

مدل سازی تکنیک بازرسی فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) با استفاده از روش اجزاء محدود

سمیه خراسانی^۱ و فرهنگ هنرور^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: آزمون فراصوتی، زمان پرواز پراش (ToFD)، مدل سازی، روش اجزاء محدود.</p>	<p>روش زمان پرواز پراش (ToFD) یکی از روش‌های بازرسی غیرمخرب فراصوتی است که به منظور تشخیص، اندازه‌گیری و تعیین موقعیت عیوب در قطعات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش معمولاً برای مقاطع ضخیم ($>15 \text{ mm}$) به کار می‌رود، برای استفاده از آن در مقاطع نازکی هم‌چون مخازن تحت فشار و لوله‌ها نیازمند به شبیه‌سازی این روش خواهیم بود. در این مقاله، روش زمان پرواز پراش با استفاده از تکنیک اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS و برای حل مسئله‌ی انتشار امواج فراصوتی از روش صریح استفاده شده است. برای بررسی صحت مدل‌سازی صورت گرفته آزمایش‌های تجربی بر روی بلوک‌های فولادی انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که مدل‌سازی اجزاء محدود تکنیک ToFD، درک بهتری از نحوه‌ی انتشار امواج فراصوتی و تعامل امواج با ناپیوستگی‌های مختلف بدست می‌دهد. به همین دلیل، برای بررسی پارامترهای مختلف آزمون ToFD، شبیه‌سازی اجزاء محدود بسیار مناسب و در مقایسه با آزمایش‌های عملی بسیار کم هزینه خواهد بود.</p>

۱- مقدمه

پایه بازتابش موج عمل می‌کنند، و براساس دامنه اکوهای دریافتی عیب را اندازه‌گیری می‌کنند، دامنه امواج منعکس شده تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله صافی سطح، و راستای قرارگیری عیب می‌باشد [۱]. نیاز به اندازه‌گیری دقیق‌تر عیوب باعث شکل‌گیری روش زمان پرواز پراش (ToFD) در سال ۱۹۷۴ در آزمایشگاه هارول مرکز ملی آزمون‌های غیر مخرب سازمان انرژی اتمی انگلستان شد [۲]. از آنجایی که این روش بر اساس پدیده پراش عمل می‌کند، وابسته به راستای قرارگیری عیب نمی‌باشد، و می‌تواند عمق و طول ناپیوستگی‌های داخلی را با دقتی بسیار بالاتر از سایر آزمون‌های فراصوتی اندازه‌گیری کند. اما اندازه‌گیری عیب توسط این روش به اندازه‌گیری دقیق زمان رسیدن امواج بازتابی و پراشیده از دو انتهای ترک بستگی دارد [۳].

یکی از روش‌های اصلی کنترل کیفیت محصولات استفاده از آزمون‌های غیرمخرب است. آزمون فراصوتی یکی از پرکاربردترین روش‌های غیرمخرب است که به سرعت و هم‌زمان با انجام آزمون، توانایی شناسایی عیوب و ترک‌ها را در قطعات صنعتی و به خصوص جوشکاری‌های انجام شده در خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز را دارد. در آزمون فراصوتی امواج صوتی با فرکانس بالا وارد قطعه شده و با مطالعه رفتار موج در داخل قطعه، عیوب شناسایی و ارزیابی می‌شوند. اکثر روش‌های فراصوتی بر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: honarvar@kntu.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

¹ Time of Flight Diffraction

لازم است. در روش‌های صریح مقدار متغیری مثل جابجایی در یک زمان خاص، براساس مقادیر آن در گام-های زمانی قبلی‌اش تعیین می‌شود. در این روش‌ها برنامه-نویسی ساده‌تر بوده و گام‌های زمانی کوتاه‌تری لازم است. بنابراین برای مسائل دینامیکی از جمله انتشار امواج فراصوتی، که نتایج آنی در هر گام زمانی مورد نیاز است، روش‌های صریح ارجحیت دارند [۱۰].

این مقاله با بهره‌گیری از روش صریح اجزاء محدود در مدل‌سازی انتشار امواج فراصوتی، به شبیه‌سازی تکنیک زمان پرواز پراش می‌پردازد. از نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی انتشار امواج فراصوتی در قطعات دو بعدی با ترک‌های قائم و مایل استفاده شده است. با در نظر گرفتن سرعت موج و زمان رسیدن امواج پراش‌یافته، محل عیب و اندازه آن در این قطعات تعیین شده است. برای مشخص کردن صحت مدل‌سازی‌های انجام شده، آزمایش‌های تجربی نیز انجام گرفته و با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی با مقادیر واقعی پارامترها، درصد خطای آنها مشخص شده است. چگونگی انتشار موج فراصوتی و تقابل اثر آن با عیوب نیز به نمایش گذاشته شده است. این مقاله درک بهتری از پدیده پراش و تقابل امواج فراصوتی با ناپیوستگی‌ها را فراهم می‌سازد، و همچنین می‌تواند در طراحی آزمون ToFD برای بازرسی قطعات نازک و یا زمانی که هندسه قطعه پیچیده باشد، مورد استفاده قرار گیرد.

۲- اصول حاکم بر تکنیک بازرسی زمان

پرواز پراش (ToFD)

در روش ToFD از دو پروب فراصوتی زاویه‌ای استفاده می‌شود و روش بازرسی به صورت ارسال-دریافت^{۱۰} است. یکی از پروب‌ها به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده موج فراصوتی عمل می‌کند و فاصله دو پروب در هنگام بازرسی از هم ثابت

با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر امواج فراصوتی، در مواردی که هندسه سیستم پیچیده بوده و یا مشخصات ماده تغییر نماید، استفاده از معادلات تحلیلی برای بررسی انتشار امواج بسیار دشوار و حتی ناممکن است. علاوه بر این، معادلات به دست آمده در اکثر موارد، تنها با استفاده از روش‌های عددی قابل حل خواهند بود [۴]. به منظور شناخت هرچه بیشتر رفتار امواج فراصوتی و بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر آنها، تاکنون روش‌های عددی متنوعی برای حل معادلات انتشار امواج مورد استفاده قرار گرفته است، که از آن جمله می‌توان به مدل شبکه جرم-فتر^۲، روش تفاضل محدود^۳، روش اجزاء محدود^۴، تکنیک انتگرال‌گیری محدود الاستودینامیک^۵ و روش اجزاء مرزی^۶ اشاره کرد [۷-۵]. لین^۷ و همکارانش انتشار امواج فراصوتی در یک نمونه‌ی فولاد آستنیتی را با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کرده‌اند، آنها در مدل‌سازی خود اثرات مربوط به پراکندگی در مرز دانه‌ها را نیز در نظر گرفته‌اند و توانستند مکانی که امواج پراشیده بیشترین انرژی را دارند معین سازند [۸]. باسکاران و همکارانش نیز انتشار امواج فراصوتی را به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی کرده‌اند. از آنجا که این نرم‌افزار از روش ضمنی^۸ برای حل معادلات گذرای موج استفاده می‌کند، مدل‌سازی آنها از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه بوده است [۹].

