دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایان‌نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مدلسازی سیگنال فراصوتی دریافتی از ترانسدیوسرهای مستطیلی زاویه‌ای

نگارش

مهدی دمبند خامنه

استاد راهنما

دکتر فرهنگ هنرور

تابستان ۱۳۸۹

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخت تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند. دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند. حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

تأسیس۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

تائیدیه هیأت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت درجلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: **"مدلسازی سیگنال فراصوتی دریافتی از ترانسدیوسرهای مستطیلی زاویه‌ای"** توسط آقای **مهدی دمبند خامنه** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید با رتبه ..... مورد تائید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما	آقای دکتر فرهنگ هنرور	امضاء.....
۲- ممتحن داخلی	آقای دکتر جمال زمانی	امضاء.....
۳- ممتحن داخلی	آقای دکتر مهرداد کازرونی	امضاء.....
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده		امضاء.....

اظهارنامه‌ی دانشجو

موضوع پایان نامه :
مدلسازی سیگنال فراصوتی دریافتی از ترانسدیوسرهای مستطیلی زاویه‌ای
استاد راهنما: آقای دکتر فرهنگ هنرور
نام دانشجو: آقای مهدی دمبند خامنه
شماره دانشجوئی: ۸۶۰۴۵۹۴

اینجانب مهدی دمبند خامنه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است . بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

فرم حق چاپ، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

زکردار هر کس که دارم سپاس　　بگویم به یزدان نیکی شناس

(فردوسی)

با حک کردن این نوشته در ابتدای پایان‌نامه، سپاس خود را از جناب آقای دکتر فرهنگ هنرور، به دلیل راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ ایشان که باعث به ثمر نشستن پایان‌نامه شد، و نیز آقایان مهندس یاقوتیان، مهندس ضیغمی و مهندس مهدیزاد به دلیل همراهی در انجام مدلسازی و آزمایشات، ابراز می‌دارم.

چکیده

بازرسی فراصوتی یکی از موثرترین روش‌های آزمون غیرمخرب جهت شناسایی عیوب قطعات به شمار می‌آید. برای کسب نتایج صحیح از آزمون فراصوتی، سیستم اندازه‌گیری فراصوتی باید در ابتدا کالیبره شود. بدین منظور می‌توان از بازتابنده‌های مبنا مانند سوراخ‌های جانبی (side-drilled holes) برای کالیبراسیون و ارزیابی کارایی سیستم فراصوتی استفاده کرد. با در دست داشتن یک مدل تئوری پیش‌بینی سیگنال‌های دریافتی از یک بازتابنده مبنا، می‌توان عملکرد سیستم فراصوتی را از قبل پیش‌بینی نمود. در این پایان‌نامه سیگنال فراصوتی دریافتی از یک سوراخ جانبی توسط یک ترانسدیوسر زاویه‌ای مستطیلی مدلسازی شده است. برای مدلسازی سیستم بازرسی فراصوتی، ابتدا بایستی برای هر یک از سه بخش اصلی سیستم مدلی مناسب ارائه شود. این سه بخش عبارتند از: ۱) میدان امواج فراصوتی در اطراف سوراخ جانبی، ۲) تابع سیستم که شامل تمامی اجزاء الکتریکی و الکترومکانیکی سیستم است، و ۳) میدان پراکندگی حاصل از عیب که در اثر برخورد امواج فراصوتی ارسالی با سوراخ جانبی بوجود می‌آید. برای مدلسازی میدان امواج فراصوتی از روش مدل پرتو چند-گوسی که به کمک آن می‌توان میدان امواج ارسالی از ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای را پس از عبور از سطح مشترک‌های انحنادار در اطراف سوراخ محاسبه نمود، استفاده شده است. جهت مدلسازی تابع سیستم از سیگنال دریافتی از سطح استوانه‌ای بلوک کالیبراسیون V1 استفاده شده و با استفاده از دکانولوشن سیگنال دریافتی و اعمال فیلتر وینر تابع تبدیل اجزایی همچون کابل، ترانسدیوسر، پالس‌ساز و گیرنده بدست آمده است. برای مدلسازی میدان پراکندگی امواج از عیب نیز از دو روش جداسازی متغیرها (separation of variables) و تقریب کرشهف (Kirchhoff approximation) استفاده شده است. در تقریب کرشهف از فرضیاتی برای ساده‌سازی مسئله پراکندگی استفاده می‌شود، حال آنکه در روش جداسازی متغیرها، پاسخ مسئله پراکندگی به صورت دقیق بدست می‌آید. با استفاده از این سه مدل و روابط ریاضی موجود برای انتشار، عبور و بازتاب امواج فراصوتی، مدلی جامع برای پیش‌بینی سیگنال دریافتی ترانسدیوسرهای مستطیلی در سیستم اندازه‌گیری زاویه‌ای بدست آمده است. صحت مدل ارائه شده با انجام آزمایش مورد تایید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ارزیابی فراصوتی، ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای، مدلسازی میدان امواج، پراکندگی، مدل پرتو چند-گوسی.

