

مدلسازی سیگنال‌های آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش با استفاده از مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری

امین یاقوتیان^۱

استادیار

فرهنگ هنرور^۲

دانشیار

آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) یک آزمون غیر مخرب دقیق است که برای تشخیص و اندازه‌گیری عیوب سطحی و حجمی در قطعات صنعتی و خصوصاً جوش‌ها بکار می‌رود. در این آزمون با استفاده از خاصیت واگرایی امواج ارسال شده توسط پروب‌های فراصوتی، تمامی ضخامت قطعه با یکبار ارسال موج ارزیابی می‌شود. در این مقاله، مدلسازی سیگنال‌های آزمون ToFD مورد توجه قرار گرفته است. بدلیل واگرایی امواج در آزمون ToFD، مشخصه فرکانسی اکوها در لحظات مختلف دریافت سیگنال تغییر می‌کند. بدین منظور، یک مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری (NMGB) برای پروب‌های زاویه‌ای استفاده شده در آزمون ToFD تعمیم داده شده و نتایج حاصل از این مدل به روش‌های عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده، حاکی از توانمندی مدل NMGB در پیش‌بینی شکل اکوها در لحظات مختلف دریافت سیگنال ToFD است.

واژه‌های راهنما: آزمون فراصوتی، زمان پرواز پراش، مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری

۱- مقدمه

با کاربرد روز افزون آزمون‌های فراصوتی^۳ برای تشخیص و تخمین اندازه عیوب سطحی و حجمی در قطعات صنعتی، تکنیک‌های گوناگون مدلسازی نیز گسترش یافته است. مدلسازی نحوه انتشار امواج و پیش‌بینی شکل اکوها در هر نقطه از میدان می‌تواند در تفسیر و تشخیص عیوب در این آزمون‌ها بسیار سودمند باشد. اهمیت ارائه الگوی مناسب میدان امواج تولید شده توسط تراگذارها^۴ در محیط‌های مختلف را می‌توان از چندین دیدگاه مورد بررسی قرار داد؛ دانش نحوه انتشار امواج در یک محیط می‌تواند به بهینه‌سازی

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهیدچمران a.yaghootian@scu.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی honarvar@kntu.ac.ir

^۳ Ultrasonic Tests

^۴ Transducers

پارامترهای تراگذار فراصوتی کمک کند. همچنین، مدلسازی میدان امواج باعث کاهش تعداد آزمایشات شده و در نتیجه از نظر کاهش زمان و هزینه نیز بسیار موثر خواهد بود. از طرفی، از مدلسازی می‌توان برای تعیین سیگنال‌ها و اکوها در آزمون‌های مختلف فراصوتی استفاده کرد. سیگنال‌های بدست آمده از این طریق را می‌توان در تشخیص عیوب و یا در مسایل پردازش سیگنال بکار برد. به طور کلی، مدلسازی نسبت به انجام آزمایش به مراتب ساده‌تر و دارای هزینه کمتر است [۱].

در سالهای اخیر، استفاده از مدل پرتو گوسی چندگانه^۱ (MGB) بدلیل دقت و راندمان محاسباتی بسیار بالای آن مورد توجه قرار گرفته است [۶-۲]. در این روش مدلسازی، میدان امواج تولید شده توسط یک تراگذار فراصوتی با استفاده از جمع آثار چندین پرتو گوسی با ضرایب وزنی مشخص محاسبه می‌شود. این مدل که اولین بار توسط ون و بریزیل (Wen and Breazeale) [۲] با الهام از نحوه انتشار پرتوهای لیزر برای بررسی انتشار امواج در یک محیط همگن و همسانگرد و برای انتشار عمودی امواج فراصوتی توسط تراگذارهای همسطح ارائه شد، در سالهای اخیر توسط محققین بسیاری برای محیط‌های غیر همسانگرد [۷] و یا غیر همگن [۸]، تراگذارهای غیر دایروی [۳ و ۶]، تراگذارهای زاویه‌ای [۹ و ۱۰] و یا متمرکز کننده [۱۰] و نیز برای مدلسازی عیوب مختلف در محیط [۱۰ و ۱۱] استفاده شده است. یکی از مهمترین محدودیت‌های مدل MGB که در تمامی پژوهش‌های فوق‌الذکر مورد توجه قرار گرفته است فرض انتشار شبه محوری^۲ امواج در این مدل می‌باشد. تقریب شبه محوری انتشار امواج به این معنی است که میدان امواج نقطه‌ای که در فاصله دورتری نسبت به محور اصلی تراگذار قرار گرفته‌اند به درستی پیش‌بینی نخواهد شد. لذا مطالعات انجام شده مذکور محدود به مدلسازی‌هایی است که عیوب بر روی محور اصلی تراگذار قرار داشته‌اند. این مشکل در آزمون‌هایی مانند آزمون زمان پرواز پراش^۳ (ToFD) بیشتر نمود می‌یابد.

در این مقاله، مدلسازی سیگنال‌های آزمون ToFD مورد توجه قرار گرفته است. برای بدست آوردن نتایج دقیق‌تر، در این آزمون مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری^۴ (NMGB) که اخیراً برای مدلسازی تراگذارهای مستطیلی آرایه فازی بکار گرفته شده است [۱۲]، برای تراگذارهای دایروی و زاویه‌ای آزمون ToFD تعمیم داده خواهد شد. نتایج مدل MGB و NMGB با نتایج حل دقیق انتگرال ریلی - سامرفلد^۵ در حالت تابش عمودی مقایسه شده و صحت نتایج با انجام آزمایش نیز مورد تایید قرار خواهد گرفت.

۲- آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD)

روش آزمون فراصوتی زمان پرواز پراش در اوایل دهه ۷۰ میلادی ابداع شد و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش بجای تخمین اندازه و مکان عیوب براساس اندازه‌گیری دامنه اکوهای دریافتی، از زمان رسیدن اکوها استفاده می‌شود و با توجه به اینکه اندازه‌گیری زمان رسیدن اکوها نسبت به