تکنیک‌های اجزاء محدود بر اساس روشی که برای تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری استفاده می‌کنند، به دو نوع ضمنی و صریح^۹ تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش ضمنی مقادیر متغیر در گام‌های زمانی بعدی، برای تعیین مقادیر فعلی آن مورد نیاز است. برنامه‌نویسی این روش پیچیده، و برای هر گام زمانی زمان محاسباتی بیشتری

^۲ Mass spring lattice model

^۳ Finite difference method

^۴ Finite element method

^۵ Elastodynamic finite integration technique

^۶ Boundary element method

^۷ Lin

^۸ Implicit

^۹ Explicit

^{۱۰} Pitch-catch

۱- موج زیرپوستی^{۱۱}، این موج فاصله بین دو پروب را به صورت مستقیم طی می‌کند و چون نسبت به سایر امواج فاصله کمتری را طی می‌کند، زودتر از سایر امواج به پروب گیرنده می‌رسد.

۲- موج پراش یافته از نوک فوقانی عیب^{۱۲}

۳- موج پراش یافته از نوک تحتانی عیب^{۱۳}

۴- موج دیواره پستی^{۱۴}، این موج از سطح تحتانی قطعه بازتابیده می‌شود و دیرتر از سایر امواج ذکر شده به پروب گیرنده می‌رسد.

در شکل ۱ سیگنال‌های دریافت شده مربوط به این امواج نیز نشان داده شده‌اند. به این نوع نمایش سیگنال‌ها، روبش A گفته می‌شود. در این تصویر محور عمودی دامنه سیگنال و محور افقی زمان رسیدن سیگنال را نشان می‌دهد. در سیگنال روبش A نشان داده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود که اکوی موج پراش یافته از نوک فوقانی عیب نسبت به اکوی موج پراش یافته از نوک تحتانی عیب در فاز مخالف است [۱۲]. علاوه بر این موج زیرپوستی نیز با موج دیواره پستی در فاز مخالف هستند.

در شکل ۲ قطعه‌ای به ضخامت H نشان داده شده است که ترکی به عمق d و طول قائم 2a در راستای ضخامت آن ایجاد شده است. فاصله شاخص دو پروب فرستنده و گیرنده 2S می‌باشد. اگر T_L زمان رسیدن موج زیر پوستی، T_{BW} زمان رسیدن موج دیواره پستی و T_1 و T_2 به ترتیب زمان رسیدن امواج پراش یافته از نوک‌های فوقانی و تحتانی ترک باشند در این صورت می‌توان با توجه به شکل ۲ این زمان‌ها را بر حسب ابعاد و سرعت موج فراصوتی C، مطابق معادلات زیر بیان کرد [۱۲].

$$T_L = \frac{2S}{C} \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{2\sqrt{S^2 + d^2}}{C} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{2\sqrt{S^2 + (d+2a)^2}}{C} \quad (3)$$

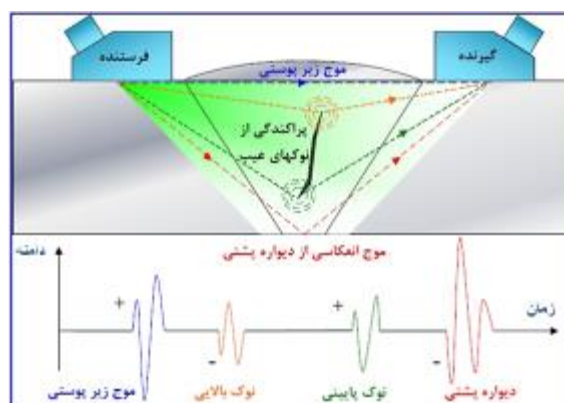
¹¹ Lateral wave

¹² Upper tip diffracted wave

¹³ Lower tip diffracted wave

¹⁴ Backwall echo

نگاه داشته می‌شود. نحوه قرار گرفتن پروب‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

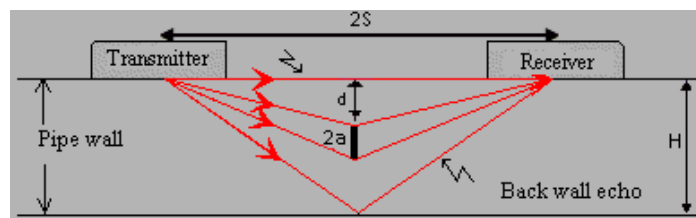


شکل ۱- شماتیک تکنیک ToFD [۱۱]

در این روش معمولاً از پروب‌های زاویه‌ای موج طولی استفاده می‌شود. زمانی که موج فراصوتی با زاویه به یک سطح یا عیب برخورد می‌کند، قسمتی از انرژی به حالت دیگری از موج تبدیل می‌شود. از آنجایی که سرعت موج عرضی تقریباً نصف سرعت موج طولی است، هنگام استفاده از پروب موج طولی اولین سیگنال‌های پراش یافته از نوع موج طولی هستند و بنابراین زودتر از سیگنال‌های ناشی از تغییر حالت موج به پروب گیرنده می‌رسند [۱۲]. زمانی که موج فراصوتی به عیب برخورد می‌کند، مطابق شکل ۱ لبه‌های عیب به عنوان منبع نقطه‌ای باعث انتشار مجدد موج فراصوتی در دامنه وسیعی از زوایا می‌شوند. این سیگنال‌های ضعیف، امواج پراش یافته نامیده می‌شوند و ایجاد آن‌ها هیچ ارتباطی به جهت قرارگیری عیب و یا نوع عیب ندارد. این سیگنال‌های پراش یافته به پروب گیرنده می‌رسند و با محاسبه زمان رسیدن این سیگنال‌ها به گیرنده، می‌توان به محل قرارگیری عیب پی برد [۱۲]. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در روش ToFD صرف نظر از امواج تغییر حالت یافته، چهار موج معین وجود دارند. این موج‌ها از لحاظ زمان رسیدن به پروب گیرنده به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۱۲]:

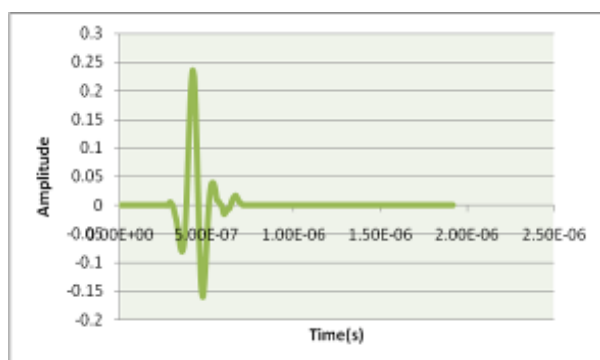
بنابراین با استفاده از روابط بیان شده می‌توان با داشتن زمان رسیدن امواج و سرعت موج فراصوتی، ضخامت قطعه، عمق و طول عیب را محاسبه نمود.

$$T_{BW} = \frac{2\sqrt{S^2 + H^2}}{C} \quad (4)$$



شکل ۲- هندسه کلی آزمون ToFD [۱۳]

تجربی مقایسه کرد. سیگنال تجربی به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- سیگنال مورد استفاده در مدل‌سازی

در این مقاله برای ایجاد موج در قطعه شرایط مرزی از نوع جابجایی بر اساس این پالس بر گره‌هایی که در محل تماس تراگذار و نمونه هستند اعمال شده است.