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف مسئله ۳

۱-۳- محتوای پایان‌نامه ۵

۲- پیشینه تحقیق ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- بررسی پژوهش‌ها و مقالات ۷

۲-۲-۱- مدل‌های محاسبه میدان امواج ۷

۲-۲-۲- مدل‌های تعیین پراکندگی از عیب ۱۳

۲-۲-۳- مدل‌های جامع فراصوتی ۱۵

۳- مدلسازی میدان امواج فراصوتی ۱۷

۳-۱- مقدمه ۱۸

۳-۲- انتشار پرتوهای گوسی و تقریب محوری ۱۸

۳-۲-۱- معادلات امواج شبه‌صفحه‌ای در یک مایع ۱۸

۳-۲-۲- تکنیک استفاده از پرتو گوسی برای حل معادلات تقریب محوری ۲۰

۳-۲-۳- معادلات امواج شبه‌صفحه‌ای در یک جامد الاستیک و همسانگرد ۲۳

۳-۳- عبور و بازتاب یک پرتو گوسی از یک سطح مشترک انحنادار ۲۵

۳-۴- تعیین رفتار پرتوهای گوسی در برخورد با سطوح مشترک متوالی با استفاده از ماتریس‌های A,B,C,D ۳۱

۳-۵- مدل پرتو چند-گوسی ۳۵

۳-۶- جمع‌بندی ۳۶

۴- مدلسازی پراکندگی امواج از عیب ۳۷

۴-۱- مقدمه ۳۸

۴-۲- پاسخ عیب در یک سیستم اندازه‌گیری فراصوتی ۳۹

۴-۳- تقریب کرشهف برای عیوب عاری از تنش در یک ماده همسانگرد ۴۱

۴-۴- روش جداسازی متغیرها ۴۴

۴-۵- محدوده اطمینان تقریب کرشهف ۴۶

۴-۶- جمع‌بندی ۵۱

۵- مدلسازی اجزای الکتریکی و الکترومکانیکی سیستم فراصوتی ۵۲

۵-۱- مقدمه ۵۳

۵-۲- مدلسازی ترکیبی اجزای الکتریکی و الکترومکانیکی ۵۴

۵-۳- روش بازتابنده مبنا ۶۱

۵-۴- فاکتور کارایی سیستم ۶۲

۵-۵- جمع بندی ۶۳

۶- مدلسازی و تحلیل نتایج ۶۴

۶-۱- مقدمه ۶۵

۶-۲- مدلسازی انتشار موج در یک محیط ۶۶

۶-۳- مدلسازی میدان موج ترانسدیوسر مستطیلی در برخورد زاویه‌ای به سطح مشترک انحنادار ۶۸

۶-۴- مدلسازی سیگنال دریافتی از ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای ۷۱

۶-۴-۱- مدلسازی میدان امواج ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای ۷۱