¹ Multi-Gaussian Beam

² Paraxial

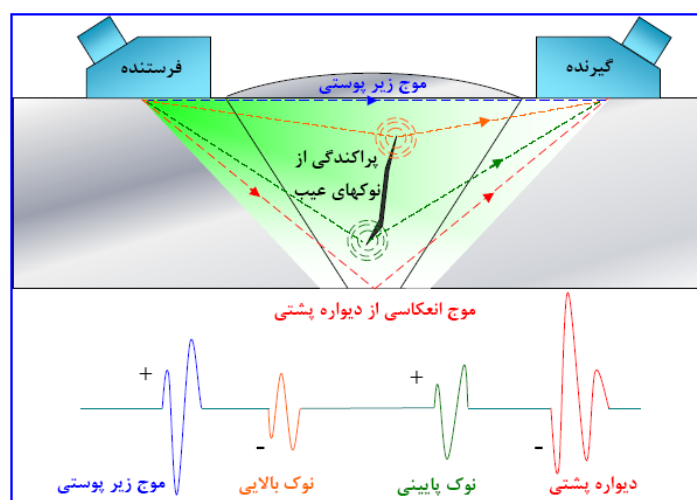
³ Time of Flight Diffraction

⁴ Nonparaxial Multi-Gaussian Beam

⁵ Rayleigh-Sommerfeld integral

اندازه‌گیری دامنه آنها با دقت بالاتری قابل انجام است، این روش از خطای کمتری نسبت به سایر روشها برخوردار است [۱۳]. در روش زمان پرواز پراش از دو پروب زاویه‌ای به صورتی که در شکل (۱) نشان داده شده است استفاده می‌شود. پروب فرستنده امواج فراصوتی طولی را به داخل قطعه تحت آزمون ارسال می‌دارد. امواج ارسالی پس از بازتابش و یا پراش از عیوب، توسط پروب گیرنده دریافت می‌شوند. پروب گیرنده از نظر هندسی و مشخصات فرکانسی مشابه پروب فرستنده بوده و در فاصله مناسبی از آن قرار می‌گیرد.

واگرایی امواج ارسال شده توسط فرستنده باعث می‌شود که کل ضخامت قطعه تحت پوشش قرار گیرد. موج زیر پوستی که فاصله مستقیم بین دو پروب را طی می‌کند، اولین موجی است که توسط پروب گیرنده دریافت می‌شود. آخرین اکو مربوط به بازتابش امواج از دیواره پشتی بوده و به اکوی دیواره پشتی معروف است. از آنجا که مسافت پیموده شده توسط امواج در اکوی دیواره پشتی بیشتر از سایر امواج است، اکوی مربوط به آن در فاصله دورتری نسبت به سایر اکوها ظاهر می‌شود.



شکل ۱- شماتیک آزمون ToFD

در شکل (۱) در فاصله بین اکوی زیر پوستی و اکوی دیواره پشتی دو اکوی دیگر مشاهده می‌شوند که ناشی از امواج پراش یافته از نوک بالایی و پایینی ترک هستند. این اکوها حتی در حالتی که ترک‌های نوک تیز در قطعه وجود نداشته باشند نیز مشاهده می‌شوند. هنگامیکه امواج ارسال شده از پروب به ترک می‌رسند، این امواج بصورت امواج سطحی روی سطوح ترک حرکت کرده و ترک را مرتعش می‌سازند. ارتعاش باعث پراشیده شدن امواج از نوکهای ترک می‌شود. اثر امواج پراشیده شده از نوکهای ترک بصورت اکوهایی در فاصله بین موج زیر پوستی و دیواره پشتی ظاهر می‌شود.

۳- مدل پرتوگوسی چندگانه غیر شبه محوری در تابش عمودی

انتگرال ریلی - سامرفلد (RSI) برای تراگذارهای دایره‌ای که روی سطح یک محیط الاستیک جامد قرار گرفته‌اند تعمیم یافته و صحت پاسخهای آن مورد تایید قرار گرفته است [۱۴]. براساس انتگرال ریلی -

سامرفلد میدان سرعت موج طولی انتشار یافته از تراگذاری با شعاع a در محیط الاستیک جامد را می‌توان به شکل رابطه (۱) نوشت [۱۴].

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{-i\omega}{2\pi c_p} \int_{S_0} V_0 K_p(\theta') \mathbf{d}_p \frac{\exp(ik_p r)}{r} dS_0 \quad (1)$$

که در آن c_p سرعت موج طولی در محیط جامد، S_0 مساحت تراگذار، V_0 توزیع سرعت روی سطح تراگذار، k_p عدد موج در محیط جامد و \mathbf{d}_p بردار پلارزاسیون موج طولی است. r فاصله هر نقطه از محیط، $\mathbf{x} = (x, y, z)$ نسبت به هر نقطه از سطح تراگذار $(x_0, y_0, z_0 = 0)$ است (شکل ۲). $K_p(\theta')$ برای محیط جامد از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$K_p(\theta') = \frac{\cos\theta' \kappa^2 (\kappa^2 / 2 - \sin^2 \theta')}{2G(\sin \theta')} \quad (2)$$

که در آن $\kappa = c_p / c_s$ نسبت سرعت موج طولی به موج عرضی در محیط جامد است و تابع G عبارتست از:

$$G(\chi) = (\chi^2 - \kappa^2 / 2)^2 + \chi^2 \sqrt{1 - \chi^2} \sqrt{\kappa^2 - \chi^2} \quad (3)$$

θ' زاویه بین بردار \mathbf{r} و بردار نرمال سطح تراگذار است (شکل ۲).

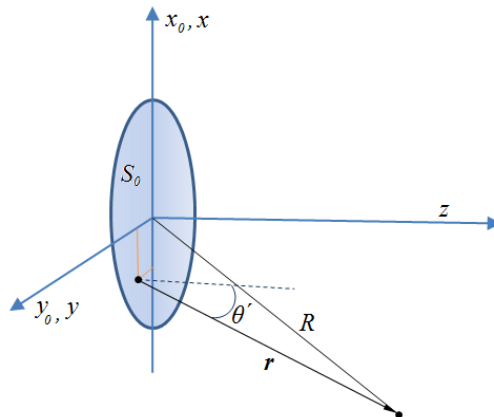
بدلیل وجود ماده واسط در بین تراگذار و قطعه، سرعت نرمالیزه شده روی سطح تراگذار را می‌توان یکنواخت در نظر گرفت [۶]. در اینصورت،

$$\frac{V_0(x_0, y_0, 0)}{v_0} = \text{circ}(r^2 / a^2) = \begin{cases} 1 & \frac{r^2}{a^2} = \frac{x_0^2 + y_0^2}{a^2} \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

سرعت یکنواخت روی سطح تراگذار را می‌توان به صورت ترکیبی از چند پرتو گوسی به توسط رابطه زیر تقریب زد [۲].

$$\frac{V_0(x_0, y_0, 0)}{v_0} = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-B_n \frac{x_0^2 + y_0^2}{a^2}) \quad (5)$$

که A_n و B_n ضرایبی مختلطی هستند که توسط ون و بریزیل با روش بهینه‌سازی بدست آمده‌اند [۲].