۳-۲- مدل‌سازی کفشک تراگذار

کفشک تراگذار معمولاً از جنس پلکسی‌گلاس^۴ است، این کفشک باعث می‌شود، پرتو فراصوتی در زاویه مورد نظر در داخل قطعه منتشر شود. مدل‌سازی تکنیک ToFD با کفشک، تعداد گره‌ها و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد، به همین دلیل در این مقاله با ملاحظه فرضیات زیر از

۳- مدل‌سازی تکنیک ToFD با استفاده از روش اجزاء محدود

در تکنیک ToFD از پروب زاویه‌ای برای ارسال و دریافت امواج فراصوتی استفاده می‌شود. این پروب از یک تراگذار^۱ پیزوالکتریک که به یک گوه پلاستیکی چسبانده شده است تشکیل می‌شود، این گوه اصطلاحاً کفشک تراگذار^۲ نامیده می‌شود و معمولاً از جنس پلاستیک انتخاب می‌شود. با استفاده از کفشک تراگذار، برخورد مایل امواج فراصوتی به سطح قطعه کار صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی تکنیک ToFD مستلزم مدل‌سازی تراگذار پیزوالکتریک و کفشک است که در ادامه نحوه مدل‌سازی آنها توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی تراگذار پیزوالکتریک

مکانیزم عملکرد پیزوالکتریک با اعمال پالس تحریک گذرا بر روی سطح قطعه مدل‌سازی می‌شود [۱۴]. پالس تحریک مورد استفاده در این مقاله بر اساس سیگنال دریافت شده از آزمایش تجربی در حالت بازرسی بازتابی^۳، به دست آمده است تا بتوان نتایج شبیه‌سازی را با نتایج

^۱ Transducer

^۲ Probe shoe

^۳ pulse-echo

^۴ Plexiglas

در این بخش نحوه‌ی مدل‌سازی تکنیک ToFD در قطعاتی با عیوب مختلف تشریح، و چگونگی انتشار امواج فراصوتی و تعامل اثر آن با ناپیوستگی‌های مختلفی که در قطعه وجود دارد بررسی خواهد شد. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی‌های صورت گرفته، آزمایش‌هایی نیز انجام شده است. پارامترهای هندسی قطعات ابتدا بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات عملی و سپس بر اساس مدل‌سازی اجزاء محدود محاسبه و درصد خطای دو روش نسبت به مقادیر واقعی محاسبه خواهد شد. در پایان تکنیک ToFD در قطعه‌ای با عیب داخلی مایل مدل-سازی می‌شود و به این ترتیب توانایی تکنیک ToFD در تعیین و اندازه‌گیری عیوب داخلی نیز بررسی خواهد شد.

۴-۱- آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی از دو بلوک استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. ضخامت هر دو بلوک $38/012$ mm است. بلوک اول، شکل ۴(الف)، قطعه‌ای است سالم و بدون عیب و بلوک دوم، شکل ۴(ب)، قطعه‌ای است که شیاری به عمق $18/971$ mm و عرض $0/3$ mm در سطح فوقانی آن قرار گرفته است. این دو قطعه از جنس CK 45 هستند با مدول الاستیسیته 205 GPa، ضریب پواسون $0/3$ و چگالی 7708 kg/m³. پروب فراصوتی که برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است، ساخت شرکت پانامتریکس^۴ و مدل $V 537$ است. فرکانس این پروب 10 MHz و قطر آن $0/25$ in است. کفشک مورد استفاده نیز ساخت شرکت پانامتریکس و مدل $ABWM - 4107$ است. این کفشک موج طولی را با زاویه 60° وارد قطعه فولادی می‌کند. پروب و کفشک استفاده شده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

مدل‌سازی واقعی کفشک اجتناب و به جای آن از روشی دیگر برای ارسال زاویه‌ای موج استفاده شده است. فرضیات مورد استفاده عبارتند از:

- استهلاک تمامی امواجی که به گیرنده می‌رسند، در کفشک یکسان است و یا به عبارتی نسبت دامنه موج در حالت وجود کفشک و عدم وجود آن برابر است.
- زمان عبور در کفشک برای تمامی امواجی که به گیرنده می‌رسند یکسان است. برای اندازه‌گیری اندازه عیب، اختلاف زمان بین سیگنال عیب و سیگنال مرجع (زیر پوستی یا دیواره پشتی) اندازه‌گیری می‌شود، که در صورت وجود کفشک تغییری نخواهد کرد.
- شرایط تماس بین کفشک و قطعه به گونه‌ای است که تنها شکست ساده‌ای در پرتو ایجاد می‌شود و اثرات دیگر نادیده گرفته می‌شوند.

انتشار پرتو فراصوتی در قطعه با زاویه مورد نظر، با اعمال تأخیر زمانی در سیگنال تحریک در گره‌های مجاور ایجاد می‌شود [۱۴]. به این عمل در اصطلاح جهت‌دهی پرتو فراصوتی^۱ گفته می‌شود. جهت‌دهی پرتو فراصوتی در تکنیک آرایه‌های فازی^۲ بسیار رایج است. آرایه فازی شامل تعدادی تراگذار یکسان است که در مجاورت هم قرار گرفته‌اند. این تراگذارها به نوبت و به صورت جداگانه اما با اما با اختلاف فاز نسبت به هم، تحریک می‌شوند. با تنظیم مناسب این اختلاف فاز می‌توان پرتوهای حاصل از این تراگذارها را در نقطه مطلوب متمرکز ساخت و به تصاویری با قابلیت تفکیک^۳ بالا دست یافت [۱۵].

۴- مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی

تکنیک ToFD

¹ Ultrasonic beam steering

² Phased arrays

³ resolution

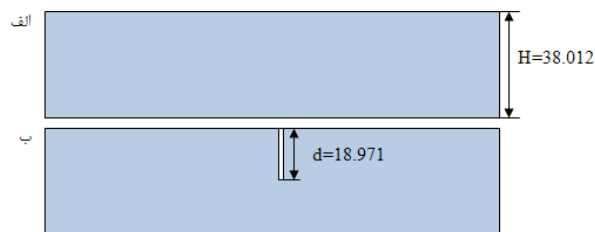
⁴ Panametrics

مدت انجام آزمایش ثابت بماند، از یک بلوک به ضخامت ۱۵ mm استفاده شده که این بلوک در تمام مدت انجام آزمایش در حد فاصل بین دو کفشک قرار داده شده است. این نکته نیز مورد توجه قرار گرفته است که در هنگام انجام آزمایش، ترک دقیقاً در وسط حد فاصل دو کفشک قرار گیرد.