۶-۴-۲- بدست آوردن تابع سیستم در سیستم اندازه‌گیری زاویه‌ای ۷۳

۶-۴-۳- تعیین پاسخ پراکندگی با استفاده از روش جداسازی متغیرها و تقریب کرشهف ۷۸

۶-۴-۴- مدل جامع فراصوتی برای ترانسدیوسرهای مستطیلی زاویه‌ای ۸۱

۶-۵- تایید صحت مدل اندازه‌گیری ۸۲

۶-۵-۱- دستیابی به مدل نرمال با شرط صفر بودن زاویه ارسال امواج ۸۲

۶-۵-۲- تغییر متناسب پروفیل میدان موج با افزایش تدریجی زاویه اسال ۸۳

۶-۵-۳- مقایسه سیگنال مدلسازی شده با سیگنال آزمایش ۸۳

۶-۵-۳-۱- تجهیزات فراصوتی برای دریافت سیگنال حاصل از آزمایش ۸۵

۶-۵-۳-۲- تحلیل نتایج ۸۷

۶-۶- جمع‌بندی ۹۰

۷- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۹۱

۷-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۲

۷-۲- ارائه پیشنهادات ۹۲

مراجع ۹۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: مقطع عرضی یک پرتو گوسی ۲۰
شکل ۳-۲: شماتیک برخورد یک پرتو گوسی به یک سطح مشترک انحنادار ۲۶
شکل ۳-۳: راستای پلاریزاسیون امواج برخوردی، بازتابی و عبوری ۲۸
شکل ۳-۴: بازتاب و یا عبور پرتو گوسی از چند سطح مشترک متوالی ۳۱
شکل ۴-۱: سیستم اندازه‌گیری فراصوتی؛ (الف) حالت اول و (ب) حالت دوم ۴۰
شکل ۴-۲: شماتیک پراکنده‌سازهای مبنا (الف) ترک دایروی (ب)حفره کروی (ج) سوراخ جانبی ۴۴
شکل ۴-۳: اختلاف دامنه پیک-تا-پیک تقریب کرشهف و روش جداسازی متغیرها برای برخورد (الف) موج طولی و (ب) موج عرضی به حفره کروی ۴۷
شکل ۴-۴: اختلاف دامنه پیک-تا-پیک تقریب کرشهف و روش جداسازی متغیرها برای برخورد (الف) موج طولی و (ب) موج عرضی به سوراخ جانبی ۴۸
شکل ۴-۵: اختلاف دامنه پیک-تا-پیک تقریب کرشهف و روش برش بهینه برای برخورد نرمال موج طولی به ترک دایروی ۴۹
شکل ۴-۶: حداکثر زاویه برخورد به شرطی که اختلاف تقریب کرشهف با رو ش برش بهینه بیشتر از 1dB نباشد ۵۰
شکل ۵-۱: شماتیک سیستم اندازه‌گیری ارسال-دریافت به روش غوطه‌وری ۵۳
شکل ۵-۲: (الف) سیگنال حوزه زمان و (ب) طیف فرکانسی مربوطه ۵۴
شکل ۵-۳: پالس‌ساز و مدار الکتریکی معادل آن ۵۴
شکل ۵-۴: شماتیک کابل به صورت یک سیستم دو-سر ۵۵
شکل ۵-۵: حالت (الف) مدار باز و (ب) اتصال کوتاه کابل به عنوان یک سیستم دو-سر ۵۵
شکل ۵-۶: شماتیک ترانسدیوسر فرستنده و مدل مربوطه ۵۶
شکل ۵-۷: (الف) ترانسدیوسر فرستنده به عنوان یک سیستم دو-سر و (ب) مدل معادل ساده شده ۵۷
شکل ۵-۸: شماتیک قسمت تولید موج و مدل الکتریکی معادل آن ۵۷
شکل ۵-۹: شماتیک ترانسدیوسر گیرنده و مدل الکتریکی معادل آن ۵۸
شکل ۵-۱۰: گیرنده فراصوتی و مدار معادل آن ۵۹
شکل ۵-۱۱: قسمت دریافت کننده موج و مدل الکتریکی معادل ۵۹
شکل ۵-۱۲: شماتیک سیستم اندازه‌گیری فراصوتی و مدار معادل آن ۶۰
شکل ۶-۱: شماتیک میدان موج ترانسدیوسر مستطیلی نرمال با فرکانس مرکزی ۸ MHz ۶۷
شکل ۶-۲: شماتیک برخورد زاویه‌ای موج ارسالی از ترانسدیوسر مستطیلی به یک سطح مشترک انحنادار ۶۸
شکل ۶-۳: شماتیک بازرسی زاویه‌ای سوراخ جانبی با استفاده از ترانسدیوسر مستطیلی به روش تماسی ۷۱
شکل ۶-۴: میدان امواج ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای با فرکانس مرکزی ۸ MHz ۷۳
شکل ۶-۵: سطح استوانه‌ای بلوک کالیبراسیون که به عنوان سطح مبنا در نظر گرفته شده است ۷۳
شکل ۶-۶: سیگنال دریافتی از سطح مبنا ۷۴

