and Signal Processing*, Vol. 2, P.P. 52 – 56, 2013.
- [14] O. Diligent, M. Lowe, P. Cawley, P. Wilcox, Reflection of the so lamb mode from a part-depth circular defect in a plate, when the incident wave is created by a small source, *AIP conference proceedings*. 2003
- [15] C.M. Lee, *Guided elastic waves in structures with an arbitrary cross-section*, the pensylvania state university, PhD Thesis. 2006.
- [16] J.N. Barshinger, J.L. Rose, Guided wave propagation in an elastic hollow cylinder coated with a viscoelastic material, *Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 51, 1547 – 1556, 2004.
- [17] J. Koreck, Ch. Valle, J. Qu, L.J. Jacobs, Computational characterization of adhesive layer properties using guided waves in bonded plates, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 26, 97 – 105, 2007.
- [18] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, *ABAQUS, Finite Element Computer Program*, Version 6.7, 2007.
- [19] I. Bartoli, F. Lanza di Scalea, M. Fateh, E. Viola, Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks, *Journal of NDT & E International*, 38, 325 – 334, 2005.
- [20] 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, P.P. 95 – 106. (in Persian)
- [21] 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)
- [22] W. Lester, Jr. Schmerr, *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*, pp. 535 – 542, Switzerland: Springer, 2015.
- [23] P. Drayabor, M. Farzin, S. Koohestani, MODELING OF NONDESTRUCTIVE ULTRASONIC TEST OF BONDING BETWEEN ALUMINUM AND COMPOSITE USING FEM, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 26, P.P. 1 – 12. (in Persian)