شکل ۲- مختصات استفاده شده در مدلسازی تابش عمودی

در مدل غیر شبه محوری انتشار را می‌توان بصورت زیر برای فاصله r در نظر گرفت،

$$r = \sqrt{z^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (۶)$$

$$\approx R + (x_0^2 + y_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0) / 2R$$

که در آن $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ فاصله هر نقطه از محیط جامد تا مرکز تراگذار است. در اینصورت رابطه (۱) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد،

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{-i\omega v_0 \mathbf{d}_p K_p(\theta)}{2\pi c_p} \int \left[\sum_{n=1}^N A_n \exp(-B_n(x_0^2 + y_0^2)/a^2) \right] \times \frac{\exp(ik_p R)}{R} \exp\left[ik_p \left(\frac{x_0^2 + y_0^2 - 2xx_0 - 2yy_0}{2R} \right) \right] dS_0 \quad (۷)$$

در رابطه اخیر، با توجه به اینکه تغییرات جمله $1/r$ نسبت به تابع $\exp(ik_p r)$ سرعت نمو کمتری دارد، با جمله $1/R$ جایگزین شده است. همچنین برای ابعاد کوچک پروب نسبت به فاصله نقاط محیط، θ' با θ جایگزین شده است. θ زاویه بین بردار \mathbf{R} با بردار عمود بر سطح تراگذار است. انتگرال روی سطح تراگذار در رابطه (۷) را می‌توان بصورت حاصلضرب دو انتگرال بر حسب مختصات مستقل بصورت زیر بیان کرد،

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{-i\omega v_0 \mathbf{d}_p K_p(\theta) \exp(ik_p R)}{2\pi c_p R} \sum_{n=1}^N A_n \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{B_n}{a^2} - \frac{ik_p}{2R} \right) x_0^2 - \frac{ik_p x x_0}{R} \right] dx_0 \quad (۸)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{B_n}{a^2} - \frac{ik_p}{2R} \right) y_0^2 - \frac{ik_p y y_0}{R} \right] dy_0$$

بر پایه انتگرال شناخته شده زیر:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-a\chi^2 + b\chi) d\chi = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2}{4a} \right), \quad \text{real}(a) > 0 \quad (۹)$$

رابطه (۸) به شکل نهایی زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_p K_p(\theta) \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{1 + iB_n R / D_R} \exp(ik_p R) \exp\left(\frac{-ik_p (x^2 + y^2) / R}{2} \frac{1 + iB_n R / D_R}{1 + iB_n R / D_R} \right) \quad (۱۰)$$

رابطه (۱۰) میدان سرعت در محیط جامد الاستیک همگن برای تراگذار تماسی نرمال را با استفاده از مدل NMGB بیان می‌کند.

با استفاده از تکنیک ارائه شده می‌توان میدان موج فراصوتی را براساس تقریب شبه محوری بدست آورد. با توجه به اینکه در تقریب شبه محوری، فاصله هر نقطه از محیط انتشار امواج نسبت به نقاط تراگذار به

صورت شبه محوری تقریب زده می‌شود، خواهیم داشت،

$$r = \sqrt{z^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \approx z + \frac{(x-x_0)^2}{2z} + \frac{(y-y_0)^2}{2z} \quad (11)$$

در اینصورت با در نظر گرفتن اینکه مقدار تابع $K_p(\theta)$ در نزدیکی محور تراگذار برابر ۱ است، با جایگذاری در رابطه (۱) و استفاده از رابطه (۵) داریم،

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{-i\omega v_0 \mathbf{d}_p}{2\pi c_p} \int \left[\sum_{n=1}^N A_n \exp(-B_n(x_0^2 + y_0^2)/a^2) \right] \times \frac{\exp(ik_p z)}{z} \exp\left[ik_p \left(\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z} \right) \right] dS_0 \quad (12)$$

که در رابطه (۱۲) بدلیل نمو کمتر ضریب $1/r$ نسبت به تابع نمایی با ضریب $1/z$ جایگزین شده است. رابطه (۱۳) از بسط توابع نمایی رابطه اخیر به شکل زیر حاصل می‌شود،

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{-i\omega v_0 \mathbf{d}_p}{2\pi c_p} \frac{\exp(ik_p z)}{z} \exp\left(ik_p \frac{x^2 + y^2}{2z} \right) \sum_{n=1}^N A_n \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{B_n}{a^2} - \frac{ik_p}{2z} \right) x_0^2 - \frac{ik_p x x_0}{z} \right] dx_0 \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{B_n}{a^2} - \frac{ik_p}{2z} \right) y_0^2 - \frac{ik_p y y_0}{z} \right] dy_0 \quad (13)$$

حال با استفاده از معادله (۹) و ساده‌سازی روابط، فرم نهایی مدل پرتو چندگوسی انتشار امواج فراصوتی برای تراگذار دایره‌ای نرمال در محیط الاستیک جامد به شکل زیر بدست می‌آید،

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_p \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{1 + iB_n z / D_R} \exp(ik_p z) \exp\left(\frac{ik_p}{2} \frac{iB_n / D_R}{1 + iB_n z / D_R} (x^2 + y^2) \right) \quad (14)$$

مقایسه روابط (۱۰) و (۱۴) نشان می‌دهد که این دو رابطه در حالت خاص انتشار روی محور یعنی $x = y = 0, R = z$ برابر خواهند بود.

اگر رابطه (۱۴) را بخواهیم برحسب ماتریس‌های \mathbf{M} که در مدل MGB متداول است نمایش دهیم، داریم،

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_p \sum_{n=1}^N A_n \frac{\sqrt{\det(\mathbf{M}(z))}}{\sqrt{\det(\mathbf{M}(0))}} \exp(ik_p z) \exp\left(\frac{i\omega}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{M}(z) \mathbf{x} \right) \quad (15)$$

که در آن :

$$\mathbf{M}(z) = \begin{bmatrix} \frac{iB_n / c_p D_R}{1 + iB_n z / c_p D_R} & 0 \\ 0 & \frac{iB_n / c_p D_R}{1 + iB_n z / c_p D_R} \end{bmatrix} \quad (16)$$

و

$$\mathbf{M}(0) = \begin{bmatrix} \frac{iB_n}{c_p D_R} & 0 \\ 0 & \frac{iB_n}{c_p D_R} \end{bmatrix} \quad (17)$$

۴- مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری در تابش زاویه‌ای

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، نحوه تابش در آزمون ToFD بصورت زاویه‌ای است. لذا در این بخش مدل NMGB برای تابش زاویه‌ای تعمیم می‌یابد.