شکل ۶-۷: تابع سیستم مورد استفاده در آزمون فراصوتی توسط ترانسدیوسر مستطیلی ۷۸
شکل ۶-۸: مقایسه (الف) روش جداسازی متغیرها با (ب) تقریب کرشهف برای تعیین پاسخ پراکندگی حاصل از ۷۹
شکل ۶-۹: شماتیک (الف) مدل دقیق شامل امواج خزشی و (ب) مدل تقریبی بدون امواج خزشی[۴] ۸۰
شکل ۶-۱۰: مقایسه پاسخ پراکندگی تقریب کرشهف و روش جداسازی متغیرها حاصل از برخورد موج طولی با فرکانس ۸ MHz به سوراخ جانبی با قطرهای (الف) ۰/۵ mm، (ب) ۱ mm، (ج) ۱/۵ mm و (د) ۲ mm ۸۰
شکل ۶-۱۱: سیگنال پیش‌بینی شده توسط مدل جامع فراصوتی (الف) استفاده از تقریب کرشهف برای مدلسازی پراکندگی ۸۱
شکل ۶-۱۲: پروفیل میدان امواج برای زوایای ارسال (a) 1°، (b) 2°، (c) 3°، (d) 4°، (e) 5°، (f) 6°، (g) 7°، (h) 8°، (i) 9°، (j) 10°، (k) 11°، (l) 12°، (m) 13°، (n) 14°، (o) 15°، (p) 16°، (q) 17°، (r) 18°، (s) 19° و (t) 20° برای ترانسدیوسر مستطیلی ۸۴
شکل ۶-۱۳: سیستم اندازه‌گیری فراصوتی برای دریافت سیگنال از سوراخ جانبی بلوک کالیبراسیون ۸۵
شکل ۶-۱۴: سیگنال نشان داده شده در صفحه نمایشگر ۸۶
شکل ۶-۱۵: سیگنال آزمایشی دریافتی از سوراخ جانبی ۸۷
شکل ۶-۱۶: مقایسه سیگنال مدلسازی و سیگنال آزمایش: (الف) حالت اول با ضریب همبستگی ۰/۸۳۹۹ (ب)حالت دوم با ضریب همبستگی ۰/۸۷۸۴ (ج) حالت سوم با ضریب همبستگی ۰/۸۶۷۵ (د) حالت چهارم با ضریب همبستگی ۰/۹۰۳۳ .در این نتایج از تقریب کرشهف برای مدلسازی پراکندگی از عیب استفاده شده است. ۸۸
شکل ۶-۱۷: مقایسه سیگنال مدلسازی و سیگنال آزمایش. (الف) حالت اول با ضریب همبستگی ۰/۸۵۲۶ (ب)حالت دوم با ضریب همبستگی ۰/۸۹۷۴ (ج) حالت سوم با ضریب همبستگی ۰/۸۸۴۰ (د) حالت چهارم با ضریب همبستگی ۰/۹۱۰۵ . در این نتایج از روش جداسازی متغیرها برای مدلسازی پراکندگی از عیب استفاده شده است. ۸۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

آزمون غیرمخرب[1] عملیاتی است که بازرسی مواد، قطعات و یا مجموعه‌ای از قطعات را با استفاده از روش‌هایی که بر کارایی نهایی آنها تأثیر نمی‌گذارد، شامل می‌شود. روش‌های متنوعی برای آزمون غیرمخرب قطعات مختلف صنعتی وجود دارد که آزمون فراصوتی یکی از مهمترین آنهاست. در آزمون فراصوتی امواج با فرکانس بالا وارد قطعه شده و در اثر برخورد با عیوب و ناپیوستگی‌های داخلی و سطوح خارجی، ویژگی‌های آن تغییر می‌کند. با بررسی چگونگی تغییر رفتار موج در برخورد با عیوب و سطوح مختلف، می‌توان قطعه مورد نظر را ارزیابی نمود.