آنچه که از انجام آزمون‌های فراصوتی ToFD به دست می‌آید اکوهایی است که مربوط به زمان رسیدن امواج زیر پوستی، پراش‌یافته از نوک فوقانی ترک، پراش‌یافته از نوک تحتانی ترک و دیواره پشتی هستند. این اکوها به صورت روبش A بر روی صفحه رایانه نمایش داده می‌شوند. در این روبش محور عمودی دامنه سیگنال و محور افقی زمان رسیدن سیگنال را نشان می‌دهد. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که زمان‌های به دست آمده مطلق هستند و زمان عبور موج از درون کفشک‌ها باید از آن‌ها کاسته شود، بدین ترتیب می‌توان مدت زمانی را که موج وارد قطعه و از آن خارج می‌شود به دست آورد.

سیگنال‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برای بلوک بدون عیب و بلوک با ترک بر روی سطح فوقانی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، زمانی که قطعه سالم باشد، تنها دو موج زیرپوستی و دیواره پشتی توسط پروب گیرنده دریافت خواهند شد. از شکل ۷ نیز مشخص است که در قطعه با ترک در سطح فوقانی تنها دو موج پراش‌یافته از نوک تحتانی ترک و موج دیواره پشتی توسط پروب گیرنده قابل دریافت خواهند بود، زیرا سطح قطعه در موقعیت ترک باز است و در نتیجه موج زیرپوستی قابلیت انتقال را نخواهد داشت.



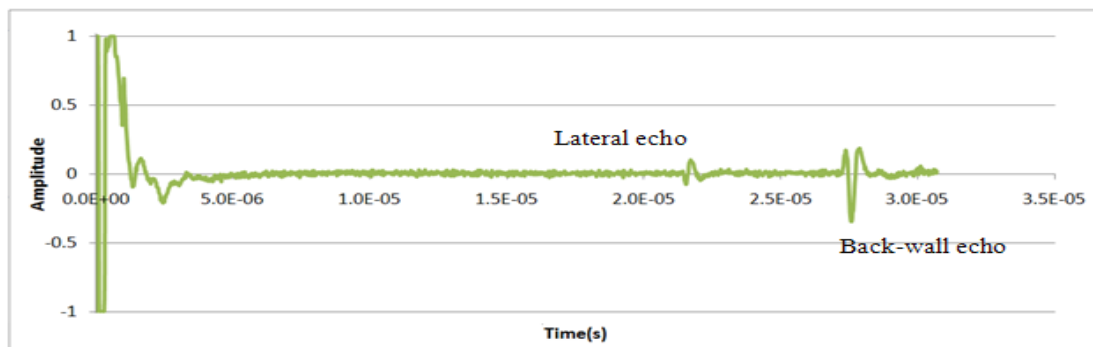
شکل ۴: بلوک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی و آزمایش



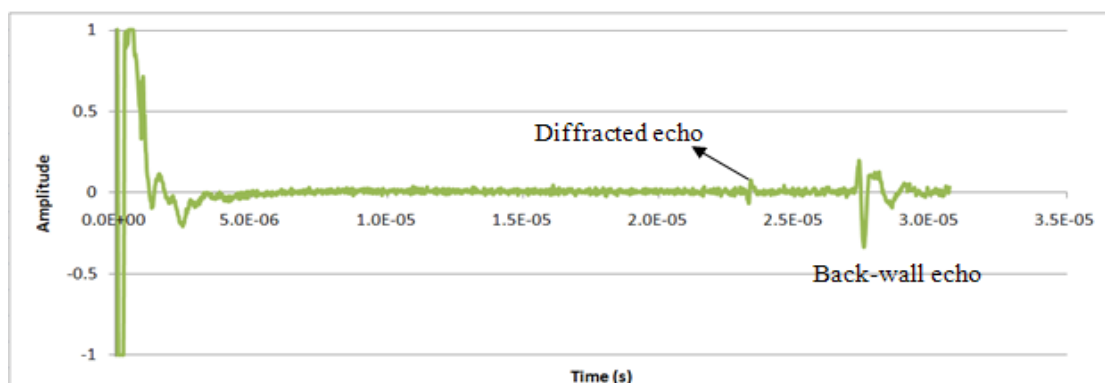
شکل ۵: پروب و کفشک استفاده شده در آزمون

قبل از انجام آزمون‌های فراصوتی، سرعت انتشار موج طولی در قطعات مورد آزمون به دست آمده است، به این صورت که پروب فراصوتی معرفی شده به صورت نرمال بر روی سطح قطعه قرار گرفته و بازتاب‌های موج از سطح پشتی قطعه در حالت بازتابی دریافت شدند. با اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال اول و ضخامت قطعه، سرعت انتشار موج طولی در قطعه مورد آزمون برابر با $5981/43 \text{ m/s}$ به دست آمده است.

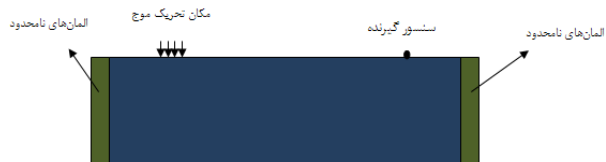
برای انجام آزمون‌های فراصوتی زمان پرواز پراش، پارامتری که لازم است بسیار دقیق اندازه‌گیری شود، فاصله بین شاخص‌های دو کفشک یعنی همان فاصله بین نقاط ورود و خروج موج از قطعه می‌باشد. این فاصله در این آزمایش‌ها ۶۳ mm در نظر گرفته شده است. برای اینکه این فاصله به صورت دقیق تنظیم شود و در تمام