در آزمون‌های فراصوتی زاویه‌ای، امواج تولید شده توسط تراگذار فراصوتی طول کفشکی جامد را طی می‌کنند تا به مرز مشترک بین کفشک و محیط تحت آزمون برسند. در مرز بین کفشک و قطعه از ماده واسطی که معمولاً مایعی مانند آب یا روغن است، برای حذف هوای بین دو قطعه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه امواج فراصوتی عرضی از مرز ماده واسط مایع عبور نمی‌کنند، کفشک جامد را می‌توان بصورت یک محیط مایع در نظر گرفت. به عبارت دیگر، از اثر تنش برشی در مرز کفشک و قطعه برای مدلسازی موج عبوری چشم پوشی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که در نظر نگرفتن تنش برشی در مرز بین قطعه و کفشک برای مدلسازی ماده واسط هنگامیکه ضخامت آن قابل صرف نظر باشد، الزامی است [۹].

برای آنکه بتوان از قوانین انتشار و عبور امواج گوسی که در مرجع [۹] به آن اشاره شده است در این مدل نیز استفاده کرد از تقریب زیر بهره گرفته می‌شود،

$$\begin{aligned} \exp(ik_p R) &= \exp\left(ik_p \sqrt{z^2 + x^2 + y^2}\right) \approx \exp\left(ik_p \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right) \\ &\approx \exp(ik_p z) \exp\left(\frac{ik_p}{2} \frac{x^2 + y^2}{R}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

تقریب فوق خصوصاً برای ابعاد کوچک کفشک و با توجه به آنکه زاویه واگرایی امواج در کفشک (به دلیل ابعاد آن) محدود است، تقریب قابل قبولی است. در این صورت با جایگذاری رابطه (۱۸) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت،

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_p K_p(\theta) \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{1 + iB_n R / D_R} \exp(ik_p z) \exp\left(\frac{i\omega}{2} \mathbf{x}^T \frac{iB_n / c_p D_R}{1 + iB_n R / D_R} \mathbf{x}\right) \quad (19)$$

که در آن $\mathbf{x}^T = [x \ y]$ است.

رابطه اخیر را می‌توان بر حسب ماتریس‌های \mathbf{M} بصورت زیر بازنویسی کرد،

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_p K_p(\theta) \sum_{n=1}^N \frac{\sqrt{\det(\mathbf{M}_1^p(R))}}{\sqrt{\det(\mathbf{M}_1^p(0))}} \exp(ik_p z) \exp\left(\frac{i\omega}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{M}_1^p(R) \mathbf{x}\right) \quad (20)$$

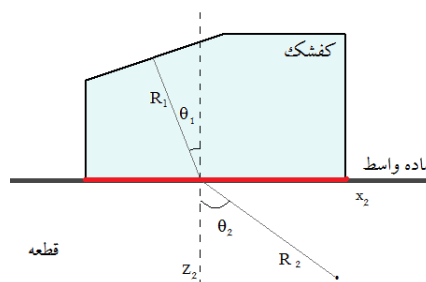
که در آن

$$\mathbf{M}_1^p(R) = \begin{bmatrix} \frac{iB_n / c_1^p D_R}{1 + iB_n R / D_R} & 0 \\ 0 & \frac{iB_n / c_1^p D_R}{1 + iB_n R / D_R} \end{bmatrix} \quad (21)$$

و

$$\mathbf{M}_1^p(0) = \begin{bmatrix} \frac{iB_n}{c_p D_R} & 0 \\ 0 & \frac{iB_n}{c_p D_R} \end{bmatrix} \quad (22)$$

در این حالت از قوانین عبور و انتشار امواج گوسی بیان شده در مرجع [۹] نیز می‌توان بهره برد. با داشتن معادله انتشار موج در کفشک، میدان امواج در قطعه در حالت تابش زاویه‌ای موج از کفشک به قطعه قابل استخراج است. با توجه به اینکه معادله (۲۰) برای مجموعی از امواج گوسی با ضرایب وزنی A_n و B_n بدست آمده است، با بدست آوردن موج عبوری برای تک موج گوسی، میدان امواج عبوری برای حالت پرتو گوسی چندگانه در حالت غیر شبه محوری قابل تعمیم است. برای امواج گوسی پس از عبور از سطح مشترک بین کفشک و قطعه مطابق شکل (۳)، روابط زیر برقرار است [۱۰].



شکل ۳- هندسه عبور امواج از کفشک به قطعه

$$[\mathbf{M}_2^p(0)]_{11} = \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos^2 \theta_2} [\mathbf{M}_1^p(R_1)]_{11}$$

$$[\mathbf{M}_2^p(0)]_{22} = [\mathbf{M}_1^p(R_1)]_{22} \quad (23)$$

$$[\mathbf{M}_2^p(0)]_{12} = [\mathbf{M}_2^p(0)]_{21} = 0$$

و پس از انتشار در قطعه

$$\mathbf{M}_2^p(R_2) = \frac{\mathbf{M}_2^p(0)}{\mathbf{I} + c_2^p R_2 \mathbf{M}_2^p(0)} \quad (24)$$

نهایتاً میدان سرعت در محیط قطعه بصورت رابطه زیر خواهد بود،

$$\frac{\mathbf{v}(\mathbf{x}, \omega)}{v_0} = \mathbf{d}_2^p K_p(\theta_1) \sum_{n=1}^N \frac{\sqrt{\det(\mathbf{M}_1^p(z_1))} \sqrt{\det(\mathbf{M}_2^p(R_2))}}{\sqrt{\det(\mathbf{M}_1^p(0))} \sqrt{\det(\mathbf{M}_2^p(0))}} \exp(ik_1^p z_1) \exp(ik_2^p z_2) \exp\left(\frac{i\omega}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{M}_2^p(R_2) \mathbf{x}\right) \quad (25)$$

در رابطه اخیر، با توجه به آنکه طول مسیر در کفشک کوتاه و ابعاد کفشک محدود است، امواج منتشر شده در کفشک را می‌توان بصورت شبه محوری در نظر گرفت.