در آزمون فراصوتی از امواج صوتی با فرکانس‌های بالاتر از حد شنوایی انسان استفاده می‌شود. محدوده فرکانسی آزمون فراصوتی اغلب بین ۰/۱ تا ۲۵ مگاهرتز بوده و با افزایش فرکانس صوت، میزان واگرایی پرتوها کاهش می‌یابد. این خاصیت یکی از مهمترین عوامل استفاده از امواج فراصوتی در آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد [۱]. ترانسدیوسرها قسمتی از سیستم اندازه‌گیری فراصوتی هستند که وظیفه ارسال و دریافت امواج را بر عهده دارند. کریستال پیزوالکتریک که درون ترانسدیوسر است، امواج فراصوتی را ایجاد نموده و پس از بازگشت موج از درون قطعه نیز می‌تواند آنرا دریافت نماید. با تحریک یک مولد پالسی و اعمال ولتاژ الکتریکی به دو سر پیزوالکتریک، پیزوالکتریک تغییر شکل یافته و ارتعاش مکانیکی (موج) تولید می‌شود. با انتخاب کریستال پیزوالکتریک مناسب می‌توان امواج فراصوتی با فرکانس‌های دلخواه را تولید نمود. در بازرسی حجمی قطعات، می‌توان هر دو نوع موج طولی و عرضی را مورد استفاده قرار داد. در موج طولی جهت انتشار همراستا با جهت نوسان ذرات و در موج عرضی جهت انتشار عمود بر جهت نوسان ذرات است. موج تولید شده پس از انتشار در داخل قطعه و عبور از سطوح مشترک، توسط ترانسدیوسر گیرنده دریافت می‌شود. خاصیت دیگر پیزوالکتریک این است که ارتعاش مکانیکی را به ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌کند. بر اساس این خاصیت، پس از برخورد موج فراصوتی به پیزوالکتریک، ترانسدیوسر گیرنده ولتاژ الکتریکی تولید نموده و آنرا جهت نمایش به نمایشگر ارسال می‌نماید. با تغییر شکل کریستال پیزوالکتریک، میدان امواج فراصوتی تولید شده تغییر می‌کند. کریستال پیزوالکتریک ترانسدیوسرهای فراصوتی معمولاً به سه شکل دایروی، بیضوی و مستطیلی هستند.

[1] Nondestructive Testing

ترانسدیوسرهای فراصوتی دارای انواع مختلفی هستند که در حالت کلی بر اساس کاربردشان به دو گروه تماسی[1] و غوطه‌وری[2] تقسیم می‌شوند. ترانسدیوسرهای تماسی به‌صورت دستی یا اتوماتیک بر روی قطعه قرار داده شده و فشاری در حد لازم به آن‌ها وارد می‌شود. به منظور خالی کردن هوای محبوس بین ترانسدیوسر و قطعه و امکان انتقال امواج فراصوتی به درون قطعه، از یک ماده واسط[3] که معمولاً روغن یا گریس است، استفاده می‌شود. در آزمون‌هایی که از ترانسدیوسرهای غوطه‌وری استفاده می‌شود، قطعه و ترانسدیوسر در داخل محفظه‌ای از آب قرار می‌گیرند و آب نقش ماده واسط را ایفا می‌کند [۲،۱].

برای انجام آزمون فراصوتی روش‌های مختلفی وجود دارد. روش بازتابی[4] معمول‌ترین این روش‌ها است که در آن از یک ترانسدیوسر برای ارسال و دریافت موج استفاده می‌شود. در روش دیگری که روش عبوری[5] نامیده می‌شود، از دو ترانسدیوسر در دو طرف قطعه، یکی به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده، استفاده می‌شود. موج ارسالی توسط ترانسدیوسر فرستنده از قطعه عبور کرده و در سمت دیگر توسط ترانسدیوسر گیرنده دریافت می‌شود. روش ارسال-دریافت[6] یکی دیگر از روش‌های بازرسی فراصوتی است. در این روش از دو ترانسدیوسر زاویه‌ای فرستنده و گیرنده که در یک طرف قطعه قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود[۲،۱].