شکل ۶: سیگنال حاصل از آزمایش تجربی در قطعه سالم



شکل ۷: سیگنال دریافتی در قطعه با ترک در سطح فوقانی



شکل ۸: مدل ایجاد شده برای شبیه‌سازی تکنیک ToFD

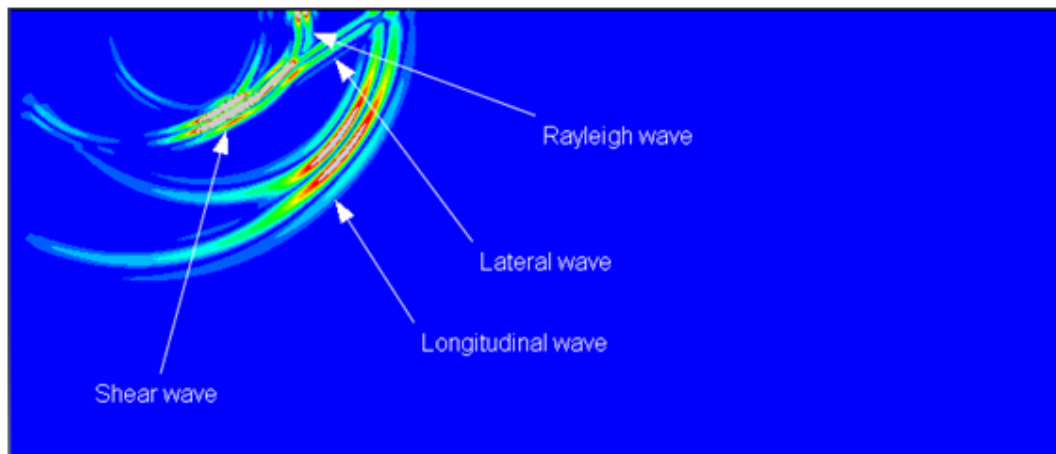
برای مدل‌سازی از المان کرنش صفحه‌ای مربعی یا چهار گره‌ای CPE4R استفاده شده و همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده به منظور جلوگیری از انعکاس موج از دیواره‌های سمت راست و چپ قطعه، این دو قسمت با المان‌های نامحدود کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای CINPE4 المان‌بندی شده‌اند. استفاده از المان‌های نامحدود در دیواره‌های سمت راست و چپ قطعه باعث حذف سیگنال‌های اضافی و تشخیص بهتر و راحت‌تر امواج دریافت شده می‌شود. در هنگام استفاده از المان چهار گره‌ای، تعداد المان‌ها در قطعات حدود ۳۳۳۰۰۰ المان است.

۲-۴- مدل‌سازی آزمایش‌های تجربی با استفاده از روش اجزاء محدود

به منظور شبیه‌سازی تکنیک ToFD مدلی ایجاد شده است که حتی الامکان شبیه به شرایط آزمایش تجربی باشد، این مدل به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. موج به روشی که قبلاً در بخش ۳ توضیح داده شد، در سمت چپ قطعه ایجاد می‌شود. در سمت راست قطعه، در محل تماس قطعه با تراگذار گیرنده، حسگرهایی قرار داده شده است که جابجایی نقاط متناظر را در راستای ضخامت بلوک و عمود بر آن ثبت می‌کنند. سیگنال‌های دریافتی توسط این حسگرها با تأخیر زمانی نسبت به یکدیگر دریافت می‌شوند. سیگنال‌هایی که در ادامه به عنوان سیگنال دریافتی معرفی می‌شوند، میانگین سیگنال‌های دریافت شده توسط حسگرهاست. یکی از این حسگرها در شکل ۸ نشان داده شده است.

زیرپوستی و ریلی ایجاد می‌شوند. این امواج به خوبی در شکل ۹ دیده می‌شوند. مبدأ اندازه‌گیری زمان لحظه‌ای است که تحریک بر روی سطح قطعه صورت می‌گیرد.

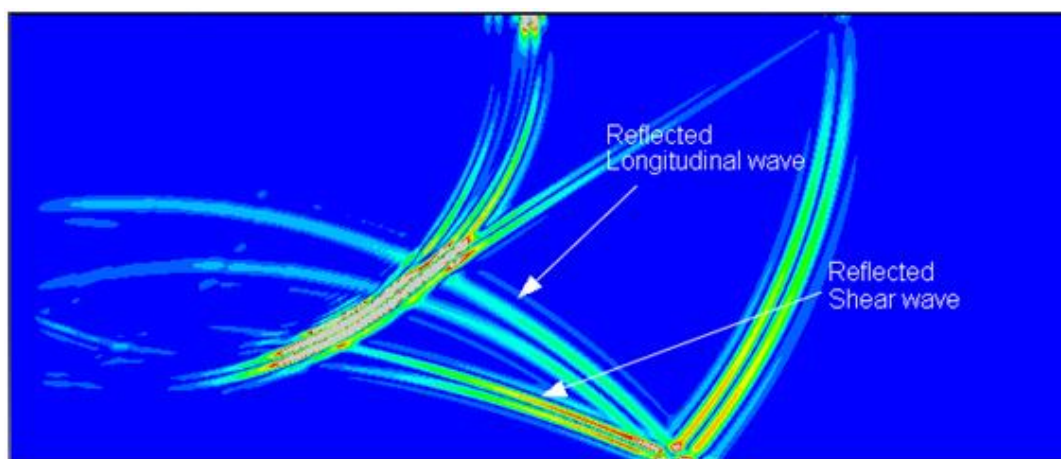
در شکل ۹ تصویر لحظه‌ای از انتشار امواج فراصوتی در قطعه بدون عیب نشان داده شده است. زمانی که سطح قطعه به روشی که توضیح داده شد تحریک می‌شود، در داخل جسم امواج طولی و برشی و در سطح آن امواج



شکل ۹: تصویر لحظه‌ای از انتشار موج فراصوتی در قطعه سالم در لحظه $4 \mu\text{s}$

شده است که موج طولی انعکاس یافته قبل از موج عرضی به پروب گیرنده برسد. در شبیه‌سازی نیز زمان تحلیل باید به گونه‌ای تنظیم شود که این موج بتواند توسط حسگرها دریافت شود. زمان تحلیل برای مدل‌سازی بر روی $18/5 \mu\text{s}$ تنظیم شده است.

با برخورد موج طولی به دیواره پشتی قطعه، انعکاس و تغییر حالت موج اتفاق می‌افتد و بدین ترتیب موج طولی به دو موج طولی و عرضی تبدیل می‌شود، که در شکل ۱۰ در لحظه $10 \mu\text{s}$ نشان داده شده است. فاصله بین دو کفشک در مدل‌سازی‌های انجام شده، به گونه‌ای تنظیم



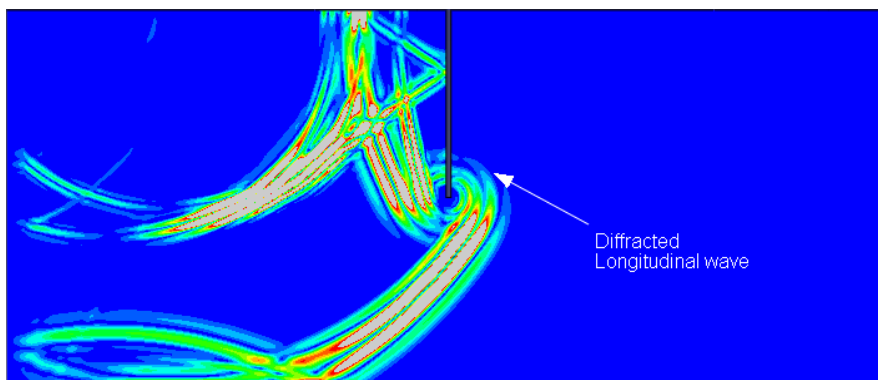
شکل ۱۰: تصویر لحظه‌ای از انتشار موج فراصوتی در لحظه $10 \mu\text{s}$ ، تغییر حالت موج طولی در هنگام برخورد با دیواره پشتی قطعه

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با برخورد موج به ترک، نوک ترک به عنوان منبع جدیدی برای تولید