۵- ضریب کارایی سیستم

ضریب کارایی سیستم، پارامتر بسیار مهمی است که مشخصات یک سیستم کامل اندازه‌گیری فراصوتی را تشریح می‌کند. این مشخصات شامل اجزای الکترونیکی و الکترومکانیکی سیستم است که در حالت کلی محاسبه اثر هر یک به تنهایی شاید امکان‌پذیر نباشد. ضریب کارایی سیستم $(\beta(\omega))$ معمولاً با استفاده از دیکانولوشن یک سیگنال مرجع اندازه‌گیری شده و یک سیگنال مدلسازی شده در یک آزمون فراصوتی بدست می‌آید. سیگنال مرجع انتخابی، از قطعه‌ای بدون عیب از جنس قطعه آزمون و در شرایط آزمون بدست می‌آید. در این صورت،

$$\beta(\omega) = \frac{V_{ref}(\omega)}{[v(\omega)/v_0]_{ref}} W(\omega) \quad (26)$$

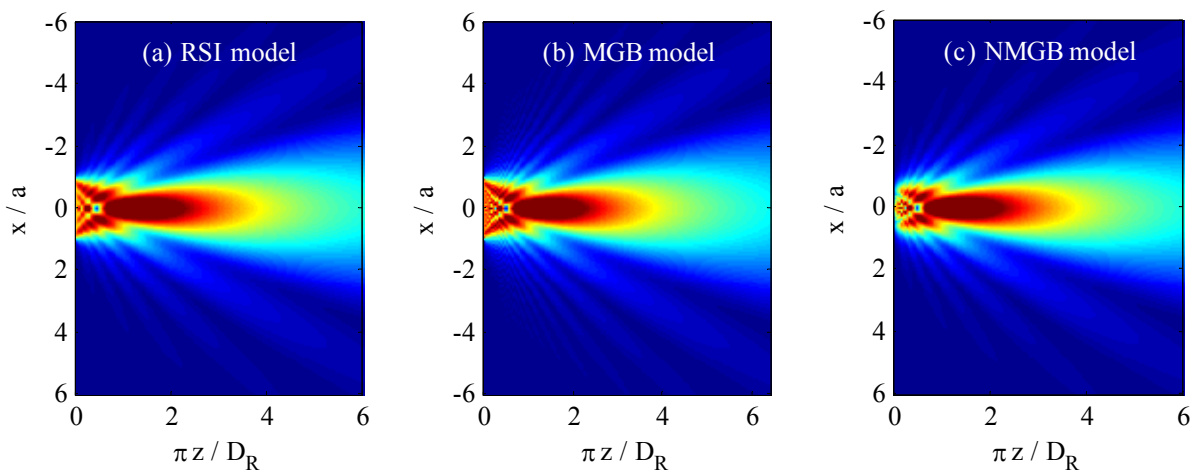
که در آن $V_{ref}(\omega)$ سیگنال مرجع بدست آمده از آزمون، $[v(\omega)/v_0]_{ref}$ سیگنال مدلسازی شده در شرایط آزمون و $W(\omega)$ فیلتر وینر برای حذف نویز است [۱۰].

۶- مقایسه نتایج عددی میدان امواج

در این قسمت ابتدا نتایج شبیه‌سازی دو مدل پرتوی چند گوسی شبه محوری (MGB) و پرتو چندگوسی غیر شبه محوری (NMGB) با مقادیر دقیقی که از حل انتگرال ریلی - سامرفلد (RSI) بدست آمده است، در

حالت تابش عمودی مقایسه می‌شود. برای مقایسه نتایج سه مدل، تراگذاری با قطر ۱۰ میلیمتر و فرکانس مرکزی ۴ مگاهرتز در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که این تراگذار امواج طولی را بصورت نرمال در محیطی از جنس آلومینیوم با چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و با سرعت‌های طولی و عرضی به ترتیب، ۶۴۰۰ و ۳۱۵۰ متر بر ثانیه منتشر می‌کند. نتایج شبیه‌سازی دو بعدی برای هر سه مدل در شکل (۴) با محورهای بی‌بعد شده، نشان داده شده است.

از مقایسه سه مدل مشخص می‌شود که هر دو مدل MGB و NMGB در مقایسه با حل دقیق RSI در نزدیکی محور اصلی تراگذار پاسخ‌های یکسانی را ارائه می‌کنند، در حالیکه در نقاط دور از محور تغییرات سرعت در مدل NMGB از حل دقیق RSI پیروی کرده ولی پاسخ‌های مدل MGB نامعتبر است که این مساله نامطمئن بودن فرض انتشار شبه محوری امواج در مدل MGB را تایید می‌کند.

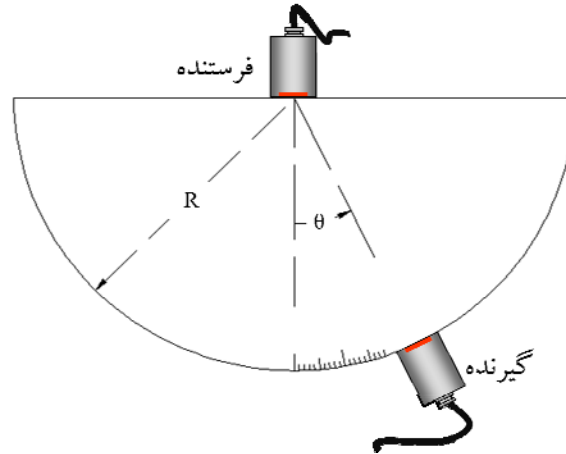


شکل ۴- شبیه‌سازی میدان امواج انتشار یافته در محیط جامد: RSI (a)، MGB (b)، NMGB (c)