از نگاهی دیگر، ترانسدیوسرهای فراصوتی را می‌توان به دو گروه ترانسدیوسرهای نرمال (قائم) و زاویه‌ای تقسیم کرد [۲،۱]. در ترانسدیوسرهای نرمال موج به صورت عمود و در ترانسدیوسرهای زاویه‌ای موج تحت زاویه‌ای معین وارد قطعه می‌شود. از ترانسدیوسرهای زاویه‌ای هنگامی استفاده می‌شود که امکان استفاده از ترانسدیوسرهای نرمال نباشد. یکی از کاربردهای ترانسدیوسرهای زاویه‌ای در بازرسی جوش است که به علت برآمده و ناهموار بودن گرده جوش، امکان استفاده از ترانسدیوسر نرمال نمی‌باشد.

۱-۲- تعریف مسئله

ترانسدیوسرهای زاویه‌ای با کریستال پیزوالکتریک مستطیلی، از جمله ترانسدیوسرهایی هستند که در آزمون‌های فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدلسازی میدان امواج ساطع شده از این ترانسدیوسرها،

[1] contact
[2] immersion
[3] couplant
[4] Pulse-echo
[5] Trough-transmission
[6] pitch-catch

می‌تواند کمک شایانی به ارزیابی غیرمخرب قطعات و همچنین بررسی رفتار موج ارسالی نماید. با مدلسازی میدان امواج ترانسدیوسر می‌توان سیگنال دریافتی از عیوب مختلف را پیش‌بینی نمود. یکی از کاربردهای پیش‌بینی سیگنال فراصوتی، کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری است. در آزمون‌های فراصوتی، برای حصول اطمینان از دقیق بودن اندازه‌گیری، باید دستگاه قبل از انجام آزمایش کالیبره شود. برای کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود که استفاده از بازتابنده‌های مبنا[1] مانند سوراخ جانبی[2]، سوراخ کف-تخت[3] و حفره‌های کروی[4] از جمله این روش‌ها به شمار می‌آیند. در این میان سوراخ جانبی به علت سهولت تولید مرسوم‌ترین بازتابنده مبنا محسوب می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری میزان بازتابش موج از سوراخ‌های جانبی ایجاد شده در قطعات مرجع یکی از روش‌های معمول کالیبراسیون دستگاه‌های فراصوتی است. از این رو در دست داشتن یک مدل تئوری برای پیش‌بینی سیگنال فراصوتی حاصل از برخورد امواج فراصوتی طولی ساطع شده از یک ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای تماسی به یک سوراخ جانبی در سیستم اندازه‌گیری بازتابی بسیار مفید و حائز اهمیت است.

برای مدلسازی سیستم بازرسی فراصوتی، بایستی برای هر یک از سه بخش اصلی سیستم، مدلی مناسب انتخاب شود. این سه بخش عبارتند از: ۱) میدان امواج فراصوتی ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای، ۲) تابع سیستم که شامل تمامی اجزای الکتریکی و الکترومکانیکی سیستم است، و ۳) میدان پراکندگی امواج از سوراخ جانبی. در این پایان‌نامه برای مدلسازی میدان امواج از مدل پرتو چند-گوسی استفاده می‌شود. برای مدلسازی تابع سیستم نیز از روش مبنا و سیگنال دریافتی از سطح استوانه‌ای بلوک کالیبراسیون فولادی AWS و به منظور مدلسازی میدان پراکندگی نیز از دو روش تقریب کرشهف و جداسازی متغیرها استفاده می‌شود. با استفاده از مدل‌های ارائه شده برای این سه بخش، مدلی جامع برای پیش‌بینی سیگنال دریافتی از سوراخ جانبی توسط ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای ارائه خواهد شد. در انتها نیز صحت مدل ارائه شده توسط نتایج بدست آمده از آزمایشات مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که برای مدلسازی روابط موجود از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

[1] reference reflectors
[2] Sided-drilled hole
[3] Flat-bottom hole
[4] Spherical voids