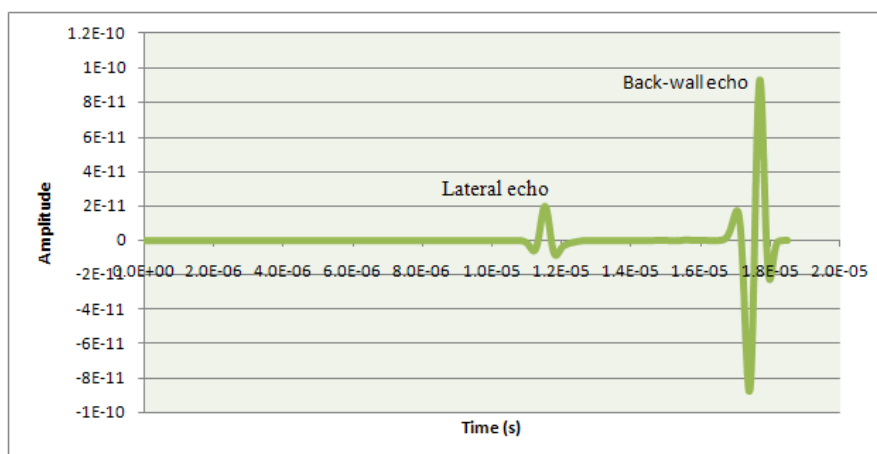
در شکل ۱۱ تصویر لحظه‌ای انتشار امواج در قطعه با ترک در سطح فوقانی در لحظه $7/5 \mu\text{s}$ دیده می‌شود.

دست آمده از مدل سازی، برای بلوک بدون عیب و بلوک با ترک بر روی سطح فوقانی به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده اند.

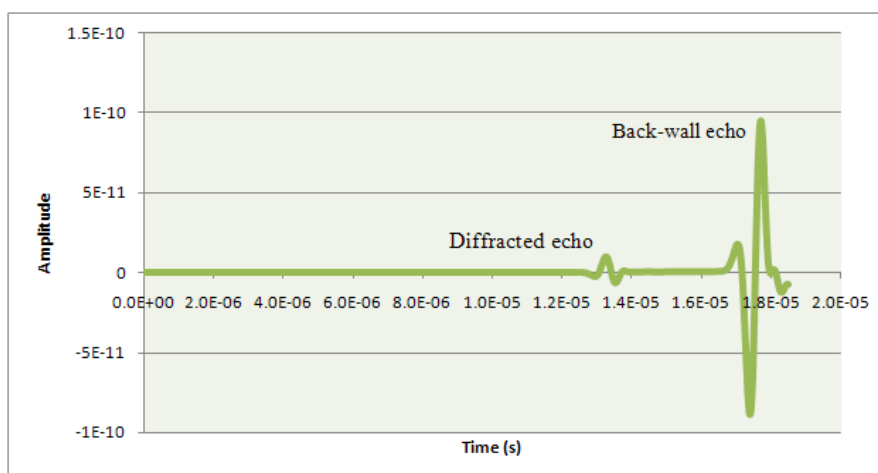
امواج عمل می کند. بدین ترتیب موج به صورت دایره ای از این منبع جدید به اطراف منتشر شده و قبل از رسیدن موج دیواره پشتی، به حسگرها می رسد. سیگنال های به



شکل ۱۱: تصویر لحظه ای از انتشار موج در قطعه با ترک در سطح فوقانی در لحظه $7/5 \mu s$



شکل ۱۲: سیگنال های حاصل از مدل سازی تکنیک ToFD در قطعه سالم



شکل ۱۳: سیگنال های دریافت شده توسط حسگر در قطعه با ترک در سطح فوقانی

۳-۴ - مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی

با توجه به اختلاف زمان رسیدن امواج زیر پوستی و دیواره پشتی در قطعه سالم که از آزمایش تجربی و مدل سازی به دست آمده است و با استفاده از معادله (۵) که از تفاضل معادله (۱) از معادله (۴) حاصل شده است و با دانستن سرعت انتشار موج فراصوتی در قطعه می توان ضخامت قطعه سالم را به دست آورد:

$$T_{BW} - T_L = \frac{2(\sqrt{S^2 + H^2} - S)}{C} \quad (5)$$

با توجه به اختلاف زمان رسیدن امواج پراش یافته از نوک تحتانی ترک و دیواره پشتی در قطعه با ترک در سطح فوقانی که از آزمایش تجربی و مدل سازی به دست آمده است و با استفاده از معادله (۶) که از تفاضل معادله (۳) از معادله (۴) حاصل شده است و با دانستن سرعت انتشار موج فراصوتی در قطعه و ضخامت قطعه می توان عمق ترک را در قطعه به دست آورد:

$$T_{BW} - T_2 = \frac{2(\sqrt{S^2 + H^2} - \sqrt{S^2 + d^2})}{C} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن اختلاف زمانی سیگنال های دریافت شده از مدل سازی و آزمایش های تجربی و با استفاده از معادلات (۵) و (۶) می توان ضخامت را در قطعه سالم و عمق عیب را در قطعه ی با ترک در سطح فوقانی محاسبه کرد. در جدول ۳ پارامترهای به دست آمده از نتایج تجربی و مدل سازی با مقادیر واقعی آن ها مقایسه و اختلاف بین مقادیر به دست آمده با مقادیر واقعی و درصد خطای نتایج تجربی و مدل سازی ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل سازی های انجام شده از دقت قابل قبولی برخوردار می باشند.

سیگنال های حاصل از مدل سازی و آزمایش تجربی برای قطعه سالم به ترتیب در شکل های ۶ و ۱۲ نشان داده شده اند. مقادیر عددی نتایج به دست آمده از آزمایش و مدل سازی در جدول ۱ با هم مقایسه شده اند.

جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش های تجربی و مدل سازی برای قطعه سالم

نتایج به دست آمده	زمان رسیدن موج زیر پوستی (T_L) (μs)	زمان رسیدن موج دیواره پشتی (T_{BW}) (μs)	اختلاف زمان رسیدن امواج ($T_{BW} - T_L$) (μs)
تجربی	۱۰/۶۴	۱۶/۵۲	۵/۸۸
مدل سازی	۱۱/۵۳	۱۷/۴۰	۵/۸۷

سیگنال های حاصل از مدل سازی و آزمایش تجربی برای قطعه با ترک در سطح فوقانی به ترتیب در شکل های ۷ و ۱۳ نشان داده شده اند. مقادیر عددی نتایج به دست آمده از آزمایش و مدل سازی برای این قطعه در جدول ۲ با هم مقایسه شده اند.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و مدل سازی برای قطعه با ترک در سطح فوقانی

نتایج به دست آمده	زمان رسیدن موج پراش - یافته از ترک (T_2) (μs)	زمان رسیدن موج دیواره پشتی (T_{BW}) (μs)	اختلاف زمان رسیدن امواج ($T_{BW} - T_2$) (μs)
تجربی	۱۲/۳۲	۱۶/۴۸	۴/۱۶
مدل سازی	۱۳/۲۷	۱۷/۴۰	۴/۱۳

نکته ای که لازم است دوباره به آن اشاره شود این است که زمان های به دست آمده از آزمایش های تجربی که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده اند مطلق هستند و زمان عبور موج از درون کفشک ها باید از آن ها کاسته شود، که این کار در جداول ۱ و ۲ انجام شده است.