۷- مقایسه مدلسازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی

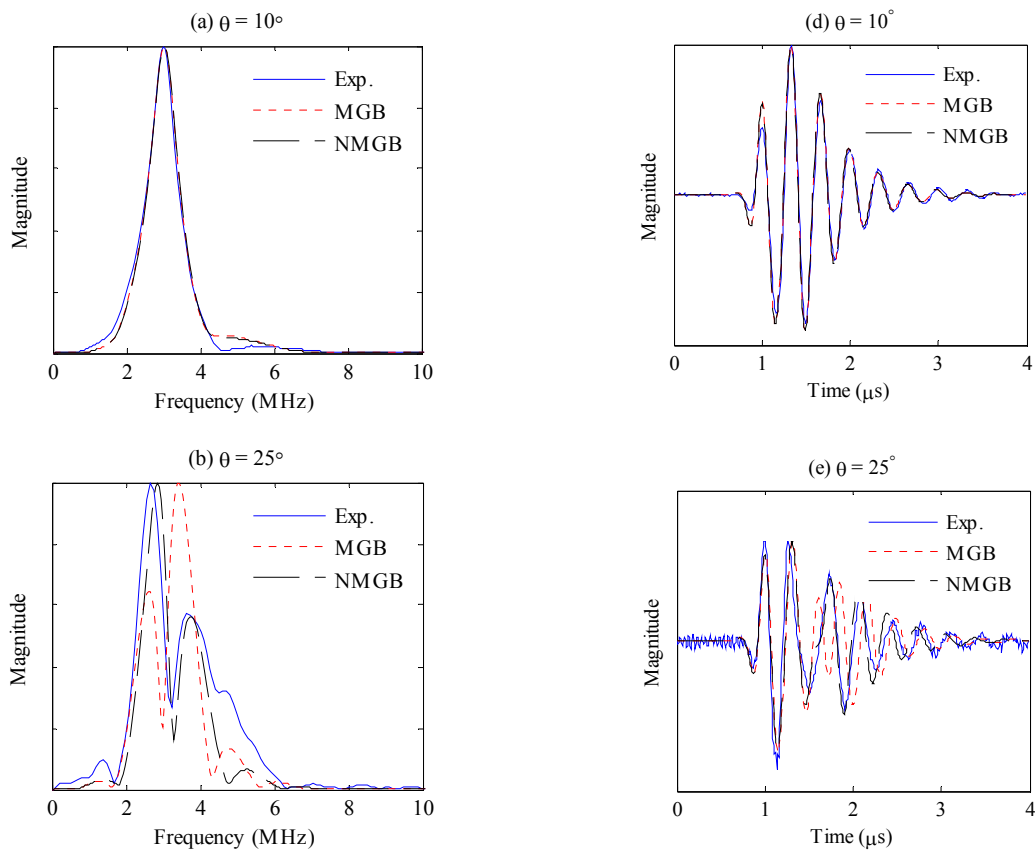
الف) تابش عمودی

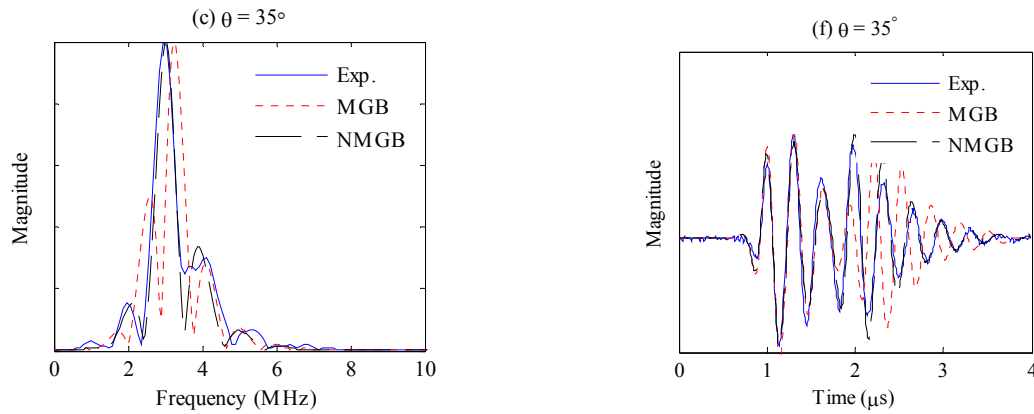
در گام اول از یک نیم استوانه آلومینیومی برای مقایسه مدل‌های MGB و NMGB با نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در زوایای مختلف استفاده می‌کنیم. در این آزمایش امواج توسط یک تراگذار مسطح فراصوتی که در مرکز یک نیم استوانه مطابق شکل (۵) ثابت شده به درون قطعه ارسال می‌شوند. تراگذار گیرنده، که مشابه فرستنده است، می‌تواند بر روی محیط استوانه به راحتی حرکت کرده و در زوایای مختلف قرار گیرد. هر دو تراگذار دارای فرکانس مرکزی ۴ مگاهرتز و قطر ۱۰ میلیمتر هستند. نیم استوانه از جنس آلومینیوم با چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت‌های موج طولی و عرضی ۶۲۰۰ و ۳۱۰۰ متر بر ثانیه است. شعاع نیم استوانه ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت آن ۳۰ میلیمتر است. آزمایش برای زوایای مختلف انجام شده و نتایج آن در شکل (۶) آمده است. در شکل (۵) زاویه θ نسبت به محور عمود بر سطح تراگذار اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵- شماتیک آزمون تغییرات اکوهای امواج فراصوتی در زوایای مختلف در تابش عمودی

برای اعمال اثر سیستم اندازه‌گیری و محاسبه ضریب کارایی سیستم، از سیگنال مرجعی که در زاویه $\theta = 0$ اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. این ضریب تمام مولفه‌های الکتریکی و الکترومکانیکی سیستم اندازه‌گیری را شامل می‌شود





شکل ۶- مقایسه نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی در حوزه زمان و فرکانس برای زوایای مختلف

شکل (۶) طیف فرکانسی امواج به همراه اکوهای زمانی را در زوایای مختلف نسبت به محور تقارن تراگذار نشان می‌دهد. شکل‌های (۶a-c) طیف فرکانسی اکوها در زوایای ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درجه و شکل‌های (۶d-f) اکوهای زمانی متناظر با آنها را نشان می‌دهد. در این شکل خط پر نتایج آزمایشگاهی است که با اندازه‌گیری در زاویه‌های مشخص بدست آمده است. نقطه‌چین و خط‌چین به ترتیب نتایج مربوط به مدل‌های MGB و NMGB را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که اگرچه مدل MGB در زوایای بزرگتر با آزمایش اختلاف می‌یابد ولی تطابق مدل NMGB همچنان برقرار است. برای درک بهتر ضریب همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی‌های انجام شده در زوایای مختلف محاسبه و در جدول (۱) آورده شده است. ضریب همبستگی نزدیک به یک بیانگر تطابق دو اکوی مدل شده با نتایج آزمایشگاهی بوده و هر چه مقدار این ضریب به صفر نزدیک شود، اختلاف بین نتایج مدلسازی و آزمون بیشتر است.

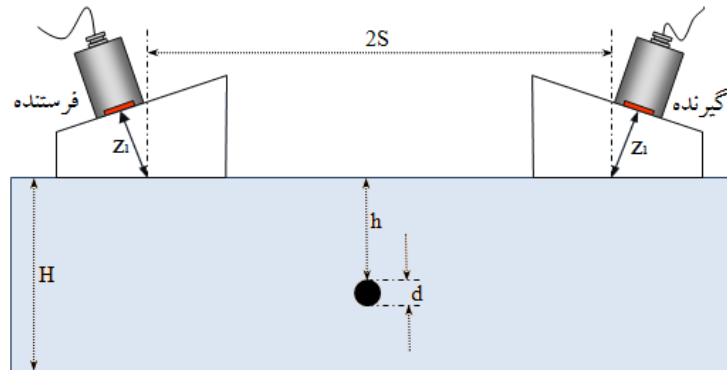
جدول ۱- ضریب همبستگی بین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی در زوایای مختلف

θ (درجه)	۵	۱۰	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
مدل MGB	۰/۹۷۷۵	۰/۹۹۰۶	۰/۸۷۸۵	۰/۶۰۰۴	۰/۳۸۷۴	۰/۴۶۶۱
مدل NMGB	۰/۹۷۷۶	۰/۹۸۸۰	۰/۹۵۴۶	۰/۸۹۴۲	۰/۹۰۹۵	۰/۹۶۱۰