۱-۳- محتوای پایان‌نامه

این پایان‌نامه در هفت فصل تنظیم شده است. در فصل اول (فصل حاضر)، توضیحات مختصری در مورد آزمون فراصوتی آمده است و روش تحقیق بیان شده است. در فصل دوم مدل‌های ارائه شده توسط سایر محققین برای مدلسازی میدان امواج فراصوتی و پراکندگی امواج از عیب بررسی شده است. در این فصل، روش‌های مدلسازی میدان امواج به دو دسته کلی پاراکسیال[1] و غیرپاراکسیال[2] تقسیم شده و مدل‌های مربوط به هر بخش به صورت مختصر توضیح داده شده‌اند. همچنین مدل‌های دقیق و تقریبی مدلسازی پراکندگی ارائه شده توسط محققین بررسی شده است. در سه فصل بعدی، مدل‌های مناسب برای هر یک از سه بخش اصلی سیستم توضیح داده شده‌اند. در فصل سوم ابتدا مدل پرتو گوسی برای مدلسازی میدان امواج ترانسدیوسر دایروی توضیح داده شده است. سپس با استفاده از ماتریس‌های A,B,C,D (که انتشار، عبور و بازتاب پرتو گوسی را تعیین می‌کنند) رفتار موج در حین عبور از سطح مشترک‌های متوالی بررسی شده و برای بهبود مدلسازی، مدل پرتو چند-گوسی با استفاده از ترکیب چند تابع گوسی با ضرایب وزنی مناسب ارائه شده است. در فصل چهارم دو روش تقریب کرشهف و روش دقیق جداسازی متغیرها برای تعیین پاسخ پراکندگی امواج از عیب توضیح داده شده است. در فصل پنجم نحوه بدست آوردن تابع سیستم بررسی شده است. در فصل ششم ابتدا میدان امواج ترانسدیوسر مستطیلی زاویه‌ای مدلسازی شده و سپس با استفاده از مدل مناسب پراکندگی و مدل بازتابنده مبنا، سیگنال حاصل از برخورد موج طولی با یک سوراخ جانبی پیش‌بینی شده است. صحت نتایج مدلسازی نیز با روش‌های مناسب مورد تایید قرار گرفته است. در فصل هفتم جمع‌بندی و نیز پیشنهادات مناسب برای کارهای آتی ارائه شده است.

[1] paraxial
[2] non-paraxial

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

مدلسازی یکی از ابزارهای مهم در ارزیابی غیرمخرب عیوب به روش فراصوتی است. مدل‌های ارائه شده در تفسیر داده‌های بدست آمده از آزمون فراصوتی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان روش اندازه‌گیری بسیار مفید هستند. مدل‌های متعددی برای مدلسازی انتشار، بازتاب، عبور و پراکندگی امواج و پیش‌بینی سیگنال‌های دریافتی از عیوب مختلف وجود دارد. در حقیقت، تا کنون برای تمامی المان‌های سهیم در پیش‌بینی سیگنال دریافتی از عیب در یک سیستم اندازه‌گیری فراصوتی مدلی مناسب ارائه شده است [۴،۳]. در یک مدل اندازه‌گیری ، ولتاژ خروجی که بیانگر سیگنال دریافتی است، ترکیبی از ترم انتشار امواج، ترم پراکندگی امواج از عیب و همچنین تاثیرات اجزای الکتریکی و الکترومکانیکی سیستم شامل پالس‌ساز/گیرنده، کابل‌ها و ترانسدیوسرها می‌باشد. تاثیر این اجزای الکتریکی و الکترومکانیکی تحت عنوان تابع سیستم بیان شده از یک آزمایش مبنا بدست می‌آید [۴]. همچنین برای تعیین انتشار امواج از مدل‌های تعیین میدان امواج و برای تعیین پاسخ پراکندگی از روش‌های دقیق و یا تقریبی استفاده می‌شود. مدل‌های مربوط به انتشار امواج، چگونگی انتشار امواج از ترانسدیوسر، شکست، عبور و بازتاب امواج از سطوح مشترک را شامل می‌شود. مدل پراکندگی نیز امواج پراکندگی حاصل از تعامل اثر امواج برخوردی با عیوب مختلف مانند حفره‌ها، ترک‌ها و ناخالصی‌ها را محاسبه و مدلسازی می‌کند.