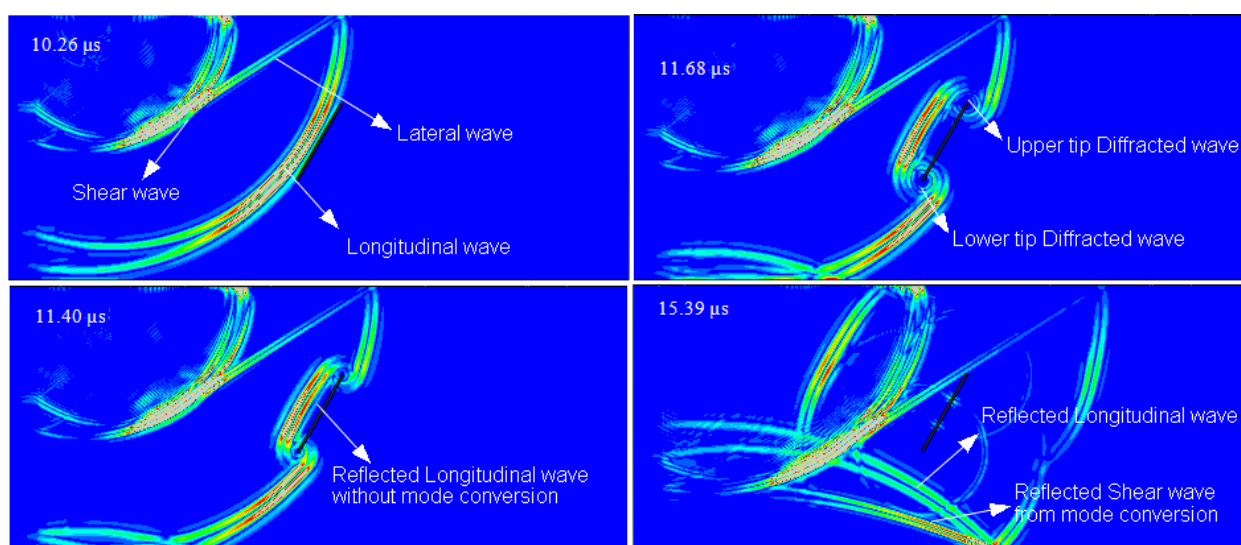
جدول ۳: مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی با مقادیر واقعی

مدل‌سازی			تجربی			مقدار واقعی (mm)	پارامتر مورد نظر
درصد خطا (به درصد)	اختلاف با مقدار واقعی (mm)	نتیجه (mm)	درصد خطا (به درصد)	اختلاف با مقدار واقعی (mm)	نتیجه (mm)		
۱/۰۷	۰/۴۰۷	۳۷/۶۰۵	۰/۹۷	۰/۳۶۸	۳۷/۶۴۴	۳۸/۰۱۲	ضخامت قطعه سالم (mm)
۲/۶۱	۰/۴۶۹	۱۹/۴۴۰	۱/۵۷	۰/۲۹۸	۱۹/۲۶۹	۱۸/۹۷۱	ارتفاع عیب در قطعه با ترک در سطح فوقانی (mm)

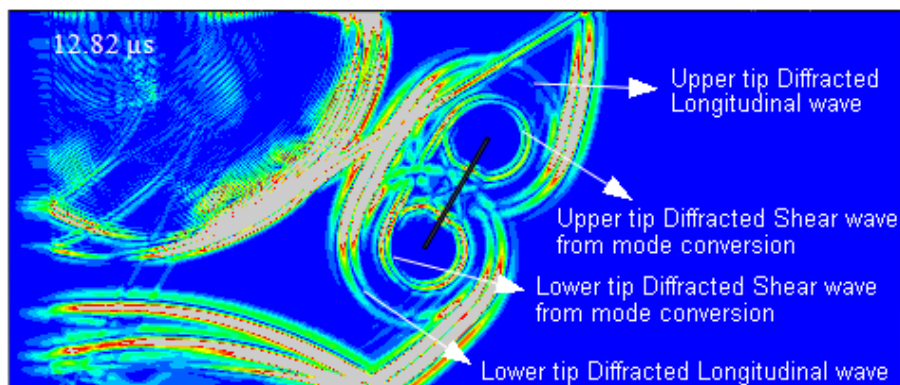
قطعه در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، به دلیل یکسان بودن زوایای انتشار موج طولی و عیب مایل، تمامی موج طولی که به دیواره ترک برخورد می‌کند، بازتابیده می‌شود و قسمت‌های دیگر موج طولی به طور همزمان از دو انتهای ترک با تغییر حالت پراشیده می‌شوند. برای مشاهده بهتر پدیده پراش و تغییر حالت موج در اثر برخورد با نوک ترک، تصویر لحظه‌ای انتشار امواج فراصوتی در لحظه $12/82 \mu s$ در شکل ۱۵ بزرگنمایی شده است.

۴-۴- مدل‌سازی تکنیک ToFD در قطعه‌ای با عیب داخلی مایل

پس از تعیین دقت و صحت مدل‌سازی‌های انجام شده، در این قسمت به مدل‌سازی تکنیک ToFD در قطعه‌ای با عیب مایل به عمق 20 mm و طول مایل 20 mm و زاویه 60° نسبت به افق در قطعه‌ای به جنس CK 45 پرداخته شده است. تعداد المان استفاده شده در این مدل‌سازی 774686 است و زمان تحلیل $28/5 \mu s$ در نظر گرفته شده است. تصاویر لحظه‌ای انتشار امواج فراصوتی در این



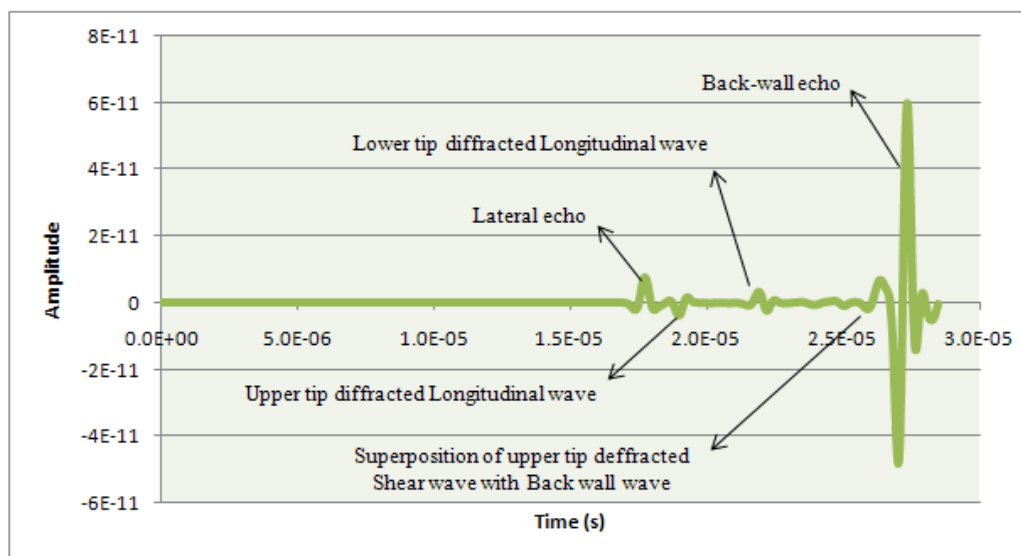
شکل ۱۴: تصاویر لحظه‌ای از انتشار امواج فراصوتی در قطعه با عیب داخلی مایل در زمان‌های مختلف