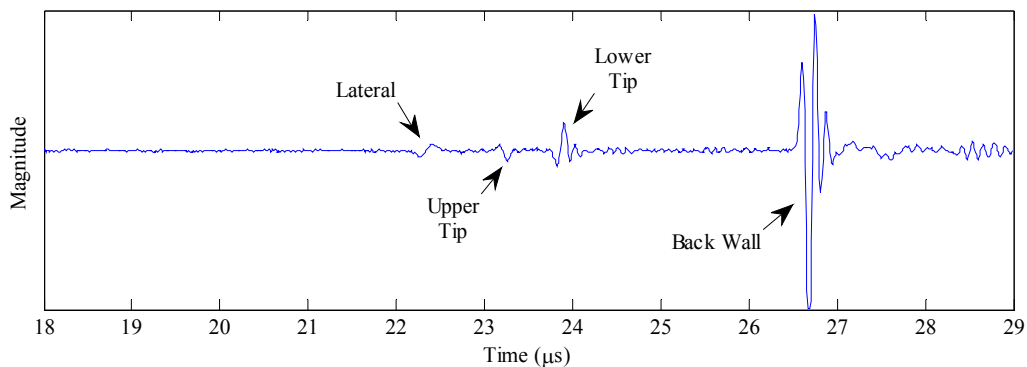
ب) مقایسه نتایج ToFD

پس از آنکه تطابق نتایج مدل NMGB در تابش عمودی با نتایج آزمایشگاهی مورد تایید قرار گرفت، در این بخش نتایج مدلسازی NMGB با نتایج حاصل از آزمون ToFD مقایسه می‌شود. در این آزمون از تراگذارهایی با فرکانس مرکزی ۱۰ مگاهرتز و قطر ۰/۲۵ اینچ استفاده شده است (شکل ۷). امواج به واسطه دو کفشک مشابه به صورت زاویه‌ای ارسال و دریافت می‌شوند. بلوک فولادی شامل یک سوراخ جانبی به قطر ۵ میلیمتر است که در عمق ۱۶/۵ میلیمتر نسبت به سطح بالای قطعه قرار گرفته است. ضخامت کل قطعه نیز برابر ۳۸ میلیمتر و سرعت امواج طولی و عرضی در آن به ترتیب، ۵۹۰۰ و ۳۲۴۰ متر بر ثانیه است. موقعیت پروب‌ها روی قطعه به نحوی است که سوراخ در وسط فاصله بین دو شاخص کفشک‌ها قرار گیرد.

سیگنال بدست آمده از آزمون در حالتی که فاصله بین شاخص‌های دو پروب برابر ۱۲۰ میلی‌متر است، در شکل (۸) آورده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، سیگنال شامل ۴ اکو است که به ترتیب مربوط به موج زیر پوستی، پراش از سطح بالای سوراخ، پراش از سطح پایین سوراخ و بازتاب از دیواره پشتی هستند.

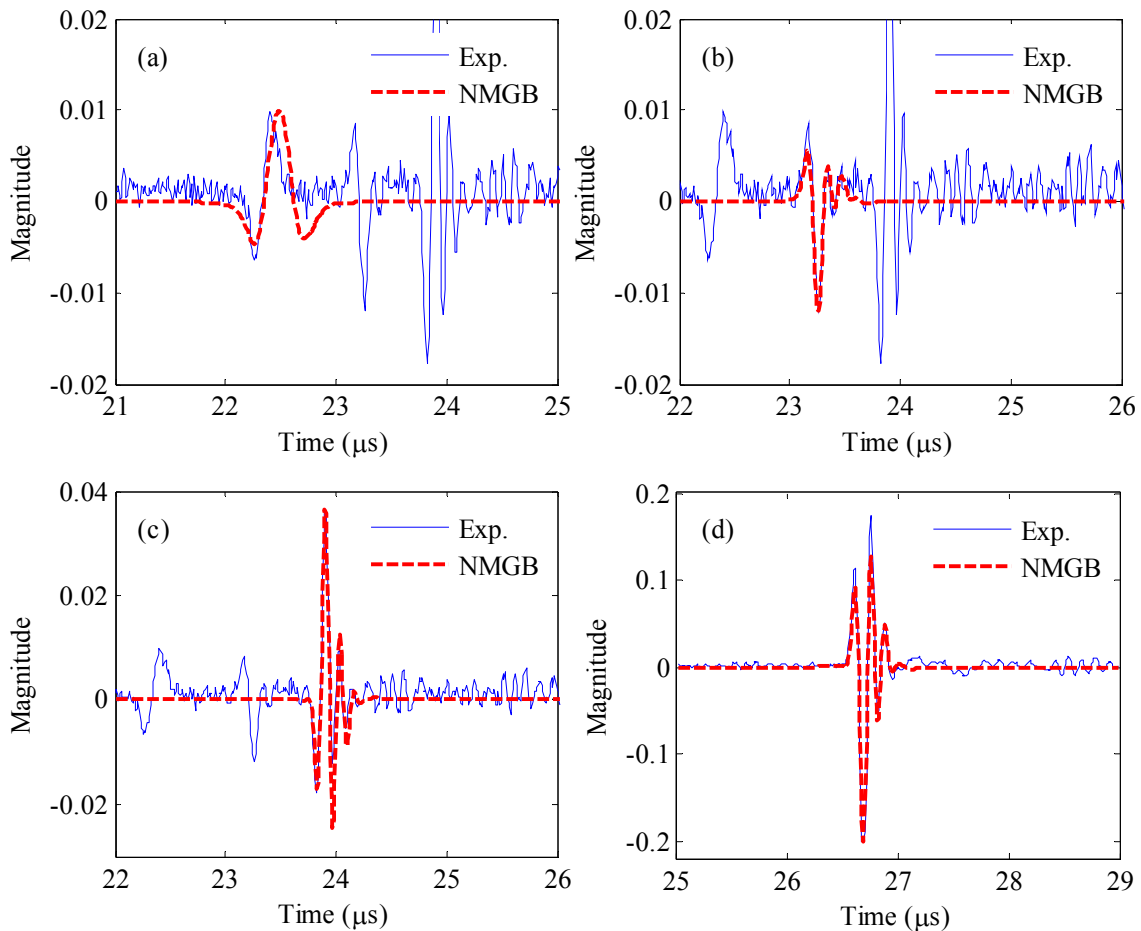


شکل ۷- شماتیک آزمون ToFD برای مقایسه نتایج پردازش سیگنال



شکل ۸- سیگنال بدست آمده از آزمون ToFD، فاصله بین دو شاخص پروبها برابر ۱۲۰ میلی‌متر است

در شکل (۹) هر یک از چهار اکوی مشخص شده در شکل (۸) با اکوهای بدست آمده از مدل NMGB مقایسه شده‌اند. شکل (۹a) بزرگنمایی مربوط به اکوی موج زیر پوستی است. شکل‌های (۹b) و (۹c) به ترتیب اکوهای امواج پراش یافته از سطح بالا و پایین سوراخ را نشان می‌دهند و در شکل (۹d) اکوی بازتابیده شده از دیواره پشتی در دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی شده مقایسه شده است.