هدف این پایان‌نامه مدلسازی سیگنال دریافتی از ترانسدیوسرهای مستطیلی در بازرسی زاویه‌ای است. برای این مهم، برای هر یک از قسمت‌هایی که در بازرسی عیوب در یک سیستم اندازه‌گیری فراصوتی سهیم هستند، مدلی مناسب ارائه می‌شود. به طور خاص، مدلسازی میدان امواج فراصوتی و پراکندگی امواج از عیب در دستور کار قرار گرفته است. در این بخش به بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدلسازی میدان امواج و پراکندگی پرداخته شده است.

۲-۲- بررسی پژوهش‌ها و مقالات

۲-۲-۱-مدل‌های محاسبه میدان امواج

تا کنون، روش‌های متنوعی برای مدلسازی انتشار، عبور و بازتاب امواج فراصوتی ارائه شده است. برای فهم بهتر، این روش‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند. دسته اول بر اساس تقریب پاراکسیال[1] بوده حال آنکه دسته دوم بر اساس روش‌های دقیق‌تری هستند که از تقریب پاراکسیال استفاده نمی‌کنند. در تقریب

[1] Paraxial approximation

پاراکسیال فرض می‌شود که امواج در یک راستای ثابت انتشار می‌یابند. در بسیاری از روش‌ها و تکنیک‌های بازرسی فراصوتی، امواج خروجی از ترانسدیوسر را می‌توان به صورت پاراکسیال در نظر گرفت. با این وجود، در برخی از شرایط خاص که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، این تقریب صحت خود را از دست می‌دهد. با وجود اینکه مدل‌های ارائه شده در دسته دوم روش‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های پاراکسیال هستند، ولی از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌باشند. در عین حال این روش‌ها را می‌توان برای تایید صحت روش‌های پاراکسیال نیز بکار برد.

روش‌های پاراکسیال موجود برای محاسبه میدان امواج ترانسدیوسر عبارتند از: روشهای موج شکست مرزی[1] (BDW)، گاوس-هرمایت[2] و مدل پرتو چند-گوسی[3] (MGB). اشمر[4] ، لرچ[5] و سدف[6] [۶،۵] مدل موج شکست مرزی را برای شبیه‌سازی میدان امواج تولید شده در یک جامد الاستیک همسانگرد توسط یک ترانسدیوسر دایروی مسطح غوطه‌ور در آب ارائه دادند. سپس رادولف[7] [۷] آن مدل را برای تعیین رفتار موج در یک ماده غیرهمسانگرد بسط داد. در مدل BDW موج منتشر شده از ترانسدیوسر را به دو بخش تقسیم می‌کنند: (۱) موج صفحه‌ای مستقیم که عمود بر سطح ترانسدیوسر انتشار می‌یابد و (۲) موج لبه‌ای که از تمام نقاط واقع بر محیط ترانسدیوسر منتشر می‌شود. مدل BDW ارائه شده به آسانی می‌توانست ترانسدیوسرهای مسطح را مدلسازی و شکل میدان موج را بدست آورد، ولی قابلیت مدلسازی ترانسدیوسرهای متمرکزکننده را نداشت. با این وجود اشمر و همکارانش با بسط این مدل توانستند میدان امواج حاصل از ترانسدیوسر متمرکز کننده کروی را در یک مایع بدست آورند [۸]. با این وجود همچنان، مدل BDW ارائه شده، قادر به حل مسئله عبور موج حاصل از ترانسدیوسر متمرکزکننده از فصل مشترک خمیده نبود.

بر اساس پژوهش کوک و آرنولت[8] [۹]، تامسون[9] و همکارانش [۱۱،۱۰] مدل پرتو پاراکسیال گوس-هرمایت را برای شبیه‌سازی رفتار پرتو در عبور از سطح مشترک خمیده مایع-جامد (جامد الاستیک) ارائه دادند. در این مدل از ترکیب چند تابع گوس-هرمایت متعامد[10] (ضرب تابع گوسی در چند جمله‌ای‌های

[1] Boundary diffraction wave
[2] Gauss-Hermite
[3] Multi-Gaussian Beam
[4] Schmerr
[5] Lerch
[6] Sedov
[7] Rudolph
[8] Cook and Arnoult
[9] Thompson
[10] Orthogonal Gauss-Hermite function