شکل ۱۵: تصویر حاصل از بزرگنمایی انتشار امواج فراصوتی به منظور آشکارتر شدن پدیده پراش در قطعه با عیب مایل

ضخامت قطعه و عمق و طول مایل عیب را اندازه‌گیری کرد. نتایج حاصل در جدول ۴ با مقادیر واقعی این پارامترها مقایسه شده است و درصد خطای حاصل از مدل سازی به دست آمده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل سازی تکنیک ToFD در تعیین عمق و طول ناپیوستگی مایل نیز از دقت قابل قبولی برخوردار است.

سیگنال‌های دریافت شده در این مدل سازی در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، موج برشی که از تغییر حالت موج فراصوتی در هنگام برخورد با نوک فوقانی ترک ایجاد می‌شود همزمان با موج دیواره پشتی توسط حسگر دریافت می‌شود. با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل سازی می‌توان



شکل ۱۶: سیگنال‌های دریافت شده توسط سنسور در مدل سازی تکنیک ToFD در قطعه‌ای با عیب مایل

جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی تکنیک ToFD با مقادیر واقعی در قطعه‌ای با عیب مایل

پارامتر هندسی مورد نظر	مقدار واقعی پارامتر (mm)	مقدار به دست آمده از مدل سازی (mm)	درصد خطا (به درصد)
ضخامت قطعه	۶۰	۵۹/۵۸۴	۰/۶۹
عمق عیب	۲۰	۱۹/۳۶۴	۳/۱۸
طول مایل عیب	۲۰	۲۰/۹۴۲	-۴/۷۱

۵- نتیجه‌گیری

آمده ملاحظه می‌شود که مدل‌سازی اجزاء محدود تکنیک ToFD و به طور کلی شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوتی، درک بهتری از نحوه‌ی انتشار امواج فراصوتی و تعامل امواج با ناپیوستگی‌های مختلف به دست می‌دهد. به همین دلیل، برای به دست آوردن دید فیزیکی از مسئله انتشار امواج فراصوتی و بررسی پارامترهای مختلف، شبیه‌سازی اجزاء محدود بسیار مناسب و در مقایسه با آزمایشات عملی بسیار کم هزینه خواهد بود. انجام مدل‌سازی در بهینه‌سازی پارامترهای تجربی نیز بسیار مفید بوده و تفسیر نتایج به دست آمده از آزمایش را، به خصوص در مقاطع با ضخامت کم و با هندسه پیچیده، بهبود می‌بخشد.

در این مقاله، روش بازرسی فراصوتی زمان پرواز پراش (ToFD) با استفاده از تکنیک اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است. برای کاهش حجم و هزینه محاسبات از روش صریح برای حل مسئله‌ی انتشار امواج فراصوتی استفاده شده است. به منظور بررسی دقت مدل‌سازی تکنیک ToFD با روش اجزاء محدود، آزمایش‌های تجربی انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها نیز با نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه شده‌اند. در پایان برای بررسی دقت مدل‌سازی انجام شده در بازرسی قطعاتی با عیوب داخلی، مدل‌سازی قطعه‌ای با عیب داخلی مایل انجام شد. مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی مؤید دقت قابل قبول مدل‌سازی‌های انجام شده است. با توجه به بررسی‌ها و نتایج به دست

۶- مراجع

- [1] G. Baskaran, K. Balasubramaniam and C. Lakshmana Rao, "Shear Wave Time of Flight Diffraction (S-ToFD) Technique", NDT&E International Vol. 39, 2006.
- [2] K. S. Venkataraman and Alex Mclay, "The Performance of the Time of Flight Diffraction (ToFD) Technique in Various International Round Robin Trails and the Continuing Research Work Underway", Proceeding of the 14th World Conference on Non Destructive Testing, New Delhi, India, December 8-13, 1996, A. A. Balkeman, Rotterdam, 1997.
- [3] A. Hecht, "Time of Flight Diffraction Technique (ToFD)- An ultrasonic testing method for all applications", www.ndt.net, Vol. 2, No. 9, September 1997.
- [4] L. J. Bond, "Methods for the computer modelling of ultrasonic waves in solids", Research techniques in NDT, Vol. 6, pp. 107-150, 1982.
- [5] R. Ludwig, W. Lord, "Finite-element study of ultrasonic wave propagation and scattering in a aluminum block", Materials Evaluation, Vol. 46, pp. 156-161, 1988.
- [6] H. Yim, Y. Choi, "Simulation of ultrasonic waves in various types of elastic media using the mass spring lattice Model", Materials Evaluation, Vol. 58, pp. 889-896, 2000.
- [7] H. Yim, Y. Sohn, "Numerical simulation and visualization of elastic waves using mass-spring lattice model IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, pp. 549-558, 2000.
- [8] S. Lin, H. Fuutomi and T. Ogata, "Analysis of wave propagation for the ToFD method by finite element method: optimization of test configuration and proposal of a new ToFD method," Nondestructive Evaluation, Vol. 25, 2006.
- [9] G. Baskaran, C. Lakshmana Rao and K. Balasubramaniam, "Simulation of the ToFD Technique Using the Finite Element Method", Insight, Vol. 49, No. 11, November 2007.

[10] Getting started with Abaqus, Interactive edition, version 6.7, Dassault Systems 2007.

[۱۱] هنرور ف.، یاقوتیان ا.، ”پردازش تصاویر روبش B حاصل از آزمون TOFD با استفاده از روش دیکانولوشن وینر و تکنیک برونیایی طیفی اتورگرسیو“، اولین کنفرانس بین المللی بازرسی فنی و آزمون غیر مخرب، تهران، ۱ و ۲ آبان ۱۳۸۶.

[12] J. P. Charlesworth and J. A. G. Temple, “Engineering Application of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction”, Second Edition, Research Studies Press Ltd., 2001.

[13] A. Hecht, “Time of Flight Diffraction Technique (ToFD) - An Ultrasonic Testing Method for all Applications?”, NDT.net, Vol. 2, No. 9, September 1997.

[14] F. Honarvar and S. Khorasani, “Simulation of Time-of-Flight Diffraction (ToFD) Technique by Finite Element Method,” Simulation in NDT, Online Workshop in www.ndt.net, September 2010.

[15] J. Blitz and G. Simpson, “Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing”, Chapman & hall, 1996.