شکل ۹- مقایسه اکوهای آزمون ToFD و مدل NMGB، خط پر: سیگنال حاصل از آزمایش، خط چین: مدل NMGB، (a) اکوی موج زیر پوستی، (b) اکوی سطح بالای سوراخ، (c) اکوی سطح پایین سوراخ و (d) اکوی دیواره پشتی

در تمام این مدلسازی‌ها از یک سیگنال مرجع برای اعمال اثرات پاسخ سیستم اندازه‌گیری به عنوان ضریب کارایی سیستم (همانگونه که در بخش‌های گذشته توضیح داده شد) استفاده شده است که از تابش زاویه‌ای امواج توسط پروب و کفشک بکار رفته در آزمون ToFD به بلوک استاندارد آزمون فراصوتی V1 بدست آمده است. نتایج تطابق خوبی را بین اکوهای مدل شده و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. اختلاف بوجود آمده در شکل (۹a) می‌تواند به دلیل محدود بودن ابعاد کفشک در آزمون باشد که در مدلسازی بصورت نامحدود در نظر گرفته شده است.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلسازی سیگنال‌های آزمون فراصوتی زمان پرواز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از مدل پرتو گوسی چندگانه غیر شبه محوری (NMGB) برای مدلسازی استفاده شد. مقایسه نتایج در دو بخش عددی و آزمایشگاهی صورت گرفت. در بخش نتایج عددی، مزیت روش NMGB در مقایسه با مدل پرتو گوسی چندگانه با فرض انتشار شبه محوری امواج (MGB) مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که مدل NMGB تطابق بسیار خوبی با حل دقیق بدست آمده از انتگرال ریلی- سامرفلد (RSI) در تمامی نقاط

میدان، حتی در زوایای دور از محور اصلی تراگذار، دارد. در بخش آزمایشگاهی، نتایج مدلسازی با دو حالت تابش عمودی و سیگنال ToFD مقایسه شد که در هر دو حالت صحت نتایج مدلسازی مورد تایید قرار گرفت.

مراجع

- [1] Bostrom, A., and Wirdelius, H., "Ultrasonic Probe Modeling and Nondestructive Crack Detection", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, No. 5, pp. 2836-2848, (1995).
- [2] Wen, J.J., and Breazeale, M.A., "A Diffraction Beam Field Expressed as the Superposition of Gaussian Beams", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 83, pp. 1752-1756, (1988).
- [3] Ding, D.S., Zhang, Y., and Liu, J.Q., "Some Extensions of the Gaussian Beam Expansion: Radiation Fields of the Rectangular and the Elliptical Transducer", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, pp. 3043-3048, (2003).
- [4] Kim, H.J., Schmerr, L.W., and Sedov, A., "Generation of the Basis Sets for Multi-Gaussian Ultrasonic Beam Models – An Overview", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 119, pp. 1971-1978, (2006).
- [5] Spies, M., "Modeling of Transducer Fields in Inhomogeneous Anisotropic Materials using Gaussian Beam Superposition", NDT&E International, Vol. 33, pp. 155-162 (2000).
- [6] Kim, H.J., Song, S.J., and Schmerr, L.W., "An Ultrasonic Measurement Model using a Multi-Gaussian Beam Model for a Rectangular Transducer", Ultrasonics, Vol. 44, pp. 969-974, (2006).
- [7] Spies, M., "Transducer Field Modeling in Anisotropic Media by Superposition of Gaussian Base Functions", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, No. 2, Pt. 1, February, pp. 633-638, (1999).
- [8] Spies, M., "Modeling of Transducer Fields in Inhomogeneous Anisotropic Materials using Gaussian Beam Superposition", NDT&E Int., Vol. 33, pp. 155-162, (2000).
- [9] Kim, H.J., Park, J.S., Song, S.J., and Schmerr, L.W., "Modeling Angle Beam Ultrasonic Testing Using Multi-Gaussian Beams", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 23, No. 3, pp. 81-93, (2004).
- [10] Schmerr, L.W., and Song, S.J., "Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Models and Measurements", Springer, (2007)
- [11] Kim, H.J., Song, S.J. and Schmerr, L.W., " Modeling Ultrasonic Pulse-echo Signals from a Flat-bottom Hole in Immersion Testing using a Multi-Gaussian Beam " Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 23, No. 1, (2004).
- [12] Zhao, X., and Gang, T., "Nonparaxial Multi-Gaussian Beam Models and Measurement Models for Phased Array Transducers", Ultrasonics, Vol. 49, pp. 126-130, (2009).

- [13] Charlesworth, J.P., and Temple, J.A.G, "*Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-flight Diffraction*", Research Studies Press, 2nd Ed, England, (2001).
- [14] Schemerr, L.W., "*Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*", Plenum Press, (1998).

فهرست نمادهای انگلیسی

A_n, B_n : ضرایب مختلط ون و بریزیل

a : شعاع سطح تراگذار

c_p : سرعت موج طولی

c_s : سرعت موج عرضی

d_p : بردار پلارزاسیون موج طولی

k_p : عدد موج طولی

r, R : فاصله هر نقطه از محیط

S_0 : مساحت تراگذار

V_0 : سرعت روی سطح تراگذار

$V_{ref}(\omega)$: سیگنال مرجع

$W(\omega)$: فیلتر وینر

نمادهای یونانی

κ : نسبت سرعت موج طولی به موج عرضی

θ, θ' : زاویه هر نقطه از محیط نسبت به بردار سطح تراگذار

ω : فرکانس زاویه‌ای

Abstract

Ultrasonic time-of-flight diffraction (ToFD) technique is an accurate nondestructive testing method used for detection and sizing of internal and surface defects in industrial components. ToFD takes advantage of the beam divergence of ultrasonic probes and by using this characteristic, it can inspect the whole thickness of a specimen in one single shot. In this paper, it is intended to develop a mathematical model of the ultrasonic echoes produced in a ToFD measurement. Since the frequency content of echoes in a ToFD signal vary with time, the Nonparaxial Multi-Gaussian Beam (NMGB) technique has been used for this purpose. The results obtained from this model are verified by numerical and experimental techniques. These results show that the NMGB can accurately model the ultrasonic echoes received in a ToFD measurement.